

77. Moderne Alchemie: Der Weg über das Unwägbare zum Wägbaren

von **Otto Hahn**¹⁾.

(3. III. 53.)

Haben Sie herzlichen Dank für die grosse Auszeichnung, in Ihrem Kreise einen unter dem Namen *Paracelsus* gehenden Vortrag halten zu können. Das Thema dieses Vortrags soll von der neuen Alchemie handeln, und da liegt es nahe, zu fragen, ob dieses Thema vielleicht in einem gewissen Zusammenhang steht mit dem grossen Schweizer Naturforscher, dessen Namen wir heute ehren wollen. Verweilen wir ein paar Augenblicke auf dem Standpunkt, den die Chemie des Mittelalters bis zu dem Auftreten des *Theophrastus Bombastus von Hohenheim*, gen. *Paracelsus*, eingenommen hat, so sehen wir, dass es bis zu dessen Lebenszeit eine eigentliche wissenschaftliche Chemie nicht gegeben hat.

Es gab zwar eine Jahrtausende alte chemische Praxis, die mit rein praktischen Ergebnissen Erfolge hatte und die in der Gewinnung und Verarbeitung von Metallen, Salzen, Farbstoffen grosse Leistungen aufwies. Unter einem grossen Sammelbegriff der Chemie wurden diese zu den verschiedensten Zeiten und in den verschiedensten Ländern gesammelten Erkenntnisse aber nicht zusammengefasst.

Daneben gab es aber die fast ein Jahrtausend alte offizielle Lehrmeinung der Alchemie, die sich eines göttlichen Ursprungs rühmte, die nach dem „Stein der Weisen“ fahndete, um mit diesem Element-Umwandlungen vorzunehmen, vor allem, aus unedlen Metallen edle zu gewinnen. Der wirkliche Beitrag an Erkenntnissen durch die Alchemie steht aber in keinem Verhältnis zu der aufgewendeten Arbeit, und man ist mehr geneigt, dem alchemistischen Wirken einen hemmenden Einfluss auf die Fortentwicklung wissenschaftlicher chemischer Erkenntnisse zuzusprechen als das Gegenteil.

Eine eigentliche, systematische Chemie gab es weder dem Namen noch dem Begriffe nach.

Aber mit der Wende zu unserer neueren Zeit, der geistigen Bewegung des Humanismus, dem Zeitalter der Entdeckungen, der Abwehr der alles beherrschenden mittelalterlichen Scholastik mit *Kopernikus*, später *Galilei* und *Kepler*, wurde es auch in der Chemie lebendig.

¹⁾ Vorgetragen am 1. März 1953 an der Winterversammlung der Schweiz. Chemischen Gesellschaft in Neuenburg bei Anlass der Verleihung der *Paracelsus*-Medaille an Prof. Dr. *Otto Hahn*.

Zum ersten Male wurden die Grundprobleme angegriffen, das Problem der chemischen Zusammensetzung der Stoffe und das Problem des Verhaltens der Stoffe zueinander. Das historische Verdienst, die Lösung dieser Fragen in Angriff genommen zu haben, gebührt vornehmlich *Paracelsus*²⁾. Durch ihn wurden die vielen zersplitterten chemisch-praktischen Kenntnisse zu einem einheitlichen Wissenszweig vereinigt. Mit der bewussten Zusammenfassung der Lehre von den Stoffen und deren Veränderungen erscheint nunmehr die auf Beobachtung und Erfahrung basierende Chemie im Gegensatz zu den mystischen Glaubenssätzen der Alchemie. Sachlich verband *Paracelsus* diese neue Chemie mit der Medizin und der Pharmazie. Ärzte und Apotheker wurden für die folgenden Jahrhunderte zugleich die offiziellen Vertreter der neuen Chemie.

Nach aussen hin hat *Paracelsus* allerdings auch mit der Alchemie noch nicht ganz gebrochen. Gelegentlich wendet er sich zwar an die „Phantasten“, die Gold und Silber künstlich herstellen wollen, und nennt die Alchemisten Narren, die leeres Stroh dreschen. Bei anderen Gelegenheiten spricht er aber von dem Stein der Weisen als von einer wohlbekannten Sache, zweifelt nicht an der Möglichkeit der Metallverwandlung und rühmt sich der Dinge, die er mit Hilfe der Alchemie dargestellt habe. Vielleicht machte er diese Behauptungen aber nur, um sich neben seinen vielen anderen Künsten auch als Meister der Alchemie anstaunen zu lassen (nach Dr. *Kopp*, Geschichte der Chemie).

