

geh ko

Tache

## Inhaltsverzeichnis:

	Seite
Einleitung	
von A. Esau .....	5
Herstellung von Leuchtstoffen ohne Anwendung von Radium	
von A. Esau .....	15
Künstliche Atomwandler und die Spaltung des Urans	
von Otto Hahn .....	19
Die Energiegewinnung aus der Atomkernspaltung	
von Werner Heisenberg .....	29
Die Forschungsmittel der Kernphysik	
von Walter Bothe .....	37
Isotopentrennung	
von Klaus Clusius .....	61

## Eröffnung

**B a s s u m k e r:** Meine Herren! Die heutige Tagung über Probleme der Kernphysik hat den besonderen Zweck einer Unterrichtung der im Dienste der Luftfahrt tätigen Männer über den derzeitigen Stand eines der grossen Grundgebiete der Naturwissenschaften.

Es kann heute noch gar nicht abgeschätzt werden, welche Bedeutung unsere neuesten Erkenntnisse über den Aufbau der Materie besitzen. Immer war es so, dass alle Umwälzungen im äusseren Leben der Menschen - und in deren Gefolge dann auch die Umwandlungen auf rein geistigen Gebieten - von neuen Erkenntnissen aus dem Bereich der Naturwissenschaften ihren Anfang nahmen. Aufbauend auf diesem neuen allgemeinen Wissen um unsere Welt pflegte und pflegt sich dann die technische Anwendung der geistig Gewonnenen zu vollziehen. Im Frieden ist es die Erfüllung neuer Lebensbedürfnisse der Menschheit, die sich dergestalt aus der Fortführung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse in die technische Arbeit auf den Weg über die Weltwirtschaft ergibt, im Kriege dagegen zieht die Entwicklung neuer Kampfmittel hieraus ihre Vorteile. Niemals aber ist vorangetragen, was einer wissenschaftlichen Neuerkenntnis solcher Art an friedlichen oder kriegerischen Werten zufallen wird, wenn erst einmal die Auswertung im Bereich der Technik und Wirtschaft begonnen hat, niemals ruht deshalb der stets unruhige Menschengeist in seinem unabhängigen faustischen Streben, die Türen zu den zahllosen dunklen Geheimnissen aufzustossen, die bisher unsichtbar unser ganzes, sich mehr triebhaft als verstandesmässig regelndes Leben umgeben.

In dieser Erkenntnis hat auch die Luftfahrt wissenschaftliche Arbeit den Anschluss an die grossen Bewegungen im Bereich der freischöpfenden Naturwissenschaften gesucht und gefunden. Aus ihren Beziehungen zu den führenden Forschern im Gebiete der Naturwissenschaften hat die junge Akademie der Luftfahrtforschung, den Weisungen ihres Begründers und Präsidenten folgend, gerade in jüngster Zeit die enge Verbindungen zu den Naturwissenschaften zum Grundprinzip ihrer Arbeit erhoben. Die Akademie beginnt, sich die ersten Vorteile aus der Gemeinsamkeit des Schaffens für die eigenen Ziele zu sichern. Zwei grundverschiedene, im Herzen aber gleicherweise "revolutionäre" Gebiete haben sich damit gefunden, auf ganz verschiedenen Wegen streben sie dem hohen Ziele des Erfolges für eine grosse Sache zu: im Frieden dem Wohle der ganzen Menschheit zu dienen, im Kriege aber dem Vaterland mit den Waffen des Geistes im Kampfe zur Seite zu stehen.

Bei der Wissenschaftsarbeit ist niemals abzusehen, welches die letzten Wirkungen ihrer Ergebnisse sein werden. Unbekannt ist bei den Schritten in jenes geistige Neuland, das jenseits unserer festen Erkenntnisse liegt, ob wir selbst den späteren Geschlechtern noch Kinder des Sieges unserer Arbeit sein werden, unbekannt auch ist es, wer den Lorbeerkranz des geistigen Sieges in den Augen der Nachwelt tragen wird. Ungebunden durch die oft niedrigen Zwecke einer Anwendung und Ausnutzung unseres Wissens strebt das geistige Schaffen der absoluten Forschung in die weiten Fernen seinen reinen hohen Zielen nach. Das gerade hat naturwissenschaftliche Forschung mit der neuen Luftfahrtforschung gemein, das verbindet beide Gebiete durch eine starke tragende Brücken zu innerer Verständigung: dies auch gibt

beiden Arbeitszweigen den gleichen hohen Schwung in ihrem schöpferischen Schaffen. -- Möge sich hieraus der Urgrund zu schnellen und bedeutenden Erfolgen ergeben. --

Es gereicht der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung zur hohen Ehre, dass auf dieser Arbeitstagung führende Männer der Naturwissenschaften ihr Wissen und ihre Erfahrung dem Kreise der Luftfahrtforschung und -technik zur Verfügung stellen. Die Vortragenden sind Persönlichkeiten von hohem nationalen und zugleich auch im weitesten Sinne gesehen von internationalem Ruf, bedeutendste Kenner ihres Faches, hervorragende Repräsentanten einer Inhalt wie Form der wissenschaftlichen Arbeit gleichermaßen beherrschenden geistigen Führungsschicht. Sämtliche Vortragenden gehören zum Kreise unserer Akademie.

Wir haben bei dieser Veranstaltung auch unserem Mitglied Herrn Esau zu danken, dass er sich den Mühen der Vorbereitungen unterzogen hat und diese Sitzung jetzt leiten will. Als kommissarischer Beauftragter des Reichsforschungsrates übt er auch die Arbeitsgestaltung im Gebiet der Kernphysik einen wesentlichen Einfluss aus. Er hat sich durch seine Bemühung die Leitung der Akademie zu Dank verpflichtet.

Wenn ein Teil der von uns geladenen Gäste besonderer Umstände wegen, die sich aus den Aufgaben des Krieges ergeben, entgegen ihrer ursprünglichen Zusage nicht erscheinen konnte, so bittet die Akademie dies mit den zur Zeit vorliegenden Verhältnissen zu entschuldigen. Durch Verteilung des gedruckten Berichtes der sehr bald herausgegeben werden soll, wird eine viel weitergehende Auswertung des wissenschaftlichen Inhaltes der zu ersattenden Berichte erzielt werden, als dies durch die Einladung von Gästen jemals erreicht werden kann. Die Akademie wird demgemäß ihre volle Aufmerksamkeit auf das Ziel richten, die Bemühungen unseres Vortragenden um eine bessere Kenntnis vom Wesen der modernen Kernphysik durch eine sorgfältige Verteilung des Sitzungsberichtes zu unterstützen.

Ich übergebe die Leitung der Sitzung an Herrn Esau.

7



# Einleitung

von A. ESAU

Die heutige Sitzung der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung hat zum Gegenstand die Kernphysik, ein Gebiet der Physik, das in den letzten Jahren ein ganz besonderes Interesse erweckt hat und auf dem vor allem in Amerika unter Einsatz grösster Mittel ausserordentlich erfolgreich gearbeitet worden ist. Obwohl in Deutschland auf diesem Gebiet grundlegende Entdeckungen gemacht worden sind, worüber die Herren Hahn, Bothe, Heisenberg und Clusius vortragen werden, ist die Weiterentwicklung in der Hauptsache durch das Nichtvorhandensein ausreichender Mittel bedauerlicherweise nur langsam vorwärts gekommen und eine Überflügelung von seiten ausländischer Physiker unvermeidlich gewesen.

Nach der Entdeckung der Uranspaltung durch Herrn Hahn wurde im Frühjahr 1939 von seiten des Reichserziehungsministeriums ein aus den namhaftesten Vertretern der Kernphysik bestehender Arbeitskreis gebildet, der sich in erster Linie mit der Energiegewinnung aus dem Atomkern befassen sollte. Mit Kriegsanfang übernahm das Heereswaffenamt die Führung dieses Kreises, dessen Mitarbeiterzahl sehr beträchtlich erweitert wurde und dem auch Mittel in der notwendigen Höhe für sein ausgedehntes Arbeitsprogramm zur Verfügung gestellt wurden.

Anfang 1942 wurde die Weiterführung der Versuche, die bereits eine Reihe für das Gesamtproblem wichtiger Ergebnisse gezeitigt hatte, in die Hände des damaligen Reichsforschungsrates gelegt, der seinerseits den Leiter der Fachsparte Physik mit der Leitung des Arbeitskreises betraute.

Inzwischen hatten sich aber auch andere Wehrmachtsteile, Behörden und Institute den gleichen Problemen zugewandt und mit den Arbeiten begonnen ohne die notwendige enge Fühlungnahme mit dem bestehenden Arbeitskreis aufgenommen zu haben. Die hierin liegende Gefahr der Zersplitterung der Kräfte und der Mittel sowie unnötiger Parallelarbeit wurde durch die Ernennung eines Bevollmächtigten des Reichsmarschalls für das Gebiet der Kernphysik im Frühjahr 1942 vermieden.

Dies hat dazu geführt, dass nunmehr alle auf diesem Gebiet getroffenen Einrichtungen und Kräfte bestmöglichst für die Lösung der hier vorliegenden Probleme eingesetzt werden können mit dem Ziel, das Versäumte so weit und so schnell wie möglich nachzuholen und der deutschen Forschung auch auf diesem Gebiet wiederum die Stellung zu erringen, die ihr gebührt und die für ihr Ansehen im Ausland notwendig ist.

Bevor wir die Vorträge der vorhin genannten Herren hören, möchte ich nun einleitend einen Überblick über den Stand der Arbeiten auf dem Gebiet der Kernphysik geben.

Es handelt sich im wesentlichen und vordringlich um folgende Aufgaben:

- I. Nutzbarmachung der Kernenergie des Urans.
- II. Herstellung energiereicher Neutronenquellen.
- III. Verhütung von Schädigungen des Menschen durch Neutronen.
- IV. Messmethoden und Messapparaturen zur Bestimmung der Leistung von Neutronenquellen.
- V. Anwendung der Neutronen in Technik und Wissenschaft.

Ausserdem wird noch zu berichten sein über die für die Fliegerei besonders wichtige Aufgabe der Herstellung von Leuchtfarben ohne Zusatz von Radium. Hierfür ist in den letzten Wochen eine Lösung gefunden worden, die ohne Radium auskommt und uns damit der grossen Sorge enthoben hat, die uns der mehr und mehr schrumpfende, völlig unzureichende und nicht auffüllbare Radiumbestand bereitet hatte.

### I. Nutzbarmachung der Kernenergie des Urans.

Durch die Ernennung eines Bevollmächtigten für das Gesamtgebiet der Kernphysik war die Möglichkeit gegeben, die an den verschiedenen Stellen in Angriff genommenen Arbeiten einheitlich in einer grossen Arbeitsgemeinschaft zusammenzufassen, nutzlose Parallelarbeit zu vermeiden, die vorhandenen Neutronengeneratoren besser auszunutzen und sie der Forschung auf anderen Gebieten der Technik und der Naturwissenschaften zur Verfügung zu stellen.

Auf dem Gebiet der Nutzbarmachung der Kernenergie des Urans sind in den letzten Monaten eine Reihe von Versuchen entweder bereits durchgeführt oder vorbereitet worden. Es handelt sich zunächst um die Klärung von Fragen, die gelöst werden müssen, bevor an den Aufbau einer grösseren Anlage herangegangen werden kann.

Es handelt sich dabei um die Bestimmung der Vermehrungszahl der Neutronen im Uran unter Bedingungen, wie sie später in einer technischen Anlage vorhanden sind.

Dabei zeigte es sich, dass die bisherige Verwendung des Uranmetalls in Form von Platten nicht die optimale ist und dass die Ausbeute an Neutronen, auf die es praktisch ankommt, bei der Würfel- bzw. Säulenform günstiger wird. Auch in bezug auf die beste Form des Halterungsmaterials für die angegebenen Teile der Anlage sind neue Erkenntnisse gewonnen worden. Aufbauend auf diesen Ergebnissen sind zwei grössere Versuche als Vorstufen für den in Aussicht genommenen Grossversuch in Vorbereitung. Wenn nicht unvorhergesehene Ereignisse eintreten, ist damit zu rechnen, dass man von dem einen in etwa 4 Monaten, von dem anderen bei Jahresende Ergebnisse erwarten kann, die unsere Erkenntnisse über den Mechanismus der Neutronenvermehrung fördern und die Grundlagen sein werden, auf denen ein Versuch noch grösseren Ausmasses aufgebaut werden soll. Die Herstellung des hierfür notwendigen Uranmetalls in möglichst grosser Reinheit und in der gewünschten Form ist auf Grund der bisher gesammelten Erfahrungen und der Erstellung eines grösseren Schmelzofens als gesichert anzusehen.

Grössere Schwierigkeiten traten auf dem Schutz der Uranoberfläche gegen Korrosion unter dem Einfluss des die Metallplatte oder den Würfel umgebenden Wassermantels. Während bei den bisherigen Versuchen unter Zimmertemperatur besondere Schutzmassnahmen nicht notwendig sind, zeigte sich unter den praktischen Arbeitsbedingungen (Temperaturen in der Gegend von 100°C und darüber) eine sehr lebhafte, chemische Reaktion zwischen Wasser und Metall, die explosive Formen annehmen kann.

Nach Überwindung grosser Schwierigkeiten und nach vielen fehlgeschlagenen Versuchen - Erfahrungen über den Korrosionsschutz von Uran lagen in der deutschen Technik bisher überhaupt nicht vor - ist es endlich gelungen, dem Uran einen Überzug von Aluminium oder Zinn zu geben, den den vorkommenden Temperaturbeanspruchungen aushält. Unser Ergebnis ist für den späteren Aufbau einer Maschine von entscheidender Bedeutung, die ohne einen wirksamen Schutz des Urans nicht betriebssicher arbeiten würde (Explosions- und Brandgefahr).

Zeitweilige Schwierigkeiten sind aufgetreten mit der Beschaffung von ausreichenden Mengen schweren Wassers, das bisher nur in Norwegen hergestellt werden konnte und von dort bezogen werden musste.

Nachdem die Produktion dort in ausreichendem Umfang lief, wurde im Frühjahr dieses Jahres durch einen Sabotageakt ein wichtiger Teil der Anlage zerstört. Dieser Schaden ist in verhältnismässig kurzer Zeit behoben worden, so dass die Produktion seit einigen Wochen wieder läuft.

Ausser dieser Grossanlage gehen noch an zwei weiteren Stellen in Norwegen kleinere Anlagen ihrer Vollendung entgegen.

Da aber auf Grund der Verhältnisse in Norwegen damit gerechnet werden muss, dass ein neuer Sabotageakt trotz aller Sicherungsmassnahmen erfolgt, ist in Leuna bei der I.G. dieser wichtige Teil der norwegischen Anlage im Aufbau begriffen, der nahezu betriebsfertig ist.

Es wird dann die Hochkonzentration des in Norwegen hergestellten schweren Wassers (Rohprodukt) in Leuna vorgenommen werden können, falls die Anlage in Norwegen erneut zerstört werden sollte.

Da ausserdem damit gerechnet werden muss, dass unter Umständen auch die norwegische Gesamtanlage einem Sabotageakt zum Opfer fallen kann, sind mit einem italienischen Werk in Meran Verhandlungen im Gange, die darauf abzielen, das Rohprodukt von dort aus zu beziehen. Es musste auf diese Anlage zurückgegriffen werden, da in Europa zur Zeit für diesen Zweck andere Anlagen nicht zur Verfügung stehen.

Wenn auch die Menge schweren Wassers aus diesem Werk nur etwa 40% der norwegischen Produktion erreicht, so ist sie doch für die Sicherung der Wasserlieferung von Bedeutung.

Jedenfalls haben wir für die Fortführung der erwähnten Versuche genügende Mengen schweren Wassers hier zur Verfügung.

Weitere Anstrengungen unsererseits zielen auf die Anreicherung des Urannmetalls an dem besonders wirksamen Isotop 235 hin, die erfolgreich verlaufen.

Hierfür notwendige Anordnungen sind bereits erprobt und in Fabrikation gegeben worden. Die von einer derartigen Apparatur erwartete Anreicherung wird uns wahrscheinlich von der Notwendigkeit schweres Wasser unbedingt zur Verfügung zu haben, befreien und auch die Dimensionen der Maschine verkleinern, was praktisch sehr erwünscht ist.

Inzwischen haben sich auch Betrachtungen über die Arbeitsweise einer nach diesem Prinzip arbeitenden Maschine angestellt werden (Wärmeübertragung aus dem Metall in das Wassermolekül in Dampf usw.), die aber noch nicht abgeschlossen sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Reihe von Schwierigkeiten, die der Lösung des Problems der Energieerzeugung aus Uran entgegenstanden, beseitigt worden sind, dass aber insbesondere die Ergebnisse der in Vorbereitung befindlichen grossen Versuche abgewartet werden müssen, die uns höchstwahrscheinlich die endgültigen Lösung einen grossen Schritt näherbringen werden.

## II. Herstellung energiereicher Neutronenquellen.

Als ergiebigste Neutronenquellen haben sich bisher Kernreaktionen von Deuteronen mit Beryllium, Lithium, u.a. erwiesen, wofür besondere Beschleunigungsvorrichtungen erforderlich sind, deren Herstellung teilweise beendet, teilweise der Vollendung entgegengeht oder in Angriff genommen worden ist.

Es sind bereits in Betrieb:

- a) 2 Hochspannungsanlagen (Kaskadenanordnungen)
  - B e r l i n - B u c h im Kaiser-Wilhelm-Institut für Hirnforschung.
  - B e r l i n - D a h l e m im Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik eine Anlage für 1,2 MV mit einer Leistung entsprechend etwa 0,8-1 kg (Radium-Beryllium) Äquivalent.

Im Aufbau: 4 Hochspannungsanlagen.

Anlage für die Reichspost von 1,5 MV, die von der Baufirma bereits ausgeliefert und im Aufbau begriffen ist. Mit ihrer Inbetriebsetzung kann noch etwa im Oktober d.J. gerechnet werden. Anlage für das Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie von 1,5 MV, ebenfalls bereits geliefert. Mit dem Aufbau kann erst nach Fertigstellung des Unterbringungsraumes gerechnet werden, die in etwa 2 Monaten zu erwarten ist.

