

SOCIETE SUISSE DE PHYSIQUE
SCHWEIZERISCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT
SWISS PHYSICAL SOCIETY

STRAHLUNG UND MENSCH

ANWENDUNG UND WIRKUNG



Historische Aufnahme von W.C.RÖNTGEN (Physikalisches Institut Universität Würzburg)

SOCIETE SUISSE DE PHYSIQUE
SCHWEIZERISCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT
SWISS PHYSICAL SOCIETY

STRAHLUNG UND MENSCH

ANWENDUNG UND WIRKUNG

Verfasst im Auftrag der SPG von:

Prof. Dr. J.Th. Locher (Kantonsspital Aarau), Redaktion
Prof. Dr. J.P. Blaser (ETHZ und PSI Villigen)
Prof. Dr. H. Fritz-Niggli (Universität Zürich)
Prof. Dr. H. Loosli (Universität Bern)
Prof. Dr. J. Roth (Universität Basel)
Dr. H. Tschäppeler (Inselspital Bern)

Unter Mitarbeit von:

Prof. Dr. B. Larsson (Universität Zürich und PSI Villigen)
Prof. Dr. U.M. Lütolf (Universität Zürich)
Dr. B. Sartorelli (Universitätsspital Zürich)
Prof. Dr. P. Vock (Universität Bern)

Für die SPG:

Prof. Dr. W. Kündig (Universität Zürich)
PD Dr. H.J. Schötzau (ETHZ und AEW Aarau)

Verdankung:

Die Herausgabe dieser Broschüre wurde dank einer finanziellen Unterstützung durch die Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften (SANW) ermöglicht.

Sie ist zu beziehen bei:

Schweizerische Physikalische Gesellschaft
c/o Physikalisches Institut der Universität Zürich
Schönberggasse 9
8001 Zürich

Preis: Fr. 10.--

Vorwort

Mit der vorliegenden Broschüre über die Beziehungen des Menschen zu der ihn umgebenden Strahlung will die Schweizerische Physikalische Gesellschaft mit einer objektiven Information zu einer Versachlichung der Diskussion in der Öffentlichkeit beitragen.

Seit der Entstehung der Erde ist die Strahlung ein ganz wesentlicher Teil der Natur und auch deren Evolution. Die "Unsichtbarkeit" des grössten Teils der Strahlung für den Menschen liess ihn über Jahrtausende hinweg im Einklang mit ihr leben. Die rasante technische Entwicklung in diesem Jahrhundert hat dieses Verhältnis nachhaltig geändert.

Es ist unbestritten, dass die Strahlung - insbesondere die künstlich erzeugte Strahlung in der Medizin - für den Menschen von grossem oder sogar lebenserhaltendem Nutzen ist. Ebenso unbestritten bleibt, dass ein unsachgemässer Umgang mit Strahlung dem Menschen schaden kann. Wie so oft ist das Mass der den Menschen beeinflussenden Strahlung entscheidend. Es muss aber mit aller Deutlichkeit gesagt werden, dass der Mensch in vielen Bereichen die Vorteile der Technik - denken wir an das Auto - nutzt und deren Gefahren bei weitem nicht so emotional in der Öffentlichkeit diskutiert. Wenn diese Broschüre hier aufklären kann, dann hat sie ihren Zweck erfüllt.

Es ist der SPG ein grosses Anliegen Herrn Prof.J.Locher für seine grosse Arbeit zu danken. Er hat zusammen mit Prof.J.P.Blaser einen wesentlichen Anteil am Gelingen dieser Broschüre. Darüberhinaus möchten wir auch allen anderen Autoren für ihre Zusammenarbeit unseren Dank auszusprechen.

Préface

En publiant cette brochure sur l'homme et les radiations l'entourant, la Société Suisse de Physique aimerait faire mieux connaître les phénomènes physiques et biologiques y relatifs et ainsi contribuer à rendre plus objective la discussion publique de ces problèmes.

Les radiations ont joué un rôle central lors de la formation et au cours de l'évolution de notre planète. Ubiquitaires dans la nature, ces rayonnements ne sont toutefois pas accessibles à nos sens. Ainsi l'humanité a vécu dès ses origines en accord avec ces phénomènes invisibles; ce ne sont que les développements relativement récents de la science et de la technique qui nous les ont révélés.

Il ne fait aucun doute que l'application des rayonnements, en particulier de ceux créés par l'homme -les rayons X par exemple- ont amélioré de façon décisive les possibilités de la médecine. Il est non moins évident que les rayonnements à haute dose peuvent avoir des effets nocifs. Mais, comme dans d'autres domaines de la technique, le public a tendance à percevoir les dangers plutôt psychologiquement que sur des bases objectives. Ceci est particulièrement frappant et regrettable dans l'appréciation des dangers de la radioactivité d'une part et des risques tels que ceux du trafic automobile ou de la fumée d'autre part. Que cette brochure puisse aider le lecteur à mieux comprendre ces phénomènes et à peser plus objectivement bienfaits et dangers.

La Société tient à remercier le prof.J.Locher du grand travail de rédaction accompli. Il a, en collaboration avec le prof.J.P.Blaser et les autres auteurs, auxquels nous exprimons notre reconnaissance, essentiellement contribué à la réalisation de cette brochure.

Aarau/Zürich en décembre 1992

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Französische Kurzfassung (Résumé)	9
1 Geschichtlicher Überblick	13
1.1 Die Entdeckungen und Entwicklungen in der Physik	
1.2 Die Entwicklung der Anwendungen in Medizin und Biologie	
2 Physik der ionisierenden Strahlung, Radioaktivität	17
2.1 Vorbemerkungen	
2.2 Strahlungsformen bei radioaktiven Zerfällen	
2.3 Die radioaktiven Zerfälle	
2.4 "Radioaktive" Erscheinungen in der Natur	
2.5 Durch den Menschen erzeugte Radioaktivität und Strahlung	
2.6 Wechselwirkung von Strahlungen und Materie	
3 Strahlenbiologie	32
3.1 Strahlenbiologische Wirkungskette	
3.2 Strahlenpathologie	
3.3 Beurteilung eines Strahlenrisikos	
3.4 Wirkungen kleiner Dosen	
3.5 Wirkungen hoher Dosen	
3.6 Strahlenschutz, Dosis-Grenzwerte	
4 Epidemiologie	52
4.1 Einleitung	
4.2 Natürliche und zivilisatorische Strahlenexpositionen	
4.3 Radon und seine Zerfallsprodukte	
4.4 Reaktorkatastrophe von Tschernobyl	
5 Moderne medizinische Bildgebung	64
5.1 Überblick	
5.2 Diagnostische Verfahren	
5.3 Schlussbetrachtung	
6 Nuklearmedizin	79
6.1 Einleitung	
6.2 Wahl der Isotope	
6.3 Messtechnik	
6.4 Klinische Anwendungen	
6.5 Trends	
7 Therapie mit ionisierender Strahlung	95
7.1 Zum Krebsproblem	
7.2 Methoden und Aufgabe der Radioonkologie	
7.3 Entwicklung und heutiger Stand der Radiotherapie	
7.4 Zukünftige Entwicklungen in der Radiotherapie	
7.5 Entwicklungen in der Teilchentherapie	
7.6 Ausblick	
8 Messung der Strahlung, Masseinheiten, Abkürzungen	104

Résumé

1 Aperçu historique

Insensible aux radiations omniprésentes, l'être humain n'a découvert le phénomène de la radioactivité et des radiations associées qu'à la fin du siècle passé. Toutefois les applications des rayons X, découverts par RÖNTGEN en 1895, à des fins de diagnostic et de thérapie furent présagées immédiatement. Pourtant, ce n'est que le développement de la science de l'atome et de son noyau, domaine de la mécanique quantique, qui permet finalement de comprendre ces phénomènes cachés et d'initier, à partir du milieu de notre siècle, les importantes applications des radiations dans les domaines de la biologie et de la médecine. Cette évolution s'est basée sur les technologies développées dans le cadre des recherches en physique nucléaire: accélérateurs, physique et chimie des isotopes radioactifs, technique des détecteurs et électronique. Ce développement est actuellement en pleine évolution.

2 Physique des rayonnements ionisants; radioactivité

Les phénomènes nucléaires sont de grande importance dans la nature. Ils sont caractérisés par une énergie dépassant de beaucoup celle associée aux phénomènes mécanique, chimique et biologique. Le rayonnement est formé de particules (électrons (bêta), protons, particules alpha etc.) ou de rayonnement électromagnétique (rayons X, rayons Gamma). Beaucoup de noyaux sont radioactifs, c'est-à-dire instables et se désintègrent selon une loi exponentielle. Les éléments radioactifs naturels (l'Uranium p.ex.) sont produits par la formation d'éléments chimiques dans les étoiles de l'univers à la suite de processus thermonucléaires (fusion). La matière dont est faite notre planète et nous-mêmes provient de l'explosion de telles étoiles. De nombreux isotopes radioactifs à durée de vie limitée sont aujourd'hui produits par l'homme à l'aide d'accélérateurs ou dans les réacteurs nucléaires. Ce sont ces techniques ainsi que les connaissances détaillées acquises sur l'interaction des rayonnements avec la matière qui permettent actuellement en biologie et en médecine le grand nombre d'applications bénéfiques traités dans les chapitres suivants.

3 Radiobiologie

L'action des rayonnements divers (nature, énergie) sur la matière vivante est très complexe. Elle est à l'origine de toute une chaîne de phénomènes physiques et chimiques. L'action sur les cellules peut être d'interrompre momentanément leur développement ou alors de les détruire. Lorsque, d'autre part, une interaction a lieu dans le noyau cellulaire, les molécules porteuses du

code génétique (DNA) subissent des modifications pouvant mener à des mutations héréditaires. La radiobiologie a montré l'existence, dans un organisme, de mécanismes réparateurs très efficaces. Ceux-ci dépendent toutefois fortement de la nature du rayonnement (densité d'ionisation), de son application dans le temps et de la distribution dans l'organisme. Ainsi, la radiobiologie est à la base des applications radiothérapeutiques. Ces mêmes phénomènes déterminent et permettent de prévoir les risques provenant d'irradiations médicales, ou accidentelles lors de l'utilisation d'armes nucléaires ou d'accidents de réacteurs. Il importe de distinguer les risques concernant l'individu de ceux affectant un collectif ou même des populations entières. Les mêmes raisonnements mènent à fixer les normes de la radioprotection.

4 Epidémiologie

L'étude des effets du rayonnement vise avant tout l'incidence des diverses formes de cancer. Malgré le fait établi que les rayonnements peuvent avoir un effet cancérigène, la mortalité due au cancer est très différente selon les régions du monde et subit de grandes variations dans le temps (p. ex. cancer des poumons dû à la fumée). L'épidémiologie part des divers rayonnements auxquels une population est exposée: rayonnements naturels des rayons cosmiques, des isotopes radioactifs naturels dans notre corps et dans la matière nous entourant (p.ex. le radon émanant du sol), ainsi que les rayonnements 'normaux' de notre civilisation (diagnostique médicale avant tout) et finalement les rayonnements accidentels (Hiroshima, Chernobyl). Sur cette base on cherche à établir une relation entre 'exposition' et incidence du cancer. Ceci est compliqué par l'intervalle généralement long entre la cause et l'effet. Des estimations prospectives forment la base des mesures préventives. De façon générale, on a tendance à fortement exagérer l'influence des rayonnements nucléaires sur l'incidence du cancer.

5 Radiographie et les nouvelles méthodes digitales

La démonstration du fait par RÖNTGEN, que l'on peut 'voir' à l'intérieur du corps vivant fut la base du développement de la radiographie photographique et de la radioscopie vers une méthode essentielle de la diagnostique. Mais c'est l'avènement des techniques électroniques et des ordinateurs qui permit de compléter les méthodes photographiques par l'imagerie digitale, donnant accès à une véritable vision spatiale tout en permettant de réduire énormément les doses de rayonnement. En même temps une discrimination beaucoup plus fine des divers tissus, tels que les vaisseaux sanguins (angiographie) à l'aide de substances contrastantes devint possible. De nouveaux effets physiques furent rapidement appliqués: la propagation des ultrasons (sonographie) permettant même la détection du flux sanguin. Mais c'est en particulier la découverte de la résonance magnétique nucléaire qui mena ces

dernières années à une véritable révolution de l'imagerie diagnostique. Cette méthode permet de discerner en détail des structures internes pratiquement invisibles aux rayons X. Grâce à la spectroscopie, elle se développe aussi en direction de l'analyse de processus biologiques.

6 Médecine nucléaire

Un isotope radioactif se comporte chimiquement exactement comme un atome normal. Il est donc possible d'introduire une substance marquée par un élément radioactif dans le métabolisme et d'observer l'évolution dans le temps et sa localisation. La détection se fait par l'observation des rayons Gamma dans des systèmes de plus en plus élaborés et permettant une vue spatiale. Ceci permet p.ex. de diagnostiquer des troubles dans la ventilation et perfusion dans les poumons ainsi que la fonction du coeur et des reins. La scintigraphie révèle souvent des affections cancéreuses. La méthode la plus récente (PET, tomographe à positrons) permet de localiser les traceurs d'éléments organiques naturels (C,N,O) à l'aide du rayonnement d'annihilation et d'étudier en particulier leur métabolisme dans le cerveau. Les techniques thérapeutiques de la médecine nucléaire emploient des doses radioactives suffisamment fortes pour produire des effets dans l'organe où se concentre la substance; l'exemple de l'iode dans la thyroïde est bien connu. L'infrastructure nécessaire à la médecine nucléaire est lourde et se limite aux hôpitaux. En effet, la production des radionuclides se fait avec des accélérateurs ou dans des réacteurs, et la fabrication de substances radiopharmaceutiques nécessite des laboratoires de radiochimie.

7 La radiothérapie

Près de la moitié des cas de cancer peuvent être guéris, avant tout par la chirurgie et la radiothérapie. Malgré tout, le cancer représente la cause de mortalité pour environ un tiers de la population. L'amélioration des méthodes de traitement est de grande importance. Le but est de détruire toutes les cellules d'une tumeur par le rayonnement, ce qui est difficile sans atteindre à la fois les tissus sains. Les rayons X utilisés dès leur découverte pénètrent insuffisamment. C'est pourquoi le développement est allé vers l'emploi d'énergies croissantes et l'application de faisceaux d'électrons en plus des photons (rayons Gamma). L'installation la plus utilisée est actuellement l'accélérateur linéaire d'énergie de l'ordre de 10 MeV. De façon à favoriser le rétablissement du tissu sain, l'irradiation est appliquée en doses successives. Actuellement de nouvelles méthodes cherchent à utiliser des particules plus lourdes (protons, pions, ions lourds) afin de mieux limiter la zone irradiée à la tumeur et à mettre à profit l'action biologique spécifique de ces particules.

Annexe: Mesure des radiations, unités

L'interaction du rayonnement avec la matière dépend de façon extrême de la masse et charge d'une particule et de son énergie. Lorsque la source est un élément radioactif, son 'activité' se mesure en 'Becquerel' (nombre de désintégrations par seconde). La dose physique d'un rayonnement se mesure à l'aide de compteurs divers et est exprimée en 'Gray', l'énergie déposée. Celle-ci engendre dans les tissus vivants une série complexe d'effets chimiques et biologiques que l'on mesure par une dose biologique dont l'unité est le 'Sievert'. Cette grandeur tient compte de la réaction fort différente de chaque tissu à une dose donnée. Lorsqu'il s'agit d'évaluer l'action du rayonnement sur un organisme entier, ce qui est nécessaire pour la radioprotection, il importe de définir des doses biologiques effectives.

1 Geschichtlicher Überblick

1.1 Die Entdeckungen und Entwicklungen in der Physik

Noch selten in der Geschichte der Menschheit haben Entdeckungen aus der physikalischen Welt so schnelle und bedeutungsvolle Entwicklungen im Bereich der biologischen und medizinischen Wissenschaften in Gang gebracht wie die bald hundertjährigen Entdeckungen von RÖNTGEN (1895), BECQUEREL (1896) und MARIE CURIE, welche 1903 das erste chemisch isolierte radioaktive Isotop nach ihrer Heimat Polonium nannte. Damit nahmen die heute so wichtige Radiologie mit ihren diagnostischen und therapeutischen Methoden, ebenso wie die Radiobiologie ihren Anfang.

Der Mensch, ohne Sinne für Signale aus der verborgenen, aber allgegenwärtigen nuklearen Welt, blieb ohne die geringste Ahnung von Vorgängen, welche entscheidend Entstehen und Schicksal unserer Welt bestimmen. So erklärt sich die ungeheure Sensation, als RÖNTGEN die Knochen im Innern des Körpers sichtbar machen konnte (Titelseite). Diese Entdeckung war die Krönung einer langen Reihe von Forschungsarbeiten über die elektrischen Vorgänge in Gasen, eine in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts wichtige Richtung der Physik.

Die Arbeiten von RÖNTGEN fanden in der Schweiz ein besonderes Echo und führten hier zu einer schnellen Entwicklung dieser neuen Methoden. In der Tat hatte er nach seinem Studium an der ETH (vorher als Maschineningenieur) und seinem Doktorat in Physik an der Universität Zürich eine enge Beziehung zu unserem Land behalten und hatte zahlreiche Freunde und Kollegen in der Schweiz. (Siehe dazu das interessante Jubiläums-Buch von C. Wieser et al. "75 Jahre Radiologie in der Schweiz", Verlag H. Huber, 1989).

Die erwähnten, wegweisenden Entdeckungen gingen einher mit einer neuen Einsicht in die *Natur der Materie*. Obwohl die Existenz von Atomen durch die Entwicklung der Chemie und der Theorie der Wärme im letzten Jahrhundert offensichtlich wurde, war man damals noch ohne Vorstellungen über ihre innere Struktur, so dass ihre wirkliche Existenz sogar noch bis in unser Jahrhundert hinein vielfach umstritten war. Entscheidend waren der Nachweis durch THOMSON (1896), dass das Elektron ein Teilchen und Träger der Elementarladung ist. Schliesslich gelang es VON LAUE (1905), die wahre Natur der neu entdeckten Röntgenstrahlen als elektromagnetische Wellen zu erkennen.

Der Weg zum Verständnis der Materie und seiner atomaren Struktur war gebahnt. Eine wichtige Etappe war auch die Klärung des unerwarteten Zusammenhangs zwischen Radioaktivität und Chemie durch MARIE CURIE (Änderung des chemischen Elementes bei radioaktiven Prozessen). Im Jahrzehnt 1910-20 führte RUTHERFORD dann die entscheidenden Experimente zur inneren Struktur des Atoms durch (äusserst kleiner Kern als Träger der Atommasse, im Zentrum

der Elektronenhülle) und entdeckte die Kernreaktionen. In den 20er Jahren folgte das theoretische Gebäude der die atomare Welt bestimmenden Quantenmechanik durch u.a. DE BROGLIE, BOHR, SCHRÖDINGER, HEISENBERG, PAULI. Als weiterer Schritt, der für die Entwicklung der Radiologie massgebend war, folgte schliesslich in den 30er Jahren die Entdeckung des *Neutrons* (CHADWICK) und der Nachweis der Existenz von *Antimaterie* durch die Entdeckung des *Positrons* (ANDERSON). Ebenso wichtig waren die neuen Arbeiten auf dem Gebiet der Chemie, welche zu neuen Erkenntnissen über Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten der radioaktiven Isotopen führten (SODDY, VON HEVESY). Schliesslich ermöglichten die Fortschritte der *Beschleuniger-Technik* (COCKROFT, WALTON, WIDERÖE, LAWRENCE) immer höhere Energien zu erreichen und damit die volle Entwicklung der Kern- und Teilchenphysik und deren Anwendungen.

1.2 Die Entwicklung der Anwendungen in Medizin und Biologie

Diese grundlegenden Entwicklungen in der Physik, gepaart mit grossen Fortschritten der Technik, ermöglichten erst die vielen neuen Anwendungen in der Biologie und Medizin, von denen in den folgenden Kapiteln berichtet wird. Die neuen Erkenntnisse der Physik wurden sehr schnell und mit Begeisterung aufgenommen und sofort angewendet. Die anfängliche Unkenntnis über die Wirkung der Strahlung auf biologische Systeme führte neben Erfolgen auch zu einer Reihe von Schädigungen durch die Strahlung. Diese trafen oft die Forscher selbst, welche damals ohne Rücksicht auf ihre Gesundheit Erkenntnisse auf diesen neuen, so aufregenden Gebieten suchten.

Schon 1896, anlässlich der legendären Tagung der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft in *Würzburg* hatte Röntgen selbst die Hoffnung ausgedrückt, die Medizin möge die sich bietenden neuen Möglichkeiten nutzen. Die Frage, ob die neuen Strahlen neben dem "Durchleuchten" des Körpers auch das Wachstum lebensbedrohlicher Tumoren zu hemmen vermöchten, war gestellt. Bereits 1896 fanden in Amerika erste Krebsbestrahlungen statt und 1899 berichteten STENBECK sowie SJOEGREN über erste Heilungserfolge bei Krebsgeschwüren nach zum Teil über hundert Bestrahlungen mit Röntgenstrahlen. Eine grosse Zahl von Röntgen-Instituten wurden in den folgenden Jahrzehnten in der ganzen Welt geschaffen, doch erst in den dreissiger Jahren wurde die Radiologie als selbständiges medizinisches Fach anerkannt. In der Schweiz ist diese Entwicklung überall intensiv mitverfolgt worden, wobei mit SCHINZ (Zürich) nur ein herausragender Name genannt sei.

Mit der Entwicklung neuer Techniken mit radioaktiven Isotopen nahm eine weitere Richtung Gestalt an: die *Nuklearmedizin*, welche bald auch zum Lehrfach wurde. Diese baut auf die gleichzeitig weiter entwickelten Methoden der *Radiochemie* und *Radiopharmazie* auf.

In der *diagnostischen Radiologie* wurde die Entwicklung im wesentlichen durch die Fortschritte der Technologie geprägt, so durch immer bessere Röntgenröhren mit schärferem Brennfleck. Ferner gestatteten es die neu aufgekommenen elektronischen Bildverstärker die bis dahin relativ hohe Dosis bei Röntgenuntersuchungen drastisch zu senken. Ein dramatischer Schritt zur echten räumlichen Darstellung gelang in neuerer Zeit mit der *Computer-Tomographie* (Medizin-Nobelpreis 1979 an CORMACK und HOUNSFIELD). Zur bildgebenden, aber vor allem auch funktionellen Diagnostik führt schliesslich die neueste Methode aus der Nuklearmedizin, der *Positronemissions-Tomograph (PET)*. Bei diesem werden Positronen aussendende Radioisotope verwendet, welche die genaue Lokalisierung durch die bei der Annihilation emittierten Gammastrahlen gestatten. Diese radiologischen Methoden wurden schliesslich ergänzt durch *Ultraschall* und insbesondere die *Kernspin- (oder Magnet) Resonanz -Tomographie*.

In der *Radiotherapie* wurde schon sehr früh, zusätzlich zur Bestrahlung von Tumoren mit Röntgenstrahlen, auch die lokale Implantation von radioaktiven Präparaten versucht (Curie-Therapie, damals mit Radium). Diese Methode wird heute noch in gewissen Fällen angewandt. Bei der Bestrahlung hat ebenfalls die Technologie weitgehend den Fortschritt ermöglicht, insbesondere indem die Energie der Strahlung so erhöht werden konnte, dass auch tief liegende Tumoren behandelt werden konnten. Besonders grosse Schritte waren die *Kobaltgeräte*, welche die MeV-Gammastrahlung des mit dem Kernreaktor gewonnenen Radioisotop ^{60}Co benützen, sowie die Einführung des *Betatrons*, das neben hochenergetische Gamma als auch erstmals den direkten Einsatz von Elektronenstrahlen im Bereich von 10-20 MeV und darüber eröffnete. In dieser Entwicklung hat die Schweiz eine besonders aktive Rolle gespielt (WIDERÖE, BBC, SCHINZ). Die moderne Beschleunigertechnik aus der Teilchenphysik lieferte schliesslich das heutige Routinegerät der Radiotherapie: den *Linearbeschleuniger* für Elektronen (LINAC, Abbildung 7.3).

Die Entwicklung ist heute weiter in vollem Gang in Richtung der Benützung von schwereren Teilchen, welche eine viel genauere Dosisdeposition bei tiefliegenden Tumoren erlaubt, und damit die Heilungschancen verbessert. Genutzt werden dabei auch teilweise die spezifischen Eigenschaften von Teilchen (hohe biologische Wirkung durch starke Ionisation). Als Beispiele seien erwähnt: Neutronen, Pionen, Protonen, schwere Ionen und Bor-Einfang von Neutronen. Auch in dieser Richtung ist die Schweiz mit an der Front der Entwicklung.

Parallel zu diesen auf medizinische Anwendungen zielenden Entwicklungen versuchten die Biologen die neuartigen Prozesse, welche durch Strahlung in lebenden Geweben ausgelöst werden, grundsätzlich zu verstehen. Die *Radiobiologie* entstand. Diese Erkenntnisse gestatteten auch das Problem der Schädigung durch ionisierende Strahlen zunehmend wissenschaftlich zu verstehen und genau zu erfassen; damit wurde es möglich entsprechende Sicherheitsnormen aufzustellen. Dies geschah erstmals 1913 in einem "Merkblatt der Deutschen Röntgengesellschaft" und ist seither auf internationaler Basis weiterentwickelt worden. Heute sind auf diesem Gebiet, dem *Strahlenschutz*, zwei internationale Komitees massgebend (ICRP und ICRU, International Committee on Radiation Protection resp. Radiological Units). Die Aufgabe ist schwierig, gilt es doch sowohl direkte Schädigungen, wie auch kollektive Einflüsse auf grosse Bevölkerungsgruppen zu berücksichtigen, wobei auch genetische Veränderungen einzubeziehen sind. Voraussetzung dazu sind genaue Messmethoden für die verschiedenen Strahlungsarten: die *Dosimetrie*. Auch hier sind erst in den letzten Jahrzehnten wirklich zuverlässige Techniken entwickelt worden.

2 Physik der ionisierenden Strahlung, Radioaktivität

2.1 Vorbemerkungen

In der Natur sind nukleare Vorgänge allgegenwärtig und von grosser Bedeutung. Ohne sie würde die Sonne nicht scheinen. Die Materie, aus denen die Berge gemacht sind, ebenso wie die Elemente, aus denen wir selbst bestehen, sind in früheren Sternen durch nukleare Prozesse entstanden. Diese Prozesse zeichnen sich durch hohe Energieumsätze aus und sind mit Strahlung von Teilchen und elektromagnetischen Wellen sowie diversen Prozessen der Radioaktivität verbunden. Da wir Menschen (und generell die Lebewesen) keinerlei Sinnesorgane besitzen, die über solche Vorgänge informieren, ist die Erkenntnis darüber erst jüngerer Datums. Die Kenntnis ist auch nur abstrakt und nicht gefühlsmässig erfassbar. Diesem allgemeinen Mangel an Wissen und der in den letzten Jahren erfolgten Dramatisierung der Gefahren möchte diese Broschüre durch sachliche Information begegnen.

Die im historischen Überblick skizzierten Entwicklungen führten etwa Mitte dieses Jahrhunderts zu einem vollständigen Bild der vielfältigen Erscheinungen im nuklearen Bereich. Dieses grundsätzliche Verständnis, die experimentellen Methoden und technischen Hilfsmittel zur Erzeugung und Messung von Radioaktivität, bildeten die Basis der beeindruckend schnellen Entwicklung der Anwendungen in der Medizin. Die Bedeutung und der heutige Stand diverser Methoden wie strukturelle und funktionelle Diagnostik, Strahlentherapie, Nuklearmedizin und Radiopharmazie sowie die Radiobiologie werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.

2.2 Strahlungsformen bei radioaktiven Zerfällen

Sie tritt in vielfältigen Formen auf, welche sehr unterschiedliche biologische Wirkungen haben können. Gemeinsam ist ihnen die grosse Energie pro Elementarteilchen oder Quantum, welche weit über den Energien der chemischen Bindungen (Bereich eV) oder den für das Atom typischen Quantenzuständen (10 eV - 100 keV) liegt. Dadurch ist die Strahlung nicht nur in der Lage, chemische Veränderungen zu bewirken, sondern auch zu ionisieren. Der letztere Prozess, bei dem Elektronen aus der Atomhülle entfernt werden, wobei selbständige Ladungen (positives Atom-Ion und Elektronen) entstehen, ist für die biologische Wirkung wichtig.

Als *Teilchenstrahlen* bezeichnet man Bündel von Teilchen, die durch ihre grosse Energie Materie zu durchdringen vermögen und dabei eine ungefähr definierte Richtung und Reichweite haben. In erster Linie sind es Teilchen, welche Bestandteile des Atoms sind:

- Elektronen, Protonen, Neutronen, Alphateilchen (Heliumkerne), oder schwerere Ionen.

- Es können aber auch instabile Teilchen sein, so Müonen in der kosmischen Strahlung oder Pionen, wie sie zur Krebstherapie eingesetzt werden.

Die *elektromagnetische Strahlung* zeigt bei Emission und Absorption ihre Quantennatur. Dieses Quant oder *Photon* der Frequenz ν von Licht, Röntgen- oder Gammastrahlung besitzt die Energie $E = h\nu$ (h ist die Planck'sche Konstante). Bei hohen Energien dominiert der "Teilchencharakter" zunehmend die Wellennatur der Photonen.

Der Energiebereich ist gewaltig:

- in der natürlichen Radioaktivität keV - MeV ($10^3 - 10^6$ eV)

- durch die Technik der Beschleuniger MeV - GeV - TeV ($10^6 - 10^9 - 10^{12}$ eV)

- in der kosmischen Strahlung, mit abnehmender Häufigkeit, bis 10^{20} eV (bei dieser Energie hat ein einzelnes Proton die mechanische Wucht eines scharfen Tennisballs!)

Man kann daher einzelne Teilchen oder Quanten, so verschwindend klein sie an und für sich sind, einzeln auf ihrer Bahn verfolgen, sie individuell in Detektoren nachweisen und so auch den genauen Ort ihrer, z.B. biologischen, Wirkung ausmachen.

2.3 Die radioaktiven Zerfälle

Die Kerne der Atome bestehen aus Protonen und Neutronen (Nukleonen). Sie sind durch die Kernkräfte sehr stark gebunden, wobei sich diese Bindungsenergie nach der Relativitätstheorie in der Kernmasse als ein Massendefekt manifestiert. Nur ein gewisses Verhältnis von Protonen zu Neutronen führt zu einer maximalen Bindung und damit zu stabilen Kernen, wie wir sie aus den Elementen in der Chemie kennen. Kerne ausserhalb dieses Stabilitätsbereiches sind radioaktiv, d.h. sie verwandeln sich durch Emission von Teilchen in andere, die stabiler sind (Abbildung 2.1)

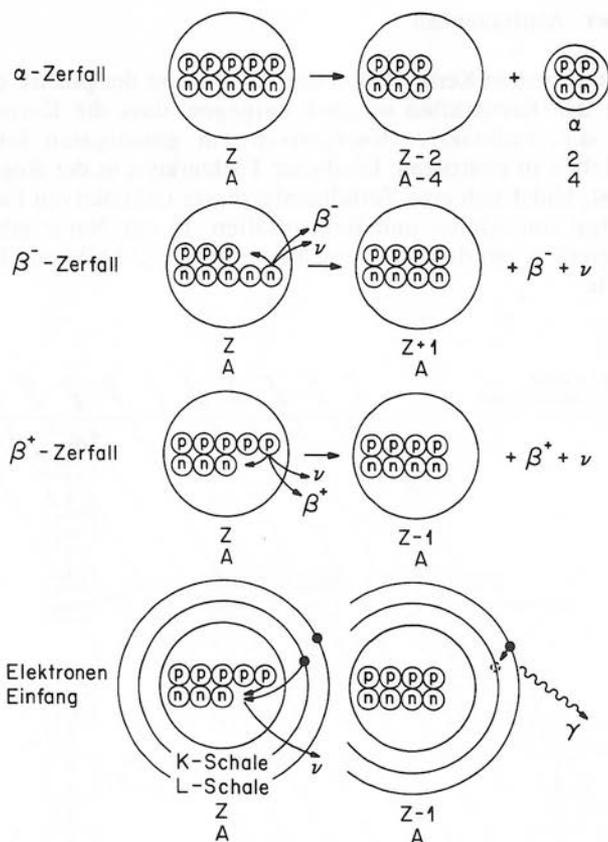


Abbildung 2.1: Radioaktive Zerfallsarten

Man beobachtet im wesentlichen fünf solche Prozesse:

- 1) Bei sehr schweren Kernen, Emission von ${}^4\text{He}$ Kernen, α -Zerfall genannt,
- 2) Bei Neutronenüberschuss, Emission eines Elektrons, β^- -Zerfall genannt,
- 3) Bei Protonenüberschuss, Emission eines positiven Elektrons (Positron als Antiteilchen des Elektrons), β^+ -Zerfall,
- 4) in Konkurrenz zum β^+ -Zerfall: Elektronen-Einfang,
- 5) Emission von elektromagnetischen Strahlungsquanten zwischen Quantenzuständen der Kerne, γ -Zerfall genannt.

Historisch wurden die Prozesse 1,2 und 5 vor bald hundert Jahren entdeckt. Der Fälle 3 und 4 konnten erst viel später bei künstlich (mit Beschleunigern) erzeugten Nukliden beobachtet werden.

2.3.1 Der Alphazerfall

Bei schweren Kernen wirkt die Abstossung der positiv geladenen Protonen den Kernkräften so stark entgegen, dass die Kerne instabil werden, d.h. radioaktiv. Energetisch am günstigsten ist es, ein Alphateilchen zu emittieren. Da dieser Tochterkern in der Regel wieder instabil ist, bildet sich eine Zerfallsreihe dieser radioaktiven Familie mit einer Folge von Alpha- und Betazerfällen. In der Natur gibt es drei solche Familien mit den Ursprungskernen ^{238}U (Abbildung 2.2), ^{235}U und ^{232}Th .

