

## **BUND-Stellungnahme zum Entwurf des Strahlenschutzgesetzes**

Autoren: Prof. Dr. med. Wolfgang Hoffmann und Prof. Dr. rer. nat. Inge Schmitz-Feuerhake unter Mitarbeit von Claudia Baitinger, Dr. rer. nat. Karsten Hinrichsen, Dr. phil. nat. Werner Neumann, Wolfgang Neumann, Karin Wurzbacher (alle BUND Atom- und Strahlenkommission) sowie Dr. med. Alex Rosen, Dr. med. Jörg Schmid, Dr. med. vet. Ursula Kia (IPPNW Deutsche Sektion der Internationalen Ärzte für die Verhütung des Atomkrieges/Ärzte in sozialer Verantwortung e.V.).

Berlin, 24.3. 2017

Die EU Richtlinie 2013/59/EURATOM muss bis zum 06.02.2018 in nationales Recht der Mitgliedstaaten umgesetzt werden. Sie enthält Mindestvorschriften. Der Erlass einheitlicher Sicherheitsnormen für den Gesundheitsschutz schließt nicht aus, dass ein Mitgliedstaat **strengere Schutzmaßnahmen** festlegt, sofern dies in den Normen nicht ausdrücklich anders geregelt ist.

Zu den Erwägungsgründen der Richtlinie gehört die Berücksichtigung der Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission ICRP aus dem Jahre 2007 in ihrer Publikation 103 (ICRP 2008). Diese löst die Risikoangaben und Grenzwertempfehlungen der ICRP-Publikation 60 von 1990 ab, auf der die Regelungen der noch gültigen Strahlenschutzverordnung beruhen. Da die Änderungen auch die Gewebe- und Strahlungswichtungsfaktoren betreffen, mussten die effektiven Dosen neu berechnet werden, daher wird in der Richtlinie auch auf die ICRP-Publikationen 116 (2010) und 119 (2012) hingewiesen.

Der BUND unterstützt die Pläne, in Deutschland ein neues Strahlenschutzgesetz zu schaffen. Hierzu reichen die ICRP-Publikationen als Grundlage aber nicht aus. Die ICRP befindet sich bezüglich der Strahlengefahren nicht auf dem Stand der Wissenschaft und blendet viele Anforderungen an einen Strahlenschutz aus, der das in der Verfassung niedergelegte Recht auf körperliche Unversehrtheit respektiert.

Die wichtigsten Verbesserungen, die der BUND demgegenüber für erforderlich hält, werden in den Punkten I – XIV benannt. Sie werden im Folgenden begründet.

## **Forderungen an das neue Strahlenschutzgesetz:**

- I Ergänzung der vorrangigen Schutzziele um die Unversehrtheit der Nachkommen**
- II Senkung des Dosisgrenzwerts für die Bevölkerung um den Faktor 10 auf 0,1 mSv pro Jahr und Begrenzung der Kollektivdosis bei Maßnahmen mit Umweltkontaminationen**
- III Senkung der Dosisgrenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen um den Faktor 10**
- IV Senkung von organspezifischen Grenzwerten: Haut und Augenlinse sind als empfindlich für stochastische Schäden einzustufen**
- V Einführung eines Dosisgrenzwertes für die Gonaden**
- VI Erhöhung der Schutzvorschriften bei Schwangerschaft**
- VII Verbindliches Regelwerk zur Begrenzung der diagnostischen Strahlenbelastung durch Berücksichtigung von Referenzdosen; Wiedereinführung der genetisch signifikanten Dosis in der diagnostischen Radiologie**
- VIII Einführung eines Grenzwerts für Radon in Gebäuden von 50 Bq/m<sup>3</sup>**
- IX Senkung des Grenzwerts für den Radiumgehalt in Mineral- und Trinkwasser für die Vergabe des Hinweises „geeignet für Zubereitung von Säuglingsnahrung“ auf 10 mBq pro Liter. Deklarationspflicht über den Radiumgehalt in Mineralwässern.**
- X Berücksichtigung der höheren Relativen Biologischen Wirksamkeit von Neutronen und Protonen als nach ICRP für Dosisermittlungen bspw. bei Flugpersonal und Atomtransporten**
- XI Erweiterung der Rechenvorschriften für die Ermittlung von Bevölkerungsdosen. Angabe von Vertrauensbereichen für Dosisfaktoren bei Inkorporation, bei Transportrechnungen nach AVV und weiteren Faktoren, die für die Berechnung von Strahlenexpositionen benötigt werden.**
- XII Aufhebung der aktuellen Freigaberegelungen für gering radioaktive Reststoffe und Abfälle**
- XIII Revision des Auswahlverfahrens für die Besetzung von Fachgremien**
- XIV Einrichtung von Universitätslehrstühlen für unabhängige Strahlenbiologie und Strahlen-genetik**

## Inhaltsverzeichnis

1 Begründung der Forderungen I-VII: Bewertung der strahleninduzierten Gesundheitsschäden .....	4
1.1 Einleitung.....	4
1.2 Grundsätzliche Kritik.....	5
1.3 Einfluss von Dosisleistung und Strahlungsqualität auf die Schadensrate .....	5
1.4 Krebserkrankungen .....	6
1.5 Organspezifische Grenzwerte: Haut.....	8
1.6 Organspezifische Grenzwerte: Augenlinse .....	9
1.7 Effekte nach Exposition in utero .....	9
1.8 Erkrankungen bei den Nachkommen bestrahlter Eltern.....	10
1.9 Nicht maligne strahleninduzierte Erkrankungen .....	13
2 Begründung der Forderung VIII: Grenzwert für Radon.....	14
3 Begründung der Forderung IX: Radiumgehalt in Mineral- und Trinkwasser .....	15
4 Begründung der Forderung X: Wirksamkeit von Neutronen und Protonen .....	16
5 Begründung der Forderung XI: Dosisfaktoren und Ausbreitungsmodelle .....	18
6 Begründung der Forderung XII: Änderung der Freigaberegulung .....	21
7 Begründung der Forderung XIII: Besetzung von Fachgremien .....	23
8 Begründung der Forderung XIV: Einrichtung von Universitätslehrstühlen für unabhängige Strahlenbiologie und Strahlengenetik .....	23
9 Literaturangaben .....	24

# 1 Begründung der Forderungen I-VII: Bewertung der strahleninduzierten Gesundheitsschäden

## 1.1 Einleitung

Die von der ICRP niedergelegten aktuellen Einschätzungen von Strahlenfolgen im Niederdosisbereich sind in Tabelle 1, Zeile 2, aufgeführt.

