

Wissenschaftliche Nachrichten



Gewidmet von der
ZENTRALSPARKASSE
FÜR GEMEINDEFÜRSORGE WIEN

Nr. 6 - Oktober 1964

Inhalt:

CHEMIE

DNS, RNS und ihr genetische Code (I)
Ionen und Ionenaustauscher
Öle und Fette als Rohstoffe
Ein neuer Wassergaskatalysator
Chemie und Raketen

PHYSIK

Erzeugung und Nachweis der künstlichen Elemente
Quasisterne

Astronomische Nachrichten
Vergebliche Suche nach magnetischen Einzelpolen
Supraleitung

VORSCHAU AUF DEN INHALT DER NÄCHSTEN FOLGE

Der genetische Code (II)
Endogene Amine im Stoffwechsel des Gehirns und psychotrope Pharmaka
Spin, Isospin und Hyperladung
Die Theorie der superdichten Sterne
Voraussichtlich Fortsetzung der Lehrmittelerie von Professor R. Lederer

CHEMIE

Dr. Edith Jarisch

DNS, RNS und der genetische Code (I)

Einleitung

Die Strukturaufklärung der DNS, die als Träger der Erbinformation erkannt worden war, bedeutet für die Biologie und die Biochemie den Anbruch einer neuen Ära. Der Schleier vor einem der größten Geheimnisse des Lebens wurde gelüftet und in die schlichte Formelsprache des Chemikers gekleidet.

Keine Entelechie und keine weitreichenden Kräfte, denen oft etwas Mystisches anhaftete, bewirken das Werden eines neuen Individuums, sondern Reaktionen zwischen Einzelmolekülen, chemische Nahkräfte, wie Wasserstoffbrücken, kovalente Bindungen und Koordinationsbindungen, die dem Chemiker schon seit langem bekannt und vertraut sind. Sie ermöglichen die Übertragung der genauen Erbinformation auf die Tochterzelle, regeln ihr Wachstum und ihren Stoffwechsel und bedingen so ihren Phänotypus.

Diese chemischen Vorgänge, die die Entstehung eines neuen Individuums verursachen, sind bis jetzt an Viren, Bakteriophagen und Bakterien experimentell geklärt und überprüft worden. Durch zielbewußte Veränderungen der Erbfaktorträgersubstanz, der DNS, sind auch neue Phänotypen, also neue Arten, dieser einfachen Lebewesen

geschaffen worden. Eines aber scheint sicher zu sein: was bei Einzellern praktisch verwirklicht wurde, ist im Prinzip auch auf den Vielzeller anwendbar.

So können nicht nur die Ursachen für eine Genmutation qualitativ und quantitativ bestimmt werden, sondern Genmutationen können durch chemische Reaktionen bewirkt werden. Diese erregende Erkenntnis läßt phantastische Zukunftsbilder entwerfen, und wohl jeder, der sich ernsthaft mit diesen Problemen befaßt, kommt zur Überzeugung, daß diese keine „science fiction“ sind, sondern durchaus im Bereich des Realisierbaren liegen.

Dieser Bericht soll drei Abschnitte umfassen:

1. Die Chemie der Nucleinsäuren:
Die Strukturaufklärung der DNS, RNS und verwandter Substanzen, ihre Bedeutung und Aufgabe in der Zelle
2. Der genetische Code:
Das Problem der Codierung der Erbinformation, die Veränderungen des Codes (Genmutationen)
3. Proteinsynthese:
Die Aufgaben der DNS und RNS bei der, den Phänotypus bestimmenden, arteigenen Proteinsynthese der Zelle

Die Abschnitte 2 und 3 werden in den folgenden Heften erscheinen.

1. Die Chemie der Nucleinsäuren

Nucleinsäuren wurden zuerst aus den Nucleoproteiden der Zellkerne erhalten. Die ersten Arbeiten über diese Stoffgruppe wurden 1934 von Ph. A. Levene (Rockefeller-Inst. N.Y.) verfaßt. Bei den Nucleoproteiden handelt es sich um hochmolekulare Substanzen, die aus Protein und Nucleinsäure bestehen. Diese Nucleinsäuren sind selbst auch wieder hochmolekular und liefern bei hydrolytischer Spaltung immer drei Komponenten: Phosphorsäure, eine Pentose (Ribose oder Desoxyribose) und Basen des Purin- und Pyrimidintyps.

Es konnte festgestellt werden, daß in den Nucleinsäuren immer entweder Ribose oder Desoxyribose, aber niemals beide Pentosen zugleich vorkommen. Schon auf Levene gehen die ersten Vorschläge für die Verknüpfungsart dieser drei Komponenten zurück. Es ist verwunderlich, daß in den folgenden Jahren dem Bau dieser interessanten Verbindungsklasse verhältnismäßig wenig Aufmerksamkeit geschenkt wurde, während die Chemie der Proteine in den Mittelpunkt des allgemeinen Interesses rückte.

Aber gerade im Zusammenhang mit der Erforschung der Proteine wurden viele Enzyme auf ihre Zusammensetzung untersucht, und hier konnten bei einigen, z. B. Cozymase, Coenzym A, die gleichen Bausteine wie in den Nucleinsäuren festgestellt werden (Karrer, Euler, Schlenk 1942; Lipmann, Lynen 1947).

Im Zusammenhang mit der Virusforschung wurde die Frage nach der Struktur der Nucleinsäuren wieder aktuell. Ende der vierziger Jahre galt es bereits als sehr wahrscheinlich, daß die Steuerung sämtlicher chemischer Vorgänge in der Zelle nur durch Nucleinsäuren bewirkt wird. Arbeiten von Hershey und Chase (1952) bewiesen, daß nur allein Nucleinsäure (Desoxyribonucleinsäure = DNS) aus Bakteriophagen die Erbinformation überträgt, d. h. biologisch wirksam ist, die Proteinkomponente des Nucleoproteids der Chromosomen völlig unwirksam ist. Damit war das Problem einer genauen Strukturklärung für die Biochemie zu besonderer Bedeutung gelangt.

Über den Bau der Nucleinsäuren veröffentlichte Todd (1954) die ersten genauen Untersuchungen. Für die Desoxyribose enthaltende DNS wurde die Struktur einer hochmolekularen Kette vorgeschlagen, während für die Ribose enthaltende Art der Nucleinsäuren, die RNS, eine verzweigte Kette in Erwägung gezogen wurde.

Hier restlose Klarheit zu schaffen, ist das Verdienst von F. H. Crick und M. H. F. Wilkins (Medical Research Council, England) und von J. D. Watson (Harvard Univ.), deren Arbeiten durch den Nobelpreis für Medizin 1962 anerkannt wurden.

DNS und RNS erfüllen in der Zelle verschiedene Aufgaben. DNS enthält die Erbinformation, und nur bei einigen Viren und Bakteriophagen kann an ihre Stelle auch die RNS treten. Im allgemeinen besorgt die RNS die Auswertung der Erbinformation und greift so in den Stoffwechsel der Zelle ein. Es konnten drei verschiedene Arten der RNS festgestellt werden: eine hochmolekulare, eine niedermolekulare und die in den Ribosomen enthaltene. Die Bausteine der DNS und RNS sind bis auf die Zuckerkomponente die gleichen, und auch die Verknüpfungsart erfolgt nach den gleichen Prinzipien.

Um die Schwierigkeiten, die bei der Strukturaufklärung dieser Verbindungen zu überwinden waren, und auch die Zusammenhänge der DNS und RNS mit den Enzymen verständlich zu machen, soll zunächst der Bau der Nucleotide und Nucleoside kurz besprochen werden.

Nucleotide

Wird hochpolymere Nucleinsäure alkalisch oder durch Enzyme (Nucleasen) abgebaut, so wird ein niedermolekulares Nucleotid erhalten. Nucleotide sind Phosphorsäureester und können daher wieder hydrolytisch gespalten werden, wobei ein Nucleosid und H_3PO_4 erhalten wird. Nucleoside und H_3PO_4 können auch direkt durch saure Hydrolyse aus Nucleinsäuren erhalten werden. Die Nucleoside sind Glykoside, deren Zuckerkomponente immer aus Ribose oder Desoxyribose besteht. Diese Pentosen sind mit den Purinen Adenin oder Guanin bzw. den Pyrimidinen Cytosin, Thymin oder, falls RNS abgebaut wurde, mit Uracil verknüpft (Tabelle 1).

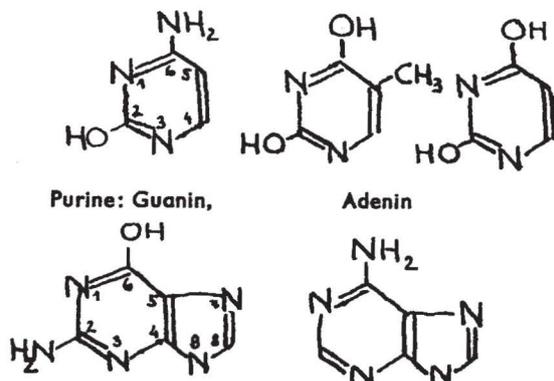
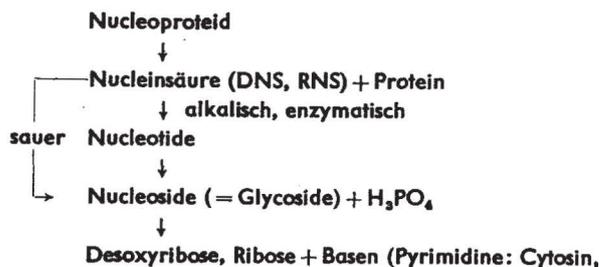
Nucleoside wurden auch als Teile prosthetischer Gruppen von verschiedenen Fermenten erhalten. Auch hier sind sie mit Phosphorsäure verestert, jedoch tritt hier neben H_3PO_4 auch Di- und Triphosphorsäure auf. Ein wichtiges Enzym dieser Gruppe ist z. B. Adenosinmonophosphat (AMP). Die Strukturaufklärung dieses und anderer Enzyme, z. B. Coenzym I, zeigte, daß die Ribose immer an C_1 in β -Konfiguration die Base gebunden hält, während C_5 mit der Phosphorsäure verestert ist. Die Ribose liegt dabei als Furanose vor.

Bei den Mono-, Di- und Trinucleotiden des Adenins handelt es sich um Phosphorylierungsfaktoren, welche besonders im Kohlehydratstoffwechsel eine große Rolle spielen (Cori, Cori 1937—1941). Der Reaktionsverlauf erfolgt nach dem Schema:



Diese Reaktion liefert auch die für die Muskelarbeit nötige Energie (Lipmann).

Tabelle 1: Abbau der Nucleoproteide



Adenosin ist auch in oxydativen Fermenten enthalten:

DPN = Diphosphopyridinnucleotid = Cozymase,
Coenzym I

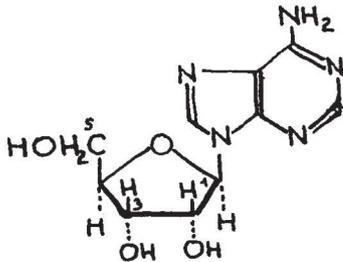
TPN = Triphosphopyridinnucleotid = Coenzym II

Dehydrogenasen enthalten wie das gelbe Enzym der Hefe Adenosin (Lactoflavin-adeninnucleotid). Eine weitere Rolle spielt das Adenosin auch in dem für die Acetylierungsreaktionen wichtigen Coenzym A.

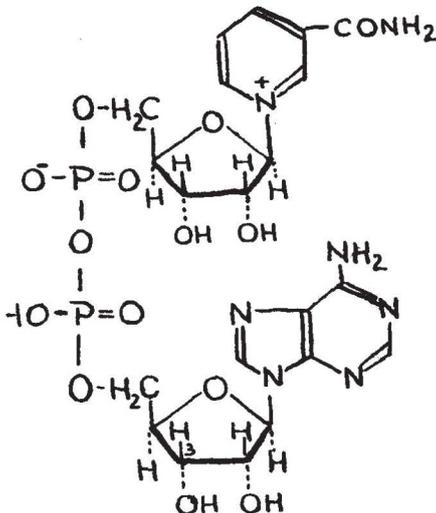
Alle diese Beispiele zeigen, daß dem Adenosin bzw. seinem Nucleotid eine besondere Bedeutung im Stoffwechsel zukommt.

Tabelle 2 gibt eine Übersicht der Adenosinnucleotide.

Tabelle 2: Adenosinnucleotide



1) Adenosin



2) DPN

1. Adenosin (Ribose-Adenin)
2. DPN = Cozymase, Coenzym I (Nicotinsäureamid-Ribose-Diphosphorsäure-Adenosin)
3. TPN = Coenzym II (wie DPN, aber an C₃ des Adenosins mit H₃PO₄ verestert)
4. Lactoflavin-adeninnucleotid (Lactoflavin-Diphosphorsäure-Adenosin)
5. Coenzym A = CoASH (β-Mercaptoäthanolamin-Pantothensäure-Diphosphorsäure-Adenylnsäure)

Wird DNS oder RNS hydrolysiert, erhält man ebenfalls Adenosinnucleotid. Daher ergibt sich die Frage, ob Adenin, Pentose und Phosphorsäure in der gleichen charakteristischen Weise verknüpft sind, wie dies in den Enzymen der Fall ist. Schon Levene versuchte einen Beweis für die Bindungsstelle zwischen Phosphorsäure und Ribose zu erbringen. Er nahm an, daß die Ribose an C₃ und an C₅ mit Phosphorsäure verestert ist. Später jedoch (Todd 1953) stellte sich heraus, daß dieser Beweis wegen Isomerisierungsvorgängen nicht stichhaltig sein konnte.

Levene erhielt aus einem Adenosinnucleotid, der Hefeadenylnsäure, bei saurer Hydrolyse Adenosin und einen optisch aktiven Phosphorsäureester der Ribose. Da dieser bei Hydrierung einen optisch inaktiven Ester des

Ribitols lieferte, war die Annahme gerechtfertigt, daß die H₃PO₄ nur am C₃ gebunden sein konnte (Abb. 1).

Durch Todd wurde aber festgestellt, daß auch 2-Phosphoribose bei Hydrierung den optisch inaktiven Phosphoribit liefert, was nur durch einen Stellungswechsel der H₃PO₄ von C₂ nach C₃ zu erklären ist; diese Isomerisierung ist auch für viele andere cis-Glykole nachgewiesen worden. Daß aber dennoch die Bindung der Phosphorsäure am C₃ erfolgt, konnte von Todd indirekt aus Analogiegründen geschlossen werden. Wird anstatt des Nucleotids der Ribose das der Desoxyribose untersucht, so kommt bei diesem das C₂ als Bindungsstelle für die Phosphorsäure nicht in Frage. So konnte bei dieser Verbindung Todd eindeutig nachweisen, daß Phosphorsäure an C₃ gebunden ist, und es ist daher naheliegend, auch den gleichen Bindungstyp bei der Ribose anzunehmen (Abb. 2).

Eine andere Adenylnsäure, die Muskeladenylnsäure, die bereits 1927 von Embden isoliert worden war, stellte sich als ein Isomeres der Hefeadenylnsäure heraus. Da Muskeladenylnsäure einen für cis-Glykole charakteristischen Borsäurekomplex bildet, ist nicht C₃ mit H₃PO₄ verestert. Hier ist C₅ Träger der H₃PO₄, was ebenfalls von Todd (1947) durch Synthese bewiesen werden konnte (Abb. 3).

Ebenfalls von Todd wurde eindeutig der alte Befund von Levene bestätigt, wonach bei saurer Hydrolyse von DNS auch 3,5-Diphosphonucleoside erhalten werden (Abb. 4).

Aus allen diesen Untersuchungen schloß Todd, daß DNS ein langes Kettenmolekül darstellen müsse, bei dem in wechselnder Reihenfolge Desoxyribose mit Phosphorsäure verestert ist, wobei die Basen jeweils an die Pentose gebunden sind. Für die RNS ergab sich zu dieser Zeit (1953) noch kein klares Aufbauprinzip.

Die Basen

Bei der Hydrolyse von Nucleosiden, die aus DNS gewonnen worden waren, wurden stets vier verschiedene Basen, nämlich Adenin (A), Guanin (G), Thymin (T) und Cytosin (C) erhalten, bei solchen, die aus RNS stammten, zusätzlich noch Uracil (U). Andere Basen wurden nie beobachtet.

Bereits 1950 wurde festgestellt (Chargaff), daß, einerlei woher die DNS stammte, das molare Verhältnis von A:T bzw. von G:C immer 1:1 beträgt, auch wenn die Mengen von A:G sehr stark schwankten.

Aber schon viel früher wurden die ersten Hinweise für einen regelmäßigen und gesetzmäßigen Bau des genetischen Materials erhalten.

- 1932 Patti und 1937 Schmidt: Optische Untersuchungen (Doppelbrechung).
- 1938 Signer, Caspersson und Hammarsten: Messung der Strömungsdoppelbrechung zeigt, daß Molekülebenen ungefähr normal auf die Achse des fadenförmigen genetischen Materials stehen.
- 1947 Gulland und Jordan: Elektrotitrimetrische Untersuchungen zeigen Wasserstoff-Brückenbindungen zwischen den Basen an.
- 1947 Astbury: Röntgenbeugung von DNS-Fasern gibt den ersten Hinweis auf eine beträchtliche Regelmäßigkeit des Moleküls.

Seitdem erkannt worden war (1952), daß DNS als Träger der Erbfaktoren wirkt, wandte sich eine Reihe von Forschergruppen der Aufklärung der Feinstruktur mit Hilfe von physikalischen Methoden zu.

1953 veröffentlichten Pauling und Corey ein Strukturmodell der DNS, welches aber bereits zwei Monate später durch das Modell von Watson und Crick widerlegt werden konnte. Watson und Crick bezogen sich bei ihrem Modell auf die Ergebnisse von Chargaff über das molare Verhältnis der Basen und fanden dadurch den Schlüssel zur Lösung des Problems nicht nur der Feinstruktur der genetischen Substanz, sondern auch der Übertragung der genetischen Information.

Die Helixstruktur der DNS und RNS

Zu Beginn des Jahres 1953 galten folgende Tatsachen über den Bau der Nucleinsäuren als sichergestellt:

1. DNS und RNS sind hochmolekulare Substanzen.
2. Desoxyribose und Ribose bilden mit Phosphorsäure

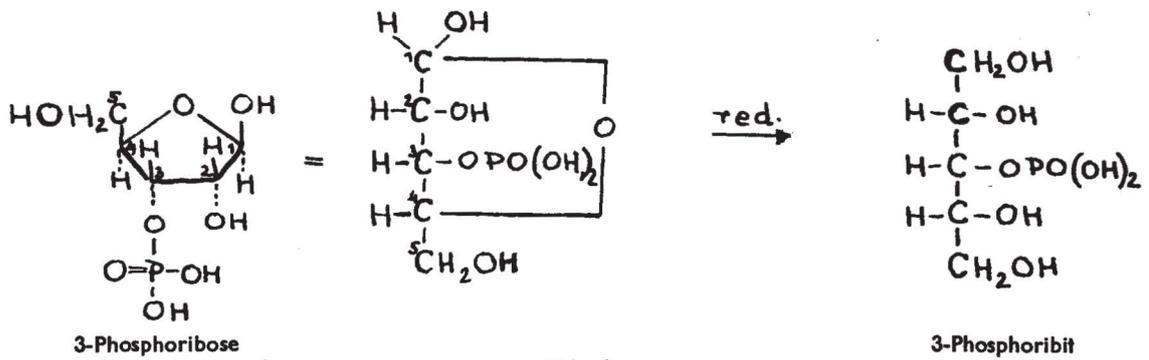
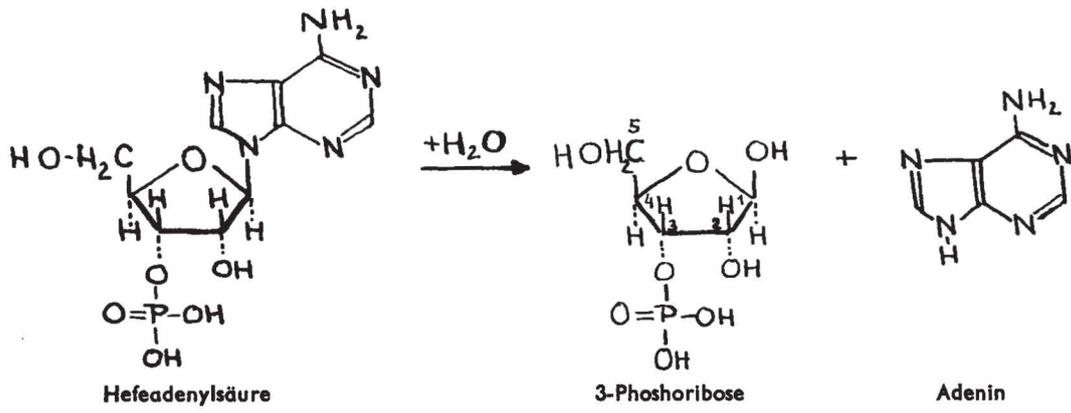


Abb. 1

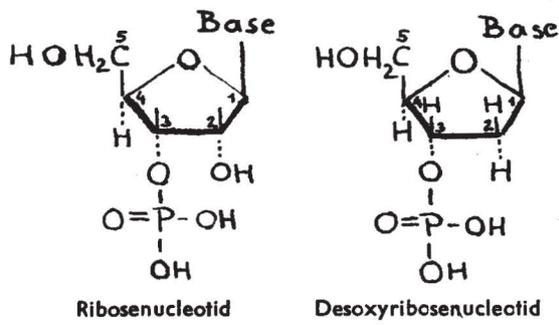


Abb. 2

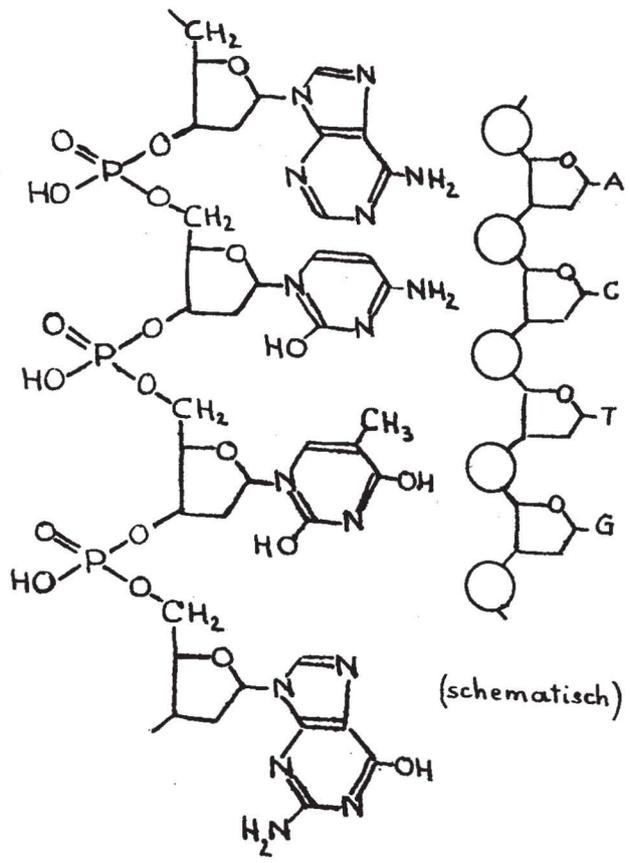
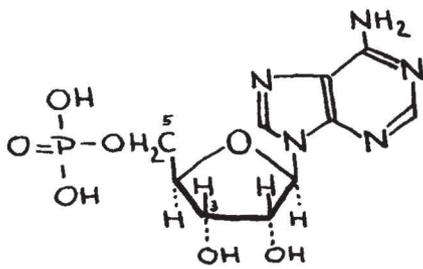


Abb. 4 Nucleinsäure

lineare Polyester, wobei die Verknüpfung der Pentosen über C₃ und C₅ erfolgt.

