

# Strahlung



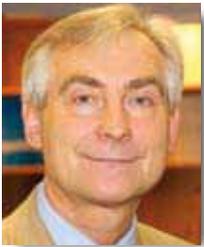
Von Röntgen  
bis Tschernobyl

# Autoren in diesem Heft



**Michael van den Heuvel**

ist Diplom-Chemiker. In der GSF-Öffentlichkeitsarbeit ist er als Fachjournalist und Internet-Redakteur tätig.



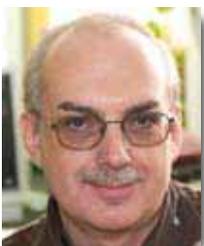
**Peter Jacob**

leitet die Arbeitsgruppe Risikoanalyse im Institut für Strahlenschutz der GSF. Der promovierte Physiker ist Mitglied der Strahlenschutzkommission (SSK) und leitet den Ausschuss Strahlenrisiko der SSK.



**Thomas Haninger**

leitet den Radonmessdienst der GSF. Der promovierte Physiker ist in der GSF-Auswertungsstelle für Strahlendosimeter zuständig für Fragen der Neutronendosimetrie sowie der Orts- und Umgebungsdosimetrie.



**Josef Peter**

erstellt im Fachbereich Strahlenschutz und Gesundheit des Bundesamtes für Strahlenschutz in Neuherberg fachliche Berichte über Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung. Nach seinem Studium der Physik und Promotion in Biologie war er von 1985 bis 1994 am Institut für Strahlenschutz der GSF im Bereich Radonmesstechnik tätig.



**Albrecht M. Kellerer**

Emeritus für Strahlenbiologie an der Universität München und ehemaliger Direktor des GSF-Instituts für Strahlenbiologie, war Mitglied nationaler und internationaler Gremien zur Risikobewertung ionisierender Strahlung. In seiner wissenschaftlichen Arbeit beschäftigte er sich schwerpunktmäßig mit Fragen der Strahlenphysik, Mikrodosimetrie und Risikoabschätzung.



**Christoph Hoeschen**

leitet die Arbeitsgruppe Medizinphysik am GSF-Institut für Strahlenschutz. Der promovierte Physiker befasst sich schwerpunktmäßig mit Fragen der Optimierung der Relation zwischen Bildqualität und Dosis und des Strahlenschutzes allgemein in der medizinischen Diagnostik.



**Irene Brüske-Hohfeld**

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im GSF-Institut für Epidemiologie. Die promovierte Arbeitsmedizinerin befasst sich schwerpunktmäßig mit Risikofaktoren für Lungenkrebs.



**Hans Schraube**

war Leiter des Neutronenlabors des GSF-Instituts für Strahlenschutz. Der promovierte Elektroingenieur befasste sich neben der Neutronenmesstechnik auch mit der Dosimetrie kosmischer Strahlung und war für die Entwicklung des Rechenmodells EPCARD zur Bestimmung der Strahlenexposition in Flugzeugen verantwortlich.



**Stephan Hübner**

arbeitet als Diplom-Physiker in der Auswertungsstelle für Strahlendosimeter der GSF. Er ist zuständig für die FilmDOSimetrie und elektronische Dosimetrie und für die Öffentlichkeitsarbeit der Auswertungsstelle verantwortlich.



**H.-Erich Wichmann**

ist Direktor des GSF-Instituts für Epidemiologie und Inhaber des Lehrstuhls für Epidemiologie an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Der Diplomphysiker und Mediziner gehört der Strahlenschutzkommission an und ist Mitglied in zahlreichen wissenschaftlichen Kommissionen und Beratungsgremien.



**Lothar Kreienbrock**

ist Professor für Biometrie, Epidemiologie und Informationsverarbeitung an der Tierärztlichen Hochschule Hannover. Zu seinen Arbeitsschwerpunkten gehören Fragen der Risikoabschätzung, Umweltepidemiologie und insbesondere Strahlenepidemiologie.

#### Herausgeber

GSF – Forschungszentrum für Umwelt und  
 Gesundheit, GmbH  
 in der Helmholtz-Gemeinschaft

#### Redaktion

Cordula Klemm, Dr. Hans Guldner,  
 Heinz-Jörg Haury

#### Bildredaktion

Michael van den Heuvel

#### Redaktionsanschrift

Öffentlichkeitsarbeit GSF,  
 Ingolstädter Landstraße 1, 85764 Neuherberg  
 Tel.: 089/31-87-27-11, Fax: 089/31-87-33-24  
 E-Mail: oea@gsf.de, Internet: <http://www.gsf.de>

#### Redaktionsbeirat

Dr. Johannes Beckers, Dr. Erhard Deml,  
 Prof. Dr. Jochen Graw, Dr. Joachim Heinrich,  
 Prof. Dr. Hans Wolfgang Levi, Dr. Josef Peter

#### Titelbild

Enno Kleinert, München  
[www.kleinert.de/illustratoren/kleinert/](http://www.kleinert.de/illustratoren/kleinert/)

#### Layout

Ute Schneider, u-s-design, München  
[www.u-s-design.com](http://www.u-s-design.com)

#### Litho und Druck

Gerber GmbH, Druck + Medien, Kirchheim

#### Grafik

Ute Schneider

#### Bildnachweis

AOK, Ulla Baumgart, Janine Becker, Bernd  
 Müller, Martin Böckmann, Bundesamt für  
 Strahlenschutz, Ute Fill, Werner Friedland,  
 GE-Healthcare, Günter und Ingrid Goddeng,  
 Michael van den Heuvel, Informationskreis  
 Kernenergie, Lufthansa, Hans Madej, Bilder-  
 berg, Dieter Regulla, Natalia Semiochkina,  
 Siemens Medizintechnik, Jochen Tschiersch,  
 U.S. National Nuclear Security Administra-  
 tion, Wasserwerk Rheinwald, I.F. Kostin/  
 V.A. Zuafarov, Maria Zankl

Auszüge aus diesem Heft dürfen ohne weitere  
 Genehmigung wiedergegeben werden, vor-  
 ausgesetzt, dass bei der Veröffentlichung der  
 jeweilige Autor und die GSF genannt wer-  
 den. Um ein Belegexemplar wird gebeten. Alle  
 übrigen Rechte bleiben vorbehalten.

ISSN 0949-0663

<b>Autoren in diesem Heft</b>	<b>2</b>
<b>Vorwort</b>	<b>3</b>
<b>Inhalt und Impressum</b>	<b>5</b>
<i>Michael van den Heuvel</i>	
<b>Strahlenquelle Atomkern: Ionisierende Strahlung</b>	<b>6</b>
<i>Hans Schraube</i>	
<b>Höhenstrahlung: die Exposition beim Fliegen</b>	<b>14</b>
<i>Christoph Hoeschen</i>	
<b>Spagat zwischen heilen und schaden: Strahlenanwendungen in der Medizin</b>	<b>16</b>
<i>Albrecht M. Kellerer</i>	
<b>Strahlenwirkung: Von der Dosis zum Risiko</b>	<b>23</b>
<i>Irene Brüske-Hohlfeld, Lothar Kreienbrock und H.-Erich Wichmann</i>	
<b>Inhalation natürlicher Strahlung: Lungenkrebs durch Radon</b>	<b>37</b>
<i>Thomas Haninger</i>	
<b>Der Radon-Messdienst der GSF-Auswertungsstelle</b>	<b>44</b>
<i>Peter Jacob</i>	
<b>20 Jahre danach: Der Unfall von Tschernobyl</b>	<b>46</b>
<i>Josef Peter</i>	
<b>Strahlenschutz in der Praxis: Grenzwerte und Regelungen</b>	<b>55</b>
<i>Stephan Hübner</i>	
<b>Filmdosimetrie: Die Überwachung beruflich strahlenexponierter Personen</b>	<b>65</b>
<b>Glossar/Links zum Strahlenschutz</b>	<b>67</b>

**D**ie GSF hat die Aufgabe, die komplexen Einflüsse der Umwelt auf die Gesundheit der Menschen in vielfältigen interdisziplinären Ansätzen zu analysieren. Für die Thematik der umweltbedingten Erkrankungen spielt Strahlung als potentiell schädlicher Faktor eine sehr große Rolle. Menschen sind Strahlung aus unterschiedlichsten Quellen ausgesetzt. Offensichtlich ist der Einfluss des Sonnenlichtes mit begrenzten Anteilen an UV-Strahlung auf das Wohlbefinden von Mensch und Natur, weniger offensichtlich ist der Einfluss der ionisierenden Strahlung aus anderen natürlichen Quellen. Hier handelt es sich vor allem um die kosmische Strahlung, die die Erdoberfläche erreicht, die Strahlung natürlich radioaktiver Substanzen im Erdboden und Gestein sowie deren Aufnahme mit der Nahrung und Atemluft. Ein wesentlicher Anteil der natürlichen Strahlenexposition ist zivilisationsbedingt, nämlich durch das Wohnen in Häusern: Die Anreicherung des natürlich radioaktiven Edelgases Radon in Gebäuden und die Einatmung seiner kurzlebigen Zerfallsprodukte macht etwa die Hälfte der gesamten durchschnittlichen natürlichen Strahlendosis aus.

Ionisierende Strahlen werden seit mehr als hundert Jahren auch in der Medizin eingesetzt, insbesondere in der Röntgendiagnostik, Nuklearmedizin und Strahlentherapie. Seit ihrer Entdeckung in den Jahren 1895 und 1896 durch Wilhelm Conrad Röntgen und Henri Becquerel hat man ionisierende Strahlung in der Medizin, Materialprüfung, Materialbearbeitung, Energieerzeugung, Pflanzenzüchtung und Forschung auf vielfältige Art genutzt. Bei hohen Dosen kann ionisierende Strah-

lung negative Effekte auf die Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen hervorrufen. Daher ist es notwendig, den Menschen und seine Umwelt vor derartigen Risiken natürlicher, medizinischer und industrieller Strahlenquellen zu schützen. Dies ist in erster Linie Aufgabe des Gesetzgebers und der Politik. Aufgabe der Strahlenforschung ist es, das Wissen und die Methoden zur Verfügung zu stellen, die einen effektiven Schutz möglich machen. Als Mitglieder der deutschen Strahlenschutzkommission sowie europäischer und internationaler Organisationen bringen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der GSF ihren Sachverstand in die wichtigen Beratungsgremien auf diesem Gebiet der Gesundheitsvorsorge ein. Forschungsergebnisse der GSF waren und sind wichtige Grundlagen für nationale und internationale Strahlenschutzkonzepte und Vorsorgegrenzwerte.

Die GSF hat eine jahrzehntelange Tradition als die renommierteste Einrichtung für Strahlenforschung in Deutschland. Derzeitige Projekte befassen sich mit Verbesserungen der Strahlenmesstechnik, Dosimetrie, Radioökologie, Quantifizierung und Bewertung von Strahlenrisiken, Strahlenepidemiologie, Strahlenschutzmedizin und Radiologie. Weitere Schwerpunkte sind Beiträge zur Mammographie-Diskussion und Radon-Problematik bis hin zu neuen Konzepten für Strahlentherapie auf der Basis medizinischer Strahlenphysik. Die umfassenden Kompetenzen, die in Bereichen der molekularen und zellulären Strahlenbiologie vorhanden sind, sollen in naher Zukunft durch die Weiterführung und Neuausrichtung des Instituts für Strahlenbiologie verstärkt werden.

Strahlung hat immer eine wichtige Rolle für die Analyse der Struktur und Funktion des Genoms gespielt. Zahlreiche Typen von DNA-Schäden sind bekannt und quantifizierbar, und sie werden, wie auch strukturelle Veränderungen von Chromosomen, für molekulare und biologische Dosimetrie und Risikomodellierung verwendet. Die Auf-

klärung der Vielzahl von DNA-Reparaturprozessen, die wie Zellzyklus-Arrest und Apoptose (programmierter Zelltod) komplexe zelluläre Antworten auf genotoxische Schädigung darstellen, sind ein wichtiges Thema moderner strahlenbiologischer Forschung. Deren Ergebnisse dienen ebenfalls dem besseren Verständnis von Immunabwehr, von Alterungsprozessen sowie zahlreichen Erkrankungen des Menschen, wie zum Beispiel Kanzerogenese und Autoimmunerkrankungen.

In Verbindung mit modernen Techniken der Molekularbiologie und Mikroskopie, den vielfältigen Screeningverfahren der Genom- und Proteomforschung, sowie bildanalytischen Verfahren wird Strahlung weiterhin als elegantes Werkzeug genutzt werden, um Struktur und Funktion von Zellen und Geweben zu analysieren. Wegen ihrer exzellenten mikroskopischen Dosimetrie längs der Spuren der dadurch erzeugten Sekundärteilchen – Elektronen, Protonen, Alphateilchen, etc. – ist Strahlung ein sehr gutes „Modellagens“ für die Erzeugung von oxidativem Stress, der auch durch viele chemische Substanzen, Nanopartikel und endogene Prozesse wie zum Beispiel Entzündungen ausgelöst wird und als Ursache vieler Erkrankungen gilt. Im Rahmen eines systembiologischen Ansatzes können die komplexen Antworten von Zellen auf oxidativen Stress nach Bestrahlungen mit unterschiedlichen Dosen, Dosisraten und Strahlenqualitäten in ihren Vernetzungen im Gewebe genetisch, biochemisch und funktionell sehr gut analysiert werden.

Die Ergebnisse der molekularen, zellulären und organismischen strahlenbiologischen Forschung sollen in Kooperationen mit Universitäts-Kliniken für eine Verbesserung strahlendiagnostischer und -therapeutischer Verfahren dienen. Für die Übertragbarkeit der Ergebnisse haben die an der GSF etablierten Mausmodelle eine große Bedeutung. Mausmodelle werden ebenfalls genutzt, um Gene zu identifizieren, die organspezifisch bei

der Entwicklung (Initiation und Progression) strahleninduzierter Tumore durch unterschiedliche Strahlungsarten eine Rolle spielen. Die Erkennung möglicher individueller Unterschiede in der Strahlenempfindlichkeit anhand molekularer und zellulärer Marker und deren Validierung durch epidemiologische Verfahren wird einer Optimierung der Tumorthherapie durch Strahlung dienen. Ziel ist es, die molekularen, zellulären und organismischen Prozesse, die bei niedrigen Strahldosen in Gang gesetzt werden und die unterschiedlichsten gesundheitlichen Konsequenzen haben können, aufzuklären. Wenn dies gelingt, ergibt sich erstmals die Möglichkeit, quantitative Modelle des Strahlenrisikos für den Bereich niedriger Dosen und Dosisraten zu entwickeln, die nicht auf Extrapolation aus dem Bereich hoher Dosen beruhen. Bekannt ist bereits heute, dass derartige Extrapolationen mechanistisch nicht begründet sind.

Die Aktivitäten in der Strahlenforschung an der GSF sollen einen wichtigen Beitrag zu dem geplanten „Münchener Zentrum für Strahlenforschung“ leisten. Zu den besonderen Attraktionen im Münchener Raum zählt auch der Ionen-Mikrostrahl am Maier-Leibnitz-Beschleuniger der beiden Münchener Universitäten, der hinsichtlich Ionenspektrum, Ionenenergien und Strahlauflösung weltweit an vorderster Front steht. Mit dieser Bestrahlungseinrichtung können mit einzelnen Ionen gezielt subzelluläre Regionen (wie zum Beispiel der Zellkern), Einzelzellen oder Gewebemodelle bestrahlt werden. Dies ermöglicht neuartige Experimente in der Grundlagenfor-

schung, zum Beispiel zur Aufklärung von intra- und interzellulären Signalprozessen nach Bestrahlung mit einzelnen geladenen Teilchen mit oder ohne niedrige Photonen-Dosen, zur vierdimensionalen Analyse von Reparaturprozessen und zur Beobachtung von strahleninduzierten Chromatinveränderungen. Zudem bilden die mit dieser Anlage erarbeiteten strahlenbiologischen Ergebnisse neue Grundlagen bei der Entwicklung neuer Strahlentherapiekonzepte.

Gerade im Bereich der Strahlenforschung und des Strahlenschutzes nimmt die GSF die Informationspflicht gegenüber dem Bürger sehr ernst und dies seit langer Zeit. Mit dieser Ausgabe von mensch+umwelt spezial wenden wir uns an die interessierte Öffentlichkeit, die sich über grundlegende Fragen der Wirkungen und Risiken ionisierender Strahlung informieren möchte. Die Autoren dieses Heftes erläutern, welchen wichtigen Quellen ionisierender Strahlung wir ausgesetzt sind. Sie stellen dar, auf welchen Daten und Annahmen die Konzepte zur Dosis- und Risikobestimmung basieren. Zwanzig Jahre nach dem Reaktorunglück in Tschernobyl ziehen sie eine vorsichtige Bilanz der Ereignisse und der sich daraus ergebenden neuen Erkenntnisse für den Strahlenschutz. Auch neue Ergebnisse zur Epidemiologie natürlicher Strahlung werden dargestellt und ein Überblick über die Anwendung von Strahlung in der modernen medizinischen Diagnostik gegeben. Die vielfältigen Arbeiten im Bereich der molekularen und zellulären Strahlenbiologie werden in einem gesonderten Heft vorgestellt.

Das Magazin mensch+umwelt spezial ist eines der zahlreichen Angebote der GSF, um die Kommunikation zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit zu verbessern und – dies gilt insbesondere für diese Ausgabe – eine wissenschaftlich fundierte und wertfreie Basis für die Diskussion über ein wichtiges öffentliches und politisches Thema zur Verfügung zu stellen.

Neben den Autoren gilt mein besonderer Dank den Mitgliedern des Redaktionsbeirats, ohne deren Einsatz das Heft so nicht hätte erscheinen können.

*Prof. Dr. Günther Wess*  
*Wissenschaftlicher Geschäftsführer*



Foto: Michael van den Heuvel

**Strahlenquelle Atomkern**

# Ionisierende Strahlung

**Michael van den Heuvel**

Atome sind oftmals nicht stabil, sondern zerfallen spontan unter Aussendung ionisierender Strahlung. Vor über 100 Jahren begann – ausgehend von eher zufälligen Beobachtungen – die detaillierte wissenschaftliche Untersuchung dieser Phänomene. Sie führte zu einem tieferen Verständnis des Aufbaus der Materie und lieferte neue Impulse für Medizin und Energiewirtschaft.

**F**ür bestimmte Arten elektromagnetischer Strahlung besitzt der Mensch hoch entwickelte Sinnesorgane und er kann sie, wie im Falle von Licht- und Wärmestrahlung, in bestimmtem Umfang direkt wahrnehmen. Ionisierende Strahlung ist jedoch ohne technische Hilfsmittel nicht wahrnehmbar. So verwundert es nicht, dass das Phänomen der Radioaktivität erst verhältnismäßig spät entdeckt wurde.

1896 stellte der französische Physiker Antoine Henri Becquerel (1852 – 1908) bei Untersuchungen von Fluoreszenzphänomenen fest, dass Uranminerale eine Strahlung aussenden, die fotografische Platten trotz lichtdichter Verpackung schwärzt. Schon ein Jahr zuvor, 1895, hatte Wilhelm Conrad Röntgen (1845 – 1923) eine Strahlung mit ähnlichen Eigenschaften beob-



**Die Pechblende, auch Uranit oder Uranpecherz genannt, ist eines der wichtigsten natürlichen Uranerze. 1898 isolierten Pierre und Marie Curie daraus erstmals Radium und Polonium.**

Foto: Michael van den Heuvel

achtet, die in einer evakuierten Glasröhre beim Aufprall beschleunigter Elektronen auf eine Kupferanode entsteht. Diese so genannten X-Strahlen konnten ebenfalls Materie durchdringen und fanden als „Röntgenstrahlen“ rasch Einzug in die medizinische Diagnostik und später auch in die Strahlentherapie.

Das Zeitalter der Kernphysik und Kernchemie hatte begonnen. 1898 entdeckte das Ehepaar Marie und Pierre Curie die radioaktiven Elemente Polonium und Radium. Als Quelle verwendeten die Wissenschaftler das Mineral Pechblende, von dem nahezu zwei Tonnen chemisch aufgearbeitet werden muss-

ten, um die Salze dieser Elemente im Milligramm-Maßstab zu gewinnen.

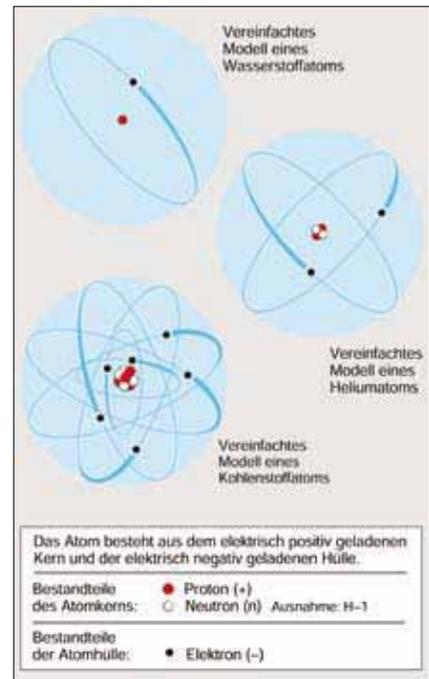
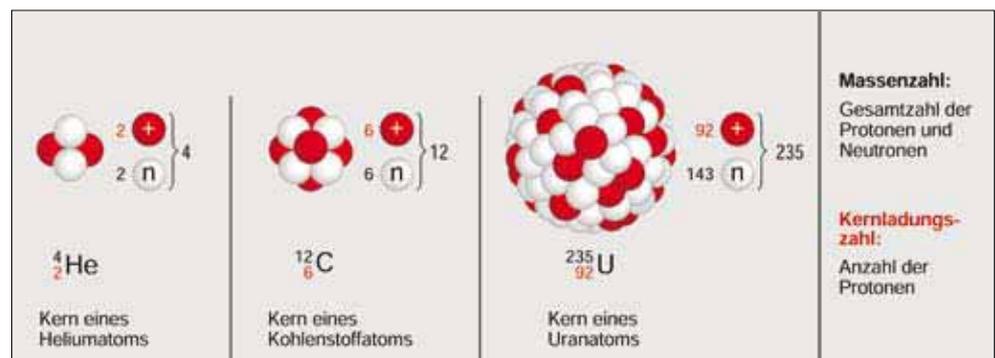
Die Strahlenarten, die von radioaktiven Stoffen emittiert werden, nennt man  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen. Röntgenstrahlen sind im Prinzip das Gleiche wie  $\gamma$ -Strahlen. Eine weitere Art ionisierender Strahlen wurde 1932 von James Chadwick entdeckt: die Neutronen.

## Der Bau der Materie

Atome sind, anders als man früher annahm und der Name vermuten lässt (griech. *atomos*: unteilbar), keine unteilbare Einheit. Nach dem Bohr'schen Atommodell besteht ein Atom aus einem aus Protonen und Neutronen aufgebauten Atomkern und einer Elektronenhülle, in der sich die Elektronen auf Bahnen um den Kern bewegen. Ein Atom ist nach außen hin elektrisch neutral, das heißt die Zahl der positiv geladenen Protonen im Kern entspricht der Zahl der negativ geladenen Elektronen in der Hülle. Kerne, die bei gleicher Protonenzahl eine unterschiedliche Zahl an Neutronen aufweisen, bezeichnet man als Isotope, da sie im Periodensystem der Elemente an der gleichen Position zu finden sind (griech. *isos*: gleich, *topos*: Platz). Von den leichten Elementen existieren oftmals radioaktive und stabile (nicht radioaktive), Isotope. Bei den sehr schweren Elementen sind jedoch alle Isotope instabil.

Chemische Reaktionen sind Reaktionen der Elektronenhülle. Die Vorgänge, die zur Radioaktivität führen, spielen sich dagegen im

**Aufbau eines Atomkerns: Protonen und Neutronen machen nahezu die gesamte Masse eines Atoms aus.**



**Das Bohr'sche Atommodell: Elektronen bewegen sich auf Bahnen um den aus Protonen und Neutronen bestehenden Atomkern.**

Atomkern ab: Instabile Atomkerne zerfallen unter Aussendung von Strahlung und bilden so genannte Tochternuklide. Als Halbwertszeit eines radioaktiven Isotops bezeichnet man den Zeitraum, nach dem die Hälfte der Atomkerne zerfallen ist. Sie variiert je nach Element von Bruchteilen einer Sekunde (zum Beispiel Polonium-212: 0,0000003 Sekunden) bis zu einigen Milliarden Jahren (zum Beispiel Thorium-232: 14 Milliarden Jahre). Nach zehn Halbwertszeiten sind 99,9 Prozent eines radioaktiven Isotops zerfallen. Allerdings können die durch den Zerfall entstandenen Tochternuklide ebenfalls wieder radioaktiv sein und



gang mit  $\beta$ -Strahlern eine viel sorgfältigere Abschirmung gegen äußere Bestrahlung notwendig.

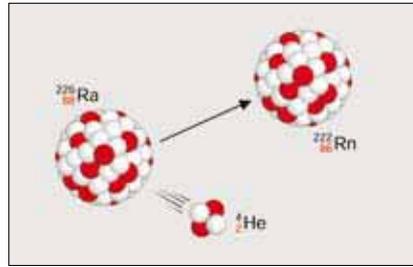
$\gamma$ -Strahlung besteht aus Energiequanten und wird daher im Magnetfeld nicht abgelenkt. Sie entsteht, wenn ein angeregter Atomkern in einen Zustand tieferer Energie übergeht. Bei der Wechselwirkung von  $\gamma$ -Strahlung mit Materie finden lockere Ionisationen statt.

Das Spektrum an elektromagnetischer Strahlung, die uns natürlicherweise umgibt, ist sehr groß. Die Energie einer Strahlungsart kann aus ihrer Frequenz abgeleitet werden: Je höher die Frequenz beziehungsweise je kleiner die Wellenlänge ist, desto größer ist die Energie der Strahlungsart.

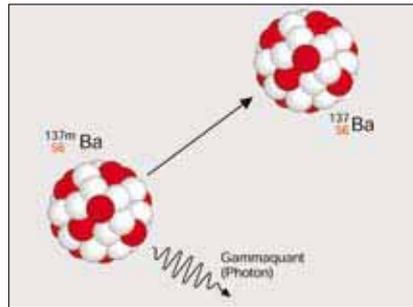
## Die Messung ionisierender Strahlung

Ionisierende Strahlung erzeugt in Materie, die sie durchdringt, Ladungen, macht sie also leitend für elektrischen Strom. Viele Nachweismethoden für ionisierende Strahlung basieren auf dieser Eigenschaft.

Dieses Grundprinzip wird z.B. beim Geiger-Müller-Zählrohr verwendet. Bei der Messung gelangt durch ein Eintrittsfenster aus Glimmer oder aus einer Metallfolie Strahlung in das Innere des Zählrohrs. Stößt ein Teilchen mit einem Atom der Argon-Gasfüllung zusammen, entstehen Ionen. Im Inneren des Zählrohrs befindet sich ein Draht, an dem eine hohe positive Spannung anliegt. Diese bewirkt eine starke Beschleunigung und ein lawinenartiges Anwachsen der Ladungsträger. Die gesamte Ladung der Lawine kann am Zählrohr als elektrischer Impuls abgenommen werden. Dem Zählgas beigefügter Alkoholdampf „löscht“ die Ionenlawine wieder, damit das Zählrohr nach einer gewissen Totzeit wieder für eine neue Messung bereit steht. Die Messmethode ist sehr empfindlich. Da jedoch jede Art von ionisierender Strahlung eine gleichartige Lawine auslöst, kann hiermit zwischen den Strahlungsarten und -energien nicht unterschieden werden. Anders ist das beim Pro-

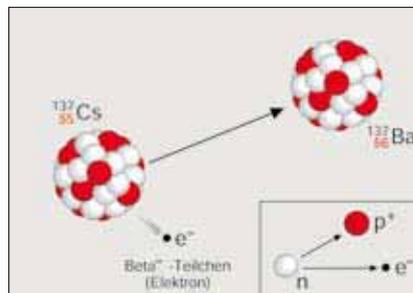


**Beim  $\alpha$ -Zerfall spaltet ein instabiles Isotop (links) einen Heliumkern (Mitte) ab. Das entstehende Isotop weist zwei Protonen und zwei Neutronen weniger im Kern auf.**



**Ein angeregter, metastabiler Kern (links) gibt Energie in Form von  $\gamma$ -Strahlung ab. Die Zahl der Protonen und Neutronen bleibt dabei konstant.**

Grafiken: Informationskreis Kernenergie



**Beim  $\beta$ -Zerfall spaltet ein instabiles Isotop (links) ein Elektron ab, das im Kern entstanden ist: Ein Neutron wandelte sich in ein Proton und ein Elektron um. Das gebildete Tochter-nuklid (rechts) hat bei annähernd gleicher Masse ein Proton mehr und ein Neutron weniger als das Mutter-nuklid.**

portionalzähler: Hier wird die Spannung zwischen Zählrohr und Wandung gerade so niedrig gewählt, dass zwar eine Ladungsverstärkung eintritt, aber keine Lawine ausgelöst wird. Die Höhe eines Impulses ist dann proportional zur Energie der einfallenden Teilchen. Ein drittes Messprinzip, das auf der Ionisation

beruht, wird in der Ionisationskammer realisiert. Hier wird keine Ionenlawine ausgelöst sondern nur die Primärionisation registriert. Die Ionisationskammer wird heute vor allem eingesetzt zur Messung sehr intensiver Strahlungsbündel, beispielsweise in der Strahlentherapie.

Moderne Halbleiterdetektoren arbeiten ähnlich wie Gas-Ionisationskammern: Die vom Gammaquant im Halbleiterkristall erzeugten Sekundärteilchen setzen dort eine zu ihrer Energie proportionale Zahl von Ladungsträgerpaaren frei. Die Höhe des entsprechend verstärkten Ladungsimpulses ist also ein Maß für die ursprüngliche Energie des Gammaquants.

Da nahezu jedes radioaktive Isotop Gammastrahlung mit einem charakteristischen Linienspektrum aussendet, kann durch die Aufnahme eines Gamma-Energie-Spektrums auf das ursprüngliche radioaktive Isotop geschlossen werden.

## Kondensstreifen in der Nebelkammer

Bereits 1912 gelang es Charles Wilson (1869 – 1959), ionisierende Strahlung in einer Nebelkammer indirekt sichtbar zu machen. Das Prinzip kann mit der Entstehung von Kondensstreifen durch Düsentriebwerke verglichen werden: Ausgelöst durch Ionen kondensiert übersättigter Wasserdampf und zeichnet die Bahn des Teilchens nach. Im Labor erzeugt man durch ein Temperaturgefälle einen übersättigten Alkohol-Wasser-Dampf. Strahlen ionisieren den Dampf entlang ihres Weges; die Flugbahn wird als weißer Kondensstreifen sichtbar. Die entstandenen Ionen müssen ständig durch eine negative Hochspannungselektrode entfernt werden, um eine Kondensation des gesamten Kammerinhalts zu verhindern.

Schon früh wurde bei Nebelkammer-Experimenten beobachtet, dass manche Strahlungsarten im Magnetfeld abgelenkt werden, andere jedoch nicht. Aus der Stärke und Richtung dieser Ablenkung

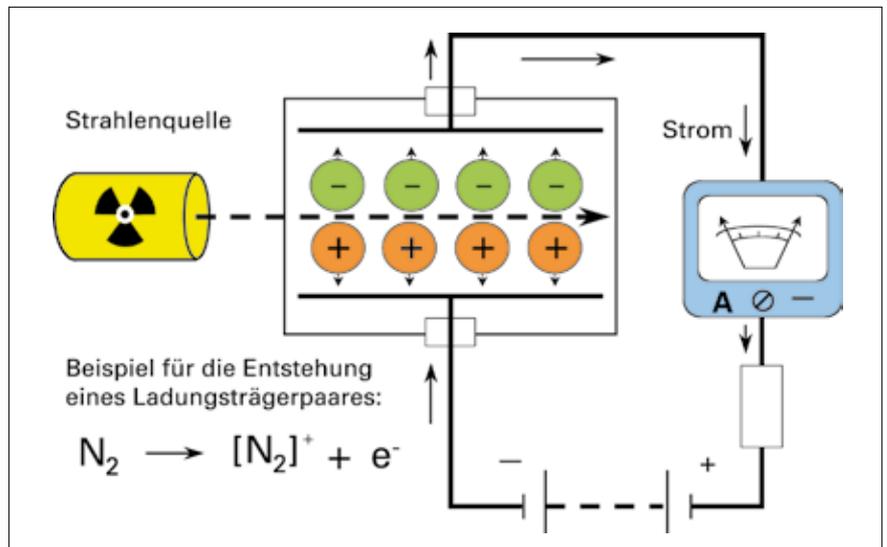
# Ionisierende Strahlung

konnten bereits erste Rückschlüsse auf das Verhältnis von Masse zu Ladung und auf das Vorzeichen der Ladung gezogen werden.

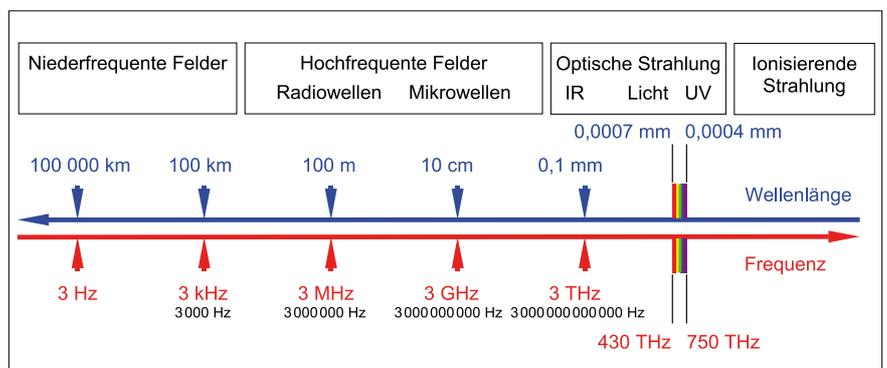
## Verräterisches Leuchten

Ionisierende Strahlung kann auch durch bestimmte Leuchtstoffe nachgewiesen werden. Diese Erkenntnis nutzte man schon früh im so genannten Spintariskop, einem Gerät, das aus einer lichtdichten Röhre besteht, die an einem Ende mit der Sidot'schen Blende – einem mit Kupfer oder Silber dotierten Zinksulfid – beschichtet ist. Mit einer Vergrößerungslinse blickt man auf diesen Leuchtschirm. Ein  $\alpha$ -Teilchen, das auf die Sidot'sche Blende trifft, erzeugt einen einzelnen Lichtblitz, da seine Energie beim Zusammenprall mit dem Luminophor teilweise in Licht umgewandelt wird. Dieses Prinzip wurde bei Röntgenschirmen, die seit den Anfängen der Röntgentechnik Patientenuntersuchungen ermöglichen, technisch umgesetzt.

Der Nachweis ionisierender Strahlung über Lichtquanten wurde mit dem Szintillationszähler weiter optimiert: Dieser wird im Labor zur Bestimmung der Energie oder der Anzahl der emittierten Quanten oder Teilchen verwendet. Die Auszählung der Lichtblitze erfolgt elektronisch: An den Leuchtstoff, der meist aus organischen Molekülen besteht, wird über einen Lichtleiter ein Sekundärelektronenvervielfacher als Verstärker angeschlossen. Durch die Analyse der Impulse kann dann auf die Energie der Strahlung und auf die Substanz selbst geschlossen werden. Dieses Verfahren wurde auch zur Analyse radioaktiver Kontaminationen in Lebensmitteln und Bodenproben



Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Ionisationskammer.



Das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung reicht von den langwelligeren energiearmen Radiowellen über das sichtbare Licht und die UV-Strahlung bis hin zu den kurzwelligen energiereichen Röntgen- und  $\gamma$ -Strahlen.

Grafiken: Bundesamt für Strahlenschutz

nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl eingesetzt.

gebildet als verbraucht werden oder entweichen; es entsteht eine Kettenreaktion.

## Energie aus dem Atomkern

Große Atomkerne können durch den Beschuss mit Neutronen in mehrere Bruchstücke gespalten werden. 1938 beobachteten Otto Hahn und Fritz Strassmann, dass Uran-235 durch thermische Neutronen in zwei Bruchstücke, zum Beispiel in Barium und Krypton, gespalten wird. Solche Bruchstücke bilden die radioaktiven Spaltprodukte. Pro eingesetztem Neutron werden in der Regel zwei bis drei weitere Neutronen frei, die wiederum Kerne spalten können. Liegt eine entsprechend große „kritische“ Masse spaltbaren Materials vor, werden mehr Neutronen durch Spaltung

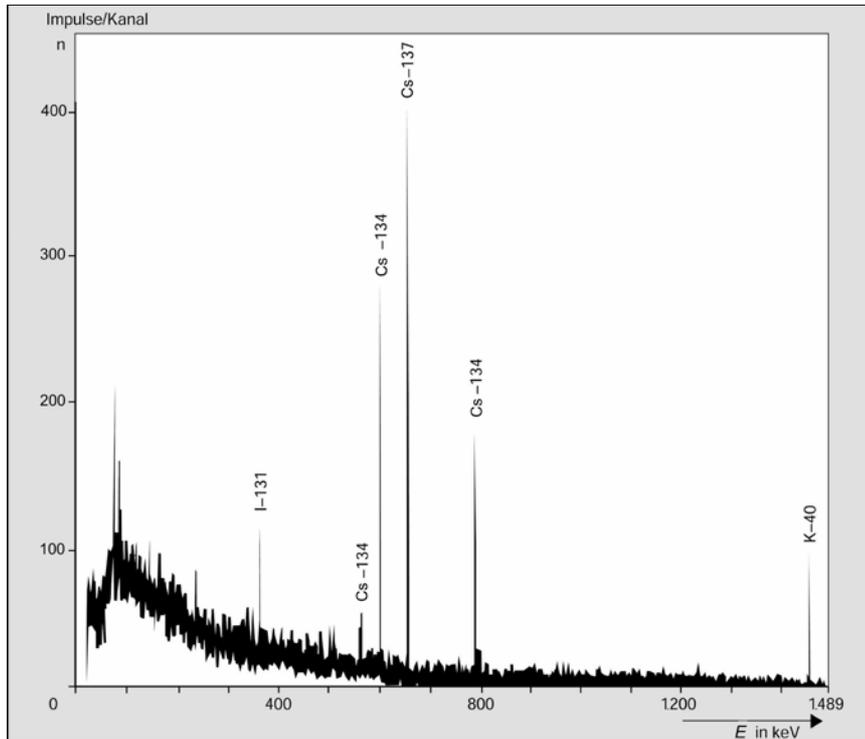


Der Strahlung auf der Spur: In der Nebelkammer können energiereiche  $\alpha$ - und  $\beta$ -Teilchen anhand der Kondensation eines übersättigten Ethanol-Wasserdampfes indirekt sichtbar gemacht werden.

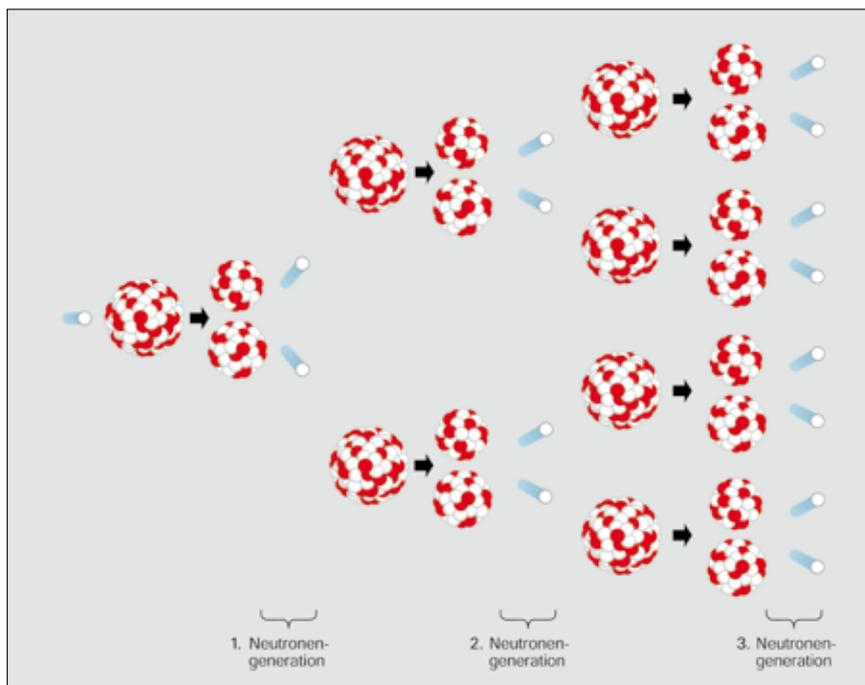
Foto: Michael van den Heuvel

In Kernkraftwerken wird mit Hilfe von Regelstäben aus Cadmium oder Bor die Kernspaltung so gesteuert, dass es weder zu einer unkontrollierbaren Kettenreaktion kommt, noch der Neutronenfluss versiegt. Eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion benötigt auch einen Moderator, etwa Wasser, der die Energie der Neutronen so weit ver-

ringert, bis diese als thermische Neutronen von Uran-235-Kernen „eingefangen“ werden können und damit zu einer weiteren Kernspaltung führen. Ein Teil der bei der Spaltung frei werdenden Bindungsenergie wird direkt in Wärme und dann – über Wärmetauscher und Turbinen – in elektrischen Strom umgewandelt.



**Fingerabdrücke der Isotope: Ein Gammaenergie-Spektrum verrät, welche Nuklide in einer Probe enthalten sind. Radioaktive Kontaminationen in Nahrungsmitteln können so nachgewiesen werden.**



Bereits 1942 arbeitete in Chicago, USA, der erste Versuchsreaktor auf Basis einer gesteuerten Kettenreaktion, 1956 entstand in Calder Hall, Großbritannien, das erste kommerzielle Kernkraftwerk zur Erzeugung elektrischer Energie.

Das Prinzip der Kernspaltung wurde jedoch nicht vom Menschen „erfunden“. Bei der Untersuchung einer Uran-Lagerstätte in Gabun, Westafrika, wurde ein untypisches Verhältnis von Uran-235 zu Uran-238 entdeckt. Das Verhältnis ist sonst weltweit bei allen Uran-Lagerstätten gleich. Zusammen mit dem Isotopenverhältnis des im Gestein eingeschlossenen Edelgases Xenon legt dies den Schluss nahe, dass hier über mehrere hunderttausend Jahre eine natürliche Kettenreaktion aktiv gewesen sein könnte. Als Moderator diente wahrscheinlich das in den Fels diffundierende Regenwasser; Lithium-, Bor- und Cadmium-Verbindungen im Erz fungierten als Absorber.

## Radioaktive Belastung

Radioaktivität ist in unserer natürlichen Umgebung allgegenwärtig. Der Dosismittelwert wird auf zwei bis drei Milli-Sievert pro Jahr geschätzt, wobei dieser Wert stark von der geologischen Beschaffenheit des Untergrunds und von der Höhe eines Gebiets abhängt.

Im Erdboden ist immer mehr oder weniger Uran enthalten, das über mehrere Zwischenschritte zu dem radioaktiven Edelgas Radon-222 mit einer Halbwertszeit von 3,825 Tagen zerfällt. Dieses Radionuklid gelangt durch Mauerspalt und Ritzen in die Wohnräume und wird dort eingeatmet. Als  $\alpha$ -Strahler schädigen Radon und mehr noch seine kurzlebigen radioaktiven Zerfallsprodukte die Zellen des Lungengewebes.

**Kernspaltung nach dem Schneeballsystem: Bei einer Kettenreaktion wird ein Atomkern durch Neutronen in mehrere Bruchstücke gespalten. Die dabei freiwerdenden Neutronen spalten mehrere Atomkerne.**

Grafiken:

Informationskreis Kernenergie

# Ionisierende Strahlung

Eine weitere Quelle natürlicher Radioaktivität ist die kosmische Strahlung, oft auch als Höhenstrahlung bezeichnet. Sie entsteht durch energiereiche Teilchenstrahlung aus unserer Galaxis beziehungsweise fernen Galaxien. Diese Primärteilchen stoßen mit Atomkernen der Erdatmosphäre zusammen, es entstehen kurzlebige Fragmente als Sekundärstrahler. Da die Bestandteile der Lufthülle die Primär- und Sekundärstrahlung teilweise absorbieren, variiert die Belastung durch Höhenstrahlung stark mit der Höhe eines Ortes: Auf Meeresebene misst man pro Jahr etwa 0,3 mSv, in 720 Metern Höhe (zum Beispiel in Garmisch-Partenkirchen) etwa 0,5 mSv und in 3 000 Metern Höhe (zum Beispiel auf der Zugspitze) zirka 1,0 mSv. In zehn Kilometern Höhe über München beträgt der Wert derzeit etwa 38 mSv pro Jahr, daher sind Vielflieger und Kabinenbesetzungen einer erhöhten Strahlenexposition ausgesetzt. Diese Werte bedeuten jedoch, dass man sich ein Jahr lang in der angegebenen Höhe aufhalten müsste, um dieser Dosis ausgesetzt zu sein, was bei Flugreisen natürlich nicht der Fall ist. Speziell für das Personal von Fluggesellschaften wurde am GSF-Institut für Strahlenschutz das Programm EPCARD (European Program Package for the Calculation of Aviation Route Doses) entwickelt, das eine genaue Berechnung der Strahlenexposition bei Langstreckenflügen ermöglicht.

Durch natürlich radioaktive Stoffe im Körper, vor allem das Isotop Kalium-40, steigt die mittlere jährliche Exposition der Bevölkerung um weitere 0,3 mSv. Nach Ende des Zweiten Weltkriegs kam noch die Belastung durch Atombombentests hinzu, größere Mengen an Radioaktivität wurden zudem beim Reak-

torunfall in Tschernobyl/Ukraine im April 1986 frei gesetzt. Die daraus resultierende Strahlenexposition macht allerdings nur einen Bruchteil der gesamten Strahlenexposition aus.

Nicht zu vernachlässigen ist der Anteil der Strahlenexposition durch medizinische Diagnostik und Therapie. Sie macht durchschnittlich etwa 2,0 mSv pro Jahr aus. Je nach gesundheitlicher Situation des Einzelnen kann dieser Wert jedoch stark variieren.