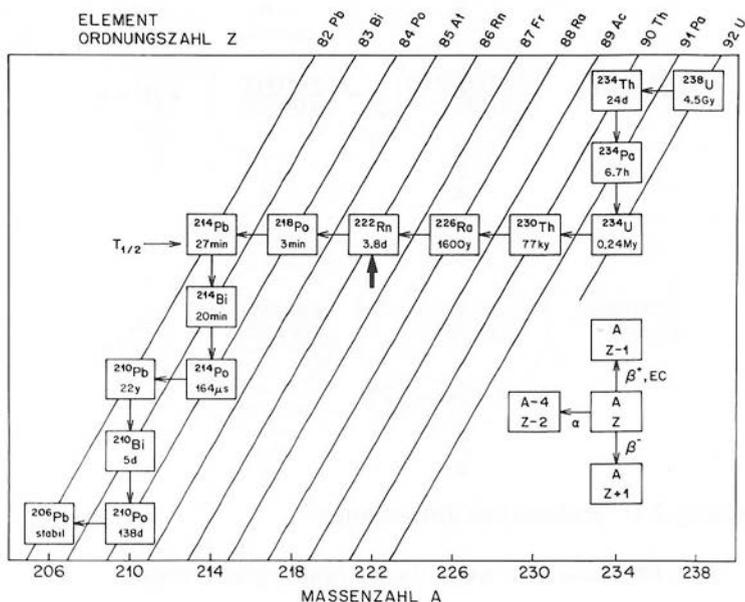
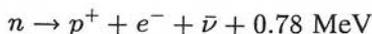


Abbildung 2.2: Zerfallsfamilie des ^{238}U .
Betreffend Radon (Pfeil) siehe Kapitel 4.3.

Der Alphazerfall hat eine wohlbestimmte Zerfallsenergie, und daher haben alle Alphateilchen die gleiche Energie und praktisch auch dieselbe Reichweite. Die Halbwertszeiten sind eine sehr steile Funktion dieser Energie, da der Zerfall ein Musterbeispiel der Wirkung der Quantenmechanik darstellt: Das Austreten eines Alphateilchens hat genau die Wahrscheinlichkeit, welche durch den sog. *Tunneleffekt* beim Durchdringen der Barriere der elektrostatischen Kräfte des Kerns gegeben ist.

2.3.2 Der Beta-Zerfall

Der *Grundprozess des β^- -Zerfalls* ist die Umwandlung des Neutrons in ein Proton. Ein freies Neutron zerfällt mit einer Halbwertszeit von etwa 10 Minuten durch Emission eines Elektrons und eines Neutrinos nach folgender Reaktionsgleichung:



Das Auftreten eines Neutrinos (Antineutrino $\bar{\nu}$) ist charakteristisch für den durch die sog. 'Schwache Wechselwirkung' bedingten Prozess. Dieses Teilchen ist elektrisch neutral und hat keine Ruhemasse. Deshalb hat es praktisch keine Wechselwirkung mit Materie und ist sehr durchdringend (es könnte Lichtjahre dickes Blei durchdringen!) und ist daher äusserst schwierig nachzuweisen.

Weil sich die Zerfallsenergie beim Betazerfall auf drei Teilchen verteilt, haben die Elektronen ein kontinuierliches Spektrum mit Energien von Null bis zur Zerfallsenergie. Das wirkt sich auf die Eindringtiefe ins lebende Gewebe und die biologischen Effekte stark aus.

Innerhalb der Kerne, man denke z.B. an den Sauerstoff mit je acht Protonen und Neutronen, bleiben Neutronen stabil, weil der Kern, der durch ihren Zerfall entstehen würde, energetisch ungünstiger wäre. Daher tritt der β^- -Zerfall nur bei Kernen mit Neutronenüberschuss auf.

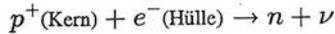
Der Effekt dieser Bindungsenergien der Kerne ist so stark, dass dadurch auch die Umkehrung des Prozesses, nämlich der β^+ -Zerfall möglich wird; dies in Kernen mit Protonenüberschuss, bei denen der Zerfall eines Protons in ein Neutron energetisch vorteilhaft ist:



Diese Zerfallsgleichung ist identisch mit der obigen Gleichung für β^- , wenn man die zwei leichten Teilchen (Leptonen) als Antiteilchen auf die andere Seite der Gleichung schreibt.

Das Positron lebt bei Vorhandensein von Materie nur kurz. Es annihiliert mit seinem Antiteilchen dem Elektron. Beobachtet werden bei der e^+e^- Annihilation zwei 511 keV γ -Quanten. Das ist der Prozess, der in der Nuklearmedizin die PET-Technik ermöglicht (Kapitel 6.3.4).

Diese Zusammenhänge lassen auch eine sehr häufige Variante des β^+ -Zerfalles leicht verstehen, den *Elektronen-Einfang*. Bei diesem absorbiert der Kern ein normales Elektron aus der Hülle des Atoms, statt das Antiteilchen e^+ zu emittieren. Das dabei entstehende Loch in der Atomhülle wird mit der Aussendung von Röntgenquanten wieder aufgefüllt. Die Zerfallsgleichung zeigt, dass nur das nicht nachweisbare Neutrino emittiert wird:



2.3.3 Der Gamma-Zerfall

Er tritt in Verbindung mit Alpha- oder Betazerfall auf, nämlich dann, wenn nach dem Prozess der Kern nicht im Grundzustand erzeugt wird, sondern sich in einem 'angeregten' Quantenzustand befindet. Wie bei der Lichtemission eines Atoms hat das Gammaquant dann die Quantenenergie, die den Übergängen entspricht. Gammastrahlen werden oft 'in Kaskade', d.h. unmittelbar nacheinander emittiert. Normalerweise erfolgen Gammaübergänge also spontan (in Zeiten unter Milliardstel Sekunden). Bei Übergängen zwischen Kernzuständen mit sehr verschiedenen Spins (quantisierte Drehimpulse) können quantenmechanische Regeln allerdings die Übergangswahrscheinlichkeiten so reduzieren, dass Kerne lange Halbwertszeiten für Gammazerfall haben. Man nennt sie *Isomere*. Diese spielen in nuklearmedizinischen Anwendungen eine wichtige Rolle, indem damit sog. Generatorsysteme (Kapitel 6.2) ermöglicht werden.

2.3.4 Die radioaktiven Zerfallsgesetze

Die Zerfallsprozesse sind vollständig durch die Regeln der Quantenmechanik bestimmt. Das führt dazu, dass jeder Kern zu jeder Zeit eine genau bestimmte Wahrscheinlichkeit hat zu zerfallen; dies völlig unabhängig von der Vorgeschichte oder von dem, was andere Kerne tun. Nach den Sätzen der mathematischen Statistik führt dies zu einem exponentiellen Zerfallsgesetz. Von einer Anfangszahl von N_0 aktiven Kernen bleiben nach der Zeit t noch N übrig:

$$N = N_0 e^{-t/\tau}$$

$$T_{1/2} = \ln 2 \tau = 0.693 \tau$$

τ = mittlere Lebensdauer, $T_{1/2}$ = Halbwertszeit

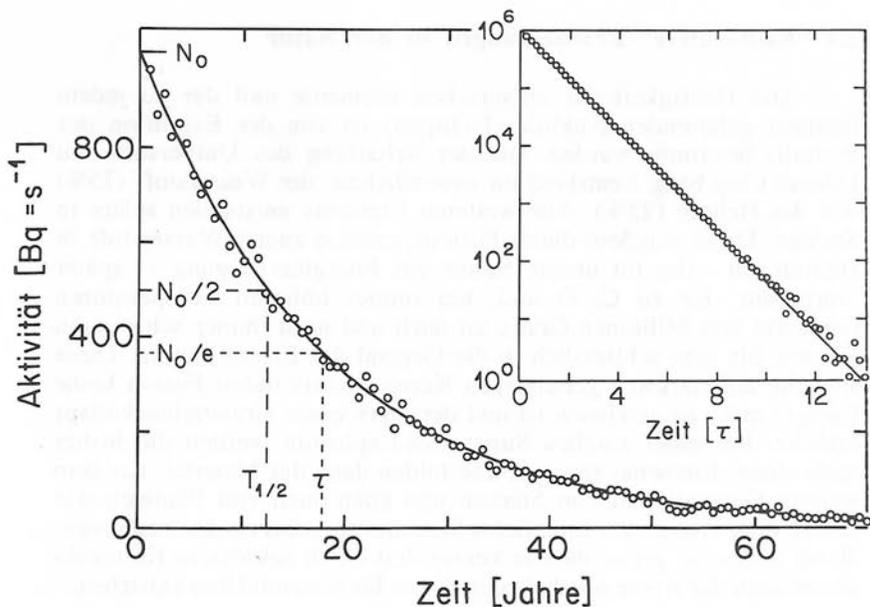


Abbildung 2.3: Radioaktives Zerfallsgesetz und statistische Schwankungen am Beispiel des Tritiumzerfalls:



$$T_{1/2} = 12,3 \text{ a}, \tau = 17,7 \text{ a}$$

Die Zahl der in einer gegebenen Zeit erfolgenden Zerfälle ist Schwankungen unterworfen (Abbildung 2.3). Diese Schwankungen entsprechen der Wurzel aus der Zahl der Zerfälle. Nach den Gesetzen der Statistik wird man so z.B. bei 100 erwarteten Zerfällen in 2/3 der Fälle ein Resultat zwischen 90 und 110 erhalten. Die Genauigkeit einer Messung lässt sich also grundsätzlich nur durch eine längere Messzeit steigern. Dies ist bei allen nuklearmedizinischen Techniken zu berücksichtigen.

2.4 "Radioaktive" Erscheinungen in der Natur

Die Häufigkeit der chemischen Elemente und der zu jedem Element gehörenden Nuklide (Isotopen) ist von der Evolution des Weltalls bestimmt worden. Bei der Schaffung des Universums im Urknall ('big bang') entstand im wesentlichen der Wasserstoff (75%) und das Helium (25%). Alle weiteren Elemente entstanden später in Sternen. Diese wandeln durch Fusionsprozesse zuerst Wasserstoff in Helium um - das tut unsere Sonne zur Energieerzeugung - später 'verbrennt' He zu C, O und, bei immer höheren Temperaturen (hunderte von Millionen Grad), zu nach und nach immer schwereren Kernen, bis man schliesslich in die Gegend des Eisens kommt. Diese sind die am stärksten gebundenen Kerne, sodass durch Fusion keine Energie mehr zu gewinnen ist und der Stern einen Gravitationskollaps erleidet. Bei einer solchen Supernova-Explosion werden die bisher 'gekochten' Elemente zerstreut und bilden dann das Material, aus dem weitere Generationen von Sternen und eben auch von Planeten wie unsere Erde entstanden sind. Beim Supernovaprozess ist die Neutronendichte zudem so gross, dass in kurzer Zeit durch sukzessive Kernreaktionen auch die Kerne oberhalb des Eisens bis hin zum Uran entstehen.

Die *Kosmische Strahlung* ist ein Bote, der uns Signale von solchen Prozessen bringt. Die Strahlung besteht aus hochenergetischen Teilchen, vor allem Protonen. Über ihren Ursprung gibt es verschiedene Hypothesen, es ist aber klar, dass Vorgänge wie Supernovae und deren Überbleibsel (Pulsare als schnell rotierende Neutronensterne mit Kern-massendichte und ungeheuren Magnetfeldern) Teilchen auf höchste Energien beschleunigen können.

In unserer Gegend der Galaxie kommt die kosmische Strahlung aus allen Richtungen, als Folge von den sie ablenkenden galaktischen Magnetfeldern. Auch das Erdmagnetfeld lenkt sie ab, so dass die Strahlung von der geographischen Breite abhängt. An der Erdoberfläche registriert man vor allem Müonen, die Zerfallsteilchen der von den Primär-Protonen in der hohen Atmosphäre erzeugten Pionen. Die Müonen gelangen dank der Zeitdilatation (EINSTEIN) trotz ihrer kurzen Lebensdauer (2.2 Mikrosekunden) bis zu uns. Unser ganzes Leben lang werden wir jede Sekunde von etwa hundert ionisierenden Müonen durchdrungen. Bei höchstenergetischen Prozessen entstehen auch riesige Schauer von Elektronen und Gammastrahlen (Abbildung 2.4). Die kosmische Strahlung ist ein wichtiger Teil der natürlichen Strahlenbelastung. Sie verdoppelt sich in unseren Breiten etwa alle 1500 m und erreicht in circa 20 km Höhe den hundertfachen Wert. Damit erhält ein Pilot der in dieser Höhe fliegenden Concorde jährlich eine Strahlendosis, welche über den für strahlenexponiertes Personal tolerierten Limiten liegt. (Es ist allerdings nicht üblich den Flugverkehr mit Strahlengefahr in Verbindung zu bringen.)

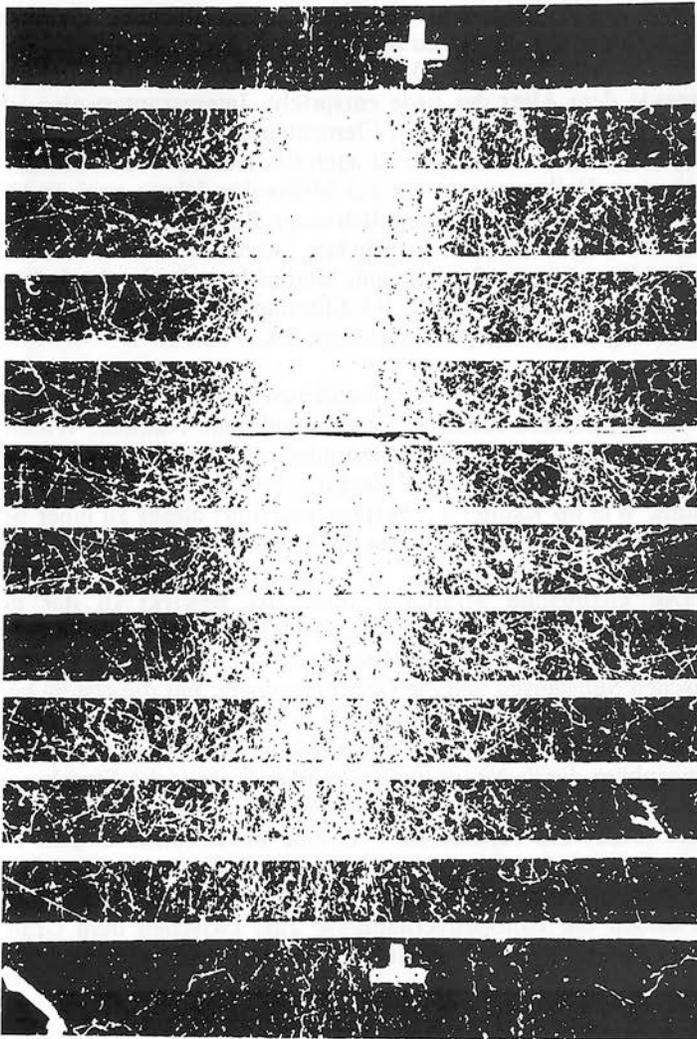


Abbildung 2.4: Elektronenschauer: Bild eines Schauers in einer Nebelkammer mit einer Reihe von Bleiplatten. Die von oben einfallende hochenergetische Gammastrahlung führt zu einer starken Vermehrung der Elektronen: Im elektrischen Feld von Pb-Kernen findet Paarproduktion statt - ein Elektron-Positron Paar hoher Energie - und diese erzeugen in der Folge weitere Gammastrahlen (Bremsstrahlungsquanten) und so fort.

Von den Vorgängen bei der Synthese der Elemente zeugen viele Fakten auf der Erde: So haben die langlebigsten Elemente (U, Th), die man auf der Erde findet, eine Halbwertszeit von Milliarden von Jahren, was gerade dem Alter der Erde entspricht. Interessanterweise ist das nicht nur bei den ganz schweren Elementen am Ende des Periodischen Systems der Fall. Zum Beispiel ist auch das Nuklid ^{40}K radioaktiv und mit einer Halbwertszeit von 1,3 Milliarden Jahren noch in kleiner Menge erhalten. Es bildet bekanntlich einen Bestandteil der organischen Materie und trägt zu unserer natürlichen Strahlenbelastung bei. Kürzerlebige Nuklide, die es anfänglich gab, sind nicht mehr da. Auch fehlt das Element mit der Ordnungszahl 43 (Technetium), weil dieses weder stabile noch genügend langlebige Isotope hat.

Zusätzlich zu den 'noch vorhandenen' Nukliden entstehen in der Natur durch nukleare Prozesse fortwährend neue Nuklide. Wichtig ist im Rahmen dieses Büchleins insbesondere das *Radon*, ein kurzlebiges radioaktives Edelgas aus den Zerfallsfamilien des Urans und des Thoriums. Wie im Kapitel 4.3 besprochen, führt dieses zu einer bedeutenden Komponente der natürlichen Strahlenbelastung des Menschen.

Die kosmische Strahlung ihrerseits bewirkt in der hohen Atmosphäre Kernreaktionen, die zu radioaktiven Nukliden führen. Eine wichtige Anwendung dieser Prozesse sind die *Altersbestimmung* von organischen Substanzen und die *Geochronologie*. Für die erstere benützt man die Tatsache, dass das radioaktive Isotop ^{14}C (Halbwertszeit 5700 Jahre) in lebenden Organismen eingebaut wird. Erzeugt wird es in der Erdatmosphäre durch Neutronen (sekundäre kosmische Strahlung) mit einer (n,p)-Reaktion am Luftstickstoff. Nach dem Ende der biologischen Prozesse bildet das zerfallende ^{14}C eine unbestechliche Uhr. In der Geochronologie können langlebige, auch durch die kosmischen Strahlen erzeugten Isotopen wie ^{10}Be verwendet werden. Für die ganz langen Zeiten bilden die Isotopenverhältnisse z.B. zwischen dem Uran und seinen stabilen Tochterkernen nützliche Zeitskalen.

2.5 Durch den Menschen erzeugte Radioaktivität und Strahlung

Historisch wurden zuerst die Röntgenstrahlen als 'Bremsstrahlung' von elektrostatisch beschleunigten Elektronen erzeugt. Die Entwicklung der wichtigen Anwendungen in Diagnostik und Therapie wird in folgenden Kapiteln eingehend behandelt.

Nachdem RUTHERFORD 1919 mit Alphateilchen der natürlichen Radioaktivität das Auftreten von neuartigen Kernreaktionen nachgewiesen hatte, dauerte es bis in die 30er Jahre, bis die Technik es

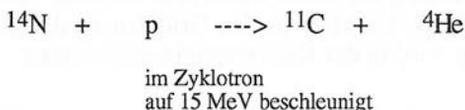
ermöglichte, auch künstlich solche Reaktionen zu bewirken. Von diesen Anfängen aus hat sich in der Folge die *Beschleunigertechnik* rapid entwickelt, einerseits zu immer höheren Energien für die Teilchenphysik, andererseits zu vielseitigen Beschleunigern wie sie heute in der Medizin eingesetzt werden, dies in zwei Hauptrichtungen:

a) Zur Erzeugung von Isotopen in Radiochemie und Nuklearmedizin, für Tracertechniken, für Positron-Tomographie (PET) usw. Zur Anwendung gelangen dafür vor allem kleinere 'Kompakt-Zyklotrons', die z.T. auch in Spitälern betreibbar sind.

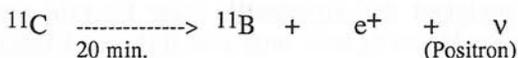
b) Zur Radiotherapie mit Hilfe von ionisierenden Strahlen. Ausgehend von den Röntgenstrahlen folgte die Entwicklung zu höheren Energien und verschiedenen Strahlenarten: Gammastrahlen, Elektronen, Neutronen, Protonen, Pionen und schwere Ionen. Die erforderlichen Beschleuniger (Linearbeschleuniger, Betatrons, Zyklotrons, Synchrotrons) sind notwendigerweise bedeutend aufwendiger. Ihre Technik wurde in Zusammenarbeit zwischen Physik und Medizin entwickelt.

In *Kernreaktoren* wird die von Neutronen induzierte Spaltung des Urans (Fission) verwendet. Die Fission erzeugt selbst wieder Neutronen, was die Möglichkeit einer kontrollierten Kettenreaktion ergibt. Die Spaltprodukte sind meist selbst radioaktiv. Im Innern von Kernreaktoren herrschen enorme Flüsse von langsamen, sog. *thermischen Neutronen*. Mit diesen lassen sich leicht viele radioaktive Isotopen erzeugen. Beispielsweise wird das in der Radiotherapie eingesetzte Nuklid ^{60}Co mit Hilfe der (n,γ) -Reaktion aus gewöhnlichem (stabilem) ^{59}Co hergestellt (Abbildung 2.5).

Der Einsatz von Beschleunigern gestattet heute, eine Vielzahl medizinisch anwendbarer radioaktiver Isotopen aus dem ganzen Bereich des periodischen Systems und mit allen erwünschten Halbwertszeiten herzustellen. Besonders wichtig in der Nuklearmedizin sind heute die Positron-emittierenden Isotopen geworden:



Chemisch bindet sich das ^{11}C an Sauerstoff zu CO_2 . Dieses wird zu organischen Radiopharmaka verarbeitet, die dem PET-Patienten verabreicht werden.



Zu den unerfreulichen Aspekten der durch den Menschen erzeugten Radioaktivität gehören die durch Kernwaffen und bei Reaktorunfällen in die Umwelt gelangenden Produkte der Fissionsreaktionen. Schon kleine Emissionen sind auch wissenschaftlich nachteilig, indem sie Datierungsmessungen erschweren.

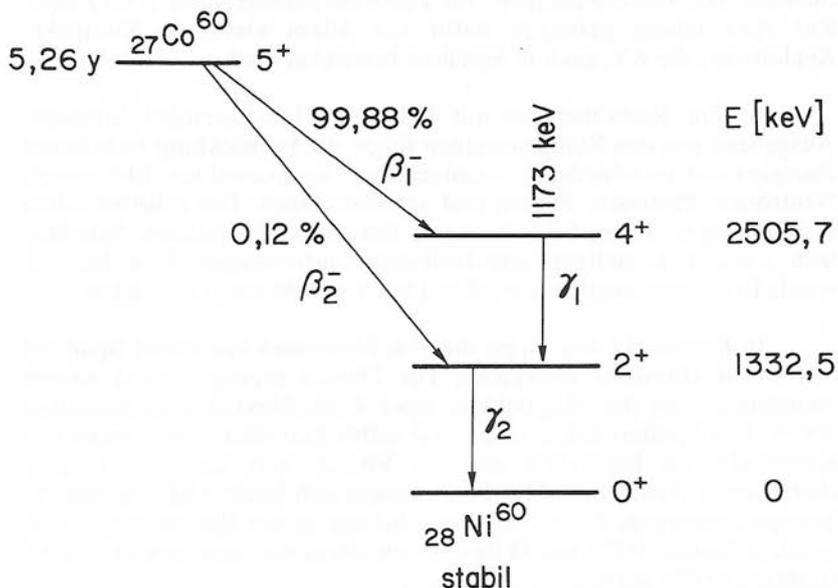


Abbildung 2.5: Termschema von ^{60}Co : Das im Reaktor durch Einfang eines Neutrons am gewöhnlichen ^{59}Co erzeugte ^{60}Co zerfällt mit fünf Jahren Halbwertszeit. Das beim Betazerfall emittierte Elektron führt in einen hoch angeregten Zustand, der sofort durch eine Kaskade von zwei Gammastrahlen von 1,2 resp. 1,3 MeV in den Grundzustand von ^{60}Ni übergeht. Diese Strahlung wird in der Radiotherapie angewendet.

2.6 Wechselwirkung von Strahlungen und Materie

Diese physikalischen und z.T. auch chemischen Prozesse sind es, welche die biologische Wirkung der Strahlung bestimmen. Die Vorgänge sind in Abhängigkeit der Strahlenart, ihrer Energie und der Natur des durchstrahlten Materials sehr unterschiedlich und können hier nur in groben Zügen dargestellt werden.

Bei **Strahlen von Teilchen** wie Elektronen, Protonen, schwere Ionen sind Masse, Ladung und Energie die bestimmenden Faktoren. Die Prozesse beim Durchdringen von Materie sind die folgenden:

a) Im elektrischen Feld der Kerne des Materials erfährt das Teilchen viele kleine Ablenkungen die sich statistisch summieren und zu einer Änderung der Flugrichtung führen (Winkelstraggling). Ganz selten kann das Teilchen so nahe an einem Kern vorbeifliegen, dass es eine starke Ablenkung erfährt (Rutherford-Streuung). Während schwere, hochenergetische Teilchen gerade fliegen, werden Elektronen so stark beeinflusst, dass sie ihre Richtung verlieren und ungeordnete Bahnen beschreiben (wie ein Fliegenschwarm).

b) Bei der Wechselwirkung mit den Atomhüllen findet *Ionisation* statt, d.h. ein oder mehrere Elektronen des Atoms werden herausgerissen. Die Folgeprozesse nach der Ionisation sind sehr vielfältig und bestimmen auch die biologische Wirkung. Pro Ionisierungsprozess verliert das Teilchen etwa 30 eV, so dass es nach einer bestimmten Flugstrecke - der *Reichweite* - stehen bleibt. Diese Bremsung geschieht aber auf statistische Art, so dass Schwankungen der Reichweite auftreten (rangestraggling). Wie erwähnt haben Elektronen keine definierte Reichweite.

Die *Ionisierungsdichte*, das heisst die räumliche Dichte der durch Ionisation deponierten Energie, ist von der Energie und Masse aber insbesondere von der Ladung des Teilchens bestimmt. Bei Elektronen ist sie gering, bei mehrfach geladenen schweren Teilchen sehr stark. Abbildung 7.2 zeigt den typischen Verlauf mit der Zunahme der Ionisierungsdichte gegen das Ende der Reichweite, die "Bragg-Kurve". Die in der Biologie LET (linear energy transfer, in keV/ μ m) genannte Ionisierungsdichte variiert in einem weiten Bereich und bestimmt in entscheidender Weise die biologische Wirkung (siehe Kapitel 3.1.5).

Die *Neutronen* sind ebenfalls schwere Teilchen (wie Protonen), erfahren aber wegen Abwesenheit einer Ladung die gerade beschriebenen Prozesse nicht und benehmen sich völlig anders. Der einzige Vorgang für Neutronen sind direkte Stösse mit Kernen. Die Kleinheit der letzteren macht diese so selten, dass Neutronen bei hoher Energie selbst dichte Materie über Strecken von Dezimetern wie im Vakuum durchlaufen. Bei den Stössen können aber auch Kernreaktionen stattfinden, bei denen das Neutron vom Kern aufgenommen wird und nach Aussendung eines anderen Teilchens (z.B. eines Protons) ein neuer, oft radioaktiver Kern entsteht.

Die Stösse von Neutronen können "elastische Billiardstösse" sein, wobei nach den Gesetzen der Mechanik mit der Zeit die Energie abnimmt. Die so "moderierten" Neutronen werden verlangsamt, bis sie mit den Atomen des Materials im thermischen Gleichgewicht stehen.

Diese "thermischen Neutronen" bilden dann eine Art Gas mit Geschwindigkeiten der Neutronen von etwa 1000 m in der Sekunde. Reaktionen besonderer Art finden nach der Thermalisierung von Neutronen statt. Dies ist sehr häufig, weil die Wahrscheinlichkeit der Absorption im Kern nach den Gesetzen der Quantenmechanik bei kleinerer Energie immer grösser wird.

Eine Besonderheit für die biologische Wirkung der Neutronen höherer Energie (z.B. in der Neutronen-Therapie) ist die Erzeugung von Rückstoss-Ionen, welche dann wegen ihrer höheren Ladung eine sehr starke Ionisierungswirkung entfalten.

Bei *Photonen, d.h. Röntgen- und Gammastrahlen*, sind ganz andere Prozesse im Spiel. Diese hängen wieder in hohem Mass von den Energien und vom betrachteten Material ab. Man hat drei grundsätzlich verschiedene Prozesse, welche die Wechselwirkung mit der Materie bestimmen (Abbildung 2.6).

Im *unteren* Energiebereich dominiert der *Photoeffekt*, bei dem ein Elektron aus einem Atom ausgelöst wird. Die gesamte Quantenenergie des Gammastrahls wird dabei in die Bindungsenergie und die kinetische Energie des Elektrons aufgeteilt.

Bei *hohen* Energien, beginnend bei 1 MeV, kann das Gammaquant im elektrischen Feld eines Kernes durch *Paarerzeugung* ein Elektron und ein Positron (dessen Antiteilchen) bilden. Dies ist ein Musterbeispiel der von Einstein postulierten Äquivalenz von Energie und Masse. Die erwähnte Grenze entspricht der Ruheenergie der zwei zu schaffenden Elektronen.

Im *Zwischenbereich* tritt ein weiterer Prozess auf, der *Compton-Effekt*. Bei diesem findet ein "Billiardstoss" zwischen dem sich als 'Teilchen' benehmenden Gammaquant und einem Elektron statt, wobei ein Gammaquant mit kleinerer Energie und in einer anderen Richtung weiterfliegt.

Diese Prozesse führen dazu, dass Gammastrahlung in Materie absorbiert wird, wobei abhängig von Energie und Ordnungszahl der Atome komplexe Energie- und Richtungsänderungen auftreten. Die Gammastrahlung hat dabei keine definierte Reichweite, sondern verliert ihre Intensität ungefähr nach einem exponentiellen Gesetz. (Absorption von Photonen in üblichen Materialien siehe Tabelle Kapitel 8.3)

Besonders eindrücklich sind *Prozesse bei höchsten Energien*. Dort dominiert die Paarerzeugung. Die so gebildeten Elektronen hoher Energie erzeugen, wenn sie im Feld der Atomkerne abgelenkt werden, selbst wieder Gammaquanten (durch Bremsstrahlung), welche ihrerseits wieder Paare erzeugen. So entsteht, z.B. in der kosmischen Strahlung aus einem anfänglich einzigen Gammaquant hoher Energie ein *Schauer*, der in einem engen Kegel abertausende von Elektronen und Photonen enthalten kann (Abbildung 2.4).

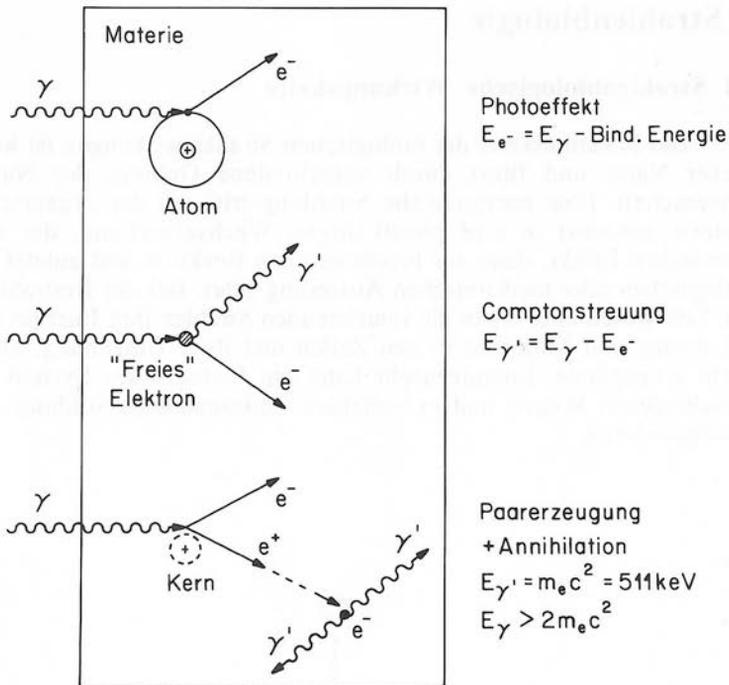


Abbildung 2.6: Wechselwirkung der Photonen mit Materie

Die vielfältigen Prozesse der Wechselwirkung von Strahlung mit der Materie werden in **Detektoren** in elektrische Signale umgewandelt, um Natur, Intensität und Energie von Teilchen oder elektromagnetischer Strahlung zu messen. Die Ionisation ist der massgebende Prozess im historischen Geiger-Müller Zähler, in Ionisations- und Drahtkammern. In Szintillationszählern werden die durch Teilchen erzeugten Lichtblitze registriert. In Festkörperdetektoren können die von Gammaquanten nicht zu hoher Energie erzeugten Prozesse mit hoher Energieauflösung registriert werden.

Die genaue Kenntnis der elementaren Prozesse der Wechselwirkung Strahlung-Materie ist auch die Grundlage zur **Abschirmung** von Strahlenquellen wie Beschleunigern, Reaktoren, radioaktive Substanzen, so dass die biologischen Strahlendosen der Benutzer innerhalb der Strahlenschutznormen begrenzt werden. Besonders komplex sind naturgemäss Abschirmungen für Neutronen verschiedener Energien.

3 Strahlenbiologie

3.1 Strahlenbiologische Wirkungskette

Die Reaktionskette der biologischen Strahlenwirkungen ist komplexer Natur und führt durch verschiedene Gebiete der Naturwissenschaft. Eine energiereiche Strahlung tritt mit der organischen Materie zunächst in eine physikalische Wechselwirkung, die zum chemischen Effekt, dann zur biochemischen Reaktion und zuletzt zur biologischen oder medizinischen Äusserung führt. Bei der Bestrahlung von Lebewesen übertragen die ionisierenden Strahlen ihre Energie also auf Atome und Moleküle in den Zellen und ihrer Umgebung. Diese 'nicht eingepflanzte' Energiezufuhr kann ein biologisches System auf verschiedenen Wegen und in variablen Zeiträumen (Abbildung 3.1) desorganisieren.

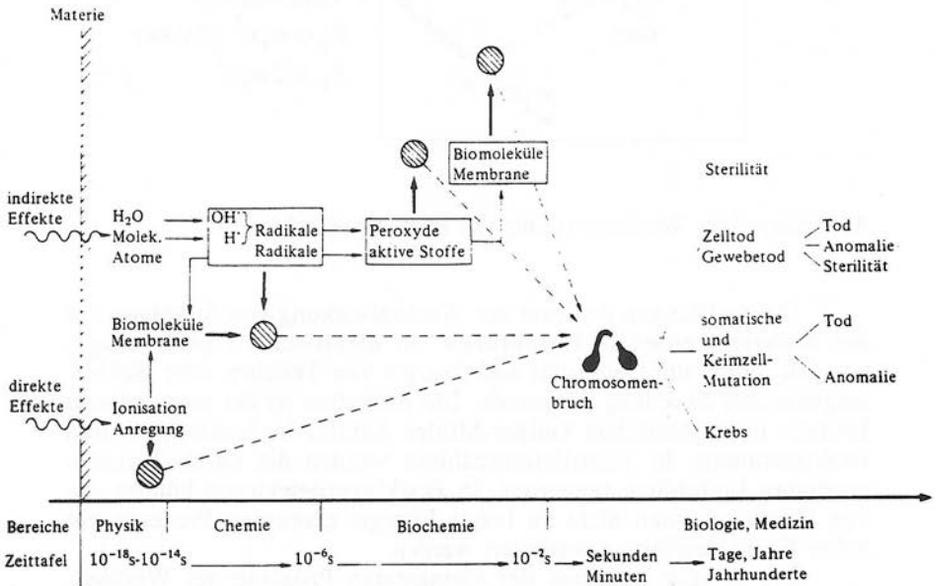


Abbildung 3.1. Strahlenbiologische Wirkungskette, dargestellt eine biologische Störung (Chromosomenbruch), die durch verschiedenste physikalisch-chemische Ereignisse induziert werden kann und ihrerseits Ursache vielfältiger biomedizinischer Effekte ist.