**Tabelle 1:** Zu erwartende Gesundheitsschäden nach Exposition einer Bevölkerung mit niedriger Dosis, Angaben nach ICRP und Bewertung

	Krebskrankheiten	Genetische Schäden	Effekte nach Exposition in utero	Erkrankungen außer Krebs
<b>ICRP Risikoangaben 2008, 2012</b>	5,5 % pro Sv	0,2 % pro Sv	kein Effekt unter 100 mSv	kein Effekt unter 500 mSv
<b>Kritik</b>	Unterschätzung um Faktor 2-5 aufgrund unberechtigtem DDREF=2 und neueren Ergebnissen aus epidemiologischen Untersuchungen im Niederdosisbereich  siehe Kap.1.4	Bewertung unvollständig und u.a. deshalb um Größenordnungen zu niedrig  siehe Kap.1.8	nicht berücksichtigt:  Aborte; geringes Geburtsgewicht Totgeburten Säuglingssterblichkeit Fehlbildungen Geistige Behinderung Geisteskrankheiten Downsyndrom Kinderkrankheiten  siehe Kap.1.7	widerspricht:  Daten über benigne Tumore (Hirn etc.); Hiroshimadaten; zahlreichen epidemiologischen Befunden nach Strahlentherapie und -diagnostik, beruflicher Exposition, bei Tschernobylopfern  siehe Kap.1.9

Die Erkrankungen, die von der ICRP als Risiko in Betracht gezogen und quantitativ bewertet werden, sind Krebs- und Erbkrankheiten. Für diese stochastischen Schäden wird Dosisproportionalität angesetzt (ICRP 2008). Die Risikozahl für Krebs (Spalte 2) bedeutet, dass bei Bestrahlung einer Bevölkerung mit 1 Sv (effektive Dosis<sup>1</sup>) 5,5 Prozent davon einen strahlenbedingten Krebs erliden oder eine gleichgewichtig schwere Krebserkrankung, die nicht zum Tode führt. Die Risikozahl für Erbschäden (Spalte 3) bedeutet entsprechend, dass 0,2 Prozent der Nachkommen in der ersten Generation einen strahlenbedingten Erbschaden erleiden. Das abgeleitete Risiko ist ein Mittelwert für eine Bevölkerung unterschiedlichen Alters. Die angegebenen Werte entsprechen einem „absoluten“ Risiko, das nicht auf das normale Vorkommen in einer unbestrahlten Referenzgruppe bezogen wird.<sup>2</sup>

Als Referenz für Strahlenschäden beim Menschen dienen der ICRP bis dato vornehmlich die Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki. Diese werden bis heute in einem Forschungsinstitut in Hiroshima untersucht (Radiation Effects Research Foundation RERF).

Kritiker haben seit den 1980er-Jahren auf zahlreiche Unterschiede hingewiesen, die diese Übertragung auf andere Bestrahlungssituationen in Frage stellt. Durchweg führt sie zu einer

<sup>1</sup>Auch die Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung werden als „effektive“ Dosis angegeben. Diese soll alle Teilkörperbestrahlungen bezüglich der Folgen vergleichbar machen. Zur Ermittlung wird die jeweilige Organdosis je nach Strahlenempfindlichkeit mit einem Gewebswichtungsfaktor versehen, die Summe aller so gewichteten Teilkörperdosen ergibt die effektive Dosis.

<sup>2</sup> In epidemiologischen Studien wird durchweg das Relative Risiko RR bestimmt, das der beobachteten Schadensrate dividiert durch die spontan erwartete Schadensrate entspricht. Das Überschuss-(Excess-)Relative Risiko ERR ist der strahlenbedingte Anteil des RR und wird durch die Differenz ERR=RR-1 gebildet.

nennenswerten Unterschätzung der Folgen bei Exposition einer normalen westeuropäischen Bevölkerung (Dannheim et al. 2000; IPPNW 2014; Mämpel et al. 2015).

## 1.2 Grundsätzliche Kritik

Das Konstrukt „effektive Dosis“ der ICRP als einheitliches Schadensmaß für Strahleneffekte ist fast ausschließlich auf die Krebsmortalität ausgerichtet anhand organspezifischer Wichtungsfaktoren, die in ICRP 103 (2008) geändert wurden und entsprechend zu anderen Dosisfaktorangaben für Radionuklide führen, siehe ICRP 116 (2010), ICRP 119 (2012). Die organspezifischen Wichtungsfaktoren sind nicht anwendbar für Kinder, das genetische und teratogene Risiko und die nicht malignen Strahlenschäden.

**Als oberstes Schutzziel muss die Unversehrtheit von Ungeborenen, Nachkommen, Kindern und jungen Menschen angesehen werden.** Generelle Forderungen sind daher, außer den **effektiven** Dosen weitere Grenzwerte für besonders betroffene Organe festzulegen sowie für **Kollektivdosen** bei Maßnahmen, die die Bevölkerung betreffen. Als Standard für Umweltverträglichkeit gilt eine Schadensrate von nicht mehr als 1 Fall auf 1 Million Menschen pro Jahr (UVP-Gesellschaft 2014).

## 1.3 Einfluss von Dosisleistung und Strahlungsqualität auf die Schadensrate

Die Risikofaktoren der ICRP in Tabelle 1 gelten durch die Einführung der Äquivalentdosis in Sv und der Festlegung der effektiven Dosis anhand der Gewebewichtungsfaktoren für alle Strahlenarten, Dosisleistungen und Strahlungsenergien. Insbesondere sollen sie die Verhältnisse bei niedriger Strahlendosis durch Umweltkontaminationen und an Arbeitsplätzen repräsentieren.

Früher wurde angenommen, dass eine Dosis bei hoher Dosisleistung wirksamer ist als eine gleiche Dosis, die über längere Zeit akkumuliert wird. Man ging davon aus, dass im letzteren Fall die Reparaturmechanismen in der Zelle effektiver sind. Die Dosiswirkungsabhängigkeit würde dann bei zunehmender Dosis einen nicht-linearen Verlauf im Sinne eines Aufwärtstrends haben und z. B. einen linear-quadratischen Zusammenhang zeigen. Ein solcher Effekt wird bei der Abtötung von Zellen durch ionisierende Strahlung beobachtet und in der Strahlentherapie eingesetzt.

Die ICRP hat bis heute eine solche Vorstellung auch für strahleninduzierten Krebs beim Menschen beibehalten, dessen Entstehung als „somatische“ Mutation aufgefasst wird, ausgehend von einer einzelnen genetisch veränderten Körperzelle. Da sie die Schadensraten von den Atombombenüberlebenden ableitet, die einer extremen Kurzzeitexposition ausgesetzt waren, hat sie den Dosis- und Dosisraten-Effektivitäts-Faktor  $DDREF=2$  eingeführt. Für Strahlenschutz Zwecke werden deshalb nur halb so große Risiken angesetzt wie bei den Atombombenüberlebenden beobachtet.

Diese Reduzierung war bereits bei ihrer Einführung unzulässig, denn sie gilt nach ICRP auch für dicht ionisierende Strahlung. Für Alphastrahlung ergaben sich dagegen schon früh keine Hinweise auf verbesserte Reparatur bei abnehmender Dosisleistung sondern sogar Beobachtungen in umgekehrter Richtung, die nach Bestrahlungen beim Menschen mit Radium gemacht wurden. Heute gilt ein „inverser“ Dosisleistungseffekt für dicht ionisierende Strahlung als bestätigt (Brenner et al. 1990; Brenner et al. 1994; Kreisheimer 2006).