## Ionisierende Strahlung – gefährlich ...

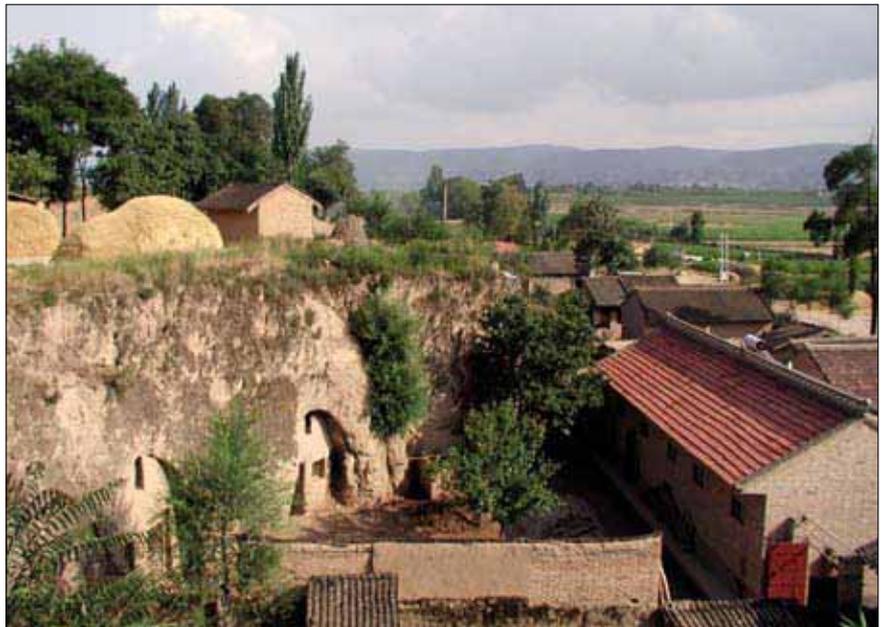
Bei Strahlenschäden unterscheidet man prinzipiell zwischen akuten Schäden, die durch hohe Dosen, und Spätschäden, die auch durch kleine Dosen entstehen: Akute Fröhschäden manifestieren sich innerhalb von Stunden oder Tagen, bei Spätschäden hingegen wird die genetische Ausstattung eines Organismus verändert, so dass sich – nach Monaten oder Jahren – Tumoren bilden können. Strahleninduzierte Gendefekte (Mutationen) können aber auch erst bei nach-

folgenden Generationen zum Tragen kommen.

Bei der Entstehung von Strahlenschäden spielen sich eine Vielzahl an Reaktionen auf zellulärer Ebene ab. In der physikalischen Phase entstehen zunächst Ionen und Radikale, die dann in der chemischen Phase mit den Molekülen des Zytosols reagieren. Als ein mögliches Reaktionsprodukt bildet sich unter anderem Wasserstoffperoxid, ein potentes Zellgift. In der biologischen Phase greifen solche reaktionsfreudigen Agenzien die funktionellen Bestandteile der Zelle an: Eine Reaktion mit der DNA verursacht Schäden am genetischen Material, Proteine verlieren durch Denaturierung ihre Funktionalität, Membran-Bestandteile werden zerstört.

Ein Organismus kann solchermaßen geschädigte Zellen erkennen und in einem gewissen Umfang auch reparieren. Ist die Schädigung jedoch zu groß, werden die Zellen durch ein zelleigenes Selbstmord-Programm, den programmierten Zelltod oder die Apoptose, eliminiert.

Zellen, die weder repariert noch eliminiert werden, können im ungünstigsten Fall in den Prozess der



**Naturnahes Wohnen ist nicht immer gesund: In den Höhlenwohnungen der zentralchinesischen Region Gansu werden aufgrund des Gesteinsmaterials und der fehlenden Lüftungsmöglichkeiten hohe Konzentrationen verschiedener Radon-Isotope gemessen. Lungenkrebserkrankungen treten hier deutlich häufiger auf.**

Foto: Jochen Tschiersch

Kanzerogenese eintreten. Durch Promotoren, etwa Umweltgifte, kommt es schließlich zum unkontrollierten Zellwachstum, und es bildet sich ein Tumor.

Vor allem Organe mit raschem Zellwachstum, etwa die Haut, das Blut bildende System oder die Zellen eines Embryos, sind sehr

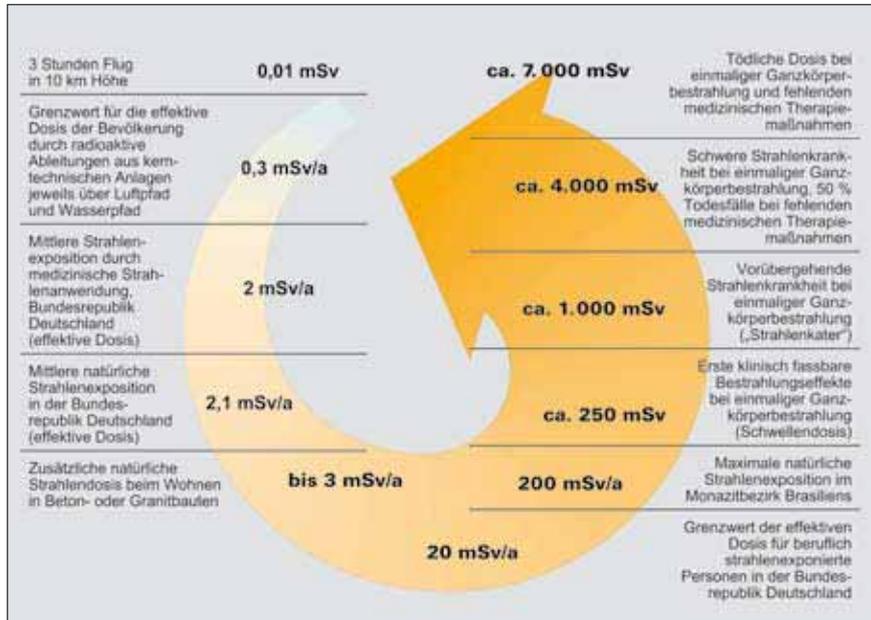
Radionuklide in unlöslicher, immobilisierter Form als Nadeln oder Kugeln direkt in den Tumor eingebracht, um diesen von innen zu „zerstrahlen“.

Zur Darstellung von Organen oder Tumoren im menschlichen Körper kann die Szintigraphie eingesetzt werden: Bestimmte Isotope,

So können beispielsweise versteckte Tumoren beziehungsweise Metastasen geortet oder stoffwechselaktive Knoten in der Schilddrüse sichtbar gemacht werden. Mit den verschiedenen Tomographie-techniken sind sogar Schichtaufnahmen eines bestimmten Organs möglich.

Zu therapeutischen Zwecken bringen Strahlenmediziner genau definierte Aktivitäten eines Radionuklids in den Körper ein. Stoffwechselaktive „heiße“ Knoten der Schilddrüse werden durch oral appliziertes Iod-131 „zerstrahlt“. Tumoren hingegen können mit hohen Dosen an Röntgen- oder  $\gamma$ -Strahlung oder auch geladenen, hoch energetischen Teilchen wie Protonen behandelt werden.

In allen Fällen muss durch entsprechende Voruntersuchungen die benötigte Strahlungs-dosis genau ermittelt werden, damit gewährleistet ist, dass einerseits die Dosis zur Zerstörung des kranken Gewebes ausreicht, andererseits aber gesundes Gewebe möglichst geschont wird.



### Gesundheitliche Relevanz von Strahlenexpositionen.

Grafik: Informationskreis Kernenergie

empfindlich gegenüber einer Strahlenbelastung. Auf hohe Strahlendosen reagiert die Haut mit Geschwüren, Schleimhäute stellen die Zellerneuerung ein und das Knochenmark vermindert die Produktion von Erythrozyten, Leukozyten und Thrombozyten, was eine schlechtere Versorgung mit Sauerstoff beziehungsweise eine Schwächung der Immunabwehr nach sich zieht. Bei sehr hohen Strahlendosen führen diese Schäden unbehandelt zum Tod.

### ... aber auch heilsam

Radioaktive Isotope werden in der Medizin innerlich und äußerlich als Strahlenquellen für diagnostische und therapeutische Zwecke eingesetzt. So behandelte man bereits seit der Entdeckung der Radioaktivität Krebserkrankungen durch Bestrahlung mit Röntgen- oder  $\gamma$ -Strahlung. In der interstitiellen Krebstherapie wurden außerdem

etwa Iod-131 ( $t_{1/2} = 13,3$  Stunden) oder Technetium-99m ( $t_{1/2} = 6$  Stunden; m steht für metastabil) reichern sich nach oraler oder intravenöser Verabreichung in verschiedenen Gewebetypen an. Ein Szintillationszähler, der sich zeilenweise über den Körper bewegt, misst die Strahlung in einzelnen Körperre-



**High Tech im Dienste der Gesundheit: Moderne Computertomographen liefern detailgetreue Bilder vom Körperinneren – und das bei kurzen Messzeiten und geringer Strahlendosis.**

Foto: AOK

### Internet:

Auswertungsstelle für Dosimeter am GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit; Bezug von Radon-Dosimetern <http://awst.gsf.de/>

Bundesamt für Strahlenschutz <http://www.bfs.de/>

Deutsches Röntgen-Museum in Remscheid: <http://www.roentgen-museum.de/>

EPCARD: Überwachung der Strahlenexposition von fliegendem Personal und Information für Fluggäste <http://www.gsf.de/epcard>

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) <http://www.grs.de/>

GSF-Institut für Strahlenschutz <http://www.gsf.de/iss>

Kernenergie online <http://www.kernenergie-online.de/>

Kerntechnische Gesellschaft <http://www.kernenergie.de/>

Kernkraftwerke in Deutschland [http://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_Kernkraftwerke\\_in\\_Deutschland](http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Kernkraftwerke_in_Deutschland)

Patienteninformationen über die Gefahren von Röntgenstrahlung [http://www.meb.uni-bonn.de/radiologie/Patienteninformation/Roentgen\\_Gefahr.html](http://www.meb.uni-bonn.de/radiologie/Patienteninformation/Roentgen_Gefahr.html)

# Ionisierende Strahlung

## Höhenstrahlung: die Exposition beim Fliegen

Hans Schraube

Die galaktische kosmische Strahlung stammt aus den Tiefen des Weltalls weit außerhalb unseres Sonnensystems. Sie besteht zu etwa 85 Prozent aus Protonen und zwölf Prozent aus Heliumionen. Ihre Energie erhält sie durch wechselnde elektromagnetische Felder im interstellaren Raum und reicht bis zu  $10^{20}$  Elektronenvolt (eV; 1 eV ist die Energie eines Elektrons nach Durchlaufen einer Spannungsdifferenz von 1 Volt).

Sobald die hochenergetischen Teilchen in unser Sonnensystem eindringen, müssen sie das magnetische Feld überwinden, das durch den so genannten Sonnenwind erzeugt wird. Dieser ist ein riesiger Strom von geladenen Teilchen – überwiegend Elektronen –, den die Sonne kontinuierlich aussendet. Dieser Strom ist allerdings nicht konstant, sondern ändert sich mit einer Zykluszeit von etwa elf Jahren. Berücksichtigt man auch noch die Polaritätsumkehr der Sonne, dann dauert der Gesamtzyklus etwa 22 Jahre. Der Abschirmungseffekt wird in sehr vereinfachender Weise als ein Bremspotential beschrieben, das die hochenergetischen Teilchen überwinden müssen – also der Energiebetrag, um den sich die kinetische Energie der Teilchen verringert. Typische Werte des Bremspotentials liegen zwischen 0,4 Gigavolt (GV; ein GV sind  $10^9$  Volt) bei niedriger und 1,4 GV bei hoher Sonnenaktivität.

Bei Annäherung an die Erde muss die kosmische Strahlung auch deren Magnetfeld überwinden. In Richtung zum Äquator laufen die Flugbahnen im wesentlichen senkrecht zu den Magnetfeldlinien. Die erforderliche Teilchenenergie ist dort am höchsten und beträgt für Protonen bis zu etwa 17 Giga-Elektronenvolt (GeV), in unseren Breiten etwa 4 GeV. Teilchen mit niedrigerer Energie werden wieder von der Erde fort gelenkt. In Richtung zu den Magnetpolen verschwindet die magnetische Abschirmwirkung der Erde.

Allerdings verringert sich das Magnetfeld der Erde vom Magnetpol in Richtung zum magnetischen Äquator nicht stetig, sondern weist zahllose kleinere oder größere Abweichungen auf. Daher nimmt bei einem Flug vom Pol zum Äquator die Dosisleistung nicht stetig, sondern unregelmäßig ab. Man behilft sich damit, dass jedem geographischen Ort der jeweilige Messwert des lokalen Magnetfeldes zugewiesen wird. Diesem Wert ordnet man dann das Moment eines einfach geladenen Teilchens zu, das gerade nicht mehr Erdnähe erreichen kann. Diese Größe – also das Moment (in GV), bei dem das Teilchen vom Zugang zur Erde gerade abgeschnitten wird – bezeichnet man als *Abschneidesteifigkeit*.

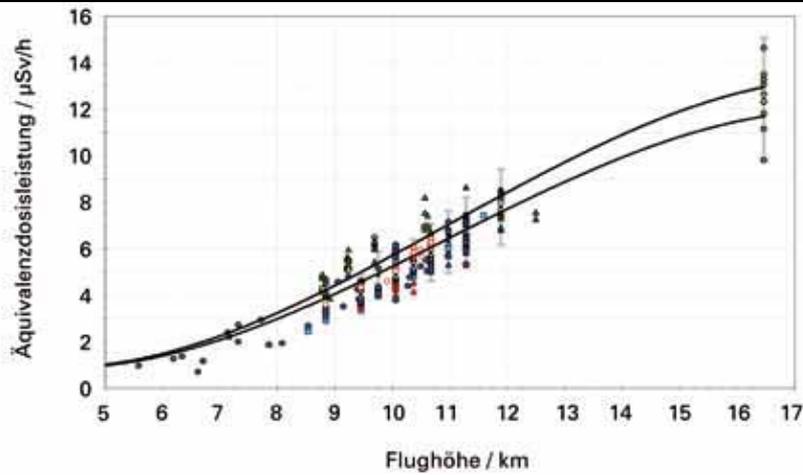
Im unserem Sprachgebrauch hat sich für die kosmische Strahlung auch der Begriff *Höhenstrahlung* ein-

gebürgert, da die Strahlungsdosis mit der Höhe über der Erdoberfläche zunimmt. Dies wurde bereits Anfang des 20. Jahrhunderts bei Ballonflügen experimentell beobachtet. Dabei stellte sich heraus, dass die Dosis der ionisierenden Strahlung mit zunehmender Höhe ein Maximum durchläuft und dann wieder abnimmt. Die Erklärung dafür: Sobald die Teilchen der kosmischen Strahlung den Außenrand der Erdatmosphäre erreichen, treten sie in Wechselwirkung mit den Luftmolekülen und erzeugen Kaskaden von Sekundärteilchen, also wiederum Protonen sowie Neutronen, Elektronen, Photonen und Mesonen. Mit zunehmender Tiefe in der Erdatmosphäre wird die Zahl der gebildeten Sekundärteilchen immer größer, bis ein Maximum erreicht wird, ab dem die Teilchenabsorption überwiegt. Je nach Art der Teilchen liegt dieses Maximum in etwa 15 bis 25 Kilometern Höhe.

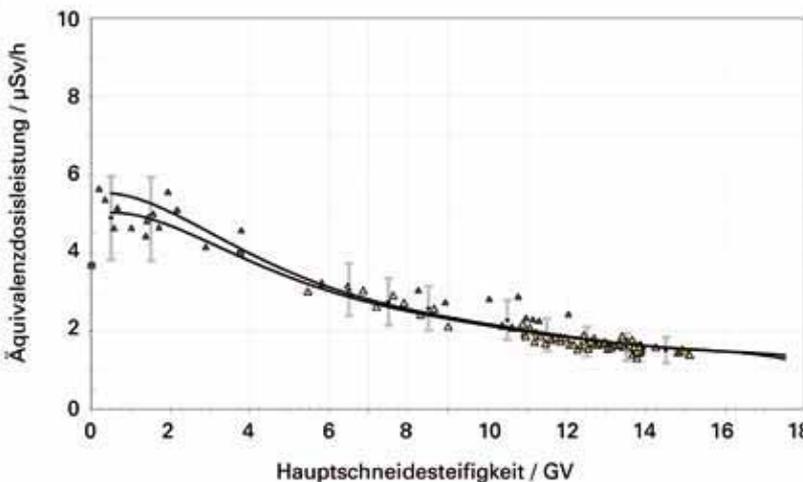
Der Verlauf der Äquivalentdosis durch Höhenstrahlung – eine Größe, die bereits die höhere Wirkung dicht ionisierender Strahlung berücksichtigt – in Abhängigkeit von der Flughöhe ist in der oberen Abbildung wiedergegeben. Hier sind berechnete Dosisleistungswerte in hohen geographischen Breiten den Messergebnissen bei unterschiedlichen Flughöhen gegenübergestellt. Die Sonnenaktivität war zum Zeitpunkt der Messungen relativ gering, das Bremspotential lag zwischen 0,5 und 0,6 GV. Die Messwerte in 16,5 Kilometern Höhe wurden mit passiven Dosimetern bei Concorde-Flügen ermittelt, die übrigen Daten mit aktiven elektronischen Dosimetern in zivilen Großraumflugzeugen.

Die Ergebnisse stammen von einer internationalen Arbeitsgruppe, die im Auftrag der Europäischen Union ihre im Laufe von elf Jahren gesammelten Messergebnisse mit berechneten Daten verglichen hat. Die Berechnungen wurden unter anderem mit dem im GSF-Forschungszentrum entwickelten Computer-Programm EPCARD durchgeführt, das zur Bestimmung der beruflichen Strahlenexposition aller französischen und der meisten deutschen Piloten verwendet wird. Mit diesem Programm kann neben der physikalischen (messbaren) Äquivalentdosis auch die (nicht messbare) effektive Dosis berechnet werden, die nach der Strahlenschutzverordnung bei beruflich strahlenexponierten Personen – also auch bei Piloten – bestimmt werden muss. Im Internet kann sich jeder Interessierte die Strahlungsdosen bei Flugreisen mit einer vereinfachten Version von EPCARD berechnen lassen ([www.gsf.de/epcard](http://www.gsf.de/epcard)).

In der unteren Abbildung sind die Dosisleistungen für die gleiche Sonnenaktivität wie im oberen Beispiel wiedergegeben, die man erhält, wenn man in zehn Kilometern Höhe vom Magnetpol zum Magnetäquator fliegt, allerdings nicht auf dem kürzesten Weg, sondern



Experimentell ermittelte Äquivalentdosisleistung in hohen geographischen Breiten und mit EPCARD berechnete Dosisleistungen bei solarem Bremspotential zwischen 0,5 GV (obere Kurve) und 0,6 GV. Jedes Symbol stellt die Ergebnisse eines spezifischen Messsystems dar. Beispielsweise stammen die runden blauen Symbole im linken und mittleren Bildbereich von einer Kombination aus Moderator-detektoren und Ionisationskammern, die runden grünen im rechten Bildbereich von passiven Kernspur- und Thermolumineszenzdetektoren.



Experimentell ermittelte und mit EPCARD berechnete Dosisleistungen bei solarem Bremspotential zwischen 0,5 GV (obere Kurve) und 0,6 GV bei einem Flug in zehn Kilometern Höhe vom Magnetpol (Abschneidesteifigkeit 0 GV) nach Thailand (zirka 17 GV) entlang stetig steigender magnetischer Abschirmung. Die senkrechten grauen Balken kennzeichnen die Messunsicherheit der experimentellen Daten im jeweiligen Intervall.

auf einem Kurs mit stetig zunehmender magnetischer Abschirmung. Die Dosisleistung verringert sich auf etwa ein Fünftel.

Die experimentellen Messdaten weisen eine beträchtliche Streuung auf. Dies ist im Wesentlichen auf statistische Effekte und ungenaue Kenntnis des Ansprechvermögens der Messgeräte zurückzuführen. Daher werden auch die Dosiswerte der Piloten für jede Flugroute nicht experimentell bestimmt, sondern mit Programmen berechnet, deren Richtigkeit in den umfangreichen Messserien bestätigt wurde.

Im Gegensatz zur galaktischen Strahlung besitzt die von der Sonne ausgehende kosmische Strahlung eine weitaus niedrigere Energie, die meist nicht ausreicht, um das Magnetfeld der Erde zu überwinden. Ausnahmen bilden plötzliche solare Eruptionen, bei denen geladene Teilchen mit Energien von über 0,5 GeV emittiert werden und deren Sekundärstrahlung bis zur Erdoberfläche durchdringen kann. Solche Ereignisse treten durchschnittlich einmal pro Jahr auf. Da sie meist nur

einige Stunden bis wenige Tage andauern, ist der Dosisbeitrag bei beruflich fliegenden Personen im Vergleich zur galaktischen kosmischen Strahlung in der Regel vernachlässigbar.

Bei einer Flughöhe von elf Kilometern liegen die typischen Dosiswerte bei innereuropäischen Flügen unter 10 Mikro-Sievert ( $\mu\text{Sv}$ ) pro Flug, bei Flügen nach Südafrika und Südamerika unter 40  $\mu\text{Sv}$  und bei transatlantischen Flügen nach USA und Kanada zwischen 50 und 80  $\mu\text{Sv}$ . Piloten, die auf Mittel- und Langstrecken fliegen, erhalten jährlich – zusätzlich zur natürlichen und zivilisatorischen Strahlung von durchschnittlich etwa 4 mSv – während ihrer Berufsausübung eine Strahlendosis, die zwischen 2 und 5 Milli-Sievert (mSv; 1 mSv = 1000  $\mu\text{Sv}$ ) liegt.

#### Literatur

- Lindborg, L., Bartlett, D., Beck, P., McAulay, I.R., Schnuer, K., Schraube, H., Spurny, F. (2004): Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew – Compilation of Measured and Calculated Data. European Commission, Radiation Protection No. 140 (ISBN 92-894-8448-9)

#### Internet:

- <http://www.gsf.de/epcard>
- [http://europa.eu.int/comm/energy/nuclear/radioprotection/publication/140\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/energy/nuclear/radioprotection/publication/140_en.htm)



Montage: Ute Fill

**Spagat zwischen heilen und schaden**

# Strahlenanwendungen in der Medizin

**Christoph Hoeschen** In der Medizin kommen zahlreiche Verfahren zum Einsatz, die die besonderen Eigenschaften ionisierender Strahlung nutzen. Bei therapeutischen Maßnahmen werden Patienten mit hohen Dosen ionisierender Strahlung behandelt, um beispielsweise Tumoren zu bekämpfen. Trotz der für den einzelnen Patienten hohen Dosen ist der Beitrag solcher Therapien zur Strahlenexposition der Gesamtbevölkerung sehr gering. Anders verhält es sich in der radiologischen und nuklearmedizinischen Diagnostik: Diese Verfahren, bei denen ionisierende Strahlen zur Erkennung von Krankheiten genutzt werden, liefern den größten Beitrag zur kollektiven effektiven Dosis der Bevölkerung in Deutschland.

**D**ie radiologische Diagnostik ist – neben der Strahlentherapie – die wichtigste Anwendung ionisierender Strahlung in der Medizin. Bezieht man Röntgenaufnahmen der Zähne mit ein, so erhält jeder Bundesbürger pro Jahr durchschnittlich etwa 1,8 Röntgenuntersuchungen. Die Exposition durch die Röntgendiagnostik stellt den größten Einzelbeitrag zur kollektiven Dosis der deutschen Gesamtbevölkerung dar. Dieser kommt jedoch nicht durch einzelne hohe Dosiswerte zu Stande, sondern vielmehr durch die große Anzahl der radiologischen Untersuchungen. Eine deutliche Reduzierung der Zahl solcher Untersuchungen wäre zwar wünschenswert, ist jedoch eher unwahrscheinlich, da der sicheren Erkennung von Krankheitsursachen ein deutlich höherer Stellenwert beigemessen wird als der Minderung der Strahlenexposition.

Für die erfolgreiche Behandlung einer Erkrankung ist es nämlich unabdingbar, die Krankheitsursache möglichst genau zu kennen. Eines der wichtigsten Mittel hierzu ist die medizinische Bildgebung, mit der – ohne operativen Eingriff – Einblicke ins Innere des Körpers gewonnen werden können. Heutzutage verfügt die Medizin über ein breites Spektrum an unterschiedlichen Techniken, die solche Einsichten erlauben. Sie lassen sich nach der Art und Weise, wie die Bildinformation erzeugt und empfangen wird, voneinander unterscheiden: Verfahren wie

die „klassische“ Röntgenbildung und die Computer-Tomographie beruhen auf ionisierender Strahlung, Verfahren wie die Sonographie und die Kernspintomographie basieren dagegen auf anderen Mechanismen.

## Sonographie

Die Sonographie – oder Ultraschall-diagnostik – ist eines der ältesten bildgebenden Verfahren für Organe und weiche Körperstrukturen. Ihre technische Weiterentwicklung hat gerade in den letzten Jahren enorme Fortschritte ermöglicht. Wie der Name verrät, nutzt diese Art der bildgebenden Diagnostik Ultraschallwellen, also Schallwellen mit sehr hoher Frequenz, die für das menschliche Gehör nicht mehr wahrnehmbar sind. Ultraschallwellen werden von einem so genannten Schallwandler erzeugt und kurzzeitig in den Körper eingestrahlt. An Grenzflächen zwischen Organen oder auch an inhomogenen Flächen innerhalb eines Organs wird die Schallwelle reflektiert. Der Schallwandler nimmt das zurückkommende Signal wieder auf und ein Computer berechnet anhand der Laufzeit, wo im Körper das Signal reflektiert wurde. Damit bekommt man eine Information über die jeweilige Grenzschicht. Benutzt man mehrere Wandler, die Schallwellen aussenden und empfangen, so erhält man eine bildhafte Information über die Verteilung der Reflexionen in der untersuchten



**Die Ultraschalldiagnostik hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Gesundheitliche Risiken sind von Ultraschallaufnahmen im Allgemeinen nicht zu erwarten.**

Foto: GE-Healthcare

Körperregion.

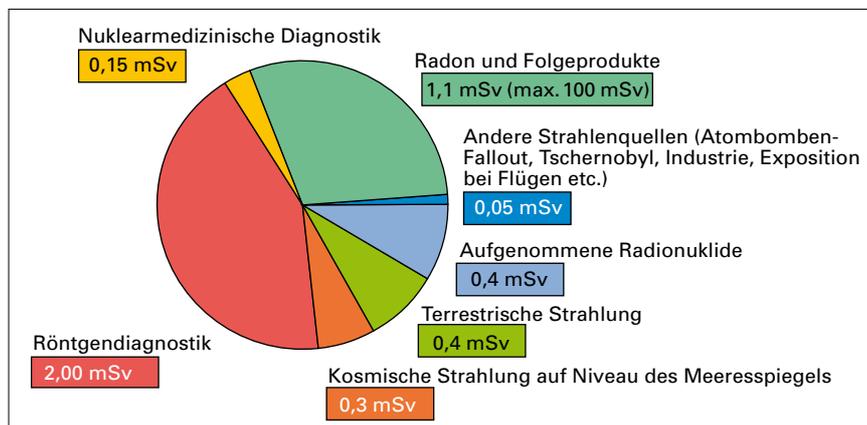
Die Ultraschalldiagnostik wird im Allgemeinen als ungefährlich angesehen. Die Erwärmung des Gewebes ist – abgesehen von Untersuchungen mit der so genannten Dopplersonographie – recht klein und weitere Effekte (wie zum Beispiel Risse im Gewebe) extrem selten. Allerdings gibt es etliche Einschränkungen für die Anwendung der Sonographie: Knochen können im Allgemeinen nicht mit Schallwellen durchdrungen werden, so dass Informationen über Gewebe, welches hinter Knochen liegt, nicht zur Verfügung stehen. Ähnliches gilt auch für Gewebe hinter stark reflektierenden Grenzflächen, zum Beispiel dort, wo Luft im Körper ist. Zudem sind sowohl die Eindringtiefe als auch das Auflösungsvermögen begrenzt. Dabei gilt: Je höher die gewünschte Auflösung, desto niedriger ist die pro eingestrahelter Energie erreichbare Eindringtiefe in den Körper. Außerdem sind Systeme, die einen automatisierten Ablauf der Bildgebung unabhängig vom Untersucher und für große Untersuchungsbereiche ermöglichen und damit Informationen für quantitative Messungen liefern, technisch noch nicht soweit ausgereift, dass sie routinemäßig eingesetzt werden könnten.

## Kernspintomographie

Ein Teil dieser Probleme lässt sich mit der Kernspintomographie, auch als *NMR*, *Nuclear Magnetic Resonance*, *MRT*, *Magnet-Reso-*

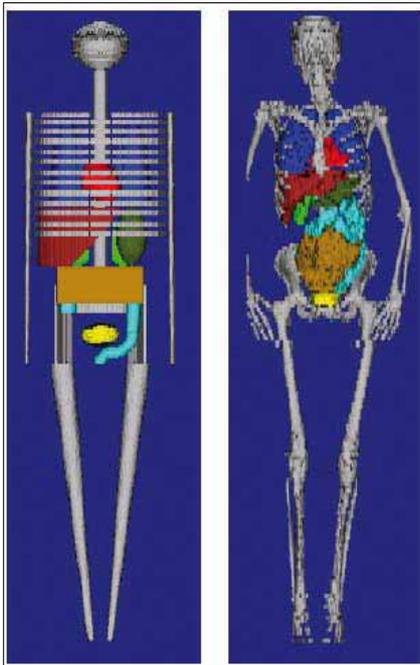
### Kollektive mittlere effektive Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland. Die medizinische Diagnostik (rot) stellt den größten Einzelbeitrag dar.

Grafik: Dieter Regulla



# Strahlen- anwendungen in der Medizin

nanz-Tomographie oder MRI, *Magnetic Resonance Imaging* bezeichnet, umgehen. Bei dieser Art der Bildgebung werden im Allgemeinen so genannte Schichtbilder aufgenommen. Man nutzt Magnetfelder, um unterschiedliche Konzentrationen signalgebender Atomkerne (üblicherweise Wasserstoff) im Gewebe sowie unterschiedlich schnelles Abklingen der Signale zu messen. Die Kerne haben ein magnetisches Moment, das mit dem Eigendrehimpuls der Protonen und gegebenenfalls Neutronen des Atomkerns gekoppelt ist. Wird ein starkes Ma-



**EVA (links) ist ein mathematisches Modell zur Dosisberechnung am weiblichen Körper. Vergleichbare Phantommenschen werden schon seit Jahrzehnten im Strahlenschutz verwendet. Sie sind zur Grundlage internationaler Strahlenschutzbestimmungen geworden.**

**Das Voxel-Modell Donna (rechts) entstand aus Computertomografie-Daten einer realen Person. Dieses Verfahren liefert virtuelle Schnittbilder des Körpers. Dazu muss für jedes Bildelement (Pixel) in jedem Schichtbild bestimmt werden, zu welchem Organ es gehört. Durch den Abstand der Schichtbilder voneinander kommt noch eine dritte Dimension hinzu. Das Pixel wird so zum Volumenelement, zum Voxel.**

Modellierung: Maria Zankl

gnetfeld angelegt, richten sich die magnetischen Momente parallel oder antiparallel zu diesem aus. Anschließend bewirkt ein hochfrequentes Wechselfeld, dass sich das magnetische Moment aus dieser Orientierung „herausdreht“. Schaltet man dann das Wechselfeld wieder ab, wird die für die Ausrichtung der Magnetisierung zugeführte Energie wieder freigesetzt und die Magnetisierung „klappt zurück“. Dies geschieht mit einer für verschiedenen Stoffe und Gewebe unterschiedlichen Zeitkonstante. Zudem wird bei diesem Prozess die Gesamtmagnetisierung kleiner, da die einzelnen Momente nicht mehr parallel zueinander ausgerichtet bleiben. Auch dieses Abklingen des Signals enthält wesentliche Informationen über das Gewebe. Wenn es gelingt, diese Informationen lokalisiert zu gewinnen, können daraus im Computer Bilder der untersuchten Körperregion erzeugt werden.

Wie bei der Ultraschallbildgebung gibt es auch bei der Kernspintomographie Vor- und Nachteile. Es wird keine ionisierende Strahlung verwendet, und es können mit ein und dem selben Untersuchungsgerät verschiedenste Informationen (Signalverkleinerung, Signalklappen, Anzahl der Wasserstoffkerne im Gewebe) gewonnen werden. Im Prinzip ist es auch möglich, die untersuchte Körperregion dreidimensional darzustellen.

Einer der größten Vorteile ist aber zugleich auch ein Nachteil: Die erreichbare Auflösung und das Untersuchungsvolumen sind miteinander gekoppelt, das heißt je größer das zu untersuchende Volumen, desto schlechter wird die Auflösung, oder die benötigte Untersuchungszeit steigt. Die Untersuchungszeit ist ohnehin häufig ein



**So genannte Röntgenkugel für Zahnuntersuchungen. Die Aufnahme stammt aus dem Jahr 1935.**

Foto: Siemens Medizintechnik

Problem, da schnelle Prozesse (wie zum Beispiel die Aufnahme von Kontrastmittel oder die Herzbewegung) nicht in jedem Fall optimiert – das heißt mit einem guten Signal-Rausch-Verhältnis – dargestellt werden können.

Die Kernspintomographie ist ein aufwändiges Untersuchungsverfahren, bei dem zur Erzielung guter Resultate viele Parameter optimal an den Patienten angepasst werden müssen. Auch mit dieser Technik erhält man über bestimmte Organe, zum Beispiel Knochen, nur sehr schlecht oder gar keine Informationen. Zudem sind bei der Kernspintomographie biologische Wirkungen nicht auszuschließen. Bei statischen Magnetfeldern über vier Tesla (Tesla ist die Einheit der magnetischen Flussdichte) sind Schwindel und Wahrnehmungsstörungen beobachtet worden. Allerdings arbeiten heute die meisten NMR-Systeme für die medizinische Anwendung nur mit Feldstärken bis drei Tesla. Bei unsachgemäßem Umgang mit dem System kann es dennoch zu Gefährdungen des Patienten kommen, so zum Beispiel, wenn metallische Gegenstände ungesichert im Untersuchungsraum vorhanden sind. Diese können durch das Magnetfeld regelrecht auf den Patienten katapultiert werden.

Auch bei sachgemäßer Benutzung heute gängiger Systeme können Irritationen des Nervensystems durch das schnelle An- und Abschalten bestimmter Zusatzfelder und der dadurch induzierten elektrischen Felder entstehen. Durch die hochfrequenten Wechselfelder wird Energie auf den Patienten übertragen,

die zur Erwärmung des Körpergewebes führen kann. Bei Patienten mit Herzschrittmachern und Insulinpumpen sind besondere Vorsichtsmaßnahmen zu treffen, da die Funktion dieser Geräte gestört werden kann.

## Nuklearmedizinische und radiologische Verfahren

Das in Deutschland immer noch häufiger als die NMR eingesetzte Verfahren für die Schnittbilddiagnostik ist die Computertomographie oder kurz CT. Sie zeichnet sich aus durch eine meist einfachere Untersuchungstechnik, kürzere Untersuchungsdauer, hohe Auflösung und die Möglichkeit, auch knöcherne Strukturen darstellen zu können. Die Computertomographie gehört – wie auch die statische Projektionsradiographie, die Durchleuchtung (dynamische Projektionsradiographie, Fluoroskopie) und als Spezialform die Angiographie – zu den bildgebenden Verfahren in der Medizin, die Röntgenstrahlung zur Bilderzeugung verwenden. Ionisierende Strahlung nutzen außerdem die nuklearmedizinisch-diagnostischen Verfahren Projektionszintigraphie, SPECT (*Single Photon Emission Computed Tomography*) und PET (*Positronen-Emissions-Tomographie*).

Neben Art und Weise der Bilderzeugung unterscheiden sich nuklearmedizinische und radiologische Verfahren in ihren Anwendungsgebieten. Nuklearmedizinische Verfahren dienen vor allem zur Darstellung funktionaler Abläufe im Körper. So können zum Beispiel Erkrankungen der Schilddrüse auf Grund einer veränderten Stoffwechsellaktivität diagnostiziert werden. Auch bestimmte Tumoren lassen sich auf diese Weise entdecken und lokalisieren, da sie radiopharmazeutische Kontrastmittel schneller aufnehmen als gesundes Gewebe. Die Darstellung der Anatomie erfolgt also nur durch die Darstellung der Funktion – so wird zum Beispiel bei der Nierenzintigraphie die Anreicherung des Kontrastmittels in den Nieren und die anschließende Ausscheidung über die Harnwege

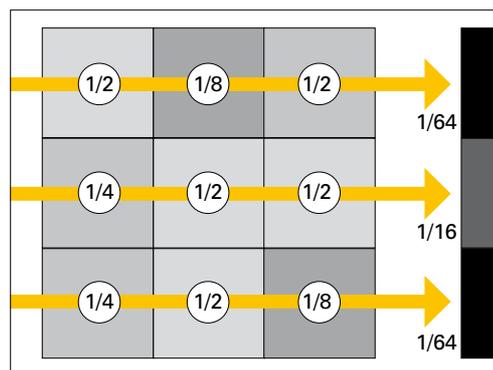
sichtbar gemacht. Im Gegensatz dazu stellen radiologische Verfahren vor allem die Anatomie des Patienten dar.

Eine weitere Art der Klassifizierung von „strahlenden“ Bildgebungsverfahren in der Medizin ist die Unterteilung in Projektionsverfahren und Schnittbild- (oder Volumendarstellungs-) verfahren. Bei Projektionsverfahren wird die Information aus dem zu untersuchenden Körpervolumen komplett auf ein zweidimensionales Bild projiziert. Dadurch überlagern sich die Bildinformationen aus den einzelnen Schichten, was die Diagnose und Lokalisation eines möglichen Befundes häufig erschweren kann. Dafür sind diese Aufnahmen besonders schnell und mit relativ einfachen Geräten zu erstellen. Die benötigte Dosis ist meist kleiner als die bei Schnittbildverfahren und in vielen Fällen ist die Aussagekraft solcher Aufnahmen völlig ausreichend. Dies gilt sowohl für die Projektionszintigraphie wie auch für die Projektionsradiographie. Bei der Projektionszintigraphie wird dem Patienten ein radiopharmazeutisches (also „strahlendes“) Arzneimittel verabreicht und mit Hilfe eines Szintillationszählers gemessen, wo sich das Radiopharmazeutikum im Körper angereichert hat.

Bei der statischen beziehungsweise dynamischen Projektionsradiographie wird mit einer Röntgenröhre außerhalb des Körpers Röntgenstrahlung erzeugt und auf das zu untersuchende Körperteil „geschossen“. Die anderen Körperregionen werden durch eine so genannte Einblendung abgeschirmt. Durch Streuung und Absorption wird die Röntgenstrahlung von den verschiedenen Körpergeweben unterschiedlich stark geschwächt, und es entsteht ein zweidimensionales Bild des Körperinneren. Die meisten medizinisch-diagnostischen Strahlenanwendungen sind solche Projektionsradiographien. Aufnahmen des Skelettsystems, die bei fast jedem Verdacht auf einen Knochenbruch durchgeführt werden, waren im Jahr 1997 mit 62 Prozent die häufigste röntgendiagnostische Untersuchung, gefolgt von der Thoraxuntersuchung mit 21 Prozent. Die

aus diesen Untersuchungen resultierende Dosis machte jedoch nur einen Anteil von neun beziehungsweise sieben Prozent an der kollektiven effektiven Dosis durch medizinische Untersuchungen aus.

Die Projektionsradiographie ist aber nicht immer auf zwei Dimensionen beschränkt. Häufig kommt noch der Faktor Zeit als dritte Dimension hinzu. Dann werden Aufnahmen in unterschiedlichen Zeitabständen gemacht, um so einen Verlauf – zum Beispiel die Ausbreitung eines Kontrastmittels – verfolgen zu können. Kontrastmittel sind Stoffe, die sich in bestimmten Körperregionen ausbreiten und Strahlung entweder besonders stark oder besonders schwach absorbieren und so den Kontrast zum umliegenden Gewebe verstärken. Es gibt sogar Untersuchungen, die quasi in Videoform ablaufen, die so genannten Fluoroskopien. Die einzelnen Bilder einer Sequenz können mit sehr viel



**Prinzip der Projektionsradiographie: Quasi parallele Strahlen durchdringen unterschiedlich stark absorbierendes Gewebe. Die jeweils durchgehenden Strahlungsanteile sind durch die Bruchzahlen symbolisiert.**

Grafik: Martin Böckmann, Universität Magdeburg

kleinerer Dosis aufgenommen werden, da bei der Auswertung das visuelle System des Menschen das Rauschen über den Zeitverlauf zum Teil mitteln kann und es somit weniger stört. Nur für Dokumentationszwecke oder besonders genaue Lagebestimmungen sind dann noch Aufnahmen mit hoher Dosis notwendig. Auf diese Weise lässt sich die Dosis je Untersuchung auch bei fluoroskopischen Untersuchungen begrenzen.

Grundsätzlich ist bei der Projektionsradiographie die Dosis je Unter-

# Strahlen- anwendungen in der Medizin

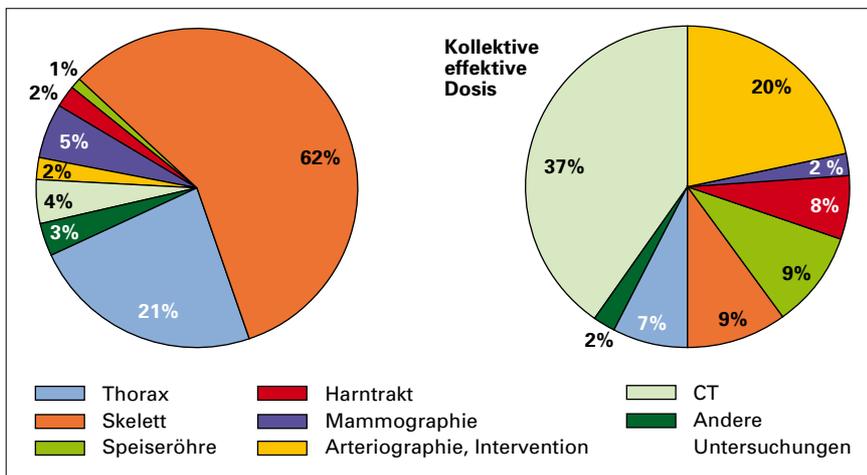
suchung relativ gering. Eine Thoraxaufnahme in zwei Ebenen (eine Aufnahme des Brustkorbs von hinten nach vorn und eine Aufnahme von der Seite) bedeutet heutzutage eine effektive Dosis von zirka 0,1 mSv – dies entspricht etwa einem Hin- und Rückflug über den Atlantik. Röntgenaufnahmen der Extremitäten oder normale Zahnaufnahmen stellen sogar ein noch

weniger sinken. Dennoch ist die Belastung bei derartigen Untersuchungen viel höher als bei einfachen Projektionsradiographien. Nur die statische Untersuchung der Brustwirbelsäule kommt mit etwa 5 mSv effektiver Dosis in ähnliche Bereiche.

## Computertomographie

Bei der Computertomographie (CT) ist die Strahlenbelastung für den Patienten deutlich höher. Bis vor kurzem gab es praktisch keine Untersuchung, bei der die effektive Dosis kleiner als 1 mSv war – die meisten CT-Untersuchungen bedeuten eher eine Dosis von zirka 10 mSv. Dies liegt daran, dass der Körper von einer Röntgenröhre und einem ge-

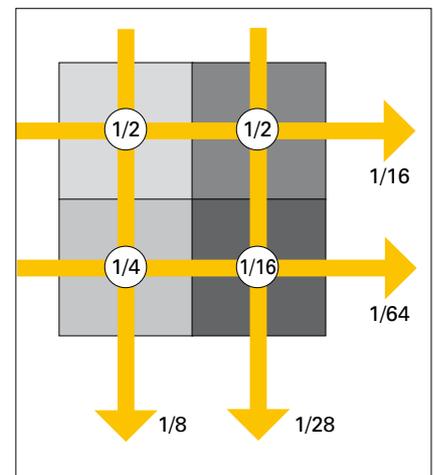
denen zum Beispiel die Strahlungsleistung der Röntgenröhre entsprechend der Absorption einer Körperregion moduliert wird, haben hinsichtlich der Strahlenexposition nur wenig Entlastung gebracht. Und selbst diese geringe Entlastung wird – vor allem in Bezug auf die Kollektivdosis – durch die zunehmende Verbreitung von so genannten Mehrschicht-CT-Systemen mehr als kompensiert. Bei diesen modernen Geräten wird nicht mehr nur eine Schicht pro Rotation um den Patienten gemessen, sondern gleich eine Vielzahl von Schichten. Auf diese Weise lassen sich viele Untersuchungen deutlich beschleunigen und ihre diagnostische Aussagekraft vergrößern. Manche Untersuchungen, die früher wegen zu langer Aufnahmezeiten nicht durch-



**In Deutschland im Jahr 1997 durchgeführte Projektionsradiographien.**  
**Links: Relative Anteile nach Art der Untersuchungen.**  
**Rechts: Die aus diesen Untersuchungsarten resultierende Strahlendosen.**  
**Obwohl Skelett- und Thoraxuntersuchungen am häufigsten durchgeführt wurden, war ihr Beitrag zur kollektiven effektiven Dosis verhältnismäßig gering.**  
 Grafik: Dieter Regulla

geringeres Risiko dar. Es gibt aber auch Ausnahmen. Bei Interventionen ist die effektive Dosis im Allgemeinen deutlich höher: Bis zu einigen Milli-Sievert können erreicht werden. Bei Untersuchungen des Herzens oder einzelner Gefäße kann die Dosis je nach Konstitution des Patienten sogar bis zu 100 mSv oder mehr betragen und damit einer Hautdosis von mehreren Gray entsprechen. Moderne Untersuchungssysteme, die den Körper gepulst – also in Zeitintervallen – durchstrahlen, lassen diese Werte deutlich auf etwa 10 mSv oder

genüberliegenden Detektor umkreist wird und an vielen Positionen „Schichtprojektionsbilder“ aufgenommen werden. Dadurch erhält man einen Datensatz über die Schwächung der Strahlung beim Durchtritt durch den Körper entlang verschiedener Strahlen und aus verschiedenen Winkeln und kann daraus ein Gleichungssystem aufstellen, aus dem die Schwächung der Strahlung an jedem einzelnen Punkt der durchstrahlten Schicht berechnet werden kann.  
 Auch die seit einigen Jahren verfügbaren optimierten Geräte, bei



**Prinzip der Computertomographie: Mehrere Sätze quasi paralleler Strahlen durchdringen das unterschiedlich stark absorbierende Gewebe. Aus den entstehenden Projektionsradiographien können die durchdringenden Anteile der jeweiligen Gewebeelemente zurück gerechnet werden.**  
 Grafik: Martin Böckmann, Universität Magdeburg

föhrbar waren, werden durch diese Technologie überhaupt erst möglich, wie zum Beispiel Untersuchungen des Herzens oder solche, bei denen der Atem angehalten werden muss. Da mehr Untersuchungen möglich sind und diese auch noch schneller gehen, werden immer mehr Computertomographien durchgeführt. Neuerdings gibt es allerdings sehr weitgehende Ansätze, die Dosis im CT zumindest für einzelne

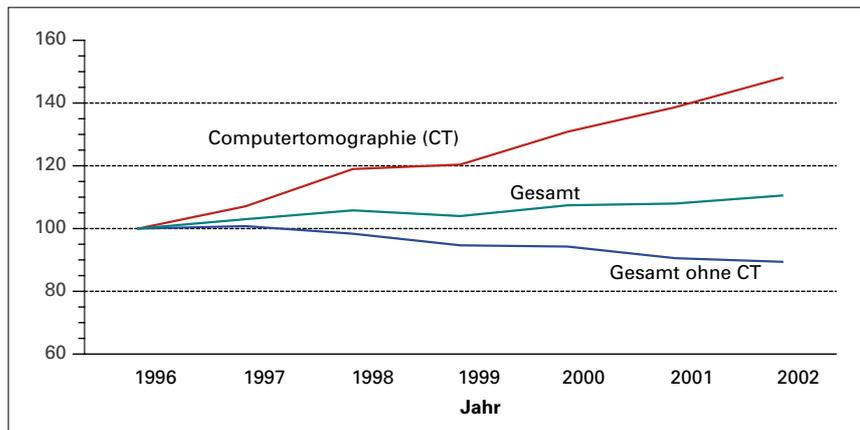
Untersuchungen drastisch zu senken: Bei den so genannten *low-dose*- oder *ultra-low-dose*-Verfahren wird bewusst auf eine hohe Bildqualität verzichtet, da man davon ausgeht, dass die erforderliche Information trotz höherem Rauschen erkennbar ist.

