



# STRAHLUNG

## EFFEKTE UND QUELLEN

Was ist Strahlung?  
Wie wirkt sich Strahlung auf uns aus?  
Woher kommt Strahlung?

>1 000 mSv

Dosis in der Strahlentherapie

100 mSv

Dosis eines Astronauten  
(4 Monate)

10 mSv

Abdomen-CT-Untersuchung

1 mSv

Dosis eines Beschäftigten in der  
Nuklearindustrie (1 Jahr)

0,1 mSv

Röntgenaufnahme des Brustkorbs  
oder Flugreise (20 Stunden)

0,01 mSv

Zahnärztliche Röntgenaufnahme

0,001 mSv

Paranüsse (30 g)





# STRAHLUNG

## EFFEKTE UND QUELLEN

Was ist Strahlung?  
Wie wirkt sich Strahlung auf uns aus?  
Woher kommt Strahlung?

Umweltprogramm der Vereinten Nationen

# HAFTUNGSAUSSCHUSSERKLÄRUNG

Diese Veröffentlichung basiert zu einem großen Teil auf den Ergebnissen des Wissenschaftlichen Ausschusses der Vereinten Nationen zur Untersuchung der Auswirkungen atomarer Strahlung (UNSCEAR). Es handelt sich hierbei um einen Ausschuss der Generalversammlung der Vereinten Nationen, für den das Umweltprogramm der Vereinten Nationen das Sekretariat stellt. Diese Veröffentlichung gibt nicht notwendigerweise die Auffassungen des Wissenschaftlichen Ausschusses oder des Umweltprogramms der Vereinten Nationen wieder.

Die verwendeten Bezeichnungen und die Darstellung des Materials in dieser Veröffentlichung stellen keinerlei Meinungsäußerung seitens des Umweltprogramms der Vereinten Nationen hinsichtlich des rechtlichen Status irgendwelcher Länder, Territorien, Städte oder Gebiete oder ihrer Behörden oder hinsichtlich ihrer politischen oder geografischen Grenzen dar.

Eine Vervielfältigung dieser Veröffentlichung in Auszügen für Bildungs- oder andere nicht der Gewinnerzielung dienende Zwecke ist ohne gesonderte Genehmigung der Urheberrechtsinhaber unter Nennung der Quelle gestattet. Das Umweltprogramm der Vereinten Nationen bittet um Übersendung eines Exemplars jeder auf dieser Broschüre als Quelle basierenden Veröffentlichung.

Eine Nutzung dieser Veröffentlichung zum Weiterverkauf oder für andere kommerzielle Zwecke jeglicher Art ist ohne vorherige schriftliche Genehmigung des Umweltprogramms der Vereinten Nationen nicht gestattet.

Das Umweltprogramm der Vereinten Nationen setzt sich für umweltverträgliche Praktiken sowohl global als auch in seiner eigenen Arbeit ein. Diese Veröffentlichung wurde auf vollständig chlorfreiem Recyclingpapier gedruckt. Die Vertriebspolitik des Umweltprogramms der Vereinten Nationen strebt eine möglichst gute Klimabilanz an.

Katalogeintrag: Strahlung: Effekte und Quellen, Umweltprogramm der Vereinten Nationen, 2016

ISBN: 978-92-807-3602-1

Job No.: DEW/2038/NA

Copyright © Umweltprogramm der Vereinten Nationen, 2016

Elektronische Version



# **STRAHLUNG**

## **EFFEKTE UND QUELLEN**

Was ist Strahlung?  
Wie wirkt sich Strahlung auf uns aus?  
Woher kommt Strahlung?

Umweltprogramm der Vereinten Nationen

## DANKSAGUNG

Diese Broschüre basiert zu einem großen Teil auf den Ergebnissen des Wissenschaftlichen Ausschusses der Vereinten Nationen zur Untersuchung der Auswirkungen atomarer Strahlung und auf der erstmals 1985 und 1991 erschienenen Veröffentlichung des Umweltprogramms der Vereinten Nationen „Radiation: doses, effects, risks“ bearbeitet von Geoffrey Lean.

Diese Broschüre ist ursprünglich auf Englisch erschienen. Die Übersetzung wurde freundlicherweise vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Deutschland) bereitgestellt. Bei Widersprüchen ist die ursprüngliche Fassung maßgeblich.

Technische Redaktion: Malcolm Crick und Ferid Shannoun

Sprachliche Redaktion: Susan Cohen-Unger und Ayhan Evrensel

Grafik und Layout: Alexandra Diesner-Kuepfer

Darüber hinaus danken wir den folgenden Personen für ihre wertvollen Beiträge und Kommentare zu dieser Broschüre:

Laura Anderson, John Cooper, Susan Cueto-Habersack, Emilie van Deventer, Gillian Hirth, David Kinley, Vladislav Klener, Kristine Leysen, Kateřina Navrátilová-Rovenská, Jaya Mohan, Wolfgang-Ulrich Müller, Maria Pérez, Shin Saigusa, Bertrand Thériault, Hiroshi Yasuda und Anthony Wrixon.

# VORWORT

Hiroshima, Nagasaki, Three Mile Island, Tschernobyl und Fukushima-Daiichi: Diese Orte stehen für die Furcht der Menschen vor Strahlung, sei es durch Kernwaffen oder durch Unfälle in Atomkraftwerken. Tatsächlich ist jedoch die tägliche Strahlenbelastung des Menschen aus einer Vielzahl anderer Quellen, darunter atmosphärischer und terrestrischer Strahlung sowie Strahlung aus medizinischen und industriellen Anwendungen, weitaus höher.



1955 kamen aufgrund von Kernwaffentests öffentliche Bedenken hinsichtlich der Auswirkungen radioaktiver Strahlung auf Luft, Wasser und Lebensmittel auf. Als Reaktion richtete die Generalversammlung der Vereinten Nationen den Wissenschaftlichen Ausschuss der Vereinten Nationen zur Untersuchung der Auswirkungen atomarer Strahlung [United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)] mit der Aufgabe ein, Informationen zur Höhe und zu den Auswirkungen von Strahlenexposition zu sammeln und auszuwerten. Der erste Bericht des Ausschusses schuf die wissenschaftliche Grundlage für die Aushandlung des Atomteststoppabkommens im Jahr 1963, mit dem oberirdische Kernwaffenversuche verboten wurden. Seither erstellt der Ausschuss fundierte Berichte über Strahlenbelastungen, darunter Berichte über Strahlenbelastungen aufgrund der Störfälle in den Kernkraftwerken Tschernobyl und Fukushima-Daiichi. Die Arbeiten des Ausschusses waren durchweg von größtem wissenschaftlichen und politischen Wert.

Die von Wissenschaftlern veröffentlichten Informationen zu Strahlungsquellen und -auswirkungen sind oftmals zu fachspezifisch und für die Öffentlichkeit möglicherweise auch zu schwer verständlich, sodass die Bevölkerung eher verunsichert als informiert wurde, was zu einer Verfestigung jahrzehntelanger Befürchtungen und Fehlinformationen geführt hat. Diese Publikation soll die aktuellen wissenschaftlichen Informationen von UNSCEAR in Bezug auf Strahlungsarten, -quellen und -auswirkungen auf Mensch und Umwelt ausführlich und für einen allgemeinen Leserkreis verständlich darstellen.

Das UNSCEAR-Sekretariat ist mit dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP), das Staaten bei der Umsetzung einer umweltverträglichen Politik und entsprechender Praktiken unterstützt, verbunden. Die Aufklärung der Bevölkerung über Strahlung und ihren Einfluss auf das Leben auf der Erde ist Teil der Kernaufgabe von UNEP.

Es ist mir eine große Freude, allen an dieser Publikation Beteiligten sowie den Mitgliedern des Ausschusses und ihren Delegationen, die in den vergangenen sechzig Jahren mit so großem Engagement an diesen wichtigen Themen gearbeitet haben, meinen besonderen Dank auszusprechen.

A handwritten signature in black ink, reading 'Achim Steiner'. The signature is written in a cursive style with a large initial 'A' and a long, sweeping underline.

Achim Steiner  
UNEP Exekutivdirektor und  
Untergeneralsekretär der Vereinten Nationen

# INHALT

<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
<b>1. WAS IST STRAHLUNG?</b>	<b>3</b>
1.1. Zur Geschichte	3
1.2. Etwas Grundlagen	4
Radioaktiver Zerfall und Halbwertszeiten	6
Strahlungseinheiten	7
1.3. Durchdringungsvermögen von Strahlung	9
<b>2. WIE WIRKT SICH STRAHLUNG AUF UNS AUS?</b>	<b>11</b>
2.1. Auswirkungen auf den Menschen	13
Frühe Gesundheitseffekte	14
Verzögerte Gesundheitseffekte	15
Auswirkungen auf Nachkommen	18
2.2. Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen	22
2.3. Zusammenhang zwischen Strahlendosis und -wirkung	24
<b>3. WOHER KOMMT STRAHLUNG?</b>	<b>27</b>
3.1. Natürliche Quellen	28
Kosmische Quellen	28
Terrestrische Quellen	29
Quellen in Lebensmitteln	32
3.2. Künstliche Quellen	32
Medizinische Anwendungen	33
Kernwaffen	37
Kernreaktoren	39
Industrielle und andere Anwendungen	48
3.3. Durchschnittliche Strahlenexposition von Bevölkerung und Beschäftigten	55



# EINLEITUNG

Zunächst ist zwischen ionisierender und nichtionisierender Strahlung zu unterscheiden. **Ionisierende Strahlung** besitzt genügend Energie, um aus einem Atom Elektronen freizusetzen. **Nichtionisierende Strahlung** wie beispielsweise Radiowellen, sichtbares Licht oder UV-Strahlung ist hierzu nicht in der Lage. Diese Publikation behandelt die Auswirkungen von Strahlenbelastung sowohl aus natürlichen als auch aus künstlichen Quellen. Wenn im Folgenden von **Strahlung** gesprochen wird, ist immer ionisierende Strahlung gemeint.



Heute ist mehr über die Quellen einer Strahlungsexposition und deren Auswirkungen als über fast jeden anderen Gefahrenstoff bekannt, und die Wissenschaft aktualisiert und analysiert ihren Kenntnisstand fortwährend. Den meisten Menschen ist die Nutzung von Strahlung in Kernkraftwerken zur Stromerzeugung oder in medizinischen Anwendungen bekannt. Eine Vielzahl weiterer Nutzungen von Kerntechnik in Industrie, Landwirtschaft, Bauwirtschaft sowie der Forschung und weiteren Gebieten ist demgegenüber kaum bekannt. Wer erstmals etwas über dieses Thema liest, wird erstaunt feststellen, dass die Strahlungsquellen, von denen die stärkste Strahlenbelastung für die Bevölkerung ausgeht, nicht unbedingt auch die bekanntesten sind. So geht die Strahlenexposition tatsächlich in erster Linie von natürlichen, in der Umwelt allgegenwärtigen Quellen aus, und die wichtigste künstliche Strahlungsquelle ist die Nutzung von Strahlung in der Medizin. Darüber hinaus kann auch im

alltäglichen Leben, beispielsweise auf Flugreisen und in gut isolierten Häusern in bestimmten Regionen der Welt, eine stark erhöhte Strahlenbelastung auftreten.

Mit dieser Publikation wollen das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und das Sekretariat des Wissenschaftlichen Ausschusses der Vereinten Nationen zur Untersuchung der Auswirkungen atomarer Strahlung (UNSCEAR) über die Quellen, den Umfang und die Effekte einer Exposition durch ionisierende Strahlung aufklären und diesbezüglich mehr Verständnis schaffen. UNSCEAR wurde 1955 von der Generalversammlung der Vereinten Nationen als Gruppe führender Wissenschaftler aus 27 Mitgliedstaaten der Vereinten Nationen ins Leben gerufen, um Fragen zu Strahlenexposition, -effekte und -risiken weltweit zu untersuchen, ohne jedoch Sicherheitsstandards aufzustellen oder zu empfehlen. Vielmehr stellt der Ausschuss wissenschaftliche Informationen bereit, die von nationalen Behörden und anderen Stellen hierfür als Grundlage genutzt werden. Die wissenschaftlichen Veröffentlichungen von UNSCEAR in den letzten sechzig Jahren bilden die wichtigste Informationsquelle für diese Publikation.

# 1. WAS IST STRAHLUNG?

Um über Höhe, Auswirkungen und Risiken einer Strahlenexposition sprechen zu können, bedarf es zunächst etwas Grundlagenwissens über Strahlung und die Wissenschaft davon. Sowohl Radioaktivität als auch die dadurch erzeugte Strahlung existierten lange vor dem Entstehen von jeglichen Lebens auf der Erde. So sind sie seit dem Anfang des Universums im All vorhanden, und radioaktives Material war schon bei ihrer Entstehung Teil der Erde. Der Mensch hat dieses elementare, universelle Phänomen jedoch erst in den letzten Jahren des 19. Jahrhunderts erkannt, und noch heute werden immer neue Formen seiner Nutzung entdeckt.

## 1.1. Zur Geschichte

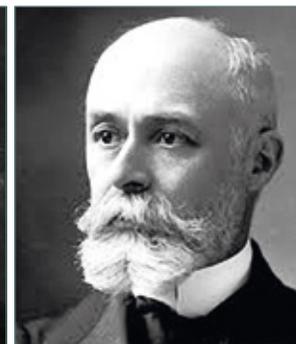
1895 entdeckte der deutsche Physiker **Wilhelm Conrad Röntgen** Strahlen – von ihm selbst als X-Strahlen bezeichnet –, die den Blick in den menschlichen Körper ermöglichen. Diese Entdeckung markiert den Beginn der seither ständig fortschreitenden medizinischen Nutzung von Strahlung. In Anerkennung seiner außerordentlichen Verdienste für die Menschheit erhielt Röntgen 1901 den ersten Nobelpreis für Physik. Ein Jahr nach Röntgens Entdeckung legte der französische Wissenschaftler **Henri Becquerel** einige Fotoplatten in eine Schublade, in der sich kleinste Teile eines uranhaltigen Minerals befanden. Als er die Platten entwickelte, stellte er zu seiner Überraschung fest, dass sie sich durch die Strahlung geschwärzt hatten. Dieses als **Radioaktivität** bezeichnete Phänomen ist die Folge einer spontanen Freisetzung von Energie aus einem Atom. Die heutige Maßeinheit ist Becquerel (Bq) nach dem Entdecker Henri Becquerel. Schon kurz danach führte die junge Chemikerin **Marie Skłodowska-Curie** die Forschungen weiter und prägte als Erste den Begriff „Radioaktivität“. 1898 machte sie gemeinsam mit ihrem Ehemann **Pierre Curie** die Entdeckung, dass sich Uran bei der Freisetzung von Strahlung auf unerklärliche Weise in zwei Elemente aufspaltet, von denen sie das eine nach ihrer polinischen Heimat „Polonium“ und das andere „Radium“, das „strahlende“ Element, nannte. Marie



Wilhelm C. Röntgen (1845–1923)



Marie Curie (1867–1934)



Henri Becquerel (1852–1908)

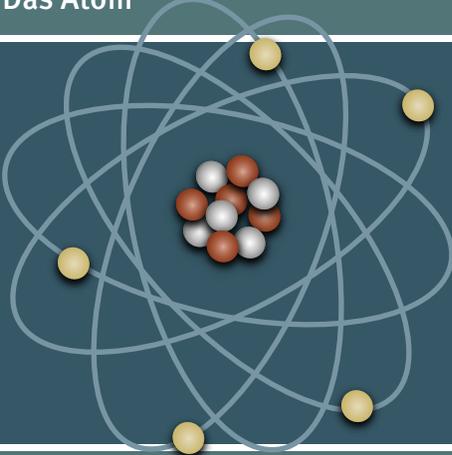
Curie erhielt den Nobelpreis für Physik 1903 gemeinsam mit Pierre Curie und Henri Becquerel. 1911 war sie die erste Frau, die den Nobelpreis zum zweiten Mal erhielt, dieses Mal für ihre Entdeckungen auf dem Gebiet der Strahlenchemie.

## 1.2. Etwas Grundlagen

Die Suche der Wissenschaftler galt dem Verständnis des **Atoms** und genauer noch seiner Struktur. Heute ist bekannt, dass Atome einen winzigen, positiv geladenen Kern besitzen, der von einer Wolke negativ geladener **Elektronen** umgeben ist. Der Kern ist etwa nur ein Hunderttausendstel so groß wie das ganze Atom, jedoch so dicht, dass er nahezu die gesamte Masse des Atoms ausmacht.

Der Kern besteht allgemein aus einem Cluster von Teilen, den **Protonen** und **Neutronen**, die eng aneinanderhaften. Protonen besitzen eine positive, Neutronen keine elektrische Ladung. Chemische Elemente werden durch die Anzahl der Protonen in ihren Atomen bestimmt (so hat beispielsweise das Boratom 5, das Uranatom 92 Protonen). Elemente mit derselben Anzahl von Protonen, aber unterschiedlicher Anzahl von Neutronen werden als **Isotope** bezeichnet (so unterscheiden sich beispielsweise Uran-235 und Uran-238 dadurch, dass der Kern von Uran-238 drei Neutronen mehr aufweist). Ein Atom ist in seiner Gesamtheit normalerweise weder positiv noch negativ geladen, da es über dieselbe Anzahl negativ geladener Elektronen wie positiv geladener Protonen verfügt.

### Das Atom



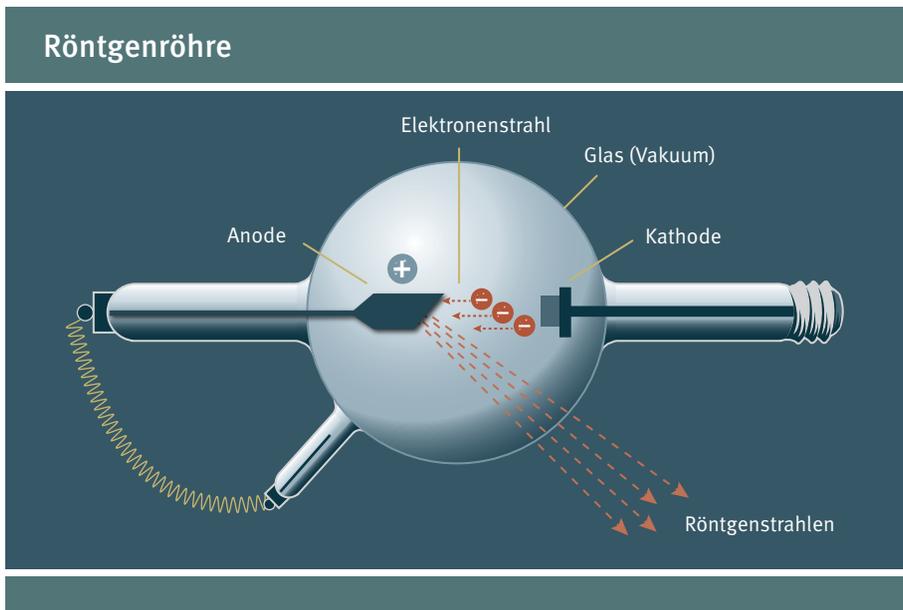
Das Diagramm zeigt ein Boratom (B) mit einem zentralen Kern, der aus Protonen (rot) und Neutronen (weiß) besteht. Um den Kern herum sind fünf Elektronen (gelb) auf kreisförmigen Bahnen angeordnet.

Ordnungszahl	5	- Elektronenzahl
Symbol	<b>B</b>	- Protonenzahl
Name	BOR	

Elektron (gelb) Proton (rot) Neutron (weiß)

Ein Atom besteht aus einem Kern ungeladener Neutronen und positiv geladener Protonen und ist von einer Wolke negativ geladener Elektronen umgeben. Bei ungeladenen Atomen ist die Anzahl der Elektronen und Protonen gleich und gibt die Atomzahl des Elements an.

Einige Atome sind von Natur aus stabil, andere nicht. Atome mit einem instabilen Kern, die spontan zerfallen und dabei Energie in Form von Strahlung freisetzen, werden als **Radionuklide** bezeichnet. Diese Energie kann mit anderen Atomen interagieren und diese ionisieren. Als **Ionisation** bezeichnet man den Prozess, bei dem Atome positiv oder negativ geladen werden, indem sie Elektronen aufnehmen oder abgeben. Ionisierende Strahlung enthält genügend Energie, um Elektronen aus ihrer Kreisbahn zu entfernen. Hierbei entstehen als **Ionen** bezeichnete geladene Atome. Die Emission eines Teilchens, das aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht, wird als **Alphaerfall**, die Emission von Elektronen als **Betazerfall** bezeichnet. Das instabile Nuklid ist häufig so energiereich, dass die Emission von Teilchen nicht ausreicht, um es zu stabilisieren. Das Ergebnis ist eine Abstrahlung von Energie als elektromagnetische Strahlung, genannt **Gammastrahlung**.



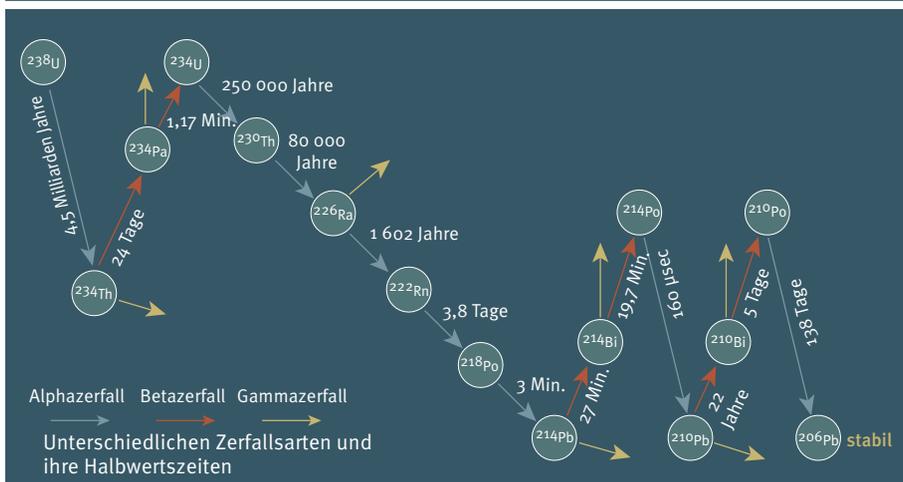
Eine weitere Form elektromagnetischer Strahlung sind die **Röntgenstrahlen**, jedoch ist diese Strahlung weniger energiereich. In einer Vakuumröhre lässt sich ein Röntgenspektrum mit unterschiedlichen Energieniveaus erzeugen, indem ein von einer **Kathode** emittierter Elektronenstrahl auf eine als „Target“ bezeichnete **Anode** gerichtet wird. Das Röntgenspektrum hängt vom Anodenmaterial und der Beschleunigungsenergie des Elektronenstrahls ab. Auf diese Weise lässt sich künstliche Röntgenstrahlung präzise und bedarfsgerecht erzeugen, was sich in industriellen und medizinischen Anwendungen gut nutzen lässt.