Grundsätzlich sind zwei Wirkungsweisen der Strahlung zu unterscheiden (Abbildung 3.2) :

Bei der *direkten* Wirkungsweise ist die primäre physikalische Wechselwirkung (z.B. eine Ionisation) bereits identisch mit dem biologischen Effekt.

Demgegenüber werden bei *indirekten* Wirkungen die biologischen Änderungen erst durch die chemischen Strahlungsprodukte ausgelöst. Die verschiedenen Phasen der Reaktionskette sind beeinflussbar und auch umkehrbar.

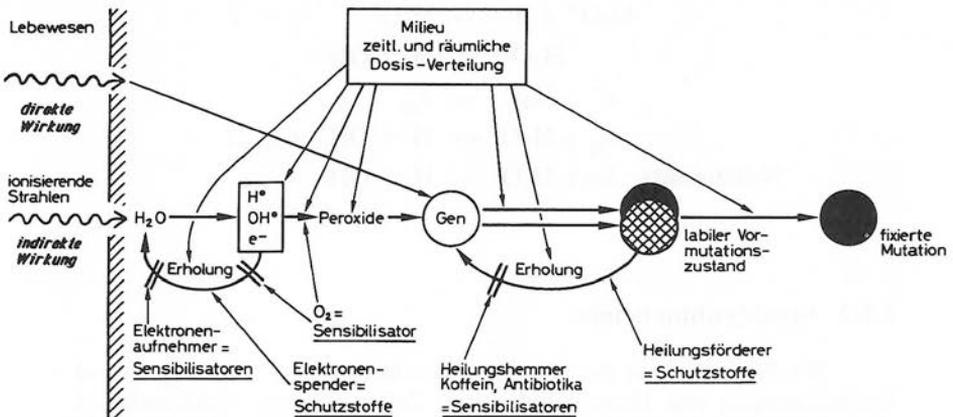
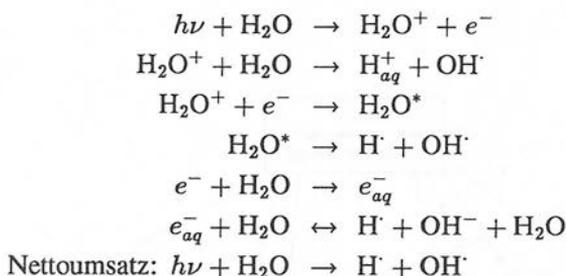


Abbildung 3.2. Direkte und indirekte Wirkungsweisen der Strahlung. Ein auf einem Chromosom lokalisiertes Gen kann infolge einer Strahlungswirkung mutieren, das heißt seine ursprüngliche Funktion ändern oder verlieren. Der Übergang in eine fixierte Mutation erfolgt ev. über labile, reversible Zwischenstufen, die von aussen beeinflussbar sind (durch 'Schutzstoffe' im Sinne der Heilungsförderung oder durch heilungshemmende 'Sensibilisatoren'). Chemische Schutzstoffe und Sensibilisatoren können auch die biologischen Auswirkungen anderer indirekter Strahleneinflüsse (Radikalbildung, Metabolismus der Peroxide) hemmen bzw. verstärken und dadurch eine Erholung der Zelle fördern oder blockieren.

3.1.1 Strahlenchemie

Biomoleküle in wässriger Lösung stehen vermutlich am Anfang vieler biomedizinischer Vorgänge. Der strahlungsbedingten Veränderung des Wassers wurde deshalb besondere Beachtung geschenkt. Es entstehen sog. hydratisierte Elektronen, sowie H- und OH-Radikale, die chemisch äusserst aktiv sind (siehe Tabelle 3.1)). Diese Bestrahlungsprodukte können indirekt die Biomoleküle in einer Zelle ändern.

Tabelle 3.1



3.1.2 Strahlenbiochemie

Wichtige Folgen der physikalisch-chemischen Wirkungen sind Veränderungen von Biomolekülen und Zellstrukturen. Nukleinsäuren als zentrale und für die Lebensfunktionen unentbehrliche Biomoleküle werden oft als sensibles "Ziel", resp. Angriffspunkt der Ionisierenden Strahlung angesehen.

Wirkung auf die Deoxyribonukleinsäure

Schwerwiegend sind strahlenbedingten Strukturveränderungen der Deoxyribonukleinsäure (DNS), die sich im Kernchromatin (den genetisch aktiven Bereichen der Chromosomen) und den Mitochondrien (stoffwechselaktive Zellorganellen) befindet. Das DNS-Modell von WATSON und CRICK sieht zwei miteinander verbundene Polynukleotidketten vor, welche sich um eine gemeinsame Achse winden. Unterbrechungen dieser Nukleotidketten, die sich als Einzel- oder Doppelstrangbrüche manifestieren können, bedingen Änderungen der Erbanlagen (Mutationen) oder sogar einen letalen Zellschaden, sofern sie nicht zellintern repariert werden können.

Wirkung auf Zellmembrane:

Membrane sind Trennwände, die die lebende Materie von ihrer Umgebung trennen und deren Aufgabe es ist, den Ein- und Austritt von lebenswichtigen Stoffen zu regulieren. Ionisierende Strahlen bewirken osmotische Veränderungen in der Zelle und beeinflussen dadurch die Funktion und Integrität der Membrane sowie von membranabhängigen Biomolekülen. Ein direkter Wirkungsnachweis ist allerdings schwierig, da Membrane ohnehin sehr labil und veränderlich sind. Ihre Permeabilität ist nicht konstant und wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst.

3.1.3 Zellulare Strahlenbiologie

Nach der Bestrahlung von Zellen, seien sie im Zellverband oder isoliert, kann sich eine Vielfalt von Reaktionen ereignen, die bis zum Zelltod führen können. (Wichtige Erscheinungsbilder sind: Strukturveränderungen, Membranstörungen, Induktion von Mutationen, Beschädigung der Chromosomen, reversible oder irreversible (=Inaktivierung) Hemmung der Zellteilung usw.) Alle diese Mechanismen sind komplexer Natur und daher im Einzelnen schwer messbar. Erst die schwerste Reaktion, der Zelltod, ist relativ einfach festzustellen und ist somit ein strahlenbiologisch wichtiger Messparameter (vergl. Überlebenskurven).

Zellinaktivierung und/oder -tod sind auch die Zielsetzungen der Strahlentherapie des Krebses. Diese können auf verschiedenen Wegen erreicht werden. So spricht man von einem *Interphasentod*, wenn die Zellen im Intervall zwischen den Zellteilungen letal geschädigt werden, oder vom *reproduktiven Tod*, wenn dieser infolge einer Schädigung des Genmaterials auftritt, was sich erst bei der Teilung der Zelle zeigt.

Sogenannte *Zell-Überlebenskurven* (Inaktivierungskurven) sind in vielen strahlenbiologischen Studien zu finden, da sie einen direkten Aufschluss über das Reaktionsvermögen der bestrahlten Zellen geben; bzw. dadurch ein biologisches Mass für eine Strahlenwirkung sind.

Typische *Formen von Zell-Überlebenskurven* sind diagnostisch aufschlussreich:

a) *Exponentielle* Überlebenskurven weisen darauf hin, dass das reaktive System einen sehr verletzlichen Bereich besitzt, wo ein einziger Treffer zur Inaktivierung führt.

b) *Sigmoide* (S-förmige) Kurven kennzeichnen demgegenüber ein strahlenresistenteres Verhalten der untersuchten Zellpopulation. Sie entstehen dadurch, dass im Bereich niedriger Strahlendosen die Zellzahlen nur langsam absinken, also der Grossteil der Zellen überlebt. In einem mittleren Dosisbereich bildet sich eine sog. *Schulter* aus, die dem Umstand zugeschrieben wird, dass die Zellen lediglich subletal geschädigt werden und sich daher erholen können. Erst unter der Einwirkung von höheren Dosen biegt die Inaktivierungskurve auch bei resistenteren Zellen ebenfalls in einen steilen Verlauf um.

3.1.4 Erholungsvorgänge und Abhängigkeit der Strahlenwirkung von der zeitlichen Verteilung der Dosis (Zeitfaktor)

In der strahlenbiologischen Wirkungskette sind einzelne Vorgänge reversibel. Es können toxische Produkte inaktiviert und somit einer zellschädigenden Wirkung entzogen werden. Ebenso können verschiedene zelleigene Reparatursysteme einen strahleninduzierten Schaden heilen. Solche Erholungs- oder Reparaturvorgänge erfolgen in der physikalisch-chemischen, in der biochemischen wie auch in der zellulären Ebene und zwar sofort nach, aber auch erst längere Zeit nach einer Bestrahlung. Der Zeitfaktor spielt eine wichtige Rolle für die Wirksamkeit der Reparaturvorgänge: So wirkt eine verdünnte oder fraktionierte Applikation locker ionisierender Strahlung weniger als eine konzentrierte, einmalige Bestrahlung.

Ein Beispiel für eine einfache Erholung vom Strahlenschaden ist die Neutralisierung aktiver Wasser-Radikale zu Wasser oder ihre Vereinigung mit sogenannten Radikalfängern (Vergl. Abbildung 3.2). Auf der biochemischen Ebene sind verschiedene intrazelluläre Enzymsysteme einzeln oder gemeinsam an Reparaturvorgängen beteiligt.

Die zell- bzw. organspezifische Strahlenwirkung wird somit nicht allein durch den Vorgang der Absorption der Strahlenenergie bestimmt, sondern sie beruht vielmehr auf einer *Wechselwirkung* aller oben diskutierten Ereignisse, also der strahlenbiologischen Wirkungskette und der reaktiven Möglichkeiten der zellständigen Erholungsmechanismen. Die zellspezifische Reparaturkapazität ist unter anderem auch ein Mass für die Strahlenempfindlichkeit.

Viele Beobachtungen sprechen dafür, dass ionisierende Strahlen, besonders im kleinsten Dosisbereich, sogar bestimmte reparative Vorgänge stimulieren. Dieser Effekt wird *Hormesis* genannt. Beachtenswert ist auch das Phänomen der *adaptiven Antwort* bei bestimmten Zellsystemen. Hier wird durch eine Vorbehandlung mit kleinen Dosen die schädigende Wirkung einer nachfolgenden, grösseren Dosis herabgesetzt (z.B. betreffend Zellinaktivierung oder Chromosomenaberrationen).

3.1.5 Abhängigkeit der Strahlenwirkung von der räumlichen Dosis-Verteilung (LET, RBW)

Je nach Art der Strahlung wird die Energie im durchstrahlten Material unterschiedlich verteilt. Schwere Teilchen geringer Energie führen zu starker Ionisation und hinterlassen daher eine 'dichte' Ionisationsspur. Schnelle, leichte Teilchen hingegen ionisieren nur schwach ('locker'). Die räumliche Verteilung des Energieverlustes längs des Durchgangs eines Teilchens wird als *lineare Energieübertragung* (linear energy transfer = LET) beschrieben, und in keV/ μm gemessen.

Die biologische Wirkung ist vom LET abhängig. Dies bedeutet, dass die gleiche Dosis von Strahlen mit unterschiedlichen LET verschiedene Effekte erzeugt. Diese Abhängigkeit vom LET wird mit dem Faktor der *relativen biologischen Wirksamkeit (RBW)* ausgedrückt. Die RBW steigt mit steigendem LET bis zu Wert von etwa 100 keV/μm, um dann wieder zu sinken

Eine locker ionisierende (niedrige LET-)Strahlung scheint hinsichtlich der meisten biomedizinischen Effekte weniger wirksam zu sein, als eine hohe LET-Strahlung, welche eher irreversible Effekte erzeugt.

Für den Begriff **Aequivalentdosis** (Einheit: Sievert = Sv) wird der *Qualitätsfaktor Q* herangezogen, der für die jeweilige Strahlenart einen gemittelten Wert, gewonnen aus verschiedenen RBW-Werten, darstellt. Für die Belange des Strahlenschutzes schlägt die ICRP 1991 den Begriff *Strahlenschwichtungsfaktor* vor.

Tabelle 3.2

Qualitätsfaktor Q (= Relative Biologische Wirksamkeit (RBW) = Strahlenschwichtungsfaktor (w_R))

	Q, w_R
Röntgen, Gammastrahlen (alle Energien)	1
Elektronen, Myonen (alle Energien)	1
Neutronen < 10 keV	5
Neutronen 10 – 100 keV	10
Neutronen 100 – 2000 keV	20
Neutronen > 20 MeV	10
schwere Teilchen (α , Fission Fragmente)	20

3.1.6 Milieufaktoren

Bereits in der Frühzeit der Strahlenbiologie wurde beobachtet, dass die Strahlen in sauerstoffarmem Gewebe weniger wirksam waren, als in gut durchblutetem, sauerstoffreichem Gewebe. Dieser *Sauerstoffeffekt* (ausgedrückt durch den Begriff: OER = oxygen enhancement ratio) kommt hauptsächlich durch die vermehrte Produktion von Peroxiden zustande. Die OER ist am höchsten für eine niedrige LET-Strahlung und niedriger für eine hohe LET-Strahlung. Da sich Krebszellen zumeist durch einen niedrigen Sauerstoffgehalt auszeichnen, ist strahlentherapeutisch eine hohe LET-Strahlung vorteilhaft, da ihre Wirkung wenig sauerstoffabhängig ist.

Auch andere Milieufaktoren, wie chemische Substanzen, beeinflussen die Strahlenwirkung. Es gibt *Strahlenschutzstoffe*, die eine Erholung vom Strahlenschaden begünstigen (z.B. Rutoside) oder als Elektronenspender (WR-Substanzen) schützend wirken. Andere *Stoffe sensibilisieren*, indem sie z.B. Elektronen aufnehmen und/oder die Erholung verhindern. Daher wäre es für die Strahlentherapie des Krebses optimal, Strahlenschutz-Stoffe für das gesunde Gewebe und Sensibilisatoren für die malignen Zellen einzusetzen (Vergl. Abbildung 3.2).

3.2 Strahlenpathologie

Vor allem aus Strahlenschutzgründen werden die Wirkungsweisen, die biomedizinische Effekte auslösen, in deterministische und stochastische unterteilt, die nachfolgend beschrieben werden.

a) Bei den *deterministischen* ist der Schweregrad der Wirkung von der Dosis abhängig. Es existiert hier eine Schwellendosis, unterhalb der keine Effekte manifest werden.

b) Im Unterschied dazu tritt eine *stochastische* Wirkung nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitstheorie ein. Hier existiert also keine Schwellendosis. Es handelt sich somit stets um Entweder-Oder-Ereignisse, wobei die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens eine Funktion der Strahlendosis ist.

3.2.1 Deterministische Wirkungen

Strahlenempfindlichkeit von Zellsystemen und Organen

Die verschiedenen Arten von Lebewesen unterscheiden sich in ihrer Strahlensensibilität erheblich. Dies drückt sich bereits in der grossen Variationsbreite der Letaldosen aus, die speziesabhängig von wenigen cGy bis über 5000 Gy reicht. Bei höheren Lebewesen ist auch die Strahlenempfindlichkeit einzelner Organe, ja sogar verschiedener Zellen variabel. Jedes Lebewesen ist daher so strahlenempfindlich, wie seine lebenswichtigsten Organe oder Zellsysteme. Besonders ausgewachsene Insekten zeichnen sich wegen der Beschaffenheit ihrer Atmungs- und Verdauungsorgane durch eine relativ hohe Strahlenresistenz aus. Demgegenüber gehören Säugetiere wegen der Empfindlichkeit ihrer blutbildenden Systeme und des Magen-Darmtraktes zu den wenig resistenten Lebewesen.

Die deterministische Wirkung an Zellsystemen und Organen erfolgt a) *direkt* durch eine Schädigung oder Tod einer Vielzahl von Zellen. Sie kann aber b) auch *indirekt* auftreten, beispielsweise durch eine Schädigung der organversorgenden Blutgefässe und über den daraus resultierenden Versorgungsmangel der Gewebe. Mitotisch aktive (sich teilende) Zellen sind besonders strahlensensibel. Interessant ist die relativ geringe Resistenz des immunologischen Systems nach Teil- und Ganzkörperbestrahlung. Dies wird medizinisch in der Vorbereitungsphase einer Organtransplantation genutzt, wo es durch eine präoperative Bestrahlung des Patienten gelingt, die gefährliche Abstossung eines implantierten Organs zu verhindern.

Hinsichtlich der *Strahlensensibilität* lassen sich Zellsysteme und Organe unterschiedlich klassifizieren:

<i>Strahlensensibel:</i>	Lymphatisches und blutbildende Systeme (Lymphknoten, Milz, Thymus, Knochenmark), Darmschleimhaut, Gonaden, Augenlinsen
<i>Mässig strahlenempfindlich:</i>	Lunge, Auge (ausgenommen Linse)
<i>Mässig strahlenresistent:</i>	Haut, Leber, Niere
<i>Strahlenresistent:</i>	Herz, Nervensystem (inkl. adultes Hirn), Muskulatur, Bindegewebe

3.2.2 Stochastische Wirkungen

Zu den stochastischen, also nach einer Bestrahlung nur zufällig eintretenden Wirkungen, gehören insbesondere: a) genetische Effekte, b) Entwicklungsstörungen und c) die Krebsinduktion.

a) *Strahlengenetik*

Prinzipiell lassen sich zwei Arten von Strahlenwirkungen auf die Zellen unterscheiden, nämlich:

a) *Modifikationen* und b) *genetische Wirkungen (Mutationen)*, also Änderungen des Erbmateri als.

Die Modifikationen betreffen nur Körperzellen (somatischer Bereich). Die Mutationen hingegen können sich sowohl als somatische Mutationen in den Zellen verschiedenster Organe ereignen, als auch in Keimzellen vorkommen, die als sogenannte Keimzellmutationen auf die Nachkommen übertragen werden können. Für die Beurteilung der gesundheitlichen Strahlenrisiken heisst dies, dass somatische Mutationen für das einzelne Individuum bedeutsam sein können, während Keimzellmutationen sowohl das Individuum als auch die Population Mensch angehen.

In den Keimzellen hängt die Mutationsrate allerdings vom Entwicklungsstadium der Zelle und vom Geschlecht ab. Das Genmaterial ist nach tierexperimentellen Daten in weiblichen Keimzellen strahlenresistenter als in männlichen; vermutlich weil die Eizellen über eine grössere Reparaturkapazität verfügen.

Strahleninduzierte Mutationen unterscheiden sich nicht von spontanen, in jedem Individuum auftretenden Mutationen.

b) Entwicklungsstörungen

Die Art und das Ausmass von strahlenbedingten Entwicklungsstörungen sind sowohl vom bestrahlten Wachstumsstadium als auch von der Dosis abhängig. Während ihrer Entwicklung sind alle Lebewesen strahlenempfindlicher als im Erwachsenenstadium.

Während der Frühentwicklung sind bei den Säugetieren hauptsächlich ein Entwicklungsstillstand und sogar der Tod sichtbare Folgen einer Bestrahlung. In der späten Fötalperiode, d.h. während der Organbildung, können neben dem Wachstums auch einzelne Organfunktionen gestört werden, wobei mit zunehmender Reife die Strahlenempfindlichkeit abnimmt.

c) Krebsinduktion

Nach einer Ganz- oder Teilkörperbestrahlung können in allen Organen Geschwulstbildungen entstehen, die sogar bösartig entarten können. Weder in ihrem Aufbau noch in ihrem Verhalten lassen sich diese strahleninduzierten Tumoren von den natürlicherweise vorkommenden Krebsen unterscheiden. Die Mechanismen einer Krebsinduktion sind bislang nicht geklärt. Man darf jedoch annehmen, dass eine einzige Mutation Ausgangspunkt für eine Krebsgeschwulst ist. In zeitlich variablen Stadien folgen der Auslösung einer Zellumwandlung die Phasen der Zellvermehrung, der Konversion in einen malignen Tumor und der Ausbildung zu einer klinisch manifesten Krankheit.

Leukämien, Tumoren der Lunge, des Magens, des Dickdarms und der weiblichen Brust gehören zu den häufigsten strahleninduzierten Neubildungen. Hinsichtlich ihrer epidemiologischen Bedeutung sei auf Kapitel 4.1 verwiesen.

3.3 Beurteilung eines Strahlenrisikos

3.3.1 Wichtungsfaktoren

Um das gesamte gesundheitliche Risiko eines Menschen erfassen zu können, wurde von ICPR erstmals 1978 der Begriff des *effektiven Dosisäquivalents* (effektive Äquivalentdosis) eingeführt. Da in diesem wichtige strahlenphysikalische und gewebespezifische Eigenschaften gewichtet sind, ermöglicht er eine *einheitliche Bewertung* von Ganz- und Teilkörperbestrahlungen. Es lassen sich somit auch alle Risiken aus natürlicher und künstlicher Strahlenexposition miteinander vergleichen.

Die *Strahlenwichtungsfaktoren* sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Sie berücksichtigen die unterschiedliche biologische Wirksamkeit der verschiedenen Strahlenarten.

Die *Gewebewichtungsfaktoren* beziehen sich demgegenüber auf die unterschiedliche Strahlensensibilität der Gewebe und Organe für stochastische Wirkungen (Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3

Gewebe-Wichtungsfaktoren w_T (ICRP 1990)

Gewebe, Organ	w_T	Gewebe, Organ	w_T
Gonaden	0.20	Leber	0.05
Knochenmark (rotes)	0.12	Oesophagus	0.05
Kolon	0.12	Schilddrüse	0.05
Lunge	0.12	Haut	0.01
Magen	0.12	Knochenoberfläche	0.01
Blase	0.05	Übrige	0.05
Brust	0.05	Summe	1.00

Hinsichtlich einer Risikobeurteilung sind zwei wichtige Begriffe auseinanderzuhalten:

Die *Feststellung* des Risikos heisst, eine *objektive* Grösse, einen objektiven 'Endpoint', mit einer physikalischen Grösse zu korrelieren oder eine objektive biomedizinische Grösse in physikalischen Einheiten auszudrücken.

Die *Bewertung* der Risiken stellt demgegenüber die *subjektive* Komponente dar und kann so zu einem politischen Moment werden.

Aus strahlenbiologischer Sicht ist nur die Feststellung der Risiken, also der objektive Teil, wissenschaftlich vertretbar. Betreffend einer generellen Risikobewertung muss ausdrücklich festgehalten werden, dass die ionisierenden Strahlen nur *eine* mögliche Ursache für Umwelt- bzw. zivilisatorische Schäden darstellen. Daher sind zum Vergleich mit anderen Risiken (z.B. chemischer Art) nur absolut vergleichbare, objektive Grössen zulässig, die aber heute meist noch fehlen.

3.3.2 Projektionsmodelle und Dosis-Wirkungsbeziehungen:

Das Risiko eines strahlenbedingten biomedizinischen Effektes (z.B. Tumorentstehung) wird aus sogenannten Projektionsmodellen ersichtlich. Man unterscheidet a) ein absolutes (additives) und b) ein relatives (multiplikatives) Risiko.

a) Das *absolute Risiko* stellt das zusätzliche Auftreten eines Effektes durch eine bestimmte Dosis einer bestimmten Strahlenqualität dar. Es errechnet sich aus der *arithmetischen Differenz* zwischen den Häufigkeitsraten der nicht exponierten und einer strahlenexponierten Bevölkerungsgruppe. Nach einer Latenzzeit steigt die Inzidenzrate an; dies unabhängig vom spontanen Risiko aber als Funktion der absorbierten Dosis.

b) Das *relativen Risiko* wird ausgedrückt als das *Verhältnis* zwischen den Häufigkeitsraten einer strahleninduzierten Wirkung bei einer exponierten und bei der nicht exponierten Bevölkerung. Beim relativen Modell wird also die Exzess-Inzidenz auf Lebenszeit durch die Multiplikation der natürlichen Inzidenz mit einem Faktor errechnet (deshalb auch die Bezeichnung 'multiplikatives Modell'). Der Multiplikationsfaktor resultiert aus Beobachtungen, die nur einen Teil der Lebenszeit betreffen.

Die Wahl der Projektionsmodelle und der Dosis-Wirkungskurven beeinflusst wesentlich die Grösse der Risikowerte.

Für das genetische Risiko und die Tumorinduktion (neuerdings auch für die Leukämie) wird für den Strahlenschutz die lineare Dosis-Wirkungsbeziehung gewählt.

3.4 Wirkungen kleiner Dosen

Die biologischen Effekte kleiner Dosen sind meist stochastischer Natur.

3.4.1 Dosisbereiche

Dosis: Nach UNSCEAR 1986 werden unter einer *niedrigen* Dosis Belastungswerte zwischen 0 - 0,2 Sv verstanden, unter einer *mittleren* Dosis Werte von 0,2 - 2,0 Sv und unter einer *hohen* Dosis Werte von 2,0 - 10,0 Sv.

Dosisraten: Werte unter 0,05 mSv/min bedeuten *niedrige* Dosisraten und *hohe* Dosisraten Werte von über 0,05 mSv/min.

3.4.2 Kollektive Risiken

a) *Natürliche Strahlenexposition:*

Die natürliche Strahlenbelastung des Menschen variiert je nach seinem Wohngebiet beträchtlich. In der Schweiz beträgt sie für die Bevölkerung durchschnittlich 3,37 mGy/a (1988, incl. Radon) mit einer erheblichen Schwankungsbreite von 1-8 mGy/a. Wesentlich höhere externe Dosisraten von bis zu 120 mGy/a kennt man beispielsweise in Brasilien oder Kerala (Indien). (Vergl. Tabelle 3.4).

Mehrere Studien beschäftigten sich mit den möglichen biologischen Folgen in Gegenden mit grosser natürlicher Strahlenexposition. Bei der Bevölkerung fanden sich zwar örtlich vermehrte Chromosomen-Aberrationen, aber hinsichtlich der Tumorfrequenz konnte kein Anstieg beobachtet werden (wie auch aus der Tabelle 3.4 hervorgeht). Im Gegenteil, oft wurde sogar ein inverser Effekt registriert, d.h. eine niedrigere Tumorraten in den Gebieten mit höchster Strahlenexposition (z.B. in Gegenden der Schweiz, USA, Indien). Rein theoretisch lässt sich bei einer linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung schätzen, dass in der Schweiz etwa 4 % der "normalen" Krebsmortalität auf die Strahlenexposition durch natürliche Quellen zurückzuführen ist.

b) *Beruflich Strahlen-Exponierte:*

Im Vergleich zur Bevölkerung sind einige Berufsgruppen in Medizin, Technik und Industrie einer höheren Strahlenbelastung ausgesetzt. Diese Mehrbelastung ist heute wegen den fortschrittlichen Strahlenschutzmassnahmen meist gering. In der Schweiz betrug sie 1989 bei über 55 000 überwachten Personen im Mittel 0,30 mGy/a pro Person; ein Wert also, der im Schwankungsbereich von natürlichen Ortsdosen liegt.

Das strahlenbedingte Berufsrisiko ist Inhalt zahlreicher Untersuchungen. Bei *Bergwerksarbeitern* z.B., die während ihrer Arbeit Radon und dessen Zerfallsprodukten ausgesetzt waren, wurde eine erhöhte Lungenkrebsinzidenz festgestellt. Andere, teilweise beträchtlich höhere Risiken, wie das Rauchen, kompromittieren allerdings die Aussagekraft solcher Resultate erheblich. Neueste, sehr detailliert konzipierte Studien konnten dagegen bei *Beschäftigten in der Kernindustrie* das gelegentlich vermutete Krebsrisiko nicht bestätigen.

c) *Bevölkerung um kernindustrielle Anlagen:*

In Studien bei der Bevölkerung in der Umgebung einer Kernanlage fand sich keine erhöhte Krebsmortalität. Auch eine soeben in den USA durchgeführte Nachuntersuchung an über 900000 Krebs-Todesfällen schloss einen Zusammenhang "Tumorinzidenz - Nähe einer Kernanlage" aus. Einzig in den 80-er Jahren erregte eine angebliche Erhöhung der kindlichen Leukämierate in der Umgebung von Sellafield (GB) weltweites Aufsehen. Die Ergebnisse konnten aber bei Nachkontrollen nicht bestätigt werden. Ähnliche Häufungen von Leukämie (sog. Cluster) fehlten in der Umgebung von anderen Kernanlagen bzw. wurden auch in Gegenden ohne Nuklearindustrie beobachtet. Daher wird heute eine Viruserkrankung als mögliche Ursache für Leukämiecluster angesehen.

Tabelle 3.4

Natürliche Strahlenbelastung und biologische Folgen

Land	Strahlenpegel (mGy/a)	Population	Ergebnisse
Kerala (Indien)	1-20	70000	Keine Unterschiede betreffend Fertilität, Missgeburtsrate Anomalien, Kinder-Todesrate
Kerala	15-30	18800	Mongolismusrate leicht erhöht
Indien 6 Städte	0,2-0,75	Bombay, Pune Bangalore, Ahmedabad Nagpur, Madras	Krebsmortalität niedriger in Städten mit höherer Strahlung (Inverse Dosis-Effekt- Beziehung)
Japan	0,39-1,59	329 Distrikte	Krebsmortalität unverändert
China	1,2-3,51	160000	bei höherer Strahlung Krebs- mortalität zunehmend (statistisch nicht signifikant) Chromosomen-Aberrationen erhöht (statistisch signifikant)
USA	A) 2,10 B) 1,70 C) 1,18	82,3 Mio. 7 Staaten 14 Staaten 14 Staaten	In Gruppe A (höchste Strahlung) Krebs- und fötale Mortalität niedriger als in den Gruppen B und C
Schweiz	drei Zonen 1 0,8-1,2 2 1,2-1,8 3 1,8-2,4	5,02 Mio.	In Zone 3 (höchste Strahlung) Krebsmortalität, Missbildungs- rate niedriger als in Zone 1 (in Zone 2 leicht höher als Zone 1)

d) Patienten

Die Tumorfrequenz ist bei therapeutisch wegen verschiedener Krankheiten vorbestrahlten Patienten erhöht, allerdings in geringerem Ausmass als bei Atombombenopfern. Dies zeigen u.a. eine englische Nachkontrolle bei 14000 Patienten mit einem früher häufig bestrahlten Wirbelsäuleleiden (Morbus Bechterew) und eine Studie bei über 150000 Frauen mit Gebärmutterkrebs. Bei Tuberkulose-Patientinnen führten häufige Durchleuchtungen des Oberkörpers zu einem erhöhten Brustkrebsrisiko. Auch die zusätzliche Strahlenbelastung des Foetus durch eine röntgendiagnostische Untersuchung der Mutter ist mit einem erhöhten kindlichen Tumorrisiko verbunden.

3.4.3 Phänomenologie des Risikos

a) Genetisches Risiko (Keimzellmutationen)

Die natürliche Mutationsrate ist sehr hoch und betrifft, gemäss den Angaben verschiedener Studien, bis zu 11 % der Lebendgeborenen. In Anbetracht dieser hohen natürlichen Frequenz konnte beim Menschen die Dosis-Wirkungsbeziehung für *strahleninduzierte* Keimzellmutationen bisher nicht gesichert werden. Zum Beispiel zeigte die Anomalierate bei über 70000 Nachkommen von japanischen Atombombenopfern gegenüber einer nicht betroffenen 'Kontrollbevölkerung' keine signifikanten Veränderungen. Man ist deshalb auf *Schätzungen* angewiesen, die auf tierexperimentellen Erfahrungen beruhen. Aber selbst diese sind für den niedrigsten Dosisbereich sehr unsicher, so dass man auch auf Extrapolationen aus einem höheren Dosisbereich zurückgreifen muss.

Nach ICRP 1991 dürften vernünftige Schätzungen der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer erblichen schweren Erkrankung für die allgemeine Bevölkerung bei $1,3 \times 10^{-2}$ pro Sv und für die beruflich tätige Bevölkerung bei $0,8 \times 10^{-2}$ pro Sv liegen.

Gemäss BEIR 1990 lässt sich für genau definierte Erbkrankheiten beispielsweise nach einer Belastung mit 0,01 Gy (niedrige Dosisrate und niedrige LET) pro 30-Jahrgeneration in der ersten Generation eine Zunahme von 15-40 Anomalien pro Million Lebendgeborener schätzen. Diese ist im Vergleich zur natürlichen Manifestationsrate von 36000-46000 Fällen pro Mio. kaum erkennbar.

Als *Verdoppelungsdosis*, d.h. als diejenige Dosis, die gleichviele Mutationen induziert, wie sie natürlicherweise entstehen, wird üblicherweise 1 Gy angegeben.

b) Entwicklungsstörungen

Auf die erhöhte Strahlensensibilität während der Entwicklungsphase wurde bereits hingewiesen.

Bei der Maus steigt die Gesamtschädigungsrate nach einer Bestrahlung mit einer Dosis von 0,01 Gy am 8. Tag nach der Befruchtung.