In der nuklearmedizinischen Diagnostik ist eine Reduzierung der Strahlenbelastung noch schwieriger, da eine gewisse Mindestmenge an Photonen am Detektor außerhalb des Körpers benötigt wird, um überhaupt ein Bild erstellen zu können. Bei diesen Verfahren ist ohnehin sehr viel zusätzliche Nachbearbeitung der Rohdaten notwendig, um aussagekräftige Darstellungen zu erhalten. Bei einer Projektionszintigraphie liegt der Dosisbedarf bei Erwachsenen je nach untersuchtem Organ bei zirka 1 bis 3 mSv effektiver Dosis. Für Kinder sind entsprechend Größe und Gewicht geringere Strahlenexpositionen zu erzielen.

## PET und SPECT

Die nuklearmedizinischen Schnittbildverfahren PET und SPECT bedeuten für den Patienten noch sehr viel höhere Strahlenexpositionen. Sie entsprechen typischerweise einer effektiven Dosis von 10 bis 20 mSv. Dafür ist der Informationsgehalt solcher Aufnahmen sehr viel aussagekräftiger. So können zum Beispiel Größe und Aktivität von Tumoren wesentlich besser dargestellt werden, und das bedeutet letztlich eine deutliche Verbesserung der Therapiechancen. Zudem wird es möglich, die funktionelle nuklearmedizinische Information mit der anatomischen radiologischen Darstellung aus der Computertomographie zu verknüpfen. Dadurch kann beispielsweise die operative Entfernung eines Tumors noch genauer und risikoärmer erfolgen, da empfindliche Organe geschont werden können.

Bei der SPECT (*Single Photon Emission Computed Tomography*) sendet ein Radiopharmazeutikum ständig Photonen aus, die den Körper von dem Punkt aus, wo das Radiopharmazeutikum sie emit-



**Mittlere effektive Dosis pro Einwohner durch Röntgen- und CT-Untersuchungen in Prozent gegenüber 1996: Während die mittlere Strahlendosis pro Kopf der Bevölkerung durch Projektionsradiographieuntersuchungen in den letzten Jahren kontinuierlich gesunken ist, hat der Dosisbeitrag durch computertomographische Untersuchungen erheblich zugenommen. Die mittlere effektive Pro-Kopf-Dosis durch die medizinische Diagnostik insgesamt ist dadurch leicht angestiegen.** Grafik: Bundesamt für Strahlenschutz

tiert, in irgendeine Richtung durchstrahlen. Das Radiopharmazeutikum ist so gewählt, dass es sich zum Beispiel besonders gut an einen Tumor anlagert. Rings um den Körper sind Detektoren für die Photonen angebracht. Jedes einzelne Photon wird an der Position detektiert, wo es den Körper verlässt. Aus der Gesamtheit der gemessenen Signale werden dann viele Schnitte durch die zu untersuchende Körperregion rekonstruiert und diese im Computer zu einem dreidimensionalen Bild zusammengesetzt.

Auch bei der PET (*Positronen-Emissions-Tomographie*) werden dreidimensionale Bilddaten aus Schnittbildern erstellt, die dafür notwendigen Rohdaten werden aber auf andere Art und Weise generiert. Das Radiopharmazeutikum zeichnet sich hier durch  $\beta^+$ -Umwandlung aus, bei der ein Positron aus dem Atomkern abgestrahlt wird. Zusammen mit einem Elektron aus dem Gewebe wird ein Paar gebildet, das dann – bei einer so genannten Paarvernichtung – zerstrahlt. Dabei wird Energie in Form von zwei Photonen abgegeben, die in genau entgegengesetzte Richtungen davonfliegen. Die Photonen werden durch einander gegenüberliegende Detektoren erfasst. Signale, die innerhalb eines bestimmten Zeitfensters in den beiden Detektoren eingehen, lassen sich auf einen Zerfall

zurückführen, der sich innerhalb der untersuchten Körperregion auf einer Verbindungslinie zwischen den beiden Detektoren ereignet hat. Damit lassen sich Daten erzeugen, die für die Rekonstruktion der Schnittbilder geeignet sind. Die PET-Bildqualität ist im Vergleich zur der von SPECT häufig deutlich besser, weil die lokale Zuordnung des Zerfallsprozesses einfacher ist.

## Screening-Programme

In Zukunft ist – trotz der Neufassung der Röntgenverordnung von 2002, die die Anwendung von Strahlung am Menschen nur nach strenger Indikationsstellung oder im Rahmen kollektiver Reihenuntersuchungen zur Früherkennung (Screeningprogramme) erlaubt – mit einem weiteren Anstieg der Strahlenexposition für die Bevölkerung durch die medizinische Bildgebung zu rechnen. Das liegt zum einen an den zusätzlichen diagnostischen Möglichkeiten vor allem im Bereich der Computertomographie, zum anderen aber auch an der Zunahme von prophylaktischen Maßnahmen. Das vom Bundestag beschlossene und derzeit in der Startphase befindliche Mammographie-Screening wird dabei allerdings nur wenig zur Erhöhung der kollektiven Strahlenexposition beitragen, da es die heute gängigen Vorsorge-Mammographien, die vie-

# Strahlen- anwendungen in der Medizin

le Patientinnen durchführen lassen, ersetzen wird und die Aufnahmen an Zentren mit besonders guter und ständig überwachter Qualität durchgeführt werden. Allerdings kommt im Laufe der zwanzig Jahre, die die Patientinnen überwacht werden sollen, im Regelfall eine mittlere Parenchymdosis von zirka 10 bis 20 mSv je Brust zusammen. Die Parenchymdosis ist für die Risikoabschätzung in der Mammographie eine sinnvollere Angabe als die effektive Dosis, da außer der Brust praktisch kein Gewebe durch ionisierende Strahlung getroffen wird, das Drüsengewebe selber aber recht strahlenempfindlich ist. Diese Dosisabschätzung führt auf der Basis der vorhandenen epidemiologischen Daten zu der Abschätzung, dass von 100.000 Teilnehmerinnen des Screening-Programms rein rechnerisch weniger als zehn Frauen an einem strahlenbedingten Brustkrebs sterben werden. Dabei ist berücksichtigt, dass die Relative Biologische Wirksamkeit (RBW) für die weiche Mammographiestrahlung zwischen zwei und sechs liegen

wird. Im selben Zeitraum, das heißt ab dem 50. Lebensjahr, werden rein rechnerisch etwa 7.700 der 100.000 Teilnehmerinnen an einem „spontanen“ Brustkrebs erkranken und etwa 3.100 an dieser Erkrankung sterben. Als Ausgangspunkt für eine Nutzen-Risiko-Abschätzung lässt sich aus diesen Schätzungen folgern, dass in einem Kollektiv von 100.000 Teilnehmerinnen mindestens zehn Brustkrebstodesfälle durch das Mammographie-Screening verhindert werden müssen, damit für die Frauen ein Nutzen verzeichnet werden kann. Das entspricht einer anzustrebenden Mortalitätsreduktion von weniger als einem Prozent. Im Allgemeinen wird von einer Mortalitätsreduktion von 20 bis 30 Prozent ausgegangen, so dass von einem deutlichen Nutzen für die Frauen ausgegangen werden müsste. Allerdings sind unangenehme Nebenaspekte in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt, wie zum Beispiel falsch positive Befunde, die die betroffenen Frauen verunsichern und abgeklärt werden müssen.

Als problematisch ist das „quasi CT-Screening“ zu betrachten, das zurzeit immer häufiger durchgeführt wird. Insbesondere bei Ganzkörperuntersuchungen ist die effektive Dosis mit 5 bis 20 mSv oder mehr recht hoch und der Nutzen – zumindest bei Fehlen konkreter Verdachtsmomente – sehr zweifelhaft. Bei solchen Untersuchungen ist die Gefahr groß, dass eine tatsächliche

Erkrankung auf Grund der Fülle der dargestellten Informationen übersehen wird, während auf der anderen Seite unkritische Veränderungen zu vielen falsch positiven Befunden führen werden. Derartige Angebote sollten also mit Skepsis betrachtet werden. Aber auch hier gibt es natürlich Ausnahmen. Wenn auf Grund der Vorgeschichte einer Person von einem erhöhten Krankheitsrisiko ausgegangen werden muss, zum Beispiel Lungenkrebs bei Asbest-exponierten Personen, macht eine solche Untersuchung sicherlich Sinn. Noch sind allerdings die wissenschaftlichen Studien zum möglichen Nutzen präventiver Diagnosen nicht genügend fundiert, um eindeutige Aussagen machen zu können.

Insgesamt gesehen wird eine effektive Reduktion der Strahlenexposition durch medizinische Anwendungen nur durch innovative Weiterentwicklungen der bildgebenden Verfahren erreicht werden können.

## Literatur:

*Grundlagen der Strahlenphysik und radiologischen Technik in der Medizin.*  
Hrsg.: W. Angerstein (2005)

*Medizinische Strahlenexposition in der Diagnostik und ihre Bewertung.* Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2002);  
Download unter [www.ksr-cpr.admin.ch/pdf/Bd51.PDF](http://www.ksr-cpr.admin.ch/pdf/Bd51.PDF)

## Internet:

[www.bfs.de/ion/medizin](http://www.bfs.de/ion/medizin)  
Bundesamt für Strahlenschutz: Medizinische Strahlenanwendungen

[www.gsf.de/iss/medphys/](http://www.gsf.de/iss/medphys/)  
GSF-Institut für Strahlenschutz, Arbeitsgruppe Medizinphysik

[www.drg.de](http://www.drg.de)  
Deutsche Röntgengesellschaft

[www.degro.org](http://www.degro.org)  
Deutsche Gesellschaft für Radioonkologie e.V.

[www.nuklearmedizin.de](http://www.nuklearmedizin.de)  
Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin

[www.radiologie.de](http://www.radiologie.de)  
Informationen für Ärzte und interessierte Patienten

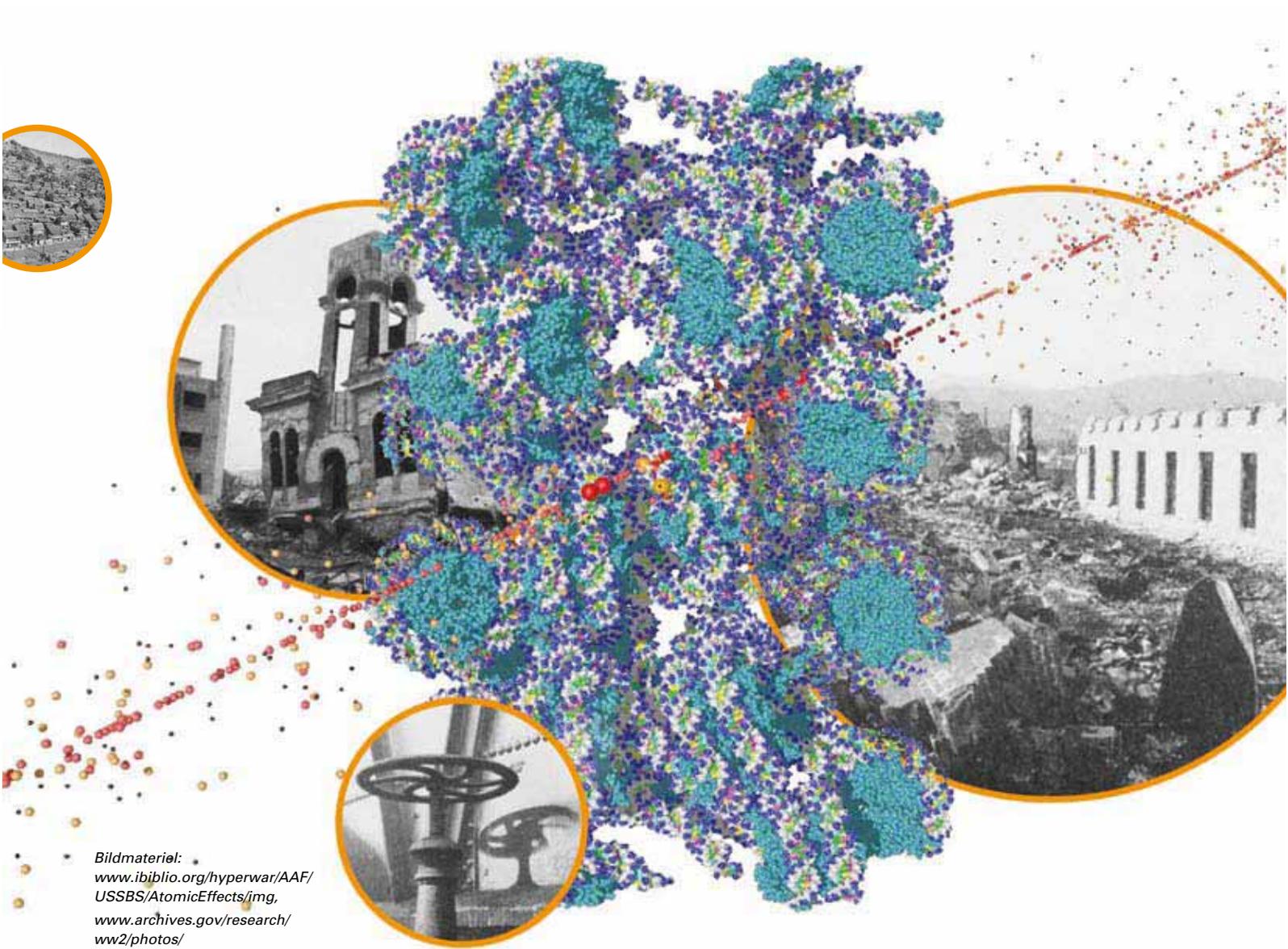
[www.meb.uni-bonn.de/radiologie/Patienteninformation/Roentgen.html](http://www.meb.uni-bonn.de/radiologie/Patienteninformation/Roentgen.html)

*Patienteninformation über Röntgenuntersuchungen der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn*

## Dosiswerte einiger häufiger Röntgenuntersuchungen

Art der Untersuchung	effektive Dosis in mSv
Zahnaufnahme	<0,01
Extremitäten	0,01 – 0,1
Schädelaufnahme	0,03 – 0,1
Thoraxaufnahme in zwei Ebenen	0,1
Arteriographie und Interventionen	10 – 100
Computertomographische Untersuchungen	1 – 10
Mammographie (Parenchymdosis mSv pro Brust)	1 – 2

In der Tabelle sind mittlere Werte der effektiven Dosis für einige häufige Röntgenuntersuchungen für den „Standardpatienten“ (70 bis 75 kg Körpergewicht) zusammengestellt. Die tatsächlichen Dosiswerte können abhängig von Untersuchungsbedingungen und Patient bis zu einem Faktor 10 davon abweichen.



Bildmaterial:  
[www.ibiblio.org/hyperwar/AAF/USBS/AtomicEffects/img](http://www.ibiblio.org/hyperwar/AAF/USBS/AtomicEffects/img),  
[www.archives.gov/research/ww2/photos/](http://www.archives.gov/research/ww2/photos/)

## Strahlenwirkung

# Von der Dosis zum Risiko

**Albrecht M. Kellerer**

Noch bis in die 1940er-Jahre war man davon überzeugt, nur langanhaltende und intensive Expositionen mit ionisierender Strahlung seien ein Gesundheitsrisiko, geringe Dosen wirkten dagegen gesundheitsfördernd und „allgemein stimulierend“. Diese Einstellung hat sich grundlegend gewandelt, nicht zuletzt aufgrund der – auf tragische Weise erkaufen – Erkenntnisse über die gesundheitlichen Folgen der durch die Atombomben in Hiroshima und Nagasaki verursachten Strahlenexpositionen. Dennoch bleiben die Zusammenhänge zwischen Art und Dosis ionisierender Strahlung und ihren gesundheitsschädlichen Effekten komplex und – gerade hinsichtlich der Wirkung sehr kleiner Dosen – umstritten.

# Von der Dosis zum Risiko

**L**icht ist die Urform von Energie. Es besteht aus elektromagnetischen Quanten, die auch als Photonen bezeichnet werden. Photonen können – viele Größenordnungen über das enge Spektrum des sichtbaren Lichts hinaus – äußerst geringe, aber auch sehr hohe Energien haben. In der Atomphysik ist es üblich, die kleine Energieeinheit Elektronenvolt (eV) zu benutzen. Sie ist bequem, weil sie ungefähr der Energie einzelner chemischer Bindungen entspricht. Diese Energie reicht von Bruchteilen eines Elektronenvolt bis zu etwa 6 eV für eine starke organische Bindung, zum Beispiel die Bindung zwischen zwei Kohlenstoffatomen. Auch die Photonen des Sonnenlichtes haben Energien der gleichen Größenordnung, nämlich etwa 1,5 eV (rotes Licht) bis 3 eV (blaues Licht).

Elektromagnetische Wellen – neuerdings auch mit dem bedrohlich klingenden Begriff Elektromog bezeichnet – sind Felder aus Photonen vergleichsweise geringer Energie. Beispielsweise bestehen Mikrowellen aus Photonen mit nur Bruchteilen eines Milli-Elektronenvolt (meV), das heißt weniger als einem tausendstel Elektronenvolt. Solche elektromagnetische Strahlung wird, da sie keine Elektronen aus atomaren oder molekularen Bindungen löst, als *nicht ionisierend* bezeichnet. Sie dringt in die Materie ein, gibt gleichmäßig Energie an sie ab und kann sie bei genügender Intensität spürbar erwärmen. Ob elektromagnetische Wellen auch bei geringer Intensität schädliche Wirkungen – wenn nicht auf organisches Gewebe allgemein, so doch auf bestimmte Strukturen des menschlichen Körpers – ausüben können, bleibt umstritten. Angesichts der wachsenden Präsenz elektromagnetischer Felder ist dies

Gegenstand kritischer Aufmerksamkeit.

Anders verhält es sich mit *ionisierender Strahlung*: Hier bestehen keine Zweifel über die Risiken, sie sind greifbar und weitgehend verstanden, weil Photonen hoher Energie auf molekularer Ebene klar erkennbare physikalische Wirkungen hervorrufen. Die Photonen der Röntgen- und  $\gamma$ -Strahlung besitzen Energien von einigen zehn Kilo-Elektronenvolt (keV) bis zu mehreren Mega-Elektronenvolt (MeV) und können ohne Energieverlust in Materie eindringen. So haben zum Beispiel 1-MeV-Photonen im Gewebe eine mittlere freie Weglänge von mehreren Zentimetern. Kommt es jedoch zu einer Kollisionen mit einzelnen Elektronen aus dem Molekülverband, übertragen sie ihnen genügend Energie, um ihrerseits zahlreiche Ionisationen zu verursachen, das heißt weitere Elektronen freizusetzen. Röntgen- und  $\gamma$ -Strahlen wirken also dadurch, dass sie im Körper eine andere Art von ionisierender Strahlung, nämlich schnelle Elektronen, erzeugen. Ionisierende Strahlen – ob sie nun aus Photonen oder Elektronen bestehen – wirken daher letztlich durch die gleichen Mechanismen: Sie entfernen Elektronen aus dem Molekülverband und verursachen so die unterschiedlichsten molekularen Veränderungen. In der DNA von Keim- oder Körperzellen kann eine einzelne dieser Veränderungen – wenn auch mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit – eine Wirkungskette auslösen, die sich später als Erbschaden oder Krebserkrankung manifestiert.

## Die Besonderheit ionisierender Strahlung

Da Strahlung durch die auf den Körper übertragene Energie wirkt, ist die pro Masseneinheit übertragene Energie ein sinnvolles Maß der Exposition. Sie wird als *Energiedosis* oder einfach als *Dosis* bezeichnet. Mit den Einheiten des metrischen Systems, dem Joule (J) für die Energie und dem Kilogramm (kg) für die Masse, ist die Einheit der Energiedosis das Joule pro Kilogramm (J/kg).

Gleiche Energie auf unterschiedliche Weise übertragen hat sehr unterschiedliche Wirkungen. Als mechanische Energie genügen 5 J/kg, um einen Körper 50 Zentimeter gegen die Schwerkraft anzuheben oder ihn auf eine Geschwindigkeit von elf Stundenkilometern zu beschleunigen. Als thermische Energie, etwa durch Mikrowellen übertragen, bewirkt die selbe Dosis in Wasser oder organischem Gewebe nur eine unmerkliche Erwärmung um 0,02 °C. In Form ionisierender Strahlung dagegen sind 5 J/kg ohne medizinische Gegenmaßnahmen tödlich. Auf atomarer Ebene wird durch diese Dosis zwar nur ein einziges unter einer Milliarde Elektronen aus seinem Molekülverband herausgerissen. So gering dieser Bruchteil auch ist, entspricht er doch einigen hunderttausend Ionisationen pro Zelle – genug, um die Mehrzahl der Zellen zu töten und in den überlebenden Zellen zahlreiche reversible, aber auch einige bleibende DNA-Schäden zu verursachen.

Der Begriff Energiedosis wird allein auf Expositionen mit ionisierender Strahlung angewandt. Überdies wurde ein spezieller Name, nämlich Gray (Gy), für die Einheit J/kg eingeführt. Dies dient einerseits der sprachlichen Verkürzung, andererseits verdeutlicht es, dass von einer Exposition durch ionisierende Strahlung die Rede ist.

Bei der Diskussion des Strahlenrisikos geht es nicht um hohe Dosen von mehreren Gray, die akute Symptome der Strahlenkrankheit hervorrufen, sondern um geringe Expositionen von einigen Milli-Gray (mGy). Solche Dosen rufen keinerlei unmittelbar erkennbare Gesundheitsschäden hervor, verursachen jedoch in einzelnen Zellen Veränderungen im genetischen Material, der DNA. Die meisten dieser Veränderungen werden umgehend durch die für die Stabilität der DNA verantwortlichen zelleigenen Reparatursysteme wieder rückgängig gemacht. Zellen mit nicht reparablen DNA-Schäden werden zum überwiegenden Teil durch Apoptose – den programmierten Zelltod – eliminiert. Einige molekulare Verän-

derungen können jedoch bestehen bleiben und, wenn auch mit geringer Wahrscheinlichkeit, zu Erbschäden führen oder noch nach Jahren oder Jahrzehnten zur Auslösung von Krebserkrankungen beitragen. Solche Spätschäden sind

gemeint, wenn von Strahlenrisiko die Rede ist.

Die natürliche Strahlenexposition aus der Umwelt und aus der Radioaktivität im eigenen Körper beträgt etwa 1 mGy pro Jahr. Nicht eingerechnet ist hierbei die regio-

nal stark variierende Strahlenexposition der Lunge durch das radioaktive Gas Radon und seine Zerfallsprodukte. Eine vergleichbare durchschnittliche Dosis, also etwa 1 bis 2 mGy pro Jahr, erhalten die Menschen in den europäischen

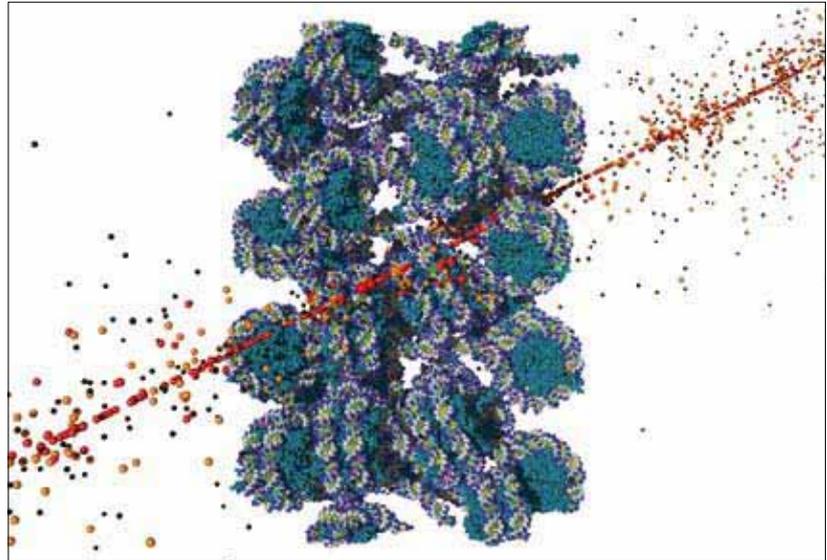
## Modelle für die Strahlen-Risikoanalyse

Wie und in welchem Umfang die Trägerin der Erbinformation, die DNA, durch Strahlung Schaden nimmt, wird in einer Arbeitsgruppe des GSF-Instituts für Strahlenschutz auf atomarer Ebene nachvollzogen.

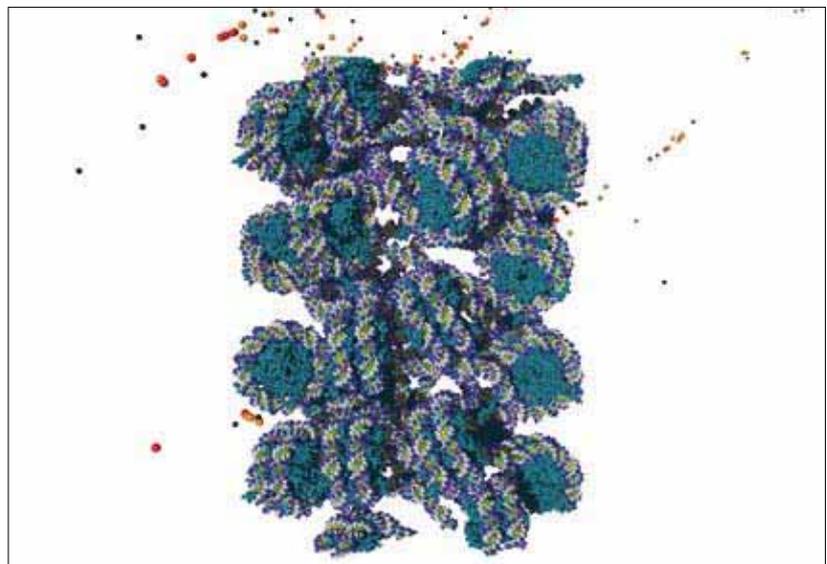
Mit Hilfe eines Simulationsmodells werden die entlang einer Strahlenspur innerhalb des Zellkerns entstehenden Veränderungen mit der räumlichen Struktur der DNA in Verbindung gebracht. Dabei werden Doppelhelix, Nukleosome, Chromatinfasern, -schleifen und -domänen sowie Chromosomen als wesentliche Organisationsebenen des Genoms berücksichtigt.

Trifft ein virtueller Strahlenschauer auf einen Zellkern, so lässt sich im Computer neben der Zahl der Doppelstrangbrüche auch die Größenverteilung der dabei gebildeten DNA-Fragmente errechnen. Diese Fragmentverteilung ist für den Vergleich mit gemessenen Werten zu strahleninduzierten Doppelstrangbrüchen von besonderer Bedeutung, da kleine Fragmente bei den Experimenten zumeist unberücksichtigt bleiben und dadurch die tatsächliche Entstehung von Doppelstrangbrüchen bei dicht ionisierender Strahlung erheblich unterschätzt wird. Darüber hinaus deuten die Modellergebnisse darauf hin, dass diese kleinen DNA-Fragmente eine besonders hohe biologische Wirksamkeit haben und vergleichsweise oft zur Teilungsfähigkeit der Zelle führen.

*Modellrechnungen:  
Werner Friedland*



**Dicht ionisierende Strahlung tritt mit DNA in Wechselwirkung: Die Modellrechnung zeigt die Spur von Ionisationen (rot), Anregungen (gelb) und hydratisierten Elektronen (schwarz) eines 6 MeV-Alpha-Teilchens beim Durchgang durch eine Chromatinfaser. Oft entstehen Doppelstrangbrüche der DNA an mehreren Stellen der Chromatinfaser (große Kugeln).**



**Locker ionisierende Strahlung tritt mit DNA in Wechselwirkung: Ein Elektron mit 10 keV Energie kann die Chromatinfaser durchdringen, ohne darin eine Wechselwirkung zu machen (Spur von links unten nach rechts oben). Die zur besseren Erkennbarkeit oberhalb einer abgeschnittenen Chromatinfaser dargestellte Spur zeigt die Wechselwirkungen eines Elektrons von 1,3 keV bis zur vollständigen Abbremsung. Strahlenschäden durch locker ionisierende Strahlung treten vornehmlich an solchen Bahnenden auf.**

# Von der Dosis zum Risiko

Ländern zusätzlich durch röntgen-diagnostische Verfahren.

Die Regeln des Strahlenschutzes schreiben vor, dass selbst kleine „kritische“ Gruppen der Bevölkerung – etwa in der Nähe von kerntechnischen Anlagen – keine zusätzlichen Expositionen erhalten sollen, die den Durchschnittswert der natürlichen Strahlenexposition übersteigen. Für berufliche Strahlenexposition gilt ein 20-fach höherer Grenzwert, das heißt 20 mGy pro Jahr. Zusätzlich gilt jedoch das Minimierungsgebot, also die Vorschrift, dass jede unnötige Exposition zu vermeiden ist.

## Locker und dicht ionisierende Strahlung

Unterschiedliche Arten ionisierender Strahlung haben unterschiedliche Reichweiten, das heißt sie dringen mehr oder weniger tief in den Körper ein. Röntgenstrahlung mit ihrer meist relativ geringen Photonenenergie (etwa 100 keV) wird im Körper stark abgeschwächt. Die höchste Dosis ergibt sich nahe der Körperoberfläche; bereits in wenigen Zentimetern Tiefe verringert sie sich. Energiereiche  $\gamma$ -Strahlen dagegen – zum Beispiel die 600-keV-Photonen von Cäsium-137 oder die 1,2-MeV-Photonen von Cobalt-60 – bewirken eine gleichmäßigere Dosisverteilung im Körper.

Die Dosisverteilung hängt auch davon ab, ob Strahlung von außen auf den Körper einfällt oder aus dem Körper selbst, das heißt aus inkorporierter Radioaktivität stammt. Für harte  $\gamma$ -Strahlung ist dieser Unterschied allerdings wenig bedeutsam. Psychologisch ist es zwar verständlich, dass – wie nach Tschernobyl – über die Nahrung aufgenommenes Cäsium-137 weit bedrohlicher erscheint als Cäsium-

137 in der Umwelt. Die Strahlung ist jedoch die selbe, ob sie im Körper oder außerhalb des Körpers freigesetzt wird. Letztlich ist die Dosis entscheidend.

Abgesehen von der unterschiedlichen Dosisverteilung wirken alle Arten ionisierender Strahlung durch den selben Mechanismus: Sie ionisieren, das heißt sie lösen Elektronen aus atomaren und molekularen Bindungen. Eine bestimmte Energiedosis erzeugt – unabhängig von der Art der ionisierenden Strahlung – etwa gleich viele Ionisationen. Insofern ist die Energiedosis ein sinnvolles Maß für die Strahlenexposition.

Dennoch besteht ein entscheidender Unterschied. Gleiche Energiedosen erzeugen zwar etwa gleich viele Ionisationen pro Masseneinheit des bestrahlten Gewebes, aber die mikroskopische Verteilung kann – wie auf der vorhergehenden Seite veranschaulicht – sehr unterschiedlich sein. Manche Strahlenarten erzeugen Ionisationen in mehr oder weniger zufälliger räumlicher Verteilung, andere dagegen in enger mikroskopischer Nachbarschaft. Man spricht von *locker ionisierender* beziehungsweise *dicht ionisierender* Strahlung. Würde jede Ionisation für sich allein mit gewisser Wahrscheinlichkeit die kritische Veränderung der DNA erzeugen, so wäre die mikroskopische Verteilung der Ionisationen belanglos. Tatsächlich erhöht sich jedoch die Wahrscheinlichkeit für nicht reparierbare DNA-Schäden beträchtlich, wenn Ionisationen eng benachbart sind. Die an sich sehr wirksamen, über Jahrmillionen der Evolution entwickelten Mechanismen der DNA-Reparatur beginnen dann zu versagen. Folgende Analogie kann das verdeutlichen: Enthält ein Buch einige hundert Druckfehler, so sind sie leicht korrigierbar; häufen sich jedoch alle in einem kurzen Abschnitt, so können sie unkorrigierbar werden. Da ein einzelnes dicht ionisierendes Teilchen in einer einzigen Zelle tausende von eng benachbarten Ionisationen verursacht, erzeugen selbst kleine Dosen kritische DNA-Schäden.

Schnelle Elektronen dagegen verursachen beim Durchgang durch

eine Zelle nur einige dutzend Ionisationen. Röntgen- und  $\gamma$ -Strahlung, ebenso wie die schnellen Elektronen selbst, werden deshalb als locker ionisierend bezeichnet. Auch sehr energiereiche, das heißt sehr schnelle schwere Teilchen sind locker ionisierend, insbesondere die aus dem Weltraum einfallenden Protonen, die einen Großteil der Strahlenexposition bei Flugreisen und in der Raumfahrt verursachen und deren Energie hunderte von MeV oder sogar einige Giga-Elektronenvolt (GeV) erreichen kann.

*Dicht ionisierend* dagegen sind schwere elektrisch geladene Teilchen, wenn sie – wie die aus radioaktivem Zerfall resultierende  $\alpha$ -Strahlung – Energien von nur wenigen MeV haben. Die Geschwindigkeit der Teilchen ist dann weit geringer als die energiereicherer Elektronen; sie stehen deshalb beim Durchgang durch Materie länger mit deren Elektronen in Wechselwirkung und ionisieren in viel engerem Abstand. Wegen ihrer geringen Reichweite, das heißt ihrem geringen Eindringungsvermögen in den menschlichen Körper, sind  $\alpha$ -Strahlen allerdings nur bedeutsam, wenn sie unmittelbar im Körper freigesetzt werden. Gerade dies ist jedoch beim Einatmen von Radon der Fall, das – in regional stark variierender Konzentration – dem Boden entweicht und sich in Innenräumen anreichern kann. Gemeinsam mit seinen Zerfallsprodukten verursacht Radon einen beträchtlichen Teil der natürlichen Strahlenbelastung. Zusätzlich zum Rauchen – und verstärkt bei Rauchern – erhöht es daher die Wahrscheinlichkeit für Lungenkrebs.

Ein wichtiger Sonderfall dicht ionisierender Strahlung sind energiereiche Neutronen. Als ungeladene Teilchen können sie ähnlich den energiereichen Photonen in den Körper eindringen. Dort setzen sie bei Kollisionen mit Atomkernen dicht ionisierende Teilchen, insbesondere Protonen, aber auch schwerere Atomkerne oder Fragmente von Atomkernen frei. Die Rückstoßprotonen erhalten im Mittel die Hälfte der Energie des stoßenden Neutrons. Am wirksamsten ist Neutronenstrahlung bei einer

## Pränatale Strahlenschäden

Etwa 30 der *in utero* bestrahlten Kinder von Frauen, die den Atombombenangriff überlebten, waren schwer geistig behindert. Später wurde deutlich, dass fast all diese Kinder zwischen der achten und 15. Woche der Schwangerschaft exponiert worden waren, also in der Periode, in der das Zentralnervensystem angelegt wird. Da diese Schäden zum Teil schon bei verhältnismäßig geringen Dosen auftraten, und überdies ein Trend zu einem verringerten Intelligenzquotienten nach Bestrahlung deutlich wurde, ist in dieser Periode der Schwangerschaft besonders strenger Strahlenschutz nötig.

Auch hinsichtlich erhöhter Krebsraten ist pränatale Exposition kritisch. In der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts wurden Frauen während der Schwangerschaft häufig und mit relativ hohen Dosen geröntgt. In der so genannten Oxford-Studie ergaben sich Hinweise auf erhöhte kindliche Leukämieraten und – weniger stark ausgeprägt – andere Krebsraten schon nach Dosen von etwa 10 mGy. Obwohl spätere Studien einem Teil dieser Ergebnisse widersprachen und auch die Untersuchung an den Kindern der Atombombenüberlebenden auf weniger ausgeprägte Risiken hindeuten, besteht kein Zweifel an der besonderen Strahlenempfindlichkeit *in utero*.

Energie von etwa 0,5 MeV; dann werden vorwiegend Protonen ausgelöst, die einerseits maximale Ionisationsdichte erreichen, andererseits gerade genügend Reichweite haben, um den Zellkern, der die DNA beinhaltet, zu durchqueren.

### Strahlenschäden – Akute Wirkungen und Spätschäden

Als Wilhelm Conrad Röntgen 1895 die X-Strahlen entdeckte, dachte er nicht an gesundheitliche Risiken, schützte sich aber unbewusst durch die Sorgfalt des Physikers, der im Interesse genauer Messungen sich selbst in einen bleiummantelten Kasten einschloss und die Strahlenquelle außerhalb ließ.

Anders war es, als wenig später versucht wurde, die geheimnisvolle Entdeckung technisch zu nutzen. Der amerikanische Erfinder und Industrielle Thomas Alva Edison (1847 – 1931) ließ seine Arbeiter Tag und Nacht ungeschützt mit den neuen Strahlen arbeiten. Erst nachdem einer seiner Assistenten einer erkennbar durch hohe Strahlenexposition verursachten Krebserkrankung zum Opfer fiel, stellte er alle Arbeiten ein.

Trotz erster Warnungen blieb man zunächst überzeugt, nur lang andauernde und intensive Strahlenexposition sei ein gesundheitliches Risiko, geringe Dosen ionisierender Strahlung dagegen seien sogar gesundheitsfördernd und „allgemein stimulierend“. Die erste Generation der Radiologen zahlte

einen hohen Preis für den naiven Optimismus, mit dem jahrelang Röntgenuntersuchungen ohne Schutz und Abschirmung betrieben wurden: Viele von ihnen starben an Leukämie, ein Schicksal, das auch Marie Curie und ihre Tochter Irene Joliot Curie traf. Beide waren jahrelang mit Radium und Polonium umgegangen und hatten auf den Schlachtfeldern des 1. Weltkrieges ungeschützt mit selbst entwickelten mobilen Röntgengeräten zahllose Verletzte untersucht.

Die schreckliche Wende brachte 50 Jahre nach Röntgens Entdeckung der Abwurf der Atombomben auf Hiroshima und Nagasaki. Druck und Hitze töteten etwa 200.000 Menschen. Aber auch die über Sekunden und Minuten andauernde  $\gamma$ -Strahlung aus der Bombe und der sie umgebenden Atmosphäre forderte zahlreiche Opfer; viele der zunächst Überlebenden starben während der folgenden Tage und Wochen an akuter Strahlenkrankheit, an der Zerstörung des Darm- und Magentraktes oder später des blutbildenden Systems.

Man wusste bereits damals, dass  $\gamma$ -Strahlen Mutationen hervorrufen können, und befürchtete deshalb vor allem Erbschäden bei den Nachkommen der Überlebenden. Diese Erwartung war wohlbegründet. Allerdings wurde bis heute – trotz aufwändiger statistischer Analysen – unter den Nachkommen der Atombombenüberlebenden keine erhöhte Rate von Erbschäden beobachtet. Dies bedeutet aber nicht, dass es keine solche Erhöhung gibt, sie war lediglich nicht ausgeprägt

genug, um deutlich zu werden.

Was dagegen heute als hauptsächliches Risiko ionisierender Strahlen erkannt ist, nämlich eine Erhöhung der Krebsraten durch verhältnismäßig geringe Dosen, wurde zunächst nicht erwartet oder auch nur in Betracht gezogen. 1949, als in Japan die öffentliche Diskussion gesundheitlicher Folgen der Atombombenexplosionen noch verboten war, berichtete ein japanischer Arzt über gehäuft auftretende Todesfälle durch Leukämie in Hiroshima und Nagasaki. Dies war der Beginn eines langen und zunächst unsicheren Prozesses, der zum heutigen Wissen über die Risiken ionisierender Strahlung führte.

Bevor diese Erkenntnisse genauer dargestellt werden, sind einige grundlegende Resultate der experimentellen Strahlenbiologie zu erörtern. Sie machen es leichter, die epidemiologischen Ergebnisse aus Hiroshima und Nagasaki zu einem Gesamtbild zusammenzufügen.

### Mutationen und Chromosomenschäden

Hohe Dosen ionisierender Strahlung können – wie an Zellkulturen eingehend untersucht und wie täglich an Tausenden von Krebspatienten medizinisch genutzt – Zellen inaktivieren, das heißt ihre Vermehrung stoppen und sie schließlich absterben lassen. Im Hinblick auf kleine Dosen ist Zelltod jedoch unkritisch: Jedes Gewebe kann einen gewissen Grad von Zellverlust ausgleichen. Eine Gefahr ist fehlerhaft oder nicht

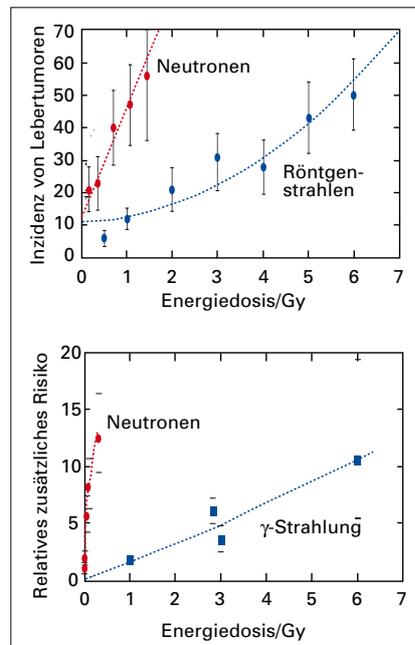
# Von der Dosis zum Risiko

reparierte DNA. Sie kann zum Verlust der Wachstumskontrolle, zu un-gehemmter Vermehrung der Zellen und schließlich zur Entstehung von Tumoren führen.

Erst zu Beginn der 1970er-Jahre wurden die grundlegenden Untersuchungen zur hohen Wirkung kleiner Dosen energiereicher Neutronen durchgeführt. Nachstehende Abbildung gibt links die Dosisabhängigkeiten für strahleninduzierte rosa Mutationen in den Zellen der Staubfäden der Pflanze *Tradescantia* wieder, rechts die Abhängigkeiten für die Erzeugung von Chromosomenschäden in Lymphozyten des menschlichen Blutes. Beide Arten von Schäden entstehen durch falsch reparierte DNA-Brüche. Wie in zahlreichen späteren

wirksamer.

Insgesamt bestätigte sich in einer Fülle strahlenbiologischer Untersuchungen, dass für locker ionisierende Strahlung die Abhängigkeiten zunächst flach verlaufen, bei höheren Dosen jedoch steiler werden. Diese *sigmoiden* Dosisabhängigkeiten zeigen, dass einzelne ionisierende Teilchen wenig wirksam sind und erst bei höheren Dosen das Zusammenspiel mehrerer Absorptionereignisse die Wirksamkeit erhöht. Bestätigt wird diese Vorstellung auch durch zahlreiche Untersuchungen, die zeigen, dass sich bei geringer Dosisleistung, also bei langsamer Zufuhr der Dosis über einen längeren Zeitraum, die Dosiswirkungsbeziehung so abflacht, dass sie auch noch bei höheren Dosen der anfänglichen linearen Abhängigkeit entspricht. Die dicht ionisierenden energiereichen Neutronen dagegen erzeugen eng benachbarte Schäden schon in einzelnen Teilchenspuren, das heißt bereits bei kleinsten Dosen. Entsprechend ergibt sich eine steile *lineare* Dosisabhängigkeit, die wenig oder gar nicht von der Dosisleistung abhängt.

