



# Strahlenschutz heute – Erfolge, Probleme, Empfehlungen für die Zukunft

Rolf Michel, Bernd Lorenz, Hansruedi Völkle

## 1. Einführung

In weiten Kreisen des Strahlenschutzes wurde in den letzten Jahren ein Unbehagen über die gegenwärtige Situation des Strahlenschutzes geäußert. Dies betrifft sowohl fachliche Aspekte des Regelwerkes und dessen Umsetzung als auch – in besonderem Ausmaße – die Wahrnehmung von Radioaktivität, Strahlung und Strahlenschutz durch die Gesellschaft. Der Fachverband für Strahlenschutz für Deutschland und die Schweiz (FS) hat deshalb eine Arbeitsgruppe damit beauftragt, Grundsatzfragen des Strahlenschutzes zu diskutieren und Empfehlungen für die zukünftige Entwicklung des Strahlenschutzes auszuarbeiten. Das Ergebnis der Diskussionen ist dieses vom Direktorium des Fachverbandes für Strahlenschutz verabschiedete Positionspapier.

Das Positionspapier ist wie folgt gegliedert: Nach der Einleitung folgen im zweiten Kapitel die **„Empfehlungen für die zukünftige Entwicklung des Strahlenschutzes“**, thesenhaft zusammengefasst. Die Veranlassung zu den Empfehlungen wird dann in den folgenden drei Kapiteln erläutert und begründet.

Im dritten Kapitel **„Geschichte des Strahlenschutzes – der Weg zu mehr Sicherheit“** wird die Entwicklung des Strahlenschutzes unter dem Fokus Sicherheit dargestellt. Die historische Betrachtung des Strahlenschutzes belegt eine Erfolgsgeschichte. Strahlenschutz ist die Grundlage zum sicheren Umgang mit Radioaktivität und Strahlung zum Wohle des Menschen. Angesichts der Schädigungen, die von Radioaktivität und Strahlung ausgehen können, wird guter Strahlenschutz auch in der Zukunft erforderlich sein. Strahlenschutz soll als Teil einer umfassenderen Sicherheitskultur verstanden und gelebt werden, um damit Sicherheit schaffen.

Im vierten Kapitel **„Die natürliche Strahlung und deren Risiken – eine Referenzgröße für den Strahlenschutz“** werden die natürliche Strahlenexposition und deren örtliche und zeitliche Variation als Referenzgröße für die Beurteilung zusätzlicher Strahlenexpositionen aus menschlichen Tätigkeiten vorgestellt. Natürliche Radioaktivität und Strahlung sind allgegenwärtig und zum großen Teil unvermeidbar. Das durch sie bedingte Strahlenrisiko, sei es nur hypothetisch oder auch epidemiologisch quantifizierbar, ist ein naturgegebener Bestandteil der menschlichen Lebensbedingungen. Dieser unvermeidliche Anteil der

natürlichen Strahlenexposition setzt den Bemühungen des Strahlenschutzes um Senkung von Dosen und Risiken eine natürliche untere Grenze. Die Reduzierung einzelner Beiträge zur Strahlenexposition weit unterhalb dieser natürlichen Grenze ist unverhältnismäßig, vergeudet Ressourcen und trägt eher zur Verunsicherung der Menschen bei. Das, was zählt, ist immer die gesamte Dosis, die eine einzelne Person erhält.

Im fünften Kapitel „**Das Unbehagen der Strahlenschützer<sup>1</sup> – Empfehlungen für die Zukunft**“ werden die das allgemeine Unbehagen der Strahlenschützer verursachenden Probleme analysiert und diskutiert. Es werden Thesen als Grundlage für die zukünftige Ausgestaltung guten Strahlenschutzes aufgestellt und Empfehlungen zu dessen Weiterentwicklung ausgesprochen und begründet.

Ein Entwurf dieses Positionspapiers wurde zunächst den Mitgliedern des Fachverbandes für Strahlenschutz zur Diskussion und Kommentierung vorgelegt. Die Rückmeldungen der Mitglieder des FS waren ganz überwiegend äußerst positiv. Die umfangreichen editorischen und inhaltlichen Kommentare wurden dann von der Arbeitsgruppe in der Erstellung des Positionspapiers weitgehend berücksichtigt.

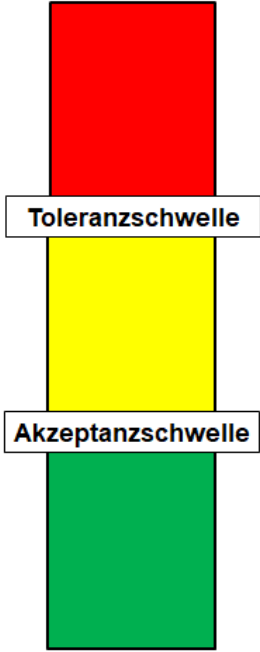
In einem nächsten Schritt soll dieses Positionspapier als Publikation des FS in einer internationalen Fachzeitschrift veröffentlicht und damit auch den internationalen Organisationen, z.B. der IRPA und der ICRP, zur Diskussion vorgestellt werden.

## 2. Empfehlungen für die zukünftige Entwicklung des Strahlenschutzes

<b>Strahlung und Strahlenrisiko</b>	
Sicherheit statt Risiko	Strahlenschutz vermittelt Sicherheit und baut Risiken und Ängste ab.  Strahlenschützer sorgen für Sicherheit beim Umgang mit Strahlung und Radioaktivität. Sie haben Erfahrung, kennen ihr Metier und bilden sich regelmäßig weiter. Sie bemühen sich um Neutralität und Objektivität. Sie setzen sich dafür ein, dass das Regelwerk des Strahlenschutzes, die Schutzmaßnahmen und das Vorgehen transparent und auch für den Laien verständlich und nachvollziehbar sind.
<b>Strahlendosen, Strahlenwirkung und Grenzwerte</b>	
Gesamtdosis statt Dosiskomponenten angeben	Wenn immer möglich sollen Gesamt-Dosen angegeben und im Hinblick auf die Strahlenwirkungen und die Strahlenrisiken in einer ganzheitlichen Sichtweise bewertet werden; also insbesondere im Vergleich zur natürlichen Strahlung – mit ihren örtlichen und zeitlichen Variationen.
Klare Angaben bei Dosen	Wichtig bei der Kommunikation mit der Bevölkerung sind klare und verständliche Aussagen, daher ist Vorsicht bei hypothetischen Dosen und berechneten, hypothetischen Todesfällen geboten. Dies betrifft insbesondere die Dosiswerte; also  – ob diese gemessen oder berechnet wurden oder nur prognostizierte Werte sind,

<sup>1</sup> Wenn wir hier aus Gründen der Lesbarkeit der Texte immer nur von den Strahlenschützern in der männlichen Form sprechen, sind natürlich immer auch die vielen im Strahlenschutz tätigen Frauen mit einbezogen.

	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ob sie unter realistischen oder konservativen Annahmen bestimmt wurden,</li> <li>– ob sie reale Dosen sind, die Menschen erhalten, oder hypothetische Dosen sind, d.h. Dosen die ein Mensch möglicherweise irgendwann erhalten könnte,</li> <li>– ob es die gesamte Dosis oder nur ein Teil der Dosis ist,</li> <li>– ob es sich um effektive oder Organ-Äquivalentdosen oder um Energiedosen handelt.</li> </ul> <p>Berechnungen von hypothetischen Dosisbeiträgen sind ein reines Planungsinstrument und geben nicht eine tatsächliche Dosis wieder. Hypothetische Dosisbeiträge sind daher klar als solche zu bezeichnen. Meist haben sie auch eine erhebliche Unsicherheit, die – wo sinnvoll möglich – angegeben werden sollte.</p>
Kein Missbrauch der Kollektivdosis	Die Kollektivdosis ist ein wertvolles Instrument für die Optimierung des Schutzes einer abzählbar definierten Personengruppe, nicht aber ein Werkzeug zur Berechnung von hypothetischen Krankheits- oder Todesfällen. Die ICRP warnt vor der Berechnung von hypothetischen Toten im niedrigen Dosisbereich <i>"It is not appropriate, for the purpose of public health planning, to calculate the hypothetical number of cases of cancer or heritable disease that might be associated with very small radiation doses received by large numbers of people over very long period of time."</i> (ICRP103 (2007), p.51.
LNT-Hypothese und multiplikatives Risiko-Modell	Das LNT-Modell muss besser erläutert werden, vor allem bezüglich der Unsicherheit der darauf basierenden Aussagen, und dass dieses möglicherweise das Risiko im niedrigen Dosisbereich überschätzt, dass es aber beim heutigen Wissensstand für den Strahlenschutz praktisch und zweckmäßig ist. Ebenso muss das multiplikative Dosis-Risiko-Modell (basierend auf einem linear-quadratischen Ansatz) besser erläutert werden, insbesondere sein Bezug zum spontanen Krebsrisiko und dessen Variabilität.
ALARA soll konsequent angewendet werden	Hier muss der <i>«social and economic»</i> -Grundsatz im ALARA-Prinzip in den verschiedenen Expositionssituationen konsequent beachtet werden, wie auch dessen Umsetzung in andern Kulturen und Gesellschaften.
Dose constraints etc.	Das System von Grenz-, Richt-, Eingreifwerten, Constraints etc. ist zu komplex und nicht allgemein kommunizierbar. Strahlenschutzgrößen und damit die Dosen sollen für die Gesellschaft und auch für Politiker, Entscheidungsträger, Lehrer und Journalisten als Multiplikatoren verständlich und nachvollziehbar sein. Diese sollen Sicherheit vermitteln und nicht verunsichern. Für die Kommunikation sollte deswegen systematisch ein Ampelmodell angewendet werden, das von jedermann verstanden wird.

<p>Ein Ampelmodell des Strahlenschutzes als Mittel der Kommunikation</p>	 <p>Die <b>Toleranzschwelle</b> entspricht dem Risiko beim Grenzwert der Dosis in geplanten Expositionen oder dem oberen Referenzwert in bestehenden und Notfallexpositionssituationen. Expositionen oberhalb der Toleranzschwelle werden als nicht tolerierbar oder inakzeptable angesehen.</p> <p>Im <b>gelben Bereich</b> gelten Expositionen als tolerierbar, wenn alles zu ihrer Reduzierung getan wird unter Berücksichtigung der gesellschaftlichen und ökonomischen Gegebenheiten: ALARA. Zur Klarstellung: Optimierung bedeutet Reduzierung unter Nebenbedingungen.</p> <p>Die <b>Akzeptanzschwelle</b> entspricht dem Risiko des unvermeidbaren Anteils der natürlichen Strahlenexposition. Bei zusätzlichen Dosen kleiner als 10% der Akzeptanzschwelle gelten Gesamtdosen als akzeptabel. Angesichts der natürlichen Variabilität der unvermeidlichen Dosis gilt 10% der akzeptablen Dosis als triviale Dosis.</p>
<p>Grenzwerte nicht weiter senken</p>	<p>Eine weitere Senkung von Grenzwerten ist aus heutiger Sicht nicht sinnvoll, weil die Grenzwerte schon heute nicht mit den von der Natur vorgegebenen Dosiswerten im Einklang sind. Die bestehenden Dosisgrenzwerte bieten nach aktuellem Stand der Wissenschaft einen hohen Schutz. Zu niedrige Grenzwerte würden hingegen ein falsches Gefühl der Gefährlichkeit vermitteln.</p>
<p>Radon einheitlich regeln</p>	<p>Beim Radon haben die internationalen Strahlenschutzgremien ihre Aufgabe nicht erfüllt: Mit Naturgegebenem, mit dem die Menschheit seit jeher lebt, werden nun in der Bevölkerung Ängste und Unsicherheiten ausgelöst. So etwas gilt es grundsätzlich zu vermeiden! WHO, ICRP, IAEA und andere Institutionen im internationalen Strahlenschutz müssen sich beim Radon im Wohnbereich auf ein einheitliches und praktikables Vorgehen in Bezug auf die Dosimetrie und ein Schutzkonzeptes mit abgestimmten Regeln einigen, die auch einfach kommuniziert werden können.</p>
<p>Dosis der Augenlinse</p>	<p>Die neuen Regelungen werden als nicht sinnvoll erachtet. In der Praxis führen sie zu unverhältnismäßig hohem Überwachungsaufwand in einer Expositionssituation, bei der mit relativ einfachen Strahlenschutzmaßnahmen hohe Dosen vermieden werden können. Zudem können heute Katarakte der Augenlinse erfolgreich behandelt werden. Die neuen Regelungen zur Begrenzung der Augenlinsendosis sollten daher zurück genommen werden.</p>
<p><b>Praktischer Strahlenschutz</b></p>	
<p>Unnötige Konservativitäten vermeiden</p>	<p>Konservativitäten bei Dosisberechnungen sollten soweit wie möglich vermieden werden und realistische Zahlen für Dosen und Risiken angegeben werden. Die Kumulation von Konservativitäten führt vielfach zu völlig verfälschten Ergebnissen und ist zu vermeiden.</p>
<p>Grundsatz der Rechtfertigung betonen</p>	<p>Nach ICRP 103 soll jede Entscheidung, die die Strahlenexposition verändert, mehr nutzen als schaden. Dieser, auch für die Praxis wichtige Grundsatz (vergl. Tote durch Evakuierungen nach Fukushima) ist auch Laien leicht zu vermitteln und kann helfen, Forderungen nach ungerechtfertigten Maßnahmen im Strahlenschutz abzuwehren.</p>

<p>Optimierung muss eine untere Grenze haben</p>	<p>Die Optimierung ist ein wichtiger Grundsatz im Strahlenschutz; sie muss aber auch eine untere Grenze haben. Optimierung unterhalb von 0,1 mSv/Jahr (für die allgemeine Bevölkerung) bzw. unterhalb 1 mSv/Jahr (für einzelne beruflich Strahlenexponierte) wird in einem praxisnahen operationellen Strahlenschutz nicht als sinnvoll angesehen.</p> <p>Bei der Optimierung im Rahmen der Planung umfangreicherer Arbeiten (Jobs) mit nennenswerter Kollektivdosis (Jobdosis) - zum Beispiel einer größeren Pumpenrevision in einem Kernkraftwerk, an der mehrere Personen beteiligt sind - ist ebenfalls eine Dosis von 1 Personen-mSv/Job als ausreichend niedrig anzusehen.</p>
<p>Grenzen von epidemiologischen Studien aufzeigen</p>	<p>Epidemiologische Studien sind zwar sehr nützlich, haben aber auch ihre Grenzen. Insbesondere im niedrigen Dosisbereich ist deren Aussagekraft beschränkt, einerseits aus Gründen der Statistik und andererseits, weil es auf unserem Planeten praktisch unmöglich ist, eine bei allen anderen möglichen Einflussfaktoren identische Vergleichspopulation zu finden.</p>
<p>Einführung eines Ampelmodells</p>	<p>Der Strahlenschutz lässt sich mit dem Ampelmodell leicht erklären und wird von allen verstanden: Expositionen im ROTEN Bereich sind nicht akzeptabel und erfordern Handeln, insbesondere wenn Grenzwerte verletzt sind. Der GELBE Bereich ist der Bereich der Optimierung – unter Berücksichtigung der genaueren Umstände. Expositionen im GRÜNEN Bereich gelten als akzeptabel und erfordern kein Handeln.</p>
<p>Mehr Vernunft walten lassen</p>	<p>Die Strahlenschützer sollten nicht nur formalistisch dem Regelwerk folgen. Bei der Umsetzung sollten sie, basierend auf Ausbildung und Erfahrung und unter Anwendung des gesunden Menschenverstands, sinnvoll und angemessen vorgehen. Der Strahlenschützer darf sich nicht zum sturen Vollzugsbeamten degradieren lassen, dem es nur noch um die Einhaltung von Vorschriften geht und nicht um den Schutz vor wirklichen Bedrohungen. Die Erfahrungen der Strahlenschutzpraktiker sollen bei der Erarbeitung von Richtlinien und Schutzkonzepten mehr einbezogen werden und es sollten Ermessensspielräume definiert werden. Es müssen Ressourcen zur Verfügung gestellt werden, damit alle im Strahlenschutz handelnden Akteure hinreichend aus- und weitergebildet werden, um eine sinnvolle und angemessene Umsetzung des Strahlenschutzes vornehmen zu können.</p>
<p>Messungen richtig interpretieren</p>	<p>Die Messtechnik hat in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte gemacht. So können heute selbst Bruchteile eines Bq pro Volumeneinheit genau gemessen werden. Jedoch ist alles, was messtechnisch nachweisbar ist, nicht auch sicherheitsrelevant. Eine hohe Messempfindlichkeit macht Sinn, wenn es darum geht, an wenigen Standorten in einem Land gewisse Messgrößen möglichst genau zu erfassen, um auch geringfügige, langfristige Trends und Veränderungen zu dokumentieren.</p>
<p><b>Bewältigung von Notfallsituationen</b></p>	
<p>Notfallsituationen</p>	<p>Die Information der Bevölkerung in Notfallexpositionssituationen ist verbesserungsbedürftig. Dies gilt auch für die Notfallvorsorge. Die Information muss verständlicher und nachvollziehbarer werden, insbesondere in den folgenden Bereichen: beim Krisenmanagement, beim Schutzkonzept, bei den dynamischen Eingreif- und Richtwerten und bei der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit in der Bewältigung eines Ereignisses. Die Betroffenen, Personen aus der Bevölkerung, Mitarbeiter und Einsatzkräfte, müssen zeitnah über Ursache, Verlauf und Auswirkungen eines Ereignisses sowie über die Überwachung der Auswirkungen und über das Schutzkonzept informiert werden. Der medizinischen und psychologischen Betreuung sowie der</p>

	Unterstützung der Betroffenen muss im Hinblick auf die nicht-radiologischen Folgen und deren Bewältigung, sowohl bei der Planung als auch bei der Organisation, wesentlich mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden.
Flexibilität bei Ereignissen	Bereits in der Notfallvorsorge und erst recht im Fall eines radiologischen Ereignisses muss der Bevölkerung das System von flexiblen Referenz- und Eingreifwerten verständlich nahegebracht werden. Im Ereignis muss dieses länderübergreifend abgestimmt und entsprechend dem Verlauf und der Entwicklung eines Ereignisses angepasst werden, um eine schrittweise Rückkehr zur Normalität zu ermöglichen.
Umgang mit Strahlenangst	Die Entwicklung einer Strategie für den Umgang mit der Angst vor Strahlung ist notwendig. Strahlenangst macht oft mehr krank als die Strahlung selbst. Auch für die Bewältigung von nicht-radiologischen Folgen eines Ereignisses (posttraumatische Belastungsstörungen) müssen Maßnahmen und ein entsprechendes Kommunikations- und Aufklärungskonzept erarbeitet werden. Nach Tschernobyl und in noch größerem Ausmaß nach Fukushima wurden die nicht-radiologischen Auswirkungen massiv unterschätzt und zu wenig systematisch erfasst. Möglicherweise waren sie gar grösser als die rein strahlenbedingten Auswirkungen.
<b>Kommunikation und Information der Bevölkerung</b>	
Kommunikation professionell gestalten	Im Bedarfsfall sollten professionelle Medienverantwortliche im Namen ihrer Institutionen die Presse zeitnah informieren und dazu mit den zuständigen Behörden und andern Fachstellen direkt vernetzt sein. Dadurch sollte vermieden werden, dass selbsternannte Experten den Fachleuten zuvorkommen. Im Ernstfall ist es wichtiger, rasch mit vorläufigen Ergebnissen von begrenzter Genauigkeit zu informieren, als zu spät aber mit hoher Genauigkeit und Sicherheit. Die ehrliche Aussage, dass es sich bei einem Ernstfall oft erst um vorläufige Einschätzungen und Resultate handelt und das weitere Abklärungen laufen, macht die Strahlenschutzfachleute bei der Bevölkerung deswegen nicht unglaubwürdig; im Gegenteil, sie lässt die Bevölkerung Einsicht nehmen in das Vorgehen bei der Aufarbeitung und Bewältigung eines radiologischen Ereignisses.
Präsenz in den Medien und bei der Ausbildung	In den Medien muss die Präsenz des Strahlenschutzes verstärkt werden. Es gibt zwar viele für Wissenschaftler ausgelegte Studien, Publikationen und Fachzeitschriften, die aber in den Medien wenig Beachtung erhalten. Es bedarf einer Strategie, um die Glaubwürdigkeit von Strahlenschutzfachleuten bei Medien, den Behörden und in der Öffentlichkeit zu verbessern. Ein Minimum an Kenntnis über Radioaktivität und Strahlung, vermittelt durch die Schulbildung, würde eine sachliche und objektive Information der Bevölkerung wesentlich erleichtern.
Fachausbildung	Der Beruf der Strahlenschutzfachperson muss mit mehreren Qualifikationsstufen attraktiver gemacht werden. Das Aus- und Weiterbildungsangebot ist auszubauen und zu verbessern. Entsprechende Lehrstühle an Hochschulen und Universitäten sind einzurichten.
Umgang mit selbsternannten «Experten»	Es bedarf einer Strategie, wie mit selbsternannten «Experten» umzugehen ist. Das Ziel muss sein, dass sich die Strahlenschutzfachleute mit ihrer Erfahrung und Kompetenz diesen gegenüber glaubhaft bei Medien und Bevölkerung durchsetzen können und auch als kompetente Fachleute wahrgenommen werden. Medientraining und Argumentationsschulung sollten Bestandteil der Ausbildung werden.

### **3. Geschichte des Strahlenschutzes – der Weg zu mehr Sicherheit**

#### **3.1 Zusammenfassung**

Im Laufe einer mehr als hundertjährigen Geschichte wurden die Gefahren und Risiken, die von ionisierender Strahlung und Radioaktivität ausgehen, gut untersucht, so dass heute eine solide und belastbare Grundlage für ein international anerkanntes System des Strahlenschutzes zur Verfügung steht. Dieses basiert auf den Strahlenschutzgrundsätzen der Rechtfertigung, der Optimierung und der Begrenzung von Expositionen und hat größtmögliche Sicherheit für die beruflich Exponierten und auch für die übrige Bevölkerung geschaffen. Es bedarf jedoch permanenter Anstrengungen der Strahlenschutzfachleute, um guten Strahlenschutz durchzusetzen, das System zukunftsfähig weiter zu entwickeln und seine Inhalte den Beschäftigten, der Bevölkerung und den Entscheidungsträgern zu vermitteln.

#### **3.2 Die frühen Jahre und die Auswirkungen der Kernwaffen**

Vor nunmehr mehr als 120 Jahren wurden die Röntgenstrahlung und die Radioaktivität entdeckt. Schnell wurden die Möglichkeiten dieser Phänomene für die medizinische Diagnostik und die Therapie erkannt und ihre Anwendungen verbreiteten sich rasant. Bereits ein Jahr nach der Entdeckung der Röntgenstrahlung erschienen Berichte über Schäden nach hohen Expositionen (CLARKE und VALENTIN 2009). Zuerst war nur die Rede von Erythemen und einer „Röntgen-Dermatitis“, aber dann wurde bald klar, dass diese in Krebserkrankungen ausarten konnten und eine tödliche Gefahr darstellten, der sich Mediziner und andere Wissenschaftler, aber auch Unternehmen, die diese Phänomene marktwirtschaftlich nutzten, stellen mussten. Manche von ihnen wurden infolge ihrer Arbeit mit Röntgenstrahlung und mit der Strahlung des Radiums zu Märtyrern (MOLINEUS et al. 1992). Auch in der technischen Arbeitswelt wurden die Gefahren, die von unsachgemäßem Umgang mit Radionukliden ausgehen, deutlich. Zifferblattmalerinnen, die in den 1920er Jahren ohne Schutzmaßnahmen Zifferblätter mit Radium bemalten und als Folge des Anspitzens der Pinsel mit den Lippen, Radium in großem Maße inkorporierten, wurden Opfer von Knochenkrebs (MARTLAND et al. 1925, HARRISON und MARTLAND 1931, EVANS 1933, FRY 1998).

Genetische Wirkungen ionisierender Strahlung wurden in Tierversuchen an der Fruchtfliege (*Drosophila melanogaster*) in den 1920er Jahren durch Muller nachgewiesen (MULLER 1927), der für diese Entdeckung 1946 den Nobelpreis für Physiologie erhielt. Die biologischen Auswirkungen ionisierender Strahlung rückten nach dem zweiten Weltkrieg in den Fokus der breiten Öffentlichkeit. Zwar waren auch während des Manhattan-Projektes umfangreiche Erfahrungen mit biologischen Strahlenwirkungen gesammelt worden, die aber geheimgehalten wurden. Es waren die Folgen der Atombombenexplosionen von Hiroshima und Nagasaki, die dazu führten, dass die gesundheitlichen Aspekte einer Strahlenexposition allgemein bekannt wurden. Die Überlebenden berichteten vom akuten Strahlensyndrom, der Strahlenkrankheit. Außerdem gab es die Befürchtung aufgrund der Ergebnisse von Tierversuchen, dass genetische Schäden bei den Nachkommen der Überlebenden auftreten könnten. Erste epidemiologische Untersuchungen ab 1947 durch die *Atomic Bomb Casualty Commission* (ABCC) an den Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki bestätigten diese Befürchtungen jedoch nicht. Bis heute wurden genetischen Schäden, die man sehr wohl im Tierversuch sieht, am Menschen nicht beobachtet.

Aber ein anderes Problem wurde bei diesen Untersuchungen erkannt. Bei den Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki traten zuerst gehäuft Leukämien und später dann auch solide Tumoren auf. Dies gab Anlass, die *Life Span Study* (LSS) zu initiieren, in der die Überlebenden aus Hiroshima und Nagasaki in Bezug auf das Auftreten von Krebs und Leukämie untersucht werden. Heute stellen die Ergebnisse der von der *Radiation Effects Research Foundation* (RERF) durchgeführten LSS das wichtigste Datenmaterial über

gesundheitliche Effekte nach externer Ganzkörperbestrahlung durch Gammastrahlung und Neutronen dar. Tab. 1 fasst die Ergebnisse der LSS für die Jahre 1950 bis 2003 zusammen.

**Table 1:** Späte stochastische Effekte der Atombombenexplosionen in Hiroshima und Nagasaki im Zeitraum von 1950 bis 2003 (für Leukämie 1950 bis 2000); OZASA et al. (2012); RICHARDSON et al. (2009).

	Leukämie	Solide Tumoren	Nicht-Krebs- erkrankungen <sup>#)</sup>	Alle Ursachen
Anzahl der Todesfälle	310*)	10 929	35 685	50 620
Anzahl der Exzessfälle durch Strahlung aus den Bombenabwürfen	103	527	353	983
Der Strahlung zuschreibbarer Anteil	33 %	4,8 %	1,0 %	1,9 %

\*) Im Jahr 2003 belief sich die Anzahl aller Leukämien auf 318.

#) Erkrankungen des Herz-Kreislaufsystems, der Atemwege und des Magen-Darm-Traktes,

GRANT et al. (2017) haben die Studien-Kohorte in Bezug auf die Bildung und Entstehung von soliden Tumoren für den Zeitraum 1958 bis 2009 neu ausgewertet. Die LSS Kohorte umfasst 105 444 Personen, von denen für 80 205 Personen individuelle Dosiswerte nach der Dosimetrie DS02R1 vorlagen. Als Kontrollgruppe dienten die restlichen 25 239 Personen, die sich zum Zeitpunkt der Explosionen nicht in Hiroshima oder Nagasaki befanden. Insgesamt lagen für die Neuauswertung die Daten für 3 079 484 Personenjahre im Zeitraum 1958 – 2009 vor. In diesem Zeitraum konnten in 22 538 Fällen bösartige Tumoren beobachtet werden, von denen 992 der Strahlenwirkung zugeordnet wurden. Für Frauen wurde eine lineare Dosis-Wirkungsbeziehung beobachtet mit einem ERR 1 Gy = 0,64 Gy<sup>-1</sup> (95 % CI: 0,52 – 0,77). Für Männer fand man eine linear-quadratische Wirkungsbeziehung mit einem ERR 1 Gy = 0,20 Gy<sup>-1</sup> (95 % CI: 0,12 – 0,28) bei 1 Gy und einen ERR 0,1 Gy = 0,01 Gy<sup>-1</sup> (95 % CI: -0,0003 – 0,021) bei 0,1 Gy.

Anmerkung: Das Excess Relative Risk (ERR) quantifiziert die Erhöhung des Krebsrisikos gegenüber dem spontanen Krebsrisiko. Das Confidence Interval (CI) gibt den Bereich an, in dem bei Wiederholungsexperimenten mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, dem Konfidenzniveau, ein Ergebnis erwartet wird.

Dem Zweiten Weltkrieg folgte der kalte Krieg mit knapp 1 400 Kernwaffentests, von denen bis 1963 etwa 500 Testexplosionen mit einer gesamten Sprengkraft von mehr als 400 Mt (Megatonne) TNT-Äquivalent in der Atmosphäre stattfanden.

Dabei blieben hohe Strahlenexpositionen auf die nähere Umgebung der Explosionsorte beschränkt (IAEA 2005). Gesundheitliche Effekte an den in der Nähe von Explosionsorten lebenden Menschen blieben weitgehend geheim und wurden erst in den 1990er Jahren öffentlich; z.B. HILLE (1988) und IAEA (1998, 2005). Einzige Ausnahme war der Besatzung des japanischen Fischerbootes Fukuru Maru, die nach der ersten Explosion einer Wasserstoffbombe (Castle Bravo, 28.02.1954, Bikini, 15 Mt TNT) in massiven Fallout geriet und von der einige am akuten Strahlensyndrom litten, wobei ein Besatzungsmitglied daran starb.

Global bewirkten die oberirdischen Kernwaffenexplosionen und die weltweite Kontamination keine nachweisbaren gesundheitlichen Schäden (UNSCEAR 2000). Auf der stärker von



Fallout betroffenen Nordhalbkugel blieben die Strahlenexpositionen gering, in der Schweiz führten beispielsweise die Folgedosen bis zum Jahr 1985 zu 1,2 mSv (VÖLKLE 1985).

Anmerkung: UNSCEAR (1982) gab eine Folgedosis von 4,5 mSv an, da man Expositionen durch  $^{14}\text{C}$  über Zeiträume weit über die Lebenszeit des Menschen hinaus extrapoliert hatte. Diese unsinnige Konservativität wurde erst im Bericht aus dem Jahr 2000 korrigiert.

Schon während des Manhattan-Projekts und auch in militärischen Forschungseinrichtungen anderer Staaten kam es zu Vorfällen und Unfällen, die zu hohen, teilweise tödlichen Strahlendosen der Beschäftigten führten. Auch diese blieben weitgehend und lange geheim. (UNSCEAR 2008b)

Hierzu gehören auch die Arbeitsbedingungen mit erhöhten externen und internen Strahlenexpositionen und die Unfälle im sowjetischen Atomkomplex Majak. Nach ersten Hinweisen in der westlichen Literatur (Medvedev 1976, 1977, MEDWEDJEW 1979; in den 1980er Jahren wurden erst nach der Perestroika und dem Fall des Eisernen Vorhangs die Einzelheiten von drei großen radiologischen Ereignissen in den Jahren 1950, 1957 und 1967 bekannt.

Durch Angaben des Kurtschatow-Instituts in Moskau und des Instituts für Radiologie in Obninsk wurden im Jahr 1992 die Einzelheiten der Unfälle mit Radioaktivitätsfreisetzung im Plutonium-Produktionskomplex Majak 1950 – 1967 bekannt:

- 1950 Radioaktivitätsfreisetzung: keine Angabe über Menge, oder Zusammensetzung; größte Kontamination am Fluss Tschaja; 1951 kein Notfallmanagement; keine Umwelttechnik; keine Erfahrung mit radioaktiven Abfällen. Es gab 935 Fälle von Strahlenkrankheit; 6 000 Menschen wurden im Zeitraum von 6 Jahren evakuiert. Seit 1950 wurden 17 200 Menschen untersucht: Zunahme der Leukämie um 41 %; Zunahme des Mortalitätsindex um 17 bis 24 %.
- 1957 Explosion eines Lagerbehälters mit radioaktivem Abfall in der militärischen Anlage von Kyshtym; Freisetzung von 20 Mio. Ci<sup>2</sup> =  $7,4 \times 10^{17}$  Bq verschiedener Radionuklide (bei Tschernobyl waren es 50 Mio. Ci =  $1,85 \times 10^{18}$  Bq), betroffen waren die Städte Cheliabinsk, Sverdlovsk und Tjumen.
- 1967 im See Karatschai wurden 120 Mio. Ci =  $4,4 \times 10^{18}$  Bq radioaktiver Abfall versenkt. Im Sommer 1967 kam es zur Freisetzung von 6000 Ci =  $2,2 \times 10^{14}$  Bq aus dem witterungsbedingt ausgetrockneten Seebett durch einen Wirbelsturm.

Epidemiologische Untersuchungen der Strahlenexpositionen der Beschäftigten im Majak-Atomkomplex und der Bevölkerung entlang des Tschaja-Flusses sowie die sich daraus ergebenden gesundheitlichen Folgen stellen heute eine wichtige Grundlage zur Beurteilung externer und interner Strahlenexposition bei niedrigen Dosen<sup>3</sup> dar (DAVIS et al. 2015, KRESTININA et al. 2005, 2013, NAIR et al. 2009, SCHONFELD et al. 2013, TAO et al. 2012).

Es gab in der Vergangenheit Unfälle mit deterministischen Schäden bei Beschäftigten und der Bevölkerung (UNSCEAR 2008b Annex C, ORTIZ et al. 2000, VÖLKLE 2015) und man wird sie auch in der Zukunft nicht ausschließen können. Schuld sind menschliches und technisches Versagen. Vermeidbar sind sie nur durch einen hohen technischen Sicherheitsstandard und einen guten Strahlenschutz – was wir als Strahlenschutzkultur bezeichnen.

