SITZUNGSBERICHTE
DER LEIBNIZ-SOZIETÄT
Band 16 • Jahrgang 1997

Reinhardt Becker Verlag Velten

ISSN 0947-5850 ISBN 3-89597-320-8

Inhalt

Radioaktivität. Von Becquerel bis Tschernobyl. Teil I

Samuel Mitja Rapoport:

Vorwort >>>

Günther Vormum

100 Jahre Radioaktivität. Rückblick und Versuch einer Bilanz >>>

Helmut Abel

Erkenntnisse und Wissenslücken über Strahlenrisiken.. >>>

Siegrid Przyborowski

Schwierigkeiten bei der Bewertung der Strahlenexposition durch Radon >>>

Burkhardt Bauer, Egon Robert Schwarz

Ionisierende Strahlung und radioaktive Stoffe als diagnostisches
und therapeutisches Instrumentarium in der Medizin >>>

Juri Kutlachmedov

Radioökologische Probleme der Tschernobyl-Katastrophe.
Wiederherstellung und Gesundung des natürlichen und des
landwirtschaftlichen Ökosystems.
Effektivität von Gegenmaßnahmen >>>

Samuel Mitja Rapoport
Präsident der Leibniz-Sozietät

Vorwort

Mit dieser Publikation will die Leibniz-Sozietät der mit den Begriffen Radioaktivität, Strahlenrisiko und Kernenergie entstandenen irrationalen Verknüpfung mit der Furcht vor erhöhter Krebsgefahr und anderen bedrohlichen Folgen für Mensch und Umwelt entgegenwirken. Die gegebene Situation beunruhigt nicht nur die Fachleute, sondern auch breite Kreise der Öffentlichkeit. Eine Versachlichung der öffentlichen Diskussion der Risiken für Leben, Gesundheit und Umwelt muß erreicht werden, denn es besteht große Gefahr, daß Ängste in der Öffentlichkeit ein Ausmaß erlangen, das vernunftgetragene Auseinandersetzungen nicht mehr zuläßt.

Die hundertjährige Wiederkehr der Entdeckung der natürlichen Radioaktivität durch Henri Becquerel und die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl vor einem Jahrzehnt bieten einen geeigneten Anlaß, die vorliegenden beiden Bände der Sitzungsberichte herauszugeben. Neben den Beiträgen, die als Vorträge im Rahmen der wissenschaftlichen Tätigkeit der Leibniz-Sozietät gehalten und für die Veröffentlichung bearbeitet und erweitert wurden, enthalten die Bände Aufsätze, die Fachkollegen vom Bundesamt für Strahlenschutz und aus der Industrie dankenswerterweise zur Verfügung gestellt haben.

Ihre Unabhängigkeit von der Wissenschaftspolitik des Staates und der Parteien ermöglicht der Leibniz-Sozietät, unbeeinflußt und kritisch Standpunkte darzulegen. Dabei müssen gesichertes Wissen ebenso wie Erkenntnislücken benannte werden. Das Ziel ist eine Versachlichung der öffentlichen Diskussion, um unbegründete Ängste hinsichtlich der Risiken der Radioaktivität in allen ihren Anwendungen abzubauen. Weder Verharmlosung noch Panikmache sind angebracht.

Der Themenkreis wurde breit gewählt. Neben Beiträgen, die den Hintergründen von Kontroversen nachspüren, dienen andere sachlicher Information.

Der Beitrag zur hundertjährigen Geschichte der Radioaktivität veranschaulicht den reichen Erkenntnisgewinn, der von ihrer Entdeckung ausging. Die Entwicklung war begleitet von Risiken, die zunächst übersehen, später ernst genommen, aber bis heute in Grundfragen nicht widerspruchsfrei geklärt sind. Vermittelt werden ferner Einblicke in die Entwicklungen von Röntgendiagnostik, Nuklearmedizin und vor allem Kernenergie sowie deren Stand in Deutschland. Der Fortschritt vollzog sich nicht stetig aufgrund des unterschiedlichen Tempos von Entwicklungen in Technik und Grundlagenwissen.

Tschernobyl hat viele Fragen neu stellen lassen, radioökologische Probleme betreffend, wie im Bericht aus der Ukraine als auch in Darlegungen zu den Ursachen, Folgen und Konsequenzen der Tschernobyl-Katastrophe erläutert wird. Wissenswertes wird mitgeteilt über die Organisation eines landesweiten Notfallschutzes sowie über die Risiken bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle.

Längst nicht alle Fragen sind beantwortbar. Wissenschaft, Technik und Politik sehen sich Verantwortungen gegenübergestellt, von deren Wahrnehmung, öffentlicher Vermittelbarkeit in Entscheidungen die Zukunft in hohem Maße beeinflußt wird.

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.

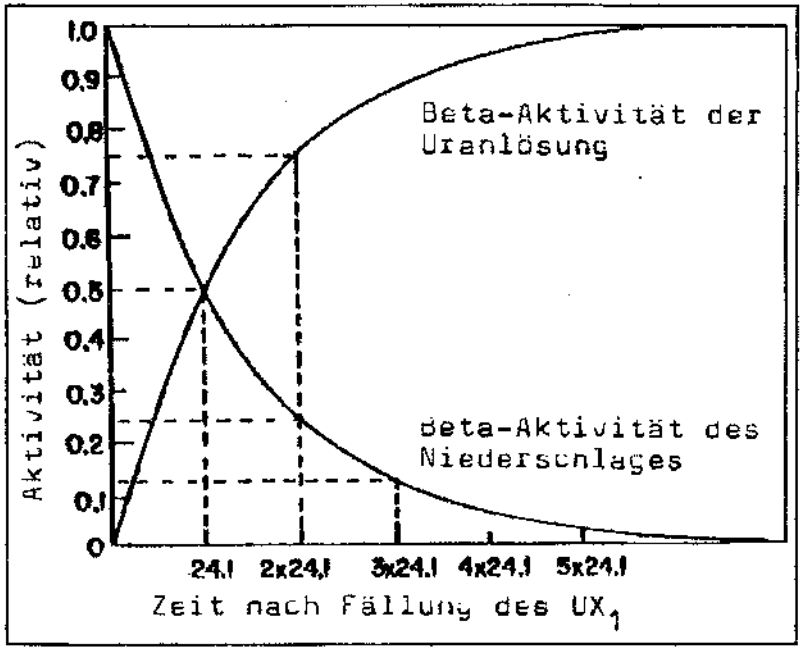

Abb. 1 Abklingkurve am Beispiel des UX_1 (HWZ 24,1 d = Einheit auf der Zeitachse).Spiegelbildlich dazu die ansteigende Kurve des in der Uranlösung nachwachsenden UX_1

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.

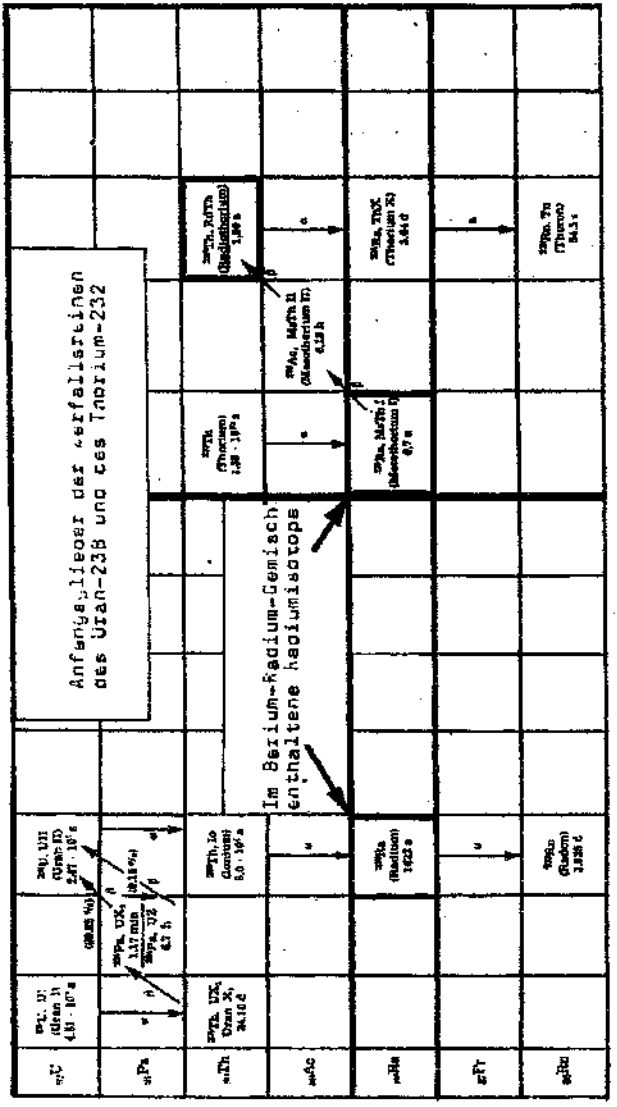

Abb. 2 Hahns Gedankengang, erklärt durch Gegenüberstellung der Anfangsglieder der Zerfallsreihen des Uran-238 und der des Thorium-232. Ra-226 (linke Seite) zerfällt über Radon schließlich in Po, Bi und Pb. Ra-228 (rechte Seite) geht über ein kurzlebiges Zwischenprodukt in das von Hahn entdeckte Radiothor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

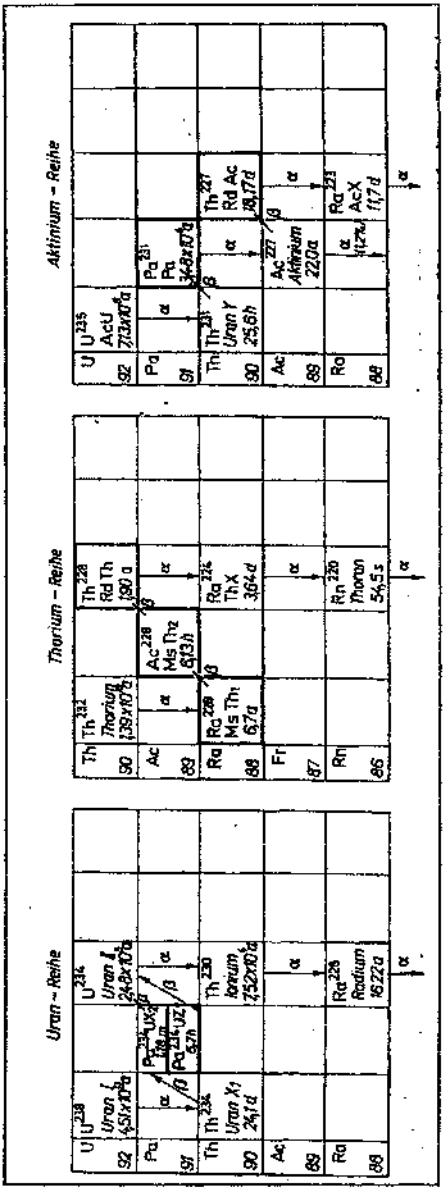

Abb. 3 Die drei natürlichen Zerfallsreihen (auszugsweise) mit den sechs von Hahn bzw. Hahn und Meitner entdeckten Radioelementen (stark umrandet)

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).

Helmut Abel

Erkenntnisse und Wissenslücken über Strahlenrisiken

Vorwort

Strahlenrisiken werden sowohl in den Medien als auch in der Wissenschaft selbst kontrovers diskutiert. In den Medien verkaufen sich emotionsgetragene Ängste besser als vernunftgetragene Sachlichkeit. In der Wissenschaft hat der Kampf um Forschungsmittel, Ansehen und Aufsehen die Grenzen des Normalen überschritten.

Sowohl Erkenntnisse als auch Wissenslücken sind unvereinbar mit Behauptungen, daß viele Menschen jährlich infolge Röntgendiagnostik an Krebs erkranken oder Kindern in der Umgebung von Kernkraftwerken Leukämie droht.

In diesem Beitrag soll versucht werden, Entstehen und Fragwürdigkeit der Kontroversen durch einen Überblick zur Geschichte der Diskussionen zum Strahlenrisiko näher zu beleuchten.

I. Historische Entwicklung der Dosis-Grenzwerte

An den Anfang möchte ich in gebotener Kürze und mithin nur fragmentarisch eine Betrachtung der historischen Entwicklung sogenannter Dosis-Grenzwerte stellen, die der Beschränkung von Gefährdungen im Umgang mit Strahlung Rechnung tragen sollen

Ihre Geschichte beginnt mit dem 2. Internationalen Röntgenkongreß 1928 in Stockholm. Auf diesem Kongreß mußte bereits ein großer Teil des Programms dem Strahlenrisiko und dem Strahlenschutz gewidmet werden; überdies wurde eine Internationale Kommission für Strahlenschutz ins Leben gerufen. Der Grund dafür lag darin, daß in den ersten zwei Jahrzehnten nach der Entdeckung der Röntgenstrahlung (1895) erschreckend viele Berichte über strahleninduzierte Erkrankungen bei Ärzten und Röntgentechnikern an Krebs und Leukämie erschienen waren. Die Faszination, mittels Röntgenstrahlen in den Menschen hineinsehen zu können, hatte Bedenken zunächst verdrängt.

Auf dem Stockholmer Kongreß wurden Schutzmaßnahmen empfohlen und aus Umfragen über Arbeitsweisen und beobachtete gesundheitliche Schäden abgeleitete sogenannte Toleranzdosen diskutiert. Aus Mangel an einheitlicher physikalischer Meßtechnik wurde die Toleranzdosis seinerzeit noch an Hautreaktionen orientiert. Der Wahl dieses Begriffes lag die Vorstellung einer Verträglichkeit von Röntgenstrahlung unterhalb eines Schwellenwertes zugrunde. Diese Vorstellung schien deshalb nicht abwegig, weil durch die Entdeckung der natürlichen Radioaktivität in Boden, Luft und Wasser sowie der kosmischen Strahlung belegt war, daß jeder Mensch natürlicherweise und unvermeidlich einer dauernden Exposition ionisierender Strahlung ausgesetzt ist, und dies ohne bislang nachweisbare Schäden.

Eine Erschütterung erfuhr diese Annahme einer schadensfreien Strahlenexposition durch die Ende der zwanziger Jahre gemachte Entdeckung, daß ionisierende Strahlung Genmutationen verursachen kann. Daß es sie gibt, war lange bekannt, nur ihre Ursachen nicht. Es entstand daher die Frage, ob diese sogenannten spontanen Genmutationen durch die natürliche Strahlung verursacht sein könnten. Quantitative Untersuchungen führten jedoch rasch zu dem Resultat, daß für die relativ große Häufigkeit der spontanen Genmutationen die natürliche Strahlung etwa tausendmal zu schwach ist, also zumindest quantitativ nur einen sehr geringen Beitrag leisten kann. Er ist bis heute weder qualitativ noch quantitativ angebbar.

Die dringenden Empfehlungen von Schutzmaßnahmen und die Beachtung von Toleranzdosen hatten zwar einen durchschlagenden Erfolg in dem Sinne, daß nur noch sehr vereinzelt berufsbedingte Strahlenerkrankungen registriert wurden, aber wissenschaftlich eindeutig belegbare Beziehungen zwischen Bestrahlungsdosen und gesundheitlichen Folgeschäden konnten nicht gefunden werden. Dieser Mangel an Erkenntnissen veranlaßte die Internationale Kommission für Strahlenschutz 1934 dazu, den Begriff 'Toleranzdosis' durch 'maximal zulässige Dosis' zu ersetzen mit einem Wert (in heute geltender Maßeinheit) von 2 mSv/Tag (mSv = Milli-Sievert).

Als Vergleich sei angegeben, daß die natürliche kosmische und terrestrische Strahlung je nach geologischen Gegebenheiten und Höhenlagen Expositionswerte etwa zwischen 0,003 mSv/Tag und 0,07 mSv/Tag mit einem globalen Mittelwert bei 0,004 mSv/Tag bewirkt.

Die Unsicherheiten hinsichtlich der Bewertung strahleninduzierbarer Genmutationen und ihrer möglichen populationsgenetischen Konsequen-

zen in Verbindung mit der raschen Zunahme der Anzahl berufsbedingt mit Strahlung umgehender Personen führten dann 1950 dazu, auch 'maximal zulässig' aufzugeben und durch 'so niedrig wie möglich' zu ersetzten bei gleichzeitiger Neufestlegung eines kleineren Grenzwertes für berufsbedingt strahlenexponierte Personen auf 6 mSv/Woche. Die Formulierung 'so niedrig wie möglich' trug in verantwortungsbewußter Weise den wissenschaftlichen Unsicherheiten Rechnung, stellte somit aber auch die Sicherheit des Grenzwertes in Frage.