Paracelsus starb 1541 in Salzburg, also in einem Alter von nur 48 Jahren; ein unruhvoller Geist, von Ländern zu Ländern wandernd, nirgends sesshaft, von einer ausserordentlichen Vielseitigkeit. Allerdings – nach *Schiller* –: „Von der Parteien Gunst und Hass verwirrt, schwankt sein Charakterbild in der Geschichte“. Aber trotzdem dürfen wir ihn als den Vater der eigentlichen Chemie ansehen.

Es dauerte freilich noch ein paar Jahrhunderte, bis der letzte Spuk der alchemistischen Spekulationen endgültig von der systematischen Forschung überwunden war.

Das 19. Jahrhundert mit seiner imponierenden Entwicklung vorurteilsloser wissenschaftlicher Forschung schien ein ununterbrochener Beweis der modernen Atomlehre, nach der die Atome die unveränderlichen, unzerstörbaren Grundbestandteile unserer materiellen Welt vorstellen. Aber das Jahrhundert war noch nicht ganz vorbeigegangen, da fing das festgefügte Gebäude der Atomlehre in seinem Gefüge zu wanken an. Mit der Entdeckung der Radioaktivität durch *Henri Becquerel*, mit der Herstellung des Radiums durch das Ehepaar *Curie* musste man bald erkennen, dass es zumindest einige chemische Elemente gibt, die einem inneratomistischen Umwandlungsprozess unterliegen. Die zunächst so rätselhaften „Strahlen“ der radioaktiven

²⁾ *Theophrastus Bombastus Paracelsus von Hohenheim*, geboren 1493 in Einsiedeln (Schweiz).

Elemente entpuppten sich in ihrem wichtigsten Vertreter, den α -Strahlen, als Heliumatome, die aus den radioaktiven Atomen ausgeschleudert wurden. Das Radium selbst konnte als ein Zwischenglied einer langen Kette von Atomumwandlungen erkannt werden, bei denen die schwersten in der Natur vorkommenden Elemente, das Uran und das Thorium, allmählich in Blei übergehen.

In etwa 20jähriger Forschung in allen Kulturländern der Erde wurden diese Vorgänge erforscht, etwa 40 verschiedene radioaktive Atomarten wurden festgestellt und in den drei natürlichen radioaktiven Umwandlungsreihen, der Uran-, der Thorium- und der Actiniumreihe, untergebracht, wobei die letztere sich auch aus dem Uran ableitet.

Dass diese Untersuchungen möglich waren, hatte seinen Grund darin, dass die radioaktiven Prozesse durch die dabei emittierten Strahlenteilchen in Gewichtsmengen nachweisbar waren, die weit jenseits der üblichen chemischen und auch physikalischen Methoden des Nachweises lagen. Die Grenzen dieser Nachweisbarkeit wurden dabei immer weiter heruntergedrückt; sie endeten mit dem Ergebnis, dass es gelingt, die einzelnen Atome chemischer Elemente zu erkennen und ihre chemische Natur festzulegen. Durch diese Möglichkeit, und nur durch sie, wurde das moderne Gebiet der Atom- oder besser Kernphysik erschlossen, mit ihr die willkürliche Transmutation chemischer Elemente, zunächst in unwägbareren Mengen durchgeführt und schliesslich die künstliche Gewinnung solcher Elemente in auch dem Chemiker zugänglichen Mengen. Die Alchemie des Mittelalters war in moderner Form wieder auferstanden.

Welch weiter Weg zunächst von der Wägbarkeit materieller Teilchen bis zum Nachweis unwägbarer Atomumwandlungen zurückzulegen war, darüber noch einige kurze Ausführungen.

Unsere gewöhnliche analytische Waage erlaubt die Feststellung der Masse von einigen hundert Gramm mit einer Genauigkeit von $\frac{1}{10}$ bis zu $\frac{1}{20}$ Milligramm. Die modernen Mikrowaagen bestimmen Bruchteile von Grammen auf Tausendstel Milligramm und noch darunter. Mit ultramikrochemischen Methoden wurden die Grenzen noch weiter nach unten verlegt, und hier fallen die Grenzen der Wägbarkeit schon ungefähr mit den Grenzen der Sichtbarkeit zusammen. Ich erinnere an die Versuche von *Alfred Stock* über die Schädlichkeit des Quecksilbers, bei denen es ihm gelang, Hg als HgJ_2 bis zu $\frac{1}{100\,000}$ mg nachzuweisen (dies sind 10^{-8} g), oder an den *Haber'schen* Goldnachweis mit ähnlicher Empfindlichkeit.