3. Die Basen sind jeweils an C₁ der Pentose gebunden.
4. DNS enthält Adenin, Thymin, Guanin, Cytosin; RNS zusätzlich noch Uracil.
5. Das Verhältnis A:T und G:C ist immer 1:1.
6. Zwischen den Basen existieren H-Brücken.
7. Die Röntgenbeugung deutet auf eine sehr regelmäßige Struktur.

Diese Tatsachen bildeten die Ausgangsbasis der Hypothese von Watson und Crick, die dann durch die Untersuchungen von Wilkins bestätigt wurde.

Es ist sehr interessant zu erfahren, wie Wilkins, der Physiker, in Kontakt mit der Biologie kam. Randall, Inhaber des Lehrstuhls für Physik am King's College in London, errichtete mit Unterstützung des Medical Research Council ein für eine physikalische Fakultät sehr ungewöhnliches Laboratorium. Hier sollten in Zusammenarbeit mit Biologen und Biochemikern biophysikalische Untersuchungen durchgeführt werden. So erhielt Wilkins die Aufgabe, mittels UV-Mikroskopie die in den Zellen enthaltene Menge der Nucleinsäuren zu bestimmen. Bei der Herstellung von DNS-Gelen zur Messung des UV-Dichroismus war ihm aufgefallen, daß an den benutzten Glasstäbchen fast unsichtbar feine Fäden haften. Diese Beobachtung ermutigte ihn, durch vorsichtiges Strecken und Trocknen eine weitgehende Orientierung der DNS-Fäden im Präparat zu versuchen, um Röntgenbeugungsbilder anzufertigen. Diese Arbeiten unter Leitung von Randall, der selbst Schüler von W. L. Bragg war, brachten sofort sehr ermutigende Resultate. Schon die ersten Aufnahmen ließen einige sehr scharfe Reflexe erkennen, die auf eine Kristallisationstendenz der DNS schließen ließen. Durch Verfeinerung der Präparationsmethodik konnten schließlich kristalline DNS-Präparate erhalten werden, die ausgezeichnete Röntgenbeugungsbilder lieferten. Aus diesen Bildern konnten auch die ersten Hinweise für eine helixförmige Struktur, entsprechend verzwirnten Fäden, erhalten werden.

Wie konnte aber das Paradoxon geklärt werden, das sich aus einer völlig regellosen und willkürlichen Anordnung der Basen in der DNS-Kette einerseits und den Befunden der Röntgenbeugung, die einen Bau vollkommener Regelmäßigkeit andererseits forderte, ergab?

In Zusammenarbeit mit Watson und Crick vom Medical Research Council in Cambridge wurde die Lösung gefunden.

Nach der Hypothese von Watson und Crick tritt ein Adenin- mit einem Thyminmolekül und ein Guanin- mit einem Cytosinmolekül durch H-Brückenbindung zusammen. Für die beiden Paare A-T und G-C ergeben sich fast identische Maße, so daß damit die Regelmäßigkeit der Beugungsaufnahmen erklärbar war, aber andererseits auch das konstante Basenverhältnis von A:T und G:C mit immer 1:1 zwanglos erklärbar war (Abb. 5).

Angeregt durch die bahnbrechenden Forschungen Paulings über die Helixstruktur der Proteine, wurde ein Modell der DNS entworfen, in dem eine Doppelhelix durch die Wasserstoffbrücken der Basenpaare gebildet wird.

Um diese Arbeitshypothese zu beweisen, wurden maßstabgerechte Molekülmodelle der DNS-Doppelhelix aufgebaut und aus den nun makroskopisch meßbaren Identitätsabständen des Modells die zu erwartenden Beugungsreflexe berechnet, eine Arbeit, die wohl kaum ohne elektronische Rechenanlagen durchführbar gewesen wäre.

Drei Modelltypen wurden aufgestellt, die sich durch die Zahl der Basenpaare pro Windung, durch die Ganghöhe der Windungen und durch die Neigungswinkel der Basenpaare zur Windungsachse unterschieden. Alle diese drei Typen konnten später an natürlicher DNS festgestellt werden. Bei dieser Arbeitsweise handelte es sich darum: „... Man befindet sich ungefähr in der Lage jemandes, der den Bau eines Klappstuhls aus dessen Schafften ableiten will: Eine kleine Änderung der Konfiguration des Stuhles macht seine Struktur deutlicher.“ (Wilkins, Nobel-Vortrag, 11. Dezember 1962.)

Die A-Konfiguration, die bei der zuerst untersuchten DNS gefunden wurde, besitzt 11 Nucleotide pro Spiralwindung, eine Ganghöhe von 28 Å, und ihre Basenpaare

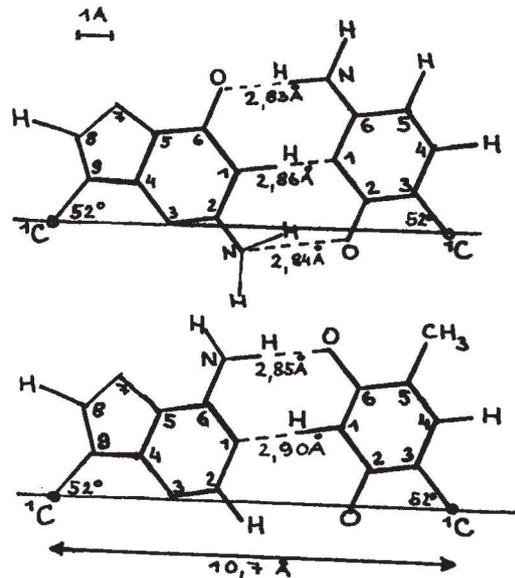


Abb. 5. Basenpaare. Oben: Guanin-Cytosin. Unten: Adenin-Thymin. Der Abstand zwischen den C-1 der Desoxyribose-Reste beträgt bei beiden Paaren 10,7 Å, die Bindungen C-1—N-9 und C-1—N-3 bilden mit der Verbindungslinie der C-1-Atome einen Winkel von 52°. (Nach Watson-Crick, von S. Arnott modifiziert. Angew. Chem. 75/10/432.)

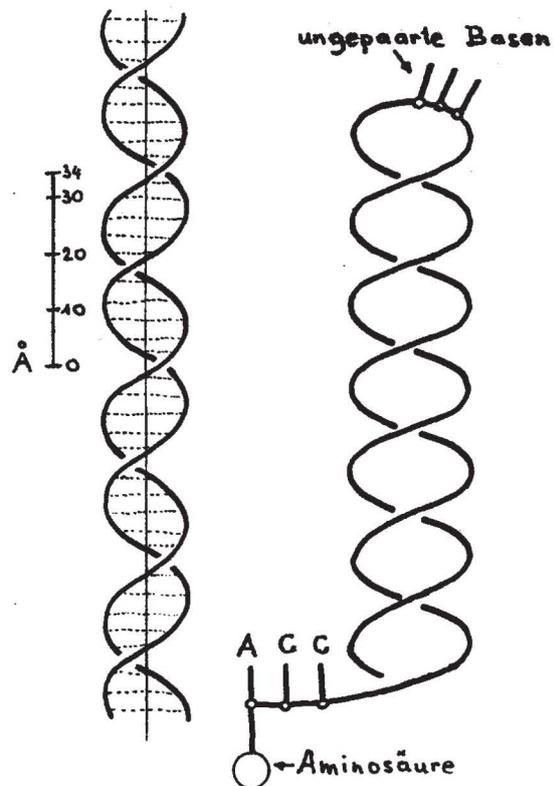


Abb. 6 Links: Schema der DNS, B-Konfiguration, angedeutet die Lage der durch H-Brücken zusammengehaltenen Basen. Rechts: Schema der IRNS, A-Konfiguration (nach Angew. Chem. 75/10/432, 437).

sind um 20° gegen die Molekülachse geneigt. Sie kommt nicht in vivo vor, jedoch wurde diese Struktur später bei der RNS gefunden.

Die B-Konfiguration existiert bei hohem Feuchtigkeitsgehalt der Umgebung, sie ist die in vivo vorliegende Form der DNS. Sie besitzt 10 Nucleotide pro Windung, und die Ganghöhe der Windungen beträgt 34 Å. Die Basenpaare besitzen einen Abstand von 3,4 Å voneinander, die Ebenen der Basen liegen normal zur Faserachse und sind so angeordnet, daß keine zusätzlichen H-Brückenbindungen zu umgebendem Wasser möglich sind; dadurch wird die Spirale selbst sehr gut stabilisiert, denn die Basen wirken so durch die H-Brücken nur aufeinander. Die Struktur dieser Konfiguration ist sehr regelmäßig, so daß Versuche, sie zur Kristallisation zu bringen erfolgreich waren. Ihre Röntgenbeugungsbilder geben sehr scharfe Reflexe, deshalb wurde eine dreidimensionale Fourier-Analyse in Angriff genommen, die bereits teilweise erfolgreich durchgeführt wurde (Abb. 6).

Die C-Konfiguration, die dritte Form der DNS, ist ein reines Kunstprodukt, welches durch teilweises Trocknen erhalten wurde. Sie enthält 9,3 Basenpaare pro Windung, die Basen besitzen eine Neigung von 5°.

Die natürliche Konfiguration der DNS, also die B-Form, bildet eine Doppelspirale, dabei ist es vollständig einerlei, woher die DNS stammt. Diese Universalität der spiralförmigen DNS-Struktur wurde durch mannigfaltige Untersuchungen bestätigt. Sie wurde gefunden bei DNS aus Leukocyten eines Patienten mit chronischer Knochenmarkleukämie und aus normalen Leukocyten, aus Sperma von Widdern und Cephalopoden, aus Bakterien oder Kalbthymus, aus Zellen, die in langsamer oder aber in sehr schneller Teilung sich befanden. Die Unterschiede zwischen den DNS-Arten liegen nur in der Länge der Doppelhelix und in der Aufeinanderfolge der Basen, der Basensequenz. So enthält z. B. DNS aus Bakteriophagen rund 450.000 Mononucleotide. Bei Annahme der B-Konfiguration (10 Mononucleotide pro Windung, Ganghöhe 34 Å) läßt sich eine Moleküllänge von 0,15 mm errechnen, der Durchmesser des Moleküls beträgt allerdings nur 23 Å. Bakterien-DNS dürfte ungefähr zehnmal so lang sein.

Über die Reihenfolge der Basen in einer Spirale kann nur gesagt werden, daß wahrscheinlich jede beliebige Sequenz auftreten kann und jeder Sequenz eine bestimmte Erbinformation zugrunde liegt. In der Doppelspirale sind die Einzelspiralen zueinander komplementär. Bei der Mitose erfolgt eine Reduplikation der DNS: Aus einer Doppelhelix werden zwei. Nach der Lösung der H-Brücken, die im Gegensatz zur Lösung einer kovalenten Bindung nur wenig Energie fordert, werden von den auseinandergetretenen Einzelsträngen der DNS aus dem Zellmaterial die zugehörigen Mononucleotide durch Neubildung von H-Brücken angelagert, ein Enzym polymerisiert Mononucleotide zur neuen DNS-Einzelspirale. So bildet ein Elternpaar mit je einer neugebildeten Spirale zwei neue DNS-Doppelhelices.

Daß vollständige Identität über beliebig viele Generationen gewahrt bleibt, dafür sorgen die komplementären Basenpaare A—T und C—G. Durch Untersuchungen an Virus-RNS (hier kann die RNS die Aufgaben der DNS übernehmen), die man durch Ablösen der Proteinhülle des Virus enthält, wurde festgestellt, daß allein die RNS das infektiöse Agens ist und fähig ist, sich nicht nur zu vermehren, sondern neu Viren bildet. Voraussetzung dafür ist, daß die RNS in ein Milieu gebracht wird, welches sämtliche Stoffe — Enzyme und Bausteine — enthält, die für die Bildung von neuen Viren notwendig sind. Viren vermehren sich unter Ausnützung und auf Kosten der in der Wirtszelle enthaltenen Substanzen.

Größere Schwierigkeiten als die Strukturauflösung der DNS bereitete die der RNS. Schon seit längerer Zeit war bekannt, daß in der Zelle verschiedene Arten der RNS existieren:

1. hochmolekulare RNS (messenger-RNS)
2. Ribosomen-RNS
3. niedermolekulare RNS (lösliche RNS = IRNS, transfer-RNS)

Wider Erwarten konnte die niedermolekulare RNS und die RNS aus den Ribosomen eher zur kristallinen Orientierung gebracht werden als die hochmolekulare Form. Bei der Auswertung der Röntgenbeugungsbilder, die sehr

diffus waren und kaum scharfe Reflexe erkennen ließen, ergaben sich größte Schwierigkeiten. Die RNS-Präparate waren sehr inhomogen, und nur durch sehr langsames Trocknen kam es zu einer teilweisen Orientierung dieser RNS-Gemenge.

Bei der löslichen RNS handelt es sich um ungewöhnlich kleine Moleküle aus insgesamt etwa 80 Nucleotiden. Die Röntgenbeugung brachte auch hier den Beweis für eine Spiralstruktur. Wahrscheinlich besteht IRNS nur aus einer Kette, die aber gefaltet und verzwirrt ist. An der Faltstelle sind drei Basen ungepaart, und das eine — längere — Kettenende trägt immer die gleiche Reihenfolge der Basen C—C—A, wobei an Adenin noch jeweils eine Aminosäure gebunden ist. Bei der IRNS handelt es sich offenbar um diejenige Substanz, welche die am Kettenende sitzende Aminosäure zur Proteinsynthese abgeben kann. Die Art dieser Aminosäure wird dabei wohl durch die Reihenfolge der drei ungepaarten Basen an der Faltstelle bestimmt (Abb. 6). In ihrer Helixstruktur entspricht die lösliche RNS — sie wird auch transfer-RNS oder Überträger-RNS genannt — der A-Konfiguration der DNS. Die Ribosomen-RNS dürfte wahrscheinlich genau so wie die Viren-RNS eine Doppelhelix sein.

Im Gegensatz zu diesen beiden Arten der RNS stellt die hochmolekulare RNS nur eine Einzelkette dar. Von Nirenberg und Ochoa wurden Polynucleotide synthetisch hergestellt (1961, 1962). Die hier angewendete Technik besteht darin, entweder nur Uridyl- oder Adenylsäure oder ein Gemisch von zwei bis drei Nucleotiden enzymatisch zu polymerisieren. Dabei wird Polyuracil, Polyadenin oder eine RNS mit statistisch verteilten Basen, wie Poly-(U, C) oder Poly-(A, C), erhalten. Wie bereits vorher erwähnt, wurde in natürlicher RNS auch die Base Uracil gefunden, die an die Stelle von Adenin treten kann und der daher ebenfalls die Base Cytosin komplementär ist. Der Beweis dafür, daß nun die hochpolymere RNS eine Einzelkette ohne sekundäre Struktur ist, daß sie also nicht gefaltet oder verzwirrt ist, konnte durch, besondere Eigenschaften synthetischer RNS-Arten erbracht werden. Hochmolekulare RNS hat die Fähigkeit auch in zellfreien Systemen die Proteinsynthese zu stimulieren. Solch ein System ist z. B. ein DNS-freier Extrakt aus Colibakterien (*Escherichia coli*). In diesem Extrakt sind nicht nur alle Stoffe vorhanden, die zur Synthese von Protein notwendig sind, sondern auch noch die hochmolekulare RNS, Ribosomen-RNS und lösliche RNS; daher findet in diesem System tatsächlich die Synthese von Protein statt. Wird nun synthetische RNS zugesetzt, so steigt die Proteinsynthese auf das 10- bis 20fache an. Von besonderer Bedeutung war hier der Versuch von Nirenberg und Matthaei (Juni 1961), bei dem der Zusatz von Polyuridylsäure spezifisch die Synthese von Polyphenylalanin stimulierte. Wird jedoch Poly-U mit Poly-C gemischt, so stellt sich diese Mischung als vollkommen wirkungslos heraus. Offenbar zeigt Poly-U die Fähigkeit, mit dem komplementären Poly-C zu Doppelhelices zusammenzutreten, denen aber nicht mehr die Fähigkeit zu einer Proteinsynthese zukommt. Somit ist die hochmolekulare RNS sicher einsträngig.

Die Eigenschaft des Poly-U, spezifisch den Aufbau von Polyphenylalanin zu ermöglichen, gab einerseits den ersten Hinweis auf die Art des genetischen Codes und bestätigte andererseits die Vermutung über die Bedeutung dieser RNS-Art für die Proteinsynthese: Sie hat die Aufgabe, die Information über die Art des neu zu bildenden Proteins von der DNS zu holen und mit Hilfe der IRNS durchzuführen. Die hochmolekulare RNS wird daher als messenger-RNS bezeichnet.

Nur die genaue Kenntnis der Struktur von DNS und RNS ist die Voraussetzung für das Verständnis des genetischen Codes, der Übertragung von Erbfaktoren und der Vorgänge bei der Synthese der Proteine, oder — kurz gesagt — für das Verständnis der Mechanismen, die die Zellvermehrung und das Zellwachstum regeln. Die folgenden Berichte werden sich mit diesen Problemen noch genauer befassen.

Literatur:

- A. R. Todd, *Angew. Chem.* 65/ 1/12
F. H. Crick, *Angew. Chem.* 75/10/425
M. H. F. Wilkins, *Angew. Chem.* 75/10/429
J. D. Watson, *Angew. Chem.* 75/10/439

Ionen und Ionenaustauscher

In den letzten Jahren haben die Ionenaustauscher sehr große Bedeutung gewonnen. Aus der modernen Forschung und Industrie sind diese Substanzen gar nicht mehr wegzudenken. Über ihren Bau, ihre Wirkungsweise und Anwendung existiert bereits eine außerordentlich umfangreiche Literatur.

Hier soll in Kürze nur ein Überblick über diese Substanzen und ihre Anwendung unter Berücksichtigung einiger neuerer Entwicklungen auf diesem Gebiet gegeben werden.

I. Arten der Ionenaustauscher und Austauschvorgänge

Ein Ionenaustauscher ist eine feste, in Wasser und wäßrigen Lösungen unlösliche, jedoch quellbare Substanz. Er besteht aus einem polymeren Teil, welcher ein dreidimensionales, mehr oder weniger weitmaschiges Netzwerk, das Gerüst, darstellt. Dieses Gerüst kann entweder Anion- oder Kationcharakter besitzen. Es enthält in seinen Hohlräumen den äquivalenten Anteil kleiner, leicht beweglicher, daher austauschbarer Ionen. Prinzipiell können nur äquivalente Mengen von Ionen gleicher Ladung ausgetauscht werden, z. B. 2Na^+ gegen Ca^{++} . Beim Austausch handelt es sich immer um sehr schnell verlaufende und reversible Reaktionen.

Die Entwicklung der Ionenaustauscher geht auf die Beobachtung der Wirkung von Zeolithen in Ackerböden zurück. So waren die ersten Ionenaustauscher künstliche Zeolithe, dann folgten Kohleaustauscher und schließlich die verschiedenartigen Kunstharzaustauscher. Die rasche Entwicklung der Kunstharze ermöglicht es jetzt, bereits einen Austauscher nach Maß herzustellen. Voraussetzung für den Ionenaustausch ist:

1. leichte Quellbarkeit,
2. eine Mindestporengröße.

Gerade die Porengröße ist für die Art der Austauschvorgänge besonders wichtig, da kleine Ionen viel rascher ausgetauscht werden; es ist jedoch dabei zu berücksichtigen, daß die Ionen im allgemeinen nur in hydratisierter Form vorliegen, also von einer festen Wasserhülle umgeben sind.

Tabelle 1: Durchmesser hydratisierter Ionen und Porengröße einiger Austauscher (alles in Å)

Ion	hydratisiertes Ion	
Li	1,36	20
Na	1,96	15,8
K	2,66	10,6
NH_4	2,86	10,74
Mg	1,78	21,6
Ca	2,34	19,2
Sr	2,68	19,2
Ba	2,98	17,6

Austauscher	Porengröße
Kohleaustauscher	100—3000
Silikatischer Austauscher	100—5000
Kondensationsharze	7— 20
Polymerisationsharze	5— 15
Poröse Austauscher	8— 30

Für die Grundgerüste werden jetzt neben Silikaten hauptsächlich Kondensations- und Polymerisationsharze verwendet, welche aktive Gruppen tragen und dadurch zu festen Säuren oder Basen werden.