Für locker ionisierende Strahlung (Gamma-, Röntgen, Elektronen) zeigten sich ebenfalls keine Ergebnisse, die eine Risikoreduzierung bei niedrigen Dosen rechtfertigen. Ab den 1990-er Jahren waren die Analysen aus Hiroshima für solide Tumoren am besten kompatibel mit einem dosisproportionalen Zusammenhang. Auswertungen der Daten bis 2003 erga-

ben keine Abweichung des Risikos im Niederdosisbereich im Vergleich zum Risiko für den gesamten Dosisbereich (Ozasa et al. 2012).

Der DDREF=2 hat sich auch aufgrund von zahlreichen Untersuchungen an beruflich Strahlenexponierten als unzulässig herausgestellt und wird in Deutschland von der Strahlenschutzkommission und dem Bundesamt für Strahlenschutz abgelehnt (BfS 2005; SSK 2007; SSK 2014). International ist die Annahme der ICRP und damit der EU-Richtlinie ebenfalls als überholt anzusehen. Während das Strahlenkomitee der U.S.-amerikanischen Academy of Sciences BEIR (Biological Effects of Ionizing Radiation) 2006 noch einen verringerten DDREF von 1,5 vorschlug (BEIR VII 2006), hat die Weltgesundheitsorganisation (WHO) im Jahr 2013 in einer Stellungnahme zu den Folgen der Reaktorkatastrophe von Fukushima einen DDREF von 1 als angemessen eingesetzt (WHO 2013).

Zu den strahlenbiologischen Grundlagen gehört die Erkenntnis, dass die Effekte nicht nur von der Energiedosis im Gewebe abhängen sondern auch von der mikroskopischen Verteilung der Dosis. Als Maß dafür gilt der Lineare Energietransfer LET, der angibt, wieviel Energie von direkt ionisierenden Teilchen lokal auf das Gewebe übertragen wird, und zwar entlang seiner Wegstrecke. Gemessen wird er in der Einheit eV/μm. Der LET nimmt ab, je durchdringender die Strahlung ist.

Die biologische Wirkung der locker ionisierenden Strahlung pro Sv hat die ICRP jedoch mit der Wahl des Strahlungswichtungsfaktors  $w_R=1$  für alle Strahlenarten und Energien gleichgesetzt (Gamma- und Röntgenstrahlen ionisieren im Gewebe über die von ihnen freigesetzten Elektronen).

Straume hat 1995 darauf hingewiesen, dass die Atombombenstrahlung im Gegensatz zu den meisten zu betrachtenden Situationen des Strahlenschutzes und der Strahlenanwendungen extrem hochenergetisch war. Die Dosis wurde überwiegend durch Gammastrahlen im Energiebereich 2 bis 5 MeV erzeugt und enthielt Beiträge bis hin zu 20 MeV. Aus zytogenetischen Untersuchungen schloss Straume, dass bei der Atombombenstrahlung die Relative Biologische Wirksamkeit RBE (die durch den Wichtungsfaktor  $w_R$  simuliert werden soll) um einen Faktor 4 geringer sei als diejenige einer Röntgenstrahlung von 250-kVp (mit einer Maximalenergie von 0,25 MeV). Letztere wird in der Strahlenbiologie als Referenzstrahlung verwendet.

Hunter und Muirhead (langjähriges Mitglied der ICRP) sehen demgegenüber nur geringe Abweichungen der RBE von der Gammaenergie (2009). Sie halten die vereinfachende Haltung der ICRP für vertretbar angesichts der Tatsache, dass sich die Vertrauensbereiche der Ergebnisse aus den japanischen Studien und bei beruflich Exponierten sowie aus anderen epidemiologischen Studien überlappen. Diese Begründung wäre aber nur zu billigen, wenn man den ICRP-Risikofaktor wenigstens annähernd als konservativ ansehen könnte, was – wie oben bereits ausgeführt – nicht der Fall ist.

Zwei mögliche Ausnahmen konzidieren auch Hunter und Muirhead. Der Betastrahler Tritium mit einer Maximalenergie von nur 0,0186 MeV und die bei der Mammographie verwendete besonders weiche Röntgenstrahlung von 29 kVp erweisen sich in in-vitro-Versuchen als etwa 6-fach effektiver als die Gammastrahlung im Energiebereich der Atombombenstrahlung.

## 1.4 Krebserkrankungen

Die Risikozahl für Krebs bei Bestrahlung einer Bevölkerung von 5,5% pro Sv (Tab.1) wurde anhand von Inzidenzdaten aus dem japanischen Kollektiv entwickelt. Bei der vorangegangenen Empfehlung der ICRP in ihrer Publikation 60 waren Mortalitätsdaten herangezogen worden (ICRP 1991). Die Inzidenzwerte wurden wegen der unterschiedlichen Sterblichkeit bei den verschiedenen Krebserkrankungen der Organe und Gewebe mit jeweils einem Letalitätsfaktor gewichtet. Da man jedoch nicht nur das Mortalitätsrisiko als Strahlenschaden be-

rücksichtigen wollte, wurde ein Zuschlag für schwere Fälle hinzugefügt, die nicht zum Tode führen. Im Mittel stellt sich die angegebene Risikozahl so dar, dass etwa 75 % einer Mortalität entsprechen und 25 % einer schweren, nicht tödlich verlaufenden Erkrankung (Tab. A.4.1 in ICRP 103).

Vergleichsmöglichkeiten mit Befunden bei Bevölkerungen nach chronischer Niederdosisexposition bieten die Untersuchungen am Fluss Techa im Südrural, wo die Anwohner durch Emissionen aus der Plutoniumfabrik Mayak exponiert wurden, sowie Studien über die Folgen von Radonbelastungen in Häusern.

Mit der Mayak-Verseuchung befasste sich eine internationale Forschergruppe nach dem Fall des Eisernen Vorhangs und untersuchte eine Bevölkerungsgruppe von etwa 30.000 Personen, die in den 1950-er Jahren interne Kontaminationen vornehmlich durch Sr-90 und Cs-137 erhalten hatten, da die Anlage flüssige radioaktive Abfälle in den Fluss entließ. Nach den Angaben von Krestinina et al. (2005) ergaben sich 84 strahlenbedingte Krebstote bei 15.241 Todesfällen. Die mittlere Dosis betrug 30 mGy (Cardis 2007), somit ergab sich ein absolutes Mortalitätsrisiko von 18 % pro Gy. Der Mortalitätsanteil des Risikofaktors 5,5 % pro Sv von ICRP 103 beträgt nach oben  $0,75 \times 5,5 \% = 4,1 \%$  pro Sv und ist demnach um den Faktor 4,4 geringer als das bei Mayak beobachtete Mortalitätsrisiko.