In den folgenden Jahrzehnten wurde nun auch der Grenzwert noch mehrmals herabgesetzt, letztmalig 1990 auf 100 mSv/5Jahre (entsprechend etwa 0,4 mSv/Woche) /1/. Damit ist er gegenwärtig vergleichbar mit dem Maximalwert der natürlich bedingten Strahlenexposition. Diese Nähe zu den Werten der natürlichen Strahlenexpositionen führte nun auch dazu, die Formulierung 'so niedrig wie möglich' durch 'so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar' zu ersetzen.

Der mehrmaligen Herabsetzung des Grenzwertes von 6 mSv/Woche auf 0,4 mSv/Woche lagen jedoch keine Erkenntnisse über quantitative und wissenschaftlich erklärbare Beziehungen zwischen Strahlenexpositionen im Grenzwertbereich und gesundheitsschädlichen Folgen zugrunde. Sie ergaben sich aus ganz anderen Gründen. Einerseits hatte sich die Strahlenmeßtechnik kontinuierlich verbessert und erlaubte immer genauere Kontrollen. Andererseits zeigte sich gerade dabei, daß die gleichfalls kontinuierlich stattgefundene Weiterentwicklung der technischen Schutzmaßnahmen für berufsbedingten Umgang mit Strahlung zu Strahlenexpositionen geführt hat, die deutlich unter den Grenzwerten lagen. Also war es eingedenk der wissenschaftlichen Unsicherheiten möglich und auch vernünftig, die Grenzwerte immer weiter herabzusetzen.

Aus der zunehmend breiteren Anwendung von Strahlungsquellen, in der Medizin, der Forschung und der Industrie, einschließlich der Kernenergieindustrie, folgte die Notwendigkeit der Festlegung von Grenzwerten für die Strahlenexposition der Bevölkerung. Da es keinen Hinweis auf Schäden im beruflichen Dosis-Grenzwertbereich gab, wurden sie stets etwa um einen Faktor 10 niedriger als für berufsbedingt mit Strahlung umgehende Personen festgelegt. Gegenwärtig liegt der Bevölkerungs-Grenzwert deutlich unter dem Maximalwert der natürlich gegebenen Strahlenexpositionen. D.h., es gibt auch Bevölkerungsgruppen, die natürlicherweise infolge geologischer Gegebenheiten (natürliche Radioaktivität

des Bodens) eine höhere als dem gegenwärtigen Bevölkerungs-Grenzwert entsprechende Strahlenexposition erfahren.

So wissenschaftlich einsichtig und verantwortungsbewußt der oben genannte Formulierungswandel von 'Toleranzdosis' bis zu 'so niedrig wie vernünftigerweise erreichbare Dosis' sein mag, Verwirrungen und Ängste in der Öffentlichkeit konnten nicht ausbleiben. Es mußte sich öffentlich die Frage aufdrängen, ob nun Strahlenexpositionen in jedem Falle, so niedrig sie auch sein mögen, das Krebrisiko erhöhen.

Nicht überraschend ist auch ihre Abwandlung in die Frage, ob sich die Internationale Strahlenschutzkommission bei ihrem grundsätzlichen Festhalten an 'Akzeptanz in Grenzen', nicht auch hat leiten lassen von Überlegungen zum Ja oder Nein zur Kernenergie. Natürlich hat sie das; mußte es. Alle ihre Auswertungen der internationalen wissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse mußten lückenlos Neuentwicklungen in allen Bereichen, von der Medizin über alle Industriezweige, berücksichtigen. Stets war die Frage zu beantworten, ob und wie sich aus den erkannten Risiken nach Lage der Erkenntnisse und der Wissenslücken Akzeptanz in Grenzen bzw. Warnungen begründen lassen. Sollen Verbote gefordert werden, dann müssen die wissenschaftlichen Begründungen jeder Kritik standhalten. Ein solcher Wissensstand ist bei Strahlenrisiken nicht erreicht.

II. Krebsmortalität und Umweltstrahlung

Gebiete mit erhöhter natürlicher Radioaktivität sind seit vielen Jahrzehnten der Wissenschaft bekannt. Das Erzgebirge wurde bereits in den dreißiger Jahren als ein klassisches Gebiet der Radioaktivität bezeichnet. Heute liegen quantitative Bestimmungen von Expositionswerten weltweit vor und lassen erkennen, daß es große Gebiete relativ hoher natürlicher Radioaktivität neben Gebieten geringer natürlicher Radioaktivität gibt. Es war daher naheliegend zu versuchen, über epidemiologische Untersuchungen Hinweise auf mögliche Beziehungen zwischen Krebsmortalität und Umweltstrahlung zu erhalten.

Einer epidemiologischen Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Krebsmortalität und Jahresdosis stehen trotz dieser Variationen der natürlichen Umweltstrahlung erhebliche Schwierigkeiten gegenüber. So fehlt eine zuverlässige und flächendeckende Registrierung der Krebssterbefälle in den meisten und besonders interessierenden Gebieten. Außerdem sind Lebensgewohnheiten und soziale Grundlagen unterschiedlich. Hinzu

kommt, daß die aus Gründen statistischer Sicherheit der Aussagen erforderliche Größe der zu vergleichenden Personengruppen Anforderungen stellt, die kaum erfüllbar sind. Bei Expositionsdifferenzen im mSv-Bereich müßten Millionen Personen in epidemiologischen Untersuchungen erfaßt werden. Trotz dieser Schwierigkeiten wurden viele Versuche unternommen, zu Aussagen zu kommen, mit immer weiterentwickelten statistischen Modellen.

In Deutschland-Ost besteht das wohl einzige hinreichend lange (seit 1953) geführte Krebsregister. Die Expositionswerte aus der natürlich gegebenen Umweltstrahlung steigen hier von Norden nach Süden leicht an und erreichen in Kreisen der Bergbaugebiete Thüringens und Sachsens Werte, die mehr als doppelt so hoch sind wie im Norden. Aus den bisher vorliegenden epidemiologischen Untersuchungen konnten hinsichtlich der Inzidenz bösartiger Erkrankungen, einschließlich Leukämien, bis auf eine Ausnahme, keine Unterschiede nachgewiesen werden. Die Ausnahme bildet der Kreis Aue, das Territorium des früheren Uranbergbaues, in dem bei Männern - und nur bei diesen - eine signifikant erhöhte Lungenkrebsrate nachweisbar ist, die aus dem überproportional hohen Anteil an ehemaligen Wismut-Bergleuten resultiert /2/.

Es seien noch zwei weitere epidemiologische Untersuchungsbefunde /3/ genannt, die mit zu den bisher zahlenmäßig umfassendsten gehören und deren Vergleich insofern besonders interessant erscheint, weil bei zwar relativ kleinen vergleichbaren Dosen die Dosisleistungen sehr unterschiedlich sind. In dem einen Falle handelt es sich um diejenige Gruppe von Überlebenden der Atombombenabwürfe auf Hiroshima/Nagasaki (23321 exponierte Personen; 34272 Personen der Kontrollgruppe), die mit Dosen unterhalb etwa 100 mSv kurzzeitig exponiert wurden.. Im anderen Falle wurden Bewohner eines Gebietes in China (74000 Einwohner) untersucht, wo die natürliche Strahlenexposition 200% bis 300% über dem Landesdurchschnitt liegt und die mittlere Lebensdosis 70-jähriger Einwohner 350 mSv beträgt.

Sowohl im Falle der Hiroshima/Nagasaki-Untersuchungen als auch bei der China-Studie konnten in den genannten niedrigen Dosisbereichen keine Unterschiede im Krebsrisiko zwischen den höher exponierten Gruppen und den Kontrollgruppen statistisch sicher nachgewiesen werden.

Es existieren zahlreiche weitere epidemiologische Untersuchungen, in denen wechselnd mal Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Krebsmortalität und Umweltstrahlung ausgewiesen werden und mal nicht. Nicht

wenige derartige Untersuchungen haben sogar zu der Schlußfolgerung geführt, daß die Krebsmortalität in Gebieten besonders geringer Umweltstrahlung größer ist als in Gebieten höherer Umweltstrahlung. Doch keine einzige von allen bisherigen Studien hat wissenschaftlich widerspruchsfreie Akzeptanz erfahren können. In einer 1995 publizierten Arbeit mit dem Titel 'Bewertungen epidemiologischer Studien' /4/ kommen die Autoren zu der Schlußfolgerung, daß " die Akzeptanz von Studienergebnissen nicht nur von der Eindeutigkeit der Befunde abhängt, sondern auch von deren sozialer - oder im weitesten Sinne, politischer - Bedeutung. Hinter dem Exzerpierten Erkenntniszugewinn steht häufig ein gerichtetes Interesse".

Ein Beispiel, bei dem diese Schwierigkeiten besonders deutlich hervorgetreten sind, zeigt die Diskussion um die Häufung kindlicher Leukämien in der Umgebung des Kernkraftwerks Krümmel in der Elbmarsch. In einem Zeitraum von 16 Monaten (1989-1991) erkrankten dort 5 Kinder unter 15 Jahren an Leukämie und ein Kind an aplastischer Anämie. Die Frage entstand, ob eine der Öffentlichkeit verschwiegene Havarie im Kernkraftwerk Ursache sein könnte oder ob nur eine Zufälligkeit vorliegen könnte, die nichts mit dem Kernkraftwerk zu tun hat. Nun setzt die Prüfung, ob eine Havarie vorlag und verschwiegen wurde, Glaubwürdigkeit in die Aussagen und Unterlagen des Kernkraftwerkes voraus. Ob es sich um eine Zufälligkeit handelt, setzt wiederum Glaubwürdigkeit in die korrekte mathematische Durchführung der statistischen Untersuchung voraus. Beides ist in der Öffentlichkeit nicht gegeben. Obgleich die mathematische Statistik die Möglichkeit eines Zufalls ergeben hat /5/, dem Kernkraftwerk das Verschweigen einer Havarie nicht nachgewiesen werden konnte, sind Ängste und Zweifel geblieben.

Man kommt nicht umhin festzustellen, daß die Frage, ob die natürliche Radioaktivität bzw. die um Prozente dessen erhöhte Exposition infolge künstlicher Strahlenexpositionsquellen Krebserkrankungen fördert oder nicht oder sogar vermindert, in eine Erkenntnislücke führt. Diese Lücke zuzugeben fällt offensichtlich deshalb so schwer, weil für Strahlenexpositionen mit höheren Dosen, oberhalb etwa einiger 100 mSv, kein Zweifel besteht, daß die Wahrscheinlichkeit eines erhöhten Krebsrisikos gegeben ist und mit wachsender Dosis zunimmt.

Die Internationale Strahlenschutzkommission nimmt deshalb aus Gründen der Vorsicht und solange das Gegenteil nicht zweifelsfrei bewiesen ist an,

daß aus Strahlenexpositionen selbst geringster Dosen ein erhöhtes, wenn auch nicht nachweisbares, Krebsrisiko resultiert.

Unvermeidlich führt diese Annahme eines Krebsrisikos bei beliebig kleinen Strahlendosen dazu, die Lebensräume von Menschen in Krebsrisikogebiete nach der natürlich gegebenen Umweltstrahlung, der röntgenologischen Betreuung oder der Existenz von Kernkraftwerken aufzuteilen. Berechnungen der Anzahl der Krebs- oder Leukämietodesfälle dieser Ursachen anzustellen, fehlt eine zuverlässige wissenschaftliche Grundlage. Daß solche Berechnungen immer wieder angestellt und den Medien übergeben werden, erklärt sich mehr aus unterschiedlicher Sucht als aus Verantwortungempfinden.

III. Molekularbiologische Aspekte zum Strahlenrisiko

Seitens der Molekularbiologie bestehen Zweifel zur Annahme eines Krebsrisikos selbst bei beliebig kleinen Dosen. Die Annahme beinhaltet ja, daß strahleninduzierte Kanzerogenese durch ein singuläres Strahlenenergie-Absorptionereignis in einer Zelle ausgelöst werden kann. Die Komplexität allein der Initiationsphase der Umwandlung einer gesunden Zelle in eine Krebszelle begründet den Zweifel. In einer Kette komplizierter und voneinander abhängiger Prozesse während der Umwandlung sind Protoonkogene, Onkogene, Supressorgene und Reparaturgene miteinander verknüpft. Letzteren kommt eine besondere Funktion zu, die neben dem organismischen Immunsystem ein Erhaltungsprinzip des Lebens auf zellulärer Ebene widerspiegelt.

Träger aller Gene ist die chromosomale DNS. Ihre doppelsträngige Struktur mit gleichem Informationsgehalt in jedem Strang bildet bereits eine erste Sicherheit gegen Störungen im Informationssystem der Zelle zur Aufrechterhaltung aller Funktionen. Störungen in einem der beiden Stränge führen dadurch nicht zwingend zum Informationsverlust. Die Zelle läßt dennoch eine solche einsträngige Störung nicht bestehen. In Experimenten läßt sich gut beobachten, daß solche Störungen in Minuten bis Stunden wieder aufgehoben bzw. repariert werden. Die Produkte der Reparaturgene bilden ein komplexes Arsenal an Enzymen mit Erkennungs-, Ausschneide- und Synthesefunktionen, so daß die Störstelle erkannt und wieder repariert werden kann. Aus sterischen Gründen ist die ausgebesserte Stelle stets größer als die ursprüngliche Störstelle, wodurch auch

spontane quantenchemische Irrtümer und andere Störungen, die der Erkennung entgangen sind, mit aufgehoben werden.

Daß die DNS infolge ihrer Länge, 100.000 mal den Zellkerndurchmesser überschreitend, in superhelikaler Weise organisiert sein muß, konnte schon vor vielen Jahren nachgewiesen werden. Aus vergleichenden Bestrahlungsexperimenten an Säugerzellen mit leichten und schweren beschleunigten Ionen ergaben sich darüber hinaus Hinweise darauf, daß die chromosomale DNS in nahezu äquidistanten Abständen kernmembranassoziiert ist und weit über 1000 Subeinheiten mit funktioneller Reparaturautonomie bildet /6,7,8/. Jede Zelle verfügt also über mehr als 1000 autonom arbeitende Reparatureinheiten.

Experimentell gesichert ist heute, daß ionisierende Strahlung insbesondere einsträngige und sehr viel seltener doppelsträngige Brüche in der (doppelsträngigen) DNS bestrahlter Zellen hervorruft. Bei einsträngigen Brüchen wird die Bruchstelle enzymatisch erweitert und der gegenüberliegende intakte Strangabschnitt liefert die Information für die korrekte Neusynthese des Strangstückes. Doppelstrangbrüche, in den Strängen gegenüberliegend, wurden lange Zeit als irreparabel vermutet, weil sie den Verlust gleicher Informationen in beiden Strängen bewirken. Doch inzwischen konnte auch ihre Reparatur nachgewiesen werden. Die DNS-Superhelikalität in den Subeinheiten realisiert eine räumliche Nachbarschaft homologer DNS-Subeinheiten, wodurch die Reparatur von strahleninduzierten Doppelstrangbrüchen durch sogenannte Austauschprozesse möglich wird. Diese erfordern jedoch das Fortschreiten der Zelle im Zellzyklus und beanspruchen somit Stunden.

Nun verursacht die natürlich gegebene Umweltstrahlung in einer betrachteten Zelle unseres menschlichen Körpers strahleninduzierte DNS-Störungen nur in zeitlichen Abständen von Monaten, also in Zeiten, die sehr groß verglichen mit den intrazellulären Reparaturzeiten sind. Die betroffene Zelle hat diese Störung also längst repariert, ehe eine zweite strahleninduzierte Störung erfolgt, falls sie dann nicht schon natürlicherweise ausgeschieden ist.

So hoch die Effizienz der DNS-Reparaturmechanismen auch eingeschätzt werden muß, so ist sie doch nicht fehlerfrei. Zu fragen ist, welche Art strahleninduzierter DNS-Schäden an Initiationen maligner Zelltransformationen beteiligt sein könnten. Die in Krebszellen nachgewiesenen chromosomalen Umbauten lenkt die Aufmerksamkeit auf nicht oder fehlerhaft reparierte Doppelstrangbrüche. Sie werden dann nicht oder nur

fehlerhaft reparabel sein, wenn sie Cluster in den superhelikalen DNS-Subeinheiten bilden und sich dadurch die Reparaturenzyme gegenseitig behindern.