Der Säurecharakter kann durch Einführen verschieden stark saurer Gruppen abgestuft werden, ebenso der Basencharakter.

Tabelle 2: Aktive Gruppen in Kunstharzaustauschern

1. Kationenaustauscher mit sauren Gruppen:

- a) schwach sauer:
 - phenolische OH-Gruppe
 - COOH
 - (sehr schwach sauer, nur in alkalischen Lösungen)
 - (Entkarbonisierung, nur für Hydrogencarbonate)
- b) stärker sauer:
 - PO₃H
 - AsO₃H
 - (selektive Adsorption von Buntmetallen: Cu, Zn usw.)
- c) stark sauer:
 - CH₂—SO₃H
 - SO₃H
 - (für Na- und H-Austausch)

2. Anionenaustauscher mit basischen Gruppen:

- a) schwach bis mittelstark basisch mit abgestufter Basizität, 3-wert. N:
 - NH₂
 - =NH
 - =N
 - (für starke bis mittelstarke Säuren: HCl, H₂SO₄, HNO₃)
- b) stark basisch mit N⁺:
 - $$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ | \\ \text{—N—CH}_3 \\ | \\ \text{OH C}_2\text{H}_4\text{OH} \end{array}$$
- c) sehr stark basisch:
 - $$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ | \\ \text{—N—CH}_3 \\ | \\ \text{OH CH}_3 \end{array}$$
 - (für sehr schwache Säuren, Kieselsäure)

Der Ionenaustausch ist ein Diffusionsvorgang, welcher durch eine Reihe von physikalischen Daten bestimmt wird. Er ist abhängig von der Temperatur, der Porenweite und Korngröße des Austauschers, von der Konzentration und der Art der Ionen, weshalb Austauschvorgänge selektiv sind. So werden mehrwertige Ionen bevorzugt adsorbiert. Außerdem sind noch die Durchflußzeit, d. h. die zur Verfügung stehenden Reaktionszeiten, und häufig die Fähigkeit zur Komplexbildung Faktoren, von denen Austauschvorgänge abhängig sein können. Besonders durch die Komplexbildung kann eine große Selektivität erzielt werden: durch Einbau optisch aktiver Gruppen sind sogar Austauscher für optische Isomere hergestellt worden. Andererseits kann durch Zusatz von Komplexbildnern auch eine bestimmte Ionenart am Austausch gehindert werden. Diese Methoden sind besonders für die Analytik sehr wertvoll geworden.

Ein praktisches Beispiel für die Ausnützung von Komplexbildung ist die Reinigung von konzentrierter Salzsäure von Fe⁺⁺⁺-Ionen. In konzentrierter Salzsäure liegt das Eisen in Form von FeCl₄[—] vor. Dieses Ion kann von einem Anionenaustauscher gebunden werden, während wegen der großen Säurekonzentration ein Kationenaustauscher Eisen nicht adsorbieren kann. Der Anionenaustauscher kann, wenn er an FeCl₄[—] gesättigt ist, sehr leicht wieder regeneriert werden, da allein beim Behandeln mit Wasser das Eisenkomplexion zerstört wird und Fe⁺⁺⁺-Ionen durch das Wasser aus dem Austauscher hinausgespült werden.

Die Möglichkeit einer leichten Regenerierbarkeit der Austauscher ist eine prinzipielle Forderung der Technik, nur dann sind sie wirtschaftlich. Um gebundene Ionen zu entfernen, ist eine genügend hohe Konzentration der regenerierenden Lösung nötig oder es können durch entsprechende Zusätze — wieder über Komplexbildungen oder deren Zerstörung — die Austauscher gereinigt werden.

Die sogenannten Elektronenaustauscher zeigen Selektivität gegenüber Sauerstoff. Sie stellen eigentlich Redox-Systeme dar und enthalten Gruppen, welche reversibel oxydierbar und reduzierbar sind, entsprechend dem System Hydrochinon \rightleftharpoons Chinon. Sie können daher mit leicht oxydierbaren oder reduzierbaren Ionen reagieren.

Ionenaustauscher können aber nicht nur Ionen adsorbieren, sondern auch andere Substanzen, namentlich größere organische Moleküle. In ihrer Wirkung entsprechen sie damit den Bleicherden oder Aktivkohlen, sind diesen aber weit überlegen. Hier spielen außer der großen und leicht zugänglichen Oberfläche doch auch die ionenaktiven Gruppen mit. So können organische Säuren an einem H-Ionenaustauscher adsorbiert werden, wobei das Adsorptionsvermögen mit steigender C-Anzahl zunimmt.

Auch Trennungen von Elektrolyt-Nichtelektrolyt sind durchführbar. Es kann auf diese Weise z. B. Kochsalz von Glycerin getrennt werden. Hier wird die Eigenschaft der Ionenaustauscher benützt, gleichsinnige Ionen abzustößen. Dringt nämlich in einen mit Na^+ beladenen Kationenaustauscher eine Kochsalz-Glycerin-Lösung ein, so erscheint im Ablauf zunächst nur die Kochsalzlösung, und das Glycerin folgt erst später.

II. Technische Anwendungen der Ionenaustauscher

Bei der technischen Verwendung von Ionenaustauschern können drei Anwendungsgruppen unterschieden werden:

1. Ersatz von Ionen
2. Anreicherungen von Ionen
3. Trennungsvorgänge

Für den wirtschaftlichen Einsatz entscheidend ist die genaue Kenntnis des Arbeitsbereiches des jeweils verwendeten Austauschers. Der Arbeitsbereich wird wesentlich vom pH der zu verarbeitenden Lösungen bestimmt. Daneben bestimmen auch Kapazität und äußere Form der Austauscher ihre Anwendung. Ursprünglich wurden Austauscher nur als gebrochenes Korn verwendet, während in letzter Zeit die Kugelform (Durchmesser 0,8 mm bei Lewatit, Bayer) bevorzugt wird. Aber auch Austauscher in Folienform werden hergestellt, deren besondere Eigenschaft ist, für bestimmte Ionen nicht durchlässig zu sein. Neben großen industriellen Anlagen werden auch für Kleinverbraucher Austauscher angeboten. Diese ersetzen die wesentlich kostspieligere Anlage zur Herstellung von destilliertem Wasser und können 50 l voll entsalztes Wasser pro Stunde liefern.

1. Ersatz unerwünschter Ionen durch erwünschte:

Wasser für die verschiedenartigste technische Verwendung darf oft einen ganz bestimmten Gehalt an zulässigen Kationen und Anionen besitzen.

Unerwünscht ist meist die **Karbonathärte**, deren Ursache Ca^{++} , Mg^{++} , und HCO_3^- ist. Wird hier durch einen Kationenaustauscher Ca^{++} und Mg^{++} gegen H^+ ersetzt, so kann auch HCO_3^- anschließend entfernt werden, da es mit H^+ zu CO_2 und Wasser reagiert hat und CO_2 durch Luft ausgeblasen wird. Dieses Verfahren wird hauptsächlich zur Herstellung von Kühlwasser und zur Wasseraufbereitung zur Herstellung heller Biere verwendet.

Bei der Herstellung von **Weichwasser** für Wäscherien und Färbereien werden alle Ca-Ionen gegen Na-Ionen ausgetauscht, die Anionen HCO_3^- (ev. SO_4^{--}) werden nicht entfernt.

Die **Wasserentsalzung** wird meist in mehreren Einzelschritten durchgeführt:

1. Kationenaustauscher: Ersatz von Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ gegen H^+
2. Anionenaustauscher: Ersatz von Cl^- , SO_4^{--} gegen OH^-
3. Anionenaustauscher (stark basisch): Ersatz von HCO_3^- und SiO_3^{--} gegen OH^-

Da äquivalente Mengen an Kationen und Anionen ausgetauscht wurden, reagieren $\text{H}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$. Nicht entfernbar sind oft Spuren von Kieselsäure, deren Menge aber weniger als 0,01 mg/l beträgt. Soll das Wasser nur salzarm sein, so genügt meist ein sogenanntes Mischbettfilter, welches Kation- und Anionenaustauscher enthält und bereits weitgehend entsalzt. Die Entsalzung wird durch Leitfähigkeitsmessungen überprüft, und auch Kleinanlagen für Laboratorien sind mit diesen Meßgeräten ausgestattet. Voll entsalztes Wasser wird hauptsächlich in der chemischen und pharmazeutischen Industrie zur Herstellung besonders reiner Präparate verwendet, weiters zur Speisung von Hochdruckdampfkesseln, für bestimmte Typen von Atomreaktoren (Druckwasserreaktoren und Schwimmbadreaktoren). In der Reaktortechnik spielen Ionenaustauscher überhaupt eine große Rolle zur Reini-

gung radioaktiv gewordener Abwässer und radioaktiven Kühlwassers. Der Reinigungseffekt ist dabei sehr hoch, das Verhältnis der radioaktiven Strahlung vor und nach der Reinigung des Wassers beträgt 1.000.000:1 (Dekontaminierungsfaktor = 10^6). Dieser hohe Reinigungseffekt erlaubt es auch, radioaktiv gewordenes Trinkwasser durch Ionenaustauscher zu reinigen. In breit angelegten Versuchen mit Trinkwasser verschiedenster Herkunft wurde immer medizinisch einwandfreies Wasser erhalten.

2. Anreicherung von Ionen:

Einige Beispiele sollen hier die vielfältigen Möglichkeiten andeuten:

a) **Reinhaltung von Lösungen:** H_3PO_4 -Beizbäder, wie sie zur Oberflächenbehandlung metallischer Werkstücke verwendet werden, können durch in Lösung gegangene Fe-Ionen wertlos werden. Durch einen stark sauren Austauscher werden laufend Fe-Ionen gegen H-Ionen ausgetauscht und so die kostspielige Phosphorsäure voll ausgenützt.

b) **Reinigung von Abwässern:** Verbrauchte Chromsäurebäder können durch Anionenaustauscher von Chromationen befreit werden, wodurch nicht nur die gefährliche Vergiftung der Flüsse vermieden, sondern auch die Chromsäure zurückgewonnen wird.

c) **Rückgewinnung von Substanzen:** So wie Chrom ist auch Kupfer ein teures Metall. Bei der Fabrikation von Kupferseide können mit Hilfe der Austauscher auch aus sehr verdünnten Lösungen Cu^{++} -Ionen zurückgewonnen werden, auch NH_3 läßt sich rückgewinnen. Ein Kubikmeter Austauscher kann z. B. 40 kg Kupfer binden.

d) **Aufarbeitung stark verdünnter Lösungen:** Die Selektivität eines schwach sauren Austauschers benützt man zur Adsorption von Streptomycin aus den verdünnten Lösungen der Pilzkulturen, wodurch die Herstellung dieses Medikamentes wesentlich verbilligt wurde. Grubenwässer von Braunkohlen- oder Flußspatgruben sowohl in sedimentärem als auch kristallinem Gestein enthalten häufig 1 bis 20 mg Uran pro Liter, welches selektiv durch Austauscher gebunden wird und so der Aufarbeitung zugeführt werden kann.

e) **Hydrometallurgie:** Abbauwürdige Uranvorkommen enthalten bis zu 0,2% Uran. Durch Auslaugen des Erzes mit Schwefelsäure wird eine Lösung erhalten, die neben Uran noch Ca, Mg, Al, Fe, Mn und Kieselsäure enthält. An einem stark basischen Anionenaustauscher wird Uran in Form eines Anionkomplexes, welcher in stark schwefelsaurer Lösung beständig ist, selektiv adsorbiert.

3. Trennungsvorgänge:

Einige Beispiele sollen hier auch die Wirtschaftlichkeit der Verwendung von Ionenaustauschern aufzeigen. Man kann sowohl Ionen, oft sogar sehr ähnlicher Art, voneinander wie auch von nichtionogenen Substanzen trennen. Bei der Aufarbeitung verbrauchter Brennstoffelemente aus Reaktoren werden strahlenbeständige Austauscher verwendet. Auch die Aufarbeitung der Seltenen Erden wird durch Austauscher vereinfacht. Hier wird vor allem die Tendenz zur Komplexbildung ausgenützt, die bei den einzelnen Elementen doch verschieden groß ist. Beim Waschen der Austauscher mit komplexbildenden Säuren werden diejenigen Elemente, die am leichtesten Komplexe bilden, zuerst herausgelöst. So können z. B. 175 Austauschfilter mit 425 m³ Austauscher monatlich mehrere Tonnen Seltene Erden aufarbeiten, während für die Trennung nur durch Kristallisation ca. 40.000 (!) Einzelschritte notwendig wären.

Auch die Entsalzung von Glycerinlösungen (wie oben besprochen), Fruchtsäften und Zuckerlösungen wird durch Austauscher vollzogen. Hier werden nicht nur Destillationsvorgänge eingespart, sondern auch die Ausbeute erhöht (weniger Melasse bei der Zuckergewinnung) und die Farbe verbessert (Traubenzucker aus Kartoffelstärke). Bei Weinen und Obstsaften kann durch eine Säureentfernung auch eine Geschmacksverbesserung eintreten, aber es ist auch möglich, durch H-Ionenaustauscher Weine, die wegen ihres zu geringen Säuregehaltes eine beschränkte Lagerfähigkeit besitzen, lagerfähig zu machen.

Membranaustauscher:

Austauscher in Folienform lassen einige besondere Anwendungen zu. So ist eine Kationenmembran nur für Kationen und eine Anionenmembran nur für Anionen

Diese dimere Säure wird anstelle von Phthalsäure bei der Herstellung von Alkydharzen verwendet, man kann aber auch Polyamide aus ihr herstellen, die bereits vielseitige Anwendung gefunden haben (Versamide der General Mills Inc.).

Literatur: Umschau i. W. u. T., 1962/2/46

Ein neuer Wassergaskatalysator

Die Konvertierung des Kohlenmonoxyds wurde bei Anwendung der bisher üblichen Eisen-Chrom-Katalysatoren bei 350°—430°C durchgeführt. Wegen der bei dieser hohen Temperatur schon ungünstigen Gleichgewichtslage:



liegt der CO-Gehalt nach einmaligem Durchsatz immerhin bei 1%. Ein neuer Katalysator, der in den USA („Girdler G 66“, Chemetron Corp., Louisville) entwickelt wurde, erlaubt die Konvertierung bereits bei einer Temperatur von 150°C durchzuführen. Unter diesen Bedingungen ist der CO-Gehalt höchstens 0,2%. Durch Einsparung von Konverterstufen kann ein Viertel des bisherigen Kostenaufwandes erspart werden. Die Lebensdauer dieses Katalysators beträgt 5 Jahre, außerdem zeigt er keine Tendenz zu Bildung von Kohle und CH_4 .

Literatur: Nachr. a. Chemie u. Technik, 1963, 11/15/281

Chemie und Raketen

1. Chemie im Raketenbau

Eine Rakete ist sehr großen thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. Das Material muß Temperaturen von —250°C, der Temperatur der flüssigen Treibstoffe H_2 , O_2 usw., bis 9000°C, der Temperatur der Raketenspitze und der Stabilisierflüssen beim Wiedereintritt in die Atmosphäre, standhalten.

Als metallische Baustoffe werden hauptsächlich die Elemente Beryllium, Niob, Hafnium, Lithium, Molybdän, Tantal, Thorium, Titan, Wolfram, Zirkon und deren Legierungen verwendet.

Da auch die besten Legierungen den extrem hohen Temperaturen auf die Dauer nicht gewachsen sind, haben nichtmetallische Baustoffe sehr große Bedeutung. Neben Asbest, Graphit, verschiedenen Carbiden, Nitriden und Siliciden werden vor allem keramische Massen aus Metalloxyden verwendet.

Graphit, besonders der sogenannte Pyrographit, ist wegen seiner thermischen Anisotropie ein hervorragender Raketenbaustoff. In Richtung der Kristallebenen verhält sich Pyrographit in bezug auf seine elektrische und seine Wärmeleitfähigkeit wie ein Halbmetall, senkrecht dazu aber praktisch wie ein Isolator. Er besitzt auch eine sehr hohe Sublimationstemperatur, ist auch bei hohen Temperaturen gasundurchlässig, widerstandsfähig gegen Thermoschocks und zeigt oberhalb 1900°C eine größere Zugfestigkeit als Wolfram. Carbide und Silicide werden hauptsächlich wegen ihrer Hitzebeständigkeit verwendet, Hafniumcarbid hält für kurze Zeit 4000°C aus. Meist werden sie aber wegen ihrer hohen Sprödigkeit in Mischungen verwendet: Siliciumcarbid mit granuliertem Graphit gesintert, Siliciumcarbid-Bornitrid, Siliciumnitrid mit 5% Siliciumcarbid.

Als keramische Massen werden die gesinterten Oxyde der Metalle Aluminium, Beryllium, Hafnium, Lanthan, Magnesium, Neodym, Thorium, Titan, Uran und Zirkon verwendet.

Zur Erhöhung der Festigkeit der Metalle werden in diese sogenannte „whiskers“ eingebaut. Dies sind fadenförmige Einkristalle von Berylliumoxyd, Aluminiumoxyd oder Zirkonoxyd mit einem Durchmesser von 1—2 μ und einer Länge bis zu 2,5 cm. Ihre Zugfestigkeit von 200 000 kg/cm² übertrifft die der besten Stähle.

2. Raketentreibstoffe

Ein Raketentreibstoff besteht aus dem eigentlichen Brennstoff und dem dazugehörigen Oxydationsmittel. Die Leistung eines Treibstoffes ist direkt proportional der Temperatur in der Brennkammer und umgekehrt proportional dem Molekulargewicht der bei der Reaktion entstehenden Gase. Zur Kennzeichnung der Leistung eines Treibstoffes dient der „spezifische Impuls“, welcher in sec ausgedrückt wird.

$$I_{\text{spez}} = \frac{I}{K} \quad \begin{matrix} I = \text{kg m sec}^{-1} \\ K = \text{kg m sec}^{-2} \end{matrix}$$

(K ist der Schub, der beim Umsatz von 1 kg Treibstoff pro sec erhalten wird.) Die Treibstoffe lassen sich in folgende Systeme einteilen: flüssig-flüssig, fest-flüssig und fest-fest.

a) Flüssig-flüssig

Als Brennstoffe werden verwendet: Kohlenwasserstoffe, Alkohole, Amine, Hydrazin, unsymmetrisches Dimethylhydrazin, Hydryne (= 60 Gew.-% unsymmetrisches Dimethylhydrazin und 40 Gew.-% Diäthylentriamin), flüssiger Wasserstoff. Borane, Alkylborane und Aluminiumborhydrid sollen weniger geeignet sein.

Als Oxydationsmittel werden verwendet: H_2O_2 , hochkonzentrierte Salpetersäure, flüssiger Sauerstoff, Ozon, Fluor. Fluor gibt zwar als stärkstes Oxydationsmittel die höchsten Leistungsziffern, ist aber sehr schwer zu handhaben, weshalb Versuche mit weniger aggressiven Fluorverbindungen unternommen wurden, wie OF_2 , NF_3 , ClF_3 , N_2F_4 (Tetrafluorhydrazin), ClO_2F (Perchlorylfluorid).

Beim Flüssig-flüssig-Antrieb werden Brennstoff und Oxydationsmittel durch getrennte Düsen in die Brennkammer gespritzt. Sie können dort entweder spontan zünden (hypergole Zündung), oder sie können elektrisch gezündet werden. Brennt das Treibstoffgemisch nach dem ersten Zünden selbständig weiter, so ist kein mehrfaches Anhalten und Wiederanlaufen des Triebwerkes möglich. Hypergol zünden die Gemische H_2O_2 /Hydrazin, HNO_3 /Hydrazin.

Daten einiger Treibstoffkombinationen:

Brennstoff (B)	Oxydationsmittel (O)	B:O	mittl. Dichte	I_{spez} (sec)
n-Oktan	flüss. O_2	2,2	1,00	250
Hydrazin	flüss. O_2	0,67	1,06	265
Diboran	flüss. F_2	6,33	1,15	293
Flüss. H_2	flüss. F_2	6,3	0,40	362

b) Fest-flüssig (Lithergol-Treibstoffe)

Auf den festen Brennstoff werden flüssige Oxydationsmittel aufgespritzt. Über diese Treibstoffe sind nur wenige Angaben zugänglich. Als Brennstoffe werden vor allem Kunststoffe, nämlich polymere Kohlenwasserstoffe (Polyäthylen, Polypropylen, Polybutadien, Butyl- und Isobutylkautschuk) und bestimmte Polyamide verwendet. Als Oxydationsmittel werden wahrscheinlich HNO_3 , Fluor oder flüssiger Sauerstoff verwendet. Mit der Kombination Lithium-flüssiges Fluor sollen spezifische Impulse bis zu 400 sec erreicht werden.

c) Fest-fest

Hier werden zwei Haupttypen unterschieden:

1. Doppelbasige Pulver: Sie enthalten Brennstoff und Oxydationsmittel im gleichen Molekül: Nitrozellulose, Nitroglycerin und andere nitrierte Polyalkohole (Diäthylenglykoldinitrat, Triäthylenglykoldinitrat). Diese Treibstoffe werden in Mischungen eingesetzt, die meist einen Gehalt von 25 bis 45% Nitroglycerin besitzen. Als Stabilisatoren werden Diphenylamin, seine Derivate oder substituierte Harnstoffe zugesetzt, als Weichmacher Phenylurethane oder Alkylphthalate. KClO_4 , Di- und Trinitrotoluol, Pentaerythrit-tetranitrat, Aluminium und Schwermetallsalze regeln die Abbrandeigenschaften, und K_2SO_4 dämpft den Feuerstrahl. Zwei Treibstoffe aus dem zweiten Weltkrieg besaßen folgende Zusammensetzung:

Ballistite JPN

Nitrozellulose	51,50%
Nitroglycerin	43,00%
Diäthylphthalat	3,25%
K ₂ SO ₄	1,25%
Subst. Harnstoff	1,00%
Ruß	0,20%
Wachs	0,08%

Z 167

Nitrozellulose	54,90%
Diäthylenglykoldinitrat	16,35%
Pentaerythrit-tetranitrat	6,00%
Unsymm. Diphenylharnstoff	0,50%
Lignin	0,75%
TNT	12,50%
Dinitrotoluol	9,00%

2. Composite-Treibstoffe: Sie enthalten ein anorganisches Oxydationsmittel (NH₄ClO₄, NH₄NO₃) und einen Kunststoff, der gleichzeitig Brennstoff und Bindemittel ist. Besonders geeignet sind Polyalkylen-polysulfide,

Butadien-Mischpolymerisate, Butyl- und Isobutylkautschuk, PVC und vor allem Polyurethane (Polyester- und Polyätherurethane, hergestellt aus Isocyanaten bzw. kurzkettigen niedrigviskosen Polyäthern oder Polyestern mit Isocyanat-Endgruppen und Polyätherglykolen oder Polyesterglykolen), deren Nachteil allerdings ihre große Feuchtigkeitsempfindlichkeit ist.