## Radioaktiver Zerfall und Halbwertszeiten

Zwar sind alle Radionuklide instabil, jedoch in unterschiedlichem Ausmaß. So sind beispielsweise die Teilchen im Kern eines Uran-238-Atoms (mit 92 Protonen und 146 Neutronen) gerade noch zur Clusterbildung in der Lage. Nach unterschiedlichen Zeitabschnitten bricht eine Gruppe aus zwei Protonen und zwei Neutronen aus und verlässt das Atom als Alphateilchen. Hierbei wird das Uran-238 zu Thorium-234 (mit 90 Protonen und 144 Neutronen). Thorium-234 ist jedoch auch instabil: Durch Umwandlung eines Neutrons in ein Proton und ein Elektron, das seinerseits als Beta-Teilchen emittiert wird, verwandelt sich das Thorium zu Protactinium-234 mit 91 Protonen und 143 Neutronen. Dieses wiederum ist ebenfalls äußerst instabil und zerfällt recht schnell zu Uran-234, sodass das Atom weiterhin Teilchen abgibt und letztlich zu stabilem Blei-206 mit 82 Protonen und 124 Neutronen wird. Es existieren viele derartige Umwandlungssequenzen, die als *radioaktiver Zerfall* bezeichnet werden.

Die Zeit, die vergeht, bis die Hälfte eines Elements zerfallen ist, ist die *Halbwertszeit*. Nach der Halbwertszeit sind von einer Million Atomen im Durchschnitt 500 000 (Atome) zu etwas anderem zerfallen. Während der nächsten Halbwertszeit zerfallen weitere 250 000 Atome. Dieser Vorgang setzt sich so lange fort, bis sämtliche Atome zerfallen sind. Nach zehn Halbwertszeiten ist nur noch etwa ein Tausendstel (d. h. 0,1 %) der ursprünglichen Million übrig. Im obigen Beispiel dauert es nur etwas länger als eine Minute, bis die Hälfte der Protactinium-234-Atome zu Uran-234 zerfallen ist. Demgegenüber dauert es bei Uran-238 4,5 Milliarden Jahre

### Uran-238 – radioaktive Zerfallsreihe



(4 500 000 000), bis die Hälfte der Atome zu Thorium-234 zerfallen ist. Allerdings kommen nur relativ wenige Radionuklide natürlich in der Umgebung vor.

## Strahlungseinheiten

Heute weiß man, dass Strahlungsenergie lebendes Gewebe schädigen kann. Die Menge der in lebendem Gewebe abgelagerten Energie wird in einer als *Dosis* bezeichneten Dimension ausgedrückt. Die Strahlendosis kann ihren Ursprung in jedem Radionuklid oder in mehreren Radionukliden haben. Diese können sich außerhalb des Körpers befinden oder beispielsweise durch Einatmen oder Verschlucken in den Körper gelangen und von dort aus strahlen. Dosen werden auf unterschiedliche Weise angegeben, je nachdem, wie viele und welche Teile des Körpers bestrahlt werden, ob eine oder mehrere Personen betroffen sind und wie lang die Expositionsdauer ist (beispielsweise akute Exposition).

Die Menge der pro Kilogramm Gewebe aufgenommenen Strahlungsenergie wird als *absorbierte Dosis* bezeichnet und in der Einheit Gray (Gy) nach dem englischen Physiker und Pionier der Strahlungsbiologie **Harold Gray** ausgedrückt. Dies ist allerdings dahingehend einzuschränken, dass eine Dosis Alphateilchen weit aus schädlicher sein kann als dieselbe Dosis Beta-Teilchen oder Gammastrahlen. Um die absorbierten Dosen unterschiedlicher Strahlungsarten vergleichen zu können, müssen diese mit ihrem jeweiligen Potenzial, bestimmte Arten biologischer Schäden zu verursachen, gewichtet werden. Diese gewichtete Dosis wird als *Äquivalentdosis* bezeichnet und in der Einheit Sievert (Sv) nach dem schwedischen Wissenschaftler **Rolf Sievert** ausgedrückt. Ein Sievert entspricht 1 000 Millisievert, ebenso wie 1 Liter 1 000 Millilitern und 1 Meter 1 000 Millimetern entspricht.



Harold Gray (1905–1965)  
Rolf Sievert (1896–1966)

Zu berücksichtigen ist auch, dass nicht alle Teile des Körpers gleich verletzlich sind. So kann beispielsweise dieselbe Äquivalentstrahlendosis eher Lungen- als Leberkrebs auslösen, und die Fortpflanzungsorgane sind aufgrund der Gefahr von Erbgutschäden besonders zu schützen. Um daher Strahlenbelastungsdosen unterschiedlicher Gewebe und Organe vergleichen zu können, werden die Äquivalentdosen der verschiedenen Teile des Körpers ebenfalls gewichtet. Das Ergebnis ist die gleichfalls in Sievert (Sv) ausgedrückte *effektive Dosis*. Die

effektive Dosis ist allerdings ein Indikator für die Wahrscheinlichkeit von Krebs und genetischen Schädigungen aufgrund geringerer Dosen, ohne jedoch als Maß für die Schwere von Folgen bei höheren Dosen zu dienen.

Dieses komplizierte System von Strahlungsgrößen ist erforderlich, um eine einheitliche Struktur zu schaffen, anhand derer Strahlenschutzfachleute individuelle Dosen einheitlich und vergleichbar darstellen können. Dies ist insbesondere für Personen wichtig, die mit Strahlung umgehen und somit *berufsbedingt exponiert* sind.

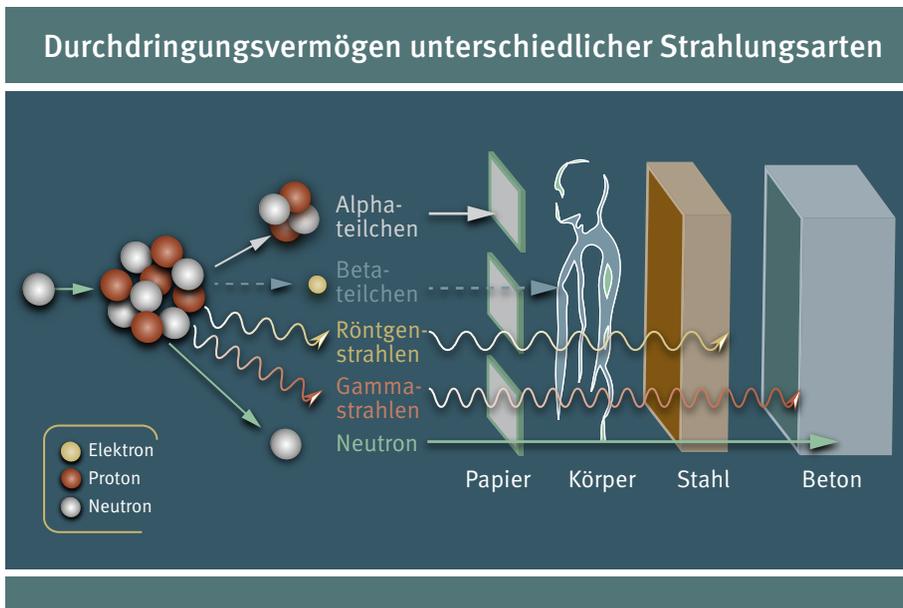
Strahlungsgrößen	
Physikalische Größe	
Aktivität	Die Anzahl der Kernumwandlungen mit Energiefreisetzung pro Zeiteinheit. Sie wird in Zerfällen pro Sekunde gemessen und in Becquerel (Bq) ausgedrückt.
Absorbierte Dosis	Die Menge von durch Strahlung in eine Masseinheit eines Materials, beispielsweise ein Gewebe oder Organ, abgegebene Energie. Sie wird in Gray (Gy) ausgedrückt, was Joule pro Kilogramm entspricht.
Berechnete Menge	
Äquivalentdosis	Absorbierte Dosis, multipliziert mit einem Strahlungsfaktor ( $w_R$ ), der berücksichtigt, wie die unterschiedlichen Strahlungsarten ein Gewebe oder Organ schädigen. Sie wird in Sievert (Sv) ausgedrückt, was Joule pro Kilogramm entspricht.
Effektive Dosis	Äquivalentdosis, multipliziert mit Organfaktoren ( $w_T$ ), die die Empfindlichkeit, unterschiedliche Gewebe und Organe zu schädigen, berücksichtigen. Sie wird in Sievert (Sv) ausgedrückt, was Joule pro Kilogramm entspricht.
Kollektive effektive Dosis	Summe aller effektiven Dosen einer Strahlung ausgesetzten Population oder Bevölkerungsgruppe. Sie wird in Personen-Sievert (Personen-Sv) ausgedrückt.

Hiermit werden allerdings nur Dosen für einzelne Personen beschrieben. Wenn man sämtliche effektiven Dosen, denen jeder Mensch in einer Population ausgesetzt wurde, addiert, erhält man die *kollektive effektive Dosis* bzw. einfacher die *kollektive Dosis*, ausgedrückt in Personen-Sievert (Personen-Sv). So beträgt die

jährliche kollektive Dosis der Weltbevölkerung beispielsweise über 19 Millionen Personen-Sv, entsprechend einer jährlichen durchschnittlichen Dosis von 3 mSv pro Person.

### 1.3. Durchdringungsvermögen von Strahlung

Strahlung kann, kurz gesagt, als Teilchen (beispielsweise als Alpha- oder Beta-Teilchen oder als Neutronen) oder als elektromagnetische Wellen (Gamma- und Röntgenstrahlung) und sämtlich mit unterschiedlichen Energiegehalten auftreten. Die unterschiedlichen Emissionsenergien und Teilchentypen weisen ein jeweils unterschiedliches Durchdringungsvermögen auf und haben somit auch unterschiedliche Auswirkungen auf lebendes Gewebe. Alphateilchen bestehen aus zwei positiv geladenen Protonen und zwei Neutronen und transportieren daher auch die größte Ladung aller Strahlungstypen. Aufgrund dieser stärkeren Ladung interagieren sie auch stärker mit Atomen in ihrer Umgebung. Durch diese Wechselwirkung wird nach und nach die Energie des Teilchens absorbiert und damit auch die Durchdringungsenergie reduziert. So können Alphateilchen beispielsweise von einem Blatt Papier aufgehalten werden. Die negativ geladenen Beta-Teilchen weisen eine geringere Ladung auf und haben daher auch ein stärkeres Durchdringungsvermögen als Alphateilchen. Beta-Teilchen durchdringen lebendes Gewebe bis zu einer Tiefe von ein bis zwei Zentimetern. Gamma- und Röntgenstrahlen weisen ein extrem starkes Durchdringungsvermögen auf und durchdringen alle Materialien von geringerer Dichte als dicke Stahlplatten. Aus einem instabilen Kern können überdies künstlich erzeugte Neutronen durch Atom- oder Kernspaltung freigesetzt werden. Neutronen



können auch natürlich als Teil kosmischer Strahlung auftreten. Sie haben als elektrisch neutrale Teilchen bei der Wechselwirkung mit Material oder Gewebe ein sehr starkes Durchdringungsvermögen.

## 2. WIE WIRKT SICH STRAHLUNG AUF UNS AUS?

Vor einer ausführlicheren Darstellung der Effekte einer Strahlenexposition soll zunächst noch etwas näher auf die bereits zuvor vorgestellten Pioniere der Strahlenwissenschaft eingegangen werden. Schon bald nach **Henri Becquerels** Entdeckung musste er selbst die Kehrseite der Strahlung, nämlich die Auswirkungen auf lebendes Gewebe, erfahren. Eine Phiolen mit Radium, die er in seiner Tasche aufbewahrt hatte, hatte seine Haut geschädigt.

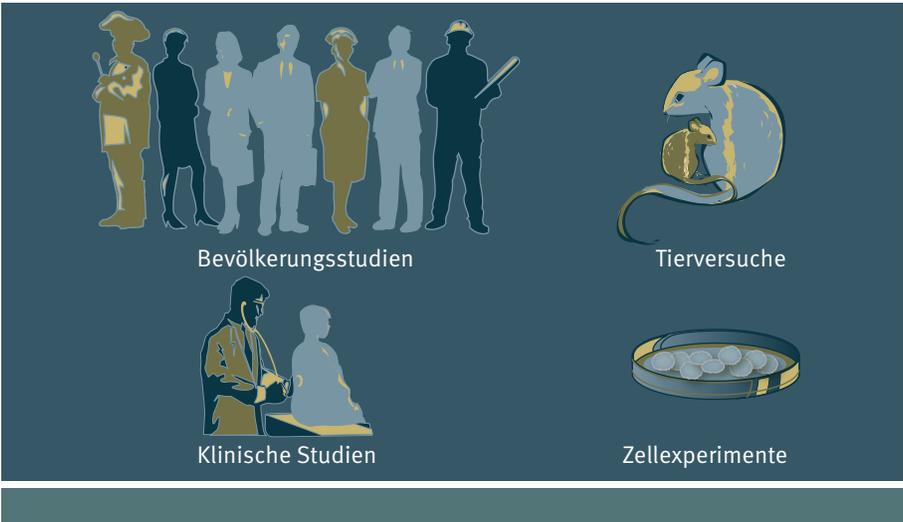
**Wilhelm Conrad Röntgen**, der 1895 die Röntgenstrahlen entdeckt hatte, starb 1923 an Darmkrebs. **Marie Curie**, die ihr gesamtes Arbeitsleben lang Strahlung ausgesetzt war, starb 1934 an einer Blutkrankheit.

Berichten zufolge sollen bis Ende der 1950er Jahre mindestens 359 Menschen, die zu Beginn der Strahlenwissenschaft mit Strahlung in Berührung gekommen waren (überwiegend Ärzte und andere Wissenschaftler), an Strahlenschäden gestorben sein, da sie nicht um die Notwendigkeit geeigneter Schutzmaßnahmen Bescheid wussten.

Es erstaunt daher auch nicht, dass die ersten Empfehlungen zum Strahlenschutz am Arbeitsplatz von Ärzten formuliert wurden, die Strahlung zur Behandlung von Patienten einsetzten. 1928 wurde auf dem 2. Internationalen Kongress für Radiologie in Stockholm das „International X-ray and Radium Protection Committee“ gegründet und **Rolf Sievert** zu seinem ersten Vorsitzenden gewählt. Nach dem 2. Weltkrieg wurde das Komitee vor dem Hintergrund neuer Anwendungen von Strahlung außerhalb der Medizin umstrukturiert und in „International Commission on Radiological Protection“ umbenannt. Später amtierte Rolf Sievert zwischen 1958 und 1960 als vierter Vorsitzender von UNSCEAR, zu einer Zeit, als die genetischen Effekte der Kernwaffenversuche auf den Menschen in den Mittelpunkt des Interesses rückten.

Mit zunehmendem Bewusstsein um die Gefahren der Strahlenexposition erlebte das 20. Jahrhundert die Entwicklung intensiver Forschungen zu den Auswirkungen von Strahlung auf Mensch und Umwelt. Die wichtigste Studie über strahlenbelastete Bevölkerungsgruppen ist die Untersuchung von etwa 86 500 Überlebenden der Atombombenabwürfe über Hiroshima und Nagasaki am Ende des 2. Weltkriegs im Jahr 1945 (im Weiteren die **Überlebenden der Atombombenabwürfe**). Weitere zuverlässige Daten zu diesem Thema stammen aus Erfahrungen mit Arbeitern nach Strahlenunfällen (beispielsweise nach dem Störfall im Kernkraftwerk Tschernobyl), mit strahlenbehandelten Patienten, sowie von Tier- und Zellversuchen im Labor.

## Quellen von Erkenntnissen über die Effekte von Strahlung



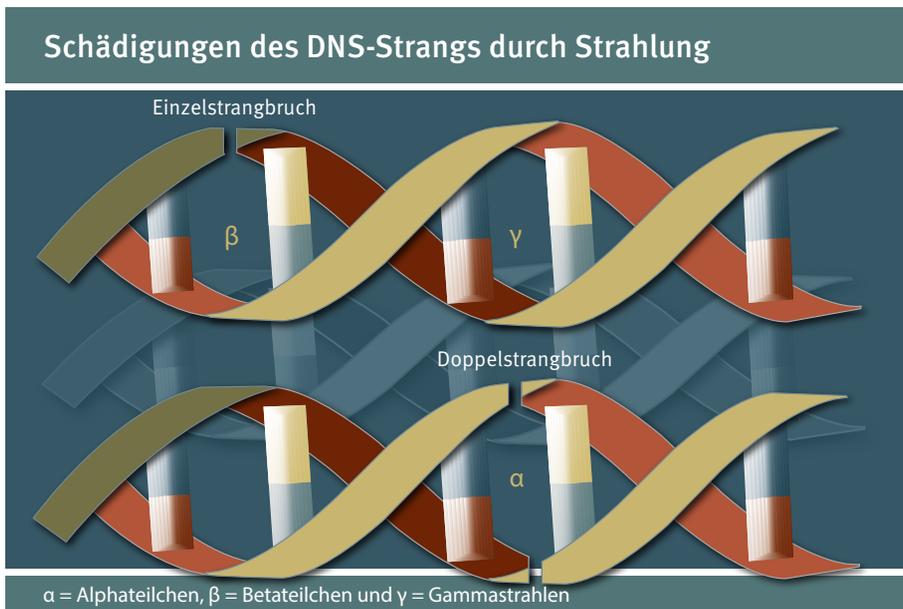
UNSCEAR wertet wissenschaftliche Informationen über die Auswirkungen von Strahlung auf Mensch und Umwelt aus und versucht, die Auswirkungen unterschiedlicher Expositionshöhen mit größtmöglicher Zuverlässigkeit zu ermitteln. Wie bereits erwähnt, hängt die Strahlenexposition von der Art der Strahlung, ihrer Dauer sowie der im Material enthaltenen Energiemenge ab. Für die wissenschaftlichen Auswertungen verwendet UNSCEAR gegenwärtig den Begriff *niedrige Dosis* für eine Strahlung zwischen 10 mGy und 100 mGy sowie *sehr niedrige Dosis* bei Dosen weniger als 10 mGy.

## Von UNSCEAR verwendete Dosenbandbreiten

Hohe Dosis	Über ~ 1 Gy	Schwere Strahlungsunfälle (beispielsweise Feuerwehreute nach dem Unfall in Tschernobyl)
Mäßige Dosis	~ 100 mGy bis ~ 1 Gy	Bergungsschafften nach dem Unfall in Tschernobyl
Niedrige Dosis	~ 10 mGy bis ~ 100mGy	Wiederholte Computertomografieuntersuchungen (CT-Scans)
Sehr niedrige Dosis	Unter ~ 10 mGy	Konventionelle Radiografie (d. h. ohne CT)

## 2.1. Auswirkungen auf den Menschen

In den mehr als einhundert Jahren seit der Entdeckung der Strahlung hat die Forschung umfassendes Wissen über die biologischen Wirkungsmechanismen von Strahlung auf die Gesundheit gesammelt. Es ist bekannt, dass sich Strahlung auf zellulärer Ebene auswirken und zum Tod oder zu Veränderungen von Zellen führen kann. Dies geschieht in der Regel durch direkte Schädigung der Desoxyribonukleinsäurestränge (DNS-Stränge) in den Chromosomen. Sobald die Zahl geschädigter oder abgetöteter Zellen ein gewisses Maß erreicht, kann dies zum Versagen von Organen bis hin zum Tod führen. Darüber hinaus kann es auch zu anderen Schädigungen der DNS kommen, ohne dass Zellen sterben. Derartige Schäden werden in der Regel vollständig repariert. Wenn dies jedoch nicht der Fall ist, besteht die daraus folgende Veränderung, die **Zellmutation**, nach der Zellteilung weiter und führt letztlich möglicherweise zu Krebserkrankungen. Wenn es sich bei den veränderten Zellen um Zellen handelt, die Erbinformationen an die Nachkommen weitergeben, kann es zu genetischen Störungen kommen. Eine Quelle von Erkenntnissen über biologische Mechanismen und Auswirkungen auf das Erbgut sind oftmals Laborversuche.



Abhängig vom Zeitpunkt ihres Auftretens nach der Exposition wird hier zwischen frühen und verzögerten Gesundheitseffekten unterschieden. Grundsätzlich zeigen sich frühe Effekte in der Diagnose klinischer Syndrome bei einzelnen Patienten, während verzögerte Effekte wie beispielsweise Krebs in **epidemiologischen Studien** durch Feststellung eines gehäufteten Auftretens eines pathologischen Zustands in einer Gruppe erkannt werden. Darüber hinaus wird hierbei besonders auf Auswirkungen auf Kinder und Embryos/Föten sowie auf Erbinformationen geachtet.

## Frühe Gesundheitseffekte

Frühe Gesundheitseffekte werden durch extensiven Zelltod bzw. extensive Zellschädigungen ausgelöst. Dies können beispielsweise Hautverbrennungen, Haarverlust und Beeinträchtigung der Fruchtbarkeit sein. Diese Gesundheitseffekte treten nur dann auf, wenn innerhalb eines kurzen Zeitraums eine relativ hohe Schwelle überschritten wird. Sobald diese überschritten ist, steigt die Schwere des Effekts mit zunehmender Dosis an.