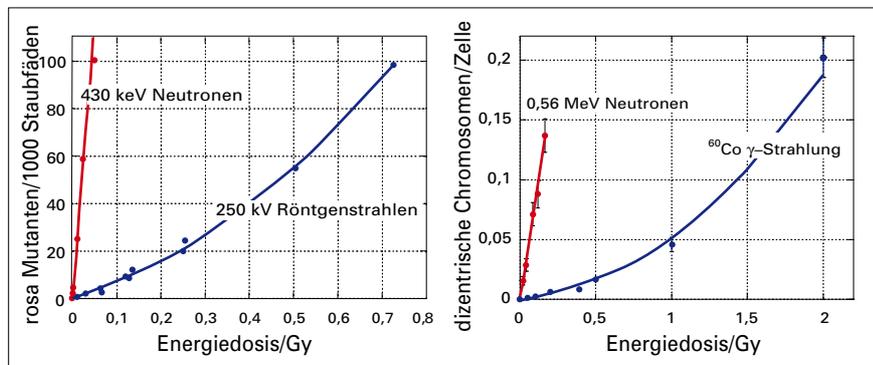


(Quellen: Ullrich et al. 1983, Wolf et al. 2000)

**Dosisabhängigkeiten für die Häufigkeit von Tumoren in Tiermodellen.** Das obere Diagramm zeigt die Induktion von Lebertumoren in Mäusen durch Spaltneutronen (schwarze Kurve) und 250 kV Röntgenstrahlung (blaue Kurve). Im unteren Diagramm ist die Mortalität durch Tumoren in Ratten nach Bestrahlung mit Spaltneutronen (schwarze Kurve) und  $\gamma$ -Strahlung (blaue Kurve) dargestellt. Aufgetragen ist das zusätzliche relative Risiko in Abhängigkeit von der Dosis.

durchgeführt, um die Wirkung auf einzelne Zellen mit der auf den gesamten Organismus zu vergleichen und so eine bessere Extrapolation auf den Menschen zu ermöglichen. Obenstehende Abbildung zeigt die Dosisabhängigkeiten für die Häufigkeit von Lebertumoren in bestrahlten Mäusen und für letale Tumoren in Ratten. In beiden Diagrammen beziehen sich die steilen Dosisabhängigkeiten auf Spaltneutronen, die weniger steil verlaufenden, dagegen auf die Röntgen- bzw.  $\gamma$ -Strahlung.

Die Krebsraten erhöhen sich also mit der Dosis auf ähnliche Weise wie Mutationen oder chromosomale Veränderungen. Bei kleinen Dosen setzt allerdings die Statistik den Beobachtungen eine Grenze. In der Studie an Mäusen war die Wirkung kleiner Dosen von Röntgenstrahlung zu gering, um die RBW der Neutronen überhaupt zahlen-



(Quellen: Sparrow et al. 1972, Schmid et al. 2000)

**Die unterschiedlichen Dosisabhängigkeiten bei dicht ionisierender Strahlung (Neutronen, rote Kurven) und locker ionisierender Strahlung (Röntgenstrahlung oder  $\gamma$ -Strahlung, blaue Kurven):** Im linken Diagramm ist die Erzeugung von rosa Mutationen in der Pflanze *Tradescantia* dargestellt. Das rechte Diagramm zeigt die Dosisabhängigkeiten für dizen-trische Chromosomen in Lymphozyten des menschlichen Blutes.

Experimenten zeigte sich hier die hohe relative biologische Wirksamkeit (RBW) der Neutronen. Gegenüber den Röntgenstrahlen erwiesen sie sich bei kleinen Dosen etwa 40-fach wirksamer, gegenüber den noch lockerer ionisierenden  $\gamma$ -Strahlen nahezu 80-mal

## Krebs durch Strahlung

Es ist fraglich, ob die Dosisabhängigkeiten für zelluläre Schäden denen für strahleninduzierte Krebserkrankungen entsprechen. In der Vergangenheit wurden Untersuchungen mit Mäusen und Ratten

mäßig anzugeben. Bei der großen französischen Studie an Ratten betrug sie etwa 50. Eine Ausweitung der Experimente war – auch in der damaligen Zeit, als Tierversuche noch weniger kritisch gesehen wurden – schwer zu begründen, da eine quantitative Übersetzung der Ergebnisse aus Tierversuchen in Risikobestimmung für den Menschen ohnehin nicht möglich ist. Wirklich belastbare Risikoabschätzungen lassen sich nur aus direkter Erfahrung ableiten. Solche Erfahrung aber ergab sich auf tragische Weise nach der Zerstörung Hiroshimas und Nagasakis.

### Erhöhung der Krebsraten bei Atombombenüberlebenden

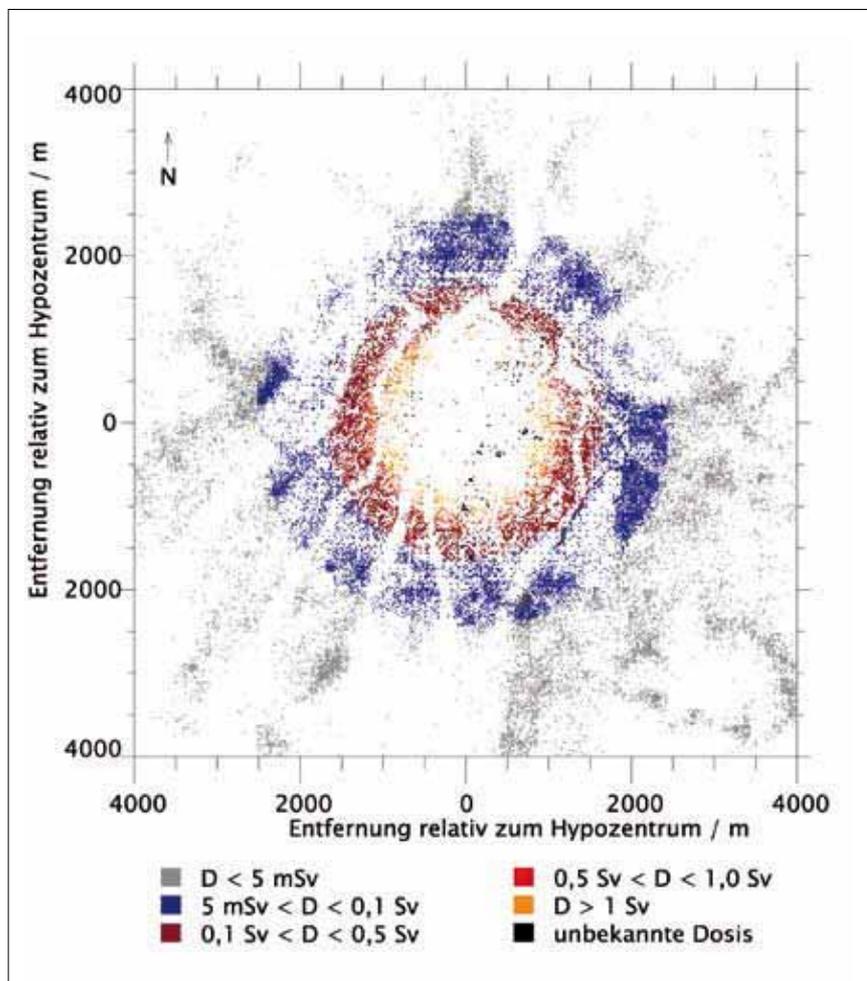
Als die erhöhte Häufigkeit von Leukämien unter den Atombombenüberlebenden deutlich geworden war, erkannte man die Notwendigkeit einer systematischen Studie, um auch andere mögliche Gesundheitsschäden aufzudecken. Insbesondere wurde schon damals die Frage gestellt, ob alle Krebserkrankungen in ähnlicher Weise vermehrt auftreten. 1950 wurde daher eine große Studie mit über 120.000 Überlebenden aus Hiroshima und Nagasaki begonnen. Die Kohorte dieser Überlebenden wurde *Life Span Study Cohort*, kurz *LSS-Kohorte*, genannt. Für Personen der *LSS-Kohorte* sollten über die folgenden Jahrzehnte die Überlebensdaten und Todesursachen bestimmt und statistisch analysiert werden. Überdies wurden in Hiroshima und Nagasaki Tumorregister eingerichtet, um so die Daten der Krebsmortalität durch die der Krebsinzidenz zu ergänzen. Die Beobachtungen in Hiroshima und Nagasaki wurden zur größten jemals durchgeführten epidemiologischen Studie. Wichtige Aspekte der – vom Forschungszentrum für Strahlenwirkungen (*REF*) in Hiroshima in detaillierten Berichten veröffentlichten – Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst.

Das nebenstehende Diagramm gibt einen Eindruck von der *LSS-Kohorte*. Es stellt jeden Überleben-

den von Hiroshima durch einen Punkt dar, und zwar an dem Ort, an dem er sich zum Zeitpunkt der Explosion befand. Die Farbkodierung deutet die für die einzelnen Personen aufgrund unterschiedlicher Parameter – Entfernung, Abschirmung durch Gebäude, Geschlecht, Körpergewicht und Orientierung – geschätzte Dosis an. Man erkennt die geringe Überlebensrate bei kleinen Abständen vom Hypozentrum der Explosion, die in etwas mehr als 600 Metern Höhe erfolgte.

Erhöhte Erkrankungsdaten an Leukämie wurden schon früh deutlich. Die Punkte im oberen Diagramm auf der nächsten Seite geben die Anzahl der Fälle wieder, die in der *LSS-Kohorte* im Laufe der

Jahre auftraten. Es gibt bis heute keine molekularen „Marker“ und auch keine klinischen Erkennungszeichen, die es erlauben, eine Leukämie als ‚strahleninduziert‘ oder als ‚spontan‘ zu klassifizieren. Auch aus grundsätzlichen Erwägungen wäre eine solche Trennung schwierig: Krebs ist das Ergebnis einer komplexen, durch vielerlei Faktoren verursachten Störung, und Strahlung ist nur einer dieser Faktoren. Ihr Einfluss kann daher nur als statistische Korrelation zwischen der Dosis in verschiedenen Untergruppen und den in diesen Gruppen beobachteten Krebsraten erkannt werden. Sorgfältige Analysen dieser Art wurden in Japan durchgeführt. Die zusätzlichen Leukämiefälle sind



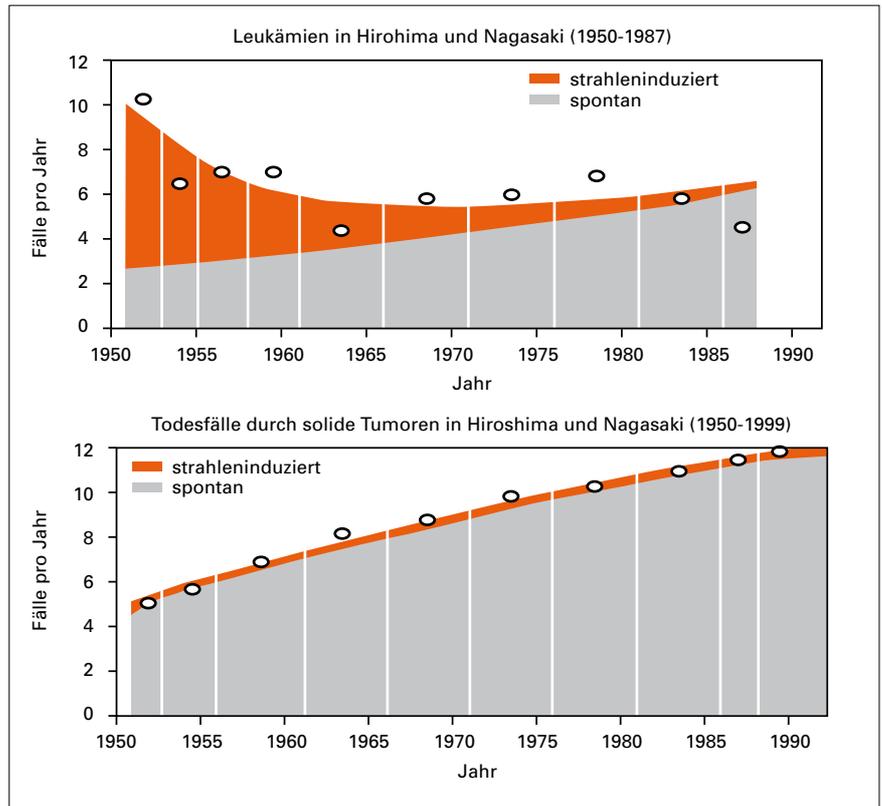
Ein aus Daten von *REF* abgeleitetes Punktdiagramm der Position der Atombombenüberlebenden zum Zeitpunkt der Explosion in Hiroshima. Jeder Punkt repräsentiert eine Person aus der *life span study* – Kohorte (*LSS*), das heißt der Gruppe von etwa 80.000 Überlebenden aus Hiroshima, deren Gesundheitsstatus beobachtet wurde und wird. Die Farbkodierung deutet die Höhe der Dosis an. Nahe der Explosion (< 1 km) überlebten nur wenige. Aus dem Diagramm lässt sich die Topographie der Stadt erkennen mit den Flussarmen, die zum südlich gelegenen Hafen führen.

# Von der Dosis zum Risiko

als rote Fläche dargestellt, die normalerweise, das heißt ohne Bestrahlung erwarteten Fälle als graue Fläche.

Die höchste zusätzliche Rate ergab sich in den ersten Jahren, später verringerte sie sich, und schließlich wurden keine deutlich erhöhten Raten mehr beobachtet. Das ständige Anwachsen der erwarteten Fälle entspricht der auch normalerweise mit dem Alter der LSS-Kohorte zunehmenden Leukämierate. 1987 waren noch ungefähr die Hälfte der ursprünglichen Mitglieder der Kohorte am Leben. Der wesentliche Punkt ist, dass ein bedeutender Teil aller Leukämiefälle – nämlich 75 von insgesamt 231 Fällen, also etwa ein Drittel – in dem halben Jahrhundert nach den Atombombenexplosionen durch die Strahlung bedingt war. Dabei ist zu bedenken, dass nur ein kleiner Teil der Atombombenüberlebenden eine hohe Dosis erhalten hatte.

Bei der Mortalität durch andere Krebsarten, das heißt durch solide Tumoren, wurde für eine Reihe von Jahren nach Beginn der Untersuchungen keine entsprechende Erhöhung beobachtet. Als später doch noch eine Zunahme deutlich wurde, erwies sie sich prozentual weit geringer als die Zunahme der Leukämierate. Das untere Diagramm der Abbildung gibt die Zahlen der Todesfälle durch solide Tumoren wieder. Es zeigt, dass über die gesamte Beobachtungsperiode summiert nur etwa vier Prozent der Fälle der Strahlenbelastung zuzuschreiben sind. Bis 1990 entsprach dies etwa 315 von insgesamt 7.558 Krebstodesfällen. Während die relative Erhöhung der zusätzlichen Todesfälle durch solide Tumoren wesentlich geringer ist als die für Leukämien, ist die absolute Zahl also mehr als viermal höher.



**Häufigkeit von Leukämien und Sterblichkeit durch solide Tumoren in Hiroshima und Nagasaki. Das obere Diagramm zeigt die jährliche Anzahl von Leukämiefällen unter den Atombombenüberlebenden im Zeitraum 1950 - 1987. Die graue Fläche stellt die Anzahl dar, die nach der statistischen Analyse auch ohne die Strahlenexposition aufgetreten wäre. Die rote Fläche gibt die durch die Bestrahlung verursachte zusätzliche Rate wieder. Gleichmaßen ist im unteren Diagramm die Sterblichkeit durch solide Tumoren in den Jahren 1950 - 1990 dargestellt. Für die Zeit vor 1950 fehlen die nötigen Daten.**

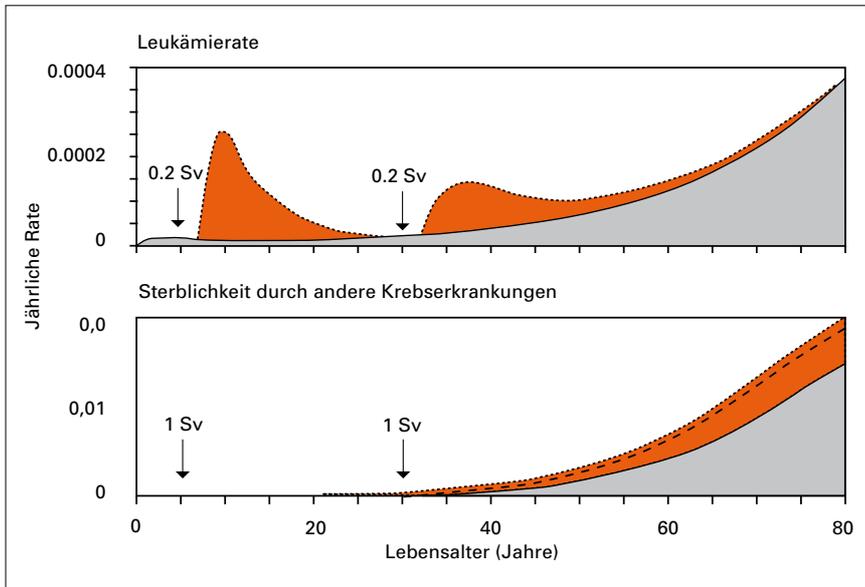
Da die Erhöhung der Krebsrate für solide Tumoren – im Gegensatz zu den Leukämien – weiterbesteht, wird das Verhältnis sogar noch weiter ansteigen.

An jedem Jahrestag des Infernos von 1945 werden in Hiroshima die Namen neu verstorbener „Hibakusha“, das heißt derer, die die Bombe überlebt hatten, in die Gedenkliste der Opfer eingetragen. In 60 Jahren ist die Zahl dieser Namen auf mehr als 100.000 gestiegen. Alle diese Menschen waren Opfer der Atombombenangriffe, die ihr Leben lang unter dem Schrecken des damals Erlebten und dem sozialen Stigma, das sie seither begleitete, litten. Dass zusätzlich zu der gewaltigen Anzahl der sofort und in den ersten Wochen und Monaten Gestorbenen heute mehr als 100.000 Todesfälle als Spätfolge der Atombomben betrachtet werden, ist daher durchaus verständlich. Ein gro-

ßes Missverständnis ist es dennoch und gleichzeitig ein Symptom für die Kluft zwischen der Bevölkerung und der Arbeit der Wissenschaftler bei RERF. Den Preis für das mangelnde Verständnis der wirklichen gesundheitlichen Gefährdung zahlen auch die Hibakusha, die selbst heute noch vielfach wie Aussätzige behandelt werden.

Dass tatsächlich in der LSS-Kohorte also bis 1990 nicht mehr als 75 Leukämien und 315 andere Krebstodesfälle unter insgesamt etwa 7.800 Krebstodesfällen der Strahlenexposition zuzuschreiben sind, könnte den Eindruck erwecken, die Ergebnisse seien statistisch wenig gesichert. Tatsächlich sind die erhöhten Krebsraten jedoch in der Untergruppe der relativ hoch bestrahlten Überlebenden deutlich ausgeprägt. So sind in der Untergruppe der etwa 5.500 Überlebenden mit einer Dosis von mehr

(Quelle: Kellerer 2001, basierend auf Daten von RERF).



**Altersabhängigkeit der Leukämierate und der Sterblichkeit durch andere Krebserkrankungen unter den Atombombenüberlebenden. Die grauen Flächen stellen die Normalraten dar und die roten Flächen die durch Bestrahlung (entweder im Alter von 5 Jahren oder von 30 Jahren) verursachten Erhöhungen. Für Leukämie sind die Abhängigkeiten nach Bestrahlung im Kindesalter oder im Alter von 30 Jahren sehr unterschiedlich. Im unteren Diagramm bezieht sich die punktierte Kurve auf Bestrahlung im Alter von 5 Jahren, die gestrichelte Kurve auf eine Bestrahlung im Alter von 30 Jahren.**

als 0,5 Gy etwa 15 Prozent aller Krebsfälle auf die Strahlung zurückzuführen, und das bezieht sich auf fast alle Organe.

Auch die Abhängigkeiten der erhöhten Krebsraten vom Alter bei Exposition und vom erreichten Alter sind aus den Beobachtungen deutlich geworden. Das obere Diagramm der oben stehenden Abbildung bezieht sich auf Leukämien. Die durchgezogene Kurve gibt die normale Leukämie-Inzidenz wieder, das heißt die mit dem Alter stark ansteigende jährliche Wahrscheinlichkeit, an Leukämie zu erkranken. Die gestrichelte Kurve stellt die – aus den Beobachtungen an den Atombombenüberlebenden erschlossenen – erhöhten Raten für Personen dar, die entweder im Alter von fünf Jahren oder 30 Jahren mit 0,2 Sv exponiert worden waren. Die Raten sind wellenförmig erhöht mit nur wenigen Jahren Latenzzeit, mit steilerem Gipfel für die Strahlenexposition im Kindesalter. Integriert über die Lebenszeit ergibt sich jedoch etwa die gleiche Zusatzwahrscheinlichkeit nach Exposition im Kindesalter oder im mittleren Alter. Wegen der sehr viel geringeren Spontanrate im Kindes-

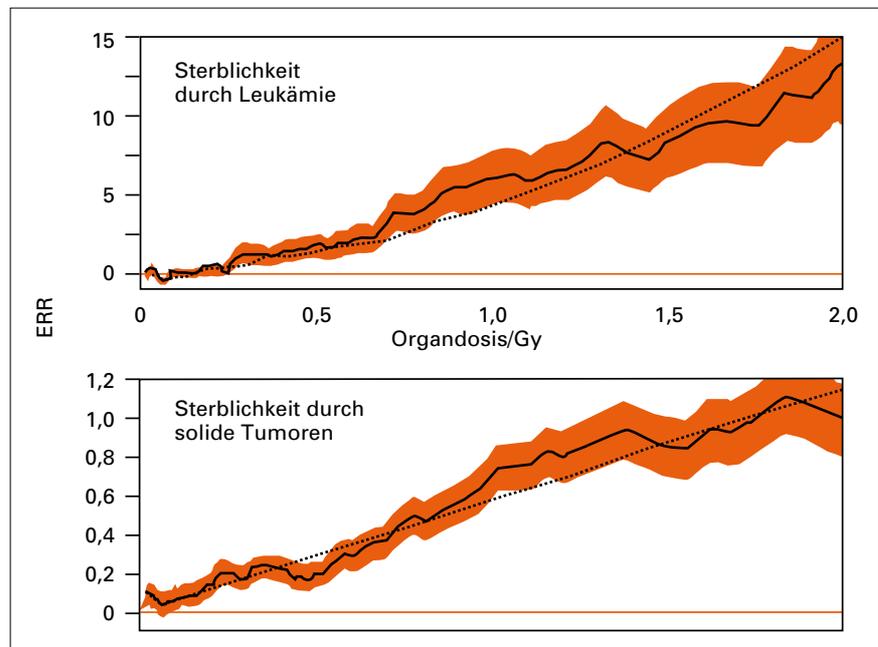
und Jugendalter werden die strahlenbedingten Erhöhungen jedoch sehr viel deutlicher. Dies ist der Grund dafür, dass eine erhöhte Ra-

te kindlicher Leukämien das erste und deutlichste Anzeichen nach Strahlenexposition einer Bevölkerung ist.

Das untere Diagramm der Abbildung bezieht sich auf die Sterblichkeit durch solide Tumoren. Da die relative Erhöhung geringer ist als für Leukämien, ist auf die höhere Dosis von 1 Gy Bezug genommen. Die Latenzzeiten sind länger als für Leukämien und die Erhöhungen bestehen, anders als bei Leukämien, bis ins hohe Alter. Für Exposition in jüngerem Alter ist das über die gesamte Lebenszeit integrierte Risiko höher als für eine Bestrahlung im höheren Alter. Die Abhängigkeiten sind zwar nur mit beträchtlicher statistischer Unsicherheit anzugeben, die wichtigsten Charakteristika werden jedoch deutlich.

## Dosis und Wirkung

In der nachfolgenden Abbildung ist für Leukämie und andere Krebserkrankungen die Abhängigkeit des zusätzlichen relativen Risikos, *ERR* (*excess relative risk*), von der Dosis



**Das zusätzliche relative Risiko, *ERR* (*excess relative risk*), für Leukämie und Sterblichkeit durch andere Krebserkrankungen in Abhängigkeit von der Dosis. Die durchgezeichneten Linien geben die Werte für die jeweilige Dosis an, die grauen Bänder den Standardfehler. Die gestrichelten Kurven geben, gemäß der üblichen Analyse, eine linear-quadratische Anpassung für die Leukämien (oben) und eine lineare Anpassung für die Sterblichkeit durch andere Krebserkrankungen (unten) wieder.**

# Von der Dosis zum Risiko

bei höherem Alter angesehen werden. Sie sind auch ein Durchschnitt des höheren *relativen* zusätzlichen Risikos für Frauen und des nur etwa halb so hohen Wertes für Männer. Da – von Brustkrebs abgesehen – die altersabhängige Krebssterblichkeit bei Männern etwa doppelt so hoch ist wie bei Frauen, ist das *absolute* zusätzliche Risiko

lenexposition und die dadurch erhöhten Krebsraten geworden. Im Strahlenschutz geht es jedoch um Dosen weit unterhalb des Bereiches, in dem Erhöhungen sichtbar wurden. Das Risiko kleiner Dosen lässt sich daher zwar abschätzen, aber weder zeigen noch beweisen. Über Unsichtbares lässt sich gut streiten, insbesondere wenn es um

## Informationen aus anderen Quellen

Die Beobachtungen an den Atombombenüberlebenden sind zur wichtigsten Grundlage der Risikoschätzungen geworden. Untersuchungen an Personengruppen, die aus medizinischen Gründen bestrahlt wurden, sind ebenfalls wichtig, aber aus statistischen Gründen weniger aussagekräftig.

Zahlreiche Untersuchungen wurden an beruflich strahlenexponierten Personen durchgeführt. Leuchtziffermalerinnen in den USA und in England inkorporierten in den ersten Jahrzehnten des vergangenen Jahrhunderts – bevor über beruflichen Strahlenschutz überhaupt nachgedacht wurde – große Aktivitäten von Radium, weil sie die Pinsel mit radiumhaltiger Farbe mit dem Mund spitzten. Viele von ihnen starben später an Knochenkrebs, aber die inkorporierten Dosen waren so hoch, dass sie wenig Information liefern über die Risiken von geringen Expositionen, die heute – etwa bei Unfällen – in Frage kommen.

In einer großen Studie über Nukleararbeiter in westlichen Ländern wurden neuerdings dosisabhängige Erhöhungen der Krebshäufigkeit und -sterblichkeit gefunden. Allerdings ist die statistische Unsicherheit dieser Beobachtungen weit größer als für die aus den

japanischen Daten abgeleiteten Risikokoeffizienten, und der mögliche Einfluss des Rauchens ist kritisch für die Ergebnisse.

Durch den militärischen Nuklearkomplex Mayak im Südrussland wurde in den Anfangsjahren des Kalten Krieges die Bevölkerung am radioaktiv verseuchten Fluss Tschernobyl und die Arbeiter der Betriebe extrem hohen Dosen ausgesetzt. Die noch laufenden Untersuchungen zu den gesundheitlichen Folgen werden wichtige Erkenntnisse liefern.

**Leuchtziffermalerinnen in den 20er-Jahren des letzten Jahrhunderts.**



dargestellt. Die orangefarbenen Bänder geben die geschätzten Werte und ihren Standardfehler wieder, wie sie sich direkt aus den Daten ohne Annahme einer bestimmten Art der Dosisabhängigkeit ergeben. Die gestrichelten Linien entsprechen der üblichen linear-quadratischen Anpassung für die Leukämien und der linearen Anpassung für andere Krebserkrankungen. Insgesamt ergibt sich trotz des nicht geringen Standardfehlers ein gutes Bild der Dosisabhängigkeiten.

Bei den Berechnungen werden zahlreiche Faktoren, wie zum Beispiel Geschlecht, Alter bei Exposition und erreichtes Alter, berücksichtigt. Die Daten in der Abbildung beziehen sich auf ein Alter von 30 Jahren bei Bestrahlung und können als Mittelwerte zwischen den höheren Werten bei geringerem Alter und den geringeren Werten

für Frauen und Männer etwa gleich hoch.

Die Mehrzahl der Atombombenüberlebenden erhielt Dosen, die deutlich niedriger als 0,2 Sv waren. Für diese Personen lässt sich die erhöhte Krebswahrscheinlichkeit nicht oder nur mit sehr großer Unsicherheit bestimmen, da die zusätzliche Rate gegenüber der ebenfalls nicht genau ermittelten spontanen Rate gering ist. Risikoschätzungen für kleine Dosen beruhen daher auf einer Rückextrapolation in den Bereich der kleinen Dosen.

## Risikoschätzung – Extrapolation in die Grauzone

Die Daten der Atombombenüberlebenden sind zur gesicherten Grundlage unseres Wissens über Strah-

lenexposition und die dadurch erhöhten Krebsraten geworden. Im Strahlenschutz geht es jedoch um Dosen weit unterhalb des Bereiches, in dem Erhöhungen sichtbar wurden. Das Risiko kleiner Dosen lässt sich daher zwar abschätzen, aber weder zeigen noch beweisen. Über Unsichtbares lässt sich gut streiten, insbesondere wenn es um

ein Thema geht, das – mit weitreichenden Assoziationen und Implikationen belastet – zum Symbol geworden ist für den Gebrauch und Missbrauch nuklearer Technologie. Unabhängig von den Kontroversen über das Strahlenrisiko muss sich der Strahlenschutz jedoch auf plausible Extrapolation des gesicherten Wissens stützen.

Das zentrale, sehr allgemeine Postulat bei der Risikoabschätzung wird als linear *no-threshold*-Konzept, kurz *LNT*, bezeichnet. Es besagt, dass auch bei sehr kleinen Dosen – in der Grauzone des epidemiologisch nicht Beobachtbaren – das Risiko proportional zur Dosis zunimmt, also kein Schwellenwert besteht, unterhalb dessen die Strahlenexposition keinerlei Wirkung hat.

Angesichts der statistischen Unsicherheit bei der Bestimmung der

Dosiswirkungsbeziehung wurde anfänglich für solide Tumoren Linearität bis zu hohen Dosen als einfachster Ansatz postuliert. Man erhielt so für  $\gamma$ -Strahlung aus den Daten der Atombombenüberlebenden eine relative Erhöhung der Raten um fünf Prozent pro 0,1 Gy. Da andererseits die strahlenbiologische Erfahrung zeigt, dass locker ionisierende Strahlung bei geringer Dosis oder geringer Dosisleistung weniger wirksam ist als bei hohen, kurzzeitigen Dosen, nimmt die Internationale Kommission für Strahlenschutz (ICRP) seit längerem an, dass das tatsächliche Risiko bei kleinen Dosen oder niedrigen Dosisleistungen um etwa den Faktor 2 geringer ist – man spricht vom *DDREF* (*dose and dose rate effect factor*). Diese Annahme eines aus den epidemiologischen Daten nicht erkennbaren und nur strahlenbiologisch begründeten Reduktionsfaktors blieb umstritten. Andererseits deutet sich dieser Reduktionsfaktor in neueren Analysen nun auch in den Daten der Atombombenüberlebenden an und hat damit an Plausibilität gewonnen. Gemittelt für Leukämie und für andere Krebserkrankungen ergibt sich so ein zusätzliches relatives Risiko von 0,25 pro Gy. Veranschaulicht heißt das, dass in einer Bevölkerung, in der normalerweise 40 von 100 Menschen im Laufe ihres Lebens an Krebs erkranken, nach einer Exposition mit 100 mGy  $\gamma$ -Strahlung 41 statt der erwarteten 40 Krebsfälle auftreten.

Da 0,1 Gy etwa der über die Lebenszeit summierten natürlichen Strahlenexposition entsprechen, könnten zirka zwei Prozent aller Krebserkrankungen durch die natürliche Strahlenexposition bedingt sein. Natürliche Radioaktivität kann daher nicht als belanglos abgetan werden, auch wenn sie deshalb nicht als bedrohlich angesehen werden muss. Wo es mit vertretbarem Aufwand möglich ist – zum Beispiel bei hohen Radonkonzentrationen – wird man die Exposition vermindern. Andererseits ist zu bedenken, dass Strahlung von Anfang an das Leben auf der Erde begleitet hat und darüber hinaus auch als Antriebskraft der Evolution wirkte.

Ferner ist es ein Gebot der Vernunft, Risiken mit unbeobachtbaren Folgen nicht mit größerem Aufwand zu begegnen als solchen von erkennbar schwerwiegendem Ausmaß.

## Ungewissheiten der Risikoschätzung

Welche Ungewissheiten der Risikoschätzung werden diskutiert? Ein Aspekt sind komplexe und teilweise noch wenig verstandene Wirkungen kleiner Dosen, die an Zellkulturen beobachtet wurden und möglicherweise auch im Organismus eine Rolle spielen. Beispiele hierfür sind der *bystander effect*, der Einfluss von unmittelbar durch geladene Teilchen getroffenen Zellen auf Nachbarzellen, sowie die Apoptose (Induktion von programmiertem Zelltod) oder *induced repair* (Aktivierung molekularer Reparatursysteme durch kleine Dosen). Es ist bisher völlig unklar, ob und – wenn ja – wie diese oder ähnliche Prozesse die Dosiswirkungsbeziehung bei kleinen Dosen beeinflussen können. Trotzdem wird die bloße Existenz dieser Mechanismen gern als Argument gegen jede Extrapolation der epidemiologischen Beobachtungen in den Bereich der kleinen Dosen – also gegen das LNT-Konzept – herangezogen.

Gezielte Kritik bezieht sich auf leichter entscheidbare Fragen. Der wichtigste Einwand ist, dass der Risikoeffizient  $ERR/Gy = 0,25$  für Krebs, obwohl er auf den Daten für  $\gamma$ -Strahlung beruht, auch auf die etwas dichter ionisierende Röntgenstrahlung angewandt wird. Da strahlenbiologische Erfahrung zeigt, dass konventionelle Röntgenstrahlen bei kleinen Dosen etwa doppelt so wirksam sind wie  $\gamma$ -Strahlen, wird für eine Verdopplung der Risikoschätzung und deshalb eine Verringerung der zulässigen Dosen – zumindest für das Personal in der Röntgendiagnostik – plädiert.

Dagegen lässt sich einwenden, dass die Gesamtheit der allerdings stark variierenden epidemiologischen Studien an mit Röntgenstrahlung untersuchten oder behandelten Patienten auf niedrigere Wer-

te des Risikoeffizienten hinweist, als sie sich aus der Beobachtung der Atombombenüberlebenden ergeben. Diese überraschende Divergenz wird als Rechtfertigung angesehen, den aus den japanischen Daten abgeleiteten Risikoeffizienten gleichermaßen auf  $\gamma$ - und auf Röntgenstrahlen zu beziehen.

Tatsächlich gibt es eine mögliche Erklärung dafür, dass an den Atombombenüberlebenden etwas höhere Risiken beobachtet wurden als in anderen Studien: Der aus den japanischen Daten abgeleitete Wert des Risikoeffizienten für  $\gamma$ -Strahlung könnte überschätzt sein, weil die erhöhten Krebsraten der Atombombenüberlebenden gegenwärtig fast ausschließlich den  $\gamma$ -Strahlen zugeschrieben werden. In Wirklichkeit könnten die erhöhten Krebsraten aber zum nicht geringen Teil durch den kleinen, aber sehr wirksamen Dosisbeitrag der Neutronen mitverursacht sein. Eine grobe Abschätzung kann dies verdeutlichen.

Die Analyse der japanischen Daten bezieht sich traditionell – und im Interesse der Kontinuität auch heute noch – auf die Dosis im Kolon (Dickdarm), das heißt in einem tief im Körper liegenden Organ, und schreibt den Neutronen die relative biologische Wirksamkeit von nur 10 zu. Auch die Daten in den beiden vorangehenden Abbildungen sind auf diese Weise errechnet. Da der Anteil der Energiedosis von Neutronen bei einer mittleren Dosis von 1 Gy etwa ein Prozent beträgt, ergibt sich so ein Wirkungsanteil der Neutronen von nur etwa zehn Prozent. Tatsächlich müssten sich die Berechnungen jedoch für jede Krebserkrankung auf die jeweilige Organdosis oder zumindest auf eine mittlere Organdosis stützen. Für  $\gamma$ -Strahlung ist die mittlere Organdosis nur unwesentlich größer als die Kolondosis; der etwas willkürliche Bezug auf das Kolon ist also unkritisch. Für die Neutronen hingegen ist die mittlere Organdosis etwa doppelt so hoch wie die Kolondosis. Zudem sprechen die strahlenbiologischen Daten dafür, statt dem Wichtungsfaktor 10 für Neutronen einen deutlich höheren Faktor, etwa 50, zu benutzen.

# Von der Dosis zum Risiko

zen. Mit diesen beiden Korrekturen müssten die Neutronen nicht für zehn Prozent, sondern – wie sich zeigen lässt – für fast die Hälfte der Wirkung verantwortlich sein. Entsprechend wäre der Risikokoeffizient für die  $\gamma$ -Strahlung um nahezu den Faktor 2 zu reduzieren.

Die hier beschriebene Möglichkeit wird gestützt durch die Tatsache, dass der scheinbare Konflikt zwischen den japanischen Daten und den Beobachtungen an röntgenexponierten Patienten für Brustkrebs besonders deutlich wird. Da der relative Anteil der Neutronendosis für Organe nahe der Körperoberfläche, und somit für die Brust, am höchsten ist, ist genau dies zu erwarten. Der scheinbare Gegensatz zwischen den japanischen Daten und den medizinischen Studien löst sich also auf, wenn den Neutronen die Wirksamkeit zugerechnet wird, die sich in strahlenbiologischen Studien erwiesen hat. Der gegenwärtig angenommene Risikokoeffizient überschätzt dann die Wirkung der  $\gamma$ -Strahlung etwas, ist aber für Röntgenstrahlung angemessen.

Energiereiche Neutronen sind im Strahlenschutz nur in speziellen Situationen von Bedeutung, zum Beispiel beim Transport abgebrannter nuklearer Brennelemente. Gerade in diesem Zusammenhang wurde jedoch das von ihnen ausgehende Risiko leidenschaftlich diskutiert und teilweise 60-mal höher eingeschätzt, als es der offiziellen Bewertung entspricht. Dabei wurde allerdings übersehen, dass dann allein die Neutronen in Hiroshima mehr als das Zehnfache des insgesamt beobachteten Risikos verursacht hätten. Dem gegenüber entspricht der erhöhte Beitrag der Neutronen zu den zusätzlichen

Krebsfällen der Atombombenüberlebenden nach den oben angeführten Überlegungen zwar auch einer gewissen Erhöhung des Risikokoeffizienten für Neutronen, diese ist allerdings relativ gering. Die RBW von 50 übersteigt den im Strahlenschutz festgelegten Bewertungsfaktor 20 nämlich um den Faktor 2,5. Ein Teil dieser Erhöhung wird jedoch dadurch ausgeglichen, dass sich die Referenzgröße, das heißt der Risikokoeffizient für  $\gamma$ -Strahlung, entsprechend verringert. So unerfreulich der Einsatz tausender von Polizisten zur Begleitung der Castortransporte war, kann dennoch davon ausgegangen werden, dass sie keinen ungewöhnlichen Strahlenrisiken ausgesetzt waren.

## Risiko und Risikowahrnehmung nach Tschernobyl

Der Reaktorunfall in Tschernobyl war eine gewaltige Katastrophe sowohl auf menschlicher als auch auf wirtschaftlicher Ebene. Wie sehr jedoch die Folgen durch ein zweites Versagen – die fehlende Kommunikation zwischen Politik, Wissenschaft und Öffentlichkeit und die daraus resultierenden Verwirrungen, Fehlinformationen und Ängste – potenziert wurden, wird erst künftig deutlich werden. Nicht mangelndes fachliches Wissen war verantwortlich, sondern die Unfähigkeit, vorhandene Erkenntnisse umzusetzen und glaubhaft darzulegen. Die Problematik reicht weit über die Bestimmung und Wahrnehmung des Strahlenrisikos hinaus, aber dieser Aspekt stand im Mittelpunkt der Diskussionen.

## Die Folgen der hohen Strahlenexpositionen

Als der Reaktor in Tschernobyl explodierte, wurden Dutzende von Arbeitern und Feuerwehrleuten tödlich verletzt. Über die Dimension vergleichbarer Unfälle hinaus wuchs die Katastrophe jedoch durch die weiträumige Verteilung der freigesetzten Radioaktivität. Die Evaku-

ierung Hunderttausender von Menschen wurde unvermeidbar. Das kurzlebige Radiojod verursachte in den ersten Tagen hohe Strahlenexposition der Schilddrüse, vor allem bei Kindern in den betroffenen Gebieten, in denen der Verbrauch frischer Milch nicht eingeschränkt wurde. In der Folge führte dies zu mehr als 2.000 zusätzlichen Fällen von Schilddrüsenkrebs. Obwohl es dadurch bislang nur vereinzelt Todesfälle gab, sind und bleiben die Folgen der operativen Entfernung der Schilddrüse schwerwiegend und bedrohlich für die Betroffenen. Die Exposition der Schilddrüse war so hoch, dass es sich nicht mehr um ein Problem kleiner Dosen handelte, sondern das Risiko greifbar und deutlich wurde.

## Die Auswirkung der langlebigen Kontamination

Die langlebige Radioaktivität, hauptsächlich durch Cäsium-137, verursachte weit geringere Dosen. In den am höchsten kontaminierten, nicht evakuierten Gebieten Weißrusslands und der Ukraine wurden im ersten Jahr durchschnittliche Dosen von einigen mGy erreicht. Dass nach solchen Expositionen keine Erhöhungen der Krebsraten nachgewiesen wurden, ist aufgrund der Beobachtungen an den Atombombenüberlebenden nicht überraschend. Am ehesten zu erwarten waren erhöhte Leukämieraten bei Kindern, aber auch diese wurden, wie in Berichten der Vereinten Nationen und der Weltgesundheitsorganisation dargelegt wurde, bisher nicht gefunden.

Was in den wissenschaftlichen Gremien Jahre nach der Tragödie ermittelt wird, ist allerdings weit entfernt von den unmittelbaren Eindrücken und Erfahrungen der betroffenen Bevölkerung. Der Reaktorunfall war eine tragische Folge blinden Vertrauens in unsichere Technik. Seine Konsequenzen wurden verstärkt durch den Versuch der staatlichen Organe und selbst mancher Wissenschaftler, die nicht mehr beherrschbare Situation zu

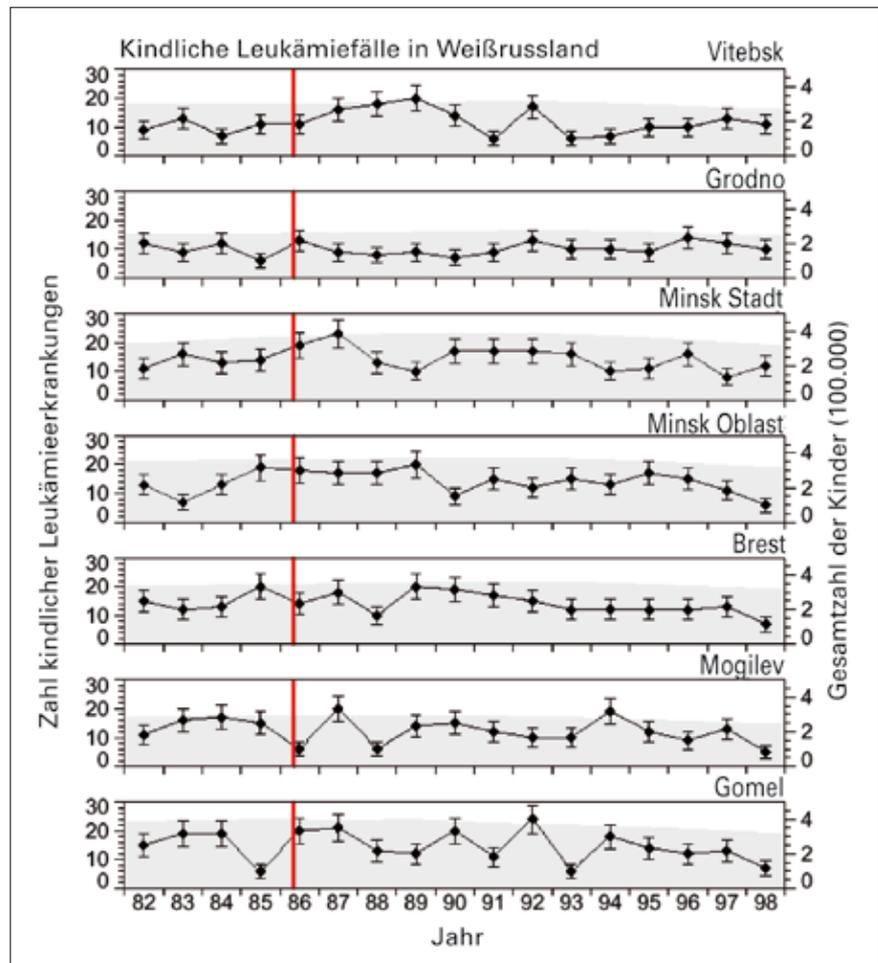
verharmlosen und zu verschleiern. Wo jeder Maßstab zerbrochen war, musste es zur Erwartung schlimmster gesundheitlicher Folgen kommen. Verlässliche Zahlen wurden erst später ermittelt und werden auch heute noch – durchaus verständlich – mit Skepsis betrachtet.

Die Abbildung gibt die anhand aller vorhandenen Krankenhausakten erhobenen Zahlen kindlicher Leukämiefälle in Weißrussland wieder. Von oben nach unten sind die Daten für die Teilregionen, von dem wenig betroffenen Vitebsk bis zu den am stärksten kontaminierten Regionen Mogilev und Gomel, aufgelistet. Wegen der begrenzten Fallzahlen sind die statistischen Schwankungen beträchtlich, aber es werden weder Erhöhungen in den Jahren nach dem Unfall deutlich noch sind Unterschiede zwischen den weniger und den höher belasteten Regionen erkennbar.

Aus dem Fehlen unmittelbar erkennbarer Auffälligkeiten kann nicht gefolgert werden, dass es keine Erhöhungen der kindlichen Leukämieraten gab; man kann lediglich feststellen, dass sie relativ gering geblieben sind. Die Eltern eines an Leukämie erkrankten Kindes wird das allerdings nicht überzeugen. Wie könnte man von ihnen erwarten, an eine andere Ursache als die Reaktorkatastrophe zu denken? Sowohl die aus der Unglückszone evakuierte als auch die in den kontaminierten Regionen verbliebene Bevölkerung litt und leidet immer noch an den vielfältigen Folgen des Reaktorunfalls mit all ihren Konsequenzen und an verständlichen Ängsten vor den gesundheitlichen Folgen der Strahlenexposition.