Wie in Kap.2 (Grenzwert für Radon) ausgeführt wird, liegen zahlreiche Befunde über die Lungenkrebssinduktion durch Radon in Häusern vor. Nach WHO und BfS sind in Deutschland 8 % der vorkommenden Lungenkrebstode durch Radon bedingt, das nach BfS eine mittlere effektive Dosis für die Bevölkerung von ca. 0,9 mSv pro Jahr bewirkt und somit eine akkumulierte effektive Dosis in 60 Jahren von 54 mSv (10 Jahre Latenzzeit mindestens angenommen). Mit dem Gewebewichtungsfaktor 0,12 für die Lunge nach ICRP, der dem Anteil des Krebsgeschehens im Gesamtkörper bei homogener Bestrahlung entsprechen soll, ergeben sich  $0,12 \times 8 \% = 0,96 \%$  Gesamtkrebstode in der Bevölkerung. Bezogen auf die effektive Dosis erhält man ein absolutes Mortalitätsrisiko von ca. 17,8 % pro Sv. Dieses ist um den Faktor 4,4 höher als nach ICRP.

Für Personen, die als Erwachsene exponiert werden, hat die ICRP in Publikation 103 einen Risikofaktor 4,1 % pro Sv abgeleitet. Er soll als Bezugsgröße für strahlenexponierte Beschäftigte gelten (Alter bei Exposition 18 bis 64 Jahre). Bei Betrachtung wiederum nur der Mortalität an Krebs entspräche dies einem Risiko von 3,0 % pro Sv.

Seit den 1980-er Jahren ist eine Reihe von Untersuchungen an beruflich strahlenexponierten Personen durchgeführt worden, die signifikant erhöhte Krebsraten innerhalb der gesetzlich zulässigen Dosisgrenzwerte zeigten. Die zahlenmäßig größten Mortalitätsstudien erfolgten im Rahmen des Projektes INWORKS (International Nuclear Workers Study) an 308.297 überwachten Beschäftigten der Nuklearindustrie in Frankreich, U.K. und U.S.A. An der Untersuchung über maligne solide Tumore waren 9 internationale Forschungsinstitute beteiligt (Richardson et al. 2015). Die mittlere akkumulierte Organdosis für den Darm (entsprechend der gewählten Referenzdosis wie bei den Atombombenüberlebenden) wurde zu 20,9 mGy (Median 4,1 mGy) bestimmt.

Bei 66.632 Todesfällen insgesamt und einer Anzahl von Krebttoden von 19.748 ergibt sich ein Mortalitätsrisiko von 0,48 pro Gy. Aufgrund der mittleren Dosis errechnen sich damit 197 strahlenbedingte Krebstodesfälle. Damit erhält man ein absolutes Risiko von 14,1 % pro Gy. Unter der Annahme, dass überwiegend externe Gammastrahlung wirksam war, erhält man damit einen 4,7-fach höheren Wert als ICRP.

Die Vertrauensbereiche der Ergebnisse für das Krebsrisiko aus den genannten Untersuchungen im Niederdosisbereich sind trotz sehr hoher Kohortengröße sehr weit. Daher lassen sich zur Zeit keine exakten Risikoangaben ableiten. Es zeigt sich aber klar, dass die ICRP-Schätzungen nicht konservativ sind und höher angesetzt werden müssen.

Für Tritium und niederenergetische Röntgenstrahlen muss ein Strahlungswichtungsfaktor 2 eingesetzt werden (siehe Kap.1.3).

Das absolute Strahlenrisiko von Kindern wird in ICRP 103 (2007) höher eingeschätzt als das der Gesamtbevölkerung, es soll aber im frühen Kindesalter höchstens dreifach höher liegen. Dieses ergäbe ein Lebenszeitrisiko für Krebserkrankungen nach ICRP von maximal 16,5 % pro Sv.

Eine sehr viel größere relative Strahlenempfindlichkeit als bisher angenommen zeigt sich in zwei der größten Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Krebsinzidenz bei Kindern und Hintergrundstrahlung aus neuerer Zeit (Kendall et al. 2013; Spycher et al. 2015). Die Autoren der erstgenannten Studie fanden in Großbritannien einen signifikanten Anstieg der Leukämierate mit der akkumulierten Dosis in einem Bereich von 1 bis 31 mSv (mittlere Dosis 4,0 mSv). Das strahlenbedingte relative Risiko ERR ergab sich zu 12 % pro mSv für Gammastrahlung. Andere Krebserkrankungen zeigten sich nicht erhöht, jedoch muss man die längeren Latenzzeiten bedenken, die für diese zu erwarten sind und während des begrenzten Kindesalters (14 J.) nicht erreicht werden.

Die zweite Untersuchung betraf 2 Millionen Personen bis zum Alter von 16 Jahren in der Schweiz (Spycher et al. 2015). Dort ist die Hintergrundstrahlung höher als in Deutschland (mittlere akkumulierte Dosis 9,1 mSv). Signifikante Erhöhungen ergaben sich außer für Leukämie (ERR 4 % pro mSv) für die Gesamtkrebsrate (ERR 3 % pro mSv) und für ZNS-Tumoren (ERR 4 % pro mSv).

In beiden Untersuchungen werden weder genetische Effekte durch die Bestrahlung der Eltern noch solche durch Exposition in utero in Rechnung gestellt, dieses wäre aber erforderlich (s. unten).

Die hohe Empfindlichkeit von Kindern bestätigt sich in einer australischen Studie über die Folgen von CT-Scans im Kindes- und Jugendalter. Mathews et al. (2013) untersuchten 680.000 Personen mit einer mittleren effektiven Dosis von 4,5 mSv und ermittelten ein relatives Krebsrisiko von 5,3 % pro mSv bei einer Beobachtungszeit von im Mittel nur 9,5 Jahren.

Bereits vorher hatten britische Mediziner die Folgen von Schädel-CTs bei Kindern untersucht und erhöhte Raten von Leukämie und Hirntumoren bei den Betroffenen festgestellt (Pearce et al. 2012). Zu ersterem Befund ist zu bemerken, dass sich im Kindesalter höhere Anteile des roten Knochenmarks im Schädel befinden als bei Erwachsenen. **Die Autoren kommen zu der Beurteilung, dass 50 mSv Organdosis durch CT-Scans bei Kindern das Leukämierisiko in etwa verdreifachen und 60 mSv das Risiko für maligne Hirntumore verdreifachen.**

Die genannten neueren Erkenntnisse sind in der EU-Richtlinie und im offiziellen Strahlenschutz nicht berücksichtigt worden. Sie stützen die Forderung nach einer konsequenten Minimierung von Strahlenexpositionen im Kindes- und Jugendalter. Das gilt insbesondere für kleine (und ungeborene) Kinder.