Anlage für maximal 5 MV der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, die vorläufig in einer der Berliner Messhallen aufgestellt wird. Vorversuche mit dieser Anlage werden in Kürze in Angriff genommen werden.

Strassburg, Anlage für das Physikalische Institut der Universität Strassburg von 1,5 MV. Die Anlieferung soll in Kürze erfolgen.

Eingehende Untersuchungen an den Kaskadenanordnungen, die von der Firma C.H.F. Müller, Hamburg, angestellt worden sind, haben ergeben, dass die Neutronenausbeute mit steigender Spannung stark zunimmt, so dass bei den vorgesehenen Anlagen mit praktisch brauchbaren Leistungen gerechnet werden kann.

b) Anlagen nach van de Graaf (in Betrieb)

Heidelberg, im Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik eine Anlage von 1 MV,

Berlin, im Laboratorium von M. von Ardenne eine Anlage von 1,1 MV und einer Leistung von etwa 32 g (Ra-Be)-Äquivalent.

c) Zyklotrone (in Betrieb)

Anlage in Paris, deren Leistung durch verschiedene Umbauten und Verbesserungen auf etwa 90 kg (Ra-Be)-Äquivalent gebracht werden konnte. Mit einer weiteren Erhöhung dieses Wertes kann in absehbarer Zeit gerechnet werden.

Im Bau:

Heidelberg: Anlage am Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik, deren Einzelteile zum allergrössten Teil bereits fertiggestellt sind oder in kurzer Zeit zur Herstellung entgegengehen. Mit der Inbetriebsetzung kann Ende des Jahres gerechnet werden erwartende Leistung etwa 200 kg Äquivalent.

Berlin. Anlage für das Laboratorium von Manfred von Ardenne von etwa der halben Leistung. Die Räume für die Untereinrichtungen sind fertiggestellt, desgleichen auch wichtige Teile der Apparatur, so dass mit dem Ingangsetzen Ende des Jahres gerechnet werden kann.

Berlin. Anlage für die Deutsche Reichspost. Der Stand des Bau es der Anlage und ihrer Fertigstellung dürfte etwa der gleiche sein wie der der vorhergehenden Anlage.

Leipzig. Anlage für das Physikalische Institut der Universität. Der Bau der Anlage ist in Angriff genommen worden. Ihre Fertigstellung und Aufstellung ist aber erst nach Beendigung der Arbeiten an der vorhergehenden Anlage zu erwarten.

Die Leistungen der vier Anlagen werden mit Ausnahme der Heidelberger der Grössenordnung nach die gleichen sein. Nach ihrer Fertigstellung wird Deutschland auf diesem Gebiet über vier Neutronenanlagen verfügen, die zwar die Leistungen der grösseren in Amerika bereits fertiggestellten oder noch im Bau befindlichen Anlagen noch nicht erreichen, aber immerhin für viele technische Zwecke ausreichend sein werden. An der Herstellung noch wesentlich stärkerer nach diesen Prinzip arbeitenden Neutronenquellen kann erst heran-gegangen werden, wenn mit den ausgeführten Anlagen genügende Betriebserfahrungen vorliegen werden.

a). Die Vorarbeiten zur Durchführung eines von Dr. Dallenbach gemachten Vorschlages für den Bau eines Zyklotrons grosser Leistung sind mit Unterstützung des Ministeriums für Bewaffnung und Munition der Kaiser-Wilhelm-Institut Gesellschaft und der ARB in Angriff genommen worden. Ob sich das vorgeschlagene Bauprinzip bewähren wird und welche Leistungen damit erzielt werden können, lässt sich erst beurteilen, wenn die Ergebnisse der Vorversuche vorliegen werden.

### III. Verhütung von Schädigungen des Menschen durch Neutronen

Solange bei kernphysikalischen Untersuchungen nur mit sehr schwachen Neutronenquellen gearbeitet wurde, konnten die Einwirkungen der Neutronen auf den menschlichen Organismus als unschädlich angesehen werden. Die Inbetriebsetzung stärkerer Generatoren, wie beispielsweise des Zyklotrons in Paris mit einem (Ra-Be)-Äquivalent von vielen Kilogramm und weiterer im Bericht aufgeführter Anlagen, macht aber die Einrichtung von Schutzmassnahmen erforderlich. Zu diesem Zweck mussten zunächst Untersuchungen über die Art der hervorgerufenen Schädigungen durchgeführt werden, die zwar schon an praktisch wertvollen Ergebnissen geführt haben, aber noch nicht abgeschlossen sind.

Aus ihnen geht bisher hervor:

1. Die Wirkung von Neutronen auf den lebenden Organismus ist anders als bei Röntgenstrahlen, und zwar, auf die gleiche Dosis bezogen, um ein Mehrfaches stärker.
2. Es gibt eine Reihe von Stoffen, die Neutronen stark absorbieren und damit für die Schutzanlagen in Frage kommen. Die wirksamsten haben sich in erster Linie Boratüre u.ä. erwiesen. Soweit diese Stoffe verfügbar sind, werden sie hierfür weiter eingesetzt, beispielsweise beim Pariser



Zyklotron. Bei den im Bau befindlichen Anlagen, die erst Anfang des kommenden Jahres in den Betrieb eingesetzt werden können, werden die Schutzmassnahmen in anderer Form ausgeführt, die zwar weniger einfach sind, infolge der Materiallage aber zur Zeit noch hergestellt werden können. Jedenfalls bieten beide Möglichkeiten die Gewähr dafür, dass auch bei durchgehendem Betrieb eine Schädigung der den Versuchen beschäftigten Personen vermieden wird. Weitere notwendige Versuche nach dieser Richtung sind unter Leitung von Professor Heubner, Berlin, bzw. Professor Rajewski, Frankfurt/Main, in Angriff genommen worden und lassen wichtige Ergebnisse erwarten.

#### IV. Messmethoden und Messapparaturen zur Bestimmung der Leistung von Neutronenquellen.

Die Kontrolle der Neutronenquellen, die Feststellung der Wirksamkeit von Schutzmassnahmen und die mit künstlich aktivierten Präparaten arbeitenden Techniker, Biologen und Mediziner benötigen einwandfreie Messmethoden und möglichst einfache, gleichzeitig aber auch empfindliche Messapparaturen.

Über die bisher allgemein verwendete Indikatormethode hinaus war es notwendig, weitere Messverfahren zu entwickeln. Das eine von ihnen gestattet die Messung der Zahl der von einer beliebigen Neutronenquelle abgegebenen Neutronen. Die Arbeiten an ihm sind nahezu abgeschlossen. Seine Brauchbarkeit für die gedachten Zwecke konnte bereits bei der Ausmessung der im Betrieb befindlichen Generatoren bewiesen werden.

Das zweite insbesondere für die Bestimmung der Neutronendosis bestimmte Gerät befindet sich noch in der Entwicklung. Wenn hierbei auch noch mancherlei Schwierigkeiten zu überwinden sein werden, kann doch in absehbarer Zeit mit dem erfolgreichen Abschluss auch dieser Arbeiten gerechnet werden.

Auch die Massenspektrographen sind auf der einen Seite sowohl in bezug auf ihre Empfindlichkeit als auch andererseits für den praktischen Gebrauch in einfacher zu handhabender Form und für Relativmessungen weiter entwickelt worden.

Das Vorhandensein sicher arbeitender Messapparate und die Durchbildung einwandfreier Messmethoden sind für die Fortführung der Arbeiten auf kernphysikalischem Gebiet von besonderer Wichtigkeit und müssen daher auch in Zukunft weiter vervollkommen werden.

#### V. Anwendungen der Neutronen in Technik und Wissenschaft.

Infolge der bisher nur vorhandenen nicht sehr starken Neutronenquellen konnten die Technik und die Forschung auf anderen Gebieten der Naturwissenschaften naturgemäss noch nicht in dem erstrebten Masse Nutzen auf ihnen ziehen. Immerhin sind aber doch schon recht aussichtsreiche Anfänge zu verzeichnen.

### Technik.

Es handelt sich um die Verwendung der Neutronen für die Zwecke der störungsfreien Werkstoffprüfung. Aus den bisherigen Versuchen scheint hervorzugehen, dass diese Strahlenart in gewissen Fällen den bisher allgemein für diese Untersuchungen benutzten Röntgenstrahlen unterlegen sein wird und dass in Zukunft beide Arten mit ihren speziellen Eigenschaften nebeneinander bestehen werden. Die noch bei der Photographie dieser Strahlenart vorhandenen Unvollkommenheiten (Unschärfe der Bilder) hängen im wesentlichen von der geringen Intensität der jetzigen Neutronenquellen ab. Sie werden aber beim Vorhandensein grösserer Energien unschwer überwunden werden.

Die Arbeiten auf diesem Gebiet werden mit grösstem Nachdruck fortgesetzt und lassen in der Zukunft für die Technik wichtige Ergebnisse erwarten.

### Forschungen auf anderen Gebieten der Naturwissenschaften.

Es handelt sich hierbei in erster Linie um die Erzeugung künstlicher Radipaktivität. Wenn es auch bereits gelungen ist, derartige Präparate in den verschiedensten Zusammensetzungen durch Aktivierung mittels Neutronen herzustellen, so sind doch die dabei erzielten Intensitäten (Stärke der Präparate) zur Zeit infolge der schwachen Neutronenquellen noch ausserordentlich klein. Eine Änderung wird hier erst eintreten können, wenn die im Vorhergehenden erwähnten grösseren Zyklotronanordnungen in Betrieb sein werden.

Zunächst kann daher noch nicht daran gedacht werden, diese so hergestellten künstlichen Radiumpräparate an den Stellen einzusetzen, die z.Zt. natürliches Radium abnutzen.

In der Medizin werden auf diese Weise aktivierte Präparate zum Nachweis der Wirkung von Kampfgasen auf die einzelnen Organe des menschlichen Körpers angewendet. Über die schädigende oder heilende Wirkung der Neutronen liegen noch keine abschliessenden Untersuchungen vor. Auch auf diesem Gebiet kann in Zukunft mit praktisch wichtigen Ergebnissen und Anwendungsmöglichkeiten gerechnet werden.

Auf dem Gebiet der Biologie sind Versuche mit Neutronen noch nicht über das Anfangsstadium hinausgekommen. Es ist aber zu erwarten, dass sie auch hier in der Zukunft eine wichtige Rolle spielen werden.

Aus ersten Versuchen auf dem Gebiet der Chemie scheint sich die Möglichkeit zu ergeben, Polymerisationen unter Bedingungen herbeizuführen, die von den bisherigen verschiedenen sind.

Inwieweit ein solches Verfahren von technischer Bedeutung sein wird, kann erst nach dem Abschluss von Versuchen auf einer hinreichend verbreiteter Basis überschauen werden.



# Herstellung von Leuchtfarben ohne Anwendung von Radium.

von A. Esau

In Flugzeugen wurden bisher für die Beleuchtung von Bord mit Leuchtfarben benutzt, die Radium enthalten. Da der Verbrauch an Radium, wenn auch gering für das einzelne Gerät, infolge der hohen Stückzahlen doch sehr hoch ist - er beträgt jetzt etwa 15 g pro Jahr - und die uns zur Verfügung stehenden Radiummengen von zur Zeit etwa 20 g somit in einem Jahre erschöpft sein würden und damit die Herstellung der Leuchtfarben auf dem bisherigen Wege zum Erliegen kommen müsste, war es eine der vorzüglichsten und wichtigsten Aufgaben der Kernphysik, hier Abhilfe zu schaffen.

## 1. Die Zückerergewinnung der in den Leuchtfarben der Geräte enthaltenen Radiummengen.

Auf diese Möglichkeit und Notwendigkeit der Wiedernutzbar-machung des Radiums ist bereits zu Kriegsbeginn von seiten der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt mehrfach hingewiesen worden.

Eine Sammelaktion der unbrauchbar gewordenen, mit Leuchtfarben versehenen Skalen und Geräteteile ist vor einigen Wochen nach wiederholten Hinweisen auf die Wichtigkeit und Notwendigkeit dieser Aktion von den in Frage kommenden Stellen des RLM in Gang gekommen.

Nach einem eigens hierfür entwickelten Verfahren wird das Radium auf chemischem Wege aus der Leuchtfarbe extrahiert und kann dann weiter benutzt werden.

Auf diese Weise wird es nunmehr gelingen, etwa 5 g Radium jährlich wiederzugewinnen und damit unsere Radiumvorräte zu strecken.

Durch das viel zu späte Anlaufen der Sammelaktion sind beträchtliche Radiummengen verloren gegangen.

## 2. Die Einsparung von Radium bei der jetzigen Fabrikation der Leuchtfarben.

Die in Frage kommenden Industrien, denen dieses Problem als sehr wichtig und dringlich vorgelegt worden ist, haben erklärt, dass auch zu in ihren Betrieben vorgenommenen Versuchen eine Einsparung von etwa 10% an und für sich möglich wäre. Da aber bei geringerem Radiumzusatz andere Leuchtmassen zur Anwendung kommen müssen, die bei der Herstellung ausserordentliche Schwierigkeiten bereiten und nicht mit Sicherheit die Bedingungen erfüllen, die an ihre Leuchteigenschaften gestellt werden müssen, bringt diese Massnahme keine Abhilfe.

## 3. Herstellung von künstlich aktiviertem Präparaten. (Künstliche Radioaktivität)

Wenn es auch in vielen Fällen gelungen ist, Präparate künstlich radioaktiv zu machen, so sind doch die dabei erhältlichen Mengen so ausserordentlich gering, dass nicht auf sie zurückgegriffen werden kann. Möglichkeiten hierfür werden sich erst dann eröffnen, wenn die im Bau befindlichen Zyklotronanlagen betriebsfertig sein werden.

4. Herstellung von Poloniumpräparaten.

Als radioaktiver Zusatz zu den Leuchtmassen kommt an Stelle von Radium in erster Linie das Strahlen aussendende Polonium in Frage, wenn es, was leider nicht der Fall ist, in ausreichender Menge zur Verfügung stände.

Es ist deshalb seine Gewinnung aus Bleirückständen aus Joachimsthal (S. t) von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt nach einem dort entwickelten Verfahren in Angriff genommen worden, und es ist zu erwarten, dass die gewonnenen Mengen nutzbar gemacht werden können.

5. Aufarbeitung aller in unserem Machtbereich noch vorhandenen Radiumerze.

Ausföhren kann zwar nach bekannten Verfahren das Radium gewonnen werden. Wenn auch die hierbei erzielten Mengen den jährlichen Verbrauch auch nicht annähernd decken können, wird doch zur Zeit alles getan, um das in ihnen enthaltene Radium herauszuholen.

Die angeführten bisher beschrittenen Wege können aber auf lange Sicht die Sicherstellung der Herstellung ausreichender Mengen von radioaktiven Leuchtfarben für die Skalenbeleuchtung der Flugzeuge nicht gewährleisten.

6. Herstellung von Leuchtfarben ohne Radium.

Es ist auf einem vollkommen anderen Wege ganz kürzlich gelungen, das vorliegende Problem ohne Anwendung von Radium zu lösen und zwar folgendermaßen.

Gewisse Zusätze in verschwindenden Mengen zu den bisher verwendeten Leuchtmassen ergeben nach kurzer Bestrahlung mit ultraviolettem Licht ein Nachleuchten und damit eine Ablesbarkeit der Skalen von einer Stunde gegenüber einer früher erreichten Zeit von kaum 20 Minuten, die für den vorliegenden Zweck viel zu kurz gewesen wäre. Da Einrichtungen für Ultraviolettbeleuchtung im Flugzeug sowieso vorhanden sind, sind keine weiteren Einbauten notwendig. Bei Ausfall der Bordbeleuchtung und damit auch der ultravioletten Strahlenquelle werden die mit der neuen Leuchtfarbe versehenen Geräte noch eine ganze Stunde so hell nachleuchten, dass die Ablesungen der Instrumente gewährleistet sind. Wenn man dann die Skalen einer durch Vacublitz kleinster Ausmasses erzeugten nicht sichtbaren Ultraviolettbestrahlung aussetzt, so bleiben die Skalen für eine weitere Stunde ablesbar usw.

Damit ist die Gewähr geschaffen, dass auch bei Ausfall der Flugzeugbeleuchtung unter allen Umständen die Ablesbarkeit der Geräte sichergestellt ist und eine Behinderung des Fluges nicht eintreten kann, d.h. das Problem der Leuchtfarben ohne Radiumzusatz bzw. radioaktiven Zusatz ist gelöst.

Erwähnt sei ferner, dass 1. die verwendeten Stoffe in mehr als ausreichender Menge im Lande vorhanden sind und 2. eine Änderung der Geräte nicht erforderlich wird, 3. Fabrikationsschwierigkeiten bei den neuen Leuchtfarben nicht vorliegen, die in jeder beliebigen Menge geliefert werden können, 4. eine Vereinfachung in der Aufbringung der neuen Leuchtfarbe auf die Geräte und damit eine Ersparnis von Arbeitszeit eintritt, 5. dass die Lebensdauer der neuen

Leuchtfarbe größer ist als die der bisher verwendeten radioaktiven

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die mitgeteilte Lösung der gestellten Aufgabe uns der Sorge enthebt, beim Verbrauch unserer beschränkten und nicht ergänzbaren Radiumbestände einen nicht zu überwindenden Engpass vor uns zu haben.

Es handelt sich darum, möglichst unverzüglich mit der Erprobung im Flugzeug zu beginnen und nach deren Erledigung die Einführung dieser neuen Leuchtfarbe in Angriff zu nehmen.

## Künstliche Atomumwandlungen und die Spaltung des Urans.

von Otto Hahn.

Die Gesamtheit der im "Periodischen System" zusammengefasst chemischen Elemente beträgt 92. Aus ihnen bestehen alle Körper der materiellen Welt. Jedes Atom eines beliebigen chemischen Elements setzt sich zusammen aus dem im Verhältnis zu dem Atom selbst winzigen kleinen positiv geladenen Atomkern, der praktisch die gesamte Masse des Atoms enthält, und den um diesen Kern kreisenden negativen Elektronen, deren Anzahl und Gesamtladung die positive Ladung des Kerns neutralisiert. Die Anzahl der positiven Kernladungen bestimmt die Stellung des Elements im Periodischen System der Elemente. So hat der Wasserstoff, das leichteste Element, die Kernladung 1 und steht an erster Stelle des Systems, das schwere Uran hat die Kernladung 92 und steht unter den in der Natur vorkommenden Elementen an letzter Stelle. Dazwischen liegen alle anderen Elemente. Die Eigenschaften eines chemischen Elementes sind durch die Anzahl der positiven Ladungseinheiten des Kerns eindeutig bestimmt.