## Das Los der „Liquidatoren“

Hunderttausende von „Liquidatoren“ mussten sich an den Aufräumarbeiten am Unglücksreaktor und seiner Umgebung beteiligen. Zehntausende von ihnen wurden Dosen von  $\gamma$ -Strahlung bis zum festgesetzten Limit von 0,3 Gy oder mehr ausgesetzt. Der erzwungene Einsatz und die mangelnde Information



**Jährliche Anzahl kindlicher Leukämiefälle (Alter bei Diagnose < 15 Jahre) in den sechs Regionen von Weißrussland und der Stadt Minsk. Die Balken um die Fallzahlen entsprechen der Standardabweichung gemäß der Poissonstatistik. Die grauen Flächen geben die Anzahl der Kinder in der jeweiligen Regionen an. Der Zeitpunkt der Reaktorkatastrophe ist durch die vertikale rote Linie markiert. Die Regionen sind von oben nach unten nach steigender Kontamination aufgelistet.**

über die Höhe der Expositionen und der möglichen Folgen haben zu Unsicherheit und Resignation geführt.

Epidemiologische Studien über die gesundheitlichen Folgen erwiesen sich als schwierig, da die aus allen Teilen der Sowjetunion zusammengeholten Liquidatoren mittlerweile wieder in ihre Heimatgebiete zurückgekehrt sind. Erhöhungen der Krebsraten wurden bisher nur – und auch das auch nur mit beträchtlicher Unsicherheit – für Leukämien ermittelt. Dramatisch dagegen sind jüngste Beobachtungen über generelle Erhöhungen der Sterblichkeit und einen erschreckenden Rückgang der Lebenserwartung.

Eine Strahlenexposition von 0,3 Gy erhöht nach der vorliegenden

Risikoschätzung die normale Krebsrate um etwa ein Zehntel. Wenn in Russland 20 Prozent aller Todesfälle durch Krebs verursacht sind, so wären es in der exponierten Gruppe 22 Prozent. Im Sinne des Strahlenschutzes ist eine so hohe Exposition unannehmbar, andererseits verschiebt sie das persönliche Risiko nicht in einem Ausmaß, das die bis zum Fatalismus reichende Verunsicherung rechtfertigen dürfte.

Diese Aussage lässt sich durch eine Überlegung quantifizieren, die für das Verständnis des Strahlenrisikos hilfreich ist. In einem Land mit einer Lebenserwartung von 65 Jahren – einem Wert, der bis vor einigen Jahren für die männliche Bevölkerung Russlands gegolten hat – wird etwa einer von fünf Todes-

# Von der Dosis zum Risiko

fällen durch Krebs verursacht. Bei Wegfall aller durch Krebs verursachten Todesfälle würde sich die Lebenserwartung nicht um 20 Prozent erhöhen, wie man naiv erwarten könnte, sondern nur um etwa zwei Jahre. Entsprechend würde eine Erhöhung der Krebssterblichkeit um zehn Prozent die Lebenserwartung um etwa 0,2 Jahre verringern. So inakzeptabel sie vom Standpunkt des Strahlenschutzes aus ist, relativiert sich diese Schädigung angesichts der Tatsache, dass seit Auflösung der Sowjetunion die Lebenserwartung von Männern in Russland tatsächlich um mehrere Jahre gesunken ist. Als hauptsächliche Gründe werden Alkoholmissbrauch, ein erschreckendes Anwachsen der HIV-Infektionen, sowie steigende Unfall- und Suizidraten genannt. Für die Liquidatoren wird ein noch schlimmeres Bild gezeichnet. Wenn dafür auch nur teilweise die durch die Strahlenexposition motivierte Resignation verantwortlich ist, so übersteigt dieser indirekte Effekt die direkte Wirkung der Reaktorkatastrophe auf tragische Weise. Das Versagen der Risikokommunikation wird zum größten Risiko.

## Die Ängste in Deutschland

Es ist verständlich, dass die glaubhafte Darlegung der Fakten angesichts der Katastrophe von Tschernobyl in der damaligen Sowjetunion fast unmöglich war. Umso bemerkenswerter ist es, dass in unserem eigenen Land die Kommunikation noch stärker versagte. Die radioaktive Kontamination war angesichts der großen Entfernung vom Unglücksreaktor so unerwartet und erschreckend, dass selbst nach Monaten die fachliche Aufklärung

vom Ticken der Geigerzähler über-tönt wurde. Im am stärksten betroffenen Voralpengebiet summierte sich die mittlere zusätzliche Dosis im Jahr nach dem Unglück auf etwa 1 mGy. Selbst nach konservativer Risikoschätzung könnte dies die Krebsraten nur um weniger als ein Promille erhöhen. Dennoch waren die Befürchtungen groß, und es fehlt bis heute nicht an vielerlei Berichten über höhere Leukämieraten bei Kindern und erhöhte Säuglingssterblichkeit. Wo Ängste um sich greifen, finden sie auch scheinbare Bestätigung.

## Fazit

Es ist nicht einfach, das Ausmaß von Risiken anhand nüchterner Zahlen und wissenschaftlicher Erkenntnisse zu verdeutlichen. Zu komplex sind die Bewertungen und zu unterschiedlich der Blickwinkel. Wenn – konservativ geschätzt – 1 mGy die mittlere, auch über die kommenden Jahre in Deutschland summierte Dosis durch Tschernobyl ist, so bedeutet dies nach der heutigen Risikoschätzung, dass von 10.000 Menschen etwa drei zusätzlich an Krebs sterben werden, was gegenüber den in dieser Gruppe ohnehin zu erwartenden 2.600 Krebstodesfällen verschwindend gering ist. Andererseits entspräche die so errechnete Erhöhung unter den 82,5 Millionen Deutschen insgesamt immerhin mehr als 2.000 zusätzlichen Krebstodesfällen. Ein und derselbe Schaden kann also je nach Blickwinkel als unbedeutend oder als katastrophal angesehen werden, und da er nicht sichtbar wird, sondern als gefühlte Bedrohung weiterbesteht, bleibt dieses Spannungsverhältnis unaufgelöst bestehen.

Das Dilemma des Strahlenschutzes liegt also – so paradox es sein mag – gerade darin, dass die Spätschäden verborgen bleiben, das heißt sich nicht abheben aus der Menge ohnehin auftretender Erkrankungen. Unsichtbares kann leichter ignoriert werden als das Sichtbare, kann aber auch bedrohlicher wirken. Da Ungewissheit irritiert, liegt es nahe, die Strahlenri-

siken entweder zu negieren oder sie plakativ zu vergrößern. Beides geschieht, und beides schafft Verwirrung und neue Gefahr. Ebenso falsch und gefährlich aber ist es, sinnvolle Extrapolation als gesichertes Wissen auszugeben; der Versuch bestehende Unsicherheiten herunter zu spielen, erhebt sie statt dessen zum Gegenstand fruchtloser Kontroversen.

## Literatur:

Gapanovich, V.N., Iaroshovich, R.F., Shuavaeva, L.P., Becker, S.I., Nekolla, E.A., Kellerer, A.M.: *Childhood leukaemia in Belarus before and after the Chernobyl accident: Continued follow-up. Radiat. Environ. Biophys.* 40: 259-267 (2001)

Kellerer, A.M.: *Das Beispiel Strahlung: Wandlungen der Risikobewertung, GSF-Magazin mensch+umwelt* 12:14-22 (1998)

Kellerer, A.M.: *Invisible threat: the risk of ionising radiation. In: Nupecc. Workshop on Nuclear Science: Impact, Applications, Interactions (www.nupecc.org/iai2001) Doc001 - Doc338 / Doc318.doc* (2001)

Schmid, E., Regulla, D., Guldbakke, S., Schlegel, D., Bauchinger, M.: *The effectiveness of monoenergetic neutrons at 565 keV in producing dicentric chromosomes in human lymphocytes at low doses. Radiat. Res.* 154: 307-312 (2000)

Sparrow, A.H., Underbrink, A.G., Rossi, H.H.: *Mutations Induced in Tradescantia by Small Doses of X rays and Neutrons: Analysis of Dose-Response Curves. Science* 176, 916-918 (1972)

Ullrich, R.L.: *Tumor induction in BALB/c female mice after fission neutron or gamma-irradiation. Radiat. Res.* 93: 506-515 (1983)

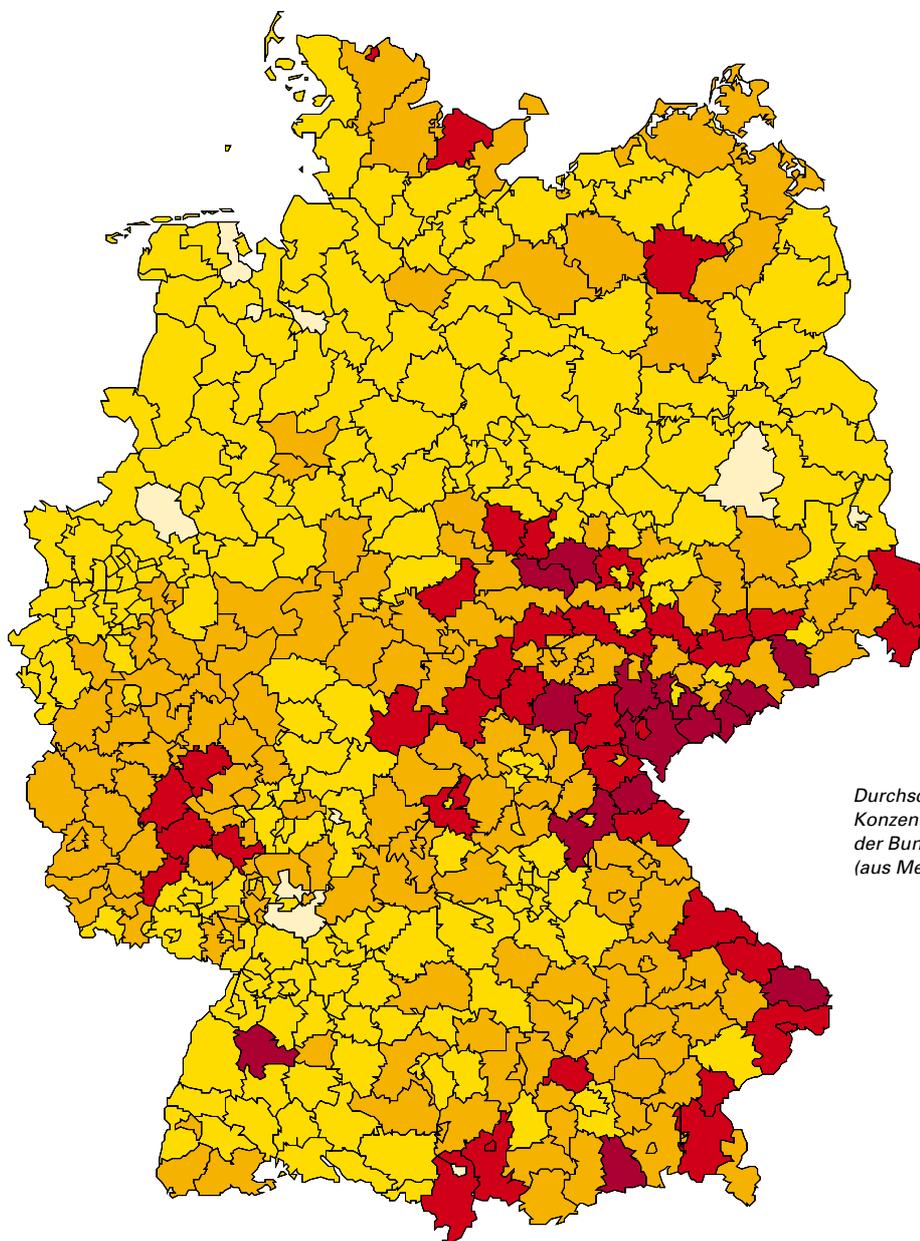
Wolf, C., Lafuma, J., Masse, R., Morin, M., Kellerer, A.M.: *Neutron RBE for induction of tumors with high lethality in Sprague-Dawley rats. Radiat. Res.* 154: 412-420 (2000)

## Internet:

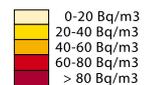
[www.ans.org/reports/2000\\_2.html](http://www.ans.org/reports/2000_2.html)  
United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)

[www.ICRP.org](http://www.ICRP.org)  
ICRP (International Commission for Radiological Protection), *Biological and Epidemiological Information on Health Risks Attributable to Ionising Radiation: A Summary of Judgements for the Purpose of Radiological Protection of Humans*

[www4.nas.edu](http://www4.nas.edu)  
US National Academy of Science (NAS), *Bericht BEIR VII (Biological Effects of Ionizing Radiation)*



Durchschnittliche Radon-Konzentration in Wohnungen in der Bundesrepublik Deutschland (aus Menzler et al. 2006)



## Inhalation natürlicher Strahlung

# Lungenkrebs durch Radon

**Irene Brüske-Hohfeld**  
**Lothar Kreienbock**  
**H.-Erich Wichmann**

Radon ist ein natürlich vorkommendes Edelgas, das in allen Böden, Gesteinen, Gewässern und in der Luft vorhanden ist. Es zerfällt unter Aussendung von Alpha-Strahlung in Elemente, die ebenfalls radioaktiv sind. Über Undichtigkeiten und Risse in der Bausubstanz kann Radon leicht in Gebäude eindringen und sich dort anreichern. Die Inhalation von Radon und seinen radioaktiven Folgeprodukten ist nach dem Tabakrauch die wichtigste Ursache für Lungenkrebs.

# Lungenkrebs durch Radon

**R**eiche Silberfunde in der Nähe von Freiberg führten im Jahr 1168 – wie im 19. Jahrhundert der „Gold Rush“ in Nordamerika – zur raschen Besiedlung einer kargen Gegend, die seither als „Erzgebirge“ bezeichnet wird. Bald zeigte sich, dass die Bergleute im Erz-



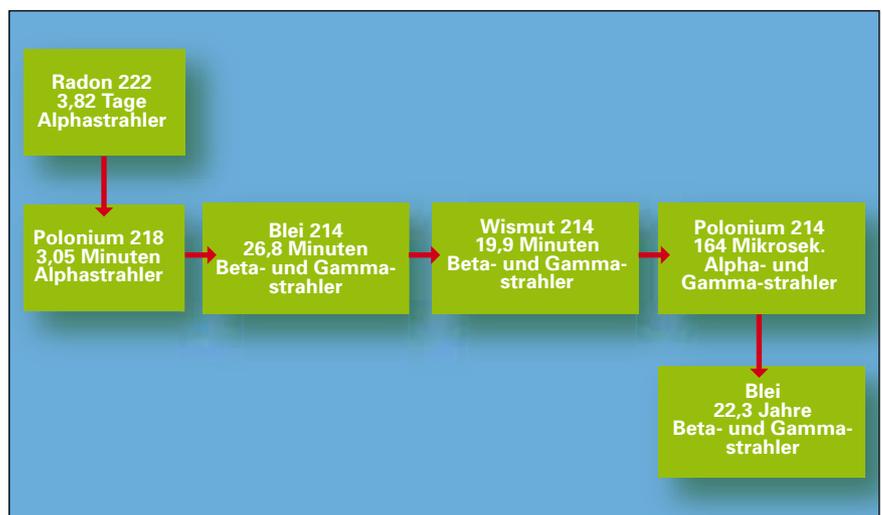
Georgius Agricola war von 1527 bis 1533 als Stadtarzt im böhmischen Joachimsthal tätig. Er beschrieb eine seltsame Lungenkrankheit, an der damals viele Bergarbeiter im Grubenrevier von Schneeberg-Joachimsthal starben.

gebirge nicht alt wurden. Viele starben schon in jungen Jahren mit den Anzeichen einer Krankheit, die Agricola (1494 – 1555), Stadtarzt im böhmischen Joachimsthal, „Bergsucht“ nannte. Er vermutete, dass das Einatmen von Staub die Erkrankung verursachte, und entwarf erste Ideen, wie Bergwerke künstlich belüftet werden könnten. Auch der Arzt Paracelsus (1493 – 1541) beschrieb in seinem Buch „Von der Bergsucht und anderen Bergkrankheiten“ zahlreiche Lungenerkrankungen, die heute als Silikose, Tuberkulose oder Lungenkrebs diagnostiziert würden, damals aber noch nicht als solche erkannt und unterschieden werden konnten. Er äußerte die Vermutung, dass in-

haliierte metallische Gase in der Lunge deponiert würden und dadurch Krankheiten verursachen. Erst 1879 erkannten die beiden Mediziner F. H. Härting und W. Hesse, dass es sich bei der im Grubenrevier von Schneeberg rasch tödlich verlaufenden „Schneeberger Krankheit“ um Lungenkrebs handelte.

Bald nachdem die Chemikerin Marie Curie (1867 – 1934) die „Radium Emanation“ entdeckt hatte – heute als Radon bezeichnet – wurden 1901 in verschiedenen Stollen im Erzgebirge Messungen vorgenommen, die das Gas überall unter Tage nachweisen konnten. Genauere Messungen in den 1920er-Jahren bildeten die Grundlage

Frankreich, die Tschechoslowakei und Australien –, den Abbau des Erzes und die Urananreicherung, um Ausgangsmaterial zur nuklearen Energieerzeugung und für die Entwicklung von Atombomben zu gewinnen. Die Sowjetunion verfügte nicht über ausreichende Vorkommen, hatte aber in ihrer Besatzungszone – Thüringen und Sachsen – das Erzgebirge mit seinem historischen Bergbau übernommen und vorhandene Bergwerke mit Besatzungsrecht requiriert. Eine zentrale Leitung wurde eingerichtet und im Jahr 1947 eine sowjetische Aktiengesellschaft mit dem Tarnnamen ‚Wismut‘ gegründet. Die Anfangsjahre des



Radon 222 bildet eine Reihe kurzlebiger Zerfallsprodukte, die sich an Aerosolpartikel anlagern und mit der Atemluft in der Lunge deponiert werden.

Grafik: GSF

für die Hypothese, dass zwischen der Höhe der Radonexposition und dem Auftreten von Lungenkrebs ein Zusammenhang besteht. Der „Schneeberger Lungenkrebs“ wurde 1925 im Rahmen der ersten Berufskrankheiten-Verordnung in Deutschland in die Liste der entschädigungspflichtigen Berufskrankheiten aufgenommen.

## Uranbergbau und Lungenkrebs: in Deutschland ...

In den Jahren des Kalten Krieges nach 1945 intensivierten alle Länder, die über Uranerz-Bodenschätze verfügten – wie die Vereinigten Staaten von Amerika, Kanada,

Unternehmens waren durch einen erheblichen Druck der sowjetischen Besatzungsmacht gekennzeichnet, die Uranerzgewinnung so rasch wie möglich voranzutreiben. Es wurde versucht, die unzureichenden materiell-technischen Voraussetzungen durch eine hohe Zahl von Arbeitern auszugleichen: Mitte der 1950er-Jahre wurde mit rund 100.000 Beschäftigten ein Höchststand erreicht. Im Zeitraum von 1946 bis 1990 arbeiteten ungefähr 150.000 Bergleute untertage und es wurden 231.000 Tonnen Uran gewonnen. Die Wismut war damit – nach den USA und Kanada – drittgrößter Uranproduzent der Welt. Mit der Vereinigung der beiden Teile Deutschlands wurde der Uran-

abbau 1990 eingestellt. Bereits seit den 1970er-Jahren kam es unter den Beschäftigten zu auffällig vielen Lungenkrebserkrankungen, durchschnittlich 200 bis 250 Fälle pro Jahr. Insgesamt erkrankten von 1958 bis 1990 mehr als 5.000 Beschäftigte der Wismut an Lungenkrebs. Nach Hochrechnungen sind insgesamt rund 18.000 Lungenkrebserkrankungen durch Radon bei der Wismut bis 2020 zu erwarten.

### ... und weltweit

In den Zeiten des Wettrüstens wurde auch in anderen Ländern wenig zum Gesundheitsschutz der Bergleute unternommen. Erst Ende der 1960er-Jahre lagen die ersten Ergebnisse epidemiologischer Erhebungen bei Uranbergarbeitern in den USA und der Tschechoslowakei vor. Wie erwartet zeigte sich eine erhöhte Lungenkrebsrate unter den Bergleuten. In den darauf folgenden Jahren wurden weitere Studien in sieben Ländern (China, Tschechische Republik, USA, Kanada, Schweden, Australien und Frankreich) durchgeführt. Werden alle weltweit durchgeführten Kohortenstudien gemeinsam ausgewertet, so beruht die statistische Analyse auf zirka 68.000 Bergarbeitern, die im Schnitt knapp sechs Jahre im Bergbau beschäftigt waren und bei denen fast 2.700 Todesfälle durch Lungenkrebs auftraten. Die mittlere aufsummierte Radonbelastung aller Bergleute in der statistischen Auswertung lag bei 164 WLM (*Working Level Months*), was in etwa einer 20-jährigen Exposition in einem Wohnhaus bei 2.000 Bq/m<sup>3</sup> entspricht. Das relative Lungenkrebsrisiko wurde als lineare Funktion der Radonbelastung ohne Annahme eines Schwellenwertes modelliert. Ein solches Modell ist plausibel, da bereits der Durchtritt eines einzigen Alpha-Teilchens durch den Zellkern die DNA durch Doppelstrangbruch dauerhaft schädigen kann. Das relative Risiko stieg um 19 Prozent pro 100 WLM (ohne Adjustierung für Rauchen). Der Anstieg in der Expositions-Wirkungs-Beziehung fiel mit erreichtem Alter und

der Zeit seit Exposition. Das Alter bei Exposition hatte bei Erwachsenen keinen wichtigen Einfluss. Die derzeit vom Bundesamt für Strahlenschutz durchgeführte Kohortenstudie an ehemaligen Beschäftigten der Wismut, die allein fast 59.000 Personen umfasst, ist in diesen Analysen nicht enthalten. Aus Deutschland liegt derzeit nur das Ergebnis einer Fall-Kontroll-Studie (1997 – 2001) bei den ehemaligen Mitarbeitern der Wismut vor. Die Studie zeigt einen signifikanten Anstieg des Lungenkrebs-Erkrankungsrisikos um zehn Prozent pro 100 WLM, adjustiert für Rauchgewohnheiten und Asbestexposition.

### Radonbelastung in Wohnungen

Schon vor mehreren Jahrzehnten war klar geworden, dass die Radonproblematik nicht auf den Bergbau beschränkt ist. Jedoch sind die Ergebnisse der epidemiologischen Erhebungen bei Uranbergarbeitern nicht direkt auf die Radonexposition der „Normal“-Bevölkerung

übertragbar. Das liegt daran, dass Bergarbeiter eine besondere Personengruppe darstellen: Sie gehen einer anstrengenden körperlichen Tätigkeit nach, die eine kräftige Atmung verlangt. Das bedingt eine höhere Abscheidungsrate von partikulären Radonzerfallsprodukten in der Lunge. Auch können Bergleute zahlreichen anderen schädlichen Stoffen ausgesetzt sein wie zum Beispiel Arsen, Dieselabgasen und Asbest. Zudem rauchen sie stärker als die Allgemeinbevölkerung. All diese Faktoren begünstigen die Entstehung von Lungenkrebs. Die Risikoeffizienten für Bergarbeiter lassen sich somit nicht direkt auf den Niedrig-Dosis-Bereich eines Wohnhauses übertragen. Außerdem hängt die Extrapolation von Annahmen über die Aufenthaltszeit im Haus, das Gleichgewicht zwischen Radon und seinen Folgeprodukten und über den relevanten Expositionszeitraum ab. Darüber hinaus gibt es Unterschiede in der Aerosolkonzentration zwischen Außenluft und Innenraumluft. Weltweit sind deshalb seit dem Ende der 1980er-Jahre zahlreiche Studien



**Der Untergrund ist die Hauptquelle erhöhter Radonkonzentrationen in Häusern. Das radioaktive Edelgas Radon-222 kann durch Risse und Fugen, Abwasser- und Entlüftungsrohre, Rohr- und Kabeldurchführungen aus dem Erdbo-den in Gebäude übertreten, sich dort anreichern und zu einem erhöhten Lungenkrebsrisiko der Bewohner führen.**

Grafik: u.s.design

# Lungenkrebs durch Radon

zur Radonbelastung in Wohnhäusern durchgeführt worden, bei denen in Wohnungen von Lungenkrebspatienten und gesunden Kontrollen Radonmessungen vorgenommen und Störfaktoren wie das Rauchverhalten individuell erfasst wurden. Die Konzentration und Verteilung von Radon und seinen Zerfallsprodukten in Innenräumen wird durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Geologische und geophysikalische Bedingungen, die den Gehalt an Radon in der Bodenluft und dessen Freisetzung bestimmen, wie Radiumgehalt im Untergrundmaterial, sowie die Porosität, Dichte, Feuchtigkeit und Durchlässigkeit des Untergrunds.
- Art und Zustand der Gebäudeabdichtung gegenüber dem Untergrund: Vorhandensein eines Kellers oder einer festen Fundamentbodenplatte, Eintrittspforten wie zum Beispiel Risse und Fugen, Abwasser- und Entlüftungsröhre, Rohr- und Kabeldurchführungen.
- Abgeschlossenheit des Kellers und der Treppenaufgänge.
- Druckgradient zwischen Untergrund und Gebäudeinnenräumen, der wiederum von der Temperatur, barometrischen Druckunterschieden und den Windverhältnissen beeinflusst wird.

Die Außenluftkonzentration ist im Allgemeinen klein und beträgt im Durchschnitt zehn bis 30 Prozent der Innenraumkonzentration in Wohnungen. Radonausdünstung aus Baustoffen führt nur in Ausnahmefällen zu erhöhten Radonkonzentrationen in Gebäuden, etwa bei Verwendung von radioaktiv kontaminiertem Haldenmaterial in Bergbaugebieten. Ebenfalls von untergeordneter Bedeutung ist in Wasser gelöstes beziehungsweise

bei der Verfeuerung von Kohle oder Erdgas freigesetztes Radon. Für die Radonkonzentration in Innenräumen spielt neben den Quellen Lüftung eine entscheidende Rolle, wobei zwischen häufig und selten gelüfteten Wohnungen ein Faktor bis 1,5 vorliegen kann.

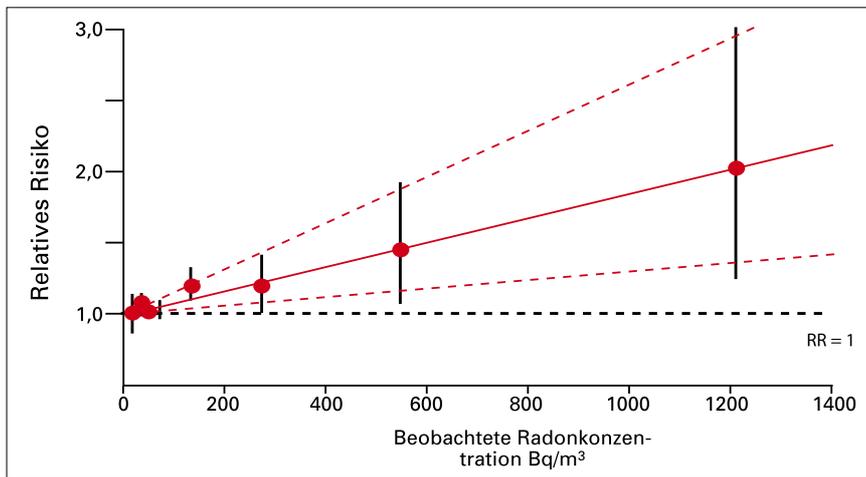
## Radon in Wohnungen und Lungenkrebs in Deutschland...

Vom GSF-Institut für Epidemiologie wurden in Kooperation mit der Ludwig-Maximilians-Universität München in Teilen West- und Ostdeutschlands zwei epidemiologische Studien zum Zusammenhang zwischen Radon in Wohnhäusern und Lungenkrebs vorgenommen. Sie werden als deutsche Radon-Studie zusammengefasst und geben deutliche Hinweise auf einen Anstieg des Lungenkrebsrisikos in Abhängigkeit von der Höhe der Radonkonzentration in Wohnungen. Die in den Jahren 1990 bis 1997 angefertigten Studien umfassten insgesamt 2.963 Lungenkrebspatienten und eine Bevölkerungsstichprobe von 4.232 nicht an Lungenkrebs erkrankten Kontrollpersonen. In über 9.000 Wohnungen, die von den Studienteilnehmern entweder zum Zeitpunkt der Studie oder früher bewohnt worden waren, wurde die Höhe der Radonkonzentration gemessen. Die mittlere Radonkonzentration lag im Studiengebiet West bei 50 Bq/m<sup>3</sup>. Im Studiengebiet Ost, das Gebiete mit bekanntermaßen höheren Radonkonzentrationen in den Bundesländern Thüringen und Sachsen umfasste, betrug die mittlere Radonkonzentration 75 Bq/m<sup>3</sup>. In der Risikoanalyse wurde die Radonkonzentration in den letzten fünf bis 35 Jahren untersucht und dabei das lebenslange Rauchverhalten – der bei weitem wichtigste Risikofaktor für Lungenkrebs – sowie weitere Faktoren berücksichtigt. Für die höchste Radonkategorie (140–3.000 Bq/m<sup>3</sup>, Mittelwert 252 Bq/m<sup>3</sup>) ergab sich im Vergleich zur Referenzkategorie (0–50 Bq/m<sup>3</sup>, Mittelwert 38 Bq/m<sup>3</sup>) ein um 40 Prozent erhöhtes Lungenkrebsrisiko. Diese Schätzung ist

statistisch signifikant. Das Lungenkrebsrisiko stieg pro 100 Bq/m<sup>3</sup> um zehn Prozent an, was einer Verdoppelung bei einer Radonkonzentration von 1.000 Bq/m<sup>3</sup> entspricht; diese Schätzung war jedoch nur grenzwertig signifikant. Höhere Schätzungen für das relative Risiko wurden für den Subtyp des kleinzelligen Bronchialkarzinoms beobachtet, der mit einer besonders ungünstigen Krankheitsprognose einhergeht.

## ... und in Europa

Die statistische Aussagekraft einer Studie gewinnt durch höhere Teilnehmerzahlen. Insofern erlaubt die gemeinsame Auswertung von dreizehn epidemiologischen Fall-Kontroll-Studien in Europa eine noch präzisere quantitative Abschätzung des Lungenkrebsrisikos durch Radon. Die Studien wurden in Deutschland (zwei Teilstudien), England, Schweden (drei Teilstudien), Finnland (zwei Teilstudien), Frankreich, Italien, Spanien, Österreich und der tschechischen Republik durchgeführt. Die individuellen Daten aller Probanden wurden nach einem einheitlichen Schema erfasst. Es wurden Daten zu den Rauchgewohnheiten erhoben sowie zur Radonexposition, basierend auf Langzeitmessungen der Radongaskonzentration. Für 7.148 Patienten mit Lungenkrebs und 14.208 Kontrollpersonen ohne Lungenkrebs konnten diese Daten ausgewertet werden. Bei den Patienten mit Lungenkrebs lag die mittlere Radonkonzentration bei 104 Bq/m<sup>3</sup>, bei den Kontrollpersonen betrug diese 98 Bq/m<sup>3</sup>. Der Zusammenhang zwischen dem relativen Risiko der Entwicklung eines Lungentumors und der Radonexposition wurde in einem linearen Modell untersucht, in dem die Daten nach Alter, Geschlecht, Wohnregion, Rauchgewohnheiten und Studie gruppiert waren. Der Zusammenhang zwischen der Höhe der Konzentration von Radon in Wohnräumen in den letzten 35 Jahren und dem Risiko der Entstehung von Lungenkrebs war statistisch signifikant. Die Dosis-Wirkungs-Beziehung



**Relatives Risiko für Lungenkrebs in Abhängigkeit von der Radonkonzentration in Wohnungen in Europa. Die durchgezogene Linie gibt die geschätzte lineare Beziehung wieder. Für 0 Bq/m<sup>3</sup> ist das relative Risiko gleich 1. Die gestrichelten Linien zeigen das zugehörige 95% Konfidenzintervall.**

Quelle: Lungenkrebsrisiko durch Radonexpositionen in Wohnungen – Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, April 2005.

war linear, ohne Hinweis auf einen Schwellenwert. Das berechnete zusätzliche Risiko für Lungenkrebs lag bei acht Prozent pro 100 Bq/m<sup>3</sup>-Zunahme der beobachteten mittleren Radonkonzentration. Bei einer Beschränkung auf Personen, die in ihren Wohnungen niedriger als 200 Bq/m<sup>3</sup> exponiert waren, blieb die Dosis-Wirkungs-Beziehung statistisch signifikant und das geschätzte Risiko änderte sich kaum im Vergleich zum kompletten Datensatz.

Es gab keinen Hinweis auf starke Unterschiede zwischen den Studien, und die Ergebnisse wurden auch nicht durch eine einzelne Studie dominiert. Darüber hinaus gab es auch keinen Hinweis darauf, dass die Dosis-Wirkungs-Beziehung von Besonderheiten des Studiendesigns oder der Radonmessung abhängig war. Es gab keine Variablen, die einen modifizierenden Einfluss auf das Ergebnis gehabt hätten. Berücksichtigt man im Modell die zufälligen Unsicherheiten in der Messung der Radonkonzentration, bleibt die Dosis-Wirkungs-Beziehung linear und die geschätzte Zunahme des relativen Risikos pro 100 Bq/m<sup>3</sup> steigt auf 16 Prozent. Damit liegt das für Radon in Wohnungen berechnete Lungenkrebsrisiko in der Größenordnung der Vorhersage, die auf der Basis von Uranbergarbeiter-Studien gemacht wurde.

Bemerkenswert war, dass das Risiko für die verschiedenen histologischen Typen des Lungenkrebses durchaus unterschiedlich war. Am deutlichsten war der Anstieg des Risikos um 31 Prozent pro 100 Bq/m<sup>3</sup> für sogenannte kleinzellige Tumormformen. Für andere histologische Typen stieg das Risiko nur um drei Prozent pro 100 Bq/m<sup>3</sup>. Keinen Hinweis gab es darauf, dass das relative Risiko davon abhängt, ob es sich bei den Probanden um Raucher oder Nichtraucher handelt. Das absolute Risiko ist bei Rauchern allerdings erheblich höher als bei Nichtrauchern, da sich die relativen Risiken von Rauchen und Radon in etwa multiplizieren. Kombiniert man die Daten dieser europäischen Studien mit externen Daten zum absoluten Risiko an Lungenkrebs zu sterben, so ergeben sich für das Gesamtrisiko, bis zum Alter von 75 Jahren an Lungenkrebs zu sterben, die in nebenstehendem Kasten zusammengestellten Werte.

Die Daten zeigen deutlich, dass die Exposition gegenüber Radon in Wohnungen ein erhöhtes Lungenkrebsrisiko für die Allgemeinbevölkerung darstellt. Diese Ergebnisse sind sehr wichtig für die Verbesserung bestehender Richtlinien, die die Exposition gegenüber der natürlichen Strahlenbelastung regeln

und das Ziel verfolgen, die Zahl der Todesfälle durch Lungenkrebs zu reduzieren.

## Risiko für die Bevölkerung

Auf der Grundlage der epidemiologischen Studien kann das Lungenkrebsrisiko für die deutsche Bevölkerung hochgerechnet werden, wenn weitere Informationen vorliegen: Für dieses Attributivrisiko muss man die Radonkonzentrationen nicht nur für ein Studiengebiet, sondern für die ganze Bundesrepublik kennen oder abschätzen und ferner die Erkrankungs- oder Sterbezahlen sowie das Rauchen berücksichtigen. Auf der Grundlage von Radonmessungen in Wohn- und Schlafzimmerräumen von circa 27.000 Wohnungen wurde die mittlere Radonkonzentration in deutschen Wohnungen mit 49 Bq/m<sup>3</sup> bestimmt. Hierbei wurden die vorhandenen Messwerte für sämtliche Kreise der Bundesrepublik gemittelt, fehlende Werte wurden anhand von Bodenluftmessungen geschätzt.

Pro Jahr sterben in Deutschland circa 37.700 Personen an Lungenkrebs (28.550 Männer, 9.150 Frauen). Rauchen als wichtigster Risikofaktor für diese Erkrankung ist in der

### Absolutes Risiko...

...bis zum Alter von 75 Jahren an Lungenkrebs zu versterben für:

	0 Bq/m <sup>3</sup>	800 Bq/m <sup>3</sup>
Lebenslange Nichtraucher	0,4 %	0,7 %
Raucher (15-24 Zigaretten pro Tag bis zum 30. Lebensjahr)	2,3 %	3,7 %
Raucher (15-24 Zigaretten pro Tag bis zum 50. Lebensjahr)	4,3 %	7,2 %
Raucher (15-24 Zigaretten pro Tag bis zum 75. Lebensjahr)	10,4 %	16,9 %

# Lungenkrebs durch Radon

deutschen Bevölkerung stark verbreitet: Bei Männern sind 73 Prozent Raucher und Ex-Raucher, bei Frauen sind dies 44 Prozent. Im Vergleich dazu sind bei den männlichen Lungenkrebspatienten 98 Prozent Raucher oder Ex-Raucher, und bei den weiblichen Patienten 74 Prozent.

Verwendet man diese Zahlen und das Modell der Europäischen Radon-Studie (zusätzliches Lungenkrebsrisiko 16 Prozent pro 100 Bq/m<sup>3</sup>), dann ergibt sich, dass circa 5 Prozent aller Lungenkrebstodesfälle in Deutschland auf Radon in Wohnungen zurückzuführen ist. Dieser Anteil ist für Männer und Frauen ungefähr gleich und entspricht ca. 1.900 Lungenkrebstoten pro Jahr (1.400 Männer, 500 Frauen). Betrachtet man die Bundesländer, dann ist das Attributivrisiko in Thüringen (8,8 Prozent), Sachsen (8,3 Prozent) Bayern (6,2 Prozent, und Nordrhein Westfalen (4,4 Prozent) am höchsten, während die Stadtstaaten Berlin, Hamburg und Bremen mit 2,3 bis 3,3 Prozent das niedrigste Risiko aufweisen. Berücksichtigt man allerdings die Bevölkerungszahlen, dann ist die Zahl der Lungenkrebstoten pro Jahr, die dem Radon zuzuordnen sind, in Nordrhein-Westfalen am höchsten (rund 450), gefolgt von Bayern (rund 270).

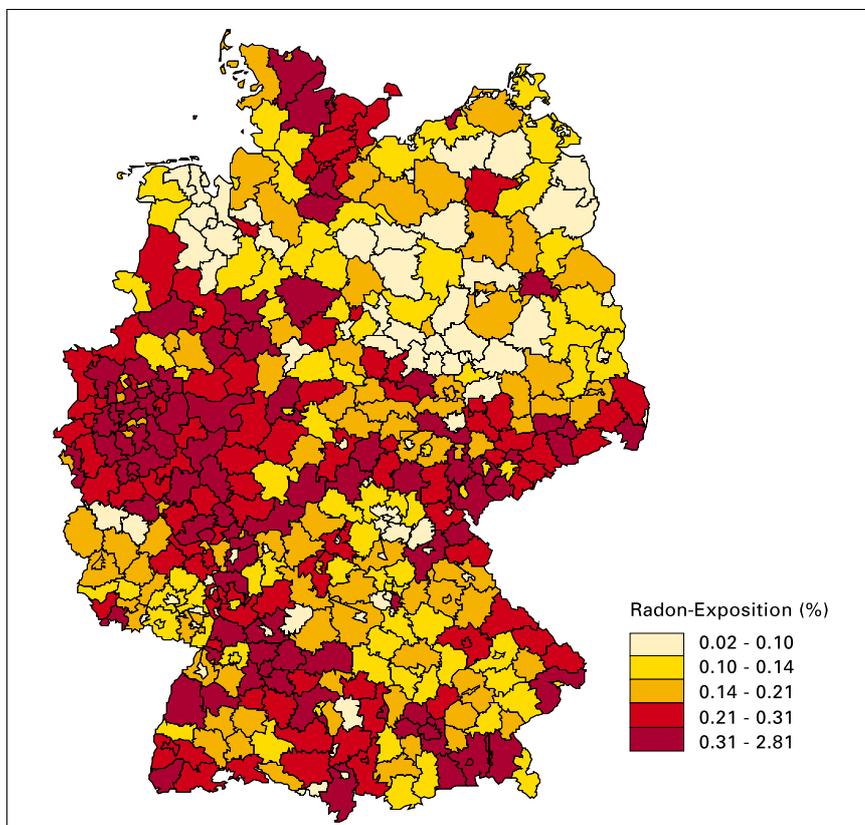
Man kann abschätzen, wie viele Lungenkrebstote pro Jahr vermieden werden können, wenn die Radonkonzentrationen in Wohnungen unter einen vorgegebenen Höchstwert abgesenkt würden. Einige Beispiele sind in der Tabelle am Ende des Beitrags aufgeführt. Am effektivsten wäre es, wenn eine Absenkung auf unter 100 Bq/m<sup>3</sup> erfolgte, dann könnten pro Jahr circa 300 Lungenkrebstodesfälle verhindert werden. Eine Absenkung auf

## Lungenkrebs durch Radon nach Bundesländern

Bundesland	AR in %	Mittlere jährliche Anzahl Lungenkrebs-Todesfälle durch Radon
Schleswig-Holstein	×	×
Hamburg	3.06	29
Niedersachsen	3.43	125
Bremen	2.30	10
Nordrhein-Westfalen	4.36	447
Hessen	5.02	127
Rheinland-Pfalz	6.43	127
Baden-Württemberg	4.82	169
Bayern	6.24	265
Saarland	4.90	33
Berlin	3.32	53
Brandenburg	×	×
Mecklenburg-Vorpommern	×	×
Sachsen	8.29	159
Sachsen-Anhalt	×	×
Thüringen	8.75	93
Deutschland gesamt	5.02	1 896

× keine Berechnung aufgrund zu geringer Information zur Radonbelastung  
 Berechnung nach korrigiertem europäischen Pooling-Modell mit korrigierter Radonverteilung (Darby et al. 2005)

**Attributivrisiken (AR) durch Radon in Wohnungen im Vergleich zur Außenluft von 9 Bq/m<sup>3</sup>, getrennt nach Bundesland** (aus Menzler et al. 2006).



**Prozentuale kumulative (kollektive) Radon-Exposition der Bevölkerung in den Landkreisen in Deutschland (berechnet als Produkt aus Einwohnerzahl und Mittelwert der Radonkonzentration des Kreises).** (aus Menzler et al. 2006).

den derzeitigen EU-Grenzwert für Neubauten (200 Bq/m<sup>3</sup>) würde nur halb so wirksam sein, und der derzeitige EU-Grenzwert von 400 Bq/m<sup>3</sup> für bestehende Gebäude ist nur ein Viertel so wirksam. Ein Grenzwert bei 1000 Bq/m<sup>3</sup> hätte einen minimalen Schutzeffekt (20 vermiedene Lungenkrebstote pro Jahr), während eine Absenkung auf die Außenluftkonzentration von 9 Bq/m<sup>3</sup> zwar ideal wäre, aber selbstverständlich nicht realistisch

sollte man über aufwändigere bautechnische Verfahren nachdenken. Der Radoneintritt kann zum Beispiel durch den Einbau von Kunststofffolien, Beschichtungen und Bitumenbahnen im Fundamentbereich verringert werden. Ziel ist eine radondichte Sperrschicht zwischen Untergrund und Gebäude oder zumindest zwischen Keller und Wohnbereich. In Regionen mit hoher Radon-Konzentration sollten vor allem bei Neubauten präventive Maßnah-

*Deutschland durch Radon in Wohnungen.* Ecomed-Verlag Landsberg, 2006

I. Brüske-Hohlfeld et al.: *Lung cancer risk among former uranium miners of the Wismut Company in Germany.* Health Physics, in press 2006

*Radon-Handbuch Deutschland.* Verlag für Neue Wissenschaft, Bremerhaven 2001

*Strahlenexposition und strahleninduzierte Berufskrankheiten im Uranbergbau am Beispiel Wismut.* G.G. Eigenwillig und E. Ettenhuber (Hrsgb.), TÜV-Verlag, Köln, 2000. ISBN 3-8249-0610-4

**Internet:**

Überblick zu Radon und Umweltradioaktivität: [www.radon-info.de](http://www.radon-info.de)

Radon in Wohnungen: [www.wdr.de/tv/service/bauen/inhalt/20041029/b\\_2.phtml](http://www.wdr.de/tv/service/bauen/inhalt/20041029/b_2.phtml)

Lungenkrebsrisiko durch Radonexpositionen in Wohnungen – Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, April 2005: [www.ssk.de/werke/kurzinfo/2005/ssk0503.htm](http://www.ssk.de/werke/kurzinfo/2005/ssk0503.htm)

Radon an Innenraumarbeitsplätzen. Hrg: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz: [www.hvbg.de/d/bia/fac/strahl/radon.pdf](http://www.hvbg.de/d/bia/fac/strahl/radon.pdf)

Verbraucherschutzinformationssystem Bayern (Hrg. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz): *Gesundheitsgefahren durch Radon in Innenräumen* [www.vis-technik.bayern.de/de/left/fachinformationen/chemie\\_basis/radon\\_gesundheitsgefahren.htm](http://www.vis-technik.bayern.de/de/left/fachinformationen/chemie_basis/radon_gesundheitsgefahren.htm)

Radon – ein Edelgas belastet das Wohnen. Themenpapier des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: [www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/radon\\_themenpapier.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/radon_themenpapier.pdf)

[www.ssk.de/werke/volltext/2005/ssk0503.pdf](http://www.ssk.de/werke/volltext/2005/ssk0503.pdf)

Informationen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission: [www.ssk.de](http://www.ssk.de)

**Vermeidbare Zahl von Lungenkrebstoten ...**

... pro Jahr in Deutschland durch Begrenzung der Radonbelastung

Maximalwert [Bq/m <sup>3</sup> ]	Anzahl vermeidbarer Lungenkrebstodesfälle
9 (Außenluft)	1896
100	302
200	143
400	68
1000	20

(aus Menzler et al 2006)

ist, denn dann müssten wir im Freien oder in Zelten leben.

Insgesamt zeigen diese Abschätzungen, dass Radon in Wohnungen nach dem Tabak das wichtigste umweltbedingte Krebsrisiko für die Bevölkerung ist, deutlich vor Asbest, Benzol, Dioxinen, Cadmium, Arsen, Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen und weiteren Kanzerogenen. Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos sind daher dringend erforderlich.