## 1.5 Organspezifische Grenzwerte: Haut

Die Haut galt früher als relativ unempfindlich gegenüber ionisierender Strahlung und die ICRP hat daher den Gewebewichtungsfaktor zu 0,01 angesetzt. Um gegen deterministische Effekte zu schützen, wurde ein Grenzwert für die Organ-Äquivalentdosis von 50 mSv pro Jahr für die Bevölkerung und 500 mSv pro Jahr für berufliche Exposition empfohlen. Als Referenz dienten wiederum die japanischen Atombombenüberlebenden.

Dabei wurden mögliche genetische Unterschiede zur europäischen Bevölkerung nicht beachtet. Obwohl wahrscheinlich von Bedeutung ist, dass Hautkrebs bei Menschen mit stärkerer



rer Hautpigmentierung sehr viel seltener auftritt als bei Menschen mit heller Haut (Gloster et al. 2006).

Inzwischen hat sich gezeigt, dass neben Basaliomen und Plattenepithelkarzinomen, die wegen der guten Therapierbarkeit im System der ICRP praktisch keine Rolle spielen, auch maligne Melanome bei beruflich Exponierten und nach Röntgendiagnostik vermehrt auftreten (Mathews et al. 2013; Schmitz-Feuerhake 2014; Mämpel et al. 2015). Die ermittelten Verdopplungsdosen liegen größtenteils unterhalb von 100 mSv.

Während die ICRP und die EU-Richtlinie (Artikel 9, 11, 129) die alten Empfehlungen aufrechterhalten, muss ein Organdosisgrenzwert für die Haut von 1 mSv pro Jahr für die Bevölkerung und ein Wert von 10 mSv pro Jahr für berufliche Exposition gefordert werden.

## 1.6 Organspezifische Grenzwerte: Augenlinse

Strahleninduzierte Trübungen der Augenlinse wurden früher als deterministische Effekte angesehen. Die ICRP hat diese Auffassung in ihren Publikationen 103 und 118 aufrechterhalten, obwohl zahlreiche neuere Publikationen über Katarakte bei niedriger Dosis und mit dosisproportionaler Häufigkeit von ihr aufgeführt werden. Dennoch werden in der EU-Richtlinie die Dosisgrenzwerte nach ICRP 60 (1991) beibehalten;

- Bevölkerung: Organ-Äquivalentdosis für die Augenlinse 15 mSv im Jahr
- Beruflich: 20 mSv in einem einzelnen Jahr oder 100 mSv in einem Fünfjahreszeitraum, wobei der Dosiswert für ein einzelnes Jahr 50 mSv nicht überschreiten darf

Diese Bewertung ist wissenschaftlich nicht mehr haltbar, vielmehr müssen strahleninduzierte Katarakte als stochastischer Effekt aufgefasst werden (Ainsbury et al. 2009; Shore et al. 2010). Insbesondere zeigen Beobachtungen in den durch den Reaktorunfall von Tschernobyl kontaminierten Gebieten eine hohe Empfindlichkeit von Kindern (Worgul et al. 1996a), die von der ICRP nicht beachtet wird. (Angaben über abzuleitende Verdopplungsdosen siehe Mämpel et al. 2015).

Ein Organdosisgrenzwert für die Augenlinse von 1 mSv pro Jahr für die Bevölkerung und ein Wert von 10 mSv pro Jahr für berufliche Exposition wird gefordert.

## 1.7 Effekte nach Exposition in utero

Es ist heute anerkannter Erkenntnisstand, dass vorgeburtliche Exposition durch diagnostisches Röntgen Leukämie und andere Krebserkrankungen auslöst. ICRP 103 (2008) schätzt dieses Krebsrisiko als gleich hoch ein wie dasjenige nach Exposition im frühen Kindesalter (das wiederum etwa dreimal so hoch sein soll wie im Durchschnitt in der Bevölkerung insgesamt). Das Risiko bei Exposition in utero (Tabelle 1, Spalte 4) wird nicht gesondert berücksichtigt, sondern wird durch den Dosisgrenzwert für die Bevölkerung als hinreichend niedrig erachtet. Zudem geht ICRP 103 von einem Dosiswellenwert von 100 mSv aus.

Entsprechend heißt es in Artikel 10 der Richtlinie: „Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass dem ungeborenen Kind ein Schutz gewährt wird, der dem Schutz von Einzelpersonen der Bevölkerung vergleichbar ist.“

Schon in den frühen Zeiten der Strahlenforschung war bekannt, dass zwei weitere Klassen von Schädigungen zu erwarten sind: a) das vorzeitige Absterben der Frucht in utero und eine Erhöhung der perinatalen Sterblichkeit, b) Missbildungen von Organen oder des Körperbaus und fehlerhafte Organfunktion. Die Effekte sind naturgemäß sehr stark vom Entwicklungsstadium bei Exposition abhängig. Im Tierversuch sind sie auch unterhalb von 100 mSv nachweisbar (Fritz-Niggli 1997). Signifikante Schädigungen des Zentralnervensystems bei den Atombombenüberlebenden lassen keine Aussagen über einen so hohen Dosiswellenwert wie 100 mSv zu (Yamasaki et al. 1990; Miller 1990). Sie äußerten sich durch geistige

Behinderung und dosisproportionale Senkung der IQ-Werte. Die genannte Dosischwelle ist auch angesichts der Daten aus der Tschernobylforschung vollkommen unangemessen. Sie wurde in dieser Höhe erst in neuerer Zeit eingeführt (in ICRP 90 von 2003).

Nach dem Tschernobylunfall 1986 wurde in zahlreichen deutschen und internationalen Studien aufgezeigt, dass nicht nur in den Nachbarländern der zerstörten Anlage, sondern auch in weiter entfernten europäischen Staaten die Fehlbildungsraten anstiegen und die perinatale Sterblichkeit erhöht war (Busby et al. 2009; Hoffmann 2001; Körblein et al. 1997; Körblein 2003; Scherb et al. 1999; Fucic et al. 2016). Ferner zeigten sich nach Exposition im Mutterleib bei den Jugendlichen Störungen der Intelligenz, wie es nach den Befunden in Hiroshima und Nagasaki zu erwarten war (Heiervang et al. 2010). Wertelecki und Mitarbeiter (2010, 2014) fanden in den Jahren 2000-2009 – also mehr als 14 Jahre nach dem Unfall – in der Ukraine noch über 50 % erhöhte Fehlbildungsraten, und zwar in der hochverstrahlten nördlichen Provinz Rivne. Diese werden von ihnen als in utero erzeugt aufgefasst.

In Deutschland wird an der Universitätskinderklinik Mainz ein lokales Geburtenregister über angeborene Fehlbildungen geführt. Im Auftrag des BfS erfolgte dort eine Untersuchung an strahlenexponierten Frauen. Bei deren Kindern zeigte sich eine 3,2-fach erhöhte Rate an Fehlbildungen, die die Autoren auf die Exposition während der Schwangerschaft zurückführen (Wiesel et al. 2011). Man hätte erwarten können, dass ein solches Ergebnis, das zwar nur auf 4 Fällen beruht, die aber sämtlich sehr schwerwiegend sind, zumindest zu umfangreicheren Folgeuntersuchungen geführt hätte. Das ist aber nicht der Fall. Der BUND hält diesen Befund eher für einen genetischen Effekt, in jedem Fall ist er keinesfalls kompatibel mit den Annahmen der ICRP.