Die Verteilung von Doppelstrangbrüchen in den DNS-Subeinheiten einer Zelle, also auch die Clusterung von Doppelstrangbrüchen, läßt sich infolge der Kenntnisse über die Organisation der DNS im Zellkern in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdosis und für jede beliebige Strahlenart quantenphysikalisch gut berechnen, folglich auch die Rate der als irreparabel angenommenen Doppelstrangbrüche /8/. Dabei ergaben sich zwei interessante Resultate. Für energiereiche Quantenstrahlung, wie sie in der natürlichen Umweltstrahlung vorkommt, sinkt die Rate irreparabler Doppelstrangbruchcluster im Dosis-Bereich der Umweltstrahlung kontinuierlich auf so niedrige Werte ab, daß ihr Beitrag zur Initiation einer malignen Zelltransformation weit unter jeder Nachweisschwelle heutiger molekularbiologischer Methoden liegt. Für Alphastrahlung hingegen, die als merklicher Anteil der Umweltstrahlung aus dem Radon resultiert, nimmt die Rate irreparabler Doppelstrangbrüche unterhalb etwa einiger 100 mSv nicht mehr ab, sondern bleibt bei 0,1 bis 0,2 konstant. D.h., sobald eine Zelle von einem Alphateilchen durchquert wird und im Zellkern Energie überträgt, entsteht mit konstanter Wahrscheinlichkeit auch ein irreparabler Doppelstrangbruch in ihrer chromosomalen DNS.

Da Radon als Alphastrahlung emittierende natürliche Expositionsquelle nicht zu vernachlässigen ist, scheint dieses Resultat die Annahme eines Krebsrisikos auch im Expositionsbereich der Umweltstrahlung bzw. bis Dosis Null herab zu stützen.

Doch dieser Schluß ist zu voreilig. Er ignoriert zumindest zwei Fakten. Erstens ist unabhängig von der Dosis stets der Anteil an DNS-Einstrangbrüchen extrem viel größer als der Anteil an irreparablen DNS-Doppelstrangbrüchen. Zweitens ist jede Reparatur eines Einstrangbruches als Signal zur DNS-Kontrolle zu werten, woraus bei der Reparatur des strahleninduzierten Bruchs die gleichzeitige Aufhebung eines Anteils der zigtausendfach häufigeren spontanen endogenen und nicht strahleninduzierten DNS-Störungen resultiert.

Aus molekularbiologischer Sicht kann also nicht ausgeschlossen werden, daß die natürliche Umweltstrahlung eine begrenzende Funktion bezüglich der spontanen und aller nicht strahleninduzierten Mutationen und Zelltransformationen haben könnte. Gleichzeitig würde sich daraus ableiten,

daß im Expositionsbereich der Umweltstrahlung eine strahlenbedingte Zunahme des Krebsrisikos nicht eintritt.

Zunächst ist dies nicht mehr als ein Denkansatz, der aber die Forschung auf gezielte Untersuchungen orientiert. So wurden z.B. nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl Mutationsuntersuchungen an peripheren Lymphozyten von Personen einer Baustelle durchgeführt /9/, die sich dort, 150 km entfernt vom Unglücksort, während und noch 4 Wochen nach dem Reaktorunfall aufhielten. Eine gut bekannte und vor allem auch spontan vorkommende Mutationsart wurde in entnommenen Lymphozyten von diesem Personenkreis und von einem Kontroll-Personenkreis über die spontane Rate hinaus chemisch induziert. Trifft der oben genannte Denkansatz zu, müßte bei dem Personenkreis der Baustelle eine geringere Anzahl an Mutationen entstanden sein., weil in ihren Lymphozyten infolge der erhöhten Strahlenexposition auch eine intensivere DNS-Kontrolle induziert worden ist. Die Untersuchungen zeigten auch dieses Ergebnis. Die Autoren dieser Arbeit halten dies jedoch noch nicht für eine Bestätigung, weil auch Verschiebungen in den Lymphozyten-Subpopulationen zugunsten strahlenresistenter Zellen bei dem exponierten Personenkreis das Resultat erklären könnten

Es ließen sich noch eine Reihe weiterer Untersuchungen anführen, die dem Denkansatz einer mutations- und transformationsbegrenzenden Funktion der natürlichen Umweltstrahlung gefolgt sind. Sie ermutigen auch zur Fortsetzung, haben aber der Internationalen Strahlenschutzkommission noch keine hinreichende Sicherheit vermitteln können, von ihrer auf Vorsicht gegründeten Position, der allgemeinen Annahme eines stetigen Zunehmens des Krebsrisikos mit wachsender Strahlenexposition, abzuweichen. Sie hat diese Denkansätze nicht ignoriert, kommt aber in ihrem Bericht 1990 zu der Schlußfolgerung : "Radiation may be able to stimulate the repair of prior radiation damage, thus decreasing its consequences, or may be able to improve immunological surveillance, thus strengthening the body's natural defence mechanisms. Such effects, currently termed 'hormesis', are poorly understood and are controversial. Most of the experimental data are inconclusive, mainly because of statistical diffilulties at low doses. It is therefore inappropriate at present to take account of the possible influence of hormesis on the probability of the induction of stochastic effects by radiation".

Man muß diesen Standpunkt akzeptieren, darf aber die vorsichtsbegründete Annahme der Internationalen Strahlenschutzkommission nicht zum

unumstößlichen Dogma werden lassen und schon gar nicht auf ihrer Grundlage Gefahren der Röntgendiagnostik oder der unterschiedlichen Krebsrisiken in verschiedenen Gegenden eines Landes berechnen wollen.

IV. Zusammenfassung

Den heutigen Dosis-Grenzwerten für Strahlenexpositionen liegen wissenschaftliche Erkenntnisse über die damit verbundenen Krebsrisiken nicht zugrunde. Ihre Festsetzung wurde einerseits maßgeblich durch die Vervollkommnung der Strahlenmeßtechnik und andererseits aus Vorsicht gerade durch die Erkenntnislücken bestimmt.

Epidemiologische Untersuchungen konnten bisher weder über eine Zu- noch Abnahme des Krebsrisikos mit der Dosis im Expositionsbereich der Grenzwerte widerspruchsfreie Hinweise erbringen.

Auch der Erkenntnisstand der biophysikalischen und molekularbiologischen Grundlagenforschung reicht noch nicht aus, um die zur Vorsicht verpflichtete Internationale Strahlenschutzkommission zu veranlassen, ihre auf Vorsicht bedachte Risiko-Bewertung zu verändern.

Wissenslücken sind objektiv gegeben, nicht jedoch von der Art, daß sie Ängste begründen und ihre Verbreitung in der Öffentlichkeit rechtfertigen könnten.

Literatur

/1/ ICRP Publication 60 : 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP 21 (No. 1-3), Pergamon Press, Oxford 1991

/2/ Arndt D., Die Strahlenexposition in den Bergbaugebieten Thüringens und Sachsens, in : Strahlenschutz in Forschung und Praxis, Band 33 (47-60), Gustav Fischer Verlag-Stuttgart-Jena-New York 1992

/3/ Steinhäusler F., Der Mensch im Strahlenumfeld, in : Strahlenschutz: Physik und Messtechnik, Band 1 (1-18), Publikationsreihe des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V., Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln 1994

/4/ Breckow J., Grosche B., Weber K.-H., Bewertung epidemiologischer Studien Fachverband für Strahlenschutz, FS-95-76-AKS, 1995

/5/ Rübenberg P, Leukämiecluster in der Elbmarsch-Unfallfolge oder statistische Fluktuation Fachverband für Strahlenschutz, FS-96-78-T, 1996

/6/ Regel K., DNA-Superstrukturen, Radiobiol. Radiother. 29 : 520-560 (1988)

/7/ Erzgräber G., Rosemann M., Abel H. and Regel K., DNA-structures and radiation injury, in : Proceedings of the COSPAR-Meeting Den Haag, Pergamon Press 1990

/8/ Rosemann M., Ein mikrodosimetrisches Modell zu Reparatur strahleninduzierter DNA-Doppelstrangbrüche in Säugerzellen, Dissertation A, Humboldt-Universität Berlin, 1992

/9/ Tuschl H., Kovac R. und Topaloglou A., DNA Reparatur, Schwesterchromatidaustausche und immunologische Parameter nach Rn-oder beruflicher Strahlenexposition. Vortrag 1988, Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf, A-2444 Seibersdorf

Siegrid Przyborowski

Schwierigkeiten bei der Bewertung der Strahlenexposition durch Radon

1. Einleitung

Seit jeher ist die Menschheit der natürlichen Strahlenexposition ausgesetzt. In der Vergangenheit wurde - obwohl der Strahlenschutz für künstliche Strahlenquellen immer weiter entwickelt - die Strahlenexposition aus natürlichen Quellen als gegeben hingenommen und weitgehend aus allen Regelungen ausgespart. In den letzten Jahren wurde diesen Strahlenexpositionen jedoch sowohl von Strahlenschutzexperten als auch von der Öffentlichkeit zunehmend mehr Beachtung geschenkt.

Eine der wichtigsten Komponenten der natürlichen Strahlenquellen ist das Radon und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte. Einerseits haben Radon und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte einen großen Anteil - vielfach sogar den größten Anteil - an der Strahlenexposition der Bevölkerung und bestimmter Gruppen von Beschäftigten, andererseits erfordert diese Komponente - gegenüber anderen Strahlenquellen - eine besondere Behandlung im Strahlenschutz. Das beruht sowohl auf den charakteristischen Eigenschaften des Radon und seiner kurzlebigen Zerfallsprodukte, ihrer weiten Verbreitung mit extrem großen räumlichen und zeitlichen Schwankungen sowie der Möglichkeit, das gesundheitliche Risiko unmittelbar aus epidemiologischen Studien an Bergarbeitern abschätzen zu können. Die Sonderrolle des Radon und seiner kurzlebigen Zerfallsprodukte im Strahlenschutz beginnt bei der Verwendung spezieller Größen und Einheiten, führt zu eigenständigen Maßstäben der Bewertung und endet bei speziellen Empfehlungen zur Reduzierung der Exposition und zur Beachtung im Strahlenschutz.

Im folgenden sollen - ausgehend von den gegenwärtigen Erkenntnissen und deren Unsicherheiten über das Auftreten von Radon und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten und das damit verbundene Risiko - die Grundlagen erläutert werden, auf deren Basis Empfehlungen für die Re-

duzierung dieser Komponente der Strahlenexposition gegenwärtig beruhen.

2. Charakteristische Merkmale der Exposition durch Radon und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte

Das Radon ist ein radioaktives Edelgas, das aus dem Zerfall von Radium entsteht, das in unserer natürlichen Umwelt in Böden und Gesteinen enthalten ist. In Abhängigkeit von dem Radiumgehalt in den Gesteinen und im Boden, der Durchlässigkeit der Gesteine und des Bodens für Radon und den Witterungsverhältnissen gelangt mehr oder weniger Radon in unterirdische Hohlräume und aus dem Boden an die Oberfläche und damit in die freie Atmosphäre oder auch direkt aus dem Boden in die Gebäude.

Das Radon bildet mit einer Halbwertszeit von wenigen Tagen kurzlebige Zerfallsprodukte als Schwermetall-Atome und -Ionen, die in der Luft zum Teil in der freien Form erhalten bleiben, zum Teil sich an vorhandene Aerosole anlagern. Diese kurzlebigen Zerfallsprodukte treten immer in Verbindung mit Radon auf, wobei im allgemeinen kein radioaktives Gleichgewicht herrscht, sondern die Zerfallsprodukte nur zu einem bestimmten Anteil gegenüber dem Radon vorhanden sind. Da aber nur Zerfallsprodukte risikorelevant sind (s. unter 3.), muß sich die Bewertung der Strahlenexposition auf die Zerfallsprodukte beziehen. Glücklicherweise kann in vielen Fällen davon ausgegangen werden, daß sich im Jahresmittel ein annähernd konstanter Gleichgewichtsfaktor einstellt, z. B. in Wohngebäuden in mittleren Temperaturregionen ein Wert von etwa 0,4. Unter dieser Annahme werden dann auch Angaben über die Radon-Konzentration allein im Sinne der Risikorelevanz aussagekräftig. Aus diesem Grunde wird im folgenden der Begriff Radon als Synonym für Radon und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte benutzt.

Obwohl Radon sowohl im Freien als auch in Gebäuden auftritt, spielt nur das letztere eine Rolle bei der Strahlenexposition der Bevölkerung. Zum einen wird das aus dem Boden in die freie Atmosphäre austretende Radon schnell mit der Umgebungsluft verdünnt, zum anderen sind die Aufenthaltszeiten der Bevölkerung im Freien wesentlich geringer als die in Gebäuden (man rechnet in unseren Breiten im Jahresmittel mit einem durchschittlichen Verhältnis von 0,2 zu 0,8).

In der Bundesrepublik Deutschland sind ebenso wie in den meisten anderen Ländern die Radon-Konzentrationen in Häusern gut bekannt. In

Gebieten mit Gestein hohen Uran- bzw. Radiumgehalts und unter bestimmten geologischen Bedingungen treten gehäuft höhere Radon-Konzentrationen auf, wobei in Einzelfällen besonders hohe Werte, durch früheren Bergbau bedingt, gefunden wurden. Die Jahresmittel der Radon-Konzentrationen in Wohnungen variieren im Bereich von einigen Bq/m³ bis zu einigen Tausend Bq/m³ und erreichen in Extremfällen einige 10 000 Bq/m³, der Mittelwert beträgt 50 Bq/m³. Obwohl man von der Häufung bestimmter Radon-Konzentrationen in bestimmten Gebieten ausgehen kann, ist eine Vorhersage über die tatsächliche Radon-Konzentration in einem bestimmten Haus nicht möglich.

Hohe Radon-Konzentrationen können auch für bestimmte Gruppen von Beschäftigten auftreten. Das betrifft nicht nur den Bereich des Uranerzbergbaus, sondern den Bergbau und andere Untertage-Arbeitsplätze insgesamt, wenn sie sich in bestimmten geologischen Formationen befinden. Bekannt sind auch besonders hohe Radon-Konzentrationen in bestimmten Bereichen der Wasserwirtschaft.

Gegenüber allen anderen Strahlenquellen ist der räumliche und zeitliche Schwankungsbereich für Radon - insbesondere in Gebäuden - extrem groß und kann mehrere Größenordnungen betragen.

3. Abschätzung des Risikos

3.1 Dosimetrische Modelle

Der relevante Expositionspfad bei Radon und seinen Zerfallsprodukten ist die Inhalation. Da die biologischen Halbwertszeiten unterhalb der physikalischen Halbwertszeiten liegen, entsteht die Strahlenexposition im wesentlichen durch die im Atemtrakt, insbesondere im Bronchialbereich, deponierten bzw. dort durch weiteren Zerfall entstehenden kurzlebigen Radon-Zerfallsprodukte. Den Hauptbeitrag zur Strahlenexposition liefert dabei der Alphazerfall, da die Reichweite der Alpha-Energien vergleichbar ist mit dem Abstand zwischen Depositionsort und Risikozellen. Die durch das Edelgas Radon entstehende inhalative Strahlenexposition ist dagegen um mehr als eine Größenordnung niedriger.

Bei anderen inhalierten Radionukliden wird die sich ergebende Strahlendosis über Inhalationsdosiskoeffizienten berechnet, die aus dosimetrischen Modellen abgeleitet werden. Das Risiko ergibt sich dann aus der Dosis-Wirkungs-Beziehung, die aus epidemiologischen Untersuchungen

der Atombombenüberlebenden auf die für den Strahlenschutz relevanten niedrigen Dosis-/Dosisleistungsbereiche extrapoliert wurden. Wird das neue Atemtraktmodell der Internationalen Strahlenschutzkommission auf Radon und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte angewandt, so ergeben sich höhere Risiken für Lungenkrebs als bei den epidemiologischen Untersuchungen an Bergleuten beobachtet wurden. Neben den vielen anderen Unsicherheiten bei der Modellierung für die kurzlebigen Radon-Zerfallsprodukte (z. B. Unterschiede bei der Deposition freier und angelagerter Anteile, Reichweiten der Alpha-Energien annähernd gleich dem Abstand der Risikozellen vom Depositionsort) spielt die Unsicherheit des Strahlungswichtungsfaktors des Alpha-Zerfalls bei den Radon-Zerfallsprodukten gegenüber der Strahlung niedriger LET bei den Atombombenüberlebenden eine wesentliche Rolle. Die Internationale Strahlenschutzkommission hat deshalb empfohlen, das dosimetrische Modell für Radon-Zerfallsprodukte nicht anzuwenden, sondern sich stattdessen bei der Risikoabschätzung für diese Radionuklide nur auf die Ergebnisse der epidemiologischen Untersuchungen an Bergleuten zu stützen.