**Radon reduzieren**

Bei erhöhtem Radon-Gehalt der Raumluft gibt es verschiedene Methoden zu dessen Reduzierung. Eine einfache Maßnahme besteht im häufigen und stoßweisen Lüften. Reicht das Lüften allein nicht aus, um die Radon-Exposition zu senken, kommt als weitere Maßnahme die Beseitigung von Undichtigkeiten in Betracht. Potentielle Eintrittsstellen für Radon wie Risse und Fugen in Boden und Wänden, Rohrdurchführungen sowie Leitungskanäle und -rohre sollten abgedichtet werden. Führen auch diese Maßnahmen nicht zum Erfolg,

men gegen den Eintritt von Radon ins Gebäudeinnere ergriffen werden, wie:

- Durchgehende Bodenplatte statt Streifenfundament;
- Mechanische Luftabführung im Unterbau oder unter dem Gebäude;
- radondichte Folie unter die Bodenplatte bringen;
- Leitungsdurchführungen für Wasser, Elektrizität, TV, oder Erdsonden ins Erdreich sorgfältig abdichten, eventuell oberirdisch verlegen;
- Dichte Türen zwischen Kellerräumen und Wohnräumen;
- Abgeschlossene Treppenhäuser.

**Literatur:**

S. Darby et al.: *Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies.* BMJ. 2005 Jan 29; 330(7485):223. Epub 2004 Dec 21.

H. E. Wichmann et al.: *Increased lung cancer risk due to residential radon in a pooled and extended analysis of studies in Germany.* Health Phys. 2005 Jan; 88(1):71-9.

S. Menzler, A. Schaffrath-Rosario, H.E. Wichmann, L. Kreienbrock: *Abschätzung des attributablen Lungenkrebsrisikos in*

# Lungenkrebs durch Radon

## Der Radon-Messdienst der GSF-Auswertungsstelle

Thomas Haninger

### Was ist Radon? Wo kommt es her?

Die Erdkruste enthält die natürlichen Radionuklide Uran-238, Uran-235, Thorium-232 und Kalium-40. Als Zwischenprodukt der Zerfallsreihe von Uran-238 entsteht über Radium-226 das radioaktive Edelgas Radon-222 (Rn-222), das eine Halbwertszeit von 3,8 Tagen besitzt. Radon geht mit anderen Elementen keine chemischen Verbindungen ein und ist deshalb besonders mobil. Es kann sich im Erdboden ausbreiten, in Gebäude eindringen und sich dort in der Raumluft anreichern. Dies geschieht vor allem im Winter.

Hauptursache für hohe Radonkonzentrationen ist die geologische Beschaffenheit des Bauuntergrundes. Erhöhte Konzentrationen treten insbesondere in älteren Gebäuden auf, da diese manchmal Risse und undichte Stellen im Kellerbereich aufweisen und oft keinen Betonboden besitzen. Die Baumaterialien selbst sind nur in seltenen Fällen für überhöhte Radonwerte verantwortlich. Im Mittel liegt die Radonkonzentration in Gebäuden in Deutschland bei 50 Bq/m<sup>3</sup> Raumluft. Eine Besonderheit stellen wasserwirtschaftliche Anlagen dar. Hier können Werte von über 100.000 Bq/m<sup>3</sup> Raumluft erreicht werden. Die Ursache dafür ist das Grundwasser, in dem Radon gelöst ist und beim Austritt an die Oberfläche in die Raumluft übertritt. Hohe Radonkonzentrationen findet man vor allem in Sammelbehältern, die schlecht belüftet sind, allerdings auch nur selten betreten werden. Im Trinkwasser beim Endverbraucher ist Radon aber kein Problem.

### Gesetzliche Regelungen

Gesetzliche Regelungen zur Beschränkung der Radonkonzentrationen in Wohnungen sind zur Zeit in Vorbereitung.

Arbeitsplätze mit erhöhter Exposition durch natürliche Radionuklide unterliegen der Strahlenschutzverordnung. Eine Radonexposition von über  $2 \times 10^6$  Bq/m<sup>3</sup> mal Anzahl der Stunden muss der zuständigen Aufsichtsbehörde – in der Regel das Landesamt für Umweltschutz – gemeldet werden. Darüber hinaus sind Maßnahmen zur Senkung der Exposition einzuleiten. Die Radonexposition berechnet sich aus der mittleren

Radonkonzentration multipliziert mit der Aufenthaltsdauer an diesem Arbeitsplatz in Stunden pro Jahr.

### Wie wird Radon gemessen?

Die GSF-Auswertungsstelle für Strahlendosimeter ist als amtliche Messstelle gemäß ISO/IEC-Norm 17025 akkreditiert und bietet Radonmessungen in der Raumluft nach dem Kernspurmessverfahren gemäß DIN 25706-1 an.

Ein passives Radon-Messgerät (auch Radonexposimeter oder Radondosimeter genannt) besteht aus einer kleinen Diffusionskammer mit einem Durchmesser von 58 Millimetern und einer Höhe von 24 Millimetern. Das Gehäuse besteht aus schwarzem, elektrisch leitenden Kunststoff zur Vermeidung elektrostatischer Aufladungen. Das Edelgas Radon kann durch einen kleinen Schlitz zwischen Gehäusedeckel und Boden in das Innere eindringen und zerfällt dort unter Aussendung von Alpha-Strahlung. Diese erzeugt in einem speziellen Kunststoffchip kleine, latente Spuren. Nach Beendigung der Messung wird das Dosimeter an die Auswertungsstelle zurückgeschickt. Dort wird der Plastikchip in Natronlauge bei 94 °C vier Stunden lang geätzt. Die latenten Spuren werden durch die Ätzung so stark vergrößert, dass sie mit einem lichtmikroskopischen Verfahren gezählt werden können. Die Anzahl der Spuren ist ein Maß für die Radonexposition, das heißt für die Radonkonzentration summiert über die Zeit.

### Messungen in Wohnungen

Radonkonzentrationen in Gebäuden unterliegen starken zeitlichen Schwankungen. Aus meteorologischen Gründen treten hohe Ra-



Passives Radonmessgerät mit Kernspurdetektor.

Fotos: Michael van den Heuvel



**Auswertegerät für Kernspurdetektoren: Die Anzahl der Spuren ist ein Maß für die Radonexposition.**

Fotos: Bernd Müller

Radonkonzentrationen eher im Winter auf. Um diese Schwankungen auszugleichen, wird eine Messdauer von mindestens drei Monaten empfohlen, die in der Heizperiode liegen sollten. Die Messungen können aber auch bis auf ein Jahr ausgedehnt werden. Um einen möglichst repräsentativen Wert der mittleren Radonbelastung zu erhalten, sollte in Räumen gemessen werden, in denen sich die

Bewohner am häufigsten aufhalten, wie zum Beispiel im Wohn-, Kinder- und Schlafzimmer. Da Radon hauptsächlich aus dem Bauuntergrund kommt, sollte mindestens ein Messort im Erdgeschoss liegen. Eine Messung im Keller empfiehlt sich nur dann, wenn sich die Bewohner regelmäßig dort aufhalten, zum Beispiel wenn der Keller als Büro oder Hobbyraum genutzt wird.

Radondosimeter sollten an gut zugänglichen Stellen platziert werden, beispielsweise in einem Bücherregal. Zugige Plätze wie Fensterbänke oder Stellen, an denen die Luft schlecht zirkuliert, sind zu vermeiden, ebenso eine direkte Sonnenbestrahlung oder Erwärmung der Dosimeter auf über 35 °C.

Passive Radonmessgeräte können beim Radon-Messdienst der GSF - Auswertungsstelle oder einer anderen akkreditierten Messstelle bestellt werden. Der Kunde erhält dann die Messgeräte mit einer ausführlichen Gebrauchsanweisung per Post zugeschickt und kann sie nach dem Ende der Messung zusammen mit einem kurzen Protokoll zurücksenden. Die Auswertung und die Erstellung eines Ergebnisberichtes erfolgt innerhalb von vier Wochen. Die Kosten einer Radonmessung in der Wohnung betragen üblicherweise 30 bis 50 Euro.



**Messungen in wasserwirtschaftlichen Anlagen**

In wasserwirtschaftlichen Anlagen beträgt die Messdauer wegen der dort vorkommenden höheren Radonkonzentration nur 14 Tage, um ein Überschreiten der oberen Messgrenze zu vermeiden. Bei einer geringen Anzahl von Hochbehältern und einem Aufenthalt von weniger als 20 Stunden pro Jahr in den Anlagen sind in der Regel Ortsmessungen zur Abschätzung der Radonexposition des Personals ausreichend. Ansonsten muss ein personengebundenes Radonexposimeter getragen werden, das vor dem Betreten einer Anlage angelegt werden muss und danach in frischer Luft gelagert werden sollte. Die Überwachungsperiode bei personengebundenen Messungen beträgt normalerweise drei Monate.

**Weitere Informationen**

Radonmessungen können unter folgender Adresse angefordert werden:  
GSF-Auswertungsstelle  
Radon-Messdienst  
Ingolstädter Landstraße 1  
85764 Neuherberg  
Telefon (089) 3187-2220  
Internet: <http://awst.gsf.de>  
E-Mail: [haninger@gsf.de](mailto:haninger@gsf.de)

**Internet:**

- Bundesamt für Strahlenschutz:  
[www.bfs.de/ion/radon](http://www.bfs.de/ion/radon)  
[www.bfs.de/ion/radon/radon\\_in\\_haeusern.html](http://www.bfs.de/ion/radon/radon_in_haeusern.html)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:  
[www.bmu.de/strahlenschutz](http://www.bmu.de/strahlenschutz)
- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz:  
[www.bayern.de/lfu/strahlen](http://www.bayern.de/lfu/strahlen)
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz:  
[www.stmugv.bayern.de/de/strahl/radon](http://www.stmugv.bayern.de/de/strahl/radon)
- Strahlenschutzkommission:  
[www.ssk.de](http://www.ssk.de)

20 Jahre danach

# Der Unfall von Tschernobyl

**Peter Jacob** Kein Ereignis hat den Glauben in die friedliche Nutzung der Kernenergie so massiv und nachhaltig erschüttert wie die nun 20 Jahre zurückliegende Reaktorkatastrophe von Tschernobyl. Technisches Versagen und menschliches Fehlverhalten hatten dazu geführt, dass riesige Mengen radioaktives Material in die Umwelt freigesetzt wurden und zahllose Menschen in ganz Europa mit Radionukliden aus dem Reaktor in Kontakt kamen. In der Folge wurde in großen Studien untersucht, wie sich die radioaktiven Kontaminationen auf die Gesundheit der betroffenen Menschen auswirken und welche Maßnahmen geeignet sind, einen effektiven vorsorglichen Strahlenschutz zu gewährleisten.

**A**m 26. April 1986 ereignete sich im Reaktorblock 4 der Kernkraftwerksanlage bei Tschernobyl in der Ukraine der bisher größte nukleartechnische Unfall. Durch eine Explosion wurden riesige Mengen radioaktiven Materials in die Atmosphäre geschleudert und ein zehn Tage lang währendes Feuer in der Reaktoranlage setzte weitere große Radionuklidmengen frei. Kernbrennstoffteile und größere radioaktive Aerosole lagerten sich in der Umgebung des Reaktors ab, kleine radioaktive Aerosole und Gase verteilten sich dagegen weitläufig über den gesamten europäischen Kontinent. Selbst in zweitausend Kilometern Entfernung vom Unglücksort führten Regenfälle zu beträchtlichen Ablagerungen von Radionukliden aus dem Unglücksreaktor.

Mehr als 300.000 Menschen wurden aus den hoch kontaminierten Gebieten evakuiert oder umgesiedelt. Viele derjenigen, die in radioaktiv belasteten Regionen wohnten oder immer noch wohnen, müssen mit dem Stigma ‚Tschernobyl-Opfer‘ leben. Dies führte zu massiven psychologischen und soziologischen Problemen.

Eine fehlende beziehungsweise völlig misslungene Information der betroffenen Menschen durch die Behörden verschlimmerte die Folgen des Tschernobyl-Unfalls drastisch. In den 1980er-Jahren gehörte es noch zum System der Sowjetunion, die Bevölkerung über Umweltkatastrophen im Unklaren zu lassen. Abgesehen davon, dass zahlreiche Strahlenexpositionen von Menschen hätten vermieden werden können, führte dies zu einem tiefen Misstrauen der Bevölkerung gegenüber dem politischen System. Dies trug sicherlich zur Auflösung der Sowjetunion bei.

Aber auch in den westlichen Demokratien herrschte – und herrscht immer noch – in Teilen der Bevölkerung Misstrauen gegenüber den offiziellen Verlautbarungen über die strahlenbedingten Gesundheitsrisiken. Angesichts dieser Situation bemühen sich internationale Gremien wie das „Wissenschaftliche Komitee der Vereinten Nationen für

die Effekte von Atomstrahlung“ (UNSCEAR) und das „Tschernobyl-Forum“ der Vereinten Nationen, die Fakten objektiv darzustellen.

## Radioaktive Kontaminationen

Etwa fünfzig Prozent der aus dem Reaktor emittierten Aktivität bestand aus dem radioaktiven Edelgas Xenon-133. Da sich radioaktive Edelgase nur zu einem äußerst geringen Teil in der Umwelt und bei Inhalation in der Lunge ablagern, sind andere Radionuklide für die Strahlenexposition der Bevölkerung von wesentlich größerer Bedeutung. Dies sind insbesondere Jod-131 mit einer Halbwertszeit von acht Tagen, Cäsium-134 mit einer Halbwertszeit von zwei Jahren und Cäsium-137 mit einer Halbwerts-

zeit von 30 Jahren. Strontium und Plutonium wurden vor allem in der näheren Umgebung des Tschernobyl-Reaktors abgelagert und spielten deshalb für andere Regionen eine nur untergeordnete Rolle.

Insgesamt wurden 200.000 Quadratkilometer mit über 37 kBq Cäsium-137 pro Quadratmeter (1 Curie pro Quadratmeter) kontaminiert. Dies bedeutet, dass in den ersten Monaten nach der Ablagerung in jeder Sekunde mehr als 37.000 Cäsium-137-Atome je Quadratmeter Boden zerfallen sind und Gammastrahlung ausgesendet haben. Nach 20 Jahren hat sich die abgelagerte Cäsium-137-Aktivität auf Grund dieser Zerfälle um ein Drittel verringert. 71 Prozent der kontaminierten Gebiete liegen in der Ukraine, in Weißrussland und Russland. In Deutschland gehören einige Orte am Alpenrand zu den kontaminierten Regionen.

Durch die Ablagerungen der Radionuklide wurden auch Lebensmittel radioaktiv belastet. Insbesondere war die Jod-131-Kontamination von Milch und – in geringerem Maße – von Blattgemüse von Bedeutung. Folgende Maßnahmen wurden ergriffen, um die Belastung von Mensch und Tier möglichst gering zu halten:

- Einnahme von Tabletten mit stabilem Jod, um die Aufnahme von Jod-131 in die menschliche Schilddrüse zu vermindern. Dies wurde mit gutem Erfolg in Polen durchgeführt. Die Jodprophylaxe wurde auch – allerdings nur in geringem Maße – von Arbeitern am Unfallort, von den aus der Stadt Pripjat evakuierten Menschen und den Bewohnern einiger weißrussischer Orte angewendet.
- Verbot des Verzehrs von stärker kontaminierter Milch. Dieses Verbot wurde in den ersten Maitagen nach dem Unfall in einigen Gebieten Weißrusslands, aber auch in



**Sperrzone um den havarierten Reaktor. Viele ehemalige Bewohner sind illegal in ihre Dörfer und Häuser zurückgekehrt und beziehen – wie diese Bewohnerin der gesperrten Zone – ihr Trinkwasser aus oberirdischen Brunnen.**

Fotos: Natalia Semiochkina

# Der Unfall von Tschernobyl

zeit – nach acht Tagen ist die Hälfte seiner Aktivität abgeklungen – nur noch sehr geringfügig vorhanden.

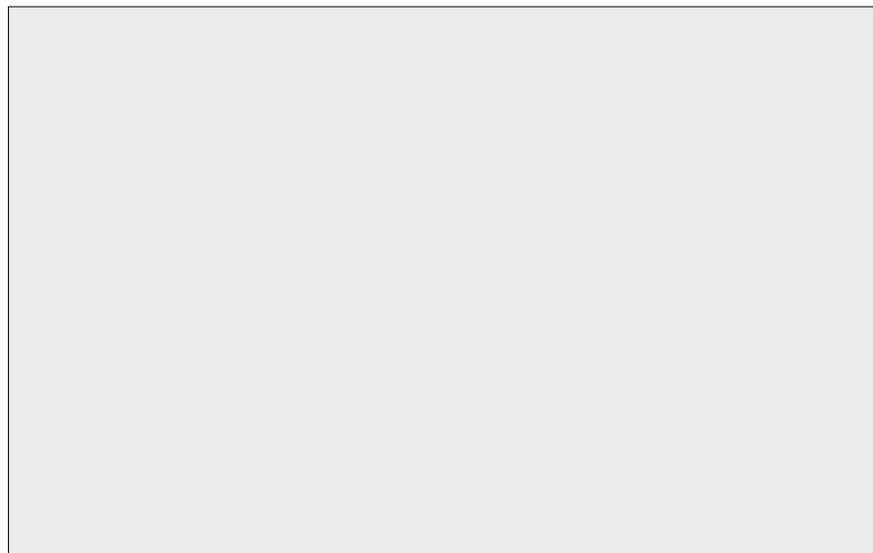
Langfristige Kontaminationen von Nahrungsmitteln wurden insbesondere durch Cäsium-134 und Cäsium-137 verursacht. In Deutschland erreichten die Cäsium-Kontaminationen keine Werte, die Gegen-

die nur wenig Cäsium aufnehmen. Außerdem wurden dem Futter der Kühe Cäsium-Binder hinzugefügt. Jede dieser beiden Maßnahmen führte zu einer Reduzierung der Milchkontamination um etwa einen Faktor drei.

In den späten 1990er-Jahren verarmte die Bevölkerung in den betroffenen Regionen jedoch zunehmend, die Intensität der Gegenmaßnahmen ließ nach und die Strahlenbelastung der Bevölkerung nahm wieder zu. Während in den ersten Jahren natürliche Prozesse – das Einwandern des Cäsiums in den Erdboden, seine Bindung an die Bodenmatrix und die damit verbundene geringere Pflanzenverfügbarkeit – die Kontamination von landwirtschaftlichen Produkten relativ schnell verringerte, hat sie in den letzten Jahren nur noch um jährlich drei bis sieben Prozent abgenommen. Gegenwärtig wird bei der Internationalen Atomenergie Organisation IAEA ein Programm entwickelt, das die Optimierung von Gegenmaßnahmen in den höher kontaminierten Gebieten der Ukraine, Weißrusslands und Russlands unterstützen soll.

Im Gegensatz zu den landwirtschaftlichen Produkten bleibt die Kontamination von Pilzen und Wildfleisch relativ konstant auf hohem Niveau. Dies ist vor allem deshalb von großer Bedeutung, weil diese Waldprodukte insbesondere in den ländlichen Gebieten der Ukraine, Weißrusslands und Russlands eine wichtige Nahrungskomponente darstellen. Als Gegenmaßnahmen wurden Nutzungsverbote ausgesprochen beziehungsweise Empfehlungen für die Zubereitung gegeben, die die Aktivität in der Speise verringern sollen, so zum Beispiel mehrfaches Kochen von Pilzen und Abgießen des Kochwassers.

Auch in Süddeutschland können immer noch erhebliche Kontaminationen in Waldprodukten auftreten. So wurden Werte von über zwei Kilobecquerel (kBq) Cäsium je Kilogramm Wildschweinfleisch oder Maronenröhrlinge nachgewiesen. Normales Putzen der Pilze reduziert den Cäsiumgehalt um einen Faktor zwei. Ein Wildschwein- oder Pilzgericht mit einer Gesamt-



**Waldfrüchte und Pilze stellen in den ländlichen Regionen der GUS-Staaten eine wichtige Nahrungskomponente dar. Ihre Belastung ist nach wie vor hoch.** Foto: Hans Madej, Bilderberg

den höher kontaminierten Gebieten Deutschlands verhängt.

- Verlängerung der Fütterung mit nicht kontaminiertem Winterfutter und Verarbeitung höher kontaminierter Milch zu lagerbaren Milchprodukten, damit die Aktivität abklingen kann. Diese beiden Maßnahmen wurden in den kontaminierten Regionen Südbayerns durchgeführt.
- Unterpflügen von kontaminiertem Blattgemüse. Diese Maßnahme wurde ebenfalls in den kontaminierten Gebieten Süddeutschlands angeordnet.

In Polen und in Süddeutschland wurde durch diese Maßnahmen ein wesentlicher Teil der potentiellen Jod-131-Exposition der Bevölkerung vermieden. Der Erfolg in der ehemaligen Sowjetunion war allerdings wegen der späten Anwendung und der mangelhaften Informationspolitik nur mäßig.

Spätestens seit August 1986 sind Kontaminationen mit Jod-131 auf Grund seiner kurzen Halbwerts-

maßnahmen erforderlich gemacht hätten. In den stärker belasteten Gebieten der Ukraine, Weißrusslands und Russlands führte die Ablagerung von Cäsium-137 auf dem Weidegras in den beiden ersten Jahren nach dem Unfall zu erhöhten Kontaminationen der Milch. Der Milchkonsum wurde somit zu einem wesentlichen Expositionspfad, dennoch wurden – zumindest in dieser Zeit – kaum Gegenmaßnahmen ergriffen. Darüber hinaus wurde die radioaktive Kontamination über das Winterfutter bis zum Frühling 1988 verschleppt.

In den darauf folgenden Jahren waren Weidegras und andere Nutzpflanzen – wenn auch in geringerem Umfang – durch Cäsium-137 kontaminiert, das über die Wurzeln aus dem Boden aufgenommen wurde. Zwischenzeitlich war jedoch das Problembewusstsein in den Folgestaaten der Sowjetunion gewachsen: Weideflächen wurden in großem Umfang gepflügt, gedüngt und mit Grassorten besät,

aktivität von 1 kBq Cäsium führt zu einer effektiven Dosis von 0,013 mSv, die so gering ist, dass man sich den Genuss einer solchen Mahlzeit nicht verderben lassen sollte. Zum Vergleich: Die natürliche Strahlenexposition beträgt im Mittel pro Jahr 2,0 mSv mit einem Schwankungsbereich von 1 bis 10 mSv.

sen bestimmt werden. In Interviews wurden Informationen über den Austrieb von Kühen auf kontaminierte Weiden, die Beendigung des Verzehrs kontaminierter Milch und die Durchführung einer Jodprophylaxe erfragt. Mit diesen Angaben konnte der zeitliche Verlauf der Jod-131-Aktivität in der Schilddrüse re-

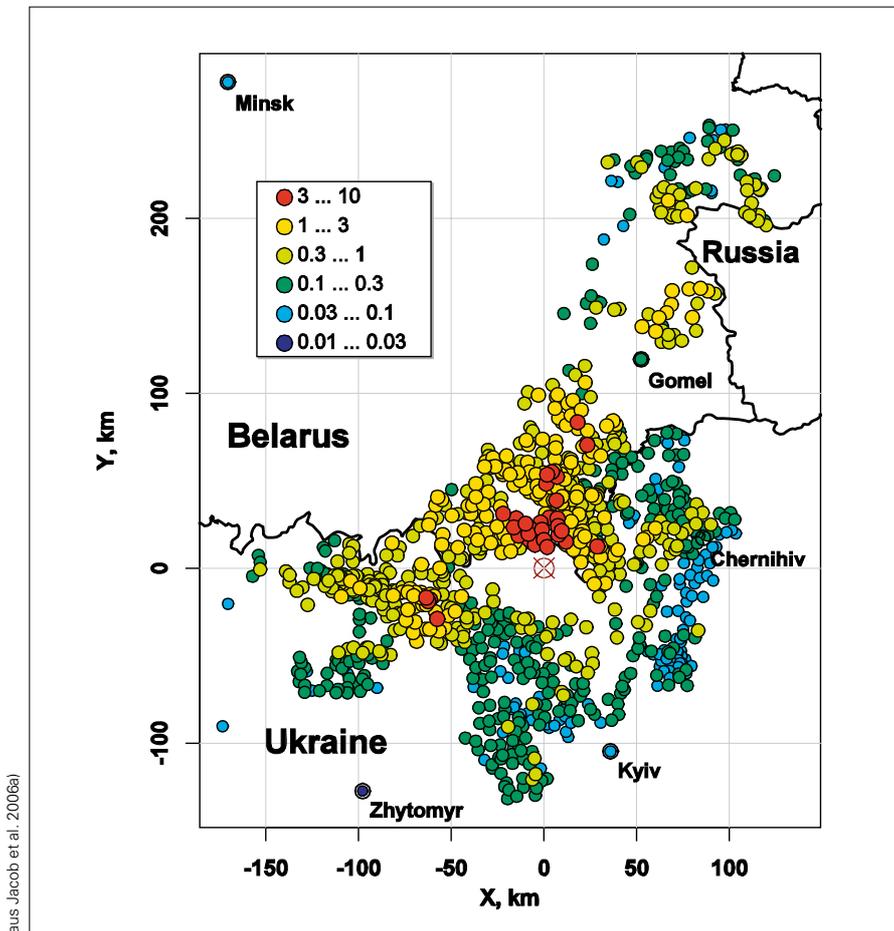
Schilddrüsensdosen von mehr als 100 mSv.

Die Dosen von Kleinkindern waren auf Grund der geringeren Schilddrüsenmasse und der fast gleich großen inkorporierten Aktivität um einen Faktor zwei bis drei höher als die mittleren Dosen. Bei ihnen wurden mit 15 Sv die höchsten Dosen gefunden. Die Strahlenexpositionen von im Jahre 1986 geborenen Kindern waren eher geringer als die Dosen von Kleinkindern, die vor dem Unfall geboren wurden.

Bei Kindern aus dem am höchsten kontaminierten deutschen Alpenrandgebiet lagen die Schilddrüsensdosen auf Grund der guten Vorsorge im Bereich von 5 mSv. Dies entspricht einer effektiven Dosis von 0,25 mSv.

Verglichen mit der Schilddrüse sind die Dosen der anderen Organe gering. Externe Strahlenexpositionen und Expositionen durch inkorporiertes Radiocäsium belasten den gesamten Körper im Wesentlichen gleichmäßig stark. Es wurde geschätzt, dass in den ersten zehn Jahren nach der Reaktorkatastrophe insgesamt etwa 10.000 Menschen mit effektiven Dosen von mehr als 100 mSv exponiert wurden. Gegenwärtig werden noch mehr als 100.000 Bewohner der kontaminierten Gebiete mit mehr als 1 mSv jährlich exponiert. Demgegenüber betragen die über die gesamte Lebenszeit aufsummierten effektiven Dosen in den am höchsten kontaminierten Gebieten Deutschlands nur 2 mSv.

Insgesamt betrachtet gab es in den betroffenen Gebieten der Ukraine, Weißrusslands und Russlands über eine Millionen Menschen mit erheblichen Schilddrüsensdosen durch radioaktives Jod und etwa 10.000 Menschen mit erheblichen effektiven Dosen durch andere Radionuklide, insbesondere Cäsium. In den am höchsten kontaminierten Gebieten Deutschlands entsprechen die Strahlenexpositionen durch den Tschernobyl-Unfall nur etwa einer Jahresdosis durch natürliche Strahlung und waren deutlich geringer als die Variabilität der jährlichen natürlichen Strahlenexposition.



Mittlere Schilddrüsensdosen (Sv) von Kindern und Jugendlichen im April/Mai 1986 in 1034 durch den Reaktorunfall von Tschernobyl kontaminierten Orten der Ukraine und Weißrusslands, in denen jeweils mehr als zehn Messungen der Jod-131-Aktivität in der menschlichen Schilddrüse durchgeführt wurden.

## Strahlenexpositionen der Bevölkerung

Die höchsten Organdosen traten durch Inkorporation von radioaktivem Jod-131 in der Schilddrüse auf. In der ehemaligen Sowjetunion wurden in den ersten Wochen nach dem Reaktorunfall insgesamt 350.000 Messungen der Gammastrahlung, die durch radioaktiven Zerfall in der Schilddrüse emittiert wurde, durchgeführt. Mit Hilfe von Kalibrierfaktoren konnten so die Jod-131-Gehalte in den Schilddrü-

konstruiert und – zusammen mit den Messungen – die durch inkorporiertes Jod-131 verursachte Schilddrüsensdosis ermittelt werden.

In der Abbildung ist die mittlere Dosis von Kindern und Jugendlichen in 1034 ukrainischen und weißrussischen Orten dargestellt, in denen jeweils mehr als zehn Messungen der Jodaktivität in der Schilddrüse durchgeführt wurden. In mehr als 30 Orten lagen die mittleren Schilddrüsensdosen bei über 3 Sv, insgesamt erhielten 100.000 Kinder und Jugendliche

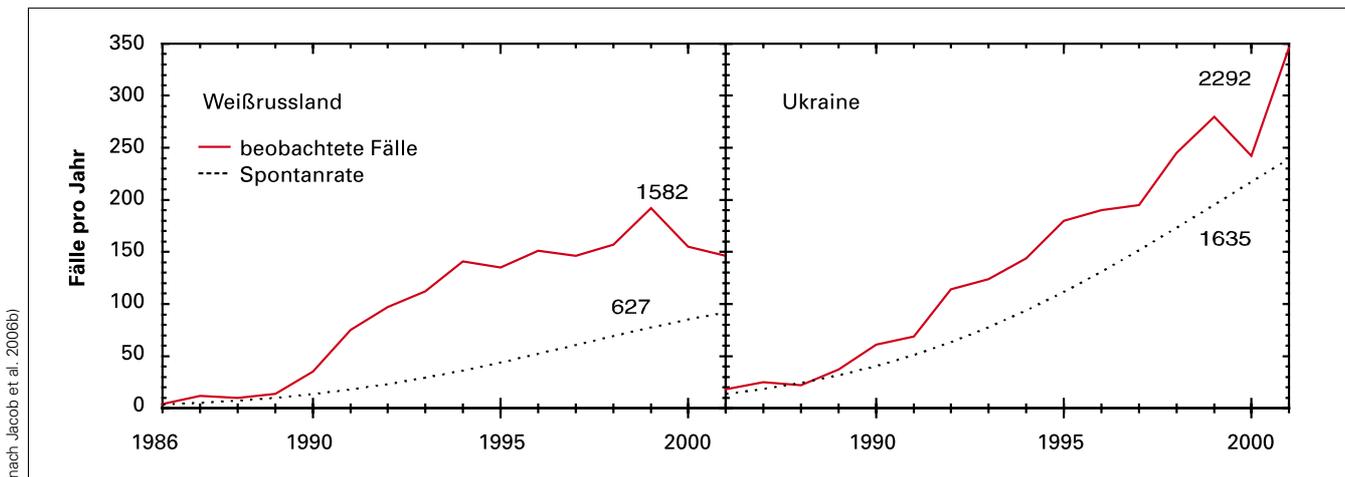
# Der Unfall von Tschernobyl

## Gesundheitsfolgen durch den Reaktorunfall

Nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl wurde der Zusammenhang der Strahlenexposition und der Erkrankungsrate an Schilddrüsenkrebs detailliert untersucht. Für andere Krebserkrankungen wie Leukämien und Krankheiten des Herz-Kreislauf-Systems wurden wegen der relativ geringen Strahleneffek-

eine signifikante Zunahme der Schilddrüsenkrebsrate bei Menschen, die zum Unfallzeitpunkt Kinder oder Jugendliche waren. In Gomel, dem am höchsten kontaminierten Gebiet in Weißrussland, war der Effekt besonders dramatisch. Hier war die beobachtete Anzahl von Fällen um einen Faktor 6 höher als die Spontanrate, für die allerdings nur ein Schätzwert vorliegt. Insgesamt wurden im Zeitraum 1986 bis 2002 in der Ukraine und Weißrussland unter denjenigen, die zum Zeitpunkt des Unfalls Kinder und Jugendliche waren (Geburt vor 1986), 4400 Schilddrüsenkrebsfälle registriert. Im Geburtsjahrgang 1986 waren es 124 Fälle. Unter Berücksichtigung der höher kontaminierten Gebiete Russlands (Bryansk, Kaluga, Orel, Tula) erhöhen sich die Zahlen um zirka zehn Prozent.

le zurückzuführen sei. Durch Autopsiestudien in verschiedenen Ländern ist bekannt, dass zirka zehn Prozent der Bevölkerung Schilddrüsenkrebs haben, ohne dass dies vor dem Tod bekannt wird. Ein Teil dieser so genannten okkulten Schilddrüsenkrebsfälle kann durch verbesserte Untersuchungsmethoden entdeckt werden. Tatsächlich wurden in den kontaminierten Gebieten vermehrt Ultraschalluntersuchungen der Schilddrüsen durchgeführt. Aber auch ohne Ultraschall führt schon eine höhere Aufmerksamkeit bei medizinischen Untersuchungen zu einem häufigeren Nachweis von Schilddrüsenkrebs. Drei Fall-Kontrollstudien in Weißrussland und Russland zeigten allerdings einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Strahlenexposition und Erhöhung der Inzidenzrate.



### Jährliche Schilddrüsenkrebsoperationen unter denjenigen, die zum Zeitpunkt des Tschernobylunfalls Kinder oder Jugendliche waren.

te nur wenige Studien durchgeführt. Demgegenüber gibt es einige Untersuchungen der sozialen und psychologischen Folgen des Unfalls. Widersprüchliche oder unklare Aussagen gibt es zu Missbildungen bei Neugeborenen, Totgeburten und erhöhter Kindersterblichkeit.

## Schilddrüsenkrebs

Seit 1990 gibt es in Weißrussland und in den stärker kontaminierten Gebieten der Ukraine (Zhytomyr, Chernihiv und Kyiv) und Russlands

In Gomel war die Inzidenzrate um mehr als einen Faktor 10 höher als in den niedriger kontaminierten Gebieten der Ukraine. Sie lag um einen Faktor 3 höher als in den USA, wobei die USA die höchste Schilddrüsenkrebsrate aller Länder, die große Krebsregister führen, aufweist. In der Ukraine waren die Schilddrüsendosen im Mittel deutlich niedriger. Dementsprechend lag die Inzidenzrate im mittleren Bereich der Raten, wie sie auch in nicht vom Reaktorunfall betroffenen Ländern vorkommen.

In den 1990er-Jahren entstand eine Diskussion darüber, ob die Zunahme von Schilddrüsenkrebs direkt auf die Strahlenwirkung oder eher auf eine verbesserte Nachweis- und Berichtsrate der Krebsfäl-

Eine Untersuchung der Schilddrüsenkrebsinzidenz in den oben schon genannten 1034 ukrainischen und weißrussischen Orten ergab, dass die jährliche Anzahl der zusätzlichen Krebsfälle über den gesamten Beobachtungszeitraum von 1990 bis 2001 kontinuierlich angestiegen ist. Daraus kann geschlossen werden, dass ein wesentlicher Teil der Schilddrüsenkrebsfälle wohl erst in der Zukunft zu erwarten ist. Andererseits nimmt die spontane Schilddrüsenkrebsinzidenz mit zunehmendem Alter der Exponierten zu, so dass das relative Risiko – das Verhältnis der Gesamtfälle zu den Spontanfällen – mit der Zeit nach der Exposition abnimmt.

Eine Analyse der in den verschiedenen Gebieten der Ukraine

und Weißrusslands aufgetretenen Strahlenexpositionen und Schilddrüsenkrebsfälle zeigte, dass die spontane Schilddrüsenkrebsinzidenz durch die verbesserte Nachweis- und Berichtsrate von 1988 bis 1999 in den höher kontaminierten Gebieten um einen Faktor 3 und in den niedriger kontaminierten Gebieten um einen Faktor 2 zugenommen hat. In den Jahren 1990 bis 2001 sind nach dieser Analyse 30 Prozent der ukrainischen und 60 Prozent der weißrussischen Fälle der Jahrgänge 1968 bis 1985 direkt auf die Strahlenexposition zurückzuführen. Eine langfristige Beobachtung von 741 weißrussischen Schilddrüsenkrebspatienten, die im Kindesalter operiert worden waren, ergab eine fünfjährige Überlebensrate von 99,3 Prozent und eine zehnjährige Überlebensrate von 98,5 Prozent. Es gibt also eine hohe Überlebenschance für die Schilddrüsenkrebspatienten. Allerdings traten bei 27 Prozent der Patienten Rückfälle (Rezidive) auf.

## Andere Krebsarten

Durch Studien an den Überlebenden der Atombombenabwürfe von Hiroshima und Nagasaki ist bekannt, dass die Leukämie unter den strahlenbedingten Spätfolgen einer Gamma-Bestrahlung derjenige mit dem höchsten relativen Risiko ist. Vor allem bei Menschen, die in jungem Lebensalter exponiert werden, tritt die Erkrankung bereits in den ersten Jahren nach der Exposition auf.

Auch nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl wurden mehrere Studien durchgeführt, die den Zusammenhang von freigesetzter Strahlung mit dem Auftreten von Leukämien untersuchten. In der *European Childhood Leukaemia-Lymphoma Incidence Study (ECLIS)* wurden die Inzidenzdaten für Kinder unter 15 Jahren aus den Krebsregistern von 23 Ländern ausgewertet. Die mittleren Strahlenexpositionen wurden aus Kontaminationen der Umgebung und der Lebensmittel abgeschätzt. Die Zahl der Leukämiefälle war nach dem Tschernobyl-Unfall signifikant höher als zuvor. Allerdings gab es keine Korrelation



(nach Jacob et al. 2006)

Die Karte zeigt die Regierungsbezirke (Oblasts) in der Ukraine und in Weißrussland. In dem Diagramm auf der gegenüberliegenden Seite sind die mittlere Schilddrüsendosis der Kinder und Jugendlichen durch den Tschernobylunfall und die Inzidenzrate von Schilddrüsenkrebsoperationen im Zeitraum 1986 bis 2001 für die jeweiligen Regierungsbezirke aufgetragen. Die roten Linien entsprechen einem zusätzlichen relativen Risiko je Schilddrüsendosis von 10 pro Sievert für zwei angenommene Werte der spontanen Inzidenzrate. Zum Vergleich: Die Inzidenzrate betrug in der gleichen Altersgruppe in den USA (Weiße) 2,6, in Kanada 2,1, in der Tschechischen Republik 1,0, in den Niederlanden 0,8 und in England 0,6 Fälle je 100.000 Personenjahre.

zwischen der Strahlenexposition und der Erhöhung der Inzidenz, das heißt die Daten ergaben keinen Hinweis darauf, dass die Zunahme der Leukämiefälle ursächlich auf die Strahlenexposition zurückzuführen ist. In einer Studie in Weißrussland konnte kein Anstieg der Leukämieraten nach dem Tschernobyl-Unfall festgestellt werden. Zudem lagen die Inzidenzraten in den höher kontaminierten Gebieten (Gomel und Mogilev) nicht über denen in den niedriger kontaminierten Regionen.

Außer für Schilddrüsenkrebs gibt es aus wissenschaftlicher Sicht bisher keinen Beweis für eine Erhöhung der Krebsraten bei der Bevölkerung der Ukraine, Weißrusslands und Russlands. Manche Krebserkrankungen besitzen allerdings lange Latenzzeiten, und daher ist nicht auszuschließen, dass erhöhte Krebsraten erst zu einem späteren Zeitpunkt erkennbar werden. Um

diese nachzuweisen sind jedoch sehr aufwändige epidemiologische Studien notwendig.

## Herz-Kreislauf-Erkrankungen

Hohe Strahlenexpositionen können Erkrankungen des Herzens und der Blutgefäße verursachen. Strahleninduzierte Veränderungen der Blutgefäße ähneln denjenigen der Atherosklerose. Bei den Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki wurde ein dosisabhängiger Anstieg der Sterblichkeit durch Herz-Kreislauf-Erkrankungen nachgewiesen.

Eine Studie an russischen Arbeitern, die zu Aufräumarbeiten am Unglücksreaktor eingesetzt waren, ergab ebenfalls eine signifikante dosisabhängige Erhöhung der Sterblichkeit durch Herz-Kreislauf-Erkrankungen.

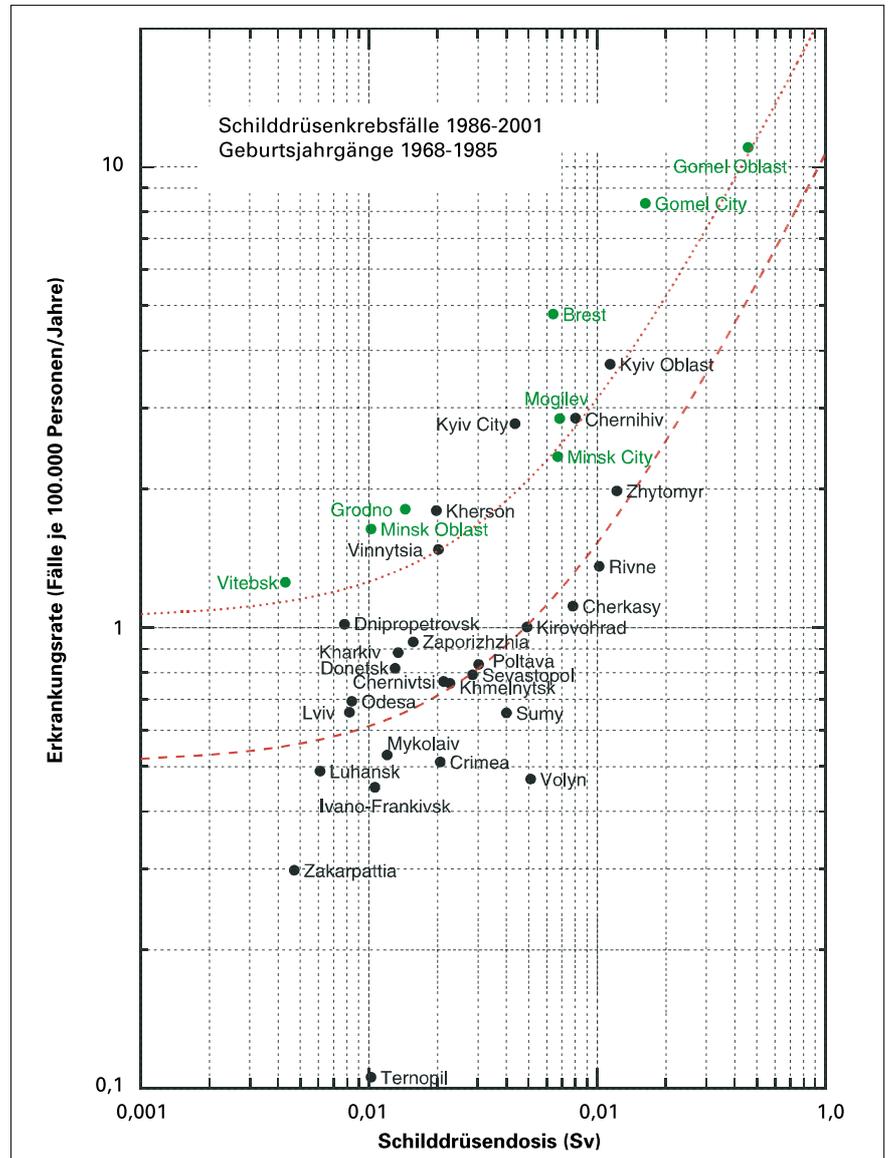
# Der Unfall von Tschernobyl

kungen. Allerdings war in der gleichen Gruppe die Häufigkeit des Auftretens dieser Erkrankungen (Inzidenz) nicht signifikant erhöht. Aufgrund der Widersprüchlichkeit der Ergebnisse dieser und anderer Studien lassen sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch keine definitiven Aussagen darüber machen, ob und wie diese Erkrankungen mit dem Reaktorunfall zusammenhängen.

## Mentale und psychologische Effekte

In einer Reihe von Studien wurde festgestellt, dass bei den durch den Reaktorunfall exponierten Bevölkerungsgruppen verstärkt Depressionen, Angstzustände und medizinisch nicht erklärbare physische Beschwerden auftraten. Teilweise resultierten die Symptome, die meist nur schwach ausgeprägt waren, aus der Überzeugung, dass die eigene Gesundheit durch den Unfall in Mitleidenschaft gezogen worden sei. Ärztliche Diagnosen wie „Tschernobyl-bedingter Gesundheitseffekt“ spielten hierbei sicherlich eine nicht unwesentliche Rolle.

Bei japanischen Atombombenüberlebenden, die vor ihrer Geburt exponiert worden waren, traten vermehrt geistige Behinderungen auf. Obwohl die Strahlenexpositionen der Bevölkerung durch den Tschernobyl-Unfall geringer waren als die Dosen in Japan, gab es dennoch Befürchtungen, dass ähnliche Beeinträchtigungen auch nach dem Reaktorunfall aufgetreten seien. Studien, die daraufhin durchgeführt wurden, fanden jedoch keine neurophysiologischen Effekte bei Kindern, die 1986 nach dem Reaktorunfall in den kontaminierten Gebieten geboren worden waren. Trotzdem glaubten 31 Prozent der



(nach Jacob et al. 2006b)

Schilddrüsenkrebsoperationen und Schilddrüsendosis für die verschiedenen Regierungsbezirke in Weißrussland (grüne Punkte) und der Ukraine (schwarze Punkte).

evakuierten Frauen, aber nur sieben Prozent der Frauen einer Kontrollgruppe, dass ihre Kinder Gedächtnisprobleme hätten, obwohl entsprechende Tests keine markanten Unterschiede ergaben.

Insgesamt betrachtet sind die psychologischen Effekte – neben den Schilddrüsenkrebserkrankungen – das größte durch den Reaktorunfall verursachte Problem für die öffentliche Gesundheit. Es gibt mittlerweile zahlreiche Initiativen, um diesen psychologischen Effekten entgegenzuwirken. So wurde in Gomel ein Informationszentrum eingerichtet, das sich insbesondere an Lehrer und Ärzte wendet. Weiterhin wurden durch eine Initiative der UNESCO in den höher kontaminierten Gebieten der Ukraine, Weiß-

ruslands und Russlands neun Zentren für soziale und psychologische Rehabilitation gegründet. Dort werden individuelle und familiäre Beratungen, Unterstützung zur Bewältigung des täglichen Lebens, Spiel- und Kunsttherapien und Informationskurse angeboten. Bereits mehrere tausend Personen haben diese Leistungen seit der Gründung der Zentren in den Jahren 1993/1994 in Anspruch genommen.

