Günther Vormum

100 Jahre Radioaktivität - Rückblick und Versuch einer Bilanz*

Ein Rückblick auf einhundert Jahre Radioaktivität sollte eines gewissen sachlichen Zusammenhanges wegen nicht mit dem 24. Februar 1896 beginnen, dem Datum, an welchem Henri Becquerel über eine bei der Phosphoreszenz von Uranylsulfat ausgehende unsichtbare Strahlung berichtete, sondern mit dem 8. November 1895, an dem Wilhelm Conrad Röntgen in Würzburg jene Versuche durchführte, die mehrere Wochen intensiven Experimentierens hinter verschlossenen Türen und unter strenger Verschwiegenheit nach sich zogen, und die schließlich in der Entdekkung der X-Strahlen ihren krönenden Abschluß fanden. Veröffentlicht hat Röntgen schließlich seine Ergebnisse nach eingehender und wiederholter experimenteller Prüfung am 28. Dezember 1895 unter dem Titel: "Eine neue Art von Strahlen" bei der Würzburger Buchhandlung, welche die Sitzungsberichte der Würzburger Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft verlegte. Die Abhandlung wurde gleichzeitig als Broschüre gedruckt und in mehrere Sprachen übersetzt. Seine Sonderdrucke pflegte auch Röntgen an zahlreiche Fachkollegen im In- und Ausland zu verschicken. Die Liste der Adressaten enthielt an die hundert Namen. Seine Entdeckung fand bei Wissenschaftlern in aller Welt ein ungeahntes Echo und wurde auch sonst als eine Sensation gefeiert.

Das Instrumentarium, mit dem er seine Experimente durchführte, nimmt sich, mit heutigem Maßstab gemessen, äußert bescheiden aus. Es bestand aus einem Funkeninduktor mit Unterbrecher zur Erzeugung einer Hochspannung, einem Hittorfschen Entladungsrohre, das ist ein evakuiertes Glasrohr mit eingeschmolzenen Elektroden an den Enden, sowie einem Leuchtschirm. Letzterer bestand aus einem Stück Pappe, auf dem mittels Bindemittel "Bariumplatincyanür" in einer dünnen, gleichmäßigen Schicht befestigt war. Bariumplatincyanür ist nach heutiger Nomenklatur Barium-Tetracyano-Platinat. Bei dem entscheidenden Versuch, die vermutete unsichtbare Strahlung nachzuweisen, wurde das Entladungsrohr lichtdicht

* erweiterte Fassung eines Vortrages vor dem Plenum der Leibniz-Sozietät am 18. April 1996

mit schwarzem Papier umhüllt. Nach Einschalten der Hochspannungsquelle leuchteten der Schirm wie auch einige zufällig auf dem Experimentiertisch liegende Krümel des Leuchtstoffes. Dies war offenbar der erste entscheidende Schritt zur Entdeckung der Röntgenstrahlung. Unsichtbare Strahlung entstand unter den gegebenen Bedingungen im Entladungsrohr, durchdrang die Glaswand und die lichtdichte Umhüllung und wandelte sich in den Kristallen des Leuchtstoffes in sichtbares Licht um. Diesen Vorgang nannte man damals Phosphoreszenz, heute spricht man von Fluoreszenz.

Unsichtbare, durchdringende Strahlung und Fluoreszenz, welchen Zusammenhang gab es zwischen beiden? Das war eine Frage, die damals zahlreiche Forscher bewegte, so auch Henri Becquerel. Er stammte aus einer Physikerfamilie. Der Großvater war Professor am Museum für Naturgeschichte in Paris und gehörte zu den Begründern der Elektrochemie. Der Vater, Edmund Becquerel, arbeitete an der Erforschung der Fluoreszenz und hat sich darüber hinaus um die wissenschaftliche Fotografie verdient gemacht. Henri hatte das Interesse an der Phosphoreszenz gewissermaßen von seinen Vorvätern ererbt. Bereits 1880 präparierte er Kaliumuranylsulfat $K_2UO_2(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$ und beobachtete dessen durch UV-Licht angeregte intensive Phosphoreszenz.

Im Januar 1896 berichtete der berühmte Mathematiker und mathematische Physiker Henri Poincaré, nachdem er Röntgens neueste Publikation gelesen hatte, in einer Sitzung der Pariser Akademie der Wissenschaften über die X-Strahlen und warf dabei die Frage auf, ob nicht fluoreszierende Kristalle nach Anregung durch Sonnenlicht ihrerseits unsichtbare Strahlen aussenden, die den X-Strahlen ähnlich sind. Henri Becquerel, der auch an der Sitzung teilnahm, war von dem geäußerten Gedanken so fasziniert, daß er unmittelbar danach Versuche aufnahm, um seine in früheren Experimenten verwendeten Uranylsalze in Hinblick auf die vermutete unsichtbare Strahlung zu überprüfen. Zunächst exponierte er Uranylsulfatkristalle, die auf einer mit schwarzem Papier lichtdicht umhüllten Fotoplatte lagen, dem Sonnenlicht. Die Platte zeigte nach dem Entwickeln eine flekkige Schwärzung. Becquerel glaubte, hiermit die vermutete X-Strahlung nachgewiesen zu haben, und er publizierte den Befund umgehend. Der vermeintliche Zusammenhang zwischen fluoreszierenden Kristallen und der unsichtbaren Strahlung sollte sich jedoch bald als Irrtum erweisen. Weitergehende Versuche ergaben nämlich, daß auch Präparate, die nicht dem Sonnenlicht ausgesetzt waren, den gleichen Effekt zeigten. Auch Uranylsalze, die im Dunkeln präpariert und aufbewahrt wurden, ja selbst

Uranverbindungen, welche nicht fluoreszieren, sowie gelöstes Uranylsulfat und auch metallisches Uran (oder was man damals dafür hielt) verursachten Schwärzungen der Fotoplatte. Becquerel folgerte, daß es sich bei der von ihm nachgewiesenen, durchdringenden Strahlung nicht um transformierte Sonnenstrahlung handeln könne. Die Schwärzung der Fotoplatte war, wie genauere Versuche zeigten, vielmehr der eingesetzten Uranmenge proportional. Es mußte folglich eine Strahlung sein, die vom Uran selbst ausging. Wie sich bald herausstellte, hatte Becquerel eine Naturerscheinung von weitreichender Bedeutung entdeckt, die Radioaktivität [1].

Diese Entdeckung an der Schwelle zum 20. Jahrhundert zog weltweit in zahlreichen Laboratorien eine emsige Forschungstätigkeit nach sich. Hauptsächlich Physiker und Chemiker studierten die Eigenschaften der neuartigen Strahlung und versuchten vor allem ihren Ursprung zu erklären. Die Bemühungen führten sehr bald zu der Erkenntnis, daß das Uran nicht eine einheitliche Strahlung emittiert, sondern daß drei verschiedene Strahlenarten auftreten. Das konnte durch unterschiedliches Absorptionsverhalten an dünnen Metallfolien nachgewiesen werden. Außerdem fand man, daß Uran nicht das einzig radioaktive Element war. Thorium zeigte ein ähnliches Verhalten. Vor allem aber sollte die Erkenntnis, daß beim radioaktiven Zerfall eine Elementumwandlung erfolgte, wesentlich zum Umsturz im Weltbild der Physik beitragen. Hatte man doch bis dahin an die Unteilbarkeit der Atome und damit an die Stabilität der Elemente geglaubt.

Im folgenden sollen die Ereignisse in chronologischer Folge nachgezeichnet werden. Die Entdeckung Becquerels war unmittelbarer Ausgangspunkt für die epochemachenden Arbeiten von Marie und Pierre Curie in Paris. Mit Marie Curie trat auf dem Gebiet der Naturwissenschaft erstmals eine Frau in die Reihe der hervorragenden Forscherpersönlichkeiten. Das wurde damals von vielen ihrer Fachkollegen keineswegs als selbstverständlich angesehen. Einige Bemerkungen zur Lebensgeschichte von Marie und Pierre Curie scheinen mir hier angezeigt.

Marie Curie geb. Sklodowska war Polin. In Warschau am 7. November 1867 geboren, hat sie in Frankreich ihre wissenschaftliche Laufbahn begonnen und auch dort mehrere Jahrzehnte erfolgreich gearbeitet. Sie stammte aus einer Pädagogenfamilie. Der Vater war Gymnasiallehrer in den Fächern Physik und Chemie, während die Mutter eine Mädchenschule mehrere Jahre leitete und dort auch unterrichtete. Marie war eine ausgezeichnete Schülerin. Nach Abschluß der Oberschule beherrschte sie Rus-

sisch, Englisch, Deutsch und Französisch wie ihre Muttersprache. Auch in den anderen Fächern zeigte sie hervorragende Leistungen. Sie hätte sehr gern ein Hochschulstudium begonnen. Leider war im zaristischen russischen Reich, zu dem damals das Königreich Polen gehörte, ein Frauenstudium unmöglich. Um im Ausland an einer Universität zu studieren, fehlten ihr die finanziellen Mittel. Sie hat dann sechs Jahre als Erzieherin gearbeitet, zunächst im Hause eines Gutsbesitzers auf dem Lande und das letzte Jahr in Warschau im Hause eines Fabrikbesitzers. In ihrer freien Zeit nutzte sie die Möglichkeit, im Museum für Industrie und Landwirtschaft, das ein Verwandter von ihr leitete, naturwissenschaftlich zu experimentieren. Mit vierundzwanzig Jahren konnte sie dann endlich in Paris an der naturwissenschaftlichen Fakultät der Sorbonne das Studium der Physik aufnehmen. Ihre Liebe galt ganz der Mathematik, der Physik und der Chemie. Sie arbeitete mit äußerster Anstrengung, um ihr Studium in möglichst kurzer Zeit mit besten Noten abschließen zu können.

Als junge Diplomphysikerin bekam sie den Auftrag, die magnetischen Eigenschaften verschiedener Metalle zu untersuchen. Bei ihren Bemühungen um einen für solche Experimente geeigneten Laborplatz lernte sie Anfang 1894 den Physiker Pierre Curie kennen, der an einer Pariser Fachschule Physik und Chemie lehrte. Neben seiner Lehrtätigkeit untersuchte er die elektrischen Eigenschaften von Kristallen sowie den Einfluß der Temperatur auf den Magnetismus. Ihm verdanken wir die Konstruktion und den Bau einer für derlei Messungen erforderlichen Präzisionswaage. In seinem Labor bekam Marie Sklodowska den ersehnten Arbeitsplatz, und es entstand eine experimentelle Zusammenarbeit, aus der sich dann eine persönliche Freundschaft entwickelte. Im Juli 1895 entschlossen sie sich zu heiraten. Im Sommer 1896 legte Marie Curie ihre Lehramtsprüfung ab. Damit durfte sie nun an höheren Schulen unterrichten. Jetzt sah sie sich nach einem Thema für eine Dissertation um. Henry Becquerel hatte gerade die noch rätselhafte Strahlung des Urans entdeckt, und so reizte es sie, deren Natur zu ergründen. In einem Nebengelaß der Schule, an der ihr Mann unterrichtete, führte sie erste Versuche in dieser Richtung durch. 1898 fand sie, daß offenbar nicht nur Uran die seltsame Strahlung emittert, sondern auch Thorium. Zur gleichen Zeit hat übrigens auch der deutsche Physiker Gerhard C. Schmidt in Erlangen dies beobachtet und publiziert. Für die strahlenden Stoffe Uran und Thorium prägte Marie Curie den Begriff "Radioaktive Elemente". Wie sich bald herausstellte, gehören hierzu weit mehr Elemente als nur die beiden genannten. Mit dem ihr eigenen Forscherdrang begann Marie Curie uranhaltige und andere

Minerale auf ihren Gehalt an Radioaktivität zu prüfen. In der Mineraliensammlung der Schule, in der sie experimentieren durfte, hatte sie ein reiches Betätigungsfeld. Die hierfür erforderlichen elektrischen Meßgeräte bekam sie von ihrem Mann Pierre angefertigt. Hatte er sich doch bereits früher in der Konstruktion und im Bau physikalischer Meßgeräte Verdienste erworben.

Ausgehend von der schon von Becquerel gewonnen Erkenntnis, daß die von den radioaktiven Stoffen emittierte unsichtbare Strahlung nicht nur Fotoplatten zu schwärzen vermochte, sondern auch Luft elektrisch leitend machte, war ein Wechselwirkungsprinzip entdeckt worden, das sich für die quantitative Messung der Radioaktivität hervorragend eignete. Und so waren Varianten sogenannter Ionisationskammern in Verbindung mit den damals üblichen Goldblattelektrometern wichtigste Meßinstrumente im Labor der Curies und darüber hinaus auch in vielen Forschungslaboratorien anderswo. Nebenbei bemerkt haben diese Detektoren sich für spezielle Zwecke bis heute behaupten können und das sogar neben den modernen Scintillations- und Halbleiterdetektoren und den Kammersystemen mit raffinierter Elektronik.