Ein Downsyndrom (Trisomie 21) als genetischer Effekte kann ebenfalls in utero – kurz nach der Konzeption – durch ionisierende Strahlung induziert werden.

Die Vielfältigkeit der in utero auslösbaren Strahleneffekte erfordert einen Strahlenschutz über das Krebsrisiko hinaus. Selbst wenn die teratogenen Schädigungen nicht zu den stochastischen Effekten zu zählen sind, können diese offensichtlich durch sehr niedrige Dosen weit unterhalb von 100 mSv erzeugt werden.

Im Gegensatz zu Säuglingen, für die Grenzwerte bezüglich radioaktiver Belastungen von Nahrungsmitteln bestehen, gibt es keine entsprechenden Schutzvorschriften für Embryonen und Föten. Daher müssen Grenzwerte für Nahrungsmittel, die Schwangere zu sich nehmen, eingeführt werden.

Sobald eine schwangere Mitarbeiterin dem Arbeitgeber mitgeteilt hat, dass sie schwanger ist, muss ein Aufenthalt nicht nur in Kontrollbereichen, sondern auch in Überwachungsbereichen absolut ausgeschlossen werden. Die aktuell geltende Höchstdosis von 1 mSv als Uterusdosis ist in der Praxis nicht überprüfbar und kann daher den Schutz des ungeborenen Lebens nicht sicherstellen.

### **1.8 Erkrankungen bei den Nachkommen bestrahlter Eltern**

Aufgrund von Forschungsergebnissen aus Tierversuchen und Beobachtungen beim Menschen muss mit folgenden Erbschäden bei den Nachkommen bestrahlter Eltern durch ionisierende Strahlung gerechnet werden:

- 1) schwerwiegende Entwicklungsstörungen (Aborte, geringes Geburtsgewicht, perinatale Sterblichkeit, früher Kindstod, Fehlbildungen, Unfruchtbarkeit, durch Chromosomen- oder Genanomalien bedingte Krankheiten wie Downsyndrom)
- 2) Krebs im Kindes- oder Erwachsenenalter
- 3) Immunschwäche und multiple Degenerationserscheinungen.

Die ICRP betrachtet ausschließlich dominante Effekte in der 1. Generation und leitet ihre Risikozahl von Experimenten an Mäusen ab. Sie behauptet, es gäbe keinen direkten wis-

senschaftlichen Nachweis, dass für Kinder von bestrahlten Eltern ein erhöhtes Risiko für Erbkrankheiten besteht (ICRP 2008).

Die Annahmen der ICRP und anderer offizieller Gremien, die das genetische Strahlenrisiko als sehr gering einschätzen, beziehen sich auf Beobachtungen an den japanischen Atombombenüberlebenden und auf Studien an Nachkommen von Eltern, die sich im früheren Leben einer Strahlentherapie unterziehen mussten (ICRP 2008). In beiden Fällen lag eine Kurzzeitbestrahlung vor. Für die Mutationsentstehung in den Keimzellen ist jedoch der Zeitpunkt der Bestrahlung vor Konzeption von großer Bedeutung. Dies gilt besonders für die Spermatogenese.

**Bei der Betrachtung des genetischen Strahlenrisikos ist es daher sehr wichtig, den Unterschied zwischen einer akuten und einer chronischen Exposition, wie sie bei Umweltkontaminationen und an Arbeitsplätzen vorliegt, zu beachten.**

Die Stammzellen der Spermien in den Gonaden (Stamm-Spermatogonien) sind relativ unempfindlich gegenüber Strahlenwirkungen bzw. verfügen über gute Reparatursysteme bei Mutationen im Erbmateriale (Fritz-Niggli 1997). Bis zur Entstehung der reifen Spermien durchlaufen die Tochterzellen verschiedene Entwicklungsstadien. Aus den B-Spermatogonien, die in die Hodenkanälchen gelangen, entstehen Spermatozyten, die durch Reifeteilung in solche mit halbem Chromosomensatz übergehen (haploid). Die weiteren Tochterzellen verwandeln sich zu Spermatozoen und schließlich zu reifen Spermien. Die Zeitdauer der Spermatogenese beträgt etwa 86 Tage.

Die Stadien der Spermatozyten und Spermatozoen sind um ein Vielfaches strahlenempfindlicher als die Stammzellen und auch als die reifen Spermien (Fritz-Niggli 1997). Erstere kommen bei strahlentherapierten Eltern naturgemäß nicht zur Wirkung und waren auch bei den Atombombenüberlebenden wahrscheinlich nicht relevant. Hinzu kommt, dass die systematische Untersuchung der gesundheitlichen Folgen in Hiroshima erst 5 Jahre nach den Explosionen begann.

Bei chronischer Strahlenexposition von Männern werden ständig alle Stadien der Spermatogenese bestrahlt. Dadurch erklärt sich das relativ hohe Aufkommen von Fehlbildungen und anderen Geburtsfehlern in den Untersuchungen nach Tabelle 2 und auch ein vielfach beobachtetes Auftreten in durch Tschernobylfallout betroffenen Bevölkerungen (Lazjuk et al. 1997, 2003; Scherb et al. 2003, 2004; Schmitz-Feuerhake et al. 2016).

In der Tabelle 2 sind Studien aufgeführt, die genetische Effekte bei den Kindern bestrahlter erwachsener Männer zeigen. Die verhältnismäßig geringe Anzahl solcher Untersuchungen resultiert daraus, dass man im offiziellen Strahlenschutz früher davon ausging, dass bei beruflich strahlenexponierten Personen innerhalb der zulässigen Dosisgrenzwerte statistisch keine Effekte erkennbar sein würden. Deswegen wurden auch bei ihren Nachkommen keine diesbezüglichen Daten erhoben.

Beim Vergleich mit den japanischen Daten wird ein weiterer wichtiger Punkt in den offiziellen Bewertungen nicht beachtet. Die Datenerhebung in der Kohorte der Atombombenüberlebenden in Bezug auf die Nachkommen war besonders unzuverlässig, weil sie eine gesellschaftlich ausgestoßene und geächtete Population darstellten. Um die Heiratschancen ihrer Kinder nicht zu gefährden, wurde ihre Herkunft möglichst verschwiegen und die potentiellen Schädigungen wurden von vielen Eltern nicht angegeben (Yamasaki et al. 1990).