Die alle Atome  $e$   $r$   $n$   $e$  zusammensetzenden Masseinheiten sind das Proton und das Neutron. Das Proton ist der positiv geladene Kern des Wasserstoffatoms mit der Massenzahl 1, das Neutron  $n$  ist ein ungeladener neutraler Atomkern, der ebenfalls die Masse 1 besitzt. Aus diesen und nur diesen beiden Elementarbestandteilen muss man sich die Atomkerne der chemischen Elemente zusammengesetzt denken. So besteht z.B. der Kern des Kohlenstoffs aus 6 Protonen und 6 Neutronen. Die Kernladung ist also 6, seine Masse 12. Um diesen Kern bewegen sich 6 Elektronen der Atomhülle.

Da die chemischen Eigenschaften eines Elements eindeutig durch die Anzahl der Protonen, der geladenen Kernbestandteile, festgelegt sind, ändert sich nichts an den chemischen Eigenschaften, z.B. des Kohlenstoffs, wenn statt 6 Neutronen 7 Neutronen in dem Kern enthalten sind. Das Atom hat dann die Massenzahl 13, bleibt aber wegen seiner Kernladung von 6 noch ein Atom des Kohlenstoffs. In der Tat gibt es ein solches Kohlenstoffatom von der Masse 13. Man nennt solche Atome die bei gleicher Kernladung, also gleichen chemischen Eigenschaften eine verschiedene Anzahl von Neutronen besitzen,  $i$   $s$   $o$   $t$   $o$   $p$   $e$  Atomarten. Fast alle Elemente des Periodischen Systems sind Mischungen isotoper Atomarten.

Die meisten von diesen Elementen haben seit Hunderten von Jahrtausenden keinerlei Umwandlungen erfahren. Alle chemischen Reaktionen spielen sich nämlich in der Elektronenhülle ab und ändern nichts an dem Kern selbst. Eigentliche Atomumwandlungen sind nur möglich, wenn sich an den Kernen Bestandteile etwas ändern. Fliegt z.B. ein geladenes Teilchen aus dem Atomkern heraus, oder verwandelt sich ein Neutron in dem Kern in ein Proton (oder umgekehrt), dann haben wir eine wahre Umwandlung in das Atom eines anderen Elements. Wird dagegen ein Neutron in den Kern aufgenommen, oder von dem Kern abgegeben, dann bleibt die chemische Natur des Elementes unverändert, nur seine Masse ändert sich, es entsteht ein Isotop der ursprünglichen Atomart.

Die in der Natur vorkommenden radioaktiven Substanzen waren die ersten Beispiele für Element- oder Atomumwandlungen. Unter Aussendung schnell bewegter Strahlenteilchen erleiden diese Elemente eine inneratomistische Umwandlung. Produkte dieser Umwandlung sind beim Uran das Radium, die Radiumemanation und andere, beim Thorium das Mesothorium, Radiothorium und andere.

Die grosse Bedeutung dieser radioaktiven Substanzen liegt in den von ihnen ausgesandten Strahlenteilchen, die das radioaktive Atom mit ungeheurer Anfangsgeschwindigkeit verlassen und sich wegen ihrer grossen Energie bis zu den einzelnen Strahlenteilchen nachweisen lassen. Wieso dies möglich ist, zeigt ein Vergleich etwa mit einer Flintenkugel. Eine Flintenkugel, die mit 1000 Meter pro Sekunde den Lauf verlässt, hat eine ganz andere Wirkung und lässt sich viel leichter nachweisen durch diese Wirkung als das zur Ruhe gekommene Geschoss, das etwa ruhig vor uns auf dem Schreibtisch liegt. Die sogenannten  $\alpha$ -Teilchen radioaktiver Elemente verlassen das radioaktive Atom nun aber nicht mit einer Geschwindigkeit von 1000 Meter pro Sekunde, sondern von 15 000 Kilometer pro Sekunde, und deshalb ist ihre Wirkung so gross und ihr Nachweis so leicht.

Zu den in der Natur in Uran- und Thormineralien vorkommenden natürlichen radioaktiven Substanzen kommen nun seit einer Reihe von Jahren die künstlichen Radioelemente hinzu. Durch Bestrahlung einzelner leichter Elemente durch die Strahlen starker Radiumpräparate wurden solche künstlich radioaktiven Elemente von dem Ehepaar Curie-Joliot in Paris zuerst hergestellt. Ein grosser Fortschritt in der Gewinnung solcher künstlicher Elemente wurde dann durch den italienischen Physiker Fermi erzielt, der an Stelle der geladenen  $\alpha$ -Teilchen des Radiums die ungeladenen Neutronenteilchen, deren Masse ebenso gross ist wie die des Wasserstoffs, zur Beschliessung chemischer Elemente verwendete. Die Neutronen waren kurz vorher im Anschluss an Versuche von Bothe und Becker (Heidelberg) durch den englischen Physiker Chadwick als solche erkannt worden. Der Vorteil der Neutronen beruht darauf, dass diese kleinen Masseteilchen ungeladene Atomkerne sind und deshalb nicht wie die positiv geladenen  $\alpha$ -Strahlen des Radiums von den ebenfalls positiv geladenen Kernen der Atome abgestossen werden. Vor allem mit Hilfe dieser ungeladenen Neutronenteilchen konnten von fast allen Elementen des Periodischen Systems künstlich radioaktive Vertreter, also aktive Isotope, gewonnen werden. Allerdings sind die Intensitäten der erhaltenen radioaktiven Substanzen im allgemeinen recht gering und der Nachweis nur mit empfindlichen physikalischen Methoden durchzuführen.

Ein grosser Fortschritt wurde deshalb dadurch erzielt, dass es in den letzten Jahren gelang, die Strahlen des Radiums weitgehend durch künstliche Strahlenquellen zu ersetzen. Solche künstlichen Strahlenquellen sind Hochspannungsanlagen, elektrostatische Generatoren und vor allem das Zyklotron. Besonders mit Hilfe des letzteren hat man nunmehr Strahlenquellen zur Verfügung, die u. U. mehreren Zentnern Radium entsprechen. Es ist selbstverständlich, dass mit diesen künstlichen Strahlenquellen sehr viele Untersuchungen durchgeführt werden können, zu denen die Intensität auch starker Radiumpräparate nicht ausreicht.

In der Tabelle 1 findet sich eine Zusammenstellung der wichtigsten bisher bekannten Kernreaktionen mit der Angabe der Anzahl der für die einzelnen Reaktionen bisher nachgewiesenen Fälle. In der ersten Vertikalreihe stehen die für die Umwandlungen verwendeten Geschosse, also die  $\alpha$ -Teilchen, Deuteronen (D), Protonen

aus ein	$\alpha$	H	2n	n	$\gamma$
$\alpha$	1	31	2	49	-
D	46	119	22	74	-
H	10	2	-	89	27
n	45	67	86	5	132
$\gamma$	-	-	-	26	-

Tab.1

Umwandlungsreaktionen von Atomkernen.

Neutronen(n) und  $\gamma$ -Strahlen. In der ersten H o r i z o n t a l - reihe stehen die bei der Reaktion frei werdenden Teilchen. Bei der Beschussung z.B. mit Deuteronen sind zur Zeit also 46 Reaktionen bekannt, bei denen  $\alpha$ -Teilchen emittiert werden: sogenannte d,  $\alpha$ -Prozesse; ausserdem 119 d p-Prozesse, bei denen ein Deuteron eingeschossen, ein Proton ausgesendet wird. Besonders zahlreich sind auch, wie schon erwähnt, die Neutronenprozesse, bei denen also Neutronen als Geschosse verwendet werden. Die wichtigsten unter diesen sind die, bei denen das Neutron unter Bildung eines Isotops des getroffenen Elements eingefangen wird, wobei ein  $\gamma$ -Strahl emittiert wird. 132 solcher Prozesse sind beschrieben.

Bei all den zahlreichen Umwandlungen, die man nunmehr durchführen kann, werden aber wie man aus der Tabelle sieht, immer nur kleine Masseteilchen, wie der Wasserstoff, das Helium oder das Neutron. Eine eigentliche Zertrümmerung der bestrahlten Elemente trat niemals auf und wurde auch für schwere Elemente für absolut unmöglich gehalten.

Kun habe ich vor einer Reihe von Jahren in Gemeinschaft mit Herrn Strassmann bei der Bestrahlung des Urans, des schwersten Elements des Periodischen Systems, mit Neutronen künstlich radioaktive Isotope aufgefunden, die wir für Vertreter des Radiums halten mussten. Die chemischen Eigenschaften dieses künstlichen Radiums schienen aber etwas andere zu sein als die des in der Natur vorkommenden Radiums, und wir haben deshalb eine systematische Untersuchung zur Aufklärung dieser kleinen Unterschiede durchgeföhrt, auf deren Einzelheiten hier nicht eingegangen werden kann. Schliesslich kamen wir zu der Überzeugung, dass wir kein künstliches Radium sondern ein künstliches, dem Radium chemisch nächstehendes Element das Barium, vor uns hatten. Da das Barium im System der Elemente an 56.Stelle steht gegenüber dem Uran an 92., war dieser Befund völlig unerwartet. Das Uran war offensichtlich in niedere Atomart zerplatzt.

Unmittelbar nach unserer ersten Veröffentlichung wurden die Versuche von allen grösseren Laboratorien in Europa und vor allem in den Vereinigten Staaten nachgeprüft und waren nach wenig Tagen bestätigt. Dass diese Bestätigung so schnell erfolgte, nachdem wir monatelang intensive Arbeit dazu gebraucht hatten, die Tatsache dieses neuartigen Prozesses zu behaupten, kommt daher, dass man



den Prozess ja für unmöglich gehalten hatte. Nach unserer chemischen Feststellung konnten dann die Physiker mit ihren stärkeren Strahlenquellen nach physikalischen Methoden die Vorgänge rasch verfolgen.

Fragt man sich, warum diese Uranspaltung ein solch ungewöhnliches Aufsehen erregte, dann sind dafür mehrere Gründe massgebend:

1. Der Prozess einer solchen Aufspaltung galt für ganz unmöglich.
2. Die Energie, mit der diese Zerspaltung des Urans vor sich geht, wurde als ausserordentlich gross erkannt; sie ist für die Spaltung eines Uranatoms etwa 30 Millionen mal grösser als die, die bei der Verbrennung von einem Atom Kohlenstoff zu einem Molekül Kohlensäure frei wird.
3. Bei dieser Zerspaltung treten nicht nur Elemente mittleren Atomgewichts auf, sondern es werden zusätzlich Neutronen abgegeben. Da nun die Spaltung selbst durch die Einwirkung von Neutronen erfolgt, so können diese zusätzlichen Neutronen weitere Spaltungen hervorrufen, und man kann deshalb sich eine Art Kettenreaktion vorstellen, nach der sich der Prozess immer mehr hinaufschauzelt, so dass die dabei frei werdenden Energien ganz ausserordentliche Beträge annehmen.

Nun gibt es aber neben diesen Neutronen erzeugenden Spaltreaktionen des Urans eine andere Reaktion, die Neutronen verschluckt, bevor diese die Spaltung herbeiführen. Schon vor einer Reihe von Jahren habe ich in Gemeinschaft mit L. Meitner ein künstlich radioaktives Uran-Isotop nachgewiesen, das bei der Bestrahlung des Urans mit Neutronen entsteht. Es entsteht durch einfache Anlagerung eines Neutrons an das Uran vom Atomgewicht 238, hat also das Atomgewicht 239. Unter Aussenden von  $\alpha$ -Strahlen bildet sich aus ihm ein Vertreter des Elements der Ordnungszahl 93, also eines Elements jenseits Uran, ein sogenanntes Trans-Uran. Für eine Energiegewinnung kommt der Anlagerungsprozess nicht in Frage. Es ist nun die Aufgabe der experimentellen Anordnung, den die Neutronen anlagernden Prozess nach Möglichkeit zu unterdrücken und den Spaltungsprozess zu bevorzugen. Über diese Fragen wird Herr Heisenberg nachher berichten.

4. Ein weiterer Punkt, der grosses Interesse beansprucht, ist die Erkenntnis, dass die Spaltungsprozesse ganz ausserordentlich verwickelt sind. Ausser den radioaktiven Bariumarten und den bei dieser Spaltungsart gleichzeitig entstehenden aktiven Kryptonisotopen bilden sich noch eine grosse Anzahl anderer radioaktiver Elemente. Es sind bisher nicht weniger als 24 dieser Elemente in Form von fast 90 verschiedenen radioaktiven Isotopen nachgewiesen und auf ihre Strahlung und Stabilität untersucht worden.

In der Tabelle 2 ist eine Zusammenstellung der bei der Uranspaltung bisher nachgewiesenen Elemente resp. ihrer künstlich radioaktiven Atomarten wiedergegeben.

Die genauere Erforschung der bei der Uranspaltung entstehenden Atomarten hat aber auch in bezug auf die nachher folgenden Ausführungen von Herrn Heisenberg eine ganz besondere Bedeutung. Diese Substanzen entstehen sozusagen als Schlacke bei dem Arbeiten der Maschine. Diese Schlacke kann den Prozess hemmen, und es ist daher sehr wichtig zu wissen, aus welchen Stoffen und in welchem Ausmass sich die Spaltprodukte, also die Schlacke, zusammensetzen; denn die





hermende Kraft, nämlich das Verschlucken von Neutronen, ist für die verschiedenen entstehenden Produkte sehr verschieden. Vielleicht gelingt es auch einmal, den Prozess in der einen oder anderen Richtung zu lenken. Doch sind diesvielleicht noch verfrühte Fragen.

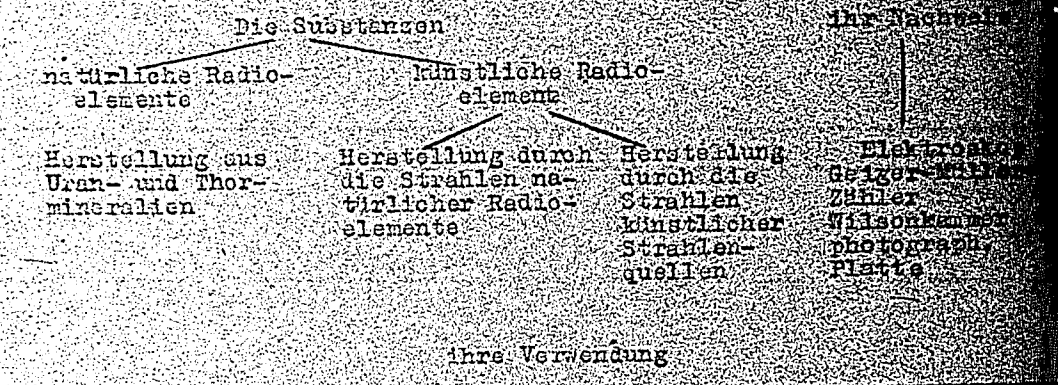
Wir wollen uns deshalb jetzt noch kurz mit der allgemeinen Bedeutung befassen, die den radioaktiven Substanzen, den natürlichen wie, vor allem in Zukunft, den künstlichen zukommt. Ich gehe jetzt ab, auf die unwälbliche Bedeutung der radioaktiven Vorgänge für die reine Forschung einzugehen. Aber einige Beispiele aus der praktischen Verwendung seien hier angeführt. Da können wir zunächst zwei prinzipiell verschiedene Verwendungsgebiete unterscheiden. Bei dem einen sind die Strahlen Selbstzweck. Wir haben ja an dem vorher genannten Vergleich mit der Flintenkugel gesehen, wie groß die Energie ist, mit der die Strahlenteilchen aus dem radioaktiven Atom herausgeschleudert werden. Man kann deshalb mit den radioaktiven Strahlen Gewebszerstörungen hervorbringen und benutzt diese Methode schon heute in grosser Masse etwa zur Heilung bösartiger Geschwülste wie Krebs und anderer Krankheiten.

Sie sogenannten  $\alpha$ -Teilchen des Radiums oder des Radiumthor regen gewisse Substanzen zum Leuchten an, so dass die Gegenstände die damit bestrichen sind, im Dunkeln leicht erkennbar werden; aus dieses Leuchten lässt sich nach, im Gegensatz zu den gewöhnlichen Leuchtfarben. Die ausgiebige Verwendung solcher radioaktiven Leuchtfarben für Unterseeboote, Flugzeuge u.dgl. darf ich als bekannt voraussetzen.

Eine technisch bedeutsame Anwendung der durchdringenden Strahlen ist ihre Verwendung zum Durchleuchten von Metall- und Maschinenanteilen, zur Prüfung von Schweißnähten, Prüfung auf Gussfehler und Porositäten. Hier sind die radioaktiven Strahlen den Röntgenstrahlen in mancherlei Fällen überlegen, weil die Präparate handlich sind und auch, wenn nötig, unmittelbar an die zu prüfende Stelle, etwa eine Schiffsschraube, einen Flugmotor, herangebracht werden können.

Eine wichtige Verwendung der Strahlen beruht auf ihrer Verhinderung des Zündvorgangs bei Zeitzündern gewisser Geschosse. Die Strahlen machen die Luft leitend und lösen damit den Zündvorgang aus.