## Auswirkungen in Deutschland: Strahlenschutzvorsorge

Zum Zeitpunkt des Tschernobyl-Unfalls gab es in Deutschland umfangreiche Messprogramme zur Um-

weltradioaktivität, allerdings waren diese im Wesentlichen auf sehr niedrige Umweltkontaminationen eingerichtet, wie sie 20 Jahre nach dem Ende der meisten atmosphärischer Atombombentests noch vorkamen. Die meisten Verfahren erforderten zeitaufwändige Anreicherungsschritte. Im Prinzip waren die Labore auch für Schnellmessverfahren für höhere Kontaminationen eingerichtet, aber wegen der fehlenden Vorbereitungszeit konnten viele Messungen nur mit einer erheblichen Verzögerung durchgeführt werden. Ausnahmen bildeten das GSF-Institut für Strahlenschutz und die ehemaligen BGA-Institute für Strahlenhygiene und Atmosphärische Radioaktivität (jetzt beide im Bundesamt für Strahlenschutz), die schon früh nach der Katastrophe radionuklidspezifische Messungen der Luft- und Niederschlagskontaminationen durchführten und veröffentlichten.

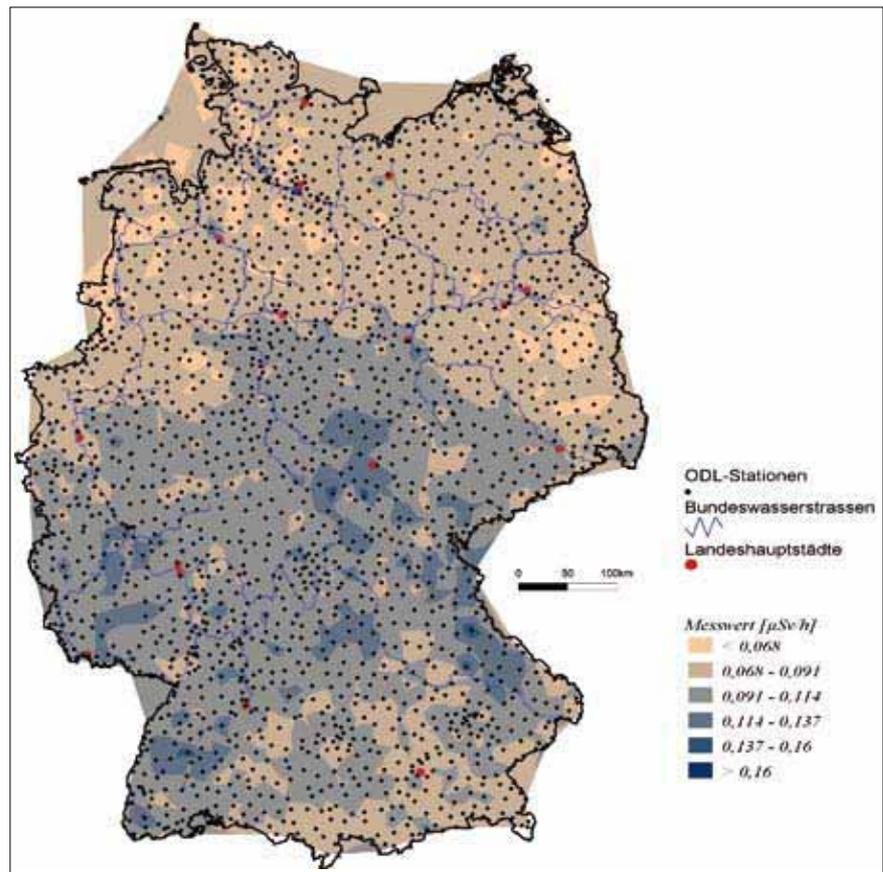
Die von den deutschen Behörden nach dem Tschernobyl-Unfall gemachten Erfahrungen flossen in das Konzept des so genannten Integrierten Mess- und Informationssystems (IMIS) ein. Grundlage dafür war das Strahlenschutzvorsorgegesetz, das noch im Jahre 1986 verabschiedet wurde. IMIS umfasst zirka 2150 Stationen zur Messung der Gamma-Dosisleistung in der Luft und etwa 50 Stationen für nuklidspezifische Messungen. Diese Messungen werden online durchgeführt, im Normalbetrieb in einem Rhythmus von 24 Stunden, im Ereignisfall alle zwei Stunden. Die Messnetze werden durch Messfahrzeuge und Hubschrauber ergänzt. Bei einer Erhöhung der Messwerte wird automatisch eine Frühwarnmeldung ausgegeben. In der Zentralstelle des Bundes werden die IMIS-Daten auf ihre Wertigkeit geprüft, grafisch dargestellt und weiterverarbeitet. So schätzt zum Beispiel das „Programmsystem zur Abschätzung radiologischer Konsequenzen“ (PARK) die durch eventuelle Umweltkontaminationen auftretenden Strahlenexpositionen der Bevölkerung ab. Nach Freigabe der IMIS-Datensätze durch das Bundesumweltministerium wird ein Teil der Daten im Internet veröffentlicht.

Neben der Verbesserung der Messsysteme spielen die Vereinheitlichung der Messverfahren und Datenformate, der organisierte Austausch von Informationen sowie eine gegenseitige Unterstützung bei Messaufgaben eine wesentliche Rolle beim vorsorglichen Strahlenschutz. Traditionell fallen Radioaktivitätsmessungen in der Umgebung von Kernkraftwerken in den Aufgabenbereich der Bundesländer, die flächendeckenden IMIS-Messungen dagegen in die Zuständigkeiten des Bundes. Durch die Umsetzung einer im Jahr 1998 von einer Bund-Länder-Arbeitsgruppe gemachten Empfehlung wurde erreicht, dass diese Messsysteme miteinander gekoppelt und harmonisiert werden.

Auf internationaler Ebene kam es noch im Jahre 1986 zu zwei unter Leitung der Internationalen Atomenergie Organisation (IAEO) geschlossenen Abkommen: Das

Abkommen über die frühzeitige Benachrichtigung bei nuklearen Unfällen und das Abkommen zur Hilfestellung bei nuklearen Unfällen oder radiologischen Notfällen. Der Rat der Europäischen Union erließ 1987 Gemeinschaftsvereinbarungen für den beschleunigten Informationsaustausch im Falle einer radiologischen Notstandssituation. Allerdings sind die europäischen Messsysteme zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht harmonisiert.

Durch die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl wurde auch deutlich, dass in Deutschland einheitliche Vorgaben zum Umgang mit radioaktiven Kontaminationen fehlten. Teilweise widersprüchliche Empfehlungen in den Bundesländern führten zu großen Verunsicherungen in der Bevölkerung. Mittlerweile wurden auf europäischer Ebene einheitliche Regeln eingeführt: In den Jahren 1989 und 1990 legte der Rat der Europäischen Union



**Das Messnetz für die Gamma-Ortsdosisleistung im Rahmen des Integrierten Mess- und Informationssystems (IMIS) umfasst etwa 2150 Stationen (schwarze Punkte). Dargestellt ist der 24-Stunden-Mittelwert der Gamma-Ortsdosisleistung am 15. Januar 2006. Eine aktuelle Darstellung findet sich jeweils unter <http://odlinfo.bfs.de/>**

Grafik: Bundesamt für Strahlenschutz

# Der Unfall von Tschernobyl



Höchstwerte für radioaktive Kontaminationen bei der Vermarktung von Lebens- und Futtermitteln fest.

## Katastrophenschutz

Die Ereignisse von Tschernobyl haben gezeigt, dass ein schnelles und effizientes Handeln im Ereignisfall nur dann möglich ist, wenn die Durchführbarkeit von Empfehlungen und Maßnahmen zum Schutz von Mensch und Umwelt zuvor untersucht wurde. Es wurde ein umfassender Maßnahmenkatalog erstellt, der die Entscheidungsfindung im Ereignisfall erleichtern soll.

Besonders deutlich wurde, dass durch Kontamination der Umwelt mit radioaktivem Jod ein erhöhtes Risiko für Schilddrüsenkrebs besteht. Zuvor war von der Mehrheit der Experten angenommen worden, dass radioaktives Jod bei gleicher Dosis eine geringere krebserzeugende Wirkung hat als externe Strahlung – eine Annahme, die durch die epidemiologischen Untersuchungen nach dem Unfall nicht bestätigt werden konnte.

Durch prophylaktische Einnahme von Tabletten mit stabilem Jod kann die Aufnahme von radioaktivem Jod in die menschliche Schilddrüse erheblich verringert werden. Unter dem Eindruck des Tschernobyl-Unfalls hat die Strahlenschutzkommission ihre Empfehlungen für Eingreifrichtwerte zur Verteilung von Jodtabletten geändert. Es wird davon ausgegangen, dass die Jod-131-Aufnahme mit der Nahrung durch Maßnahmen wie Vermarktungsverbote unterbunden wird. Mögliche Schilddrüsendosen durch Inhalation von radioaktivem Jod werden durch die Vorhersagemodelle in den Radioaktivitätsmess-

**Packung mit Tabletten von stabilem Jod, wie sie für den Fall einer größeren Umweltkontamination mit radioaktivem Jod in der Umgebung von Kernkraftwerken eingelagert werden.**

systemen vorhergesagt. Eine Einnahme von Tabletten mit stabilem Jod wird für Kinder und Jugendliche ab einer prognostizierten Schilddrüsendosis von 0,05 Sv und für bis zu 45-Jährige ab einer Dosis von 0,25 Sv empfohlen. Für ältere Personen wird die Einnahme von Jodtabletten wegen des geringeren Strahlenrisikos und möglicher Nebenwirkungen nicht empfohlen. Als vorbereitende Maßnahme für eine Verteilung im Ereignisfall werden gegen wärtig Packungen mit Jodtabletten in der Umgebung von Kernkraftwerken eingelagert.

## Ausblick

Obwohl seit dem Reaktorunfall von Tschernobyl bereits 20 Jahre vergangen sind, gibt es für viele Erkrankungen noch keine schlüssigen Antworten, ob erhöhte Raten aufgetreten sind. In den meisten Fällen liegt das daran, dass die Strahlenexpositionen zu gering waren, um sich statistisch nachweisbar von den Schwankungen der spontan auftretenden Fälle abzuheben. Für einige gesundheitliche Wirkungen könnte eine längere Beobachtungszeit und ein verbessertes Studiendesign zukünftig zu signifikanten Ergebnissen führen. Dies gilt insbesondere für nicht-maligne Schilddrüsenkrankungen und andere solide Tumoren wie Schilddrüsenkrebs. In Deutschland kann allerdings davon ausgegangen werden, dass die Expositionen zu gering waren, um signifikante Effekte auf den Gesundheitszustand der Bevölkerung haben zu können.

## Literatur:

- Bromet, E.J., Goldgaber, D., Carlson, G. et al. (2000): Children's well-being 11 years after the Chernobyl catastrophe. *Arch. Gen. Psychiatry* 57: 563-571.
- Cardis, E., Kesminiene, A., Ivanov, V. et al. (2005): Risk of thyroid cancer after exposure to 131I in childhood. *J. Natl. Cancer Inst.* 97: 724-732.
- Demidchik, Y.E., Demidchik, E.P., Reiners, C. et al. (2006): Comprehensive clinical assessment of 741 operated pediatric thyroid cancer cases in Belarus. *Ann. Surgery, in Druck*.
- Havenaar, J.M., de Wilde, E.J., van den Bout, J. et al. (2003): Perception of risk and subjective health among victims of the Chernobyl disaster. *Soc. Sci. Med.* 56: 569-572.
- Jacob, P., Bogdanova, T.I., Buglova, E. et al. (2006a): Thyroid cancer risk in areas of Ukraine and Belarus affected by the Chernobyl accident. *Radiat. Res.*, 165:1-8.
- Jacob, P., Bogdanova, T.I., Buglova, E. et al. (2006b): Thyroid cancer among Ukrainians and Belarusians, who were children or adolescents at the time of the Chernobyl accident. *J. Radiol. Prot.*, 26:1-17.
- Litcher, L., Bromet, E.J., Carlson, G. et al. (2000): School and neuropsychological performance of evacuated children in Kyiv 11 years after the Chernobyl disaster. *J. Child. Psychol. Psychiatry* 41: 291-299.
- Parkin, D.M., Clayton, D., Black, R.J. et al. (1996): Childhood leukaemia in Europe after Chernobyl: 5 year follow-up. *Br. J. Cancer* 73: 1006-1012
- Internet:**
- BfS – Bundesamt für Strahlenschutz: Die Kontamination von Lebensmitteln nach der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl [www.bfs.de/bfs/druck/strahlenthemen/lebensmittel.html](http://www.bfs.de/bfs/druck/strahlenthemen/lebensmittel.html)
- Integriertes Mess- und Informationssystem IMIS: Informationsfaltblatt (Download) [www.bfs.de/bfs/druck/strahlenthemen/IMIS](http://www.bfs.de/bfs/druck/strahlenthemen/IMIS)
- Integriertes Mess- und Informationssystem IMIS: Aktuelle Messwerte [www.bfs.de/ion/imis](http://www.bfs.de/ion/imis)
- Internationale Atomenergie Organisation IAEA: Im Brennpunkt Tschernobyl (englisch) [www.iaea.org/NewsCenter/Focus/Chernobyl/index.shtml](http://www.iaea.org/NewsCenter/Focus/Chernobyl/index.shtml)
- SSK – Strahlenschutzkommission: Iodblockade, Notfallschutz, Strahlenschutzvorsorge, Strahlenunfälle [www.ssk.de/thema/st-210](http://www.ssk.de/thema/st-210)
- UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; Daten und Fakten (englisch) [www.unscear.org](http://www.unscear.org), Registerpunkt „Chernobyl“.



Foto: Bundesamt für Strahlenschutz

## Strahlenschutz in der Praxis

# Grenzwerte und Regelungen

**Josef Peter**

Seit jeher lebt die Menschheit unter dem Einfluss von ionisierender Strahlung, die aus den Tiefen des Weltalls und von natürlichen radioaktiven Stoffen in der Luft, im Wasser und im Boden stammt. Im Zeitalter der Technik sind jedoch noch weitere Strahlenquellen hinzugekommen: Medizin, Kerntechnik und der Fall-out von Nuklearwaffenversuchen tragen nicht unerheblich zur Exposition von Mensch und Umwelt bei. Der Strahlenschutz hat die Aufgabe, die Risiken durch natürliche und zivilisatorische Quellen zu bewerten und Grenzwerte beziehungsweise Regelungen zu erarbeiten, um diese Risiken so gering wie möglich zu halten.

# Grenzwerte und Regelungen

**B**ereits wenige Wochen nachdem Wilhelm Conrad Röntgen im Jahr 1895 die X-Strahlen – heute als Röntgenstrahlen bezeichnet – entdeckt hatte, gab es Berichte über unerwünschte Nebenwirkungen wie Hautverbrennungen, Haarverlust und Augenschmerzen. 1897 schrieb H. R. Crocker im *British Medical Journal*: „Viele wissenschaftliche Entdeckungen, die dem Wohle der Menschheit dienen, haben in ihrer Begleitung eine gewisse Menge Schadwirkung, indem sie direkt oder indirekt Krankheiten oder Verletzungen verursachen. Auch die X-Strahlen von Röntgen scheinen keine Ausnahme zu sein – und mehrere Fälle davon wurden schon berichtet.“

Bald gab es auch die ersten Strahlenopfer: Ein Assistent von Thomas A. Edison starb an den Folgen einer Überexposition, Röntgen-Ärzte der ersten Stunde verloren mehrere Finger. Der Strahlenschutz hatte mit der Entwicklung der Diagnostik nicht Schritt gehalten. Dies änderte sich erst 1928, als die Internationale Strahlenschutzkommission (International Commission on Radiation Protection, ICRP) die ersten internationalen Empfehlungen zum Strahlenschutz herausgab und die Doseinheit „Röntgen“ definierte.

Ein wichtiger Schritt in Richtung Strahlenschutz in Deutschland war die Reichsversicherungsverordnung von 1911, die die Integration der „Unfall- und Schadensverhütungsvorschriften der Deutschen Röntgenengesellschaft“ in die Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaften ermöglichte. Ein weiterer Schritt war die „Verordnung zum Schutz gegen Schädigungen durch Röntgenstrahlen und radioaktive Stoffe in nichtmedizinischen Betrieben“ – die so genannte



**Explosion der 14-Kilotonnen-Bombe XX-27 Charlie auf dem Testgelände der USA in Nevada. Der Test war Teil einer Serie von sechs oberirdischen und einer unterirdischen Explosion, die zum Jahresende 1951 durchgeführt wurden.**

Foto: U.S. National Nuclear Security Administration/Nevada Site Office

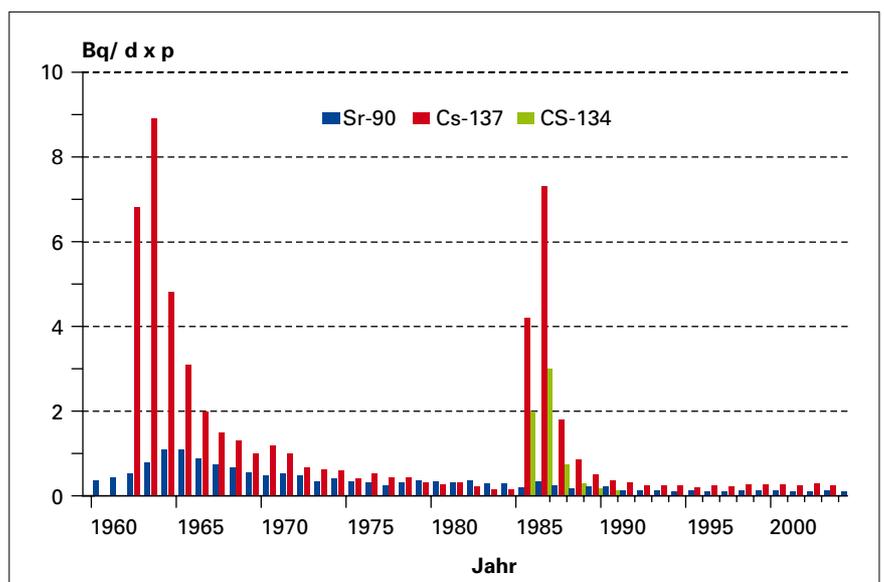
Röntgenverordnung – von 1941. Heute ist der Schutz vor den schädlichen Wirkungen der Röntgenstrahlung nur ein Teilgebiet des Strahlenschutzes. In der Bundesrepublik beruht der Strahlenschutz auf Artikel 2, Absatz 2 des Grundgesetzes: „Jeder hat das Recht auf Leben und körperliche Unversehrt-

heit“. Hier sind auch die Zuständigkeiten des Bundes und der Länder grundsätzlich geregelt.

## Umweltradioaktivität

Der Gedanke, die Radioaktivität in der Umwelt zu überwachen, entstand in der Zeit, als der Mensch durch den Fall-out der Kernwaffentests die Umweltradioaktivität stark veränderte, also in den 50er- und 60er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts. Die Periode von 1945 bis 1958 war geprägt durch eine ständig steigende Zahl von Atomwaffentests der Nuklearmächte USA (ab 1945), UdSSR (ab 1949) und Großbritannien (ab 1952). Der Fall-out dieser Versuche wurde als regional begrenztes Problem in der Umgebung der Testgelände betrachtet. Das änderte sich erst 1952 mit der Zündung des ersten thermonuklearen Sprengsatzes und den nachfolgenden Kernwaffentests. Bei der Zündung einer einzigen Wasserstoffbombe im „Bravo-Test“ 1954 wurde eine Energiemenge freigesetzt, die 14 Millionen Tonnen TNT entsprach. Der Fall-out erreichte die Stratosphäre und wurde so zum globalen Problem.

In Deutschland wurden künstliche Radionuklide aus dem Atom-



**Mittlere jährliche Aktivitätszufuhr an Cäsium-134, Cäsium-137 und Strontium-90 aus Nahrungsmitteln pro Person und Tag: Im Diagramm ist der Höhepunkt der oberirdischen Atomwaffenversuche Mitte der 1960er-Jahre sowie der Reaktorunfall von Tschernobyl im April 1986 deutlich zu erkennen.**

Grafik: Bundesamt für Strahlenschutz

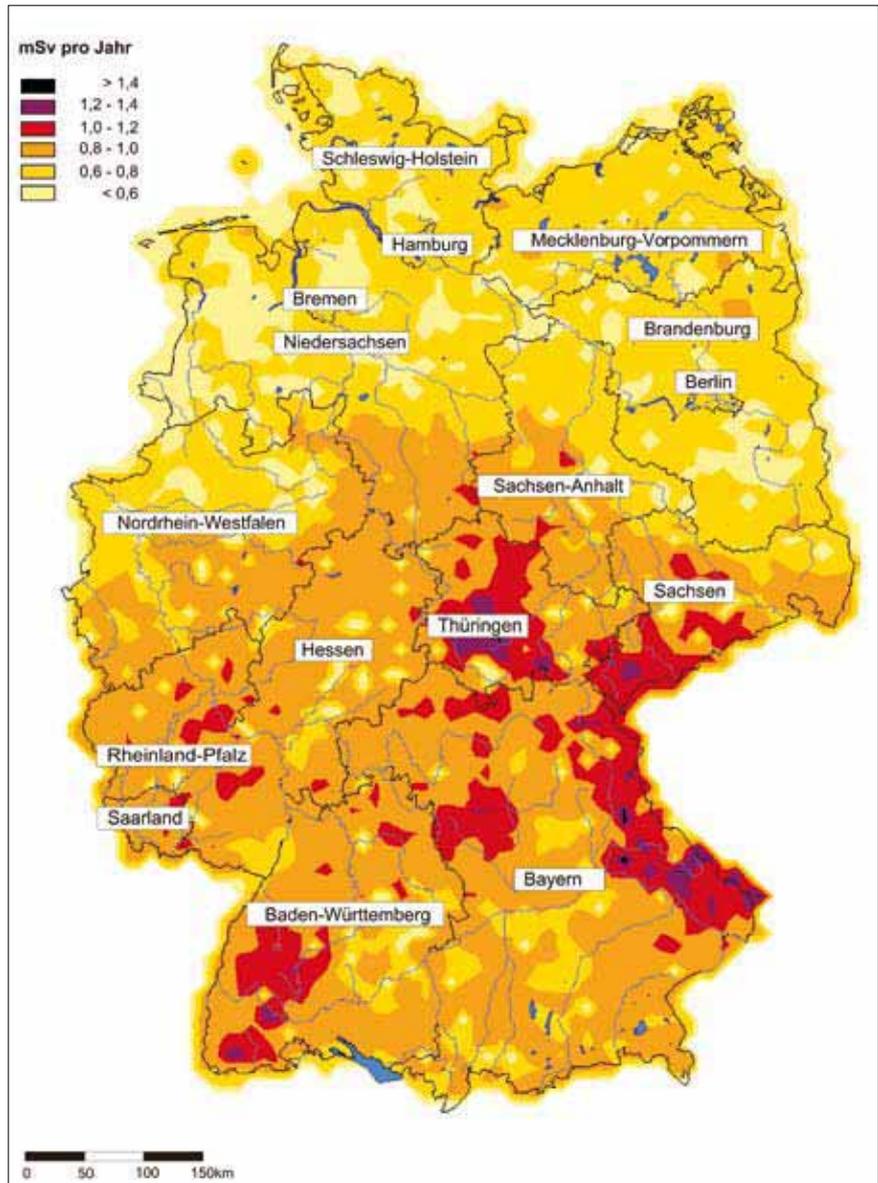
waffen-Fall-out erstmals im März 1953 nachgewiesen. Eine Arbeitsgruppe des Physikalischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg fand in Niederschlagsproben von der Messstelle Schauinsland, 1200 m über dem Meeresspiegel gelegen, Spaltprodukte von einem oberirdischen Kernwaffentest, der in Nevada/USA durchgeführt wurde.

Ein wichtiger Meilenstein bei der systematischen Überwachung der Umweltradioaktivität war die Berufung einer Expertenkommission durch den damals zuständigen Minister für Atomfragen im Jahr 1956. Dieser „Sonderausschuss Radioaktivität“ legte im Januar 1958 seinen ersten Bericht über die vorliegenden Messergebnisse für die Radioaktivität in Luft, Wasser, Boden und Lebensmitteln vor.

Nach einer Pause von zwei Jahren begann 1960 mit dem Eintritt Frankreichs in den Kreis der Atomwaffenstaaten eine neue Serie von Versuchen, die erst mit dem Atomteststopp-Abkommen vom August 1963 endete. Nach dieser Zeit wurden atmosphärische Tests nur noch von Frankreich (bis 1974) und China (1964 bis 1980) durchgeführt, die beide dem Abkommen nicht beigetreten waren. Ab 1963 ging die radioaktive Belastung der Umwelt mit Cäsium-137 und Strontium-90 und damit auch der Gehalt dieser Radionuklide im menschlichen Körper kontinuierlich zurück.

## Umgebungsradioaktivität

Die friedliche Nutzung der Atomenergie in der Bundesrepublik begann mit der Inbetriebnahme des Forschungsreaktors München in Garching 1957 und des ersten Versuchatomkraftwerkes in Kahl 1960. Dadurch wurde es notwendig, die Radioaktivität in der Umgebung kerntechnischer Anlagen und die Emissionen dieser Anlagen zu überwachen. Seit der Inbetriebnahme des Demonstrationskraftwerks Gundremmingen im Jahr 1966 waren die Weichen der Energiepolitik der Bundesrepublik in Richtung großtechnischer Nutzung der Kernenergie gestellt. Im Laufe der 1970er-Jahre gingen in West-



**Die mittlere externe Strahlenexposition in der Bundesrepublik Deutschland in Bodennähe im Freien im Jahr 2004. An über 2000 Messstellen des Integrierten Mess- und Informationssystems (IMIS) werden täglich Messwerte bestimmt, die zentral gesammelt und ausgewertet werden.**

Grafik: Bundesamt für Strahlenschutz

deutschland neun, in Ostdeutschland fünf große Kernkraftwerke in Betrieb. Der Anteil der Kernenergie an der Stromerzeugung stieg stark an und die Überwachung der abgegebenen Radioaktivitätsmenge in der Umgebung dieser Anlagen wurde immer bedeutsamer. Im Gegensatz zur Überwachung der allgemeinen Umweltradioaktivität wird diese spezielle Art der Kontrolle von Kernkraftwerken als „Überwachung der Umgebungsradioaktivität“ bezeichnet. Zu diesem Zweck steht in Deutschland ein eigenes gesetzliches und untergesetzliches Regelwerk zur Verfügung.

## Natürliche Umweltradioaktivität

Bei der Suche nach sinnvollen Grenzwerten für die Strahlenexposition durch Ableitungen der Kernkraftwerke wollte man sich am natürlichen Strahlungsumfeld des Menschen orientieren, so zum Beispiel beim „30-Millirem-Konzept“ (entspricht 0,3 mSv). Allerdings waren kaum ortsbezogene Messwerte über die externe Exposition durch terrestrische und kosmische Gammastrahlung, die Ortsdosisleistung und ihre Schwankungsbreite vorhanden. Noch dürftiger war

# Grenzwerte und Regelungen

bis in die 1980er-Jahre die Datelage bei der Exposition durch die Inhalation von Radonzerfallsprodukten. Heute erfasst das Integrierte Mess- und Informationssystem IMIS die Tageswerte der Ortsdosisleistung an über 2 000 Messstellen in Deutschland. Ebenso kennt man die Gegenden mit hohem Radongehalt im Boden, in denen bei ungünstiger Bauweise auch die Radonkonzentration in Wohnungen über dem Durchschnitt liegen kann. Die Schwankungsbreite der Radonkonzentration in Wohnungen erreicht mehrere Größenordnungen. Deshalb kann die Exposition durch natürliche Strahlenquellen, die schon im Schnitt einen erheblichen Teil der gesamten Strahlenexposition umfasst, individuell sehr hohe Werte erreichen. Durch Information der Bevölkerung und Initiativen auf dem Gebiet der Gesetzgebung will man im Strahlenschutz derzeit erreichen, dass auch diese bedeutende Komponente der Exposition begrenzt werden kann.

## Berufliche Strahlenexposition

Die Überwachung der beruflichen Strahlenexposition in Deutschland gliedert sich im Wesentlichen in vier Bereiche:

- Bei Personen, die genehmigungs- und anzeigebedürftige Tätigkeiten in Strahlenschutzbereichen durchführen und effektive Dosen von mehr als 1 mSv pro Jahr erhalten können, wird die Personendosis ermittelt. Dies geschieht in der Regel durch monatlich ausgegebene Dosimeter. Dieser Bereich kann sowohl bezüglich der Anzahl der überwachten Personen als auch auf Grund der seit

vier Jahrzehnten praktizierten Überwachung als der „traditionelle Bereich“ der beruflichen Strahlenschutzüberwachung angesehen werden.

- Bei Personen, bei denen am Arbeitsplatz die Aufnahme von radioaktiven Stoffen in den Körper, zum Beispiel über die Atemluft, nicht ausgeschlossen werden kann, werden in der Regel Radioaktivitätsmessungen in Ganz- und Teilkörperzählern beziehungsweise Analysen ihrer Körperausscheidungen durchgeführt.
- Mit der Novelle der Strahlenschutzverordnung wurden die Anforderungen der EU-Richtlinie 96/29 EURATOM in nationales Recht umgesetzt. Überwachungspflichtig ist damit auch Luftfahrtpersonal, das in einem Beschäftigungsverhältnis gemäß deutschem Arbeitsrecht steht und während des Fluges durch kosmische Strahlung eine effektive

che effektive Dosis von 6 mSv überschreiten können, eingeführt. Dies betrifft unter anderem die Beschäftigten in Schauhöhlen und Wasserwerken (§ 95 StrlSchV).

## Gesetzliche Regelungen

Sehr rasch nach dem Beginn der Überwachung der Umweltradioaktivität in Deutschland in den frühen 1950er-Jahren wurde diese auch per Gesetz geregelt. Im Jahr 1955 wurde der Deutsche Wetterdienst (DWD) verpflichtet, die Atmosphäre auf radioaktive Beimengungen und deren Verfrachtung zu überwachen.

Mit dem Vertrag zur Gründung der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM-Vertrag) im Jahr 1957 verpflichteten sich die Mitgliedstaaten, die Radioaktivität in der Umwelt zu überwachen. Im Artikel 35 des EURATOM-Vertrages wird die Schaffung von Einrichtun-



**Untersuchung im Ganzkörperzähler: Geschickte Anordnung von Detektoren ermöglicht es, die Aktivität von in den Körper aufgenommenen radioaktiven Stoffen zu bestimmen.**

Foto: Goddeng/ GSF

Dosis von mindestens 1 mSv im Kalenderjahr erhalten kann (§ 103 StrlSchV).

- Ebenfalls mit der Novelle der Strahlenschutzverordnung wurde die Überwachung von Personen bei Arbeiten in Betrieben mit erheblich erhöhter Exposition durch natürliche terrestrische Strahlenquellen, die eine jährli-

gen zur Überwachung der Radioaktivität der Luft, des Wassers und des Bodens sowie die Überwachung der Einhaltung der Strahlenschutz-Grundnormen vorgeschrieben. Artikel 36 verpflichtet zur regelmäßigen Berichterstattung über die Ergebnisse der Überwachung.

Zur Umsetzung dieser Verpflichtungen zur Überwachung der

*Umweltradioaktivität* wurden 1960 die Verwaltungsaufgaben zwischen dem Bund und den Ländern durch Verwaltungsvereinbarungen abgestimmt. Die Überwachung der Luft, der Niederschläge, der Bundeswasserstraßen sowie der Nord- und Ostsee erfolgt seither durch die Messstellen des Bundes, die Überwachung aller anderen Umweltbereiche durch die Messstellen der Länder. Diese Aufgabenverteilung wurde später in das Strahlenschutzvorsorgegesetz übernommen.

Die rechtliche Grundlage für die *Umgebungsüberwachung* und die Dosisgrenzwerte leitet sich aus dem Atomgesetz (AtG) und der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) ab. Das Atomgesetz dient dazu, „Leben, Gesundheit und Sachgüter vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen zu schützen und durch Kernenergie oder ionisierende Strahlen verursachte Schäden



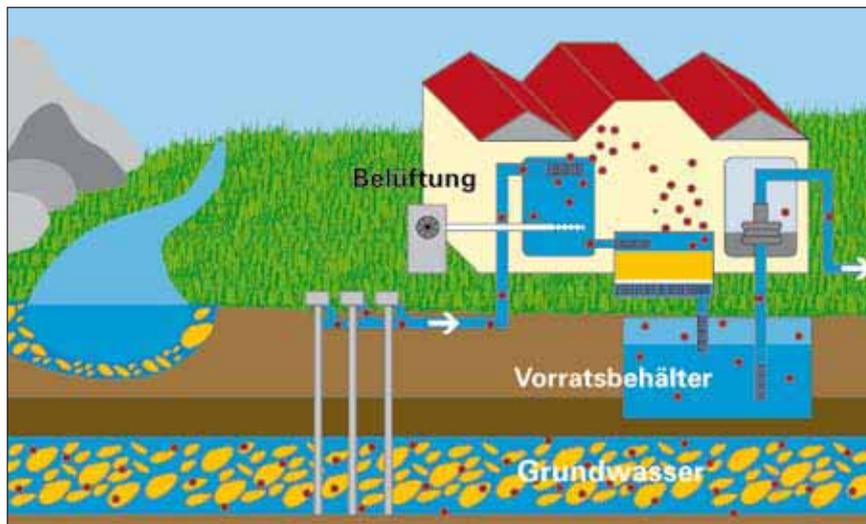
**Flugzeugbesatzungen sind bei ihrer Arbeit kosmischer Strahlung ausgesetzt. Nach neuem Strahlenschutzrecht unterliegen sie der Personendosisüberwachung.**

Foto: Lufthansa



**Das natürliche Edelgas Radon kann in Wasserwerken zur Strahlenexposition von Beschäftigten führen.**

Foto: Wasserwerk Rheinwald



**In Wasserversorgungsunternehmen entweicht Radon aus dem Grundwasser insbesondere in Hochbehältern, Sammelschächten, Aufbereitungsanlagen und Brunnen. Dort kann es sich in der Luft zu erhöhten Radonkonzentrationen ansammeln.**

Grafik: nach Kempski & Partner

auszugleichen“ (§1, Abs. 2). Zum 1. August 2001 trat die Novelle der Strahlenschutzverordnung in Kraft. Damit wurden Anforderungen der Richtlinie 96/29/EURATOM über die Grundnormen für den Strahlenschutz und der Patientenschutzrichtlinie 97/43/EURATOM in deutsches Recht umgesetzt.

Die Durchführung der Überwachung erfolgt durch die Betreiber der einzelnen Anlagen gemäß der „Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen“, REI von 1993. Die Ergebnisse dieser Messungen werden regelmäßig an die zuständigen Aufsichtsbehörden übermittelt.

Die Eigenüberwachung der Betreiber wird durch ein Kontrollmessprogramm eines unabhängigen Sachverständigen – in der Regel eine Organisationseinheit des Bundesamtes für Strahlenschutz – überprüft. Grundlage hierfür ist die Richtlinie über die „Kontrolle der Eigenüberwachung radioaktiver Emissionen aus Kernkraftwerken“.

Ende der 1970er-Jahre wurde durch Einführung des „Kernreaktor-Fernüberwachungssystems (KFÜ)“ eine zusätzliche automatische Überwachung für kerntechnische Anlagen geschaffen. Mit diesen Systemen werden sicherheitsrelevante betriebstechnische Parameter der Anlage, die Emissionen, meteorolo-

gische Parameter und wichtige Immissionsgrößen in der Umgebung der Anlage erfasst und die Ergebnisse an die atomrechtlichen Aufsichtsbehörden weitergeleitet.

## Das Strahlenschutzvorsorgegesetz

Der Reaktorunfall von Tschernobyl im Jahr 1986 zeigte, dass in der Bundesrepublik ein Regelwerk fehlte, das im Falle einer großräumigen radioaktiven Kontamination die Empfehlung von abgestimmten Maßnahmen ermöglicht. Aus dieser Erfahrung heraus wurde noch im gleichen Jahr das Strahlenschutzvorsorgegesetz (StrVG) verabschiedet.

Ziel dieses Gesetzes ist es, „zum Schutz der Bevölkerung die Radioaktivität in der Umwelt zu überwachen und im Falle von Ereignissen mit möglichen, nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen die radioaktive Kontamination in der Umwelt und die Strahlenexposition des Menschen durch angemessene Maßnahmen so gering wie möglich zu halten.“

Auf der Grundlage des StrVG wurden ab dem Jahr 1988 die bestehenden Einrichtungen zur Überwachung der Umweltradioaktivität erweitert und mit Hilfe der Informationstechnik zu einem *Integrierten Mess- und Informationssystem*

# Grenzwerte und Regelungen

und Reaktorsicherheit (BMU) empfohlen oder angeordnet werden können.

Die Überwachung der Umwelt-radioaktivität, die aus bergbaulichen Tätigkeiten stammt, ist in den neuen Bundesländern Aufgabe des Bundes. In Analogie zur Überwachung bei kerntechnischen Anlagen regelt die „Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung bei

reichen – zum Beispiel Luft, Gewässer, Lebensmittel – beziehungsweise für bestimmte Überwachungsaufgaben bei kerntechnischen Anlagen – wie Fortluft und Abwasser – verantwortlich und in Bundesoberbehörden eingerichtet, deren sonstige Aufgaben ebenfalls in diesen Umweltbereichen liegen. Die Leitstellen prüfen für ihren jeweiligen Zuständigkeitsbereich Probenahme-, Analyse- und Messverfahren, entwickeln diese weiter und führen Forschungsarbeiten über die unterschiedlichen Kontaminationsketten durch. Einige der Leitstellen betreiben auch eigene Messnetze. Die von den Leitstellen herausgegebenen „Messanleitungen“ beschreiben die amtlichen Probenahme-, Analyse- und Messverfahren.

Überwachungsziel			
allgemeine Umwelt		Umgebung kerntechnischer Anlagen	
Gesetzliche Grundlagen			
StrVG, EURATOM-Vertrag (Artikel 35)		AtG, StrlSchV	
Zuständigkeit			
Bund	Länder	Länder	
Überwachungsprogramm			
IMIS	Länderprogramme	Überwachung kerntechnischer Anlagen	
§ 2 StrVG	§ 3 StrVG	REI Überwachung von Emission und Immission	KFÜ Überwachung von Anlagen, Emission, meteorologische Parameter und Immissionen

## Regelung der Zuständigkeiten im Bereich der Umwelt- und Umgebungsüberwachung.

Diagramm: Bundesamt für Strahlenschutz

(IMIS) ausgebaut. Das 1993 in Betrieb genommene System ermöglicht eine rasche Online-Information der in die Strahlenschutzvorsorge eingebundenen Bundes- und Landesbehörden über die jeweilige Kontaminationslage.

Für die Durchführung der im StrVG vorgeschriebenen Überwachung der Umweltradioaktivität wurden zwei Messprogramme entwickelt:

Das *Routinemessprogramm* enthält verbindliche Vorgaben für die Durchführung der routinemäßigen Überwachungsmaßnahmen durch die zuständigen Behörden des Bundes und der Länder und stellt das bundeseinheitliche Vorgehen sicher.

Bei einem nuklearen Unfall tritt an die Stelle des Routinemessprogramms ein *Intensivmessprogramm*. Darin sind Radioaktivitätsmessungen vorgeschrieben, mit denen die radiologische Lage schnell erfasst und erforderliche Maßnahmen zur Minimierung der Strahlenexposition durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz

bergbaulichen Tätigkeiten (REI-Bergbau)“ die Aufgabenstellung und Zuständigkeiten für die Emissions- und Immissionsüberwachung bei der genehmigungsbedürftigen Stilllegung und Sanierung von Anlagen des Uranerzbergbaus und der Uranerzaufbereitung.

## Zuständigkeiten

Menschen kommen in unterschiedlichen Bereichen und über verschiedene Wege mit ionisierender Strahlung in Kontakt. Dementsprechend müssen auch verschiedene Umweltbereiche überwacht werden. Im Laufe der Zeit hat sich daraus eine Aufteilung der Zuständigkeiten entwickelt. Deren Struktur spiegelt sich im Bereich der oberen Bundesbehörden durch die Benennung von so genannten *Leitstellen* wider. Ihre Aufgaben wurden Anfang der 1960er-Jahre durch den Bund festgelegt.

Sie sind jeweils für die Überwachung von bestimmten Umweltbe-

## Berichterstattungspflichten

Auf Grund des Interesses der Bevölkerung an den Auswirkungen der Kernwaffenversuche forderte der Bundestag 1962 die Bundesregierung auf, jährlich über die Lage auf dem Gebiet der Umwelt-radioaktivität zu berichten. Dieser Jahresbericht des BMU hat zur Zeit einen Umfang von zirka 270 Seiten und enthält umfangreiche Tabellen zur Umwelt- und Umgebungsradioaktivität. Darüber hinaus umfasst er die Teile „Radioaktive Stoffe aus kerntechnischen Anlagen und Bergbauanlagen“, „Berufliche Strahlenexposition“, „Strahlenexposition durch medizinische Maßnahmen“, „Umgang mit radioaktiven Stoffen“ und „Nicht ionisierende Strahlung“.

Seit 1975 berichtet die Bundesregierung dem Deutschen Bundestag außerdem jährlich über Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung. Dieser so genannte Parlamentsbericht – mit einem Umfang von zur Zeit etwa 50 Seiten – behandelt schwerpunktmäßig die zivilisatorische Strahlenexposition aus kerntechnischen Anlagen, Forschung und Technik, Beruf, medizinischer Anwendung und besonderen Vorkommnissen im Anwendungsbereich der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV).

Eine Neuordnung der Berichterstattung erfolgte 1989 durch das Strahlenschutzvorsorgegesetz (StrVG). Die darin genannte Zentralstelle des Bundes sammelt und dokumentiert die Daten, die die Leitstellen für verschiedene Bereiche der Umweltradioaktivität liefern, und unterstützt das BMU bei

der Berichterstattung an den Bundestag, den Bundesrat und die Öffentlichkeit.

### Geltende Grenzwerte

Für die Bundesrepublik Deutschland ist nach der Strahlenschutzver-

ordnung „jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt zu vermeiden“ und „jede Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalles

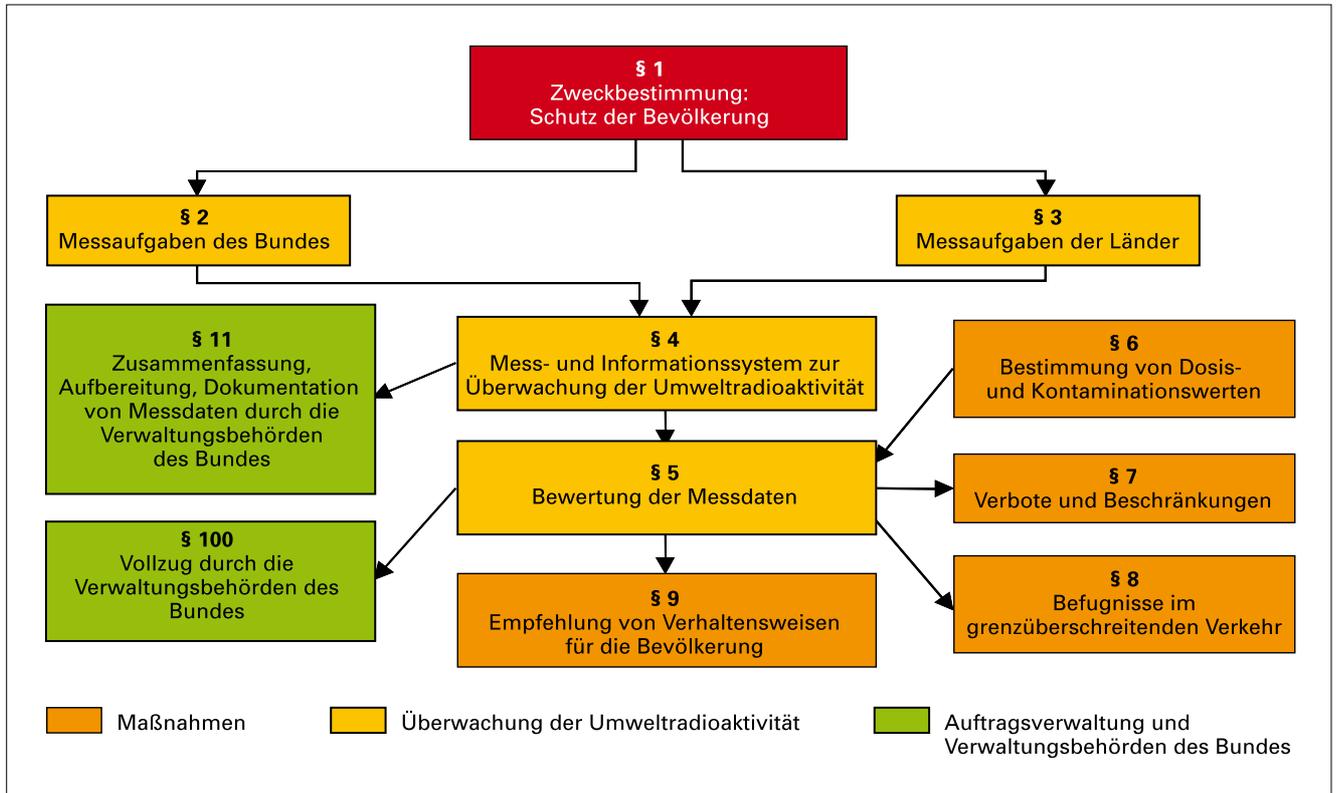
<b>Übersicht über Gesetze und Regelungen im Strahlenschutz</b>	
EURATOM-Vertrag	Vertrag zur Gründung der Europäischen Atomgemeinschaft vom 25.03.1957
Atomgesetz (AtG)	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Art. 1 des Gesetzes vom 12.08.2005 (BGBl.IS.2365)
Strahlenschutzvorsorgegesetz (StrVG)	Gesetz zum vorsorgenden Schutz der Bevölkerung gegen Strahlenbelastung vom 19. Dezember 1986 (BGBl. I S. 261), zuletzt geändert durch Art. 43 der Verordnung vom 25.11.2003 (BGBl.IS.2304)
Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)	Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714), zuletzt geändert durch Art. 2 § 3 Abs. 31 des Gesetzes vom 01.09.2005 (BGBl.IS.2618)
Richtlinie Emission/Immission (REI)	Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen vom 30. Juni 1993 (GMBI. 1993, S. 502) und Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI), Anhang B und C, vom 20. Dezember 1995 (GMBI. 1996, Nr. 9/10, S. 195)
Routinemessprogramm	Richtlinie für die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz, Teil I: Messprogramm für den Normalbetrieb vom 28. Juli 1994 (GMBI. 1994, S. 930)
Intensivmessprogramm	Richtlinie für die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz, Teil II: Messprogramm für den Intensivbetrieb vom 19. Januar 1995 (GMBI. 1995, S. 261)
Röntgenverordnung (RöV)	Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen vom 8. Januar 1987 (BGBl. I S. 114), neugefasst durch Bekanntmachung vom 30.04.2003 (BGBl. I S.604)
Richtlinie 96/29/EURATOM (Strahlenschutzgrundnormen)	Richtlinie des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlungen. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Nr. L 159/1, 39. Jahrgang, 29. Juni 1996
Richtlinie 97/43/EURATOM (Patientenschutzrichtlinie)	Richtline des Rates vom 30. Juni 1997 über den Gesundheitsschutz von Personen gegen die Gefahren ionisierender Strahlung bei medizinischer Exposition und zur Aufhebung der Richtlinie 84/466/EURATOM
Richtlinie 2003/122/EURATOM	Richtlinie zur Kontrolle hoch radioaktiver umschlossener Strahlenquellen und herrenloser Strahlenquellen vom 22. Dezember 2003
Richtlinie 2003/4/EG	Richtlinie 2003/4/EG des euopäischen Parlaments und des Rates vom 28. Januar 2003 über den Zugang der Öffentlichkeit zu Umweltinformationen und zur Aufhebung der Richtlinie 90/313/EWG des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union Nr. L 41/26 vom 14.02.2003
Umweltinformationsgesetz (UIG)	Gesetz zur Neugestaltung des Umweltinformationsgesetzes und zur Änderung der Rechtsgrundlagen zum Emissionshandel vom 22. Dezember 2004 (BGBl. I 2004, S.3704)
Gesetz zur Kontrolle hochradioaktiver Strahlenquellen	Gesetz zur Kontrolle hochradioaktiver Strahlenquellen vom 12. August 2005 (BGBl. I 2005, Nr. 49, S. 2365)

# Grenzwerte und Regelungen

- Für Einzelpersonen der Bevölkerung beträgt der Grenzwert der effektiven Dosis durch Strahlenexpositionen aus Tätigkeiten nach § 2 Abs. 1 Nr. 1 ein Millisievert im Kalenderjahr.
- Unbeschadet des Absatzes 1 beträgt der Grenzwert der Organdosis für die Augenlinse 15 Millisievert im Kalenderjahr und der

völkerung durch mit Fortluft oder Abwasser emittierte radioaktive Stoffe sind in § 47, Abs. 1 Strahlenschutzverordnung Dosisgrenzwerte festgelegt:

„Für die Planung, die Errichtung und den Betrieb von Anlagen und Einrichtungen gelten folgende Grenzwerte der durch Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Luft oder



## Aufgabenverteilung nach Strahlenschutzvorsorgegesetz.

Diagramm: Bundesamt für Strahlenschutz

auch unterhalb der Grenzwerte so gering wie möglich zu halten“ (§ 6 Abs. 1 und 2 der StrlSchV). Dies entspricht dem *ALARA-Prinzip* der ICRP. ALARA bedeutet: *as low as reasonably achievable*, so gering wie vernünftigerweise möglich. Weiterhin sind höchstzulässige Dosiswerte (Dosisgrenzwerte) für die Bevölkerung und für beruflich strahlenexponierte Personen in dieser Verordnung festgelegt. § 95 regelt die Exposition durch natürlich vorkommende radioaktive Stoffe an Arbeitsplätzen und § 103 den Schutz des fliegenden Personals vor Expositionen durch kosmische Strahlung.