3.2 Epidemiologische Studien

Erste Beschreibungen von Lungenkrankheiten gab es schon vor mehr als hundert Jahren für die Bergleute aus dem Erzgebirge. Dabei wurde die "Schneeberger Krankheit" erst um das Jahr 1900 als Lungenkrebs diagnostiziert.

Für die epidemiologischen Studien wurden weltweit (z.B. nordamerikanische, tschechische, französische) Bergleute, insbesondere aus dem Uranbergbau, ausgewählt, die langanhaltend einer hohen Radon-Konzentration untertage ausgesetzt waren. Dabei wurde auffallend häufiger als bei der übrigen Bevölkerung Lungenkrebs festgestellt, wobei die Häufigkeit mit zunehmender Radon-Exposition ansteigt.

Neben den allgemeinen Unsicherheiten epidemiologischer Untersuchungen (retrospektive Expositionsbestimmung, begrenzte Größe der exponierten Gruppe, Auswahl geeigneter Kontrollgruppen, Notwendigkeit von Zeitprojektionsmodellen und Extrapolation der Risiko-Expositions-Beziehung in nicht beobachtete Expositionsbereiche) existieren bei den Bergarbeiterstudien spezielle Unsicherheiten durch die unterschiedlichen Bergwerksatmosphären, die andere kanzerogene Noxen enthalten können, sowie durch den starken Einfluß des Rauchens. Dieser muß korrigiert wer-

den, wobei die Wechselwirkung der Expositionen durch Radon und Rauchen zwischen multiplikativ und additiv liegt.

Für die Abschätzung des Risikos der Bevölkerung durch die Exposition bei erhöhten Radon-Konzentrationen im Wohnbereich existieren zwar mehrere epidemiologische Studien, deren Ergebnisse aber nicht konsistent sind. Nur in Einzelfällen konnte bei höheren Konzentrationen eine eindeutige Erhöhung des Lungenkrebsrisikos in Abhängigkeit von der Exposition durch Radon festgestellt werden.

Daher wird von der Internationalen Strahlenschutzkommission vorgeschlagen, die Risikoabschätzung für die Exposition durch Radon von den Bergarbeiterstudien auf die Bevölkerung zu übertragen. Dabei werden die einer solchen Übertragung innewohnenden Unsicherheiten bewußt in Kauf genommen:

- in der Bevölkerung werden auch Frauen und Kinder exponiert, während bei den Bergarbeiter-Studien nur Männer - noch dazu mit einem überdurchschnittlich guten Gesundheitszustand - erfaßt werden (z.B. Unterschiede in den Atemraten, im Rauchverhalten)
- die Atmosphären im Bergbau und in den Wohnungen unterscheiden sich sowohl in klimatischen Bedingungen (z.B. Feuchte) als auch hinsichtlich zusätzlicher Noxen (z.B. Stäube, Explosionsgase)

Genauso wie bei anderen Noxen muß für eine Abschätzung des Krebsrisikos von hohen Radon-Konzentrationen im Bergbau auf die niedrigeren in Wohnungen extrapoliert werden. Im Gegensatz zu anderen Innenraumnoxen wie Asbest ist die Datenlage zur Abschätzung des Krebsrisikos für Radon vergleichsweise gut, da die Konzentrationen, denen die Bergleute ausgesetzt waren, im unteren Bereich mit den Konzentrationen in hochbelasteten Wohnungen vergleichbar sind.

Die deutsche Strahlenschutzkommission erkennt die Risikoschätzung der Internationalen Strahlenschutzkommission als derzeitigen Wissensstand an. Sie betont aber, daß die allgemeinen Zusammenhänge im Bereich der Exposition in Wohnungen noch weiter geklärt werden müssen. Die Bundesrepublik beteiligt sich deshalb mit der Durchführung von epidemiologischen Studien an einer Verbesserung der Kenntnisse über das tatsächliche radonbedingte Risiko der Wohnbevölkerung.

3.2 Dosiskonvention

Die epidemiologischen Untersuchungen an Bergarbeitern liefern eine direkte Beziehung zwischen dem erhöhten Risiko an Lungenkrebs und der Strahlenexposition durch Radon. Die Strahlenexposition wird dabei ausgedrückt als Zeitintegral über die während der Expositionszeit vorhandene Konzentration der Radon-Zerfallsprodukte.

Soll die Strahlenexposition durch Radon mit anderen Strahlenexpositionen verglichen werden, beispielsweise bei der Wertung des Anteils von Radon an der gesamten natürlichen Strahlenexposition, bei kombinierter beruflicher Strahlenexposition, so wird die Angabe in effektiver Dosis benötigt. Da wegen der empfohlenen Nicht-Anwendung des dosimetrischen Atemtraktmodells keine Dosiskoeffizienten verfügbar sind, hat die Internationale Strahlenschutzkommission einen Ersatz dafür mit der sog. Dosiskonvention geschaffen. In der Dosiskonvention wird das Risiko für tödlichen Lungenkrebs aus den Bergarbeiter-Studien mit dem gesamten stochastischen Schaden aus den Studien der Atombombenüberlebenden verglichen und die dazugehörigen Expositionen an Radon mit der zugehörigen effektiven Dosis gleichgesetzt.

4. Bewertungsgrundlage

Regelungen im Strahlenschutz basieren einerseits auf der Kenntnis des Risikos aus den epidemiologischen Studien der Atombombenüberlebenden und der Hypothese einer linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung für stochastische Effekte auch im nichtbeobachteten Dosisbereich. Andererseits basieren sie auf einer internationalen Übereinkunft über die Höhe solcher hypothetischer Risiken, die unter definierten Gegebenheiten für bestimmte Situationen und bestimmte Personen als akzeptabel und tolerabel gelten sollen. In diesen Übereinkünften spielt auch die Verhältnismäßigkeit der Mittel, d.h. ein Abwägen von Aufwand und Nutzen des Strahlenschutzes eine Rolle. Generell geht es aber darum, die bei der Anwendung von Strahlenquellen hervorgerufene Strahlenexposition so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar zu halten, unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und sozialer Faktoren.

Bei Radon handelt es sich dagegen um eine natürliche Strahlenquelle in der normalen Umwelt, zu der natürlich auch das Wohnen in Gebäuden

zählt, die mehr oder weniger zur Exposition jedes Menschen beiträgt. Die Strahlenexposition kann aber in bestimmten Situationen und für bestimmte Personengruppen durch menschlichen Einfluß erhöht werden - beispielsweise durch unterirdische Arbeitsplätze, durch Veränderungen am Haus, die entweder den Radoneintritt aus dem Boden erleichtern oder den Luftaustausch mit der Außenluft erschweren. Es ist aber äußerst schwierig, diesen Einfluß von den ohnehin natürlich vorhandenen zu trennen, zumal auch die normale Schwankungsbreite der Radon-Konzentration Größenordnungen betragen kann. Diesen Problemen überlagert ist die Unsicherheit in den Kenntnissen über das tatsächliche Risiko der größten betroffenen Personengruppe, der Wohnbevölkerung.

Das Ziel des Strahlenschutzes im Zusammenhang mit der Exposition durch Radon ist deshalb aus Vorsorgegründen die Verminderung der höchsten bestehenden Expositionen und das vorausschauende Verhindern des Neuauftretens solcher Expositionen. Es ist nicht das Ziel, das durchschnittliche Niveau dieser Strahlenexposition zu senken. Damit wird ein gewisser "Normalbereich" als gegeben akzeptiert, ohne daß damit vordergründig eine Wertung verbunden ist, ob diese "normalerweise in der Natur auftretenden Bedingungen" positiv oder negativ sind. Auf jeden Fall ist auch das Abschneiden der höchsten Expositionen gegenüber einer über Jahrzehnte dauernden Nichtbeachtung im Strahlenschutz als Fortschritt zu werten.

Die Schwierigkeit besteht in der Definition, welche auftretenden Konzentrationen an Radon als "normal" zu betrachten sind. Diese Definition kann sich in Abhängigkeit von der im jeweiligen Lande vorliegenden Verteilung der Radon-Konzentration und ökonomischen Situation von Land zu Land unterscheiden. Wesentlich ist aber ein internationaler Konsens über den möglichen Wertebereich.

Die Bedeutung dieser Bewertungsgrundsätze wird am Beispiel der Regelungen für Radon in Wohnungen deutlich. Bei diesen Regelungen geht es um die Festlegung von Werten für den jährlichen Mittelwert der Radon-Konzentration in Wohnbereichen, bei deren Überschreitung die Radon-Konzentration nicht mehr als "normal" zu betrachten ist. Mit der Festlegung solcher Werte sind bestimmte Maßnahmen verbunden, die bei Überschreitung der Werte empfohlen oder gesetzlich festgelegt werden. Dabei ist es wiederum von der Situation in dem jeweiligen Land abhängig, ob solche Festlegungen nur Empfehlungscharakter haben, wie

beispielsweise in der Bundesrepublik Deutschland, oder Gesetzeskraft besitzen, wie beispielsweise in der Schweiz.

Die Internationale Strahlenschutzkommission empfiehlt, daß Richtwerte für die Radon-Konzentration, bei deren Überschreitung einfache Maßnahmen zu ergreifen sind, national zwischen 200 und 600 Bq/m³ festgelegt werden sollten. Die deutsche Strahlenschutzkommission hat in Auswertung der Situation in Deutschland empfohlen, dabei 3 Bereiche der Radon-Konzentration zu unterscheiden. Liegen langzeitige Mittelwerte der Radon-Konzentration im Wohnbereich innerhalb des "Normalbereiches", der sich bis 250 Bq/m³ erstreckt, werden Maßnahmen zur Reduzierung der Radon-Konzentration als nicht notwendig erachtet. Es wird geschätzt, daß ca. 98,2 - 98, 9 % (ca. 98 - 99 %) der ca. 15 Millionen Wohngebäude in Deutschland innerhalb des so definierten Normalbereiches liegen. Der Bereich zwischen 250 und 1000 Bq/m³ gilt als "Ermessensbereich", für den einfache Maßnahmen zur Reduzierung der Radon-Konzentration empfohlen werden. Das würde in ca. 1 - 1,5 % der deutschen Wohngebäude zutreffen. Erst wenn die langzeitige Radon-Konzentration im Wohnbereich 1000 Bq/m³ überschreitet ist der "Sanierungsbereich" gegeben, in dem die Radon-Konzentration reduziert werden sollte, auch wenn dazu ein größerer technischer und finanzieller Aufwand unumgänglich ist. Davon wären aber schätzungsweise nur 0,1 - 0,3 % der Wohngebäude in Deutschland betroffen. Für neu zu errichtende Gebäude sollte angestrebt werden, daß der "Normalbereich" nicht überschritten wird.

Diese Bewertungsgrundsätze gelten aber auch für die berufliche Exposition durch Radon. Solange bestimmte Werte der Radon-Konzentration nicht überschritten werden, gilt diese Exposition als zum natürlichen Arbeitsumfeld gehörend, die keiner Beachtung bedarf. Erst wenn festgelegte Werte überschritten werden, sollten Maßnahmen zur Reduzierung dieser Exposition am Arbeitsplatz unternommen werden. International werden - in Anbetracht der kürzeren Arbeitszeit gegenüber dem Aufenthalt in Wohnungen - Werte im Bereich zwischen 500 und 1500 Bq/m³ vorgeschlagen. Da Radon überall auftreten kann ist es im Sinne der praktischen Umsetzbarkeit von Regelungen erforderlich, daß national die Kategorien von Arbeitsplätzen festgelegt werden, bei denen überhaupt eine Untersuchung stattfinden sollte. In Deutschland sind diesbezügliche Regelungen im Rahmen der Umsetzung der Euratom-Grundnormen in der Diskussion.

5. Zusammenfassung

Die Behandlung von Radon im Strahlenschutz führt immer wieder zu kontroversen Diskussionen. Einerseits gehören sie zu den natürlichen Strahlenquellen, die seit jeher zu der Exposition des Menschen beitragen, andererseits führen sie für bestimmte Personengruppen zu den höchsten Expositionen überhaupt. Die Tendenz im internationalen Strahlenschutz, Expositionen durch Radon und seine Zerfallsprodukte im national zu definierenden "Normalbereich" als natürliche Lebensumwelt zu akzeptieren, aber für Expositionen oberhalb dieses "Normalbereiches" Maßnahmen zur Reduzierung dieser Expositionen zu empfehlen, erscheint auch im Sinne der oben beschriebenen Schwierigkeiten und Unsicherheiten eine gerechtfertigte und optimale Lösung zu sein.

Literatur

Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Bekanntmachung einer Empfehlung der Strahlenschutzkommission, vom 30. Juni 1994: Strahlenschutzgrundsätze zur Begrenzung der Strahlenexposition durch Radon und seine Zerfallsprodukte in Gebäuden, Bundesanzeiger Nr.155 vom 18. August 1994

International Commission on Radiological Protection; Protection against Radon-222 at Home and at Work; ICRP Publication 65, Annals of the ICRP, Vol.23, No 2, 1993

S. Przyborowski, W. Zeller: Internationale und nationale Empfehlungen und Regelungen zum Strahlenschutz bei natürlichen Strahlenquellen, Strahlenschutzpraxis 2 (1996), Heft 3, S. 27-32

Burkhardt Bauer; Egon Robert Schwarz,

Ionisierende Strahlung und radioaktive Stoffe als diagnostisches und therapeutisches Instrumentarium in der Medizin

1. Einleitung

Neben der Exposition gegenüber natürlicher ionisierender Strahlung ist der Mensch auch künstlichen Strahlenquellen ausgesetzt (zivilisatorische Strahlenexposition). Die zivilisatorische Strahlenexposition resultiert zum größten Teil aus der Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin.

Weitere (geringfügige) Beiträge zur mittleren zivilisatorisch bedingten Strahlenexposition der Bevölkerung sind durch Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen, aus der Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung in Forschung, Technik und Haushalt und durch den Fall-out von Kernwaffenversuchen bedingt. Die berufliche Strahlenexposition betrifft nur einen sehr kleinen Teil der Bevölkerung.

Einen Überblick über die Strahlenexposition der Bevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland, einschließlich der Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl, zeigt für das Jahr 1994 die Tabelle 1. In der Tabelle ist die Strahlenexposition der Bevölkerung angegeben als "Mittlere effektive Dosis in Millisievert pro Jahr". Näheres zu diesem Dosisbegriff ist in Kapitel 3 unter 3.1 erläutert.

Die als mittlere effektive Dosis ausgedrückte Strahlenexposition ist jedoch nicht geeignet, um daraus etwa ein mittleres Strahlenrisiko aus medizinischen Maßnahmen für einen Durchschnittsbürger zu errechnen, da sich die medizinisch bedingte Strahlenexposition sehr ungleichmäßig auf die Bevölkerung verteilt. Medizinische Maßnahmen betreffen immer Einzelpersonen, für die ein <u>individuelles</u> Verhältnis zwischen Nutzen und Risiko ermittelt werden muß, nämlich das (hypothetische) Risiko aus der Strahlenexposition im Vergleich zu deren Nutzen, d.h. die Erkennung oder auch der Ausschluß einer Krankheit. Näheres hierzu ist in Kapitel 4 erläutert.