Allgemein führen Akutdosen von mehr als 50 Gy zu so starken Schädigungen des Zentralnervensystems, dass der Patient innerhalb weniger Tage stirbt. Aber auch bei Dosen unter 8 Gy treten Symptome von Strahlenkrankheit, auch als *akutes Strahlensyndrom* bezeichnet, auf und äußern sich unter anderem in Übelkeit, Erbrechen, Durchfall, Darmkrämpfen, erhöhtem Speichelfluss, Dehydrierung, Müdigkeit, Apathie, Antriebslosigkeit, Schweißausbrüchen, Fieber, Kopfschmerzen und niedrigem Blutdruck. Als „akut“ werden medizinische Probleme bezeichnet, die im Gegensatz zu sich über längere Zeiten hinweg entwickelnden Problemen unmittelbar nach einer Strahlenbelastung auftreten. Hierbei kann das Opfer durchaus zunächst überleben und stirbt erst eine oder zwei Wochen später an gastrointestinalen Schäden. Niedrigere Dosen führen nicht notwendigerweise zu gastrointestinalen Schädigungen, können jedoch, hauptsächlich aufgrund von Schädigungen des roten Knochenmarks, nach einigen Monaten zum Tod führen. Bei noch niedrigeren Dosen treten die Krankheitssymptome später auf und sind weniger schwer. Bei etwa der Hälfte

## Unbeabsichtigte Exposition in der Medizin

Bei der Radiotherapie werden die Patienten hohen Dosen ausgesetzt. Es ist daher wichtig, akuten Auswirkungen vorzubeugen.



der Menschen, die einer Dosis von 2 Gy ausgesetzt waren, kommt es nach etwa drei Stunden zu Erbrechen. Bei Dosen unter 1 Gy tritt dies nur selten auf.

Wenn das rote Knochenmark und das übrige blutbildende System weniger als 1 Gy ausgesetzt sind, weisen diese eine beachtliche Regenerationsfähigkeit auf und können sich vollständig erholen, wobei allerdings ein erhöhtes Risiko besteht, in späteren Jahren an Leukämie zu erkranken. Wenn nur ein Teil des Körpers Strahlung ausgesetzt ist, bleibt in der Regel genügend Knochenmark ungeschädigt, um geschädigte Teile zu ersetzen. Tierversuche weisen darauf hin, dass selbst dann, wenn nur ein Zehntel des aktiven Knochenmarks von Strahlung verschont bleibt, die Überlebenschance fast 100 % beträgt.

Die Tatsache, dass Strahlung die Zell-DNS direkt schädigen kann, wird in der **Strahlentherapie** genutzt, um in der Behandlung von Krebs gezielt maligne Zellen abzutöten. Die in der Strahlentherapie eingesetzte Gesamtstrahlungsmenge richtet sich nach der Art und dem Stadium der zu behandelnden Krebserkrankung. Typische Dosen für einen soliden Tumor reichen von 20 bis 80 Gy, was als Einzeldosis für den Patienten gefährlich wäre. Für eine kontrollierte Behandlung werden daher Strahlendosen in wiederholten Teildosen von maximal 2 Gy verabreicht. Durch diese Fraktionierung können sich gesunde Zellen erholen, während Tumorzellen abgetötet werden, da sie die strahlungsbedingten Schäden im Allgemeinen weniger gut reparieren können.

## Verzögerte Gesundheitseffekte

Verzögerte Gesundheitseffekte treten erst lange Zeit nach einer Strahlenexposition auf. Generell sind die meisten verzögerten Gesundheitseffekte auch stochastisch, d. h. ihre Auftretenswahrscheinlichkeit hängt von der aufgenommenen Dosis ab. Man vermutet, dass diese Auswirkungen auf die Gesundheit durch Veränderungen des Genmaterials der Zelle nach einer Strahlenexposition verursacht werden. Beispiele für verzögerte Effekte sind solide Tumoren und Leukämie bei einer Strahlenbelastung ausgesetzten Personen sowie genetische Störungen bei ihren Nachkommen. Die Häufigkeit des Auftretens, nicht jedoch die Schwere dieser Effekte in einer Population, scheint mit steigender Dosis zuzunehmen.

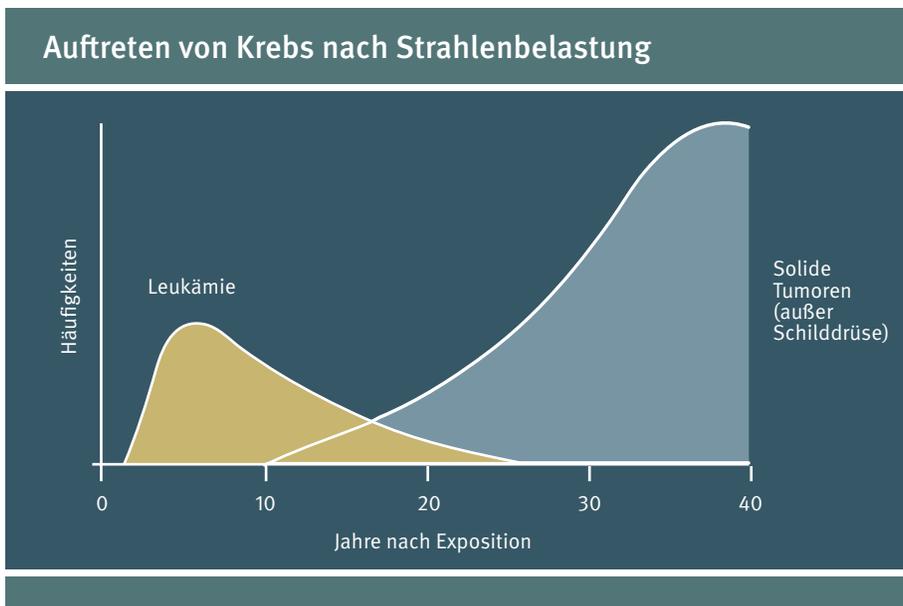
Für das Verständnis verzögerter Gesundheitseffekte nach einer Strahlenexposition sind epidemiologische Studien von großer Bedeutung. Hierbei wird mithilfe statistischer Methoden das Auftreten eines Gesundheitseffekts (beispielsweise Krebs) in einer belasteten Gruppe einer unbelasteten Gruppe gegenübergestellt. Wenn in der belasteten Gruppe eine deutliche Zunahme festgestellt wird, kann dies mit der Strahlenbelastung der Bevölkerung insgesamt in Verbindung stehen.

Die wichtigste Langzeitauswertung von Strahlung ausgesetzten Gruppen ist die epidemiologische Studie von Überlebenden der Atombombenabwürfe. Dies ist die umfassendste jemals durchgeführte Studie, da eine große Zahl von im Wesentlichen für die allgemeine Bevölkerung repräsentativen Menschen einer Vielzahl von Dosen mehr oder weniger gleichmäßig über alle Regionen des Körpers ausgesetzt war. Auch die Schätzungen der Dosen, denen diese Gruppe ausgesetzt war, sind relativ genau. Laut der Studie liegt die Zahl der festgestellten Krebsfälle um einige Hundert über dem Wert, der in dieser Gruppe ohne die Strahlenexposition zu erwarten wäre. Da viele Überlebende der Atombombenabwürfe noch heute leben, werden die Studien fortgesetzt, um die Auswertung abzuschließen.

### Krebs

Krebs ist die Ursache von etwa 20 % aller Todesfälle und nach Herz-Kreislauf-Erkrankungen die zweithäufigste Todesursache in den Industriestaaten. In der allgemeinen Bevölkerung erkranken etwa vier von zehn Menschen auch ohne Strahlenbelastung an Krebs. Die häufigsten Krebsarten bei Männern sind in den letzten Jahren Lungen-, Prostata-, Dickdarm-, Magen- und Leberkrebs, bei Frauen Brust-, Dickdarm-, Lungen-, Gebärmutterhals- und Magenkrebs.

Die Entwicklung von Krebs ist ein komplexer Prozess, der in mehreren Stadien abläuft. Ein auslösendes Phänomen, von dem höchstwahrscheinlich nur eine einzige Zelle betroffen ist, scheint den Prozess in Gang zu setzen, jedoch ist vermutlich noch eine ganze Reihe weiterer Ereignisse nötig, damit eine Zelle bösartig wird und sich ein



Tumor entwickelt. Zwischen dem ersten Schaden und dem Auftreten von Krebs liegt eine lange Latenzzeit. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Krebs nach einer Strahlenexposition ist Gegenstand großer Sorge und könnte für eine Gruppe berechnet werden, wenn diese einer so hohen Strahlendosis ausgesetzt war, dass es zu einem so stark erhöhten Auftreten von Krebs kommt, dass statistische und andere Unsicherheiten ausgeschlossen werden können. Ungeachtet dessen ist der tatsächliche Anteil von Strahlung an der Entstehung von Krebs noch unbekannt.

Leukämie sowie Schilddrüsen- und Knochenkrebs treten erstmals innerhalb weniger Jahre nach einer Strahlenexposition auf, während die meisten anderen Krebsarten erst zehn Jahre oder sogar mehrere Jahrzehnte nach Exposition festzustellen sind. Da jedoch keine einzige Krebsart ausschließlich durch Strahlung verursacht wird, ist eine Unterscheidung zwischen strahlungsinduzierten und durch andere Ursachen ausgelösten Tumoren nicht möglich. Gleichwohl ist es wichtig, die Wahrscheinlichkeit abschätzen zu können, mit der sich Krebs nach bestimmten Strahlendosen entwickelt, um eine aussagefähige wissenschaftliche Grundlage für die Festlegung von Expositionsgrenzen bereitzustellen.

Studien mit strahlenmedizinisch behandelten Patienten, mit Menschen berufsbedingter Exposition und vor allem mit Überlebenden der Atombombenabwürfe bilden die Erkenntnisgrundlage für die Beziehungen zwischen Krebs und Strahlenexposition. Diese Studien erfassen große Stichproben von Menschen, die in vielen Regionen des Körpers Strahlung ausgesetzt waren und die über angemessen lange Zeiträume an Verlaufskontrollen teilnahmen. Einige Studien weisen jedoch erhebliche Nachteile auf, darunter in erster Linie eine andere Altersverteilung als die Normalbevölkerung und die Tatsache, dass viele dieser Patienten zum Zeitpunkt der Strahlenexposition bereits an Krebs erkrankt und in Behandlung waren.

Grundsätzlicher noch ist zu bedenken, dass fast sämtliche Daten auf Studien mit Menschen basieren, die relativ hohen Strahlendosen von 1 Gy oder mehr als Einzeldosis oder über relativ kurze Zeiträume ausgesetzt waren. Über die Effekte geringerer Dosen über lange Zeiträume liegen kaum Erkenntnisse vor. Nur wenige Studien befassen sich mit den Auswirkungen von Strahlendosenbereichen, denen mit Strahlung arbeitende Personen im Normalfall ausgesetzt sind, und es existieren praktisch keine direkten Erkenntnisse über die Folgen der alltäglichen Strahlenbelastung der Bevölkerung. Es wären Studien nötig, in denen eine große Zahl von Menschen über einen langen Zeitraum beobachtet wird, und letztlich könnten selbst solche Studien sich als zu wenig aussagekräftig erweisen, um ein erhöhtes Auftreten von Krebs gegenüber dem Grundrisiko feststellen zu können.

UNSCEAR hat umfassende Untersuchungen zum Auftreten von Krebs bei strahlenexponierten Gruppen durchgeführt und schätzt, dass das zusätzliche Krebsrisiko aufgrund von Strahlung über 100 mSv um 3 bis 5 % pro Sievert zunimmt.

## *Andere Gesundheitseffekte*

Eine hohe Strahlenbelastung des Herzens bedeutet eine erhöhte Wahrscheinlichkeit kardiovaskulärer Erkrankungen (beispielsweise Herzinfarkt). Eine solche Belastung ist bei einer Strahlentherapie möglich, wobei das Herz allerdings bei heutigen Behandlungstechniken geringeren Dosen ausgesetzt ist. Unabhängig davon gibt es keinen wissenschaftlichen Beweis für die Vermutung, dass eine geringe Strahlendosis kardiovaskuläre Erkrankungen verursacht.

UNSCEAR hat bei den Notfalleinsatzkräften in Tschernobyl ein erhöhtes Auftreten von Katarakt festgestellt, was möglicherweise mit hohen Strahlendosen zusammenhängen kann. Darüber hinaus hat UNSCEAR auch die Auswirkungen von Strahlung auf das Immunsystem von Überlebenden der Atombombenabwürfe, von Notfalleinsatzkräften im Kernkraftwerk Tschernobyl und von mit Strahlung behandelten Patienten untersucht. Die Auswirkungen von Strahlung auf das Immunsystem werden durch Abschätzung von Veränderungen der Zellzahl oder durch eine Vielzahl von Funktionsanalysen beurteilt. Hohe Strahlendosen unterdrücken das Immunsystem in erster Linie durch Schädigung der Lymphozyten. Ein Rückgang der Lymphozytenzahl wird heute als Frühindikator für die Bestimmung der Strahlendosis nach einer akuten Exposition verwendet.

## *Auswirkungen auf Nachkommen*

Eine strahlungsbedingte Schädigung der Keimzellen – Spermien oder Eizellen – kann bei Nachkommen zu Erbgutschäden führen. Darüber hinaus kann Strahlung auch den bereits im Mutterleib heranwachsenden Embryo oder Fötus direkt schädigen. Unterschieden werden muss zwischen der Strahlenbelastung von Erwachsenen, Kindern und Embryos/Föten. UNSCEAR hat die Gesundheitsfolgen einschließlich der Schädigungen des Erbguts für diese Gruppen umfassend untersucht.

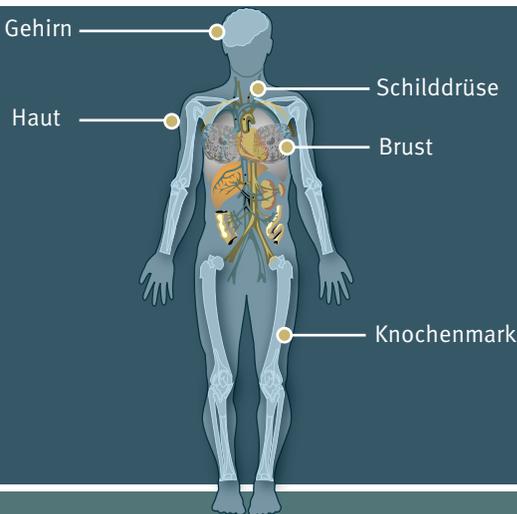
## *Auswirkungen auf Kinder*

Die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit hängen von diversen körperlichen Faktoren ab. Strahlung wirkt sich bei Kindern und Erwachsenen unterschiedlich aus aufgrund ihrer anatomischen und physiologischen Unterschiede. Da Kinder darüber hinaus kleiner sind und ihre inneren Organe durch weniger darüber liegendes Gewebe geschützt werden, sind deren innere Organe bei gleicher Exposition höheren Dosen ausgesetzt als bei Erwachsenen. Aufgrund ihrer geringeren Körpergröße sind Kinder darüber hinaus gegebenenfalls höheren Strahlendosen von Radionukliden im Boden ausgesetzt.

Da Kinder kleiner als Erwachsene sind und ihre inneren Organe enger beieinander liegen, strahlen in einem Organ angereicherte Radionuklide stärker in andere innere Organe aus, als dies bei Erwachsenen der Fall ist. Daneben besteht eine Vielzahl weiterer altersabhängiger Faktoren, die den Stoffwechsel und die Physiologie des Menschen betreffen und die für die unterschiedlichen Effekte von Strahlendosen auf Personen unterschiedlichen Alters maßgeblich sind. Hinsichtlich der Strahlenbelastung im Körper von Kindern sind einige Radionuklide besonders zu beachten. Unfälle mit einer Freisetzung von radioaktivem Jod-131 können zu einer erheblichen Belastung der Schilddrüse führen. Bei identischer Aufnahmemenge ist die Schilddrüse von Kindern einer neun Mal so hohen Dosis wie die von Erwachsenen ausgesetzt. Studien des Unfalls im Kernkraftwerk Tschernobyl haben den Zusammenhang zwischen Schilddrüsenkrebs und Jod-131, das sich überwiegend in diesem Organ ansammelt, bestätigt.

Epidemiologische Studien haben gezeigt, dass bei identischer Strahlenbelastung junge Menschen unter 20 Jahren etwa doppelt so häufig wie Erwachsene an Leukämie erkranken. Darüber hinaus sind Kinder unter 10 Jahren besonders empfindlich und haben einigen anderen Studien zufolge ein drei bis vier Mal höheres Risiko, an Leukämie zu sterben als Erwachsene. Wieder andere Studien zeigen, dass junge Frauen, die im Alter von weniger als 20 Jahren Strahlung ausgesetzt waren, ein etwa doppelt so hohes Brustkrebsrisiko haben wie erwachsene Frauen. Die Wahrscheinlichkeit, nach einer Strahlenexposition eine Krebserkrankung zu entwickeln, ist bei Kindern höher als bei Erwachsenen. Es ist jedoch durchaus möglich, dass sich die Erkrankung erst in dem Lebensalter bemerkbar macht, in dem sie normalerweise auftritt.

## Besonders strahlungsempfindliche Organe bei Kindern



Kinder, die im Alter von weniger als 20 Jahren Strahlung ausgesetzt waren, weisen bei identischer Dosis ein etwa doppelt so hohes Risiko von Gehirntumoren auf wie Erwachsene. Ein ähnlicher Zusammenhang wurde auch in Bezug auf das Brustkrebsrisiko von Frauen festgestellt, wenn diese im Alter von weniger als 20 Jahren Strahlung ausgesetzt waren.

Eine Untersuchung wissenschaftlichen Materials durch UNSCEAR hat ergeben, dass das Auftreten von Krebs bei Kindern anders als bei Erwachsenen ist und von der Tumorart sowie dem Alter und Geschlecht des Kindes abhängt. Insoweit bezeichnet der Begriff *Strahlenempfindlichkeit* in Bezug auf die Entstehung von Krebs die Rate der durch Strahlung verursachten Tumoren. Untersuchungen hinsichtlich der unterschiedlichen Strahlenempfindlichkeit von Erwachsenen und Kindern haben ergeben, dass Kinder anfälliger für das Entstehen von Schilddrüsen-, Gehirn-, Haut- und Brusttumoren sowie von Leukämie sind.

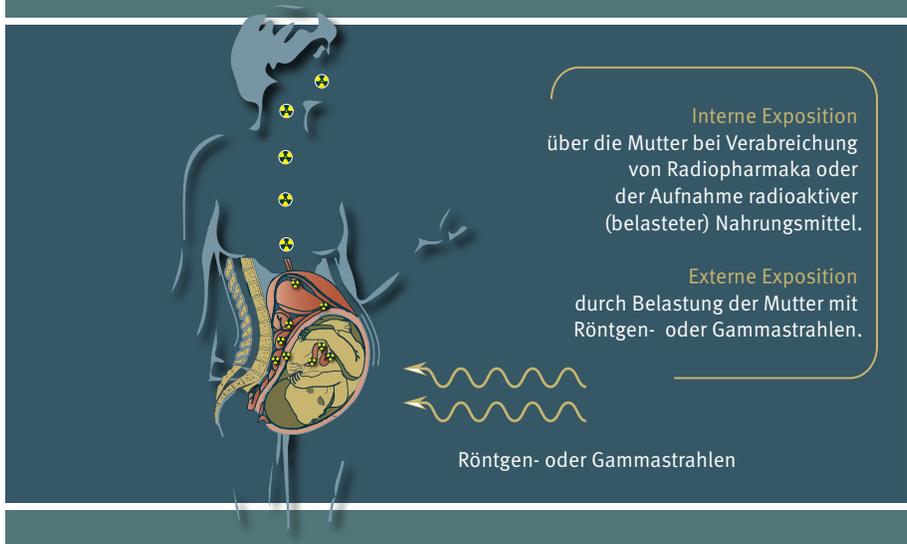
Die Unterschiede bei frühen Gesundheitseffekten bei Kindern nach hohen Dosen (beispielsweise nach einer Strahlentherapie) sind komplex und erklären sich durch Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Gewebetypen und biologischen Mechanismen. Einige Effekte (beispielsweise Hirnschädigungen, Katarakt und Schilddrüsenknoten) sind eher bei einer Belastung im Kindes- als im Erwachsenenalter zu beobachten, wobei gegen einige Effekte ist kindliches Gewebe widerstandsfähiger (beispielsweise Lunge und Eierstöcke).

### *Auswirkungen auf Ungeborene*

Ein Embryo oder Fötus kann durch radioaktive Stoffe, die die Mutter über Lebensmittel aufgenommen hat (interne Exposition), oder direkt in Form einer externen Exposition belastet werden. Da der Fötus von der Gebärmutter geschützt wird, ist seine Strahlendosis in der Regel niedriger als die Dosis, der die Mutter ausgesetzt ist. Andererseits sind Embryo und Fötus besonders empfindlich gegenüber Strahlung, und die gesundheitlichen Folgen einer Belastung können auch dann noch schwerwiegend sein, wenn sie einer niedrigeren Strahlendosis ausgesetzt sind als die Mutter. Mögliche Folgen sind unter anderem Wachstumshemmung, Fehlbildungen, beeinträchtigte Hirnfunktionen und Krebs.

Die Entwicklung von Säugetieren in der Gebärmutter lässt sich ganz allgemein in drei Stadien unterteilen. Es ist bekannt, dass Strahlung für den Embryo in der Gebärmutter in der ersten Phase tödlich sein kann. Diese Phase umfasst beim Menschen die ersten beiden Schwangerschaftswochen und dauert allgemein vom Zeitpunkt der Empfängnis bis zum Zeitpunkt der Einnistung der Eizelle in der Gebärmutter. Was in dieser Phase geschieht, ist sehr schwer zu untersuchen, jedoch bestätigen hauptsächlich Tierversuche die tödliche Wirkung von Strahlendosen ab einer gewissen Höhe auf den frühen Embryo. In der sich anschließenden Phase, die beim Menschen von der zweiten bis zur achten Woche dauert, liegt die größte Gefahr in Fehlbildungen der wachsenden Organe, was um den Zeitpunkt der Geburt herum tödlich sein kann. Aus Tierversuchen ist bekannt, dass ein besonders hohes Risiko einer Fehlbildung von Organen (beispielsweise Augen, Hirn, Skelett) besteht, wenn sie während ihrer Entwicklung Strahlung ausgesetzt werden.