Zur Erhöhung der Leistung von Composite-Treibstoffen wird meist 5 bis 20% Al-Granulat beigemischt. Auch Beryllium kann dazu verwendet werden. Als Abbrandregler dienen Kupferverbindungen, falls NH₄ClO₄ das Oxydationsmittel ist; wird NH₄NO₃ verwendet, so regeln Eisencyanokomplexe, (NH₄)₂CrO₄, (NH₄)₂Cr₂O₇, den Abbrand.

Bei der Polaris-Rakete konnte durch neue Zusätze die Reichweite von 2275 km auf 4650 km erhöht werden. Der Brennstoff besteht aus Polyäthylen und 3-Nitroaza-1,5-pentandilsocyanat, bei den Zusätzen handelt es sich um die Nitroverbindungen Bis-(2,2-dinitropropyl)-formal und Bis-(2,2-dinitropropyl)-acetal. Dieser Treibstoff soll in seiner Handhabung nicht gefährlicher als TNT sein.

Literatur: Nachr. aus Chemie und Technik 1963/11, 197, 436.

PHYSIK

Dr. Walter Kranzer

Erzeugung und Nachweis der künstlichen Elemente

Die Methoden der chemischen Analyse waren zu Beginn dieses Jahrhunderts bereits so weit entwickelt, daß schon 1927 alle Elemente bis auf vier (mit den Ordnungszahlen 43, 61, 85, 87) bekannt und dargestellt waren. Von unersetzlichem Wert erwies sich das Periodensystem von Mendelejew, weil es eine rohe Vorhersage gewisser chemischer und physikalischer Eigenschaften erlaubte. Man wußte dadurch, in welcher Richtung die größten Erfolgchancen lagen.

Die erste Kernumwandlung, die E. Rutherford beim Beschuß von Stickstoff mit α -Strahlen (${}_7\text{N}^{14} + \alpha \rightarrow {}_8\text{O}^{17} + p$) erzielte, eröffnete der Forschung neue Möglichkeiten. Neben die chemischen Umwandlungen traten nun die Kernreaktionen, deren Anzahl bald lawinenartig anwuchs. Die Sensationspresse schwelgte in utopischen Träumen, als es 1925 den Anschein hatte, daß Miethe in Berlin Quecksilber in Gold umwandeln könne. Die Ernüchterung erfolgte rasch durch die trockene Bekanntgabe der submikroskopischen Quantitäten der neugebildeten Substanzen. Viel bedeutungsvoller war jedoch der Entschluß einiger Forscher, mit Hilfe von Kernreaktionen neue Elemente zu erzeugen. Ehe wir einen historischen Über-

blick über den Verlauf dieses kühnen Vorhabens geben, stellen wir in der beigefügten Tabelle die wichtigsten diesbezüglichen Daten zusammen. Nicht behandelt werden in diesem Zusammenhang die Isotope schon bekannter Elemente.

Die Tabelle entspricht dem Stand von Mitte 1959 (mit Ausnahme von Lw, das erst 1961 entdeckt wurde). In den letzten beiden Spalten sind die größte und die kleinste derzeit bekannte Halbwertszeit unter den verschiedenen Isotopen eines Elements mit dem betreffenden Vertreter eingetragen. Sämtliche Halbwertszeiten sind im Vergleich zu geologischen Epochen kurz, und das ist auch der Grund für das Fehlen in der Natur. Seit ihrer allfälligen Bildung ist soviel Zeit vergangen, daß sämtliche Isotope — sie sind durchwegs instabil — längst zerfallen sind.

Wir beginnen zuerst mit den Elementen der Ordnungszahlen 43, 61, 85, 87. Danach werden die Transurane 93 bis 103 besprochen werden.

Technetium (${}_{43}\text{Tc}$). Im Jahre 1937 ließen C. Perrier und E. Segrè im Zyklotron von Berkeley Molybdän mit Deuteronen bestrahlen. Die bestrahlte Probe wurde sofort an die beiden Gelehrten zurückgesandt. Ihnen gelang die chemische Trennung des Isotops ${}_{43}\text{Tc}^{99}$ von den übrigen Stoffen der Probe, dessen mittlere Lebensdauer $T=6$ h beträgt. An dieser kurzen Zeit scheiterte die Gewinnung größerer Mengen. Tc^{99} , ein anderes Isotop desselben

Element	Symbol	Entdeckt	Entdeckungsreaktion	Isotopenanzahl	Halbwertszeiten	
					T_{\max}	T_{\min}
Technetium	${}_{43}\text{Tc}$	1937	${}_{42}\text{Mo}^{98} + n \rightarrow {}_{42}\text{Mo}^{99} \rightarrow {}_{43}\text{Tc}^{99} + e^-$	15	Tc^{97} 2,6 · 10 ⁶ a	Tc^{102} 5 s
Promethium	${}_{61}\text{Pm}$	1945	a) p-Bestrahlung von ${}_{60}\text{Nd}^{142}$ b) Uranspaltung	15	Pm^{145} , 18 a	Pm^{142} , 40 s
Astatin	${}_{85}\text{At}$	1940	${}_{83}\text{Bi}^{209} + \alpha \rightarrow {}_{85}\text{At}^{211} + 2n$	19	At^{210} , 8,3 h	At^{213} , 10 ⁻⁶ s
Francium	${}_{87}\text{Fr}$	1939	a) ${}_{89}\text{Ac}^{227} \rightarrow {}_{87}\text{Fr}^{223} + \alpha$ b) ${}_{89}\text{Ac}^{225} \rightarrow {}_{87}\text{Fr}^{221} + \alpha$	8	Fr^{223} , 22 m	Fr^{218} , 0,005 s
Neptunium	${}_{93}\text{Np}$	1940	${}_{92}\text{U}^{238} + n \rightarrow {}_{92}\text{U}^{239} \rightarrow {}_{93}\text{Np}^{239} + e^-$	11	Np^{237} , 2,2 · 10 ⁶ a	Np^{232} , 16 m
Plutonium	${}_{94}\text{Pu}$	1941	${}_{92}\text{U}^{238} + d \rightarrow {}_{94}\text{Pu}^{238} + 2n$	15	Pu^{244} , 7,5 · 10 ⁷ a	Pu^{233} , 20 m
Americium	${}_{95}\text{Am}$	1945	${}_{94}\text{Pu}^{239} + 2n \rightarrow {}_{95}\text{Am}^{241} + e^-$	10	Am^{243} , 8000 a	Am^{246} , 25 m
Curium	${}_{96}\text{Cm}$	1944	${}_{94}\text{Pu}^{239} + \alpha \rightarrow {}_{96}\text{Cm}^{242} + n$	13	Cm^{247} , > 4 · 10 ⁷ a	Cm^{249} , 64 m
Berkelium	${}_{97}\text{Bk}$	1949	${}_{95}\text{Am}^{241} + \alpha \rightarrow {}_{97}\text{Bk}^{243} + 2n$	8	Bk^{247} , ~10 ⁴ a	Bk^{244} , 4,4 h
Californium	${}_{98}\text{Cf}$	1950	${}_{96}\text{Cm}^{242} + \alpha \rightarrow {}_{98}\text{Cf}^{245} + n$	11	Cf^{251} , ~800 a	Cf^{244} , 25 m
Einsteinium	${}_{99}\text{Es}$	1952	${}_{92}\text{U}^{238} + n \rightarrow {}_{99}\text{Es}^{253}$ bei thermonuklearer Reaktion	10	Es^{254} , 480 d	Es^{246} , 7,3 m
Fermium	${}_{100}\text{Fm}$	1953	${}_{92}\text{U}^{238} + xn \rightarrow {}_{100}\text{Fm}^{255}$ bei thermonuklearer Reaktion	9	Fm^{253} , ~4,5 d	Fm^{250} , 30 m
Mendelevium	${}_{101}\text{Md}$	1955	${}_{99}\text{Es}^{253} + \alpha \rightarrow {}_{101}\text{Md}^{256} + n$	2	Md^{256} , 1,5 h	Md^{255} , 30 m
Nobelium	${}_{102}\text{No}$	1958	${}_{96}\text{Cm}^{246} + {}_6\text{C}^{12} \rightarrow {}_{102}\text{No}^{254} + 4n$	3	No^{253} , 10 m	No^{254} , 3 s
Lawrencium	${}_{103}\text{Lw}$	1961	${}_{98}\text{Cf}^{252} + {}_5\text{B}^{10} \rightarrow {}_{103}\text{Lw}^{257} + 5n$	1	8 s	8 s

Elements, konnte man im Reaktor erzeugen, und zwar liefert die Reaktion



aus 1 kg ${}_{92}\text{U}^{235}$ 26 mg Tc^{99} (Mo tritt unter den Spaltprodukten des Urans auf!).

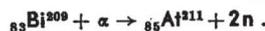
Die Lebensdauer des langlebigsten Tc-Isotops beträgt $T = 2,6 \cdot 10^6$ a. 1950 besaß man schon einige mg davon. Im Strahlungsgleichgewicht enthält 1 kg ${}_{92}\text{U}^{235}$ etwa 10^{-12} g Tc^{99} .

Promethium (${}_{61}\text{Pm}$). Pm gehört zu den seltenen Erden und ist schon aus diesem Grunde von den anderen Lanthaniden chemisch schwer zu separieren. Wie so oft stand auch hier ein zur rechten Zeit neuentwickeltes Experimentiermittel zur Verfügung, mit dessen Hilfe die Schwierigkeiten elegant überwunden werden konnten.

Das neue Gerät war der Ionenaustauscher, eine mit Harz gefüllte Glasröhre, die das Lösungsgemisch passieren muß. Es war bekannt, daß die Durchlaufzeit um so kürzer ausfällt, je höher die Atommasse ist. Man bestrahlte also seltene Erden, z. B. ${}_{60}\text{Nd}$, im Zyklotron und hoffte, auf diese Weise im Verlauf der Prozedur auch ${}_{61}\text{Pm}$ zu erhalten. Der Lösung der bestrahlten Probe wurde ${}_{62}\text{Sm}$ beigefügt, welches wegen seines höheren Gewichts vor Pm den Ionenaustauscher verlassen mußte. Wenn man also die aus dem Austauscher tretenden Tropfen einzeln sammelt und jeden für sich entweder chemisch oder nach seiner typischen Radioaktivität untersucht und die dem Pm im Periodensystem benachbarten Elemente ${}_{60}\text{Nd}$ und ${}_{62}\text{Sm}$ festgestellt hat, so kann Pm nur in jenen Tröpfchen stecken, die zwischen den Nd-hältigen und den Sm-hältigen ausgetreten sind. Zeigen sie beispielsweise eine Radioaktivität (Nd, Sm sind stabil!), so ist der Nachweis von Pm geglückt. Man kann aber auch Nd, Sm durch Vorbestrahlung künstlich radioaktiv machen und mit Zählgeräten die unterschiedliche Aktivität feststellen.

Dieerspaltung liefert ein langlebiges Pm-Isotop. Den ersten sicheren Nachweis führten L. E. Glendenin und J. A. Marinsky im Clinton Laboratory nahe Oak Ridge 1945. ${}_{61}\text{Pm}^{147}$ wurde rein dargestellt ($T = 3,7$ a).

Astatin (${}_{85}\text{At}$). ${}_{85}\text{At}^{211}$ wurde 1940 (vor Pm) von D. R. Corson, K. R. Mackenzie und E. Segrè — letzterer hatte sich zu diesem Zweck von Italien nach Berkeley begeben, weil nur dort ein geeignetes Zyklotron zur Verfügung stand — hergestellt. Durch Beschuß von Bi mit beschleunigten α -Teilchen erhielt man gemäß



${}_{85}\text{At}^{211}$ war leicht nachweisbar, weil es auf zwei verschiedene Arten zerfällt: Ein Teil der At-Atome zerfällt nach dem Schema $\dots {}_{85}\text{At}^{211} \rightarrow {}_{83}\text{Bi}^{207}$ (α -Zerfall), der andere Teil gemäß $\dots {}_{85}\text{At}^{211} + e^{-} \rightarrow {}_{84}\text{Po}^{210} \rightarrow {}_{82}\text{Pb}^{207} + \alpha$ (β -Einfang mit anschließendem α -Zerfall).

Die unterschiedlichen Energien der α -Strahlung gestatten die Identifizierung. Da das langlebigste Isotop binnen 8,3 h zerfällt, ist die Ansammlung größerer Mengen undurchführbar.

Francium (${}_{87}\text{Fr}$). Obwohl die österreichischen Physiker St. Mayer, V. Heß und A. F. Paneth schon 1914 diesem instabilen Element auf der Spur waren — sie hatten bemerkt, daß der β -Strahler ${}_{89}\text{Ac}^{227}$ in ganz geringem Ausmaß α -Teilchen emittierte (nach dem Verschiebungsgesetz bedeutete dies die Umwandlung eines Teiles der Ac-Atome in ein Element der Massenzahl 223 und der Kernladungszahl 87) —, gelang der endgültige Nachweis erst 1939 der französischen Physikerin M. Perey. Da unter den acht Fr-Isotopen die größte Halbwertszeit nur 22 m beträgt, kam ein chemischer Nachweis kaum in Betracht. Mlle Perey ließ sich vielmehr von der Radioaktivität jener der beiden Tochtersubstanzen des Ac leiten, die aus ihm durch α -Zerfall entstanden.

Nachdem in späteren Jahren ${}_{93}\text{Np}$ synthetisiert werden konnte, entdeckte man, daß Np das erste Glied einer vierten Zerfallsreihe ist, in der auch ${}_{87}\text{Fr}^{221}$ aufscheint, das aus Ac^{225} gemäß ${}_{89}\text{Ac}^{225} \rightarrow {}_{87}\text{Fr}^{221} + \alpha$ hervorgeht.

Die Transurane

Neptunium (${}_{93}\text{Np}$). Die wachsende Anzahl bekannter Kernreaktionen ließ den Gedanken aufkommen, ${}_{92}\text{U}^{238}$ mit Neutronen zu bestrahlen. Falls ein Urankern dabei

Neutronen einfängt und diese sich danach unter Emission je eines Elektrons in Protonen umwandeln, besitzt der neue Kern eine höhere Ladungszahl als 92. Überraschenderweise produzierte die n-Bestrahlung eine übergroße Zahl von Tochterkernen. Das war zunächst schwer verständlich. Erst nachdem die Vorgänge genauer untersucht waren, wußte man, woher die vielen neuen Teilchen stammten: aus der Uranspaltung! Dieser Vorgang, der die technische, militärische und politische Situation der Welt einschneidenden Änderungen unterworfen hatte, war also Nebenerscheinung eines in ganz andere Richtungen zielenden wissenschaftlichen Unternehmens, der Suche nach Transuranen. Wieder einmal hat die von Außenstehenden so verächtlich apostrophierte Grundlagenforschung, obwohl sie auch hier keinem „praktischen“ Erfordernis diene, Ergebnisse von ungeheurer Tragweite gezeitigt.

Im Jahre 1940 beschossen McMillan und P. H. Abelson in Berkeley eine dünne Schicht von ${}_{92}\text{U}^{238}$ mit Neutronen. Sie fanden zwei Tochterprodukte und bestimmten deren Energie durch Messung der Weglängen, die sie (infolge der Impulserhaltung beim Zerfall) in entgegengesetzten Richtungen zurücklegten. Auf Grund der vorhandenen Radioaktivität mußte noch eine dritte Tochterkomponente mit der Halbwertszeit $T = 2,35$ d existieren, die jedoch die Uranschicht kaum verließ. Ihre aus diesem Umstand als geringfügig erkennbare Energie wies auf einen Neutroneneinfang hin. Tatsächlich hatte sich folgendes ereignet:



Das etwas leichtere Isotop ${}_{93}\text{Np}^{237}$ wurde 1942 von G. Seaborg, McMillan, J. W. Kennedy und A. C. Wahl in Berkeley entdeckt. Da sich seine Halbwertszeit auf $T = 2 \cdot 10^6$ a beläuft, kann es in großen Mengen hergestellt und aufbewahrt sowie auf normale Art behandelt werden. Die Produktion erfolgt im Uranbrenner.

Np ist das erste Element der Gruppe der Aktiniden, die eine erhebliche Analogie mit den seltenen Erden (= Lanthaniden) besitzen, weshalb über diese einige Bemerkungen erforderlich sind.

Eine große Schwierigkeit des Periodensystems bestand in der Unmöglichkeit, die seltenen Erden wie andere Elemente einzuordnen. Um den Aufbau des Systems nicht zu stören, war man gezwungen, die 14 Elemente ${}_{58}\text{Ce}$ bis ${}_{71}\text{Lu}$ zwischen den auf Grund der chemischen Eigenschaften im System benachbarten Elementen ${}_{57}\text{La}$, ${}_{72}\text{Hf}$ als Sondergruppe einzuschalten. Der wahre Grund für diese Notwendigkeit wurde offenbar, als eine befriedigende Theorie des Schalenaufbaus der Elektronenhülle vorlag.

Während bei ${}_{36}\text{Kr}$ bei steigender Kernladungszahl Z die hinzukommenden Hüllenelektronen auf der jeweils äußersten Schale untergebracht werden, setzt bei ${}_{37}\text{Rb}$ ein uneinheitlicher Zubau ein. Es bleiben gewisse Unterschalen ganz oder teilweise unbesetzt, die neuen Elektronen bevorzugen die noch offenen höheren Schalen.

Bei ${}_{58}\text{Ce}$ beginnt nun der abgebrochene Ausbau der — bereits tiefer als die äußerste Schale liegenden, aber trotzdem bisher unbesetzt gebliebenen — Unterschale 4f (d. h. Hauptquantenzahl $n = 4$, Nebenquantenzahl $l = 3$) nachgeholt zu werden. Nach dem Pauli-Prinzip sind zur Komplettierung von 4f 14 Elektronen erforderlich. Bei ${}_{71}\text{Lu}$ sind alle 14 Elektronen in 4f untergebracht. Die geringe chemische Verschiedenheit der seltenen Erden resultiert aus der weitgehenden Übereinstimmung in der Elektronenkonfiguration der äußersten Schale, von der die chemischen Eigenschaften in erster Linie abhängen.

Der gleiche Vorgang wiederholt sich mit der Unterschale 5f ($n = 5$, $l = 3$), deren Besetzung mit dem Element ${}_{90}\text{Th}$ ihren Anfang nimmt und — da wieder 14 Elektronen einzubauen sind — bei der Kernladungszahl $Z = 103$ endet. Diese Gruppe erhielt wegen ihrer Instabilität die Bezeichnung Aktiniden. Sie muß im Periodensystem ebenso als Gesamtheit eingeschaltet werden wie die seltenen Erden. Die Aktiniden waren im Jahre 1961 vollzählig erzeugt und nachgewiesen, ihr Endglied ist Lawrencium ${}_{103}\text{Lw}$.

Das chemische Verhalten innerhalb der Gruppe weist aus denselben Gründen wie bei den Lanthaniden nur geringfügige Unterschiede auf. Die Mittel der chemischen Analyse können daher nur dann eingesetzt werden, wenn ausreichende Mengen der neuen Stoffe vorliegen. Das ist wohl bei den ersten Gliedern der Gruppe der Fall, nicht

aber bei den letzten, von denen lediglich wenige Atome hergestellt werden konnten. Wegen der Gleichartigkeit im Verhalten der Lanthaniden und der Aktiniden spielt die Verwendung von Ionenaustauschern eine wichtige Rolle. Die schweren Atome passieren schneller als die leichten.

Andere Identifikationsmöglichkeiten bietet die Messung der magnetischen Eigenschaften (die bereits bei Quantitäten in der Größenordnung 10^{-9} g anwendbar wird), ferner die Röntgenanalyse der Kristallstruktur sowie die Bestimmung der für jede Atomart typischen Radioaktivität. Besonders die letzte Methode lieferte weitgehende Aufschlüsse über die Natur der gesuchten Stoffe.

Für die Arbeitspräzision der beteiligten Forscherteams spricht die Tatsache, daß derzeit alle Elemente bis einschließlich ${}_{93}\text{Es}$ chemisch und physikalisch makroskopisch untersucht sind, obwohl die Halbwertszeit mitunter kurz und die vorhandenen Mengen gering sind. So standen bei Es^{253} ganze 10^{-8} g mit der Halbwertszeit $T=20$ d zur Verfügung. Im Gegensatz dazu sind heute Np und Pu tonnenweise vorhanden.

Plutonium (${}_{94}\text{Pu}$). Das instabile ${}_{93}\text{Np}^{239}$ ist ein β -Strahler. Nach dem Verschiebungsgesetz geht es in ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ über: ${}_{93}\text{Np}^{239} \rightarrow {}_{94}\text{Pu}^{239} + e^-$. In ${}_{93}\text{Np}^{239}$ bildet sich somit stets ohne weiteres Zutun ${}_{94}\text{Pu}^{239}$. Die Langlebigkeit dieses Isotops ($T=24.000$ a) erschwert den Nachweis mit Hilfe der Zerfallsstrahlung beträchtlich. Schon 1941 entdeckten G. Seaborg, McMillan und A. C. Wahl die Reaktion



${}_{94}\text{Pu}^{238}$ ist ein α -Strahler mit der viel kleineren Lebensdauer $T=86,4$ a, also gut an seiner Zerfallsstrahlung erkennbar.