Bei der Prüfung von Uranerzen, in erster Linie waren das Uranpechblende und Chalkolith, stelle man überraschenderweise fest, daß die gemessene Strahlung weitaus stärker war, als nach dem berechneten Urangehalt zu erwarten war. Es mußten in den Mineralen also Elemente enthalten sein, die eine sehr viel höhere Radioaktivität besaßen als das Uran selbst. Zur Klärung dieses Befundes begannen die Curies mit der chemischen Aufarbeitung von Erzproben [2]. Man schrieb das Jahr 1898. Tatsächlich gelang es ihnen, einen sehr stark strahlenden Körper in den Wismutfraktionen ihres Trennungsganges angereichert zu finden und seine Strahlungseigenschaften zu ermitteln. Die Gewinnung einer wägbaren Menge, die zur Atomgewichtsbestimmung und zur chemischen Identifizierung gereicht hätte, war ihnen nicht möglich. In ihrem Bericht vom Juli 1898 an die Pariser Akademie der Wissenschaften schrieben sie: "Wenn das Vorhandensein dieses neuen Metalles sich bestätigen sollte, schlagen wir vor, es nach der Herkunft des einen von uns *Polonium* zu nennen." Gegen Ende des Jahres gelang es ihnen, ein weiteres radioaktives Element zu isolieren, diesmal in der Bariumfraktion. Sie beschrieben es als ein Element mit ungeheurer Strahlungskraft und gaben ihm den Namen *Radium*. Hier galt es, wie beim Polonium versucht, wägbare Mengen zu gewinnen, um damit zu experimentieren und vor allem das reine Metall darstellen zu können. Beim Radium gelang die Anreicherung zur wägbaren Menge, wenngleich

unter großen Mühen. Beim Polonium blieb man ohne sichtbaren Erfolg, und so trat dieses Element mehr und mehr in den Hintergrund des Interesses. Heute wissen wir, daß seine Präparation in wägbarer Menge wegen der kurzen Halbwertzeit (HWZ) des Poloniums von nur 138 Tagen nicht möglich war. Es besteht nämlich ein direkter Zusammenhang zwischen der Halbwertzeit und der spezifischen Aktivität einer radioaktiven Spezies. Bei gleicher Aktivität (z. B. gemessen in Zerfällen pro Sekunde) entspricht der langlebigen Kernart eine größere Masse als der kurzlebigen. Dieser Zusammenhang sei am Beispiel von vier Radionukliden sehr unterschiedlicher Halbwertzeit gezeigt:

^{226}Ra (1600 a)	1 Ci ≅ 1 g	1 Ci = $37 \cdot 10^9$ Bq
^{131}I (8 d)	1 Ci ≅ 8µg	1 Bq = 1 Zerfall pro Sekunde
^{14}C (5700 a)	1 Ci ≅ 224 mg	
^{238}U ($4{,}5 \cdot 10^9$ a)	1 Ci ≅ 3 t	

Bei der früher verwendeten Einheit der Radioaktivität Curie (Ci) ging man von der Zahl der Zerfälle in 1 g Radium aus. Diese war festgelegt auf $3{,}70.. \cdot 10^{10}$ Zerfälle pro Sekunde. Seit den siebziger Jahren setzt sich mehr und mehr die SI-Einheit Becquerel (Bq) durch, sie ist definiert als 1 Zerfall pro Sekunde.

Um wägbare Mengen Radiums zu gewinnen, reichten die vorhandenen Uranerzproben bei weitem nicht aus. Für den Kauf der notwendigen Menge Uranerz fehlte aber das Geld. Durch Verkettung glücklicher Umstände wurde ihnen das für weitere Arbeiten erforderliche Ausgangsmaterial von der österreichischen Regierung geschenkt. Es handelte sich dabei um Schlacken, die bei der Urangewinnung als Abfallprodukt anfielen. Uransalze wurden seinerzeit in der Glasindustrie zum Gelbfärben von Gläsern verwendet. Als Ausgangsprodukt diente Uranpechblende aus Joachimsthal in Böhmen.

Inzwischen war es den Curies gelungen, für weitere Präparationen einen Arbeitsraum in einem Schuppen auf dem bereits erwähnten Schulgelände zu erhalten. Aus heutiger Sicht der Präparationstechnik und vor allem des Strahlenschutzes waren die Bedingungen, unter denen die in Rede stehenden radiochemischen Pioniertaten vollbracht wurden, geradezu abenteuerlich. Wilhelm Ostwald, der das Labor einmal in Abwesenheit der Curies besuchte, nannte es später in seiner Autobiografie "ein Mittelding zwischen Pferdestall und Kartoffelkeller". In Jahren mühevoller Arbeit war es ihnen gelungen, einhundert Milligramm reines Radiumchlorid zu isolieren. Sie bestimmten das Atomgewicht zunächst zu 225, stellten das

reine Metall durch Elektrolyse des geschmolzenen Salzes her und bestimmten die Strahlungsstärke im Vergleich zum Uran mit etwa dem Faktor zwei Millionen. Aber damit nicht genug, führten sie auch calorische Messungen durch. Becquerel hatte bereits festgestellt, daß das Uran ohne jegliche Energiezufuhr, z. B. durch Licht oder Wärme, seine Strahlung über Jahre unvermindert emittiert, und Ernest Rutherford hatte Schätzungen über den mit der Strahlung verbundenen Energieaustritt angestellt. Eine Energiequelle dieser Art war bis dahin unbekannt. Die Curies haben durch calorische Messungen ermittelt, daß 1 Gramm Radium in der Stunde ca. 1000 cal in Form von Wärme abgibt. Das Ergebnis, das ja eine gewaltige Energiequelle offenbarte, rief einerseits kontroverse Diskussionen unter den Wissenschaftlern hervor, andererseits wurden aber Radium und Radioaktivität auch zum Gegenstand wilder Spekulationen. So in der St. Louis Post-Dispatch vom 4. Oktober 1903, in der von einer "unglaublichen neuen Kraft die Rede ist, über ihre militärische Nutzung und darüber, sie als Instrument zur Zerstörung der Welt zu benutzen".

Unter den zahlreichen wissenschaftlichen Publikationen, die in den Jahren nach Entdeckung des Radiums von den Curies allein oder in Koautorschaft erschienen, waren besonders bemerkenswert jene über die physiologische Wirkung der Radiumstrahlung, über radioaktive Gase in Thermalquellen sowie über die Anwendung des radioaktiven Zerfalles zur Bestimmung geologischer Zeiträume.

1903 kam Marie Curie endlich dazu, ihre vor Jahren begonnene Doktorarbeit unter dem Titel "Forschung über radioaktive Substanzen" fertigzustellen und an der Sorbonne das Doktorexamen abzulegen. Noch im gleichen Jahr wurden Marie und Pierre Curie zusammen mit Henri Becquerel für die Entdeckung der Radioaktivität mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Mit dieser großen Ehrung wurde ein Ruhmesblatt auch in der Lebensgeschichte der Laureaten aufgeschlagen. Fachwelt und Presse wurden aufmerksam. Eine Flut der Briefe von Fachkollegen, aber auch von verhinderten Entdeckern, Spiritisten und Autogrammsammlern ergoß sich über sie. Die hohe Auszeichnung hatte aber auch ihre guten Seiten. Die mit dem Preis verbundenen Geldmittel ermöglichten es ihnen, die Arbeitsbedingungen zu verbessern. Sie konnten endlich einen Laborgehilfen für Routinearbeit einstellen, und sie kauften einige Laborgeräte und Material für die nun noch intensivere Forschungsarbeit. Pierre Curie gab seine Lehrtätigkeit an der Fachschule für Physik auf und widmete sich fortan ganz der gemeinsamen Forschungsarbeit. 1905 wurde Pierre Curie zum Mitglied der Französischen Akademie der Wissenschaften gewählt. Im

gleichen Jahr bekam er einen Lehrstuhl für Physik an der Pariser Universität, zunächst aber ohne Labor. Marie Curie, die bisher ihre Radiumforschung gewissermaßen auf eigene Rechnung durchführte, bekam nun eine planmäßige Assistentenstelle.

Im April 1906 kam Pierre Curie auf einer Pariser Straßenkreuzung bei einem Verkehrsunfall ums Leben. Er hinterließ Marie mit zwei Töchtern. Marie Curie wurde übrigens trotz ihrer großen wissenschaftlichen Verdienste niemals Akademiemitglied. Es fehlten einige Stimmen zu ihrer Wahl. Man hatte Vorbehalte gegen Frauen als Mitglieder in der Akademie. Im Mai 1906 wurde sie an der Sorbonne mit dem Lehramt betraut, das so lange ihr Mann innehatte. Zwei Jahre später wurde sie Professor mit Lehrstuhl. In wissenschaftlicher Hinsicht konzentrierte sie ihre Bemühungen auf den Ausbau der Meßmethoden. 1911 wurde Madame Curie für ihre überragenden Leistungen auf dem Gebiet des Radiums und seiner Verbindungen mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet. Diesmal bekam sie den Preis ungeteilt.

Ihren Bemühungen ist es zu verdanken, daß 1913 auch an der Sorbonne ein Radiumlabor errichtet wird, in dessen physikalischer Abteilung unter ihrer Leitung die weitere Erforschung radioaktiver Stoffe erfolgte, während in der biologisch-medizinischen Abteilung die therapeutische Anwendung radioaktiver Elemente im Vordergrund des Interesses stand.

Im ersten Weltkrieg hat sie ihre ganze Kraft in den Dienst ihres Adoptiv-Vaterlandes gestellt. Sie hat sich dabei besonders um die Anwendung der Röntgendiagnostik bemüht, die ja damals noch nicht sehr weit entwickelt war. In Würdigung ihrer Verdienste um die Förderung der Röntgenologie wurde sie 1922 zum Mitglied der Pariser Medizinischen Akademie gewählt. Am 4. Juli 1934 starb Madame Curie im Alter von 67 Jahren in einem Sanatorium in den französischen Alpen an den Folgen einer langjährigen Strahlenexposition.

Ich komme nun auf einen anderen genialen Physiker zu sprechen, der sich bei der Erforschung der Radioaktivität und der des Aufbaus der Atome große Verdienste erwarb, auf Ernest Rutherford. Er wurde 1871 in Neuseeland geboren, führte seine bahnbrechenden Experimente, von denen hier die Rede sein soll, an der Universität Montreal durch. Er erhielt 1908 den Chemie-Nobelpreis für die Erforschung des Zerfalles der Elemente und der Chemie radioaktiver Substanzen. 1919 wurde er Leiter des berühmten Cavendish Laboratoriums in Cambridge. 1899 begann Rutherford, die Eigenschaften der Strahlung selbst genauer zu untersu-

chen. Bereits J. J. Thomson erkannte die Ursache für die schon von Becquerel beobachtete Entladung eines Elektroskopes durch Strahlung in der Ionisierung von Luftmolekülen. Den Ionisationsstrom, der in einem eingeschlossenen Luftvolumen durch eine angelegte elektrische Spannung erzeugt wird, konnte man mit einem Elektrometer messen und hatte somit eine genaue und zuverlässige Methode zur Bestimmung von Strahlungsintensität und damit auch von Radioaktivität in der Hand. Dieses Prinzip lag auch den von Rutherford verwendeten Detektoren zu Grunde. Messung der Absorption der von radioaktiven Präparaten emittierten Strahlung durch dünne Metallfolien zeigten, daß es offenbar zwei im Absorptionsverhalten unterschiedliche Komponenten gab. Eine Komponente wurde bereits durch wenige hundertstel Millimeter Aluminium absorbiert. Diese nannte man Alphastrahlung. Die zweite Komponente zu absorbieren bedurfte es einer mehr als hundert Mal dickeren Aluminiumschicht. Diese nannte man Betastrahlung. Eine genauere Prüfung ergab, daß die Absorption der Betastrahlung einer e-Funktion folgte und somit ein für das Absorbermaterial charakteristischer Koeffizient bestimmt werden konnte. Für Al etwa 15 cm^{-1}. Versuche, ein ähnliches Absorptionsverhalten auch bei Alphastrahlern nachzuweisen, scheiterten. Schon Frau Curie, die ähnliche Versuche unternommen hatte, fand, daß bei Alphastrahlern der Absorptionskoefizient nicht konstant war, sondern sich bei fortschreitender Absorption erhöhte. Ein Befund, der schwer zu erklären war. Bragg konnte 1904 dann experimentell nachweisen, daß Alphastrahlen (man hatte inzwischen erkannt, daß es sich um Teilchen handelt), die von radioaktiven Substanzen emittiert werden, definierte Reichweiten haben. Er fand, daß viele radioaktive Substanzen Alphateilchen mit unterschiedlichen, charakteristischen Reichweiten emittieren.

Die Erkenntnis, daß Alpha- und Betastrahlen Ströme hochbeschleunigter geladener Teilchen sind, wurde in erster Linie durch Ablenkungsversuche in elektrischen und magnetischen Feldern gewonnen. Betateilchen wurden so als mit nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegte Elektronen erkannt. Alphastrahlen widersetzten sich zunächst scheinbar den Ablenkungsversuchen. Bei genauerer Prüfung zeigte sich dann aber, daß Alphateilchen positiv geladen sind, wobei das Verhältnis von Ladung zu Masse halb so groß wie beim Wasserstoffion ist. Das legte die Vermutung nahe, daß Alphateilchen doppelt positiv geladene Heliumionen sind (Ladung +2; Masse 4). Die Anwesenheit von Helium in Uran- und Thoriumerzen war schon früher beschrieben worden und in diesem Zusammenhang natürlich interessant. Der experimentelle Nachweis konnte dann dadurch erbracht

werden, daß man Alphateilchen durch die sehr dünne Wand in das Innere eines evakuierten Glasröhrchens schoß. Nach wenigen Tagen sammelte sich dort eine spektroskopisch nachweisbare Menge Heliums an. Die Arbeiten zur Identifizierung der beiden genannten Strahlenarten waren noch im Gange, als man eine dritte, sehr durchdringende Strahlung erkannte, die Gammastrahlung. Ihre Charakterisierung als der Röntgenstrahlung analoge elektromagnetische Strahlung erfolgte sehr bald.