---

<sup>2</sup> Ci (Curie) ist die alte, nicht mehr gültige Einheit für die Radioaktivität: 1 Ci =  $3,7 \times 10^{10}$  Bq.

<sup>3</sup> Was hier unter „niedrigen Dosen“ zu verstehen ist, ist in Kap. 5.4. unter „Sprachregelung“ definiert

Ein besonderes Problem stellen verlorene oder nicht sachgerecht entsorgte Strahlenquellen dar. Eklatant war das radiologische Ereignis von Goiânia im brasilianischen Bundesstaat Goiás (IAEA 1988). Eine  $^{137}\text{Cs}$ -Radiotherapieeinrichtung war aus einer verlassenen Therapiepraxis entwendet worden und wurde zu einem Schrottplatz verbracht und dort zerlegt. Die darin enthaltene hochradioaktive Strahlenquelle wurde zerstört, die Radioaktivität freigesetzt. Es kam zu umfangreichen Kontaminationen, . 50 Menschen wurden hoch kontaminiert und 4 Personen starben.

### 3.3 Schwere Unfälle in Kernanlagen

Von besonderer Bedeutung für Erkenntnisse über die gesundheitlichen Effekte von Strahlung und ihre Wahrnehmung durch die allgemeine Bevölkerung sind die Reaktorunfälle von Three Miles Island (TMI) im Jahr 1979, Tschernobyl im Jahr 1986 und Fukushima Dai-ichi im Jahr 2011. Gleichzeitig sind diese Unfälle von fundamentaler Bedeutung für die verzerrte Wahrnehmung von Kernenergie und biologischer Strahlenwirkung in der Bevölkerung, offenbar besonders deutschsprachiger Länder; z.B. (MICHEL 2015).

Aufgrund mangelhafter Leittechnik und menschlicher Fehler kam es in Block 2 der Anlage in Three Miles Island (TMI) nahe Harrisburg/USA am 28.3.1979 als Folge eines „kleinen“ Lecks im Primärkreislauf zu einer Kernschmelze. Das Containment blieb aber intakt, so dass die meisten Spaltprodukte aufgrund ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften im Containment verblieben oder von Filtern zurückgehalten wurden. Nur kurzlebige Spaltprodukte wie  $^{131}\text{I}$  (8,02 Tage HWZ) und  $^{133}\text{Xe}$  (5,25 Tage HWZ) entwichen über einen anfangs nicht erkannten Weg aus dem Hilfsanlagegebäude in die Umwelt. Es wurden weniger als  $10^{12}$  Bq  $^{131}\text{I}$  freigesetzt. Die durchschnittliche Dosis für Personen, die innerhalb eines 10 Meilen-Radius um das Kraftwerk lebten, lag bei 0,08 mSv. Die Maximaldosis für einzelne Personen lag bei 1 mSv. In mehreren Untersuchungen wurde nach gesundheitlichen Effekten des Unfalls von TMI gesucht. Es konnten keine strahlenbedingten Effekte gefunden werden (HATCH et al. 1991; LEVIN 2008), sehr wohl aber psychische Auswirkungen als Folge von Angst und Verunsicherung (DOHRENWEND et al. 1981). Hinzu kamen Schäden als Folge angeordneter Evakuierungsmaßnahmen vor allem bei Schwangeren und Kindern.

Im Zusammenhang mit dem Unfall von TMI und dem kurz vor dem Unfall angelaufenen Film „Das Chinasyndrom“ wurden Begriffe wie „Chinasyndrom“, „GAU“ und „Super GAU“ zu stehenden Ausdrücken für nukleare Desaster, auch wenn TMI tatsächlich kein Desaster im Hinblick auf gesundheitliche Folgen war. Es war ein auslegungsüberschreitendes Ereignis mit relativ geringen Freisetzungen und Strahlenexpositionen ohne gesundheitliche Folgen für Beschäftigte oder Bevölkerung.

Anmerkung: Der Ausdruck GAU wird meist falsch verstanden: GAU ist der Auslegungsstörfall, also der größte angenommene Unfall, den die Sicherheitsvorkehrungen der Anlage noch beherrschen sollte.

Am 26.4.1986 explodierte Block 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl in der heutigen Ukraine. Im Rahmen eines Experimentes kommt es zu einem unkontrollierten Leistungsanstieg aufgrund von inhärenten Sicherheitsmängeln dieses Reaktortyps sowie von Designmängeln, Managementfehlern und menschlichem Fehlverhalten. Der Reaktorkern lag offen, und es kam zu einem Graphitbrand und zur Schmelze des restlichen Kerns. Insgesamt wurden  $5,3 \times 10^{18}$  Bq freigesetzt.

Kurzfristig wurden ca. 115 000 Menschen evakuiert. Die Evakuierten erhielten Schilddrüsendosen von bis zu einigen Gy und effektive Dosen von bis zu einigen zehn mSv. Die nicht Evakuierten in den hoch kontaminierten Gebieten erhielten die höchsten Strahlenexpositionen. Von 134 Unfallhelfern mit akutem Strahlensyndrom (ARS = Acute Radiation Syndrome; diese treten ab etwa 2 Gy auf) starben 28 unmittelbar nach dem

Ereignis durch ARS. Von mehr als 500 000 Aufräumarbeitern, meist als Liquidatoren bezeichnet, erhielten 1986 etwa 300 000 mittlere effektive Dosen von 146 mSv, im Jahr 1987 wurden etwa 138 000 Arbeiter noch mit 96 mSv exponiert. In den hoch kontaminierten Gebieten Weißrusslands, der Ukraine und der Russischen Föderation erhielten Kinder Schilddrüsensdosen von bis zu einigen zehn Gy, da keinerlei Notfallschutzmaßnahmen (etwa die Abgabe von KI-Tabletten oder Verhaltensempfehlungen) durchgeführt wurden. In Deutschland bleiben die Schilddrüsensdosen bei Kindern unter 10 mSv, effektive Lebenszeitdosen liegen zwischen 0,6 mSv und 2,2 mSv (SSK, 2006). Für die Schweizer Bevölkerung wurde auf der Basis von Messungen eine durchschnittliche zusätzliche Lebenszeitdosis von 0,5 mSv errechnet, davon 0,2 mSv im ersten Jahr nach der Katastrophe (HUBER et al, 1996). Die Bevölkerung Österreichs wurde im ersten Jahr nach dem Unfall durchschnittlich mit 0,54 mSv exponiert (Mücke 1996).

Fünf Jahre nach dem Unfall wurde ein erhöhtes Auftreten von Schilddrüsenkrebs in den drei meistbetroffenen Ländern Ukraine, Weißrussland und Russische Föderation festgestellt. Bis zum Jahr 1998 wurden 1 096 Fälle von Schilddrüsentumoren bei Kindern, die zum Zeitpunkt des Unfalls unter 15 Jahren waren, beobachtet. Keine erhöhten Schilddrüsenkrebsfälle wurden bei Personen beobachtet, die zum Zeitpunkt des Unfalls bereits erwachsen waren. Es wurde auch kein erhöhtes Auftreten von soliden Tumoren oder Leukämien beobachtet (SSK 2006, UNSCEAR 2000).

Von 1992 bis 2005 zählte man bei denen, die zum Zeitpunkt des Unfalls unter 14 Jahren alt waren, 5 127 Fälle von Schilddrüsenkrebs; bei den unter 18-jährigen waren es 6 848 Fälle. Bis 2005 verstarben 15 dieser Personen. Die Gesamtzahl der Schilddrüsenkrebsfälle stieg von 2006 bis 2015 bei den zum Zeitpunkt des Unfalls unter 18-jährigen weiter kontinuierlich auf bis zu 20 000 an. Schätzungen des strahlenbedingten Anteils liegen bei 25 % bis 60 % für die Jahre 1986 - 2015<sup>4</sup> (UNSCEAR 2017).

Am 11.03.2011 um 14:46 Uhr ereignete sich in Japan ein Erdbeben vor der Küste Tohokus mit der Stärke 9,0. Etwa 1 Stunde nach dem Erdbeben verwüstete ein 7 m – 15 m hoher Tsunami die Küste. Es gab mehr als 20.000 Tote und Vermisste und 380 000 Menschen mussten als Folge von Erdbeben und Tsunami evakuiert werden (UNSCEAR 2014).

Im zu diesem Zeitpunkt nach dem Erdbeben bereits abgeschalteten Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi überflutete und zerstörte der Tsunami die Notstrom-Dieselegeneratoren, das Nebenkühlwasser-Gebäude und die Meerwasser-Einlassbauwerke und führte zu einem vollständigen „Station Black-out“. In der Folge schmolzen die Kerne von drei Reaktorblöcken, da die Reaktoren nicht mehr gekühlt, also die Nachwärme nicht mehr abgeführt werden konnte. Vier Wasserstoffexplosionen zerstörten Reaktorgebäude; ein Containment (Block 2) versagte. Die Freisetzungen von Radioaktivität blieben jedoch deutlich (etwa eine Größenordnung) unter denen des Unfalls von Tschernobyl und waren aufgrund der Bauweise der Siedewasserreaktoren im Wesentlichen auf kurzlebige Edelgase und radioaktive Iod-Isotope sowie <sup>134</sup>Cs und <sup>137</sup>Cs beschränkt. Bereiche der Präfektur Fukushima

---

<sup>4</sup> Originaltext: “By 2005, among those exposed who had been under the age of 14 years in 1986, there were 5,127 cases of thyroid cancer reported between 1991 and 2005 (for those who had been under the age of 18 years in 1986, there were 6,848 cases). By 2005, 15 cases had proved fatal. ... Both the total number of cases and crude incidence rate per 10<sup>5</sup> person years basically increased monotonically during the last decade (2006–2015). The total number of cases of thyroid cancer registered in 1991–2015 in males and females who were under 18 in 1986, for the whole of Belarus and Ukraine and for the four most contaminated Russian Federation regions, approached 20,000 (table 1). This number is 2.9 times higher than the number of thyroid cancer cases registered in the same cohort in the period 1991–2005 [U2]. ... The estimates of the AF (hinzugefügt: AF = attributable fraction) of 0.6 and 0.25 may be considered to be a rough estimate for the whole period from 1986 to 2015.”

und der angrenzenden Präfekturen wurden durch Fallout nennenswert kontaminiert. Bereits frühzeitig wurden 78 000 Personen aus dem 20 km Umkreis evakuiert, später weitere Menschen aus höher kontaminierten Gebieten im Nordwesten der Anlage. Die Schilddrüsendosen lagen unter 50 mSv und die effektiven Lebenszeitdosen der Bevölkerung in der Präfektur Fukushima werden unter 20 mSv bleiben (UNSCEAR 2014).

Es wurden keine deterministischen Schäden bei den Arbeitern oder der Bevölkerung festgestellt; erkennbare stochastische Strahlenschäden wie Krebs oder Leukämie sind nicht zu erwarten (UNSCEAR 2014, WHO 2012, IAEA 2015). Die zum Teil voreilige Evakuierung von insgesamt 146 520 Personen und die langfristigen Lebensumstände der Evakuierung verursachten in der Präfektur Fukushima allerdings mehr als 1000 vorzeitige, nicht-radiologische Todesfälle (Japan Times 20. Februar 2014. <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-accident.aspx>).

Nach großen Reaktorunfällen, wie in Tschernobyl und Fukushima, leiden die Evakuierten und das beim Notfall eingesetzte Personal unter posttraumatischem Stress, sie sind stigmatisiert und werden sozial ausgegrenzt. Hinzu kommen Entwurzelung und der Verlust von Heimat und sozialen Verbindungen durch Evakuierung und Umsiedlung. Die psychischen und sozialen Folgen solcher Unfälle stellen die eigentlichen gesundheitlichen Probleme dar und wurden durch zwar gutgemeinte, aber im nachhinein fragliche Strahlenschutzmaßnahmen möglicherweise verstärkt.

Diese drei Reaktorunfälle machten aber auch in eklatanter Weise klar, dass das Eintreten von Strahleneffekten eine Frage der Dosisleistung ist und von der Gesamtdosis abhängt, die ein Lebewesen akkumuliert. In der Öffentlichkeit wird diese Tatsache im Zusammenhang mit Radioaktivität und Strahlung bisher meist nicht zur Kenntnis genommen. Dies liegt neben der irrationalen Angst vor Strahlung wohl auch daran, dass das Konzept Grenzwerte im Strahlenschutz missverstanden und juristisch in unseren Rechtssystemen ungenügend begründet wird.

### **3.4 Die natürliche Radioaktivität**

Strahlenexpositionen durch natürliche Radioaktivität und Strahlung sowie die von ihnen verursachten gesundheitlichen Effekte rückten erst relativ spät ins Blickfeld des Strahlenschutzes. Bereits in den 1930er Jahren wurde durch RAJEWSKI und Mitarbeiter vermutet, dass die seit dem Mittelalter bekannte Schneeberger Krankheit, ein häufiger Lungenkrebs bei Bergarbeitern, durch Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) verursacht wurde (ZEMAN und KARLSCH 2013). Aber erst Anfang der 1950er Jahre konnte gezeigt werden, dass die Radon-Folgeprodukte im Untertagebau extrem hohe Strahlenexpositionen verursachen und für die Entstehung des Lungenkrebses ursächlich waren (BALE 1951). Epidemiologische Studien belegten in den folgenden Jahrzehnten, dass weltweit viele tausend Lungenkrebsfälle bei Uran-Bergarbeitern durch Radon und Radon-Folgeprodukte verursacht wurden (LUBIN et al. 1995).

Die größte Kohorte von Uranbergarbeitern sind die Beschäftigten der WISMUT AG (ab 1954 SDAG), die nach dem Zweiten Weltkrieg in großem Umfang in Sachsen und Thüringen Uran abbauten. Seit 1946 gab es den Uranbergbau der WISMUT in Sachsen mit bis zu 100 000 Arbeitern. Bis zum Jahr 1990 wurden 5 237 Fälle von Lungenkrebs als beruflich bedingt anerkannt, wobei die Mehrzahl der Erkrankten (98 %) ihre Tätigkeit vor 1955 in den so genannten „wilden Jahren“ der WISMUT begann. Für die Anerkennung als beruflich bedingt, muss die Verursachungswahrscheinlichkeit ein rechtlich festgelegtes Maß übersteigen, in Deutschland im Allgemeinen mehr als 50%.

Nach der Wiedervereinigung und der Beendigung des Uranbergbaus wurden weitere 200 bis 300 Fälle pro Jahr für die nähere Zukunft erwartet. Die so genannte WISMUT-Kohorte ist die

fallmäßig größte Bergarbeiterkohorte, und die epidemiologischen Untersuchungen der WISMUT Case Control Study dauern an (KREIENBROCK et al. 2001; WALSH et al. 2015; KREUZER et al. 2018).

Lange Jahre wurde kontrovers diskutiert, ob sich das im Bergbau beobachtete Lungenkrebsrisiko auch auf die Strahlenexposition durch Radon und Radonfolgeprodukte in Wohnhäusern übertragen lassen. Dieses Risiko erwies sich als existent, war jedoch nur epidemiologisch in extrem großen Populationen erkennbar (DARBY et al. 2005; KREWSKI 2005, 2006; LUBIN 2004).

Ein spezieller Aspekt der Radon-Problematik ist, dass die Strahlenexpositionen durch Radon und seine Folgeprodukte schon bei normalen Radon-Konzentrationen in der Raumluft relative hoch sind. Wenn man in Deutschland derzeit von einer effektiven Dosis durch Inhalation von Radon und Folgeprodukten bei einer mittleren Radon-Konzentration in Wohnräumen von  $50 \text{ Bq/m}^3$  von ca.  $1 \text{ mSv}$  pro Jahr ausgeht, bedeutet das, dass die Lungenäquivalentdosis bei  $10 \text{ mSv}$  pro Jahr liegt. In der Schweiz wird die durchschnittliche Dosis durch Radon bei einer durchschnittlichen Radonkonzentration von  $75 \text{ Bq/m}^3$  im Wohnbereich mit  $3,2 \text{ mSv}$  pro Jahr angegeben. Der Unterschied zu Deutschland liegt daran, dass die Schweiz seit dem Jahresbericht 2009, erschienen im Jahr 2010, den neuen Umrechnungsfaktor von Exposition in effektive Dosis gemäss dem „Statement on Radon“ der ICRP vom November 2009 anwendet.

Dabei ist das Problem der Dosimetrie von Radon und Folgeprodukten aufgrund der Komplexität des Inhalationsprozesses und der das Risiko modifizierenden Faktoren extrem schwierig und bis heute nicht wirklich gelöst. Im erwähnten *Statement on Radon* hat die ICRP im Jahr 2009 das Risiko in einem epidemiologische Ansatz neu bewertet und die bisherige Dosimetrie nach dem dosimetrischen Ansatz aufgegeben. Im Jahr 2017 hat die ICRP in Publikation 137 neue Dosiskonversionsfaktoren empfohlen, mit denen eine Radonkonzentration direkt in effektive Dosis umzurechnen wäre. Danach würden sich die effektiven Dosen durch die Inhalation von Radon und Folgeprodukten verdoppeln. Die Schweiz hat diesem Umstand bereits in ihren Jahresberichten über die Strahlenexposition der Schweizer Bevölkerung Rechnung getragen (BAG 2009). Eine internationale Abstimmung über die zu verwendenden Dosiskonversionsfaktoren ist bisher noch nicht erfolgt und wird auch angesichts der Vielzahl von Faktoren, von denen die Strahlenexposition durch Radon und Radon-Folgeprodukte abhängt, äußerst schwierig werden. Die SSK hat daher 2017 empfohlen, die alten Dosiskonversionsfaktoren zu benutzen, bis eine internationale Abstimmung erfolgt ist.

Es ist an dieser Stelle allerdings festzustellen, dass die allgemeinen Befunde der epidemiologischen Studien zum Lungenkrebs durch Radon und Folgeprodukte im Bergbau und in Häusern durch die Unsicherheit der Dosiskoeffizienten nicht beeinträchtigt werden, da die Dosis direkt aus der Exposition, d.h. der Radon-Aktivitätskonzentration mal Expositionszeit, berechnet wird. Radon und seine Folgeprodukte sind zu Recht als wirksames Karzinogen in der Umwelt eingestuft worden (IARC 1988, WHO 2016), dies obwohl die Risikokoeffizienten weiterhin kontrovers diskutiert werden. Dabei ist auf eine besondere Unstimmigkeit hinzuweisen, die es derzeit unmöglich macht, Prognosen zu den zukünftigen Risikokoeffizienten zu erstellen: die Risikokoeffizienten, die dem ICRP-Statement zu Radon aus dem Jahr 2009 zugrunde lagen, berücksichtigen noch nicht die abweichenden Ergebnisse der WISMUT-Kohorte.

Aber es gibt auch andere Bevölkerungsgruppen, die erhöhten Strahlenexpositionen durch natürliche Radioaktivität und Strahlung erhalten (z. B. das Personal der Zivilluftfahrt durch kosmische Strahlung, Wasserwerkpersonal durch Radon etc.). UNSCEAR arbeitet derzeit an einem Bericht über die biologischen Effekte niedriger Dosen und Dosisraten, wie sie bei erhöhter natürlicher Radioaktivität in verschiedenen Regionen der Welt oder bei der Bevölkerung entlang des Flusses Techa in Westsibirien auftreten. Die bisherigen Ergebnisse

deuten darauf hin, dass die durch diese Expositionen verursachten Risiken nicht im Widerspruch zur Extrapolation der Risiken der Life Span Study stehen, aber im Endeffekt auf Grund der hohen Unsicherheiten keine belastbaren Aussagen im Bereich der Extrapolation zulassen.

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass neuere Untersuchungen darauf hinweisen, dass auch radiologische Risiken von Nicht-Krebserkrankungen, etwa im Herz-Kreislauf-Bereich (OZASA et al. 2012), bestehen könnten und dass die früher als deterministische Schäden eingestuften Katarakte der Augenlinsen auch eine stochastische Komponente hat (SSK 2009). Vielleicht müssen wir uns daran gewöhnen, dass viele gesundheitliche Effekte zwei Aspekte haben können, erstens deterministische Effekte durch Gewebe- oder Organversagen und zweitens stochastische durch zelluläre Fehlentwicklungen.

### 3.5 Der heutige Wissensstand über die Wirkung ionisierender Strahlung

Wenn uns auch nach mehr als 50jähriger Forschung ein tieferes Verständnis der Entstehung stochastischer Schäden – wie auch allgemein der Entstehung von Krebs und Leukämie – immer noch fehlt, so können wir doch die Risiken heute so hinreichend quantifizieren, dass ein vernünftiger Strahlenschutz verantwortungsbewusst ausgestaltet werden kann, denn die quantitativen Schätzungen der Risiken stochastischer Schäden haben sich in den letzten ca. 30 Jahren nicht wesentlich verändert.

Das heutige Wissen, aber auch Unwissen, über Strahlenexpositionen und gesundheitliche Effekte ionisierender Strahlung hat UNEP (2016) in einer empfehlenswerten Broschüre zusammengefasst (Abb. 1). Die strahlungsbedingten Effekte können danach folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Bei Dosen **oberhalb von 1.000 mSv** kommt es im bestrahlten Individuum zu klinisch beobachtbaren (manifesten) Effekten, wie etwa Sterilität, Erytheme, Katarakte und dem akuten Strahlensyndrom. Charakteristisch für diese so genannten deterministischen Effekte ist, dass die Schwere des Effektes mit der Dosis zunimmt und dass es eine Schwelle gibt, unterhalb der keine deterministischen Effekte auftreten.
- Unterhalb eines Bereiches von **500 mSv bis 1.000 mSv** sind deterministische Schäden nicht zu erwarten. Hier ist der Bereich stochastischer Schäden wie Krebs und Leukämie, für die nur die Wahrscheinlichkeit des Auftretens als Funktion der Dosis – nicht jedoch die Schwere der Erkrankung – angegeben werden kann. Die Wahrscheinlichkeit dieser stochastischen Schäden steigt linear oder linear-quadratisch mit der Dosis. Nur bei epidemiologischen Studien an großen Populationen ist das Krebs- oder Leukämie-Risiko beobachtbar. Ob eine Krebserkrankung im Einzelfall durch Strahlung oder andere Ursachen ausgelöst wurde, ist jedoch nicht feststellbar und kann nur mit Wahrscheinlichkeitsaussagen gestützt werden.
- **Unterhalb von 100 mSv** gelangt die Epidemiologie an ihre Grenzen und selbst in sehr großen Populationen ist ein erhöhtes Risiko – obwohl biologisch plausibel – nicht mehr erkennbar. Da jedoch keine untere Schwelle für stochastische Effekte feststellbar ist, gehen die ICRP und ganz allgemein der Strahlenschutz auch unterhalb von 100 mSv von einer linearen Dosis-Risiko-Beziehung ohne Schwelle aus, und empfehlen hier als konservativen Ansatz das so genannte Linear-No-Threshold-Modell (LNT Hypothese).

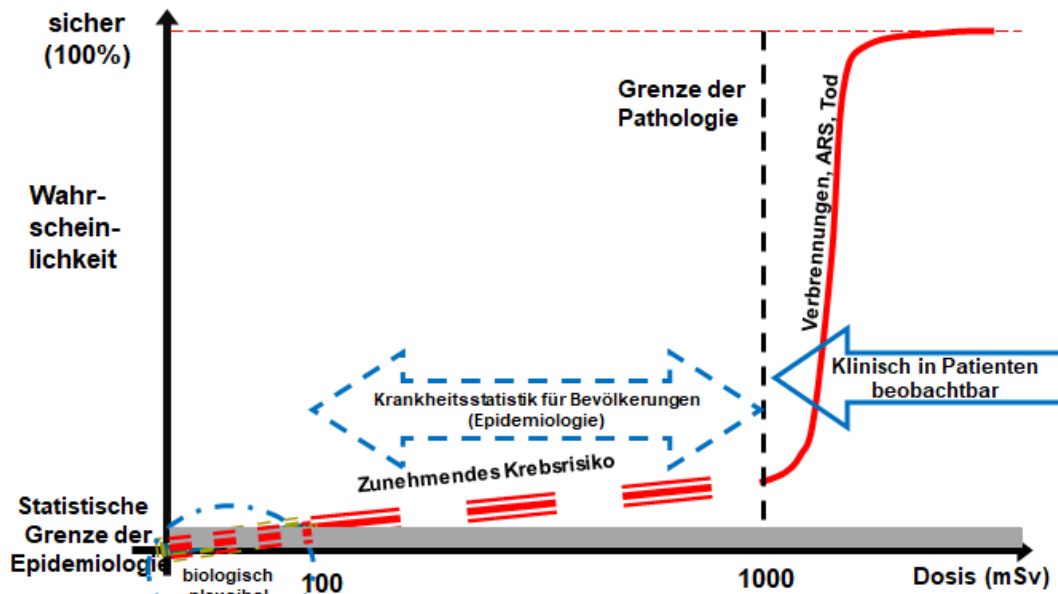


Abb. 1: Gesundheitliche Effekte ionisierender Strahlung (UNEP 2016; modifiziert)

Diese genannten beobachteten und hypothetischen gesundheitlichen Effekte waren und bilden die Grundlage des Strahlenschutzes für Beschäftigte und die Bevölkerung. Wie sich die hier dargestellten Erkenntnisse über Expositionen und gesundheitliche Effekte auf die Entwicklung des Strahlenschutzes ausgewirkt haben, wird in der Folge dargestellt.

### 3.6 Die Empfehlungen der ICRP

Das Ziel des Strahlenschutzes ist die Vermeidung deterministischer Effekte und die Begrenzung stochastischer Effekte auf ein tolerables oder akzeptables Maß. Um diese Ziele zu erreichen, benutzt der Strahlenschutz drei Strahlenschutzgrundsätze, die in ICRP 103 (ICRP 2007) formuliert werden als:

*„Die drei Grundprinzipien des Strahlenschutzes werden in den neuen Empfehlungen beibehalten. Die Grundsätze der Rechtfertigung und Optimierung gelten für alle drei Expositionssituationen, während der Grundsatz der Anwendung von Dosisgrenzwerten nur für Dosen gilt, die als Folge geplanter Expositionssituationen erhalten werden. Diese Grundsätze sind wie folgt definiert:“*

-	„Grundsatz der Rechtfertigung: Jede Entscheidung, die die Strahlenexpositionssituation verändert, soll der von der Entscheidung betroffenen Population mehr nutzen als schaden.“
-	„Grundsatz der Optimierung des Schutzes: Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Exposition auftritt, die Zahl der exponierten Personen und die Höhe der individuellen Dosen sollen so niedrig gehalten werden wie es unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Faktoren vernünftigerweise erreichbar ist.“
-	„Grundsatz der Anwendung von Dosisgrenzwerten: Die Personendosis aus überwachten Quellen bei geplanten Expositionssituationen, außer medizinischen Expositionen, soll die von der Kommission empfohlenen Grenzwerte nicht überschreiten.“

Diese Grundsätze sollen für die berufliche Exposition, die medizinische Exposition und die Exposition der allgemeinen Bevölkerung – sowie auch für die Exposition zwecks nicht-

medizinischer Bildgebung – in allen Expositionssituationen, also in geplanten, bestehenden und Notfall-Expositionssituationen angewendet werden; bei letzteren jedoch nicht als Dosisgrenzwerte, sondern als flexible Referenzwerte. Diese Grundsätze haben Aufnahme in internationale und nationale Regelwerke und Gesetze gefunden.

### 3.7 Sicherheit durch Vermeidung deterministischer Schäden

Das Regelwerk des Strahlenschutzes ist im Laufe seiner Geschichte aus der Entwicklung der Erkenntnisse über die gesundheitlichen Effekte ionisierender Strahlung entstanden und hat durch Anpassung der Grenzwerte zu immer mehr Sicherheit geführt. In Abb. 2 ist die zeitliche Entwicklung der Grenzwerte für die berufliche Strahlenexposition und für die Exposition der allgemeinen Bevölkerung dargestellt. Tab. 2 und 3 bilden diese Entwicklung anhand der ICRP Empfehlungen, der EURATOM Grundnormen und der deutschen Strahlenschutzverordnungen ab. Auch die Schweizerischen und österreichischen Gesetzgebungen im Strahlenschutz folgten dieser Entwicklung.

Am Anfang stand die Vermeidung deterministischer Schäden im Vordergrund. Im Jahr 1925 gab es einen Vorschlag von MUTSCHELLER und SIEVERT, die Dosis pro Jahr auf 10 % der Erythemdosis zu begrenzen. Dies wäre jedoch in Einheiten der Dosis eine sehr unscharfe Begrenzung gewesen, da 10 % der Erythemdosis für 100 kV Röntgenstrahlen etwa 30 R pro Jahr entspricht, für 200 kV Röntgenstrahlen aber etwa 70 R pro Jahr (100 R im Gewebe sind geringfügig weniger als 1 Gy bzw. weniger als 1 Sv bei niedrig-LET-Strahlung also für Beta- sowie für Gamma- und Röntgenstrahlung). Es fehlte damals eine vernünftige Einheit für die Strahlungsmessung. In Abb. 2 ist diese Unsicherheit durch eine entsprechende Bandbreite verdeutlicht.

Es dauerte bis zum Jahr 1925, als auf dem ersten *International Congress of Radiology* (ICR) in London die Notwendigkeit der Gründung eines Strahlenschutzkomitees diskutiert wurde, das dann als *International X-Ray and Radium Protection Commission*, (später *International Commission on Radiological Protection* (ICRP)) auf dem zweiten Kongress in Stockholm im Jahr 1928 gegründet wurde (Clarke und Valentin 2009). Die ICRP sollte auf der Grundlage der wissenschaftlichen Erkenntnis die notwendigen Schutzstandards festlegen. Gleichzeitig war klargeworden, dass die schädigenden Strahleneffekte eine Frage der Dosis waren. Auch die heilende Wirkung der ionisierenden Strahlung zur Behandlung bösartiger Erkrankungen hing von der applizierten Dosis ab. Daher wurde das ebenfalls auf dem ersten Kongress im Jahr 1925 angedachte *International X-Ray Unit Committee*, später *International Committee for Radiological Units* (ICRU) (heißt heute: The International Commission on Radiation Units and Measurements), auf dem gleichen zweiten Kongress gegründet (<http://www.icru.org/home/uncategorised/history>). Erste Aufgabe der ICRU wurde die Festlegung einer Einheit zur Strahlungsmessung für die Medizin.

Bis zu international akzeptierten Grenzwerten war es jedoch noch ein langer Weg. Die ICRP empfahl erstmals 1934 Dosisgrenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen. Dabei handelte es sich um die Vermeidung deterministischer Effekte, was die ICRP (1934) so formulierte:

*“The dangers of over exposure to X rays and radium can be avoided by the provision of adequate protection and suitable working conditions. It is the duty of those in charge of X-ray and radium departments to ensure such conditions for their personnel. The known effects to be guarded against are: (a) Injuries to the superficial tissues. (b) Derangements of internal organs and changes in the blood. The evidence at present available appears to suggest that under satisfactory working conditions a person in normal health can tolerate exposure to X rays to an extent of about 0.2 international röntgens (r) per day. On the basis of continuous irradiation during a working day of seven hours, this figure corresponds to a dosage rate of  $10^{-5}$  r per second. The protective values given in these recommendations are generally in*



*harmony with this figure under average conditions. No similar tolerance dose is at present available in the case of radium gamma rays."*

Es dauerte weitere 16 Jahre, bis die ICRP eine vollständigere Liste von biologischen Strahlenwirkungen berücksichtigte. Sie nannte nunmehr fünf mögliche Folgen von Strahlenexpositionen (ICRP 1950):

*"It appears that the effects to be considered are: (1) Superficial injuries, (2) General effects on the body, particularly the blood and blood-forming organs, e.g., production of anaemia and leukemias, (3) the induction of malignant tumours, (4) other deleterious effects including cataract, obesity<sup>5</sup>, impaired fertility, and reduction of life span, (5) Genetic effects."*

Bis 1956 war der Strahlenschutz ausschließlich auf die Beschäftigten, die mit Radioaktivität und Strahlung umgingen, ausgerichtet. Erst im Jahr 1956 nennt die ICRP die allgemeine Bevölkerung als eine Zielgruppe des Strahlenschutzes (ICRP 1956). Dies war eine Folge der Erkenntnisse aus den Untersuchungen an den Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki und den mit dem globalen Fallout der atmosphärischen Kernwaffenexplosionen verbundenen Befürchtungen vor Krebserkrankungen und genetischen Effekten.

In der Zeit bis zum Jahr 1977 schlug die ICRP die verschiedensten Dosisgrenzwerte vor, ohne allerdings ein umfassendes Strahlenschutzkonzept zu entwickeln. Im Jahr 1934 waren es 0,2 R pro Tag bzw. 1 R pro Arbeitswoche; im Jahr 1950 150 mSv pro Jahr entsprechend etwa 3 mSv pro Arbeitswoche und 1956: 50 mSv pro Jahr, also etwa 1 mSv pro Arbeitswoche. Abb. 2 stellt die zeitliche Entwicklung der Jahresgrenzwerte für die Beschäftigten dar.

### **3.8 Sicherheit durch Begrenzung stochastischer Schäden**

Mit der Publikation ICRP 26 im Jahr 1977 formulierte ICRP ein komplettes Strahlenschutzkonzept (ICRP 1977). Sie unterschied nun stochastische und nicht-stochastische Effekte und regte an, den Strahlenschutz auf Beschäftigte und die allgemeine Bevölkerung auszudehnen.