Fast noch wichtiger in der Zukunft wird die Bedeutung der Strahlen nicht als Selbstzweck, sondern als Mittel zum Zweck sein, nämlich als Mittel zur Erkennung chemischer Elemente. Jeder der überaus empfindlichen Nachweiser durch die Strahlen, deren Wirkungsdauer für jedes aktive Element charakteristisch ist, sind sich die chemischen Elemente durch diese Strahlen bis hin zu den kleinsten Mengen einwandfrei feststellen. Sie dienen deshalb als "Indikatoren" für die gewöhnlichen Elemente und werden immer häufiger treffend als "Spurensucher" bezeichnet. Nur wenige Beispiele will ich hier nennen. Handelt es sich um die Durchlässigkeit von masken gefährlichen Gasen gegenüber oder um die Durchlässigkeit von Gewebeteilchen oder Filtereinheiten Schwabstörfer gegenüber, dann lässt sich diese Durchlässigkeit mit Hilfe kleiner Mengen gesetzter radioaktiver Gase oder radioaktiver Nebelstoffe mit grosserer Genauigkeit feststellen als nach anderen Methoden. Das gilt natürlich auch etwa für die Prüfung der Durchlässigkeit von Tüchern gegenüber Gelbkreuzteilchen u.dgl. mehr.



anorg.Ch.	analyt. Ch.	präparati- ve Ch.	physikal. Ch.	techni- sche Ch.	Kolloid- chemie	Biochemie
Eigen- schaften neuer Ele- mente Löslich- keitsbest. Konstitu- tionsbest. Gitterrein- bau	Wirksam- keit chem. Trennungen Quantita- tive Ana- lyse zerstörungs- freie Ana- lyse	Ent- deckung und Her- stellung von BiH <sub>3</sub>	Reaktions- geschwin- digkeit absolute Oberflächen- charakteran- derungen Diffusions- vorgänge Reaktionen im festen Zustand	Material- prüfung durch γ-Strahlen aktive Leucht- massen Prüfung v. Gasdurch- lässigkeit	Nachweis kolloider u. kristal- loider Lösungen Alterung von Selen und Gelen	Stoff- wechsel vorgänge in Tiere Mensch Knochen u. Zahn- bildung Rein- mittel- prüfung

Tabelle 3

Atomumwandlungen und ihre Verwendung in der Chemie

## Die Energiegewinnung aus der Atomkernspaltung.

von Werner Heisenberg

Die Entdeckung der Uranspaltung durch Hahn und Strassmann hat die Aussicht auf die Lösung eines wichtigen Problems eröffnet, die technische Ausnutzung der grossen, in den Atomkernen aufgespeicherten Energien. Wenn 1 kg Kohle verbrennt, so wird dabei eine Energiemenge etwa 7000-kcal frei, wenn dagegen 1 kg Radium durch die Aussendung radioaktiver Strahlung im Laufe der Zeit zerfällt, so werden dabei etwa 40 Mill. kcal frei. Die technische Ausnutzung dieser Energie war bisher unmöglich, da der radioaktive Zerfall der Materie nicht beeinflusst werden kann, und da die künstliche Umwandlung von Atomkernen, die "Atomzertrümmerung", stets nur an minimalen Materiemengen möglich gewesen ist. Nach der Entdeckung der Uranspaltung kann man jedoch hoffen, die Umwandlung grösserer Materiemengen durch eine Kettenreaktion zu bewerkstelligen; denn bei der Spaltung des Urankerns werden gewöhnlich auch einige Neutronen, die vorher Bestandteile des Atomkerns waren, freigesetzt. Diese Neutronen können ihrerseits neue Spaltungen an andern Atomkernen hervorrufen, bei denen dann wieder Neutronen frei werden, und so kann sich dieses Spiel wiederholen. Ein grosser Teil der Uranmenge durch Spaltung verwandelt ist. Diese Grundidee zur Energiegewinnung aus den Atomkernen ist im Sommer 1939 in einem Artikel von Flügge in den "Naturwissenschaften" veröffentlicht worden.

Nach dem Beginn des Krieges ist das Problem von einer Arbeitsgemeinschaft im Rahmen des Heereswaffenamtes in Angriff genommen worden. Aber auch in andern Ländern, insbesondere in den Vereinigten Staaten, sind grosse Mittel für die Lösung des Problems eingesetzt worden.

Die Verwirklichung des Kriegszweckes geschichteten Plans stehen zunächst folgende Schwierigkeiten im Wege: Das gewöhnliche Uran ist eine Mischung von drei Atomsorten:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{234}\text{U}$ , die das Atomgewicht 238, 235 bzw. 234 besitzen. Die beiden letzteren Atomarten sind viel seltener als die erste. Das  $^{235}\text{U}$  macht etwa weniger als 1% und  $^{234}\text{U}$  weniger als 1/100% von  $^{238}\text{U}$  aus. Nur das zweite Isotop, das  $^{235}\text{U}$ , kann durch langsame Neutronen gespalten werden. Wenn es gelänge, diese Substanz rein darzustellen, also eine grössere Menge von reinem  $^{235}\text{U}$  herzustellen, so würde sich in diesem Material ein Vorgang abspielen, der schematisch auf der rechten Seite der Abbildung 1 dargestellt ist. Die von einem Spaltungszentrum ausgehenden Neutronen würden auf andere  $^{235}\text{U}$ -Kerne treffen und diese anfangs spalten und dabei neue Neutronen erzeugen oder an ihnen abgelenkt werden und dabei Energie verlieren. Die abgelenkten Neutronen würden wieder auf andere Urankerne treffen, aber schliesslich wird jedes Neutron einmal Anlass zu einer Spaltung und damit zu einer Neutronenvermehrung geben. Die gesamte Neutronenmenge wird sich also demnach vermehren. Es sei denn, dass das Materiestück so klein ist, dass die vielen Neutronen durch die Oberfläche abfliessen, dass dieser Abfluss nicht durch die Neutronenvermehrung im Innern aufgewogen wird. Wenn aber das Materiestück gross genug ist, so wird die Neutronenvermehrung überwiegen. Die Neutronenmenge wird im Bruchteil einer Sekunde an enormen Mengen anwachsen, bis ein grosser Teil des Materials durch Spaltung verwandelt und eine entsprechende grosse Energiemenge in Form von Sionsart frei geworden ist.



Abb. 1

Schematische Darstellung der Vorgänge beim Durchgang von Neutronen durch Uran.

Im gewöhnlichen Uran jedoch spielen sich die Vorgänge ganz anders ab (vgl. die linke Seite der Abbildung 1). Hier wird ein von einem Spaltungszentrum ausgehendes Neutron nur in seltenen Fällen bei Zusammenstoss mit Urankernen wieder eine Spaltung hervorgerufen. Meist wird das Neutron durch Ablenkung an  $^{238}\text{U}$ -Kernen abgelenkt, wird es schliesslich bei bestimmten Energien in einem  $^{238}\text{U}$ -Kern eingelenkt und diesen in einen  $^{239}\text{U}$ -Kern umwandelt. Damit geht das Neutron für die weitere Neutronenvermehrung verloren, und deshalb ist im gewöhnlichen Uran die genannte Kettenreaktion unmöglich.

Man kann aber versuchen, dem gewöhnlichen Uran eine gewisse Bremssubstanz beizugeben (vgl. die untere Hälfte der linken Seite der Abbildung 1), die die Neutronen möglichst schnell bis zur kritischen Geschwindigkeit abbremsen soll, so dass sie dadurch an dem kritischen Energiegebiet, in dem sie von  $^{238}\text{U}$  eingelenkt werden können, vorbeiziehen. Als Neutronen thermischer Geschwindigkeit werden sie dann die Spaltung des Atomkerns  $^{235}\text{U}$  führen. Allerdings bringt die Beibringung einer Bremssubstanz wieder die Gefahr mit sich, dass die langsamen Neutronen in der Bremssubstanz eingefangen werden und damit für die weitere Vermehrung ausscheiden.

Bei dieser Sachlage bieten sich zwei Wege dar, die Gewinnung aus der Uranspaltung zu verwirklichen.

## 1. Die Reindarstellung oder Anreicherung des wirksamen Isotops 235.

Dieser Weg muss sicher zum Ziel führen, wenn die Reindarstellung oder die Anreicherung technisch möglich ist. In der genannten Arbeitsgemeinschaft ist es zum erstenmal Hardeck im vergangenen Jahrgelungen, eine geringe Anreicherung an zunächst noch sehr kleinen Materiemengen zu erzielen. Über die Technik und späteren Aussichten dieses Verfahrens wird im Vortrag von Herrn Clusius die Rede sein.

## 2. Die Verwendung von gewöhnlichem Uran mit einer geeigneten Bremsabstanz.

Über die mit diesem Verfahren zusammenhängenden Fragen sind im Laufe der letzten Jahre in der genannten Arbeitsgemeinschaft viele Untersuchungen durch die Kaiser-Wilhelm-Institute in Heidelberg und in Berlin, durch die Physikalischen Institute an den Universitäten Leipzig, Hamburg, Wien, an der Technischen Hochschule in Charlottenburg und an anderen Hochschulinstituten durchgeführt worden, die hier nicht im einzelnen aufgeführt werden können. Nur die wichtigsten Ergebnisse sollen kurz Erwähnung finden: Die einzige Bremsabstanz, die für die Lösung des Problems in Betracht kommt, ist schweres Wasser. Andere Substanzen, wie Beryllium und reine Kohle, können zwar in Verbindung mit schwerem Wasser zu einer Verbesserung der Maschine führen, würden wohl aber allein nicht ausreichen. Ferner hat sich herausgestellt, dass bei dem Vorgang im gewöhnlichen Uran auch die Spaltung des  $^{238}\text{U}$  durch schnelle Neutronen eine gewisse Rolle spielt. Schliesslich ist man daran gegangen, kleine Versuchsapparaturen zu bauen, die aus Schichten von Uran und Bremsabstanz bestehen, und an denen man die Möglichkeit der Energiegewinnung in folgender Weise kontrollieren kann: Diese Apparaturen sind zu klein, um selbsttätig brennen zu können, da der Abfluss von Neutronen aus der Oberfläche zu gross ist. Wenn man jedoch ins Zentrum dieser Apparaturen eine Neutronenquelle bringt, so kann man untersuchen, ob die dann aus der Apparatur ausströmende Neutronenmenge grösser oder kleiner ist als die Neutronenmenge, die von der Neutronenquelle selbst ausgeht. Wenn sie grösser ist, so ist damit der Beweis erbracht, dass eine Vergrösserung der Apparatur zu einem selbständig strahlenden U-Brenner führen würde. Ein Bild einer solchen Versuchsapparatur geben die Abbildungen 2 und 3. Die dort dargestellte Versuchsapparatur enthält Paraffin als Bremsabstanz und ist deshalb zur Neutronenvermehrung nicht geeignet. Sie war zur Vermehrung der wichtigsten Konstanten für spätere Anordnungen bestimmt. Die ganzen Apparaturen werden gewöhnlich in Wasser versenkt (vgl. Abbildung 3), da der Wassermantel für eine starke Rückstreuung von Neutronen in das Innere der Apparatur hinein und damit für eine Steigerung der Neutronenvermehrung sorgt.

Mit einer derartigen Apparatur aus U-Metall und schwerem Wasser ist zum erstenmal vor etwa einem Jahr durch Bögel in Leipzig gezeigt worden, dass die Energiegewinnung auf dem beschriebenen Weg möglich sein muss. **WAPPA** Inzwischen ist noch eine etwas verbesserte Apparatur ähnlicher Art in der Chemisch-Technischen Reichsanstalt durch eine Arbeitsgruppe des Heereswaffenamts untersucht worden, die gleichen Ergebnis geführt hat, und in der die Neutronenvermehrung etwas höher war.

Abb. 2

Schnitt durch eine Schichtenanordnung aus Uranmetall und Paraffin, die im Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik in Dahlem zur Untersuchung der Neutronenvermehrung aufgebaut war.



Abb. 3

Aussenansicht der Apparatur im Wasserbehälter.

Da zum Bau eines energieliefernden Uranbrenners wahrscheinlich recht erhebliche Mengen von Uranmetall und schwerem Wasser notwendig sind, wird der Bau von Versuchsapparaturen, die uns diesem Ziel näher bringen, in seinem Tempo durch die Herstellung dieser beiden Materialien bestimmt. Als nächster Schritt ist der Bau einer Apparatur geplant, die etwa  $1\frac{1}{2}$  t  $D_2O$  und 3 t Uranmetall in Form von Schichten enthalten und in einem jetzt in Bau befindlichen Bunker im Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik in Dahlem aufgestellt werden soll. Die Abbildung 4 zeigt das Innere des geplanten Apparats. Es ist zu hoffen, dass die Versuche an diesem Apparat, die von den Mitgliedern der Kaiser-Wilhelm-Institute in Berlin und Heidelberg gemeinschaftlich durchgeführt werden sollen, noch im Laufe des Sommers 1943 begonnen werden können. Aus den Ergebnissen des Versuchs wird man recht sichere Schlüsse über die Ausmaße und die Wirkungsweise des endgültigen Uranbrenners erhalten können.

Der endgültige Brenner würde die Lieferung von Energie etwa in folgender Weise bewerkstelligen: Er würde sich vermöge der in seinem Innern stattfindenden Spaltungsprozesse von selbst auf einer geeigneten Betriebstemperatur halten, wobei die Betriebstemperatur von den Abmessungen des Brenners abhängt und so gewählt werden muss, dass einerseits viel Wärme abgeführt werden kann und andererseits keine Zerstörung des Brenners durch Korrosion o.dgl. eintritt. Bei einer Abführung von Wärme aus dem Brenner würde die Temperatur nur für ganz kurze Zeit gesenkt werden; denn jede Senkung der Temperatur hat sofort eine Steigerung der Spaltungsprozesse und damit eine erhöhte Energielieferung zur Folge. Dem Brenner kann also so viel Energie entzogen werden, bis ein erheblicher Teil der gesamten Uranmenge durch Spaltung verwandelt ist.

Abb. 4

Schematische Innenansicht einer im Bau befindlichen Apparatur mit  $1,5$  t  $D_2O$  und 3 t Uran-Metall.

Wenn es einmal gelingt, erhebliche Mengen von Uran herzustellen, in denen das wirksame Isotop 235 angereichert ist, so wird man die Grösse des Brenners bei Benutzung dieses Urans erheblich verringern können, insbesondere wird man auch das seltene  $D_2O$  durch gewöhnliches Wasser ersetzen können.

Wenn es gelungen ist, einen derartigen Brenner in Gang zu setzen, so wird die erste wichtigste technische Anwendung in der Herstellung künstlich radioaktiver Substanzen bestehen; denn ein solcher Brenner würde etwa 100mal stärker als die stärksten bisher gebauten Tyllotrons strahlen können und würde daher die Herstellung von sehr grossen Mengen künstlich radioaktiver Substanzen ermöglichen. Über die technische Anwendung solcher Substanzen (vgl. z.B. das Problem der Leuchtfarben) wurde bereits im Vortrag von Herrn Hahn gesprochen.

Wenn man viele derartige Brenner herstellen kann, so kann man an ihre Anwendung zum Antrieb von Wärmekraftmaschinen und an ihre Benutzung für Schiffe und andere Fahrzeuge denken, bei denen es darauf ankommt, eine möglichst grosse Energiemenge in einem kleinen Raum zu speichern. Dass bis zur Erreichung dieses Zieles auch noch viele rein technische Probleme zu lösen sind, die mit der Frage der Wärmeüberführung, der Korrosionsfestigkeit der benutzten Metalle usw. zusammenhängen, braucht wohl nicht erst erwähnt zu werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass hier der erste Schritt zu einer sehr wichtigen technischen Entwicklung getan ist, und dass nach den vorliegenden Experimenten kaum mehr an der Möglichkeit gezweifelt werden kann, die Atomkern-Energie für technische Zwecke in grossem Umfange freizumachen. Andererseits stösst die praktische Durchführung dieser Entwicklung in der gespannten Wirtschaftslage des Krieges naturgemäss auf grosse äussere Schwierigkeiten.

## Die Forschungsmittel der Kernphysik.

von Walter Bothe.

Die Physik der Atomkerne ist heute fast ein halbes Jahrhundert alt. Dennoch waren die experimentellen Hilfsmittel, deren sich der Kernphysiker bis vor etwa einem Jahrzehnt bediente, noch ausserordentlich einfach. Dies hatte natürlich seinen Grund darin, dass die Strahlen, die ja das eigentliche Werkzeug, sozusagen das tägliche Brot des Kernphysikers sind, damals noch ausschliesslich von der Natur selbst geliefert wurden. Als Strahlenquellen dienten die natürlich radioaktiven Stoffe und ihre Zerfallsprodukte, das Uran, Radium, Thorium, Polonium, die Emanationen usw. Der Kernphysiker brauchte sich also seine Strahlen nicht erst zu machen, weil er sie nicht machen konnte, oder besser, weil er noch nicht wusste, dass er sie sich machen kann. Das wurde aber sofort anders, als im Jahre 1932 im Rutherford'schen Laboratorium zum erstenmal gezeigt wurde, dass man mit künstlich hergestellten Strahlen Atomkernprozesse hervorrufen kann. Seitdem ist sehr viel Mühe und Geld auf die technische Durchbildung immer leistungsfähigerer künstlicher Strahlenquellen verwendet worden, und dieser Prozess ist noch keineswegs zum Abschluss gekommen. Jedenfalls ist die Lage heute so, dass ein kernphysikalisch arbeitendes Laboratorium hoffnungslos im Rückstand wäre, wenn es dieser technischen Entwicklung nicht folgen wollte, denn gerade dieser Entwicklung ist es zu danken, dass nicht nur die Kernphysik als Wissenschaftsweig einen so grossen Aufschwung nehmen konnte, sondern auch mancherlei praktische Anwendungen der Kernphysik, die früher höchstens als theoretische Möglichkeit diskutabel erschienen, heute kernpraktischen Verwirklichung nahegekommen sind.

Worauf beruht nun die grosse Überlegenheit dieser künstlichen Strahlenquellen gegenüber den natürlich radioaktiven? Hier sind drei verschiedene Umstände von Wichtigkeit. Erstens: Von den drei Strahlenarten, die von den natürlich radioaktiven Stoffen ausgesandt werden,  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen, kommen für die künstliche Umwandlung der Elementpraktisch nur die  $\alpha$ -Strahlen in Betracht; sie bestehen bekanntlich aus Kernen des Heliumatoms. Die technischen Strahlenquellen dagegen erlauben ausser diesen auch Strahlen aus Protonen und Deuteronen herzustellen, das sind die Kerne des gewöhnlichen und des schweren Wasserstoffs, und diese haben sich gerade als besonders wirksame Mittel zur Umwandlung der Atomkerne erwiesen. Gelegentlich konnten sogar künstliche Strahlen aus dem dritten Wasserstoffisotop, dem Tritonium, und aus Lithiumkernen für Kernumwandlungen benutzt werden. Erst hierdurch wird die grosse Mannigfaltigkeit der heute bekannten Kernprozesse bedingt. Der zweite wichtige Punkt ist, dass man auf technischem Wege ausserordentlich viel grössere Strahlenmengen erzeugen kann, als von den normalerweise verfügbaren radioaktiven Präparaten ausgehen. Strahlungen, die einer Radiummenge von 100 kg äquivalent sind, sind heute schon gar nichts besonders Aufregendes mehr. Was drittens die Strahlenenergie, d.h. die Bewegungsenergie der einzelnen Teilchen betrifft, so lässt sich diese mit dem Zyklotron heute schon bis auf das Vierfache der Energie normaler natürlicher  $\alpha$ -Strahlen steigern.