Bei der Aktivitätsmessung an Thoriumpräparaten hatte Rutherford schon frühzeitig festgestellt, daß gelegentlich Abweichungen bei der Elektrometeranzeige auftraten, die zunächst nicht zu erklären waren. 1899 stellte man dann fest, daß von den Thoriumpräparaten offenbar eine radioaktive Substanz abgegeben wird, die in das Kammervolumen diffundiert und dort Meßfehler verursacht. Eine ganz ähnliche Erscheinung konnte auch bei Radiumsalzen beobachtet werden. Sehr eingehende Versuche, die Rutherford und F. Soddy anstellten, ergaben, daß die "Emanation" ein inertes Gas mit hohem Atomgewicht war, welches bei -150 °C kondensierte. Bald wurde gefunden, daß auch Aktiniumpräparate emanieren. Emanationen sind, wie sich herausstellte, nicht sehr langlebig. Die Aktivität der Radiumemanation wurde im Laufe von Tagen merklich geringer, während die Thoriumemanation schon in wenigen Wochen verschwand. Das Auftreten der Emanation bei Radium, Thorium und Aktinium war für die Forscher geradzu ein Glücksfall. Die Natur ließ sich gewissermaßen in die Karten schauen, indem sie selbst eine radiochemische Trennung demonstriert, nämlich die zwischen einer festen radioaktiven Substanz und einem radioaktiven Edelgas. Aus diesem Sachverhalt zogen Rutherford und Soddy die sehr weitreichenden Schlüsse, daß erstens radioaktive Stoffe nicht für immer unvermindert Strahlung aussenden, sondern daß nach einer für die Substanz charakteristischen Zeitskala die Intensität der Strahlung abnimmt und zweitens, daß mit dem radioaktiven Zerfall offenbar eine Elementumwandlung einhergeht [3].

1900 und in den folgenden Jahren begannen vor allem W. Crookes sowie Rutherford und Soddy, radiochemische Trennmethoden zu entwickeln und anzuwenden. Dabei stießen sie auf weitere Spezies der Uran- und Thoriumfolgeprodukte. Zunächst auf die sog. X-Körper, nämlich Uran X (^{234}Th) und Thorium X (^{224}Ra). Bei beiden nahm die Radioaktivität im Laufe von Tagen erheblich ab. In gleichem Maße nahm aber die Aktivität der X-Körper in der jeweiligen Muttersubstanz zu.

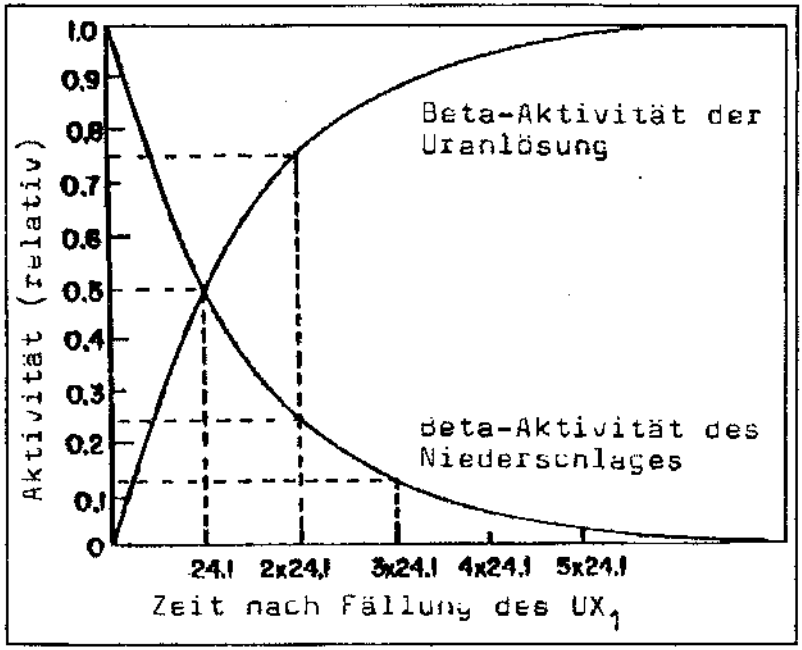

Abb. 1 Abklingkurve am Beispiel des UX_1 (HWZ 24,1 d = Einheit auf der Zeitachse).Spiegelbildlich dazu die ansteigende Kurve des in der Uranlösung nachwachsenden UX_1

Meßtechnisch war eine Unterscheidung dadurch möglich, daß Uran und auch Thorium, wenn sie sorgfältig von X-Körpern gereinigt sind, nur Alphastrahlung aussenden.

Im Frühjahr 1903 publizierten Rutherford und Soddy ihr inzwischen sehr klares Konzept über die Natur der Radioaktivität, wonach sich ein radioaktives Element spontan in ein anderes umwandelt. Es handelt sich dabei also um eine inneratomare (nucleare) Umwandlung, die von Strahlenemission begleitet ist [4].

Man bedenke, daß das Konzept des Atomkernes erst acht Jahre später entstand, wiederum fußend auf den genialen Experimenten Ernest Rutherfords.

Den radioaktiven Zerfallsprozeß als ein Phänomen der Zerfallswahrscheinlichkeit einzelner Atome zu beschreiben, ist ein Verdienst E.

Schweidlers. Er formulierte 1905 als erster das Gesetz des radioaktiven Zerfalls in seiner einfachsten Form. Seine Überlegungen dazu waren folgende:

Die Wahrscheinlichkeit (p), daß sich ein bestimmtes Atom eines radioaktiven Elementes im Zeitintervall Δt umwandelt (zerfällt), ist unabhängig von seiner Vorgeschichte und von den äußeren Bedingungen wie Temperatur, Druck etc.; sie hängt lediglich von der Länge des betrachteten Zeitintervalles ab und ist bei genügend kleinem Δt diesem proportional:

$$p = \lambda \cdot \Delta t,$$

wobei man λ die Zerfallskonstante nennt. Sie ist für das betreffende Radioelement charakteristisch und der häufiger verwendeten Halbwertszeit (HWZ) umgekehrt proportional.

Die Wahrscheinlichkeit,
im Intervall Δt nicht zu zerfallen ist $1 - p = 1 - \lambda \cdot \Delta t$

Die Wahrscheinlichkeit,
n Intervalle zu überleben ist $(1 - \lambda\Delta t)^n$

Setzen wir $n \cdot \Delta t = t$ oder $\Delta t = t/n$, so folgt $(1 - \lambda t/n)^n$

Erinnern wir uns, daß allgemein gilt

$\lim_{n \to \infty} (1 + x/n)^n = e^x$, sofolgt für unsere Betrachtung $\lim_{n \to \infty}(1 - \lambda t/n)^n = e^{-\lambda t}$

Für eine große Zahl anfangs vorhandener radioaktiver Atome gilt dann $N/N_0 = e^{-\lambda t}$

N ist die Zahl der zur Zeit t noch nicht zerfallenen radioaktiven Atome. Dieser Ausdruck gestattet die Berechnung der Aktivität einer zerfallenden einheitlichen radioaktiven Spezies.

Fünf Jahre später hat H. Bateman dann die Lösung eines Systems von Differentialgleichungen publiziert, das auch die Berechnung aufeinander folgender und verzweigter radioaktiver Prozesse gestattet, wie wir sie z. B. in den Zerfallsreihen der natürlich radioaktiven Kernarten U-238, Th-232 und U-235 finden.

Zu der Zeit, als in Paris und Montreal große Entdeckungen auf dem Gebiet der Radioaktivität gemacht wurden, arbeitete Otto Hahn im Ramsayschen Institut in England und hatte "rein zufällig", wie er später selbst be-

richtete, das Radiothorium entdeckt. "Dieses Radiothorium mußte ich finden", sagt Hahn weiter, "denn es befand sich in einem Barium-Radium-Gemisch, das nicht aus reinem Uranmineral, sondern aus einem thorium- und uranhaltigen Mineral stammte" [5].

Später war der Zusammenhang leicht erklärbar: Beim Ausfällen des Gemisches der Barium- und Radium-Ionen fiel das Tochterprodukt des als Verunreinigung vorhandenen Thoriums, das Mesothor I (Ra^{228} ; HWZ = 6,7 a) selbstverständlich mit aus. Folgeprodukt des eigentlichen Radiums (Ra^{226}; HWZ = 1622 a) ist die Emanation, gefolgt von Isotopen der Elemente Po, Bi und Pb. Das Mesothorium 1 zerfällt über ein kurzlebiges Zwischenprodukt MsTh 2 zu Radiothorium (Th^{228}; HWZ = 1,9 a). Thorium ist aber von den Elementen Po, Bi und Pb leicht trennbar [6].

Zurück zu Otto Hahn. Sir William Ramsay schlug ihm vor, sich von der organischen Chemie, seiner ursprünglichen Arbeitsrichtung, ganz abzuwenden und bei der Radioaktivität zu bleiben. Hahn folgte diesem Rat und ging im Herbst 1905 zu Rutherford nach Montreal, um sich auf dem Gebiet der Radioaktivität weiter ausbilden zu lassen.

Nun sind sowohl RdTh als auch RdAc Alphastrahler. In Rutherfords Laboratorium befaßte man sich bekanntlich unter anderem mit der magnetischen und elektrischen Ablenkung sowie mit der Absorption von Alphastrahlen, und so lag es nahe, die Eigenschaften der Alphastrahlung dieser beiden Radionuklide eingehend zu untersuchen. Durch Rutherfords Arbeiten sowie durch die von Bragg und Klemann über die Reichweite von Alphastrahlen hatte man erkannt, daß einheitliche radioaktive Elemente Alphastrahlen einer bestimmten Reichweite emittieren. Damit stand ein Mittel zur Analyse von Radioelementen, soweit sie Alphateilchen aussenden, zur Verfügung.

Im Sommer 1906 kehrte Hahn aus Kanada nach Deutschland zurück und bekam in Berlin, im Chemischen Institut in der Hessischen Straße von Emil Fischer einen Arbeitsplatz zur Verfügung gestellt, d. h. er richtete sich diesen in einer ausgeräumten Holzwerkstatt im Keller des Gebäudes ein. Zunächst setzte er allein seine bei Ramsay angefangenen Arbeiten über die natürlich radioaktiven Elemente, das Radiothor und dessen vermeintliche Muttersubstanz, fort. Die Halbwertzeit des RdTh war von Hahn mit etwa 2 Jahren angegeben worden, Boltwood hatte aufgrund eigener Versuche Zweifel an diesem Wert. Nach seinen Beobachtungen sollte RdTh eine längere Halbwertzeit haben. Den von ihm untersuchten Thoriumsalzen fehlte nach Hahns Meinung offenbar ein Teil des RdTh.

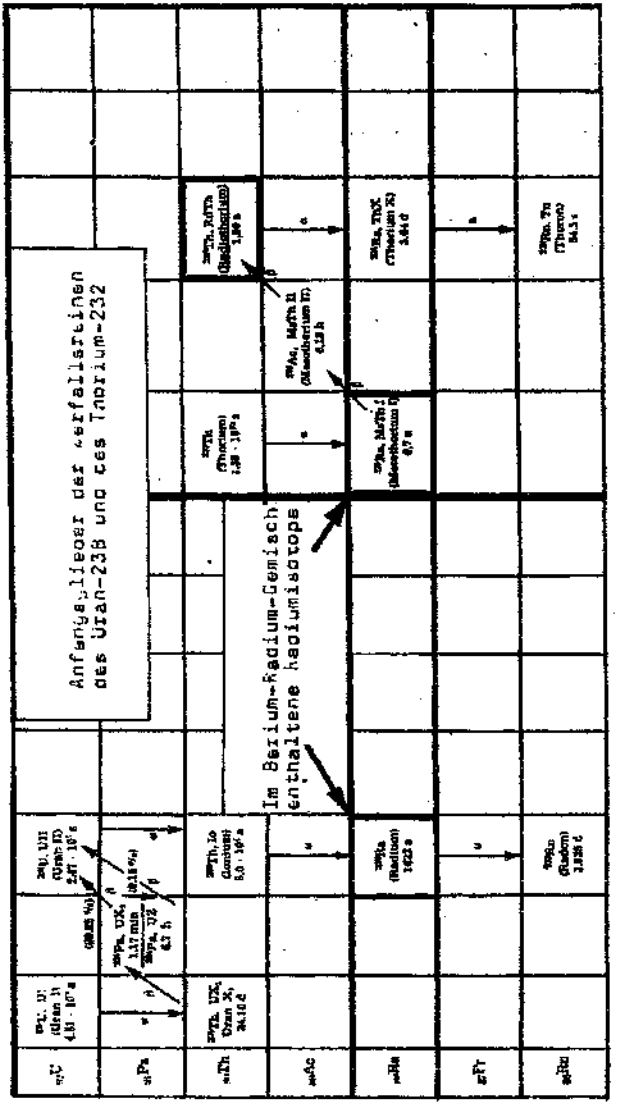

Abb. 2 Hahns Gedankengang, erklärt durch Gegenüberstellung der Anfangsglieder der Zerfallsreihen des Uran-238 und der des Thorium-232. Ra-226 (linke Seite) zerfällt über Radon schließlich in Po, Bi und Pb. Ra-228 (rechte Seite) geht über ein kurzlebiges Zwischenprodukt in das von Hahn entdeckte Radiothor über.

Wenn letzteres nämlich unmittelbares Tochterprodukt des Thoriums gewesen wäre, hätte in wenigen Monaten RdTh meßbar nachwachsen müssen.