## Wege der Strahlungsexposition von Embryos



Nach der achten Woche, mit Beginn der dritten und letzten Phase der Schwangerschaft, scheint die Schädigung des Zentralnervensystems am ausgeprägtesten zu sein. Das Wissen um die Effekte einer Strahlenbelastung auf das Gehirn Ungeborener hat erheblich zugenommen. So wurden beispielsweise bei 30 von 1 600 Kindern von Überlebenden der Atombombenabwürfe, die vor ihrer Geburt einer Strahlung von 1 Gy ausgesetzt waren, schwerste geistige Behinderungen festgestellt.

Umstritten ist, ob eine Strahlenbelastung von Embryos im späteren Verlauf des Lebens zu Krebs führen kann. In Tierversuchen konnte kein spezifischer Zusammenhang nachgewiesen werden. UNSCEAR hat versucht, die Gesamtrisiken für ungeborene Kinder für eine Reihe von Strahlungsfolgen – Tod, Fehlbildung, geistige Behinderung und Krebs – abzuschätzen. Insgesamt geht man davon aus, dass maximal zwei von 1 000 lebend geborenen Kindern, die in der Gebärmutter einer Dosis von 1/100 Gy ausgesetzt waren, betroffen sein könnten. Dem stehen 6 % Kinder gegenüber, bei denen dieselben Schädigungen auch ohne vorherige Strahlenexposition auftreten.

### *Schädigungen des Erbguts*

Strahlung kann zur Veränderung von Erbinformationen übertragenden Zellen und dadurch zu genetischen Störungen führen. Diese zu untersuchen, ist deshalb schwer, weil nur sehr wenig darüber bekannt ist, welche genetischen Schädigungen der Mensch durch Strahlung erfährt. Dies ist unter anderem darin begründet,

dass sich einerseits das gesamte Ausmaß von Erbgutschädigungen erst im Verlauf vieler Generationen herausstellt, und sich andererseits die unterschiedlichen Effekte – beispielsweise bei Krebs – nur schwer von den auf anderen Ursachen beruhenden Auswirkungen abgrenzen lassen.

Viele der schwer geschädigten Embryos und Föten überleben nicht. Schätzungen zufolge ist etwa die Hälfte aller Fehlgeburten auf eine abnormale genetische Konstitution zurückzuführen. Selbst wenn sie lebend geboren werden, ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie keine fünf Jahre alt werden, fünf Mal so hoch wie bei gesunden Kindern.

Erbgutschädigungen lassen sich in zwei Hauptkategorien unterteilen, nämlich Chromosomenaberrationen, d. h. eine abweichende Anzahl oder Struktur von Chromosomen, sowie Mutationen der Gene selbst. Sie können, müssen aber nicht in jedem Fall in folgenden Generationen in Erscheinung treten.

Studien mit Kindern von Überlebenden der Atombombenabwürfe haben keinen Hinweis auf feststellbare Schädigungen des Erbguts erbracht. Dies bedeutet allerdings nicht, dass keine Schädigung eingetreten ist, sondern lediglich, dass eine mäßige Strahlenexposition selbst einer relativ großen Gruppe keine feststellbaren Auswirkungen hat. Andererseits haben experimentelle Studien sowohl mit Pflanzen als auch mit Tieren, die hohen Dosen ausgesetzt wurden, eindeutig nachgewiesen, dass Strahlung Auswirkungen auf das Erbgut haben kann. Der Mensch dürfte hier kaum eine Ausnahme bilden.

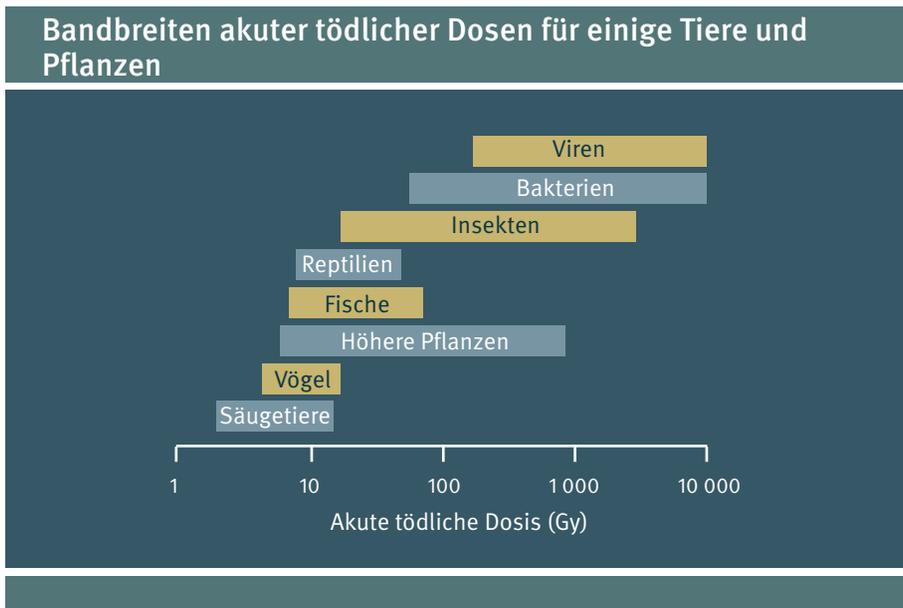
UNSCEAR hat sich ausschließlich auf schwere Schädigungen des Erbguts konzentriert und schätzt das Gesamtrisiko der ersten Generation nach einer Strahlenbelastung auf etwa 0,3 bis 0,5 % pro Gray, d. h. weniger als ein Zehntel der Auftretenswahrscheinlichkeit einer tödlichen Krebserkrankung.

## 2.2. Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen

Den Auswirkungen von Strahlung auf Tiere und Pflanzen kommt heute mehr Aufmerksamkeit zu als früher. In früheren Jahrzehnten besagte die vorherrschende Meinung, dass ein angemessener Schutz für menschliches Leben gleichermaßen auch für den von Pflanzen und Tieren sorgt. UNSCEAR hat die Auswirkungen von Strahlung auf Pflanzen und Tiere ausgewertet und festgestellt, dass eine theoretische Dosis im Bereich von 1 bis 10 Gy kaum Auswirkungen auf Tier- und Pflanzenpopulationen hat und dass die Reaktionen auf eine Strahlenexposition von Fall zu Fall unterschiedlich sind (so sind von allen Tieren Säugetiere am empfindlichsten). Effekte, die auf Populationsebene vermutlich signifikant sind, betreffen Fruchtbarkeit, Sterblichkeit und die Auslösung von Mutationen. *Reproduktive Veränderungen*, beispielsweise in der Zahl der Nachkommen, sind ein aussagekräftigerer Indi-

kator für Strahlenfolgen als die Sterblichkeit.

Die **Letaldosis** ist die Dosis, die zum Tod von 50 % der exponierten Subjekte führen würde. Bei innerhalb einer relativ kurzen Zeitspanne (**akut**) exponierten Pflanzen wurde ein Letaldosisbereich von weniger als 10 bis ca. 1 000 Gy beobachtet. Generell ist die Strahlenempfindlichkeit bei größeren Pflanzen höher als bei kleineren. Die Letaldosis liegt zwischen 6 und 10 Gy bei kleinen und bei ca. 2,5 Gy bei größeren Säugetieren. Einige Insekten, Bakterien und Viren können Dosen von über 1.000 Gy überstehen.



Eine Hauptinformationsquelle waren Beobachtungen, die im Zusammenhang mit der Strahlenbelastung von Tieren und Pflanzen in der Umgebung des Kernkraftwerks Tschernobyl gemacht wurden. UNSCEAR untersuchte Wege, auf denen die Umweltbelastung erfolgte, und entwickelte neue Konzepte und Methoden zur Beurteilung der potenziellen Auswirkungen dieser Exposition.

Vor Kurzem hat UNSCEAR die Dosen und damit verbundenen Auswirkungen der Strahlenexposition für ausgewählte Tiere und Pflanzen nach dem Unfall im Kernkraftwerk Fukushima-Daiichi untersucht und kam zu dem Ergebnis, dass die Exposition allgemein zu gering war, um akute Effekte feststellen zu können. Nicht ausschließen ließen sich allerdings Veränderungen von **Biomarkern**, d. h. von Indikatoren für spezifische Erkrankungen oder physiologische Zustände von Organismen – insbesondere von Säugetieren –, ohne dass aber deren Tragweite für die Unversehrtheit der Population der betroffenen Organismen klar wurde.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Schutz- und Abhilfemaßnahmen zur Reduzierung der Strahlenexposition von Personen erhebliche weiterreichende Folgen haben können. Betroffen sein können beispielsweise Umweltgüter und -dienstleistungen, in der Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft sowie im Tourismus eingesetzte Ressourcen und spirituelle, kulturelle und Erholungseinrichtungen.

### 2.3. Zusammenhang zwischen Strahlendosis und -wirkung

In einer zusammenfassenden Darstellung der Beziehungen zwischen Strahlendosen und Gesundheitseffekten weist UNSCEAR auf die Wichtigkeit einer Unterscheidung zwischen Beobachtungen bestehender Auswirkungen auf die Gesundheit belasteter Gruppen einerseits und theoretischen Hochrechnungen möglicher zukünftiger Effekte andererseits hin. In beiden Fällen sind eventuelle Unsicherheiten und Ungenauigkeiten bei Strahlungsmessungen, statistischen Analysen oder anderen Faktoren zu berücksichtigen.

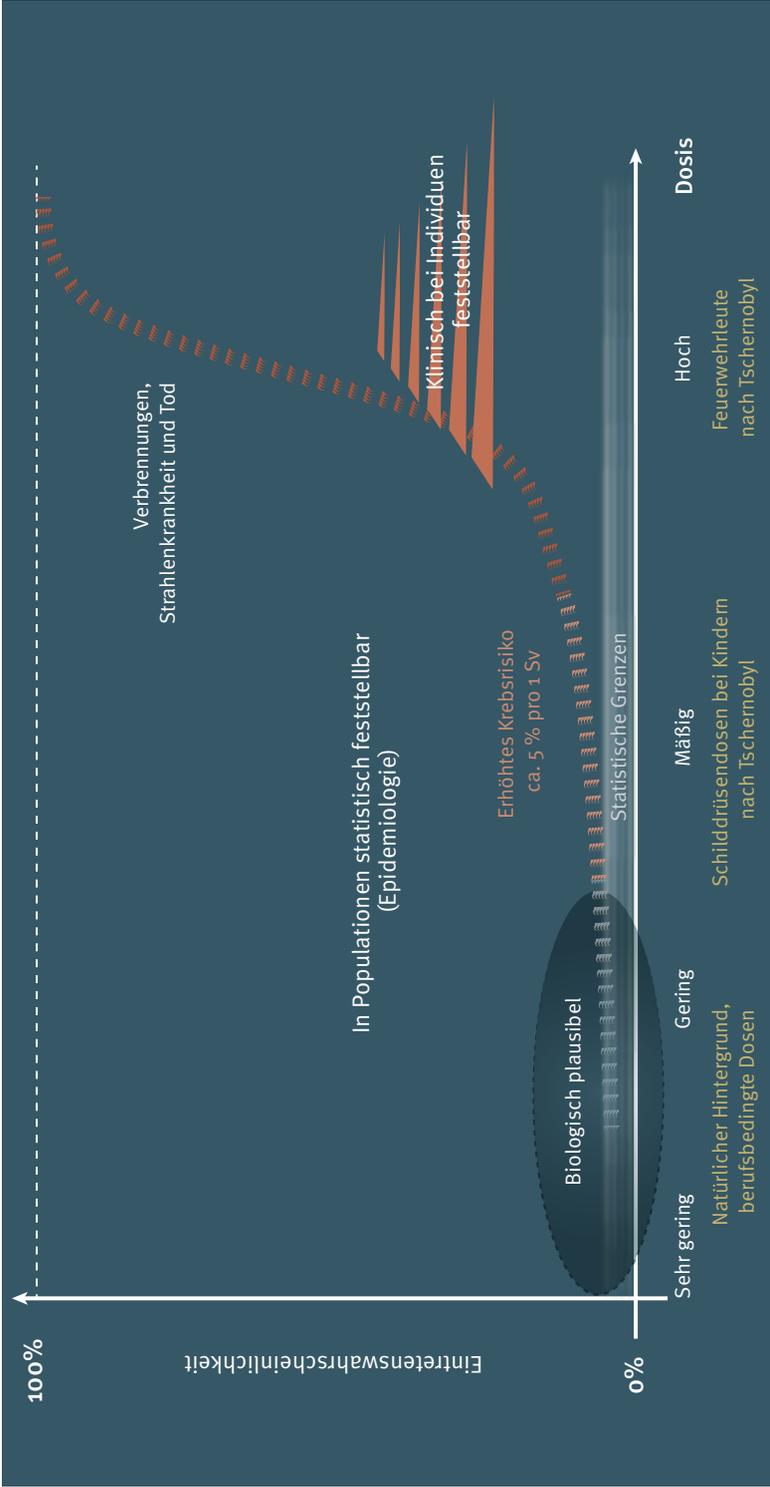
Nach derzeitigem Kenntnisstand können beobachtete Gesundheitseffekte verlässlich auf eine Strahlenexposition zurückgeführt werden, wenn frühe Effekte (beispielsweise Hautverbrennungen) nach hohen Dosen von mehr als 1 Gy bei Menschen auftreten. Diese Dosen können die Folge von Strahlungsunfällen sein, beispielsweise im Fall der Notfalleinsatzkräfte während des Störfalls im Kernkraftwerk Tschernobyl oder bei Patienten als Folge von Unfällen während der Strahlentherapie.

Mithilfe epidemiologischer Methoden kann ein erhöhtes Auftreten verzögerter Gesundheitseffekte (beispielsweise Krebs) in einer mäßigen Strahlendosen ausgesetzten Population mit Strahlung in Verbindung gebracht werden, wenn die beobachtete Zunahme groß genug ist, um alle Unsicherheiten auszuräumen. Andererseits gibt es heute noch keine Biomarker, anhand derer unterschieden werden kann, ob ein Krebs strahlungsbedingt ist oder nicht.

Im Fall einer geringen oder sehr geringen Strahlenbelastung – was bei einer umwelt- oder berufsbezogenen Exposition eher der Fall ist – wurden in Anbetracht statistischer und sonstiger Unsicherheiten keine Veränderungen im Auftreten verzögerter Gesundheitseffekte bestätigt. Ausschließen lassen sich diese Effekte jedoch nicht.

Hinsichtlich möglicher zukünftiger Gesundheitseffekte bestehen übereinstimmende Konzepte zur Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit dieser Effekte bei hohen und mäßigen Strahlendosen. Bei geringen und sehr geringen Dosen müssen jedoch Annahmen getroffen und mathematische Modelle angewandt werden, um die Wahrscheinlichkeit eventueller Auswirkungen auf die Gesundheit abschätzen zu können, was zu sehr unsicheren Werten führt. Für geringe und sehr geringe Strahlendosen hat UNSCEAR daher aufgrund nicht hinnehmbarer Unsicherheiten in

## Zusammenhang zwischen Strahlungsdosis und Gesundheitsfolgen



den Vorhersagen beschlossen, diese Modelle in seinen Abschätzungen und Hochrechnungen der gesundheitlichen Auswirkungen oder Todesfälle – beispielsweise nach den Unfällen in Tschernobyl und Fukushima-Daiichi – nicht anzuwenden. Ungeachtet dessen können diese Berechnungen für Vergleiche im öffentlichen Gesundheitswesen oder für Strahlenschutz Zwecke hilfreich sein, sofern die Unsicherheiten bedacht und die Grenzen unmissverständlich erläutert werden.

### 3. WOHER KOMMT STRAHLUNG?

Der Mensch ist ständig Strahlung aus einer Vielzahl von Quellen ausgesetzt. Alle auf der Erde lebenden Arten leben und entwickeln sich seit jeher in einer Umwelt, in der sie natürlicher Umgebungsstrahlung ausgesetzt sind. Aktuell ist das Leben auf der Erde zudem Strahlung aus künstlichen Quellen ausgesetzt, die es erst seit ca. einhundert Jahren gibt. Über 80 % der Strahlenbelastung stammt aus natürlichen und lediglich 20 % aus vom Menschen geschaffenen künstlichen Quellen, vorwiegend aus Strahlungsanwendungen in der Medizin. In dieser Publikation wird nach den einzelnen Quellen von Strahlenexposition unterschieden und insbesondere auf die Strahlenbelastung der Bevölkerung im Allgemeinen eingegangen. Aus ordnungsrechtlichen Gründen (beispielsweise für den Strahlenschutz) wird die Strahlenexposition nach unterschiedlichen Bevölkerungsgruppen differenziert betrachtet. Dies ist auch der Grund, warum diese Publikation zusätzliche Informationen für mit Strahlung behandelte Patienten und für am Arbeitsplatz Strahlung ausgesetzte Beschäftigte enthält.

Eine weitere Möglichkeit zur Klassifizierung von Strahlenexposition ist die Art und Weise der Belastung. Der menschliche Körper kann radioaktiven Substanzen und Umgebungsstrahlung von außen – *extern* – ausgesetzt sein, oder in der Luft enthaltene Substanzen werden eingeatmet, in Lebensmitteln und Wasser enthaltene Substanzen werden aufgenommen oder über die Haut und durch Wunden absorbiert, sodass sie den Organismus von innen – *intern* – belasten. Global gesehen sind die Dosen aus interner und externer Exposition in etwa gleich.

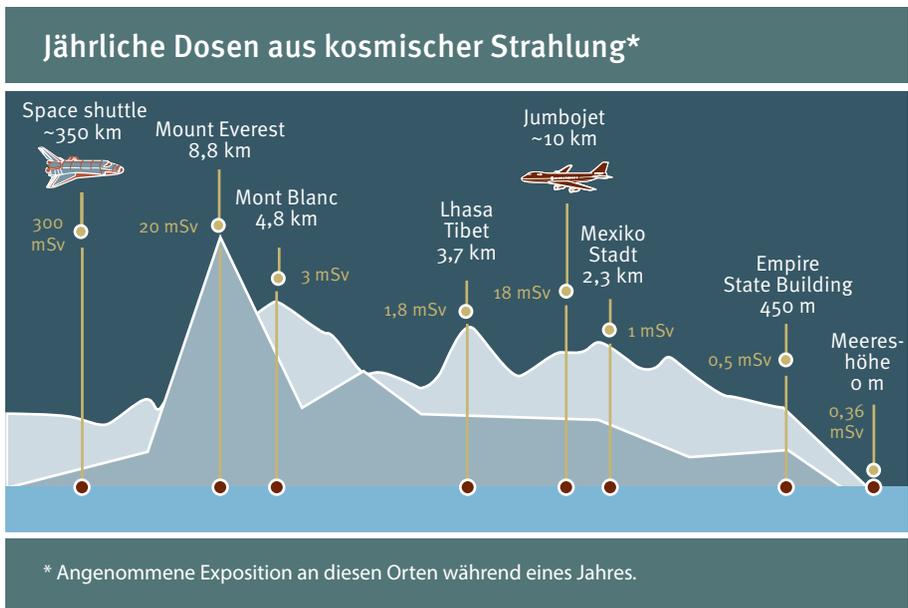


### 3.1. Natürliche Quellen

Seit der Entstehung der Erde ist sie Strahlung sowohl aus dem Weltall als auch aus radioaktivem Material in der Erdkruste und dem Erdkern ausgesetzt. Eine Exposition gegenüber diesen natürlichen Quellen, die den größten Teil der Strahlenbelastung der Weltbevölkerung ausmachen, lässt sich in keiner Weise vermeiden. Die globale jährliche effektive Dosis pro Person im Durchschnitt liegt bei 2,4 mSv und reicht je nach Ort von etwa 1 bis über 10 mSv. Gebäude können ein bestimmtes radioaktives Gas – Radon – einfangen, und auch einige Baustoffe selbst können Radionuklide enthalten, die die Strahlenexposition erhöhen. Ungeachtet des Bestehens natürlicher Quellen kann man jedoch den Höhe der Belastung durch die Wahl einer entsprechenden Lebensweise, des Wohnorts und der Ernährung beeinflussen.

#### Kosmische Quellen

Kosmische Strahlung ist eine wesentliche natürliche Expositionsquelle. Die meisten dieser Strahlen kommen aus den Tiefen des Weltalls, andere stammen aus Sonneneruptionen. Diese treffen unmittelbar auf die Erde, wo sie im Zusammenwirken mit der Atmosphäre unterschiedliche Arten von Strahlung und radioaktiven Stoffen erzeugen. Diese sind die vorherrschende Strahlenquelle im Weltraum. Zwar schwächen die Atmosphäre und das Magnetfeld der Erde die kosmische Strahlung stark ab, jedoch sind nicht alle Regionen der Erde in gleichem Maß der Strahlung ausgesetzt. Da die kosmische Strahlung vom Magnetfeld am Nord- und Südpol abgelenkt wird, sind diese mehr Strahlung ausgesetzt als die Regionen am Äquator.



Darüber hinaus nimmt die Stärke der Exposition mit zunehmender Höhe zu, da die als Abschirmung wirkende Luftschicht dünner ist. Auf Meereshöhe beträgt die durchschnittliche jährliche effektive Dosis aus kosmischen Quellen ca. 0,3 mSv. Dies entspricht etwa 10 bis 15 % der Gesamtdosis aus natürlichen Quellen. In 2 000 m Höhe ist die Dosis sieben Mal so hoch. Flugreisende sind gegebenenfalls noch höheren Dosen ausgesetzt, da die Strahlenexposition aus kosmischen Quellen nicht nur von der Höhe, sondern auch von der Flugdauer abhängt. So liegt beispielsweise auf Reiseflughöhe die durchschnittliche effektive Dosis bei einem zehnstündigen Flug bei 0,03 bis 0,08 mSv. Bei einem Flug von New York nach Paris und zurück belief sich die Strahlenbelastung eines Passagiers auf ca. 0,05 mSv. Dies entspricht ungefähr der effektiven Dosis, der ein Patient bei einer routinemäßigen Röntgenuntersuchung ausgesetzt ist. Auch wenn die geschätzten effektiven Dosen, denen die einzelnen Passagiere auf einem Flug ausgesetzt sind, niedrig sind, können die kollektiven Dosen aufgrund der großen Zahl von Flugreisenden und Flügen weltweit recht hoch sein.