**Tabelle 2:** Angeborene Anomalien bei den Nachkommen (1.Generation) beruflich strahlenexponierter Männer

Kohorte der Väter	Art der Geburtsfehler	Dosis	Referenzen
Radiologen in den USA 1951	Angeborene Fehlbildungen Erhöhung um 20 %		Macht et al. 1955
Beschäftigte der Nuklearwaffenfabrik Hanford USA	Neuralrohrdefekte (Spina bifida, Gehirnmisbildungen u.a.) signifikant verdoppelt	im allg. < 100 mSv	Sever et al. 1988
Beschäftigte Wiederaufarbeitungsanlage für Kernbrennstoff Sellafield U.K.	Totgeburten mit Neuralrohrdefekten pro 100 mSv signifikant um 69 % erhöht	Mittelwert 30 mSv	Parker et al. 1999
Röntgentechniker in Jordanien	Erhöhung angeborener Anomalien 10-fach signifikant		Shaknatreh et al. 2001
Liquidatoren <sup>3</sup> aus Obninsk (Russ.) mit 300 Kindern	Erhöhung angeborener Anomalien zwischen 1994-2002	im allg. 10-250 mSv	Tsyb et al. 2004
Liquidatoren aus Russland, Provinz Bryansk	Erhöhung angeborener Anomalien ca. 4-fach		Matveenکو et al. 2005
Liquidatoren aus Russland 2379 Neugeborene im Alter bis 1 Jahr	Signifikante Erhöhung ca. um: Anecephalie 310 % Spina bifida 316 % Lippen/Gaumenspalten 170 % Gliedermaßenverkümmerng 155% Mehrfachfehlbildungen 19 % Fehlbildungen gesamt 120 %	5-250 mSv	Lyaginskaja et al. 2009

Auch mit Stammzellmutationen muss aber gerechnet werden, wie eine bislang unbeachtete Arbeit aus Deutschland zeigt (Herrmann et al. 2004). Die Autoren untersuchten 61 Kinder von 47 Paaren, bei denen ein Elternteil eine Strahlentherapie erhalten hatte, über einen Zeitraum bis zu 20 Jahren. Es handelte sich um Bestrahlungen mit Gonadendosen zwischen 0,01 und 2 Gy. Gegenüber dem Normalkollektiv zeigten sich eine erhöhte Frühgeburtlichkeit und eine Verzögerung der Skelettentwicklung. „2 der Kinder (3,3%) waren vor der 37. Schwangerschaftswoche mit schweren Fehlbildungen geboren worden und verstarben noch im 1. Lebensmonat (Atemnotsyndrom, Trisomie E).“ Insgesamt traten 61 leichte und schwere Entwicklungsstörungen und Fehlbildungen auf (bei einigen Kindern traten mehrfache Anomalien auf). Dazu geben die Autoren an: „Dabei fallen neben einer schweren Fehlbildung im Handbereich, eine angeborene Taubheit, eine Innenohrschwerhörigkeit sowie eine einseitige Blindheit als besondere, die Lebensqualität einschränkende Normabweichung auf.“ Insgesamt werden also mit diesen vier „schwereren Malformationen“ und den genannten beiden früh Verstorbenen mit schweren Fehlbildungen sechs klinisch schwerere oder schwere Fehlbildungen registriert, was mit einer Quote von fast 10% eine deutliche Erhöhung gegenüber normal darstellt.

Auffällig ist weiterhin, wie die Autoren ausführen, die große Anzahl von Hernien (Nabel- und Leistenbrüche) – 16 Hernien bei 13 Kindern (21,3% der Kinder waren betroffen).

In West-Berlin, welches 1986 zur Zeit der Tschernobylkatastrophe eine Art geschlossene Insel bildete, fand der Humangenetiker Sperling einen auffälligen signifikanten Anstieg von Downsyndromfällen exakt 9 Monate nach dem Reaktorunfall. In anderen kontaminierten Gegenden Deutschlands und Europas ergaben sich ebenfalls Anstiege von Downsyndrom (Sperling et al. 1987, 1991, 1994a, 1994b, 2012; Zatsopin et al. 2007).

<sup>3</sup> Als „Liquidatoren“ wurden Soldaten und andere (überwiegend junge) Männer eingesetzt, um Strahlenschutzmaßnahmen und Aufräumarbeiten am Katastrophenort vorzunehmen.

Downsyndrom und andere kongenitale Defekte zeigten sich auch erhöht in einer frühen Studie aus dem Department für Medizinische Genetik des Kinderkrankenhauses Montreal, Kanada, über die genetischen Folgen diagnostischer Röntgenstrahlen (Cox 1964). Der Autor untersuchte die Nachkommen von Müttern, die seit 1925 im Kindesalter wegen Hüftdysplasie behandelt worden waren und deswegen mehrere Röntgenaufnahmen erhalten hatten.

Krebserkrankungen als genetischer Strahleneffekt wurden in den 1990-er Jahren heftig diskutiert, als es um Leukämien bei der britischen Wiederaufarbeitungsanlage für Kernbrennstoffe Sellafield ging. Diese waren von Gardner und Mitarbeitern als genetischer Effekt gedeutet worden, da sich zeigte, dass die Väter der betroffenen Patienten in der Anlage gearbeitet hatten (Gardner et al. 1990). Prinzipiell waren solche Effekte aus Tierversuchen bekannt (Nomura 1982; 2006) und bereits nach beruflicher Exposition und diagnostischem Röntgen beim Menschen gefunden worden.

Statistische Erhebungen in Weißrussland und anderen hoch kontaminierten Regionen in den Anrainerstaaten von Tschernobyl haben Anstiege der Krebsmortalität bei Kindern ergeben, die Jahre nach dem Unfall geboren wurden (Yablokov 2006; Yablokov et al. 2009). Kinder von Liquidatoren litten ebenfalls vermehrt an Leukämie und anderen Krebserkrankungen (Pflugbeil et al. 2006).

Genschäden als Ursache für ein Absterben der Frucht können auch an den Geschlechtschromosomen auftreten, wobei sie hauptsächlich an dem größeren X-Chromosom zu erwarten sind. Das X-Chromosom des Mannes kann nur an die Töchter weitergegeben werden. Ein dominanter Letalfaktor dort führt zum Absterben der weiblichen Zygote. Rezessive Letalfaktoren am X-Chromosom sind wesentlich häufiger als dominante (Vogel 1969). Diese können sich auch nur bei den Töchtern auswirken. Wenn man genügend große Bevölkerungen studiert, ist dieser Effekt nachweisbar.

Ein sehr eindrucksvoller Befund wurde an Arbeitern der britischen Wiederaufarbeitungsanlage für Kernbrennstoffe Sellafield erhoben, die in der Provinz Cumbria liegt. Das Geschlechterverhältnis bei ihren Kindern (Verhältnis männlich: weiblich) war deutlich erhöht gegenüber dem bei allen Geburten in Cumbria und stieg an mit der erhaltenen Dosis (Dickinson et al. 1996). Einen ähnlichen Effekt zeigt eine Untersuchung an männlichen Kardiologen, die Herzkatheteruntersuchungen ausführten und dadurch einer relativ hohen Röntgendosis ausgesetzt waren. Der Anteil weiblicher Nachkommen nimmt ab, je höher die Exposition der Väter war (Choi et al. 2007).