Einen entsprechenden Anstieg der Alpha-Aktivität konnte Boltwood jedoch nicht nachweisen. Hahn äußerte in einem persönlichen Gespräch, das er mit ihm geführt hatte, daß an die mögliche Existenz eines Zwischenkörpers zu denken sei. Hierzu äußert sich Hahn später wörtlich: "Die Radiothorpräparate nehmen also ab, das Boltwoodsche geschwächte Thorium nahm aber nicht oder nicht in demselben Maße zu, wie man hätte erwarten müssen, wenn das Radiothorium der direkte Abkömmling des Thoriums war. Hier läßt sich ein Ausweg aus der Schwierigkeit finden, wenn man die Existenz eines Zwischenproduktes zwischen Thorium und Radiothorium mit einer längeren Lebensdauer als der des Radiothoriums annimmt. Dann würde es sich erklären lassen, warum das erwähnte schwache Thoriumpräparat nicht in dem Maße zunahm, als die von mir untersuchten Radiothorpräparate abnahmen. Man brauchte ja nur anzunehmen, daß dem Thoriumpräparat nicht nur das Radiothor, sondern auch das Zwischenprodukt fehle, mit dessen Neubildung dann erst die Neubildung des Radiothors eintreten könnte."

Durch Prüfung verschieden alter Th-Präparate, die alle unter gleichen Bedingungen hergestellt worden waren, konnte dann schließlich im Hahnschen Laboratorium der Beweis der Existenz des vermuteten Zwischenkörpers, des Mesothoriums, erbracht werden.

Man muß sich hierbei vor Augen führen, mit welch einfachen Mitteln der Radiochemiker damals zu arbeiten gezwungen war. Hahn hat das selbst später einmal gesagt: "Verglichen mit späteren Zeiten, waren die apparativen Hilfsmittel sehr einfach. Unsere Beta- und Gammastrahlen-Elektroskope stellten wir uns aus einer größeren Konserven- oder sonstigen Blechdose her, auf die eine kleinere Tabaks- oder Zigarettendose aufgesetzt war. Die Isolation des Blättchenträgers geschah mit Schwefel, den Bernstein hatten wir damals noch nicht."

Im Laufe weiterer Untersuchungen hat sich dann gezeigt, daß das Mesothor selbst keine einheitliche Substanz ist, sondern daß es sich aus zwei genetisch miteinander verbunden Bestandteilen zusammensetzt, von denen der längerlebige, das eigentliche Mesothor (6,7a), ohne erkennbare Strahlung in ein neues Produkt übergeht, das Betastrahlung aussendet und eine HWZ von 6,2 h besitzt. Mesothor 1 und 2 sind Isotope des Radiums bzw. des Actiniums. Mesothor 1 hat, wie wir heute wissen, eine maximale

Betaenergie von nur 0,012 MeV und entzog sich deshalb damals der Messung.

Im Herbst 1907, also ein Jahr nach Otto Hahn, hatte Lise Meitner, aus Wien kommend, ebenfalls in der Hessischen Straße einen Arbeitsplatz erhalten. Meitner hatte bis dahin am physikalischen Institut der Wiener Universität bei Stephan Meyer ein Jahr lang über Probleme der Radioaktivität gearbeitet. Nun war sie mit der Absicht nach Berlin gekommen, sich in theoretischer Physik bei Max Planck weiter ausbilden zu lassen. Aus den zunächst vorgesehen 2 Jahren ist dann eine mehr als 30jährige erfolgreiche Schaffensperiode an der Seite Otto Hahns geworden.

An einer Reihe von Betastrahlern begann nun in Zusammenarbeit mit Otto von Baeyer ein systematisches Studium der Strahlenabsorption mit Aluminiumabsorbern. Fand man eine einfache exponentielle Absorptionskurve, wurde auf einen einheitlichen, andernfalls auf einen komplexen Betastrahler geschlossen. Versuche, durch Ablenkung der Betastrahlen im Magnetfeld für ein reines Radioelement einheitliche Linien zu erhalten, analog den Rutherfordschen Ergebnissen an Alphastrahlern, bewiesen jedoch die Unrichtigkeit der bis daher angewendeten Arbeitshypothese. Aber gerade dieses negative Ergebnis war Anlaß für eine Reihe bedeutender Arbeiten Lise Meitners, die später wesentlich zur Entwicklung einer Theorie des Betazerfalls und zu der der Gamma-Emission beigetragen haben.

Das Interesse beider Forscher galt nun keineswegs der Th-Reihe allein, sondern auch den Folgeprodukten des Urans sowie der Ac-Reihe. In diesem Zusammenahg sollte auch erwähnt werden, daß wir Hahn und Meitner die Aufklärung eines Phänomens verdanken, das wir heute als Rückstoßeffekt kennen.

Fast 10 Jahre später, 1918, nachdem eine Reihe grundlegend neuer Erkenntnisse gewonnen, vor allem aber das Rutherford-Bohrsche Atommodell aufgestellt worden war, publizierten Hahn und Meitner eine Mitteilung über die Entdeckung der Muttersubstanz des seit 1899 bekannten Actiniums. Fast gleichzeitig berichteten auch Soddy und Cranston von der Entdeckung dieser Substanz. Die Frage nach dem Ursprung des Ac hatte insofern an Interesse gewonnen, als seine relativ kurze HWZ - man schätzte damals etwa 30 a (heutiger Wert 22 a) - erkennen ließ, daß Actinium kein Primärelement sein könne. Also galt die Suche seiner Muttersubstanz. Man hatte Grund zu der Annahme, daß es sich um ein fünfwertiges Element handeln müsse. Durch die Aufstellung der Verschiebungs-

regeln durch Fajans, Russel und Soddy 1913 war nämlich die Zahl der in Frage kommenden Elemente von vornherein sehr eingeschränkt. Diffusionsversuche von G. von Hevesy an Kationen in wäßriger Lösung, die sich im Überschuß von einwertigen Anionen befinden, sowie chemische Versuche von A. Fleck und auch von Hahn und Meitner selbst zeigten, daß Ac wahrscheinlich ein dreiwertiges Element sei. Somit konnte die gesuchte Substanz entweder ein fünfwertiger Alphastrahler oder ein zweiwertiger Betastrahler sein.

Soddy u. a. vermuteten, daß das von Russel hypothetisch eingeführte fünfwertige UX_2 die gesuchte Muttersubstanz sei. Fajans und Göhring fanden dann aber tatsächlich das UX_2 und wiesen nach, daß es sich hierbei um einen Betastrahler mit einer HWZ < 2 Minuten handelte. Dieser konnte also keinesfalls die gesuchte Substanz sein. Als zweiwertiger Betastrahler kam andererseits aber nur das Ra in Frage. Soddy und Paneth versuchten, in alten Ra-Präparaten Ac nachzuweisen, jedoch mit negativem Erfolg.

Hahn und Meitner ließen sich schließlich von dem Gedanken leiten, daß die gesuchte fünfwertige Substanz, wenn sie ein langlebiges Isotop des UX_2 war, den chemischen Reaktionen des Ta folgen müsse. Versuche mit 25 Jahre alten Uranylnitratpräparaten und mit einigen Mineralien lieferten jedoch keine eindeutigen Ergebnisse. In dem HNO_3-löslichen Rückstand der Pechblende, der neben Kieselsäure praktisch die gesamte Menge der Ta-ähnlichen Substanz enthielt, sollte eigentlich die gesuchte Substanz in angereichter Form vorliegen.

Ein solcher Rückstand wurde mit Ta-Träger versetzt, in HF gelöst, filtriert, eingedampft und der Rückstand mit H_2SO_4 abgeraucht. Ein Auskochen dieses Rückstandes mit HNO_3 ließ nur die Ta-ähnlichen Substanzen ungelöst zurück. Das so gewonnene Präparat zeigte auch tatsächlich eine energiearme Alphastrahlung und eine durchdringendere Strahlung, deren Intensität mit der Zeit zunahm, entsprechend dem Nachwachsen von Ac. Um den eindeutigen Beweis für das entdeckte Element zu erbringen, wurden qualitative Messungen der Emanation und des aktiven Niederschlages des Ac angeschlossen. Quantitative Messungen konnten sie erst an größeren Mengen eines reinen Präparates durchführen. Die neuentdeckte Substanz erhielt den Namen Protactinium.

Mit dem Pa war, so nahm man an, das letzte Element von langer Lebensdauer, das noch in der Ac-Zerfallsreihe fehlte, gefunden worden. Auch für die beiden anderen Zerfallsreihen durfte man annehmen, daß es ausge-

schlossen war, noch neue Substanzen zu finden, die sich in direkter Folge in die bekannten Reihen einfügen ließen. Allerdings war man sich durchaus nicht über die Stellung des Ac zur Uranreihe im klaren. Bereits fünf Jahre früher war dieses Problem Gegenstand einer Publikation von Hahn und Meitner gewesen. Noch nahm man an, daß es einem Zweig der Urankette angehörte (1913).

$$\begin{array}{l} U\,I^{\alpha} \rightarrow UX_1{}^{\beta}\,(Th) \rightarrow UX_2{}^{\beta}\,(Pa) \rightarrow U\,II^{\alpha} \rightarrow Jo^{\alpha} \rightarrow Ra^{\alpha} \rightarrow Em^{\alpha} \rightarrow \text{etc.} \\ \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \searrow UY^{\beta}\,(Th) \rightarrow Pa^{\alpha} \rightarrow Ac^{\alpha} \rightarrow RdAc^{\alpha} \rightarrow \text{etc.} \end{array}$$

Es gab aber auch Zweifel an dieser Vorstellung, die bekanntlich erst Jahre später (1935) von Dempster durch den massenspektrometrischen Nachweis des ^{235}U ausgeräumt wurden.

Angeregt durch die schnelle Erweiterung der Kenntnissse über die Isotopie (Fajans und Soddy 1913) bei vielen chemischen Elementen, wurden nun von Hahn und Meitner die am Anfang der Uranzerfallsreihe stehenden Umwandlungsprodukte genauer betrachtet. Waren doch bei der Bestimmung der Lebensdauer des Pa und auch bei Versuchen an Uran Y gelegentlich geringfügige Unstimmigkeiten bei elektroskopischen Messungen gefunden, damals aber für Verunreinigungen mit Spuren von ThB gehalten worden. Jetzt erschien diese Beobachtung natürlich im neuen Lichte. Unter Anwendung von Ta-Träger in flußsaurer Lösung war es bei schnellem Arbeiten möglich, mit dem Träger zusammen eine äußerst geringe Menge einer β-strahlenden Substanz abzuscheiden, deren HWZ nach Abzug der UX-Kurve zu 6 - 7 h bestimmt werden konnte.

Eine Infektion mit Mesothor 2 (HWZ 6,2 h) mußte allerdings zunächst in Betracht gezogen werden, zumal in den Laboratorien lange mit starken Mesothorpräparaten experimentiert worden war. Mesothor 2 ist ein Ac-Isotop und läßt sich deshalb quantitativ mit La-Träger als Fluorid ausfällen und bleibt im Gegensatz zu der neuen Substanz in Flußsäure unlöslich, während letztere stets in Lösung ging. Hahn gab diesem Körper den Namen Uran Z. Damit war eine bisher nicht beobachtete Verzweigung gefunden worden, bei der aus einer Muttersubstanz (UX_1) durch Betazerfall anscheinend zwei in ihren radioaktiven Eigenschaften verschiedene Kerne entstehen: Uran X_2 und Uran Z. Ersteres hat eine HZW von 1,8 Minuten, während Uran Z eine solche von 6,7 h zeigt. Heute wissen wir, daß aus dem Uran X_1 zunächst Uran X_2 entsteht und dieses sich entweder durch Betastrahlung direkt in das Uran 2 (^{234}U) umwandelt oder zunächst durch Emission von Gammaquanten in das Uran Z, also - wie wir heute sagen - vom angeregten in den Grundzustand übergeht. Letzteres wandelt sich

unter Beta-Emission dann auch in Uran 2 um. Wir kennen heute eine große Zahl solcher Isomerenpaare, d. h. Isotope gleicher Massenzahl; Kerne also, die sich nur durch ihren Energieinhalt unterscheiden.

Nachdem das Gebiet der natürlichen radioaktiven Zerfallsreihen nicht zuletzt auch - wie wir gesehen haben - durch Arbeiten von Hahn und Meitner als im wesentlichen aufgeklärt angesehen werden konnte, wurde Anfang der dreißiger Jahre eine Reihe bedeutender Entdeckungen gemacht, die der Radioaktivität und der Kernchemie zu einer geradezu stürmischen Entwicklung verhelfen sollten. Dem Ehepaar Joliot-Curie war es 1934 gelungen, durch Alpha-Bestrahlung von Bor, Magnesium und Aluminium erste künstlich radioaktive Kernarten, nämlich Isotope des Stickstoffs, des Siliziums und des Phosphors darzustellen. Diese Entdeckung erfolgte - wie auch anderswo in der Geschichte der Radioaktivität - zufällig. Bereits ein Jahr zuvor hatten sie gefunden, daß man Positronen und Neutronen erzeugen kann, wenn man leichte Elemente mit Alphateilchen beschießt.

Neutronen hatte J. Chadwick 1932 entdeckt, und im gleichen Jahre konnte Anderson Positronen in der kosmischen Strahlung mit Hilfe einer Nebelkammer nachweisen.