Tabelle 1:
Mittlere effektive Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1994

			Mittlere effektive Dosis in Millisievert pro Jahr	
1.	**Natürliche Strahlenexposition**			
	1.1	durch kosmische Strahlung (in Meereshöhe)	ca. 0,3	
	1.2	durch terrestrische Strahlung von außen bei Aufenthalt im Freien (5 Std./Tag) bei Aufenthalt in Häusern (19 Std./Tag)	ca. 0,4	ca. 0,1 ca. 0,3
	1.3	durch Inhalation von Radonfolgeprodukten durch Aufenthalt im Freien (5 Std./Tag durch Aufenthalt in Gebäuden (19 Std./Tag)	ca. 1,4	ca. 0,2 ca. 1,2
	1.4	durch Ingestion von natürlich radioaktiven Stoffen	ca. 0,3	
		Summe der natürlichen Strahlenexposition	**ca. 2,4**	
2.	**Zivilisatorische Strahlenexposition**			
	2.1	durch kerntechnische Anlagen	< 0,01	
	2.2	durch Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin	ca. 1,5 a)	
	2.3	durch Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in Forschung, Technik und Haushalt (ohne 2.4)	< 0,01	
		2.3.1 Industrieerzeugnisse		< 0,01
		2.3.2 technische Strahlenquellen		< 0,01
		2.3.3 Störstrahler		< 0,01
	2.4	durch berufliche Strahlenexposition (Beitrag zur mittleren Strahlenexposition der Bevölkerung)	< 0,01	
	2.5	durch besondere Vorkommnisse	0	
	2.6	durch Fall-out von Kernwaffenversuchen	< 0,01	
		2.6.1 von außen im Freien		< 0,01
		2.6.2 durch inkorporierte radioaktive Stoffe		< 0,01
		Summe der zivilisatorischen Strahlenexposition	**ca. 1,5**	
3.	**Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl**		ca. 0,02	

a) Der Schwankungsbereich dieses Wertes beträgt ca. 50 %

(aus: Umweltpolitik - Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 1994. Hrsg.: Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn, Januar 1997, S. 7)

Der folgende Text befaßt sich ausschließlich mit der medizinischen Strahlenexposition der Patienten. Auf die berufliche Strahlenexposition der im medizinischen Bereich Beschäftigten wird hier nicht eingegangen.

2. Anwendungen in der Medizin

Die Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe in der Medizin verfolgt diagnostische und therapeutische Ziele. Die Gewinnung einer Information aus dem menschlichen Körper zur ärztlichen Diagnostik wird in Kapitel 2.1 (Röntgendiagnostik) und 2.2 (Nuklearmedizin) beschrieben. Ionisierende Strahlen verschiedener Art, einschließlich der von radioaktiven Stoffen ausgehenden, eignen sich aber auch zur Strahlentherapie, die in Kapitel 2.3 beschrieben ist.

2.1 Röntgendiagnostik

Um Informationen aus dem menschlichen Körper zu erhalten, kann man sich unter anderem der Eigenschaften der Röntgenstrahlen bedienen, die beim Durchdringen von Materie in ihrer Intensität abgeschwächt werden. Diese Abschwächung ist von mehreren Faktoren abhängig, die einerseits in den physikalischen Eigenschaften der Röntgenstrahlen bedingt sind und damit vom untersuchenden Arzt beeinflußt werden können und andererseits durch die physikalischen Gegebenheiten im menschlichen Körper, der untersucht werden soll.

2.1.1 Bilderzeugende Systeme

Die für das menschliche Auge unsichtbare Röntgenstrahlung muß, um als Abbild des menschlichen Körpers vom Arzt beurteilt werden zu können, in ein sichtbares Bild umgewandelt werden. Dies kann in unterschiedlicher Weise erfolgen:

Radiographie

Unter Radiographie versteht man die Anfertigung von Röntgenaufnahmen in sog. Direkttechnik. Um die durch den Körper in Abhängigkeit von seiner Gewebszusammensetzung abgeschwächten Röntgenstrahlen sichtbar zu machen, wird auf der der Röntgenröhre gegenüberliegenden Seite des

Körpers eine Filmkassette angebracht, in die ein beidseits beschichteter Film eingeschlossen ist. Die Kassette besteht aus Aluminium oder Kunststoff, wobei sich Karbonfasermaterialien als besonders strahlendurchlässig und mechanisch haltbar erwiesen haben. In die Kassette sind sowohl an der Vorder- wie an der Rückseite Verstärkerfolien eingeklebt, die auf sie auftreffende Röntgenstrahlen in sichtbares Licht umwandeln. Heutzutage werden üblicherweise als Leuchtstoffe Salze von Seltenen Erden verwendet, die ein grünliches Licht ausstrahlen. Die Schwärzung des Films erfolgt zu etwa 95 % aus diesem von den Verstärkerfolien stammenden Licht. Nur 5 % der Schwärzung erfolgt durch direkte Einwirkung der Röntgenstrahlen auf die Silberhalogenidkristalle des Films. Es gibt Folien mit unterschiedlicher Verstärkungswirkung, wobei mit zunehmender Verstärkungswirkung auch die geometrische Unschärfe zunimmt und die Abbildungsqualität leidet. Bei guter Abstimmung der Folie und des Films benötigt man etwa 5 - 10 µGy Dosis auf der Filmkassette, um einen gut auswertbaren Röntgenfilm zu erhalten. Die Belichtungszeiten bei Röntgenaufnahmen liegen je nach darzustellendem Organ und Patientendicke zwischen einigen Millisekunden bis zu 0,5, bei besonderen Untersuchungen auch 2 Sekunden.

Eine andere Möglichkeit der Gewinnung eines statischen Röntgenbildes ist die digitale Radiographie. Bei ihr wird statt der Verstärkerfolien und des Films in der Aufnahmekassette auf einer Lumineszenzschicht proportional zur Menge und Energie der auftreffenden Röntgenquanten ein latentes Bild erzeugt, das durch Laserlicht zum Leuchten angeregt wird und digital ausgewertet werden kann. Man kann dann das Röntgenbild entweder in einem Laserprinter als Hardcopy ausdrucken oder auf einem Monitor direkt befunden und dadurch den Film einschließlich seiner Archivierung einsparen. Vorteil dieser sehr teuren Methode ist weniger die Dosiseinsparung pro Bild, sondern die Tatsache, daß bei Unterbelichtung ein noch auswertbares Bild, wenn auch mit schlechterer Bildqualität, entsteht. Auch erhebliche Überbelichtungen führen nicht zu einem unauswertbaren schwarzen Bild, sondern zu einem Bild mit verbessertem Signal-Rausch-Verhältnis. Die Dosiseinsparung ergibt sich also durch die Vermeidung von Wiederholungsaufnahmen, vor allem bei schwierigen Belichtungen im freien Betrieb, wo die Strahlendosis nicht durch eine Belichtungsautomatik geregelt werden kann.

Fluoroskopie (Durchleuchtung)

Soll bei der Untersuchung ein bewegter Vorgang, etwa die Funktion eines Organs, beurteilt werden, wird die Röntgenuntersuchung als Durchleuchtung durchgeführt. Dabei findet sich hinter dem Patienten wiederum ein Leuchtschirm, der aber sein Licht nicht auf einen Röntgenfilm, sondern auf einen elektronischen Bildverstärker abgibt, der das zunächst sehr schwache Bild optoelektronisch verkleinert und verstärkt. Das so entstehende kleinere, aber lichtstarke Bild wird über eine Fernsehkamera wieder in ein elektrisches Signal umgewandelt, auf einen Monitor übertragen und kann hier direkt betrachtet werden.

Indirekte Radiographie

Sollen bei der Durchleuchtung zusätzlich Röntgenaufnahmen zur späteren Auswertung angefertigt werden, bietet sich die Indirekttechnik an. Dabei kann mit einer Mittelformatkamera das Bild am Bildverstärkerausgang abfotografiert oder bei sehr schnellen Vorgängen, wie etwa Herz- oder Herzkranzgefäßuntersuchungen, mit einer Kinokamera abgefilmt werden. Auch die Überführung des Durchleuchtungssignals in ein Digitalbild und eine Übertragung auf den Monitor oder eine Laserkamera als indirekte digitale Radiographie ist möglich. Diese digitale Technik eignet sich besonders zur Untersuchung schwacher Kontraste, wie etwa Gefäßdarstellungen als sog. digitale Subtraktionsangiographie (DSA). Es ist möglich, zunächst eine kurze Leeruntersuchung durchzuführen, dieses Bild ins Negativ zu verkehren und anschließend von dem mit Kontrastmittel angefertigten Bild elektronisch abzuziehen, so daß sich die Körperkonturen gegenseitig aufheben und sich nur die durch Kontrastmittel erzeugten Schatten deutlich darstellen.

Computertomographie

Einen völlig anderen Weg der Bilderzeugung beschreitet die Computertomographie (CT). Durch eine Schlitzblende vor dem Röntgenstrahler wird ein schmales fächerförmiges Röntgenstrahlenbündel quer zur Körperachse des Patienten ausgeblendet. Auf der Gegenseite befindet sich anstelle des Films ein bogenförmiger Kranz von Detektoren, die die Röntgenstrahlung über Leuchtstoffkristalle und Photomultiplier in ein elektrisches Signal entsprechend der Abschwächung der Röntgenstrahlen in die-

ser Strahlrichtung umwandeln. Während der Untersuchung rotiert die Röntgenröhre und der Detektorkranz um den menschlichen Körper, so daß man aus zahlreichen Einstrahlrichtungen, bei modernen Geräten auch in kontinuierlicher Aufzeichnung, aus allen Richtungen Schwächungswerte der Röntgenstrahlen erhält. In einem komplizierten Rechenverfahren wird daraus im Computer jedem Volumenelement des menschlichen Körpers innerhalb der durchstrahlten Schicht ein Röntgenstrahlenabsorptionswert zugeordnet. Dieser läßt sich als Bildpunkt auf einem Monitor darstellen und ergibt ein überlagerungsfreies Querschnittsbild des menschlichen Körpers. Dieser Vorgang der Querschnittsbilderzeugung wird abschnittsweise in Schichtdicken von 10 - herunter zu 1 mm entlang der Längsachse des Körpers fortgesetzt, so daß sich ein räumliches Bild bei Betrachtung der nebeneinander liegenden Schichten im Kopf des untersuchenden Radiologen ergibt oder vom Computer in einer dreidimensionalen Darstellung erzeugen läßt.

2.1.2 Kontrast

Um die einzelnen Organe und Gewebearten im Röntgenbild, bei der Durchleuchtung oder der Computertomographie in ihrer regulären Form und Funktion, aber auch in ihren krankhaften Veränderungen erkennen zu können, nutzt man die unterschiedliche Absorption der Röntgenstrahlen beim Durchdringen von Materie in Abhängigkeit von der Strahlenqualität und der durchstrahlten Materie aus. Röntgenstrahlen werden beim Durchdringen von Materie im wesentlichen durch Absorption und durch Streuung unter gleichzeitiger Abschwächung der Energie abgeschwächt. Je niedriger die Strahlenenergie, um so stärker überwiegt die Abschwächung durch Absorption und diese nimmt mit der Ordnungszahl der Atome zu. Bei höheren Strahlungsenergien überwiegt die Abschwächung durch Streuung, die in erster Linie von der Anzahl der Atome im durchstrahlten Volumen und damit von der physikalischen Dichte abhängt. Gleichmäßig auf beide Abschwächungsarten wirkt die Schichtdicke des durchstrahlten Gewebes. Diese sich überlagernden Effekte nutzt man bei der Darstellung von Organen und Geweben in der Medizin.

Natürlicher Kontrast

Die Unterscheidung nach der Dichte gelingt besonders dort gut, wo Körpergewebe von Lufteinschlüssen im Körper zu unterscheiden ist, wie z.B.

bei der Untersuchung der Lunge oder einer krankhaften Gasansammlung im Bauchraum. Entsprechend dem oben gesagtem verwendet man hier die Hartstrahltechnik mit einer Röhrenspannung oberhalb von 100 kV.

Geht es eher um die Darstellung von Skelettanteilen, die Kalzium (mit der Ordnungszahl 20 bzw. dem Atomgewicht 40) enthalten, wählt man eine niedrigere Aufnahmespannung im Bereich zwischen 70 und 50 kV, um einen guten Kontrast gegenüber dem Körperweichteilgewebe zu erhalten. Bei einer noch niedrigeren Aufnahmespannung im Bereich um 25 kV wird dieser Kontrasteffekt derart verstärkt, daß sich sogar die unterschiedliche mittlere Ordnungszahl von Fettgewebe, das im wesentlichen Wasserstoff und Kohlenstoff enthält, von sonstigem Körpergewebe, das schwerere Atome wie Sauerstoff und Stickstoff enthält, unterscheiden läßt. Dieses Verfahren findet in der Mammographie Anwendung.

Künstliche Kontrastanhebung

Reicht der natürliche Kontrast zur Abgrenzung der Organe und der Erkennung krankhafter Veränderungen nicht aus, so kann man den Kontrast durch negative, d.h. stärker strahlendurchlässige, oder positive, d.h. stärker schattengebende Kontrastmittel verstärken.

Als negatives Kontrastmittel eignet sich z.B. Kohlensäuregas, das in neueren Techniken in kleinen Mengen in Blutgefäße eingespritzt wird, um so diese darstellen zu können. Häufig verwendet werden positive Kontrastmittel, die es in zwei Arten gibt, nämlich als Barium-Verbindungen und als organische Iodverbindungen.

Barium als Ion ist hochtoxisch, als Bariumsulfatverbindung jedoch absolut unlöslich und daher ungiftig, aber auch nicht resorbierbar. Als feinstes Pulver in Wasser suspendiert eignet es sich zur Darstellung des Verdauungstraktes von der Speiseröhre über Magen und Dünndarm bis zum Dickdarm. Eine besonders gute Darstellung erlaubt der sog. Doppelkontrast, bei dem nach Füllung des zu untersuchenden Abschnittes mit Barium-Kontrastmittel der Magen-Darm-Kanal medikamentös kurzfristig ruhiggestellt wird und dieser Abschnitt zusätzlich mit Luft oder Kohlensäuregas aufgefüllt wird, so daß sich ein hauchdünner Kontrastmittelwandbeschlag um das entspannte und weit gefüllte gasgefüllte Hohlorgan legt und einen optimalen Doppelkontrast bildet.

Zur Darstellung anderer Organe eignen sich organische Iodverbindungen. So lassen sich z.B. durch Einspritzen in die Blutgefäße diese kontrastreich abbilden. Bei der intravenösen Verabreichung wird auch die Ausscheidungsfähigkeit dieses Kontrastmittels durch den Körper ausgenützt, so füllen sich die Hauptausscheidungsorgane, nämlich die Nieren und entsprechend die ableitenden Harnwege, gut mit Kontrastmittel. Andere Iodhaltige Kontrastmittel werden über die Galle ausgeschieden und lassen die Gallenblase und Gallenwege erkennen.

Auch für eine direkte Kontrastmitteleinbringung, z.B. in Fisteln und krankhafte sowie natürliche Hohlräume, eignet sich das Kontrastmittel. In aufwendiger Technik kann z.B. auch durch ein Endoskop vom Zwölffingerdarm aus eine Sonde in den Gallengang eingeführt werden und dieser mit Iodhaltigem Kontrastmittel angefüllt im Röntgenbild dargestellt werden.

Die Kunst des Radiologen besteht unter anderem darin, aus diesen mit den verschiedenen Techniken angefertigten Röntgenbildern zu erkennen, ob sich die Organe oder Gewebe normal darstellen oder krankhaft verändert sind.

2.2 Nuklearmedizin

Die nuklearmedizinische Diagnostik erlaubt eine Darstellung von Organen/Organsystemen oder Geweben bzw. darin enthaltener Krankheitsherde in Abhängigkeit von deren physiologischer bzw. krankheitswertig gestörter Funktion. Es werden dem Patienten Arzneimittel durch Injektion oder auch oral, d.h. durch Trinken, verabreicht, deren Verteilung im Körper, Anreicherung in bestimmten Organen, Geweben oder Krankheitsherden und deren Ausscheidung bekannt ist. Diese Arzneimittel werden dergestalt verändert, daß in deren chemischer Struktur einzelne Atome durch radioaktive Atome ersetzt oder solche zusätzlich eingefügt werden. Die von diesen Atomen ausgehenden ionisierenden Strahlen (Gammastrahlen) können von außen mit empfindlichen Meßinstrumenten in ihrer örtlichen und zeitlichen Verteilung gemessen und bildlich bzw. graphisch dargestellt werden. Diese Art der Messung wird Szintigraphie genannt. Bei der Szintigraphie trifft die Gammastrahlung auf einen Detektor, der die Energie dieser Strahlung in elektrische Signale umwandet, die je nach Meßaufgabe elektronisch weiterverarbeitet werden (verstärkt mittels sog. Photomultiplier, sortiert u.ä.) und für die Auswerteeinheiten (Zähler,

Rechner, u.ä.) im Hinblick auf Bildgebung bzw. graphische Darstellung aufbereitet werden.