Sie empfahl nicht nur Grenzwerte, sondern auch die Strahlenschutzgrundsätze der Rechtfertigung und das ALARA-Prinzip (*As Low As Reasonably Achievable*) unter Berücksichtigung ökonomischer und gesellschaftlicher Faktoren. ICRP 26 gab auch eine generelle Begründung für die Dosisgrenzwerte:

*"The aim of radiation protection should be to prevent detrimental non-stochastic effects and to limit the probability of stochastic effects to levels deemed to be acceptable."*

Dadurch, dass für das Auftreten von nicht-stochastischen Effekten zunächst eine Schwellendosis überschritten werden muss, bevor dann mit zunehmender Dosis die Schwere und – wegen der Unterschiede in der individuellen Strahlenempfindlichkeit – die Häufigkeit der Erkrankung zunimmt, ist es relativ einfach, für diese Strahleneffekte Dosisgrenzwerte zu formulieren. Die Grenzwerte müssen lediglich deutlich unterhalb der Schwellendosen liegen, um das Auftreten von deterministischen Effekten auszuschließen. Daher schlug die ICRP in der Publikation 26 als Grenzwert für alle Organe 500 mSv pro Jahr

---

<sup>5</sup> Es ist unklar, ob die ICRP tatsächlich Fettleibigkeit als strahleninduzierten Effekt ansah. Aber es steht so im Text von (ICRP 1950).

vor, mit Ausnahme der Augenlinse, für die ein Dosisgrenzwert von 300 mSv pro Jahr empfohlen wurde.

Wesentlich schwieriger stellt sich die Situation bei den stochastischen Effekten dar. Im Strahlenschutz geht man davon aus, dass stochastische Risiken (wie bösartige Tumoren, Leukämien, Erbkrankheiten) keine Schwellendosen aufweisen, die Schwere der Erkrankung ist nicht von der Strahlendosis abhängig, dagegen steigt die Anzahl betroffener Personen mit zunehmender Strahlendosis an. Damit stellt sich sofort die Frage, was unter „*acceptable*“ zu verstehen ist. ICRP 26 verfolgte das Konzept, das strahleninduzierte stochastische Strahlenrisiko mit Risiken in anderen als „sicher“ geltenden Berufszweigen zu vergleichen: „*comparing this risk with that for other occupations recognized as having high standards of safety*“. Über diesen Weg kam ICRP in der Publikation 26 unter zusätzlicher Berücksichtigung einiger weiterer Annahmen zu dem Schluss, dass das mit 50 mSv pro Jahr Äquivalentdosis verbundene Risiko „akzeptabel“ ist. Dieses Konzept lehnte sich an das Vorgehen bei anderen Berufszweigen an und wurde in den ICRP Publikationen 27 und 45 ausführlich erläutert. Es ist hier anzumerken, dass der Begriff „akzeptabel“, wie in ICRP 26 verwendet, dem Begriff „tolerabel“ in ICRP 103 entspricht, der hier auch im Folgenden benutzt wird.

### 3.9 Die Empfehlung von Grenzwerten

Zu beachten ist, dass die ICRP 26 bei der Festlegung der Dosisgrenzwerte zusätzlich die Erfahrung berücksichtigte, dass bei einer großen Gruppe beruflich strahlenexponierter Beschäftigter eine logarithmische Normalverteilung der jährlichen Dosen mit einem arithmetischen Mittelwert von etwa 5 mSv pro Jahr auftritt. In Deutschland und der Schweiz liegt der Wert deutlich unter 5 mSv pro Jahr. Nur bei sehr wenigen Personen kommt die jährliche Dosis in die Nähe des derzeitigen Dosisgrenzwertes von 20 mSv pro Jahr.

Die Dosisgrenzwerte werden vor allem für die Planung von technischen Einrichtungen mit Strahlenexpositionen und für die Überwachung von Personen eingesetzt. Zur weiteren Optimierung des Strahlenschutzes ist der *Dose Constraint* eingeführt worden (ICRP 1991, 2007). Mit diesem Instrument, dessen Wert unterhalb des Dosisgrenzwertes liegt, wird durch Kommunikation mit dem Betreiber der Anlage, verbunden mit einem Optimierungsprozess, der alle spezifischen Gegebenheiten einer Anlage bei der Planung der Arbeiten in der Anlage einbezieht, soll eine Verbesserung des Strahlenschutzes erreicht werden. Bei den derzeit erreichten niedrigen Expositionen unter 1 mSv/a ist die Einführung eines zusätzlichen Richtwertes jedoch zweifelhaft und überflüssig.

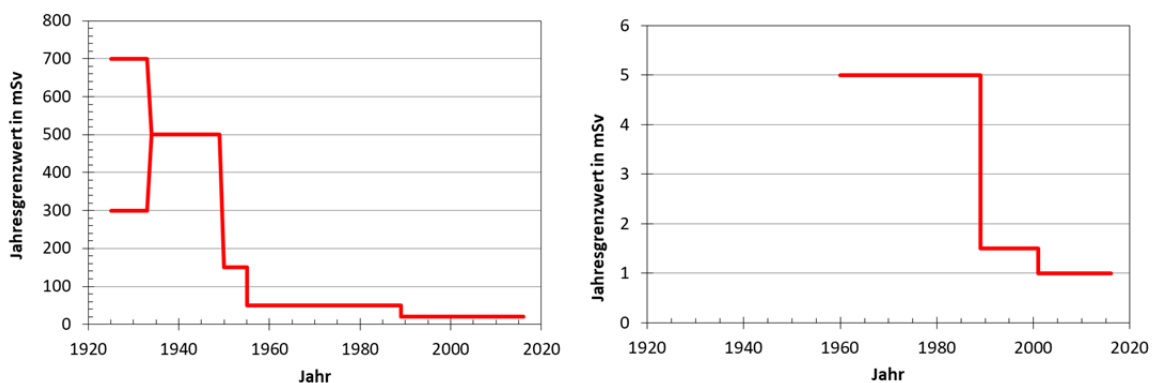
ICRP 60 verfolgte den oben genannten Ansatz des Vergleichs mit Risiken anderer Berufe allerdings nicht weiter. Vielmehr bemühte man sich jetzt um eine Definition von *unacceptable*, *tolerable* und *acceptable*. *Unacceptable* bedeutet, dass unter üblichen Arbeitsbedingungen ein Risiko nicht hinnehmbar ist; nach Unfällen oder Katastrophen kann sich dies ändern. *Tolerabel* sind Situationen, die zwar nicht willkommen sind, aber hingenommen werden können, während *acceptable* meint, dass diese Risiken nach Optimierung akzeptiert werden können. ICRP 60 zog die Grenze zwischen „*tolerabel*“ und „*unakzeptabel*“ bei einem strahleninduzierten beruflichen Todesfall pro Jahr pro 1 000 Personen. Die Begründung lautete (ICRP 1991, Annex C, Kap. C14):

*„A report of a Study Group of the British Royal Society (1983) concluded that imposing a continuing annual occupational probability of death of 1 in 100 would be unacceptable, while they found the situation less clear with regard to an annual probability of death of 1 in 1000. They felt that the latter probability level could „hardly be called totally unacceptable provided the individual at risk knew of the situation, judged he had some commensurable benefit as a result, and understood that everything reasonable had already been done to reduce the risk“. However, the*

*annual probability of death is only one of the attributes which are appropriate to take into account. In the following, a number of other aspects will be considered.“*

Aus dieser Überlegung und neueren epidemiologischen Daten zum Krebsrisiko in Hiroshima und Nagasaki sowie der Berücksichtigung eines multiplikativen Modells zur Risikoabschätzung resultierte für beruflich strahlenexponierte Beschäftigte ein mittlerer Grenzwert von 20 mSv pro Jahr, ausgedrückt als 100 mSv pro 5 Jahre, wobei in keinem Jahr mehr als 50 mSv auftreten dürfen.

Strahlenschutz war bis in die 1950er Jahre eine Sache für Mediziner und in geringerem Maße für die übrigen Wissenschaftler. Die Bevölkerung war von deren Aktivitäten nicht betroffen – es sei denn als Patienten. Erst mit den oberirdischen Kernwaffenversuchen und dem Aufbau kerntechnischer Anlagen und Reaktoren, die radioaktive Stoffe in die Umwelt ableiteten, wurde die Frage nach der Strahlenexposition der Bevölkerung aktuell. Erst später wurde die natürliche Radioaktivität und Strahlung als Noxe empfunden und über deren Begrenzungen nachgedacht, ausgelöst durch die berufliche Strahlenexposition der Bergleute.



**Abb.2:** Zeitliche Entwicklung der Grenzwerte für die berufliche Strahlenexposition (links) und für die Strahlenexposition der Bevölkerung (rechts). Die anfänglichen zwei Werte für die berufliche Exposition charakterisieren die Unsicherheit bei der Dosisbestimmung, die sich hinter dem Vorschlag eines Grenzwertes der Erythemdosis von MUTSCHELLER (1925) und SIEVERT (1925) verbirgt.

Um das Jahr 1950 befürchtete man genetische Schäden bei den Nachkommen der Atombombenopfer von Hiroshima und Nagasaki. Diese Befürchtungen bestätigten sich jedoch nicht. Solche Schäden wurden bis heute nur im Tierversuch, vor allem an der Fruchtfliege *Drosophila melanogaster*, beobachtet. Allerdings beobachtete man bei den Atombombenopfern selbst ein erhöhtes Auftreten von Leukämie und soliden Tumoren. Dies veränderte den Strahlenschutz. Es ging jetzt nicht mehr nur darum, deterministische Effekte zu vermeiden sondern auch das Risiko stochastischer Schäden auf ein akzeptables oder besser tolerables Maß begrenzen.

Mit den atmosphärischen Kernwaffentests während des kalten Krieges und der weltweiten Kontamination durch Fallout verschob sich der Fokus des Strahlenschutzes: Jetzt waren auch die Strahlenexpositionen der allgemeinen Bevölkerung zu betrachten. Zudem leiteten die für die militärische und friedliche Nutzung der Kernenergie errichteten kerntechnischen Anlagen und Reaktoren Radionuklide mit der Fortluft und dem Abwasser in die Umwelt ab. So wurde die Strahlenexposition der Bevölkerung auch Gegenstand der Überwachung und ein Kriterium für die Genehmigungsfähigkeit von Anlagen.

Mit der Empfehlung ICRP 103 (ICRP 2007), die dann Grundlage für die EURATOM Grundnormen von 2013 (EC 2013), für das deutsche StrlSchG von 2017 (BMUB 2017) und auch für die Strahlenschutzgesetzgebung in der Schweiz (SCHWEIZER BUNDESRAT 2017, BAG 2017) waren, wurde das System des Strahlenschutzes im Wesentlichen belassen, aber

neu geordnet. Die ICRP unterscheidet jetzt geplante, bestehende und Notfall-Expositionssituationen für die Beschäftigten, die allgemeine Bevölkerung, die Patienten und die Umwelt. Abb. 3 stellt dies schematisch dar. Grenzwerte gelten in geplanten Expositionssituationen. Hier bleibt es für die Bevölkerung beim Grenzwert von 1 mSv pro Jahr. Unterhalb des Grenzwertes empfiehlt die ICRP die Anwendung von Dosisrichtwerten, so genannten *Dose Constraints*.

Für kurze Zeit dauernde Notfall-Expositionssituationen empfiehlt die ICRP für die Bevölkerung Referenzwerte mit Bandbreiten von 100 mSv pro Jahr bis 20 mSv pro Jahr, für längerfristig bestehenden Expositionssituationen solche von 20 mSv pro Jahr bis 1 mSv pro Jahr. Die Überschreitung des oberen Referenzwertes wird jeweils für nicht-tolerierbar gehalten, was Maßnahmen verlangt. Ziel ist es, im Rahmen der Optimierung, die Dosis der so genannten repräsentativen Person aus der betroffenen Bevölkerung unter den unteren Referenzwert zu bringen. Für bestehende Situationen ist das endgültige und abschließende Ziel gemäß ICRP (2006), dass die durch die Situation bedingte Exposition der repräsentativen Person weniger als 1 mSv pro Jahr beträgt. Die Empfehlung solcher Zielwerte ist problematisch, da sie nicht die Umstände des Einzelfalles berücksichtigt. Zudem unterscheiden sich die gesellschaftlichen Verhältnisse der Länder und auch deren ökonomische Möglichkeiten.

Vom ICRP-System unberührt bleibt die Exposition durch die am Standort von Natur aus vorhandenen Strahlenquellen, die ein Mehrfaches von 1 mSv pro Jahr betragen kann. Radon ist hier eine Ausnahme.

**Tab. 2:** Zeitliche Entwicklung der Grenzwerte für die berufliche Strahlenexposition

Jahr	Grenzwerte
1925	1. Int. Congress of Radiology in London MUTSCHELLER & SIEVERT schlagen 10% der Erythemdosis als Grenzwert vor. Es besteht Unklarheit über die Messgröße Dosis. Das bedeutet: ~70 R pro Jahr = 0,7 Sv pro Jahr (200 kV X-rays), ~30 R pro Jahr = 0,3 Sv pro Jahr (100 kV X-rays)
1928	2. Int. Congress of Radiology in Stockholm; Gründung der ICRP und der ICRU
1934	ICRP Empfehlung: 0,2 R pro Tag, 1 R/w, 50 R pro Jahr $\cong$ 0,5 Sv pro Jahr
1950	ICRP Empfehlung: 3 mSv/w, 150 mSv pro Jahr
1956	ICRP Empfehlung: 1 mSv/w, 50 mSv pro Jahr
1977	ICRP 26: Vergleich mit Arbeitsunfällen; Additives Modell, Kosten-Nutzen-Ansatz 500 mSv pro Jahr (300 mSv pro Jahr Augenlinse) wg. deterministischer Effekte 50 mSv pro Jahr GW; berufliche Exposition im Mittel 5 mSv pro Jahr
1990	ICRP 60: multiplikatives Modell Effektive Dosis 20 mSv pro Jahr (150 mSv pro Jahr Augenlinse, 500 mSv Haut, Hände & Füße)
2007	ICRP 103: Referenzwerte für bestehende und Notfallexpositionssituationen Grenzwerte für geplante Expositionssituationen Effektive Dosis 20 mSv pro Jahr (150 mSv pro Jahr Augenlinse, 500 mSv Haut, Hände & Füße)
2013	Richtlinie 2013/59/EURATOM: Effektive Dosis 20 mSv pro Jahr (20 mSv pro Jahr Augenlinse, 500 mSv Haut, Hände & Füße)
2017	StrlSchG Effektive Dosis 20 mSv pro Jahr (20 mSv pro Jahr Augenlinse, 500 mSv pro Jahr Haut, Hände & Füße)

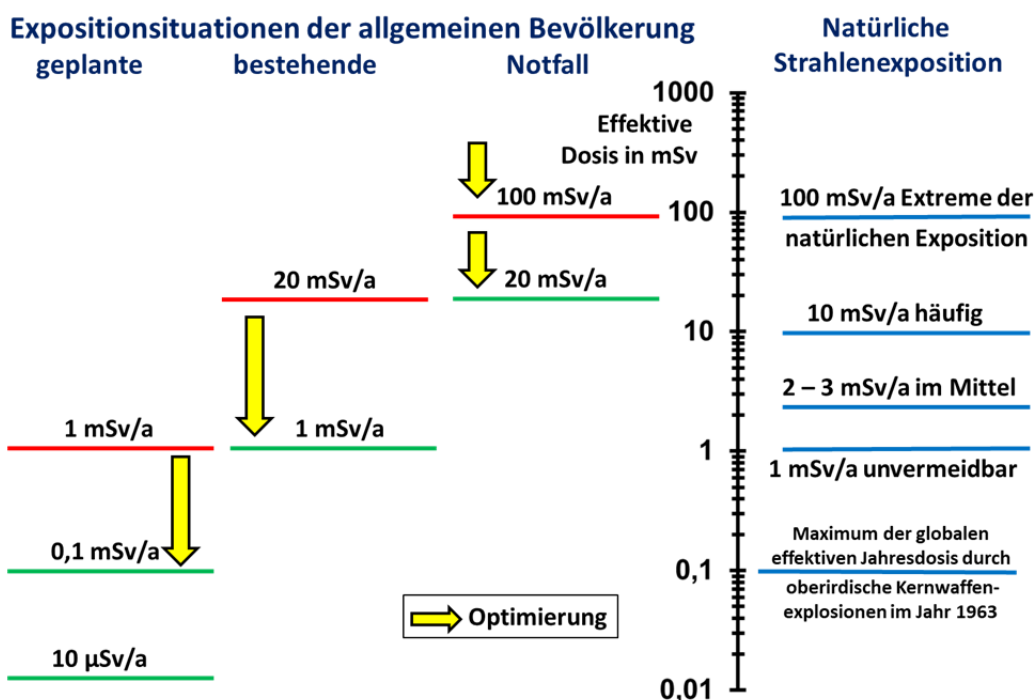
Der Begriff repräsentative Person (ICRP 2006) wird nun für den bisher verwendeten Begriff der kritischen Gruppe eingeführt, was lediglich eine sprachliche und keine inhaltliche Veränderung sein soll. Die repräsentative Person soll bei probabilistischer Ermittlung der Strahlenexposition das 95. Perzentil darstellen. Die repräsentative Person ist eine normale Person (Mann-Frau) mit mittleren Lebens- und Ernährungsgewohnheiten, die eine „*more exposed person*“ darstellt. Eine Diskussion der Rolle der repräsentativen Person ist in SSK (2013) gegeben.

In geplanten Expositionssituationen soll unterhalb des Grenzwertes optimiert werden; es wird jedoch kein unteres quantitatives oder zeitliches Ende der Optimierung angegeben.. Die Optimierung soll in allen Expositionssituationen gesellschaftliche und ökonomische Aspekte berücksichtigen.

**Tab. 3:** Zeitliche Entwicklung der Grenzwerte für die Strahlenexposition der Bevölkerung

Jahr	Grenzwerte
1958	ICRP Genetisch signifikante Dosis 5 mSv pro Jahr
1959	EURATOM Grundnormen 5 rem = 50 mSv kumuliert bis zum Alter 30 Jahre (Gesamtbevölkerung) 0,5 rem pro Jahr = 5 mSv (besondere Bevölkerungsgruppen)
1960	1. StrlSchV §29 1,5 rem pro Jahr = 15 mSv pro Jahr Person gelegentlich im Kontrollbereich §29 0,5 rem pro Jahr = 5 mSv pro Jahr Person im Überwachungsbereich
1977	ICRP 26 (§119) Äquivalentdosis 5 mSv pro Jahr für die kritische Gruppe. Es wird für „ <i>prudent</i> “ empfunden, bei lebenslanger Exposition unter 1 mSv pro Jahr zu bleiben. Es wird angenommen, dass die tatsächlichen Dosen um einen Faktor zehn geringer ausfallen werden.
1989	StrlSchV §44 (1) 1,5 mSv pro Jahr durch Direktstrahlung (§44 (2) 5 mSv pro Jahr nach behördlicher Ausnahmegenehmigung) §45 „30 mrem pro Jahr Konzept“, i.e. je 0,3 mSv pro Jahr durch Ableitungen über den Luftpfad und 0,3 mSv/a für Ableitungen über den Wasserpfad
1990	ICRP 60 1 mSv pro Jahr, Augenlinse 15 mSv pro Jahr, Haut 50 mSv pro Jahr
Schweiz: ab1994	Eine erste Strahlenschutzverordnung trat in der Schweiz 1963 in Kraft (als Verordnung im Rahmen des Atomgesetzes, nämlich des Bundesgesetzes vom 23. Dezember 1959 über die friedliche Verwendung der Atomenergie). Diese Verordnung wurde 1976 und 1994 revidierte. Mit der Fassung von 1994 gilt auch in der Schweiz für die Bevölkerung der Grenzwert von 1 mSv/Jahr aus künstlichen Strahlenquellen. Die heute gültige Strahlenschutzverordnung (StSV 814.501) vom 22.4.2017 wurde auf 1.1.2018 in Kraft gesetzt. Grundlage hierzu ist das Strahlenschutzgesetz (StSG 814.50) vom 22.3.1991, Stand 1.5.2017.
2001	StrlSchV 1 mSv pro Jahr (Augenlinse 15 mSv pro Jahr) je 2x0,3 mSv pro Jahr durch Ableitungen 10 µSv pro Jahr als Kriterium für die Entlassung aus dem Atomrecht 1 mSv pro Jahr als Richtwert für erhöhte Strahlenexpositionen durch Rückstände mit natürlicher Radioaktivität und Strahlung
2007	ICRP 103

Jahr	Grenzwerte
	1 mSv pro Jahr, Augenlinse 15 mSv pro Jahr, Haut 50 mSv pro Jahr
2013	Richtlinie 2013/59/EURATOM 1 mSv pro Jahr (15 mSv pro Jahr Augenlinse, 50 mSv pro Jahr Haut)
2017	StrlSchG 1 mSv pro Jahr aus der Summe zugelassener Tätigkeiten (15 mSv pro Jahr Augenlinse) 2x0,3 mSv pro Jahr durch Ableitungen 10 µSv pro Jahr als Kriterium für die Entlassung aus dem Atomrecht 1 mSv pro Jahr als Kriterium für Entlassung von Rückständen 1 mSv pro Jahr Referenzwert für Altlasten 1 mSv pro Jahr Referenzwert für Radioaktivität in Bauprodukten 300 Bq/m <sup>3</sup> Referenzwert für Radon $\cong$ 10 mSv pro Jahr (alte Dosiskoeffizienten)



**Abb. 3:** Das System der Grenzwerte, Richtwerte (Dose Constraints), Referenzwerte und der Optimierung des Schutzes nach ICRP 103 (ICRP 2007) im Vergleich zur Bandbreite der natürlichen Strahlenexposition. Für geplante Expositionssituationen gilt ein Grenzwert (rot) von 1 mSv pro Jahr. In Grün sind für geplante Expositionssituationen das hier vorgeschlagene Abschneidekriterium (de minimis) von 0,1 mSv pro Jahr und der derzeit gültige Freigabewert von 10 µSv pro Jahr dargestellt. Für bestehende und Notfall-Expositionssituationen sind die oberen Referenzwerte in Rot, die unteren in Grün dargestellt. Gemäß ICRP 103 wird ein Referenzwert von 1 mSv pro Jahr im Rahmen der Optimierung in bestehenden Expositionssituationen als langfristiges Ziel angestrebt.

### 3.10 Strahlenschutz hat Sicherheit geschaffen: eine Erfolgsgeschichte

Das System des Strahlenschutzes basiert somit im Wesentlichen auf den Empfehlungen der ICRP und den darauf aufbauenden internationalen und nationalen Regelwerken. Die Strahlenschutzgrundsätze Rechtfertigung, Optimierung und Dosis-Begrenzung bieten ein solides Fundament für sinnvollen und effizienten Strahlenschutz. Die zunehmende Gleichbehandlung von natürlicher und künstlicher Radioaktivität und Strahlung in den Regelwerken ist zwar ein wichtiger Schritt zu einer ganzheitlichen Betrachtung der

Strahlenexposition und des damit verbundenen Risikos für stochastische Strahlenschäden, stößt jedoch auf Probleme bei der Umsetzung. Die Realität der Strahlenexpositionen in geplanten Expositionssituationen hat größtmögliche Sicherheit für Beschäftigte und die allgemeine Bevölkerung gebracht.

**Sicherheit ist meist ein Gefühl, ist relativ und kontextbezogen.**

Sicherheit ist meist ein Gefühl, also etwas, was subjektiv wahrgenommen wird. Sie ist relativ und kontextbezogen. Sie hängt von der individuellen, subjektiven Risikobewertung ab, aber auch davon, ob jemand dieses Risiko freiwillig eingeht oder ob es ihm durch die Lebensumstände oder andere Ursachen auferlegt wird. Im Weiteren spielt eine große Rolle, ob es ein Risiko ist, von dem der Betroffene glaubt, es kontrollieren oder beeinflussen zu können.

Im Strahlenschutz bezieht sich Sicherheit und Risikominimierung auf die Vermeidung von deterministischen Schäden und die Minimierung von stochastischen Schäden unter Berücksichtigung ökonomischer und sozialer Aspekte. Das System des Strahlenschutzes ist für alle drei Expositionssituationen: den geplanten, bestehenden und den Notfallexpositionssituationen gedacht und gilt für Beschäftigte, die allgemeine Bevölkerung und Patienten.

Hohe berufliche Strahlenexpositionen kommen heute praktisch nicht mehr vor. In 2012 wurden laut Bericht des BfS (2014) 351 901 Personen in Deutschland personendosimetrisch überwacht. Von diesen konnte bei 14 % eine Strahlenexposition nachgewiesen werden (also eine Dosis über der Erkennungsgrenze von ca. 0,1 mSv pro Jahr). Der Mittelwert der dieser jährlichen beruflichen Strahlenexposition lag in der Medizin bei 0,4 mSv, in der Industrie bei 0,9 mSv, in der Kerntechnik bei 1,0 mSv, beim fliegenden Personal bei 2,0 mSv und beim Personal von Wasserwerken, Schauhöhlen und der WISMUT GmbH bei 3,0 mSv. Die entsprechenden Zahlen der Schweiz betragen gemäß BAG-Dosimetriebericht für 2015 bei allen 94 008 strahlenschutzüberwachten, beruflich strahlenexponierten Personen im Mittel 0,063 mSv pro Jahr, davon 0,016 mSv pro Jahr in der Medizin, 0,68 mSv pro Jahr in der Kerntechnik und 0,03 mSv pro Jahr für die übrigen Bereiche. Das Flugpersonal zählte bis Ende 2017 in der Schweiz noch nicht zu den beruflich strahlenexponierten Personen; doch deren Strahlenexposition unterscheiden sich nicht von denjenigen ihrer deutschen Kollegen.

Die starke Reduktion der Dosisanteile aus der beruflichen Strahlenexposition durch kontinuierliche und konsequente Optimierungsmaßnahmen seit den 1990er-Jahren ist eine der Erfolgsgeschichten des Strahlenschutzes; z.B. (BfS 2014; ENSI 2013; UNSCEAR 2008).

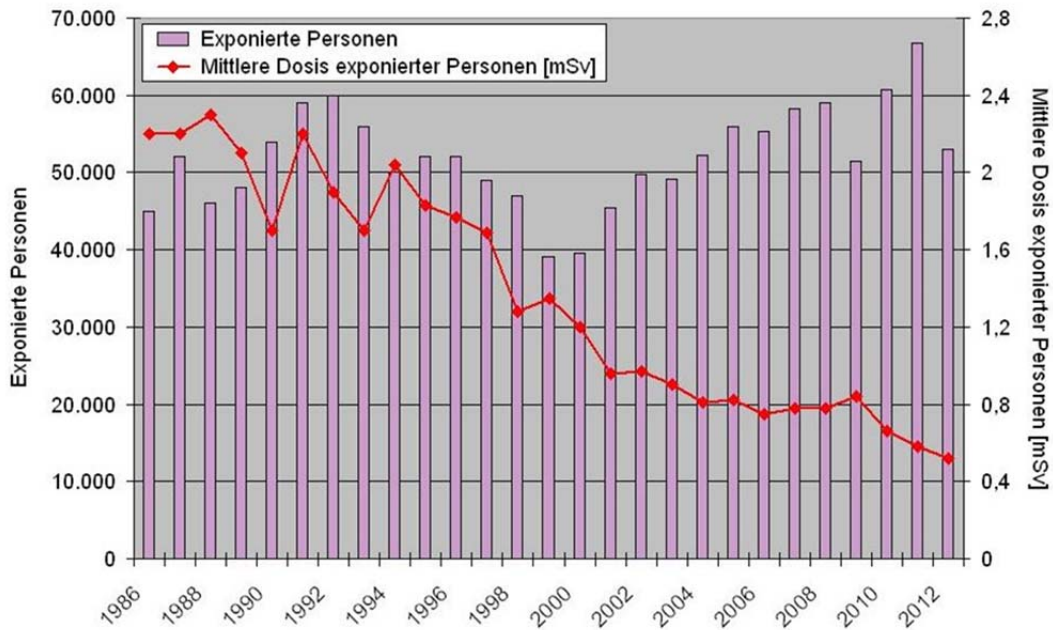


Abb. 4: Zeitliche Entwicklung der beruflich Strahlenexponierten in Deutschland mit Jahresdosen größer Null sowie der mittleren Jahresdosis dieser Exponierten (© Bundesamt für Strahlenschutz).

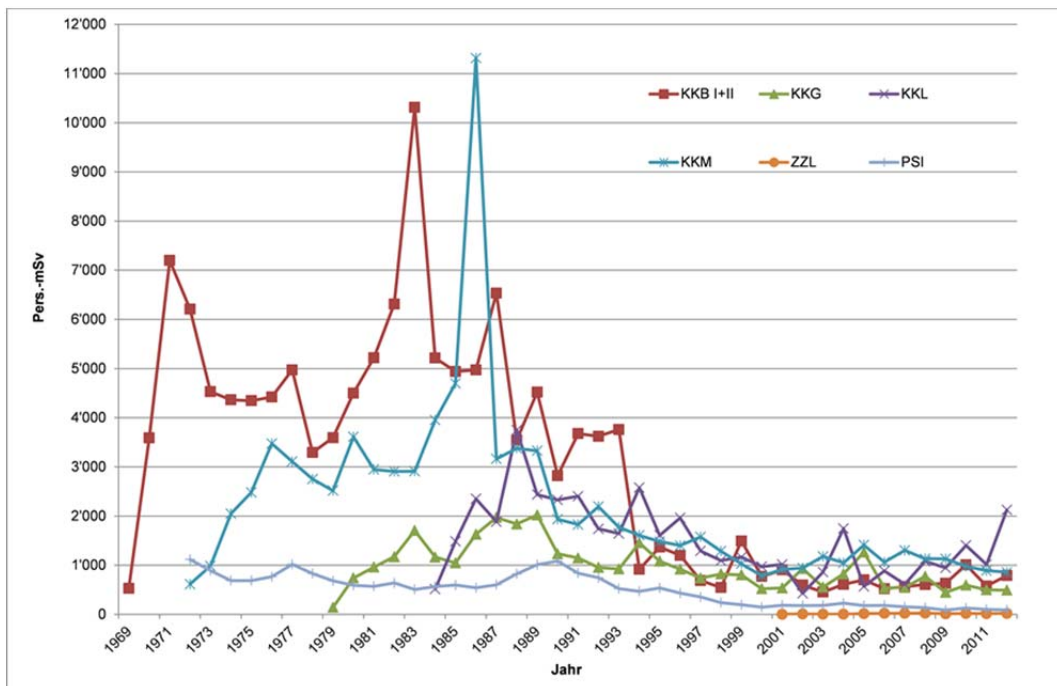


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der Kollektivdosen in den Schweizer Kernkraftwerken seit der KKW-Inbetriebnahme (ENSI 2013).

Relevant für die Qualität des Strahlenschutzes ist die zusätzliche Strahlenexposition während der Dauer der beruflichen Tätigkeit. Die Realität in Deutschland sieht wie folgt aus. Von den 1 445 813 im Strahlenschutzregister erfassten Personen erhalten 37 % der Personen Dosiswerte oberhalb der Erkennungsgrenze von ca. 0,1 mSv pro Jahr, die zur Abschätzung der Berufslebensdosen herangezogen werden können (BfS 2014). Danach liegen 95 % der Berufslebensdosen unter 10 mSv, 100 mSv werden nur von 0,4 % der Beschäftigten überschritten. Strahlenexpositionen von mehr als 200 mSv traten lediglich in 0,1 % der Fälle auf. Für 268 Personen, das sind 0,02 % der registrierten Personen, weist das Strahlenschutzregister für die Zeit von 1960 bis 2012 eine Berufslebensdosis über 400 mSv



aus. Etwa 90 % der 400-mSv-Überschreitungen entstanden vor 2000, etwa 70 % zwischen 1970 und 1990. In der Schweiz haben 98.3 % der beruflich Strahlenexponierten (2016) berufsbedingte Expositionen im Bereich von 0 bis 1 mSv pro Jahr erhalten; 1.7 % solche zwischen 1 und 10 mSv pro Jahr und nur 0,005 % Dosen zwischen 10 und 20 mSv pro Jahr. Auch das ist eine Erfolgsgeschichte des Strahlenschutzes!

Die zusätzliche **Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung** in der Nahumgebung kerntechnischer Anlagen und Kernreaktoren wird in den jährlichen Parlamentsberichten mit weniger als 0,01 mSv pro Jahr angegeben. Dieser errechnete Wert ist extrem konservativ berechnet. Die tatsächliche Exposition der am höchsten von Ableitungen aus Kernreaktoren und kerntechnischen Anlagen sowie durch Direktstrahlung exponierten Personen liegt mindestens einen Faktor 10, wahrscheinlich einen Faktor 100 niedriger (VÖLKLE 1984 und 2009). Für die überwiegende Bevölkerung Deutschlands ist sie nahe bei Null. Für die Schweiz sind die Zahlenwerte, die vom ENSI aus den bilanzierten Abgaben jeder Kernanlage errechnet und jährlich publiziert (ENSI, 2016) werden, mit höchstens 0,0043 mSv im Jahr 2016 für das einjährige Kind etwa gleich groß wie in Deutschland. Diese Dosiswerte wurden auf der Basis konservativer Annahmen berechnet; realistische Dosiswerte sind etwa 50 mal tiefer (VÖLKLE, 1984). Eine solche realistische Ermittlung der Strahlenexposition, die u.a. die SSK angemahnt hat (SSK 2013), wurde in Deutschland nie vorgenommen. Unserer Gesellschaft fehlt die Kultur, die Strahlenexpositionen der Bevölkerung realistisch zu bewerten und in den Kontext zur natürlichen Strahlenexposition sowie anderen Risiken zu stellen.