Nachkontrollen bei japanischen Kindern, die infolge der Atomwaffen-Explosionen in utero strahlenexponiert waren, zeigen, dass die Belastung mit kleinen Dosen hauptsächlich das zentrale Nervensystems schädigt. Hinsichtlich des Auftretens einer geistigen Behinderung wurde allerdings nur nach Bestrahlung in der kritischen Entwicklungsphase (8. bis 15. Woche der Gestation) eine lineare Dosiswirkungs-Beziehung beobachtet. Nach UNSCEAR 1986 beläuft sich das Gesamt-Schädigungsrisiko eines lebendgeborenen Menschen auf 0,2 % pro 0,01 Gy, wenn die Strahlendosis über die ganze Gestationsperiode verabreicht wird.

c) Krebsinduktion

Im Gegensatz zum genetischen Risiko, stehen für die Risikoeinschätzung einer Tumorinduktion die Erfahrungswerte aus zahlreichen epidemiologischen Studien beim Menschen zur Verfügung. Gut untersuchte Kollektive betreffen Überlebende der Atombombenexplosionen und therapeutisch bestrahlte Patientengruppen (siehe oben). Diese Studien zeigen, dass sich nach einer Strahlenexposition prinzipiell in allen Organen oder Geweben ein Krebs entwickeln kann, aber der Zeitpunkt des Auftretens (bzw. die Latenzzeit) variiert. Die meisten soliden Tumoren weisen eine minimale Latenzzeit von etwa 10 Jahren auf. Leukämien können bereits früher auftreten.

Nach ICRP 1991 wird das Risiko für das Auftreten von tödlichen Krebsfällen für die Bevölkerung mit 5×10^{-2} pro Sv und für beruflich strahlenexponierte Personen mit 4×10^{-2} pro Sv angegeben.

Die am besten dokumentierte epidemiologische Studie betrifft die Überlebenden der Atombomben-Explosionen von Hiroshima und Nagasaki. Unter den 41719 Menschen, die mit Dosen von 0,01 - über 4 Gy bestrahlt worden waren, traten in den Jahren 1950-85 insgesamt 3435 Krebstodesfälle auf. Da in dieser Gruppe natürlicherweise ohnehin 3045 Krebstodesfälle zu erwarten gewesen wären, ergibt sich in diesen 35 Jahren ein "strahlenbedingter Ueberschuss" von lediglich 390 Fällen.

3.5 Wirkungen hoher Dosen

3.5.1 Einleitung

Erst seit dem Menschen die Herstellung künstlicher Strahlenquellen gelungen ist, besteht auch die Möglichkeit sich einer hohen Strahlenbelastung (über 2,0 Gy) auszusetzen. Im Gegensatz zur permanenten natürlichen Strahlenexposition mit niedrigen Dosisraten sind hohe Expositionsraten immer artifiziell, gleichgültig, ob gewollt oder unbeabsichtigt. Betroffen sind somit immer nur begrenzte Personengruppen. Hinsichtlich der *Ursachen* für eine hohe Strahlenexposition dominieren zwei Möglichkeiten, die *traumatischen* und die *medizinisch* bedingten (Tabelle 3.5):

Tabelle 3.5 Ursachen für hohe Strahlenbelastungen

Ursache	Ereignis	Begründung	Auswirkung
traumatisch	gewollt ungewollt	Nuklearwaffen Unfall	Massenausfälle Einzelfälle
medizinisch	gewollt ungewollt	Therapie Unfall/ Fehler	Patientenkollektiv Einzelfall, -organ

Die biologischen Auswirkungen hoher Dosen sind deterministischer Natur und vorallem nach den Atombombeneinsätzen in Japan und wegen den Fortschritten in der Strahlentherapie relativ gut bekannt. Prinzipiell besteht zwischen ca. 0,01 und 100 Gy, also auch für den klinisch relevanten Bereich, eine *lineare Dosis-Wirkungs-Beziehung* über mindestens drei Grössenordnungen.

Diese Linearität ist im Wirkungsbereich kleiner Dosen fraglich und wird daher kontrovers diskutiert, da, wie oben dargelegt, verschiedene Modelle denkbar sind. Auch der wegen des *Unfallbegriffes* versicherungsrechtlich wichtige Übergang vom sehr niedrigen Dosisbereich, in welchem die Wirkungen anhand von Projektionsmodellen geschätzt werden, zum linearen Dosis-Wirkungsbereich ist nicht einheitlich definiert. Die SUVA anerkennt eine unbeabsichtigte, kurzfristige Ganzkörperexposition mit 0,25 Gy als Unfall, obwohl in dieser Grössenordnung keine akuten Krankheits-symptome auftreten. In Anbetracht der technischen Schwierigkeiten der Dosimetrie in Unfallsituationen und der unbestimmten Spätrisiken wird diese Dosisregel im Einzelfall nicht starr ausgelegt.

Im Folgenden wird vorallem auf die *somatischen Auswirkungen* und die klinische Symptomatik von hohen Strahlenbelastungen eingegangen. Diesbezüglich besonders bedeutungsvoll sind a) der Zeitfaktor, b) die Strahlensensibilität des betroffenen Organes sowie c) das Ausmass und die Art der Bestrahlung. (Für strahlentherapeutischen Besonderheiten siehe Kapitel 7).

a) Zeitfaktor

Man unterscheidet *akute Strahlensyndrome* (Auftreten sofort bis Wochen nach der Exposition) und *Spätfolgen* (Monate bis Jahre). Bei medizinischen Einsätzen bestimmt die zeitlich auf die biologischen Eigenschaften eines Tumors abgestimmte Strahlenwirkung die Behandlungschancen. Umgekehrt erlaubt die Beobachtung des zeitlichen Ablaufs von Symptomen die Prognose der Überlebenschancen des Patienten nach einer kriegs- oder unfallbedingten Strahlenexposition. Diesbezüglich relevant ist das akute Beschwerdebild, während allfällige Spätfolgen erst als kollektives Risiko sichtbar werden.

b) Organsensibilität

Die unterschiedliche Empfindlichkeit der einzelnen Organe bestimmt die objektive Symptomatik der Strahlenkrankheit. Besonders empfindlich reagieren Organe mit hoher Zellteilungsrate, wie Knochenmark, Darmschleimhaut, Lymphatisches System (immunologische Abwehr) und reproduktive Organe. Aber auch bei anderen Organen entstehen typische Strahlenläsionen, wie die Linsentrübung des Auges, Hautschädigungen (Haarausfall, Rötung, Strahlendermatitis), Lungenfibrose, Niereninsuffizienz, Nervenzellschäden u.a. (Vergl. Kap. 3.2.1).

c) Formen der Strahlenbelastung

Die Grösse eines *bestrahlten Volumens* ist von grosser biologischer Bedeutung. Entsprechend wird eine akute *Ganzkörperbestrahlung (GK)* besser ertragen als *Teilkörperbestrahlung (TK)*. Zwar können auch bei örtlich begrenzter Bestrahlung Allgemeinsymptome des Körpers auftreten, doch das Erscheinungsbild ist gegenüber einer Ganzkörperexposition in quantitativer und qualitativer Hinsicht völlig verschieden. Während akute GK-Belastungen von mehr als 5 Gy kaum überlebt werden, werden örtlich begrenzte Teilkörper- oder Organdosen bis zu mehreren 10 Gy therapeutisch erfolgreich eingesetzt. TK-Bestrahlungen sind auch in Unfallsituationen wesentlich häufiger.

Auch die *Art der Exposition* ist klinisch und biologisch bedeutungsvoll. Die Symptomatik ist verschieden, je nachdem ob die Bestrahlung *von aussen* (z.B. in Form einer Strahlendusche) oder durch *Inkorporation* von strahlender Materie erfolgt ist. Zudem ist bei ungewollten, insbesondere kriegsbedingten Expositionen, der Krankheitsverlauf oft durch *andere Faktoren* erschwert, z.B. durch Blutverlust, Infektionen, Wasser- und Nahrungsmangel. Solche sogenannten *Kombinationsschäden* beeinträchtigen die Überlebenschancen der Verletzten wesentlich und bestimmen deshalb auch die therapeutischen Konzepte der Katastrophenmedizin.

3.5.2 Strahlensyndrom

Die Strahlenkrankheit des Menschen wird hauptsächlich durch deterministische Ereignisse bestimmt. Sie ist nach der Explosion der Atombomben von Hiroshima und Nagasaki in ihrer Tragweite erfasst und seither intensiv untersucht worden. Entsprechend der unterschiedlichen Strahlenempfindlichkeit der Organe treten funktionelle Störungen bzw. Organversagen dosisabhängig und zeitlich gestaffelt auf, so dass sogar dosimetrische Rückschlüsse möglich sind (biologische Dosimetrie). Je früher und je heftiger die Symptome ausbrechen, umso schlechter sind die Behandlungschancen.

Prinzipiell lässt sich der Ablauf des Strahlensyndroms in *Stadien* einteilen, die mit steigendem Schweregrad ineinander übergehen:

- a) *Latenzzeit* (Zeit zwischen Strahlenexposition bis Auftreten erster Symptome),
- b) *Prodromalstadium* (Strahlenkater),
- c) *Symptomfreies Intervall* (fakultativ),
- d) *Akute Strahlenkrankheit*,
- e) *Rekonvaleszenz* oder Strahlentod.

Die *Leitsymptome der Strahlenkrankheit* sind heftiges Erbrechen und massive Durchfälle, die Ausdruck für die Schädigung der Darmschleimhaut sind und rasch zu einem Flüssigkeits- und Salzverlust des Körpers führen; ferner Blutungen, Halsentzündungen wegen Störungen der Blutzellbildung und Infektabwehr, sowie ein plötzlicher Haarausfall.

3.5.3 Schutzmassnahmen

Die Strahlenbelastungen können durch kollektive Schutzmassnahmen und adäquate und individuelle Verhaltensweisen wesentlich reduziert werden, was sowohl für das Auftreten von Frühsymptomen (Überleben) als auch für das Risiko von Spätfolgen bedeutsam ist. Man unterscheidet *aktive* und *passive Massnahmen* sowohl hinsichtlich einer externen, als auch internen Exposition (dazu siehe Tabelle 3.6). Durch bauliche und andere Schutzvorrichtungen, Vorratshaltung von Nahrungsmitteln, Wasser und Medikamenten, Planungen von Evakuationsmöglichkeiten und -wegen in denkbaren Verstrahlungslagen und instruierte Verhaltensweisen von Militär- und Zivilpersonen gilt es die örtliche und zeitliche Strahlenbelastung im Fall eines nuklearen Angriffes für einen Grossteil der betroffenen Bevölkerung möglichst gering zu halten. Wie für andere Katastrophenlagen können auch hier vorbereitete Massnahmen einen lebensrettenden Zeitgewinn bringen.

Tabelle 3.6 Strahlenschutzmassnahmen

Bestrahlungsart	Schutz-wirkung	Art der Massnahme	Prinzip der Schutzwirkung
Externe Bestrahlung	<i>passiv</i>	bauliche:	Dicke der Abschirmung/ Abstand von Strahlenquelle
		zeitliche	Begrenzung der Exposition
		chemische	Einsatz von bio- logischen Faktoren
Inkorporation	<i>aktiv</i>	Dekontamination Evakuierung	
	<i>passiv</i>	Vermeidung Aufnahme	
	<i>aktiv</i>	Medikamente	

3.5.4 Therapie von Verstrahlten

Eine wirksame kausale Behandlung im Sinne einer Heilung durch Ausschalten der krankheitsverursachende Faktoren gibt es nicht. Diese wäre auch theoretisch kaum vorstellbar, da die biologischen Auswirkungen auf einem irreversiblen Phänomen, dem intrazellulären Energietransfer, beruhen. Schutzmassnahmen zur Vermeidung oder Verringerung seiner Eintrittswahrscheinlichkeit sind begrenzt wirksam. Beobachtungen der weiten Streuung der Strahlenresistenz von Tierarten zeigen allerdings, dass in der Natur verschiedenen chemischen Substanzen eine strahlenprotektive Wirkung zugesprochen werden kann (z.B. Chitin bei Insekten). Technologisch genutzte Anwendungen finden sich bisher nur für Schutzfaktoren gegen UV-Licht, die den Sonnencremen beigemischt werden. Die Konzentration von bereits inkorporierten Radioisotopen in empfindlichen Organen kann ev. durch eine rechtzeitige Gabe von bestimmten Medikamenten vermieden, reduziert oder deren Ausscheidung gefördert werden (Natriumjodid-Tabletten blockieren die Aufnahme des Radiojodes in der Schilddrüse).

Im Wesentlichen konzentriert sich die Behandlung von Verstrahlten auf die Symptombekämpfung und die Vermeidung häufiger Komplikationen. Neben verschiedenen medizinischen Massnahmen gehören dazu auch die Hygiene und die Ernährung. Viele Erkenntnisse der modernen Medizin, wie Operationstechniken, Behandlungen in sog. 'life islands', Transplantationen von Knochenmark, Medikamente u.a., haben die Überlebenschance von Strahlungsoffern in Friedenszeiten wesentlich erhöht. Dies zeigen auch die therapeutischen Einsätze von sonst letalen Knochenmarksdosen (über 10 Gy) in der Behandlung von einzelnen Leukämieformen. Dennoch, *Unfallprophylaxe in jeder Form und Schutzmassnahmen sind jedem Therapiekonzept voranzustellen.*

3.6 Strahlenschutz, Dosis-Grenzwerte

Nach der Internationalen Strahlenschutz-Kommission (ICRP) ist das Ziel des Strahlenschutzes schädliche deterministische Wirkungen zu verhindern und die Risiken von stochastischen Wirkungen auf einem noch annehmbaren Niveau zu begrenzen. Es sollte keine Tätigkeit aufgenommen werden, die mit einer Strahlenexposition verbunden ist, bevor nicht ihr Nutzen erwiesen ist. Gemäss einem anerkannten Prinzip muss die Strahlenbelastung jeweils so niedrig gehalten werden, wie dies, unter Berücksichtigung aller wirtschaftlicher und sozialer Faktoren, vernünftigerweise erreichbar ist.

Die heute geltenden *Dosis-Grenzwerte* sind (ICRP 1991):

Für die *beruflich Strahlenexponierten* gilt eine effektive Dosis von 20 mSv pro Jahr, gemittelt über eine definierte Periode von 5 Jahren. In einem einzelnen Jahr sollen 50 mSv nicht überstiegen werden. Betreffend Teilkörperbestrahlungen (deterministische Effekte) wird eine jährliche Äquivalentdosis für die Linse des Auges von 150 mSv, für die Haut, Hände und Füsse von 500 mSv eingesetzt.

Für die *allgemeine Bevölkerung* gilt 1 mSv/a. Für ein einzelnes Jahr ist eine höhere Dosis zulässig, vorausgesetzt dass der Mittelwert über 5 Jahre nicht 1 mSv/a übersteigt. Die Grenzwerte für Teilkörperbestrahlung sind für die Augenlinse 15 mSv und für die Haut 50 mSv (neue Empfehlungen der Schweizerischen Strahlenschutzverordnung).

Strahlenschutzbewusstsein:

Die individuelle und kollektive Sensibilisierung hinsichtlich potentieller Strahlenrisiken erfolgte sprunghaft auf Grund der strahlenbiologischen Beobachtungen nach den Atombombenabwürfen und nach Unfällen bei der Kernenergienutzung. Bereits kurz nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen wurden Organschäden und sogar Todesfälle bekannt. Ende der 20-er Jahre gelang es, das genetische Risiko zu quantifizieren, was zur Gründung der Internationalen Kommission für Strahlenschutz (ICRP) führte. Nach dem zweiten Weltkrieg wurde der Strahlenschutzgedanke institutionalisiert. Es entstanden Abkommen, Gesetze und Verordnungen auf internationaler und nationaler Ebene, die seither laufend dem Erfahrungsstand angepasst worden sind. Wichtig dafür waren auch die Ergebnisse von epidemiologischen Studien bei überlebenden Atombombenopfern und bei strahlenexponierten Berufsgruppen. Erwähnenswert ist dazu eine bei Röntgenärzten durchgeführte Studie aus den 50-er Jahren, die neben genetischen erstmals auch somatische Langzeitrisiken diskutierte, insbesondere eine erhöhte Tumorbahrscheinlichkeit. Mit der weltweit zunehmenden Verbreitung der Kerntechnologie zur Energiegewinnung und auch wegen den Betriebsunfällen in der Nuklearindustrie (z.B. Tschernobyl) wurden die Strahlenrisiken einer breiten Öffentlichkeit bekannt. Die Problematik erhielt eine politische Dimension und führte wegen der auch unter Fachleuten divergierenden Meinungen in Sicherheitsfragen zu einer Versäuerung breiter Bevölkerungskreise, zu einem Vertrauensschwund in Behörden und Institutionen und zu einer zeitweisen Lähmung von Aktivitäten in verschiedenen Anwendungsbereichen der Strahlentechnologie und der Forschung.

Die Schweiz gilt weltweit als Pionierland des Strahlenschutzes. Ein neues Strahlenschutzgesetz, das gewisse Vorbehalte gegenüber bisherigen Verordnungen korrigieren wird, steht kurz vor der Einführung.

4 Epidemiologie

4.1 Einleitung

In jüngster Zeit haben viele Untersuchungen dazu beigetragen die gesundheitsgefährdenden Risiken von zahlreichen menschlichen Aktivitäten und Umweltseinflüssen aufzudecken und hinsichtlich ihrer kurz- und langfristigen Auswirkungen auf Einzelpersonen und verschiedene Bevölkerungsgruppen besser einzuschätzen. Manche Ergebnisse sind einer breiteren Öffentlichkeit bekannt geworden und haben deren Lebensgewohnheiten nachhaltig beeinflusst, andere werden trotz überzeugender Daten noch immer verkannt. Auch über die Schädlichkeit der Strahlung liegen umfangreiche epidemiologische Studien vor, wobei eine mögliche Krebsentstehung eindeutig im Vordergrund der Untersuchungen steht. Obwohl dieser bereits oben diskutierte Strahlungseffekt experimentell bewiesen ist, tritt er epidemiologisch aber als krebs-erregende Ursache kaum in Erscheinung. Die Krebshäufigkeit hängt offenbar in erster Linie von chemischen Faktoren und allenfalls auch von einer genetisch bedingten, individuellen Veranlagung ab. Somit spielen Ernährung und andere Lebensgewohnheiten eine viel grössere Rolle als eine sogar weit über dem Durchschnitt liegende Strahlenbelastung.

Weltweit gibt es viele Gebiete (z.B. in Indien und Brasilien), in denen grössere Populationen dauernd so hohen natürlichen Strahlendosen ausgesetzt sind, die nach den bei uns geltenden Strahlenschutzgesetzen bereits zu Alarm oder sogar zur Evakuierung der betroffenen Bevölkerung führen müssten (Tabelle 3.4). Ein erhöhtes Krebsvorkommen wurde dort bisher nie registriert.

Auch in der Schweiz bestehen örtlich grosse Unterschiede in der natürlichen Strahlenbelastung. Aber auch hier sind in den Gebieten mit erhöhter Gesteinsradioaktivität oder überdurchschnittlichen Radonkonzentrationen (vergl. Kapitel 4.3) die Krebsleiden deshalb nicht häufiger, sondern paradoxerweise sogar geringer als im schweizerischen Mittel, wie eine epidemiologische Studie zeigt (Hinweise dazu auch in Abbildung 4.1). Diese Problematik ist wegen der vom Bundesamt für Gesundheitswesen propagierten, kostspieligen Häusersanierungen aktuell.

Im Gegensatz zur fehlenden Abhängigkeit von der natürlichen Strahlenbelastung findet man aber weltweit grosse Unterschiede in den Häufigkeiten wichtiger Krebsleiden als Folge von bevölkerungsspezifischen und genetischen Faktoren sowie von *zivilisatorischen Einflüssen* (Tabelle 4.1). Zudem stellt man oft unerwartet rasche Inzidenzänderungen in Abhängigkeit von einem veränderten (Konsum-) Verhalten fest. Die Abbildung 4.2 zeigt diese Entwicklungen.

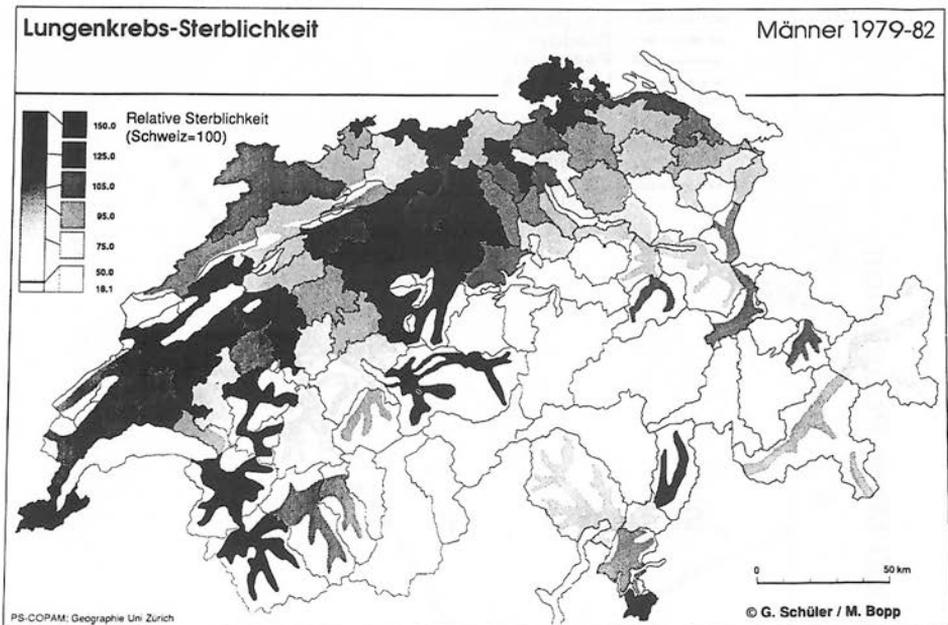


Abbildung 4.1: Lungenkrebssterblichkeit in der Schweiz

(Relative Tumorsterblichkeit in dunkel markierten Gebieten höher und in weissen Regionen tiefer als im schweizerischen Durchschnitt)

Beispiele: Bedingt durch das Rauchen von Zigaretten hat der Lungenkrebs neuerdings auch bei Frauen stark zugenommen. Infolge der Mode des Sonnenbadens (Ultraviolettstrahlung) wurden die Fälle von schwarzem Hautkrebs (Melanom) in den letzten Jahren viel häufiger. (Dazu ist folgende Notiz interessant: Wie Risikovergleiche mit einer ionisierenden Strahlung zeigen, wäre eine Sonnenexposition von lediglich 95 Minuten pro Jahr tolerabel, wenn unsere Strahlenschutzbestimmungen auch für die UV-Strahlung gelten würden).

Umgekehrt hat auch der in den letzten Jahren deutliche Rückgang des Magenkrebses seinen Grund: Durch die heute mittels chemischen Prozessen "geräucherten" Fleischwaren entfallen die kanzerogenen Teerstoffe der "natürlichen" Räucherung.

**Age-Adjusted Cancer Death Rates* for Selected Sites
Males, United States, 1930-1978**

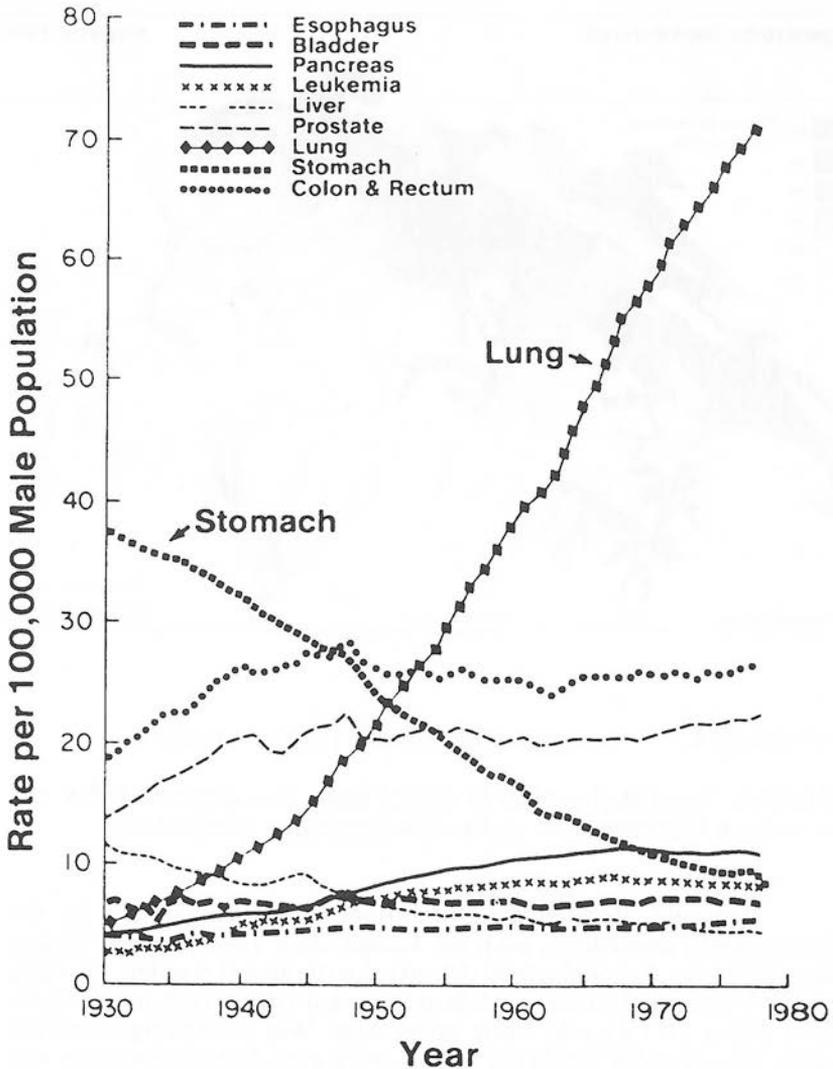


Abbildung 4.2: Krebssterberaten 1930-1978 für Männer. Verlauf für einige sich stark ändernde Tumorhäufigkeiten (US National Center for Health Statistics).

Tabelle 4.1: Rangfolge häufigster Krebsarten im regionalen Vergleich

	CHINA	O-EUROPA	ZÜRICH	USA
<i>Männer</i>				
1	Magen	Lunge	Lunge	Lunge
2	Oesophag	Magen	Prostata	Prostata
3	Leber	Darm	Darm	Darm
4	Lunge	Prostata	Harnblase	Harnblase
5.	Darm	Rachen	Magen	Lymphome
<i>Frauen</i>				
1	Zervix	Brust	Brust	Brust
2	Magen	Magen	Darm	Darm
3	Oesophag	Zervix	Uterus	Lunge
4	Brust	Darm	Ovar	Uterus
5	Darm	Lunge	Melanom	Lymphome

Bei diesen Vergleichen sollte allerdings nicht vergessen werden, dass eine zuverlässige Krebsstatistik vielenorts heute noch fehlt, so dass Änderungen der Krebsinzidenz verfälscht sein können. Trotzdem ist es angesichts dieser Tatsachen schwer verständlich, wie stark in der Öffentlichkeit die strahlungsbedingte Krebsgefahr durch die Medien überzeichnet wird, während es den Präventivmedizinerinnen nicht gelingt, das Bewusstsein für reelle, belegte Gefahren, wie das Rauchen, zu wecken.

4.2 Natürliche und zivilisatorische Strahlenexpositionen

4.2.1 Natürliche Strahlenquellen

Die Menschen sind seit jeher der Belastung verschiedener natürlicher Strahlenquellen ausgesetzt. Diese variiert je nach Wohnort und Lebensgewohnheiten erheblich. Hinsichtlich der biologischen Auswirkungen bestehen keine Unterschiede zwischen einer natürlichen oder künstlich erzeugten (zivilisatorischen) Strahlung.

Prinzipiell können drei *natürliche Strahlenquellen* unterschieden werden:

a) *Extraterrestrische, kosmische Strahlung*: Die Herkunft der primären kosmischen Strahlung ist nicht völlig geklärt. Sie besteht zu etwa 90% aus hochenergetischen Protonen ($1-10^{14}$ MeV) und zu circa 10% aus $^4\text{Helium}$ -Ionen und schwereren Teilchen. Elektronen und Protonen werden in beiden Strahlengürteln der Erde im magnetischen Feld abgefangen. Durch Interaktionen mit Atomen der Luft entstehen in der Atmosphäre sekundäre kosmische Strahlen wie Neutronen, Protonen, Elektronen, Photonen. Von Stickstoffkernen eingefangene Neutronen führen zur Bildung von ^{14}C , das wegen seiner langen physikalischen Halbwertszeit und seiner Teilnahme an zellmetabolischen Vorgängen ein bekannter Indikator für die archäologische Datierung geworden ist.

b) *Terrestrische Strahlung*: Sie wird von radioaktiven Quellen ausgesandt, die sich in der Erde und in Baumaterialien finden. Der Gehalt an radioaktiven Nukliden in verschiedenen Gesteinen variiert stark und ist in Graniten sehr hoch, in Sedimenten von Kalk und Sandstein gering. Die Strahlenbelastung erfolgt grösstenteils körperextern durch Gammastrahlung. Eine interne Exposition infolge Einatmen oder Inkorporation von radioaktiven Substanzen ist möglich.

c) *Endogene Strahlung*: Die interne Bestrahlung erfolgt insbesondere durch das omnipräsente ^{40}K Kalium, durch die nahrungsbedingte Aufnahme (Inkorporation) von Radionukliden und die Inhalation von Radon und seinen Folgeprodukten.

4.2.2 Zivilisatorische Strahlenexpositionen

Die Herkunft der zivilisatorischen Strahlenbelastung ist, wie nachfolgende Beispiele zeigen, vielfältig und örtlich stark unterschiedlich (Abbildung 4.3). Für die Schweizer Bevölkerung resultieren jährlich im Durchschnitt 1.3 mSv/a aus künstlichen Strahlenquellen (natürliche 3.4 mSv/a). Den grössten Teil dazu trägt die Medizin bei. Aber auch viele Gegenstände und Materialien des täglichen Gebrauchs enthalten natürliche oder künstliche Radionuklide.

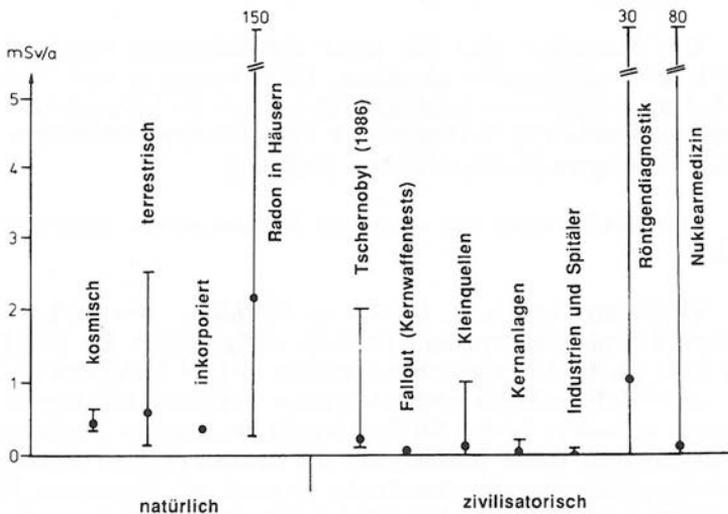


Abbildung 4.3: Natürliche und zivilisatorische Strahlenbelastung in der Schweiz (Effektive jährliche Äquivalentdosen für die Bevölkerung in mSv/a), KUEr 1989

In Technik und Medizin ist heute ein Verzicht auf Strahlenquellen kaum mehr vorstellbar. Durch diese Anwendungen erfahren allerdings verschiedene Berufsgruppen eine zusätzliche Strahlenbelastung im Vergleich zur Allgemeinbevölkerung. In der Schweiz werden etwa 55'000 'beruflich strahlenexponierte' Personen überwacht, wovon circa 35'000 Medizinalpersonen. Die von ihnen zusätzlich akkumulierten Strahldosen betragen im Durchschnitt 0.3 mSv/a und liegen somit im Streubereich der natürlichen Strahlenbelastung in der Schweiz. Sehr selten ist in den letzten Jahren der für beruflich strahlenexponierte Personen gesetzlich festgelegte Grenzwert von 50 mSv/a (neu: 20 mSv/a) erreicht worden, meist wegen Unachtsamkeit, Nichteinhaltung von Betriebsvorschriften oder defekten Geräten. Wird diese berufliche Strahlenexposition auf die Gesamtbevölkerung umgerechnet, so ist sie vernachlässigbar. Dieser erfreuliche Zustand zeigt, dass in der Schweiz der Strahlenschutz beherrscht wird.

Beispiele für die Verbreitung von Strahlenanwendungen und die technisch bedingte Zunahme der natürlichen Strahlenbelastung sind:

Die Leuchtziffern von Uhren enthalten heute kein Radium mehr, sondern Tritium. Das Gehäuse absorbiert zwar die Beta-Strahlung vollständig, jedoch diffundiert jährlich ca. 5 % des Tritiums aus der Uhr. Die ionisierende Wirkung von Alpha-Strahlen nutzt man vor allem bei Feuermeldern und antistatischen Vorrichtungen aus. Im weiteren enthalten viele Gebrauchsgegenstände kleine, aber messbare Mengen von Radionukliden. Uran ist z.B. in Zahnporzellan, Gläsern, Porzellanglasuren und Keramikgegenständen nachzuweisen, oder Thorium in optischen Linsen, Brillengläsern, Glühstrümpfen, Schweißdrähten und Metalllegierungen. Sogar illustrierte Zeitschriften enthalten natürliches ^{226}Ra und ^{232}Th . Als weitere Strahlenquellen seien erwähnt: Röntgengeräte für die Werkstoffprüfung oder für Gepäckkontrolle auf Flugplätzen, Röntgen-Spektroskopiegeräte, Füllstands- und Dickemessungen mit Radionukliden, Elektronenmikroskope, Hochspannungsgleichrichterröhren etc. Die Immisionen durch die Abgabe von radioaktiven Stoffen aus Kernkraftwerken an die Umwelt sind im Normalbetrieb selbst in der nahen Umgebung kaum nachweisbar. Unter Berücksichtigung aller Eventualitäten einer umgebungsnahen Nahrungsmittelkontamination und unter Einschluss der Abluft führen letztere zu einer hypothetischen, effektiven Belastung von circa 0.01 mSv/a. Ausserhalb der Umzäunung von Kernanlagen ist die Dosisleistung weniger als 0.1 mSv/a.

Aus früher durchgeführten Kernwaffenversuchen stammt immer noch ein gewisser Ausfall von ^{137}Cs , ^{90}Sr usw. Davon ist der grösste Teil auf dem Boden abgelagert und kann eventuell über die Nahrungskette in den Körper gelangen.