Nun zu den verschiedenen Konstruktionsprinzipien künstlicher Strahlenquellen und ihren praktischen Ausführungen. Strahlen geladener Teilchen ersetzt man, indem man die Teilchen mit Hilfe elektrischer Spannungen beschleunigt. Je höher die Spannung, umso grosser wird die Bewegungsenergie der Teilchen; man rechnet diese nach folgender Formel:

Volt oder genauer in "Elektron-Volt" (eV). Z.B. haben die natürlichen  $\alpha$ -Strahlen der Radium- und Thoriumreihe Energien bis zu rund 8 Mill.eV. So hohe Spannungen wirklich herzustellen, ist schon technisch nicht ganz einfach, und in der Tat begnügt man sich für kernphysikalische Zwecke meist mit erheblich kleineren Spannungen. Das gewöhnliche Mittel der Technik, Hochspannung herzustellen, ist der Transformator. Es wäre aber nur unzweckmässig, wenn man beispielsweise Strahlen von 1 Mill.eV herstellen wollte, einen Transformator für 1 Mill.Volt aufzustellen. Statt dessen geht man von einer verhältnismässig niedrigen Transformatorspannung aus, etwa einigen 100 000 Volt, und sorgt durch gewisse Kunstschaltungen dafür, dass diese Spannung sich mehrmals übereinandertümt, bis die gewünschte Endspannung erreicht ist. Abbildung 1 zeigt das aus einem zur ~~Ultimate~~ ~~Ultimate~~ Transformator, Kondensator und Ventilen das Schema eines solchen "Stossengenerators", der in der Hauptsache aus einem verhältnissmässig kleinen Transformator, Kondensatoren und Ventilen besteht (zuerst von Kleinacher angegeben). Abbildung 2 zeigt als Beispiel einer praktischen Ausführungsform die beiden von Siemens gebauten Kaskadengeneratoren im Max-Planck-Institut in Göttingen, die für je 1,4 Mill.Volt gedacht waren. Ein anderes Beispiel (Abbildung 3) ist die von Philips errichtete Anlage im Cavendish-Laboratorium für 1,2 Mill.Volt. Hier sieht man auch die Röhre, die zur Beschleunigung der Teilchen dient, ferner einen Generator, der zur Erzeugung der Teilchen am oberen Ende der Röhre nötig ist; dieser liegt natürlich auf Hochspannung und muss mit einem isolierenden Treibriemen oder Welle angetrieben werden. Das Genauere über die Erzeugung der Strahlen wird auf einer späteren Abbildung zu sehen sein (Abbildung 5). Mit Generatoren dieses Typs ist man bisher nicht über 2 Mill.Volt gegangen, obwohl grundsätzlich auch 3 oder 4 Mill.Volt auf diese Weise erreicht werden könnten. Dagegen hat man 3 Mill.Volt und mehr des Öfteren mit einer anderen Schaltung hergestellt, dem sogenannten Stossgenerator. Hierbei wird das Aufeinandertreffen kleinerer Spannungen nur jeweils für einen kurzen Augenblick stossweise zu Wege gebracht, indem man parallel aufgeschlossene Kondensatoren plötzlich hintereinanderschaltet.

Abb. 1  
Schema des Kaskadengenerators

Abb. 2  
Kaskadengeneratoren des Max-Planck-Instituts

Abbildung 4 zeigt einen kleineren Stossgenerator für 2 Mill. Volt, der in Kopenhagen im Bohrschen Institut steht (gebaut von Koch und Stersel). In Abbildung 5 sind zwei Stossgeneratoren für 2-5 Mill. Volt zu sehen, die also zusammen 10 Mill. Volt liefern (GEC, U.S.A.). Die Verwendungsmöglichkeiten solcher Stossgeneratoren für kernphysikalischen Zwecke sind jedoch recht beschränkt.

Abb. 3

Anlage des Cavendish-Laboratoriums. Von links nach rechts: Kaskadengenerator; Messwiderstand, Beschleunigungsröhre, 60-kV-Generator zum Betrieb der Ionenquelle.

Abb. 4

Stossgenerator im Kopenhagener Institut.

Abb. 5

Stossgenerator der GEC für 2-5 Mill. Volt.

Es gibt aber nun noch ein anderes Prinzip zur Erzeugung hoher Spannungen, das ohne Transformatoren arbeitet und sich wegen seiner Einfachheit gerade für Aufgaben der Kernphysik als sehr nützlich erwiesen hat, d. i. der elektrostatische Generator nach van de Graaff (Abbildung 6). Das Prinzip ist einfach das der bekannten Influenzmaschine, nur sind die rotierenden Scheiben dabei ersetzt durch ein endloses Band aus einem Isolierstoff, das oben und unten über je eine Walze läuft und von unten mit einem Motor angetrieben wird. Unten wird elektrische Ladung auf das Band gesprüht, nach oben transportiert und dort auf einen grossen Hochspannungskörper überführt. Dieser Körper enthält nun gleichzeitig auch das eine Ende der Beschleunigungsröhre, deren Konstruktion hier ebenfalls zu erkennen ist. Das Grundprinzip der Strahlerzeugung ist stets das von M. Wien erdachte Durchströmungsprinzip. Die Ionen werden zunächst in einem Raum von verhältnismässig niedriger Spannung (etwa 50 000 Volt) erzeugt und treten dann als Kanalstrahlen durch eine enge Düse in den eigentlichen Beschleunigungsraum, der dauernd auf Hochvakuum gepumpt wird. Die Ionenquelle ist hier die im Rutherford'schen Laboratorium zuerst angewandte; neuerdings gibt es auch andere Konstruktionen dafür, die gewisse Vorteile bieten. Zum Betrieb der Ionenquelle dient eine kleiner Generator mit Gleichrichter, der im Innern des Hochspannungszylinders untergebracht ist und mit einer isolierenden Pertinaxwelle von aussen angetrieben wird. Weiter ist im Hochspannungszylinder noch der Gasbehälter untergebracht, der die Ionenquelle speist; das Gas (gewöhnlicher oder schwerer Wasserstoff, Helium) strömt erst in die Ionenquelle, tritt dann durch die Düse in den Beschleunigungsraum, aus dem es durch eine leistungsstarke Diffusionspumpe unten rasch abgepumpt wird. Der Beschleunigungsraum enthält nun mehrere zylindrische Zwischenelektroden, deren Potential



durch Abgrüthen geregelt werden kann. Die genaue Zentrierung der obersten Zwischenelektrode, auf die es sehr ankommt, geschieht von aussen durch Schliffe. Diese Zwischenelektroden erfüllen zweierlei Funktionen: Erstens regeln sie den Spannungsabfall in der Röhre und verhindern so Durchschläge, zweitens wirken die Zwischenräume zwischen den einzelnen Zylindern als "Ionenlinsen", die den Strahl in einem Brennfleck am unteren Ende der Röhre zusammenziehen. Hier wird dann die zu bestrahlende Substanz abgebracht, wobei man noch für gute Fühlung sorgen muss, denn die Wärmewirkung des Strahls kann beträchtlich sein. Dazwischen ist dann gewöhnlich noch ein Absperrrohr angebracht, damit man die Substanz auswechseln kann ohne Luft in die Röhre zu lassen, sowie eine Quarzplatte, die man in den Strahlengang drehen kann, um die Fokussierung zu überwachen; der Quarz leuchtet hell auf, wo er von dem Strahlen getroffen wird. Ausführlicher soll auf die Konstruktion nicht eingegangen werden; es sollte nur an einem Beispiel gezeigt werden, dass schon in einer verhältnismässig einfachen Anlage eine ganze Reihe konstruktiver Feinheiten stecken. Die äussere Ansicht dieser Anlage zeigt Abbildung 7; es ist die in unserem Heidelberger Institut seit 6 Jahren feststehend in Betrieb befindliche Anlage. Sie liefert bis zu 1 Mill. Volt. U. a. gelang mit dieser einfachen Anlage zum erstenmal die Erzeugung radioaktiver Stoffe mittels

Strahlen. Der grosse Vorteil des elektrostatischen Generators besteht darin, dass nie ernstlich etwas daran entzwei gehen kann, dass etwaige Schäden immer leicht und schnell zu beheben sind, und dass die Bau- und Betriebskosten sehr gering sind. Die Abbildungen 8 und 9 zeigen eine grössere Anlage dieser Art in Cambridge, USA. Der Hochspannungskörper hat rund 5 m Durchmesser. Dieser Generator reicht bis 2,7 Mill. Volt. Die obere Spannungsgrenze ist immer durch Überschläge und Sprühentladungen mit dem Luftdruck wächst. Nun weist man diese Spannung, dass die Übergangsspannung mit dem Luftdruck wächst. Daher kann man die Spannung noch erheblich höher treiben, indem man den Generator in einen Druckkessel bringt, wie beim Generator der Westinghouse-Gesellschaft (Abbildung 10). Dieser reicht bis 3,7 Mill. Volt bei einem Druck von 5,6 at. Der Betrieb in einem solchen abgeschlossenen Kessel bringt naturgemäss mancherlei Unbequemlichkeiten mit sich, und auch der Kosten- und Materialaufwand ist bei einem so grossen Druckgenerator schon recht beträchtlich.

Abb. 6

Schnitt durch die Heidelberger van de Graaff-Anlage

Abb. 7

Ansicht der Heidelberger van de Graaff-Anlage

Abb. 8

Schnitt durch die van de Graaff-Anlage in Cambridge, USA

Abb. 9

Ansicht der van de Graaff-Anlage in Cambridge, USA

Abb. 11

Leistungskurve für den Prozess  $\text{Be} (d,n)$

Die Apparate, von denen bisher die Rede war (Kaskaden-generator, Stoss-generator, elektrostatischer Generator) haben wohl alle dieselbe praktische Spannungsgrenze, die man auf etwa 4 Mill. Volt veranschlagen kann. Über diese Grenze hinaus würden die Erstellungs- und Betriebskosten solcher Anlagen in keinem Verhältnis mehr zu ihrer Leistung stehen. Auf der anderen Seite besteht nun aber ein grosses Interesse daran, die Strahlenergie möglichst weit zu steigern. Die Ergiebigkeit aller Kernreaktionen wächst nämlich mit steigender Strahlenergie sehr rasch an. Gewisse Kernprozesse erfordern sogar eine gewisse Mindestenergie der Strahlen, die sehr hoch liegen kann, z.B. bei 10 Mill. Volt. Die Abbildung 11 soll den Vorteil grosser Strahlenergie veranschaulichen. Sie stellt die Radiummenge dar, mit welcher ein Deuteronenstrahl von gegebener Energie gleichwertig ist. Abszisse ist die Energie, Ordinate ist das Radiumäquivalent, immer für dieselbe Strahlintensität von  $1 \mu\text{A}$ . Das Radiumäquivalent ist gemessen an der Fähigkeit, Neutronen beim Auftreffen des Strahls auf Beryllium zu erzeugen. Man sieht, wann es gelingt, die Strahlenergie von 4 Mill. eV auf 10 Mill. eV zu steigern, so wächst das Radiumäquivalent auf das 17fache, bei 16 Mill. eV sogar auf das 40fache an. Diese Kurve ist g e m e i n worden, denn in Nordamerika kann man in der Tat seit einigen Jahren schon Strahlen von 16 Mill. eV herstellen. Dies gelingt allerdings nur mit einer ganz anderenartigen Einrichtung als bisher besprochen, nämlich dem Zyklotron.



Das Zyklotron ist zur Zeit das mächtigste Werkzeug des Kernphysikers und soll daher etwas ausführlicher besprochen werden. Es wurde im Jahre 1930 von Lawrence in Berkeley erfunden und beruht auf folgendem Grundgedanken: Statt die Teilchen in einem Zug durch eine entsprechend rechnerisch hohe Spannung zu beschleunigen, erteilt man ihnen nach und nach viele kleine Stöße, ähnlich wie man ein Rad in sehr schneller Umdrehung versetzen kann, indem man es sehr häufig nacheinander mit der Hand anstößt. Dazu muss man mit der Hand immer wieder nachholen, und dasselbe gilt beim Zyklotron für die beschleunigte Spannung, d.h. man braucht Wechselspannung, und zwar von ziemlich hoher Frequenz, die entsprechende Welle liegt im Kurzwellenbereich. Und weiter: Ebenso wie beim Rad muss man auch beim Zyklotron die Teilchen umlaufen lassen, sonst müsste man ihnen ja mit der Spannung nachlaufen, und die Apparatur würde auf diese Weise 100m lang oder noch länger werden. Dieses Umlaufen geladener Teilchen erzielt man bekanntlich, indem man sie in einem Magnetfeld sich bewegen lässt. Wie nun diese beiden Felder, das elektrische Hochfrequenzfeld und das Magnetfeld im Zyklotron miteinander kombiniert sind, zeigt schematisch Abbildung 12. DD ist eine längs eines Durchmessers aufgeschlitzte Dose, die in einem starken Magnetfeld von 10 bis 20 000 Oe liegt; die magnetischen Kraftlinien verlaufen senkrecht zur Zeichnung. An den beiden Halbdosen ("D-Elektroden") liegt die Hochfrequenzspannung. Die Teilchen werden ungefähr in der Mitte durch eine Ionenquelle Q erzeugt. Dann entwickelt sich folgendes Spiel: Die obere Elektrode wird abwechselnd negativ und positiv, die untere entsprechend positiv und negativ. Sobald die obere Elektrode negativ geladen ist, werden die positiven Teilchen hineingezogen und beschreiben im Innern einen Halbkreis, bis sie wieder aus dieser Elektrode austreten. Inzwischen haben sich aber die beiden Elektroden elektrisch umgepolt, sodass jetzt die untere Elektrode negativ geworden ist. Daher erhält das Teilchen einen neuen Beschleunigungsstoß, der seine Energie weiter wachsen lässt. Dieses Spiel wiederholt sich sehr oft; dabei wird der Bahnradius mit zunehmender Energie immer grösser, bis das Teilchen dem Innenrande der Elektroden nahe kommt und damit die grösstmögliche Energie erreicht hat. Dieser Vorgang muss natürlich bei geringem Gasdruck verlaufen, deshalb ist das Ganze in eine gasdichte Kammer K eingeschlossen, durch deren Wand die Hochfrequenz isoliert eingeführt wird. Wenn nun die Teilchen ihre Höchstenergie angenommen haben, ist der Zweck häufig schon erreicht. Man kann die Stoffe, die bestrahlt werden sollen, auf einer gekühlten Sonde ins Innere der Kammer, und zwar in die letzten Strahlungsarme bringen. Häufig möchte man aber auch gern den Strahl aus der Kammer austreten lassen, um ihn besser handhaben zu können. Dies geschieht in der Weise, dass man den Strahl durch eine zusätzliche elektrische Querspannung, die man an den sogenannten Ablenker A legt, aus dem Bereich der elektrischen und magnetischen Spannung herauszieht und durch ein dünnes Fenster F austreten lässt.

Dies ist das Prinzip des Zyklotrons; wie sieht nun die praktische Ausführung aus? Zunächst ist die Zahl der Umläufe in Wirklichkeit viel grösser als hier aus Gründen der Übersichtlichkeit gezeichnet wurde. Man lässt die Teilchen z.B. 100mal und noch öfter umlaufen. Ist dann die Maximalspannung zwischen den D-Elektroden z.B. 50 000 Volt, was leicht zu erreichen ist, so gewinnt das Teilchen bei jedem Umlauf 100 000 eV, kommt also schliesslich auf 100x100 000 = 10 Mill.eV und mehr. Die grösste Energie, die man bisher auf diese Weise erreicht hat, beträgt 15 Mill.eV für Deuteronen, 32 Mill.eV für  $\alpha$ -Teilchen. Das Zyklotron, mit dem dies gelang, steht in Berkeley, Cal. (Abbildung 13). Es ist selbstverständlich, dass sich die praktische Ausführung einer leistungsfähigen Zyklotronanlage wesentlich komplizierter gestaltet als das einfache Prinzip. Es enthält eine grosse Zahl technischer, insbesondere hochfrequenz- und hochspannungs-

Abb.12

Schema des Zyklotrons.

Abb.13

Das grosse Berkeley-Zyklotron. Oberes Bild: Vorn links der Magnet mit der Beschleunigungskammer, in der Mitte der D-Elektroden-Schwingkreis, im Hintergrund der HF-Sender; durch das schwarze Kabel wird die Ablenkspannung zugeführt. Unteres Bild: Ansicht von der anderen Seite mit der Bestrahlungskammer.

Probleme. Z.B. muss man auch die Feldverläufe sorgfältig so wählen, dass der Strahl bei seinen vielen Umläufen immer in der Nähe der Mittelebene bleibt und nicht an die Innenwände der D-Elektroden anläuft. Es würde aber zu weit führen, auf solche Einzelheiten näher einzugehen, zjmal auch die genaue Theorie des Zyklotrons, wie sie von Herrn Danzer in unserem Institut entwickelt wurde, wesentlich komplizierter ist als zunächst zu erwarten war. Es soll nur noch in einer Abbildung gezeigt werden, wie die praktische Konstruktion der Kammer aussieht (Abbildung 14). Die Kammer des grossen Berkeley-Instituts hat 1,5m Durchmesser.

Abb.14

Kammer des kleineren Berkeley-Zyklotrons.