Für bestehende Expositionssituationen hat sich für die Bevölkerung Deutschlands seit 2017 ein Richtwert von 1 mSv pro Jahr bewährt. Die Hinterlassenschaften der WISMUT wurden nach diesem Konzept saniert und die dafür entwickelte erste realistische Rechenvorschrift zur Ermittlung der Strahlenexposition in Deutschland, die Berechnungsgrundlagen Bergbau (SSK 1994, BfS 2010), wurden auch anderweitig mit Erfolg angewandt (z.B. GELLERMANN et al. 2006).

Die Regelungen, die für den Strahlenschutz eingeführt wurden, sind vorbildlich und wurden teilweise in andere Bereiche übernommen, so z. B. die Funktion des Strahlenschutz-Beauftragten als „Sicherheits-Beauftragten“, die Forderung nach Unterweisung (früher Belehrung) der im Bereich Tätigen vor Beginn der Tätigkeit sowie regelmäßige Wiederholungen, usw. Im Bereich von Chemikalien wird mittlerweile auch zwischen deterministischen und stochastischen Schäden („krebserregend“) unterschieden. Auch dort ist zu beobachten, dass die Grenzwerte (z. B. „MAK-Werte“) aufgrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse laufend angepasst wurden.

Trotz aller Erfolge des Strahlenschutzes können auch in der Zukunft aufgrund von technischen Fehlern oder menschlichem Versagen Strahlenunfälle und inakzeptabel hohe Strahlenexpositionen nie ganz vermieden werden. Diese soweit als möglich zu verhindern oder im Ereignisfall deren Folgen zu minimieren, ist eine andauernde und bleibende Aufgabe des Strahlenschutzes, aber nicht nur für ihn allein.

### **3.11 Guter Strahlenschutz tut auch weiterhin Not**

Ohne die Weiterentwicklung des Strahlenschutzes seit 1925 hätten wir unakzeptabel hohe Expositionen. Denn ohne Strahlenschutz würden wir unsere Strahlenexposition gar nicht kennen und würden auch nicht wissen, ob und wo unzulässige Dosen auftreten. Strahlenschutz ist somit erforderlich, um Unfälle zu vermeiden und optimale Sicherheit zu garantieren. Denn nur aus diesem Wissen können wir ableiten, wo, wann und welche Maßnahmen getroffen werden müssen, wo, wann und wie durch Optimierung die Gesamtexposition verringert werden kann und wie Arbeiten so geplant und durchgeführt werden können, dass die zusätzliche Strahlenexposition tolerabel bleibt. Wir brauchen also

erfahrene und kompetente Strahlenschutzfunktionsträger, auch wenn erst bei hohen Dosen und Dosisleistungen mit gesundheitlichen Effekten zu rechnen ist.

**Strahlenschutz ist nötig um Unfälle und unzulässige Dosen zu vermeiden  
und um eine größtmögliche Sicherheit zu erreichen.**

Welche Verbesserungen im Strahlenschutz sind nun jenseits des begründeten und erfolgreichen Systems von ICRP 103 überhaupt noch nötig oder sinnvoll? Da Strahlenschutz immer im Spannungsfeld zwischen wissenschaftlicher Erkenntnis, technisch Möglichem und gesellschaftlicher Wahrnehmung stattfindet, darf er nicht im wissenschaftlichen Elfenbeinturm verharren. Er muss immer wieder von neuem die Frage beantworten, wie kann das, was wissenschaftlich und theoretisch vernünftig erscheint, in die Praxis umgesetzt werden?

Der Strahlenschutz braucht einen soliden theoretischen Überbau mit ethischen Grundsätzen (IRPA 2004) und einem Verhaltenskodex (IRPA 2011), der dessen Unabhängigkeit sicherstellt. Der Strahlenschutz kann nur glaubwürdig bleiben, wenn er frei bleibt von Einflüssen der Politik oder von Gruppen, die ihre Partikularinteressen vertreten und dabei leider immer wieder versuchen, die Agenda des Strahlenschutzes für ihre Zwecke zu missbrauchen. Nur so können Strahlenschutzfachleute von der Gesellschaft als glaubwürdige und zuverlässige Partner wahrgenommen und akzeptiert werden.

Des Weiteren benötigt der Strahlenschutz Kompetenz in mehreren Disziplinen und wissenschaftliche Seriosität bei gleichzeitiger Offenheit für neue Erkenntnisse. Strahlenschutz braucht Kontinuität im Regelwerk, aber auch Diskussion und Bereitschaft zur Weiterentwicklung. Letztere kann hauptsächlich durch permanente Aus- und Weiterbildung sowie durch Nachwuchsförderung sichergestellt werden. Schließlich sollte sich der Strahlenschutz in Richtung einer Strahlenschutzkultur bei den professionellen Strahlenschutzfachleuten und der gesamten Gesellschaft fortentwickeln; siehe hierzu (MICHEL 2009, IRPA 2014). Strahlenschutzkultur wäre damit ein integraler Teil einer umfassenden Sicherheitskultur.

## **4. Die natürliche Strahlung und deren Risiken – eine Referenzgröße für den Strahlenschutz**

### **4.1 Zusammenfassung**

Natürliche Radioaktivität und Strahlung sind allgegenwärtige und unvermeidbare Phänomene unserer Umwelt. Sie setzen den Bemühungen des Strahlenschutzes um die bestmögliche Reduzierung stochastischer Risiken eine natürliche untere Grenze. Die verbleibenden Strahlenrisiken entsprechen denen der natürlichen Lebensführung des Menschen in einer modernen Gesellschaft mit hochentwickelter Technologie und medizinischer Versorgung. Eine weitere, über das Maß einer bestmöglichen Reduzierung angestrebte Minimierung von anthropogenen Strahlenexpositionen, die die gesamte Strahlenexposition nicht mehr erkennbar verändert, wäre aus gesamtgesellschaftlicher Sicht nicht mehr zu rechtfertigen. Sie würde im Gegenteil zur Vergeudung von Ressourcen führen, die besser anderweitig mit Nutzen für Mensch und Umwelt verwendet werden könnten.

### **4.2 Die natürliche Strahlenexposition**

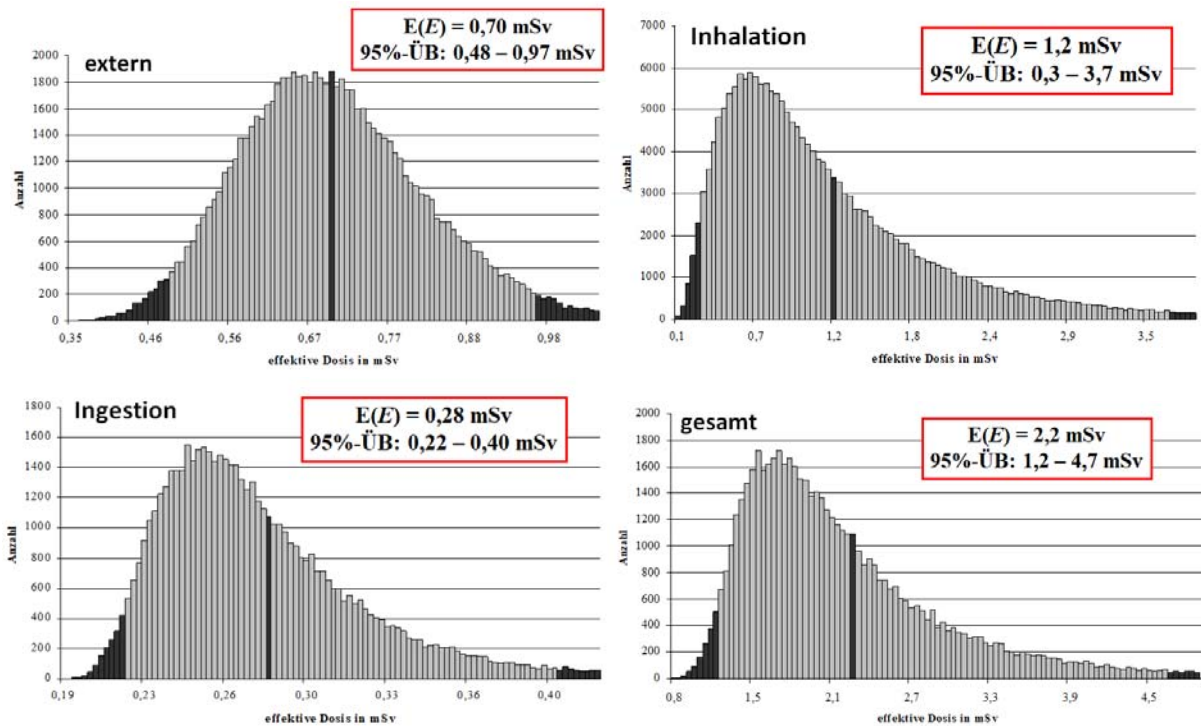
Natürliche Radioaktivität und Strahlung sind allgegenwärtig; siehe z.B. MICHEL et al. (2006), UNEP (2016); Sie bewirken eine natürliche Strahlenexposition, dem jeder Mensch ausgesetzt ist und dem niemand entgehen kann. Siehe dazu auch SSP Heft 1/2017 mit dem

Schwerpunktthema: „Natürliche radioaktive Stoffe – wir (ge-)brauchen sie“, sowie SSP Heft 2/2017 mit dem Schwerpunktthema: „Inkorporationsüberwachung, vor allem bei natürlichen radioaktiven Stoffen“.

Betrachten wir zunächst die Realität der Strahlenexpositionen der Menschen in Deutschland und der Schweiz (Tab. 4). Sie beträgt im Mittel in Deutschland 2,1 mSv pro Jahr (BMUB 2015), davon 0,7 mSv pro Jahr als externe Exposition durch die kosmische und die terrestrische Strahlung, 0,3 mSv pro Jahr durch Ingestion von Radionukliden mit Nahrung und Trinkwasser und 1,1 mSv pro Jahr durch Inhalation von Radionukliden, hauptsächlich Radon und Radonfolgeprodukten. Dies sind Mittelwerte der natürlichen Strahlenexposition, die allerdings hoch variabel ist. Für die Schweiz publizierte das Bundesamt für Gesundheit für 2016 (BAG 2016) die folgenden Dosiswerte für die Schweizer Bevölkerung aus natürlichen Strahlenquellen: terrestrische Strahlung: 0,35 mSv pro Jahr, kosmische Strahlung 0,4 mSv pro Jahr, Radionuklide im Körper: 0,35 mSv pro Jahr, Radon im Wohnbereich: 3,2 mSv pro Jahr, gesamthaft also 4,3 mSv pro Jahr. Beim Vergleich der Werte der Inhalationsdosen ist zu beachten, dass in Deutschland und der Schweiz unterschiedliche Dosiskoeffizienten für die Strahlenexposition durch Radon benutzt werden. Die Inhalationsdosen könnten sich in der Zukunft als etwa doppelt so hoch erweisen, falls man dem neuen dosimetrischen Ansatz der ICRP für Radon im Wohnbereich folgt. Siehe hierzu die ausführliche Diskussion in Kapitel 5. Man beachte weiter, dass 1 mSv effektive Dosis durch Inhalation von Radon und Folgeprodukten nach bisheriger Dosimetrie ca. 10 mSv Lungenäquivalentdosis bedeutet.

Mittels der Monte-Carlo-Methode auf der Grundlage der Verteilung von Messwerten der Umweltradioaktivität und Strahlung berechnete Vahlbruch für Niedersachsen einen 95%-Überdeckungsbereich der effektiven Dosis für Personen der Bevölkerung aus natürlichen Strahlenquellen von 1,2 mSv bis 4,7 mSv (VAHLBRUCH 2004). Die einzelnen Komponenten der natürlichen Strahlenexposition ergaben 95%-Überdeckungsbereiche für die externe Strahlung von 0,48 mSv pro Jahr bis 0,97 mSv pro Jahr, für die Ingestion von 0,22 mSv pro Jahr bis 0,40 mSv pro Jahr und für die Inhalation von 0,3 mSv pro Jahr bis 3,7 mSv pro Jahr.

Abb. 6 zeigt die Verteilungsdichten der natürlichen Strahlenexpositionen und ihrer Komponenten. Tab. 5 erweitert die genannten Daten für ganz Deutschland. Zusammenfassend kann man feststellen, dass eine natürliche Strahlenexposition von ca. 1 mSv bis 1,5 mSv pro Jahr die untere Schranke für die Bevölkerung Deutschland ist. Diese Strahlenexposition ist naturgegeben und unvermeidbar!



**Abb. 6:** Verteilung der altersabhängig gewichteten effektiven Jahresdosen durch externe Bestrahlung (oben links), Inhalation (oben rechts) und Ingestion (unten links) sowie die gesamte natürliche Strahlenexposition (unten rechts) in Niedersachsen. Außerdem sind die Erwartungswerte  $E(E)$  und 95%-Überdeckungsbereiche (95%-ÜB) der effektiven Dosen angegeben. (MICHEL et al. 2006, VAHLBRUCH 2004).

Die natürliche Strahlenexposition in Deutschland und auch in der Schweiz bewegt sich im weltweiten Vergleich im eher unteren Mittelfeld und weist keine außergewöhnlichen Anomalien auf, wenn auch in Bergregionen der terrestrische und der kosmische Anteil der Strahlung etwas erhöht sind. Länder mit höheren natürlichen Expositionen im Mittel und auch in den Extremen sind z. B. die nordischen Staaten wie Norwegen, Schweden und Finnland. Für Finnland ist die Verteilungsdichte der natürlichen Strahlenexposition in Abb. 7 dargestellt. Außerdem ist in Abb. 7 ein Überblick über die Bevölkerungsanteile einiger Europäischer Staaten gegeben, deren natürliche Strahlenexpositionen über 10 mSv im Jahr liegen. Eine ausführliche Übersicht über Anomalien der natürlichen Strahlenexpositionen ist an anderer Stelle gegeben (MICHEL et al. 2006).

Als Besonderheit ist anzumerken, dass nicht nur die externe Exposition durch die kosmische und die terrestrische Strahlung sondern auch die natürliche Ingestionsdosis weltweit hoch variabel ist. Vor allem der regelmäßige Verzehr von Fischen, Krusten- und Schalentieren kann wegen der naturgegebenen, teilweise hohen Aktivitätskonzentrationen von natürlichem  $^{210}\text{Po}$  und  $^{210}\text{Pb}$  zu Ingestionsdosen von bis zu 3 mSv pro Jahr führen (IAEA 1998, NORD-COTENTIN RADIOECOLOGY GROUP 1999)

**Tab. 4:** Erwartungswerte und in Klammern 95%-Überdeckungsbereiche der effektiven Jahresdosis in mSv in Deutschland (MICHEL et al. 2006, VAHLBRUCH 2004)

Alters-Klasse	$\leq 1$ Jahr	$> 1 - \leq 2$ Jahre	$> 2 - \leq 7$ Jahre	$> 7 - \leq 12$ Jahre	$> 12 - \leq 17$ Jahre	$> 17$ Jahre
Extern	0,7 (0,5 – 1,0)	0,7 (0,5 – 1,0)	0,7 (0,5 – 1,0)	0,7 (0,5 – 1,0)	0,7 (0,5 – 1,0)	0,7 (0,5 – 1,0)

Inhalation	0,2 (0,0 – 0,5)	0,3 (0,1 – 1,0)	0,6 (0,1 – 1,6)	1,0 (0,2 – 2,9)	1,3 (0,3 – 3,8)	1,4 (0,3 – 4,1)
Ingestion	0,8 (0,5 – 1,6)	0,4 (0,3 – 0,9)	0,4 (0,3 – 0,7)	0,4 (0,3 – 0,6)	0,4 (0,3 – 0,7)	0,2 (0,2 – 0,3)
Gesamt	1,8 (1,2 – 2,6)	1,5 (1,0 – 2,3)	1,6 (1,1 – 2,7)	2,1 (1,2 – 3,9)	2,4 (1,3 – 4,8)	2,4 (1,2 – 5,1)

Die natürliche Strahlenexposition ist ein multifaktorielles Geschehen. Es ist hilfreich, sich zu veranschaulichen, wodurch z. B. eine zusätzliche, effektive Dosis von rund 0,1 mSv im Jahr verursacht werden kann. Es sind nach MICHEL (2016b) und CHEN et al. (2015) jeweils:

- eine Reise nach Hawaii oder Tokyo (kosmische Strahlung),
- ein Jahr in Goslar statt in Hannover (terrestrische Strahlung),
- Verzehr von zwei Paranüssen pro Tag ( $^{226}\text{Ra}$ ),
- Verzehr eines Hummers oder 150 g Fisch pro Monat ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ),
- zwei kg Pilze aus den hochbelasteten Gebieten im Bayerischen Wald mit 4 000 Bq/kg  $^{137}\text{Cs}$ ,
- 10 Minuten in einem Radonstollen (Bad Gastein) mit einer  $^{222}\text{Rn}$ -Konzentration von 150 000 Bq/m<sup>3</sup> nach bisheriger Dosiskonvention.

Eine effektive Dosis von 0,1 mSv im Jahr geht im Rauschen des multifaktoriellen Geschehens der natürlichen Strahlenexposition unter! Daher wurde auch von der SSK im Jahr 2015 in ihrer Empfehlung zur Umsetzung des Dosisgrenzwertes für Einzelpersonen der Bevölkerung für die Summe der Expositionen aus allen zugelassenen Tätigkeiten 0,1 mSv im Jahr als praktikables und sinnvolles unteres Abschneidekriterium vorgeschlagen (SSK 2015).

Ein vielfach im Strahlenschutz angesprochener Dosiswert ist 0,01 mSv im Jahr im Zusammenhang mit der Freigabe von radioaktiven Stoffen („künstliche Radioaktivität“). Sehen wir, was eine zusätzliche effektive Dosis von 0,01 mSv im Jahr ausmacht. Es ist jeweils:

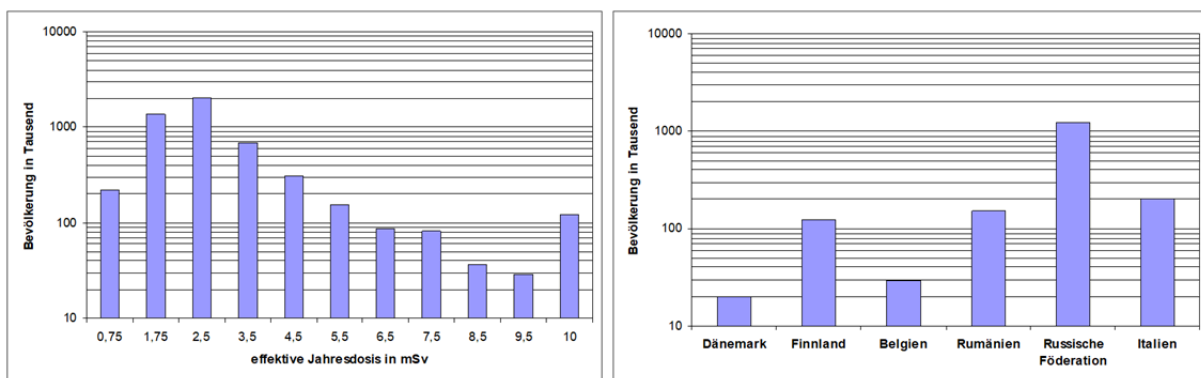
- ein Hin- und Rückflug von Deutschland nach Mallorca (kosmische Strahlung),
- ein Tag auf der Zugspitze oder dem Jungfraujoch (kosmische Strahlung),
- ein Monat in Goslar statt in Hannover (terrestrische Strahlung),
- Verzehr eines Hummers im Jahr oder einmalig 150 g Fisch ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ),
- Verzehr von zwei Paranüssen im Monat ( $^{226}\text{Ra}$ ),
- Verzehr von 200 g Pilzen aus den hochbelasteten Gebieten im Bayerischen Wald mit 4 000 Bq/kg  $^{137}\text{Cs}$ ,
- ein Tag in einer Wohnung mit 110 Bq/m<sup>3</sup>  $^{222}\text{Rn}$ .

**Tab. 5:** Statistische Kenngrößen der gesamten altersgemittelten, natürlichen effektiven Jahresdosis in mSv in Deutschland und ausgewählten Bundesländern. (In der Schweiz wurden bislang keine solchen Berechnungen durchgeführt). Die altersgemittelte Gesamtdosis wird nach der UNSCEAR-Konvention

$$\text{nach der Formel } E_{\text{gesamt, Mittel}} = 0,05 \times E_{\text{gesamt, } 1 < a \leq 2} + 0,30 \times E_{\text{gesamt, } 7 < a \leq 12} + 0,65 \times E_{\text{gesamt, } a > 17}$$

berechnet.

	altersgemittelter Mittelwert	typischer Bereich	
Welt UNSCEAR (2000)	2,4	1,0	10
Deutschland BfS (2005)	2,1	-	-
	Erwartungswert	2,5%-Perzentil	97,5%-Perzentil
Deutschland	2,2	1,2	4,6
Niedersachsen	2,2	1,2	4,7
Sachsen	2,6	1,2	6,3
Rheinland-Pfalz	2,8	1,2	6,2



**Abb. 7:** Verteilung der natürlichen Strahlenexposition in Finnland (links) und Populationen mit mehr als 10 mSv pro Jahr natürlicher Strahlenexposition (Daten aus UNSCEAR 2000)

Diese Vergleiche zeigen, dass 0,01 mSv im Jahr ein völlig unbedeutender Dosisbeitrag ist. Bei so geringen Werten noch an Maßnahmen zu denken, wäre ein Exzess der Vorsorge. Dies wäre ohnehin nur bei künstlichen Radionukliden möglich. Man muss deshalb nicht grundsätzlich gegen das Freigabekriterium von einigen 0,01 mSv pro Jahr für die höchstexponierten Personen sein. Bei künstlichen Radionukliden ist dies rechnerisch zwar machbar, aber in vielen Lebensbereichen weder sinnvoll noch akzeptabel.

Bei den natürlichen Radionukliden sieht das deutsche Regelwerk daher in Anerkennung der Sinnlosigkeit niedrigerer Werte einen realistischen Richtwert von 1 mSv pro Jahr vor. Für die Ermittlung von Strahlenexpositionen durch natürliche Radioaktivität und Strahlung ist 0,1 mSv pro Jahr eine realistische Grenze der Erkennbarkeit oder Nachweisbarkeit.

Hier muss schliesslich auch noch die medizinisch bedingte diagnostische Exposition – jedoch ohne die medizinisch-therapeutische Anwendung ionisierender Strahlung – erwähnt werden. Laut Parlamentsbericht (BMUB 2017) betrug der Mittelwert dieser Exposition über die gesamte Bevölkerung, einschließlich derer, die gar nicht untersucht wurden, 1,8 mSv pro Jahr im Jahr 2014. Der entsprechende Dosiswert der Schweiz beträgt gemäß Bundesamt für Gesundheit 1,2 mSv pro Jahr. Die Individualdosen pro Untersuchung liegen zwischen 0,1 mSv und 20 mSv. Da wir von der Annahme ausgehen, dass die Ärzte die rechtfertigende Indikation ernst nehmen, wird die medizinische Exposition hier nicht weiter betrachtet. Man kann sie zwar vermeiden, indem man radiologische oder nuklearmedizinische Untersuchungen ablehnt, aber das dadurch entstehende Gesundheitsrisiko dürfte für Viele größer sein als das radiologische Risiko. Es ist aber darauf hinzuweisen, dass bei einer ganzheitlichen Bewertung des Strahlenrisikos einer Person oder einer Population die medizinische Exposition – ungeachtet einer rechtfertigenden Indikation – sehr wohl zu berücksichtigen ist.

**Was nicht als Abweichung von der Normalität erkennbar ist, muss als normal gelten.**

### 4.3 Risiken des täglichen Lebens

Was bedeutet dies nun für die Betrachtung von Risiken und Sicherheit? Das Risiko und die erreichbare Sicherheit werden durch die natürliche Strahlenexposition – der niemand entgehen kann – nach unten hin begrenzt. Wir müssen uns also die Frage stellen: Wie sicher oder wie gefährlich ist unsere natürliche Umwelt?

Wir kennen unsere realen Risiken sehr gut. Jeder von uns muss sterben. In jedem Jahr sterben in Deutschland ca. 1,1 % der 80,8 Millionen Menschen in Deutschland (Tab. 6 und Abb. 8 und 9). Die häufigsten Todesursachen sind Herz-Kreislauf-erkrankungen und Krebserkrankungen. Leukämien gehören hingegen zu den selteneren Todesursachen. Leukämien zeigen große örtliche Variationen und haben viele mögliche Ursachen, Strahlung ist nur eine davon. Die Ableitungen radioaktiver Stoffe bei Kernkraftwerken bei Normalbetrieb verursachen jedoch keine Erhöhung des Leukämierisikos bei der in der Nahumgebung wohnenden Bevölkerung, insbesondere bei Kindern (SSK 2008, SCHÄDELIN et al. 2017).

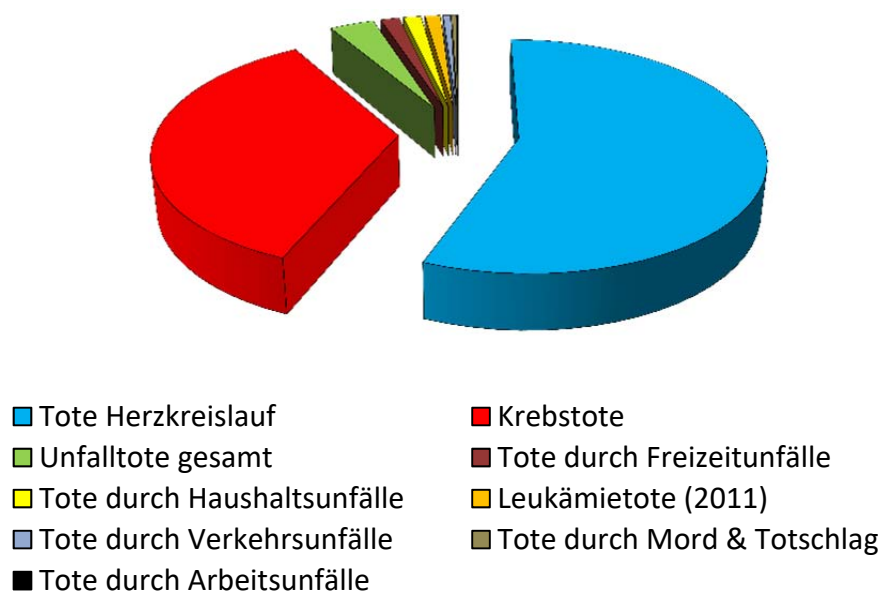
**Tab. 6:** *Integrale Populationssterberisiken in Deutschland im Jahr 2013 nach Angaben des Statistischen Bundesamtes*

Sterblichkeit	Tote	Integrales Populationsrisiko pro Jahr
Tote gesamt	891 825	1,1E-02
Tote Herz-Kreislauf	354 493	4,4E-03
Krebstote	223 842	2,8E-03
Unfalltote gesamt	21 930	2,7E-04
Tote durch Freizeitunfälle	9 214	1,1E-04
Tote durch Haushaltsunfälle	8 675	1,1E-04
Leukämietote (2011)	7 618	1,0E-04
Tote durch Verkehrsunfälle	3 542	4,4E-05
Tote durch Mord & Totschlag	2 122	2,6E-05
Tote durch Arbeitsunfälle <sup>#</sup>	932	1,2E-05

Zahlreicher als Leukämien sind tödliche Unfälle. Die Wahrscheinlichkeit von Arbeitsunfällen und damit auch die entsprechenden Sterberaten sind je nach Berufen sehr unterschiedlich und werden hier nicht weiter diskutiert. Unfälle im Haushalt und in der Freizeit, wo wir uns allgemein als sicher empfinden, sind häufiger als Unfälle im Verkehr, dessen Sicherheit individuell ganz unterschiedlich beurteilt wird. Auch Tod durch Mord und Totschlag ist um ein Vielfaches seltener als Tod durch Haushalts- und Freizeitunfälle. Aus den Fallzahlen in Tab. 6 kann man das integrale Populationsrisiko berechnen, d. h. den Anteil der Bevölkerung, der den jeweiligen Todesfall erleidet. Das integrale Populationsrisiko (gemeint ist der Anteil der Personen der Bevölkerung eines Landes, die im Alter X durch die Ursache Y sterben) ist gleichzeitig die Todeswahrscheinlichkeit der gesamten Bevölkerung; bei Erkrankungen ist sie stark altersabhängig. Allerdings sind die integralen Populationsrisiken nicht leicht verständlich und interpretierbar. Für Nicht-Fachleute sind sie zu abstrakt und irrelevant; denn man interessiert sich nur für sein individuelles Risiko (also die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person im Alter X an der Ursache Y stirbt).



Die individuellen Lebensrisiken werden durch folgende Faktoren bestimmt: unser eigenes Verhalten, dasjenige unserer Mitmenschen, unsere Lebens- und Ernährungsgewohnheiten, unsere Berufswahl und Freizeitgestaltung, Natur und Umwelt, im Weiteren auch Genetik und Epigenetik und schließlich der Zufall. Auf den Zufall und die Genetik haben wir keinen Einfluss, die anderen Faktoren können wir selbst in unterschiedlichem Maße Einfluss nehmen. Während wir bei der Umwelt in erster Linie vom Verhalten unserer Mitmenschen abhängig sind, spielt bei den anderen Faktoren unser eigenes Verhalten insgesamt die größere Rolle. So wird nach Renn (RENN 2014 p. 132) etwa 2/3 des Gesamtrisikos von unserem eigenen Verhalten bestimmt, da wir uns selbst bestimmten Risiken aussetzen. Da die Natur für uns Menschen weitaus die größte Bedrohung darstelle, treffen wir gegen Naturgefahren denn auch am meisten Maßnahmen, einerseits bei der Gefahrenabwehr und -bewältigung und andererseits zur Stärkung der Resilienz, also zur Fähigkeit, rasch zur Normalität zurückzukehren. In der Medizin entwickeln wir vorbeugende Maßnahmen, aber auch Verfahren der Diagnose und Therapie.



**Abb. 10:** *Integrale Populationssterberisiken in Deutschland im Jahr 2013*

Diese oben genannten Zahlen sind nur als Durchschnittswerte zu verstehen, sie hängen ab vom Ort an dem der Einzelne lebt, von der Personengruppe und der Altersklasse, der er angehört. Während in der Jugend Verkehrs- und andere Unfälle sowie Infektionskrankheiten dominieren, sind es im mittleren bis hohen Alter eher Haushaltsunfälle, Krebs- und Herz-Kreislaufferkrankungen, die zum Tode führen. Der Einzelne hat einen erheblichen Einfluss auf sein eigenes Risiko, etwa durch sein Verhalten im Haushalt und im Straßenverkehr, seine Lebens- und Ernährungsgewohnheiten, seinen Beruf und seine Freizeitgestaltung. Risikofaktoren, die er durch sein Verhalten beeinflussen kann, sind Rauchen, Konsum von Alkohol und Partydrogen, Übergewicht, Ernährung und Lebensstil. Da mit fortgeschrittenem Alter Krebs- und Herz-Kreislaufferkrankungen sowie Demenz zunehmen, können hier vorbeugende Untersuchungen (Brust, Prostata, Darm, Blutdruck, Cholesterin, etc.) mit den entsprechenden Änderungen des eigenen Lebensstils und rechtzeitigen medizinischen Maßnahmen das Risiko beeinflussen.

Persönliche Risikooptimierung lohnt sich somit und bedeutet: die jeweiligen Risiken zu kennen und mit Maßnahmen bei den größten von diesen zu beginnen. Im Vergleich hierzu sind Risiken durch kleine Dosisbeiträge in Bereichen unter einem mSv – oder gar einem  $\mu$ Sv – unerheblich. In diesem niedrigen Dosisbereich sind also Maßnahmen (Optimierungsmaßnahmen) mit dem Zweck, das Risiko weiter zu senken, sowohl im Sinne



der Anwendung des ALARA-Prinzips als auch angesichts des Missverhältnisses zwischen Aufwand und Nutzen nicht mehr gerechtfertigt, da sie auf das persönliche Gesamtrisiko keinen erkennbaren Einfluss mehr haben.