Nach Beendigung eines solchen Bestrahlungs-Experimentes mit α-Teilchen (es war der Silvesterabend 1933) stellte ihr aus Deutschland stammender Assistent W. W. Gentner fest, daß die Wilsonsche Nebelkammer, auch nach Entfernen der Alphaquelle, weiterhin die Flugbahnen emittierter Teilchen anzeigte. In eingehenden Versuchen konnten dann Radioisotope des Stickstoffs, des Phosphors und des Siliziums chemisch identifiziert und in bezug auf ihr radioaktives Verhalten bestimmt werden. Das Ergebnis wurde mit Datum vom 10. Februar 1934 in "Nature" veröffentlicht [7]. Enrico Fermi, der damals an der Königlichen Universität in Rom arbeitete, erprobte, nachdem er den "Nature"-Artikel gelesen hatte, einen nach seiner Meinung effektiveren Weg, um zu radioaktiven Kernarten zu gelangen. Er zapfte 630 mCi Radium-Emanation von einer sog. "Radium-Kuh", welche ihm in einer Universitätsklinik zur Verfügung stand, schloß die für damalige Verhältnisse enorme Radioaktivität zusammen mit Berylliumpulver in ein Glasröhrchen ein und steckte dies zur Abbremsung der schnellen Neutronen in eine Ummantelung aus Paraffin. Mit dieser thermischen Neutronenquelle bestrahlte er Proben aller ihm zugänglichen reinen Elemente. Am Ende waren es 60 an der Zahl. Drei Monate später

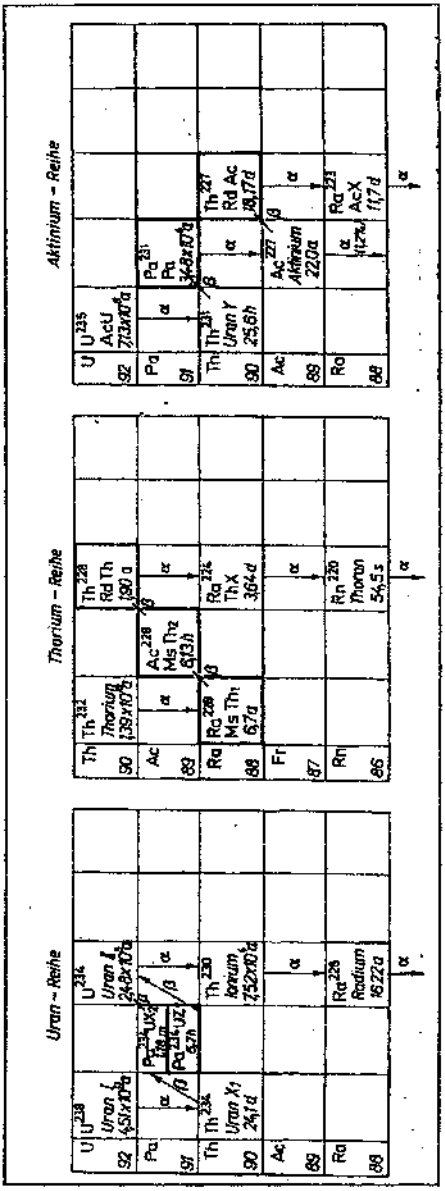

Abb. 3 Die drei natürlichen Zerfallsreihen (auszugsweise) mit den sechs von Hahn bzw. Hahn und Meitner entdeckten Radioelementen (stark umrandet)

berichtete er im "Letter to the Editor" von "Nature" über 14 durch Bestrahlung mit thermischen Neutronen erzeugte Radionuklide [8]. Darunter befand sich auch das Jod-128 (HWZ ca. 30 min), das sich bald als für die Medizin, wenigstens vorübergehend, interessantes Isotop erweisen sollte. Die eben zitierten Publikationen von Joliot-Curie und von Fermi in der "Nature" erreichten natürlich auch die Arbeitsgruppe um Ernest Lawrence in Berkeley, Californien, oder, um genau zu sein, die Autoren informierten ihren amerikanischen Kollegen telegrafisch über ihre Ergebnisse. Hatten doch Lawrence und Livingston 1930 in Berkeley ihre Erfindung verwirklicht und das erste Zyklotron errichtet. Im Nachhinein stellten sie fest, daß mit dem Zyklotron, also einem Gerät, mit dem positive Ladungsträger beschleunigt werden, im Laufe der durchgeführten Experimente zwangsläufig zahlreiche Radionuklide erzeugt wurden, ohne daß ihre Betreiber das nachgewiesen oder auch nur bemerkt hätten. Fortan richtete sich jetzt natürlich ein Teil ihrer Bemühungen im Berkeley-Laboratorium auch auf die gezielte Erzeugung radioaktiver Kerne. Kannte man im Februar 1934 drei künstlich radioaktive Kernarten und drei Monate später 14 weitere, so stieg nun deren Zahl bis Ende 1934 auf 40; 1936 waren es schon mehr als 100, und 1978 überstieg ihre Zahl bereits 2000. Inzwischen hatte man den Begriff Nuklid für Kernart eingeführt (Nuclides für Nuclear Species).

Lassen Sie mich jetzt noch einmal auf Otto Hahn und seine Mitarbeiter L. Meitner und F. Straßmann zu sprechen kommen. Aktivierungsversuche, die Fermi mit Neutronen - bevorzugt thermischen - durchführte, gaben im Hahnschon Labor zu der folgenden Überlegung Anlaß:

Man war jetzt in der Lage, durch Neutroneneinfang inaktive Kerne zu aktivieren, z. B. $^{23}Na\ (n,\gamma)\ ^{24}Na$. Aus solcher Reaktion gehen Kerne mit Neutronenüberschuß hervor, die fast immer einem Beta-minus-Zerfall unterliegen. Dabei entstehen dann Tochterkerne mit einer um 1 höheren Ordnungszahl als die Ausgangskerne. Folglich sollte es möglich sein, durch Neutronenbestrahlung von natürlichem Uran Kerne mit höherem Atomgewicht als 238 zu erzeugen, die auf Grund ihres Neutronenüberschusses unter Beta-minus-Emission in Kerne mit einer Ordnungszahl größer 92, also in "Transurane", übergehen. Mit diesem Ziel sind Mitte bis Ende der dreißiger Jahre u. a. auch im Hahnschen Institut in Berlin-Dahlem zahlreiche Versuche, zunächst scheinbar mit dem gewünschten Erfolg, unternommen worden. Von Hahn, Meitner und Straßmann finden wir in den "Chemischen Berichten" aus dem Jahre 1937 unter dem Titel "Über die Transurane und ihr chemisches Verhalten" eine Zusammenfassung ihrer Ergebnisse [9].

Die durch Neutronenbestrahlung erzeugten Aktivitäten sollten nach ihrer Meinung den Transuranen 93 - 97 zuzuschreiben sein. Der Versuch einer Reproduktion ließ dann jedoch Zweifel aufkommen. Nach den neuerlichen Befunden sollten drei Isomere des Radiums entstehen, die eigentlich nur durch zwei aufeinanderfolgende Alphazerfälle über Th entstanden sein können. Aus den Ra-Isotopen sollten durch Betazerfall Ac-Isotope entstehen,die auch als solche nachgewiesen werden konnten und deren Halbwertszeiten vorläufig zu 40 min, 4 h und 60 h bestimmt werden konnten. Seltsam war, daß, obwohl es sich um eine - so wörtlich - "Alphastrahlenabspaltung" handelte, der Prozeß verstärkbar war, d. h., daß er nicht nur mit schnellen, sondern auch - oder wie sich später zeigte - gerade mit thermischen Neutronen auslösbar ist. Ein solcher Vorgang ist energetisch nur schwer zu verstehen. Das war auch der erste Fall dieser Art, den man beobachtet hatte. Bei ähnlichen Versuchen an Th gelang eine solche Umwandlung nämlich nicht.

Bekanntlich sind ^{232}Th und ^{238}U als Kerne mit gerader Protonen- und gerader Neutronenzahl mit thermischen Neutronen nicht spaltbar, hingegen aber das ^{235}U.

Die Autoren faßten die bis daher vorliegenden Ergebnisse wie folgt zusammen:

1. ^{238}U bildet unter Neutronenbestrahlung drei Uranisotope, die in sieben der von ihnen nachgewiesenen Transurane übergehen (93 - 96).
2. Aus ^{238}U + Neutronen entstehen durch zwei sukzessive Alphazerfälle drei bisher nachgewiesene Ra-Isomere, die in drei Ac-Isomere übergehen.

Damit waren, wie man glaubte, 16 künstliche Atomarten mit den Ordnungszahlen 88 - 90 und 92 - 96 nachgewiesen.

$$\text{"Ra I" ?} \xrightarrow[< 1\ \text{min}]{\beta} \text{Ac I} \xrightarrow[< 30\ \text{min}]{\beta} \text{Th ?}$$

$$\text{"Ra II"} \xrightarrow[14 \pm 2\ \text{min}]{\beta} \text{Ac II} \xrightarrow[\sim 2{,}5\ \text{h}]{\beta} \text{Th ?}$$

$$\text{"Ra III"} \xrightarrow[86 \pm 6\ \text{min}]{\beta} \text{Ac III} \xrightarrow[\sim\ \text{mehrere Tage ?}]{\beta} \text{Th ?}$$

$$\text{"Ra IV"} \xrightarrow[250 - 300\ \text{h}]{\beta} \text{Ac IV} \xrightarrow[< 40\ \text{h}]{\beta} {}_{\lambda}\text{Th ?}$$

Zum Vergleich das entsprechende Schema der Reaktionsprodukte der Neutronenbestrahlung von Uran, wie es sich 1939 nach Entdeckung der Kernspaltung als richtig erwies.

(Die Bestimmung der Halbwertzeiten erfolgte zum Teil Jahre später mit verbesserter Meßtechnik).

$$^{143}\text{Ba} \xrightarrow[20\ \text{s}]{\beta} {}^{143}\text{La} \xrightarrow[14{,}3\ \text{min}]{\beta} {}^{143}\text{Ce (33 h)}$$

$$^{141}\text{Ba} \xrightarrow[18{,}3\ \text{min}]{\beta} {}^{141}\text{La} \xrightarrow[3{,}93\ \text{h}]{\beta} {}^{141}\text{Ce (32,5 d)}$$

$$^{139}\text{Ba} \xrightarrow[82{,}7\ \text{min}]{\beta} {}^{139}\text{La (stabil)}$$

$$^{140}\text{Ba} \xrightarrow[206\ \text{h}]{\beta} {}^{140}\text{La} \xrightarrow[40{,}2\ \text{h}]{\beta} {}^{140}\text{Ce (stabil)}$$

Zu dem Schluß, daß es sich bei der zweiten Gruppe von neuen Substanzen um Radiumisotope handeln müsse, war man gekommen, weil diese sich zusammen mit Ba-Träger abscheiden ließen und auch sonst seine Reaktionen zeigten. Alle anderen bekannten Elemente: die Transurane sowie Uran, Pa, Th bis Ac lassen sich nämlich ohne Ausnahme leicht vom Barium trennen, genauso wie die Elemente unterhalb des Radiums: Bi, Pb und Po. Die Abtrennung der neuentdeckten Erdalkalimetalle, also der vermeintlichen Radiumisotope, erfolgte deshalb auf Bariumchloridträger in starker HCl (nicht auf $BaSO_4$ wegen des Mitreißens). Mit Schwefelwasserstoff ließen sich aus dem gelösten Bariumträger keine radioaktiven Präzipitate abtrennen, weder im sauren noch im alkalischen Milieu. Somit

durfte als bewiesen angesehen werden, daß es sich bei den neu entstandenen Körpern um Erdalkalimetalle handelte.

Nun zeichnen sich die Arbeiten von Hahn und Mitarbeitern durch ein hohes Maß an Gründlichkeit und durch vorsichtige Schlußfolgerungen aus, und so heißt es an dieser Stelle in jener bedeutenden Arbeit von Hahn und Straßmann [10]: "Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle", die am 22. 12. 1938 bei der Redaktion der "Naturwissen-schaften" einging, wörtlich: "Nun müssen wir aber noch auf einige neuere Untersuchungen zu sprechen kommen, die wir der seltsamen Ergebnisse wegen nur zögernd veröffentlichen." Es hat sich nämlich bei dem Versuch, die Identität des Radiums durch fraktionierte Kristallisation und fraktionierte Fällung zu beweisen, herausgestellt, daß sich das neue "Ra" nicht - wie erwartet - an- bzw. abreicherte, sondern gleichmäßig über die Ba-Fraktionen verteilt blieb. Mit den Ra-Isotopen ThX und Mesothor 1 konnte in Kontrollversuchen der erwartete Trenneffekt jedoch erzielt werden. Aus diesen bemerkenswerten Befunden ziehen die Autoren den folgenden Schluß: "Als Chemiker müssen wir aus den kurz dargelegten Versuchen das oben gebrachte Schema eigentlich umbenennen und statt Ra, Ac, Th die Symbole Ba, La und Ce einsetzen. Als der Physik in gewisser Weise nahestehende Kernchemiker können wir uns zu diesem, allen bisherigen Erfahrungen der Kernphysik widersprechenden Sprung noch nicht entschließen. Es könnte doch noch vielleicht eine Reihe seltsamer Zufälle unsere Ergebnisse vorgetäuscht haben."