Hier sei noch eingeschaltet, dass dank der Unterstützung der Helmholtz-Gesellschaft Herr Gentner von unserem Institut im Frühjahr 1939 auf einer mehrmonatigen Reise die rund 15 Zyklotronanlagen in Nordamerika eingehend studieren konnte. Etwas später konnte der Vortragende der Inangasetzung des grossen Berkeley-Zyklotrons beizuhelfen weiter hatten wir dann noch Gelegenheit, eigene Zyklotronerfahrungen zu sammeln, als wir ab Juli 1939 dank der Initiative und Unterstützung des Heereswaffenamtes das halbfertige Pariser Zyklotron fertigstellen und gemeinsam mit Herrn Joliot in Betrieb nehmen konnten. (Abbildung 14) Im einzelnen mögen aus unserer Pariser Arbeit nur zwei Punkte herausgehoben werden.

Abb.15

Deuteronenstrahl von 7 Mill.eV am Pariser Zyklotron.

Wir haben eine neue Technik für die Bestrahlung mit Neutronen entwickelt, die es jetzt ermöglicht, Neutronenintensitäten von 30 kg Radiumäquivalent auf äusserst kleinem Raum herzustellen und auszunutzen. Diese neue Technik wurde schon für das Uranproblem nutzbar gemacht. Eine andere Aufgabe, die noch keine ganz befriedigende Lösung gefunden hat, ist die Konstanthaltung der Hochfrequenz und des Magnetfeldes. Beide Grössen müssen sehr genau aufeinander abgestimmt sein, damit die Beschleunigungsetosse, immer im richtigen Zeitpunkt auf die Teilchen wirken und die Teilchen nicht ausser Tritt fallen. Dies zeigt die Resonanzkurve des Pariser Zyklotrons (Abbildung 15). Man sieht, dass der ganze Arbeitsbereich nur rund 1% der magnetischen Feldstärke umfasst, und dass man die Feldstärke auf etwa 0,1% konstant halten muss, um einigermassen konstante Strahlintensität zu erhalten. Herr Riezler hat nun in Paris eine einfache Einrichtung konstruiert, die automatisch den Magnetisierungsstrom zwar nicht dauernd, aber doch in recht langer Zeit innerhalb dieser enger Grenzen konstant hält.

Jetzt noch ein paar Worte über unsern Heidelberger Zyklotron. Wir betreiben schon seit fünf Jahren den Bau eines grossen Zyklotrons und dank der Unterstützung des Heereswaffenamtes und der besonderen Förderung durch den Herrn Reichsminister für Bewaffnung und Munition ist diese Anlage nun kurz vor ihrer Vollendung. Die Abbildungen 17 und 18 zeigen den rund 80 t schweren Magneten, Abbildung 19 die Beschleunigungskammer von 1 m Durchmesser. In wenigen Monaten denken wir mit der Inangasetzung und den Justierarbeiten beginnen zu können. Das Zyklotron soll zunächst auf Deuteronen von 12 Mill.eV eingestellt werden. Für später scheint noch eine Leistungssteigerung möglich. Aber schon 12 Mill.eV wird unser Zyklotron unter den gegenwärtig laufenden auch noch von dem grossen Berkeley-Zyklotron an Strahlenergie übertroufen werden.

Inzwischen sind freilich in anderen Ländern noch viele andere Pläne in Gange. In Nordamerika ist ein riesiges Zyklotron für 100 Mill.eV im Bau (Abbildung 20). Der Eisenkern des Magneten ist schon weit vorgeschritten; er wiegt 4900 t und ist 17 m breit. Der Kammerdurchmesser beträgt 4,5 m. In der Sowjetunion war ein nicht ganz so grosses Zyklotron geplant, der Magnet soll das immer noch anschliessende Zyklotron

Abb.16

Zyklotron-Resonanzkurve.

Abb.17

Einfahren des Heidelberger Zyklotrons-Magneten.

Abb.18

Anfertigung des Heidelberger Zyklotrons-Magneten.

Abb.19

Kammer des Heidelberger Zyklotrons.

Abb.20

Plan des amerikanischen 100 Mill. Volt-Zyklotrons.



1933 + haben, doch ist über Libach Flen nichts Waheres bekannt geworden.

Jetzt ist noch ein Apparat zu erwähnen, der in nächster Zukunft sicher eine wichtige Rolle in der Kernphysik spielen wird. In Gegensatz zu den vorher besprochenen liefert er nicht Strahlen, die aus Alphastrahlen, wie Protonen, Deuteronen und  $\alpha$ -Teilchen, bestehen, sondern Elektronen- und Röntgenstrahlen sehr hoher Energie. Elektronen- und Röntgenstrahlen spielten bisher in der Kernphysik keine grosse Rolle, weil bedeutende Effekte damit im allgemeinen nur zu erwarten sind, wenn ihre Energie mindestens 10 Mill.eV beträgt. So konnten wir vor einigen Jahren in Heidelberg zum erstenmal künstliche Radioaktivität durch  $\gamma$ -oder Röntgenstrahlen von 17 Mill.eV erzeugen und auf diesem Wege eine ganze Reihe neuer radioaktiver Atomarten auffinden. So energiereiche  $\gamma$ -Strahlen waren aber bisher nur in sehr geringer Intensität herstellbar. Nach dem Zyklotronprinzip lassen sie sich grundsätzlich leicht herstellen, weil beim Elektron die Veränderlichkeit der Masse mit zunehmender Energie viel zu stark ist. Der neue Apparat nun, von dem ich jetzt zu sprechen ist, wurde in Deutschland von Steenbeck erfunden. Die Patentschrift ist vom Jahre 1935. Praktische Ausführungen sind nur zwei bekannt geworden, beide in Nordamerika, die eine für 2,3, die andere für 20 Mill.eV. Einen Namen scheint Steenbeck dieser Vorrichtung noch nicht gegeben zu haben; in Amerika wird sie "Rheotron" genannt. Ich möchte sie hier, ohne dem Erfinder vorgreifen zu wollen, als "Elektronenschleuder" bezeichnen. Das Prinzip versteht man wohl am einfachsten, wenn man vom gewöhnlichen Transformator ausgeht. In dem Draht der Sekundärspule eines Wechselstromtransformators wird durch das induzierte elektrische Ringfeld eine ungeheure Zahl von Elektronen um ein wenig verschoben, so dass am einen Ende des Drahts eine Verarmung an anderen eine Stauung von Elektronen eintritt. Diese gestauten Elektronen kann man dann in einer Röntgenröhre frei lassen oder gewissermassen abschliessen. Bei der Elektronenschleuder dagegen fehlt die Sekundärspule, statt dessen macht man sich eine verhältnismässig kleine Zahl von Tausenden von Elektronen, die man im Vakuum dem induzierten Ringfeld aussetzt, so dass sie sogleich auf die gewünschte Energie beschleunigt werden können. Man hat also gewissermassen einen Transformator, dessen Sekundärwirkung durch die umlaufenden freien Elektronen selbst gebildet wird. Praktisch sieht das wie Abbildung 21 aus. Der Magnet hat eine ähnliche Form wie beim Zyklotron, nur wird er mit Wechselstrom gespeist und muss daher lamelliert sein. Da die Elektronen hier nicht wie beim Transformator durch einen Draht geführt werden, müssen sie durch ein zusätzliches Magnetfeld auf einer Kreisbahn gehalten werden. Die Rechnung ergibt, dass dieses Führungsfeld in jedem Augenblick gerade halb so gross stark sein muss wie das mittlere Feld im Innern der Bahn. Ausserdem muss dieses Führungsfeld in bestimmter Weise nach aussen abfallen, damit die Bahn der Elektronen auch stabil ist. Dann pendeln die Elektronen zunächst um die stabile Bahn herum und nähern sich ihr immer mehr mit wachsender Energie an. Dieser Beschleunigungsprozess dauert so lange an, wie der magnetische Fluss durch den Eisenkern von Null bis zu seinem Höchstwert ansteigt, also während 1/4 Periode des den Magneten speisenden Wechselstroms. Die Endenergie der Elektronen wird durch den Höchstwert des Flusses bestimmt. Die so beschleunigten Elektronen kann man dann wie in einer Röntgenröhre auf eine Antikathode auffallen lassen, wo sie Röntgenstrahlen von entsprechend hoher Energie erzeugen.



Abb. 21

Prinzip der Elektronenschleuder.

In Amerika wurde die Elektronenschleuder bereits zur Herstellung radioaktiver Stoffe nach dem von uns aufgefundenen Verfahren benutzt. Dort ist auch bereits eine grössere Elektronenschleuder für 100 Mill.eV im Bau, vielleicht sogar schon fertiggestellt. Die Abmessungen einer solchen Apparatur sind nicht grösser als die eines Zyklotrons für 15 Mill.eV. Der Energiebedarf dürfte allerdings recht beträchtlich sein; die aufzubringende Blindleistung beträgt 24000 kW. Es ist interessant, dass der Bau dieser amerikanischen Anlage mit ihrer Kriegswichtigkeit begründet wird. In unserem Heidelberger Institut ist seit etwa einem Jahr eine viel bescheidenere Anlage für rund 10 Mill.eV in der Konstruktion begriffen. Jedoch sollte man auch in Deutschland beiseiten an den Bau grösserer Anlagen dieser Art heransuchen.

Als letzter Strahlenerzeuger muss jetzt noch kurz die Uranmaschine erwähnt werden. Über die Herr Heisenberg in seinem Vortrag schon ausführlich berichtet hat. Die Uran-Maschine wird, wenn sie einmal läuft, Strahlenintensitäten liefern, insbesondere Neutronenstrahlen, die um Grössenordnungen höher sind als die des Zyklotrons. Der Aufbau wird im Prinzip sehr einfach sein: Uranplatten (vielleicht auch Würfel oder Prismen) von bestimmter Dicke und bestimmtem Abstand in einem Brennstoff, wahrscheinlich schwerem Wasser. Die Abbildung 22 zeigt einen

Abb. 22

Schichtenanordnung als Ausschnitt aus einer Uranmaschine

Kleinen Ausschnitt aus einer solchen Anordnung, ein Modell, an dem wir in Heidelberg u. a. die günstigsten Schichtdicken ausprobiert haben. An einem grösseren Modell sollen nächstens in einem gemeinsamen Versuch unserer Arbeitsgruppe die endgültigen Unterlagen für die Konstruktion der Uranmaschine gewonnen werden.

Es ist vielleicht nicht überflüssig, zu bemerken, dass die Uranmaschine keineswegs die übrigen Strahlensänger antizipiert werden. Einmal kann man Uranmaschinen begrifflicherweise nicht in beliebiger Zahl bauen, und dann bietet die Uranmaschine auch nicht welche Möglichkeiten zur Variation der Strahlen nach Art und Energie wie die anderen Methoden.

Bei der Uranmaschine wird nun noch ein praktisches Problem besonders dringlich, das auch schon beim Zyklotron und den Hochspannungsanlagen eine nicht unwichtige Rolle spielt, das ist die Frage des Strahlenschutzes. Bei allen den neuzeitlichen Strahlengeräten ist die Möglichkeit einer Strahlengefährdung des Bedienungspersonals sehr ernstlich im Auge zu behalten. Wir haben uns gelegentlich der Arbeit am Pariser Zyklotron schon zusammen mit Herrn Rajewsky der experimentellen Behandlung dieser Frage zugewandt. Es ist sehr zu begrüßen, dass der Bevollmächtigte des Reichsmarschalls für die Kernphysik und Untersuchungen über Strahlenschutz seine besondere Förderung angeordnet lässt.

Zum Schluss mögen einige allgemeine Bemerkungen erlaubt sein. Vor allem muss dem Irrtum vorgebeugt werden, dass man mit einer grossen Hochspannungsanlage oder einem Zyklotron oder einer Uranmaschine schleudert. Jeder Physiker sogleich mit Erfolg Kernphysik treiben könnte. Es würde gar nicht gesprochen von der grossen Zahl zum Teil sehr tüchtiger experimenteller Hilfsmittel und Untersuchungsmethoden, die man braucht, um mit den Strahlen auch nützliche Experimente machen zu können, auch nicht von dem grossen Umfang, den das Gebiet der Kernphysik heute schon angenommen hat, und den man überblicken muss, um sinnvolle Probleme zu stellen und die Wege zu ihrer Lösung zu erschliessen. Die Zeiten, wo man in dieser Hinsicht einfach aus dem Vollen schöpfen konnte, sind wohl vorbei. Die Beschäftigung mit der Kernphysik bedeutet eine gründliche Spezialausbildung. Dabei ist auch die Frage hier so dringend wie auf irgendeinem anderen Forschungsgebiet, dass man eine grössere Zahl begabter junger Physiker sofort nach Abschluss des Hochschulstudiums, vielleicht sogar schon vorher, in ein wissenschaftliches Institut eintritt, um dort eine längere Sonderausbildung zu erfahren. Dass etwa ein Physiker aus einem anderen Arbeitsgebiet heute auf morgen zum Kernphysiker werden kann, wird höchstens eine glückliche Ausnahme bilden. Vor der viel verschiedenen Spezialausbildung sollte man in diesem Fall nicht allzuviel Angst haben.

Ebenso wichtig aber ist die Frage der Fortbildung. Wenn heute bei uns in einem naturwissenschaftlichen Institut Wissenschaftler 1/2 Hilfskräfte kommen, so gilt das in der Physik sehr gut versorgt. Das war auch in früheren Jahren schon so. Heute spielt aber, wie das Beispiel der Kernphysik zeigt, eine solche in der Forschung eine so grosse Rolle, dass man sie nicht als ausreichend angesehen werden kann. In der Physik, Chemie oder gar keiner naturwissenschaftlichen Disziplin.

kannt worden. Aus der Sowjetunion z.B. erfährt man, dass in den dortigen Instituten auf jeden Wissenschaftler durchschnittlich 10 Hilfskräfte entfielen. Solche Zahlen sollten uns vielleicht zu denken geben. Es dürfte also neben der Erstellung der unerlässlichen experimentellen Forschungsmittel eine wichtige Zukunftsaufgabe sein, nicht nur die erforderliche Zahl von Forschern zu sichern, sondern auch ein angemessenes Verhältnis von Technikern, Mechanikern usw. zu Wissenschaftlern herzustellen. Das dürfte in besonderem Maße für die Kernphysik gelten, dieses junge Forschungsgebiet, das sich immer noch in heftiger Entwicklung befindet, und auf dem leider Deutschland heute nicht die unbestrittene Führung hat.

## Isotopentrennung

von Elias Clausius.

### A. Aufgabenstellung.

Hätte man vor 100 Jahren Berzelius, den führenden Forscher auf dem Gebiet der Atomgewichte, gefragt, ob zwischen den einzelnen Elementen ein genetischer Zusammenhang bestehe, so wäre seine Antwort ein glattes Nein gewesen. Für den damaligen Chemiker waren die chemischen Elemente und ihre Atome unveränderliche, von Anbeginn gegebene Qualitäten. Erst die Entdeckung des P e r i o d i s c h e n S y s t e m s hat in dieser Auffassung Wandel geschaffen. Es zeigte sich, dass bei den Elementen in periodischer Wiederholung gewisse physikalische und chemische Eigenschaften unverkennbar wiederkehren. Diese konnten dann dienen, fehlende Elemente voranzusagen und in grossen Umrissen ihre wesentlichen Eigenschaften festzustellen. Wie wunderbar und überraschend die tiefe Erkenntnis, die sich hier anbahnte, für die Chemiker des vorigen Jahrhunderts gewesen ist, geht aus der zurückhaltenden und zögernden Aufnahme hervor, die der Gedanke des Periodischen Systems fand, ehe sein Wahrheitsgehalt durch die Entdeckung des Galliums, Scandiums und Germaniums überzeugend dargetan war.

In gewisser Hinsicht brachte die blosser Existenz des Periodischen Systems eine Enttäuschung, denn es beschränkte die Zahl der in der Natur vorhandenen Elemente, die für einen Forscher, wie Berzelius, noch in unendlicher Fülle vorhanden zu sein schienen. Für den echten Chemiker liegt der grösste Reiz seiner Wissenschaft gerade in der erstaunlichen Vielfalt der stofflichen Eigenschaften, die nun zu seiner Enttäuschung durch die endliche Zahl der Elemente eine unerwartete Begrenzung fand. Die weitere Forschung hat hier einen scheinbaren Ausgleich für den Betätigungsdrang ihrer Jünger gefunden - durch die Entdeckung der Isotope ist die Zahl der Elemente in unserem Jahrhundert in wiederum ganz unvorhergesehener Weise vervielfacht worden. Damit sieht sich der moderne Forscher vor eine ähnliche Aufgabe wie der Chemiker des vorigen Jahrhunderts gestellt, wenn er diese Isotope trennen und in reiner Form gewinnen soll. Die Isotope ein und desselben Elements sind zwar in chemischer Hinsicht kaum voneinander unterscheidbar, da sie den gleichen Aufbau ihrer Elektronenhüllen besitzen, von denen vorzüglich die chemischen Eigenschaften abhängen. In physikalischer Hinsicht sind sie dagegen durch ihre unterschiedliche Kernmasse ausgezeichnet und in ihren kernphysikalischen Beziehungen so verschieden, wie es zwei gewöhnliche Elemente durch ihre chemischen Reaktionen sind.

Für die Fragen der K e r n p h y s i k ist es von grösster Interesse, reine Isotope, d.h. Reinelemente, untersuchen zu können. Ein gewöhnliches Element gibt, soweit es ein Isotopengemisch darstellt, keine Kerneigenschaften durch die Überlagerung verschiedener gleichzeitig eintretender Kernreaktionen nur verschleiert wieder. Neben der Aufgabe der Kernphysik kommen denen der K e r n c h e m i e mehr und mehr Bedeutung zu, wobei gerade das gleiche chemische Verhalten der Isotope ein und desselben Elementes bei trotzdem vorhandener Unterschiedlichkeit durch ihre verschiedene Masse von Wert ist. Wenn heute Landminen in Deutschland schwerverwundeten mit Hilfe eines künstlichen Blutserums Leben gerettet wird, so ist vom medizinischen Standpunkt die wichtigste löste Frage von Wichtigkeit, ob und mit welcher Geschwindigkeit das Serum enthaltenen stickstoffhaltigen Verbindungen...



lichen Wege ausgeschieden oder als Fremdstoffe in manchen Organen abgelagert werden. Diese Frage wird mit Hilfe des schweren Stickstoffisotops  $^{15}\text{N}$  ebenso vollständig zu lösen sein wie der noch strittige Mechanismus der Stickstoffassimilation bei der Pflanze und das Problem des Eiweißshaushalts in einer Krebsgeschwulst. Für die Mikaralkohole ist der Verbrennungsmechanismus unserer Kraftstoffe in den Flugmotoren von grösster Bedeutung. Mit dem schweren Kohlenstoffisotop  $^{13}\text{C}$  wird es möglich sein, eine längere Paraffinkette an verschiedenen Stellen zu markieren und aus der chemischen und Isotopen Beschaffenheit der Bruchstücke festzustellen, in welcher Weise ein so kompliziertes Molekül vom Sauerstoff der Luft angegriffen und verbrannt wird. Die wenigen Beispiele liessen sich beliebig vermehren; sie genügen um zu zeigen, dass auf den verschiedensten Gebieten der Forschung in Zukunft die Verwendung von Isotopen eine bedeutsame, manchmal eine entscheidende Rolle spielen wird.