Im gleichen Jahr wurde die Verschiedenheit im Verhalten von U^{239} und Pu^{239} erforscht. Besonders folgenschwer war die Erkenntnis, daß Pu^{238} durch langsame Neutronen gespalten wird. 1942 gelang B. B. Cunningham und L. B. Werner in Chicago die Reindarstellung einiger Mikrogramm Pu^{239} — die erste Isolierung einer größeren Menge eines künstlichen Stoffes —, 1950 waren es einige Kilogramm, die inzwischen auf viele Tonnen angewachsen sind. Die Verwendung des Isotops in der Reaktortechnik ist seit Jahren weit verbreitet.

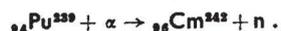
Pu tritt 3-, 4-, 5- und 6-wertig auf. Die Lösungen von Pu variieren je nach der Wertigkeit in der Farbe, und zwar erscheinen die Lösungen in der angegebenen Valenzfolge blau, grün oder bernstein, farblos, hellgelb. Wegen der hohen Radioaktivität muß die Verwendung im Schulversuch, die sehr einprägsam wäre, unterbleiben.

Americium (${}_{95}\text{Am}$). G. Seaborg, R. A. James und A. Ghiorso produzierten Anfang 1945 das Pu-Isotop mit der Massenzahl 241, das als β -Strahler bekannt war. Sein Zerfall

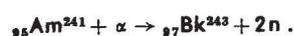


lieferte Americium als Tochtersubstanz mit $T=458$ a. Durch Einsatz ultramikrochemischer Methoden (diese Methoden muß man heranziehen, wenn die Radioaktivität „größerer“ Mengen gefährliches Ausmaß erreicht) waren 1950 sichtbare Mengen von Am vorhanden. Werner und Perlmann setzten diese in einem Reaktor der Bestrahlung aus und erhielten das nächste Glied in der Aktinidenreihe, das Curium.

Curium (${}_{96}\text{Cm}$). Cm wurde aber schon vor der Entdeckung von Am durch G. Seaborg, R. A. James und L. O. Morgan gefunden. Sie beschossen im Zyklotron Pu mit α -Teilchen und erhielten ${}_{96}\text{Cm}^{242}$ mit $T=1625$ d:



Berkelium (${}_{97}\text{Bk}$). 1949 bestrahlten S. G. Thompson, A. Ghiorso und G. Seaborg einige Milligramm ${}_{95}\text{Am}$ mit α -Teilchen der Energie 35 MeV im Zyklotron von Berkeley und erhielten die Reaktion



Die Halbwertszeit beträgt 4,5 h. 1962 besaß man $3 \cdot 10^{-9}$ g Bk-Chlorid.

Californium (${}_{98}\text{Cf}$). Je höher die Kernladungszahl ansteigt, desto feiner müssen die angewendeten Trennungs-

methoden werden. Die Unterscheidung auf Grund der Energie der emittierten α -Strahlen wird durch drei Umstände gefördert:

- Diese Energie kann sehr genau gemessen werden.
- Sie ist insofern für die einzelnen Isotope typisch, als jedes vorwiegend eine scharf definierte α -Energie abgibt.
- Das Muster der α -Emission der schwersten Elemente ist durch große Regelmäßigkeit ausgezeichnet.

Daher ist man in der Lage, die Halbwertszeit für den α -Zerfall ziemlich genau vorherzusagen.

Kommt es zur spontanen Spaltung (fission) eines Atoms, dann ist die zugehörige Halbwertszeit T für das spaltende Isotop charakteristisch. T hängt in bekannter Weise vom Atomgewicht ab und eignet sich daher für die Prognose unbekannter Elemente. Bei ${}_{100}\text{Fm}$ stimmte z. B. der ziemlich stark von der Norm abweichende theoretische Wert von T mit dem empirisch gefundenen trotzdem recht gut überein.

Ferner sind einige theoretische Aussagen über die Wahrscheinlichkeit möglich, mit der eine schwere Atomart bei Beschuß mit Partikeln einer gegebenen Energie in andere Atomarten übergeht. Dieser Umstand erlaubte, die Experimente zur Erzeugung neuer Kerne in geeigneter Weise zu planen.

Nachdem aus ${}_{95}\text{Am}$ durch Neutronenbeschuß einige Mikrogramm ${}_{96}\text{Cm}$ gewonnen waren, wurden letztere im Jahre 1950 im 60-Zoll-Zyklotron von Berkeley mit 35-MeV- α -Teilchen bombardiert. Es entstand ${}_{98}\text{Cf}^{245}$ mit $T=45$ m. Zum Nachweis standen nur 5000 Cf-Atome zur Verfügung. Bald aber hatte man gelernt, langlebigere Isotope sowohl von Bk als auch von Cf herzustellen, indem man größere Mengen von Pu, Am, Cm einer intensiven Neutronenbestrahlung aussetzte. Neutroneneinfang und nachfolgender β -Zerfall führten zu den höheren Kernladungszahlen.

Natürlich benützte man zum Nachweis von Cf ausgiebig den Ionenaustauscher. Unter der Glasröhre, aus welcher die Lösungstropfen fielen, wurde die mit vielen Metallscheibchen besetzte Peripherie eines Drehtisches vorbeigeführt. Sobald ein Tröpfchen auf einer Scheibe gelandet war, drehte sich der Tisch ruckartig gerade so weit, daß die nächste Auffangscheibe unter der Austrittsöffnung des Austauschers stehen blieb. Jeder Tropfen wurde gesondert chemisch und radiometrisch getestet. Die ersten Tropfen enthielten die schwersten Atome und zeigten die stärkste Radioaktivität. Die Aktivitätsabnahme von Tropfen zu Tropfen wurde auf Grund der registrierten Impulse des Zählgerätes graphisch dargestellt. Dann machte man denselben Versuch mit den beteiligten Aktiniden chemisch entsprechenden seltenen Erden (die vorher im Reaktor durch Neutronenbeschuß künstlich radioaktiv gemacht worden waren) und verglich die Ergebnisse. Die bedeutend größere Menge des Lanthaniden-Lösungsgemisches wirkte sich zwar auf die Kurvenform aus. Durch ein einfaches Reduktionsverfahren konnte der Vergleich der Kurven dennoch ausgeführt werden. 1960 existierten $3 \cdot 10^{-7}$ g Cf-Oxychlorid.

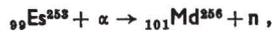
Einsteinium (${}_{99}\text{Es}$) und Fermium (${}_{100}\text{Fm}$). Nach der thermonuklearen Testexplosion vom November 1952 im Pazifik flogen Flugzeuge über das Versuchsgelände hinweg und sammelten auf Filterpapier winzigste Quantitäten der vom Versuch stammenden Schwebstoffe. Die Untersuchung des Papiers im Argonne- sowie im Los Alamos-Laboratorium bestätigte den Verdacht, daß sich Elemente mit Ordnungszahlen über 98 gebildet haben könnten. Die Behandlung erfolgte so rasch als möglich im Ionenaustauscher. Als die Indizien für das Vorhandensein der Elemente Nr. 99 und 100 sprachen, schaffte man viele Zentner Korallen aus den Atollen des Testgeländes heran, denn nur im Falle der Manipulation ausreichender Mengen konnte eine eindeutige Entscheidung fallen. Tatsächlich fand man die beiden Elemente und benannte sie nach Einstein und Fermi. Für Fm standen lächerliche 200 Atome zur Verfügung!

Es gelang aber auch — noch vor der Publikation der Erfolgsberichte — nach zwei bis drei Jahre währendender Bestrahlung von einigen Gramm Pu im Testreaktor in Arco, Idaho, mit einem Neutronenstrom sehr hoher Dichte, Es und Fm zu erzeugen. Die Explosion hatte denselben Effekt in vielleicht 10^{-6} s erzielt! In der Bombe wurde gewöhnliches U^{238} thermonuklear umgewandelt. Durch n-Einfang bildeten sich die Atomarten sämtlicher

Massenzahlen von 238 bis 255. Der nachfolgende β -Zerfall erhöhte die Kernladungszahl.

Mendelevium ($_{101}\text{Md}$). Die Suche nach dem Element Nr. 101 stellte die Experimentatoren vor nahezu unlösbare Aufgaben. Noch standen keine wägbaren Mengen der Ausgangssubstanz $_{99}\text{Es}^{253}$, die als Target dem α -Beschluß mit der damals maximal erreichbaren Energie des 60-Zoll Zyklotrons in Berkeley ausgesetzt werden sollte, zur Verfügung, sondern nur etwa 10^9 Atome. Nach mehrstündiger α -Bestrahlung von Es war die Entstehung eines einzigen Atoms Nr. 101 zu erwarten, für dessen Halbwertszeit der entmutigend kurze Zeitraum von $T=10$ m vorhergesagt war. Unter einer Milliarde Targetatomen mußte also alle paar Stunden ein einziger Md-Kern herausgefischt und binnen 10 m nach Durchlaufen des Ionenaustauschers identifiziert werden. Angesichts dieser Lage dachte man über geeignetere Methoden nach und ging dann folgendermaßen vor.

Das Es-Target wurde elektrisch auf einer Goldfolie fixiert und blieb natürlich unsichtbar. Die α -Teilchen durchsetzten zuerst das Gold. Reagierte nun eines in der gewünschten Weise mit Es



dann erfuhr der Md-Kern einen Stoß, der ihn in der Flugrichtung der α -Teilchen aus dem Massenverband riß. Er wurde von einer zweiten Au-Folie aufgefangen und in ihr festgehalten. (Die beiden Au-Folien befanden sich somit auf verschiedenen Seiten des Es-Targets.) Die zweite Folie enthielt nach der erforderlichen Zeit wohl Md, aber kein Es. Sie wurde aufgelöst und wanderte in den Ionenaustauscher. Bei der Messung der Aktivität der Tropfen erlebte man die nächste böse Überraschung an Stelle der erhofften Identifizierung. Selbst wenn die ganze Prozedur schon fünf Minuten nach dem Entstehen von Md beendet war, zeigte sich keine für Md charakteristische α -Aktivität.

Wie sich herausstellte, sendet das in der Luft in geringen Mengen auftretende instabile Gas Radon (Zerfallsprodukt von Ra) boshafterweise α -Teilchen der gleichen Energie wie Md aus. Da ein Unglück nicht allein kommt, erscheinen überdies die Tochterkerne des zerfallenden Radons nach der Separation im Ionenaustauscher am selben Platz wie Md. Auch auf diese Weise kam man dem Ziel nicht näher.

Da jede Pechserie einmal endet, entdeckte man auch hier einen Effekt, der die fast erloschenen Hoffnungen wieder belebte. Das Zählgerät verhielt sich gelegentlich so, als ob eine spontane Atomspaltung stattgefunden hätte. Dafür gab es nur eine plausible Interpretation: Aus $_{101}\text{Md}$ hatte sich ein kurzlebiger Tochterkern $_{100}\text{Fm}$ gebildet, der durch spontane Spaltung zerfiel. Also kümmerte man sich nicht mehr viel um die α -Aktivität, sondern wandte die Aufmerksamkeit den Spaltungsprozessen zu. Es gab noch eine angenehme Überraschung: Die vorausgesagte Halbwertszeit des Md von 10 Minuten stimmte nicht, ihr wirklicher Wert war länger, nämlich 30 Minuten. Andererseits blieb die Bildungswahrscheinlichkeit von Md wesentlich hinter den Erwartungen zurück. Pro Versuch wurde im Durchschnitt ein Md-Atom erzeugt (d. h. gelegentlich überhaupt keines).

Nach Klärung des gesamten komplexen Sachverhaltes schritt man an die Ausführung des Versuches. Um sicherzugehen, wurden drei selbständige Es-Targets dem α -Strom ausgesetzt, jedes drei Stunden lang. Unmittelbar darauf wanderten sie in der geschilderten Weise durch den Ionenaustauscher, der das Gemisch von Cm, Cf, Es, Md trennte. Die Tropfen wurden von fünf Zählern beobachtet, welche auf spontane Spaltung ansprachen. Das Ergebnis war eindeutig: Die Fm-hältigen Tropfen produzierten acht Spaltungen, die Md-hältigen fünf, alle anderen keine. Damit war die Existenz des Md gesichert. Die Halbwertszeit von $_{100}\text{Fm}^{256}$ für spontanen Zerfall beträgt etwa drei Stunden.

Später stand so viel Es für das Target zur Verfügung, daß man 100 Md-Atome gleichzeitig herstellen konnte. Mit ihrer Hilfe wurde der Zerfall $\text{Md}^{256} \rightarrow \text{Fm}^{256}$ sogar chemisch nachgewiesen, da sich Md wie das ihm unter den Lanthaniden entsprechende Tm verhält.

Nobelium ($_{102}\text{No}$). Die Erzeugung der Transurane jenseits Md erforderte abermals neue Methoden, weil die unmittelbar vorangehenden Kernarten so kurzlebig sind, daß sie nicht mehr in größeren Mengen erhalten und als Ausgangsmaterial verwendet werden konnten. Daher versuchte man, besser greifbare — jedoch nicht mehr

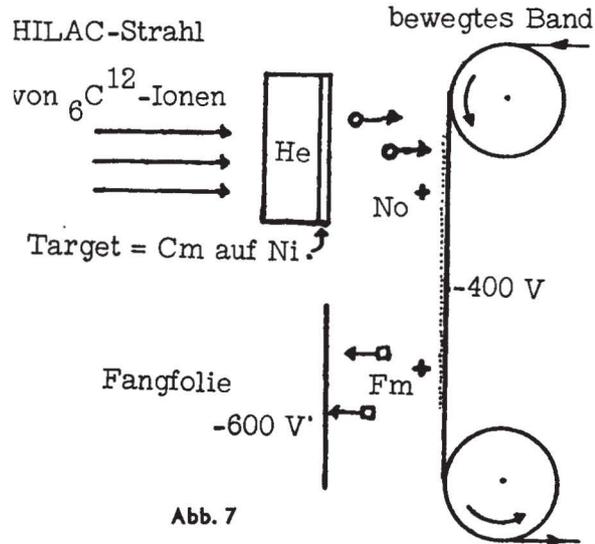


Abb. 7

benachbarte — Aktiniden mit schwereren als He-Ionen zu beschleßen. Im Falle einer Anlagerung könnten so höhere Transurane entstehen als Md.

In dem 1957 fertiggestellten Ionenbeschleuniger HILAC (= Heavy-Ion Linear Accelerator) wurden $_{6}\text{C}^{12}$ -Ionen beschleunigt und der Ionenstrahl auf das Target gelenkt. Dieses war eine Schicht von Cm-Isotopen, darunter $_{98}\text{Cm}^{248}$, die auf einer dünnen Nickelfolie haften. Cm hatte man mittels einjähriger Neutronenbestrahlung von Pu gewonnen.

Wenn im Target ein Atom der Kernladungszahl 102 entsteht, besitzt es zunächst noch keine Elektronenhülle, ist also ein positives Ion. Knapp hinter dem Target befindet sich ein bewegtes Metallband (siehe Abb. 7), das auf dem negativen Potential -400 V gehalten wird und die allfällig auftretenden No-Ionen anziehen mußte. Diese setzen sich dann im Metallband fest, zerfallen aber — wie sich in Einklang mit der Prognose herausstellte — schon nach drei Sekunden. In dieser Zeitspanne hat sich das Band so weit fortbewegt, daß die auf ihm deponierten No-Atome direkt einer Fangfolie gegenüberstehen. Die Fangfolie besitzt das Potential -600 V, ist also gegen das Band negativ geladen. Da die No-Atome gerade in dem Augenblick am wahrscheinlichsten zerfallen



in dem sie der Fangfolie am nächsten sind, werden die Fm-Ionen von der Fangfolie angezogen und absorbiert. Nach einer der Halbwertszeit des Fm angepaßten Beschußzeit wurde die Fangfolie senkrecht zur Bewegungsrichtung des Bandes in fünf Teile zerschnitten. Die Strahlung jedes einzelnen Teiles wurde gesondert und gleichzeitig genauestens untersucht. So erfuhr man die Anzahl der auf jedem Teilstück haftenden Fm-Atome. Ihre Verteilung auf den fünf Folienteilen stimmte genau mit der Verteilung überein, die sich theoretisch für eine No-Halbwertszeit von $T=3$ sec ergab.

Zur Erhärtung der Ergebnisse der Strahlungsanalyse wurde auch die Identifizierung der Fm-Tochteratome auf der Fangfolie vorgenommen. Man löste den radioaktiven Folienbelag und trennte die Komponenten im Ionenaustauscher. Nur ein Tröpfchen enthielt Fm-Atome, und zwar genau neun Stück, entsprechend den neun Zerfallsakten, die der Zähler angezeigt hatte. Um ganz sicherzugehen, fügte man der Flüssigkeit vor dem Eintritt in den Ionenaustauscher Markierungssubstanzen (tracers) bei. Diese waren radioaktives Thulium und Yttrium einerseits, Cf und Es andererseits. Die beiden ersten Tracers verlassen etwas vor Fm, die zwei letzten etwas nach Fm den Austauscher. Da ihre Radioaktivität genau bekannt war, konnte die Aktivität des Tröpfchens, das zwischen den beiden Tracerpaaren austrat, nur von Fm stammen.

Eine andere Überprüfung bestand darin, daß man das bewegte Band unerhört rasch in den Bereich eines α -Zählers brachte — das mußte geschehen, ehe ein nennenswerter Teil der drei Sekunden währenden Lebensdauer vergangen war —, der die α -Zerfallsakte der No-Atome registrierte. Auch diese Methode bestätigte den

Wert $T=3$ sec. Die Energie der α -Komponente betrug 8,3 MeV.

Die produzierende Reaktion lautet



Lawrencium (${}_{103}\text{Lw}$). Das vorläufig letzte künstliche Element erhielt man im Jahre 1961 durch Beschuß der Cf-Isotope mit den Massenzahlen 250, 251, 252 mit beschleunigten ${}_{8}\text{B}^{10}$ - und ${}_{8}\text{B}^{11}$ -Ionen. Ähnlich wie bei No fallen die positiven Lw-Ionen, die durch Rückstoß aus dem Cf-Target treten, auf ein unter dem Target befindliches Kupferband, das auf negativem Potential gehalten wird. Das Band schiebt sich in Abständen von wenigen Sekunden ruckartig weiter. Dadurch gelangen die Lw-haltigen Gebiete des Bandes in die unmittelbare Nachbarschaft von Festkörperdetektoren (genauer Si-Au- α -Detektoren), welche den α -Zerfall der Lw-Atome hinsichtlich Energie und Ausmaß in seiner Abhängigkeit von der Zeit registrieren. Auf Grund der Zählraten ergab sich für Lw die Halbwertszeit $T=8$ sec. Die Energie der α -Teilchen war 8,6 MeV.

Der Beschuß des Cf-Targets mit anderen Ionen als Bor führten zu keinem Ergebnis. Lw entstand beim Prozeß



Schlußbemerkungen. Am Ende dieses Berichts muß wohl noch auf einen Umstand hingewiesen werden, der die Bedeutung der Leistung von O. Lawrence ins rechte Licht rückt. Lawrence, dessen Namen das Element Nr. 103 trägt, war der Erfinder des Zyklotrons. Er wurde durch die Verleihung des Nobelpreises geehrt. Mit dem von ihm 1939 erbauten 60-Zoll-Zyklotron in Berkeley wurden nicht weniger als sechs Transurane erstmalig erzeugt, nämlich die Elemente mit den Ordnungszahlen 93, 94, 96, 97, 98 und 101. Die Maschine stand 22 Jahre lang bis 1961 in Betrieb.

Die Darstellung noch höherer Transurane wäre zwar reizvoll — Element Nr. 104 gehört nicht mehr zu den Aktiniden, ebenso wie ${}_{72}\text{Hf}$ das erste Element nach den seltenen Erden ist. Wie nicht anders zu erwarten, wächst die Instabilität mit steigender Kernladungszahl, bei No und Lw zählen die Halbwertszeiten nur mehr nach Sekunden. Daher ist von chemischen Trennungs- und Nachweismethoden kein Fortschritt mehr zu erhoffen. An ihrer Stelle wird die Massenspektroskopie stärker eingesetzt werden müssen. Ferner wird der Beschuß der schwersten verfügbaren Atome mit leichten Ionen erfolgen müssen, anders können die Aufbauchancen nicht verbessert werden.

Die amerikanischen Bemühungen in dieser Richtung sind im „National Transplutonium Production Program“ koordiniert. Dieses sieht mehrere Schritte vor.

- 20 kg Pu^{239} werden im Reaktor der Savannah River Plant bestrahlt. Dabei werden Pu^{242} , Am^{243} , Cm^{244} in größeren Mengen entstehen.
- In regelmäßigen Zeitabständen werden die letztgenannten drei Stoffe dem Reaktor entnommen, chemisch getrennt und in das Oak Ridge National Laboratory geschafft.
- Dort werden sie im HFIR intensiv bestrahlt werden und dürften Cf in der Größenordnung von Gramm, Bk in der Größenordnung von 0,1 g, Es in der Größenordnung von 0,01 g, Fm in Milligramm und einige 100 g Cm liefern.

HFIR (= High Flux Isotope Reactor) soll 1964 den Betrieb aufnehmen.

Eine weitere Quelle neuer künstlicher Elemente könnten auch unterirdische Kernexplosionen sein.

Während der Drucklegung wurde bekannt, daß im sowjetischen Kernforschungsinstitut in Dubna die Herstellung des Elements Nr. 104 gelungen sein soll.

Literatur:

- Scientific American: 1. April 1950, S. 38. I. Perlman, G. T. Seaborg: „The Synthetic Elements (I).“
2. Dezember 1956, S. 67. A. Ghiorso, G. T. Seaborg: „The Synthetic Elements (II).“
3. April 1963, S. 68. G. T. Seaborg, A. R. Fritsch: „The Synthetic Elements (III).“

G. Hertz, Lehrbuch der Kernphysik, Bd. II, Tabellenanhang II.

Quasisterne

Die Radioastronomie hat in der verhältnismäßig kurzen Zeitspanne von etwas mehr als zwei Dekaden, in der sie betrieben wird, namhafte Beiträge zur Physik des Himmels geleistet. Anders wäre der Bau großer und ziemlich kostspieliger Empfangsgeräte — man denke nur an die schwenkbaren Antennenanlagen von 100 und mehr Meter Durchmesser — kaum dem immer vorhandenen finanziellen Widerstand des staatlichen Geldgebers abgerungen worden.