## STRAHLENEXPOSITION AM ARBEITSPLATZ

---

Dosen aus kosmischen Quellen sind besonders für Personen, die viel fliegen, d. h. Piloten und Kabinenbesatzungen, mit einer durchschnittlichen jährlichen Dosis von ca. 2 bis 3 mSv von Bedeutung. Auch für eine Reihe von Weltraummissionen wurden Strahlendosen ermittelt. Bei kurzen Weltraummissionen wurden je nach Sonnenaktivität Dosen zwischen 2 und 27 mSv gemessen. Bei einem viermonatigen Aufenthalt auf der Internationalen Raumstation ISS, die die Erde in einer Höhe von 350 km umkreist, ist ein Astronaut schon einer effektiven Dosis von ca. 100 mSv ausgesetzt.

## Terrestrische Quellen

### *Boden*

Alles in und auf der Erde enthält *primordiale Radionuklide*. Diese im Boden vorkommenden, extrem langlebigen Radionuklide wie beispielsweise Kalium-40, Uran-238 und Thorium-232 sowie die Radionuklide, in die sie zerfallen, beispielsweise Radium-226 und Radon-222, haben schon Strahlung freigesetzt, bevor die Erde ihre heutige Gestalt annahm. UNSCEAR hat berechnet, dass jeder Mensch weltweit im Durchschnitt einer externen Strahlenbelastung von einer jährlichen effektiven Dosis von ca. 0,48 mSv aus terrestrischen Quellen ausgesetzt ist.

Die externe Exposition ist von Ort zu Ort sehr unterschiedlich. So zeigen beispielsweise Studien aus Frankreich, Deutschland, Italien, Japan und den Vereinigten Staaten von Amerika, dass etwa 95 % der jeweiligen Bevölkerung in Regionen leben, in denen die durchschnittliche jährliche Dosis im Freien zwischen 0,3 und 0,6 mSv liegt.

Allerdings gibt es in diesen Ländern auch Orte, an denen die jährliche Dosis über 1 mSv betragen kann, und an anderen Orten auf der Welt liegt die Strahlenbelastung aus terrestrischen Quellen sogar noch über diesem Wert. So ist beispielsweise die Bevölkerung an der Südwestküste des indischen Bundesstaats Kerala, einem dicht besiedelten, 55 km langen Landstrich, einer jährlichen Dosis von durchschnittlich 3,8 mSv ausgesetzt. Andere Regionen mit starken natürlichen terrestrischen Strahlenquellen finden sich auch in Brasilien, China, Iran, Madagaskar und Nigeria.

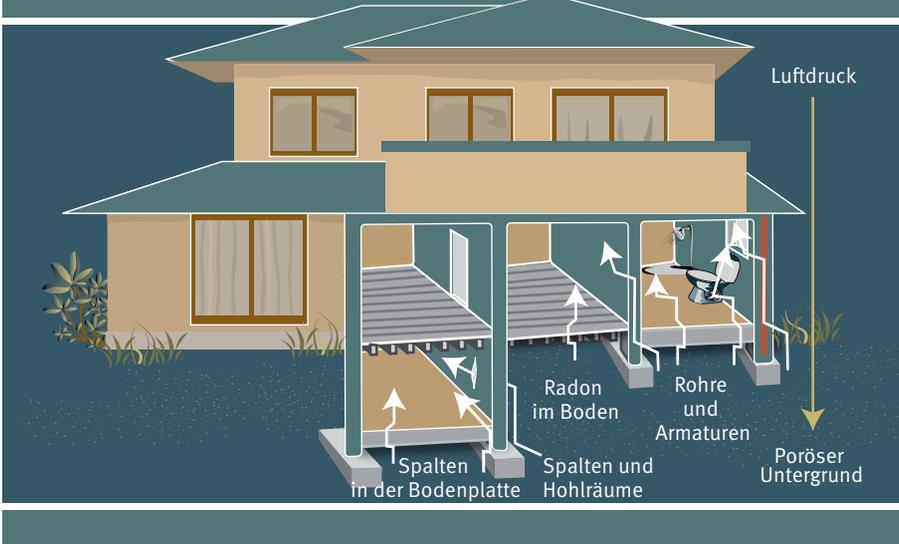
## *Radon*

Radon-222 ist ein gasförmiges Radionuklid, das auf natürliche Weise aus dem Boden freigesetzt wird. Auf der Erde entsteht es in der Zerfallsreihe von in Fels und Boden vorkommendem Uran-238. Beim Einatmen verbleiben einige der kurzlebigen Zerfallsprodukte von Radon – in erster Linie Polonium-218 und Polonium-214 – in der Lunge und bestrahlen die Atemwegszellen mit Alphateilchen. Radon ist damit eine primäre Ursache von Lungenkrebs sowohl bei Rauchern als auch bei Nichtrauchern, wobei Raucher allerdings aufgrund der starken Wechselwirkung zwischen Rauchen und Radonbelastung deutlich anfälliger sind.

Radon ist in der Atmosphäre allgegenwärtig und kann durch Keller und Böden tief in Gebäude eindringen, wo seine *Konzentration*, d. h. die Aktivität, ausgedrückt in Zerfällen pro Zeiteinheit in einer gegebenen Luftmenge, zunehmen kann. Insbesondere beim Heizen von Gebäuden steigt die warme Luft nach oben und tritt dort durch Fenster und undichte Stellen aus, sodass sich in Erdgeschoss und Keller ein Unterdruck einstellt. Dieser wiederum erzeugt eine aktive Sogwirkung, durch die Radon aus dem Boden durch Risse und andere undichtete Stellen an der Gebäudeunterkante (z.B. an Stellen, wo Versorgungsrohre eintreten) in das Gebäude gelangt.

Weltweit liegt die durchschnittliche Radonkonzentration in Innenräumen bei etwa 50 Bq/m<sup>3</sup>, jedoch verbergen sich hinter diesem Durchschnittswert erhebliche Unterschiede zwischen einzelnen Orten. Allgemein können die durchschnittlichen Konzentrationen in den einzelnen Ländern stark schwanken und reichen von weniger als 10 Bq/m<sup>3</sup> in Zypern, Ägypten und Kuba bis zu über 100 Bq/m<sup>3</sup> in der Tschechischen Republik, Finnland und Luxemburg. In einigen Ländern, beispielsweise in Kanada, Schweden und der Schweiz, wurden in Häusern Radonkonzentrationen zwischen 1 000 und 10 000 Bq/m<sup>3</sup> gemessen. Der Anteil von Häusern mit derartig hohen Konzentrationen ist jedoch sehr klein. Einige der für diese Schwankungen verantwortlichen Faktoren sind beispielsweise die lokale geologische Situation, die Durchlässigkeit des Bodens sowie die Baumaterialien und die Lüftung von Gebäuden.

## Eintrittswege von Radon in Gebäuden



Ein Schlüsselfaktor ist insbesondere die vom jeweiligen Klima abhängige Lüftung. Bei gut durchlüfteten Gebäuden, beispielsweise in tropischem Klima, ist keine nennenswerte Ansammlung von Radon zu erwarten. Demgegenüber können sich in gemäßigten oder kalten Klimazonen bei entsprechend geringerer Lüftung beträchtliche Radonkonzentrationen ansammeln. Der Effekt einer eingeschränkten Lüftung ist daher bei der Planung und Konstruktion energieeffizienter Gebäude zu bedenken. In vielen Ländern wurden umfangreiche Messprogramme durchgeführt und bilden die Grundlage für die Maßnahmen zur Reduzierung der Radonkonzentration in Innenräumen.

Der Radongehalt im Wasser ist in der Regel sehr gering, jedoch werden an einigen Orten – beispielsweise in Tiefbrunnen in Helsinki in Finnland sowie in Hot Springs im US-amerikanischen Bundesstaat Arkansas – auch sehr hohe Konzentrationen gemessen. Radon im Wasser kann, insbesondere im Bad beim Duschen, zu einer Erhöhung der Radonkonzentration in der Luft führen. UNSCEAR ist aber zu dem Ergebnis gelangt, dass der Dosenbeitrag von mit dem Trinkwasser aufgenommenem Radon im Vergleich zum Anteil des Radons in der Atemluft gering ist, und schätzt die durchschnittliche jährliche effektive Dosis durch Radon auf 1,3 mSv, was ungefähr der Hälfte dessen entspricht, dem die Bevölkerung aus allen natürlichen Quellen ausgesetzt ist.

## STRAHLENEXPOSITION AM ARBEITSPLATZ

---

An bestimmten Arbeitsplätzen stellt Radon in der Atemluft die wichtigste Expositionsquelle der Beschäftigten dar. Radon ist darüber hinaus auch die Hauptexpositionsquelle in allen Untertagebauen. Die durchschnittliche jährliche effektive Dosis eines Bergarbeiters liegt bei 2,4 mSv in Kohle- und bei etwa 3 mSv in anderen Bergwerken. In der Nuklearindustrie liegt die durchschnittliche jährliche effektive Dosis bei etwa 1 mSv, wobei Radon in Uranbergwerken den größten Teil ausmacht.

### Quellen in Lebensmitteln

Lebensmittel können primordiale und eine Reihe weiterer Radionuklide, hauptsächlich aus natürlichen Quellen, enthalten. Radionuklide, die in Felsgestein und Mineralien in Boden und Wasser enthalten sind, können von Pflanzen aufgenommen und von diesen auf Tiere übertragen werden. Die Dosen schwanken daher in Abhängigkeit von den Radionuklidkonzentrationen in Lebensmitteln sowie von den jeweiligen lokalen Ernährungsgewohnheiten.

So weisen beispielsweise Fisch und Krustentiere relativ hohe Gehalte an Blei-210 und Polonium-210 auf, sodass Menschen, die große Mengen an Meeresfrüchten essen, etwas höhere Dosen aufnehmen als andere Teile der Bevölkerung. Vergleichsweise höhere Dosen werden auch von Menschen in den arktischen Regionen aufgenommen, die große Mengen an Rentierfleisch essen. In der Arktis lebende Rentiere enthalten relativ hohe Konzentrationen von Polonium-210, das sich in den Flechten, die ihre Nahrung bilden, angesammelt hat. UNSCEAR schätzt die durchschnittliche effektive Dosis aus natürlichen Quellen in Lebensmitteln auf 0,3 mSv, hauptsächlich aufgrund von Kalium-40 sowie Radionukliden der Uran-238- und Thorium-232-Zerfallsreihen.

Radionuklide aus künstlichen Quellen können in Lebensmitteln ebenfalls zusätzlich zu Radionukliden aus natürlichen Quellen vorkommen. Der Dosenbeitrag aufgrund genehmigter Freisetzungen dieser Radionuklide in die Umwelt ist in der Regel jedoch sehr gering.

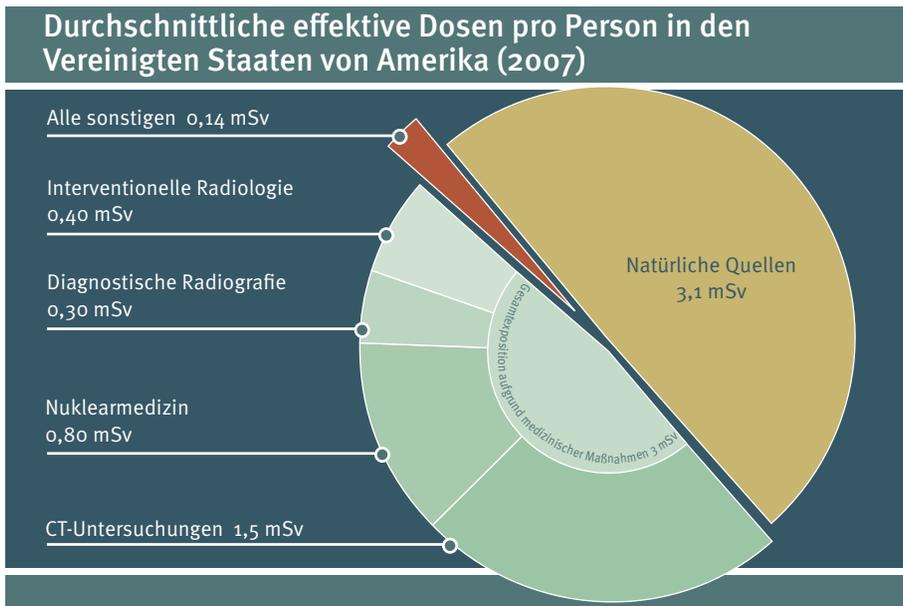
### 3.2. Künstliche Quellen

Die Anwendungen von Strahlung haben in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen, da die Wissenschaft gelernt hat, die Energie des Atoms für eine Vielzahl von Zwecken zu nutzen, angefangen bei militärischen Anwendungen bis hin zum Einsatz in der Medizin (beispielsweise in der Krebstherapie) und von der Stromerzeugung bis hin zu Anwendungen im Haushalt (beispielsweise in Rauchmeldern).

Diese und weitere künstliche Quellen erhöhen die Strahlenbelastung aus natürlichen Quellen sowohl für den Einzelnen als auch für die Weltbevölkerung. Die Einzeldosen aus künstlichen Strahlungsquellen variieren stark. Die meisten Menschen sind relativ geringen Dosen aus diesen Quellen ausgesetzt, andere hingegen einem Vielfachen des Durchschnitts. Künstliche Strahlungsquellen unterliegen in der Regel sehr wirksamen Strahlenschutzmaßnahmen.

## Medizinische Anwendungen

Strahlung spielt in der Medizin bei der Diagnose und Behandlung bestimmter Krankheiten eine so wichtige Rolle, dass diese Anwendungen mittlerweile die bei Weitem wichtigste künstliche Expositionsquelle weltweit darstellen. Auf sie entfallen durchschnittlich 98 % der Strahlenexposition aus sämtlichen künstlichen Quellen. Nach den natürlichen Quellen bilden sie die zweitgrößte Strahlenquelle für die gesamte Weltbevölkerung und entsprechen rund 20 % der Gesamtemissionen. Diese finden zum überwiegenden Teil in den Industriestaaten statt, wo für die medizinische Versorgung mehr Ressourcen zur Verfügung stehen, sodass radiologische Geräte entsprechend intensiver genutzt werden. In einigen Ländern hat auf diese Weise die jährliche durchschnittliche effektive Dosis aus medizinischen Anwendungen schon einen ähnlichen Wert wie die Strahlung aus natürlichen Quellen erreicht.



Zwischen einer Exposition aufgrund medizinischer Maßnahmen und den meisten anderen Expositionsformen bestehen erhebliche Unterschiede. Bei einer Exposition für medizinische Zwecke wird in der Regel nur ein Teil des Körpers bestrahlt, während bei anderen Formen der Exposition oftmals der ganze Körper betroffen ist.

Darüber hinaus ist die Altersverteilung der Patienten normalerweise in höheren Bereichen angesiedelt als die der allgemeinen Bevölkerung. Bei einem Vergleich von Dosen aufgrund einer medizinischen Behandlung mit Strahlenexpositionen aus anderen Strahlenquellen sollte unbedingt berücksichtigt werden, dass normalerweise die Strahlenbehandlung dem Patienten direkt nützt.

Die zunehmende Urbanisierung bedeutet in Verbindung mit der schrittweisen Verbesserung der Lebensstandards, dass immer mehr Menschen Zugang zu medizinischer Versorgung haben. Dies wiederum bedeutet, dass die Strahlendosis der Bevölkerung aufgrund medizinischer Maßnahmen weltweit steigt. UNSCEAR sammelt regelmäßig Informationen zu Diagnose- und Behandlungsverfahren. Gemäß seiner Studie für den Zeitraum von 1997 bis 2007 wurden weltweit jedes Jahr rund 3,6 Milliarden Bestrahlungen für medizinische Zwecke durchgeführt. Gegenüber der Zahl von 2,5 Milliarden gemäß der für den vorhergehenden Zeitraum von 1991 bis 1996 erstellten Studie bedeutet dies eine Steigerung um nahezu 50 %.

Die wichtigsten allgemeinen Kategorien der medizinischen Anwendung von Strahlung sind Radiologie (einschließlich interventioneller Verfahren), Nuklearmedizin sowie Radiotherapie. Weitere, von den regelmäßigen Auswertungen von UNSCEAR nicht erfasste, Anwendungen sind Reihenuntersuchungsprogramme im Gesundheitsbereich sowie die freiwillige Teilnahme an Programmen der medizinischen, biomedizinischen, diagnostischen oder therapeutischen Forschung.

**Diagnostische Radiologie** bezeichnet die Auswertung von mittels Röntgenstrahlen erzeugten Bildern mittels konventioneller Röntgentechnik (z.B. Aufnahmen des Brustkorbs oder der Zähne), Fluoroskopie (z.B. mit oral oder als Einlauf verabreichtem Bariumkontrastmittel) und Computertomografie (CT). Bildgebende Verfahren, die nichtionisierende Strahlung verwenden, darunter Ultraschallverfahren und Magnetresonanztomografie, werden von UNSCEAR nicht berücksichtigt. Die **interventionelle Radiologie** bedient sich minimalinvasiver, bildgestützter Verfahren zur Diagnose und Behandlung von Krankheiten etwa zur Kontrolle eines Katheters in einem Blutgefäß.

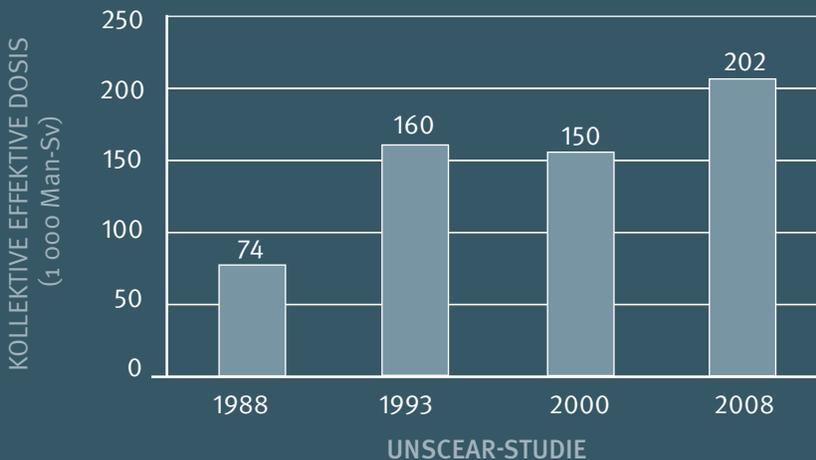
Aufgrund der zunehmenden CT-Untersuchungen und der beträchtlichen Dosis pro Untersuchung hat sich die globale durchschnittliche effektive Dosis aufgrund diagnostischer radiologischer Verfahren von 0,35 mSv im Jahr 1988 auf 0,62 mSv im Jahr 2007 nahezu verdoppelt. Laut der jüngsten UNSCEAR-Studie entfallen mittlerweile 43 % der kollektiven Gesamtdosis aufgrund radiologischer Anwendungen auf CT-Untersuchungen. Diese Zahlen sind von Region zu Region unterschiedlich. Etwa zwei Drittel aller radiologischen Verfahren entfallen auf die in den Industrieländern lebenden 25 % der Weltbevölkerung. Bei den übrigen 75 % der Weltbevölkerung ist die jährliche Untersuchungshäufigkeit weitgehend konstant. Dies gilt auch für einfache zahnärztliche Röntgenaufnahmen.

## Exposition durch Radiologie weltweit (1988 bis 2008)



In der **Nuklearmedizin** werden dem Körper *offene* (d. h. lösliche und nicht verpackelte) radioaktive Stoffe zugeführt. Dies erfolgt, um Bilder zu erhalten, die Informationen über die Struktur oder Funktion von Organen liefern, und weniger zum Zweck der Behandlung von Erkrankungen wie beispielsweise Schilddrüsenüberfunktion und -krebs. Im Allgemeinen wird ein Radionuklid so verändert, dass es intravenös oder oral als Radiopharmakon verabreicht werden kann. Es verteilt sich dann entsprechend physikalischer oder chemischer Eigenschaften so im Körper, dass eine

## Exposition durch Nuklearmedizin weltweit (1988 bis 2008)



Untersuchung per Scan möglich wird. Die vom Radionuklid innerhalb des Körpers abgegebene Strahlung wird auf diese Weise analysiert, um Bilder für diagnostische Zwecke zu erhalten, oder sie wird eingesetzt, um Erkrankungen zu behandeln.

Die Anzahl diagnostischer nuklearmedizinischer Verfahren ist weltweit von ca. 24 Millionen im Jahr 1988 auf ca. 33 Millionen im Jahr 2007 angestiegen. Das Ergebnis war ein signifikanter Anstieg der jährlichen kollektiven effektiven Dosis von 74 000 auf 202 000 Personen-Sv. Weiterhin nimmt auch die Zahl therapeutischer Anwendungen in der modernen Nuklearmedizin zu und betrifft mittlerweile ca. 0,9 Millionen Patienten jährlich weltweit. Auch hier verteilt sich der Einsatz nuklearmedizinischer Anwendungen sehr ungleichmäßig, finden doch 90 % der Untersuchungen in Industriestaaten statt.