Aber wenn wir nur einen Augenblick darüber nachdenken, um wieviel Atome oder Molekeln es sich bei diesen fast unsichtbaren und fast unwägbareren Substanzmengen handelt, dann sehen wir doch gleich ein, dass es sich dabei immer noch um Billionen Teilchen handelt. Ein Grammatom oder ein Gramm-Molekel irgendeiner Substanz

enthält ja die uns unvorstellbar grosse Anzahl von $6 \cdot 10^{23}$ Atomen oder Molekeln. Und deshalb handelt es sich auch bei den gegenüber den chemischen Nachweismethoden noch empfindlicheren spektralanalytischen Methoden im besten Falle immer noch um Milliarden von Atomen.

Aber der Weg von der Wägbarkeit zur Unwägbarkeit ging weiter, und zwar führte er über die eingangs erwähnten radioaktiven Elemente. Mit der leichten Nachweisbarkeit radioaktiver Umwandlungsvorgänge durch die Ionisation der dabei emittierten Strahlen wurden die Grenzen des Nachweises immer weiter heruntergesetzt, bis sie schliesslich mit der Nachweisbarkeit einzelner Atome die denkbar mögliche unterste Grenze erreichten. Schon mit den im ersten Jahrzehnt der Radiumforschung ausschliesslich verwendeten Elektroskopen oder Elektrometern konnte man absolut unwägbare Mengen radioaktiver Atomarten durch ihre Ionisation nachweisen und damit auch einen eindrucksvollen Begriff von der Zahl 10^{23} Atomen pro Grammatom Substanz erhalten.

So ist das gewöhnliche Uran im Vergleich zu dem millionenmal stärkeren Radium nur eine sehr schwach strahlende Substanz, die aber auch in kleinen Bruchteilen eines Gramms durch ihre α -Strahlen leicht nachweisbar ist. Es ist Ihnen wohl bekannt, dass dieses α -strahlende Uran über das Radium sich allmählich in das Blei umwandelt. Genauere quantitative Versuche haben später gezeigt, dass pro Gramm Uran in jeder Sekunde 10000 α -Teilchen emittiert werden. Es dauert aber mehr als 65 Millionen Jahre, bis sich von diesem einen Gramm nur ein Prozent in das nicht mehr weiter zerfallende Blei umgewandelt hat.

Dass es schliesslich gelungen ist, nicht nur einzelne chemische Atome nachzuweisen, sondern auch ihre chemische Natur festzustellen, verdanken wir vor allem der *Wilson'schen* Nebelkammer und den Zählapparaturen ionisierender Teilchen, unter denen der sog. *Geiger-Müller-Zähler* eine überragende Bedeutung gewonnen hat. In der *Wilson'schen* Nebelkammer wird der Weg des ionisierenden Teilchens in einer mit Wasserdampf übersättigten Luft unmittelbar sichtbar gemacht. Im *Geiger-Müller-Zählrohr* werden die einzelnen Umwandlungsvorgänge registriert und die Natur der Vorgänge genau verfolgt.

Der erste Nachweis der künstlichen Umwandlung eines Elements in ein anderes geschah allerdings zunächst noch auf einem sehr viel mühsameren Wege, und zwar durch *Rutherford* im Jahre 1919. Durch Bestrahlen von Stickstoff mit den α -Teilchen sehr starker Radiumpräparate konnte *Rutherford* zeigen, dass neben den vielen Millionen von Strahlenteilchen bekannter Reichweite einige wenige auftreten, deren Reichweite grösser war als die der α -Teilchen, und die sich deshalb auf einem phosphoreszierenden Zinksulfidschirm durch ihre

sog. Szintillationen, ihr Aufblitzen, jenseits der abgeblendeten α -Teilchen erkennen liessen. Der Vorgang wurde von *Rutherford* so interpretiert, dass das α -Teilchen zunächst von dem Kern des Stickstoffs aufgenommen wird, dieser Kern aber instabil ist und einen Wasserstoffkern emittiert. Aus dem Stickstoff war Sauerstoff entstanden, die erste künstliche Atomumwandlung gelungen. Nicht lange danach hat *Blackett* diese Reaktion mit der *Wilson*'schen Nebelkammer sozusagen optisch sichtbar gemacht.

Diesen ersten Umwandlungen folgten bald weitere. Ihre Erforschung war nur möglich, weil die oben genannten Nachweismethoden die einzelnen Atomumwandlungsprozesse genau erkennen liessen.

Zu dem stolzen Gebäude der Chemie mit wägbaren Mengen war durch die Radioaktivitätsforschung das Gebiet atomarer Prozesse erschlossen worden und durch die *Rutherford*'sche Stickstoffumwandlung das eine immer grössere Bedeutung bekommende Gebiet künstlicher Kernprozesse. Dabei handelte es sich immer um die Erforschung absolut unwägbarer Atomvorgänge, die mit den üblichen Methoden chemischen Nachweises niemals hätten gefunden werden können.