Damit ist es möglich, nicht-invasiv, allenfalls mittels Injektion des geeigneten radioaktiven Arzneimittels, die Funktion einzelner Organe/Organsysteme bzw. deren krankhafte Veränderungen festzustellen, d.h. deren gestörte Funktion örtlich zu erfassen und bildlich bzw. graphisch darzustellen. Die Nuklearmedizin beinhaltet somit im wesentlichen das Prinzip der sog. abbildungsunterstützten Funktionsdiagnostik, d.h. die erstellte Abbildung eines Organs bzw. Organsystems läßt auch Aussagen zu dessen regionaler und globaler Funktion zu.

Zu den verschiedenen nuklearmedizinischen Anwendungen im einzelnen:

2.2.1 In-vivo und in-vitro-Meßplätze

Es handelt sich hier um Meßsysteme zur Ermittlung der Aktivität eines radioaktiven Stoffes im Körper (in-vivo-Meßsysteme) oder in Probenmaterial wie z.B. Blut, Urin (in-vitro-Meßsysteme). Diese Meßsysteme sind nicht den bildgebenden Systemen zuzuordnen.

Je nachdem, ob die Aktivität radioaktiver Stoffe in bestimmten Organen bzw. Körperregionen oder im gesamten Körper zu ermitteln ist, wird bei den in-vivo-Meßsystemen zwischen Organmeßplätzen und Ganzkörperzählern unterschieden.

Von großer Bedeutung war der Einsatz von in-vivo-Meßsystemen nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl zur Erfassung der Aufnahme in den Körper der damals im Vordergrund stehenden Cäsium- und Iodradionuklide.

Die in-vitro-Meßsysteme dienen zur Ermittlung der Aktivität von Radionukliden in Probenmaterial. So können z.B. nach Verabreichung geeigneter, nierengängiger radioaktiver Arzneimittel mittels aufeinanderfolgender Messungen von Blutproben wichtige Aussagen zur Nierenfunktion gemacht werden.

2.2.2 Bilderzeugende Systeme

Neben der globalen Messung der Radioaktivität bzw. der Radioaktivitätskonzentrationen in Organen, Körperregionen sowie im gesamten Körper

mittels Organmeßplätzen bzw. Ganzkörperzählern, wie oben beschrieben, kommt in der Nuklearmedizin für klinische Fragestellungen der räumlich differenzierten in-vivo-Messung von Radioaktivitätskonzentrationen weit mehr Bedeutung zu. Hier hat die Nuklearmedizin im wesentlichen folgende Entwicklungen durchlaufen:

Scanner

Beim Scanner bewegt sich eine Szintillationsmeßsonde (zum Prinzip der Szintigraphie siehe unter 2.2) zeilenförmig innerhalb eines einstellbaren Meßfeldes über dem Patienten, ähnlich der zeilenförmigen Abtastung in der Fernsehtechnik. Die Meßsonde, mit einem festgelegten, räumlich eng begrenzten Meßbereich, erfaßt zeitlich nacheinander alle Objektbereiche unterhalb des Meßfeldes, die dabei jeweils gemessenen Impulsraten werden dann in Form eines Bildes dargestellt. Das so entstehende Szintigramm wird meist in Form verschiedener Strichdichten und einer farbig abgestuften Intensitätsaufzeichnung dokumentiert (Colorscan).

Gamma-Kamera

Die Gamma-Kamera hat den Scanner weitgehend ersetzt und ist derzeit das am häufigsten benutzte bilderzeugende Gerät in der Nuklearmedizin. Im Gegensatz zum Scanner ermöglicht die Gamma-Kamera die gleichzeitige Erfassung von Gammastrahlen aus dem gesamten Organ- bzw. Körperbereich, von dem ein Szintigramm anzufertigen ist. Wegen der Gleichzeitigkeit der Erfassung bzw. Aufnahme der Gammastrahlung über dem gesamten Meßbereich können auch sich verändernde Radioaktivitätsverteilungen dargestellt werden. Damit ist die Möglichkeit gegeben, durch eine Serie von Szintigrammen auch schnell ablaufende Funktionsvorgänge in Organen bzw. Körperregionen bildgebend und graphisch darzustellen.

Den Strahlungsdetektor bildet meist ein scheibenförmiger, kreisrunder oder rechteckiger Kristall aus NaJ (Tl) als Szintillator, der dicht bestückt ist mit Photomultipliern. Eine umfangreiche sog. Kopfelektronik sorgt unter anderem für die räumliche Ortung sowie die Energieselektion der Strahlung und für die Stabilisierung der Multiplier-Verstärkung (X-, Y-, Z-Signale). Um die Abbildung der Verteilung von Radionukliden im zu messenden Bereich zu erreichen, ist dem Kristall ein Parallellochkollimator vorgeschaltet, damit möglichst nur achsenparallele Gammastrahlen

in den Kristall einfallen. Damit wird eine senkrechte Projektion der dreidimensionalen Aktivitätsverteilung im Meßbereich des Patienten in die zweidimensionale Kristallebene erreicht (Abb. 1).

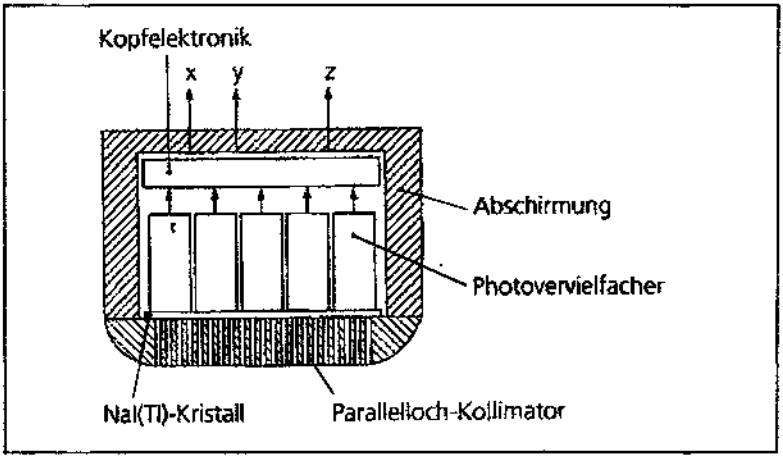

Abb. 1: ***Prinzipieller Aufbau des Meßkopfs einer Gamma-Kamera***
(aus: Büll, U. et al. (Hrsg.): Nuklearmedizin, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1994, S. 44)

Mit Einführung der Gamma-Kamera ist in Kombination mit zunehmend leistungsfähigeren EDV-Systemen eine abbildungsunterstützte Funktionsdiagnostik mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung möglich geworden.

Emissions-Computer-Tomographie (ECT)

Bei der Emissions-Computertomographie handelt es sich um ein nuklearmedizinisches Untersuchungsverfahren, mit dem Schnittbilder der Verteilung von Radionukliden im Organismus aufgenommen werden können, um mit gleicher Zielrichtung wie in der Röntgendiagnostik eine bessere Auflösung in der Bildgebung zu erreichen. Im Gegensatz zur Computertomographie in der Röntgendiagnostik (= Transmissionstomographie; s. unter 2.1.1) handelt es sich in der Nuklearmedizin um eine Emissionstomographie, d.h. es werden die von den inkorporierten Radionukliden ausgesandten (emittierten) Strahlen registriert.

Zwei verschiedene Methoden stehen zur Verfügung, die sog. SPECT (Emissions-Computertomographie mit Einzelphotonen, Messung der Gammastrahlen) und die PET (Emissions-Computertomographie mit Positronen; Messung der beim Positronenzerfall entstehenden Strahlung). Bei der SPECT hat sich die rotierende Gamma-Kamera (bis zu 3 Meßköpfe) durchgesetzt, bei der PET dominiert die ringförmige Konfiguration von Detektoren - bei beiden Systemen jeweils axial um die schichtweise abzubildende Körperregion.

2.2.3 Radioaktive Arzneimittel in der Nuklearmedizin

Als radioaktive Arzneimittel eignen sich Stoffe, deren Verteilung im gesunden oder krankhaft veränderten Körpergewebe bekannt ist. Bekanntestes Beispiel ist das Iod bzw. dessen Radioisotope, die sich bevorzugt in der Schilddrüse anreichern. Bestimmte Phosphonatverbindungen reichern sich im Knochengewebe an, Glukose wird bei physiologisch oder pathologisch gesteigerter Aktivität in allen Zellen vermehrt umgesetzt. Zur radioaktiven Markierung dieser Substanzen bzw. zum Einsatz per se eignen sich Radioisotope, die günstige strahlenphysikalische Eigenschaften wie u.a. eine ausreichend kurze Halbwertszeit haben, damit der Meßvorgang ausreichend gut durchgeführt werden kann bei einer gleichzeitig möglichst geringen Strahlenexposition des Patienten und der Umgebung. Der radioaktive Zerfall sollte als Gammastrahlung möglichst ohne Alpha- und Beta-Strahlung erfolgen, um die Strahlenexposition in den Zellen und Geweben gering zu halten, aber gleichzeitig eine Messung von außen zu ermöglichen. Der Energiebereich dieser Gamma-strahlung sollte einerseits so stark sein, daß der Strahlenschutz für die Umgebung kein Problem darstellt, andererseits die Abschwächung der Strahlung von dem zu untersuchenden Organ durch den Körper bis zum Meßgerät möglichst gering ist. Zudem sollten Radioisotope leicht in verschiedene Arzneimittel, also chemische Substanzen, einzubauen sein, ohne deren Struktur und damit pharmakologischen Eigenschaften zu verändern. Die für nicht-radioaktive Arzneimittel geltenden Randbedingungen (Pharmakologie, Toxikologie, arzneimittelrechtliche Bestimmungen u.ä.) gelten für radioaktive Arzneimittel sinngemäß ebenso.

Aufgrund der günstigen physikalischen Eigenschaften und der guten Verfügbarkeit mittels eines Generators hat sich das Isotop [^{99m}Tc] Technetium in der konventionellen nuklearmedizinischen in-vivo-Diagnostik als optimal herausgestellt und auch durchgesetzt. Bei PET-Untersuchungen, für

die die Entwicklung geeigneter radioaktiver Arzneimittel (Positronenstrahler) noch in den Anfängen steckt, findet bisher die [^{18}F] FDG zur Erfassung krankheitsspezifischer Veränderungen des Glukosestoffwechsels breite Anwendung, insbesondere bei onkologischen, neurologischen und kardiologischen Fragestellungen.

Mit Einführung der Emissions-Computertomographie in Verbindung mit neu entwickelten radioaktiven Arzneimitteln ist es möglich geworden, insbesondere mittels der PET Teilfunktionen des Körpers auch auf zellulärer bzw. molekularer Ebene bildgebend darzustellen.

2.3 Strahlentherapie

Wenige Monate nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen durch W.C. Röntgen erfolgten die ersten Mitteilungen über die Anwendung ionisierender Strahlung in der Therapie von Erkrankungen. So veröffentlichten Sjörgren und Steinbeck im Jahre 1899 einen Bericht über die Heilung eines Hautkrebses.

In der Strahlentherapie werden hauptsächlich unterschiedlich harte (=energiereiche) Röntgenstrahlen und γ-Strahlen sowie Elementarteilchenstrahlen (Elektronen und z.T. Neutronen) eingesetzt. Weniger Bedeutung haben bisher Elementarteilchen wie π-Mesonen und Protonen erlangt.

Die Bestrahlungsmethoden können einerseits nach dem Abstand zwischen Strahlenquelle und zu bestrahlendem Tumor und andererseits nach der Strahlenquelle eingeteilt werden:

Die **Radionuklidtherapie** nutzt die Möglichkeit, durch Wahl geeigneter radioaktiver Arzneimittel, d.h. mit offenen radioaktiven Stoffen, direkt in bzw. an der Tumorzelle zu bestrahlen. Als bekanntestes Beispiel sei hier das Radionuklid Iod-131 angeführt, das sich größtenteils im Schilddrüsengewebe anreichert und dort mit seiner β-Strahlung Tumorzellen vernichtet.

Bei der **Brachytherapie** werden umschlossene radioaktive Stoffe (Quellen) als Oberflächenkontakttherapie direkt auf die Haut aufgelegt, in natürliche oder künstliche Körperhöhlen eingeführt (intrakavitäre Kontakttherapie) oder als interstitielle Therapie, z.B. in Form von Drähten, operativ in das kranke Gewebe verbracht. Man verwendet hierzu Afterloading-Geräte für das sog. Nachladeverfahren. Dabei werden zunächst

spezielle Applikatoren intrakavitär (z.B. Uterus, Oesophagus) interstitiell (z.B. Prostata) oder auf der Haut plaziert. Dann werden radioaktive Quellen an den gewünschten Bestrahlungsort transportiert. Die radioaktiven Quellen werden in einem strahlensicheren Behälter des Geräts aufbewahrt und der Quellentransport erfolgt motorisch über Katheter, die an das Gerät und die Applikatoren angeschlossen sind. Nach Bestrahlungsende werden die radioaktiven Quellen in den Tresor des Afterloading-Geräts zurückgefahren.

Als sog. **Teletherapie** kann die Strahlenquelle auch aus größerer Entfernung wirken. Hierzu eignen sich unterschiedliche Bestrahlungsgeräte:

Röntgenbestrahlungseinrichtungen

Röntgenstrahlen haben nur eine geringe Eindringtiefe und entfalten ihre Hauptwirkung in der Haut, was zu Hautschäden führen kann, ohne eine ausreichende Dosis im tiefer liegenden Tumorgewebe zu erreichen. Die Röntgentherapie wird daher heute fast nur noch bei Hautkrankheiten eingesetzt.

Gammabestrahlungseinrichtungen

Die Strahlung wird bei diesem Gerätetyp nicht künstlich wie bei Röntgengeräten, sondern durch Radionuklide wie Kobalt-60 erzeugt. Da nur die Gammastrahlung eine größere Reichweite und Eindringtiefe besitzt, wird die zusätzlich entstehende, therapeutisch nicht erwünschte Alpha- und Betastrahlung durch entsprechendes Abschirmmaterial absorbiert. Das verwendete Radionuklid muß hochenergetische Gammastrahlung emittieren, eine hohe spezifische Aktivität bzw. eine entsprechend große Dosisleistung aufweisen und sollte aus ökonomischen Gründen eine möglichst lange Halbwertszeit haben. Diese Forderungen erfüllt vor allem Kobalt-60.

Nachteilig sind bei diesen Geräten der relativ große Quellendurchmesser und der dadurch bedingte allmähliche Dosisabfall am Feldrand (sog. Halbschatten).

Beschleunigereinrichtungen

Bei Beschleunigern werden Elektronen mit einer Anfangsenergie in eine Vakuumröhre eingespeist und dann je nach Gerätetyp in der Vakuumröhre beschleunigt.

Von medizinischer Bedeutung sind Teilchenbeschleuniger vom Typ des Kreisbeschleunigers (Betatron), des Linearbeschleunigers, des Elektronenzyklotrons (Mikroton) und des Neutronengenerators bzw. Isochronzyklotrons. Zahlenmäßig am weitesten verbreitet ist der Linearbeschleuniger.

Bestrahlungstechniken

Eine optimale Dosisverteilung zur Durchführung einer Strahlentherapie ist nur unter Einbeziehung aller technischen Möglichkeiten realisierbar. Es muß eine geeignete Bestrahlungstechnik gewählt werden, die zu der gewünschten Dosisverteilung führt, d.h. Vernichtung des Tumorgewebes bei höchstmöglichster Schonung des umgebenden gesunden Gewebes. So kann die Dosisverteilung wesentlich beeinflußt werden

- durch geeignete Wahl der Strahlenqualität
- durch geeignete räumliche Zuordnung einer oder verschiedenen Strahlenquellen zum Tumorgewebe während des Bestrahlungsvorganges unter Berücksichtigung des zwangsläufig miteinzubeziehenden bzw. mitbetroffenen Körpergewebes.