Zu den ersten Aufgaben des neuen Zweiges der Himmelskunde gehört die koordinatenmäßige Fixierung der Radioquellen. Dabei geht es vielfach um die Entscheidung, ob eine Radioquelle mit einem sichtbaren Objekt zusammenfällt oder nicht. Infolge der im Vergleich zum Licht wesentlich größeren Länge der Radiowellen ist das Winkelauflösungsvermögen der Radioteleskope gering. Selbst bei Antennendurchmessern von über 100 Meter gelingt die Positionsbestimmung nur mit einer Genauigkeit von einigen Bogenminuten. Der Vergrößerung der Antenne sind unübersteigbare mechanische Grenzen gesetzt. Also ging man dazu über, mit zwei getrennten, gegeneinander verschiebbaren Empfängern zu arbeiten. Der Phasenunterschied der einfallenden Signale gestattet eine bedeutend genauere Richtungsmessung als der Einsatz von nur einem großen Gerät. Eine solche Anlage wird daher richtiger Radiointerferometer genannt.

Bis vor kurzem konnte die kosmische Radiostrahlung, soweit sie näher untersucht war, keinen Einzelstern — die Sonne macht wegen ihrer Nähe natürlich eine Ausnahme —, sondern Galaxien oder den riesigen interstellaren Wasserstoffgebieten zugeschrieben werden. (Die Spinumklappung des Elektrons im H-Atom erzeugt beispielsweise die 21,3-cm-Welle; im Weltraum erfährt ein H-Atom die Spinumkehr im Durchschnitt alle 6 Millionen Jahre.) Das ist verständlich, denn der Anteil der Radiowellen an der gesamten elektromagnetischen Emission eines Sternes ist so klein, daß er bei den großen Entfernungen nicht mehr zur Geltung kommt.

Doch ist bei den Naturwissenschaften stets für Überraschung und Abwechslung gesorgt. Im Verlaufe der systematischen Lokalisierung der Radioquellen stieß man auf 5 Objekte (Stand Ende 1963), die völlig aus der Reihe fielen. Es sind dies die Himmelskörper 3C48, 3C147, 3C196, 3C273, 3C286. (3C bezieht sich auf den dritten Cambridge Catalogue of Radio Sources, der einige 100 der kräftigsten Radioquellen koordinatenmäßig erfaßt. Zur Zeit der Drucklegung waren schon 9 Quasisterne bekannt.)

Besondere Umstände gestatteten, die Position der genannten 5 Quellen auf $1''$ genau anzugeben. Das ermöglichte den Vergleich mit den genauesten Sternkarten. Und siehe da, auf ihnen fanden sich an denselben Stellen die Bilder von — Sternen und nicht von Galaxien.

Die peinlichste Überprüfung aller Unterlagen änderte nichts an diesem überraschenden Sachverhalt. Die Messungen wurden unter anderem mit dem australischen Radiointerferometer vorgenommen, dessen zwei Antennen — je ein 60-Meter-Parabol-„Spiegel“ — in der Nähe von Sidney aufgestellt sind. Ein weiterer glücklicher Umstand beseitigte den letzten Zweifel an der Richtigkeit der Radioposition von 3C273: Gelegentlich wandert der Mond über 3C273 hinweg. Die Radiosignale erlöschen, sobald die Quelle hinter der Mondscheibe verschwindet, und setzen wieder ein, wenn sie auf der anderen Seite neuerlich auftaucht. Aus der Länge der Sendepause geht die selenographische Breite, in der die Bedeckung erfolgte, hervor. Die ungemein genaue Kenntnis der Mondbahn lieferte die präzise Position. Dabei stellte sich heraus, daß 3C273 eine Doppelquelle ist, deren Komponenten A, B den Abstand von $19,5''$ haben. Aus den Beugungserscheinungen beim Passieren des Mondrandes konnte man schließen, daß zwischen ihnen ein ziemlicher Helligkeitsunterschied besteht und daß die schwächere Quelle B leicht, die stärkere A stärkere elliptische Form aufweist. (Derzeit ist es geglückt, etwa 50 Radioquellen mit sichtbaren Himmelsobjekten zu identifizieren, Unter ihnen befinden sich die 5 eingangs erwähnten Quellen.)

Über den Ursprung der Radiostrahlung gibt es nur Vermutungen. Eine sehr wahrscheinliche Hypothese betrachtet sie als Synchrotronstrahlung von schnellen Elektronen in weit ausgedehnten Magnetfeldern. Die Herkunft der

Elektronen liegt ebenso im ungewissen wie die Entstehung der Magnetfelder. Vielleicht sind sie die Folgeerscheinungen riesiger galaktischer Explosionen. Die Radioemission der stärksten Quellen beläuft sich auf 10^{45} erg/sec. Zur Deckung dieser Leistung müßte alle 90 Minuten eine Erdkugel restlos in Energie umgewandelt werden! Nimmt man lediglich ein Alter von 10^9 Jahren an, so beträgt die Energieproduktion in diesem Zeitraum mehr als 10^{58} erg allein auf dem Radiosektor. Da die langwellige elektromagnetische Strahlung stets nur einen kleinen Bruchteil der Gesamtenergie ausmacht, ist die Schätzung der Energiefönung dieser rätselhaften Vorgänge auf 10^{60} bis 10^{61} erg keineswegs übertrieben.

Zur Illustration dieser Zahl beachte man folgendes. Würde die Sonnenmasse nur aus H bestehen und vollständig (durch Fusion) in He übergeföhrt werden, so lieferte dieser Prozeß lediglich 10^{52} erg. Obwohl die Sonne schon etliche Milliarden Jahre strahlt, ist erst etwa $1\%_{00}$ ihres Wasserstoffs in Helium übergegangen. Es wäre also der H-Gehalt fast einer kompletten Galaxis mit ihren vielen Millionen Sonnen erforderlich, um dieselbe Energiemenge zu produzieren.

Der Prozeß widerspricht aber auch dem II. Hauptsatz. Die vehementeste Explosion könnte nur Partikeln von einigen MeV Energie liefern. Statt diese in Abbremsstößen an das umgebende Medium zu verlieren, steigert sie sich auf 100 GeV und mehr. Wir beobachten also eine Entwicklung, bei der ein System von selbst (?) aus dem niedrigeren in den höheren Energiezustand übergeht.

Doch wenden wir uns wieder zurück zu den bestuntersuchten Objekten 3C48 und 3C273. Nachdem es gelungen war, die Identität der Radioquellen mit sichtbaren Gebilden einwandfrei nachzuweisen, konzentrierten sich die weiteren Untersuchungen auf die optischen Eigenschaften. Nach den Himmelsfotos waren diese Gebilde keine Galaxien, sondern zeigten das Aussehen gewöhnlicher Sterne. Die scheinbaren Helligkeiten sind $m=16$ bei 3C48 beziehungsweise $m=13$ bei 3C273 wie bei Vordergrundsternen aus unserer Milchstraße. Angesichts der Emissionsstärke ist dies unmöglich. Das war in höchstem Maße sensationell, denn normalerweise dringt nur das Licht der Galaxien aus den Tiefen des Weltraumes zu uns.

Um mehr zu erfahren, fertigte man mit Hilfe des 5-Meter-Spiegels auf dem Mount Palomar Spezialfotos der beiden „Sterne“ an. Die Expositionszeit betrug 7 Stunden. Auf der Platte entdeckte man in der Umgebung von $5''$ bis $12''$ feinste nebelartige Strukturen, die Komponente B von 3C273 war von einem ungemein schwachen nebelartigen Schimmer überdeckt. Es konnte sich daher weder um Sterne noch um Galaxien handeln. Deshalb erhielten die neuartigen Objekte den Namen Quasisterne.

Der nächste Schritt war die spektrale Analyse der Quasisterne. 3C48 zeigte 6 Linien im Bereich von 3500 Å bis 6000 Å, die zunächst aber mit keiner Linie üblicher Spektren koinzidierten. Nach langer, mühevoller Suche in den Spektralfeln und Einbeziehung der Spektren ionisierter Gase gelang es, einige Linien He^+ und O^{++++} zuzuschreiben. Die anderen schienen von hochangeregtem Ne zu stammen. Befremdlicher Weise fiel aber keine Linie von 3C48 mit einer Linie von 3C147, 3C196, 3C286 zusammen. Eine Zeitlang legte man daher den ganzen Fragenkomplex aufs Eis, nahm aber dann die Forschungen doch wieder auf. Und zwar beim Spektrum von 3C273. Da 4 der gleichfalls 6 Linien aus einleuchtenden Gründen zur gleichen Serie zu gehören schienen, hatte man es schon etwas leichter. Denn auch bei eventueller Rotverschiebung von 16% konnte es sich um 4 Wasserstofflinien handeln. Die zwei restlichen mußten dann zu O^{++} und zu ionisiertem Mg gehören.

Nun wandte man sich wieder 3C48 zu und setzte die Rotverschiebung mit 37% an, weil dann die Mg-Linie von 3C273 auch im 3C48-Spektrum aufträte, was aus verschiedenen Gründen wahrscheinlich war. Die 5 anderen Linien konnten unter dieser Voraussetzung in bekannten Spektren gefunden werden. Leider gehörte keine zu H, obwohl dies doch sehr nahegelegen hätte. Es waren Linien von O^{++} und Ne^{++++} , die bei verbotenen Übergängen entstehen. Sicher gibt es auch H-Linien, aber offenbar sind sie nicht intensiv genug, um aufzufallen.

Für die ungewöhnlich große Rotverschiebung kann es nach dem heutigen Wissen nur zwei Gründe geben. Entweder sie ist die Folge riesiger Gravitationsfelder oder die Doppler-Verschiebung weit entfernter Körper gemäß dem

Hubbleschen Gesetz über das Anwachsen der Fluchtgeschwindigkeit mit zunehmender Entfernung.

Erörtern wir zunächst die erste Version. 1961 erschien in Rußland eine Arbeit des bekannten Astrophysikers Ambarzumjan (siehe Literaturverzeichnis), welche die stabilen Zustände superdichter Materie behandelte. Darin wurde gezeigt, daß beim Ansteigen der Dichte tiefgreifende Konstitutionsänderungen eintreten.

Das normale Sternplasma setzt sich aus Kernen — überwiegend Protonen — und Elektronen zusammen. Das ist die Protonen-Elektronen-Phase.

Ab $1,28 \cdot 10^7$ g/cm³ (=Dichte der weißen Zwerge) erscheinen die ersten Neutronen (freie Neutronen sind normalerweise instabil). Die Zahl der Protonen nimmt wegen der Erhaltung der Teilchenzahl entsprechend ab. Das Plasma befindet sich in der Neutronen-Phase.

Ab $1,1 \cdot 10^{15}$ g/cm³ (kein Druckfehler!) erscheinen Hyperonen. Ihr Stabilwerden ist eine Folge des Pauli-Verbotens, da wegen der hohen Dichte die tieferen Energiezustände, als welche die leichteren Teilchen anzusehen sind, besetzt sind. Jeder Zerfall wäre aber ein Übergang in einen tieferen Quantenzustand. (Hyperonen-Phase.)

Ab 10^{16} g/cm³ sind sämtliche Hyperonenarten stabil im Plasma vorhanden. Durch die Untersuchungen Ambarzumjans war die Existenz extrem dichter Körper zumindest theoretisch als möglich erwiesen.

Superdichte Sterne von Sonnenmasse haben nur mehr einen Radius von etwa 10 Kilometer. Ihr Gravitationsfeld würde ausreichen, um die relativistische Rotverschiebung von 37% zu erklären. Dieser Interpretation stehen jedoch gewichtige Argumente entgegen. Die Atmosphäre eines solchen Sternes dürfte nur wenige 100 Meter hoch sein, da sonst in ihr eine so starke Abnahme der Schwerkraft einträte (Schweregradient!), daß in den höheren Schichten die Rotverschiebung merklich zurückginge. Das aber würde sich in einer Verbreiterung der Spektrallinien äußern, die keineswegs beobachtet wird. Außerdem müßte die Dichte der Gashölle — trotz dem ungeheuren Schweredruck — klein genug bleiben, damit überhaupt verbotene Übergänge stattfinden können. Schließlich ist die Photonenemission eines superdichten Sternes an sich sehr gering, im Widerspruch zum beobachteten Strahlungsoutput der Quasisterne.

Das starke Gravitationsfeld könnte aber auch entstehen, wenn die Sternmasse — bei normaler Dichte — 10^8 Sonnenmassen betrüge. Nun ist längst bekannt, daß bereits bei 100 Sonnenmassen Strahlungsdruck und Schwerkraft einander das Gleichgewicht halten, Ansammlungen von mehr Materie also instabil wären. Rechnungen von W. A. Fowler (Cal. Tech. Inst.) haben überdies gezeigt, daß Sterne von 10^6 — 10^8 Sonnenmassen kaum mehr Photonen ausstrahlen könnten, also optisch unbeobachtbar sind. Allerdings würde beim Schwerekollaps solcher Supersterne Energie in jener Menge frei werden, die in den Quasisternen angehäuft ist. Sie beliefe sich auf 10^{62} bis 10^{64} erg. Vielleicht lassen sich die Höchstenergien der Teilchen, die in der kosmischen Strahlung gefunden wurden (bis zu 10^{19} erg je Partikel) durch solche Vorgänge erklären.

Die erste Interpretation der Rotverschiebung im Spektrum der Quasisterne ist also ziemlich problematisch.

Bleibt die Annahme einer gewaltigen Fluchtgeschwindigkeit und damit einer nach Milliarden Lichtjahren zählenden Entfernung, wie die nachstehende Tabelle lehrt.

Objekt	Rotverschiebung	Fluchtgeschwindigkeit	Entfernung
3C48	37%	0,30 · c	4 · 10 ⁹ Lj.
3C273	16%	0,15 · c	2 · 10 ⁸ Lj.

Damit wäre 3C48 das zweitentfernteste Objekt des Himmels, das wir kennen. (Den Rekord hält ein Nebel mit dem Abstand 6 Mrd. Lj.)

Die Sichtbarkeit eines Einzelsternes in solcher Entfernung ist eine Sensation ersten Ranges. Die Sternanteile von 3C48 und 3C273 hätten danach Durchmesser von 16.000 beziehungsweise 3000 Lj. Die den Sternteil umgebenden materiellen Strukturen erstreckten sich gar über 200.000 Lj. Die Sternanteile allein hätten also die Abmessungen von $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{3}$ einer durchschnittlichen Galaxis. Trotzdem kann es sich nicht um eine Anhäufung von Einzelsternen handeln, weil sonst infolge der Richtungsstreu-

ung ihrer Bewegungen die aus allen Lichtbeiträgen zustande kommenden Spektrallinien wesentlich breiter sein müßten, als sie sind.

Quasisterne dürften also gasartige Einzelgebilde sein, deren Temperaturen bei 10.000° liegen und deren Helligkeit die einer Galaxis um den Faktor 100 übersteigt.

Dafür sprechen auch neuere photoelektrische Messungen, nach denen die Helligkeit von 3C48 im Laufe eines Jahres um 30% schwankte. Überdies verzeichnete man noch monatliche Helligkeitsveränderungen. Nur eine einheitliche Masse ist imstande, derartigen Strahlungspulsationen zu unterliegen. Freilich erhebt sich im gleichen Zuge die kaum beantwortbare Frage, wie sich diese Schwankungen über tausende Lichtjahre hinweg wie auf ein Kommando ereignen können, obwohl die höchste Signalgeschwindigkeit die des Lichtes ist. Die Annahme tausender simultaner „kleinerer“ Explosionen widerspricht statistischen Überlegungen und mußte deshalb fallengelassen werden.

Aus der Radiostrahlung können sogar Schlüsse auf das Alter der Quasisterne gezogen werden. Die im Magnetfeld gespeicherte Energie von 10^{58} bis 10^{60} erg verliert durch Synchrotronstrahlung pro Jahr 10^{52} erg. Da nur ein Teil der Energie als Radiostrahlung abgegeben wird, bewegt sich das Alter eines Quasisternes in den Grenzen 10^6 bis 10^7 Jahre. Diese geringe Zeit erklärt die Seltenheit der neuentdeckten Gebilde.

Auf Grund abermaliger Messungen von Greenstein und Schmidt ergaben sich als vorläufig letzte Daten die folgenden:

Objekt	Durchmesser	Totalmasse
3C48	1 bis 6000 Lj.	10^4 – 10^6 Sonnenmassen
3C273	6 bis 6000 Lj.	10^6 – 10^{10} Sonnenmassen

Die Spektren gleichen mehr oder weniger denen von planetarischen Nebeln, die einen heißen Stern umgeben.

Die Astronomie hat wieder einen großen Schritt vorwärts getan, vielleicht den bedeutungsvollsten in diesem Jahrhundert. Tiefgreifende Fragen wurden in diesem Zusammenhang aufgeworfen und harren der Lösung, von der wir eine beachtliche Erweiterung unseres Wissens um die Natur erwarten dürfen. Wahrhaftig, der Naturwissenschaftler kann das Staunen nie verlieren!

Literatur

1. Scientific American, Dez. 1963, S. 54. J. L. Greenstein: Quasistellar Radio Sources.
2. Soviet Astronomy, Bd. 4, Nr. 2, Sept./Okt. 1961, S. 187. V. A. Ambarzumjan u. G. S. Saakjan: The Degenerate Superdense Gas of Elementary Particles. (D. i. eine Übersetzung der Originalarbeit im Astr. Journal d. Akad. d. Wiss. d. UdSSR, Bd. 37, Nr. 2 von März/April 1961.)
3. Physics Today, Mai 1964, S. 21. Hong-Yee Chiu: Gravitational Collapse.

Astronomische Nachrichten

1. OH-Linie im Radiospektrum

Das Spektrum der aus dem Weltraum stammenden Radiostrahlung ist kontinuierlich mit Ausnahme der 21-cm-Linie (1420 MHz) des Wasserstoffes. Das ist verständlich, weil die Synchrotronstrahlung einen sehr wesentlichen Anteil an der Emission von Radiowellen hat. Synchrotronstrahlung tritt immer auf, wenn elektrische Ladungen in Magnetfeldern Kreisbahnen (allgemein: gekrümmte Bahnen) beschreiben. Diese Bewegung ist wie jede ungleichförmige Bewegung einer Ladung mit der Emission elektromagnetischer Wellen verbunden. Da die Energien der Elektronen im Weltraum ebenso wie die Stärke der auf sie wirkenden Magnetfelder stetig auf weite Wertebereiche verteilt sind, hat die kosmische Synchrotronstrahlung ein kontinuierliches Spektrum. (Der Name stammt von den großen Beschleunigern, in denen Partikeln auf Kreisbahnen laufen und durch Strahlung Energie verlieren. Das um so mehr, je kleiner ihre Masse ist.)

Die 21-cm-Linie entsteht bei der Spinumklappung des Elektrons im neutralen H-Atom. Sie versorgt uns unter anderem mit wertvollen Informationen über die Verteilung des interstellaren Wasserstoffes.

Verständlicherweise sind die Astronomen stark an der Auffindung weiterer Einzellinien im Radiospektrum interessiert. Besonders eifrig war man hinter den Deuteriumlinien her, welche bei 322–329 MHz liegen müßten (dem entspricht $\lambda = 93$ cm), konnte sie aber noch nicht auffinden.

Ende 1963 wurde jedoch vom Lincoln Observatory des MIT (=Massachusetts Institute of Technology) zwei Komponenten einer Linie des OH-Radikals bei 1665,419 und 1667,377 MHz ($\lambda = 18$ cm) nachgewiesen. Die Überprüfung in Sidney war positiv. Die OH-Linie wurde auch in Bedford (Mass.) und in Berkeley bei den Radioquellen Cassiopeia A und Sagittarius A identifiziert. Die OH-Konzentration ist etwa 10^7 mal kleiner als die des neutralen Wasserstoffes.

Literatur: Umschau i. W. u. T., 1. 4. 64, S. 217, Heft 7.

2. Roter Fleck auf Jupiter

Auf Grund langjähriger Beobachtung kann folgendes über ihn gesagt werden:

Sein Ost-West-Durchmesser ist etwa 40.000 km.

Er ist nicht auf der Jupiteroberfläche fixiert, weil seine Rotation zeitlich nicht konstant ist.

Seine Veränderungen (Farbwechsel von Rot in Grau bis Weiß) scheinen von Massen zu stammen, die an ihm in der Drehrichtung des Planeten vorbeiströmen.

Der ungestörte Fleck ist rot.

Dunkle Massen, die ihn von Osten anströmen, werden schon in einem Winkelabstand von 20° gebremst und ziehen an seiner Nordseite deformiert vorbei. An seiner Südseite erfahren dunkle Massen weder Ablenkung noch Verformung.

Gegen die naheliegende Vermutung, daß es sich um ein Lavameer handeln könnte, spricht der Umstand, daß angesichts der räumlichen Ausdehnung des Gebildes ein Lavameer bedeutend stärkere Veränderungen hervorrufen müßte.

Literatur: Umschau i. W. u. T., Heft 3, 1. 2. 64, S. 87.

3. Entdeckung eines Planetensystems

Ein sehr erheblicher Prozentsatz der Fixsterne besteht aus Doppelsternen oder Mehrfachsystemen. Da die Massen der einzelnen Komponenten stets von gleicher Größenordnung sind, kann keines dieser Systeme als Planetensystem angesprochen werden. Die Chancen für die optische Auffindung eines fremden Planetensystems sind minimal, da die Lichtstärke eines erkalteten kleinen Trabanten, der von seinem Zentralstern angeleuchtet wird, kaum für eine Beobachtung ausreicht.

Der Nachweis kann nur erbracht werden, wenn es gelingt, die Eigenbewegung des Zentralsterns als Wellenlinie auszumachen (=Projektion einer Schraublinie auf das Himmelsgewölbe). Mit Hilfe der Keplerschen Gesetze gelingt unter diesen Umständen die Ermittlung der Daten des dunklen Begleiters. Der Begleiter des Sirius wurde seinerzeit so gefunden, aber erst Jahrzehnte später im Fernrohr gesehen. (Als weißer Zwerg hat er trotz vergleichbarer Masse eine wesentlich kleinere Lichtstärke als Sirius. Er ist selbstleuchtend.)