Das Jahr 1932 brachte weitere grosse Entdeckungen, das Positron, den schweren Wasserstoff und vor allem das Neutron, nach einleitenden Versuchen durch *Bothe* und *Becker* und durch das Ehepaar *Joliot-Curie* von *Chadwick* im *Rutherford*'schen Institut als solches erkannt.

Alle diese Versuche über künstliche Atomumwandlungen wurden zunächst mit schnell bewegten Heliumkernen, den α -Teilchen des Radiums, durchgeführt. Die Umwandlung verlief immer so, dass bei der Bestrahlung der Elemente durch die α -Teilchen -- nur an leichtere Atomkerne konnte das positiv geladene α -Teilchen herankommen -- das nächsthöhere stabile Element unter Aussendung eines Protons entstand.

Eine neue ganz grosse Entdeckung gelang dann dem Ehepaar *Joliot-Curie* 1934 mit der Entdeckung der künstlichen Radioaktivität, die dadurch erkannt wurde, dass gewisse Elemente, wie Bor oder Aluminium, noch nach Unterbrechung der Bestrahlung durch die α -Strahlen eine nach den Gesetzen des radioaktiven Zerfalls abnehmende Aktivität erkennen liessen.

Allmählich war es auch gelungen, statt der Strahlen des Radiums andere und intensivere Geschosse für Atomumwandlungen zu gewinnen, und zwar vor allem hochbeschleunigte Protonen. Hochspannungsanlagen, *van-de-Graaff*-Maschinen und vor allem das amerikanische Cyclotron lieferten Strahlenquellen, die beim Cyclotron Kilogrammen von Radium äquivalent waren. Aber die Methoden des Nachweises blieben dieselben. An eine Wägbarkeit der gewonnenenen Umwandlungsprodukte war noch nicht zu denken.

Wieder gab es nun noch einen Schritt vorwärts. Es war der italienische Physiker *Fermi*, der die Wichtigkeit der neu entdeckten Neutronen für Kernreaktionen zuerst erkannte. Mit diesen ungeladenen Teilchen konnte man auch solche Elemente untersuchen, an deren positiven Atomkern man mit den positiven α -Strahlen nicht herankam. Und so gelang es *Fermi*, künstliche Atomumwandlungen auch bei den schwereren Elementen, ja bis zum Uran hinauf, durchzuführen. Der Vorgang war dabei der, dass das Neutron zunächst eingefangen wurde, das entstandene Atom aber nicht stabil war, sondern sich unter Emission von β -Strahlen in das nächsthöhere Element verwandelte. Andere als die unmittelbaren Nachbarn des bestrahlten Elements wurden bei den vielen nun bald aufgefundenen Kernprozessen nie beobachtet.

So fand *Fermi* auch nach der Bestrahlung des Urans mit Neutronen einige kurzlebige β -strahlende Umwandlungsprodukte, – wie er vermutete –, künstliche Uranisotope, die sich in das nächsthöhere Element, also Element 93, oder sogar noch weiter hinauf umzuwandeln schienen. Uran hat ja die Kernladung 92.

Da die Interpretation der *Fermi*'schen Versuche teilweise bestritten wurde, haben Professor *Meitner* und ich die Arbeiten am Uran aufgenommen. Besonders deshalb, weil wir den niederen Nachbarn des Urans, das Protactinium, Element 91, schon 20 Jahre früher entdeckt hatten und seine chemischen Eigenschaften kannten.

Es wurde gegenüber *Fermi* nämlich eingewendet, er habe vermutlich nicht ein Element 93, sondern vielleicht ein Isotop des Protactiniums gewonnen. Professor *Meitner* und ich, später in Gemeinschaft mit *Strassmann*, konnten aber die Versuche von *Fermi* durchaus bestätigen, durch sog. Indikatorenversuche feststellen, dass kein Protactinium vorlag und dann in mehrjähriger Arbeit bei der Bestrahlung des Urans mit Neutronen eine grosse Anzahl von künstlich aktiven Atomarten feststellen, die wir alle für Vertreter sog. Trans-Urane ansehen mussten. Soweit unsere Versuche von anderer Seite wiederholt wurden, wurden sie alle bestätigt.

Im Herbst 1938 fanden dann aber Herr *Strassmann* und ich – *Frl. Meitner* hatte unser Institut wegen der *Hitler*'schen Rassen-gesetze im Juli 1938 verlassen – im Anschluss an Versuche von *Mme Joliot-Curie* und *Savitch* recht seltsame Resultate. Wir schieden drei aktive Erdalkalimetalle ab, die wir zunächst für künstliche Isotope des Radiums halten mussten. Dies war an sich schon merkwürdig, denn Radium mit seiner Kernladung 88 ist ja kein Nachbar mehr des Urans.

Aber die Ergebnisse wurden noch unverständlicher. Unsere „Radiumisotope“ liessen sich mit keiner der uns lange bekannten Trennungsmethoden für Radium und Barium vom Barium trennen.