Bestrahlungsplanung

Die strahlentherapeutische Behandlung eines Patienten erfordert eine individuelle Planung, die im wesentlichen zwei Aufgabenbereiche, nämlich die medizinische und die physikalische Bestrahlungsplanung umfaßt. Wesentlich ist hierbei die interdisziplinäre Beurteilung der Tumorerkrankung unter Miteinbeziehung modernster bildgebender Untersuchungsverfahren, um so nach exakter Diagnostik des Tumorgeschehens sowie exakter Therapieplanung eine optimale Bestrahlung des Tumors zu erreichen.

3. Strahlenexposition

3.1 Konzept der effektiven Dosis

Der unterschiedlichen Strahlenempfindlichkeit der verschiedenen Gewebe des menschlichen Körpers wird mit Hilfe der sog. effektiven Dosis Rechnung getragen. Durch die Einführung dieses Dosiskonzeptes, das auch in die Röntgenverordnung und Strahlenschutzverordnung zur Festlegung der Dosis-Grenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen und der Bevölkerung Eingang gefunden hat, besteht die Möglichkeit, auch bei ungleichförmiger Bestrahlung eine risikorelevante Größe zu berechnen, in der unterschiedliche Strahlenexposition und Strahlenempfindlichkeit verschiedener betroffener Gewebe berücksichtigt werden können. Die effektive Dosis errechnet sich durch gewichtete Summierung der Organdosen unter Verwendung von organspezifischen Wichtungsfaktoren. Bei der effektiven Dosis handelt es sich um eine dosimetrische Größe, die für die Begrenzung des Risikos aus stochastischen Strahlenschäden (Krebs und genetische Effekte) entwickelt wurde.

Das Konzept der effektiven Dosis wurde zunächst für die Bewertung des Strahlenrisikos bei beruflich strahlenexponierten Personen entwickelt. Es wird aber inzwischen auch als einheitliche Berechnungsmethode für die Quantifizierung der Strahlenexposition von Patienten benutzt. Man hat damit die Möglichkeit, verschiedene Untersuchungsmethoden wenigstens bezüglich ihres relativen Strahlenrisikos vergleichen zu können.

Wenn die Zahlenwerte der effektiven Dosis für verschiedene Untersuchungen bekannt sind, kann auch die kollektive effektive Dosis für diese Untersuchungen für eine definierte Personengruppe angegeben werden. Das ist die Summe der effektiven Dosiswerte, die in einer betrachteten Gruppe oder der ganzen Bevölkerung eines Landes auftreten.

Die mittlere effektive Dosis wird ermittelt, indem die Summe der effektiven Dosiswerte, die in einer betrachteten Gruppe oder der ganzen Bevölkerung eines Landes auftreten, durch die Anzahl der untersuchten Personen geteilt wird.

3.2 Strahlenexposition für die Patienten

3.2.1 Röntgendiagnostik

Die Strahlenexposition der Patienten in der Röntgendiagnostik ist bei den meisten Untersuchungen gering. Schwierigkeiten ergeben sich bei der Angabe der Dosiswerte, da bei der Untersuchung bestimmter Organe die Dosis im Körper extrem ungleichmäßig verteilt ist, je nachdem ob die Organe vom Nutzstrahlbündel direkt getroffen werden oder außerhalb des Nutzstrahlfeldes liegen und wie weit sie davon ggf. entfernt sind. Unabhängig davon schwanken die Dosiswerte in Abhängigkeit von den Körpermaßen des Patienten, von der Schwierigkeit der Diagnosefindung im Einzelfall und von der angewandten Röntgentechnik bei gleichen Untersuchungen von Fall zu Fall erheblich und zwar im Bereich von bis zu 2 Größenordnungen. Es ist daher nicht möglich, für eine bestimmte Untersuchung genau anzugeben, welche Dosis der Patient erhalten hat. Zum Vergleich verschiedener Untersuchungsmethoden unter Anwendung ionisierender Strahlen oder radioaktiven Stoffe wird trotz aller Einschränkungen die effektive Dosis herangezogen. In der Tabelle 2 sind daher Dosiswerte als effektive Dosis für ganze Untersuchungen angegeben, die zum Teil nur einzelne Aufnahmen, zum Teil aber zahlreiche Aufnahmen und längere Durchleuchtungszeiten beinhalten. Röntgenaufnahmen der Zähne, der Extremitäten und des Brustkorbs sind nur mit einer geringen effektiven Dosis verbunden. Besonders hohe Dosiswerte ergeben sich bei der Computertomographie sowie bei den Gefäßdarstellungen einschließlich der interventionellen Radiologie, also etwa der Aufdehnung verengter Gefäße mit Ballonkatheter.

3.2.2 Nuklearmedizin

In Tabelle 3 sind effektive Dosen für die 11 am häufigsten durchgeführten nuklearmedizinischen Untersuchungsverfahren unter Berücksichtigung der in der ICRP 60 geänderten Wichtungsfaktoren aufgeführt. Es handelt sich hier um die 11 Untersuchungsverfahren, die in der Bundesrepublik Deutschland etwa 95 % der diagnostischen Anwendung offener radioaktiver Stoffe ausmachen. Die Angaben gelten für Erwachsene. Für Kinder und Jugendliche sind nach ICRP 53 höhere Dosiswerte und ein damit verbundenes 2 - 3fach höheres Strahlenrisiko anzusetzen.

Tabelle 2: Gerundete Mittelwerte der effektiven Dosis bei häufigen Röntgenuntersuchungen aus Messungen an Patienten

Organ/Untersuchung	Effektive Dosis (mSv)
Brustkorb	0,3
Gliedmaßen	0,06
Halswirbelsäule	0,2
Brustwirbelsäule	0,7
Lendenwirbelsäule	2,0
Becken	1,0
Hüfte	0,5
Schädel	0,03
Bauchraum (Übersicht)	1,2
Magen	9
Dünndarm	16
Dickdarm	20
Harntrakt	5
Schlagaderdarstellung	20
Venendarstellung (Bein)	2
Mammographie	0,5
Zahnaufnahme	0,01
Knochendichtemessung	0,001
Computertomographie-Kopf	2,5
Computertomographie-Brustraum	20
Computertomographie-Bauchraum	30
Computertomographie-Wirbelsäule	9

(aus: Umweltpolitik - Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 1994, Hrsg.: Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn, Januar 1997, S. 223)

Tabelle 3: Nach ICRP 60 auf der Grundlage von ICRP 53 berechneten effektiven Dosen für die 11 am häufigsten durchgeführten nuklearmedizinischen Untersuchungsverfahren

Untersuchung	Radiopharmakon	Aktivität (MBq)	Effektive Dosis in mSv (ICRP 60)
Schilddrüse	^{99m}Tc-Pertechnetat	50	1,0
Skelett	^{99m}Tc-Phosphonat	600	3,8
Myokard	^{201}Tl-Chlorid	75	17,5
RNG/Clearance	^{123}I-Hippuran	25	0,33
Lunge (Perfusion)	^{99m}Tc-Mikrosphären	100	1,1
Herzbinnenraum	^{99m}Tc-Erythrozyten	700	5,1
Niere statisch	^{99m}Tc-DMSA	40	0,39
Hirn	^{99m}Tc-HMPAO	500	9,0
Leber/Galle	^{99m}Tc-IDA	200	5,6
Tumor/Entzündung	^{67}Ga-Zitrat	200	24,4
Radioiodtest	^{131}I-Nal	3	91,0

(aus: Reiners, Chr.: Die Strahlenexposition in der nuklearmedizinischen Diagnostik - Risikovergleiche auf der Basis effektiver Dosen. Nucl.-Med. 1993, 32, 47-51)

Zur Veranschaulichung des mit einer medizinischen Strahlenexposition möglicherweise verbundenen Risikos bietet sich ein Vergleich der angegebenen effektiven Dosen, hier aus der nuklearmedizinischen Diagnostik, mit der effektiven Dosis resultierend aus der natürlichen Strahlenexposition unter Berücksichtigung ihrer Schwankungsbreite in der Bundesrepublik Deutschland an. Die 11 am häufigsten durchgeführten nuklearmedizinischen Untersuchungsverfahren lassen sich grob in 3 Kategorien einteilen:

- solche mit einer effektiven Dosis **bis zu 1 mSv** (entsprechend der unteren Grenze der natürlichen jährlichen Strahlenexposition),
- solche mit effektiven Dosen **zwischen 1 und 6 mSv** (Schwankungsbereich der jährlichen natürlichen Strahlenexposition) und

- solche mit effektiven Dosen **von mehr als 6 mSv** (obere Grenze der natürlichen jährlichen Strahlenexposition).

Zur ersten Gruppe mit effektiven Dosen bis zu 1 mSv zählen die nuklearmedizinischen Verfahren der Nierendiagnostik und die Schilddrüsenszintigraphie mit ^{99m}Tc-Pertechnetat.

Im Bereich mittlerer effektiven Dosen zwischen 1 und 6 mSv finden sich als nuklearmedizinische Untersuchungsverfahren die Perfusionsszintigraphie der Lunge, die Skelettszintigraphie mit ^{99m}Tc-markierten Phosphonaten, die Szintigraphie des Herzbinnenraums bzw. der großen Bluträume mit ^{99m}Tc-markierten Erythrozyten sowie die Funktionsszintigraphie des Leber/Galle-Systems.

Effektive Dosen oberhalb von 6 mSv ergeben sich bei der nuklearmedizinischen Diagnostik für die Hirnszintigraphie mit ^{99m}Tc-HMPAO (etwa 9 mSv) oder die Myokardszintigraphie mit ^{201}Tl-Chlorid (etwa 18 mSv).

Zusammengefaßt ergibt sich, daß die Strahlenexposition in der nuklearmedizinischen Diagnostik sich größtenteils innerhalb oder unterhalb der jährlichen Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition bewegt.

3.2.3 Strahlentherapie

Ziel der Strahlentherapie ist es, an den zu bestrahlenden Tumor eine möglichst hohe Dosis zu bringen, ohne das umgebende gesunde Gewebe dabei übermäßig zu schädigen. Gesundes menschliches Gewebe hat jedoch eine Toleranzdosis, d.h. eine Dosis, oberhalb derer nach einem bestimmten Zeitraum mit entsprechender Wahrscheinlichkeit irreparable Schäden auftreten können.

Die optimale Gesamtdosis im Tumorvolumen hängt sowohl von der Dosis-Effekt-Beziehung für die Tumorkontrollrate als auch der Nebenwirkungshäufigkeit ab. Beide sind von den Tumoreigenschaften und von der Bestrahlungstechnik abhängig. Es ist die Aufgabe prospektiver klinischer Studien, die optimale Gesamtdosis in einer bestimmten klinischen Situation zu finden.

Um in den Tumor eine ausreichend hohe Dosis zu bringen, ohne dabei das umgebende gesunde Gewebe übermäßig zu schädigen, werden verschiedene Taktiken angewendet:

Mit Hilfe von Planungscomputern wird die Bestrahlungstechnik und die daraus resultierende Dosisverteilung für die durchzuführende Strahlentherapie berechnet. Dabei werden die interessierenden Körperquerschnitte des Patienten mit ihren anatomischen Einzelheiten unter Anwendung moderner bildgebender Verfahren in den Planungscomputer einprogrammiert.

Ein weiterer wichtiger Faktor, um das Bestrahlungsziel zu erreichen, ist die Fraktionierung, d.h. die zeitliche Aufteilung der verordneten Gesamtdosis. Die Einzelfraktionen sind so gewählt, daß gesundes Gewebe sich während der Bestrahlungspause im Gegensatz zum Tumorgewebe wieder einigermaßen erholen kann. Erreicht werden soll, daß bei der nächsten Fraktion ein deutlich stärker vorgeschädigtes Tumorgewebe noch wirksamer bestrahlt wird.

Die meisten klinischen Erfahrungen wurden mit der konventionellen Fraktionierung gewonnen, d.h. 1,8 - 2,0 Gy pro Fraktion an 5 Bestrahlungstagen in der Woche bis zum Erreichen der verordneten Gesamtdosis.

Zur Strahlentherapie gehört auch die Therapie mit Radionukliden. Sie beinhaltet die Therapie mit offenen radioaktiven Substanzen. Diese reichern sich direkt in der Zelle an, z.B. bei der Radioiodtherapie oder werden in Körperhöhlen eingebracht, z.B. in die Pleura oder den Peritonealraum. Verwendet werden vor allem Alpha- und Beta-Strahler.

4. Nutzen und Risiko aus der medizinischen Anwendung

4.1 Röntgendiagnostik und diagnostische Nuklearmedizin

Das strahlenbedingte Risiko bei der Anwendung radioaktiver Stoffe oder ionisierender Strahlen in der diagnostischen Medizin kann nicht absolut gesehen werden, da es für den Patienten ein Nullrisiko nicht gibt. Es ist vielmehr stets zwischen Nutzen und Risiko abzuwägen. Das größte Risiko für den Patienten stellt eine nicht oder zu spät erkannte Erkrankung mit ihren Folgen dar.

Es ist grundfalsch, wie dies in letzter Zeit mehrfach getan wurde, aus der Anwendung von Röntgenstrahlen in der Medizin durch einfache Multiplikation mit den Risikofaktoren der internationalen Strahlenschutzkommission Krebstote in der Gesamtbevölkerung auszurechnen. Vielmehr sind medizinische, also röntgendiagnostische und nukleardiagnostische Maßnahmen immer auf eine Einzelperson, nämlich individuell auf einen Patienten, beschränkt. Bei diesem muß eine Diagnose gestellt werden, ohne die er nicht geheilt werden kann. Im Verhältnis zu dem von der Internationalen Strahlenschutzkommission in ihrer Veröffentlichung 60 (ICRP 60, 1991 bzw. 1993) angegebenen pauschalen Risikowert von 5 % Krebssterbewahrscheinlichkeit für 1 Sievert effektive Dosis fällt der Risikowert mit zunehmendem Alter erheblich ab und beträgt im Alter von 60 Jahren nur noch 2 % und ab 80 Jahre nur noch 0,5 %, also 1/10 des Mittelwertes. Dagegen ist das Risiko bei Kindern unter 10 Jahren etwa 3mal so hoch wie der angegebene Mittelwert.

Mehr als drei Viertel aller Röntgenuntersuchungen werden bei Patienten im Alter über 40 Jahren angefertigt und davon wiederum weit über die Hälfte bei Patienten im Alter über 65 Jahren. Besonders dosisintensive Maßnahmen, wie z.B. die interventionelle Radiologie, die vorwiegend die Behandlung von Gefäßkrankheiten beinhaltet, betreffen einerseits meist ältere Patienten und erübrigen andererseits risikoreiche Therapiemaßnahmen, wie z.B. Operationen oder machen eine Behandlung überhaupt erst möglich. Mit zunehmendem Alter sinkt, wie dargestellt, das Strahlenrisiko, während gleichzeitig das Risiko durch eine Operation einschließlich der Narkose ansteigt. Zudem werden gerade bei schwer- und schwerstkranken Patienten in den letzten Lebensjahren, -wochen und -tagen besonders viele und zum Teil dosisintensive Röntgenuntersuchungen durchgeführt. Dies sind Patienten, die wegen ihrer Erkrankung oder Verletzung eine kürzere Lebenserwartung haben als gesunde Patienten dieser Altersgruppe. Da ein strahlenbedingter Krebs eine bestimmte Latenzzeit hat, bis er sich auswirkt und tödlich verlaufen kann, kann er sich bei Patienten, die innerhalb von 5 - 10 Jahren nach der Röntgenstrahlenanwendung aus anderen Gründen sterben, nicht mehr auswirken.

Für den einzelnen Patienten eignet sich die effektive Dosis nicht, um ein Risiko abzuschätzen. Hier wären im Einzelfall sehr aufwendige Organdosisbestimmungen notwendig. Entscheidend ist vielmehr, daß in der Heilkunde auf Röntgenuntersuchungen und nuklearmedizinische Untersuchungen nicht verzichtet werden kann, und bei gewissenhafter Indikationstellung sowie einer Optimierung deren Durchführung das strahlenbe-

dingte Risiko für den einzelnen Patienten gegenüber dem Nutzen für seine Gesundheit sehr gering ist.

4.2 Strahlentherapie

In der Strahlentherapie muß angestrebt werden, daß der zu bestrahlende Tumor möglichst genau die therapeutisch erforderliche Strahlendosis erhält und das umgebende gesunde Gewebe möglichst geschont wird. Dies ist nur durch die Zusammenarbeit von Strahlentherapeuten und Medizinphysikern möglich. Ständige Qualitätssicherung und Kontrolle sind daher besonders in der Strahlentherapie von Bedeutung.