#### 4.4 Risiken durch die (natürliche) Strahlenexposition

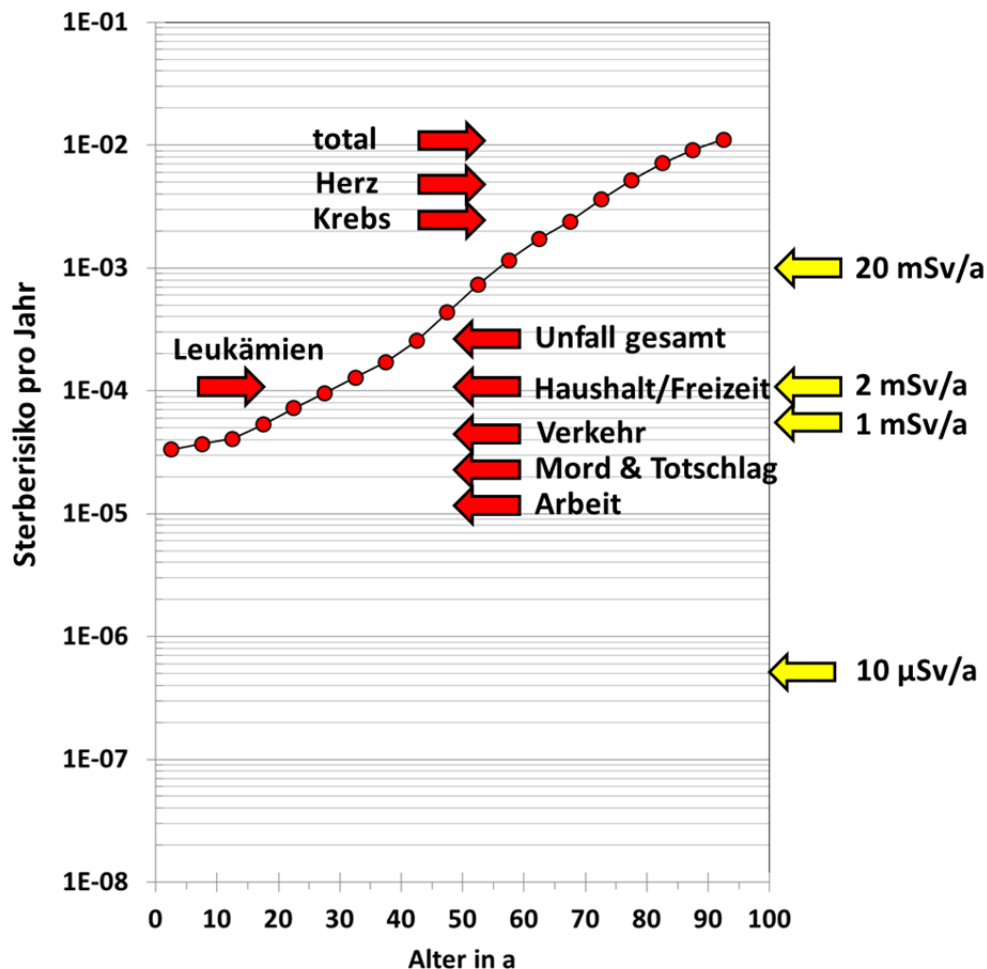
Sprechen wir nun von den radiologischen Risiken (Tab. 7). Diese werden hier als hypothetische Risiken bezeichnet, da wir nicht wissen, ob sie überhaupt existieren. **Sie beruhen ausschließlich auf der Annahme der unterstellten Gültigkeit bzw. Akzeptanz des LNT-Modells** (LNT = *Linear Non Threshold Hypothesis*), bei dem die bei hohen Dosen beobachteten Dosis-Risiko-Beziehungen konsequent zu kleinen Dosen hin linear extrapoliert werden. Dabei wird ein DDREF-Faktor (Dose and Dose Rate Effectiveness Factor) angewendet, für den die ICRP einen Wert von 2 vorschlägt.

Danach ist das hypothetische Populationsrisiko, das durch eine Strahlenexposition von 2 mSv pro Jahr bewirkt wird, zahlenmäßig gleich dem Populationsrisiko des Unfalltodes in Haushalt oder Freizeit. 1 mSv pro Jahr ist mit einem hypothetischen Populationsrisiko verbunden, das dem Risiko des Unfalltodes im Verkehr entspricht. Eine Strahlenexposition von 10 µSv pro Jahr liegt zwei Zehnerpotenzen unter den niedrigsten Unfallrisiken. Man muss aber darauf hinweisen, dass die nicht-radiologischen Risiken auf realen Fällen beruhen, also auf Toten, die man zählen und deren Todesursachen man bestimmen kann. Das große Problem ist, dass bei einem durch Strahlung bewirkten stochastischen Effekt bis heute, trotz intensiver Suche, kein Marker gefunden wurde, der es erlauben würde, strahlenbedingten Krebs oder Leukämie von solchen durch andere Ursachen zu unterscheiden.

**Tab. 7:** *Integrale hypothetische Populationssterberisiken durch Strahlenexposition in Deutschland für das Bezugsjahr 2013.*

Strahlenexposition	Populationsrisiko pro Jahr
20 mSv pro Jahr	1,0E-03
5 mSv pro Jahr	2,5E-04
Rn (D): 2 mSv pro Jahr <sup>6</sup>	1,0E-04
1 mSv pro Jahr	5,0E-05
10 µSv pro Jahr	5,0E-07

Zur Verdeutlichung dieser hypothetischen Risiken sei folgendes Beispiel ausgeführt: Eine Radonexposition von 1,1 mSv pro Jahr (für die Schweiz 3,2 mSv pro Jahr; unter Anwendung des Konversionsfaktors des Statement on Radon der ICRP von 2009) erhöht das Risiko, an Lungenkrebs zu sterben um 2,2 Prozent (für die Schweiz um 9,2 Prozent). Die mittlere berufliche Jahresdosis eines Mitarbeiters in einem Schweizer Kernkraftwerk von 0,68 mSv/Jahr entspricht einem zusätzlichen Risiko an Krebs zu sterben von  $2,8 \times 10^{-5}$ /Jahr, sein Krebssterberisiko wird also um 1,3 Prozent erhöht. Beim fliegenden Personal (2 mSv pro Jahr) erhöht sich das hypothetische Krebssterberisiko um 4 Prozent gegenüber demjenigen der übrigen Bevölkerung. Bei Personen, die in der Umgebung eines Kernkraftwerkes wohnen und einer zusätzlichen hypothetischen Dosis von 5 µSv pro Jahr ausgesetzt wären, würde das spontane Krebssterberisikos um lediglich 0,01 Prozent erhöht.

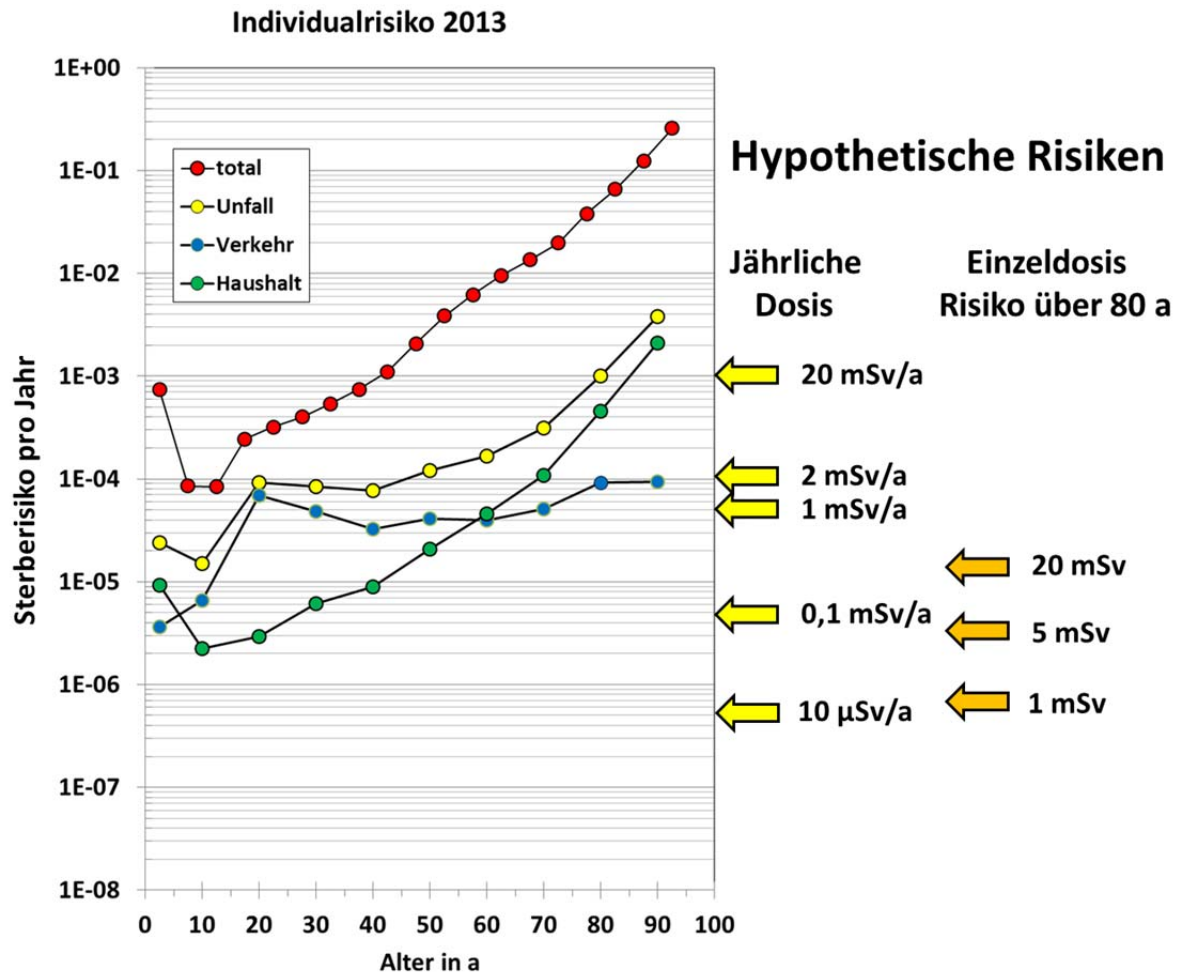


**Abb.8:** Verteilungsfunktion des Populations-Sterberisikos in Deutschland im Jahr 2013 mit Aufgliederung von Todesursachen im Vergleich zu den hypothetischen Risiken durch lebenslange Strahlenexpositionen mit den angegebenen Dosen pro Jahr (gelbe Pfeile).

Für die einzelne Person ist vor allem das Individualrisiko interessant, d. h. die Wahrscheinlichkeit, in einem bestimmten Alter zu sterben (Abb. 9). Dieses Risiko sinkt in den ersten Jahren nach der Geburt auf einen Minimalwert von etwa  $1 \times 10^{-4}$  pro Jahr und steigt dann nahezu exponentiell mit dem Alter an. In einem Alter zwischen 60 und 70 Jahren beträgt es  $1 \times 10^{-2}$  und mit 85 Jahren liegt es etwa bei 0,1. Es ist auch interessant, die Altersabhängigkeit der Unfallrisiken zu betrachten. Das Risiko eines Unfalltodes im Verkehr steigt mit dem Alter an, erreicht bei 20 Jahren aufgrund von Verkehrsunfällen bei Jugendlichen ein lokales Maximum. Dann bleibt es einige Jahrzehnte nahezu konstant, um im Alter wieder anzusteigen. Deshalb sollte man im Alter seinen Führerschein abgeben und konsequent Ampelübergänge (nur bei grün) benutzen. Tödliche Unfälle im Haushalt haben eine ganz andere Signatur. Ihre Wahrscheinlichkeit sinkt in den ersten Lebensjahren und steigt dann mit dem Alter nahezu exponentiell an.

Für einen Vergleich mit den hypothetischen, radiologischen Risiken stehen leider nur altersgemittelte Individualrisiken zur Verfügung (Tab. 8). Das Individualrisiko der mittleren natürlichen Strahlenexposition von 2 mSv pro Jahr liegt bei  $1 \times 10^{-4}$  pro Jahr und entspricht damit dem Minimum des beobachteten Sterberisikos, dem ein Mensch während seines gesamten Lebens generell ausgesetzt ist. Einmalige Strahlendosen von 20 mSv bzw. 1 mSv sind mit hypothetischen Risiken von  $1,3 \times 10^{-5}$  bzw.  $6,3 \times 10^{-7}$  verbunden. Eine extrem geringe zusätzliche Strahlenexposition von 10 µSv pro Jahr bringt ein rechnerisches Risiko von  $5 \times 10^{-7}$  pro Jahr mit sich. Im Vergleich dazu ist jeder Mensch einer Strahlenexposition von mindestens 1 mSv pro Jahr ausgesetzt. Die hat er bereits, wenn er auf die Welt kommt

und die akkumuliert er über das gesamte Leben. Im Mittel ist die Exposition um den Faktor zwei höher und für viele Menschen aufgrund der Variabilität der natürlichen Strahlenexposition um den Faktor zehn.



**Abb. 9:** Altersabhängige individuelle Sterberisiken in Deutschland im Jahr 2013 mit Aufgliederung von Todesursachen im Vergleich zu den hypothetischen Risiken durch einmalige Strahlenexpositionen (orange Pfeile) und durch lebenslange Expositionen mit den angegebenen Dosen pro Jahr (gelbe Pfeile) sowie durch einmalige Expositionen (orange Pfeile) bei einer Verteilung des Risikos auf 80 Jahre).

**Die größten Risiken sind natürlich!**

Unsere größten Risiken sind und bleiben aber natürlichen Ursprungs oder werden durch unsere normalen Lebensumstände verursacht: etwa Krankheiten und Epidemien, extreme Wetterereignisse, Erdbeben, Überschwemmungen, Tsunamis, Ernteauffälle und Hungersnöte und weitere. Hier treibt der Mensch denn auch – berechtigterweise – den größten Aufwand zum Schutz, etwa aufwändige medizinische Versorgung mit Diagnose und Therapie, sowie Maßnahmen zur Gefahrenabwehr und deren Bewältigung, aber auch Sicherheitsnormen, Verhaltensregeln und Gesetze. Die Natur ist somit nur eingeschränkt ein Vergleichsmaßstab für Sicherheit.

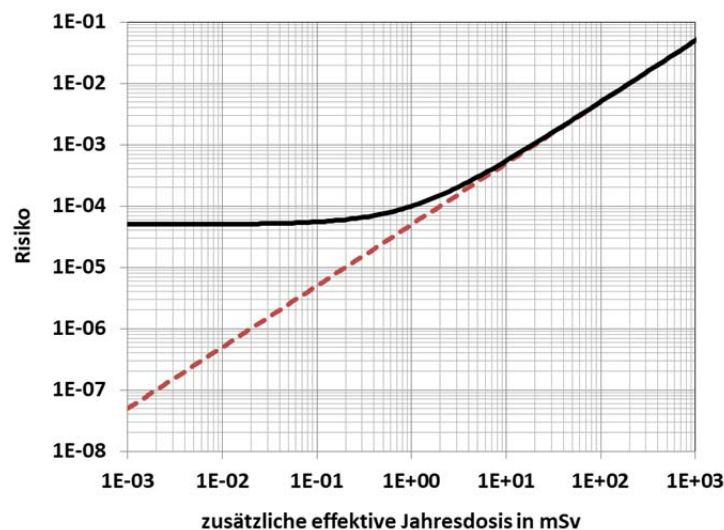
**Tab. 8:** Altersgemittelte hypothetische Individualsterberisiken durch Strahlenexposition in Deutschland auf der Grundlage eines Risikokoeffizienten von  $5\% \text{ Sv}^{-1}$ . Die angenommene mittlere Lebenserwartung beträgt 80 Jahre.

Effektive Dosis	Altersgemitteltes
-----------------	-------------------

	Individualrisiko
2 mSv pro Jahr	1,0E-04 pro Jahr
20 mSv	1,3E-05
5 mSv	3,1E-06
1 mSv	6,3E-07
10 µSv pro Jahr	5,0E-07 pro Jahr

Auch mit dem hypothetischen Risiko, verursacht durch die natürlichen Strahlenexposition, muss der Mensch leben. Die Effekte einer zusätzlichen Bestrahlung, die klein sind gegenüber der natürlichen Exposition, sind nicht mehr erkennbar und lassen sich nur noch rechnerisch ermitteln. Solche Folgen sind hypothetisch und im Vergleich zur natürlichen Exposition vernachlässigbar. Angesichts der großen Schwankungsbreite der natürlichen Exposition – die der Mensch normalerweise nicht als Kriterium für seine Ortswahl oder seinen Lifestyle heranzieht – ist somit alles, was klein ist gegenüber der örtlichen und zeitlichen Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition, nicht mehr relevant.

Bei Betrachtung der gesamten Dosis, die ein Mensch erhält, ergibt sich, dass das niedrigste erreichbare Risiko nach unten durch die natürliche Strahlenexposition begrenzt wird. Abb. 11 stellt dies grafisch dar. In der Abbildung wurde der Fall eines einjährigen Kindes betrachtet, dass die niedrigste mögliche, zusätzliche effektive Dosis von 1 mSv durch die natürliche Strahlenexposition im ersten Lebensjahr erhält. Dabei sind die Exposition im Mutterleib sowie die Exposition durch Inhalation von Radon und Radonfolgeprodukten außer acht gelassen. Man sieht, dass zusätzliche Jahresdosen unter 0,1 mSv das Gesamtrisiko nicht mehr erkennbar beeinflussen.



**Abb. 11:** Gesamtrisiko stochastischer Schäden als Funktion einer zusätzlichen effektiven Jahresdosis für ein einjähriges Kind, das in diesem Jahr eine natürliche Strahlenexposition von mindestens 1 mSv erhält (schwarze Kurve). Die rote gestrichelte Gerade gibt das ausschließliche Risiko stochastischer Schäden durch eine zusätzliche Dosis an. Es wurden der ICRP-Risikoeffizient von  $5\% \text{ Sv}^{-1}$  für die allgemeine Bevölkerung angesetzt.

Dies ist im Kern die Begründung für

- den gegenwärtigen Grenzwert von 1 mSv pro Jahr bei der Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung aus der Summe **zugelassener Tätigkeiten** nach dem StrlSchG (BMUB 2017),

- den Referenzwert von 1 mSv pro Jahr für Strahlenexpositionen bei der **Bewertung radioaktiver Altlasten**,
- den Richtwert von 1 mSv pro Jahr bei Anfall und Lagerung überwachungsbedürftiger **Rückstände aus NORM-Industrien** (BMUB 2017),
- den unteren Referenzwert als langfristiges Ziel in **bestehenden Expositionssituationen** in ICRP 103. Der Wert von 1 mSv pro Jahr stellt eine sinnvolle untere Grenze für weitergehende (Optimierungs-) Maßnahmen im Strahlenschutz für die allgemeine Bevölkerung und auch für die Beschäftigten dar.

#### 4.5 Schlussfolgerungen

Verantwortungsvoller und vernünftiger Strahlenschutz beschränkt sich auf das Machbare, sofern dieses sinnvoll und gerechtfertigt ist und vergeudet keine Ressourcen, die anderswo zum Wohle von Mensch und Umwelt besser eingesetzt werden könnten. Das Bemühen um Nachhaltigkeit und das Prinzip der Vorsorge sollten gleichzeitig dazu führen, dass die Auswirkungen geplanter menschlicher Tätigkeiten auf die Umwelt ganz im Sinne von ALARA so gering wie nach dem Stand von Wissenschaft und Technik möglich gehalten werden.

## 5. Das Unbehagen der Strahlenschützer: Empfehlungen für die Zukunft

### 5.1 Zusammenfassung

Der deutsch-schweizerische Fachverband für Strahlenschutz reagiert mit diesem Positionspapier auf den vielfach geäußerten Unmut über den derzeitigen Zustand des Strahlenschutzes und stellt Thesen und Empfehlungen für dessen zukünftige Entwicklung mitsamt ihren Begründungen national und international zur Diskussion.

### 5.2 Das verbreitete Unbehagen über den Strahlenschutz

In den letzten Jahren wurde in diversen Publikationen ein Unbehagen über den heutigen Strahlenschutz geäußert, so auch von bekannten Experten wie ABEL GONZALES und ROGER COATES. Sie empfehlen (GONZALES et al. 2013, COATES 2014) die Information und die Erläuterungen in den folgenden Bereichen zu verbessern:

- *Strahlenrisikofaktoren*,
- *Zweck, Möglichkeiten und vor allem Grenzen von epidemiologischen Studien*,
- *Größen und Einheiten im Strahlenschutz (eine Daueraufgabe)*,
- *Risiken durch Inkorporation im Vergleich zu denjenigen durch externe Bestrahlung*.

Anmerkung: Aus Erfahrung wissen wir, dass einige Terme im Zusammenhang mit ionisierender Strahlung oft missverstanden oder gar vermengt werden, wie etwa *verstrahlt*, *verseucht*, *bestrahlt*. Die ersten beiden sollten nicht mehr verwendet werden, da sie missverständlich sind. Korrekt wäre *externe Bestrahlung* (die Strahlenquelle ist ausserhalb des Körpers), *externe Kontamination* (radioaktive Stoffe haften auf Körper und Kleidung) und *interne Bestrahlung* nach *Inkorporation* (Radioaktivität gelangt über Nahrung, Atemluft oder Haut in den Körper und bestrahlen diesen von innen). Eine weitere Tatsache, die oft nicht berücksichtigt wird, ist, dass eine Bestrahlung das bestrahlte Material oder Gewebe in der Regel nicht radioaktiv macht.

Auf die Fragen, die ROGER COATES und RENATE CZARWINSKI im Namen des IRPA-Präsidiums an die Fachgesellschaften der IRPA gerichtet hatten (CZARWINSKI und COATES 2016, COATES und CZARWINSKI 2018), hat der FS bereits eine Antwort gegeben, die an der

Jahrestagung auf Usedom 2016 vorgestellt wurde: Die Fragen betrafen: *Unsicherheiten kommunizieren, Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition, flexiblere Grenz- oder Richtwerte in einer Ausnahmesituation, wie ALARA kommunizieren und wie Strahlung im Kontext betrachten*. Auf der Tagung wurden auch von andern Mitgliedsgesellschaften der IRPA eingereichten Antworten und Anregungen zusammengefasst. Die meisten Empfehlungen nach GONZALEZ et al. (2013) betreffen das Verhältnis von Strahlenschutz und Bevölkerung. In diesem Kontext werden auch grundsätzliche und praktische Aspekte der zukünftigen Entwicklung des Strahlenschutzes angesprochen.

Allgemeine Einigkeit herrscht jedoch darüber, dass der Erfolg oder Misserfolg des Strahlenschutzes ganz wesentlich davon abhängt, wie gut wir mit der Bevölkerung kommunizieren.

Auch in Diskussionen mit Mitgliedern des Fachverbandes für Strahlenschutz macht sich häufig ein allgemeines Unbehagen Luft, das man folgendermaßen zusammenfassen kann:

- *Der Strahlenschutz ist zu komplex geworden,*
- *Es gibt ein Zuviel des Schutzes aufgrund überbordender Konservativitäten. Optimierung ohne Ende macht keinen Sinn und vergeudet Ressourcen,*
- *Die Empfehlungen der ICRP zu Radon, zur Augenlinse und zum Schutz der Umwelt waren voreilig und haben das Vertrauen in die ICRP gestört,*
- *Die Sinnhaftigkeit der Dosisrichtwerte (Dose Constraints) wird häufig nicht verstanden und in Frage gestellt,*
- *Unsichtbare Risiken werden häufiger bearbeitet und sichtbare weniger berücksichtigt,*
- *Wir sind unfähig, die Inhalte des Strahlenschutzes zu kommunizieren,*
- *Wie kann die LNT-Hypothese verständlich erklärt werden?*
- *Wie können das Strahlenrisiko und dessen Unsicherheitsbereiche verständlich erklärt werden?*
- *Wie erklären wir die unterschiedlichen Dosis-Risikomodelle?*
- *Wie können wir einerseits naturwissenschaftlich exakt und gleichzeitig verständlich kommunizieren, insbesondere dann, wenn die Unsicherheiten der Befunde aus den verschiedensten Gründen sehr groß sind?*

### **5.3 Wo liegen die Probleme?**

Die theoretische Basis des Strahlenschutzes ist komplex und stützt sich auf mehrere Disziplinen, etwa Physik, Chemie, Biologie, Medizin, Technik (Völkle 2016). Sie wird nur von wenigen Fachleuten in allen Feinheiten durchschaut. Leider haben sich der theoretische Überbau und die praktische Umsetzung weit voneinander entfernt, so dass es schwierig wird, eine komplizierte Theorie in der Praxis umzusetzen. Trotzdem funktioniert die Praxis, aber nicht wegen der theoretischen Basis, sondern weil das gesetzliche Regelwerk, trotz einiger Brüche und logischer Widersprüche, meist diszipliniert und praktisch angewendet wird.

Brüche und logische Widersprüche entstehen, etwa durch die immer noch bestehende Ungleichbehandlung und Wahrnehmung von natürlicher und künstlicher Radioaktivität und der unterschiedlichen Behandlung gleicher Risiken, wenn sie aus natürlicher oder künstlicher Strahlung und Radioaktivität resultieren. Ein Beispiel dazu ist der Vergleich der Risikowahrnehmung von Radon im Wohnbereich zu den zusätzlichen Dosen in der Nahumgebung von Kernkraftwerken: im ersteren Fall liegt die Dosis bei 2 bis 3 mSv pro Jahr (mit großem Variationsbereich und einer log-normalen Verteilung mit den höchsten Werten bis zum 100fachen) und im andern Fall bei, auch unter sehr konservativen Annahmen, wenigen  $\mu$ Sv pro Jahr oder darunter.

Was verursacht am derzeitigen Strahlenschutz Unbehagen? Nachstehend eine sicherlich nicht vollständige Liste der Störfaktoren.

Komplexität	Die Komplexität der Dosisbegriffe wie zusätzliche, hypothetische, konservative, gesamt, verbleibende, erwartete, vermeidbare und vermiedene Dosis, sowie deren mangelnde Haltbarkeit durch immer wieder neue Vorschläge der ICRU/ICRP.
Begründung	Die mangelnden Begründungen für Grenz- und Referenzwerte, einschließlich derer ethischen Grundlagen.
Optimierung	Die grenzenlose Optimierung bis zur Dosis Null und das Vorsorgeprinzip nährt die Unterstellung, dass auch kleine und kleinste Dosen gefährlich seien. Dabei ist auch zu beachten, dass zusätzliche Strahlenschutzmaßnahmen zur Optimierung nicht nur zusätzlichen Aufwand erfordern, sondern anderen Risiken erhöhen könnten.
Konservativität	Aufhäufen von Konservativitäten und mangelnder Realismus.
Subjektive Beurteilung	Natürliche und vom Menschen verursachte Strahlenexpositionen werden immer noch subjektiv unterschiedlich gewichtet. 1 mSv aus natürlicher Strahlung bedeutet aber dasselbe Risiko, an Krebs zu erkranken, wie 1 mSv aus künstlicher Strahlung.
Risikobewertung	Risiken werden nur unzureichend verglichen. Da es ein Risiko Null nicht gibt, kann jedes hypothetische zusätzliche Risiko nur im Vergleich zu den bestehenden Gesamtrisiken bewertet werden.
Radon	Die Konfusion bei der Behandlung der Risiken durch Radon und die Dosimetrie von Radon. Anmerkung: Ein Beispiel einer Diskrepanz, die wir nur schwer der Bevölkerung erklären können, ist die folgende: Die Schweiz wendet die neuen Umrechnungsfaktoren bereits an, Deutschland jedoch nicht. Wie erklären wir diese Diskrepanz? Gerade beim Radon, unserer größten Dosiskomponente, führte der dosimetrische Ansatz der ICRP nicht zum Erfolg und erforderte Ausnahmen und nicht nachvollziehbare Argumentationen.
Kollektivdosen	Die Interpretation der Kollektivdosis und der daraus berechneten hypothetischen Toten. Es muss erklärt werden, wozu Kollektivdosen nützlich sind, wo sie sinnvoll sind und wo nicht.
Messbarkeit vs. Relevanz	Der Widerspruch zwischen Messbarkeit, technischer Machbarkeit und Relevanz der Daten für den Strahlenschutz.
Umwelt	Der übertriebene Strahlenschutz bezüglich der Umwelt angesichts nicht vorhandener Effekte in geplanten Expositionssituationen. Der Grundsatz, dass der Mensch die empfindlichste Spezies ist und, dass folglich, wenn dieser genügend geschützt ist, dann auch die Natur ausreichend geschützt ist, gilt auch weiterhin. Es gibt wahrscheinlich nur ganz wenige, eher exotische Ausnahmen, wo dies möglicherweise nicht der Fall ist und Maßnahmen prüfenswert sind. Zudem geht es beim Schutz des Menschen um den Schutz von Individuen. Beim Schutz der Natur geht es lediglich um den Schutz von Kollektiven, nicht jedoch von Individuen, dafür aber um die Erhaltung der Artenvielfalt. Siehe hierzu auch die Empfehlung der SSK (2016) und VÖLKLE (2006).

Und dann haben wir noch große Probleme bei der Kommunikation mit der Bevölkerung. Daher müssen wir uns fragen:

Komplexität	Ist der Strahlenschutz zu komplex, z. B. Multiplikatives Risikomodell?
Inhalte vermitteln	Können wir seine Inhalte nicht verständlich vermitteln?
Ganzheitlicher Arbeitsschutz	Wie kann der Strahlenschutz als normaler Teil des Arbeits- und Gesundheitsschutzes dargestellt werden?
Wissenschaft	Strahlenschutz & Wissenschaft: Wie gehen wir mit „alternativen Fakten“ um?
Grenzen der Kollektivdosen	Können wir es verantworten, wenn aus minimalen Dosen über die Kollektivdosis Hunderttausende von hypothetischen Tote ausgerechnet werden? Wir müssen Sinn und Grenzen der Kollektivdosen aufzeigen.
Grenzen des Optimierens	Stellen wir mit der übertriebenen Optimierung – also dort, wo der Aufwand im Vergleich zum Nutzen unverhältnismäßig wird – und dem Vorsorgeprinzip den bestehenden Strahlenschutz und uns selbst in Frage? Optimierung hat Grenzen.
„Magie“ der Strahlung	Der Strahlenschutz ist auch in der Falle der „Magie“ der Radioaktivität, da sie mit den menschlichen Sinnen nicht erfasst werden kann. Hinzu kommt, dass Hiroshima, Nagasaki, Tschernobyl und Fukushima dieser Magie noch etwas Bedrohliches beigefügt haben.
Risikokommunikation	Warum gelingt es uns nicht, das Risiko angemessen zu kommunizieren?
Mensch steht im Mittelpunkt	Kümmern wir uns nicht genug um die Sorgen der Menschen? Und um deren Sicherheit? Ängste sollte man ernst nehmen; Angst vor Strahlung kann krank machen. Radiophobie darf aber nicht geschürt werden.
Partikulär-Interessen dürfen nicht bestimmend sein	Ein besonderes Ärgernis ist, dass interessierte Gruppen, Politiker und manche Medien die Ängste der Menschen vor Radioaktivität und Strahlung zur Verfolgung eigener Ziele missbrauchen und auch vor Falschinformation nicht zurückscheuen. Hinzu kommt, dass die öffentliche Diskussion immer mehr von Inkompetenz, Vorurteilen und <i>Fake News</i> geprägt ist.
Offene Fragen denen wir uns stellen müssen	Tun wir genug in der Ausbildung, insbesondere von Multiplikatoren wie Lehrer, Ärzte und Journalisten, sowie bei der Nachwuchsförderung? Wieso gibt es so wenige Lehrstühle für Strahlenschutz?
	Interagieren wir zu wenig mit der Politik, damit Ängste nicht instrumentalisiert werden und Politiker sich für die Emanzipation einer rationalen, angstfreien und risikokompetenten Gesellschaft einsetzen?
	Was ist falsch gelaufen, wenn Menschen beim Wort Strahlung unwillkürlich an genetische Missbildungen denken, wie etwa Kälber mit drei Beinen oder Missbildungen von Kindern, die andere Ursachen haben und immer schon vorgekommen sind?



## 5.4 Thesen zur Lösung der Probleme

Alles ist eine Frage der Dosis! Aber es gibt eine massive Diskrepanz im Sprachgebrauch zwischen den Strahlenschutzfachleuten und Teilen der Bevölkerung, wenn man von kleinen Dosen spricht. Für manche lautstarke Kritiker des aktuellen Systems des Strahlenschutzes sind kleine Dosen solche im Bereich von 10  $\mu\text{Sv}$  pro Jahr und darunter. Dabei sind kleine Dosen unterhalb von selbst 1 mSv pro Jahr nicht mehr real, weil aufgrund der immer und überall bestehenden natürlichen Strahlung niemand ausschließlich einer so kleinen Exposition ausgesetzt ist. Diese rein rechnerischen (hypothetischen) Beiträge zur Strahlenexposition sind weder für die Exposition der Menschen noch für deren Strahlenrisiko relevant. Die durch das Regelwerk gegebene Sicherheit wird durch ein *de minimis* von 10  $\mu\text{Sv}$  pro Jahr (nachweislich) nicht geschmälert.

Die folgende Aufzählung enthält die wichtigsten Thesen:

Sprachregelung	Wir benötigen eine strikte Sprachregelung in Bezug auf niedrige, mittlere und hohe Dosen. Diese werden in der öffentlichen Diskussion vielfach durcheinandergeworfen und verursachen Konfusion. Eine gute Lösung wäre die Definition von UNSCEAR (2012) konsequent anzuwenden. UNSCEAR hat die bei den Fachleuten und in der Wissenschaft üblichen Dosiskategorien niedrig (low), moderat (moderate), hoch (high) unterschieden (UNSCEAR 2012, Annex A und B): <i>Niedrige Dosen wurden als Dosen im Bereich unter 100 mGy durch niedrig-LET Strahlung, niedrige Dosisraten im Bereich unter 0,1 mGy pro Minute definiert. Moderate Dosen sind definiert als Dosen oberhalb von 100 mGy bis zu 1 Gy; hohe Dosen als oberhalb von 1 Gy.</i> „Low doses were defined by the range of doses below 100 mGy of low-LET radiation, low dose rates by the range below 0.1 mGy per minute (=6 Gy/h). Medium doses are defined as doses in excess of 100 mGy up to 1 Gy. High doses above 1 Gy.“ Hier ist die Näherung 1 Gy $\approx$ 1 Sv berechtigt.
Natürliche Strahlung als Referenz	Der unvermeidbare Anteil der natürlichen Strahlung bestimmt das untere Ende der Optimierung.
Zusätzliche Dosen im Kontext bewerten	Wenn es um Effekte oder Sicherheit geht, ist die zusätzliche Dosis die falsche Größe. Ausschlaggebend ist das Gesamtrisiko, es muss also die gesamte Exposition betrachtet werden.
Abbau von Konservativitäten	Die repräsentative Person gemäß ICRP 101 ist hinreichend konservativ für den Strahlenschutz; zusätzliche Konservativitäten sollen nicht mit dem Vorsorgeprinzip begründet werden.
Grenzen der Optimierung	Ein Zuviel des Strahlenschutzes schadet, allein schon wegen begrenzter Ressourcen und einer ungerechtfertigten Umverteilung verfügbarer Mittel; dadurch können auch andere Risiken erhöht oder neue geschaffen werden.
Ganzheitlicher Ansatz	Wir benötigen einen ganzheitlichen Ansatz; Optimierungsmaßnahmen müssen bei den größten Risiken beginnen. Optimierungsmaßnahmen zu Strahlenschutz Zwecken dürfen zudem nicht andere Risiken erhöhen oder neue Risiken schaffen.
Gesamtrisiko	Wir müssen von den Gesamtdosen und Gesamtrisiken sprechen und die einzelnen Komponenten der Dosis klar als Teildosen kennzeichnen und immer in Bezug zur gesamten Dosis sowie zum Gesamtrisiko und deren

örtlichen, natürlichen und zeitlichen Variation beurteilen.
---

## 5.5 Empfehlungen für den Strahlenschutz der Zukunft

### 5.5.1 Sicherheit statt Risiko vermitteln

Wie im dritten Kapitel dargelegt, kann die Geschichte des Strahlenschutzes als ein Weg zu mehr Sicherheit verstanden werden. Der Strahlenschutz hat auf diesem Weg eine Qualität erlangt, die – bei Befolgung der Regeln – hohe Sicherheit garantiert. Dabei ist es wie in allen Lebensbereichen: Bei Nichtbefolgung von Regeln droht Gefahr. Darum ist Strahlenschutz auch für die Zukunft wichtig.