Im Verhältnis zur natürlichen Strahlenbelastung sind die Beiträge aus den genannten, 'zivilisatorischen' Strahlenquellen vernachlässigbar klein, jedoch messbar. Damit soll ausgedrückt werden, dass sich in unserer Umgebung dauernd radioaktive Stoffe befinden, die wir meistens nicht wahrnehmen, aber mit denen wir leben. Aber auch natürliche Radionuklide können durch menschliche Aktivitäten freigesetzt und so zur Strahlenquelle werden; z.B. enthält die Kohle Radionuklide, die bei der Verbrennung entweichen. Auf den Tabakblättern lagern sich ^{210}Pb und ^{218}Po ab, die beim Tabakrauchen durch die Inhalation in die Lungen gelangen und so zu einer zusätzlichen Belastung des Knochenmarks und der Gonaden von mehreren 0.01 mSv/a führen können. Beim Fliegen in grösseren Höhen erhöht sich die kosmische Strahlung. Beispielsweise entspricht ein Transatlantikflug einer zusätzlichen Äquivalentdosis von etwa 0.02 mSv.

4.2.3 Medizinische Strahlenexpositionen

Ionisierende Strahlen werden in der Medizin zur direkten Nutzanwendung an den Patienten eingesetzt. Vernünftigerweise gibt es für ihn deshalb keine gesetzlichen Dosisbeschränkungen.

Die *Röntgendiagnostik* ist für den weitaus grössten Teil der künstlichen Strahlenexposition verantwortlich. Allerdings ist die Strahlenbelastung wegen der modernen Gerätetechnik und den empfindlicheren Bildsystemen auf ungefähr einen Zehntel der Dosis vor dreissig Jahren zurückgegangen. In der Schweiz sind etwa 14'000 Röntgenanlagen in Betrieb, davon mehr als die Hälfte im Privatpraxen, wo auch etwa doppelt so viele Röntgenaufnahmen und Durchleuchtungen durchgeführt werden, als in den Spitälern. Nach neusten Schätzungen muss mit drei Röntgenuntersuchungen pro Einwohner und Jahr gerechnet werden, wovon die meisten die Zähne (27%) und den Lungenbereich (18%) betreffen. Gemittelt über die gesamte Bevölkerung trägt die Röntgendiagnostik etwa 1,2 mSv (effektive Dosis) pro Person und Jahr zur Strahlenbelastung bei. Für Einzelpersonen sind die Schwankungen allerdings erheblich (0 bis 20 mSv pro radiologische Untersuchung).

In der *nuklearmedizinischen Diagnostik* werden dem Patienten ausschliesslich Gammastrahler verabreicht, deren örtliche und zeitliche Verteilung ausserhalb des Körpers gemessen werden kann. Sämtliche verwendeten Radionuklide werden künstlich hergestellt. Die jährliche Frequenz beläuft sich in der Schweiz auf etwa zehn Untersuchungen pro 1'000 Einwohner. In den 45 nuklearmedizinischen Betrieben der Schweiz wird pro Jahr eine Gesamtaktivität von ungefähr 28 TBq umgesetzt, wovon etwa 84 % das kurzlebige ^{99m}Tc betreffen. Für therapeutische Zwecke werden nur 6 % der Gesamtaktivität und fast ausschliesslich ^{131}I verwendet. Die effektive Strahlenbelastung für die einzelnen Untersuchungen liegt in der Regel erheblich unter jener von Röntgenaufnahmen. Im therapeutischen Einzelfall kann sie aber örtlich bis zu 80 mSv betragen. Gemittelt über die ganze Bevölkerung trägt die Nuklearmedizin etwa 0.1 mSv/a zur Strahlenbelastung bei.

In der *Radioonkologie* (Strahlentherapie) werden in einem Tumorgebiet Äquivalentdosen von bis zu 80 Sv appliziert, um so krankhaftes Gewebe zu zerstören. Die für eine Therapie erforderliche Strahlendosis wird für jeden Einzelfall vorausberechnet. In der Schweiz werden pro Jahr circa 12'000 Patienten radioonkologisch behandelt. Für diese Bestrahlungen stehen etwa 12 Linear- und Kreisbeschleuniger und 20 ^{60}Co -Bestrahlungseinheiten zur Verfügung. Zusätzlich werden etwa 100 hautärztliche Röntgentherapiegeräte (Röhrenspannung 10-100 kV) sowie etwa 50 weitere Röntgentherapiegeräte mit Röhrenspannungen zwischen 100 und 300 kV vorwiegend in Privatpraxen betrieben.

4.3 Radon und seine Zerfallsprodukte

4.3.1 Herkunft

Grosse Gebiete der Schweizer Alpen enthalten an der Oberfläche kristalline Gesteine mit einem erhöhtem Uran- und Thoriumgehalt als wichtigen Anteil der primordialen Radioaktivität der Erdkruste. Das Edelgas ^{222}Rn entsteht beim α -Zerfall von ^{226}Ra , welches seinerseits ein Zerfallsprodukt in der ^{238}U -Reihe ist (Abbildung 2.2). Die Halbwertszeit von ^{222}Rn beträgt 3.8 Tage; es wandelt sich über einen α -Zerfall ins ebenfalls radioaktive ^{218}Po um. Die Zerfallsreihe führt nach total 4 α -Zerfällen und 4 β -Zerfällen vom ^{222}Rn ins stabile ^{206}Pb . Durch Diffusion tritt ^{222}Rn in die Luft über, wo sich seine kurzlebigen Zerfallsprodukte (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi) als Metallionen an Aerosole anlagern und eingeatmet werden können. Radon erzeugt in der Luft ähnlich viel Ionen wie die kosmische Strahlung (fünf Bq/m^3 ^{222}Rn und Zerfallsprodukte erzeugen circa drei Ionenpaare pro cm^3 Luft und Sekunde).

4.3.2 Radon als Innenluftnoxe

In der "Radonkarte der Schweiz" (Seite 63) sind die Messergebnisse in circa 4'000 Wohn- und 1'700 Kellerräumen dargestellt. Die ^{222}Rn -Konzentrationen schwanken erheblich zwischen zehn und mehreren Tausend Bq/m^3 . In etwa 5% der Wohnräume lagen die Werte über $200 \text{ Bq}/\text{m}^3$ und in 1% sogar über $500 \text{ Bq}/\text{m}^3$. Ferner zeigt die Abbildung 4.4, dass die Radonkonzentration in Kellern im Mittel höher ist als in Wohnräumen. Daraus kann geschlossen werden, dass das Radon primär aus dem Erdboden stammt und via Keller in die höhergelegenen Wohnräume gelangt. Dies stimmt mit Messungen in Mehrfamilienhäusern überein, wo die Radonkonzentrationen in den höheren Stockwerken oft geringer sind als in den tieferen. Man kann sich dies mit Hilfe des *Kamineffekts* erklären: Im Hausinneren erzeugt die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Aussenluft einen Unterdruck, welcher Bodengase mit Radonkonzentrationen bis zu $100 \text{ kBq}/\text{m}^3$ ansaugt. Die Radonmengen sind im Tagesverlauf variabel und hängen auch von anderen Faktoren ab (Temperaturschwankungen, Wassergehalt und Radonpermeabilität des Erdbodens, Lüftungsverhalten, Dichtheit zwischen Keller und Hausinnerem, Radongehalt des Trinkwassers u.a.).

Untersuchungen von Baumaterialien im *Paul Scherrer Institut (PSI)* haben gezeigt, dass diese nur etwa 10 bis $70 \text{ Bq}/\text{m}^3$ zum Radongehalt in Wohnräumen beitragen. Daher dürfen sie als Ursache für überhöhte (über $200 \text{ Bq}/\text{m}^3$) Radonkonzentrationen ausgeschlossen werden. Weitere Untersuchungen durch die ETH Zürich und das PSI führten zum Schluss, dass in der Schweiz auch die mit dem Trink- und Brauchwasser in den Wohnbereich gebrachten Radonmengen nicht ins Gewicht fallen. In Berggemeinden der Zentralalpen allerdings wurden Trinkwasserkonzentrationen bis zu $40 \text{ kBq}/\text{m}^3$ gemessen.

4.3.3 Biologische Strahlendosen von Radonfolgeprodukten

Radonkonzentration in der Atemluft: Die ^{222}Rn -Konzentration im Hausinneren beträgt in der Schweiz im Mittel 64 Bq/m^3 , im Freien etwa 5 Bq/m^3 , wobei ansehnliche Schwankungen mit der Tages- und Jahreszeit auftreten. Für die Strahlenbelastung wichtiger ist die Konzentration der Zerfallsprodukte, da sie durch die Lungen aus der Atemluft 'filtriert' und zum grössten Teil zurückgehalten werden.

Um die strahlenbiologisch relevanten, effektiven Dosen zu erhalten, müssen die gemessenen Radonkonzentrationen mit verschiedenen Faktoren umgerechnet werden. Mit diesen Korrekturen erhält man für die mittlere Radonkonzentration von 65 Bq/m^3 in der Schweiz eine effektive Dosis von etwa 1.9 mSv/a ; bei Mitberücksichtigung von ^{220}Rn aus der ^{232}Th -Zerfallsreihe 2.2 mSv/a . Dies entspricht einer Lungendosis von ca. 15 mSv/a . Es werden aber in ca. 10% der Fälle effektive Dosen von über 4 mSv/a und in ca. 1% von über 10 mSv/a (in Einzelfällen bis 150 mSv/a) berechnet.

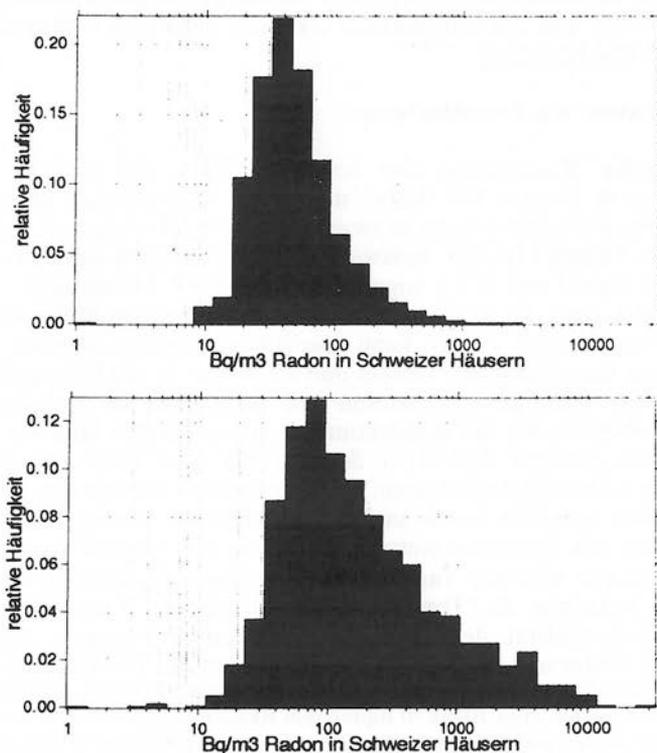


Abbildung 4.4: Radon in Wohnräumen (oben) und Kellerräumen (unten) gewichtet mit Haustyp und Bevölkerungsverteilung (RAPROS 1992).

4.3.4 Radon als Spurenstoff

^{222}Rn ist ein idealer Spurenstoff zum Studium von Umweltvorgängen, da Naturvorgänge mit Zeitkonstanten von einigen Tagen untersucht werden können, z.B. Austauschprozesse im Untergrund zwischen Mineralien und Grundwasser, zwischen dem Erdboden und der Atmosphäre; zwischen Ozean und Atmosphäre und zwischen dem Ozeanboden und der untersten Wasserschicht. Die Oberflächenschicht eines Sees oder des Ozeans enthält oft weniger ^{222}Rn als dies dem ^{226}Ra -Gehalt des Wasser entsprechen würde. Durch Gasaustausch mit der Luft geht dieses Radon in die Atmosphäre über. Die gemessene Abnahme ergibt somit quantifizierbare Angaben über die Gasaustauschkonstanten und die beteiligten Diffusionsprozesse.

Die Produktionsrate von ^{222}Rn in einem Stein, im Erdboden oder im Baumaterial ist proportional zum ^{226}Ra -Gehalt. So kann aus dem Urangehalt eines Materials auf die Radonproduktionsrate geschlossen werden, wenn der Radiumgehalt nicht durch Fraktionierung an- oder abgereichert worden ist. Wieviel vom entstandenen ^{222}Rn jedoch aus der Festsubstanz in die Luft austreten kann, ist davon abhängig, welche Strecke das Atom durch Rückstoss nach dem α -Zerfall oder durch Diffusion während seiner mittleren Lebensdauer von circa fünf Tagen zurücklegen muss. Ist der Feuchtigkeitsgehalt der Festsubstanz hoch oder sitzt das ^{226}Ra vorwiegend an der "Oberfläche" der Mineralien, ist die Austrittswahrscheinlichkeit von Radon gross.

Radon dient ferner als *Indikator für Transportprozesse* in der Atmosphäre oder im Erdboden. Die Radonkonzentration zeigt einen Tages- und einen Jahresgang; tagsüber und im Sommer ist die Verdünnung stärker als nachts resp. im Winter. Man stellt auch fest, dass die Radonkonzentration über dem Erdboden bereits nach wenigen Metern stark abnimmt. Je nach der atmosphärischen Turbulenz kann Radon in unterschiedliche Höhen transportiert werden. Über den Kontinenten sind Radon und seine Zerfallsprodukte bis in einige Kilometer Höhe nachweisbar.

4.4 Reaktorkatastrophe von Tschernobyl

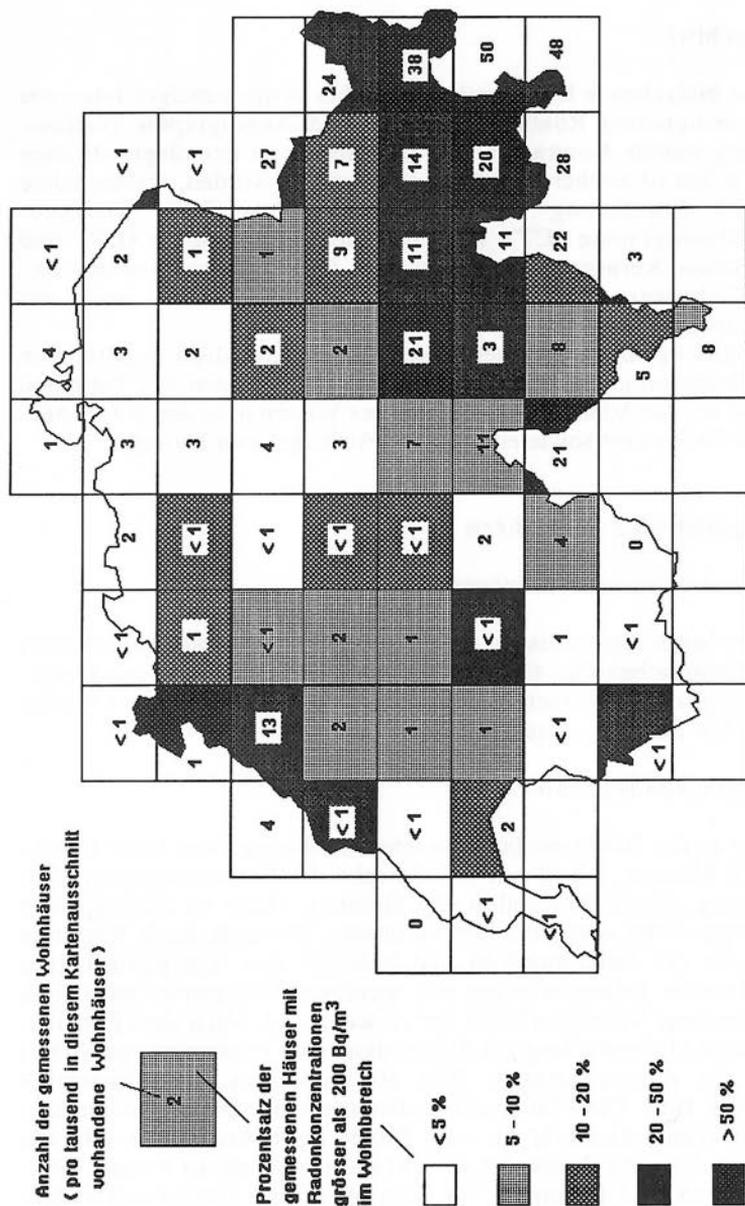
Vorgang: Im April 1986 hat sich in Tschernobyl (Ukraine) an einem leichtwassergekühlten, Graphit moderierten Druckröhrenreaktor die schwerste Katastrophe in der langjährigen Geschichte der friedlichen Nutzung der Kernenergie ereignet. Nach dem Brand von Graphit kam es zu einer Explosion im Reaktorgebäude. Eine grosse Menge leichtflüchtiger, radioaktiver Spaltprodukte (^{131}I , ^{137}Cs usw.) wurde freigesetzt, in grosse Höhen getrieben und dann weiträumig verfrachtet. Durch regenbedingten Ausfall kam es daher in weiten Teilen Europas zu einer örtlich variablen Kontamination des Bodens.

Strahlenexposition am Unfallort: Personen im Reaktorareal oder in naher Umgebung, sowie Rettungspersonal wurden grossen Strahlendosen ausgesetzt, die zu deterministischen, körperlichen Frühschäden, incl. Todesfällen führten. So traten innerhalb 3 Monaten nach Bestrahlung mit Dosen von 0.8 Gy bis 16 Gy unter 203 Patienten 31 Todesfälle auf. Über die Opfer unter den später eingesetzten 'Liquidatoren' gibt es keine gesicherten Angaben. Verschiedene Schätzungen ergeben gravierende Folgen der verfügten Massnahmen, die unter dem Aspekt des damaligen politischen Systems und seiner ethischen Grundsätze zu werten sind und in keiner Weise unserer Katastrophenplanung entsprechen.

Fernexposition: Durch die radioaktive Verseuchung sind europaweit Spät ereignisse stochastischer Natur zu erwarten, deren Ausmass höchstens rechnerisch erfassbar ist. Bisher wurden in der Ukraine eine Zunahme von kindlichen Schilddrüsentumoren (glücklicherweise meist heilbar), aber keine vermehrten Krebstodesfälle beobachtet.

Sehr unsichere Schätzungen (BEIR V) nehmen an, dass sich in den nächsten 70 Jahren die Zahl der in Russland (75 Mio.) zu erwartenden 9.5 Millionen Krebstoten um etwa 10 000 Fälle erhöhen könnte. Diese Zunahme dürfte epidemiologisch kaum zu entdecken sein. Eine höhere Tumorzinzidenz ist allenfalls bei den 116 000 aus der Ukraine und Bjelorussland evakuierten Personen zu erwarten.

Für die Schweiz wurde 1986 als Folge der Reaktorkatastrophe eine zusätzliche mittlere Dosisbelastung von circa 0.2 mSv errechnet, ein gegenüber der jährlichen, natürlichen Strahlenexposition sehr geringer Wert (siehe oben). Bis zum endgültigen Zerfall des Cäsiums dürften sich in späteren Jahren bis 0.5 mSv akkumulieren. Die gesundheitlichen Risiken der Bevölkerung sind also unerkennbar gering; rein rechnerisch ergibt sich daher für die Krebsinduktion eine Risikozunahme von 0.002 - 0.01 % des Normalwertes.



Radonkarte der Schweiz. Stand Dezember 1991 (RAPROS 1992).

5 Moderne medizinische Bildgebung

5.1 Überblick

Die bildgebende Diagnostik bestand bis in die siebziger Jahre aus der konventionellen Röntgendiagnostik und Angiographie (Gefäßdarstellung mittels Kontrastmittel). Das Spektrum der diagnostischen Möglichkeiten ist seither entscheidend erweitert worden, insbesondere durch die Einführung von Ultrasonographie (US), Röntgen-Computertomographie (CT), Digitalisierter Radiographie (DR) und Magnetischen Kernresonanztomographie (MR). Diese Neuentwicklungen sind *wenig bis nicht invasiv*; US und MR sind sogar mit keinerlei ionisierender Strahlung verbunden.

Unabdingbare Voraussetzungen dafür, dass diese zahlreichen Untersuchungsmöglichkeiten effizient und zum Nutzen des Patienten eingesetzt werden können, sind ein genaues Wissen über deren Aussagekraft und Stellenwert sowie eine genaue Auftragsformulierung.

5.2 Diagnostische Verfahren

5.2.1 Konventionelle Röntgendiagnostik

Sie beruht einerseits auf der *Röntgenfilmaufnahme*, andererseits auf der dynamischen *Durchleuchtungsuntersuchung*, welche gegebenenfalls durch gezielte Röntgenaufnahmen zur Dokumentation eines hierbei beobachteten Befundes ergänzt wird.

a) *Röntgenfilmaufnahme*

Die in der Röntgenröhre erzeugte Strahlung erfährt beim Durchtritt durch Materie, d.h. durch das Gewebe des Patientenkörpers, eine Schwächung infolge Absorption und Streuung. Diese ist abhängig von der Absorption des durchstrahlten Volumens. Die austretende Strahlung ergibt dann ein Strahlungsbild und belichtet den Röntgenfilm (zur Dosisreduktion gelangen heute mit wenigen Ausnahmen zusätzlich lumineszierende Verstärkerfolien zur Anwendung). Nach dem Entwicklungsprozess (Umwandlung der Silberhalogenide in elementares Silber) entsteht aus diesem latenten Bild ein sichtbares, aus Graustufen bestehendes Bild. Die Röntgenfilmaufnahme stellt das Untersuchungsobjekt als Summationsbild dar (sog. Projektionsradiogramm); d.h. alle Strukturen des drei-dimensionalen Körpers werden zu einem zwei-dimensionalen Bild überlagert. Zur Bestimmung der Größe und Tiefenlokalisierung einer Struktur sind deshalb in der Regel zwei in einem Winkel von 90 Grad zueinander stehende Aufnahmen erforderlich.

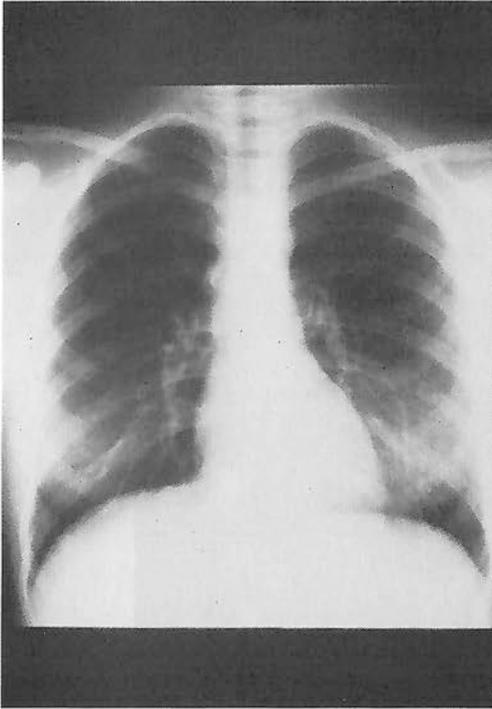


Abbildung 5.1: links: Normale Thoraxaufnahme postero-anteriore Projektion; rechts: Knochenaufnahme: Oberschenkelbruch

Währenddem das örtliche Auflösungsvermögen einer konventionellen Röntgenaufnahme hervorragend und kaum zu übertreffen ist, sind der Dichteauflösung aus physikalischen und projektionsbedingten Gründen Grenzen gesetzt. Wohl ist aufgrund der unterschiedlichen Absorption für Röntgenstrahlen die Luft (auf dem Röntgenbild schwarz) eindeutig von kalk- oder metallhaltigen Strukturen (weiss) zu unterscheiden (Abbildung 5.1); dagegen sind die verschiedenen Weichteile wie beispielsweise Bindegewebe, Muskulatur, aber auch Flüssigkeiten voneinander nicht zu unterscheiden. Deshalb müssen zur Sichtbarmachung etwa des Magen-Darm-Trakts (Abbildung 5.2) oder der Harnwege *röntgendichte Kontrastmittel* eingesetzt werden. Diese bestehen entweder aus Bariumsulfat (für Darmuntersuchungen), oder es sind wasserlösliche Jodverbindungen, welche in die Blutgefäße oder Körperhöhlen injiziert werden. Als *röntgennegatives* Kontrastmittel gelangt in speziellen Situationen Luft zur Anwendung.

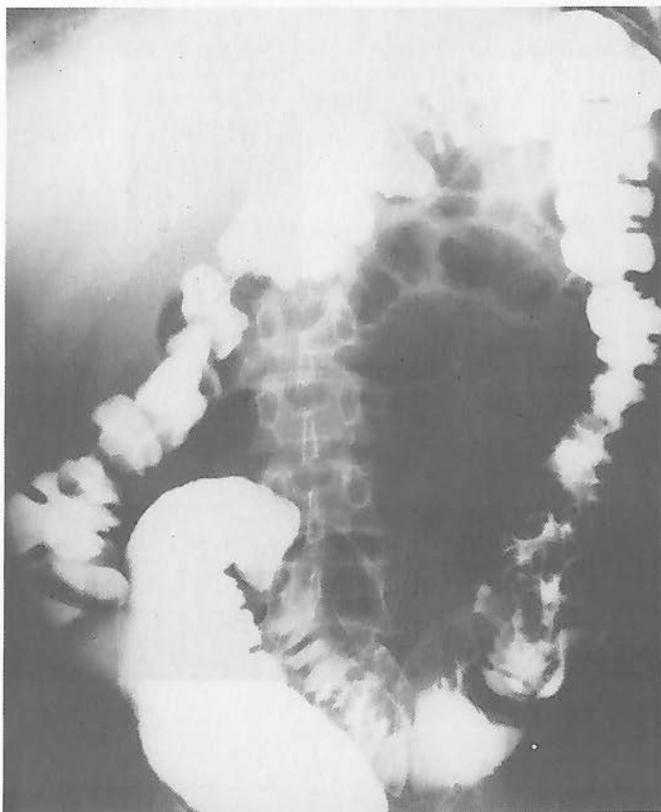


Abbildung 5.2: Darmkontrastierung mit Bariumsulfat

Die Untersuchungen der Brustorgane (Thorax), welche vor allem die Lungen und das Herz betreffen, sowie Knochenaufnahmen sind anteilmässig die häufigsten Röntgenaufnahmen. Sie gestatten als eigentliche Basisuntersuchungen in einem überwiegenden Prozentsatz der Erkrankungen oder Verletzungen dieser Organe eine abschliessende Diagnose. Konventionelle Röntgenuntersuchungen des Magen-Darm-Trakts und der Harnwege sind demgegenüber in den letzten Jahren zahlenmässig stark rückläufig; dies auf Kosten von Ultraschalluntersuchungen oder der Computertomographie, aber auch von alternativen Verfahren wie der Endoskopie (Darmspiegelung).

b) Durchleuchtungsuntersuchung

Diese Untersuchung macht sich die Fähigkeit der Röntgenstrahlen zunutze, Phosphatverbindungen zum Fluoreszieren zu bringen. In modernen Durchleuchtungsgeräten wird das dabei entstandene Bild elektronisch verstärkt, was eine beträchtliche Reduktion der Strahlendosis erlaubt. Die Wiedergabe erfolgt auf einem Fernseh Bildschirm. Die Durchleuchtung bildet einen integrierenden Bestandteil der konventionellen Röntgendiagnostik, da sie im *Echtzeitverfahren* eine dynamische Untersuchung über eine bestimmte Zeitspanne (Sekunden bis Minuten dauernde) gestattet. Hauptsächlich wird sie zur Magen-Darm-Diagnostik mittels *Kontrastmittel* eingesetzt. Unverzichtbar ist sie jedoch auch zur Platzierung von Kathetern im Rahmen der Angiographie oder für die Einspritzung von Kontrastmitteln in die Gelenke.

c) Angiographie (Gefässdarstellung)

Alle Gefässe, sowohl die Arterien, wie auch Venen oder Lymphgefässe, lassen sich angiographisch nach Kontrastmittelinjektion darstellen. So lassen sich die Durchblutungsverhältnisse in den Gefässen des Körperstammes einschliesslich innere Organe, des Gehirn und der Extremitäten beurteilen. Auch die Organdefekte infolge von Tumoren, Verletzungen, Gefässverschlüssen oder Blutungen werden sichtbar. Allerdings ist die Angiographie wegen der erforderlichen Gefässkanülierung und meist hohen Aufnahmezahlen eine für den Patienten eingreifende und strahlenbelastende Methode. Daher wird auch sie zunehmend durch US, CT und MR ersetzt. Eine besondere Bedeutung erhält sie aber in Kombination mit therapeutischen Massnahmen wie Gefässaufweitungen (*interventionelle Angiographie*).

5.2.2 Digitale Radiographie

Die Digitaltechnik, welche zuerst in der Computertomographie eingesetzt worden ist, gewinnt zunehmend auch in der Projektionsradiographie an Bedeutung. Erst mit Hochleistungsrechnern ist es möglich geworden, die in der konventionellen Radiographie anfallenden, riesigen Datenmengen zu verarbeiten. Anstelle des durch das analoge Strahlungsbild belichteten Röntgenfilms erfolgt hier die Bilddetektion derart, dass dieses rasterförmig in eine Matrix einzelner Bildelemente (Pixel) zerlegt wird. Die Pixelgrösse ist bestimmend für die Ortsauflösung. Der Wert jedes Pixel wird integral gemessen und digitalisiert in ein elektronisches Signal umgewandelt. Die Grauwertabstufungen sind somit erheblich feiner als auf einem konventionellen Röntgenfilm, d.h. die Dichteauflösung ist bedeutend höher. Das visuell nicht fassbare Zahlenbild (digitales Radiogramm) lässt sich speichern, aber auch beliebig manipulieren (Variieren von Grautons, Kontrastes oder Verstärkung, Bildsubtraktion etc.). Mittels eines Digital-Analog-Wandlers kann das verarbeitete Zahlenbild in ein analoges Videosignal umformiert werden. Daraus entsteht ein Fernsehbild, von dem erneut eine photographische Dokumentation angefertigt werden kann. Diese Dokumentation erfolgt neuerdings auch direkt digital mittels eines Laserdruckers.

Die Anwendungsbereiche der Digitaltechnik sind heute die *Bildverstärkerradiographie* und die *Photolumineszenzradiographie*.

a) *Digitale Subtraktionsangiographie (DSA)*

Von einem digital gespeicherten Maskenbild (Leerbild) werden spätere Bilder nach Verabreichung von Kontrastmittel in die Gefässe (Füllungsbilder) subtrahiert. Im Idealfall enthält das Subtraktionsbild jeweils nur die neu kontrastierten Gefässabschnitte und ist somit frei von störenden Überlagerungen.

Da das digitale Kontrastbild verstärkt werden kann, ergeben sich für den Patienten beträchtliche Vorteile: die Kontrastmittelmenge kann gegenüber der konventionellen Angiographie reduziert werden, oder es lässt sich nach einer intravenösen Kontrastmittelverabreichung, beispielsweise in eine Armvene, auch das arterielle Gefässsystem im Körperstamm darstellen (Abbildung 5.3). Dadurch entfällt die viel eingreifendere arterielle Gefässpunktion. Mittels der DSA lassen sich Verschlusskrankheiten und andere Abnormitäten im Bereich der Hauptschlagader und der von ihr abgehenden grösseren Arterien gut diagnostizieren.

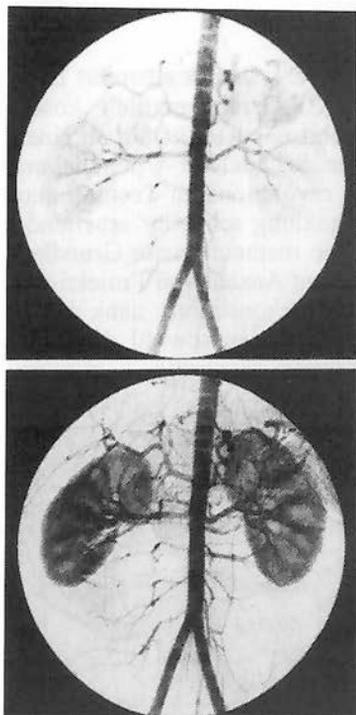


Abbildung 5.3:
Intravenöse digitale Subtraktions-
angiographie (IV-DSA):
Darstellung der normalen Bauch-
aorta und ihrer Äste sowie beider
Nieren

b) Photolumineszenzradiographie

Der Photolumineszenzeffekt der nach Belichtung einer Speicherphosphorfolie mit Röntgenstrahlen während mehreren Stunden anhält, wird dazu genutzt, mittels Infrarot-Laser das virtuelle Bild auszulesen. Hierbei treten an den belichteten Stellen der Speicherfolie Lichtblitze auf, die in einem Photomultiplier verstärkt und deren Signale anschliessend digitalisiert werden. Das digitale Zahlenbild lässt sich speichern, übertragen und weiterverarbeiten, bevor es dokumentiert wird.

Die *Vorteile* der Digitaltechnik sind: Gegenüber der konventionellen Röntgenaufnahme wird eine wesentlich grössere Dichteauflösung mit weit höherem Belichtungsspielraum erreicht; dadurch werden Fehlbelichtungen mit der Notwendigkeit zur Wiederholung der Aufnahme selten. Zudem ist je nach untersuchter Körperregion eine Reduktion der Strahlendosis möglich. Die Digitalisierung der Bildinformation ist zudem Voraussetzung für die Vernetzung von Bildquellen mit Bildverarbeitungsplätzen und Bildarchiven.

Ein *Nachteil* der heute vielerorts bereits routinemässig eingesetzten digitalen Radiographie ist die limitierte Ortsauflösung.

5.2.3 Computertomographie (CT)

Nachdem 1967 HOUNSFIELD ein Laborsystem konstruiert hatte, welches bereits alle Komponenten eines CT-Gerätes enthielt, konnte bereits vier Jahre später, in Zusammenarbeit mit AMBROSE, an einem Prototyp bei einem Patienten eine erste Schädel-CT-Untersuchung durchgeführt werden. Der Einsatz dieser revolutionären Technik auch im Ganzkörperbereich war mit der Entwicklung schneller arbeitender Geräte nur eine Frage der Zeit (1975). Die mathematische Grundlage für die CT blieb dieselbe: aus einer endlichen Anzahl von Projektionen wird ein *zweidimensionaler Körper-Schnitt* rekonstruiert; dank der die Materie durchdringenden Röntgenstrahlen werden sowohl die Oberfläche als auch der innere Aufbau eines Körpers dargestellt.