Indikatorenversuche, bei denen wir unsere künstlichen „Radium-isotope“ mit natürlichen Radiumisotopen mischten und dann die Trennung durchführten, gaben schliesslich den Ausschlag. Das „natürliche“ Radium liess sich vom Barium abtrennen, die künstlichen „Radium-Isotope“ dagegen nicht. So wurden wir zu dem Schluss gezwungen, dass die bei der Einwirkung von Neutronen auf Uran entstehenden Erdalkali-Isotope gar kein Radium waren, sondern Barium; ein höchst unerwartetes Ergebnis. Das Uran war durch den Beschuss mit Neutronen in zwei mittelschwere Kerne zerplatzt, gespalten. Das eine war Barium, das andere Bruchstück war – wie sich bald herausstellte – Krypton. Ihre Ordnungszahlen 56 und 36 ergänzen sich zu 92.

Meitner und *Frisch* waren die ersten, die den Vorgang dann auf Grund des *Bohr*'schen Modells der Atomkerne erklärten; von ihnen stammt auch der Ausdruck: Kernspaltung (nuclear fission). *Meitner* und *Frisch* gaben auch eine erste Berechnung über die bei der Spaltung frei werdende ausserordentlich grosse Energiemenge.

Die Entwicklung ging dann schnell weiter, und nur stichwortartig kann auf die einzelnen Etappen eingegangen werden. Bald wurde erkannt, dass die Spaltprozesse sehr zahlreich sind. Es entstehen nicht nur Barium- und Krypton-Isotope, sondern zahlreiche andere, wie Strontium + Xenon, Brom + Lanthan, Jod + Yttrium usw. Immer addierten sich die Kernladungen der Bruchstücke zu 92, der Kernladung des Urans. Die von *Fermi* und vor allem von uns vor der Entdeckung der Kernspaltung für Trans-Urane gehaltenen Substanzen stellten sich in Wirklichkeit alle als Spaltprodukte des Urans heraus.

In den USA. wurde schon 1939 festgestellt, dass in dem Mischelement Uran nur das seltene Isotop der Masse 235 im wesentlichen für die Spaltung verantwortlich ist, während das sehr viel häufigere Isotop 238 sich so verhält, wie die meisten gewöhnlichen chemischen Elemente: Es lagert das Neutron an, und das entstehende Isotop zerfällt unter β -Strahlen in das nächst höhere Element 93.

Die weitaus wichtigste Entdeckung war aber die Erkenntnis, dass bei der Zerspaltung des Urans nicht nur die einzelnen mittelschweren Atombruchstücke entstehen, sondern dass dabei zusätzlich Neutronen sozusagen als Begleitreaktion abgedampft werden. Von dieser Erkenntnis ab datiert die Möglichkeit des Übergangs der neueren Alchemie mit unwägbaren Mengen in die Kernchemie mit wägbaren, auch dem Chemiker zugänglichen Mengen. Bisher verliefen alle Arbeiten immer mit praktisch-unwägbaren Mengen. Dabei waren allerdings die Nachweismethoden so sicher wie die normalen Methoden des analytischen Chemikers.

Die Wahrscheinlichkeit, dass bei den Spaltprozessen noch zusätzlich Neutronen freigemacht werden, haben Herr *Strassmann* und

ich schon in unseren ersten Mitteilungen kurz in Erwägung gezogen, denn es liess sich aus dem Spaltungsschema sofort erkennen, dass die künstlich bei der Spaltung entstehenden Atombruchstücke ein gegenüber dem Atomgewicht ihres stabilen Isotops zu hohes Atomgewicht haben. Wir haben dafür aber einen Beweis nicht erbracht. Der experimentelle Beweis dafür wurde zuerst von *Joliot, v. Halban* und *Kowarski* in Frankreich und unabhängig davon in den USA. erbracht.

Welche Bedeutung haben nun diese zusätzlichen Neutronen? Ein Neutron, das auf einen Uran-235-Kern trifft, bewirkt dessen Spaltung. Dabei werden etwa drei neue Neutronen „abgedampft“. Die Spaltung hat uns also nicht nur das anfängliche Neutron sozusagen zurückgeliefert, sondern auch noch zusätzlich neue geschaffen; alle diese Neutronen können ihrerseits neue Spaltungen hervorrufen, wenn es gelingt, zu erreichen, dass die Neutronen wirklich wieder das Uran treffen und nicht durch Fremdkörper absorbiert werden oder nach aussen entweichen. Aus der ursprünglichen Spaltung eines einzigen Atoms kann also in kürzester Zeit lawinenartig eine Vermehrung der Spaltprozesse hervorgehen; eine „Kettenreaktion“, die zur Bildung wägbarer Mengen von Spaltprodukten unter ungeheurer Energieentwicklung anwächst.