Die Einschätzung der mit Strahlenexpositionen verbundenen Risiken ist bei den Strahlenschutzfachleuten in den letzten Jahrzehnten stabil geblieben. Unser Wissen über die Gefahren von Radioaktivität und ionisierender Strahlung ist hinreichend, um mit sachgerechtem Strahlenschutz höchstmögliche Sicherheit zu schaffen. Das bestehende System des Strahlenschutzes mit den Grundpfeilern Rechtfertigung von Expositionen, Optimierung des Schutzes durch Reduzierung der Dosis unter Berücksichtigung sozialer und ökonomischer Randbedingungen und der Begrenzung von Expositionen ist solide und reduziert verbleibende Risiken auf ein akzeptables oder tolerables Maß.

Ein geringes Risiko bedeutet gleichzeitig hohe Sicherheit. Ein Risiko von  $5 \times 10^{-5}$  pro mSv meint 99,995% Sicherheit (also 1:20.000). In anderen Worten: ein Grenzwert für die allgemeine Bevölkerung von 1 mSv pro Jahr bedeutet 99,995% Sicherheit. Dessen sollten wir uns bewusst sein und dies sollten wir auch in der Außendarstellung klarmachen.

<b>Strahlenschutz schafft Sicherheit!</b> <b>Reden wir daher von Sicherheit anstatt von Risiko!</b>
--

Die Strahlenschützer sehen ihre Aufgabe darin, Mensch und Umwelt vor schädlichen Wirkungen ionisierender und nicht-ionisierender Strahlung zu schützen. Konkret heißt dies, dass sie dafür sorgen, dass die entsprechenden Vorschriften und Empfehlungen eingehalten werden, dass die Betroffenen verständlich und umfassend informiert werden und dass diese die getroffenen Maßnahmen auch nachvollziehen können. Bei der Kommunikation sollte es darum gehen, die erreichte Sicherheit zu vermitteln und nicht primär von hypothetischen Risiken zu sprechen oder gar Ängste zu schüren.

Für den Wissenschaftler ist Risiko das Produkt aus der Wahrscheinlichkeit, dass ein Schadensereignis eintritt, multipliziert mit der Schwere des Schadens, also eine mathematische Größe. Für den Laien bedeutet das Wort Risiko dagegen Gefahr oder Bedrohung und kann Ängste auslösen, ist also nicht quantifizierbar. Bei der Risikobeurteilung sind Menschen sehr subjektiv. Bei Risiken, die sie freiwillig auf sich nehmen oder bei solchen, die sie glauben beherrschen zu können, sind sie großzügiger als bei solchen, die ihnen von anderen auferlegt werden. Dasselbe gilt für Tätigkeiten, die einen sofortigen Gewinn oder Nutzen versprechen, deren Gefahren oder Schäden – wenn überhaupt – erst später eintreten oder nur andere betreffen. Obwohl unser Leben in den industrialisierten Ländern heute so sicher ist wie nie zuvor, leben wir immer mehr in einer Risikowahrnehmungsgesellschaft und wittern überall Gefahren (RENN 2014). Das hängt wohl damit zusammen, dass wir heute über die vielen Kommunikationskanäle fast simultan über alles informiert werden, was irgendwo auf der Welt passiert. Die Suche nach Geborgenheit und Sicherheit ist ein urmenschliches Bedürfnis; wir glauben jedoch, dass wir diese Rückzugsmöglichkeit ins Schneckenhaus allmählich verloren haben.

Weiter ist zu berücksichtigen, dass ionisierende Strahlung mit den Sinnen nicht wahrnehmbar ist. Gefühle von Angst und Bedrohung vor etwas, was man weder spürt noch kennt, dem man sich ausgeliefert fühlt und das man nicht kontrollieren kann, sind ein Produkt

der menschlichen Phantasie. Bezüglich des Besonderen, das die Wahrnehmung des Strahlenrisikos prägt, empfehlen wir die Lektüre von Michel (2015). Leider wird die subjektive Wahrnehmung von Strahlenrisiken oft durch Informationen gesteuert oder gar fehlgeleitet, deren Relevanz und Wahrheitsgehalt der einzelne nicht überprüfen kann. Hier besteht nennenswertes Verbesserungspotential. Dabei ist Strahlung mit relativ einfachen Geräten mit hoher Empfindlichkeit messbar, sehr viel besser als die meisten chemischen Gefahrstoffe; man denke nur an die vielen Schäden, die durch Kohlenmonoxid-Vergiftungen jedes Jahr entstehen.

Die Botschaft des Strahlenschutzes lautet: Wenn die Grundsätze und Empfehlungen des Strahlenschutzes eingehalten sind – die da sind Rechtfertigung, Optimierung (so, wie in diesem Artikel beschreiben) und Begrenzung der Dosen – ist eine angemessene Sicherheit – immer im Vergleich zu den übrigen Risiken unseres täglichen Lebens – gewährleistet. Weitere Maßnahmen erübrigen sich dann, denn sie rechtfertigen den Aufwand im Vergleich zum Nutzen nicht mehr. Möglicherweise sind sie gar kontraproduktiv, da sie andere Risiken erhöhen oder neue schaffen, die durch die überflüssigen Strahlenschutzmaßnahmen erzeugt werden. Das setzt jedoch voraus, dass der Bürger Vertrauen in die Strahlenschützer hat und ihnen glaubt und dass diese auch in der Lage sind, ihre Argumentation verständlich dazulegen.

Die Fragen, mit denen wir uns für die Zukunft im Strahlenschutz auseinandersetzen müssen, sind die Folgenden: Wie stärken wir unsere Glaubwürdigkeit und wie setzen wir uns gegenüber denjenigen durch, die dem Bürger ein verzerrtes Bild vermitteln und ihm mit Falschmeldungen Angst machen? Wie erreichen wir, dass unsere Botschaft verständlich und unverfälscht über die Medien bei den Bürgern ankommen? Wie gehen wir mit den Medien um, denn sie sind ein Sprachrohr und gleichzeitig auch ein Filter zwischen uns und der Bevölkerung? Verständlicherweise haben die Medien einen ausgeprägten Selbsterhaltungstrieb, der dazu führt überwiegend interessante Botschaften zu vermitteln: Strahlung und Radioaktivität sind interessant, solange sie mystisch sind, was dazu führt, dass viele Medien Interesse an dieser mit Angst verbundenen Mystik haben und sie entsprechend pflegen.

### **5.5.2 Gesamtdosis anstatt einzelner (hypothetischer, berechneter) Dosisbeiträge**

Den Satz „*Alle Dinge sind Gift, und nichts ist ohne Gift. Allein die Dosis macht, dass ein Ding kein Gift ist*“ schreibt man PARACELSUS, einem Schweizer Arzt, Naturforscher und Philosophen (\* 11.11.1493, † 24.09.1541) zu. Dieser Satz ist zeitlos gültig und gilt auch für Radioaktivität und Strahlung. Gesundheitliche Effekte sind immer von der Dosis abhängig, und zwar von der gesamten Dosis, die ein Lebewesen erhält.

Damit kommen wir zu einem grundlegenden Problem des heutigen Strahlenschutzes, nämlich der Fokussierung auf die zusätzliche Dosis aus bestimmten menschlichen Aktivitäten anstatt auf die Gesamtdosis, die ein Individuum erhält. Es wird außeracht gelassen, dass jede zusätzliche Dosis sich zur natürlichen Strahlenexposition hinzuaddiert und meist sehr klein ist im Vergleich zu dieser. Tatsache ist, dass es solche niedrigeren Dosen allein – wie sie aufgrund von Messungen oder Modellen errechnet werden – real gar nicht gibt, da es keinen Ort auf der Welt ohne die natürliche Strahlung gibt.

Auch haben wir zu berücksichtigen, dass die einzelnen Komponenten der natürlichen Strahlenexposition einen großen Variationsbereich aufweisen. UNSCEAR hält 1 mSv pro Jahr bis 10 mSv pro Jahr für einen sinnvollen, aber noch lange nicht abdeckenden Bereich für die natürliche Exposition (UNSCEAR 2000; UNEP 2016), denn Extreme derselben liegen eher bei 100 mSv pro Jahr (Abb. 3).

Die epidemiologisch nachweisbaren Effekte, bei denen eine Dosis-Wirkungsbeziehung nachgewiesen werden konnte, beziehen sich immer auf Fälle, bei denen eine einzelne

Dosis-Komponente der gesamten Exposition relativ zur natürlichen Exposition dominierend wird und außergewöhnlich hohe Werte aufweist. Dies ist beispielsweise der Fall bei den Überlebenden der Atombombenexplosionen und den Uranbergarbeitern. Im Falle der Strahlenexposition durch Radon in Häusern sind epidemiologisch Effekte sowie eine daraus abgeleitete Dosis-Wirkungsbeziehung nur beim Zusammenlegen von Studien an großen Populationen nachweisbar.

Daher wird die Dosis-Wirkungsbeziehung durch Modelle beschrieben, denen eine LNT-Hypothese zugrunde liegt und deren Risikoeffizienten aus den Auswirkungen hoher Expositionen abgeleitet wurden. LNT ist also eine Hypothese; sie ist aber wahrscheinlich konservativ und überschätzt die Wirkung von Dosen im mSv- oder  $\mu$ Sv-Bereich.

Auch bei Wissenschaftlern gibt es kritische Stimmen zur LNT-Hypothese und insbesondere zum „Dogma“, dass es keine untere Dosischwelle gäbe: s. CALABRESE (2015). Dies geht hin bis zu – allerdings ebensowenig beweisbaren – Vermutungen, dass niedrige Dosen auch biopositive Wirkungen haben könnten. Zur Frage dieser sogenannten Hormesis siehe den posthum erschienen Artikel von JÜRGEN KIEFER im vierten Heft der SSP 2017. Aufgrund der statistischen Unsicherheiten im Bereich niedriger Dosen sind positive, aber auch negative, Wirkungen ionisierender Strahlung in diesem Dosisbereich weder erkennbar, noch nachweisbar, noch zurechenbar (UNSCEAR 2012).

Es ist gemäß heutigem Wissensstand unbekannt, ob es biologisch eine untere Schwelle für stochastische Schäden gibt. Alle Versuche, eine solche zu ermitteln, scheiterten bisher an der Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition und an der Variabilität der natürlichen Inzidenzen von Krebs und Leukämie. Aufgrund von Beobachtungen lassen sich keine genaueren Aussagen über den Verlauf der Dosis-Wirkungsbeziehungen im niedrigen Dosisbereich machen. Hinzu kommt, dass es in epidemiologischen Studien bisher nicht möglich war, ein vollständiges Unsicherheitsbudget aufzustellen. Ein solches wäre jedoch erforderlich um die Frage nach der Erkennbarkeit und Nachweisbarkeit von Risiken abschließend beantworten zu können.

Für solide Tumoren (nicht jedoch für Leukämie) wird ein multiplikatives Risikomodell empfohlen. Das durch eine Dosis  $D$  verursachte zusätzliche Risiko  $R_D(D)$  ist somit multiplikativ mit dem bereits vorhandenen (spontanen und altersabhängigen) Risiko  $R_0$  verknüpft. Für Personen, die bereits, infolge Alter und/oder Lebensumständen ein gegenüber dem Durchschnitt erhöhtes Krebsrisiko haben, erhöht sich auch der durch die Dosis  $D$  bedingte zusätzliche Risikobeitrag.

Diese Strahlenrisiko-Modelle gelten für den Durchschnittsmenschen. Es gibt jedoch individuelle Unterschiede in der Strahlenempfindlichkeit, die durch verschiedene Faktoren bestimmt werden, u.a. die Genetik und Epigenetik (das sind Änderungen der Genfunktion, die nicht auf Mutationen oder Rekombination beruhen und dennoch an Tochterzellen weitergegeben werden), das Immunsystem des betreffenden Individuums, eventuelle Prädispositionen sowie Synergien mit anderen Umweltfaktoren. Diese sind mitverantwortlich für die großen Unsicherheitsbereiche bei Risikoberechnungen.

Relevant für die Beurteilung eines Strahlenrisikos ist die gesamte Dosis, die ein Mensch erhält. Nur in den Fällen, in denen eine einzelne Komponente der Exposition dominierend ist, sollte diese und die entsprechenden Risiken getrennt betrachtet werden. Dies ist zum Beispiel der Fall bei hohen Expositionen durch die Atombombenexplosionen in Hiroshima und Nagasaki oder bei der Lungenexpositionen durch Radon bei Bergleuten oder in Wohnhäusern mit erhöhten Radonkonzentrationen. Nur in diesen Fällen macht die Betrachtung einzelner Komponenten der Strahlenexposition Sinn.

Nur bei künstlichen Radionukliden können extrem geringe Komponenten der Strahlenexpositionen aufgrund von Messdaten und Zuhilfenahme von Modellen berechnet

werden, da solche Radionuklide in der Natur nicht vorkommen. Bei natürlichen Radionukliden ist dies jedoch nicht möglich. Die Variabilität der natürlichen Hintergrundkonzentrationen setzt somit der Unterscheidbarkeit anthropogen veränderter Radionuklidkonzentrationen in der Umwelt gegenüber den natürlichen Hintergrundkonzentrationen und den daraus resultierenden Strahlenexpositionen eine untere Grenze. Unbeeinflusst von dieser Schwierigkeit bleibt die Unsicherheit, die durch die Variabilität der Inzidenzen von Krebs und Leukämie verursacht wird. Allein dass ein Effekt messtechnisch erfassbar ist, heißt noch nicht, dass er auch sicherheitsrelevant ist.

Bei Betrachtung der gesamten Dosis, die eine Person erhält, ergibt sich somit, dass das niedrigste erreichbare Risiko durch die natürliche Strahlenexposition begrenzt wird.

Bei der Beurteilung einer Gefährdung durch Strahlung ist also die Gesamtdosis die entscheidende Größe. Diese muss immer in Bezug zur natürlichen Strahlenexposition mit ihren erheblichen zeitlichen und örtlichen Variationen gesehen werden. Derselbe Grundsatz gilt auch in Bezug auf Risiken im Allgemeinen. Die Strahlenexposition hängt stark vom Wohnort und den Lebensumständen ab. Es gibt Gebiete der Erde, in denen die Menschen permanent deutlich höheren natürlichen Dosen ausgesetzt sind als dem von UNSCEAR genannten Bereich von 1 bis 10 mSv pro Jahr. Es konnten bei den Bewohnern dieser Regionen bis heute weder eine statistisch signifikante Erhöhung der Krebssterblichkeit noch anderer möglicherweise strahlenbedingte Erkrankungen nachgewiesen werden. Ob hier wirklich die Strahlenwirkung unbedeutend ist, oder ob die Signifikanz der Studien ungenügend war, muss offengelassen werden.

Die einzelnen Beiträge zur Strahlendosis, wie sie häufig auf Grund von Emissionen berechnet werden, sind nur hypothetische Dosisbeiträge. Sie sind als Rechnungsgrößen zu betrachten und nicht als reale Dosen. Diese berechneten kleinen Dosen im Sub-mSv-Bereich dürfen auch nicht losgelöst von der Gesamtdosis bewertet werden, da der Mensch permanent einer natürlichen Strahlung mit Expositionen von einigen mSv pro Jahr ausgesetzt ist und niemand ausschließlich diese kleinen Dosen erhält. Sie sind somit lediglich Planungsgrößen und dienen dazu, Maßnahmen zu treffen, sie zu rechtfertigen, zu optimieren oder deren Wirksamkeit rechnerisch zu überprüfen.

Aufgrund dieser Überlegungen erwarten wir auch von der ICRP, dass sie beim Strahlenschutz des Menschen die Gesamtdosis betrachtet. Beim Schutz der Umwelt tut sie ja dies bereits; siehe hierzu VÖLKLE (2006), PENTREATH et al. (2015), SSK (2016).

### **5.5.3 Realismus statt Konservativität!**

Das Aufeinanderhäufen von Konservativitäten führt zu unsinnigen Aussagen, insbesondere, wenn damit Maßnahmen gerechtfertigt werden, und ist wohl eher ein Zeichen von Angst und Inkompetenz. Hier soll die Dosis einer repräsentativen Person angegeben werden. Diese tritt, im Sinne der ICRP (ICRP 2006) an die Stelle der früheren Dosis der kritischen Gruppe und ist in ihrer Definition bereits hinreichend konservativ.

Ein wesentlicher Aspekt von Realismus ist die Berücksichtigung von Unsicherheiten und Variabilität. Auch die SSK (2014) fordert eine realistische Ermittlung der Strahlenexposition, denn Realismus ist ein Zeichen von Kompetenz. Berechnungen von hypothetischen oder maximalen Dosisbeiträgen, wie sie meistens durchgeführt werden, haben nur dort einen Sinn, wo es um den Nachweis geht, dass auch im Extremfall der den Emissionswerten zugrunde gelegte quellenbezogene Dosisrichtwert, etwa beispielsweise 0,3 mSv (oder 0,2 mSv) pro Jahr z.B. bei Kernkraftwerken, eingehalten ist. Dies sicherzustellen, rechtfertigt eine vernünftige Konservativität. Für die tatsächliche Exposition, also dort, wo die betroffene Bevölkerung über ihre reale Situation informiert werden soll, müssen realistische Berechnungen durchgeführt werden, welche soweit als möglich die tatsächlichen

Lebensumstände der Betroffenen berücksichtigen. Ein Beispiel für eine solche realistische Kommunikation wäre dann:

*„Wenn Sie sich als Bewohner der Nahumgebung eines potenziellen Emittenten – etwa einer Kernanlage – zeitweise an der maximalen Einwirkungsstelle der Ableitungen aus der Anlage aufhalten, sich teilweise mit Produkten ernähren, die dort erzeugt werden und einen Teil Ihres Wasserbedarfs aus dem Fluss unterhalb der Anlage decken, würde sich bei Normalbetrieb der Anlage – und bei kleinen Betriebsstörungen – ihre Strahlenexposition um weniger als einen Tausendstel der Strahlenexposition, der Sie auch ohne Betrieb der Kernanlage ausgesetzt sind, erhöhen. Im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition, der Sie dauernd ausgesetzt sind, wäre dies völlig unerheblich.“*

#### **5.5.4 Optimierung hat eine untere Grenze**

Die natürliche Strahlenexposition setzt der Minimierung möglicher gesundheitlicher Effekte und damit der Optimierung und der erreichbaren Sicherheit eine natürliche untere Grenze. Eine Jahresdosis von 0,1 mSv verschwindet bereits vollständig in der Variabilität der durch die unterschiedlichen Lebensumstände und -führungen bedingten natürlichen Strahlenexposition. Daher unser Vorschlag eines Abschneidekriteriums von 0,1 mSv, der übrigens weitgehend im Einklang mit dem derzeitigen Strahlenschutzrecht steht.

Optimierung setzt einen Abwägungsprozess voraus, der zwei oder mehr Gewichtungsfaktoren gegeneinander vergleicht. Es ist zwar einfach zu sagen, dass wir die Dosis „minimieren“ sollen, da es aber kein definiertes Ziel oberhalb der Dosis Null gibt, ist die Ermittlung eines Optimums schwierig, führt aber dennoch (bei Berücksichtigung des ALARA-Prinzips) zu einem „vernünftigen“ Ergebnis oberhalb von Null. Die Liste der unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren enthält mehr als nur die Dosis. Es sind zu nennen:

- *das Strahlenrisiko im Verhältnis zu anderen bereits bestehenden Risiken, beispielsweise in der medizinischen Anwendung aber auch bei allen anderen Expositionssituationen,*
- *der finanzielle Aufwand, sowie ökonomische Vor- und Nachteile von Maßnahmen,*
- *ein eventueller Heimatverlust nach einem Unfall oder bei bestehenden Expositionssituationen,*
- *die Vermeidung der Vergeudung von Ressourcen,*
- *die Zumutbarkeit von Maßnahmen,*
- *eine Dosis, die kleiner ist als Abschneidekriterium (de minimis),*
- *ein Risiko, das vernachlässigbar ist im Vergleich zu den üblichen Risiken,*
- *wenn die Sicherheit nicht mehr weiter verbesserbar ist, ohne dass dabei andere Risiken erhöht oder neue geschaffen werden,*
- *wenn eine Maßnahme zur Optimierung bestehende Risiken erhöht oder neuen Risiken verursacht,*
- *die Akzeptanz bei den unmittelbar Betroffenen.*

Optimierung benötigt im naturwissenschaftlich-technischen Sinne quantitative Maßstäbe und eine Verlustfunktion, sie braucht also eine Rationale. Optimierung im gesellschaftlichen Sinne bedeutet Ausgleich zwischen unterschiedlichen Interessen, Kriterien und Überzeugungen. Sie erfordert somit einen demokratisch legitimierten Handlungsplan und einen gerechten Entscheidungsprozess.

#### **5.4.1. Geplante Expositionssituationen**

Bei einem Grenzwert der effektiven Dosis von 1 mSv pro Jahr für die Strahlenexposition der Bevölkerung aus zugelassenen Tätigkeiten sollte ein Abschneidekriterium von 0,1 mSv pro Jahr als Ende der Optimierung angesetzt werden.

Allerdings ist eine Optimierung im Sinn einer Reduzierung der Jahresdosis für Menschen nicht dasselbe wie eine Optimierung zur Reduzierung von Ableitungen radioaktiver Stoffe aus einem bewilligten Betrieb.

Hier muss auch der Kontext von Ableitungsgrenzwerten und Abschneidekriterien diskutiert werden. 0,1 mSv pro Jahr als Abschneidekriterium und als Ende der Optimierung der Strahlenexposition von Menschen hat nichts zu tun mit der Begrenzung von Ableitungen. Denn hier ist der Grundsatz im Regelwerk verankert, der fordert, dass der Stand von Wissenschaft und Technik berücksichtigt wird: nämlich "so niedrig, wie technisch möglich unter Berücksichtigung sozialer und ökonomischer Aspekte (*as low as technically feasible taking social and economic aspects into account*)". Solange Grenzwerte der effektiven Dosis eingehalten werden, ist die Festlegung von Grenzwerten für Ableitungen somit Aufgabe des Regulators (der Bewilligungsbehörde) und nicht des betrieblichen Strahlenschutzes.

Die Optimierung in Bezug auf Ableitungen muss also separat betrachtet werden. Das derzeitige Kriterium ist die Dosis, die eine Person an der ungünstigsten Einwirkungsstelle erhalten könnte. Diese repräsentative Person der ICRP ist für derartige Beurteilungen sinnvoll und hinreichend. Laut StrlSchG (BMUB 2017) gilt für die Strahlenexposition durch Ableitungen oder Rückstände natürlicher Radionuklide ein Richtwert von 1 mSv pro Jahr. Wird dieser für die repräsentative Person nicht überschritten, hat die Behörde bei natürlichen Radionukliden keine Handhabe für weitere Maßnahmen.

Anmerkung: Fakt ist, dass die Behörde hier schon eine erhebliche Konservativität eingebaut hat: Als Basis dient das 0,3 mSv pro Jahr-Konzept. Auch beim vollständigen Ausschöpfen der behördlichen Höchstwerte für die Ableitungen radioaktiver Stoffe durch ein Kernkraftwerk sind die berechneten Dosiswerte bereits um eine Größenordnung niedriger als Konzept von 0,3 mSv pro Jahr gefordert. Die tatsächlichen Ableitungen führen zu Dosiswerten im  $\mu\text{Sv}$  pro Jahr-Bereich, die also mindestens zwei Größenordnung geringer sind. Bei realistischen Berechnungen würde man auf Dosiswerte kommen, die nochmals eine bis zwei Größenordnungen tiefer liegen (VÖLKLE 1984, 2009; Strahlenschutzberichte des ENSI); man kommt dann auf zusätzliche Dosen durch Ableitungen der Kernkraftwerke bei Normalbetrieb, die um bis 5 Größenordnungen unter der natürlichen Strahlendosis liegen.

Bei den künstlichen Radionukliden, gilt in Deutschland ein Jahresgrenzwert von 1 mSv pro Jahr. Dabei werden die Ableitungen mit je 0,3 mSv pro Jahr über den Luftpfad und den Wasserpfad limitiert. Dies ist kompatibel zum Grenzwert in der Schweiz, der maximal 0,2 mSv pro Jahr für die Summe von Luft- und Wasserpfad aller Anlagen an einem Standort verlangt; bei Siedewasserreaktoren gilt ein Wert von 0,3 mSv pro Jahr, da noch 0,1 mSv/a für die Direktstrahlung addiert wird.

In Deutschland ist die AVV zu § 47 StrlSchV (BMUB 2012) mit ihren nicht zu rechtfertigenden Konservativitäten anzuwenden, die zusätzlichen Druck auf die Betreiber ausübt, die Ableitungen niedrig zu halten. Sie ist jedoch nur eine Verwaltungsvorschrift. In der Schweiz gibt es keine der AVV entsprechenden gesetzlichen Vorschriften. Hier gelten die Richtlinien des ENSI (insbesondere die ENSI-G14, 2009), die auf Modellen, Konzepten und Empfehlungen basiert, die dem aktuellen Stand der Wissenschaft entsprechen.

Bei natürlichen und künstlichen Radionukliden legt das StrlSchG einen Grenzwert für die Strahlenexpositionen aus zugelassenen Tätigkeiten fest, was mit unserem Ansatz konsistent ist. Die SSK hat in einer Empfehlung zur Limitierung der Strahlenexpositionen aus der Summe zugelassener Tätigkeiten einen Wert von 0,1 mSv pro Jahr als Abschneidekriterium empfohlen.

Es gibt durchaus andere Möglichkeiten, die Limitierung von Ableitungen rechtlich zu fassen und Ableitungen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik unter Berücksichtigung sozialer und ökonomischer Aspekte so niedrig wie möglich zu halten. Es muss nicht immer ein Grenzwert sein. Es sollte aber folgender Grundsatz der Nachhaltigkeit sowohl für natürliche als auch für künstliche Radionuklide gelten:

**Solange Grenzwerte nicht überschritten werden,  
muss man ohne Not die Natur nicht verändern.**

Im Folgenden ein Beispiel, bei dem ein Optimierungsprozess zu Diskussionen führte. Es betrifft die Ableitung von  $^{129}\text{I}$  aus Wiederaufarbeitungsanlagen. Die Ableitungen von  $^{129}\text{I}$  aus Sellafield (UK) und – vor allem – aus La Hague (F) haben die natürliche Isotopenhäufigkeit von  $^{129}\text{I}$  in der Europäischen Umwelt um ca. 6 Zehnerpotenzen erhöht; (e.g. MICHEL et al. 2012). Ist das nun gefährlich oder nur unschön oder vollkommen egal? Für ein Radionuklid mit 15,7 Millionen Jahren Halbwertszeit ist dies nicht nachhaltig, da die Vorkommen von  $^{129}\text{I}$  in der Umwelt langfristig verändert werden, die resultierende Dosis liegt allerdings derzeit in Europa nur bei 10 nSv pro Jahr (10 Millionstel eines mSv!). Rechtfertigen sich hier Maßnahmen und wenn, welche und zu welchem Preis, und was würden sie bringen? Setzt man dies in Relation zu anderen massiven anthropogenen Eingriffen in die Umwelt, dann ist wohl eine so kleine Veränderung vernachlässigbar, da sie sehr wahrscheinlich ohne Folgen für Mensch und Umwelt bleiben wird. Das Beispiel des  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre, das vermutlich zu großen Teilen für den Klimawandel verantwortlich ist, möge dies erläutern. Seit Beginn der Industrialisierung hat der Mensch den  $\text{CO}_2$ -Pegel der Atmosphäre um 50 % erhöht. Lag er in den letzten mehreren hunderttausend Jahren zwischen 180 und 280 ppm, so liegt er heute bereits über 400 ppm und steigt jedes Jahr um weitere 2 ppm. Dass der Klimawandel erhebliche Folgen für die Menschheit haben wird, wird heute nicht mehr bezweifelt. Über deren Art und Ausmaß können wir allerdings nur spekulieren.

Heute können – dank hochentwickelter Messtechnik und der Tatsache, dass sich Radionuklide wegen ihrer beim Zerfall ausgesandten ionisierenden Strahlung selbst „melden“ und ihr Vorhandensein nicht erst über aufwendige Laboranalysen ermittelt werden muss - extrem niedrige Konzentrationen von Radionukliden in der Umwelt gemessen werden. Rechnerisch für diese zu jährlichen Dosenbeiträgen im Mikro-Sievert-Bereich und darunter und sind für das Risiko oder die Frage der Sicherheit völlig irrelevant. Es ist sogar denkbar eine zusätzliche Exposition von noch 0,01  $\mu\text{Sv}$  pro Tag zu messen. Vor dem Hintergrund einer durchschnittlichen Exposition von 1,2 bis 2,9  $\mu\text{Sv}$  pro Tag (entsprechend 0.05 bis 0.12  $\mu\text{Sv/h}$ ) durch natürliche Radionuklide ist dies für die Sicherheit nicht relevant. Wer an einem Tag von Frankfurt nach New York fliegt erhält eine zusätzlichen Dosis von ca. 0.05 mSv pro Tag, was die Irrelevanz weiter bestätigt.

**Nur weil etwas messtechnisch nachweisbar ist,  
heißt das noch nicht, dass es auch sicherheitsrelevant oder gar gefährlich ist.**

Der Kontext und die Basis von Freigabewerten, Freigrenzen und Überwachungsgrenzen müssen besser erläutert werden. Überkonservative Freigabewerte sind zu vermeiden, speziell bei den IAEA/EU Werten der uneingeschränkten Freigabe. Bei NORM-Situationen sind solche Freigabewerte nicht praktikabel. Widersprüche sollen aufgedeckt werden, wie etwa gemäß GELLERMANN (2013), 0,01 mSv pro Jahr als Grenzwert bei Freigabe gegenüber 1 mSv pro Jahr als Richtwert für Sanierung. Obwohl die Frage berechtigt erscheint, warum etwas ändern, das sich in der Praxis bewährt hat, sollten der Widerspruch bei der Behandlung künstlicher im Vergleich zu natürlichen Radionukliden angesprochen werden.

Beim Messen und Überwachen sind die in der deutschen Richtlinie für die Emissions- und Immissionsüberwachung (REI) und im Integrierten Mess- und Informationssystem (IMIS)



geforderten Nachweisgrenzen, die für eine einzelne Probe auf 10  $\mu\text{Sv}$  pro Jahr ausgelegt sind, aus regulatorischer Sicht auch bei einem 0,1 mSv pro Jahr Abschneidekriterium noch sinnvoll. Auch zum in der EU angewandten Konzeptes von *Dense and Sparse Networks* steht das vorgeschlagene Abschneidekriterium nicht im Widerspruch. Während das *Dense Network* dosisorientiert mit „Reporting Levels“, die einer effektiven Dosis von 1  $\mu\text{Sv}$  pro Jahr entsprechen, die Radioaktivität in der Umwelt erfasst, soll das *Sparse Network* eventuelle auch Veränderungen der Umweltradioaktivität weit unterhalb jeder radiologischen Relevanz erfassen (EC 2009).

#### **5.4.2. Notfallexpositionssituationen**

Hier ist die Begrenzung der Strahlenexposition der Beschäftigten und der Bevölkerung als die „Kunst des Möglichen“ zu bezeichnen, denn es gilt: „Not kennt kein Gebot“. Eine Strahlenexposition bis 20 mSv im ersten Jahr als unterer Referenzwert ist nach den Erfahrungen in Japan u. U. sinnvoll. Denkbar sind sogar Notfallexpositionssituationen, in denen höhere Dosen toleriert werden müssen. Ein oberer Referenzwert von 100 mSv im ersten Jahr bietet in solchen Fällen genügend Abstand zum Bereich, wo deterministischer Effekte auftreten, und genügt, um solche zu vermeiden. Optimierung ist in der akuten Phase eines Notfalls Sache der Behörden, die im Rahmen geplanter Schutzmaßnahmen die dem aktuellen Szenario angemessene Maßnahmen und Regelungen vorschreiben oder empfehlen müssen. Sie müssen dabei insbesondere den erwarteten radiologischen Erfolg von Maßnahmen gegenüber den möglichen Nachteilen für die Betroffenen abwägen. Vor jeglicher Optimierung ist dagegen die Maßnahme auf Rechtfertigung bezüglich zu erwartender nicht-radiologischer Nachteile zu prüfen; ansonsten können durch eine Schutzmaßnahme große Schäden entstehen, wie in Fukushima durch Evakuierung!