Von den in der Natur vorkommenden 83 nichtradioaktiven Elementen, auf die wir uns vorzüglich beschränken wollen, sind 25 Reinelemente; für diese besteht das Problem der Isotopentrennung nicht. Doch muss bemerkt werden, dass mit fortschreitender Verfeinerung unserer Messkunst die Zahl der Reinelemente immer geringer werden wird, da es durchaus im Bereich der Möglichkeit liegt, dass bei einem Teil von ihnen seltene Isotope bislang übersehen worden sind. Bei den übrigen kommen neben solchen, die nur zwei Isotope enthalten, wie z.B. das Helium ( $^3\text{He}$  und  $^4\text{He}$ ) oder der Stickstoff ( $^{14}\text{N}$  und  $^{15}\text{N}$ ), andere vor, die drei, vier und mehr Isotope aufweisen. Mehr als zehn Isotope, die man beim Zinn gefunden hat, sind noch nicht beobachtet worden. Das Häufigkeitsverhältnis der Isotope ist bei ein und demselben Element unabhängig von seiner Herkunft sehr nahe konstant, falls nicht durch radioaktive Prozesse eine spätere Nachbildung eines bestimmten Isotops, wie beim Blei oder Strontium, erfolgt ist. Bei den Häufigkeiten kommt die extremsten Verhältnisse vor: z.B. verhält sich  $^3\text{He}$  zu  $^4\text{He}$  wie 1:10<sup>7</sup>, während man beim Brom  $^{79}\text{Br}$ : $^{81}\text{Br}$  sehr nahe wie 1:1 findet.

Es ist bemerkenswert und für die heutige Entwicklungsrichtung kennzeichnend, dass die Aufgabe der Verwertung der atomaren Kernenergie beim Uranproblem gleich die Notwendigkeit zur Gewinnung zweier Isotope ergeben hat. Den Ausführungen von Herrn Heisenberg konnten wir entnehmen, dass die Anreicherung des Isotops  $^{235}\text{U}$  zu einer erheblichen Verkleinerung der Urankraftmaschine führen würde, wobei als Brennstoff sogar leichtes an Stelle von schwerem Wasser treten könnte. Schwere Wasser scheint aber nach unseren jetzigen Kenntnissen die einzig mögliche Brennstoffsubstanz zu sein, wenn man mit gewöhnlichem Uran eine Urankraftmaschine bauen will.

B. Trennverfahren.

Für die Isotopentrennung kommen nur solche Effekte in Betracht, bei denen die Masse des einzelnen Atoms oder Moleküls eine Rolle spielt. Es ist das selbstverständliche Bedühen aller Verfahren, möglichst grosse Mengen zu trennen und gleichzeitig hohe Anreicherungen zu erzielen. Dies sind jedoch zwei einander entgegenwirkende Forderungen, die gleichzeitig schwer erfüllt werden können. Tatsächlich sind die bisher entwickelten Verfahren entweder eine verhältnismässig grosse Menge Isotopenkonzentrat von kleiner Anreicherung oder ein verhältnismässig geringes von Material, das dafür sehr rein ist. Es liegt dies daran, dass die Wirkung des einzelnen Trennvorgangs stets nur eine verhältnismässige Verschärfung des Isotopenverhältnisses liefert, so dass man für die Erreichung der Trennung entweder auf den Durchsatz grosser Mengen ausfallen muss oder eine kleine Anzahl von Trennstufen durchlaufen, oder beides, wenn man den Durchsatz relativ klein halten und dann dafür den Trennstufen



oft wiederholen. Das Bestreben aller modernen Verfahren geht dahin, die notwendige Wiederholung des einzelnen Trennvorgangs möglichst wenig und rationell zu gestalten. Zur Anreicherung seltener Isotope sind daher Vorrichtungen erdonnen worden, bei denen nur einzelne Trennvorgänge mehrere hundert-, ja sogar mehrere tausendmal vorgenommen werden.

Von den Trennverfahren sind diejenigen, die Gase benutzen, am weitesten entwickelt. Es liegt dies daran, dass wir in der kinetischen Gastheorie eine ausgezeichnete theoretische Grundlage besitzen, während unsere entsprechenden Kenntnisse für die Flüssigkeit höchst unvollkommen sind. Der feste Körper kommt wegen der Langsamkeit der in ihm vorliegenden Diffusionsprozesse kaum in Betracht. Diese Verhältnisse bringen es mit sich, dass die besten Isotopentrennungen bisher mit gasförmigen oder wenigstens dampfförmigen Elementen bzw. ihren Verbindungen gelangt sind, während entsprechende Erfolge bei Elementen, die nicht brennbar in den gasförmigen Aggregatzustand zu überführen gehen, noch ausstehen. Zu letzteren gehören besonders die Metalle, und es wird durch diese Betrachtung klar, wieso gerade aus Uran als ein typisch metallisches Element der Abtrennung des  $^{235}\text{U}$  vom  $^{238}\text{U}$  die grössten Schwierigkeiten entgegenstehen.

In folgenden werden die einzelnen Trennverfahren durchgegangen, soweit sie zu greifbaren Ergebnissen geführt haben. Es sollen jeweils ein charakteristisches Beispiel die Leistungsfähigkeit der Methode, ihre Vorzüge und Nachteile aufgezeigt werden.

## I. Elektrolyse des Wassers.

Für das leichteste Element, den Wasserstoff, bietet die Elektrolyse eine Spezialmethode zur Gewinnung seines schwereren Isotops, des Deuteriums. Das Verfahren ist gegenüber allen anderen Isotopentrennungen dadurch ausgezeichnet, dass der Trennfaktor für die H-Isotope bei unterschieden 5 und 10 liegt, während bei den übrigen Elementen der Trennfaktor stets sehr nahe bei 1 gerunden wird.<sup>1)</sup> Infolgedessen genügt es zur Herstellung des schwereren Wasserstoffisotops, eine grosse Wassermenge bis auf einen kleinen Rest, in dem dann der schwere Wasserstoff vorzüglich zurückbleibt, herauszu elektrolysieren. Man verwendet meistens auch hier mehrere Trennstufen und fügt die Herstellung in elektrolytischen Anlagen zur industriellen Gewinnung von Wasserstoff und Sauerstoff ein. Dies ist in grösster Maffstabe bei einer Elektrolyse an Werk der Norsk Hydro zu sehen, das die billigen an Ort und Stelle vorhandenen Wasserkrafts benutzt. Diese Fabrik gewinnt reines Wasser in Mengen von einigen Litern pro Tag als Nebenprodukt. Wollte man das Elektrolyseverfahren unmittelbar zur Gewinnung von Deuterium anwenden, so muss man sich vor Augen führen, dass selbst für einen unendlich grossen Trennfaktor der Energieverbrauch nicht unter 220 kWh für 1 g  $\text{D}_2\text{O}$  gesenkt werden könnte, da diese Energiemenge zur Verflüchtigung von 7 Liter Wasser in Knallgas notwendig ist, in dem sich gerade 1 g  $\text{D}_2\text{O}$  befindet. Die Elektrolyse kommt daher nur dann in Frage, wenn die Gewinnung des schweren Wasserstoffs als Nebenprodukt möglich ist. So müssen auch für das Deuterium andere Verfahren, die mit geringem Energieverbrauch arbeiten, herangezogen werden.

1) Der Trennfaktor  $\alpha$  gibt an, in welchem Ausmass das Konzentrationsverhältnis zweier Isotope durch die Wirkung einer Trennstufe verschoben wird. Der gesamte Trennfaktor  $A$  einer Anlage aus  $n$  Stufen ist dann  $A = \alpha^n$ .

Für andere Elemente ist die Elektrolyse ausnahmslos nicht anwendbar. Sauerstoff hat einen so kleinen Trennfaktor, dass nach Johnston selbst die elektrolytische Einengung sämtlicher Valenzen zu 1 ccm erst eine Verschiebung des gewöhnlichen Isomerenverhältnisses von 0,8; 0,9 von 1:500 auf 1:250 geben würde! Bei schwereren Elementen ist der Trennfaktor sicher noch kleiner. Höchstens für Lithium nimmt man solche Werte an, dass die Anwendung des elektrolytischen Verfahrens in Gegenstrom eine merkliche Anreicherung bei grossem Energieaufwand bringen würde.

## 2. Der Massenspektrograph.

Der Massenspektrograph kann als ein Gerät zur Isotopentrennung angesehen werden, das in seinen vollkommensten Ausführungen sogar die reine Isotope liefert. Die Gewinnung winziger Mengen von getrennten Isotopen des  $^{69}\text{Li}$  und  $^{7\text{Li}}$ ,  $^{85}\text{Rb}$  und  $^{87}\text{Rb}$  ist mit ihm ebenso möglich gewesen wie der in Amerika erfolgte Nachweis, dass wirklich das Uran  $^{235}\text{U}$  und nicht  $^{238}\text{U}$  vorzugsweise für die Kernspaltung unter Lieferung mehrerer Neutronen verantwortlich zu machen ist. Die dabei erhaltenen Mengen betragen sich grössenordnungsmässig auf 10<sup>-3</sup> mg und können für bestimmte spektroskopische Zwecke sowie für kernphysikalische Versuche in Verbindung mit der mächtigen Strahlungsquelle eines Zyklotrons von Nutzen sein; für allgemeine Zweckversuche sind sie zu winzig.

## 3. Die Diffusion.

Die Diffusion durch Kapillaren ist das erste Verfahren gewesen, bei dem das Gegenstromprinzip mit Erfolg verwirklicht werden konnte. Nachdem besonders der Amerikaner Harkins in zahlreichen Versuchen die Brauchbarkeit des Diffusionsverfahrens am Chlorwasserstoff dargelegt hatte, vereinigte Herz eine Anzahl von Quecksilberdampf- und Porzellanpumpen mit porösen Tonrohren als Trenngliedern zu einer Tremskaskade (Abbildung 1). Die Dampfstrahlpumpen bewegen den zu trennenden Dampf in der Pfeilrichtung. Die leichtere Komponente expandiert mit der Wurzel aus dem Massenverhältnis  $\sqrt{M_2/M_1}$  schneller als die schwerere, die vorzugsweise innerhalb der Tonrohre weiterströmt, und schliesslich in den linken Behälter gelangt. Dagegen wird die leichtere Komponente von den Pumpen angesaugt und weiter rechts der Gaskaskade zugeführt, wodurch sie bevorzugt nach rechts bis schliesslich in den rechten Behälter geschafft wird. Der Druck in der Anordnung muss klein sein, damit die mittlere freie Weglänge des Gasgemisches in den Kapillaren der porösen Wände gross gegen deren Abmessung ist. Infolgedessen ist die transportierte Gasmenge verhältnismässig gering. Obwohl das die Nachteile, dass die zerklüftete Oberfläche der porösen Wände flüchtige Verunreinigungen, wie Wasserdampf und Kohlendioxid, adsorbieren, die bei der Trennung stören. Immerhin gelang es Herz, die Neutronen  $^{20}\text{Ne}$  und  $^{22}\text{Ne}$  sowie die Wasserstoffisotope erstmalig mit einer solchen Kaskade zu isolieren.

## 4. Die Diffusion.

Derselbe Forscher hatte schon früher erkannt, dass die Diffusion durch ein Trägergas bei geeigneter Abmessung der Vorrichtung, falls zur Isotopentrennung geeignet sein müsste, ohne die Nachteile der porösen Tonwände zu zeigen. Nur den Fall, dass das Trägergas sehr schwer ist, würde auch hier das leichte Isotop mit  $\sqrt{M_2/M_1}$  schneller als das schwere in das Trägergas eindiffundieren. Dagegen wird bei der praktischen Anwendung der Unterschied geringer, da die Abmessung des Hilfgases nicht beliebig gross ist. Die Geschwindigkeit der

durch  $\sqrt{(M_2 + M_1) M_1 / M_2 (M_2 + M_1)}$  gegeben. Nach dieser Überlegung konstruierte Hertz eine Pumpe, die mit Quecksilberdampf als Hilfgas die leichtere Komponente eines Gasgemisches bevorzugt abzusaugen vermag. Wie die Abbildung 2 zeigt, wird der Quecksilberdampfstrahl hinter der Mündung der Hut eines Pilzes abgelenkt und nach unten umgebogen. Die leichtere Komponente diffundiert bevorzugt in den Mittelteil des Dampfstrahls und wird durch ihn nach oben mitgerissen, während die schwere Komponente bevorzugt zurückbleibt. Durch die Hintereinanderschaltung solcher Pumpen konnte Hertz die Neonisotope in wenigen Stunden trennen, und seine Mitarbeiter sowie andere Forscher konnten bei Stickstoff, Argon, Sauerstoff und Kohlenstoff sehr erhebliche Anreicherungen erzielen. Auch bei dieser Anordnung beläuft sich der Betriebsdruck nur auf zwei bis  $\frac{3}{4}$  mm Hg.

Das Hilfgas muss eine Reihe günstiger Eigenschaften besitzen, von denen der Vorrang eines hohen Molekulargewichtes schon erwähnt wurde. Ausserdem muss es wieder leicht zu besetzen sein, was beim Quecksilber wegen seines kleinen Dampfdruckes gut durch Kondensation gelingt. Zudem darf es mit dem betreffenden Isotopengemisch bei den in den Pumpen auftretenden Temperaturen nicht reagieren. Daher ist z.B. die Trennung der Chlor- und Bromisotope mit dem Hertz'schen Verfahren ohne weiteres möglich. Ferner muss die Löslichkeit des Isotopengemisches im Hilfgas, wenn dieses durch Kondensation entfernt wird, gering sein, da man sonst die zu trennende Komponente in der Apparatur nach Stellen verschleppt, an die sie nicht hingeraht darf. Quecksilber erfüllt auch diese Bedingung, die meisten anderen Flüssigkeiten dagegen nicht. Es sei hervorgehoben, dass dieser Umstand eine erhebliche Schwierigkeit für die praktische Verwertbarkeit einer Reihe von Trennvorrichtungen darstellt, die man sich für die Diffusion durch ein Hilfgas ausdenken kann. Wenn dieser Mangel durch eine glückliche Konstruktion behoben oder wenigstens eingeschränkt werden könnte, würde das Diffusionsverfahren in weiter entwickelter Form sicherlich vielfach anwendbar sein, da die Trennung im Gegensatz zu den später zu besprechenden Möglichkeiten unabhängig von der Temperatur und dem speziell zwischen den Molekülen wirkenden Kraftgesetz ist.

5. Die Sektifikation.

Eine Trennung zweier Isotope durch Rektifikation ist möglich, wenn sie oder ihre Verbindungen einen merklichen Dampfdruckunterschied besitzen. Dies ist vorzugsweise bei leichteren Elementen mit tiefliegendem Siedepunkt der Fall. Man kann zeigen, dass der Dampfdruckunterschied von einem Masseneffekt herrührt, der einmal eine merkliche Differenz der Nullpunktsenergie beider Isotope bei unendlich hohen Temperaturen bewirkt, ferner von einem Beitrag, den die Masse auf chemischen Konstanten liefert. Die Nullpunktsenergie ist letzteres eine Folge der allgemeinen Gültigkeit der Heisenbergschen Unschärferelation. Die Nullpunktsenergien zweier Isotope verhalten sich unter sonst entsprechenden Bedingungen umgekehrt wie die Quaselaugen ihrer Massen.

$$E_{01}/E_{02} = \sqrt{M_2/M_1}$$

In den letzten Jahren ist der Ausbildung der Rektifikationsverfahren die für technische Stofftrennung grössten Ausmasses von immer grösserer Bedeutung sind, viel Aufmerksamkeit geschenkt worden. In dem Laboratorium konnten teilweise Trennungen des Wasserstoff-Sauerstoff-Neonisotope durchgeführt werden; um eine Anschauung von der Unfähigkeit des Verfahrens beim Wasserstoff zu geben, sei hier ein Beispiel verwiesen, bei der als Ordinate der Dampfdruck  $\log p$  in mm Hg

Abb. 1

Anlage zur Isotopentrennung nach dem Effusionsverfahren von Heitz.

Abb. 2

Hertzpumpe, die die leichte Komponente eines Gasgemisches bevorzugt weiterbefördert.

Abb. 3

Dampfdruckverlauf bei der Trennung eines  $H_2$ ,  $HD$ ,  $D_2$ -Gemisches durch Rektifikation. Der obere horizontale Ast entspricht dem Dampfdruck des reinen  $H_2$ , der tiefer gelegene dem des reinen  $HD$ .



Abszisse die Beobachtungszeit aufgetragen sind. Der Wasserdruck an dem Kopf einer kleinen Rektifikations säule laufend entnommen. Die des Dampfdruckes gibt in vorliegendem Fall gleich ein Maß für die Zusammensetzung des Wasserstoffes an, da einem Dampfdruck von 20 mm reinem H<sub>2</sub> ein solcher von 480 mm reinem HD entspricht. Die verwendete Rektifikations säule hatte nur die Wirksamkeit weniger idealer Trennflächen und gestattete doch eine vollständige Trennung der drei Wasserstoffmolekülsorten H<sub>2</sub>, HD und D<sub>2</sub>.