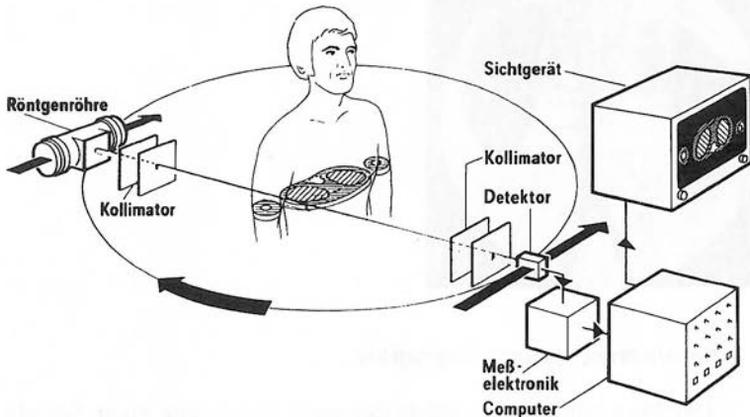


Abbildung 5.4: Blockschaltbild eines einfachen Computer-Tomographen

Die Entwicklung klinisch verwendbarer CT-Geräte erfolgte bis heute in vier Generationen, welche sich jeweils in ihrem *Messsystem* voneinander unterscheiden. Dieses besteht grundsätzlich aus einem *Röntgenstrahler* und einem *Detektorsystem* (Abbildung 5.4). Der in der Röntgenröhre erzeugte Strahlungskegel wird durch ein kompliziertes Blendensystem bis auf einen fächerförmigen Röntgenstrahl eingengt. Das in der Schwächung entsprechende Strahlungsprofil wird vom Detektor registriert; je nach Gerätetyp rotiert das Detektorsystem um den Patienten (falls Messfühler nur segmental angeordnet), oder es bleibt stationär (bei ringförmiger Anordnung der Detektoren). Die aus einer rotierenden Röntgenröhre abgegebenen Energieimpulse erzeugen eine Serie von Projektionen, die zu einem Schnittbild (=computerisiertes Tomogramm) rekonstruiert werden.

Zur Darstellung einer bestimmten Körperregion (Schädel, Brust-, Bauchraum etc.) sind immer eine Mehrzahl von axialen (d.h. senkrecht zur Körperachse liegenden) Schnittbildern notwendig. Hierzu wird der auf dem Untersuchungstisch liegende Patient nach jeder Einzelmessung in vorgegebenen, Milli- bis Zentimeter betragenden Schritten verschoben. Das digitale Zahlenbild wird analog umgesetzt und erscheint auf dem Fernsehmonitor als grauwert-abgestuftes Bild*).

*) Das Schnittbild (Computertomogramm) ist aus einer Matrix einzelner Bildelemente aufgebaut, welche eine definierte Dicke aufweisen (Volumenelement = Voxel). Die Ortsauflösung ist abhängig von der Voxelgrösse (heutiger Standard ist eine Matrix von 512 x 512 oder 1'024 x 1'024). Die Schwächungseigenschaften jedes Volumenelementes im untersuchten Körper werden mit dem sogenannten CT-Wert ausgedrückt. Die Skalierung erfolgt in *Hounsfield-Einheiten (HU)*: Zum Beispiel gelten: Luft = minus 1'000 HU; Wasser = 0 HU, Knochen über 400 HU; Weichteilgewebe zwischen 30 und 70 HU.

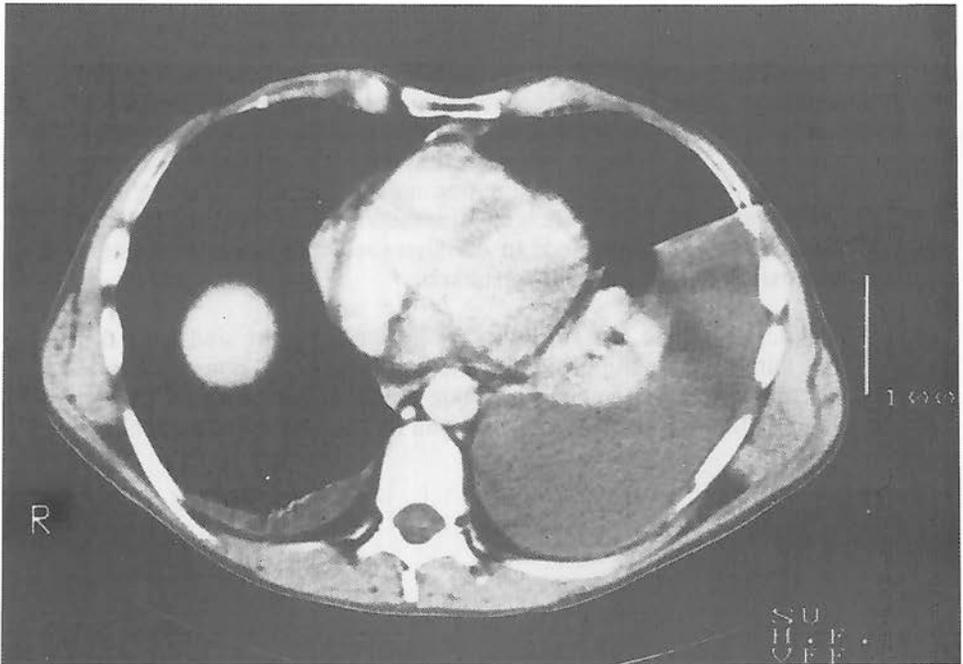


Abbildung 5.5: CT- Querschnittsbild durch den Brustkorb bei einem Lungentumor. (Beide Lungen schwarz; Herz weiss in Bildmitte oben; rechte (R) Zwerchfellkuppe als weisser rundlicher Fleck; graue, sichelförmige Fläche entspricht Flüssigkeit, die den weissen Tumor umgibt.)

Mit der Einführung der CT vor annähernd 20 Jahren ist zunächst die Untersuchung des Gehirns revolutioniert worden. Heute kommt dem Schädel-CT eine zentrale Stellung in der Notfallmedizin bei der Abklärung von Schädel-Hirn Verletzungen zu, da insbesondere innere Blutungen und gefährliche Gehirnschwellungen präzise erkannt werden können. Aber auch Hirntumoren und Missbildungen des kindlichen Gehirns werden diagnostiziert. In den Bereichen von Brust- und Bauchraum ist die CT vor allem für den Nachweis eines Tumors und seiner Beziehung zu den Nachbarorganen wichtig (Abbildung 5.5). Aber auch innere Organverletzungen oder umschriebene entzündliche Veränderungen erfasst die CT zuverlässig. Im muskuloskelettalen System ist die CT-Untersuchungen des Skeletts und des Muskelapparates sind oft eine wertvolle Ergänzung zur konventionellen Röntgendiagnostik, insbesondere bei komplizierten Frakturen der Wirbelsäule, des Beckens oder von Gesichtsschädelknochen. Von klinischem Interesse ist auch die Bestimmung des knöchernen Mineralgehaltes mittels 2- Spektren CT.

Die wesentlichen *Vorteile* der Computertomographie (CT) sind:

1. Überlagerungsfreies Schnittbild anstelle eines Summationsbildes. (Die gerätebedingte, axiale Schnittführung wird gelegentlich als Nachteil empfunden). Mittels einer lückenlosen Folge von dünn-schichtigen Schnittbildern ist die sekundäre zweidimensionale (2D) und dreidimensionale (3D) Rekonstruktionstechnik möglich geworden. Letztere wird in der Skelettdiagnostik zur optimalen Operationsplanung von Verletzungen und Missbildungen eingesetzt. 2. Wesentlich höhere Dichteauflösung. Unterschiede in der Gewebedichte lassen sich durch Kontrastmittel noch zusätzlich verstärken.

Nachteile: Die Ortsauflösung ist limitiert. Ferner sind trotz den relativ kurzen Aufnahmezeiten, welche heute unter einer Sekunde liegen, noch immer Bewegungsartefakte möglich (Aufnahmezeiten von konventionellen Röntgenaufnahmen liegen im Millisekundenbereich).

5.2.4 Ultrasonographie (US)

Das physikalische Grundprinzip beruht auf den im Gewebe fortgeleiteten *Schallwellen* und deren *Reflexion* an akustischen Grenzflächen zwischen verschiedenen Gewebearten. Die Erzeugung der Schallwellen wie auch ihre spätere Rückwandlung in elektrische Signale basiert auf dem piezoelektrischen Effekt. Einerseits sind aufgrund der Echodichte Rückschlüsse auf den Aufbau bzw. die Zusammensetzung der Gewebe (Weichteile, Flüssigkeit, Fettgewebe) möglich, andererseits erlaubt das Weg-Zeit-Prinzip die genaue Ortszuordnung.

In der US-Diagnostik gelangen Schallwellen mit einer Frequenz von 2 - 10 MHz zur Anwendung. Je höher die Frequenz, umso grösser ist das Auflösungsvermögen bei allerdings proportional abnehmender Eindringtiefe. Aus diesem Grund müssen je nach dem zu untersuchenden Organ (Bauchorgane, Schilddrüse, frühkindliches Gehirn u.a.) verschiedene Frequenzen (variable Sonden) gewählt werden.

a) B-Modus-Sonographie

Am weitesten verbreitet ist das hellkeitsmodulierte B-Bild (B = brightness). Mittels eines Scankonverters wird jeder Echoamplitude in Abhängigkeit zu ihrer Höhe ein bestimmter Grauwert zugeordnet: stark reflektierende Grenzflächen erscheinen hierbei weiss, kaum reflektierende Strukturen (Flüssigkeit) werden schwarz dargestellt (siehe Abbildung 5.6). Die Bildfolgefrequenz beträgt bis zu 50 Bilder pro Sekunde; dadurch ist ein sofortiger (real time) Bildaufbau möglich. Daher lassen sich auch dynamische Vorgänge beurteilen.

In der Regel wird die B-Bild Ultrasonographie *vor* anderen aufwendigeren oder strahlenbelastenden Untersuchungsverfahren eingesetzt (*diagnostisches Screeningverfahren*). Damit lassen sich zahlreiche Diagnosen bereits schlüssig stellen; in anderen Fällen werden die Weichen für die weitere Abklärung gestellt. Die ultraschallgezielte Feinnadelpunktion ermöglicht eine risikoarme Gewebeentnahme für die mikroskopische Untersuchung eines krankhaften Befundes.

Grundsätzlich sind der US-Diagnostik alle oberflächennahen, aber auch tiefer gelegene Organe zugänglich. Im Bauchraum sind es vor allem die Leber und Gallengänge, die Milz, die Nieren und die Harnblase, die Bauchspeicheldrüse sowie die grossen Gefässe. Weitere routinemässig untersuchte Organbereiche sind die Schilddrüse, die weibliche Brust, die Hoden und die Gelenke. In der Geburtshilfe erleichtert die US die Überwachung einer Schwangerschaft. Im Neugeborenen- und Säuglingsalter eignet sie sich vorzüglich für die Frühdiagnostik von Reifestörungen der Gelenke, Missbildungen des Nieren-/ Harnwegsystems und von gewissen Hirnschäden.

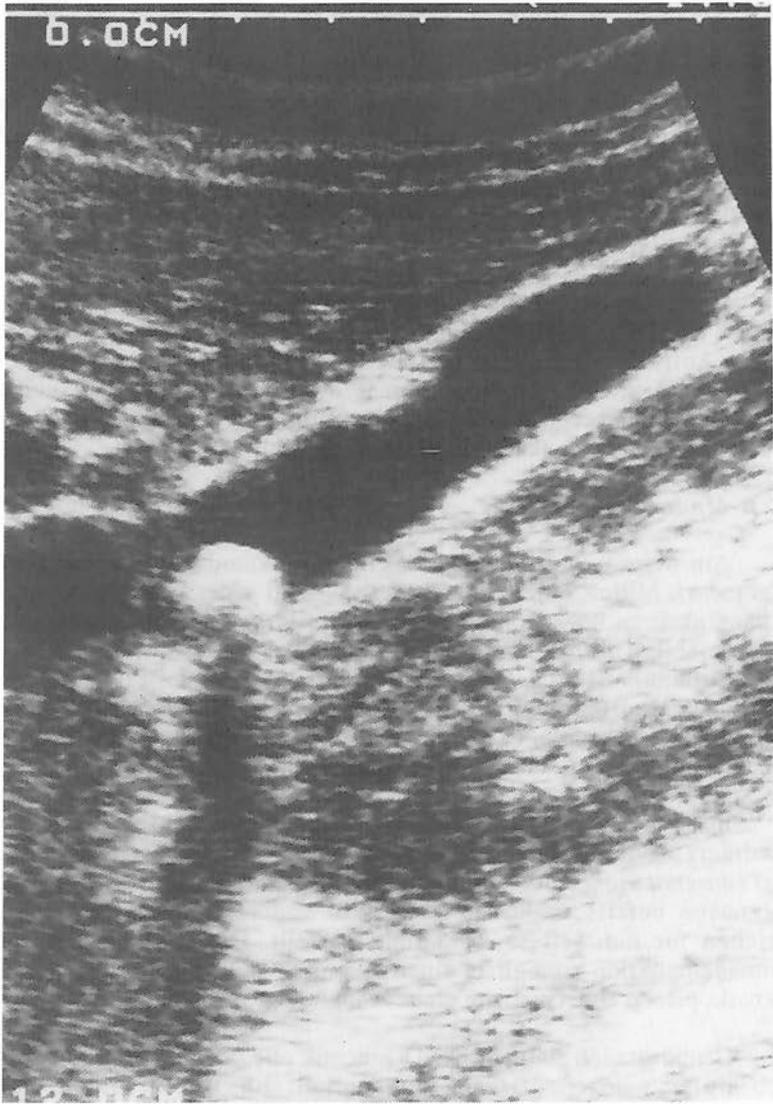


Abbildung 5.6: Echtzeit-Ultraschalluntersuchung einer Gallenblase. Gallensteine sind als weisse, rundliche Flecken in der schwarzen Gallenflüssigkeit zu erkennen; ausserdem lösen sie einen bandförmigen, schwarzen Schallschatten aus, der örtlich bis an den Bildrand reicht.

b) Doppler Sonographie

Grundlage bildet der *Doppler-Effekt*: die zellulären Blutbestandteile bewirken als schallreflektierende Grenzflächen durch ihre Bewegung relativ zur statisch bleibenden Schallsonde eine Frequenzänderung (= Dopplerverschiebung). Daraus lassen sich Flussgeschwindigkeit und Bewegungsrichtung bestimmen. Das Frequenzspektrum wird entweder als Audiosignal hörbar und/oder bildmässig sichtbar gemacht. Die neueste Entwicklung verbindet ein grauwertgestuftes, anatomisches Echtzeitbild mit einer geschwindigkeits- und richtungsabhängigen, farbcodierten Darstellung des fließenden Blutes im Gefäßsystem. Abweichungen vom normalen Farbmuster innerhalb eines Gefäßes weisen auf gestörte Strömungsverhältnisse, beispielsweise infolge von Gefäßeinengungen hin.

Speziell erwähnenswert ist die *Echokardiographie* (Herzuntersuchung mit Ultraschall), wo die Doppler-Technik eine unverzichtbare methodische Ergänzung darstellt.

5.2.5 Magnetresonanztomographie (MR)

Diese Methode beruht auf der erst 1946 nachgewiesenen Präzession der Atomkerne in einem Magnetfeld (Nobelpreis an den Zürcher F. BLOCH). Da Kerne sowohl einen Drehimpuls - den Spin - wie auch ein damit gekoppeltes magnetisches Moment (wie ein kleiner Stabmagnet) besitzen, benehmen sie sich wie es ein Kinderkreisel tut, nur ist die Kreiselbewegung viel schneller (im Bereich von Megahertz, d.h. Radiowellen). Der medizinische Tomograph benützt die Präzession der Kerne der in den Geweben so häufigen Wasserstoffatome (also Protonen), indem der Körper in ein starkes Magnetfeld gelegt und gleichzeitig mit Radiowellen bestrahlt wird. Alle Protonen führen dann gleichzeitig die gleiche Kreiselbewegung aus, die mit Spulen gemessen werden kann: Kerninduktion. Durch örtliche und zeitliche Veränderungen der Magnet- und Hochfrequenzfelder lässt sich die Kernresonanz an verschiedenen Stellen des Körpers anregen und damit ein räumliches Bild erzeugen. Die Kerne sind zwar fast vollständig entkoppelt von den atomaren Strukturen (Relaxationszeit), spüren aber die von den chemischen Bindungen herrührenden Felder. Dies führt zu verschiedenen Signalen je nachdem ein Proton z.B. Teil eines Fett- oder Eiweissmoleküls ist. Das ermöglicht eine unvorstellbar empfindliche Unterscheidung von Gewebestrukturen, welche in Röntgenaufnahmen völlig unsichtbar sind. Zusätzliche Kontrastverbesserung sind nach Gabe von *paramagnetischen Kontrastmittel* zu erreichen. Je nach Fragestellung werden *Schnittbilder* des Körpers in verschiedenen Ebenen angefertigt.

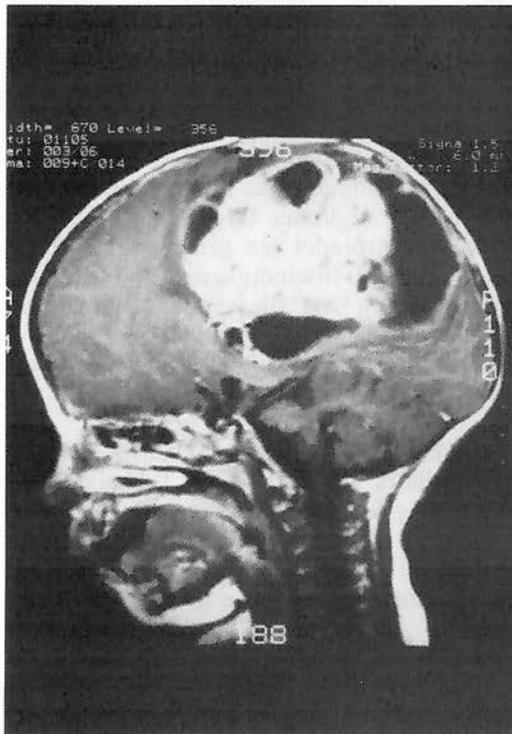


Abbildung 5.7: Magnetresonanztomographie. Riesiger Hirntumor

Eine wichtige technische Modifikation ist die *MR-Spektroskopie*. Durch diese gezielte Strukturanalyse von verschiedenen Gewebesubstanzen sind Einblicke in den Zellstoffwechsel möglich.

Die derzeit wichtigsten *Anwendungsbereiche* der MR sind:

Das Schwergewicht liegt derzeit in Untersuchungen des *zentralen Nervensystems* einschliesslich des Rückenmarks, wo MR immer häufiger zur Abklärung von Tumoren, alterungsbedingten Erkrankungen und der Multiplen Sklerose u.a. eingesetzt wird (Abbildung 5.7).

Im Brustraum sind insbesondere das *Herz* und die grossen *Gefässe*, im Bauchraum vorallem die *Parenchymorgane* für eine MR-Darstellung gut geeignet.

Auch bei Erkrankungen von *Muskulatur* und *Knochen* sind gute Abklärungsergebnisse zu erwarten (Abbildung 5.8).

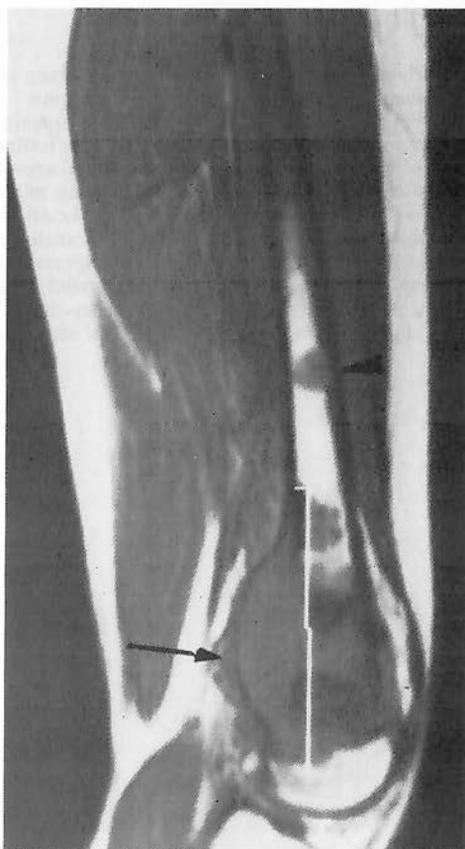


Abbildung 5.8: Magnetresonanztomographie: bösartiger Knochentumor am Oberschenkel (langer Pfeil) mit Tochtergeschwulst im Knochenmark (kurzer Pfeil).

Die methodischen *Vorteile* der Magnetresonanztomographie sind gewichtig: beliebige Schnittführung bei den tomographischen Rekonstruktionen, sehr hohe Weichteildichteauflösung, fehlende Nebenwirkungen.

Ihnen stehen *Nachteile* entgegen, welche es im Einzelfall abzuwägen gilt: nämlich die hohen Kosten, die schwierige Überwachung des Patienten im Gerät, die verhältnismässig langen Aufnahmezeiten u.a.

5.3 Schlussbetrachtung

Bildgebende Verfahren, welche mit ionisierender Strahlung arbeiten, sind auch künftig für die medizinische Diagnostik unerlässlich. Am gesamten Untersuchungsaufkommen sind die konventionellen Röntgenfilmaufnahmen noch immer mit einem Anteil zwischen 70% und 80% beteiligt. Aber fortlaufend wird mit verschiedenen methodischen Massnahmen und neuen Technologien versucht, einerseits die diagnostische Aussagekraft der Verfahren zu steigern und andererseits die Strahlenbelastung für den Patienten zu senken. Es stehen uns heute Modalitäten zur Verfügung, welche in zahlreichen Anwendungsbereichen alternativ zu herkömmlichen Methoden weit besseres leisten und weitgehend risikolos eingesetzt werden können. Die Zielsetzung jedes diagnostischen Abklärungsvorganges wird jedoch immer sein, die verfügbaren Modalitäten möglichst selektiv, d.h. patienten- und problemorientiert einzusetzen, nach dem Motto: *so wenig wie möglich, so viel wie nötig.*

6 Nuklearmedizin

6.1 Einleitung

In der nuklearmedizinischen Diagnostik und Therapie kommt beispielhaft zum Ausdruck, wie moderne naturwissenschaftliche Erkenntnisse der Medizin neue Wege zur Erforschung von Krankheitsursachen und deren Behandlung erschlossen haben. Radioaktive Substanzen (Radiopharmaka) werden hier, entsprechend ihrer Struktur gezielt, in den Organstoffwechsel eingeschleust (*Indikatormethode*). Die von ihnen emittierte Strahlung erlaubt einerseits ihr biologisches Schicksal mit geeigneten Messgeräten ausserhalb des Körpers zu visualisieren (Nuklearmedizinische Diagnostik) oder andererseits lokal einen gezielten, strahlenbiologischen Effekt zu erwirken (Nuklearmed. Therapie).

Definitionsgemäss verhalten sich Isotope chemisch und somit auch biologisch identisch, gleichgültig ob sie stabil oder dem radioaktiv sind. Dieses Prinzip ist die Grundlage für jede nuklearmedizinische Methode. Als Beispiel sei das radioaktive Jod (^{131}I , ^{123}I) zur Messung der Schilddrüsenfunktion erwähnt, das sich im Organ wie das mit der Nahrung aufgenommene, inaktive ^{128}I verhält. Aber seine Strahlung erlaubt eine körperexterne und belastungsfreie Messung des gesamten Jodstoffwechsels (also Jodaufnahme, Metabolismus und Ausscheidung). Der mengenmässiger Anteil eines solchen radioaktiven *Tracers* (biologische Suchsubstanz) muss so gering gehalten werden, dass er den Stoffwechsel selbst nicht stören kann. Er wird also auch keine pharmakologische Wirkung erzeugen. Dies gilt prinzipiell auch für eine Therapie.

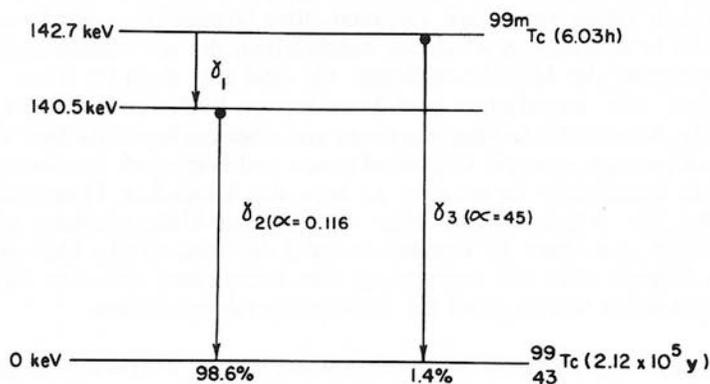
Biologische Stoffwechselforgänge werden üblicherweise in verschiedene zeitliche Phasen unterteilt, die sich auch örtlich in verschiedenen Räumen abwickeln können. Solche metabolischen Einzelschritte können sowohl in ihrem quantitativen Ausmass, als auch in ihrer zeitlichen Folge sehr stark variieren. Ihre Organisation wird mathematisch in *kinetischen Modellen* beschrieben, die der standardisierten Verarbeitung der Messdaten dienen. Sie sind aber auch für unser Verständnis von natürlichen und krankhaften Stoffwechselforgängen wichtig. Mittels der Indikatormethode und einer hochspezifischen Messtechnik gelingt es sogar, Organfunktionen und bestimmte Stoffwechselabläufe quantitativ zu messen. Je nach der klinischen Fragestellung werden die Messresultate einer bestimmten Untersuchung unterschiedlich gewichtet. Es können entweder die anatomische Darstellung eines Organs oder die Berechnung von Parametern einzelner Organfunktionen im Vordergrund des Auswerteverfahrens stehen.

Im Gegensatz zu anderen radiologischen Verfahren liegt die Stärke der Methodik nicht in der örtlichen Auflösung, sondern in der zeitlichen Auflösung und Quantifizierung der Strahlung.

6.2 Wahl der Isotope

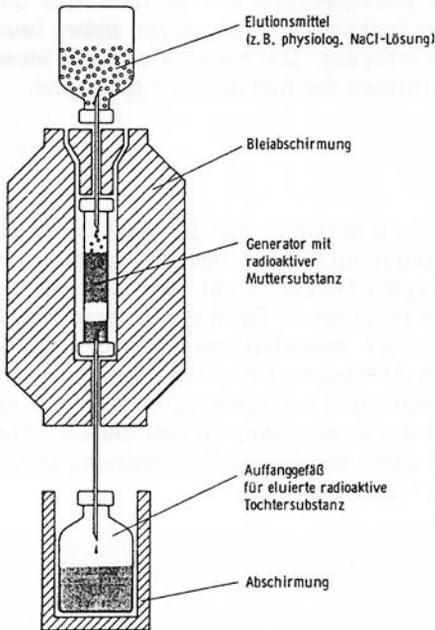
Nur selten ist es möglich, ein Radionuklid direkt zur Messung eines Stoffwechselforgangs einzusetzen, wie dies für Radiojod in der Schilddrüsendiagnostik gilt. Meistens werden chemische Verbindungen benötigt, welche eine bestimmte organspezifische Affinität besitzen. Durch den Einbau eines Radionuklids werden sie "markiert" und somit detektabel. Dabei sollten sich die biologischen Eigenschaften der markierten Verbindung nicht ändern. Die Verwirklichung dieses Ziels stellt an die Radiochemie grosse Anforderungen, da technisch komplizierte Markierungsverfahren eine Routineanwendung aus verschiedenen Gründen (Zeitverlust, Kosten, Risiken) kompromittieren können. Ferner verhalten sich viele strahlenphysikalisch geeignete Isotope in vivo körperfremd. Zu beachten ist auch die Strahlenbelastung, die, weil unabdingbar mit jeder nuklearmedizinischen Methodik verbunden, möglichst tief gehalten werden muss. Sie hängt sowohl von den physikalischen Eigenschaften des Radionuklids (physikalische Halbwertszeit, Art der Strahlung, Dosis) als auch vom biologischen Verhalten des Radiopharmakons im Organismus (biologische Halbwertszeit) ab. Für diagnostische Einsätze werden daher Isotope bevorzugt, die eine reine Gammastrahlung emittieren und eine möglichst kurzlebig sind.

In der Praxis haben sich *Generatorsysteme* als vorteilhaft erwiesen (Abbildung 6.1), da sie eine Substanzmarkierung vorort erlauben. Hierin baut sich durch den radioaktiven Zerfall eines langlebigen Mutternuklids ein geeignetes Tochternuklid auf, das eluierbar (mit einem Lösungsmittel 'auswaschbar') und somit jederzeit für Substanzmarkierungen gebrauchsfertig ist. Ein gängiges Beispiel dafür ist der Molybdän (Mo)/ Technetium (Tc)-Generator, wo das im Zyklotron hergestellte ^{99}Mo (Halbwertszeit 2,8 Tage) in $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (Halbwertszeit 6 Std.) zerfällt. Letzteres kann direkt als Tracer verwendet werden oder dient der Markierung von vorbereiteten Reagentien (*Testkits*).



Zerfallsschema von $^{99\text{m}}\text{Technetium}$

Abbildung 6.1:
Generatorsystem



In der Schweiz werden heute über 90 % aller nuklearmedizinischen Untersuchungen mit ^{99m}Tc durchgeführt, dessen monochromatische Gammastrahlung (140 keV) in einem für unsere Untersuchungsgeräte optimalen Messbereich liegt. Wie für das ^{99m}Tc stehen auch andere Isotopen für ad hoc-Markierungen am Verwendungsort zur Verfügung. Wegen des grösseren Laboraufwandes wird aber der Kauf von bereits gebrauchsfertig markierten Verbindungen bevorzugt.

6.3 Messtechnik

Grundlage der nuklearmedizinischen Messtechnik ist der Nachweis der Photonenstrahlung der Radionuklide. Beim Durchgang durch die Materie verlieren energiereiche Elektronen einen Teil ihrer Energie durch Anregung von Atomen und Molekülen, die danach unter Lichtemission in ihren Grundzustand zurückkehren. Diese Lichtblitze (Szintillationen) können mit Hilfe von *Szintillationsdetektoren* gemessen werden. Demgegenüber nutzen *Ionisations-* und *Festkörperdetektoren* die strahlungsbedingte Ionisation von Gasen bzw. Halbleitern zum Strahlungsnachweis aus.

6.3.2 Gammakamera

Gammakameras haben einen festfixierten Detektorkopf, womit ein grösserer Körperbereich gleichzeitig untersucht werden kann. Auch kann die Impulsverteilung im eingestellten Sichtbereich über einen längeren Zeitraum kontinuierlich aufgezeichnet werden.

Wesentliches Element des Messkopfes der 1958 von ANGER entwickelten Gammakamera ist ein grossflächiger *Szintillationskristall*. Auf ihm sind eine Vielzahl (bis zu 90) Photomultiplier angeordnet, die die Szintillationen in elektrische Signale umwandeln und der nachgeschalteten Messelektronik zuführen. Der Messkopf besteht aus mehreren flächenhaft gekoppelten Szintillationszählern. Die Ortsauflösung erfolgt hier elektronisch (Scanner: mechanische Ortung des Gesteigungsortes der Strahlung). Nach Richtungsselektion der Strahlung durch den *Kollimator* (dem Detektor vorgeschaltete, perforierte Bleiplatte) wird nur eine vorbestimmte Flugrichtung der Photonen für den Nachweis im Detektor zugelassen. Der durch Absorption eines Gammaquants im Szintillationskristall erzeugte Lichtblitz breitet sich kugelförmig im Kristall aus, wobei die Lichtintensität im Zentrum am grössten ist und gegen die Peripherie hin abnimmt. So erhält derjenige *Photomultiplier* am meisten Licht, der unmittelbar über dem Gesteigungsort der Strahlung liegt. Durch ein Widerstandsnetzwerk lassen sich die Koordinaten der Lichtsignale eindeutig ermitteln. Nach Zusammenführung der Signale aller Photomultiplier und nach Differenzverstärkung wird ein Koordinatensignal X,Y erzeugt. Dieses wird durch den Einkanal-diskriminator analysiert. Fällt das Signal in den Photopeak des verwendeten Radionuklids, wird ein Triggersignal erzeugt (Z- Signal), das die weitere Verarbeitung bzw. Registrierung der X- und Y-Signale auslöst.

Moderne Gammakameras sind digitalisiert. Ihre *mikroprozessor-gesteuerte* Elektronik überwacht während der Aufnahme alle technischen Funktionen, wodurch eine konstante Homogenität und Linearität des Messkopfes garantiert werden.

6.3.3 Emissionstomographie

SPECT (engl.: single-photon-emission-computed-tomography) ist eine Weiterentwicklung der digitalisierten Gammakameratechnik. Hier rotieren während der Untersuchung ein bis drei Kamera- Messköpfe kreisförmig oder elliptisch um den Patienten. Somit wird die vom Körper emittierte Strahlung aus verschiedenen Winkelpositionen für den ganzen Umfang von 360 Grad registriert. Eine apparative Variante besteht aus einem rund um den Patienten positionierten Detektorring mit einer Vielzahl von kleinen Szintillationszählern. Die aus den verschiedenen Winkelpositionen aufgenommenen Daten werden in einem Rechner gespeichert. Mittels spezieller Algorithmen werden eine Vielzahl von örtlichen Aktivitätsprofilen errechnet, woraus eine beliebige Anzahl von *tomographischen Schnittbildern* rekonstruiert werden können. Die Abbildung der Organstrukturen ist in verschiedenen Projektionsebenen möglich. Dadurch können in der Körpertiefe gelegene Organe und Krankheitsherde überlagerungsfrei dargestellt werden.

6.3.4 Positronemissionstomographie (PET)

PET ist die empfindlichste nuklearmedizinische Methode mit der besten örtlichen und zeitlichen Auflösung. Wegen des hohen Betriebsaufwands sind die Einsatzmöglichkeiten bisher auf wissenschaftliche Anwendungen beschränkt. Die Methodik erfordert eine enge örtliche Beziehung von Cyclotron zur Radionuklidproduktion, Radiochemie und klinischen Anwendung, da die kurzen physikalische Halbwertszeiten der positronemittierenden Tracer (oft im Bereich von wenigen Minuten liegend) einen längeren Nuklidtransport ausschliessen.