Wir kannten nur zwei Systeme, deren kleinere Komponente allenfalls die Bezeichnung „Planet“ verdient hätte, obwohl die Begleitermasse noch immer den ansehnlichen Betrag von 1% der Hauptmasse erreicht. Es sind dies:

- a) 61 Cygni,
- b) Lalande 21 185.

Nun hat Peter van de Kamp (Sproul Obs., USA) die Masse des dunklen Begleiters von Barnard's Stern berechnet. Sie beträgt nur die Hälfte der Jupitermasse und die Bezeichnung als Planet ist voll gerechtfertigt. Für einen Umlauf werden 24 Jahre benötigt.

Barnard's Stern liegt im Ophiuchus. Er ist der Fixstern mit der größten bisher beobachteten scheinbaren lateralen Eigenbewegung — $10,3''$ pro Jahr — und daher zu Untersuchungen der geschilderten Art besonders geeignet. Sein Abstand von der Sonne ist mit 6 Lj. ziemlich

gering. Barnard's Stern — ein sogenannter Schnellläufer — wird seit 1916 beobachtet.

Literatur: Umschau i. W. u. T., Heft 5, 1. 3. 1964, S. 156.

4. Messung des scheinbaren Durchmessers von Fixsternen

Die riesige Entfernung der Fixsterne hat bis jetzt jegliche trigonometrische Durchmesserbestimmung vereitelt. Selbst der 5-Meter-Spiegel auf dem Mount Palomar liefert von ihnen nur Punkte und keine Scheibchen als Bilder. Solange die Beobachtung innerhalb der Atmosphäre erfolgt, wird sich daran auch kaum etwas ändern, die Grenzen, die durch die Luftunruhe der optischen Auflösung gesetzt werden, sind längst erreicht. Den bisherigen Durchmesserbestimmungen lagen interferometrische Methoden zugrunde, deren Genauigkeit gleichfalls nicht beliebiger Steigerung fähig ist.

Um so interessanter ist die Entwicklung eines Verfahrens, mit dessen Hilfe Winkelabstände bis zu winzigen Bruchteilen einer Bogensekunde sicher bestimmt werden. Die neue Methode hat bereits mit der Ermittlung des Wega-Durchmessers ihre Leistungsfähigkeit und Verlässlichkeit erwiesen und verdient daher, einer breiteren Öffentlichkeit mitgeteilt zu werden.

In mehreren größeren Arbeiten, die in den Jahren 1957, 1958 in den Proc. Roy. Soc. erschienen, befaßten sich Hanbury Brown und R. Q. Twiss mit den Korrelationen zwischen den Fluktuationen im Ausgang zweier photoelektrischer Nachweisgeräte, die vom Lichtstrom derselben Lichtquelle getroffen werden, wenn letztere eine endliche Ausdehnung besitzt (also nicht punktförmig ist). Es stellte sich heraus, daß die Korrelationen von der Verteilung der Leuchtdichte auf der strahlenden Fläche abhängen. Also bestand die — damals rein theoretische — Möglichkeit, aus den Korrelationen den Sehinkel, unter dem das Objekt erscheint, zu errechnen.

Inzwischen waren die Praktiker nicht müßig geblieben und haben im Narrabri-Observatorium der Universität Sidney ein Gerät fertiggestellt, das auf der geschilderten Basis zur Messung von Fixsterndurchmessern verwendet werden soll.

Über den ersten Probelauf berichteten C. Hazard, J. Davis und L. R. Allan am 14. März 1964 in der Zeitschrift „Nature“. Das beobachtete Objekt war die Wega (α -Lyrae), einer der hellsten und nächstgelegenen Fixsterne. Wega hat die Entfernung 26 Lichtjahre und die scheinbare Helligkeit $+0,05^m$.

Das Beobachtungsinstrument besteht aus 2 Spiegeln von zirka 6,5 m Durchmesser, die auf einem kreisförmigen Geleise (Durchmesser zirka 190 m) gegeneinander verschiebbar sind. Jeder Spiegel leitet das Licht des untersuchten Objekts auf „seinen“ Photodetektor.

Das Winkelauflösungsvermögen der Anordnung ist enorm, nämlich $5 \cdot 10^{-4}$ Bogensekunden! D. h. die mm-Teilstriche eines Lineals, das in München lotrecht gehalten wird, könnten von Wien aus noch unterschieden werden!

Auf Grund der ersten Messungen hat Wega den scheinbaren Durchmesser

$$\theta = 0,0037'' \pm 0,0002''.$$

Aus der Parallaxe $\pi = (0,123 \pm 5)''$ ergibt sich ihr wahrer Durchmesser D. D beträgt $(3,2 \pm 0,2)$ Sonnendurchmesser. Die ziemlich genau bekannte Energieabstrahlung von α Lyrae gestattet nunmehr auch eine definitive Aussage über die effektive Oberflächentemperatur des Sternes. Sie ist $T_{\text{eff}} = (9200 \pm 300)^\circ \text{K}$.

Literatur:

1. Proc. Roy. Soc., Bd. 242, S. 300 (1957), Bd. 248, S. 199 und 222 (1958). Autoren: Hanbury Brown, R. Q. Twiss.
2. Nature, Bd. 178, S. 1046 (1956).
3. Nature, 14. 3. 64, S. 111. C. Hazard, J. Davis, L. R. Allan: A Preliminary Measurement of the Angular Diameter of α Lyrae.

5. γ -Emission gewisser Galaxien

Bekanntlich absorbiert die Lufthülle der Erde sehr ansehnliche Spektralbereiche, darunter die aus dem Welt- raum einfallende γ -Strahlung. Da die genaue Kenntnis derselben höchste Bedeutung für die Fortentwicklung der

Astrophysik besitzt, schritt man daran, durch Beobachtung von Erdsatelliten aus Daten über die extraterrestrischen Röntgenquellen zu sammeln.

Am 29. 4. 1963 startete eine Aerobeerakete in White Sands (New Mexico), welche uns die ersten, ganz groben Informationen brachte. Sie war mit einem Proportionalzähler ausgestattet, welcher auf Photonen aus den Bereichen

$$1-1,5 \text{ \AA}, 1,5-2,5 \text{ \AA}, 2,5-8 \text{ \AA}$$

getrennt ansprach. Die Unterteilung des Gesichtsfeldes des Zählers erfolgte durch Montage eines honigwabenartigen hexagonalen Netzes, dessen Adern für γ -Strahlen undurchsichtig waren. Außerdem vollführte die Raumsonde Rollbewegungen von je 4 sec Dauer. Dadurch wurde das Gesamtgesichtsfeld in Teilbereiche von etwa 10° Durchmesser zerlegt. Die Lokalisation der Quellen besaß somit eine Genauigkeit von 5° .

Das Unternehmen lohnte sich, denn man fand 2 Röntgenquellen, die mit einiger Wahrscheinlichkeit im Skorpion bzw. im Crabnebel (Stier) liegen. Die Intensitäten dieser Quellen verhalten sich wie 8:1.

Sollte sich die Existenz einer γ -Quelle im Kern des Crabnebels als richtig herausstellen, wäre dies ein Hinweis, daß die theoretischen Arbeiten von Ambarzumjan und Saakjan über den superdichten Zustand der Materie aus dem Jahre 1961 keine leeren Spekulationen darstellen.

Bei der Wellenlänge von 5 \AA wurde nämlich ein Energiestrom von $2 \cdot 10^{-9} \text{ erg} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{\AA}^{-1}$ gemessen, der nur zustande kommt, wenn der strahlende (schwarze) Körper die Oberflächentemperatur von $7,6 \cdot 10^8$ Grad besitzt, aus der weiter auf Temperaturen von $2,3 \cdot 10^8$ Grad in den Zentralregionen geschlossen werden darf. Da die Supernova, um deren Überbleibsel es sich beim Crabnebel handelt, vor 900 Jahren (genauer im Jahre 1054) auftrat, muß ihre Zentraltemperatur im statu nascendi sogar $5,0 \cdot 10^8$ Grad gewesen sein.

Ein gigantischer Gravitationskollaps der auf engem Raum im core einer Galaxie zusammengedrängten Sterne könnte die Energietönung erklären und damit auch die beobachtete Röntgenemission. Die Entdeckung der Quasisternen ist ein anderes gewichtiges Indiz für die Richtigkeit der dargelegten Gedankengänge.

Als Ergebnis eines Schwerefeldkollaps (Implosion) wäre das Auftreten von Dichten um 10^{16} g/cm^3 (kein Druckfehler!) und mehr durchaus denkbar. Das ist die Dichte der Kernmaterie. Wie Ambarzumjan und Saakjan zeigten, werden bei solchen Dichten die instabilen Partikeln stabil (ähnlich wie die im freien Zustand instabilen Neutronen in nuklear gebundener Form stabil sind). Derartige Sterne bestehen in den innersten Teilen aus einem Gemisch von Nukleonen und Hyperonen, weshalb sie häufig in der Literatur als Neutronensterne bezeichnet werden.

D. C. Morton (Princeton) hat in der unten angeführten Arbeit zwei Modelle mit folgendem Ergebnis berechnet:

Zentraltemp.	effektive Oberflächentemp.	thermische Energie	absolute Helligkeit (in erg/sec)	Abklingzeit der Strahlung auf das $1/e$ -fache
$2 \cdot 10^{10}$	$1,6 \cdot 10^{10}$	$1,7 \cdot 10^{48} \text{ erg}$	$3,9 \cdot 10^{37}$	1800 Jahre
$5 \cdot 10^{10}$	$9,4 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^{47} \text{ erg}$	$4,8 \cdot 10^{36}$	920 Jahre

Die Ausstrahlung eines Neutronensterns erfolgt nur im Röntgenbereich, Licht- und Radioemission fehlt.

Ein superdichter Stern hätte bei 1,3facher Sonnenmasse einen Radius von lediglich 9,25 km. Schwerebeschleunigung auf seiner Oberfläche wäre $g = 2 \cdot 10^{14} \text{ cm/sec}^2$. (Berechnet für die Dichte von $1,5 \cdot 10^{16} \text{ g/cm}^3$.)

Literatur:

1. Nature, 28. 3. 1964, S. 1307/1308.
 - a) S. Bowler et al.: X-Ray Sources in the Galaxy.
 - b) D. C. Morton, Neutronstars as X-Ray Sources.
2. Soviet Astronomy, Bd. 4, Sept./Okt. 1961, S. 187. W. A. Ambarzumjan und G. S. Saakjan: The Degenerate Superdense Gas of Elementary Particles.

6. Die Implosion einer Galaxie (Schwerekollaps)

Die in 5. angedeutete Möglichkeit des Ineinanderstürzens vieler Sterne ist bereits Gegenstand konkreter Rechnungen gewesen. Es interessiert vor allem die Frage, ob im Core einer Galaxie — das mit 10^7 bis 10^8 Sternen je Psc³ belegt sein dürfte — die Kollisionsrate ansteigt, sobald die ersten Zusammenstöße stattgefunden haben. Wäre dies der Fall, dann könnte das Ausmaß der Energie geklärt werden, das bei manchen kosmischen Katastrophen beobachtet wird.

Vorläufig hat man nur ein System von 3 bis 4 Sternen mit Hilfe eines Computers untersucht. Die Ergebnisse scheinen für den beschleunigten Ablauf des Kollisionsprozesses zu sprechen. Umfangreichere Rechnungen über Systeme mit einer größeren Zahl von Komponenten sind geplant.

Eine Vorstellung vom Umfang der freigesetzten Energie erhält man unter der Annahme, daß 0,1% der 10^{11} Sterne einer Galaxie, also 10^8 Sterne, im Core ihre Bewegungen ausführen. Ihre mittleren Abstände wären dann von der Größenordnung $50 \cdot 10^8$ km, d. i. der vierfache Durchmesser der Plutobahn. Setzt man für die Gesamtmasse der Galaxie 10^{44} g an, so entfallen auf die zentrale Region 10^{41} g. Im Abstand von 1 Lichtjahr vom Zentrum dürfte die Umlaufgeschwindigkeit eines Sternes bei 2000 km/sec liegen. Die vollständige Kollision der 10^8 Zentralsterne setzt 10^{67} erg frei und zwar im Zeitraum von ungefähr 300 Jahren, wie eine ganz grobe Überschlagsrechnung ergibt.

Das Ergebnis des Zusammensackens der Zentralregion könnte ein superdichter Stern mit $\rho = 2 \cdot 10^{10}$ g/cm³ sein. Ein solcher ist auch vom Standpunkt der allgemeinen Relativitätstheorie interessant. Auf Grund der Schwarzschildschen Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen gehört zu jeder Masse die sogenannte „Schwarzschild-Kugel“, deren Radius aber normalerweise erheblich den der Masse selbst unterschreitet. Die Sonne hat beispielsweise den Schwarzschild-Radius 3,7 km. Im Falle extremer Dichte wäre jedoch die Placierung der gesamten Masse in einem Teil ihrer Schwarzschild-Kugel denkbar.

Wie die Theorie zeigt, ist die Raum-Zeit in der Schwarzschild-Kugel singular, kein Signal kann aus ihrem Inneren nach außen gelangen (wohl aber von außen nach innen). D. h. die einzige Wirkung dieser Erscheinungsform der Materie wäre ihr Schwerfeld. Nichts sonst könnte von ihrer Existenz berichten. Allerdings, in der Zeitrechnung eines äußeren Beobachters dauert es unendlich lange, ehe die Kontraktion bis zum Schwarzschild-Bereich vordringt, während für den inneren Beobachter alle Ereignisse der Außenwelt in demselben Zeitpunkt vereinigt sind.

Literatur:

1. Discovery, März 1964, S. 20.
2. Physics Today, Mai 1964, S. 21. Hong-Yee Chiu: Gravitational Collapse.

7. Die Explosion einer Galaxie

Im Gegensatz zu den Implosionen, die nach den Ausführungen in 6. zur Erklärung der energiereichsten kosmischen Prozesse von den Theoretikern ins Auge gefaßt werden, hat die Untersuchung der Galaxie M82 während der beiden letzten Jahre den explosiven Charakter der dortigen Vorgänge mit ziemlicher Sicherheit bewiesen.

Das Objekt liegt im Abstand von 10 Millionen Lichtjahren und gehört dem Spektraltyp A5 an. Sein Alter kann nicht sehr groß sein, weil in ihm ausgedehnte Dunkelwolken existieren. Diese setzen sich aus der noch nicht aufgebrauchten interstellaren Materie zusammen, aus der, wie man heute weiß, die Himmelskörper entstehen.

M82 hat abgeflachte Gestalt, so daß sinnvoll von einer großen und einer kleinen Systemachse gesprochen werden kann. Die Galaxie scheint von Filamenten durchzogen, welche sich in Richtung der kleinen Achse etwa 10.000 Lichtjahre weit vom Zentrum weg erstrecken. Optische Auflösung in Einzelsterne ist nicht möglich.

Um Informationen über die Bewegungsverhältnisse im System zu sammeln, beobachtete man seit 1962 die Dopplerverschiebungen in verschiedenen Teilgebieten. Das geschah u. a. in der Weise, daß man den Spalt des Spektrometers parallel zur kleinen Achse orientierte. Die Linien verliefen dann etwas geneigt (statt senkrecht zur v -Achse des Spektrums). Grund: Innerhalb von M82 vollzieht sich entweder eine Explosion oder eine Implosion. In beiden

Fällen ändert sich die Teilchengeschwindigkeit linear mit dem Abstand von der Mitte und damit auch die Dopplerverschiebung entlang des Spalts. Die Entscheidung, ob wir es mit einem Auseinanderfliegen oder einem Kollaps zu tun haben, hängt davon ab, ob wir das System, das räumlich ganz grob einer Scheibe gleichen dürfte, von oben oder von unten sehen. Fotografien mit dreistündiger Expositionszeit (A. R. Sandage im März 1962) im Lichte der H α -Linie unter Benützung eines Interferenzfilters gestatteten eine ziemlich sichere Entscheidung zugunsten einer Explosion. Das war einigermaßen überraschend. Man hatte unter dem Eindruck der neuesten Beobachtungen und deren Interpretationen eher auf eine Implosion getippt.

Die Radialgeschwindigkeit (relativ zum Schwerpunkt von M82) wächst um 0,664 km/sec, wenn man längs der kleinen Achse um 1 Psc vom Zentrum weggeht. Der Schwerpunkt von M82 entfernt sich von der Sonne mit einer Geschwindigkeit von (400 ± 25) km/sec.

Der Reziprokwert des radialen Geschwindigkeitsgradienten liefert die Expansionszeit seit dem Einsetzen der Explosion:

$$\text{grad}_r v = \frac{\partial v}{\partial r} = 0,664 \text{ km/sec. Psc,}$$
$$\text{Kehrwert} = 1,47 \cdot 10^6 \text{ Jahre.}$$

Nachdem in jeder Sekunde auf der Erde im Mittel 10 H α -Quanten (die hauptsächlich aus den Filamenten stammen) 1 cm^2 durchsetzen, muß jeder cm^2 der Filamente etwa 10 H-Atome enthalten. Unter der Annahme, daß die Filamente ungefähr 0,3% der Gesamtmasse von M82 ausmachen, beliefe sich das Volumen der Filamente auf $7 \cdot 10^{82} \text{ cm}^3$. D. h. der an der Strahlung beteiligte Wasserstoff hätte $6 \cdot 10^6$ Sonnenmassen. Dann betrüge aber die kinetische Energie der bewegten Massen $2 \cdot 10^{65}$ erg. Das ist sehr viel, da ja außerdem enorme Energieverluste eingetreten sein müssen. Die Gesamtenergie der Explosion müßte daher von der Größenordnung 10^{66} erg sein, ein Betrag, der erst von 1 Million Supernovae produziert wird!

Zur Erklärung der Explosion existieren zwei Vorschläge.

Der eine stammt von F. Zwicky und G. Burbidge: Kettenreaktion nach einem Supernovaausbruch im mit Sternen dicht besetzten galaktischen Kern.

Den anderen machten F. Hoyle und W. A. Fowler: Das Zentrum der Galaxie ist ein einziger Superstern von 10^5 — 10^6 Sonnenmassen, in dem auf die nukleare Umwandlung von H in He die von He in O folgt, worauf der Sauerstoff in eine instabile Phase tritt, welche die Katastrophe verursacht.

8. Verfärbungen auf der Mondoerfläche

Zu den Vorbereitungen für den bemannten Flug zum Mond gehört die sehr genaue kartographische Erfassung der Oberfläche unseres Trabanten. Im Verlaufe der zahlreichen zu diesem Zweck angestellten Beobachtungen eigneten sich die Observatoren außerordentlich gute Detailkenntnisse des Gebietes an, mit dem sie jeweils beschäftigt waren. Es ist daher nicht verwunderlich, daß erst bei dieser Tätigkeit Veränderungen auf dem Monde wahrgenommen wurden.

Die ersten Meldungen dieser Art, die noch mit größter Skepsis aufgenommen wurden, stammten von N. A. Kosyrew, der 1955 und später in einzelnen Spektrogrammen Anzeichen für Gasentwicklungen auf kleinem Raume gefunden haben wollte.

Acht Jahre später stellten verschiedene amerikanische Astronomen unabhängig voneinander und zu verschiedenen Zeitpunkten Verfärbungen auf der Mondoerfläche fest, so daß man heute nicht mehr gut von Irrtümern oder Sinnestäuschungen sprechen kann. Der Mond scheint doch nicht ganz tot zu sein. In der nachstehenden Tabelle sind die diesbezüglichen Wahrnehmungen zusammengestellt.

Bei den zwei Erscheinungen der letzten Zeile dürfte es sich um großflächige Lumineszenzen handeln, die offenbar durch die von der Sonne eintreffenden Partikeln ausgelöst wurden. Jedem Aufleuchten war nämlich achteinhalb Stunden früher ein Sonnenflare vorausgegangen.

Literatur: Sky and Telescope, Bd. 26, S. 316 (1963) und Bd. 27, S. 3 und 140 (1964).

Beobachtungszeit	Beobachtungsort	Ort der Veränderung	Größe des auffälligen Gebietes	Art und Dauer der Veränderung	Beobachter
ab 1955	Krim-Sternwarte	Krater Aristarch		spektroskopisch	N. A. Kosyrew
29. 10. 63	Lowell-Observatorium	westlich von Aristarch	2 Gebiete mit 6 bzw. 20 km ²	Rötlich-orange-Färbung, 20 min	J. A. Greenacre und E. Barr
29. 10. 63	Lowell-Observatorium	SW-Rand von Aristarch	43 km ²	rubinfarbig, 25 min	J. A. Greenacre und E. Barr
27. 11. 63	Lowell-Observatorium	Rand von Aristarch	46 km ²	rubinfarbig, 75 min	J. A. Greenacre und E. Barr
1./2. 11. 63	—	Krater Kepler	60.000 km ²	rötliche Verfärbung, 22 ³⁵ —22 ⁴⁵ , 0 ³⁰ —0 ³⁵	—

Vergebliche Suche nach magnetischen Einzelpolen

Gegen die zünftige Wissenschaft wird häufig der Vorwurf der Überheblichkeit und Voreingenommenheit erhoben. Das Geschrei stimmen mit Vorliebe fachlich Halbgebildete an, die es nicht verwinden können, daß ihre unausgegorenen, tieferer Kenntnisse entbehrenden Vorschläge ungelesen in den Papierkorb wandern, wenn sie sich auf falschen logischen Voraussetzungen aufbauen. Leider fällt allzu gerne ein lautstarker Chor von Wichtigtuern ein und verleiht dem a priori erkennbaren Unsinn publizistische Resonanz.

Ein lehrreiches Beispiel für die tatsächliche Unvoreingenommenheit der Forscher gegenüber vernünftigen Anregungen bietet die Frage der magnetischen Einzelpole.