In einer Nachunfallphase und vor allem in der langfristigen Phase eines Notfalls erfordern Optimierungsmassnahmen zunehmend eine gesellschaftliche Akzeptanz und haben das Ziel, so schnell und so sozial verträglich wie möglich den Übergang in eine bestehende Expositionssituation zu gestalten. Dabei ist das letztendliche Ziel, die Strahlenexposition der repräsentativen Person unter den Referenzwert der effektiven Dosis von 1 mSv pro Jahr zu drücken. Aber was in einem Notfall nicht geht, geht eben nicht.

In Notfallsituationen soll der Behörde die nötige Flexibilität zugestanden werden, Planungs- und Richtwerte an die aktuelle Situation und an deren zeitliche und räumliche Entwicklung schrittweise anzupassen. Dabei ist zu berücksichtigen, welche Mittel und Maßnahmen verfügbar, einsetzbar und wirtschaftlich tragbar sind. Ebenso sind andere Dringlichkeiten und Bedürfnisse in eine Gesamtbeurteilung einzubeziehen. Wichtig ist hier auch, dass sich im Ereignisfall benachbarte Länder absprechen und Maßnahmen und Kommunikation harmonisieren. Sinnvoll sind beispielsweise im Ereignisfall für das Gros der Betroffenen 20 mSv, für einzelne Personen bis 50 mSv im ersten Jahr als Planungswert, mit dem letztendlichen Ziel, nach Rückkehr zu einer vorerst eingeschränkten Normalität auf eine Dosis von 1 bis 6 mSv pro Jahr. Dabei ist daran zu denken, dass es auf Erden Gebiete mit bis zu 80 mSv und mehr Jahresdosis aus natürlichen Quellen gibt, und dass deren Bevölkerung dies nicht als Beeinträchtigung ihrer Lebensqualität betrachtet.

Entscheidungen über Massnahmen sind im Endeffekt Sache der Gesellschaft, deren Mitglieder Sicherheit sowie soziale und ökonomische Konsequenzen abwägen müssen. Die Herausforderung bleibt jedoch, wie man Bürger und Behörden von der Notwendigkeit eines Systems mit flexiblen, situationsabhängigen Richtwerten überzeugen kann. Konkret heißt dies, dass heute in einer Ausnahmesituation etwas als akzeptabel gilt, was gestern (im Normalfall) nicht toleriert wurde. Nicht unbeachtet soll man die Erfahrungen nach Umsiedlungen größerer Bevölkerungsgruppen als Folge von schweren Kernkraftwerksunfällen lassen, denn soziale und ökonomische Konsequenzen sind schwerwiegender als zusätzliche Expositionen in der Größenordnung der natürlichen Strahlendosen.

### 5.4.3. Bestehende Expositionssituationen

Hier ist ein Referenzwert oder Richtwert von 1 mSv pro Jahr sinnvoll und hat sich z.B. bei der Sanierung der Hinterlassenschaften der WISMUT und auch anderswo – etwa bei der Sanierung von Radium-Altlasten aus der Uhrenindustrie in der Schweiz – bewährt. Ein Abschneidekriterium von 0,1 mSv pro Jahr als Ende der Optimierung ist in bestehenden Expositionssituationen genügend konservativ und soll als Planungsinstrument im Hinblick auf 1 mSv pro Jahr als langfristiges Ziel eventueller Sanierungsmaßnahmen für die effektive Dosis der repräsentativen Person angesehen werden.

Die untere Grenze für Optimierungsmaßnahmen ist dann erreicht, wenn Aufwand und Kosten unverhältnismäßig groß werden im Verhältnis zum Nutzen, den sie erzielen – in unserem Fall die Reduktion der Exposition – oder falls sie unter Umständen andere Risiken erhöhen oder gar neue schaffen. Spätestens dann sind Maßnahmen nicht mehr gerechtfertigt. Eine Optimierungsmaßnahme sollte also nicht nur deswegen durchgeführt werden, weil sie machbar ist, sondern weil sich deren Aufwand durch den erreichten Gewinn rechtfertigt und dadurch keine anderen Risiken verursacht werden.

**Optimieren ohne realen Nutzen - nur weil man es kann - ergibt keinen Sinn!**

### 5.4.4. Das Ampelmodell

Das Optimierungskonzept ergibt nur Sinn in Verbindung mit einer Strategie aus zwei Dosiswerten gemäß einem Ampelmodell (Abb. 12): Über dem oberen Dosiswert sind Maßnahmen zwingend vorzunehmen (rot), zwischen den beiden Dosiswerten ist der Bereich der Optimierung (gelb) und unter dem unteren Dosiswert sind keine Optimierungsmaßnahmen erforderlich (grün). Ein solches Konzept ist auch gut zu kommunizieren, für den Bürger nachvollziehbar und sollte im Grundsatz überall im Strahlenschutz angewendet werden.



**Abb. 12:** Ein mögliches Ampelmodell des Strahlenschutzes

Für die berufliche Strahlenexposition ist in einem solchen Ampelmodell der obere Dosiswert der gesetzliche Dosisgrenzwert, der gelbe Bereich wird als tolerabel bezeichnet, wenn alles zur Reduzierung der Strahlenexposition getan wird. Der grüne Bereich, dessen oberer Dosiswert dem gesetzlichen Grenz- oder Richtwert für die allgemeine Bevölkerung entspricht, wird als akzeptabel bezeichnet. Ein solches Ampelmodell, das z.B. beim Umgang mit kanzerogenen Stoffen im Arbeitsschutz eingeführt wurde (AGS 2012, BENDER 2014), hat den Vorteil der leichteren Kommunizierbarkeit. Die Schweiz hatte bisher für Radionuklide in Lebensmitteln ein ähnliches System mit Toleranzwerten (gelb) und Grenzwerten (rot), das sich sehr bewährt hat. Leider wurde dieses – aus Gründen der Kompatibilität mit EU und andern internationalen Empfehlungen - aufgegeben, was unter Strahlenschützern mehrheitlich bedauert wird.

### 5.5.5 Die Radonproblematik

Radon und seine Zerfallsprodukte in unserer Umwelt sind zweifellos ein wichtiges Karzinogen für Menschen. Tausende von Lungenkrebsfällen wurden in der jüngeren Geschichte als Folge hoher Radonexpositionen bei Bergarbeitern dokumentiert. Dass auch in Wohnräumen die Inhalation von Radon und seinen Zerfallsprodukten zu einem erhöhten Lungenkrebsrisiko bei Nichtrauchern und in weit größerem Ausmaß bei Rauchern führt, konnte nun auch in großen Populationen nachgewiesen werden (DARBY et al. 2005).

Die Risikoeffizienten, d.h. das Risiko pro Exposition, angegeben in  $\text{Bq h m}^{-3}$ , aus den Bergarbeiterstudien und den Studien zu Radon in Wohnräumen sind miteinander verträglich. Allerdings gibt es eine große Anzahl modifizierender Faktoren, die das Radonrisiko beeinflussen und beim Vergleich der beiden Expositionssituationen zu berücksichtigen sind. Auch die benutzten Risikomodelle sind verschieden und die nicht statistischen Unsicherheiten wie z.B. die Modellunsicherheiten sind noch immer nicht quantifizierbar.

Im November 2009 hat die ICRP ein *Statement on Radon* veröffentlicht, das in ICRP (2010) zusammen mit der Publikation 115 Part 1 *Lung cancer risk from Radon and progeny* publiziert wurde (ICRP 2009, 2010). Im ihrem *Statement on Radon* senkte die ICRP den Detriment-adjustierten Risikoeffizienten für das Lungenkrebsrisiko durch Radon und Radon-Zerfallsprodukte für eine Bevölkerung aller Altersklassen um etwa den Faktor zwei und empfiehlt neue Referenzwerte für Radon an Arbeitsplätzen und in Wohnräumen. Das *Statement on Radon* der ICRP hat bereits seinen Niederschlag in den neuen EU Grundnormen (EC 2013) gefunden und Referenzwerte für Radon an Arbeitsplätzen und in Wohnräumen sind in den neuen Regelwerken, in Deutschland das StrlSchG (BMUB 2017), in der Schweiz das StSG (SCHWEIZER BUNDESRAT 2017, BAG 2017), festgeschrieben.

Die Einschätzung des Lungenkrebsrisikos durch Inhalation von Radon und seinen Zerfallsprodukten an Arbeitsplätzen und in Wohnräumen sowie die empfohlenen Referenzwerte für Radon wurden von der ICRP nicht mehr mit Einheiten der Organäquivalentdosis oder der effektiven Dosis angegeben sondern relativ zur zeitintegrierten Radonkonzentration im Gleichgewicht mit den Zerfallsprodukten in der Luft. Die EURATOM Grundnormen und das gesetzliche Regelwerk haben diese neuen Referenzwerte bereits übernommen.

Mit dem direkten Bezug zwischen Risiko und Radonkonzentration in der Luft, also einem epidemiologischen Ansatz, umgeht man das Problem, der großen Unsicherheit bei den Konversionskoeffizienten für die Umrechnung einer Radonexposition in  $\text{Bq h m}^{-3}$  in eine Organäquivalentdosis oder der effektiven Dosis in mSv. Gegenüber der bisherigen Konvention, basierend auf einem dosimetrischen Ansatz, führt die Absenkung der Risikoeffizienten zu eine Erhöhung der effektiven Dosis für eine gegebene Radonkonzentration in der Luft um einen Faktor von etwa zwei. Diese neuen

Umrechnungsfaktoren von  $5.52 \times 10^{-6}$  mSv pro Bq·h·m<sup>3</sup> für die Bevölkerung und  $7.47 \times 10^{-6}$  mSv pro Bq·h·m<sup>3</sup> für die berufliche Exposition werden vom Schweizer Bundesamt für Gesundheit ab Jahresbericht 2009 bereits angewendet.

In ihrem Statement vom Jahr 2009 kündigte die ICRP an, dass sie in der Zukunft neue Dosiskonversionskoeffizienten für Radon in den verschiedenen Expositionssituationen auf der Basis biokinetischer und dosimetrischer Modelle zu publizieren beabsichtigt, um damit die vorübergehend aus einem epidemiologischen Ansatz abgeleiteten Konversionskoeffizienten zu ersetzen. Erst im Jahr 2017 nach dem ICRP *Statement on Radon* liegen nun mit ICRP 137 (2017) solche Dosiskoeffizienten vor. Die Dosiskonversionskoeffizienten variieren stark in Abhängigkeit von den Atemraten und den Aerosol-Charakteristiken wie dem unangelernten Anteil der Radonfolgeprodukte, der Größenverteilung der Aerosolteilchen und dem Gleichgewichtsfaktor ( $F$ ). Eine zusätzliche Schwierigkeit ergibt sich durch die Tatsache, dass, bei gleicher Radon-Konzentration das Lungenkrebsrisiko durch Radon für Raucher etwa 20 mal höher ist als für Nichtraucher. Für Radon in Innenräumen empfiehlt die ICRP (2017) Dosiskonversionskoeffizienten, die sich bereits bei sitzender Tätigkeit gegenüber körperlicher Tätigkeit um den Faktor zwei unterscheiden. Für <sup>222</sup>Rn in Häusern erhält man nach ICRP (2017) Dosiskonversionskoeffizienten von:

$$F \cdot 7,5 \frac{\text{mSv}}{\text{mJ h m}^{-3}} \hat{=} F \cdot 16,8 \frac{\text{mSv}}{\text{MBq h m}^{-3}} = F \cdot 10,6 \frac{\text{mSv}}{\text{WLM}}$$
, was einer Erhöhung um mehr als den Faktor zwei gegenüber dem Wert aus ICRP 65 (1993) entspricht.

Ob und wann diese Dosiskonversionskoeffizienten international akzeptiert werden, ist derzeit noch nicht abzusehen. Die Schweiz wendet die Dosiskonversionsfaktoren des ICRP-Statement on Radon bereits seit dem Jahresbericht für 2009 an (BAG 2010). In Deutschland hat die SSK im Jahr 2017 empfohlen, *„solange keine quantitative Änderung der Radon-Dosiskoeffizienten in Deutschland vorzunehmen, bis ... nach einer weitergehenden wissenschaftlichen Diskussion eine internationale regulatorische Abstimmung erfolgt ist. Bis dies erreicht ist, sollen die in der derzeit gültigen Strahlenschutzverordnung in § 95 Absatz 13 festgelegten Radon-Dosiskoeffizienten in den laufenden einschlägigen Rechtsetzungsvorhaben Gültigkeit behalten, da sie innerhalb eines Unsicherheits- und Fehlerbereichs liegen, der sich sowohl aus dem epidemiologischen als auch aus dem dosimetrischen Ansatz ergibt. Eine etwaige vorher erfolgende, international nicht abgestimmte Änderung nur auf nationaler Ebene würde eine wesentlich belastbarere Begründung erfordern als dies gegenwärtig möglich ist“*.

Ungeachtet der noch nicht abgeschlossenen internationalen Diskussion um die Risikokoeffizienten für Radon und die dosimetrischen Dosiskonversionskoeffizienten, verursacht die verwirrende Kommunikation über die Radonproblematik ein verbreitetes Unbehagen über die Ausgestaltung des Strahlenschutzes sowohl im regulativen Bereich als auch für die Kommunikation mit der Bevölkerung über das durch Radon verursachten Lungenkrebsrisiko. Nicht in Frage gestellt wird jedoch die Notwendigkeit des Schutzes der Bevölkerung vor Radon, unabhängig von dieser Diskussion, denn die Referenzwerte beziehen sich alle auf die <sup>222</sup>Rn Aktivitätskonzentration in Bq/m<sup>3</sup>.

Allerdings ist die Absenkung der Risikokoeffizienten durch die ICRP nicht unumstritten. In ICRP 115 werden zwar die epidemiologischen Grundlagen dargestellt, die zur Revision der Risikokoeffizienten geführt haben. Deren Begründungen werden aber von Fachleuten immer noch kontrovers diskutiert, insbesondere die Berücksichtigung der das Risiko modifizierenden Faktoren sowie dass die Ergebnisse der WISMUT-Kohorte noch nicht einbezogen wurden.

Der Jahresmittelwert der Radonkonzentration in Aufenthaltsräumen liegt in Deutschland bei 50 Bq/m<sup>3</sup>. Dies entspricht bei einer durchschnittlichen Aufenthaltszeit in den Räumen von

rund 19 Stunden pro Tag einer mittleren jährlichen effektiven Dosis von ca. 0,9 mSv pro Jahr. Die gesamte jährliche effektive Dosis durch Inhalation von Radon und Radon-Folgeprodukten in der Atemluft, sowohl in Räumen wie im Freien, wird vom BfS mit 1,1 mSv pro Jahr (gemäß Parlamentsbericht 2015) angegeben. Der entsprechende Dosiswert der Schweiz beträgt 3.2 mSv pro Jahr, dies bei einer durchschnittlichen Radonkonzentration im Wohnbereich von  $75 \text{ Bq/m}^3$  wobei hier bereits die neuen Faktoren gemäß ICRP-Statement on Radon von 2009 angewendet wurden.

Die mittlere innere Strahlenexposition durch die Inhalation radioaktiver Stoffe bei ständigem Aufenthalt im Freien beträgt ca. 0,2 mSv (Parlamentsbericht 2000). Die Radonkonzentration im Freien variiert – wie diejenige in Räumen – stark. Für den größten Teil Deutschlands liegt die Konzentration des  $^{222}\text{Rn}$  in der Luft im Freien im Bereich von 5 bis  $30 \text{ Bq/m}^3$ . Der Medianwert in Deutschland liegt bei  $15 \text{ Bq/m}^3$  (BfS 2001). In Gebieten mit besonderen geologischen Bedingungen und bei orographischen Bedingungen, die den Luftaustausch erschweren, etwa in Tallagen, können auch höhere Konzentrationen auftreten. Als obere Grenze des natürlich vorkommenden Konzentrationsbereiches gelten  $80 \text{ Bq/m}^3$  (BfS 2001).

Die berechneten Inhalationsdosen für Radon sind, wie im Vorangehenden erläutert, stark durch Konventionen geprägt. Dies betrifft sowohl die Aufenthaltszeiten – in Deutschland geht man von 5 Stunden pro Tag Aufenthalt im Freien und 19 Stunden in Gebäuden aus – als auch den so genannten Gleichgewichtsfaktor, der angibt, in welchem Maße  $^{222}\text{Rn}$  mit seinen Zerfallsprodukten im Gleichgewicht ist und diese an die Aerosole angelagert sind. Dies ist für die Ablagerung in der Lunge ausschlaggebend, denn die Dosis erfolgt weniger durch das Radon-Gas sondern die in der Lunge abgelagerten Folgeprodukte. In Innenräumen liegt der Gleichgewichtsfaktor zwischen 0,2 und 0,6. Als Konvention wird er mit 0,4 angesetzt. Im Freien wird ein solcher von 0,2 angenommen (SSK 1994, BfS 2010).

Dabei sind die Organäquivalentdosen der Lunge nicht als gering einzuschätzen. 1 mSv pro Jahr, bzw. 2 mSv pro Jahr ICRP (2017) effektive Dosis bedeutet bei einem  $w_T$ -Faktor von 12% rund 10 mSv pro Jahr oder nach ICRP (2017) 20 mSv pro Jahr Lungenäquivalentdosis. Für das Lungenkrebsrisiko ist allerdings nicht die Dosis der gesamten Lunge maßgeblich, sondern diejenige im Bronchialepithel, das wiederum kein Organ im Sinne der ICRP ist. Die Beobachtung eines erhöhten Lungenkrebs-Risikos durch Inhalation von Radon und seinen Zerfallsprodukten steht allerdings nicht im Widerspruch zur Aussage, dass es keine beobachtbaren Effekte bei kleinen Organ-Dosen gibt.

Nach den bisherigen Dosiskonversionsfaktoren sind 0,3 mSv pro Jahr, bzw. nach eventuellen neuen Dosiskonversionsfaktoren 0,6 mSv pro Jahr, in Europa unvermeidbar da die Radonexposition in der Außenluft naturgegeben ist. Diese unvermeidbaren Jahresdosen stellen somit eine natürliche untere Grenze für das naturgegebene Lungenkrebsrisiko durch Inhalation von Radon und Radon-Zerfallsprodukten dar.

Die bisherige Kommunikation des Radon-Risikos und die Begründung des Radonschutzes durch Berechnung von hypothetischen Toten ist jedoch kein Beispiel für eine gute Kommunikation. BRÜSKE-HOHLFELD et al. (2006) berechnen absolute Risiken für Raucher und Nichtraucher und geben die attributive Anzahl von Toten in Deutschland mit 1896 Todesfällen pro Jahr an. Diese Autoren haben auch berechnet, wie viele Lungenkrebstote pro Jahr in Deutschland durch Begrenzung der Radonexposition vermeidbar seien. (BRÜSKE-HOHLFELD et al. 2006). Danach wären von diesen 1 896 Toten nur 68 Todesfälle bei einer Begrenzung auf  $400 \text{ Bq/m}^3$ , ca. 100 Todesfälle bei einer Begrenzung auf  $300 \text{ Bq/m}^3$  und 302 Todesfälle bei einer Begrenzung auf  $100 \text{ Bq/m}^3$  zu vermeiden. Für  $300 \text{ Bq/m}^3$  geben die Autoren keine Ergebnisse an, der Zahlenwert der Todesfälle für  $300 \text{ Bq/m}^3$  wurde durch Interpolation ermittelt. Wie maßgeblich solchen Überlegungen sind, hängt stark von der Genauigkeit der Schätzungen ab, denn Differenzen zwischen Zahlen mit großer Unsicherheit sind schnell mal nicht mehr signifikant. Aus der Sicht der zitierten Autoren müsste der Mittelwert der Radon-Konzentration in Innenräumen gesenkt werden, um einen merklichen

Effekt zugunsten der menschlichen Gesundheit zu bewirken, was wohl kaum möglich ist. Der Radonschutz sollte sich vielmehr auf die Senkung der hohen Konzentrationen und damit auf die Verringerung des Individualrisikos beschränken und nicht darauf fokussieren, das kollektive Risiko durch Radon zu verkleinern. Ein Grundsatz, die noch zu wenig zur Kenntnis genommen wird.

Eine signifikante Verringerung des Individual- und des Populationsrisikos könnte hingegen durch ein generelles Rauchverbot erreicht werden. Wenn man ein relatives Radon-bedingtes Lungenkrebsrisiko von 16 % pro 100 Bq/m<sup>3</sup> annimmt, dann wirkt dieses in einem multiplikativen Risikomodell jeweils auf das Basisrisiko von Rauchern und Nichtraucher. Da erster ein etwa 20fach höheres Lungenkrebsrisiko als die Nichtraucher haben, sind die Radon-Risiken für Raucher als absolute Risiken 20mal höher als für Nichtraucher. Die meisten berechneten Toten sind nämlich Raucher.

Von den berechneten 1896 Todesfällen pro Jahr - die auch durch das BfS gerne zitiert werden - wurden 1584 Todesfälle für Radonkonzentrationen unter 100 Bq/m<sup>3</sup> berechnet. Hier zeigt sich das Problem, dass durch Multiplikation einer großen Anzahl von Menschen mit einem kleinen Risiko beträchtliche Anzahlen von hypothetischen Toten berechnet werden. Auch in einer neueren Arbeit von AJROUCHE et al (2017) werden Anzahlen von Toten berechnet. Allerdings werden in dieser Arbeit auch die modellbedingten Unsicherheiten solcher Schätzungen dargestellt und die Unmöglichkeit ein Populationsrisiko zu bestimmen. Die ICRP lehnt eine solche Vorgehensweise ebenfalls ab. *“It is not appropriate, for the purpose of public health planning, to calculate the hypothetical number of cases of cancer or heritable disease that might be associated with very small radiation doses received by large numbers of people over very long period of time.”* ICRP 103, p. 51. Dies führt zur berechtigten Frage: Wie relevant ist ein Risiko, dass nur in extrem großen Populationen und bei hohen Dosen epidemiologisch sichtbar wird? Haben wir keine anderen Sorgen?

In diesem Zusammenhang muss noch darauf hingewiesen werden, dass BRÜSKE-HOHLFELD et al. (2006) einen sehr niedrigen mittleren Wert der Radonkonzentration im Freien von 6 Bq/m<sup>3</sup> angenommen haben, der nicht der Realität entspricht. Ein realistischerer Wert dafür hätte die berechneten Anzahl Toten deutlich vermindert und zeigt erneut die große Unsicherheit solcher Schätzwerte von hypothetischen Todesfällen durch Radon.

Die Revision der Radon-Risikokoeffizienten und die Ankündigung neuer Dosiskonversionsfaktoren durch die ICRP ist für den praktischen Strahlenschutz und für die Kommunikation von Grundlagen des Strahlenschutzes ein Desaster. Wären neue Risikokoeffizienten und Dosiskonversionsfaktoren gleichzeitig und wohlbegründet im Jahr 2009 publiziert worden, hätte der Strahlenschutz damit gut leben können. Die neuen Erkenntnisse hätten in die Grundnormen und ins Regelwerk des Strahlenschutzes übernommen werden können und es wäre leichter gewesen, der Bevölkerung die Notwendigkeit dieser Änderungen zu erklären. Man hätte weiter die Verwirrung vermieden, dass einzelne Länder – wie etwa die Schweiz – die Konversionsfaktoren des Statement on Radon anwenden und andere noch nicht.

Ohne eine gesicherte wissenschaftliche Begründung für die Risikokoeffizienten und ohne jede Erläuterung zu den zukünftigen Dosiskonversionsfaktoren ergeben sich für den Strahlenschutz massive Probleme; siehe dazu auch SSK (2017). Eine Verdopplung der Dosiskonversionsfaktoren würde, bei unveränderter Exposition, in etwa einer Verdopplung des Zahlenwertes der natürlichen Strahlenexposition entsprechen und eine drastische Erhöhung des Zahlenwertes bei den durch Radon beruflich Strahlenexponierten zur Folge haben. Für NORM-Industrien und -Arbeitsplätze wäre der Referenzwert von 1 mSv pro Jahr praktisch immer durch die Radonexposition überschritten. Dies alles hätte massive Auswirkungen auf den praktischen Strahlenschutz und auf die Kommunikation mit der Bevölkerung. Solche Aspekte hätte die ICRP bedenken müssen, bevor sie das Statement für Radon publizierte.

Einen andern interessanten Aspekt In Bezug auf die Risikowahrnehmung durch Radon stellt man allerdings fest. Die Strahlenschützer (und die Behörden) haben große Mühe, der Bevölkerung die Botschaft der Notwendigkeit eines Radonschutzes zu vermitteln. Die Tatsache, dass in unseren Wohnungen ein natürliches Karzinogen existiert, wird vielfach ignoriert und – wenn es an eventuelle Sanierungsmaßnahmen geht – mit Hinblick auf die Kosten von Sanierungen eher hintenangestellt. Anscheinend wird der Geldbeutel subjektiv als ein empfindlicheres Organ wahrgenommen als die Lunge. Dabei ist naturgemäß die Einstellung von Mietern und Hausbesitzern deutlich verschieden. Auch das gerne benutzte Argument „Radonschutz ist Raucherschutz“, hatte bisher nur mäßigen Erfolg.

### **Radon – alle reden davon, aber keine(r) nimmt es ernst!**

Ein Aspekt, der in der öffentlichen Diskussion zu kurz kommt, ist, wie relevant bei der Bevölkerung das Radonrisiko im Vergleich zu anderen Risiken ist. Damit einher geht die Frage nach dem sinnvollsten Einsatz der verfügbaren Ressourcen beim Risikomanagement. Siehe dazu auch Renn: Das Risikoparadox oder Warum wir uns vor dem Falschen fürchten?

*Die Radon-Situation lässt sich folgendermassen zusammenfassen:* Radon ist zwar ein wichtiges Karzinogen, aber lange nicht das einzige. Die Auswirkungen von Rauchen und Schadstoffen in der Luft auf die Lungenkrebsinzidenz sind wahrscheinlich höher als jene durch Radon. Rauchen erhöht das Radonrisiko: Beim Raucher ist das Radonrisiko rund 20 mal höher als bei einem Nichtraucher, der der gleichen Radonkonzentration ausgesetzt ist. Lungenkrebs macht in den industrialisierten Ländern rund zehn Prozent aller Krebsfälle aus und ist bei Männern die zweithäufigste und bei Frauen die dritthäufigste Krebsart. Zwar kommt Radon auch in der Außenluft vor, in Gebäuden ist dessen Konzentration meist – teilweise gar deutlich – erhöht. Der Radongehalt in Wohnhäusern zeigt eine annähernd lognormale Verteilung, also mit sehr vielen Werten im tiefen Konzentrationsbereich, wenigen im hohen und sehr wenigen im höchsten Bereich. Radonprogramme mit dem Fokus Häuser mit hohen und sehr hohen Konzentrationen zu sanieren, ist somit sinnvoll, um dieser Verteilung die Spitze zu nehmen. Es kann jedoch nicht das Ziel von Massnahmen sein, auch die Verteilung der mittleren und tiefen Konzentrationswerte zu verändern. Dies ist weder vom Aufwand her kaum realisierbar noch macht es Sinn.

*Unsere Analyse führt zur folgender Beurteilung:* Der Strahlenschutz hat beim Radon sein Ziel nicht erreicht. Der Bevölkerung wurde Angst gemacht vor etwas, was von seiner Herkunft her natürlich ist und womit der Mensch seit jeher lebt. Man stützte sich auf epidemiologischen Daten, die zwar bei Minenarbeitern ein signifikantes Risiko belegen, für die meisten Konzentrationen im Wohnbereich statistisch immer noch eher auf schwachen Füßen stehen. Hier hypothetische Krebstodesfälle zu berechnen, um Maßnahmen und Finanzbegehren zu rechtfertigen, ist nicht im Sinne der ICRP. Die Bevölkerung wurde zusätzlich dadurch verwirrt, dass verschiedene Strategien, Empfehlungen, Richtwerte und Umrechnungsfaktoren veröffentlicht wurden, die von mehreren Organisationen stammen, die sich nicht abgesprochen haben. Die Verwirrung wurde dadurch noch vergrößert, indem einzelnen Ländern diese unterschiedlich streng handhaben und umsetzen. Nicht erleichtert wird die Bewertung des Risikos durch die lange Latenzzeit von 20 und mehr Jahren beim Lungenkrebs. Bei der Epidemiologie müsste logischerweise im konkreten Einzelfall berücksichtigt werden, wo und wie jemand während der letzten 20 Jahren gelebt hat.

*Die Empfehlung der Arbeitsgruppe:* Wir empfehlen, dass sich die internationale Strahlenschutzgemeinschaft und die betroffenen Organisationen auf eine gemeinsame Strategie einigen, sowohl bei Grenz- und Richtwerten als auch bei den Empfehlungen zur Umsetzung, und dies auch klar zu kommunizieren. Zweifellos sind Gebäude mit sehr hohen Radonwerten zu sanieren; bei moderaten Werten wäre ein flexibleres Vorgehen zu empfehlen, das mehr auf die genaueren Umstände der einzelnen Sanierungsfälle Rücksicht



nimmt und den Betroffenen einen vernünftigen Ermessensspielraum lässt. Es braucht auch hier ein Ampelmodell mit einem Konzentrationsbereich wo Maßnahmen zwingend sind (rot), einen Bereich der Optimierung (gelb) und einen Bereich wo keine Maßnahmen erforderlich sind (grün). Dieselbe Flexibilität ist auch bei Altlasten und NORM sinnvoll.

### 5.5.6 Dosis der Augenlinse

Im April 2011 hat die ICRP ein „*Statement on Tissue Reactions*“ publiziert, in dem die Schwelle für deterministische Effekte der Augenlinse, d.h. Katarakte, auf der Grundlage neuerer epidemiologischer Untersuchungen auf 500 mGy gesenkt und ein Grenzwert für die berufliche Strahlenexposition der Augenlinse von 20 mSv pro Jahr gemittelt über 5 Jahre empfohlen wird (ICRP 2011). Dabei soll die Augen-Äquivalentdosis in keinem Jahr 50 mSv übersteigen mit dem Schutzziel, einen hypothetischen Anstieg der strahlenbedingten Katarakte um 1% zu vermeiden.

Außerdem wurde darauf hingewiesen, dass die Schwelle für Kreislauferkrankungen des Herzens und des Gehirns ebenfalls bei 500 mGy liegen könnte. Referenzen zu den neueren epidemiologischen Untersuchungen oder Begründungen für die neue Schwellen- und Grenzwertsetzung wurden nicht angegeben.

Diese ICRP Empfehlung hat ihren Niederschlag bereits in den neuen EU Grundnormen (Richtlinie 2013/59/Euratom) gefunden, und der Grenzwert für die Augenlinse ist in den neuen Regelwerken, in Deutschland im StrlSchG (BMUB 2017), in der Schweiz in der StSV (SCHWEIZER BUNDESRAT 2017, BAG 2017), festgeschrieben. Die Überwachung der Einhaltung dieses Grenzwertes stellt eine beträchtliche Komplizierung der Dosimetrie dar. Dabei ist die Strahlenexposition der Augenlinse nur für einen sehr kleinen Teil strahlenexponierten Personals der beruflich Strahlenexponierten relevant, nämlich Beschäftigte in der interventionellen Radiologie sowie in einigen Bereichen der Herstellung medizinischer Applikationen mit Beta-Strahlern. Außerdem können Überschreitungen des Grenzwertes bei Notfallexpositionssituationen auftreten.

Man muss sich fragen, ob der beträchtliche Aufwand für die Überwachung der Augenlinsendosis gerechtfertigt ist, da erstens hohe Dosen der Augenlinse durch geeignete Schutzmaßnahmen wie einfache Schutzbrillen vermieden werden können, zweitens Katarakte der Augenlinse leicht und mit gutem Erfolg therapiert werden können, und drittens die Strahlenexposition der Augenlinse nur für einen kleinen Teil der beruflich Strahlenexponierten relevant ist. Vielen erscheinen aus diesen Gründen die Regelungen zum Schutz der Augenlinse Ausdruck eines überbordenden mehr bürokratischen und nicht mehr angemessenen Strahlenschutzes. Die beobachtete signifikante Zunahme von Katarakt-Therapien ist der höheren Lebenserwartung und nicht der Strahlenexposition geschuldet.

### 5.5.7 Kommunikation mit der Bevölkerung

Bei der Kommunikation mit der Bevölkerung zeigt sich auch der Erfolg, oder allenfalls der Misserfolg des Strahlenschutzes (VÖLKLE 2016). Die entscheidende Frage für die Bevölkerung ist: **Was ist sicher?** Sie wurde bisher nicht beantwortet. Dies hat auch die IAEA erkannt und dieses Thema auf die Tagesordnung genommen (IAEA 2016). Die Antwort sollte im Hinblick auf die von Radioaktivität und Strahlung ausgehende Gefährdung lauten:

**Strahlenschutz schafft Sicherheit!**

Der Begriff Risiko sollte – vor allem, wenn dieses minimal ist – wegen der Bedeutungsverschiebung zwischen dem wissenschaftlichen und dem landläufigen Risikobegriff- vermieden werden. Von Risiko muss man dann sprechen, wenn ein



Risikofaktor das natürliche Lebensrisiko signifikant und merkbar verändert, also eine deutliche Erhöhung des Gesamtrisikos zur Folge hat.