Auf Grund dieser Versuche hat die Firma Linde mit dem Vortragenden ein Trennverfahren zur Gewinnung von Deuterium aus schwerem Wasserstoff ausgearbeitet, das in energetischer Hinsicht der Elektrolyse um den Faktor 20-30 überlegen sein dürfte. Abbildung 4 veranschaulicht die Arbeitsweise dieses Verfahrens, bei dem gewöhnlicher Wasserstoff durch flüssige Luft vorgekühlt und dann durch einen Strom Deuterium-freien flüssigen Sauerstoffs ausgewaschen wird, wobei ihm 90 bis 95% des D-Gehaltes entzogen werden. Bei einer solchen Anlage wäre die Gewinnung von 1 g D<sub>2</sub>O mit einem Energieaufwand von 5 bis 10 kWh möglich.

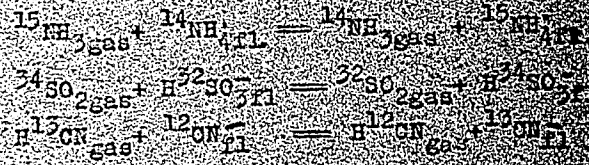
6. Chemisches Austauschverfahren

Bald nach der nun 10 Jahre zurückliegenden Entdeckung des schweren Wasserstoffs zeigte es sich, dass die chemischen Gleichgewichte durch den Einbau von Deuterien ein wenig verschoben werden. Urey hat darauf hingewiesen, dass diese Abweichung von der Massenwirkungskonstanten auch bei einigen anderen leichten Elementen, wie dem Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Schwefel, noch messbare Werte aufweisen müsste. Auch in diesem Fall machen sich die Isotope dank ihrer verschiedenen Masse auf dem Wege über die Nullpunktsenergie, die chemischen Konstanten und die unterschiedlichen Eigenfrequenzen, die ihnen in Verbindungen zukommen, bemerkbar. Urey hat ein Gegenstromverfahren angegeben, nach dem die biologisch wichtigen Isotope <sup>13</sup>C, <sup>15</sup>N und <sup>34</sup>S angereichert werden können. Die letzten uns kurz vor dem Kriegsausbruch zugekommenen Nachrichten lassen erkennen, dass die Amerikaner wegen der Wichtigkeit der Isotopenforschung solche Anlagen nicht nur gebaut, sondern wirklich in industriellem Maßstab eingerichtet haben.

Abb. 4

Projektierte Anlage der Firma Linde zur Gewinnung von schwerem Wasserstoff durch Auswaschen von gasförmigen Wasserstoff mit flüssigem Wasserstoff.

Es handelt sich um die Berechnung der Gleichgewichte



bei denen das schwere Stickstoff- und Schwefelisotop in der ersten Phase, das schwere Kohlenstoffisotop dagegen in der zweiten Phase



Die Arbeitsweise sei an Abbildung 5 erläutert, die ein Schema einer Anlage zur Anreicherung von  $^{15}\text{N}$  zeigt, mit der zu München Versuche angestellt werden. In den Türmen  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_3$  rieselt versäufte Ammoniumnitratlösung herab, um dann in einer Mischer  $M_1$  einzutreten, in den gleichzeitig überschüssige Natronlauge gespritzt wird. Die vermischten Lösungen treten in die Filtrationsbox  $R_1$  ein, die von unten her mit Wasserdampf durchströmt wird. Ammoniak wird dabei quantitativ in Freiheit gesetzt, durch den Wasserdampf mitgerissen, von ihm im Kühler  $S_1$  befreit und im Gegenstrom von herabströmenden Lösung durch die Türme zurückgeschickt. Dabei reichert sich  $^{15}\text{N}$  an unteren Ende von  $T_1$  an. Ein Teil dieser Lösung wird zur Beschickung der Türme  $T_4$  und  $T_5$  benutzt, die wieder mit Mischer  $M_2$  und Auskocher  $R_2$ ,  $R_3$  versehen sind. Am Ende von  $T_5$  erhält man dann ein höheres Isotopenkonzentrat. Die Bewegung der Flüssigkeiten geschieht durch Schlauchpumpen, die so weit entwickelt wurden, dass sie viele Wochen ohne Wartung ihren Dienst versehen. Eine solche Pumpe besteht aus einem zylindrischen Gehäuse, in dem ein Buna-Schlauch in Form einer Schlinge liegt, die an zwei Stellen durch zwei Rollen zugequetscht wird. Dreht man den Rollenhalter so wandern die gequetschten Stellen vorwärts und transportieren das zwischen ihnen befindliche Flüssigkeitsvolumen weiter. Die ganze Anlage arbeitet bei einem Druck von etwa 100 mm Quecksilber und wird durch Relais im Zusammenspiel ihrer einzelnen Teile automatisch gesteuert. Da das schwere Stickstoffisotop nur zu 0,38 % in der Natur vorhanden ist, von dem auf Grund des oben erwähnten Gleichgewichts wieder nur 2,5 % gewonnen werden können, gehen 99,992 % des eingeführten Ammoniaks verloren und nur 0,008 % werden in Form von  $^{15}\text{NH}_3$  bevorrugelt in der Anordnung zurückbehalten. An diesem Beispiel kann man den schlechten Wirkungsgrad der Isotopentrennung erfahren. Dabei ist zu bemerken, dass der Prozess zur Anreicherung von  $^{15}\text{N}$  unter den bisher bekannten chemischen Austauschverfahren noch den besten Wirkungsgrad hat! Urey hat in Amerika unter Verarbeitug von mehreren Tonnen Chemikalien schweren Stickstoff in einer Reinheit von etwa 70% erhalten, während die um eine Zehnerpotenz kleinere Münchener Anlage immerhin Anreicherungen bis zu 6%  $^{15}\text{N}$  liefert hat. Der Nachteil eines grossen Chemikalienaufwandes, dessen Wiedergewinnung nur im Rahmen einer technischen Fabrikation möglich ist, wird durch den Vorzug geringen Energiebedarfes ausgeglichen, der das chemische Austauschverfahren auszeichnet.

7. Die Zentrifuge:

Mit dem eben besprochenen Verfahren teilt die Isotopentrennung in der Zentrifuge die Notwendigkeit - und damit den Nachteil - mechanisch bewegter Teile. Zudem ergibt sich, dass bei Umfangsgeschwindigkeiten von einigen hundert Metern/Sekunde in Zimmertemperatur merkwürdige Trennungen erzielt werden können. Dies ist günstig ist, dagegen beim Zentrifugenverfahren der Umstand zu bemerken, dass die Grösse der Trennung unmitelbar von der Massendifferenz der Isotope abhängt und unabhängig von der Absolutmasse der beteiligten schweren Elemente. Um die Verbesserung des Zentrifugenantriebs meistens durch eine Pressluftturbine erfolgt, hat sich vor allem ein Amerikaner Beams verdient gemacht. Er entwickelte auch besondere Kamern zur Aufnahme des Rotors, der mit der Antriebsmaschine durch eine dünne Stahlstange gekoppelt wird. Diese Art der Energieübertragung hat den Vorteil, dass der Energieverlust in der Kopplungsstelle bei kleinen reibenden Oberflächen verhältnismässig gering ausfällt, so dass der Rotor nicht mit letzter Sorgfalt ausgewuchtet zu werden braucht, da er sich bei der Drehung seine freie Achse selbst ausrichtet. Auch die Achse hohl aus, so können im Rotor Gase zirkulieren.

werden, was bei geeigneten Konstruktionen auch während des Betriebes möglich ist. Die bisher beschriebenen Zentrifugen haben die gleiche Wirkung einer Trennstufe, wenn es auch nicht an Verschlüssen, wie bei dem Gegenstromverfahren durch konvektiven Umlauf der Gasmasse, die Gasmasse auf die Zentrifuge zu übertragen. Über den praktischen Wert solcher Modelle ist bislang nichts bekannt geworden. Schwierigkeiten sind durch das Auftreten erheblicher Corioliskräfte und durch die dabei auftretende Dilatations- und Kompressionseffekte an den Umkehrstellen der abströmenden Gasmasse zu erwarten.

In Deutschland hat sich insbesondere Hartack bemüht, mit seinem Mitarbeiter Groth die Entwicklung von Zentrifugen voranzutreiben, die zur Anreicherung des Uranisotops  $^{235}\text{U}$  Verwendung finden sollen. Seinen englischen Mitarbeitern und der einzigartigen Fertigung der Firma Ansohn-Kiel ist es zu danken, dass wir heute in Deutschland eine anscheinend einzige Zentrifuge mit elektrischem Antrieb besitzen, die bei der Trennung der Xenonisotope die theoretisch zu erwartende Konzentration ergab. Entsprechende Versuche mit Uranisotopen zur Anreicherung von  $^{235}\text{U}$  sind in der Ausführung begonnen.

Prinzipiell müsste das Schleuderverfahren auch bei anderen Lösungen anwendbar sein, womit praktisch alle Isotope aller Elemente für die Anreicherung zugänglich werden würden. Leider ist im flüssigen Aggregatzustand die Diffusionsgeschwindigkeit so gering, dass in den Hunderttausendfachen erhöhten Einstellzeiten gegenüber der Gasphase in Kauf genommen werden müssen.

8. Der Merztsche Verteilungssatz.

Bei leichten Elementen ist zu erwarten, dass auch die von Nernst und Zsigmondy aufgestellten Verteilungssätze die Isotope zweier Elemente eine etwas verschiedene Löslichkeit in zwei miteinander nicht mischbaren Flüssigkeiten zeigen werden. Leider lässt sich der Verteilungseffekt wegen der unbekannteren Einflüsse von Solvation und Hydratation nicht voraus berechnen. In jedem Falle muss auch diese Möglichkeit geprüft werden, wobei wir in München seit einer Reihe von Jahren beschäftigt sind. Da der Effekt der einzelnen Trennstufen sicher ist, ist, muss auch hier wieder ein Gegenstromverfahren herangezogen werden. Eine geeignete Transzule ist eine spiralförmig gebildete Schlangenlinie aus einem vertikalen Rohr, das durch horizontale Röhren in einem Kammern gestellt ist. Die gradlinigen Kammern sind mit Flüssigkeit gefüllt, während in den ungradlinigen Kammern durch die Spirale eine vertikale Achse flügelartige Rührer bewegt werden. Diese Versuche konnten wir zeigen, dass eine geschichtete und sich zusammen sehr nahe eine ideale Transzule hergestellt werden können. In der Tat wird durch die quirlende Bewegung in den Kammern die in der Lage Berührung gebracht, während in den vertikalen Kammern die Entschichtung stattfindet. Die quirlende Bewegung ist dabei eine einseitig rührende von wesentlicher Bedeutung für die Mischung. Die Anlage, weil dadurch ein Überwiegen der Flüssigkeit in den vertikalen Kammern sicher verhindert wird, als Gasphase. Die Rührer aus, die sich in den gefüllten Kammern befinden, sind in diesen die Flüssigkeit praktisch rührt. Die Mischung geschieht durch die vorherwähnten Schlangenlinien.

Selbst wenn sich die Hoffnungen auf eine solche Trennung nach diesem Verfahren wegen eines zu kleinen Trennfaktors erwiesen sollten, ist seine Entwicklung als eine der sichersten Versuche haben dargestellt, dass auch schwerere Elemente, insbesondere auch der Gruppe der seltenen Erden, auf einfacher Weise zu trennen sein werden.

Ein Nachteil des Trennrohrverfahrens ist der verhältnismässig kleine Durchsatz sowie der hohe Energieverbrauch, da die tragliche Temperaturdifferenz zwischen heisser und kalter Wand fortlaufend aufrecht erhalten werden muss. Auch werden bei schweren Elementen die Trennfaktoren sehr klein, da dieselben von dem Quotienten  $M_2 - M_1 / M_1 + M_2$  abhängen. Ausserdem muss man beachten, dass nicht nur die Massen, sondern auch die Wirkungsquerschnitte in dem Ausdruck für den Trennfaktor eingehen, was für Isotope allerdings keine Rolle spielt, da alle den gleichen Querschnitt besitzen. Schwerwiegender ist der Umstand, dass der Trennfaktor zusätzlich noch vom Kraftgesetz zwischen den Molekeln abhängt und umso kleiner wird, je "weicher" die Molekel ist. Befahrungsgemäss sind hier Verbindungen hohen Molekulargewichts und komplizierten Baues durch besonders kleine Abstossungsexponenten, d.h. grosse "Weichheit", ausgezeichnet. Jedemfalls haben Versuche von Fleischmann und Hartock/Groth beim Uranhexafluorid keine Trennung von  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  ergeben. Hier zeigt sich wieder, wie notwendig eine genaue Durchdringung und theoretische Durcharbeitung des gesamten Fragenkomplexes ist, da das die Härte der Molekeln bestimmende Gesetz heute nur in groben Zügen bekannt ist. Die Grösse der Thermoeffusionskonstanten wird dadurch jedoch empfindlich beeinflusst. Einen tieferen Einblick in die Feinheiten der Molekularkräfte wird der kürzlich aufgefundenen Umkehrwirkung der Thermodiffusion, der Diffusionsthermoeffekt (S. 10, 11, 12).

#### 16) Benutzung der Verdampfungsgeschwindigkeit.

Es sei schliesslich darauf aufmerksam gemacht, dass die Anwendbarkeit eines Verfahrens noch nicht ausgeschöpft zu sein scheint, was schon in der ersten Zeit der Isotopentrennversuche eine gewisse Anwendung gefunden und seine prinzipielle Brauchbarkeit erwiesen hat. Es handelt sich dabei um die Benutzung der Verdampfungsgeschwindigkeit. Aus einer Flüssigkeitsoberfläche verdampfen die leichteren Molekeln mit  $\sqrt{M_2/M_1}$  rascher als die schweren. Bei niedrigem Druck lässt sich das auf Abbildung 8 gezeigte Verfahren zur Isotopenanreicherung heranziehen. Dabei wird wieder die Wirkung der einzelnen Trennstufe durch die Anwendung des Gegenstromprinzips verstärkt. Betrachtet man ein mittleres Trennglied, so findet aus dem Flüssigkeitsreservoir die Verdampfung des leichten Isotops bevorzugt statt. Dieses wird an der unteren Seite des Kühlers kondensiert und durch ein Kapillarrohren aufgesogen, durch das es nach dem rechten Trennglied abfliesst. Auf diese Weise wird das leichte Isotop vorzugsweise in die weiter rechts oben befindlichen Trennglieder geschickt. Der in diesen Gliedern auftretende Flüssigkeitsüberschuss wird vermieden, indem ein Teil der Flüssigkeit durch ein Rohr nach dem benachbarten Trennglied links abfliessen kann, so dass sich schliesslich links unten die schwerflüchtige Komponente sammelt. Mit einer solchen Anordnung sind in München Versuche geplant. Das Verfahren ist an Temperaturen gebunden, bei denen der Abstand zwischen Kondensat- und Flüssigkeitsoberfläche von der Grössenordnung der mittleren freien Weglänge ist. Der Durchsatz wird auch hier verhältnismässig klein ausfallen, doch sollte das Verfahren mit der Diffusion durch ein Trägergas den Vorteil gemeinsam haben, dass es nur von dem Massenverhältnis der beiden Isotope abhängt, aber unabhängig von dem Kraftgesetz zwischen den einzelnen Molekeln ist. Gegenüber dem Trennrohr ist der voraussichtlich viel geringere Energieverbrauch und die Anwendbarkeit bei thermisch empfindlichen Substanzen hervorzuheben. Gerade im Falle

1) Siehe K. Clusius und L. Waldmann, Naturwissensch. 30 (1942), 711, und L. Waldmann, Naturwissensch. 31 (1943), 204.

des Urans dürfen daher die Bemühungen nicht aufgegeben werden, eine thermisch stabile flüssige Verbindung von kleinem Dampfdruck ausfindig zu machen.

### C. S c h l u s s .

Wir haben bei unseren Betrachtungen eine ganze Reihe von Verfahren nicht berücksichtigt, die entweder nicht geprüft oder ergebnislos erprobt worden sind. Der naheliegende Gedanke, mit Hilfe der Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen eine Trennung herbeizuführen, ist mehrfach geäussert, aber stets ergebnislos verfolgt worden. Isotop-Ionen scheiden keine verschiedenen Wanderungsgeschwindigkeiten zu holen, was teils daran liegen mag, dass der Masseneffekt durch die Hydratation stark vermindert wird, teils damit zusammenhängt, dass die Wanderungsgeschwindigkeit eher eine Funktion des Ionenvolumens als der Ionenmasse ist. Während die Ionen von seltenen Erden durch geeignete Versuchsanordnungen getrennt werden konnten, waren entsprechende Versuche beim Chlorion ergebnislos. Ferner habe alle Kristallisationsversuche von Eis oder Natriumchlorid - auch im Gegenstrom - kein Ergebnis gehabt, was bei der geringen Diffusionsgeschwindigkeit in festen Körper vielleicht nicht zu verwundern ist. Dagegen war sehr wohl eine merkliche Isotopentrennung zu beobachten, wenn in Temperaturgebieten gearbeitet wurde, bei denen die Diffusionsgeschwindigkeit in der Grössenordnung von der flüssigen Phase lag. So konnte bei der Diffusion von Kupfer in Silbersulfid eine Anreicherung des leichteren Kupferisotops  $^{63}\text{Cu}$  gegenüber seinem Schwereisotop  $^{65}\text{Cu}$  festgestellt werden.

Insgesamt hoffe ich, Ihnen den Eindruck vermittelt zu haben, dass die Isotopentrennung ein Gebiet ist, das im Brennpunkt des experimentellen und theoretischen Interesses steht. Nur durch Verfolgung aller sich bietenden Wege und durch die Ausschöpfung aller Möglichkeiten wird es gelingen, das ferne Ziel, die Trennung aller Isotope endlich einmal zu erreichen. Die Ergebnisse der letzten Jahre haben bewiesen, dass das anfänglich so undankbar und aussichtslos erscheinende Unterrängen, Isotope in wägbarer Menge zu trennen, durchaus erfolgreich behandelt werden kann. Wir möchten daher in Abwandlung eines Zitates von David Hilbert, das er eigentlich für die mathematische Disziplin geprägt hat, dass es auch für die Isotopentrennung kein Problem gibt, das sich nicht durch beharrliche Arbeit und durch dauerndes Nachdenken fördern und schliesslich seiner endgültigen Lösung entgegenführen lässt!