Aber so einfach, wie das klingt, lagen die Verhältnisse durchaus nicht. Wir haben gerade gehört, dass in dem Isotopengemisch Uran nur das seltene leichtere Isotop 235 für die Spaltung in Frage kommt, während das schwere Uran 238 in der üblichen Weise das Neutron einfängt. Im letzteren Fall entsteht das Element 93, das von den amerikanischen Entdeckern Neptunium genannt wurde, und aus diesem über einen weiteren β -Zerfall das langlebige Plutonium, das Element 94.

Wie verläuft nun der Vorgang im Uran? Wir denken uns einen grossen Uranblock, in dem einige Atome Uran 235 zerspalten werden. Die dabei auftretenden zusätzlichen Neutronen haben zunächst eine sehr grosse Energie. Durch Zusammenstoss mit anderen Atomkernen verlieren sie diese allmählich, und schliesslich kommen sie an eine Energiegrenze, bei der die Anlagerung an das Uran 238 in einem sog. Resonanzprozess erfolgt, das Uran 235 aber noch nicht gespalten wird. Denn für die Spaltung braucht man noch langsamere Neutronen. Das viel häufigere Uran 238 fängt also die Neutronen ab, bevor sie das seltene Uran 235 spalten können. Also werden auch keine zusätzlichen Neutronen emittiert, die Reaktionskette kommt nicht in Gang. Es musste deshalb ein Kunstgriff angewendet werden, um die übermächtige Konkurrenz des Urans 238 auf ein vernünftiges Mass herunterzudrücken. Das Ergebnis der Arbeiten war die Konstruktion des Uran-Piles oder, wie wir in Deutschland sagen, des Atombrenners oder Kernreaktors. In diesem werden durch Einlagern von *Bremssubstanzen*,

sog. Moderatoren zwischen die Uranblöcke, ein grosser Teil der Neutronen unter die gefährliche Resonanzenergie heruntergebracht, ohne dabei selbst absorbiert zu werden. Solche Moderatoren sind vor allem das schwere Wasser oder reiner Kohlenstoff. In dem Uranbrenner kann sich nun eine gesteuerte Kettenreaktion einstellen. Von den rund drei zusätzlichen Neutronen wird eines zur Aufrechterhaltung der Spaltung verbraucht und liefert die zusätzlichen Neutronen, ein zweites wird an das Uran 238 angelagert und liefert Plutonium, ein drittes entweicht nach aussen oder wird sonstwie abfangen.

Es ist bekannt, dass das in den USA. in riesigen Uran-Piles entstandene Plutonium das Material der Atombombe liefert. Daneben entstehen die mehr als 100 Spaltprodukte in riesiger Aktivität, und ausserdem können die nach aussen entweichenden Neutronen dazu verwandt werden, einen grossen Teil aller unserer gewöhnlichen chemischen Elemente durch Anlagerung des Neutrons radioaktiv zu machen und schliesslich wägbare Mengen von ihnen zu gewinnen.

Um zu einer Vorstellung zu kommen, wie gross etwa diese Gewichtsmengen sind, kann man von folgender Überlegung ausgehen: Das Gewicht der zu einer Atombombe notwendigen Menge an Plutonium ist nie genau angegeben worden. Grössenordnungsmässig sind es wohl etwa 10 kg. Unter der berechtigten Annahme, dass je Atom gebildeten Plutoniums aus Uran 238 je ein Uranatom 235 zur Spaltung geführt wird, bilden sich in dem Uran-Pile neben den 10 kg Plutonium rund 10 kg Spaltprodukte. Diese 10 kg verteilen sich auf die zahlreich entstehenden Uranbruchstücke, die früher oder später in stabile oder sehr langlebige Atomarten des Periodischen Systems übergehen. Es handelt sich bei diesen Endprodukten im wesentlichen um etwa 70, die 30 verschiedenen Elementen zugehören. Dabei sind einige wenige, die nur in äusserst geringer Menge entstehen, fortgelassen. Rechnen wir rein überschlagmässig also mit 70 stabilen oder praktisch stabilen Isotopen, deren Gesamtmenge nach unserer Annahme 10 kg beträgt, dann kommt auf jedes einzelne Isotop die Menge $10000/70 = 140$ g. In Wirklichkeit wird die Gewichtsmenge natürlich sehr variieren, je nach der Ausbeute der betreffenden Spaltreaktion.

Man sieht aus dieser sehr rohen Schätzung, dass in einem Uranbrenner, in dem 10 kg Plutonium entstanden sind, nicht nur dieses neue transuranische Element gewonnen werden kann, sondern eine grosse Menge anderer Elemente, deren Isotopenzusammensetzung gegenüber dem Isotopenverhältnis des in der Natur vorkommenden Elements verschieden ist.