Damit war es - wenn auch mit vorsichtigem Vorbehalt - ausgesprochen: Urankerne spalten unter Einwirkung von Neutronen; mit anderen Worten, die Kernspaltung war experimentell nachgewiesen! In der Fachwelt fand diese sensationelle Entdeckung starke Resonanz. Für Kernchemiker wie für Kernphysiker rückte das Problem der Kernspaltung in den Mittelpunkt des Interesses. Weitere Spaltprodukte wurden sowohl im Hahnschen Institut als auch anderswo gefunden und identifiziert, Energiemessungen durchgeführt sowie die mit der Spaltung verbundene Emission der Neutronen untersucht. In weniger als sechs Monaten nach der Entdeckung von Hahn und Straßmann lag die Theorie der Kernspaltung in ihren Grundzügen in der noch heute gültigen Fassung vor. Lise Meitner und Frisch sowie Bohr, Wheeler, Frenkel u. a. verdanken wir die physikalische Interpretation des Spaltprozesses.

Fast genau vier Jahre nach Entdeckung der Kernspaltung ließ Fermi am 2. Dezember 1942 in Chicago den ersten Kernreaktor kritisch werden und beschritt damit den schwierigen Weg vom Laborversuch zur technischen Realisierung. Das Atomzeitalter, das mit unserem Jahrhundert begann, war nun in ein völlig neues Stadium getreten. Die Grundlage für die Erschließung einer bedeutenden Energiequelle war geschaffen worden.

Mit der Entdeckung der Kernspaltung vollzog sich auch auf dem Gebiet der Forschung im Umfeld der Radioaktivität ein entscheidender Wandel, qualitativ wie auch quantitativ. Wenn bis daher die Forscher vor allem durch die - wie es Einstein formulierte - "göttliche Neugier" beflügelt waren, den Fundus der Kenntnisse über atomaren Aufbau zu erweitern, den Zusammenhang der Erscheinungen zu erfassen und zu erklären, so trat jetzt - nach dem Ende des zweiten Weltkrieges - mehr und mehr die wissenschaftliche, die diagnostische, die therapeutische und schließlich die technische und wirtschaftliche Nutzung radioaktiver Stoffe in den Vordergrund. Bis Mitte der dreißiger Jahre war man hinsichtlich der Anwendung auf die natürlichen Radioelemente beschränkt. Daß diese dennoch von großem Nutzen sein konnte, hat der segensreiche Einsatz des Radiums in der Strahlentherapie gezeigt, der bereits von Pierre und Marie Curie initiiert worden war. Hierauf werde ich gleich noch kurz eingehen. Erst die Möglichkeit, künstliche Radionuklide in erforderlicher Menge (Aktivität) und zu erschwinglichen Preisen zu erzeugen, erweiterte die praktische Nutzung entscheidend. Diese Entwicklung begann, wie ich bereits erwähnte, anfangs der dreißiger Jahre in Berkeley, Californien, am Zyklotron und mit kleineren Neutronenquellen, wie sie Fermi benutzte. Das ganze war aber sehr kostspielig und die Verfahren nicht ergiebig genug.

Die Situation änderte sich grundlegend nach Inbetriebnahme der ersten Kernreaktoren. Nun war es möglich, die bei der Kernspaltung entstehenden sog. Spaltprodukte zu gewinnen und überdies den Kernreaktor als preiswerte Neutronenquelle zur Aktivierung stabiler Kernarten zu nutzen. Es kam hinzu, daß in dem Jahrzehnt, welches seit Erfindung der Zirkularbeschleuniger vergangen war, diese so weit entwickelt waren, daß mit ihnen anwendbare Radionuklide in erforderlicher Aktivität, wenngleich zu recht hohem Preis, erzeugt werden konnten. Zyklotronisotope ergänzen wegen ihrer Strahlungseigenschaften - sie sind meist Positronenstrahler - die Palette der im Reaktor gewonnenen Radionuklide in nützlicher Weise.

Bevor ich auf die Erzeugung und Anwendung künstlicher Radionuklide eingehe, sollte ich einiges zur medizinischen Anwendung des Radiums nachtragen.

Pierre Curie stellte bald nach der Entdeckung des Radiums in Selbstversuchen fest, daß durch dessen Strahlung auf der Haut schwerheilende Verbrennungen hervorgerufen werden. Ähnliche Erfahrungen hatte man ja schon mit der Röntgenstrahlung gemacht. Diese Befunde riefen bald Mediziner auf den Plan, deren Ziel es war, die Strahlung zur Zerstörung kanzerösen Gewebes zu nutzen. Die erste Anwendung dieser Art erfolgte 1901 im St. Louis Hospital in Paris, als Danlos und Bloch mit einigen Milligramm Radiumsalz, das sie von Madame Curie erhalten hatten, eine maligne Hauterkrankung behandelten. 1903 wendete H. Strebel in München und 1904 Robert Abbe im St. Luke's Hospital in New York Radium in der Form an, daß sie eine Hohlnadel in der Mitte des Tumors implantierten und danach eine Radiumkapsel in die Nadel einführten. Dies war die erste Anwendung der sog. "After loading technique", einer Technik, die heute weltweit in der Strahlentherapie angewendet wird, natürlich in Vervollkommnung hinsichtlich des Strahlenschutzes und räumlicher wie zeitlicher Verteilung der Strahlendosis. Nach dieser Phase der Entdeckungen folgte die des empirischen Ausbaues der sog. Brachytherapie. Das ist eine Methode, bei der die Strahlenquelle von Hand in die Nähe des zu bestrahlenden Organs oder Organteiles gebracht oder, wo möglich, sogar implantiert wird. Ein erstes, aber wohl das wichtigste Anwendungsgebiet war die Gynäkologie.

In Deutschland waren die Pioniere Bumm in Berlin, Döderlein in Tübingen (später München), Krönig in Freiburg und Gauss in Würzburg. Die drei Letztgenannten erkannten, daß der Physik vor allem wegen der notwendigen Messung der Strahlendosen eine besondere Rolle erwächst. Sie stellten erste Klinikphysiker ein und errichteten in ihren Krankenhäusern entsprechende Physiklaboratorien. Der frühere Präsident unserer Akademie der Wissenschaften, Walter Friedrich, ein Schüler Wilhelm Conrad Röntgens, war übrigens der erste Klinikphysiker beim Gynäkologen Krönig in Freiburg. Entsprechende Positionen nahmen Theodor Neef in Würzburg und Friedich Voltz in München ein. Sie trugen mit ihren Arbeiten Wesentliches zu den Grundlagen einer modernen Brachytherapie bei.

Natürlich hat es ähnliche Initiativen auch im Ausland gegeben. So entstanden Schulen der Radiumtherapie in Paris, Manchester, Stockholm und

Wien, die auch ihre speziellen Techniken der Applikation und der Dosimetrie entwickelten.

Wie zu erwarten, gab es Widerstände seitens einiger Chirurgen. Die Berliner Gesellschaft für Gynäkologie und Geburtshilfe lud beispielsweise 1912 Carl Josef Gauss, einen Schüler Krönigs, ein, um über seine Ergebnisse in der Radiumtherapie vorzutragen. Sein Bericht rief geradezu einen Sturm der Entrüstung und Ablehnung auf ganzer Linie hervor. Die vorgetragenen Ergebnisse wurden durchweg in Zweifel gezogen, und schließlich verließen die Berliner den Hörsaal, während Gauss und Meyer allein auf dem Schlachtfeld zurückblieben. Dies berichtete Jahre später Meyer in seinen Memoiren. Noch im gleichen Jahr demonstrierte Krönig auf dem internationalen Gynäkologenkongress in Berlin an Hand histologischer Befunde seine strahlentherapeutischen Erfolge.

1913 wählte die Deutsche Gesellschaft für Gynäkologie und Geburtshilfe zum Hauptthema ihres Kongresses in Halle "Die Radiotherapie des uterinen Carzinoms". Bumm, Döderlein und Krönig sprachen über ihre Heilungserfolge durch Anwendung der Radiumstrahlung. Krönig, selbst ein berühmter gynäkologischer Chirurg, faßte seine Meinung sogar dahingehend zusammen, daß er angesichts der enttäuschend geringen Heilungschancen bei chirurgischer Behandlung vorschlägt, diese ganz durch Radiotherapie zu ersetzen. Seitens einiger Chirurgen gab es natürlich auch auf diesem Kongress Proteste.

Der erste Weltkrieg ließ auch auf dem Gebiet der Brachytherapie die Entwicklung stagnieren. Gauss erhielt gleich nach dem Kriege von mehreren Universitäten Angebote, einen Lehrstuhl für Gynäkologie und Geburtshilfe zu übernehmen. Er entschied sich für Würzburg, weil die Bayerische Landesregierung als einzige bereit war, seiner Bitte zum Kauf einer für die Therapie notwendigen Menge Radiums zu entsprechen. In Würzburg wurde der Physiker Carl Thoedor Neef für mehr als anderthalb Jahrzehnte Gauss' engster Mitarbeiter auf dem Gebiet der gynäkologischen Radiotherapie und der Röntgendiagnostik. Bei der Entwicklung der Methodik sowie auch in Hinblick auf die Strahlenbiologie, die Dosimetrie und den Strahlenschutz leisteten beide Pionierarbeit. Auf Grund dieser Tatsache wurde die radiologische Abteilung der Universitätsfrauenklinik in Würzburg von der Deutschen Röntgengesellschaft zum Referenzzentrum für Dosimetrie erklärt. In Hinblick auf die methodische Entwicklung entstand in Würzburg eine umfangreiche Palette von Radiumapplikatoren. Das sind Cervix-Stifte, Portio-Platten, Kraterkegel und Zylinder verschie-

dener Gestalt und Größe, die den anatomischen bzw. den pathologischen Verhältnissen angepaßt werden können. In ihrem Innern waren die Applikatoren derart gestaltet, daß sog. Radiumzellen (das sind beiderseits verschweißte Platinröhrchen, die Radium meist als Sulfat enthalten) verschiedener Aktivität in einer den radiologischen Bedingungen entsprechenden Weise angeordnet werden konnten.

Die Bestrahlungstechnik mit Radium wurde bis in die sechziger Jahre angewendet. Danach war eine Substitution durch die künstlich hergestellten Radionuklide möglich und aus Gründen des Strahlenschutzes auch dringend geboten.

Radium und seine Verbindungen sind äußerst radiotoxisch. Wenn die Umhüllung eines Radiumpräparates, die meist aus einer Platin-Iridium-Legierung besteht, undicht wird, kann das zu gefährlichen Kontaminationen des Umfeldes führen, zumal die Radiumverbindung als Pulver vorliegt. Radiumquellen müssen deshalb im Abstand weniger Jahre in besonders ausgestatteten Laboratorien auf Dichtigkeit und mechanische Unversehrtheit geprüft und ggf. neu konfektioniert werden. Durch Alphazerfall des Radiums und seiner Folgeprodukte wird naturgemäß ständig Helium erzeugt, was einen permanenten Druckanstieg zur Folge hat. Nach einigen Jahren kann das zum Platzen des Präparates führen. In einer typisch 10 mg Ra enthaltenden Quelle werden pro Jahr fast 2mm^3 Helium gebildet. Bei einem freien Volumen von nur wenigen mm^3 steigt folglich der Innendruck in 1 - 2 Jahren um ca. 1 atm.

Ein zusätzlicher Druck kann außerdem entstehen, wenn das eingeschlossene Radiumsulfat Spuren von Feuchtigkeit enthalten hat, so daß unter der intensiven Bestrahlung Knallgas gebildet wird. Verabsäumt man also bei Radiumpräparaten eine regelmäßige Prüfung und ggf. die Neukonfektionierung, so sind Undichtigkeiten und Kontaminationen früher oder später die Folge. Daß Mitte bis Ende der vierziger Jahre in Deutschland auch in dieser Hinsicht vieles im Argen lag, ist verständlich, und so wurde in der DDR nach gründlicher Prüfung und Bestandsaufnahme zu Anfang der sechziger Jahre das in den Kliniken vorhandene Radium schrittweise durch Co-60 und Cs-137 ersetzt. In einigen Ländern, z. B. in Frankreich, kam und kommt auch Ir-192 zur Anwendung. Wegen der vergleichsweise kurzen HWZ dieses Nuklids von nur 74 Tagen ist eine besondere Bevorratung und Logistik durch den Hersteller erforderlich.

Ich muß auch hier hervorheben, daß nicht nur in Würzburg die Weiterentwicklung der Brachytherapie erfolgte, sondern auch an anderen Uni-

versitäten in Deutschland und in anderen Ländern. Besonders seien hier Schweden, Frankreich und England genannt.

Der Chronologie folgend kommen wir jetzt auf einige weitere, künstlich erzeugte Radionuklide zu sprechen, wobei an Hand weniger Beispiele die Bedeutung wichtiger Methoden oder methodenorientierter Anwendungsgebiete dargelegt werden soll.

Die übliche Einteilung in medizinische und nichtmedizinische Anwendung soll auch hier beibehalten werden. Bei jedem der Teilgebiete unterscheiden wir wiederum zwischen Anwendung in umschlossener Form oder solcher als offenes radioaktives Präparat.

Bei den natürlich radioaktiven Stoffen dominierte die Verwendung als umschlossene Gammastrahlungsquelle, meist Radium oder gelegentlich Mesothor enthaltend, dennoch wurde Radon, aber auch einige andere kurzlebige Alphastrahler in offener Form therapeutisch appliziert. Man denke an die Bad Gasteiner Felsengrotten, in welchen Patienten radonhaltige Luft inhalierten.

Beginnen wir mit der medizinischen Anwendung offener Radioaktivität. Sie soll hier - etwas vereinfacht - unter dem Begriff Nuklearmedizin zusammengefaßt werden. Dabei unterscheiden wir zwischen der "in vivo"-Anwendung, bei der dem Patienten ein radioaktives Präparat zum Zweck der Diagnose oder der Therapie verabreicht wird, und der "in vitro"-Anwendung, bei der im Reagenzglas an Probandenmaterial mit Hilfe der Radioaktivität die diagnostischen Werte gewonnen werden.