Sicherheit ist für viele ein Gefühl, etwa wenn man meint, alles im Griff zu haben. Unsicherheit wird wahrgenommen als Unberechenbarkeit und Ausgeliefertsein (SLOVIC 1987, SLOVIC et al. 2004, MICHEL 2015). Das Problem von Strahlung und Radioaktivität ist, dass man sie weder sehen, noch hören, noch riechen, noch fühlen kann. Das erzeugt ein Gefühl der Unsicherheit, das von unserer Phantasie im Kopf erzeugt wird.

Unsicherheit im erkenntnistheoretischen Sinne ist ein unvermeidbares Phänomen menschlicher Existenz. Sie hat ihre Ursache in unvollständiger oder falscher Information (die zudem noch in individuell unterschiedlichem Maße verstanden und/oder verarbeitet wird), mit der wir grundsätzlich leben müssen. Dabei sind wir es auf Grund unserer Erfahrung und unserer Kenntnisse gewohnt, auch bei Vorliegen unvollständiger und subjektiv bewerteter Information Entscheidungen zu treffen - sonst könnten wir gar nicht leben.

Da Radioaktivität und Strahlung mit den Sinnen nicht wahrnehmbar ist, kommt der Vermittlung von Grundlagen des Strahlenschutzes hohe Bedeutung zu. Um mit der daraus resultierenden Unsicherheit in Bezug auf Radioaktivität und Strahlung umgehen zu können, ist Kompetenz im Strahlenschutz auch für die allgemeine Bevölkerung so notwendig wie der Umgang mit Feuer, Wasser, Sonne, Wind, Schnee, Schwerkraft, Elektrizität, Chemikalien, Werkzeugen, Maschinen und Fahrzeugen. Die Kompetenzen für den Umgang mit den letztgenannten werden uns mehr oder weniger gut beigebracht, nicht aber jene für den Umgang mit Radioaktivität und Strahlung. Hier versagt unser Ausbildungssystem. Vielfach wird von diesbezüglich ungebildeten Lehrern die Angst noch geschürt, und der Umgang mit Radioaktivität und Strahlung sowie Strahlenschutz sind immer noch nicht Teil unserer allgemeinen Kultur.

Denn Angst entsteht durch Falschinformationen oder fehlende Informationen. Sie ist ein Produkt unserer Phantasie, die durch Informationen genährt wird, die der einzelne nicht auf deren Relevanz und Wahrheitsgehalt überprüfen kann. Unter Umständen kann die Angst vor Strahlung mehr krankmachen als die Strahlung selbst. Solche Ängste müssen ernst genommen und abgebaut werden. Radiophobie darf nicht geschürt werden. Durch sachliche und verständliche Informationen können solche Ängste abgebaut werden. Das sollte ausschließlich Aufgabe der professionellen Sachkundigen im Strahlenschutz sein. Selbsternannte „Experten“ und falsche Propheten, die Außenseitermeinungen vertreten und vor „unrichtigen Behauptungen“ nicht zurückschrecken, sind hier fehl am Platz.

Wir sehen die folgenden Handlungsfelder, zu denen wir eine Strategie erarbeiten sollten.

Information professionalisieren	Die Information der Strahlenschutz-Fachgesellschaften muss professionalisiert werden, damit sie in der Lage sind, im Bedarfsfall rasch informieren zu können und ihnen die selbsternannten „Experten“ nicht zuvorkommen.
Bessere Ausbildung	Die schulische Ausbildung muss in allen Stufen Basiswissen zu Quellen und Effekten von Radioaktivität und Strahlung vermitteln.
Einbezug der Praktiker	Der Strahlenschützer darf sich nicht zum sturen Vollzugsbeamten degradieren lassen, dem es nur noch um die Einhaltung von Vorschriften geht und nicht um den Schutz vor wirklichen Bedrohungen.
Nachwuchs	Die Nachwuchsförderung im Strahlenschutz ist zu verbessern.
Multiplikatoren	Multiplikatoren, wie Lehrer, Ärzte und Journalisten, benötigen Fachwissen zu Quellen und Effekten von Radioaktivität und Strahlung.

	Wichtig ist, dass wir ihnen entsprechende und zuverlässige Informationsquellen zur Verfügung stellen.
Medien besser informieren	Journalisten sollten es lernen <i>Fake News</i> von wissenschaftlich gesicherten Aussagen zu unterscheiden. Wichtig ist, dass wir ihnen entsprechende und zuverlässige Informationsquellen „mundgerecht“ und „zeitgerecht“ zur Verfügung stellen.
Politiker Besser informieren	Politiker sollten davon Abstand nehmen, Strahlenängste für ihre eigenen Ziele zu instrumentalisieren. Wichtig ist, dass wir ihnen entsprechende und zuverlässige Informationsquellen zur Verfügung stellen und Fehlentwicklungen klar und engagiert entgegentreten.
Strahlenschutzkultur aufbauen	Strahlenschutzkultur, und auch Sicherheitskultur, sollten Teil der allgemeinen Kultur unserer Gesellschaft werden, was aus heutiger Sicht im Strahlenschutz nicht eine Fortsetzung von „noch mehr Sicherheit“ sein wird.
Professionalisierung im Strahlenschutz	Die Kommunikation des Strahlenschutzes – sowohl bei Behörden als auch in der Wissenschaft und den Fachgesellschaften – soll professionalisiert werden. Wichtig ist, dass im Bedarfsfall rasch und kompetent informiert wird und dies durch Fachleute und nicht durch selbsternannte Experten. In einem Ernstfall sind Information oft nicht vollständig und die Beurteilung der Lage nicht endgültig. Die Experten machen sich bei der Bevölkerung nicht unglaubwürdig, wenn sie darauf hinweisen und erklären, dass weitere Untersuchungen und Messungen nötig sind.  Die Unsitte, dass nach der profunden Aussage von Fachleuten auch noch die Gegenmeinung einer Organisation mit Naturschutz- oder Spendensammelaufgaben gefragt wird, soll abgestellt werden .

Ein wesentlicher Aspekt bei der Wahrnehmung von Sicherheit ist die Kontrollierbarkeit einer Gefahr, einer Bedrohung oder eines Risikos. Dabei ist es gleichgültig, ob diese Kontrollierbarkeit real oder nur gefühlt ist. Klassisches Beispiel ist hier die Einstellung vieler Autofahrer, die trotz mehr als 3.000 Unfalltoten im Jahr davon ausgehen, dass ihnen nichts passieren kann, denn sie glauben, das Risiko weitgehend unter Kontrolle zu haben.

Der große Aufwand der Autoindustrie und Legislative, das Autofahren sicherer zu machen, ist angesichts der aktuellen Anzahl an Unfallopfern sicher gerechtfertigt und zeigt Erfolge. Eine Erfolgsgeschichte bezüglich Sicherheitskultur ist die Zivilluftfahrt. Heute sterben heute noch rund 100 Personen pro Jahr durch Unfälle in der Zivilluftfahrt. Der Straßenverkehr fordert hingegen jedes Jahr weltweit 1,3 Millionen Todesopfer, in Europa 26 000 pro Jahr.

Für die Kommunikation von Sicherheit – aber auch um der Bevölkerung das Sicherheitskonzept des Strahlenschutzes zu erläutern – ist ein Ampelmodell wahrscheinlich das geeignetste. Jeder kennt aus dem täglichen Leben die Bedeutung von rot, gelb und grün. Das wird verstanden, auch wenn wir den roten Bereich als nicht tolerabel, den grünen als akzeptabel und den gelben als tolerablen Bereich der Optimierung bezeichnen. An Arbeitsplätzen mit krebserregenden Stoffen hat sich Ampelmodell auch in der Diskussion der Sozialpartner bewährt (BENDER 2014).

Allerdings ist Sicherheit immer relativ und kontextbezogen. Was im Notfall oder in einer bestehenden Expositionssituation tolerabel sein mag, mag sich bei geplanten Expositionssituationen ganz anders darstellen. Dies wird beispielsweise bei einem Notfall oder einer Altlast eines der schwierigsten Teile der Kommunikation sein. Der Regulator oder der Strahlenschützer kann hier gute Empfehlungen geben. Die Menschen werden auf Basis

ihrer dann verfügbaren Wissens letztlich für sich selbst entscheiden. Allgemeinverbindliche Regeln werden wahrscheinlich nicht durchzusetzen sein.

**Für Strahlenschutz, Radioaktivität und Strahlung gilt das gleiche wie für Verkehrsregeln und den Straßenverkehr: Solange kein Unfall passiert, fühlt man sich sicher! Dass in beiden Fällen meistens nichts passiert, liegt aber daran, dass die meisten die Regeln kennen und sich daran halten.**

Aber, was im Hinblick auf Radioaktivität und Strahlung generell und immer akzeptabel sein sollte, ist die Natur, so wie sie unvermeidbar ist ... und sicherer als das Unvermeidbare geht nicht!

## Literaturnachweis

- AGS (2012) Das Risikokzept für krebserzeugende Stoffe des Ausschusses für Gefahrstoffe ISBN 978-3-88261-718-4. [http://www.baua.de/pro\\_Tage/Publikationen/Broschueren\\_pro\\_Jahr82.pdf?\\_blob=publicationFile](http://www.baua.de/pro_Tage/Publikationen/Broschueren_pro_Jahr82.pdf?_blob=publicationFile).
- Ajrouché et al. (2017) Quantitative health risk assessment of indoor Radon: a systematic review. Radiation Protection Dosimetry, 1 – 9. Doi: 10.1093/rpd/ncx152.
- BAG (2010) Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz, Jahresbericht 2009 des Schweizer Bundesamtes für Gesundheit (BAG), [https://www.bag.admin.ch/bag\\_pro\\_Tage/home.html](https://www.bag.admin.ch/bag_pro_Tage/home.html)
- BAG (2016) Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität in der Schweiz, Ergebnisse 2016, <https://www.bag.admin.ch/bag>
- BAG (2017) Totalrevision der Verordnungen im Strahlenschutz, [https://www.bag.admin.ch/bag\\_pro\\_Tage/home/themen/mensch-gesundheit/strahlung-radioaktivitaet-schall/strahlung-gesundheit/totalrevision-der-verordnungen-im-strahlenschutz.html](https://www.bag.admin.ch/bag_pro_Tage/home/themen/mensch-gesundheit/strahlung-radioaktivitaet-schall/strahlung-gesundheit/totalrevision-der-verordnungen-im-strahlenschutz.html)
- Bale (1951) Hazards associated with radon and thoron. Health Phys (1980) 38:1062 – 1066.
- Bender (2014) Risk concepts for cancerogenic substances. Review. ASU International Edition, DOI 10.17147/pro\_JahrSUI.2014-06-10-02.
- BfS (2001) Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2000, Parlamentsbericht, Drucksache 14/6905
- BfS (2002) Umweltradioaktivität in der Bundesrepublik Deutschland 1998 bis 2001.
- BfS (2005) Parlamentsbericht. Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2005, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-201004061211>.
- BfS (2010) Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen – Bergbau). BfS– SW– 07/10. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-20100329966>.
- BfS (2010) Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen – Bergbau). BfS– SW– 07/10. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-20100329966>.
- BMUB (2012) Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung (Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Einrichtungen) vom 28. August 2012, BAnz AT 05.09.2012 B1, pp. 1 – 74.
- BfS (2014) Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Hrsg. Fachbereich Strahlenschutz und Gesundheit, Autoren: Fräsch G, Kammerer L, Karofsky R, Mordek E, Schlosser A., Spiesl J. Die berufliche Strahlenexposition in Deutschland 2012: Bericht des Strahlenschutzregisters. 1. April 2014, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2014032711370>.
- BMUB (2017) Gesetz zur Neuordnung des Rechts zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung vom 27. Juni 2017, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr. 42, ausgegeben zu Bonn am 3. Juli 2017.

- Brüske-Hohlfeld et al. (2006) Lungenkrebs durch Radon. mensh+umwelt spezial 18. Ausgabe 2006.  
[https://www.helmholtz-muenchen.de/fileadmin/FLUGS/PDF/Veranstaltungen/Radon\\_m\\_u\\_spezial.pdf](https://www.helmholtz-muenchen.de/fileadmin/FLUGS/PDF/Veranstaltungen/Radon_m_u_spezial.pdf)
- Calabrese (2015) On the origins of the linear no-threshold (LNT) dogma by means of untruths, artful dodges and blind faith. *Env. Research* 142 (2015), pp. 432-442.
- Chen et al. (2015) A report on radioactivity measurements of fish samples from the westcoast of Canada, *Radiation Protection Dosimetry* (2015), Vol. 163, No. 2, pp. 261–266.
- Clarke und Valentin (2009) The History of ICRP and the Evolution of its Policies, ICRP Publication 111, DOI: 10.1016/j.icrp.2009.07.009, [www.icrp.org](http://www.icrp.org). <http://www.icrp.org/pro Tagocs/The%20History%20of%20ICRP%20and%20the%20Evolution%20of%20its%20Policies.pdf>
- Coates (2014) Invited editorial: Radiation protection: where are we after Fukushima? *J. Radiol. Prot.* 34, E13–E16 doi:10.1088/0952-4746/34/4/E13
- Coates und Czarwinski (2017) IRPA consultation: Is the system of protection “fit for purpose” and can it be readily communicated? Views of the radiation protection professionals. *J. Radiol. Prot.* 2017 Nov 30. doi: 10.1088/1361-6498/pro Jahra9e5c.
- CRP (2010) Lung cancer risk from Radon and progeny and statement on Radon, ICRP 115, Ann. ICRP 40(1).
- Czarwinski und Coates (2016) Aktuelle Fragen des Strahlenschutzes – oder was uns bewegt - die Sicht der IRPA, Tagungsband Usedom, pp. 46-47.
- Coates und Czarwinski (2018) IRPA Consultation: is the system of protection fit for purpose and can it be readily communicated? Views of the radiation protection professionals. *J. Radiol. Prot.* 38 (2018) 440–455
- Darby et al. (2005) Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ.* 2005 Jan 29;330(7485):223. Epub 2004 Dec 21.
- Davis et al. (2015) Solid cancer incidence in the Techa river incident cohort: 1956-2007. *Radiat Res* 184(1): 56-65.
- Dohrenwend et al. (1981) Stress in the community: A report to the President .s Commission on the Accident at Three Mile Island, *Annals of the New York Academy of Science*, DOI: 10.1111/j.1749-6632.1981.tb18129.x
- EC (2009) RP-161. Environmental Radioactivity in the European Community 2004-2006.  
[https://rem.jrc.ec.europa.eu/RemWeb/MR/fileadmin Documents Monitoring Reports MR\\_2004-2006.pdf](https://rem.jrc.ec.europa.eu/RemWeb/MR/fileadmin Documents Monitoring Reports MR_2004-2006.pdf)
- EC (2013) Richtlinie 2013/59/EURATOM des Rates vom 5. Dezember 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und zur Aufhebung der Richtlinien 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom
- ENSI-G14 (2009) Richtlinie zur Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung von Schweizer Kernanlagen vom 21. Dezember 2009 (Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg).
- ENSI (2013) Strahlenschutzbericht 2012 – ENSI-AN-8302.
- ENSI (2016) Strahlenschutzbericht 2016: [https://www.ensi.ch/pro Tage/wp-content/uploads/sites/2/2017/06/ENSI\\_Strahlenschutz\\_2016\\_WEB-1.pdf](https://www.ensi.ch/pro Tage/wp-content/uploads/sites/2/2017/06/ENSI_Strahlenschutz_2016_WEB-1.pdf)
- Evans (1933) Radium Poisoning, A Review of Present Knowledge. *American Journal of Public Health*, Vol. XXIII October, 1933, No. 10, pp. 1017 – 1023.
- Fry (1998) Studies of U.S. Radium Dial Workers: An Epidemiological Classic. *Radiation Research* 150, No. 5s, pp. S21 – S29, [https:// pro Tagoi.org/10.2307/3579805](https://pro Tagoi.org/10.2307/3579805).
- Gellermann (2013) Die Asse – Werte, Wahrheiten, Widersprüche, Versuch über kein Endlager, Verlag epubli, Berlin.

- Gellermann et al. (2006) Radiologische Bewertung der Grubenwässer - Einleitungen des Steinkohlenbergbaus im Bereich Fossa Eugeniiana – Abschlussbericht, HGN Hydrogeologie.
- Gonzalez et al. (2013) Radiological protection issues arising during and after the Fukushima nuclear reactor accident. J. Radiol. Prot. 33, 497–571, doi:10.1088/0952-4746/33/3/497.
- Grant et al. (2017) Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958 – 2009. DOI: 10.1667/RR14492.1.
- Harrison und Martland (1931) The occurrence of malignancy in radioactive persons. A General review of data gathered in the study of the Radium dial painter with special reference to the occurrence of osteogenic sarcoma and the inter-relationship of certain blood diseases. American J. Cancer Vol. V, No. 4, pp. 2435 – 2516.
- Hatch et al. (1991) "Cancer rates after the Three Mile Island nuclear accident and proximity of residence to the plant". American Journal of Public Health. 81 (6): 719–724. doi:10.2105 pro JahrJPH.81.6.719.
- Hille et al. (1988) Population dose near the Semipalatinsk test site. Radiat Environ Biophys. 1998 Oct;37(3):143-9.
- Huber et al. (1996) Effects in Switzerland of the Chernobyl Reactor Accident, Kerntechnik Nr. 61 (1996), pp. 271-277.
- IAEA (1988) The Radiological Accident in Goiania. [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub815\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub815_web.pdf) .
- IAEA (1998) Radiological conditions at the Semipalatinsk test site, Kazakhstan : preliminary assessment and recommendations for further study. IAEA, Vienna, [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1063\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1063_web.pdf) .
- IAEA (1998) The radiological situation at the atolls of Mururoa and Fangataufa, STI/PUB/1028, IAEA, Wien
- IAEA (2005) Radiation, people and the environment. [https://www.iaea.org/sites\\_pro/Tagefault/files/radiation0204.pdf](https://www.iaea.org/sites_pro/Tagefault/files/radiation0204.pdf) .
- IAEA (2015) The Fukushima Daiichi Accident, <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1710-ReportByTheDG-Web.pdf> .
- IAEA (2016) Discussion Paper (Working Draft): How do we answer the question: “What is safe?” Second Meeting of the Emergency Preparedness and Response Standards Committee (EPRaSC), June 27 – July 1, 2016, IAEA, Vienna.
- IARC (1988) IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 43, Man-made Mineral Fibres and Radon, Lyon, IARC Press, pp. 33–171
- ICRP (1934) International Recommendations for X-Ray and Radium Protection Revised by the International X-Ray and Radium Protection Commission at the Fourth International Congress of Radiology, Zurich, July 1934; [www.ICRP.org](http://www.ICRP.org).
- ICRP (1950) International Recommendations on Radiological Protection, revised by the International Commission on Radiological Protection at the Sixth International Congress of Radiology, London, July 1950; [www.ICRP.org](http://www.ICRP.org).
- ICRP (1956) Report on Amendments during 1956 to the Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP); Radiation Research 8, 539-542 (1958) ; [www.ICRP.org](http://www.ICRP.org).
- ICRP (1977) Recommendations of the International Commission on Radiological protection, ICRP Publication 26, Ann. ICRP 1 (3); [www.ICRP.org](http://www.ICRP.org).
- ICRP (1991) 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21 (1-3).
- ICRP (1993) Protection against Radon-222 at Home and at Work, ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23 (2), 1993.

- ICRP (2006) Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of the Radiation Protection of the Public; ICRP Publication 101a; Ann. ICRP 36 (3).
- ICRP (2007) Die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) von 2007, ICRP-Veröffentlichung 103, Verabschiedet im März 2007. Veröffentlichungen der Internationalen Strahlenschutzkommission. Deutsche Ausgabe herausgegeben vom Bundesamt für Strahlenschutz.
- ICRP (2009) Statement on Radon, approved by the Commission in November 2009, ICRP 115 Part 2.
- ICRP (2011) Statement on Tissue Reactions, Approved by the Commission on April 21, 2011.
- ICRP (2017) Occupational intakes of radionuclides: Part 3, Annex A: Aerosol Data and Dose Coefficients for Radon Progeny. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4).
- IRPA (2004) IRPA Code of Ethics, <http://www.irpa.net/pro/Tagocs/IRPA%20Code%20of%20Ethics.pdf>
- IRPA (2011) IRPA Code of Conduct, <https://www.ipra.org/member-services/code-of-conduct/>.
- IRPA (2014) IRPA guiding principles for establishing a radiation protection culture. <http://www.irpa.net/members/IRPAGuiding%20Principles%20on%20RP%20Culture%20-2014%20.pdf>.
- Kiefer (2017) Homöopathie mit Strahlen? StrahlenschutzPraxis 4/2017 69 – 73.
- Kreienbrock et al. (2001) Case-Control Study on Lung Cancer and Residential Radon in Western Germany. American Journal of Epidemiology, 153 (1) 42–52, <https://pro.Tagoi.org/10.1093/pro/Jahrje/153.1.42>.
- Krestinina et al. (2005) Protracted radiation exposure and cancer mortality in the Techa River Cohort. Radiat Res 164(5): 602-611.
- Krestinina et al. (2013) Leukaemia incidence in the Techa River Cohort: 1953-2007. Br J Cancer 109(11): 2886-2893.
- Krewski et al. (2005) Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case control studies. Epidemiology. 2005 Mar;16(2):137-45.
- Kreuzer et al. (2018) Factors Modifying the Radon-Related Lung Cancer Risk at Low Exposures and Exposure Rates among German Uranium Miners. Radiation Research 189, No. 2, pp. 165-176. <https://pro.Tagoi.org/10.1667/RR14889.1>.
- Krewski et al. (2006) A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. J Toxicol Environ Health A. 2006 Apr; 69(7):533-97.
- Leuraud et al. (2009) Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study. Radiation Res. 172, 368 – 382.
- Levin (2008) Incidence of thyroid cancer in residents surrounding the three-mile island nuclear facility, Laryngoscope 118 (4), pp. 618–628.
- Lubin et al. (1995) Lung cancer in radon-exposed miners and estimation of risk from indoor exposure." JNCI: Journal of the National Cancer Institute 87.11 (1995): 817-827.
- Lubinet al. (2004) Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. Int J Cancer. 2004 Mar;109(1):132-7.
- Martland et al. (1925) Some unrecognized dangers in the use and handling of radio-active substances: with special reference to the storage of insoluble products of radium and mesothorium in the reticulo-endothelial system, J. A. M. A. 85: 1769, 1925.
- Medvedev (1976) Two decades of dissidence, New Scientist 72 (4.11.1976) 264 – 267.
- Medvedev (1977) Facts behind the Soviet nuclear disaster, New Scientist 74 (1977) 761 – 764.
- Medwedjew (1979) Bericht und Analyse der bisher geheim gehaltenen Atomkatastrophe in der UdSSR, Hoffman und Campe, Hamburg.
- Michel (2009) Was ist und warum bemühen wir uns um eine Kultur des Strahlenschutzes? StrahlenschutzPRAXIS 15(4), 36–51.



- Michel (2015) Strahlenschutz und Risikowahrnehmung, [https://www.entria.de/uploads/tx\\_tkpublikationen/ENTRIA-Arbeitsbericht-2015-02\\_Michel\\_Strahlenschutz\\_Risikowahrnehmung.pdf](https://www.entria.de/uploads/tx_tkpublikationen/ENTRIA-Arbeitsbericht-2015-02_Michel_Strahlenschutz_Risikowahrnehmung.pdf).
- Michel (2016) Wie wenig ist wenig genug? In: Benno Bucher, Christoph Wilhelm (eds.) Strahlenschutz für Mensch und Umwelt - 50 Jahre Kompetenz im Fachverband, Jahrestagung 2016, 25. - 30. September 2016, Heringsdorf, Usedom, pp. 75 – 81, FS-2016-172-T.
- Michel et al. (2006) Natürliche Strahlenexposition: Horrorszenario oder alles ganz normal? in: Ettenhuber et al. (Hrsg.) Strahlenschutz-Aspekte bei natürlicher Radioaktivität, Tagungsband der 38. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V. Dresden, 18. bis 22. September 2006, TÜV Media GmbH, TÜV Rheinland Group, Köln, 2006, pp. 3 – 34.
- Michel et al. (2012) Iodine-129 and Iodine-127 in European Seawaters and in Precipitation from Northern Germany, Science Total Environment 2012 Mar 1;419:151 – 169.
- Molineus et al. (1992) Ehrenbuch der Radiologen aller Nationen. Berlin 1992 ISBN 3-89412-132-7.
- Muller (1927) Artificial Transmutation of the Gene. Science 66 (1927): 84–7. <http://www.esp.org/foundations/genetics/classical/holdings/m/hjm-1927a.pdf>.
- Mutscheller (1925) Am. J Roentgenol. Radium Therapy Nucl. Med. 13, 65.
- Nair et al. (2009) Background radiation and cancer incidence in Kerala, India-Karanagappally cohort study. Health Phys 96(1): 55-66.
- Nord-Cotentin Radioecology Group (1999) Estimation of exposure levels to ionizing radiation and associated risks of leukemia for populations in the North-Cotentin, [http://www.gep-nucleaire.org/norcot/gepnc/sections/travauxgep/premiere\\_mission5339/rapport\\_synthese\\_v\\_pro\\_TagownloadFile/file/synthese\\_anglais.pdf?nocache=1278332989.01](http://www.gep-nucleaire.org/norcot/gepnc/sections/travauxgep/premiere_mission5339/rapport_synthese_v_pro_TagownloadFile/file/synthese_anglais.pdf?nocache=1278332989.01).
- Ortiz et al. (2000) Lessons from Major Radiation Accidents. Proc. IRPA 10. Hiroshima, 20000, T-21-1, P-11-230. <http://www.irpa.net/irpa10/cdrom/00140.pdf>.
- Ozasa et al. (2012) Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950–2003: An Overview of Cancer and Noncancer Diseases, Radiation Res. 177, 229 – 243.
- Pentreath et al. (2015) ICRP.s approach to protection of the living environment under different exposure situations in Annals of the ICRP, Vol. 44, 1. Suppl, pp. 288-294.
- Renn (2014) Das Risikoparadox. Warum wir uns vor dem Falschen fürchten. S. Fischer Verlag GmbH., Frankfurt/Main.
- Richardson et al. (2103) Ionizing radiation and leukemia mortality among Japanese atomic bomb survivors, 1950–2000. Radiat Res 2009; 172:368–82.
- Schädelin et al. (2017) Keine Kinderleukämien durch Emissionen aus Kernanlagen. SSP 3/2017, pp. 53-57.
- Schonfeld et al. (2013) Solid cancer mortality in the Techa river cohort (1950-2007). Radiat Res 179(2): 183-189.
- Schweizer Bundesrat (2017) 814.50 Strahlenschutzgesetz vom 22. März 1991 (StSG) und 814.501 Strahlenschutzverordnung (StSV).vom 22. Juni 1994. Die revidierte Strahlenschutzverordnung tritt am 1. Januar 2018 in Kraft.
- Sievert (1925) Einige Untersuchungen über Vorrichtungen zum Schutzgegen Röntgenstrahlen," Acta Radiol. 4, 61.
- Slovic (1987) Perception of Risk. Science 236, 280-285
- Slovic et al. (2004) Risk as Analysis and Risk as Feelings: Some Thoughts about Affect, Reason, Risk, and Rationality. Risk Analysis 24(2), 311-322.
- SSK (1994) Grundsätze zur Bewertung der Strahlenexposition infolge von Radon-Emissionen aus bergbaulichen Hinterlassenschaften in den Uranerzbergbaugebieten Sachsens und Thüringens, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, Verabschiedet in der 126. Sitzung der SSK am 22./23.09.1994, veröffentlicht im BAnz Nr. 158 vom 23.08.1995. [www.ssk.de](http://www.ssk.de).

- SSK (2006) 20 Jahre nach Tschernobyl – Eine Bilanz aus Sicht des Strahlenschutzes. Berichte der SSK, Heft 50: Redaktion: Daniela Baldauf, Detlef Gumprecht und Horst Heller, Bonn; [www.ssk.de](http://www.ssk.de).
- SSK (2008) Bewertung der epidemiologischen Studie zu Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken (KiKK-Studie). Stellungnahme der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet in der 227. Sitzung der SSK am 25./26.09.2008. Veröffentlicht im BAnz Nr. 60a vom 22.04.2009. [www.ssk.de](http://www.ssk.de).
- SSK (2009) Strahleninduzierte Katarakte. Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet in der 234. Sitzung der SSK am 14.05.2009. Veröffentlicht im BAnz Nr. 180a vom 27.11.2009; [www.ssk.de](http://www.ssk.de).
- SSK (2013) Ermittlung der Strahlenexposition, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 263. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 12. September 2013, Veröffentlicht im BAnz AT 23.05.2014 B4.
- SSK (2014) Ermittlung der Strahlenexposition. Empfehlung der Strahlenschutzkommission Heft 65, Redaktion: Daniela Baldauf, ISBN 978-3-943422-19-1.
- SSK (2015) Umsetzung des Dosisgrenzwertes für Einzelpersonen der Bevölkerung für die Summe der Expositionen aus allen zugelassenen Tätigkeiten, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, BAnz AT 23.11.2015 B6. [www.ssk.de](http://www.ssk.de).
- SSK (2016) Schutz der Umwelt im Strahlenschutz, verabschiedet in der 286. Sitzung der SSK am 01. Dezember 2016 Veröffentlicht im BAnz AT 02.05.2017 B4. [www.ssk.de](http://www.ssk.de).
- SSK (2017) Radon-Dosiskoeffizienten. Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet in der 290. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 4./5. Dezember 2017. [www.ssk.de](http://www.ssk.de).
- Tao et al. (2012) Cancer and non-cancer mortality among inhabitants in the high background radiation area of Yangjiang, China (1979-1998). Health Phys 102(2): 173-181.
- TRGS 910 (2014) Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 910. Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen. Stand 28.10.2014.
- UNEP (2016) Radiation effects and sources, <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/7790?show=full>.
- UNSCEAR (2000) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. Volume II: Effects, Annex J. Exposures and effects of the Chernobyl accident, United Nations, New York, <http://www.unscear.org/pro/Tagocs/reports/pro/Jahrnnextj.pdf>.
- UNSCEAR (2008) Sources and effects of ionizing radiation. Volume II. Annex C: Radiation exposures in accidents. Report to the General Assembly; 2008. pp 1–43.
- UNSCEAR (2014) UNSCEAR 2013 Report, Volume I, Report to the General Assembly, Scientific Annex A: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami, United Nations, New York, [http://www.unscear.org/pro/Tagocs/reports/2013/13-85418\\_Report\\_2013\\_Annex\\_A.pdf](http://www.unscear.org/pro/Tagocs/reports/2013/13-85418_Report_2013_Annex_A.pdf).
- UNSCEAR (2015) UNSCEAR 2012 Report to the General Assembly, Scientific Annexes A and B, Annex A. Attributing health effects to ionizing radiation exposure and inferring risks, Annex B. Uncertainties in risk estimates for radiation-induced cancer, United Nations, New York, 2015.
- UNSCEAR (2017) Fukushima 2017 White Paper. Developments since the 2013 UNSCEAR Report on the levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident following the great east-Japan earthquake and tsunami. A 2017 White Paper to guide the Scientific Committee's future programme of work. [http://www.unscear.org/unscear/en/publications/Fukushima\\_WP2017.html](http://www.unscear.org/unscear/en/publications/Fukushima_WP2017.html).
- Vahlbruch (2004) Über den Transfer von natürlichen Radionukliden in terrestrischen Ökosystemen und die realistische Modellierung der natürlichen Strahlenexposition in Norddeutschland. Dissertation, Leibniz Universität Hannover.



- Völkle (1984) Ein Vergleich zwischen konservativen und realistischen Dosisabschätzungen für die Umgebungsbevölkerung von Kernkraftwerken. IRPA VI. Berlin, 7.-12.5.1984, pp. 533-538.
- Völkle (1985) Zur Strahlenexposition der Bevölkerung durch den radioaktiven Ausfall der Kernwaffenversuche der 50er- und 60er-Jahre, 18. Jahrestagung des Fachverband für Strahlenschutz auf der Finnjet Travemünde-Helsinki-Travemünde vom 8. – 10.10.1985, Proceedings pp. 382-401.
- Völkle (2006) Radiation Protection of the Environment under the Light of the New Concept of Radiation Protection of Non-Human Species. Refresher Course RC9. Proceedings of the Second European IRPA Congress on Radiation Protection, 15-19 May 2006, Paris.
- Völkle (2009) Zur Dosisrelevanz der einzelnen Expositionspfade bei Emissionen aus Kernkraftwerken, 41. Jahrestagung des FS in Alpbach pro Jahr, 21.-25.9.2009, pp. 143-148.
- Völkle (2015) A brief History of Nuclear Disasters: Prevention, Consequences and Re-coverage, Global Risk Forum Davos, Planet@Risk, Volume 3, Number 2, October 2015, pp. 271-280.
- Völkle (2016) Öffentlichkeitsarbeit im Strahlenschutz – Eine Daueraufgabe. SSP 3/2016, pp. 54-58.
- Walsh et al. (2015) A review of the results from the German WISMUT uranium miners cohort. Radiat Prot Dosimetry. 2015 Apr;164(1-2):147-53. doi: 10.1093/rpd/ncu281. Epub 2014 Sep 28.
- WHO (2012) Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami. [http://pro Jahrrpps.who.int/iris/bitstream/10665/44877/1/9789241503662\\_eng.pdf](http://pro Jahrrpps.who.int/iris/bitstream/10665/44877/1/9789241503662_eng.pdf).
- WHO (2016) Radon and health, Fact sheet, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/en/>
- Zeman und Karlsch (2013) Urangeheimnisse: Das Erzgebirge im Brennpunkt der Weltpolitik 1933-1960, Ch. Links Verlag.