Was für uns aber noch wichtiger ist, ist die Tatsache, dass bei den Spaltprozessen als Zwischen- und als Endprodukte Vertreter von Elementen entstehen, die es in der Natur gar nicht gibt. Nach der von *Josef Mattauch* aufgestellten sog. Isobarenregel, nach der von

zwei nur durch eine Kernladung unterschiedenen Isobaren, also Elementen gleichen Atomgewichts aber verschiedener Kernladung, nur eines stabil sein kann, können die Elemente Nr. 43 und Nr. 61 in der Natur nicht existieren. Sie entstehen aber bei der Zerspaltung des Urans, und sie können jetzt auch durch geeignete Bestrahlung ihrer Nachbarlemente gewonnen werden.

Von besonderem Interesse ist hier das Element 43, das von seinen Entdeckern als Technetium bezeichnet wurde. Sein stabilstes Isotop hat eine Halbwertszeit von 200 000 Jahren, es ist also praktisch ein stabiles Element.

Nach unserer rohen Überschlagsrechnung würden in dem Uran-Pile, der 10 kg Plutonium liefert, $10\,000/70 = 140$ g Technetium entstehen. Nun ist aber diese Menge in Wirklichkeit noch grösser, denn die Ausbeute bei der Technetiumentstehung ist besonders günstig. So gibt es eine neuere Angabe, dass in einem Pile, der mit 100 000 Kilowatt Leistung arbeitet, pro Tag etwa 2,5 g Technetium entstehen. 100 000 kW entsprechen einer Produktion an Plutonium von rund 100 g pro Tag. Bei der Bildung der 10 kg Plutonium sind also rund 250 g Technetium entstanden.

Da bis heute das Material von vielen Atombomben gewonnen worden ist, sieht man aus diesen Zahlen, dass das künstliche Element 43 kilogrammweise gewonnen worden ist. Dem entspricht, dass die Chemie dieses künstlichen Elements heute genauer bekannt ist als die mancher anderer natürlich vorkommender Elemente. Das reine Metall wurde erhalten und eine grosse Anzahl von wohldefinierten Verbindungen (Handbuch der analytischen Chemie, 1953). In der Preisliste der Isotope Division der US.-Atomic Energy Commission wird das Technetium frei zum Verkauf angeboten. Die handelsübliche Form scheint das NH_4TeO_4 , das Ammoniumpertechnetat, zu sein (Preis vor einiger Zeit in Harwell 1 mg etwa 30 DM). Die Physiker unter Ihnen interessiert vielleicht, dass heute ausser dem stabilen Technetium mit dem Atomgewicht 99 nicht weniger als 22 weitere Isotope bekannt sind.

Etwas weniger weiss man über das andere im periodischen System fehlende Element, die seltene Erde 61, von seinen Entdeckern Prometium genannt. Auch von diesem Element sind bei der Spaltung des Urans im Pile eine Anzahl isotoper Vertreter gewonnen worden. Aber der beständigste unter diesen zerfällt zur Hälfte schon in 3,7 Jahren. Immerhin wurde eine Probe dieses Isotops – es hat das Atomgewicht 147 – im Gewicht von 5 mg spektroskopisch untersucht und seine Verschiedenheit von den anderen seltenen Erden sichergestellt.

Über die Elemente Astatin – 85 – und Francium – 87 –, die höheren Homologen des Jods und des Cäsiums, brauche ich hier nichts zu sagen. Sie sind in einer ganzen Anzahl von Isotopen be-

kennt. Aber das längste Astatinisotop hat eine Halbwertszeit von 7,5 Std., das aus dem natürlich vorkommenden Actinium als Nebenreaktion entstehende Francium nur 22 Min. Man hat also bisher keine Möglichkeit, diese Elemente in wägbarer Menge zu gewinnen.

Ganz anders wird es wieder bei den Trans-Uranen, den Elementen von 92 aufwärts. Unter diesen ist das Element 94, das Material der Atombombe, schon genannt worden. Es hat das Atomgewicht 239 und eine Halbwertszeit von 24000 Jahren, ist also praktisch stabil. Seine chemischen Eigenschaften sind bis ins einzelne bekannt. In seinen verschiedenen Wertigkeiten 3, 4 und 6 entspricht es dem 3wertigen Lanthan, dem 4wertigen Thorium, dem 6wertigen Uran.