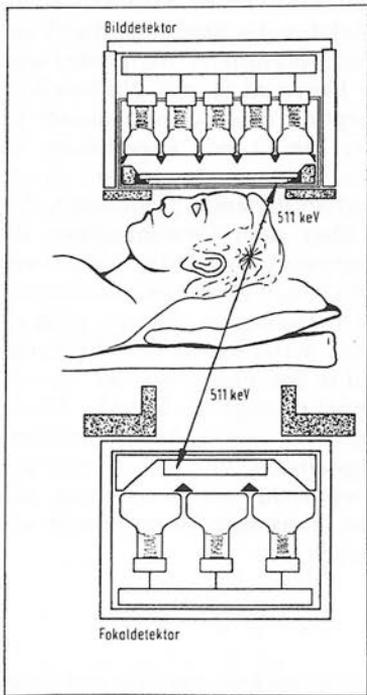


Abbildung 6.3: (s.Text)

und die spezielle Detektorkonstruktion weitgehend vorgegeben. Der grosse methodische Vorteil von PET liegt in der Möglichkeit, Radioisotopen der natürlichen biologischen Bausteine wie Kohlenstoff (^{11}C), Stickstoff (^{13}N) und Sauerstoff (^{15}O) *in vivo* zu verwenden.

Die bei der Anihilation eines Positrons und Elektrons unter 180 Grad emittierten zwei Gammaquanten von je 511 keV werden als zeitlich koinzidierende Messereignisse detektiert (Abbildung 6.3). Durch die Koinzidenzschaltung erzeugt die Elektronik ein Bildsignal, wenn gleichzeitig in zwei sich gegenüberliegenden Szintillationskristallen ein Photoeffekt nachgewiesen wurde. Der Ort des Positronzerfalls wird entsprechend der geometrischen Verhältnisse rekonstruiert. Aus der relativen Häufigkeit der von den einzelnen Detektoren gemessenen Ereignisse, lässt sich der Entstehungsort der Strahlung errechnen. Mittels einer aufwendigen Datenverarbeitung erfolgt nach Subtraktion von unspezifischer, ausserhalb der Focusebene liegender Untergrundstrahlung und der tiefenabhängigen Absorptionskorrektur die tomographische Bilddarstellung. Die Anzahl der möglichen Schnittebenen ist durch die Anzahl der Messringe

6.3.5 Dokumentation

Ein *Szintigramm* (Szintiphoto) setzt sich aus vielen Messpunkten zusammen, wobei meist nicht sofort ersichtlich ist, ob es sich um analoge oder digitale Messdaten handelt. Eine gute Bildauflösung bedingt eine genügende Zählstatistik. Heute verlangt man mindestens 20000 Szintillationen pro cm^2 oder 200000 pro Bild. Die Dokumentation eines Szintigramms ist mittels verschiedener Informationsträger möglich (Bildschirm, Papier, Röntgen- oder Polaroidfilm).

6.4 Klinische Anwendungen

In der Schweiz sind die nuklearmedizinische Installationen fast ausnahmslos an Spitäler gebunden. Diese Situation bestimmt Einsatzhäufigkeit und klinische Anwendung der Methoden ganz wesentlich. In der Folge sollen unter bewusstem Verzicht auf Vollständigkeit einige häufige Untersuchungen besprochen werden, die auch die Vorteile der beschriebenen Tracertechnik belegen.

6.4.1 Schilddrüsendiagnostik

Die Anfänge der Nuklearmedizin gehen auf den ersten klinischen Einsatz von Radiojod zur Schilddrüsendiagnostik (1937) zurück. Obwohl heute auch andere bildgebende Verfahren wie Ultraschall und MR wichtige Informationen über die Organstruktur liefern, ist die Schilddrüsendiagnostik eine Domäne der Nuklearmedizin geblieben. Dies ist mit der Häufigkeit von hormonalen Störungen (Dysthyreosen) und deren umfassenden, diagnostischen Differenzierung mittels szintigraphischer Verfahren zu begründen. Zwar haben moderne Isotopen (^{123}I , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{201}Tl) das früher viel verwendete ^{131}I weitgehend ersetzt. Zur Behandlung von Schilddrüsentumoren und gewissen hormonalen Funktionsstörungen wird ^{131}I weiterhin mit Erfolg eingesetzt.

Das klassische *Radiojodstudium* besteht aus verschiedenen Phasen, nämlich a) der Messung der Jodspeicherung in der Schilddrüse, b) der Bestimmung der Bluthormonwerte und c) der Szintigraphie. Dazu wird das Radiojod peroral verabreicht und seine *Verwertung in der Schilddrüse* über mehrere Stunden gemessen. Eine kinetische Kurvenanalyse dient der Dosisberechnung für eine Radiojodtherapie.

Messungen von Blutproben ergeben quantitativ exakt u.a. den Hormongehalt, dessen Bindungsanteil an Transporteweisse im Plasma und den Anteil der schilddrüsenbedingten Radiojodmarkierung des Hormons (Organifizierung des als Natriumjodid verabreichten Radiojodes).

Das *Szintigramm* registriert die örtliche Verteilung des gespeicherten Tracers (Abbildung 6.2). Diese kann regelmässig, diffusverteilt oder unregelmässig, in einzelnen Knoten variabel sein. Knotenbildungen sind in der Schweiz häufig Folge eines latenten Jodmangels. Sie sind von hormonal nicht aktiven Knotenbildungen (sog. kalten Knoten) zu unterscheiden, die selten auch krebsbedingt sein können.

Radiojodtherapie: Die Selektivität der Radiojodkonzentration durch die jodspeichernden Zellen der Schilddrüse ermöglicht eine äusserst wirksame Strahlentherapie mit geringer Sekundärbelastung von anderen Organen (z.B. Gonadenbelastung 0,02 mGy/MBq). Die Eleganz der Methode wird einzig durch die Urinausscheidung kompromittiert, welche strenge Strahlenschutzauflagen erforderlich macht. Patienten, die mehr als 185 MBq ^{131}I erhalten, müssen für kurze Zeit in Spezialstationen hospitalisiert werden, welche die gesetzlichen Strahlenschutzauflagen erfüllen.

6.4.2 Lungenszintigraphie

Der segmentale anatomische Lungenaufbau erleichtert die szintigraphische Diagnostik. Diese bezieht sich meist auf die funktionelle Darstellung der Belüftung einerseits und der Durchblutung andererseits.

a) *Ventilation:* Zur Atemluft werden Edelgase (^{133}Xe , ^{127}Xe , ^{82m}Kr) beigemischt. Diese gehen in der Lunge keine chemischen Bindungen ein, so dass ihre Verteilung nur von der örtlichen Belüftung abhängt. Mittels einer szintigraphischen Bildsequenz können Störungen der Ein- bzw. Ausatmung dokumentiert und quantifiziert werden.

b) *Perfusion:* Denaturierte Humanserum-Eiweisspartikel von circa 50 μm Durchmesser, als kommerziell erhältliches Präparationsbesteck mit ^{99m}Tc markiert, werden in eine Armvene injiziert und verteilen sich in den Lungen entsprechend der örtlichen Durchblutung. Wegen ihres leicht grösseren Durchmessers verschliessen sie kurzfristig, d.h. bis zu ihrer Auflösung, einzelne Lungenkapillaren, was die Durchführung von szintigraphischen Aufnahmen erlaubt. Anreicherungsdefizite deuten auf Unterbrüche der lokalen Lungendurchblutung hin, die vorallem durch Lungenembolien (Verstopfung von Lungengefässen durch Blutgerinnsel) entstehen.

c) *Röntgenbild:* In Ergänzung zur kombinierten Lungenszintigraphie wird meistens eine Röntgenaufnahme des Thorax angeordnet (Abbildung 6.5), damit die einzelnen anatomischen Strukturen besser lokalisiert werden können.

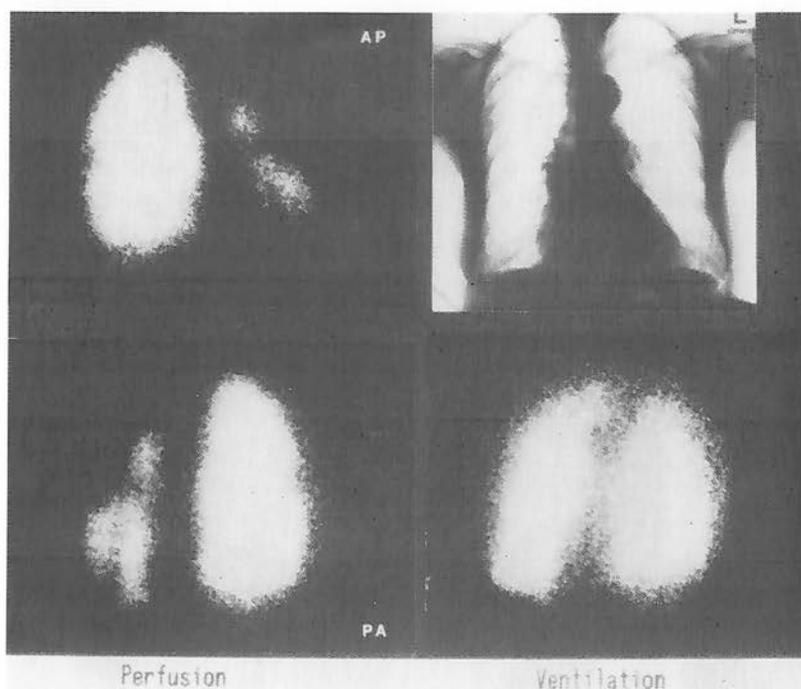


Abbildung 6.4: Kombinierte Lungenszintigraphie: Zwei Perfusionsaufnahmen von vorne (oberes Bild links) und hinten (unteres Bild links) zeigen massive Durchblutungsausfälle vorallem in der linken Lunge, die sich daher kaum darstellt. Das Ventilationsszintigramm (unten rechts) zeigt in beiden Lungen eine gute Belüftung. Röntgenbild (oben rechts).

6.4.3 Skelettszintigraphie

In der Schweiz ist die Skelettszintigraphie zur häufigsten Untersuchung avanciert (im Jahre 1991: circa 38000). Sie wird meistens als Suchmethode (Screening) d.h. vor anderen Verfahren eingesetzt.

Die Knochenzelle reagiert frühzeitig auf schädigende Einflüsse. Da sie zur Aufnahme verschiedener Substanzen fähig ist, sind radioaktive Tracer sehr geeignet um Knochendefekte infolge von Erkrankungen oder Traumen aufzuspüren. Am häufigsten werden ^{99m}Tc -markierte Phosphatverbindungen verwendet (Abbildung 6.6). Nach der Ursache jedes szintigraphisch festgestellten, krankhaften Befundes muss weiter gesucht werden (z.B. mittels einer Röntgenuntersuchung).

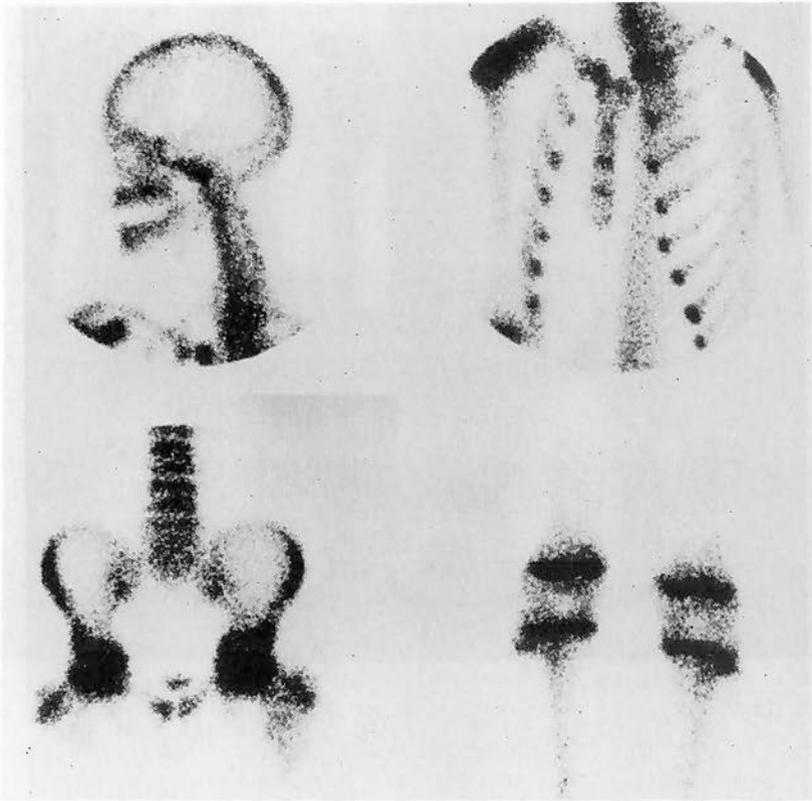


Abbildung 6.5: Normales Skelettszintigramm eines Jugendlichen. Noch aktive Orte der Knochenbildung sind intensiv schwarz 'angefärbt' (z.B. Rippen (oben rechts), Hüftgelenke (unten links), Epiphysenfugen der Kniegelenke (unten rechts)).

Die *Mehrphasen-Skelettszintigraphie* bringt diagnostisch wichtige Aufschlüsse hinsichtlich der Durchblutung einer vermuteten Läsion. Entzündliche Herde (Abbildung 6.7) und bestimmte Tumoren zeigen eine verstärkte Durchblutung, was sich unmittelbar nach der Injektion des Tracers auf sog. *Frühaufnahmen* erkennen lässt. Umgekehrt fehlt die Durchblutung in Herden mit erheblichen Zelluntergängen (z.B. Femurkopfnekrose), was eine Verzögerung der regionalen Tracer-Verteilung zur Folge hat. Weichteilreaktionen in der Umgebung einer Knochenläsion können ebenfalls beurteilt werden. *Spätaufnahmen* nach mehreren Stunden zeigen Ausmass und Intensität der Knochenreaktion.

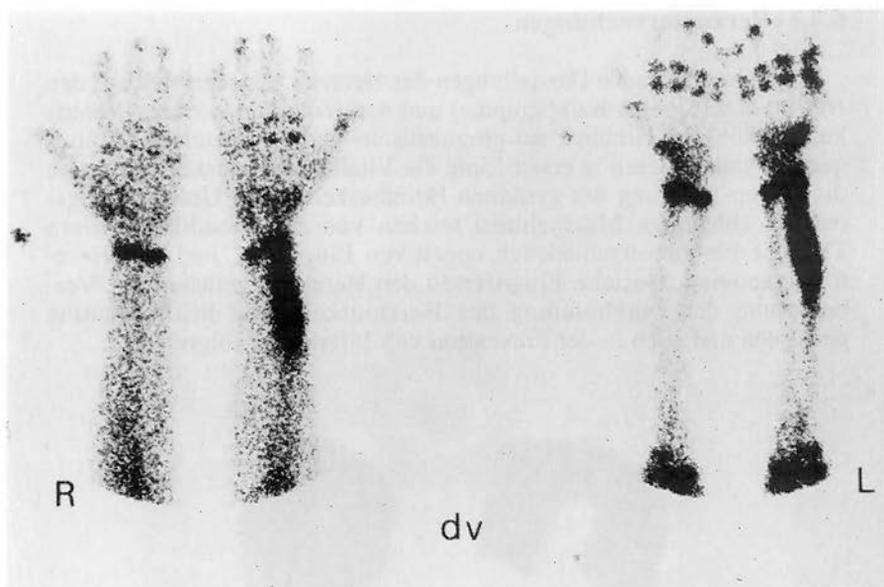


Abbildung 6.6: Mehrphasen-Szintigramm bei Knochenentzündung der linken Speiche. Eine gesteigerte Durchblutung im Vergleich zur normalen Gegenseite ist auf dem Frühbild (links) deutlich (schwarz) erkennbar. Das Spätbild (rechts) zeigt eine massive Knochenreaktion

Zweituntersuchungen

In jüngster Zeit sind mehrere Verfahren zur direkten Markierung von Zellen, die an einem bestimmten Knochenprozess mitbeteiligt sind, entwickelt worden. *Markierte Granulozyten* (weisse Blutkörperchen), die in hoher Zahl in Entzündungen und Abszesse einwandern, erlauben einen skelettszintigraphisch entdeckten Knochenherd als entzündlich bedingte Läsion (Osteomyelitis) zu diagnostizieren.

Ferner ist eine örtliche Anreicherung von spezifischen *Tumor-markern* in solchen Herdbildungen für eine Tumormetastase (Tochtergeschwulst) beweisend. Somit gestatten Bildänderungen bei Kontrollen nach einer Krebstherapie die Beurteilung eines Therapieerfolges.

6.4.4 Herzuntersuchungen

Szintigraphische Darstellungen des Herzens beziehen sich auf den *Herzmuskel* (Myokardszintigraphie) und den *Herz-Binnenraum* (Ventrikulographie). Im Hinblick auf prognostische und therapeutische Konsequenzen interessieren in erster Linie die Vitalität der Muskelzelle sowie die (Pump-)Leistung des gesamten Herzmuskels. Vom Untersuchungsergebnis abhängige Massnahmen reichen von einer medikamentösen Therapie bis zu verschiedenen operativen Eingriffen, incl. der Herztransplantation. Gezielte Eingriffe an den Herzkranzgefässen zur Verbesserung der Durchblutung des Herzmuskels sind heute Routine geworden und auch in der Prävention von Infarkten erfolgreich.



Abbildung 6.7: Herzmuskel-SPECT mit ^{201}Tl

A: nach Belastung mit deutlichem inferiorem Defekt (fehlender Ringchluss), B: in Ruhe: Normalbild. Diese Bildkonstellation ist für eine Erkrankung der Herzkranzgefässe typisch.

a) Myokardszintigraphie mit $^{201}\text{Thallium}$

Die Aufnahme von Thallium (^{201}Tl) in die Muskelzelle erfolgt, wie beim omnipräsenten Kalium, gemäss dem Gesetz von Angebot und Nachfrage. Nach einer intravenösen Injektion wird es dort vermehrt gespeichert werden, wo die Durchblutung den leistungsabhängigen Bedarf decken kann. Bei verengten Herzkranzgefässen kann der Blutzufluss unter einer körperlichen Anstrengung, also bei erhöhter Arbeit des Herzmuskels ungenügend werden. Entsprechend ist die Thalliumaufnahme in den minderperfundierten Muskelarealen relativ zu den gesunden Muskelpartien geringer; dies solange die Belastung anhält (Abbildung 6.7). Wenn durch einen Herzinfarkt Muskelgewebe definitiv zerstört worden ist, wird sich dort kein ^{201}Tl anreichern; weder in Ruhe noch unter körperlicher Belastung.

b) Ventrikulographie (Herzkammerdarstellung) mit Radionukliden

Mittels einer ^{99m}Tc -Markierung der Erythrozyten (rote Blutkörperchen) kann die Füllung der Herzkammern gemessen werden, wie sie sich im Laufe einer Herzaktion laufend ändert. Die Menge der pro Zeit vom Herzen ausgeworfenen Aktivität ist ein guter Parameter der Pumpleistung des Herzmuskels (Auswurfraction). Ausserdem können die Zeitpunkte und Ausmass der maximalen Füllung einer Herzkammer (Diastole) sowie nach maximaler Kontraktion (Systole) genau registriert werden. Die räumliche und zeitliche Beurteilung aller Phasen der Herzwandbewegung zwischen diesen beiden Extremzuständen erlaubt Rückschlüsse auf die zeitliche und örtliche Koordination der Herzmuskelkontraktionen. Störungen derselben treten häufig erst unter körperlicher Belastung auf. Sie sind oft Folge von Erkrankungen des Nerven- (Reizleitungs-)systems oder der Muskelzelle, aber auch von Medikamentenwirkungen.

c) Stoffwechseluntersuchungen



Abbildung 6.8:
Herzmuskel-PET mit ^{18}F -DG.

Durch die Substanzaufnahme wird das lebensfähige Muskelgewebe dargestellt.

Mittels der Positron-Emissionstomographie (PET) gelingt es den örtlichen *Energiebedarf* des Herzmuskels mit ^{18}F -fluorierter Deoxyglukose (^{18}F -DG) (Abbildung 6.8) oder mit metabolisch wichtigen Fettsäuren zu messen. Diese aufwendigen, meist wissenschaftlichen Untersuchungen dienen in erster Linie dem Nachweis von lebensfähigen Muskelzellresten nach einem Herzinfarkt, der Differenzierung von Erkrankungen der Muskelzellen oder dem Studium von Medikamentenwirkungen.

6.4.5 Nierenszintigraphie

Als klassisches Ausscheidungsorgan sind die Nieren für tracerkinetische Untersuchungen prädestiniert. Die Mechanismen von Ausscheidung und Rückresorption variieren je nach chemischem Aufbau des Tracers und ändern sich im Krankheitsfall. Isotopenuntersuchungen der Nieren faszinieren durch ihre technische Einfachheit und die Möglichkeit funktionelle und anatomische Aussagen in einem einzigen Untersuchungsgang zu erhalten. Mittels gleichzeitigen Entnahmen von Blutproben kann das Verschwinden der Aktivität aus der Blutbahn und somit die Ausscheidungsfunktion der Nieren (Clearance) gesamtthaft oder für jede Niere einzeln berechnet werden.

Eine Vielzahl von markierten Substanzen erlauben heute eine sehr differenzierte Nierenfunktionsdiagnostik. Am häufigsten werden heute jodierte oder ^{99m}Tc markierte Substanzen verwendet (^{123}I -Hippuran, ^{99m}Tc -MAG3). Im Vergleich zu Röntgenuntersuchungen ist die Strahlenbelastung klein, so dass das Verfahren bei Kindern sehr häufig angewendet wird und auch für Behandlungskontrollen empfehlenswert ist.

Allerdings hat sich das Indikationsspektrum unter dem Einfluss anderer bildgebender Verfahren eingengt. Weiterhin wichtig sind:

- a) die Diagnose von urogenitalen Missbildungen beim Kind und die Kontrollen der weiteren Nierenentwicklung nach einer Operation,
- b) Untersuchungen vor urologischen Eingriffen zum Nachweis von Urinabflussbehinderungen in Nierenbecken oder Harnleiter und
- c) die Funktionskontrolle einer frisch transplantierten Niere.

4.6 Weitere Organe

Gesamt- oder Partialfunktionen können bei einer Vielzahl von Organen dokumentiert oder sogar quantifiziert werden. Dies bedingt jeweils gewisse technische Modifikationen des szintigraphischen Untersuchungsvorgangs je nach der klinischen Fragestellung und der Nachfrage. Letztere hängt meist von der örtlichen Zugänglichkeit der Methoden, resp. vom Ausbau der nächstliegenden nuklearmedizinischen Einrichtungen ab und wird ferner auch von der Aussagekraft und Verfügbarkeit von anderen modernen Untersuchungsverfahren beeinflusst. Wichtige Isotopen-Untersuchungen mit grösserer Verbreitung sind in der nachstehenden Tabelle 6.1 zusammengestellt.

6.5 Trends

Hinsichtlich der methodischen Weiterentwicklung der Szintigraphie und der angewandten, radiochemischen Forschung sind derzeit drei hauptsächliche Stossrichtungen zu sehen.

a) Im *Apparatebau* schlägt die zunehmende Digitalisierung aller Messdaten durch. Diese Computerisierung erlaubt eine Vernetzung der verschiedenen bildgebenden Verfahren sowie die Integration von fachfremder Information in den Beurteilungs- und Dokumentationsprozess. Dieses vereinfacht und beschleunigt die klinische Diagnostik in mehrfacher Hinsicht. Tomographische Verfahren (CT, MR, SPECT, PET) können derart aufeinander abgestimmt werden, dass die jeweiligen Schnittebenen deckungsgleich sind. Dreidimensionale Rekonstruktionen erlauben zudem eine überlagerungsfreie Integration von funktionellen Messgrößen in anatomische Organdarstellungen. Die Messdaten sind zunehmend 'real time' erhältlich und jederzeit abrufbar. Eine zentrale Archivierung auf modernen Informationsträgern verhindert Verluste und Uebertragungsfehler und erlaubt Quervergleiche und statistische Erfahrungsschöpfung im Multizenterverbund.

b) Für die *Radiochemie* werden immunologische Erkenntnisse immer wichtiger. *Zellspezifische Antikörper* werden gegen die verschiedenen Tumorzellen hergestellt. In Zukunft werden auch markierte *Neurotransmitter* und *rezeptoraffine Substanzen* eine weitere Differenzierung von neurologischen und psychiatrischen Krankheiten erlauben und somit zu neuen Behandlungskonzepten führen. Die Früherkennung von metabolisch bedingten Erkrankungen mit häufig schweren Spätfolgen (wie z.B. Arteriosklerose oder alterungsbedingte Leiden) soll mittels spezifischer Tracer möglich werden.

c) *Therapeutisch* sollen auch *Alphastrahler* bei der Behandlung umschriebener und/oder metastasierender Tumore eingesetzt werden. Mittels spezifischer Trägersubstanzen sollen diese an den Wirkungsort gebracht werden. Dadurch könnte, unter gleichzeitiger Schonung des gesunden Gewebes, eine höhere örtliche Strahlenwirkung erreicht werden, als dies mit bisherigen Verfahren gelingt.

Tabelle 6.1: MATERIAL UND INDIKATION NUKLEARMED. METHODEN

<u>Organ</u>	<u>Isotop/Verbindung</u>	<u>Methode</u>	<u>Indikation</u>
Hirn	^{99m}Tc -HMPAO	SPECT	Durchblutung
	^{18}F -DG	PET	Metabolismus
	^{11}C , ^{18}F -Rezeptormark	PET	Epilepsie, Tumore
	^{111}In -DTPA	GC dyn	Hydrocephalus
Speicheldrüse	^{99m}Tc -PT	GC dyn	Speichelfluss
Schilddrüse	^{123}I , ^{99m}Tc -PT	GC stat PM, Blut	Struma Hormonstörungen
Parathyroidea	$^{99m}\text{Tc}/^{201}\text{Tl}$	dig GC	Adenom, Hypertrophie
Endocrine Organe	^{123}I -IMP	GC, SPECT	spez. endocrine Tumore
Nebenniere	$^{123}\text{I}/^{131}\text{I}$ -Cortison	GC stat	Tumore
Magen	^{99m}Tc PT	GC stat	Atyp.Schleimhaut,
Darm	^{99m}Tc -Erythrozyten	GC dyn	Blutungslokalisierung
Leber/Milz	^{99m}Tc -Kolloide	GC SPECT	Tumore, Metastasen
	^{99m}Tc -IDA	GC dyn	Gallenfluss, Fisteln
Lungen	^{99m}Tc -MAA	GC stat	Lungenembolie
	^{133}Xe -, ^{127}Xe -Gas	GC dyn	Reg. Belüftung
Herz	^{201}Tl -Chlorid	GC stat	Koronardurchblutung
	^{99m}Tc -Erythrozyten	GC dyn,dig	Kammerfunktion
	^{111}In -Myosin	GC stat	Myokardinfarkt
Nieren	^{99m}Tc -MAG 3	GC dyn	Ausscheidung, Funktion
	^{123}I -Hippuran		Hypertonie
Hoden/Ovar	^{99m}Tc -PT, div. AK	GC dyn	Torsion, Tumore
Skelett/Gelenke	^{99m}Tc -MDP	GC stat	Tumore, Metastasen
		GC dyn	Entzündungen, Nekrosen
Knochenmark	^{99m}Tc -Kolloide	GC stat	Ausdehnung, Defekte
		GC stat,PM	Ueberleben, Eisenkinetik
Erythrozyten	^{51}Cr , ^{59}Fe -	PM	Zell-Ueberleben
Thrombozyten	^{51}Cr	PM	Zell-Ueberleben
Granulozyten	^{111}In , ^{123}I , ^{99m}Tc	SPECT	Abzess, Infektion
Lymphozyten	^{68}Ga	GC stat	Tumore, AIDS
Lymphsystem	^{99m}Tc -Kolloid	GC dyn	Abfluss, Oedeme
Spez.Tumore	Antikörper	GC SPECT	Lokalisation, Metastasen

Legende: GC =Gammakamera; Untersuchungen: stat =statisch, dyn =dynamisch, dig =digitalisiert, PM =Punktmessung. AK =Antikörper. *Übrige Begriffe siehe Text.*

7 Therapie mit ionisierender Strahlung

7.1 Zum Krebsproblem

Die grosse Bedeutung der Radiotherapie wird durch eine aktuelle Studie der Europäischen Gemeinschaft klar. Danach wird in Europa für das Jahr 2000 eine Million Krebstoter erwartet, falls keine wesentlichen Verbesserungen in der Krebsbekämpfung erreicht werden können. Das bedeutet, dass voraussichtlich jeder dritte Europäer im Laufe seines Lebens an Krebs erkranken wird.

Der Begriff "Krebs" bezeichnet eine Vielzahl verschiedener Tumorerkrankungen in unterschiedlichen Geweben und in verschiedenen Entwicklungsstadien. Angesichts dieser Vielfalt kann nicht erwartet werden, dass man mit einer einzelnen Therapieform alle bösartigen Tumoren behandeln kann. Die etablierten Behandlungsmethoden sind die Chirurgie, die Radiotherapie, sowie die Chemo- und die Immunotherapie.

Die erwähnte Studie stellt fest, dass etwa 45% aller Krebserkrankungen heute heilbar sind. Mit gut der Hälfte dieser Heilerfolge kommt dabei der *Chirurgie* die grösste Bedeutung zu. Diese ist oft in der Lage, durch vollständige operative Entfernung des Tumors dessen weiteres Wachstum aber möglicherweise auch die Weiterverbreitung durch Metastasen zu verhindern.

Die *Radio- oder Strahlentherapie* wird – alleine oder in Kombination mit Chirurgie und Chemotherapie – zur lokalen Tumornichtung eingesetzt. Etwa 12 der erwähnten 45% Tumorheilungen werden mit Radiotherapie allein und weitere 6 zusammen mit Chirurgie erzielt.

7.2 Methoden und Aufgabe der Radioonkologie

Die Radiotherapie ist die am häufigsten angewandte Behandlung bei Krebs und etwa 60% aller Krebspatienten kommen im Verlaufe ihrer Erkrankung damit in Berührung. Auch in denjenigen Fällen bei denen eine *kurative*, das heisst zur Heilung führende Behandlung nicht mehr möglich ist, wird Radiotherapie häufig *palliativ* eingesetzt. Es gelingt dabei in der Mehrzahl der Fälle eine Verminderung der durch das Tumorwachstum hervorgerufenen Krankheitssymptome (wie starke Schmerzen, drohende Lähmungen etc.) zu erreichen. So wird häufig durch palliative Radiotherapie die Lebensqualität von Patienten mit lokal weit fortgeschrittener oder metastasierter Krebserkrankung wesentlich verbessert.

Die Aufgabe der Radiotherapie ist eine sehr schwierige. Es gilt nämlich, im Prinzip sämtliche Zellen eines Tumors, welcher meistens schon aus Milliarden von Zellen besteht, durch Strahlung abzutöten, oder wenigstens am Weiterwachsen zu hindern (inaktivieren). In der Tat können wenige, die Behandlung überlebende Zellen zu einem erneuten Tumorwachstum (*Rezidiv*) führen. Die Aufgabe ist ferner dadurch erschwert, dass die normalen Zellen der den Tumor umgebenden Organe durch die Strahlung ebenfalls geschädigt werden. Die Abbildung 7.1 zeigt, wie die Wirkung der Strahlung mit der Strahlungsdosis zunimmt, und wie schwierig es grundsätzlich ist, den Tumor zu zerstören, ohne die umgebenden Gewebe zu schädigen. Um den kleinen Unterschied in der Wirkung auf die gesunden und die Tumorzellen zu verstärken, wird die vorberechnete Strahlendosis im Laufe einer grösseren Anzahl von Einzelbestrahlungen (z.B. 20) verabreicht, die sich jeweils in Abständen von 1–2 Tagen folgen (*Fraktionierung*). Dadurch gibt man den im Bestrahlungsfeld mitbetroffenen, gesunden Organen, die Möglichkeit zur Erholung von der Strahlenwirkung, da sie üblicherweise über die besseren Reparationsmechanismen verfügen als der Tumor.

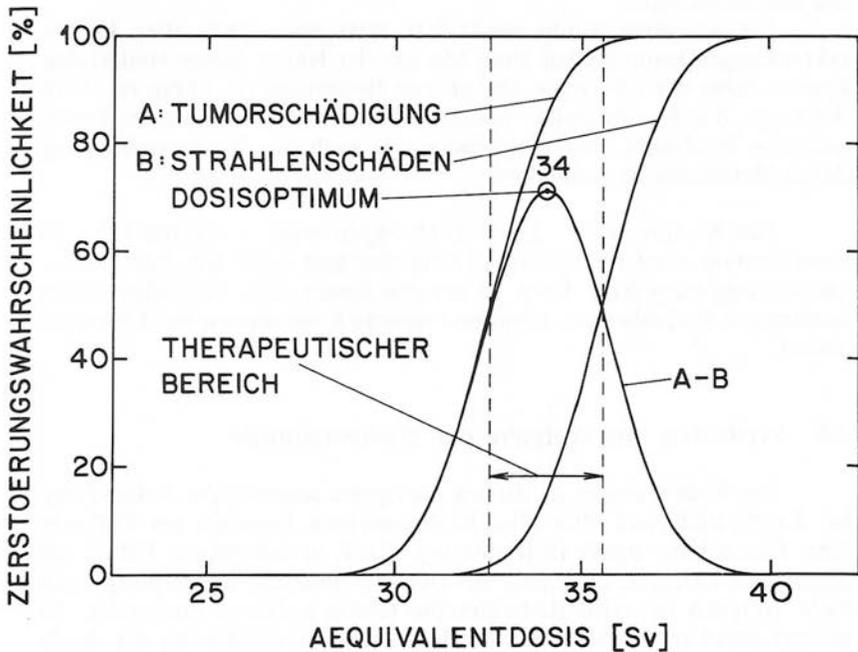


Abbildung 7.1: Zerstörung von Gewebe durch Strahlung. Schädigungsverlauf Kurve A: für Tumorgewebe; Kurve B: für gesundes Gewebe (bessere Erholungsbedingungen). Der therapeutische Bereich liegt zwischen A und B mit Angabe des Dosisoptimums.