§ 46 der StrSchV begrenzt die Strahlenexposition der Bevölkerung wie folgt:

Grenzwert der Organdosis für die Haut 50 Millisievert im Kalenderjahr.

- Bei Anlagen oder Einrichtungen gilt außerhalb des Betriebsgeländes der Grenzwert für die effektive Dosis nach Absatz 1 für die Summe der Strahlenexposition aus Direktstrahlung und der Strahlenexposition aus Ableitungen. Die für die Strahlenexposition aus Direktstrahlung maßgebenden Aufenthaltszeiten richten sich nach den räumlichen Gegebenheiten der Anlage oder Einrichtung oder des Standortes. Liegen keine begründeten Angaben für die Aufenthaltszeiten vor, ist Daueraufenthalt anzunehmen.

Für die Strahlenexposition der Be-

Wasser aus diesen Anlagen oder Einrichtungen jeweils bedingten Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung im Kalenderjahr:

1. Effektive Dosis= 0,3 mSv
2. Organdosis für Keimdrüsen, Gebärmutter, Knochenmark (rot) = 0,3 mSv
3. Organdosis für Dickdarm, Lunge, Magen, Blase, Brust, Leber, Speiseröhre, Schilddrüse, andere Organe oder Gewebe gemäß Anlage VI Teil C Nr. 2 Fußnote 1, soweit nicht unter Nr. 2 genannt = 0,9 mSv
4. Organdosis für Knochenoberfläche, Haut= 1,8 mSv

Es ist dafür zu sorgen, dass radioaktive Stoffe nicht unkontrolliert in die Umwelt abgeleitet werden“.

## Komponenten der Strahlenexposition

Die mittlere effektive Dosis der Bevölkerung durch die natürliche und die zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition beträgt zwischen 2 und 3 mSv pro Jahr. Rechnerisch ergibt sich für Erwachsene ein Wert von 2,1 mSv. Bei der zivilisatorischen Strahlenbelastung wurde der Dosisbeitrag durch röntgendiagnostische und nuklearmedizinische Untersuchungen auf etwa 1,9 mSv pro Jahr geschätzt. Die Beiträge der anderen Strahlenquellen wie zum Beispiel kerntechnische Anlagen sind sehr gering. Die berechnete Gesamtexposition beträgt also 4,0 mSv pro Jahr.

Die gesamte Strahlenexposition der Bevölkerung schwankt von Jahr zu Jahr recht wenig. Unterschiedliche Werte ergaben sich in der Vergangenheit vor allem durch die Anpassung der Berechnungsverfahren an den jeweiligen Stand der Wissenschaft. Zuletzt erfolgte dies 2001 im Zuge der Novellierung der Strahlenschutzverordnung.

Die **natürliche Strahlenexposition** setzt sich aus der kosmischen und der terrestrischen Komponente sowie aus der Exposition durch die Aufnahme (Ingestion und Inhalation) natürlich radioaktiver Stoffe in den Körper zusammen.

Die effektive Dosis der natürlichen Strahlenexposition beträgt im Mittel etwa 1,2 mSv pro Jahr. Neben der direkten kosmischen Komponente von 0,3 mSv und der direkten terrestrischen Komponente von 0,4 mSv trägt die Aufnahme natürlich radioaktiver Stoffe mit der Nahrung 0,3 mSv zur Strahlenexposition bei. Auch ein Teil der Exposition von etwa 0,2 mSv durch die radioaktiven Edelgase Radon (Rn-222) und Thoron (Rn-220) einschließlich ihrer kurzlebigen Folgeprodukte ist deshalb nicht zivilisatorisch bedingt.

Veränderungen der Umwelt des Menschen durch technische Entwicklungen, die eine unbeabsichtigte Anreicherung natürlich radioaktiver Stoffe zur Folge haben, führen zu einer zivilisatorisch bedingten Erhöhung der natürlichen

Strahlenexposition. Insbesondere Radon in Gebäuden und natürlich radioaktive Stoffe aus Bergbau- und Verarbeitungsprozessen können dazu beitragen.

Radon- und Thoron-Zerfallsprodukte in Wohnungen liefern über Inhalation den Hauptbeitrag zum zivilisatorisch erhöhten Teil der natürlichen Strahlenexposition mit einer durchschnittlichen effektiven Dosis von etwa 0,9 mSv pro Jahr.

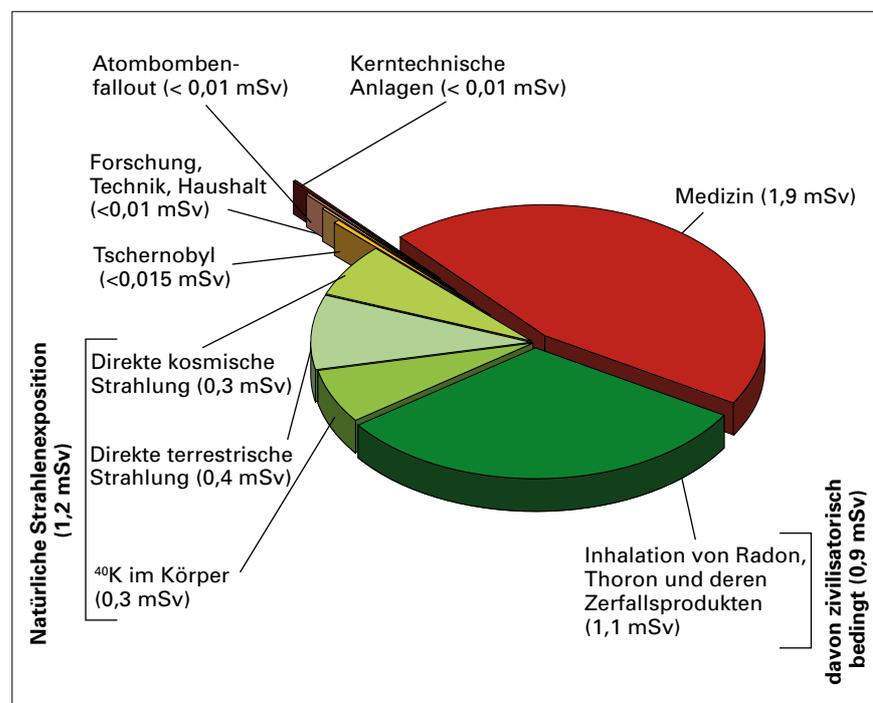
Die **zivilisatorische Strahlenexposition** der Bevölkerung resultiert aus Beiträgen kerntechnischer Anlagen, aus der Anwendung ionisierender Strahlung und radioaktiver Stoffe in Medizin, Forschung, Technik und Haushalt sowie aus dem Fall-out von Kernwaffenversuchen in der Atmosphäre bis Anfang der 1960er-Jahre. Die mittlere effektive Dosis der zivilisatorischen Strahlenexposition liegt zurzeit bei etwa 1,9 mSv pro Einwohner und Jahr.

Der Beitrag der Strahlenexposition durch Atomkraftwerke und sonstige kerntechnische Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland zur mittleren effektiven Dosis der Bevölkerung blieb im Jahr 2004 wie in den Vorjahren deutlich unter

ein Prozent der gesamten zivilisatorischen Strahlenexposition. Die Ableitungen radioaktiver Stoffe lagen bei allen kerntechnischen Anlagen unterhalb, bei den meisten sogar weit unterhalb der genehmigten Jahreswerte, die resultierenden effektiven Dosen deshalb weit unterhalb des Grenzwertes von 0,3 mSv.

Auch der Beitrag durch die Anwendung ionisierender Strahlung und radioaktiver Stoffe in Forschung, Technik und Haushalt lag unterhalb dieses Wertes.

Die Charakterisierung der **beruflichen Strahlenexposition** berücksichtigt sowohl natürliche als auch zivilisatorische Strahlenquellen. Seit der Absenkung des Jahresgrenzwertes von 50 auf 20 mSv durch die Novellierung der Strahlenschutzverordnung im Jahr 2001 ging die Anzahl der Personen, die mehr als 20 mSv im Kalenderjahr erhalten haben, kontinuierlich zurück. In Deutschland waren im Jahr 2004 etwa 313.400 Personen beruflich strahlenexponiert. Die mittlere Jahresdosis der zirka 51.500 überwachten Personen, die Dosiswerte größer als Null hatten, betrug



**Die mittlere effektive Jahresdosis durch ionisierende Strahlung im Jahr 2004, gemittelt über die Bevölkerung Deutschlands. Die einzelnen Komponenten werden nach ihrer Ursache in natürliche, zivilisatorisch veränderte natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition eingeteilt.**

Grafik: Bundesamt für Strahlenschutz

# Grenzwerte und Regelungen

0,82 mSv. Die Abbildung „Mittlere Jahrespersonendosis beruflich strahlenexponierter Personen“ gibt einen Überblick der Strahlenexposition, aufgeschlüsselt nach Tätigkeitsbereichen. Die mittlere berufliche Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide betrug 0,69 mSv. Die ermittelte Jahresdosis für fliegendes Personal lag bei etwa 1,9 mSv pro Jahr.

Der größte Beitrag zur zivilisatorischen Strahlenexposition wird durch die Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der **Medizin**, insbesondere durch die Röntgendiagnostik, verursacht. Der Beitrag der Röntgendiagnostik ist in den letzten Jahren kontinuierlich angestiegen und liegt zurzeit bei 1,9 mSv pro Jahr und Person.

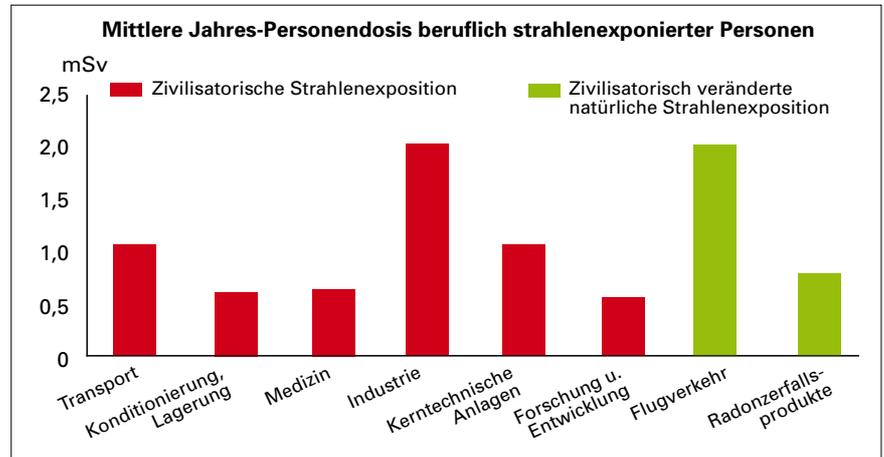
Die durch den **Unfall im Atomkraftwerk Tschernobyl** resultierende mittlere Strahlenexposition der Bevölkerung ging zwar von 0,11 mSv im Jahr 1986 auf weniger als 0,015 mSv im Jahre 2004 zurück, dennoch finden sich in Lebensmitteln aus Waldgebieten vereinzelt noch stark erhöhte Cäsium-137-Werte. Regional treten Expositionen auf, die bis zu einer Größenordnung über dem genannten Mittelwert liegen.

Die Dosis durch die bis in die 1960er-Jahre in der Atmosphäre durchgeführten Kernwaffenversuche ist weiterhin rückläufig; sie betrug 2004 weniger als 0,01 mSv. Seit 1981 werden keine **Kernwaffenversuche** mehr in der Atmosphäre durchgeführt.

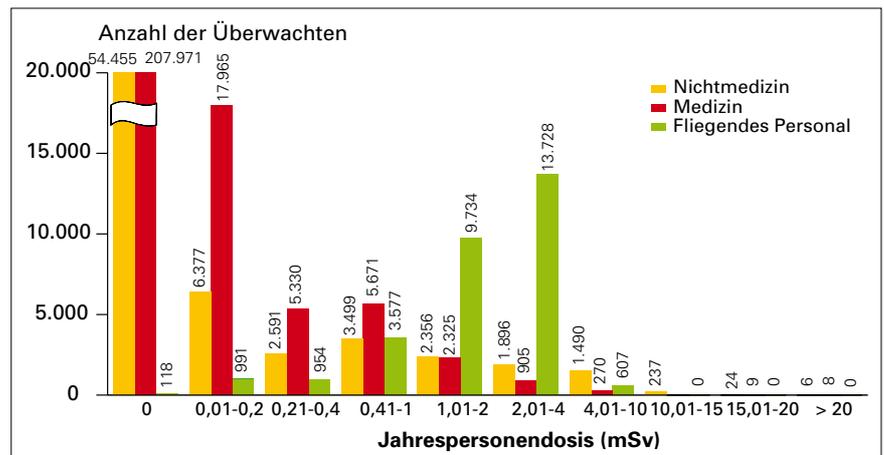
Die „Regelungsdichte“ im deutschen Strahlenschutz entspricht in den einzelnen Bereichen keinesfalls dem jeweiligen Dosisbeitrag zur Gesamtexposition der Bevölkerung. So ist im Bereich der Umgebungsüberwachung von Kernkraftwerken vom Atomgesetz über die Strahlen-

schutzverordnung bis zu zahlreichen Richtlinien und Verwaltungsvorschriften ein dichtes Netz von Regelungen geknüpft, obwohl der Dosisbeitrag im störungsfreien Betrieb relativ gering ist. Hier spielt der Aspekt des Notfallschutzes eine bedeutende Rolle. Ähnliches gilt zum Beispiel für das gerade erst in

Über all diesen Gesetzen, Bestimmungen und Regelungen darf nicht vergessen werden, dass nach über hundert Jahren der Nutzung von ionisierenden Strahlen genügend Wissen um die möglicherweise schädlichen Nebenwirkungen vorhanden ist. Dadurch ist es jedem, der sie verwendet oder ihre Auswir-



**Mittlere Jahres-Personendosis beruflich strahlenexponierter Personen in verschiedenen Tätigkeitsbereichen im Jahr 2004. Berufliche Expositionen durch Radonzerfallsprodukte treten zum Beispiel in Schauhöhlen und Wasserwerken auf.**



**Verteilung der Personendosen beruflich Strahlenexponierter auf verschiedene Berufsgruppen im Jahr 2004. Von den insgesamt 310.000 überwachten Personen liegen 83 Prozent unterhalb der Messgrenze.**

Grafiken: Bundesamt für Strahlenschutz

Kraft getretene Gesetz zur Kontrolle hochradioaktiver Strahlenquellen. Neben den bestehenden Regelungen wird in Zukunft auch der Bereich der natürlichen Strahlenexposition – soweit diese beeinflussbar ist – Gegenstand neuer Bestimmungen sein. Ein Beispiel hierfür ist das vom BMU vorbereitete Radon-schutzgesetz, das das StrVG ergänzen soll und derzeit zwischen Bund und Ländern verhandelt wird.

kungen beeinflussen kann, möglich, verantwortungsvoll damit umzugehen.

## Literatur

Crocker, H. R. (1897): A case of dermatitis from Roentgen rays. *Brit. Med. J.* 2: 8-9.

Archer, B. A. (1995): History of the shielding of diagnostic X-ray facilities, *Health Physics* 69(5), 750-759.

Verordnung zum Schutze gegen Schädigungen durch Röntgenstrahlen und radioaktive Stoffe in nichtmedizinischen Betrieben (Röntgenverordnung) vom 7.2.1941, Reichsgesetzblatt I, S. 88.

<http://www.env-it.de/umweltdaten/public/theme.do?nodent=2472>

<http://www.bmu.de/strahlenschutz/downloads/doc/36318.php>

[www.bfs.de](http://www.bfs.de)

## Internet

### Allgemeine Informationen zum Thema Strahlenschutz:

[http://www.bmu.de/strahlenschutz/information\\_zum\\_strahlenschutz/doc/2208.php](http://www.bmu.de/strahlenschutz/information_zum_strahlenschutz/doc/2208.php)

### Berichte zu Umweltradioaktivität und Strahlenschutz zum Download:

<http://www.bfs.de/bfs/druck/uus>

<http://dip.bundestag.de/btd/16/002/1600200.pdf>

## Filmdosimetrie

### Die Überwachung beruflich strahlenexponierter Personen

Stephan Hübner

**Passive Dosimeter sind ein sehr wichtiger Bestandteil des Strahlenschutzes für beruflich strahlenexponierte Personen. Die Informationen aus der Dosimetrie dienen neben der reinen Überwachung von gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerten auch dazu, ungewöhnlich hohe Dosen oder gar Zwischenfälle zu erkennen und in Zukunft zu verhindern.**

Eine kleine, meist in Brusthöhe getragene Filmkassette offenbart, dass ihr Träger zum Kreis der beruflich strahlenexponierten Personen gehört. Diese Personen – Wissenschaftler, Ärzte, Materialprüfer, Reinigungspersonal, um nur einige zu nennen – arbeiten entweder in einem Überwachungs- beziehungsweise Kontrollbereich oder können auf Grund ihrer beruflichen Tätigkeit eine jährliche Ganzkörperdosis von 1 mSv oder mehr erhalten. Ein Überwachungsbereich wird dann eingerichtet, wenn bei Vollzeitbeschäftigung, das heißt einer Arbeitszeit von mehr als 2000 Stunden pro Jahr, eine Ganzkörperdosis zwischen 1 und 6 mSv möglich ist. So ist in der Regel das gesamte Betriebsgelände von Kernkraftwerken als Überwachungsbereich ausgewiesen, soweit es nicht zu den Kontrollbereichen gehört. In Kontrollbereichen, beispielsweise Röntgenräume in Kliniken, Bestrahlungsanlagen oder bestimmte Bereiche innerhalb eines Reaktorgebäudes, kann die jährliche Ganzkörperdosis mehr als 6 mSv betragen.

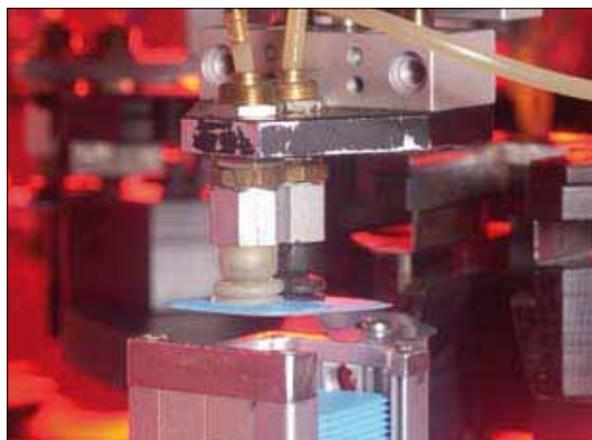
In Deutschland gibt es derzeit über 310.000 beruflich strahlenexponierte Personen. Die Auswertungsstelle (AWST) des GSF – Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit überwacht als amtliche Messstelle nahezu die Hälfte dieser Personen. Durch Bereitstellung und Auswertung von Dosimetern kontrolliert sie die Einhaltung der zugelassenen Grenzwerte beim Umgang mit ionisierender Strahlung in den Bundesländern Bayern, Baden-Württemberg, Hessen, Hamburg und Schleswig-Holstein und meldet eventuelle Überschreitungen an die zuständigen Aufsichtsbehörden.

#### Funktionsweise von Filmdosimetern

Die meisten der beruflich strahlenexponierten Personen werden mit Filmdosimetern überwacht. Ein solches besteht aus einem Messfilm, einer Filmkassette mit drei Kupferfiltern unterschiedlicher Dicke, einem Blei-Wolfram-Filter und einem Leerfeld ohne jegliche Filterung. Der lichtdicht verpackte Film wird durch die ionisierende Strahlung geschwärzt. Aus den unterschiedlichen Intensitäten der Schwärzung hinter den



**Ein hochauflösendes Densitometer bestimmt die Grauwerte der auf dem Dosismessfilm befindlichen Felder. Mit Hilfe eines Kalibrierverfahrens kann aus diesen Informationen die Personendosis errechnet werden.**



**Automatisierte Auswertung in der Personendosimetrie: Ein Roboterarm transportiert die belichteten Filmplaketten zum Auspackmechanismus.**

Filtern kann – durch Vergleich mit einer Eichkurve – die eingefallene Strahlendosis ermittelt werden. Darüber hinaus liefert der Film auch Informationen über die Energie und Richtung der Strahlung.

Wie alle anderen passiven Strahlendosimeter misst ein Filmdosimeter integrierend, das heißt der Film summiert – bis zur Auswertung durch die Messstelle – jegliche einfallende ionisierende Strahlung. Die Aus-

# Grenzwerte und Regelungen

wertung ergibt also einen Gesamtdosiswert für die Tragezeit des Dosimeters. Auskunft über Zeitpunkt oder Dosisleistung einer Exposition kann ein Filmdosimeter nicht geben. Da das Ergebnis der Überwachung erst nach Rücksendung und Auswertung verfügbar ist, kann ein Filmdosimeter – wie auch alle anderen passiven Dosimeter – nicht unmittelbar vor ionisierender Strahlung warnen.



**Filmplakette für die Personendosimetrie: Ein lichtdicht verpackter Film wird durch auftreffende ionisierende Strahlung belichtet. Die Schwärzung ist ein Maß für die erhaltene Strahlenexposition.**

Foto: Michael van den Heuvel



**Eine Auspackmaschine holt in der Dunkelkammer die belichteten Messfilme aus ihren Hüllen. Auf ein Band aufgebracht werden die Messfilme anschließend der Entwicklungsmaschine zugeführt.**

Fotos: Bernd Müller

## Weitere Dosimetertypen

Neben Filmdosimetern bietet die GSF-Auswertungsstelle mit dem *Flachglasdosimeter* (Radiophotolumineszenz, RPL) ein weiteres Ganzkörperdosimeter an. Wird ein Glasdosimeter ionisierender Strahlung ausgesetzt, bilden sich so genannte Leuchtzentren im Phos-

phatglas, in denen die Energie gespeichert wird. Durch ultraviolettes Licht eines Lasers werden diese Zentren zur Emission der gespeicherten Energie in Form von Fluoreszenzlicht angeregt. Die Intensität des Fluoreszenzlichts dient dann als Maß für die eingefallene Dosis an ionisierender Strahlung. In der Außenstelle Hamburg der GSF-AWST werden pro Monat zirka 30.000 dieser Flachglasdosimeter bearbeitet.

*Thermolumineszenz-Dosimeter* (TLD) kommen sowohl in Fingerringen für die Teilkörperdosimetrie wie auch in Albedo-Dosimetern zur Messung von Neutronenstrahlung, die zum Beispiel in Zwischenlagern für abgebrannte Brennstäbe auftritt, zum Einsatz. Etwa 6.500 Fingerringe und 1.500 Albedo-Dosimeter werden monatlich von der GSF-AWST ausgewertet. Thermolumineszenz-Dosimeter funktionieren ähnlich wie Flachgläser: Die Energie der ionisierenden Strahlung wird zum Teil im TL-Material, einem speziellen isolierenden Kristall, gespeichert. Bei der Auswertung wird diese Energie durch Erwärmung als Licht freigesetzt und gemessen.

Darüber hinaus bietet die GSF-AWST spezielle Dosimeter zur Messung von Radon-Expositionen an (weitere Informationen im Beitrag „Der Radon-Messdienst der GSF-Auswertungsstelle“ in diesem Magazin).

## Aktive Dosimeter – ein noch besserer Schutz

Aktive elektronische Dosimeter unterscheiden sich von passiven Dosimetern durch eine direkte Anzeige von Dosis oder Dosisleistung in einem Display, das heißt diese Informationen stehen unmittelbar beim Umgang mit radioaktiven Materialien zur Verfügung. In der Regel warnen aktive Dosimeter beim Überschreiten von zuvor festgelegten Schwellenwerten und werden daher auch als Alarmsdosimeter bezeichnet. In vielen Anlagen sind Alarmsdosimeter vom Gesetzgeber als zusätzliche Kontrollmaßnahme vorgeschrieben, so zum Beispiel in kerntechnischen Anlagen und nuklearmedizinischen Einrichtungen.

Die Verwendung von elektronischen Dosimetern mit Direktanzeige kann zu einer deutlichen Reduzierung der Dosisbelastung von beruflich strahlenexponierten Personen beitragen. Untersuchungen bei medizinischem Personal haben ergeben, dass auf Grund der Kenntnis der Dosisleistung öfter einfache, aber wirkungsvolle Maßnahmen zum Eigenschutz ergriffen werden, wie zum Beispiel die Einhaltung eines größeren Abstandes zu radiologisch therapierten Patienten.

**Weitere Informationen zur GSF-Auswertungsstelle:**  
<http://awst.gsf.de>

Verordnung zum Schutze gegen Schädigungen durch Röntgenstrahlen und radioaktive Stoffe in nichtmedizinischen Betrieben (Röntgenverordnung) vom 7.2.1941, Reichsgesetzblatt I, S. 88.

<http://www.env-it.de/umweltdaten/public/theme.do?nodent=2472>

<http://www.bmu.de/strahlenschutz/downloads/doc/36318.php>

[www.bfs.de](http://www.bfs.de)

## Internet

**Berichte zu Umweltradioaktivität und Strahlenschutz zum Download:**

**Allgemeine Informationen zum Thema Strahlenschutz:**

<http://www.bfs.de/bfs/druck/uus>

[http://www.bmu.de/strahlenschutz/information\\_zum\\_strahlenschutz/doc/2208.php](http://www.bmu.de/strahlenschutz/information_zum_strahlenschutz/doc/2208.php)

<http://dip.bundestag.de/btd/16/002/1600200.pdf>

## Filmdosimetrie Die Überwachung beruflich strahlenexponierter Personen

Stephan Hübner

**Passive Dosimeter sind ein sehr wichtiger Bestandteil des Strahlenschutzes für beruflich strahlenexponierte Personen. Die Informationen aus der Dosimetrie dienen neben der reinen Überwachung von gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerten auch dazu, ungewöhnlich hohe Dosen oder gar Zwischenfälle zu erkennen und in Zukunft zu verhindern.**

Eine kleine, meist in Brusthöhe getragene Filmkassette offenbart, dass ihr Träger zum Kreis der beruflich strahlenexponierten Personen gehört. Diese Personen – Wissenschaftler, Ärzte, Materialprüfer, Reinigungspersonal, um nur einige zu nennen – arbeiten entweder in einem Überwachungs- beziehungsweise Kontrollbereich oder können auf Grund ihrer beruflichen Tätigkeit eine jährliche Ganzkörperdosis von 1 mSv oder mehr erhalten. Ein Überwachungsbereich wird dann eingerichtet, wenn bei Vollzeitbeschäftigung, das heißt einer Arbeitszeit von mehr als 2000 Stunden pro Jahr, eine Ganzkörperdosis zwischen 1 und 6 mSv möglich ist. So ist in der Regel das gesamte Betriebsgelände von Kernkraftwerken als Überwachungsbereich ausgewiesen, soweit es nicht zu den Kontrollbereichen gehört. In Kontrollbereichen, beispielsweise Röntgenräume in Kliniken, Bestrahlungsanlagen oder bestimmte Bereiche innerhalb eines Reaktorgebäudes, kann die jährliche Ganzkörperdosis mehr als 6 mSv betragen.

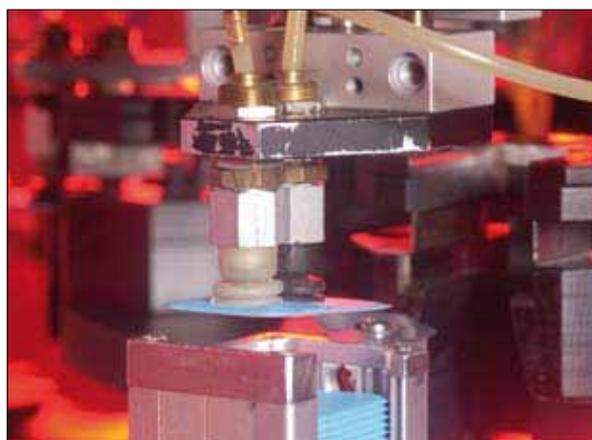
In Deutschland gibt es derzeit über 310.000 beruflich strahlenexponierte Personen. Die Auswertungsstelle (AWST) des GSF – Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit überwacht als amtliche Messstelle nahezu die Hälfte dieser Personen. Durch Bereitstellung und Auswertung von Dosimetern kontrolliert sie die Einhaltung der zugelassenen Grenzwerte beim Umgang mit ionisierender Strahlung in den Bundesländern Bayern, Baden-Württemberg, Hessen, Hamburg und Schleswig-Holstein und meldet eventuelle Überschreitungen an die zuständigen Aufsichtsbehörden.

### Funktionsweise von Filmdosimetern

Die meisten der beruflich strahlenexponierten Personen werden mit Filmdosimetern überwacht. Ein solches besteht aus einem Messfilm, einer Filmkassette mit drei Kupferfiltern unterschiedlicher Dicke, einem Blei-Wolfram-Filter und einem Leerfeld ohne jegliche Filterung. Der lichtdicht verpackte Film wird durch die ionisierende Strahlung geschwärzt. Aus den unterschiedlichen Intensitäten der Schwärzung hinter den



**Ein hochauflösendes Densitometer bestimmt die Grauwerte der auf dem Dosismessfilm befindlichen Felder. Mit Hilfe eines Kalibrierverfahrens kann aus diesen Informationen die Personendosis errechnet werden.**



**Automatisierte Auswertung in der Personendosimetrie: Ein Roboterarm transportiert die belichteten Filmplaketten zum Auspackmechanismus.**

Filtern kann – durch Vergleich mit einer Eichkurve – die eingefallene Strahlendosis ermittelt werden. Darüber hinaus liefert der Film auch Informationen über die Energie und Richtung der Strahlung.

Wie alle anderen passiven Strahlendosimeter misst ein Filmdosimeter integrierend, das heißt der Film summiert – bis zur Auswertung durch die Messstelle – jegliche einfallende ionisierende Strahlung. Die Aus-

# Grenzwerte und Regelungen

wertung ergibt also einen Gesamtdosiswert für die Tragezeit des Dosimeters. Auskunft über Zeitpunkt oder Dosisleistung einer Exposition kann ein Filmdosimeter nicht geben. Da das Ergebnis der Überwachung erst nach Rücksendung und Auswertung verfügbar ist, kann ein Filmdosimeter – wie auch alle anderen passiven Dosimeter – nicht unmittelbar vor ionisierender Strahlung warnen.



**Filmplakette für die Personendosimetrie: Ein lichtdicht verpackter Film wird durch auftreffende ionisierende Strahlung belichtet. Die Schwärzung ist ein Maß für die erhaltene Strahlenexposition.**

Foto: Michael van den Heuvel



**Eine Auspackmaschine holt in der Dunkelkammer die belichteten Messfilme aus ihren Hüllen. Auf ein Band aufgebracht werden die Messfilme anschließend der Entwicklungsmaschine zugeführt.**

Fotos: Bernd Müller

## Weitere Dosimetertypen

Neben Filmdosimetern bietet die GSF-Auswertungsstelle mit dem *Flachglasdosimeter* (Radiophotolumineszenz, RPL) ein weiteres Ganzkörperdosimeter an. Wird ein Glasdosimeter ionisierender Strahlung ausgesetzt, bilden sich so genannte Leuchtzentren im Phos-

phatglas, in denen die Energie gespeichert wird. Durch ultraviolettes Licht eines Lasers werden diese Zentren zur Emission der gespeicherten Energie in Form von Fluoreszenzlicht angeregt. Die Intensität des Fluoreszenzlichts dient dann als Maß für die eingefallene Dosis an ionisierender Strahlung. In der Außenstelle Hamburg der GSF-AWST werden pro Monat zirka 30.000 dieser Flachglasdosimeter bearbeitet.

*Thermolumineszenz-Dosimeter* (TLD) kommen sowohl in Fingerringen für die Teilkörperdosimetrie wie auch in Albedo-Dosimetern zur Messung von Neutronenstrahlung, die zum Beispiel in Zwischenlagern für abgebrannte Brennstäbe auftritt, zum Einsatz. Etwa 6.500 Fingerringe und 1.500 Albedo-Dosimeter werden monatlich von der GSF-AWST ausgewertet. Thermolumineszenz-Dosimeter funktionieren ähnlich wie Flachgläser: Die Energie der ionisierenden Strahlung wird zum Teil im TL-Material, einem speziellen isolierenden Kristall, gespeichert. Bei der Auswertung wird diese Energie durch Erwärmung als Licht freigesetzt und gemessen.

Darüber hinaus bietet die GSF-AWST spezielle Dosimeter zur Messung von Radon-Expositionen an (weitere Informationen im Beitrag „Der Radon-Messdienst der GSF-Auswertungsstelle“ in diesem Magazin).

## Aktive Dosimeter – ein noch besserer Schutz

Aktive elektronische Dosimeter unterscheiden sich von passiven Dosimetern durch eine direkte Anzeige von Dosis oder Dosisleistung in einem Display, das heißt diese Informationen stehen unmittelbar beim Umgang mit radioaktiven Materialien zur Verfügung. In der Regel warnen aktive Dosimeter beim Überschreiten von zuvor festgelegten Schwellenwerten und werden daher auch als Alarmsdosimeter bezeichnet. In vielen Anlagen sind Alarmsdosimeter vom Gesetzgeber als zusätzliche Kontrollmaßnahme vorgeschrieben, so zum Beispiel in kerntechnischen Anlagen und nuklearmedizinischen Einrichtungen.

Die Verwendung von elektronischen Dosimetern mit Direktanzeige kann zu einer deutlichen Reduzierung der Dosisbelastung von beruflich strahlenexponierten Personen beitragen. Untersuchungen bei medizinischem Personal haben ergeben, dass auf Grund der Kenntnis der Dosisleistung öfter einfache, aber wirkungsvolle Maßnahmen zum Eigenschutz ergriffen werden, wie zum Beispiel die Einhaltung eines größeren Abstandes zu radiologisch therapierten Patienten.

**Weitere Informationen zur GSF-Auswertungsstelle:**  
<http://awst.gsf.de>

**Aktivität:** Die Aktivität einer Menge von spezifizierten Radionukliden wird als die mittlere Anzahl der spontanen kernphysikalischen Übergänge von einem höheren zu einem niedrigeren Energiezustand pro Zeiteinheit angegeben. Ihre Einheit ist  $s^{-1}$ , der spezielle Name für diese Einheit ist Becquerel (Bq).

**Äquivalentdosis:** Die Äquivalentdosis berücksichtigt die biologisch relevanten Vorgänge der Strahlenwirkung durch die Einführung eines dimensionslosen Bewertungsfaktors. So verursacht Alphastrahlung wegen ihrer dichteren Energiedeposition oft eine wesentlich höhere biologische Wirkung bei gleicher Energiedosis als die Beta- und Gammastrahlung mit ihren relativ weit auseinanderliegenden Wechselwirkungsakten. Die Äquivalentdosis  $H$  ergibt sich aus der Energiedosis  $D$  durch Multiplikation mit dem dimensionslosen Strahlen-Bewertungsfaktor  $w_R$ . Er hat den Wert 1 für Röntgen-, Gamma- und Betastrahlung, für Alphastrahlung den Wert 20 und für Neutronen – je nach ihrer Energie – Werte zwischen 5 und 20. Die Einheit der Äquivalentdosis ist Joule pro Kilogramm; ihr spezieller Name das Sievert (Sv).

**Effektive Dosis:** Für die effektive Dosis  $E$  werden die Äquivalentdosen  $H_T$  in den einzelnen Organen des Körpers gewichtet und aufsummiert:  $E = \sum H_T w_T$ . Das Gewicht  $w_T$  bestimmt sich aus den relativen Beiträgen der einzelnen Organe zum gesamten mittleren, letalen Strahlenrisiko des Menschen. Da die Organ-Wichtungsfaktoren  $w_T$  dimensionslos sind, wird die effektive Dosis  $E$  – ebenso wie die Äquivalentdosis – in Joule pro Kilogramm und dem speziellen Einheitennamen Sievert (Sv) angegeben.

**Energiedosis:** Die Energiedosis  $D$  ist definiert als Quotient aus der in einem Volumen im Mittel absorbierten Strahlungsenergie und der Masse des absorbierenden Volumens. Ihre Dimension ist Energie pro Masseneinheit, also Joule pro Kilogramm, ihr spezieller Einheitenname ist Gray (Gy).

**Expositionsermittlung – WLM:** Die Exposition durch Radon und seine Folgeprodukte wird in Working Level Months (WLM) gemessen. Diese Einheit wurde in den 1950er-Jahren speziell für den Arbeitsschutz in Uranbergwerken in den USA eingeführt. Ein Working Level ist jede Kombination von Aktivitätskonzentrationen kurzlebiger Radonfolgeprodukte in einem Liter Luft, die zur Emission von  $1,3 \times 10^5$  MeV potentieller Alpha-Energie bei radioaktivem Zerfall führt. Wirkt die Alpha-Energiekonzentration von 1 WL in der Atemluft einen Arbeitsmonat lang (170 Stunden) auf einen Menschen ein, so wird diese Dosis 1 Working Level Month = 1 WLM genannt. Ein WLM entspricht einer gleichgewichtsäquivalenten Aktivitätskonzentration von  $3.700 \text{ Bq/m}^3$  von Rn-222, multipliziert mit 170 Stunden (der monatlichen Arbeitszeit).

**Fall-Kontroll-Studie:** Hier wird untersucht, ob Personen mit einer bestimmten Krankheit (Fälle) häufiger oder höher exponiert waren als vergleichbare Personen ohne diese Krankheit (Kontrollen). Die Gruppen sollten hinsichtlich anderer Risikofaktoren möglichst ähnlich sein.

**Follow-up-Studie:** Im Zuge einer Follow-up-Studie wird für jede Person aus der Kohortenstudie festgestellt, ob sie bis zu einem bestimmten Stichtag erkrankt ist (Inzidenz-Follow-up) oder ob sie verstorben ist (Mortalitäts-Follow-up).

**Kohorten-Studie:** In einer Kohortenstudie wird untersucht, ob bei Personen, die einem möglichen Risikofaktor ausgesetzt waren – zum Beispiel Radon – (Risikogruppe) bestimmte Erkrankungen häufiger auftreten als bei Personen, die keinen Kontakt zu diesem Risikofaktor hatten (Kontrollgruppe).

### Links zum Strahlenschutz

#### Aktuelle Messwerte der Umweltradioaktivität:

Tagesmittelwerte der Ortsdosisleistung von rund 2000 Messstellen des Radioaktivitätsmessnetzes des Bundesamtes für Strahlenschutz unter <http://odlinfo.bfs.de>

#### Auswertungsstelle für Strahlendosimeter der GSF:

Strahlenschutztechnische Grundlagen, Wissenswertes über Dosimetersysteme und deren Auswertung unter <http://awst.gsf.de/>

#### Strahlenschutzkommission (SSK):

Die Empfehlungen und Stellungnahmen zum Download unter <http://www.ssk.de/>

#### Bundesamt für Strahlenschutz:

Allgemeine Informationen rund um ionisierende und nichtionisierende Strahlung, Literatur, Jahresberichte zur Strahlenexposition der Bevölkerung <http://www.bfs.de>

#### Medline plus:

Die US-National Library of Medicine und die National Institutes of Health bieten ein eigenes Portal zum Thema Strahlung mit aktuellen Nachrichten und Zugriff auf die wissenschaftlichen Quellen unter <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/radiationexposure.html>

#### Physikalisch-Technische Bundesanstalt:

Informationen über Einheiten, Messungen, Kalibrieren unter [www.ptb.de](http://www.ptb.de)

#### Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:

Aktuelle Fragen zu Strahlenschutzrecht, Notfallschutz, Überwachung der Umweltradioaktivität unter <http://www.bmu.de/strahlenschutz/>

#### Bayerisches Landesamt für Umweltschutz:

Messwerte der Umweltradioaktivität in Bayern, Aktivitätsgehalte in Lebensmitteln, Radon in Wasserwerken, aktuelle Messwerte des Bayerischen Immissionsmessnetzes für Radioaktivität unter <http://www.bayern.de/lfu/strahlen/>

#### Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz:

Grundlagen zu Atomphysik und Strahlenschutz unter <http://www.stmugv.bayern.de/de/strahl/>

#### Vereinigung Deutscher Strahlenschutzärzte/ Verband für

medizinischen Strahlenschutz in Österreich: Informationsplattform für den medizinischen Strahlenschutz unter <http://www.strahlenschutz.org/>

#### United Nations Scientific Committee on the Effects of

Atomic Radiation (UNSCEAR): Internationales Expertengremium der Vereinten Nationen mit Empfehlungen zur Festlegung von Strahlenschutzgrenzwerten unter [www.unscear.org](http://www.unscear.org)

#### International Commission on Radiological Protection:

Mechanismen, Rechenmodelle, Konzepte zum Strahlenschutz in Medizin und Umwelt unter <http://www.icrp.org>

## Forschung zum Schutz des Menschen und seiner Umwelt

Das GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit konzentriert seine Arbeiten auf eine der wichtigsten Fragen der Gesellschaft, die Gesundheit des Menschen in seiner Umwelt. Im Mittelpunkt des Forschungsinteresses stehen die komplexen Interaktionen zwischen genetischer Veranlagung und Umweltfaktoren bei der Entstehung von Krankheiten.

Die GSF verknüpft in einzigartiger Weise die Bereiche Biomedizin und Umweltforschung. Mit ihrem interdisziplinären Ansatz ist die GSF in der Lage, essentielle

Beiträge zum Verständnis molekularer Grundlagen bis hin zur Entwicklung neuer Ansätze in Diagnostik, Prävention und individueller Therapie zu liefern. Aktuelle Ansätze tragen zum Verständnis von Immun-, Tumor- und degenerativen Erkrankungen bei.

Die GSF ist eine Einrichtung des Bundes und des Freistaats Bayern und gehört der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren an. Die Zahl der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter beträgt rund 1700, das Gesamtbudget beläuft sich auf 177 Millionen Euro.

## Bei der GSF können Sie erhalten



**Heft 14**  
Nahrungsmittel  
zwischen Natur  
und Retorte  
Was essen wir  
wirklich?  
(2000)



**Heft 15**  
Asthma und Allergien  
Wenn die Luft  
zum Atmen fehlt  
(2002)



**Heft 16**  
Was verraten  
unsere Gene?  
(2003)



**Heft 17**  
Grüne Gentechnik  
in Forschung  
und Anwendung  
(2004/2005)

### Weitere Ausgaben von **mensch+umwelt** **spezial** sowie Informationsmaterial über die GSF fordern Sie bitte an

per Postkarte bei  
GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit  
Öffentlichkeitsarbeit  
Ingolstädter Landstraße 1  
85764 Neuherberg

oder per E-Mail bei  
oea@gsf.de

als pdf-Download über  
<http://www.gsf.de/Aktuelles/Zeitschriften/>