Seit 1945 sind in den riesigen Uran-Piles der Vereinigten Staaten sicher Hunderte von Kilogramm Plutonium gewonnen worden. Da es keine durchdringenden, sondern nur die leicht absorbierbaren α -Teilchen emittiert, bedingt das Arbeiten mit ihm keine Strahlengefahr. Es soll aber sehr giftig sein. Erst nach Erreichen der sogen. kritischen Grösse, bei der mehr Neutronen in der Substanz verbleiben als nach aussen entweichen, entsteht der furchtbare Sprengstoff, der die Welt erschüttert hat und in wachsendem Masse auch heute wieder beunruhigt.

Ähnlich wie bei vielen anderen Elementen gibt es auch beim Plutonium eine ganze Anzahl von Isotopen, zu denen nach einer neuen Mitteilung auch noch ein besonders stabiles von 500000 Jahren hinzukommt.

Das Plutonium der Bombe entsteht im Uran-Pile über einen instabilen Vertreter dieses Elements der Kernladung 93, das Neptunium. Nach einer anderen Reaktion entsteht im Uran-Pile auch ein sehr stabiles Isotop dieses Elements 93 (Atomgewicht 237) mit einer Halbwertszeit von 2,2 Millionen Jahren. Die Ausbeute an dieser Substanz ist geringer, da sie nur mit schnellen Neutronen gebildet wird. Aber schon vor mehreren Jahren waren Hunderte von Milligrammen der Substanz gewonnen, und heute sind es sicher sehr viel mehr. In Analogie zum benachbarten Uran, zu den Uranyl-salzen, gibt es Neptunyl-salze. Die Wertigkeit ist wie beim Uran hauptsächlich 6- und 4wertig, aber auch 5- und 3wertige Verbindungen wurden gewonnen.

Von den weiteren, in den letzten Jahren in den USA. gewonnenen Trans-Uranen, den Elementen 95–98, kann man zunächst das Element 95, das Americium, erwähnen, denn von ihm existiert ein Isotop von 475 Jahren Halbwertszeit, das milligrammweise, also immerhin noch in wägbarer Menge, gewonnen wurde und dessen chemische Eigenschaften den Erwartungen für ein Element der sogen. Actinidenreihe durchaus entsprechen. Unter den normalen Bedingungen liegt Americium in seinen Lösungen in dreiwertiger Form vor.

Das nächst höhere Element, das Curium, wurde meines Wissens bisher nur in Bruchteilen von Milligrammen gewonnen. Sein stabilstes Isotop zerfällt in etwa 150 Tagen. Nach mikrochemischen Methoden konnten auch dessen Eigenschaften festgestellt werden; es ist nur noch dreiwertig.

Die letzten Elemente Berkelium und Californium wurden noch nicht gewichtsmässig hergestellt, und mit dem Californium schliesst die Reihe der bisher bekannten natürlichen und künstlichen chemischen Elemente ab.

Fassen wir zum Schluss unsere Ausführungen zusammen, dann sehen wir, dass der lange Weg von den Spekulationen der Alchemisten des Mittelalters bis zu der gelungenen Transmutation bekannter chemischer Elemente und der Herstellung völlig neuer zunächst nur zu völlig unwägbaren Mengen geführt hat. Die nach physikalischen Methoden geprüften chemischen Trennungen haben aber bewiesen, dass das Verhalten auch absolut unwägbarer Mengen genau dem entspricht, was man aus wägbaren Mengen von ihnen wusste oder bei den neuen Elementen erwarten konnte. Diese Sicherheit in den Aussagen über das chemische Verhalten auch nur weniger Atome führte zu der Auffindung der Uranspaltung. Die Erkenntnis, dass bei den Spaltungsreaktionen zusätzliche Neutronen frei werden, führte zu der Möglichkeit der Einleitung der Kettenreaktion, die in den riesigen Uran-Piles der Vereinigten Staaten mit ihrer vielmilliardenfachen Vermehrung der Einzelreaktionen in die Tat umgesetzt wurde.

Der Weg vom Unwägbaren zum Wägbaren wurde damit beschritten. Der Uran-Pile ist der „Stein der Weisen“, mittels dessen fast alle Elemente des periodischen Systems künstlich aktiv gemacht werden können. Auch in unwägbaren Mengen haben diese Elemente, wie Sie alle wissen, als Tracer Elemente, als Indikatoren, eine Bedeutung für die Medizin, Chemie und Technik, die mit jedem Tage zunimmt. Ihre inaktiven oder langlebigen Umwandlungsprodukte können durch entsprechend lange Bestrahlung als reine Atomarten in wägbarer Menge gewonnen werden. Dass die grössten Mengen von diesen bisher in dem Plutonium, dem Material der Atombombe, angesammelt sind, soll uns nicht entmutigen. Wir müssen hoffen, dass die moderne Alchemie schliesslich doch zum Segen und Fortschritt der Menschheit und nicht zu ihrer Zerstörung führt.

Göttingen, März 1953.