In der **Strahlentherapie** (auch als **Radiotherapie** bezeichnet) dient Strahlung der Behandlung diverser Krankheiten, in der Regel Krebs, jedoch auch gutartiger Tumore. Bei der externen Radiotherapie wird der Patient mit einer außerhalb seines Körpers befindlichen Strahlungsquelle behandelt. Dieses Verfahren bezeichnet man als **Teletherapie**. Hierbei kommt eine stark radioaktive Quelle (in der Regel Kobalt-60) oder ein Hochspannungsgerät (z.B. ein Linearbeschleuniger) zur Erzeugung von Strahlung zum Einsatz. Eine andere Form der Behandlung ist die vorübergehende oder dauerhafte Einbringung metallischer oder umschlossener radioaktiver Quellen in den Körper des Patienten, ein als **Brachytherapie** bezeichnetes Verfahren.

Weltweit wurden im Zeitraum von 1997 bis 2007 jedes Jahr geschätzte 5,1 Millionen Patienten mit strahlentherapeutischen Verfahren behandelt. 1998 hatte sich diese Zahl noch auf geschätzte 4,3 Millionen belaufen. Hierbei wurden rund 4,7 Millionen Patienten mit Tele- und 0,4 Millionen mit Brachytherapie behandelt. Die in den Industrieländern lebenden 25 % der Weltbevölkerung erhielten 70 % der strahlen- und 40 % aller brachytherapeutischen Behandlungen weltweit.

## STRAHLENEXPOSITION AM ARBEITSPLATZ

---

Entsprechend der starken Zunahme der Gesamtzahl medizinischer radiologischer Verfahren während der letzten Jahrzehnte ist auch die Zahl des medizinischen Personals auf über 7 Millionen, bei einer durchschnittlichen jährlichen effektiven Dosis pro Person von ca. 0,5 mSv, angestiegen. In der interventionellen Radiologie und in der Nuklearmedizin ist das medizinische Personal unter Umständen überdurchschnittlich hohen Dosen ausgesetzt.

## *Unfälle bei medizinischen Anwendungen*

Bei einigen medizinischen Strahlungsanwendungen (z.B. Radiotherapie, interventionelle Radiologie und Nuklearmedizin) werden die Patienten hohen Dosen ausgesetzt, die bei falscher Anwendung schwere Schäden verursachen oder sogar tödlich wirken können. Diese Gefahr besteht nicht allein für die Patienten, sondern auch für Ärzte und anderes Personal in der Nähe. Die meisten dieser Unfälle werden durch menschliches Versagen verursacht, beispielsweise durch falsche Dosierung aufgrund von Fehlern bei der Behandlungsplanung, Fehlbedienung von Geräten, Bestrahlung des falschen Organs sowie manchmal auch des falschen Patienten.

Die Anzahl schwerwiegender Unfälle bei strahlentherapeutischen Maßnahmen ist zwar gering, jedoch wurden immerhin über 100 Fälle berichtet. UNSCEAR hat 29 seit 1967 gemeldete Unfälle geprüft, bei denen 45 Menschen zu Tode kamen und 613 Personen verletzt wurden. Es ist allerdings auch möglich, dass einige Todes- und zahlreiche Verletzungsfälle nicht gemeldet wurden.

Nicht nur eine Über-, sondern auch eine Unterexposition kann schwerwiegende Folgen nach sich ziehen, wenn nämlich der Patient eine zur Behandlung einer lebensbedrohlichen Erkrankung zu geringe Dosis erhält. Mithilfe von Qualitätssicherungsprogrammen können hohe und einheitliche Standards aufrechterhalten werden, um das Risiko derartiger Unfälle so gering wie möglich zu halten.

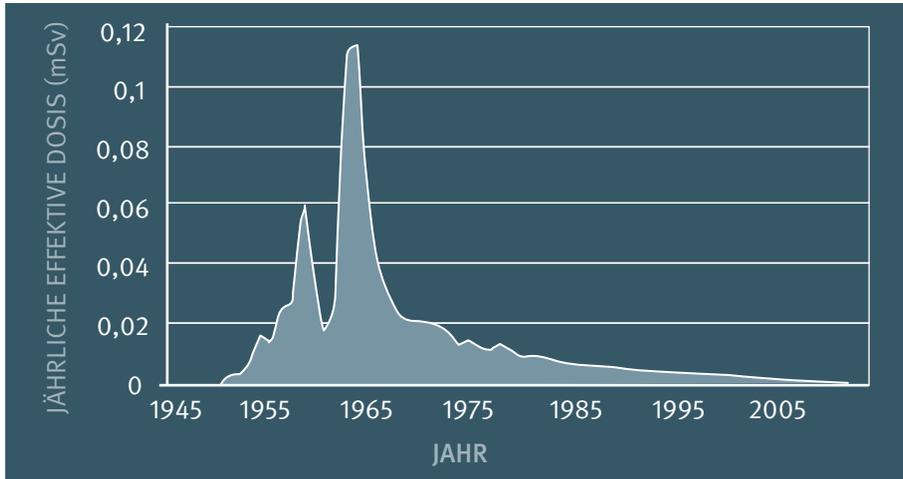
## **Kernwaffen**

Während der Endphase des 2. Weltkriegs wurden über den beiden japanischen Städten Hiroshima und Nagasaki am 6. und 9. August 1945 zwei Atombomben abgeworfen. Die Explosionen der beiden Bomben töteten fast 130 000 Menschen. Diese Ereignisse blieben der einzige Einsatz von Kernwaffen in kriegerischen Auseinandersetzungen. Ungeachtet dessen erfolgte seit 1945 eine Vielzahl oberirdischer Kernwaffenversuche, vorwiegend auf der nördlichen Halbkugel. Die meisten Versuche fanden zwischen 1952 und 1962 statt. Insgesamt wurden über 500 Versuche mit einer freigesetzten Energie entsprechend 430 Megatonnen Trinitrotoluol (TNT) durchgeführt, letztmals im Jahr 1980. Auf der ganzen Welt wurden Menschen dem radioaktiven Niederschlag (Fallout) dieser Versuche ausgesetzt. Als Reaktion auf Sorgen bezüglich der Strahlenbelastung von Mensch und Umwelt erfolgte 1955 die Gründung von UNSCEAR.

Die geschätzte jährliche durchschnittliche effektive Dosis aufgrund des globalen Fallouts durch oberirdische Kernwaffenversuche erreichte im Jahr 1963 mit 0,1 mSv den höchsten Wert und ging anschließend auf den derzeitigen Wert von

ca. 0,005 mSv zurück. Diese Belastung wird künftig nur noch sehr langsam zurückgehen, da jetzt das langlebige Radionuklid Kohlenstoff-14 für den größten Teil der Belastung verantwortlich ist.

### Dosis pro Person aufgrund von Fallout von Kernwaffentests im Weltdurchschnitt



Die Hälfte des gesamten durch oberirdische Versuche verursachten Fallouts blieben lokal auf einen Umkreis von ca. 100 km um das Versuchsgelände herum beschränkt, sodass die dort lebenden Menschen dem lokalen Fallout ganz besonders ausgesetzt waren. Da diese Versuche jedoch in relativ abgelegenen, dünn besiedelten Regionen durchgeführt wurden, waren nur wenige Menschen exponiert und trugen in nicht signifikantem Umfang zur globalen kollektiven Dosis bei. Auf der windabgewandten Seite der Versuchsgelände lebende Menschen waren allerdings weit überdurchschnittlich hohen Dosen ausgesetzt.

Der erste UNSCEAR-Bericht wurde 1958 veröffentlicht und schuf die wissenschaftliche Grundlage für die Aushandlung des *Vertrages über das Verbot von Kernwaffenversuchen in der Atmosphäre, im Weltraum und unter Wasser*. Nach der Unterzeichnung des „Moskauer Atomteststoppabkommen“-Vertrages im Jahr 1963 wurden jedes Jahr bis in die 1990er Jahre noch ca. 50 sowie auch später noch einige wenige weitere unterirdische Tests durchgeführt. Die meisten dieser Tests hatten eine niedrigere Energieausbeute als bei oberirdischen Tests, und die radioaktiven Abfälle gelangten in der Regel nur dann in die Atmosphäre, wenn Gase austraten. Bei diesen Tests wurden große Mengen an radioaktiven Abfällen erzeugt, mit denen die Bevölkerung jedoch nicht in Berührung gerät, da die Tests in großer Tiefe stattfanden und die Abfälle weitgehend mit dem umgebenden Gestein verschmolzen.

Hinsichtlich einer Nachnutzung von Atomtestgeländen (z.B. als Weide- oder Ackerland) bestehen Bedenken, da einige dieser Gelände gegenwärtig wieder genutzt werden. Die Dosen aufgrund radioaktiver Rückstände können an einigen Orten, etwa in begrenzten Gebieten des Versuchsgeländes Semipalatinsk im heutigen Kasachstan, erheblich sein, während die Dosen an anderen Orten, darunter die Mururoa- und Fangataufa-Atolle in Französisch-Polynesien, nur einem Bruchteil der normalen Umgebungsstrahlung entsprechen, denen die Menschen ausgesetzt wären, wenn sie sich auf dem Gelände ansiedelten. An anderen Orten wie den Marshallinseln und Maralinga, wo die Vereinigten Staaten von Amerika bzw. Großbritannien einige ihrer Versuche durchgeführt hatten, hängt die Strahlenexposition der Bevölkerung von den jeweiligen Ernährungs- und Lebensgewohnheiten ab.

## Kernreaktoren

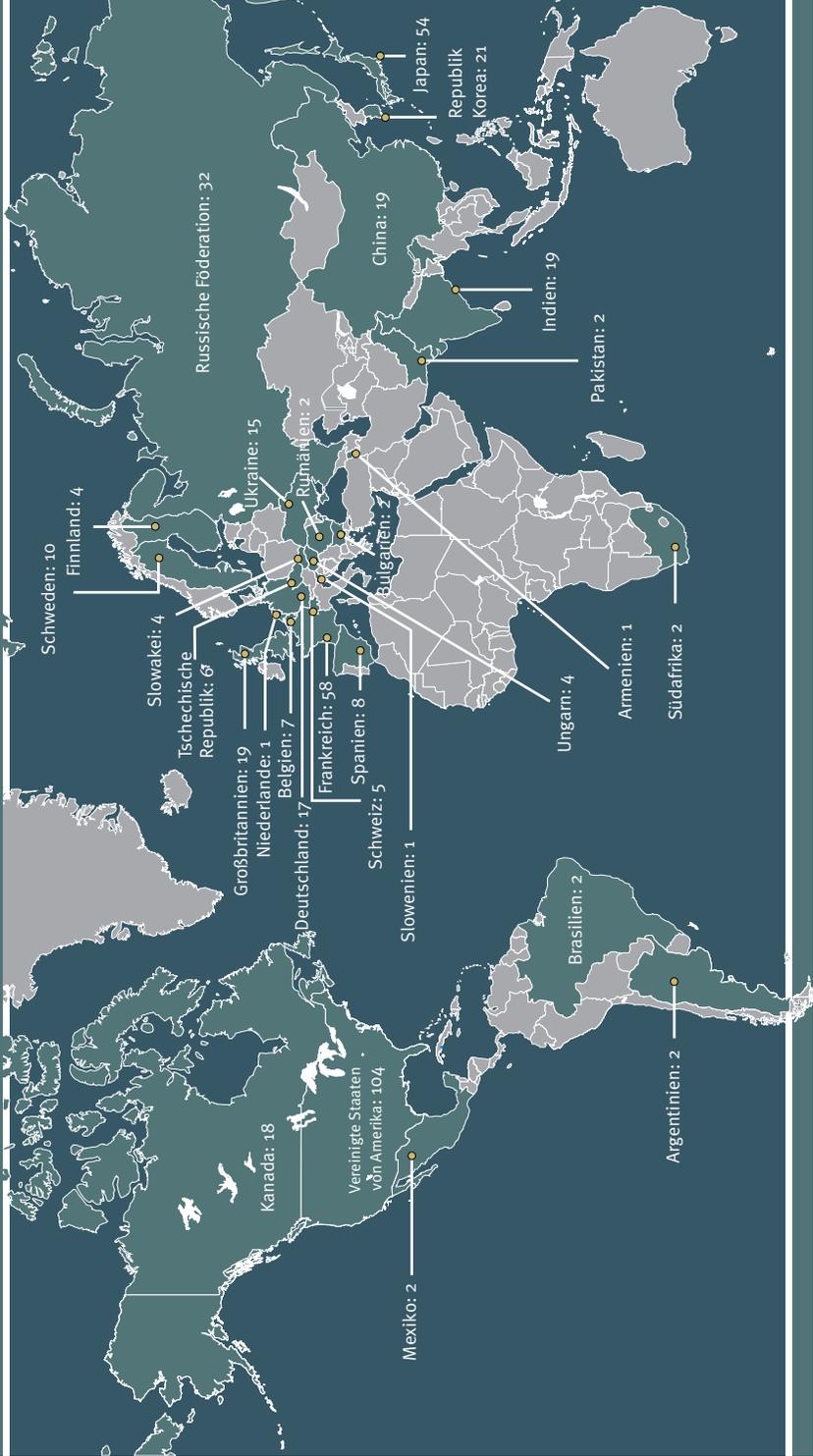
Beim Auftreffen von Neutronen auf bestimmte Uran- oder Plutoniumisotope wird deren Kern durch einen als Kernspaltung bezeichneten Vorgang in zwei kleinere Kerne gespalten. Hierbei werden Energie und zwei oder mehr Neutronen freigesetzt. Die freigesetzten Neutronen können ihrerseits auf weitere Uran- oder Plutoniumkerne treffen und diese ebenfalls spalten, sodass noch mehr Neutronen freigesetzt werden, die dann auch wiederum weitere Kerne spalten können. Dieser Vorgang wird als Kettenreaktion bezeichnet. Diese Isotope können als Brennstoff in Kernreaktoren dienen, wo die Kettenreaktion kontrolliert wird, um nicht zu schnell abzulaufen.

Die bei der Kernspaltung in Kernreaktoren freigesetzte Energie kann zur Stromerzeugung in Kernkraftwerken genutzt werden. Daneben gibt es jedoch auch Forschungsreaktoren zum Testen von Kernbrennstoffen und diversen anderen Stoffen, für kernphysikalische und biologische Untersuchungen sowie zur Erzeugung von Radionukliden zum Einsatz in Medizin und Industrie. Zwar bestehen Unterschiede zwischen den beiden Reaktortypen, jedoch sind beide auf industrielle Prozesse wie Uranbergbau und Entsorgung radioaktiver Abfälle angewiesen, bei denen sowohl die Beschäftigten als auch die Bevölkerung Strahlung ausgesetzt werden können.

## Kernkraftwerke

Das erste kommerzielle Kernkraftwerk im industriellen Maßstab ist das 1956 in Großbritannien errichtete Kraftwerk Calder Hall. Seitdem hat die Stromerzeugung in Kernkraftwerken beträchtlich zugenommen. Obwohl immer mehr ältere Reaktoren stillgelegt werden, nimmt die Stromerzeugung aus nuklearen Quellen weiterhin zu. Ende 2010 waren 440 Leistungsreaktoren in 29 Ländern in Betrieb und erzeugten ca. 10 % des weltweit hergestellten Stroms. Gleichzeitig wurden in 56 Ländern weltweit 240 Forschungsreaktoren betrieben.

## Kernkraftwerke weltweit (2010)



Obwohl die Stromerzeugung in Kernkraftwerken vielfach umstritten ist, tragen diese im Normalbetrieb in nur sehr geringem Maß zur globalen Strahlenbelastung bei. Darüber hinaus ist das Maß der Strahlenexposition von Anlagentyp zu Anlagentyp sowie von Standort zu Standort und im Verlauf der Zeit sehr unterschiedlich.

Der Gesamtexpositionsgrad aufgrund normaler Freisetzungen aus Reaktoren nimmt trotz zunehmender Stromerzeugung tendenziell ab. Dies liegt zum Teil an verbesserter Technik und zum Teil an verschärften Strahlenschutzmaßnahmen. Grundsätzlich sind die Strahlendosen aufgrund von Freisetzungen aus kerntechnischen Anlagen sehr gering. Die jährliche kollektive Dosis der in der Nähe von Kernkraftwerken lebenden Bevölkerung wird auf 75 Personen-Sv geschätzt. Wer also in der Nähe eines Kernkraftwerks lebt, ist im Durchschnitt einer jährlichen effektiven Dosis von 0,0001 mSv ausgesetzt.

Die überwiegende Quelle einer Strahlenexposition durch Kernenergie ist der Bergbau. Bei Uranabbau und -verarbeitung entstehen erhebliche Mengen an Rückständen in Form erhöhter Mengen natürlicher Radionuklide enthaltenden Abraums. 2003 wurden weltweit insgesamt rund 2 Millionen Tonnen Uran abgebaut. Hierbei fiel Abraum von mehr als 2 Milliarden Tonnen an. Die heutigen Abraumhalden werden gut unterhalten, jedoch existieren auch zahlreiche alte, aufgelassene Standorte, von denen nur wenige saniert wurden. UNSCEAR schätzt die derzeitige jährliche kollektive Dosis für in der Nähe von Bergwerken, Verarbeitungsbetrieben und Abraumhalden lebenden Menschen auf ca. 50 bis 60 Personen-Sv.

Abgebrannter Kernbrennstoff aus Reaktoren kann wiederaufbereitet werden, sodass eine Wiederverwertung des Urans und Plutoniums erfolgen kann. Der größte Teil abgebrannter Kernbrennstoffe wird gegenwärtig zwischengelagert, und etwa ein Drittel der bislang produzierten Mengen wurde inzwischen wiederaufbereitet. Die jährliche kollektive Dosis aufgrund von Aufbereitungstätigkeiten wird auf etwa 20 bis 30 Personen-Sv veranschlagt.

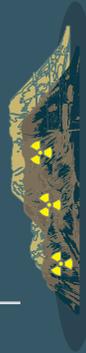
Schwach- und einige mittelaktive Abfälle werden derzeit in oberflächennahen Einrichtungen entsorgt, während in der Vergangenheit Abfälle bisweilen auch auf See entsorgt wurden. Sowohl für hochaktive Abfälle aus Wiederaufbereitungsanlagen als auch für abgebrannte Kernbrennstoffe wird, soweit keine Wiederaufbereitung erfolgt, eine Endlagerung erforderlich werden. Bei geeigneter Entsorgung der Abfälle müsste eine Exposition von Menschen auch noch in ferner Zukunft ausgeschlossen sein.

# Die wichtigsten Prozesse in der Nuklearindustrie

Durch **Umwandlung, Anreicherung und Raffination** wird Uran zu Brennstoff umgewandelt.



Durch **Mahlen** wird Uran aus Erz gewonnen. Die Reste sind Abraum, der langlebige Radionuklide in geringer Konzentration enthält.



**Natürliches Uran** wird überwiegend in Tage- oder Untertagebauen gewonnen.

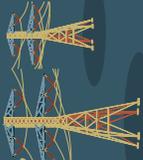
Bei der **Brennstoffherstellung** werden Brennstäbe in erster Linie aus Uran in Metallröhren gekapselten **Keramikkapseln** hergestellt.



**Wiederaufbereitetes** Uran und Plutonium aus abgebrannten Brennstäben lassen sich nach **Umwandlung und Anreicherung** wieder zu Brennstoff **recyceln**.



**Forschungs und Leistungsreaktoren**, in denen die Kerne von Uranatomen (**Kernspaltung**) gespalten werden und so zum Erhitzen von Wasser genutzte Energie freisetzen



Aufgrund radioaktiver Nebenprodukte der Brennstoff weniger effizient. Nach 12 bis 24 Monaten werden die **abgebrannten Brennstäbe** aus dem Reaktor entfernt.

In Reaktoren erzeugte **Radioisotope** können zur Verwendung in Medizin und Industrie separiert werden...

**Hochaktiver Abfall** und abgebrannte Brennstäbe werden derzeit bis zur Endlagerung an tiefen unterirdischen Lagerstätten zwischengelagert.



**Tiefe geologische Lagerstätten**

**Gering- und mittelaktiver Abfall** wird überwiegend auf oberflächennahen Deponien an Land entsorgt.



**Oberflächennahe und mittlere Tiefe**



## STRAHLENEXPOSITION AM ARBEITSPLATZ

---

In der Nuklearindustrie ist die Freisetzung von Radon im Untertageuranbergbau für einen erheblichen Teil der berufsbedingten Strahlenbelastung verantwortlich. Verbreitete Tätigkeiten sind hier der Abbau und die Verarbeitung radioaktiver Erze mit potenziell hohem Gehalt an Radionukliden. Die durchschnittliche jährliche effektive Dosis eines Beschäftigten in der Nuklearindustrie ist seit den 1970er Jahren von ehemals 4,4 auf jetzt 1 mSv zurückgegangen. Der Hauptgrund hierfür ist der starke Rückgang des Uranbergbaus in Verbindung mit fortschrittlicheren Abbaufahren und besserer Wetterführung.

### *Unfälle in kerntechnischen Anlagen*

Im Normalbetrieb ziviler kerntechnischer Anlagen ist die Strahlenbelastung äußerst gering. Andererseits kam es jedoch auch zu einigen schweren Unfällen, die von der Öffentlichkeit stark beachtet und deren Folgen von UNSCEAR untersucht wurden. Hierzu gehören beispielsweise die Unfälle im Forschungsreaktor des Instituts für Nuklearwissenschaften „Vinca“ im ehemaligen Jugoslawien im Jahr 1958, im Kernkraftwerk Three Mile Island in den Vereinigten Staaten von Amerika im Jahr 1979 sowie in der Brennstoffaufbereitungsanlage Tokai-Mura in Japan im Jahr 1999.

Zwischen 1945 und 2007 ereigneten sich in kerntechnischen Anlagen 35 schwere Strahlungsunfälle mit tödlichem Ausgang oder mit schweren Verletzungen von Beschäftigten. Bei sieben Zwischenfällen kam es zur Freisetzung radioaktiven Materials außerhalb der Anlage sowie zu nachweisbarer Strahlenbelastung der Bevölkerung. Weitere schwere Unfälle ereigneten sich in Anlagen in Verbindung mit Kernwaffenprogrammen. Ohne die Unfälle in Tschernobyl im Jahr 1986 und in Fukushima-Daiichi im Jahr 2011, auf die weiter unten eingegangen wird, sind 32 Todesfälle und 61 Fälle strahlungsbedingter, eine medizinische Behandlung erfordernder Verletzungen bekannt.