7.3 Entwicklung und heutiger Stand der Radiotherapie

Bis zur Mitte dieses Jahrhunderts verfügte der Therapeut nur über Röntgenstrahlen und über lokal applizierbare radioaktive Präparate für gewisse Fälle. Wie aus der Abbildung 7.2 ersichtlich ist, unterscheiden sich Strahlen verschiedener Art und Energie sehr stark in ihrer Fähigkeit, tief in den Körper einzudringen.

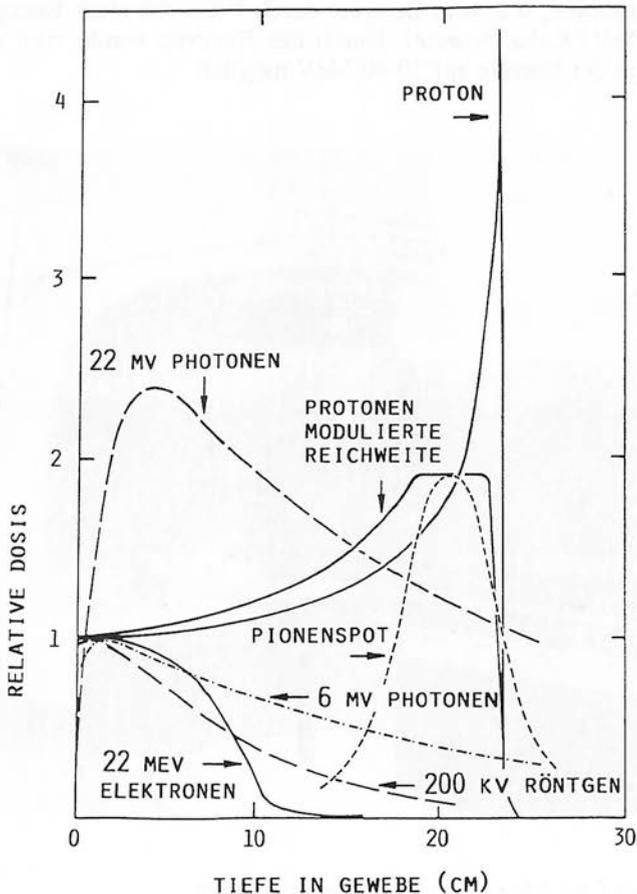


Abbildung 7.2: Wirkungsverlauf verschiedener Strahlungen in Abhängigkeit der Eintrittstiefe ins Gewebe.

Da die Röntgenstrahlen mit zunehmender Tiefe im Gewebe schnell an Wirkung verlieren, ist es mit diesen kaum möglich grosse und tiefliegende Tumore zu behandeln ohne das umliegende Gewebe zu schädigen. Die wichtigste Entwicklung war daher der Einsatz von Strahlung höherer Energie (*Hochvolttherapie*), und zwar sowohl von Photonenstrahlen (wie Röntgen- oder Gammastrahlen) wie auch von Elektronen selbst. Dies wurde ermöglicht durch die Entwicklung von kernphysikalischen Beschleunigern sowie die Herstellung von radioaktiven Isotopen in Kernreaktoren. So führte der Einsatz von starken Quellen zu einer Verbesserung der Tiefendosis gegenüber Röntgenstrahlen, wie zum Beispiel durch ^{60}Co mit einer Energie von über 1 MeV (*Kobaltbombe*). Durch das Betatron wurde eine weitere Steigerung der Energie auf 20-40 MeV möglich.

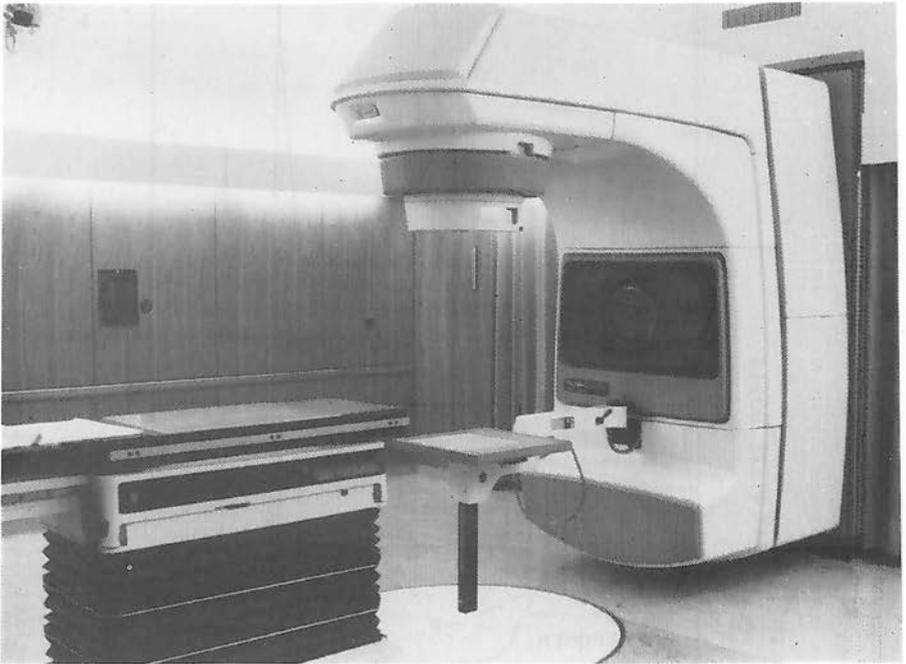


Abbildung 7.3: Moderner Linearbeschleuniger

Die Abbildung 7.2 zeigt, dass bei hohen Energien die Wirkung eines Elektronenstrahls wie auch der damit sekundär erzeugten Photonenstrahlen (für die dazu verwendeten Prozesse siehe Kapitel 2) nach Eindringen in den Körper vorerst zunimmt (Dosisaufbau) und grössere Tiefen erreicht werden. Bei diesen Entwicklungen hat die Schweiz eine wesentliche Pionierrolle gespielt, technisch mit R.WIDERÖE (BBC) und medizinisch mit H.SCHINZ (Zürich).

Mit der Einführung von kostengünstigen und leichter zu handhabenden Linearbeschleunigern für Elektronen im Energiebereich von 5–10 MeV hat die Radiotherapie ein universell einzusetzendes Gerät für Routinezwecke gefunden (Abbildung 7.3). Dieses Gerät hat auch weitgehend die Kobaltbombe ersetzt. Zusätzlich zur Bestrahlung von im Körperinnern liegenden Tumoren durch die Haut hindurch (*perkutane* Bestrahlung) werden in der *Brachytherapie* radioaktive Quellen durch Körperöffnungen oder direkt (endoluminal oder interstitiell) in unmittelbare Tumornähe gebracht. Gebräuchlich ist heute vor allem das 'Afterloading'-Verfahren mit Isotopen wie ^{60}Co , ^{137}Cs und ^{192}Ir .

Therapieplanung

Ebenso wichtig wie geeigneterer Strahlenquellen sind für die Tumorbehandlung Verbesserungen der Diagnose und der Bestrahlungsvorbereitung, wie sie mit Hilfe der Elektronik und Computer erreicht worden sind. Es geht bei dieser *Therapieplanung* darum, im gewünschten *Zielvolumen* eine möglichst gleichmässige, die Tumorzellen inaktivierende Strahlendosis zu deponieren und dabei das umliegende gesunde Gewebe weitgehend zu schonen. Für diese Aufgabe brachte der Computertomograph (Kapitel 5.2.3) den entscheidenden Fortschritt. In diesem Gerät wird der Patient, schon zusammen mit den Lagerungshilfen, welche später die genaue Positionierung bei der Bestrahlung sicherstellen, zielbewusst untersucht. Auf den Tomographien bestimmt der Arzt das zu bestrahlende Zielvolumen. Dieses schliesst das eigentliche Tumolvolumen ein sowie eine *Sicherheitszone*, in welcher noch mikroskopisch kleine Metastasen vorhanden sein könnten. So werden oft benachbarte Lymphknoten prophylaktisch in das Zielvolumen einbezogen. Auf Grund dieser Angaben des Arztes kann anschliessend der Medizin-Physiker mit dem Computer den definitiven Bestrahlungsplan erstellen. Bei Verwendung von *mehreren Strahlenfeldern* gelingt es auch bei tiefenbedingt nicht sehr günstigen Wirkungsverteilungen von Elektronen und Photonen, die Dosen im Zielvolumen wirkungsvoll zu summieren und gleichzeitig die Bestrahlung der umliegenden Gewebe klein zu halten. Zusätzlich können dabei weitere Massnahmen wie Energiefilter, Absorber zum Schutz empfindlicher Bereiche und zum Ausgleich von Inhomogenitäten im Körperinnern eingesetzt werden, um eine optimale Dosisverteilung zu erreichen.

Die Umsetzung des Bestrahlungsplans auf den Patienten erfolgt schliesslich mit dem *Therapiesimulator* (= Röntgen-Durchleuchtungsgerät), mit welchem die genaue Positionierung des Patienten für die Bestrahlung erfolgt. Moderne Geräte gestatten heute sogar eine Überprüfung der Position und der angebrachten Dosis während der Bestrahlung selbst.

7.4 Zukünftige Entwicklungen in der Radiotherapie

Das erwähnte delikate Gleichgewicht zwischen einer zur Zerstörung des Tumors genügenden, aber im gesunden Gewebe Komplikationen vermeidenden Dosis führt dazu, dass schon kleine Verbesserungen die Heilungschancen wesentlich erhöhen können. An grösseren Tumorzentren werden daher darüber Forschungen angestellt. Ein Beispiel ist die *Superfraktionierung*, d.h. mehrere Bestrahlungen pro Tag, mit denen man bezweckt, die Erholungsmechanismen von besonders aggressiv wachsenden Tumorzellen zu behindern. Ebenso kommt der Einsatz von sensibilisierenden Pharmaka zur Anwendung, welche die Strahlenwirkung potenzieren. Man versucht damit, die für den Erfolg der Radiotherapie ungünstige Tatsache zu umgehen, dass die oft schlecht mit Sauerstoff versorgten Zellen eines Tumors weniger strahlenempfindlich sind als normale Zellen. Während die Kombination von Chirurgie und Radiotherapie etablierte Methode ist, versucht man heute auch vermehrt durch Verbindung von Bestrahlung mit Chemotherapie die lokale Kontrolle zu verbessern und die Gefahr einer Metastasierung zu vermindern.

Stark verbesserungsfähig ist die genaue Anpassung des Bestrahlungsvolumens an das Tumolvolumen, besonders in allen drei Raumdimensionen. In vielen Fällen wird das Anbringen einer genügenden Dosis auf den Tumor auch dadurch eingeschränkt, dass sich lebenswichtige oder besonders strahlenempfindliche Organe in unmittelbarer Nachbarschaft eines Tumors befinden, so z.B. das Rückenmark oder Darmabschnitte. Hier wird die Radiotherapie mit Strahlen geladener, schwerer Teilchen wesentliche Verbesserungen ermöglichen. In der Tat besteht ein grosser Unterschied zwischen diesen und den Röntgen-, Gamma- und Elektronenstrahlen. Die letzteren durchdringen den Körper mit gradueller Abschwächung und seitlicher Streuung, während die schweren Teilchen nahezu gerade Bahnen wohldefinierter Länge zurücklegen. Ihre Wirkung ist gegen Ende der Bahn sogar am grössten (der Bragg-peak, siehe Abbildung 7.2), was diese Strahlen zur räumlich genauen Behandlung von tiefliegenden Tumoren prädestiniert.

Die Art der Strahlung ist ein wichtiger Faktor ihrer radiobiologischen Wirkung. Bis heute sind in der Radiotherapie aber fast ausschließlich Elektronen eingesetzt worden, sei es als Sekundärteilchen von Röntgen- oder Gammastrahlung oder direkt mit Elektronenbeschleunigern. Nun haben *schwerere Teilchen* wie Protonen, Alpha-Teilchen oder schwere Ionen (z.B. Kohlenstoff) ganz andere Wirkungen. Wenn ein energetisches, geladenes Teilchen durch die biologische Materie fliegt, ionisiert es (d.h. es schlägt Elektronen aus Atomen heraus und verliert dabei graduell seine Energie). Während Elektronen pro zurückgelegtem Weg nur relativ wenige Ionen erzeugen, sind es bei schweren, mehrfach geladenen Teilchen sehr viele. Die Radiobiologen sprechen hier vom höheren LET-Faktor für 'Linearen Energie-Transfer' (Kapitel 3.1.5). Die Fähigkeit einer bestrahlten Zelle sich zu erholen ist stark vom LET abhängig. Es besteht so im Prinzip die Chance, durch diese Strahleneigenschaft die relative Strahlenempfindlichkeit von normalem und Tumorgewebe (den sog. radiotherapeutischen Faktor) zu verbessern.

7.5 Entwicklungen in der Teilchentherapie

Die ersten Versuche wurden in den 50er Jahren in Berkeley (USA), mit Alphateilchen durchgeführt. Seither wurden an verschiedenen Orten auch Bestrahlungen mit Protonen versucht. Pionierarbeit leisteten vor allem die Aerzte und Physiker in Harvard (USA), Uppsala (Schweden) und Moskau. Bei der zur Behandlung tiefliegender Tumoren erforderlichen Energie (ca. 200–250 MeV) sind die Beschleuniger zwar relativ gross, aber in einem Spitalbetrieb durchaus denkbar. Kürzlich wurde in der Universitätsklinik in Loma Linda (Kalifornien) eine erste klinische Anlage für Protonentherapie in Betrieb genommen. In Europa wird eine erste experimentelle Anlage am Paul Scherrer Institut, Villigen (PSI), demnächst fertiggestellt. Mit dieser sollen vor allem die technisch anspruchsvollen Methoden der drei-dimensionalen konformierenden Therapie weiterentwickelt und zusammen mit den Radiotherapeuten (Universität Zürich) im klinischen Betrieb evaluiert werden. In einer späteren Phase soll die Protonentherapie in Spitälern eingeführt werden.

Von ihrer biologischen Wirkung her gehören die Protonen zwar nicht zu den sehr dicht ionisierenden Teilchen, haben jedoch eine hervorragende räumliche Definition. Die Strahlbündel bleiben beim Eindringen in den Körper scharf begrenzt und entfalten am Ende ihrer Bahn ihre maximale Wirkung, die dann jenseits der Reichweite steil abfällt (Abbildung 7.2). Das gestattet sehr nahe an empfindlichen Organen gelegene Tumoren mit bisher nicht erreichter Selektivität zu behandeln. So können strahlentherapeutische 'Eingriffe' mit Genauigkeiten von Bruchteilen von Millimetern vorgenommen werden.

Ein Beispiel dafür ist die *Protonenbestrahlung des Auges* zur Behandlung des okularen Melanomes (Abbildung 7.4). Die Methode wurde erstmals in Harvard (USA) angewandt und dann am PSI in Zusammenarbeit mit der Ophthalmologischen Klinik der Universität Lausanne weiterentwickelt. Sie ist dort inzwischen für Europa routinemässig eingeführt.

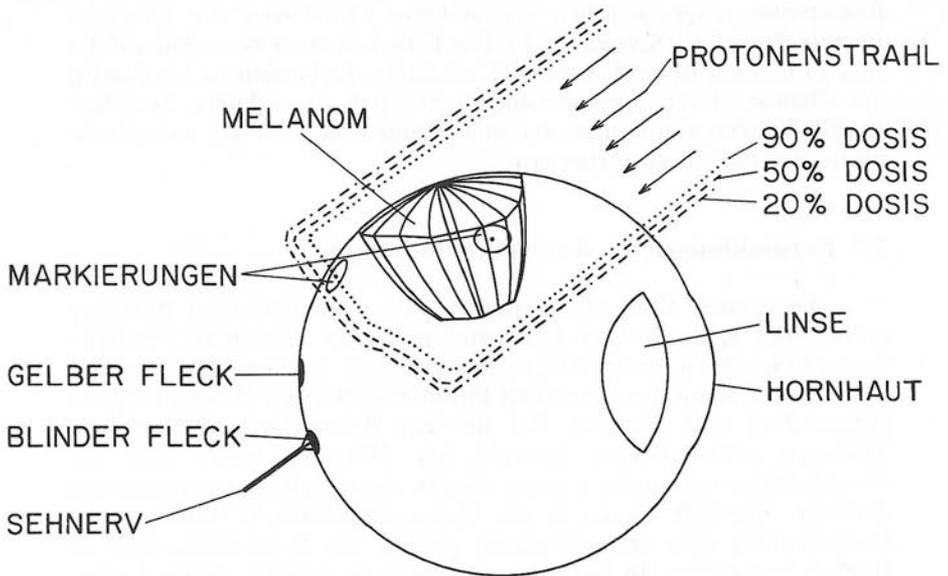


Abbildung 7.4: Planungsfeld für Protonenbestrahlung eines Augentumors (Melanom)

Schliesslich seien noch kurz weitere Versuche mit Teilchentherapie erwähnt. Mit *Neutronen* visiert man die dichtionisierenden Eigenschaften an, welche verstärkte und selektive biologische Wirkungen erzielen. Leider führen Neutronen, welche durch die Rückstossteilchen wirken, zu wenig günstigen Dosisverteilungen. Neuerdings ist auch die *Neutronen-Einfangstherapie* vorgeschlagen worden, bei der im Tumor selektiv angereichertes Bor beim Einfang von Neutronen eine starke lokale Strahlendosis erzeugt.

Bei der therapeutischen Anwendung von *negativen Pionen* war die Schweiz führend beteiligt (PSI seit 1982). Hierbei handelt es sich um sehr kurzlebige Elementarteilchen, die aufgrund ihrer physikalischen und biologischen Eigenschaften hervorragend für die Krebstherapie geeignet sind.

Es gibt auch Pläne für die Anwendung von *schweren Ionen*. Diese vereinen scharfe Strahlbündel mit hoher Ionisationskraft. Bei diesen, wie auch den anderen in diesem letzten Abschnitt erwähnten Methoden, hat man es mit zwar für die Forschung sehr interessanten, aber technisch sehr aufwendigen Experimenten zu tun, welche kaum in grösserem klinischen Rahmen einsetzbar wären.

7.6 Ausblick

Obwohl für die langfristige Beherrschung des Krebsproblems die Hoffnungen sich besonders auf molekularbiologische Forschungen richten, werden Chirurgie und Radiotherapie sicher noch lange die tragenden Elemente der Krebsbehandlung bleiben. Es ist daher richtig, alle Möglichkeiten der modernen technischen Entwicklungen auszunutzen. Die weitere Verbesserung der Therapieplanung und Bestrahlungstechnik sowie der entsprechenden Qualitätskontrolle ist sehr wichtig. Bei der grossen Zahl betroffener Patienten können dadurch noch wesentlich höhere Heilungsanteile erzielt werden. In Zukunft kommt zweifellos der Erweiterung der radiotherapeutischen Verfahren auf die Therapie mit Teilchen wie Protonen eine grosse Bedeutung zu.

8 Messung der Strahlung, Masseinheiten, Abkürzungen

Wie bereits in Kapitel 2 dargestellt, sind die Wechselwirkungen der Strahlung mit der Materie abhängig von der Art der Strahlung sowie von der Natur der bestrahlten Stoffe. Wir beschränken uns hier im wesentlichen auf biologische Gewebe. Das Ziel jeder Messung ist es, vorerst die physikalischen Eigenschaften und die Intensität einer Strahlung zu erfassen. Ist die Strahlung einmal physikalisch beschrieben, dann ist deren Wirkung nicht nur stark abhängig von ihrer Natur, sondern auch vom betrachteten System. Die Wirkungen auf eine Zelle oder auf die Funktion eines ganzen Organismus sind somit völlig unterschiedliche Probleme.

8.1 Einheiten der Radioaktivität und des Strahlenschutzes

Das SI und das ICRP haben die folgenden Grössen definiert:

Aktivität: Unter der Aktivität A eines radioaktiven Stoffes versteht man die Anzahl der Zerfälle pro Zeiteinheit. SI-Einheit der Aktivität: 1 Becquerel = 1 Bq = 1 Zerfall/s.

Veraltete Einheit: 1 Curie = 1 Ci = 3.7×10^{10} Bq.

Absorbierte Dosis: Unter der absorbierten Dosis D versteht man die pro Masseneinheit absorbierte Energie. SI-Einheit der Dosis: 1 Gray = 1 Gy = 1 J/kg.

Veraltete Einheit: 1 Rad (Radiation absorbed dose) = 1 rd = 0.01 Gy.

Ionendosis: Unter der Ionendosis D_I versteht man die pro kg trockene Luft erzeugte Ladungsmenge eines Vorzeichens. SI-Einheit der Ionendosis: 1 Coulomb/kg = 1 C/kg.

Veraltete Einheit: 1 Röntgen = 1 R = $1 \text{ esu/cm}^3 = 2.58 \times 10^{-4}$ C/kg. Mit einer mittleren Ionisationsenergie der Luft von 33.7 eV erhält man: 1 R \approx 8.69 mGy, 1 C/kg \approx 33.7 Gy.

Äquivalentdosis: Für das lebende Gewebe wird die Äquivalentdosis $D_E = D Q$ eingeführt, Q ist der "Qualitätsfaktor" (= RBW = Relative Biologische Wirksamkeit = w_R = Strahlungswichtungsfaktor). Für β -, μ - und γ -Strahlen wird $Q = 1$ angenommen, für α -Teilchen, Fissionsfragmente und schwere Kerne gilt $Q = 20$.

Für Neutronen wird folgende Energieabhängigkeit definiert! (ICRP 1990):

$$Q = 5 + 17 \exp(-(\ln(2E/\text{MeV}))^2 / 6)$$

d.h. für $E \leq 10$ keV und für $E \geq 20$ MeV gilt $Q \approx 5$, für E zwischen 100 keV und 2 MeV ist $Q \approx 20$.

SI-Einheit der Äquivalentdosis: 1 Sievert = 1 Sv.

Äquivalentdosis in Sv = absorbierte Dosis in Gy $\times Q$. Veraltete Einheit: Rem (rem) = 0.01 Sv (Röntgen equivalent for man).

Effektive Dosis: Epidemiologische Untersuchungen an strahlenexponierten Personen gestatten es, bei hohen Dosen oberhalb 0.5 Sv Aussagen über die Änderung der Krebsmortalitätsrisiken zu machen. Man kann daraus auf die Strahlenempfindlichkeit der einzelnen Gewebe und Organe schliessen. Den einzelnen Organen werden daher unterschiedliche

Gewebewichtungsfaktoren w_T zugeteilt. Die so gewichteten Äquivalentdosen werden zur effektiven Dosis E aufsummiert:

$$E = \sum_i w_{T,i} D_{E,i}$$

Da $\sum_i w_{T,i} = 1$, gilt bei einer gleichmässigen Bestrahlung $D_E = E$.

Für **beruflich strahlenexponierte Personen** gelten die folgenden Grenzen:

Die Lebensäquivalentdosis einer Person darf den Wert $D_E = 50(n-18)$ mSv nicht übersteigen ($n =$ Alter in Jahren).

Die Jahresdosis darf maximal 50 mSv betragen.

Für Hände, Unterarme, Füsse und Knöchel darf die Äquivalentdosis den Wert von 600 mSv/y nicht übersteigen.

Zum Vergleich: Die 50% Letalitätsdosis LD50 bei einer einmaligen Ganzkörperbestrahlung beträgt 3 Sv. Die Tabelle zeigt die mittlere jährliche Strahlenexposition der Bevölkerung in der Schweiz (KUER 1988).

natürliche Exposition	mSv
Radon und Zerfallsprodukte	2.2
körperinnere Bestrahlung	0.38
terrestrische Strahlung	0.55
kosmische Strahlung	0.4
künstliche Exposition	
medizinische Anwendungen	1.0
Fallout, Industrie, Spitäler, Kleinquellen, KKW	0.2
Tschernobyl im 1. Jahr	0.2

8.2 Messmethoden

Die Messverfahren haben sich historisch stark gewandelt. Im folgenden soll eine kleine Auswahl der gebräuchlichsten Detektoren kurz charakterisiert werden:

Photoplatte: Die Schwärzung der Photoplatte wird seit der Entdeckung der Radioaktivität zur groben Dosimetrie verwendet.

Ionisationskammer: Eine genaue und einfache Messung der Dosen ist mit der Ionisationskammer möglich. Der Kammerstrom ist proportional, zur Dosisleistung. Bei den oft benützten 'Bleistiftionisationskammern' wird die Entladung der Kammerkapazität gemessen. Die mit dem eingebauten Elektrometer gemessene Ladungsverminderung ist proportional zur Ionendosis.

Geiger-Müller-Zählrohr: Das empfindliche Geiger-Müller-Zählrohr dient oft als Sonde in Strahlungsmessgeräten. Da die Zählrohrimpulse keine Schlüsse auf die Energie der Strahlung zulassen, sind Rückschlüsse auf die tatsächliche Dosisleistung erschwert.

Kalorimeter: Eine direkte Messung der deponierten Energie pro Masseneinheit ist als Folge der im allgemeinen sehr kleinen absorbierten Energien schwierig. Die aufwendigen Geräte eignen sich meist nur für hohe Dosen.

Szintillationszähler: Durch Wechselwirkung der Strahlung (α , β , γ ...) mit dem Szintillationsmaterial (z.B. NaI(Tl)) entsteht sichtbares Licht, das mit einer empfindlichen Photodiode, einem 'Photomultiplier', in ein elektrisches Signal umgesetzt wird. Der elektrische Impuls ist proportional zur Energie des absorbierten γ -Quants (Elektrons etc.).

Proportionalzählrohr: Ein mit Gas gefülltes Zählrohr. Die elektronisch verstärkten Pulse sind proportional zur absorbierten Energie.

Halbleiterdetektoren (Si, Ge): Wie beim Proportionalzählrohr wird die Ionisation durch die absorbierte Strahlung gemessen. Die Signalgröße ist proportional zur Teilchenenergie, wenn das einfallende Teilchen ganz im Material absorbiert wird. Proportionalzähler, Szintillationszähler und Halbleiterdetektoren liefern direkt das Energiespektrum der untersuchten Strahlung und gestatten daher z.B. die Identifikation der die Strahlung ausstrahlenden Isotope.

Thermolumineszenz-Dosimeter: Gewisse Stoffe werden durch Strahlung elektronisch angeregt. Diese gespeicherte Information kann später durch Erwärmung als Lumineszenzstrahlung im UV- und sichtbaren Licht gemessen werden. Thermolumineszenz-Dosimeter ersetzen weitgehend die früheren Filmdosimeter.

Strahlenschäden: Die Strahlenschäden stark ionisierender Teilchen (z.B. α 's) gewisser Substanzen können durch Ätzung optisch sichtbar gemacht und gezählt werden.

8.3 Durchdringungsvermögen der Strahlung

γ -Strahlung: Beim Durchgang durch Materie werden γ -Strahlen nach dem 'Absorptionsgesetz' abgeschwächt. Die Intensität der Strahlung nach der Absorberdicke d beträgt:

$$I = I_0 e^{-d/\lambda} \quad \lambda = \lambda_{1/2} / \ln 2.$$

In der Tabelle sind einige Halbwertsängen $\lambda_{1/2}$ zusammengestellt. Charakteristisch für die γ - (inkl. Röntgen-) Strahlung ist das hohe Durchdringungsvermögen.

γ -Energie keV	Wasser $\lambda_{1/2}$ cm	Blei $\lambda_{1/2}$ cm
10	0.2	0.001
50	3.3	0.012
100	4.1	0.012
500	7.3	0.440
1000	9.9	0.940
5000	23.1	1.430
10000	34.7	1.230
50000	40.8	0.770
100000	40.8	0.680

α -Strahlung: Als Folge der starken Ionisationsdichte besitzen α -Teilchen eine kurze energieabhängige Reichweite, die für die natürlich-radioaktiven Elemente in Luft einige

Zentimeter beträgt. Natürliche α -Strahlung kann daher durch ein dünnes Blatt Papier vollständig abgeschirmt werden. Als typisches Beispiel erwähnen wir den in der Technik (z.B. Rauchmelder) oft verwendeten α -Strahler ^{241}Am , der mit einer Halbwertszeit von 460 y zerfällt. Die 5.5 MeV α Teilchen von ^{241}Am besitzen in Luft eine Reichweite von 4 cm.

β -Strahlung: Die 'praktische' Reichweite in Aluminium beträgt z.B. für Energien bis 2.5 MeV: $R = 530E/\text{MeV} - 106 \text{ mg/cm}^2$, d.h. ein 1 MeV Elektronenstrahl wird durch 1.5 mm Al praktisch vollständig absorbiert.

8.4 Radioaktive Zerfälle

Die wesentlichsten Zerfallstypen sind:

α -Zerfall	$M(A, Z) \rightarrow M(A - 4, Z - 2) + {}^4_2\alpha$	$^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{234}_{90}\text{Th} + \alpha$
β^- -Zerfall	$M(A, Z) \rightarrow M(A, Z + 1) + e^- + \bar{\nu}_e$	$^3_1\text{H} \rightarrow ^3_2\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$
β^+ -Zerfall	$M(A, Z) \rightarrow M(A, Z - 1) + e^+ + \nu_e$	$^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{22}_{10}\text{Ne} + e^+ + \nu_e$
Elektroneneinfang	$M(A, Z) + e^- \rightarrow M(A, Z - 1) + \nu_e$	$^{55}_{26}\text{Fe} + e^- \rightarrow ^{55}_{25}\text{Mn} + \nu_e$
γ -Zerfall	$M(A, Z) \rightarrow M(A, Z) + \gamma$	$^{119}_{50}\text{Sn}^m \rightarrow ^{119}_{50}\text{Sn} + \gamma$

Die folgende Tabelle zeigt Beispiele von radioaktiven Zerfällen. Angegeben sind die Energien der hauptsächlichen α - und γ -Übergänge. Da beim β^+ und β^- -Zerfall neben dem Elektron (Positron) das sehr durchdringende Neutrino ν emittiert wird (typisch 100 Lichtjahre Blei), besitzt das Elektronenspektrum eine kontinuierliche Energieverteilung mit der maximalen Energie β_{max}^\pm . Bei der 511 keV Strahlung bei ^{22}Na handelt es sich um die (e^+e^-) Anihilationsstrahlung.

Isotop	Zerfall	$\alpha, \beta_{\text{max}}, \gamma$ -Energie (keV)	$T_{1/2}$
^1_0n	$\rightarrow ^1_1\text{H} + e^- + \bar{\nu}_e$	$\beta_{\text{max}} : 782$	10.6 min
^3_1H	$\rightarrow ^3_2\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$	$\beta_{\text{max}} : 18.6$	12.3 y
$^{14}_6\text{C}$	$\rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$	$\beta_{\text{max}} : 156$	5730 y
$^{22}_{11}\text{Na}$	$\rightarrow ^{22}_{10}\text{Ne} + e^+ + \nu_e + \gamma$	$\beta_{\text{max}} : 546, \gamma : 1275, (511)$	2.60 y
$^{32}_{15}\text{P}$	$\rightarrow ^{32}_{16}\text{S} + e^- + \bar{\nu}_e$	$\beta_{\text{max}} : 1710$	14.3 d
$^{40}_{19}\text{K}$	$\rightarrow ^{40}_{20}\text{Ca} + e^- + \bar{\nu}_e$	$\beta_{\text{max}} : 1350$	1.28 Gy
$^{55}_{26}\text{Fe}$	$+ e^- \rightarrow ^{55}_{25}\text{Mn} + \nu_e$	-	2.7 y
$^{60}_{27}\text{Co}$	$\rightarrow ^{60}_{28}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e + \gamma$	$\beta_{\text{max}} : 318, \gamma : 1333, 1173$	5.27 y
$^{90}_{38}\text{Sr}$	$\rightarrow ^{90}_{39}\text{Y} + e^- + \bar{\nu}_e \rightarrow ^{90}_{40}\text{Zr} (T_{1/2} = 64 \text{ h})$	$\beta_{\text{max}} : 546$	28.9 y
$^{99}_{43}\text{Tc}^m$	$\rightarrow ^{99}_{43}\text{Tc} + \gamma \rightarrow ^{99}_{44}\text{Ru} (T_{1/2} = 214 \text{ ky})$	$\gamma : 143$	6.0 h
$^{131}_{53}\text{I}$	$\rightarrow ^{131}_{54}\text{Xe} + e^- + \bar{\nu}_e + \gamma$	$\beta_{\text{max}} : 607, \gamma : 364$	8.1 d
$^{137}_{55}\text{Cs}$	$\rightarrow ^{137}_{56}\text{Ba} + e^- + \bar{\nu}_e + \gamma$	$\beta_{\text{max}} : 512, \gamma : 662$	30.2 y
$^{198}_{79}\text{Au}$	$\rightarrow ^{198}_{80}\text{Hg} + e^- + \bar{\nu}_e + \gamma$	$\beta_{\text{max}} : 961, \gamma : 412$	2.7 d
$^{222}_{86}\text{Rn}$	$\rightarrow ^{218}_{84}\text{Po} + \alpha \rightarrow ^{214}_{82}\text{Pb} (T_{1/2} = 3.0 \text{ min})$	$\alpha : 5490$	3.82 d
$^{226}_{88}\text{Ra}$	$\rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + \alpha \rightarrow ^{218}_{84}\text{Po} (T_{1/2} = 3.8 \text{ d})$	$\alpha : 4780$	1600 y
$^{238}_{92}\text{U}$	$\rightarrow ^{234}_{90}\text{Th} + \alpha \rightarrow ^{234}_{91}\text{Pa} (T_{1/2} = 24 \text{ d})$	$\alpha : 4200$	4.49 Gy

8.5 Abkürzungen

BEIR	Advisory Committee on the B iological Effects of Ionizing Radiations
ICRP	I nternational Committee on Radiation Protection
KUeR	Eidgenössische K ommission zur Ueberwachung der Radioaktivität
NCRP	N ational Council on Radiation Protection and Measurement
SI	S ystème International d'Unités
UNSCEAR	U nited Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

Gesetzliche Vorsilben (z.B. 1 mGy = 10^{-3} Gy)

Vorsilbe	Abk.	Faktor	Vorsilbe	Abk.	Faktor
Kilo	k	$\times 10^3$	Milli	m	$\times 10^{-3}$
Mega	M	$\times 10^6$	Mikro	μ	$\times 10^{-6}$
Giga	G	$\times 10^9$	Nano	n	$\times 10^{-9}$
Tera	T	$\times 10^{12}$	Piko	p	$\times 10^{-12}$
Peta	P	$\times 10^{15}$	Femto	f	$\times 10^{-15}$
Exa	E	$\times 10^{18}$	Atto	a	$\times 10^{-18}$