Bevor ich auf die Anwendung offener Radioaktivität in der Medizin eingehe, ist ein kurzer Nachtrag zur Entwicklung von Radioaktivitäts-Meßmethoden angezeigt. Wir sahen, daß sich zu Anfang des Jahrhunderts, von der Fotoplatte einmal abgesehen, vor allem die Ionisationskammer als nahezu ausschließliches Meßinstrument der Forscher erwies. Man hatte zwar bald nach Entdeckung der Radioaktivität gefunden, daß Alphateilchen, die auf ZnS-Kristalle treffen, Lichtblitze, sogenannte Szintillationen erzeugen, die, unter dem Mikroskop beobachtet, zählbar waren, jedoch wurde erst Jahrzehnte später dieses Phänomen zur Grundlage einer der wichtigsten Meßmethoden, die dann nicht auf Alphastrahlung beschränkt war.

1912 entwickelte Wilson die nach ihm benannte Nebelkammer, die hauptsächlich in der Physik, z. B. bei der Entdeckung der künstlichen Radioaktivität durch die Joliot-Curies, große Bedeutung erlangte. Erst 1928 gelang es Geiger und Müller, mit dem nach ihnen benannten Zählrohr einen

Detektor zu schaffen, der es ermöglichte, einzelne Zerfallsereignisse bzw. die dabei entstehenden Teilchen oder Quanten zu zählen. Mitte der vierziger Jahre wurden auf Grundlage von Photomultipliern (Sekundärelektronen-Vervielfachern) erste Szintillationszähler entwickelt, die den Methoden der Anwendung von Radionukliden, vor allem auch in der Medizin, zu einer rasanten Entwicklung verhalfen. Anfang der sechziger Jahre erhielt diese durch die Einführung von Halbleiterdetektoren einen erneuten Impuls.

Die modernen Detektoren bildeten die Grundlage für die Entwicklung sogenannter Scanner und schließlich der Szintillationskamera. Das sind Instrumente, die eine schnelle und meist präzise Lokalisation der an- oder abgereicherten Aktivität im Körper des Patienten gestatten. Es ist das Ziel der In-vivo-Diagnostik, die in den Körper des Patienten eingebrachten Radionuklide auf ihrem Weg durch den Organismus zu verfolgen. Aus dem Verteilungsmuster und seiner zeitlichen Veränderung, also der Kinetik, sind Transportvorgänge und Speicherprozesse erkennbar. Abweichungen vom Normalzustand können sich z. B. in der Veränderung der Aktivitätsverteilung äußern. Eine Speicherung von Radioaktivität im krankhaften Bereich (positiver Kontrast) oder der entgegengesetzte Befund kann von diagnostischem Interesse sein.

Ziel nuklearmedizinischer Untersuchungen kann die Bestimmung der Absolutmenge einer Substanz in einem bestimmten Verteilungsraum sein (Pool) oder die permanente Erneuerung der Substanz im betrachteten Pool (Turnover). Auch der Transfer, also Transportvorgänge zwischen Phasen oder durch Membranen können wichtige Parameter sein, wie auch die Clearance, das fiktive Plasmavolumen, das in der Zeiteinheit durch Elimination vom Radiopharmakon befreit wird.

Spezielle Gebiete der nuklearmedizinischen Diagnostik, in-vivo wie auch in-vitro, sind Herz und Kreislauf, das Verdauungssystem, die Luftwege, die Schilddrüse, das Zentralnervensystem, die Nebenniere, endokrine Funktionen, das Lymphsystem, Blut und blutbildendes System, das harnbildende und -ableitende System und schließlich das Stütz- und Bewegungssystem. Die Daten für die genannten diagnostischen Zielgebiete werden sowohl in-vivo als auch in-vitro gewonnen.

Zu den In-vitro-Methoden, soweit sie die Anwendung der Radioaktivität betreffen, gehören der Radioimmunoassay RIA, der Immunoradiometrische Assay IRMA und für spezielle Zwecke die CPBA (Competitive protein binding analysis). Die weitaus größte Bedeutung hat von den drei ge-

nannten Methoden der RIA erlangt. Er zeichnet sich durch hohe Spezifität und extreme Empfindlichkeit aus. Diagnostisch interessant und mit dem RIA erreichbar sind z.B. Hormonkonzentrationen von 10^{-9} bis 10^{-12} g/ml. Die hohe Spezifität resultiert aus der Nutzung der Antigen/Antikörperreaktion, während die sehr hohe Nachweisempfindlichkeit auf die hohe spezifische Aktivität des als Tracer meist verwendeten Jod-125 und dessen effektive Meßbarkeit zurückzuführen ist. Das für den RIA Gesagte gilt auch für den IRMA.

Die Komplexität des menschlichen Organismus, die Vielfalt der Erkrankungsmöglichkeiten und der ständige Bedarf an diagnostisch relevanten Daten bei einunddemselben Patienten, z. B. bei der therapiebegleitenden Diagnostik und natürlich auch bei jedem neuen Patienten bewirken, daß die Medizin zur Radioaktivität in einem besonderen Verhältnis steht. Es besteht ein ungewöhnlich großer Bedarf an analytischen Daten. Eine weitere Besonderheit resultiert aus der notwendigen Forderung, ein Optimum an diagnostischer Information bei minimaler Nebenwirkung zu erzielen. Daraus ergeben sich wiederum u. a. folgende Forderungen an das Nuklearpharmakon:

1. Auswahl des bestgeeigneten Isotops eines Elementes (Co-57 vor Co-58 und Co-60)
2. Hohe Strahlenreinheit, d. h. Abwesenheit von fremden Radionukliden (Y-90 frei von Sr-90; Generatornuklide frei vom Mutternuklid)
3. Radiochemische Reinheit (Co-57 Vitamin B_{12} frei von Co-57 Cyanocobalamin)
4. Chemische Reinheit (keine toxischen Verunreinigungen)
5. Pyrogenfreiheit
6. ggf. Sterilität

Die erste Forderung zu erfüllen ist Aufgabe des Isotopenherstellers. Dessen Bemühungen setzen beim Targetmaterial ein, das genügend rein und ggf. bezüglich des Targetisotops angereichert sein muß. Der bestgeeignete Herstellungsweg (Beschleuniger oder Reaktor) und die Produktionsparameter sind festzulegen. Die Forderungen 2 und 3 fallen in die Zuständigkeit des Radiochemikers, während die übrigen Probleme meist von Chemikern, Biochemikern, Toxikologen und Biologen zu lösen sind. Wir sehen, daß schon bei der Erzeugung des radioaktiven Agens interdisziplinäre Zusammenarbeit geboten ist. Genauso ist das auf der apparativen Seite, Messung, Applikation und Strahlenschutz betreffend. Hier sind Physiker, Elektroniker, Apparatebauer, Datenverarbeiter und Mathemati-

ker gefordert. Allein hinter dem Stichwort Messung verbirgt sich ein Methodenarsenal, das vom einfachen Detektor bis zu Apparaten reicht, die große Serien von Meßproben bis zum Ausdrucken des verwertbaren Meßprotokolls automatisch bewältigen oder tomografische Abbildungen der Isotopenverteilung in fraglichen Organen dem Arzt an die Hand geben. Ich erwähne dies, um zu zeigen, daß sich zwischen Radioaktivität und Medizin, mit den Curies um 1900 beginnend, bis heute eine besonders enge Wechselbeziehung herausgebildet hat, und dies, wie ich meine, mehr als auf anderen Anwendungsgebieten der Radioaktivität.

Bei der Anwendung umschlossener Strahlenquellen in der Medizin, die, wie wir sahen, bald nach Entdeckung des Radiums einsetzte, haben sich neben der klassischen Brachytherapie drei Anwendungsarten besonders herausgebildet:

1. die Afterloading Technik
2. die Teletherapie und
3. die Anwendung von Betastrahlern.

Die *Afterloading Technik* ist eine Fortentwicklung der klassischen Brachytherapie mit Gammastrahlern. In einem gegen Strahlung abgeschirmten Behälter befinden sich mehrere meist Cs-137 oder Ir-192 enthaltende kugelförmige Quellen von 2 mm Durchmesser. Aus dem Innern des Behälters heraus führt ein dünner, ca. 2 m langer Metallschlauch, welcher in einem einseitig geschlossenen Rohr endet. Mit Hilfe einer Mechanik - oder hydraulisch - können nun eine oder mehrere Quellen, ferngesteuert durch den Schlauch in das endständige Rohr befördert und nach einer programmierten Zeitspanne, zurückgeholt werden. Das endständige Bestrahlungsrohr wird, bevor die Quellen ausgefahren sind, gefahrlos beim Patienten im oder am Tumor mittels mechanischer Halterungen und durch Tamponade fixiert. Die Applikation erfolgt natürlich in einem abgeschirmten Bestrahlungsraum, während die Bedienung von außerhalb des Raumes vorgenommen wird.

Bei der *Teletherapie* handelt es sich um die Anwendung sog. Kobaltkanonen. Das sind kugelförmige Behälter aus Uran, die eine Co-60 Quelle enthalten. Deren Aktivität entspricht etwa der von 1 bis 1,5 kg Radium. Der Behälter besitzt eine Strahlenaustrittsöffnung, die mittels fernbedienbarer Blende verschlossen ist. Bei modernen Geräten rotiert der kugelförmige Behälter planetenartig um den Patienten, so daß der austretende Strahl immer auf den im Rotationsmittelpunkt positionierten Tumor gerichtet ist.

Das bewirkt, daß der Tumor sich dauernd im Strahlenfeld befindet, während das ihn umgebende gesunde Gewebe nur zeitweilig bestrahlt wird.

Die *Anwendung von Betastrahlern* in Form umschlossener Quellen erfolgt zur Zeit hauptsächlich in der Ophthalmologie. Bei der Behandlung von intraokularen Augentumoren haben sich in den vergangenen zwanzig Jahren kalottenförmige Applikatoren mit Ru-106/Rh-106 hervorragend bewährt. Die heute weltweit angewendeten Strahlenquellen sind das Ergebnis einer langjährigen Zusammenarbeit zwischen Einrichtungen der AdW der DDR, der Charité und den Augenkliniken in Leipzig, Essen und Hamburg. Besondere Verdienste hat sich auf diesem Gebiet P. Lommatzsch in Leipzig erworben. Seinem zusammenfassenden Bericht aus dem Jahre 1993 entnehmen wir, daß in der Leipziger Klinik allein von 227 Tumorpatienten 146 erfolgreich (fast 65%) behandelt werden konnten, und zwar durch Bestrahlung mit Ru-106/Rh-106 Applikatoren [11].

Zwischen der Radioaktivität und der Medizin hat es, wie wir gesehen haben, immer eine sehr enge Beziehung gegeben. Dennoch sollten wir nicht vergessen, daß bereits 1912 Hevesy und Paneth die erste Anwendung eines radioaktiven Tracers, nämlich des Radium D (Pb-210), bei der Bestimmung der Löslichkeit von $PbCrO_4$ praktizierten. Sie erschlossen damit ein Gebiet, das sich erst drei bis vier Jahrzehnte später, als künstlich erzeugte Radioisotope der wichtigsten Elemente verfügbar waren, voll entfalten konnte. Hevesy wurde für die erste Traceranwendung mit dem Nobelpreis für Chemie 1943 ausgezeichnet.

Ich will versuchen, in der folgenden komprimierten und keineswegs umfassenden Auflistung die Vielfalt und Besonderheit der Anwendung von Radionukliden außerhalb der Medizin anzudeuten.

Zwei wichtige Merkmale zeichnen die analytischen Methoden mit Radionukliden gegenüber allen anderen Verfahren aus, nämlich die sehr hohe Nachweisempfindlichkeit einerseits und zum andern die Möglichkeit der Markierung.

Die hohe Nachweisempfindlichkeit war bereits bei den Verfahren der Labordiagnostik angesprochen worden. Danach gelingt bei kurzlebigen Radionukliden wegen deren hoher spezifischer Aktivität (Aktivität/Masse) der Nachweis sehr kleiner Massen, im Extremfall, *der* weniger Atome bzw. Moleküle.

Geht man beispielsweise bei einer Probe von der gut meßbaren Aktivität von 1 Bq aus, so sind bei Nukliden mit der HWZ von einer Stunde noch 5200 Atome nachweisbar, das sind $8{,}64 \cdot 10^{-21}$ mol.

Die Markierbarkeit andererseits wird bei den sogenannten Indikator- oder „tracer"-Methoden genutzt. Ersetzt man in einer chemischen Verbindung Atome eines bestimmten Elementes teilweise durch ein Radioisotop, so ist es möglich, das Schicksal der radioaktiv markierten Spezies bei chemischen Reaktionen oder bei Transportvorgängen zu verfolgen. Man denke nur an die komplizierten Reaktionsfolgen beim Stoffwechsel lebender Organismen. Hierbei kommt auch die Möglichkeit der Positionsmarkierung organischer Verbindungen zum Tragen. Der radioaktive Kohlenstoff C-14, aber auch die Radioisotope des Wasserstoffs, des Phosphors und des Schwefels können in bestimmte Positionen der zu untersuchenden Moleküle eingefügt werden. Die Analyse der Reaktionsprodukte kann dann Aufschluß über den Reaktionsweg geben.