Vor dem Ereignis in Tschernobyl ereignete sich der schwerste Unfall in einer zivilen Anlage am 28. März 1979 im Kernkraftwerk Three Mile Island, wo eine Ereigniskette zu einer Teilschmelze des Reaktorkerns geführt hatte. Bei diesem Unfall kam es zwar zur Freisetzung großer Mengen an Spaltprodukten und Radionukliden aus dem zerstörten Reaktorkern in das Sicherheitsgebäude, jedoch nur relativ geringer Mengen in die Umwelt, sodass die sich daraus ergebende Exposition der Bevölkerung sehr niedrig war.

## *Der Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl*

Der Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl am 26. April 1986 war nicht nur der schwerste Unfall in der Geschichte der zivilen Nutzung der Kernenergie, sondern führte auch zur stärksten Strahlenbelastung der Bevölkerung. Die kollektive Dosis aufgrund des Unfalls belief sich auf ein Vielfaches der kombinierten kollektiven Dosis sämtlicher anderer Strahlungsunfälle.

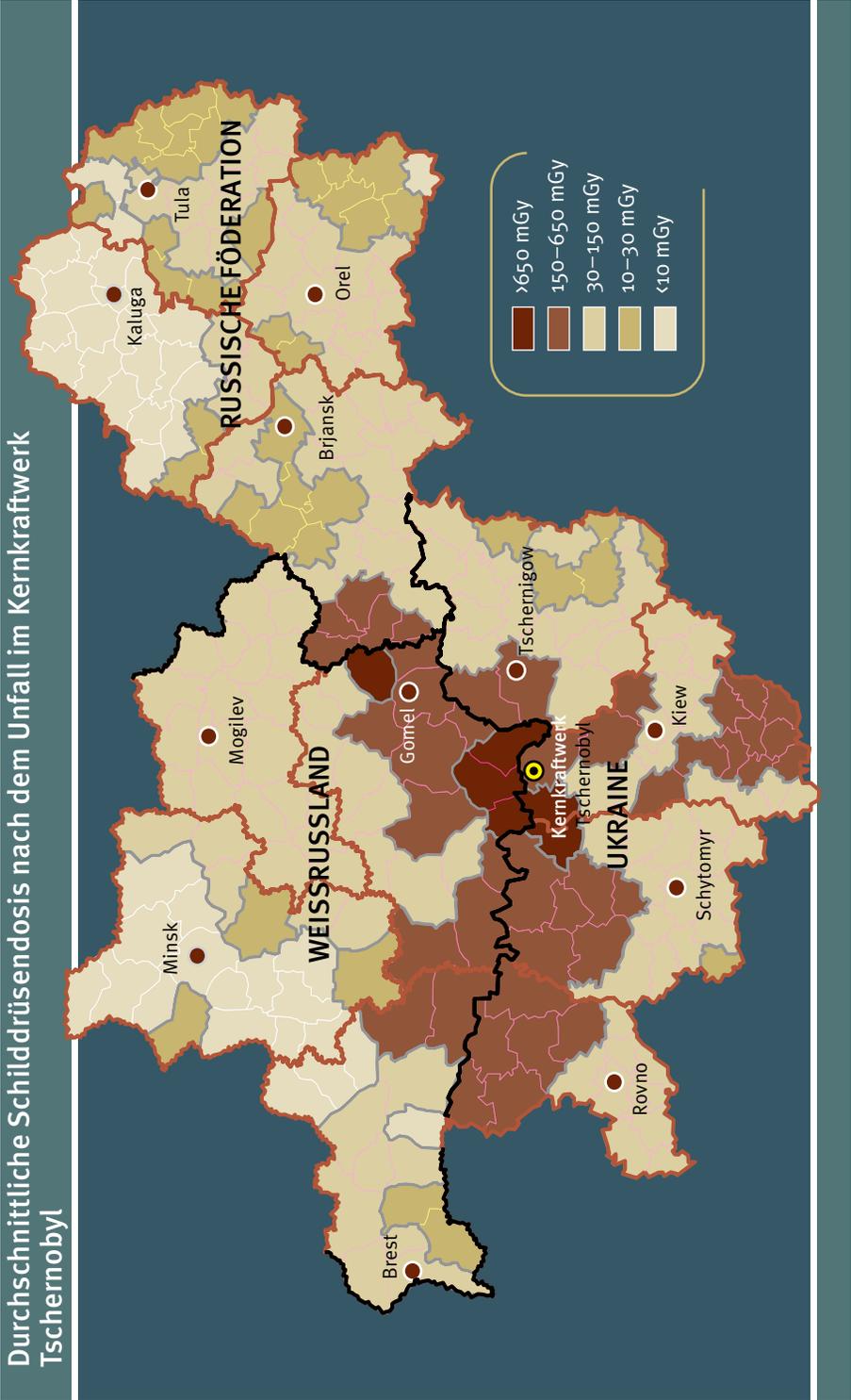
Zwei Beschäftigte erlagen unmittelbar nach dem Unfall ihren Verletzungen, und weitere 134 litten an einem akuten Strahlensyndrom, das in 28 Fällen tödlich verlief. Die Überlebenden litten in erster Linie an Hautverletzungen und strahlungsbedingtem Katarakt. Neben den Notfalleinsatzkräften waren anschließend noch mehrere hunderttausend Menschen an Rettungsmaßnahmen beteiligt. Abgesehen von einer offensichtlichen Zunahme von Leukämie- und Kataraktfällen bei den Personen, die 1986 und 1987 hohen Strahlendosen ausgesetzt waren, liegen bis dato keine Nachweise weiterer strahlungsbedingter Gesundheitsfolgen in dieser Personengruppe vor.

Der Unfall führte zur größten jemals bei irgendeiner zivilen Nutzung festgestellten unkontrollierten Freisetzung von Radioaktivität in die Umwelt, als etwa zehn Tage lang große Mengen radioaktiver Substanzen in die Umgebung gelangten. Die durch den Unfall erzeugte radioaktive Wolke erstreckte sich über die gesamte Nordhalbkugel und führte zur Ablagerung erheblicher Mengen radioaktiven Materials in weiten Teilen der ehemaligen Sowjetunion und anderen Regionen Europas mit einer Kontamination von Land und Wasser vorwiegend im heutigen Weißrussland, der Russischen Föderation und der Ukraine sowie schweren sozialen und wirtschaftlichen Problemen für große Teile der Bevölkerung.

Die Belastung frischer Milch mit dem kurzlebigen Radionuklid Jod-131 (mit einer Halbwertszeit von acht Tagen) und die Unterlassung sofortiger Gegenmaßnahmen führten in Teilen der ehemaligen Sowjetunion insbesondere bei Kindern zu sehr hohen Schilddrüsendosen. Seit Anfang der 1990er Jahre ist bei Erwachsenen, die im Kindes- oder Jugendalter Strahlung ausgesetzt waren, eine Zunahme der Häufigkeit von Schilddrüsenkrebs in Weißrussland, der Ukraine und vier der stärker betroffenen Regionen der Russischen Föderation festzustellen. Für den Zeitraum von 1991 bis 2005 wurden über 6 000 Fälle gemeldet, von denen 15 tödlich verliefen.

Längerfristig war auch die allgemeine Bevölkerung Strahlung ausgesetzt, und zwar sowohl externer aus radioaktiven Ablagerungen als auch interner durch die Aufnahme hauptsächlich mit Cäsium-137 (mit einer Halbwertszeit von 30 Jahren) kontaminierter Lebensmittel. Die daraus resultierenden langfristigen Strahlendosen waren gleichwohl relativ niedrig und lagen im Durchschnitt der individuellen effektiven Dosen während des Zeitraums von 1986 bis 2005 in den kontaminierten

Durchschnittliche Schilddrüsens dosis nach dem Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl



Regionen von Weißrussland, der Russischen Föderation und der Ukraine bei 9 mSv. Dass diese Dosis zu wesentlichen Gesundheitsfolgen in der allgemeinen Bevölkerung führt, ist nicht wahrscheinlich. Ungeachtet dessen hatte die schwerwiegende Störung aufgrund des Unfalls zu ernststen sozialen und wirtschaftlichen Problemen und großer Not für die betroffenen Menschen geführt.

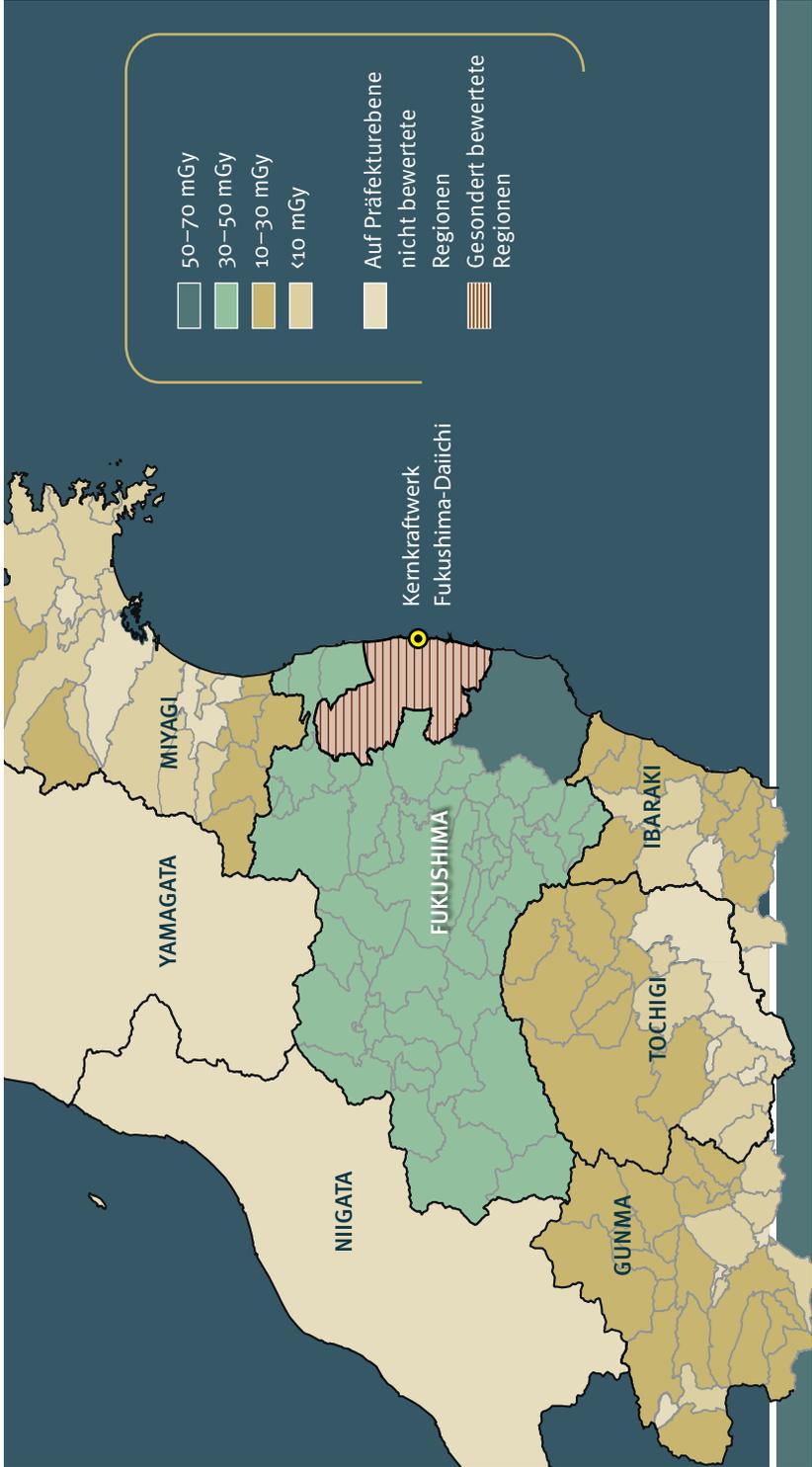
UNSCEAR hat die radiologischen Auswirkungen des Unfalls in einer Reihe von Berichten ausführlich untersucht. Die internationale Gemeinschaft hat bis dato einzigartige Anstrengungen unternommen, die Dimension und die Eigenschaften der Folgen des Unfalls im Allgemeinen und auf verschiedenen zentralen Gebieten abzuschätzen, um die radiologischen und sonstigen Folgen des Unfalls besser zu verstehen und zu deren Milderung beitragen zu können. So besagen die seit 1986 durchgeführten Studien im Kern, dass Personen, die im Kindesalter Jod-131 ausgesetzt waren, sowie die hohen Strahlendosen ausgesetzten Notfall- und Rettungskräfte ein erhöhtes Risiko strahlungsbedingter Folgen aufweisen. Andererseits waren die meisten Bewohner der Region niedrigen Strahlendosen ausgesetzt, die der natürlichen jährlichen Umgebungsstrahlung vergleichbar waren oder nur um wenige Vielfache darüber lagen.

### *Der Unfall im Kernkraftwerk Fukushima-Daiichi*

Nach dem schweren Erdbeben der Stärke 9,0 in Ostjapan und dem Tsunami an der Ostküste von Nordjapan am 11. März 2011 wurde das Kernkraftwerk Fukushima-Daiichi schwer beschädigt, und es kam zur Freisetzung radioaktiven Materials in die Umwelt. Als Vorsichtsmaßnahme wurden zwischen dem 11. und 15. März 2011 rund 85 000 Bewohner innerhalb eines Radius von 20 km um den Standort des Kernkraftwerks herum sowie in einigen benachbarten Regionen evakuiert, während der Bevölkerung in einem Umkreis von 20 bis 30 km um das Kraftwerk herum geraten wurde, das Haus nicht zu verlassen. Im April 2011 wurde dann noch aufgrund erhöhter Radionuklidgehalte am Boden die Evakuierung weiterer, weiter nordwestlich des Kraftwerks lebender 10 000 Menschen empfohlen. Durch diese Evakuierungsmaßnahmen wurde der Expositionsgrad der potenziell betroffenen Menschen erheblich reduziert. Der Konsum von Wasser und bestimmten Lebensmitteln wurde vorübergehend eingeschränkt, um die Strahlenexposition der Bevölkerung zu begrenzen. Bei den Arbeiten zur Bekämpfung des Notfalls im Kernkraftwerk kam es zur Strahlenbelastung einiger Angehöriger des Betriebs- und Notfalleinsatzpersonals.

UNSCEAR hat eine Abschätzung der Strahlendosen und der damit verbundenen Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt vorgenommen. Während der ersten 18 Monate nach dem Unfall waren ca. 25 000 Arbeiter mit Nothilfe- und anderen Maßnahmen am Kernkraft Fukushima-Daiichi beschäftigt. Diese Arbeiter waren einer durchschnittlichen effektiven Dosis von ca. 12 mSv ausgesetzt. Sechs Arbeiter erhielten allerdings auch kumulative Dosen von mehr als 250 mSv. Hierbei lag die höchste

# Durchschnittliche Schilddrüsendosis bei Säuglingen nach dem Unfall im Kernkraftwerk Fukushima-Daiichi



für einen Arbeiter berichtete Dosis bei 680 mSv, in erster Linie aufgrund interner Exposition (ca. 90 %). Zwölf Arbeiter nahmen schätzungsweise Schilddrüsendosen im Bereich zwischen 2 und 12 Gy auf. Bei den Arbeitern, die unfallbedingter Strahlung ausgesetzt waren, wurden keine strahlungsbedingten Todesfälle oder akuten Erkrankungen beobachtet.

Die durchschnittliche effektive Dosis bei Erwachsenen aus evakuierten Regionen der Präfektur Fukushima lag im ersten Jahr nach dem Unfall zwischen 1 mSv und ca. 10 mSv. Die effektiven Dosen für ein Jahr alte Kinder wurden auf etwa den doppelten Wert geschätzt. In nicht evakuierten Regionen der Präfektur Fukushima sowie in benachbarten Präfekturen waren die Dosen niedriger.

Schätzungen der durchschnittlichen Schilddrüsendosen dieser am stärksten exponierten Personen, in erster Linie durch Jod-131, lagen zwischen 35 Gy bei Erwachsenen und bis zu 80 mGy bei ein Jahr alten Kindern. Die jährliche Schilddrüsendosis, in erster Linie durch externe natürliche Strahlungsquellen, liegt in der Regel bei 1 mGy. UNSCEAR kam zu dem Ergebnis, dass ein erhöhtes Risiko von Schilddrüsenkrebs bei der am stärksten strahlenbelasteten Gruppe von Kindern theoretisch möglich ist. Andererseits ist Schilddrüsenkrebs im frühen Kindesalter selten, sodass in dieser Gruppe statistisch keine feststellbaren Auswirkungen erwartet werden.

Zwar werden Vergleiche mit der Katastrophe von Tschernobyl angestellt, jedoch unterschied sich der Atomunfall von Fukushima-Daiichi durch den Reaktortyp, den Unfallverlauf, die Freisetzungseigenschaften der Radionuklide sowie deren Ausbreitung und die ergriffenen Schutzmaßnahmen. In beiden Fällen wurden große Mengen an Jod-131 und Cäsium-137 – den beiden bezüglich der Exposition nach Nuklearunfällen signifikantesten Radionukliden – in die Umwelt freigesetzt. Im Vergleich zum Unfall von Tschernobyl wurden im Fall von Fukushima-Daiichi ca. 10 bzw. 20 % der Mengen an Jod-131 und Cäsium-137 freigesetzt.

## Industrielle und andere Anwendungen

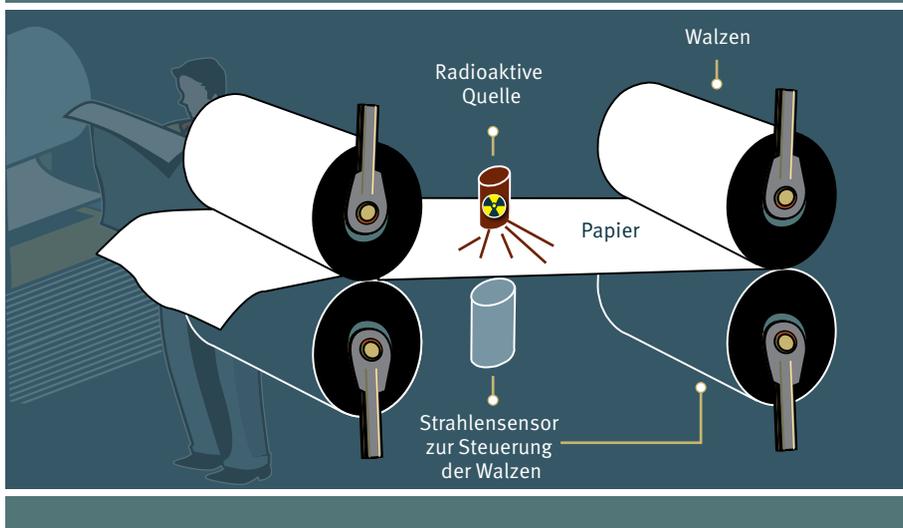
Strahlungsquellen kommen in einer Vielzahl industrieller Anwendungen zum Einsatz. Hierzu gehören industrielle Bestrahlungsverfahren zur Sterilisierung medizinischer und pharmazeutischer Produkte, Konservierung von Lebensmitteln oder Bekämpfung von Insektenbefall, industrielle Radiografie zur Prüfung von Schweißnähten auf Fehler, Alpha- oder Betaquellen in Leuchtverbindungen in Nachtsichtgeräten sowie als schwach leuchtende Lichtquellen für Ausgangsschilder und Landkartenbeleuchtungen, radioaktive Quellen oder Mini-Röntgengeräte im Brunnenbau zur Messung geologischer Eigenschaften in Bohrlöchern bei der Erkundung von Mineralien-, Öl- oder Gasvorkommen, radioaktive Quellen in Geräten zur Messung von Materialdicke, -feuchtigkeit, -dichte und -menge sowie sonstige umschlossene radioaktive Quellen in der Forschung.

Die Produktion von Radionukliden zum Einsatz im industriellen und medizinischen Bereich ist zwar weit verbreitet, führt jedoch nur zu einer sehr geringen Exposition der allgemeinen Bevölkerung. Im Fall eines Unfalls kann es jedoch zur Kontamination eher begrenzter Bereiche und zu erheblicher Strahlenbelastung kommen.

## STRAHLENEXPOSITION AM ARBEITSPLATZ

Die Anzahl der Beschäftigten in Bereichen mit industriellen Anwendungen von Strahlung lag zu Beginn dieses Jahrtausends bei etwa einer Million bei einer jährlichen durchschnittlichen effektiven Dosis pro Person von 0,3 mSv.

### Dickenmessgerät auf Strahlungsbasis



### Natürlich vorkommendes radioaktives Material

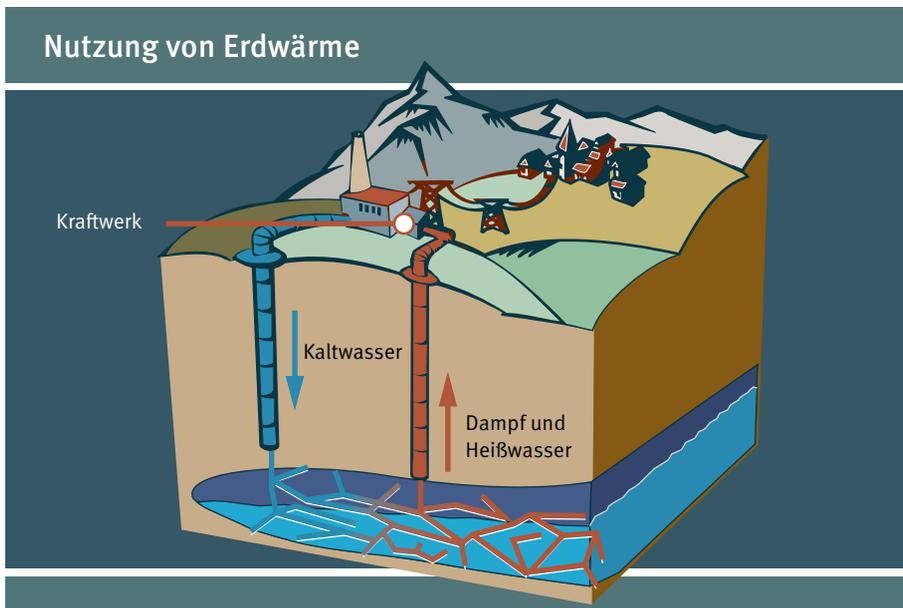
Weltweit gibt es diverse Arten von Anlagen, die zwar nicht mit der Nutzung von Kernenergie in Verbindung stehen, aber für die Bevölkerung dennoch eine Strahlenexposition hervorrufen können, weil ihre Industrie- und Nebenprodukte sowie ihr Abfall erhöhte Konzentrationen *natürlich vorkommenden radioaktiven Materials* enthalten. Die wichtigsten Anlagen dieser Art sind Bergwerke und Mineralien verarbeitende Betriebe.