Im Rahmen der Maxwellschen Theorie haben einzelne Magnetpole keinen Platz. Ihre Existenz widerspräche der Quellenfreiheit des magnetischen Feldes und würde zum Aufgeben der tausendfach bewährten Theorie der elektromagnetischen Erscheinungen zwingen. Dennoch besteht eine so ernstzunehmende Möglichkeit für das Vorhandensein magnetischer Elementarteilchen, daß es den Physikern einer der ersten Kernforschungsstätten der Welt, nämlich von Brookhaven, gerechtfertigt erschien, in einem mit den modernsten Mitteln durchgeführten Experiment die Suche aufzunehmen.

Die Maxwellschen Gleichungen sind hinsichtlich des elektrischen und des magnetischen Anteils nicht symmetrisch

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{D} &= 4\pi\rho, & \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{1}{c} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \vec{D} &= \epsilon \vec{E}, \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0, & \operatorname{rot} \vec{H} &= \frac{1}{c} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \cdot \vec{i}, & \vec{B} &= \mu \vec{H}, \\ \vec{i} &= \sigma \vec{E}, & \operatorname{div} \vec{i} + \frac{\partial \rho}{\partial t} &= 0. \end{aligned}$$

Die Symmetrie wäre hergestellt, wenn es echten Magnetismus der Dichte ρ_m und damit auch einen magnetischen Strom \vec{i}_m gäbe. Diese Überlegungen veranlaßten Dirac im Jahre 1931, die Vermutung zu äußern, daß eigentlich magnetische Elementarteilchen existieren müßten, die bei Bewegung ebenso von einem elektrischen Feld umgeben wären, wie bewegte Elektronen von einem Magnetfeld begleitet sind. Die Physik kennt keinen Grund, der magnetische Einzelteilchen (im dargelegten Sinn) verbieten würde. Nun ist in der Natur alles verwirklicht, was nicht gewissen Gesetzen widerspricht. Also griff man den Diracschen Gedanken vor kurzem wieder auf und leitete erst theoretisch, dann experimentell die Nachforschungen ein.

Dirac hatte die Frage vom Standpunkt der Quantentheorie aus geprüft und war zum Ergebnis gekommen, daß

1. die magnetische Polstärke quantisiert sein,
2. die Anziehungskraft zwischen magnetischen Elementarpolen (m_N, m_S seien die magnetischen Polstärken-

„Ladungen“ des elementaren Nord- bzw. Südpols) 4692mal die Kraft zwischen Proton und Elektron über-treffen,

3. die Masse von m mindestens 3 Protonenmassen be-tragen müßte.

Für die Gesamtpolstärke gälte ein Erhaltungssatz, so daß magnetische Elementarteilchen nur paarweise erzeugt werden könnten. Zur Produktion eines Paares m_N, m_S sind Stöße höchster Energie erforderlich, wie sie nur die Höhenstrahlung und die großen Beschleunigungsmaschinen in Meyrin, Berkeley oder Brookhaven hervorrufen können.

Da Meteoriten häufig Jahrmillionen lang der Höhenstrahlung ausgesetzt sind, ehe sie zur Erde stürzen, repräsentieren sie in erster Linie ein potentielles Depot von Monopolen. Das um so mehr, weil ein Monopol ebenso wenig (von selbst) aus dem Meteoriten entweichen kann wie ein Elektron aus einem Metall. Das Austrittspotential ist zu hoch.

Ein anderer bevorzugter Aufenthaltsort dürften Erzlager an der Erdoberfläche sein. Gelangt nämlich ein Monopol auf die Erde — er könnte aus verschiedenen Gründen nicht tief in sie eindringen —, so würde er entlang der Kraftlinien des erdmagnetischen Feldes polwärts wandern. Bei dieser Bewegung bliebe er aber in ferromagnetischem Material stecken, das sich ihm in den Weg stellt. Aus letzterem könnte er nur von Magnettefeldern von etwa 60.000 Oersted wieder befreit werden.

Die Spur eines Monopols in der Fotoemulsion wäre von jeder anderen wegen ihrer bedeutend größeren und unregelmäßigen Dicke auf den ersten Blick zu unterscheiden. In der Nebel- oder Blasen-kammer wäre die Bahnkrümmung von m viel, viel stärker als bei elektrischen Partikeln.

Nach Klarstellung der theoretischen Situation schritt man 1962 in Meyrin (CERN) und Brookhaven an die experimentelle Arbeit.

Ein Strom von 30 GeV Protonen traf ein Al-Target und erzeugte dort Antiprotonen, Pionen und — wenn sie existierten — auch magnetische Partikeln. Die Sekundärteilchen trafen, vom Target wegfliegend, einen 25 cm weiten, mit Kohlenwasserstoffen in Form gewöhnlichen Öls gefüllten Behälter. Man wußte, daß im Öl nur die Monopole, nicht aber die übrigen Partikeln abgelenkt würden. Auf dem nach oben offenen Behälter saß eine stromführende Spule, die ein äußerst starkes vertikales Magnetfeld erzeugte. Oben war sie mit einem Teilchendetektor (einmal eine Fotoemulsion, dann ein Szintillationszähler) abgeschlossen. Das Magnetfeld hätte die Monopole aufwärts werfen müssen, worauf sie im Detektor stecken-geblieben wären. (Vorteil: Man hätte die gefangen-gesetzten Monopole nachher wieder zu Experimenten verwenden können.)

Das Ergebnis war negativ. Obwohl $6 \cdot 10^{15}$ Protonen auf das Target fielen, registrierte der Detektor nicht ein einziges Ereignis, das einem magnetischen Elementarteilchen hätte zugeschrieben werden können. Denselben Mißerfolg hatten die Experimente bei CERN. Man darf also sagen: Monopole mit einer Masse unter 3 Protonenmassen scheint es nicht zu geben.

Meteoriten und Eisenerze wurden von E. Goto (Tokio), H. Kohlen und K. W. Forth (USA) untersucht, gleichfalls ohne Erfolg.

Es scheint also ein noch unbekanntes Gesetz die Konstituierung einer zur elektrischen isomorphen magnetischen Welt zu verbieten.

Literatur: Scientific American, Dez. 1963, S. 122, K. W. Forth: Magnetic Monopoles.

Supraleitung

Das Verschwinden des Ohmschen Widerstandes gewisser Metalle bei tiefen Temperaturen wurde 1911 von Kammerlingh Onnes entdeckt. Daß der Widerstand vollkommen aufhört und nicht etwa nur ungewöhnlich stark reduziert ist, geht aus zwei überzeugenden Versuchen hervor. Einmal bewirken selbst Stromstärken von 1000 A keine merkliche Temperaturerhöhung des Leiters. Andererseits kreist der durch einen kurzen Induktionsstoß erregte Strom jahrelang in supraleitenden Drahtlingen. Der Nachweis ist einfach. Der Ringstrom ist immer von einem Magnetfeld umgeben, welches nur genügend stark sein muß, um eine kleine Eisenkugel über dem Ring freischwebend zu erhalten. Dieser Schwebezustand kann nur so lange aufrecht bleiben, als der Strom mit seinem Magnetfeld vorhanden ist. Im MIT (Massachusetts Institute of Technology) war der Kreisstrom nach drei Jahren noch immer zu beobachten.

1933 wiesen Meißner und Ochsenfeld die Verdrängung bestehender Magnetfelder aus dem Inneren eines geschlossenen Supraleiters nach (Meißner-Ochsenfeld-Effekt). Das Magnetfeld ruft nämlich in einer dünnen Grenzschicht von 10^{-6} bis 10^{-5} cm an der Oberfläche des supraleitenden Drahtes Wirbelströme hervor, deren entgegengesetzt orientiertes Magnetfeld (Lenzsche Regel!) das vorhandene Feld im Inneren vollständig aufhebt. (Siehe Nr. 1 der „Wiss. Nachr.“, S. 7.)

Durch sehr starke Felder wird die Supraleitfähigkeit wieder beseitigt. T_{kr} bezeichnet die kritische Temperatur, unterhalb welcher Supraleitfähigkeit auftritt. H_{kr} ist die kritische Magnetfeldstärke, oberhalb der die Supraleitfähigkeit wieder verschwindet.

Die technischen Daten sind recht interessant. T_{kr} von Blei ist ohne Magnetfeld 7,26° K, bei der Feldstärke 500 Oersted nur mehr 4,4° K. Im allgemeinen bewegt sich H_{kr} um 1000 Oersted. Wesentlich günstiger liegen die Verhältnisse bei Niob mit $T_{kr}=7,9°$ K, $H_{kr}=1500$ Oersted. 1960 baute Autler sogar eine Spule aus Niobdraht mit $H_{kr}=4300$ Oersted.

Ein Jahr später erzielten Kunzler, Buchler und Wernick mit Nb_3Sn bereits 88.000 Oersted. Für diese Legierung ist $T_{kr}=18,2°$ K und $H_{kr}=200.000$ Oersted. H_{kr} von V_3Ga dürfte sogar bei 400.000 Oersted liegen.

Es gibt bereits Firmen, welche Magnete mit Supraleitern bis 70.000 Oersted liefern.

Am besten bewährt haben sich am italienischen Nationallaboratorium FRASCATI Mo_3Re , Nb_3Sn und eine Nb-Zr-Legierung mit 65 bis 75% Zr. Die kritischen Stromdichten lagen bei 10^6 A/cm². (Man bedenke, daß nur eine dünne Stromhaut vorhanden ist, so daß die Gesamtstromstärke numerisch bedeutend kleiner ist.)

Im Juni 1963 stellte man bei General Electric ein Solenoid aus verzinntem Niobdraht her (Drahtdurchmesser 0,7 mm), in dem 266 A flossen, welche ein Feld von 101.000 Oersted aufbauten.

Die technischen Schwierigkeiten, die zu überwinden waren, ehe man die angeführten Resultate erreicht hatte, lassen sich in fünf Punkten zusammenfassen:

1. Beim Zuführen der starken Ströme darf die Kühlflüssigkeit nicht zuviel Wärme aufnehmen.
2. Die Anordnung der Drähte und Spulen muß den enormen elektromagnetischen Kräften gewachsen sein, welche sie zu sprengen trachten.
3. Größtes Augenmerk muß auf die Vermeidung lokaler Erwärmung über T_{kr} gerichtet werden. Steigt nämlich die Temperatur irgendwo höher, dann tritt sofort wieder der elektrische Widerstand auf und das Drahtstück verdampft augenblicklich. Die Gruppe Kunzler arbeitete mit Stromdichten von 10^6 A/cm².

4. Die Bearbeitung der für die Supraleitung bestgeeigneten Stoffe ist besonders schwierig.

5. Merkwürdigerweise sind die Feldstärken bei kurzen Drähten höher als bei Spulen. Ein bislang völlig ungeklärtes Rätsel.

Naturgemäß ist man technisch an Stoffen interessiert, welche möglichst hohe Werte von T_{kr} und H_{kr} besitzen. Im supraleitenden Zustand muß das Ohmsche Gesetz durch zwei Gleichungen ersetzt werden, welche F. und H. London gefunden hatten.

Die anfänglich rein phänomenologische Behandlung der Tieftemperatureffekte konnte zu keinem tieferen Verständnis der Erscheinungen führen. Erst quantenmechanische Aspekte versprechen die Zusammenhänge zu durchleuchten.

Fröhlich befaßte sich mit dem Energieaustausch zwischen den Schwingungen der Kristallgitterionen und den Elektronen. Ihm gelang auf diese Weise eine Erklärung der Supraleitung, welche sogar die Abhängigkeit der kritischen Temperatur von der Masse der Gitterionen gemäß der Formel

$$T_{kr} = \frac{A}{\sqrt{M}}, \quad A = \text{Proportionalitätsfaktor,}$$

behaupet.

Die Überprüfung der Behauptung war erst möglich, als die Reaktortechnik genügend fortgeschritten war, um reine Isotope eines Elements in ausreichender Menge herzustellen. Bei den schweren Isotopen mußte T_{kr} tiefer liegen als bei den leichten. Der Nachweis dieses „Isotopeneffekts“ glückte 1950 zwei voneinander unabhängigen Forschungsgruppen in den USA bei Hg.

1951 wird von Bardeen, Cooper und Schrieffer ein neuerlicher theoretischer Vorstoß unternommen, der von denselben Wechselwirkungen ausgeht, die schon Fröhlich als maßgeblich angesehen hatte. Bedauerlicherweise scheint diese Grundlage nicht für die Deutung aller Phänomene auszureichen. Denn 1961 stellten B. T. Matthias et al. das Fehlen des Isotopeneffekts bei Os und Ru fest. Die Messungen zeichneten sich durch äußerste Präzision aus, ihr Fehler lag bei $\pm 0,001°$ K! Da T_{kr} bei Verunreinigungen steigt, könnten diese den Effektausfall verursacht haben. Nach Beseitigung sämtlicher, auch der nur in Spuren vorhandenen Fremdstoffe liegt T_{kr} sehr tief: Bei reinem Mo ist $T_{kr}=0,96°$ K; bei reinem Ir ist $T_{kr}=0,14°$ K.

Die letzte bedeutsame Entdeckung auf dem Gebiet der Supraleitung ist die innerhalb dieser Dekade gefundene Quantelung des magnetischen Kraftflusses. Der magnetische Kraftfluß eines stromdurchflossenen Supraleiters ist nicht kontinuierlich veränderlich, sondern nur gewisser diskreter Werte fähig. Die Supraleitung ist ersichtlich der Teil des Naturgeschehens, in dem Quanteneffekte merklich in den makroskopischen Ablauf der Dinge eingreifen. Die Flußquantelung war übrigens schon von F. London vorausgesagt worden.

Man kennt im Augenblick 28 Metalle und an die 1000 Legierungen, welche supraleitend werden.

Abschließend weisen wir noch auf zwei besonders aktuelle Verwendungen von Supraleitern hin.

1. Erzeugung stärkster Magnetfelder. Die dringende Notwendigkeit, für Zwecke der Hochenergiephysik, der Plasmaforschung usw. über besonders hohe Magnetfeldstärken zu verfügen, hat die hergebrachten Methoden bis zur Grenze ihrer Leistungsfähigkeit beansprucht. Will man z. B. Elektromagnete für Feldstärken von 10^6 Oersted herstellen, so müssen 3 Tonnen Kühlwasser je Minute und 1,6 MW an elektrischer Leistung zur Verfügung stehen.

Das Magnetfeld des CERN-Synchrotrons bei Genf hat eine Stärke von 12.000 bis 14.000 Oersted und wird mit 1,5 MW versorgt. Der Magnet der 500 Liter flüssigen Wasserstoff enthaltenden Blasenkommer in Berkeley benötigt gar 8 MW.

Obwohl die Konstrukteure der großen Beschleunigungsmaschinen bereits drastische Reduktionen der Eisen- und Stahlmassen für die Magnete erzielen konnten, belaufen sich diese noch immer auf tausende Tonnen. Auch in dieser Hinsicht ist es wünschenswert, mit den durch die Supraleiter eröffneten Möglichkeiten neue Wege zu beschreiten.

II. Supraleitende Schalt- und Speicherelemente.
Das Cryotron. Derartige Schaltelemente von Rechenautomaten enthalten zwei Supraleiter L_1 , L_2 mit den kritischen Magnetfeldstärken H_1 , H_2 . Die Materialien sind so gewählt, daß H_1 viel größer ist als H_2 . Durch L_1 fließt ein Strom, dessen Feld zwischen H_1 und H_2 bleibt. Er zerstört daher nur die Supraleitfähigkeit von L_2 . Das Wiederauftreten des Ohmschen Widerstandes in L_2 gestattet die Steuerung dieses Stromes durch L_1 . Die Schaltzeiten sind bereits auf 10^{-9} sec hinuntergedrückt.

Das Fließen eines Dauerstromes im Supraleiter macht diesen als Speicherelement brauchbar. Das „Ablesen“ der gespeicherten Information besteht in der Aufhebung des Dauerstromes durch andere Stromimpulse. In 1 cm^3 haben zehn derartige Speicher Platz. Das bedeutet kurze Laufstrecken der elektrischen Signale, also auch kurze Laufzeiten. Die Rechengeschwindigkeit ist sehr hoch.

Der Leistungsverbrauch ist so minimal, daß die Kosten für die Aufrechterhaltung der tiefen Temperaturen dadurch wieder hereinkommen. Der Leistungsverbrauch von 1 Million Cryotrons, deren jedes 10 Millionen Schaltungen je Sekunde ausführt, beträgt nur ein Watt.

Literatur:

1. Phys. Bl., Heft 4, April 1963, S. 152. W. Buckel: Über neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Supraleitung.
2. Umschau i. W. u. T., Heft 2, 15. Jänner 1964, S. 38. P. Grassmann: Starke Magnetfelder durch Supraleitung.
3. Umschau i. W. u. T., Heft 7, 1. April 1964, S. 219. Untersuchungen über supraleitende Magnetspulen.

Wirtschaftserziehung in der neuen österreichischen Schule

Zu den markantesten Merkmalen unserer ständig sich wandelnden Welt gehören vor allem auch die enge Verflochtenheit und gegenseitige Abhängigkeit verschiedener Bereiche menschlichen Seins, wie zum Beispiel Familie, Schule, Erziehung, Wissenschaft, Politik. Es ist erfreulich, daß der Gesetzgeber bei der Beschlußfassung über die neuen Schulgesetze diese Tatsache weitgehend berücksichtigte und der Schule Aufgaben stellte, die den Erfordernissen der Zeit Rechnung tragen. Die Bedeutung des Wirtschaftslebens für den modernen Menschen wird nunmehr voll erkannt und führt zu der Forderung, daß die Schule die jungen Menschen zur Anteilnahme am Wirtschaftsleben Österreichs, Europas und der Welt zu befähigen habe. Die Blickrichtung auf die vor der jungen Generation liegende Zukunft wird vor allem in der Dreigliederung Österreich—Europa—Welt offenbar, in der zweifellos eine der bereits heute erkennbaren Entwicklungslinien des sich ständig ausweitenden gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Lebens liegt.

Die gleichen Absichten des Gesetzgebers kommen auch in der Wahl neuer Bezeichnungen für einzelne Unterrichtsgegenstände zum Ausdruck. Mit den Benennungen „Geschichte und Sozialkunde“ für „Geschichte“ und „Geographie und Wirtschaftskunde“ für „Erkunde“ bzw. „Geographie“ wird auch die Forderung nach zeitentsprechender Wirtschaftserziehung erhoben, die

sich vor allem die Erweckung eines wirtschaftlichen Interesses, die Anbahnung eines gewissen Verständnisses für wirtschaftliche Fragen und die Vermittlung eines sinnvoll begrenzten Grundwissens in Wirtschaftskunde zum Ziele setzen wird. Dabei wird jedenfalls auch die Funktion des Geldes im Kreislauf der Wirtschaft, die Bedeutung eines volkswirtschaftlich richtigen Verhaltens des Einzelnen wie auch der Gesamtheit, die Notwendigkeit der Kapitalbildung und hier vor allem der Sparkapitalbildung zu behandeln sein.

Damit stehen nicht nur die Schule und die Lehrerschaft, sondern auch die Sparkassen vor bedeutsamen neuen Aufgaben, die sie nur in sinnvoller Koordination zum Wohle unseres Volkes und seiner Wirtschaft gemeinsam lösen können. Vor allem ist es notwendig, die Lehrerschaft mit dem für die neuen Anforderungen erforderlichen Wissensgut in zweckmäßiger Form zu konfrontieren, aktuelles Informationsmaterial an sie heranzutragen und pädagogisch einwandfreie Arbeitsmittel für die Schule bereitzustellen. Hier dürfen die von der Zentralsparkasse der Gemeinde Wien bereits seit einiger Zeit eingeschlagenen Wege als beispielgebend bezeichnet werden. Denn das müssen wir erkennen: Eine erfolgreiche Wirtschaftserziehung in der Schule schafft Garantien für eine gesunde wirtschaftliche und politische Entwicklung unserer Republik.

Dem wirtschaftskundlich gerichteten Fortbildungsbedürfnis der Wiener Lehrerschaft dienen die seit Herbst 1963 vom Pädagogischen Institut der Stadt Wien in Zusammenarbeit und mit Unterstützung der Zentralsparkasse der Gemeinde Wien eingerichteten Vortragsreihen und Seminare, in denen neben den bekanntesten österreichischen Wirtschaftswissenschaftlern auch anerkannte Experten aus dem Ausland sprechen. Eine Reihe von Exkursionen und Studienfahrten vermittelt ein eindrucksvolles Bild vom Stand der österreichischen Wirtschaft. Daß die genannten Veranstaltungen nicht nur für die Teilnehmer an ihnen unmittelbar von Bedeutung sind, sondern sich auch auf breitere Kreise der Lehrerschaft auswirken, beweisen die Arbeiten in den wirtschaftskundlichen Seminaren. Die Broschüre „Schule und Wirtschaft“, die im September 1964 allen in Betracht kommenden Lehrpersonen kostenlos von der Zentralsparkasse zur Verfügung gestellt wurde, ist ein Ergebnis dieser Arbeit.

Damit findet zweifellos der Beginn einer neuen Phase der intensiveren Zusammenarbeit zwischen Schule und Sparkassen einen sinnfälligen Ausdruck. Im Interesse einer soliden Wirtschaftserziehung und der Vermittlung einer wirtschaftlichen Bildung als Bestandteil der Allgemeinbildung des Staatsbürgers von morgen dürfen die genannten Bemühungen natürlich nicht auf den Wiener Bereich beschränkt bleiben. Die überaus wertvolle und fruchtbare Zusammenarbeit, die sich zwischen Stadtschulrat, Pädagogischem Institut und der Zentralsparkasse der Gemeinde Wien entwickelt hat, darf gewissermaßen als Modellfall für das betrachtet werden, was nun im Hinblick auf das wirtschaftskundliche Fortbildungsbedürfnis der österreichischen Lehrerschaft im gesamten Bundesgebiet einsetzen müßte. Das alles aber soll, wie schon erwähnt, nur der Beginn einer Zusammenarbeit sein, zwischen Schule und jenen Institutionen der Wirtschaft, die auf Grund ihres Charakters — Gemeinnützigkeit, Dienst an der Allgemeinheit — am ehesten zu einer solchen Zusammenarbeit berufen sind, und wie die Tatsachen beweisen, auch seit langem eigentlich als einzige Institutionen der Wirtschaft die Notwendigkeit einer solchen Zusammenarbeit erkannt haben.