Isotopenmethoden sind bei der Untersuchung von Austauschvorgängen nützlich, aber auch bisweilen unverzichtbar, z. B. dann, wenn der Austausch zwischen gleichen Atomen verschiedener Verbindungen (Isotopenaustausch) oder die wechselseitige Änderung der Oxidationsstufe zwischen gleichartigen Atomen (Elektronenaustausch) untersucht werden sollen.

Bei radiochemischen Methoden in der Analytik ist man nicht immer an die Zugabe eines Radionuklids gebunden. Unter Umständen kann auch die Analyse auf Grund natürlicher Radioaktivität erfolgen. Typisches Beispiel ist natürliches Kalium. Dieses enthält das radioaktive Isotop K-40 (HWZ $1{,}28 \cdot 10^9$ a) in einer Aktivität von 31000 Bq pro kg. Deshalb kann die Bestimmung des natürlichen Kaliums auch über eine Aktivitätsmessung erfolgen.

Ein weiteres effektives und variantenreiches Gebiet, auf dem man Radioaktivität ebenfalls als wesentliches Agens nutzt, ist die *Aktivierungsanalyse*. Sie beruht auf der Erzeugung der Radioaktivität im Analysengut durch Kernreaktion, meist solcher mit thermischen Neutronen, das sind Neutronen mit niederer Energie. Diese hatte, wie wir sahen, bereits Fermi gleich nach Entdeckung künstlicher Radioaktivität zur Erzeugung von Radionukliden erfolgreich eingesetzt. Die zu untersuchende Probe wird, um ein einfaches Beispiel zu nennen, in einem Kernreaktor für eine bestimmte Zeit einem Strom thermischer Neutronen ausgesetzt. Aus der Aktivität der gebildeten Radionuklide läßt sich die Zusammensetzung der Probe ermit-

teln. Zur Identifizierung der gebildeten Radionuklide eignen sich Halbleiterdetektoren in besonderer Weise. Sie haben ein enormes Auflösungsvermögen und liefern folglich detaillierte Gammaspektren, die die Erkennung bestimmter Nuklide erst ermöglichen. Viele Elemente sind durch Aktivierungsanalyse in Mengen von 10^{-10} bis 10^{-12} g in einem Gramm Probematerial bestimmbar. Bisweilen werden auch geladene Teilchen in der Aktivierungsanalyse verwendet, vorwiegend dann, wenn es um Untersuchung von Oberflächen an Festkörpern geht.

Ein auch auf Radioaktivität beruhendes analytisches Hilfsmittel, das sich in der Mineralogie, der Metallographie, besonders aber in den Biowissenschaften bewährt hat, ist die *Autoradiographie*. Sie beruht auf der Abbildung flächenhaft verteilter Radioaktivität mit Hilfe fotografischer Emulsion. Bereits H. Becquerel hatte Uransalze durch deren Strahleneinwirkung auf der Fotoplatte sichtbar machen können. Heute wendet man natürlich wesentlich verfeinerte Verfahren an, die, je nach Nuklid, ein Auflösungsvermögen von 20 - 100 Mikrometer haben. Besonders geeignet für diese Art der Abbildung sind Tritiumverbindungen, denn dieses Nuklid emittiert eine sehr weiche (energiearme) Betastrahlung. So ist z. B. die Lokalisierung bestimmter Tritiumverbindungen in Chromatogrammen, in Elektroferogrammen sowie in mikroskopischen Gewebeproben möglich.

Abschließend sei noch ein Beispiel für die Nutzung offener Radioaktivität angeführt, die Methode der Altersbestimmung, von der es dem Prinzip nach mehrere gibt und die für eine Datierung in verschiedenen Zeiträumen geeignet sind. Letzteres hängt von der HWZ der genutzten Radionuklide ab.

Hier sei kurz die Grundlage der C-14 Datierungsmethode beschrieben, die von W. F. Libby 1955 ausgearbeitet wurde [12]. Ausgangspunkt ist die permanent durch kosmische Strahlung in der Erdatmosphäre bewirkte Bildung radioaktiven Kohlenstoffs. Dieser entsteht aus dem Luftstickstoff durch Kernreaktion: ^{14}N (n, p) ^{14}C. Die an der Reaktion teilnehmenden Neutronen werden durch kosmische Strahlung erzeugt und im Luftmantel der Erde thermalisiert, d. h. energiearm und damit reaktionsfähig gemacht. Die Bildungsrate liegt bei ca. 2 Atomen C-14 in der Sekunde pro cm^2 Erdoberfläche. Die HWZ dieses Kohlenstoffisotops von 5730 Jahren reicht aus, daß eine vollständige Durchmischung mit dem austauschbaren Reservoir auf der Erde erfolgt. Man kann also von einer konstanten spezifischen Aktivität des, hauptsächlich als CO_2 vorliegenden, atmosphärischen Kohlenstoffs von etwa 15 Zerfällen pro Minute und

Gramm ausgehen. Das ist ein mit speziellen Meßeinrichtungen erfaßbares Aktivitätsniveau.

Lebende Pflanzen assimilieren aus dieser Reservoir CO_2 genannter spezifischer Aktivität. Mit dem Fällen eines Baumes endet natürlich dieser Prozeß. Von nun an nimmt die spezifische Aktivität des in seinem Holz enthaltenen Kohlenstoffs mit der HWZ des C-14 von 5730 Jahren ab. An Hand einer solchen Zeitskala ist es möglich, das Alter von Holz oder anderem organischem Material durch Aktivitätsmessung zu ermitteln. Die Grenze der Methode liegt derzeit bei ca. 40000 Jahren.

Schließlich sei erwähnt, daß die bei der medizinischen Anwendung des Radiums genannten umschlossenen Quellen auch auf vielen Gebieten außerhalb der Medizin eingesetzt werden. Umschlossene Quellen, das sind hermetisch dichte Kapseln, die nur Strahlung austreten lassen, nicht jedoch den radioaktiven Stoff selbst. Eine Palette von mehr als zehn verschiedenen Radionukliden, meist Gamma- und Betastrahler, werden als Quellen in der Industrie, der Materialprüfung, dem Verkehrswesen, der Landwirtschaft, der naturwissenschaftlichen Forschung und auf anderen Gebieten oft als Bestandteil von Meß- und Regeleinrichtungen sowie von Bestrahlungsanlagen und Defektoskopiegeräten eingesetzt.

Bei meinem Rückblick auf 100 Jahre Radioaktivität habe ich versucht, in möglichst chronologischer Folge über die Entdeckungen und Entdecker zu berichten und auch zu zeigen, wie dornenreich oft der Weg zum Erfolg sein kann und daß Zufall und Irrtum offenbar häufig die heimlichen Weggefährten des Forschers sind. Schließlich war ich bemüht, Zusammenhänge zwischen den Entdeckungen aufzuzeigen und ihre Bedeutung für die Vertiefung der wissenschaftlichen Kenntnisse wie für die praktische Nutzung herauszustellen. Für den Versuch einer Bilanz fasse ich zusammen, welchen Nutzen die Wissenschaft aus der Forschung *über* Radioaktivität und der Forschung *mit* ihr bisher hat ziehen können. Man hat auf diesem Wege erkannt,

- daß radioaktiver Zerfall der Übergang einer energiereichen Kernart in eine energieärmere ist, und zwar unter Emission hochenergetischer Strahlung (α; β; γ),
- daß mit dem radioaktiven Zerfall eine Elementumwandlung erfolgt,
- daß Atome aus einem Atomkern und einer Elektronenhülle bestehen, wobei der Kern ungefähr zehntausend Mal kleiner ist als das Atom selbst, dennoch aber fast die gesamte Masse des Atoms enthält,

- daß der Kern aus Protonen und Neutronen besteht und daß diese, kollektiv als Nukleonen bezeichneten Teilchen, sich unter Emission von Betastrahlung ineinander umwandeln können,
- daß Protonen einfach positiv geladen und Neutronen elektrisch neutral sind und beide nahezu die Masse 1 nach der Atommassenskala haben und daß auf diesen Grundkenntnissen aufbauend Stabilitätskriterien für das Verhältnis von Protonenzahl zu Neutronenzahl in Abhängigkeit von der Massenzahl, also der Gesamtzahl der Nukleonen, formuliert werden können. Danach ist jeder Kern, der nicht diesen Kriterien entspricht, potentiell radioaktiv.

Zusammengefaßt und konkret angewendet heißt das:

- Kerne mit einer Protonenzahl (Ordnungszahl) größer als 83 (Wismut) sind in bezug auf Alphazerfall potentiell instabil.
- Kerne mit Neutronenüberschuß sind Beta(minus)-instabil. In solchen Kernen wandelt sich das überschüssige Neutron unter Emission eines Elektrons in ein Proton um und erfüllt damit das Stabilitätskriterium oder es läuft ggf. dieser Prozeß mehrfach ab.
- Kerne mit Neutronendefizit unterliegen der Betaumwandlung in entgegengesetzter Richtung: ein Proton wandelt sich in ein Neutron unter Emission eines Positrons um.
- Endet der radioaktive Umwandlungsprozeß nicht im Grundzustand des Tochterkernes, so wird die verbleibende Anregungsenergie (prompt oder verzögert) als Gammaquant emittiert.
- Alphazerfall oder Betaumwandlung können von Gammastrahlung begleitet sein.

Diese Modellvorstellung über den Aufbau der Atomkerne und über den Ursprung und die Triebkraft radioaktiver Umwandlungsvorgänge entstand etwa im ersten Drittel unseres Jahrhunderts, beginnend mit der Entdekkung der Radioaktivität 1896. In den Grundzügen lagen für den Kernchemiker brauchbare Modelle Mitte der dreißiger Jahr vor. Also bald nach der Entdeckung des Neutrons durch Chadwick (1932) und nachdem C. F. von Weizsäcker 1935 seine Gleichung für das Kern-Tropfen-Modell aufgestellt hatte, nach der Stabilitätskriterien berechenbar sind. Es war nun möglich, auf dieser Grundlage Arbeitshypothesen für eine weitere kernchemische Forschung aufzustellen. Eine auf dieser Grundlage konzipierte kernchemische Untersuchung von Hahn und Straßmann führte, wie wir

sahen, zur Entdeckung der Kernspaltung Ende 1938. Auf Grund *chemischer* Befunde wurde damit ein weiteres *physikalisch* und kerntechnisch eminent wichtiges Phänomen entdeckt.

Ich wage es, die von mir zuletzt skizzierten meist fundamentalen wissenschaftlichen Ergebnisse, die von Physikern und Chemikern teils im Alleingang, meist aber wohl in engem Wechselspiel erzielt wurden, als Folge der Entdeckung der Radioaktivität zu betrachten und an erster Stelle in die Bilanz eingehen zu lassen. Aus diesem, in den vergangenen hundert Jahren geschaffenen Fundus an Kenntnissen und Erkenntnis haben Wissenschaft und Technik geschöpft und unzählige Methoden entwickelt, die in der Medizin und in nahezu allen Zweigen von Naturwissenschaft und Technik Eingang fanden.

Leider sind Radioaktivität und Kernenergie in Deutschland unverschuldet, wie ich meine, in Verruf geraten. Die Gründe dafür sind sicher vielfältig. Mangelnder Sachverstand, Ignoranz und Opportunismus spielen dabei wohl die entscheidende Rolle. Im Kampf um Einschaltquoten, Auflagenhöhe und Wählerstimmen ist bisweilen jedes Mittel recht, wissenschaftlich belegte Fakten sowie die seriöse Berichterstattung und Kommentierung zu verdrängen oder zu verdrehen. Populisten und Demagogen richten hier natürlich beachtlichen Schaden an. Manfred Eigen, vor ca. zwei Jahren von einem deutschen Wirtschaftsmagazin zur Frage Genforschung in Deutschland interviewt, prägte den treffenden Ausdruck des Laienterrors, der mancherorts in diesem Lande herrscht.

Mit dieser Schlußbetrachtung soll keineswegs der Mißachtung und Verdrängung von Gefahren das Wort geredet werden. Im Gegenteil soll sie nur als Aufruf verstanden werden, wissenschaftliche Ergebnisse kritisch und unverfälscht anzuwenden, sie als Grundlage politischer Entscheidungen zu nutzen und sie weiten Kreisen der Bevölkerung verständlich zu machen.

Literatur

[1] Becquerel, H. (Compt. Rend. **122** [1896] 420, 501, 559, 689, 762, 1086).

[2] Curie, P.; Sklodowska-Curie, M. (Compt. Rend. **127** [1898] 127, 175).

[3] Rutherford, E.; Soddy, F. (Cause and Nature of Radioactivity Phil. Mag. **6(IV)** [1902] 370).

[4] Rutherford, E.; Chadwick, J.; Ellis, C. D. (Radioations from Radioactive Substances, Cambridge University Press, New York 1930).

[5] Hahn, O. (Z. Elektrochemie, Ber. Bunsenges. physik. Chem. **58** [1954] 543).

[6] Hahn, O. (Physik. Z. **8** [1907] 277).

[7] Joliot, F.; Curie, I. (Nature **133** [1934] 201).

[8] Fermi, E. (Radioactivity induced by neutron bombardment, Letter to the Editor, Nature **133** [1934] 757).

[9] Hahn, O.; Meitner, L.; Strassmann, F. (Chem. Ber. **70** [1937] 1374).

[10] Hahn, O.; Strassmann, F. (Naturwissenschaften **27** [1939] 11).

[11] Lommatzsch, P. (Radiotherapy of Intraocular and Orbital Tumors, Springer Verlag 1993, S. 23, 228).

[12] Libby, W. F. (Radiocarbon Dating, Universitiy of Chicago Press, Chicago IL, 1955).