Aktivitäten in Verbindung mit Erzabbau und -verarbeitung können ebenfalls zu erhöhten Konzentrationen natürlich vorkommenden radioaktiven Materials führen.

Hierzu gehören beispielsweise Erzbergbau und -verhüttung, Phosphatproduktion, Kohlebergbau und -verstromung, Öl- und Gasförderung, Seltene-Erden- und Titanoxidindustrie, Zirkonium und Keramikindustrie sowie natürlich vorkommende Radionuklide (in erster Linie Radium- und Thoriumisotope) verwendende Anwendungen.

So enthält Kohle beispielsweise Spuren primordialer Radionuklide. Bei der Verbrennung werden diese Radionuklide in die Atmosphäre freigesetzt und können so zu Exposition von Menschen führen. Pro Gigawatt von in den Kohlekraftwerken weltweit erzeugten Stroms nimmt daher die kollektive Dosis der Weltbevölkerung jährlich um schätzungsweise ca. 20 Personen-Sv zu. Darüber hinaus wurde die (als Verbrennungsrückstand anfallende) Flugasche zur Bodenaufschüttung und im Straßenbau eingesetzt, wobei sie jedoch im Hausbau sowohl durch direkte Strahlung als auch durch Einatmen von Radon zu Strahlenexposition führen kann. Abgesehen davon kann die Entsorgung von Flugasche auf Deponien die Strahlenbelastung in der Umgebung erhöhen.

Die Nutzung von Erdwärme ist eine weitere Quelle für eine Strahlenexposition der Bevölkerung. Hierbei werden unterirdische Dampf- und Heißwasservorkommen zur Stromerzeugung oder zum Heizen von Gebäuden genutzt. Nach Schätzungen der Emissionen aufgrund der Nutzung dieser Technologie in Italien und den Vereinigten Staaten von Amerika werden hierbei ca. 10 % der kollektiven Dosis pro Gigawatt-Jahr von in Kohlekraftwerken erzeugtem Strom freigesetzt. Erdwärme hält derzeit einen relativ geringen Anteil an der Weltenergiegewinnung und mithin an der Exposition.

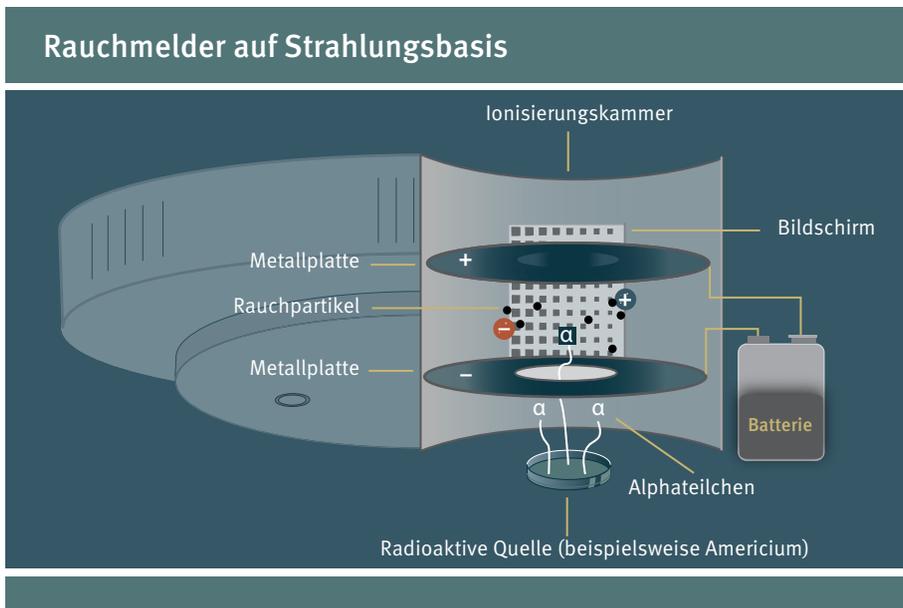


Daneben können noch weitere menschliche Aktivitäten wie beispielsweise der Einsatz von Klärschlämmen aus Wasseraufbereitungsanlagen in der Landwirtschaft zur Freisetzung natürlich vorkommenden radioaktiven Materials führen. Der Expositionsgrad der Bevölkerung ist jedoch extrem gering und liegt in einer Größenordnung von weniger als einigen Tausendstel Millisievert pro Jahr.

Ein Nebenprodukt der Urananreicherung ist abgereichertes Uran, das weniger radioaktiv als natürliches Uran ist. Abgereichertes Uran wird seit vielen Jahren sowohl für zivile als auch für militärische Zwecke genutzt und eignet sich dank seiner hohen Dichte als Strahlungsabschirmung oder als Gegengewicht in Flugzeugen. Die militärische Nutzung abgereicherten Urans, insbesondere in panzerbrechender Munition, hat Bedenken bezüglich einer möglichen Restkontamination ausgelöst. Mit Ausnahme einiger weniger spezifischer Umstände wie beispielsweise dem Umgang mit abgereichertem Uran über längere Zeiträume ist die Strahlenexposition äußerst gering. Vielmehr geht die größte Gefahr von der chemischen Toxizität des Materials aus.

### Verbrauchsgüter

Eine Reihe von Alltagsgütern enthält geringe Mengen von eigens wegen ihrer chemischen oder radioaktiven Eigenschaften zugegebenen Radionukliden. Radium-226 war historisch das wichtigste, in leuchtenden Konsumgütern eingesetzte Radionuklid. Seine Verwendung endete vor etlichen Jahrzehnten, als es durch das weniger radiotoxische Promethium-147 oder Wasserstoff-3 (Tritium) ersetzt wurde. Ungeachtet dessen können aus Tritiumverbindungen enthaltenden Uhren gewisse Mengen



von Tritium austreten, da dieses sehr mobil ist. Allerdings setzt Tritium nur äußerst schwache Betateilchen frei, die nicht in der Lage sind, die Haut zu durchdringen, sodass eine Strahlenexposition nur dann eintritt, wenn es in den Körper gelangt.

Einige moderne Rauchmelder bestehen aus Ionisationskammern mit kleinen Folien aus Americium-241, die Alphateilchen emittieren und einen konstanten Ionenstrom erzeugen. Die Umgebungsluft kann ungehindert in die Detektoren einströmen, sodass in den Melder eintretender Rauch den Strom unterbricht und dadurch den Alarm auslöst.

Die Radioaktivität der Americiumquelle im Rauchmelder ist sehr gering. Americium zerfällt mit einer Halbwertszeit von etwa 432 Jahren sehr langsam. Dies bedeutet, dass der Rauchmelder nach Ablauf seiner Lebensdauer von zehn Jahren noch fast seine gesamte Aktivität aufweist. Solange die Americiumquelle im Rauchmelder verbleibt, ist die Strahlenbelastung vernachlässigbar. Sie kann zwar mit entsprechend empfindlichen Geräten nachgewiesen werden, jedoch ist die Belastung aufgrund derartiger Produkte extrem niedrig. Wer sich täglich acht Stunden lang in einer Entfernung von 2 m vom Rauchmelder aufhält, erhält eine Jahresdosis von geschätzt weniger als 0,0001 mSv.

### *Industrieunfälle*

Obwohl Unfälle mit industriellen radioaktiven Quellen häufiger als Unfälle in Kernkraftwerken sind, kommt ihnen in der Regel nicht dieselbe öffentliche Aufmerksamkeit zu, wenngleich auch sie zu erheblicher Strahlenexposition sowohl für Beschäftigte als auch die Bevölkerung führen können.

Zwischen 1945 und 2007 wurden ca. 80 Unfälle in Industrieanlagen unter Beteiligung von Strahlungsquellen, Beschleunigern und Röntgeneinrichtungen gemeldet. In Verbindung mit diesen Unfällen wurden neun Todesfälle gemeldet, und 120 Beschäftigte erlitten Verletzungen, von denen einige ein akutes Strahlensyndrom entwickelten. Häufig betroffene Regionen waren die Hände, wobei oftmals eine Amputation erforderlich wurde. UNSCEAR vermutet, dass einige tödlich verlaufende Unfälle sowie Unfälle mit Verletzungsfolgen in Industrieanlagen nicht gemeldet wurden.

Derartige Unfälle haben viele und sehr unterschiedliche Ursachen und Folgen. An dieser Stelle sollen lediglich zwei Beispiele geschildert werden. 1978 erlitt in Louisiana in den Vereinigten Staaten von Amerika ein Röntgenassistent beim Arbeiten auf einem Schiff vermutlich aufgrund einer Dosimeterfehlfunktion eine Strahlenverletzung der linken Hand durch eine 3,7-TBq-Iridium 192-Quelle. Nach etwa drei Wochen war seine Hand gerötet und angeschwollen, und später entwickelten sich Hautblasen, die jedoch nach fünf bis acht Wochen abheilten. Sechs Monate später musste jedoch ein Teil des Zeigefingers amputiert werden. 1990 wurden im chinesi-

schen Shanghai sieben Arbeiter in einer Industrieanlage aufgrund unzureichender Sicherheitsmaßnahmen Strahlung aus einer Kobalt-60-Quelle ausgesetzt. Ein Arbeiter, dessen Dosis schätzungsweise 12 Gy betragen hatte, verstarb 25 Tage nach dem Unfall. Ein weiterer Arbeiter, dessen Dosis schätzungsweise 11 Gy betragen hatte, verstarb 90 Tage nach dem Unfall. Die anderen Arbeiter waren Dosen zwischen geschätzten 2 und 5 Gy ausgesetzt und erholten sich nach ärztlicher Behandlung.

### Herrenlose Strahlenquellen

Zwischen 1966 und 2007 wurden 31 Unfälle auf verlorene, gestohlene oder aufgegebene Strahlenquellen, auch als *herrenlose Strahlenquellen* bezeichnet, zurückgeführt. Diese Unfälle haben nach gesicherten Angaben zum Tod von 42 Menschen, darunter auch Kindern, geführt. Darüber hinaus mussten sich hunderte Menschen aufgrund eines akuten Strahlensyndroms, schwerer lokaler Verletzungen, interner Kontamination oder psychologischer Probleme in ärztliche Behandlung begeben. Sechs Unfälle standen mit außer Betrieb genommenen Medizingeräten für strahlentherapeutische Anwendungen in Verbindung.

Die genaue Zahl herrenloser Strahlenquellen weltweit ist nicht bekannt, jedoch wird davon ausgegangen, dass es sich um mehrere Tausend handelt. Der Nuclear Regulatory Commission der Vereinigten Staaten von Amerika zufolge haben Unternehmen in den USA zwischen 1996 und 2008 fast 1 500 radioaktive Quellen aus den Augen verloren. Hiervon wurde über die Hälfte nie wieder aufgefunden. Eine Studie der Europäischen Union schätzt, dass in Europa jedes Jahr bis zu 70 Quellen der behördlichen Kontrolle entgehen. Zwar stellt die Mehrzahl dieser Quellen keine wesentliche Strahlungsgefahr dar, jedoch sind Unfälle ein wesentlicher Anlass zur Besorgnis in Bezug auf herrenlose Quellen.

### Schätzungen schwerer Strahlungsunfälle weltweit\*

Art des Unfalls	1945–1965	1966–1986	1987–2007
Unfälle in kerntechnischen Anlagen	19	12	4
Industrieunfälle	2	50	28
Unfälle mit herrenlosen Strahlungsquellen	3	15	16
Unfälle an Universitäten/Forschungseinrichtungen	2	16	4
Unfälle in der Medizin	unbekannt	18	14

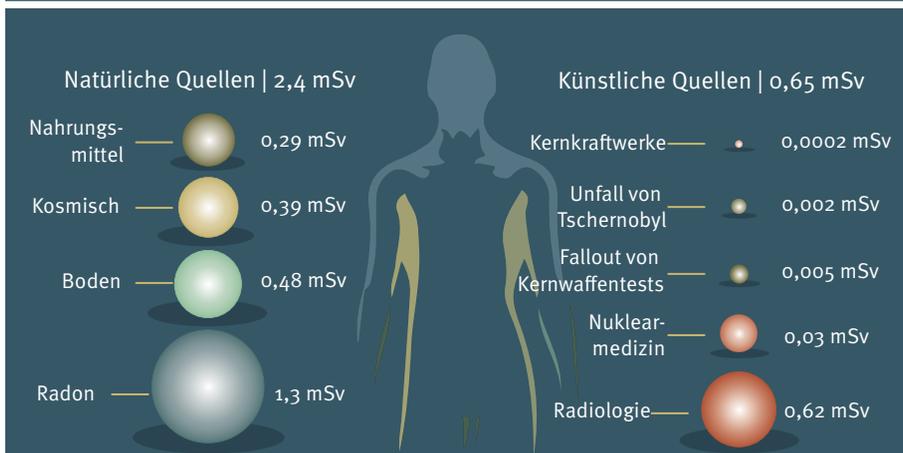
\* Grundlage: offiziell gemeldete bzw. veröffentlichte Unfälle. Die Zahl der nicht gemeldeten Unfälle, insbesondere in der Medizin, dürfte wesentlich höher sein.

Schrotthändler können sich für versiegelte Quellen oder deren Behälter interessieren, da diese aus wertvollem Metall zu sein scheinen und nicht in jedem Fall mit einem Warnzeichen für Strahlung versehen sind. Fälle, in denen nichtsahnende Arbeiter oder auch normale Bürger mit Quellen hantiert haben, haben zu schweren Verletzungen, bisweilen sogar mit tödlichem Ausgang, geführt, so beispielsweise 1987 im brasilianischen Goiânia. Dort wurde ein außer Betrieb genommenes Teletherapiegerät mit einer hochradioaktiven (50,9 TBq) Cäsium-137-Quelle gestohlen und die Kapsel der Strahlenquelle aufgebrochen. Im Verlauf der folgenden zwei Wochen verteilte sich lösliches Cäsiumchloridpulver über einen Schrottplatz und die Häuser in dessen Umgebung. Etliche Menschen entwickelten Krankheiten und Hautläsionen, und über 110 000 Menschen mussten auf radioaktive Kontamination untersucht werden, wobei bei vielen von ihnen eine interne Kontamination mit Cäsium-137 festgestellt wurde. Der Unfall führte zum Tod von vier Menschen, darunter eines Kindes.

### 3.3. Durchschnittliche Strahlenexposition von Bevölkerung und Beschäftigten

Die Exposition der Bevölkerung durch Strahlung aus natürlichen Quellen stellt allgemein den größten Anteil an der Gesamtexposition dar. UNSCEAR schätzt die durchschnittliche jährliche effektive Dosis eines Menschen auf ca. 3 mSv. Im Durchschnitt beläuft sich die jährliche Dosis aus natürlichen Quellen auf 2,4 mSv, wovon zwei Drittel auf radioaktive Substanzen in der Atemluft, in der Nahrung und im Trinkwasser entfallen. Die Hauptexpositionsquelle aus künstlichen Quellen ist in der Medizin genutzte Strahlung mit einer individuellen durchschnittlichen jährlichen effektiven Dosis von 0,62 mSv. Die Strahlenexposition durch medizinische Anwendungen ist je nach Region, Land und Gesundheitssystem unterschiedlich. UNSCEAR schätzt die durchschnittliche jährliche effektive Dosis durch medizinische Strahlungsanwendungen in Industriestaaten auf 1,9 mSv und in nicht industrialisierten Staaten auf 0,32 mSv, wobei diese Werte jedoch erheblich schwanken können (z.B. 3 mSv in den Vereinigten Staaten von Amerika und lediglich 0,05 mSv in Kenia).

#### Durchschnittliche Belastung der Bevölkerung nach Quellen\*



\* (Gerundete) Schätzungen der effektiven Dosis pro Person in einem Jahr (Durchschnitt weltweit)

Bis in die 1990er Jahre konzentrierte sich die Aufmerksamkeit bezüglich der Exposition am Arbeitsplatz auf künstliche Strahlungsquellen. Mittlerweile ist jedoch bekannt, dass eine sehr große Zahl von Beschäftigten – insbesondere im Bergbau – auch natürlichen Strahlungsquellen ausgesetzt ist. Bei bestimmten Tätigkeiten im Bergbau ist eingeatmetes Radongas die wichtigste Expositionsquelle am Arbeitsplatz. Während die Freisetzung von Radon in Untertageuranbergwerken einen wesentlichen Anteil an der berufsbedingten Exposition in der Nuklearindustrie hat,

ist die jährliche durchschnittliche Dosis eines dort Beschäftigten insgesamt von 4,4 mSv in den 1970er Jahren auf heute ca. 1 mSv zurückgegangen. Die durchschnittliche jährliche effektive Dosis eines Bergarbeiters liegt jedoch immer noch bei 2,4 mSv in Kohlebergwerken und bei etwa 3 mSv in anderen Bergwerken.

Die Gesamtzahl überwachter Arbeitskräfte wird aktuell auf etwa 23 Millionen weltweit geschätzt, von denen etwa 10 Millionen künstlichen Quellen ausgesetzt sind. Drei von vier künstlichen Quellen ausgesetzten Beschäftigten sind im Medizinbereich tätig. Die jährliche effektive Dosis pro Beschäftigtem beträgt hierbei 0,5 mSv. Eine Auswertung der Trends der durchschnittlichen jährlichen effektiven Dosis pro Beschäftigtem zeigt eine Zunahme der Belastung aus natürlichen Quellen überwiegend aufgrund von Bergbautätigkeiten sowie eine rückläufige Belastung aus künstlichen Quellen in erster Linie dank der erfolgreichen Umsetzung von Strahlenschutzmaßnahmen.

<b>Trends der Strahlenbelastung von Beschäftigten weltweit (mSv)*</b>				
<b>Jahrzehnt</b>	<b>1970er</b>	<b>1980er</b>	<b>1990er</b>	<b>2000er</b>
<b>Natürlich Quellen</b>				
Flugpersonal	—	3,0	3,0	3,0
Kohlebergbau	—	0,9	0,7	2,4
Anderer Bergbau**	—	1,0	2,7	3,0
Andere	—	6,0	4,8	4,8
<b>Summe</b>	—	1,7	1,8	2,9
<b>Künstliche Quellen</b>				
Medizinische Anwendungen	0,8	0,6	0,3	0,5
Nuklearindustrie	4,4	3,7	1,8	1,0
Andere Industrien	1,6	1,4	0,5	0,3
Andere	1,1	0,6	0,2	0,1
<b>Summe</b>	1,7	1,4	0,6	0,5
* Geschätzte durchschnittliche effektive Dosis pro Beschäftigtem in einem Jahr.				
** Uranbergbau ist in der Rubrik „Nuklearindustrie“ enthalten.				

## UNSCEAR-PUBLIKATIONEN

Seit seiner Gründung hat der Wissenschaftliche Ausschuss der Vereinten Nationen zur Untersuchung der Auswirkungen atomarer Strahlung (UNSCEAR) über 25 maßgebliche Berichte mit mehr als 100 wissenschaftlichen Anhängen veröffentlicht. Diese werden als wichtige Quellen relevanter Auswertungen zur Untersuchung der Strahlenexposition durch Kernwaffenversuche und Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung, medizinische Anwendungen von Strahlung, berufliche Strahlungs- sowie natürliche Quellen geschätzt. Darüber hinaus wertet der Ausschuss auch detaillierte Studien zu strahlungsinduziertem Krebs und strahlungsinduzierten Erbkrankheiten aus und begutachtet die radiologischen Folgen von Unfällen für Gesundheit und Umwelt. Die UNSCEAR-Berichte und wissenschaftlichen Anhänge werden als kostenpflichtige Veröffentlichungen der Vereinten Nationen ([unp.un.org](http://unp.un.org)) sowie gratis als elektronische Dokumente ([unscear.org](http://unscear.org)) zur Verbreitung der Ergebnisse zum Nutzen der UN-Mitgliedstaaten, der wissenschaftlichen Gemeinschaft sowie der Öffentlichkeit herausgegeben.

Rückmeldungen und Kommentare zu dieser Veröffentlichung werden erbeten an:

UNSCEAR-Sekretariat  
Vienna International Centre  
Postfach 500  
1400 Wien, Österreich  
E-mail: [unscear@unscear.org](mailto:unscear@unscear.org)

1955 richtete die Generalversammlung der Vereinten Nationen den Wissenschaftlichen Ausschuss der Vereinten Nationen zur Untersuchung der Auswirkungen atomarer Strahlung [United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)] mit der Aufgabe ein, Informationen zu den Höhen und den Auswirkungen ionisierender Strahlung zu sammeln und auszuwerten.

Dies erfolgte als Reaktion auf Bedenken hinsichtlich der Effekte ionisierender Strahlung auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt, da zu jener Zeit der radioaktive Niederschlag von oberirdischen Kernwaffenversuchen die Menschen über Luft, Wasser und Lebensmittel erreichte. Der erste UNSCEAR-Bericht schuf das wissenschaftliche Fundament, auf dem 1963 das Atomteststoppabkommen mit dem darin enthaltenen Verbot oberirdischer Kernwaffenversuche ausgehandelt wurde.

Diese Publikation soll den aktuellen Wissensstand in Bezug auf Strahlungshöhen und -wirkungen auf allgemein verständliche Weise darstellen. Sie basiert auf den wissenschaftlichen Berichten von UNSCEAR, die als Hauptinformationsquelle gedient haben.



UNEP