Für eine effektive Strahlentherapie werden naturgemäß ausreichend hohe Strahlendosen benötigt, so daß sich klinisch erkennbare Nebenwirkungen meist nicht vermeiden lassen.

Akute Strahlenfolgen treten innerhalb von Stunden bis mehreren Wochen auf. Als Allgemeinsymptome treten Übelkeit bis zum Erbrechen (sog. Strahlenkater) auf. Lokal bildet sich eine Rötung, z.T. auch ein Ödem im Bereich der Haut, des weiteren Ödeme innerer Organe mit entsprechenden Beschwerden wie Schluckbeschwerden, Halsschmerzen, Durchfälle oder Blasenentzündung. Ein Teil dieser akuten Strahlenwirkungen ist reversibel.

Ein anderer Teil führt zu chronischen Strahlenfolgen, die Wochen bis Monate bzw. Jahre nach Bestrahlungsende auftreten wie z.B. Hautpigmentierung, Geschwüre (Ulcera), Narben und Strikturen aber auch Fisteln im Bereich innerer Organe.

Neben diesen deterministischen Strahlenwirkungen, die auf das unmittelbar bestrahlte Gewebe beschränkt sind, können als weitere strahleninduzierte Spätfolgen auch stochastische Wirkungen auftreten. Dies können Zweittumore im Bestrahlungsgebiet aber auch außerhalb davon sein.

Sowohl akute wie auch chronische Strahlenfolgen sind in ihrem Ausmaß von der Größe des bestrahlten Volumens, dem Dosis-Zeit-Verhältnis, der Strahlenart, der Organsensibilität, individuellen Faktoren und zusätzlichen Therapieformen wie Hyperthermie, Radiosensitizer oder Zytostatika abhängig.

Angesichts der nicht unerheblichen Nebenwirkungen und Risiken der Strahlentherapie muß man sich deren Nutzen vor Augen halten. Ohne die

Strahlentherapie hätte ein Krebspatient in vielen Fällen eine sehr viel geringere oder überhaupt keine Chance, seine Erkrankung zu überleben. Tubiana (1992) gibt an, daß in Westeuropa und den USA von 100 Tumorpatienten 22 chirurgisch geheilt werden, 18 durch die Radiotherapie (allein oder als entscheidender Therapiefaktor) und 5 durch die Chemotherapie.

Bei der Bestrahlungsplanung kommt es daher wesentlich darauf an, entsprechend der Tumorerkrankung die technischen Möglichkeiten unter Berücksichtigung der verschiedenen biologischen Parameter optimal einzusetzen.

Die Bestrahlung gutartiger Erkrankungen wird mit sehr viel geringeren Dosen durchgeführt, ist aber trotzdem nicht risikofrei. Sie wird daher nur bei wenigen, ansonsten schlecht behandelbaren Krankheiten nach kritischer Indikationsstellung eingesetzt.

5. Verwendete Literatur

Bäuml, A.; Bauer, B.; Schwarz, E.-R.; Kaul, A.: Medizinische Diagnostik VIII - 5, S. 1 - 22. In: Wichmann, H.-E.; Schlipköter, H.-W.; Fülgraff, G. (Hrsg.). Handbuch der Umweltmedizin. Ecomed-Fachverlag, Landsberg a.L. 1992.

Büll, U. et al. (Hrsg.): Nuklearmedizin. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1994.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Umweltpolitik - Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 1994. Bonn, Januar 1997.

Dubben, H.-H. et al.: Strahlenbiologische Forschung - Eine Grundlage für Fortschritte der klinischen Radioonkologie. Röntgenpraxis 45, 309-316 (1992).

Hör, G.: Positronen-Emissions-Tomographie (PET) - Von der Forschung zur Klinik. Deutsches Ärzteblatt 90 [Heft 25/26], A1-1883-1889 (1993).

Empfehlung der Internationalen Strahlenschutzkommission 1990 (Deutsche Ausgabe): ICRP Veröffentlichung 60. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena 1993.

International Commission on Radiological Protection (ICRP): Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals, Publication No. 53. Oxford, Pergamon Press 1988.

Jacobi, W.: Die neuen Empfehlungen der internationalen Kommission für Strahlenschutz (ICRP). In: Strahlenschutz in Forschung und Praxis. Reiners, Chr.; Streffer, C.; Messerschmidt, O. (Hrsg.) 33, 139-55, G. Fischer, Stuttgart 1992.

Lindner, H.; Kneschaurek, P.: Radioonkologie. Schattauer Verlag, Stuttgart 1996.

Oberhausen, E. et al.: Technik der Nuklearmedizin, MTR-Lehrbuch, 4. Auflage. Deutscher Ärzteverlag, Köln 1990.

Ostertag, H.: Positronen-Emissions-Tomographie (PET). Phys. Bl. 48, No. 2, 77-83 (1992).

Reiners, Chr.: Die Strahlenexposition in der nuklearmedizinischen Diagnostik - Risikovergleiche auf der Basis effektiver Dosen. Nucl.-Med., 32, 47-51 (1993).

Richter, E.; Feyerabend, T.: Grundlagen der Strahlentherapie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1996.

Scherer, E.; Sack, H. (Hrsg.): Strahlentherapie - Radiologische Onkologie, 4. Auflage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1996.

Tubiana, M.: The role of local treatment in the cure of cancer. Eur. J. Cancer 12, 2061-9 (1992).

Winkel zum, K.: Nuklearmedizin, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1990.

Juri Kutlachmedov

Radioökologische Probleme der Tschernobyl-Katastrophe

Wiederherstellung und Gesundung des natürlichen und des landwirtschaftlichen Ökosystems. Effektivität von Gegenmaßnahmen[1]

Einleitend demonstrierte der Vortragende mit eindrucksvollen farbigen Bildern, wie infolge der Katastrophe ein nahe dem Kraftwerksgelände gelegenes Waldstück ("Roter Wald") vollständig abgetötet wurde. Es wurde abgeholzt und unter einer Sandschicht begraben, was sich, wie noch gezeigt werden wird, als Fehler erwies.

Vorgestellt wurde das 5 km vom Kraftwerk entfernte biologische Testgelände Burjakovka. Auf diesem Gelände werden Experimente zur Akkumulation und Abreicherung von Radionukliden durchgeführt, wobei es um die Auswahl von Pflanzen mit anomal hohen Akkumulationsfaktoren geht, um Möglichkeiten optimaler Phytodeaktivation von Böden zu erkunden. Begründet werden konnte dabei ein optimiertes System des Fruchtwechsels bei spezieller Behandlung des Saatgutes und vermehrter Zufuhr von Düngemitteln und Mikroorganismen in den Boden. Im Verlaufe von 4-5 Jahren konnte ein Dekontaminationsfaktor von 4 erreicht werden. Bei Grasböden, die nach dem Unfall nicht umgepflügt wurden, erwies sich ein maschinelles Abschälen der Rasenschicht von 1-5 cm Dicke als optimal.

Um die Vielzahl der radioökologischen Probleme infolge der Tschernobyl-Katastrophe weiter zu verdeutlichen, griff der Vortragende beispielhaft folgende heraus:

Der allgemeine Einfluß von Gegenmaßnahmen auf die Ökosysteme selbst kann erheblich größer sein als ihre spezielle Wirkung auf die Kontamination mit Radionukliden. Dies gilt besonders für die Anwendung aggressiver mechanischer Mittel der Dekontamination wie Bulldozer,

---

1 Zusammenfassung eines Vortrags vor der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 18. April 1996 (Redaktionelle Bearbeitung: K. F. Alexander und H. Abel)

Schaber, Grader usw. In der industriellen Zone des Kraftwerks wurden mit solchen Methoden etwa 800 temporäre Grabstätten für kontaminiertes Material angelegt, von denen bis heute unklar ist, wie weiter damit zu verfahren ist.

Ein langfristiges Problem stellt die Verschleppung von Radionukliden durch Wasserabfluß aus den kontaminierten Gebieten dar. Abschätzungen zeigen, daß ca. 40 % der Zuflüsse des Dnepr aus der 30-km-Zone um das Kraftwerk Tschernobyl stammen. Weitere 40 % kommen aus belorussischen und 20 % aus anderen Territorien. Trotz des ebenen Charakters der Landschaft in der kontaminierten Zone ist, in Abhängigkeit von der Größe der Frühlings- und Herbstüberschwemmungen, eine merkliche Radionuklidkontamination der überfluteten Gebiete und des Wassers im Raum von Pripjat, Dnepr und der gesamten Dnepr-Kaskade nicht auszuschließen. Um den Oberflächenabfluß von Radioaktivität zu reduzieren, wurden filtrierende Dämme an den kleinen Flüssen der Zone angelegt, was sich jedoch als wenig effektiv erwies. Erfolgreicher war der Bau des Deichs Krasnjanska-Wiese am Überschwemmungsland des Pripjat (1991) und die 1986 erfolgte Regulierung des Dnepr-Abflusses.

Ein besonderes Problem der Radioökologie von Großstädten stellte sich am Beispiel von Kiew. Mehrere Gegenmaßnahmen für diese Stadt wurden erfolgreich realisiert und haben eine erhebliche Reduzierung der individuellen und kollektiven Strahlungsdosen gebracht. Die drei wichtigsten Gegenmaßnahmen waren die Wasserbehandlung, die Beseitigung des stark radioaktiv kontaminierten Laubfalls und die Verschickung der Kinder während des Sommers.

Die aggressive Nutzung mechanischer Dekontamination durch Entfernung einer oberen Bodenschicht von 10 - 20 cm Dicke hat zur Entblößung von Sand und daraus resultierenden Staubstürmen geführt. Daher wurden verschiedene Methoden der Staubunterdrückung erforderlich. Insbesondere V. Blagoew hat folgendes System vorgeschlagen und realisiert: In die mit Wasser fixierte Sandoberfläche wurden Schilfsetzlinge gepflanzt und unter deren Schutz mehrjährige Gräser gesät, welche schließlich die nackten Sandflächen in der 10-km-Zone um das Kraftwerk fixiert haben.

Der Vortragende hob hervor, daß das niedrige Niveau der gegenwärtigen theoretischen Radioökologie die Wahl einer Strategie für Gegenmaßnahmen erheblich erschwert und viele Irrtümern bedingt.

Als wichtigste Lehre von Tschernobyl ist anzusehen, daß die Analyse radioökologischer Prozesse in großen Ökosystemen ohne eine seriöse theoretische Basis - eine quantitative Radioökologie - nicht möglich ist.

Im Institut des Vortragenden wurde auf der Grundlage von Vorarbeiten durch Agre und Korogodin, die bereits in den sechsziger Jahren im Laboratorium von Timofeeff-Ressovsky im Ural durchgeführt wurden, eine theoretische Methode entwickelt, um die Fähigkeit von Ökosystemen, eingetragene Radioaktivität dauerhaft und fest zu binden, d.h. ihre Radiokapazität, quantitativ zu bestimmen. Im einfachsten Fall eines Ökosystems, bestehend aus Wasser, Sediment und Biomasse, ist die Radiokapazität definiert als Quotient aus der Summe der im Sediment und in der Biomasse akkumulierten Radioaktivität zur im gesamten Ökosystem eingebrachten Radioaktivität. Mit zunehmender Biomasse bestimmt sie mehr und mehr allein die Radiokapazität des Systems, und in realen Fällen lassen sich für bestimmte Radionuklide Werte nahe 1 erreichen, d.h., daß diese Nuklide nahezu vollständig gebunden werden. Bei einer Kaskade solcher Systeme aus Wasser, Sediment und Biomasse mit geringer Strömung , wie es im Falle der Dnjepr-Kaskade (6 Stauseen) gegeben ist, erreicht die Radiokapazität z.B. für Cs-137 den Wert 0,9994.

Erste Testungen der Methode haben ihre Nützlichkeit bestätigt. So war es möglich, zur Verteilung von Cs-137 über die Dnjepr-Kaskade im Bodensediment und im Wasser vorauszusagen, daß der Hauptteil dieses Radionuklids im Schlick des Kiewer Reservoirs begraben werden wird. Insbesondere erlaubt diese Methode, diejenigen Teile eines Ökosystems auszuwählen, wo es notwendig erscheint, aktive Maßnahmen zur Dekontamination durchzuführen und, was besonders wichtig ist, ihre Effektivität im voraus zu bewerten.

An zwei Beispielen demonstrierte der Vortragende die Bewertungsmöglichkeiten von Maßnahmen auf der Grundlage der entwickelten Methode.

Das erste Beispiel betrifft das bereits einleitend erwähnte Vergraben des "Roten Waldes". Dies war eine radioökologisch und ökologisch äußerst ungünstige Lösung (darüber äußerte sich in einer Diskussion über diese Maßnahme Prof. F. Tichomirow schon 1986). Zunächst schien alles vollkommen korrekt: Die äußere Dosisleistung von 10 - 50 mGy / h auf einer Straße war sehr hoch, und es bestand Brandgefahr für den abgetöteten Wald. Die Beerdigung des Waldes reduzierte auch erwartungsgemäß die äußere Strahlenbelastung der Liquidatoren. Jedoch wurden hunderte von Kilocurie Radionuklide unter einer Sandschicht ohne die erforderliche

Abdichtung gegen Wasser vergraben. Das eine Problem der äußeren Strahlenbelastung wurde gelöst, aber es entstanden viel mehr neue Probleme wie die Zerstörung der Biomasse des Waldes und die langfristige Migration von Radionukliden im Grundwasser. Wird die Radiokapazität des Waldes nach der o.g. entwickelten Methode abgeschätzt, dann hatte sie auch nach dessen Absterben einen Wert von etwa 0,9, da ein Wald 90 % der eingetragenen Radioaktivität langfristig und fest in der Bodenschicht und anderen Elementen des Ökosystems bindet. Aber das Vergraben des Waldes zerstörte das Ökosystem mit der Folge einer starken Abnahme der Radiokapazität. Es ist heute offensichtlich, daß andere Lösungen besser gewesen wären, zum Beispiel die Verlagerung der am Roten Wald entlangführenden Straße und danach die allmähliche Herausnahme und kontrollierte Verbrennung der abgestorbenen Bäume. Die Beobachtung der Reste des Roten Waldes hat gezeigt, daß ein großer Teil der "verendeten" Kiefern noch Vitalität gerettet haben und Versuche machen, neue Triebe zu bilden und das Wachstum einzelner Zweige wiederzubeleben. Mit einer solchen Strategie wäre die Radiokapazität des Waldökosystems weitgehend erhalten geblieben und hätte eine kontrollierte Dekontamination ermöglicht..

Das zweite Beispiel betrifft den gleichfalls schon erwähnten Bau einer Anzahl von filtrierenden Dämmen an den kleinen Flüssen der kontaminierten 30 km-Zone. Für die Filtration des Überflutungswassers wurden Sorbentien zur Bindung der Radionuklide eingesetzt. Im Resultat dieser Gegenmaßnahme wurden jedoch zusätzliche Territorien (Wälder und Wiesen) überschwemmt, was zur Verminderung der Radiokapazität und Vergrößerung des Oberflächenabflusses führte. Die Fähigkeit der filtrierenden Dämme, Radionuklide zurückzuhalten, erwies sich als unbedeutend klein. Offensichtlich konnten die Sorbentien bei den hohen Strömungsgeschwindigkeiten des Flutwassers keine nennenswerten Mengen von Radioaktivität binden. Die Radiokapazität des gesamten Dammsystems erreichte nur Werte von 0,1 - 0,2. Eine Analyse vom Standpunkt des Konzepts der Radiokapazität aus zeigt, daß man anstelle der filtrierenden Dämme eine Kaskade von Miniteichen hätte anlegen sollen. Dann würde die Radiokapazität auf 0,8 - 0,9 ansteigen und es wäre möglich, ohne zusätzliche Überschwemmungen beträchtliche Mengen von Radionukliden in den Bodensedimenten dieser Miniteiche zu konzentrieren und dann kontrolliert abzutragen.

Als allgemeine Schlußfolgerung ergibt sich: Wenn eine Gegenmaßnahme sich auf die Erhöhung der Radiokapazität eines Ökosystems richtet, ist sie

in der Regel nützlich. Maßnahmen dagegen, die die Radiokapazität eines Ökosystems reduzieren, führen früher oder später zu einer Verschlechterung der radioökologischen Situation, selbst wenn sie in der ersten Phase nach dem Unfall nützlich waren.