Es zeigt sich, dass bei Bestrahlung einer Gesamtbevölkerung (d.h. Frauen und Männer) ebenfalls ein Verlust an weiblichen Geburten erfolgen kann. Hagen Scherb, Kristina Voigt vom Helmholtz-Zentrum München und Mitarbeiter haben diesen Effekt an exponierten Bevölkerungsgruppen untersucht. Sie fanden signifikante Abnahmen des weiblichen Geburtenanteils an U.S.-Bewohnern nach oberirdischen Atomtests, nach Tschernobyl in Europa und in der Umgebung europäischer Nuklearanlagen (Scherb et al. 2007; 2011; 2015; 2016).

## **1.9 Nicht maligne strahleninduzierte Erkrankungen**

Benigne Tumore in verschiedenen Organen und Geweben sind schon lange als Strahlenfolge aus der Strahlentherapie, nach diagnostischem Röntgen und nach Umweltkontaminationen bekannt, aber von der ICRP nie berücksichtigt worden. Besonders gefährlich sind Hirntumore (z. B. nach Zahnrontgen festgestellt). Eine Arbeitsgruppe der SSK befasst sich zur Zeit mit benignen Tumoren (SSK 2016a). Der vormalige SSK-Vorsitzende W.-U. Müller bestätigte auf einem Fachgespräch Radar im Februar 2016<sup>4</sup>, dass gesicherte Daten für die Organe Schilddrüse, Hirn/Zentralnervensystem, Speicheldrüse, Darm, Ovar, Uterus und

---

<sup>4</sup> veranstaltet vom Bundesministerium für Verteidigung

Knochen/Knorpel vorliegen und auch in anderen Geweben benigne Tumore durch ionisierende Strahlung entstehen können.

Nach dem Tschernobylunfall 1986 wurde ein Anstieg zahlreicher Nicht-Tumor-Erkrankungen beobachtet, die offensichtlich als Folge der chronischen Radioaktivitätsbelastung in den Anrainerstaaten aufgetreten sind (Yablokov et al. 2009). Diese Effekte wurden bislang von der ICRP nicht zur Kenntnis genommen, wohl aber die Tatsache, dass auch in ihrem bevorzugten Referenzkollektiv, den japanischen Atombombenüberlebenden, in neuerer Zeit etliche strahlenbedingte Krankheitsformen außer Krebs festgestellt wurden. Diese betreffen Herz/Kreislaufleiden sowie Erkrankungen des Blutes, des Atemtrakts, der Harnwege, der Leber, des Magen/Darm-Trakts und der Augen (Yamada et al. 2004; Shimizu et al. 2010; Ozasa et al. 2012). Schädigungen des Immunsystems und Entzündungsreaktionen bei niedriger Dosis wurden ebenfalls festgestellt (Akiyama 1995; Kusunoki et al. 2008).

Da die ICRP es aber nicht für gesichert ansah, dass diese Erkrankungen auch unterhalb von 0,5 Sv auftreten, hielt sie es vorläufig nicht für angezeigt, diese Ergebnisse in ihre Risikobetrachtungen einzubeziehen (ICRP 2008). Im Jahr 2012 hat sie sich zur Frage möglicher Wirkungsmechanismen der Strahlung im Gewebe außer der Tumorbildung geäußert und die Abhängigkeit nicht-karzinogener Effekte von der Dosisleistung untersucht. Für Katarakte und Kreislaufkrankungen kommt sie zu dem Schluss, dass die Folgen bei niedriger Dosis unabhängig von der Dosisleistung sind und daher auf irreparable „Eintreffer“-Schäden zurückzuführen sind wie bei der Krebsentstehung. Das bedeutet, dass diese Effekte eigentlich den stochastischen Schäden zuzurechnen wären. Da sie aber – angeblich – sehr selten auftreten, definiert die ICRP einen „praktischen“ Schwellenwert von 0,5 Sv für alle diese Fälle außerhalb von Krebs.

Diese Beurteilung ist für Katarakte überholt, da zahlreiche Befunde bei radioaktiv kontaminierten Bevölkerungen und Flugpersonal vorliegen (Mämpel et al. 2015). Die SSK hat sich ebenfalls von der Schwellendosis für Katarakte verabschiedet (SSK 2009).

Die Beurteilung durch die ICRP ist auch überholt für die japanischen Atombombenüberlebenden. Die Untersucher Ozasa et al. (2012) geben dosisproportionale Wirkungen an für die o.g. Krankheitsgruppen, sie erhalten ein  $ERR/Sv=0,13$  für die Mortalität an Nicht-Krebs-Erkrankungen (Tabelle 8), welches bedenklich ist, weil diese normalerweise viel häufiger auftreten als Krebs.

Bezüglich der Kreislaufkrankungen hat sich in weiten Kreisen der Fachwelt ebenfalls die Erkenntnis durchgesetzt, dass die Auswirkungen niedriger Dosen auch unterhalb von 0,5 Sv relevant sind. Im November 2012 haben Little und 26 weitere Wissenschaftler aus verschiedenen Ländern eine Übersichtsarbeit dazu veröffentlicht (Little et al. 2012). Ihr vorläufiges Ergebnis ist, dass die strahlenbedingte Mortalität an Herz-Kreislaufkrankungen etwa so hoch ist wie diejenige durch strahlenbedingten Krebs. Man kann zeigen, dass diese Einschätzung nicht konservativ ist. Außerdem müssen weitere Organkrankheiten in den Katalog der Strahlenschäden aufgenommen werden (Mämpel et al. 2015).

## **2 Begründung der Forderung VIII: Grenzwert für Radon**

Radon (Rn) ist ein gasförmiges radioaktives Folgeprodukt von Radium, welches Alphastrahlung aussendet. Es befindet sich in der Atmosphäre und trägt damit zur natürlichen Strahlenbelastung des Menschen bei. Radon kann durch Kellerfundamente und Erdreich berührende Außenwände in Häuser eindringen und wird bei geschlossenen Fenstern und guter Isolierung gegenüber außen erheblich angereichert.

Nach Angaben des Bundesamts für Strahlenschutz beträgt die Konzentration des Isotops Rn 222 in Häusern in Deutschland im Mittel etwa 50 Bq pro Kubikmeter ( $m^3$ ) Luft und bewirkt

damit eine effektive Dosis für die Bevölkerung von ca. 0,9 mSv pro Jahr (BfS 2016), das ist etwa gleich viel wie die übrige Bestrahlung der Menschen durch natürliche Quellen. Mit dem Organwichtungsfaktor von 0,12 nach ICRP bedeuten sie eine Lungendosis von 7,5 mSv pro Jahr. Die real vorkommenden Raumkonzentrationen von Radon besonders in Gegenden mit hohem Urangehalt im Untergrund betragen u. U. ein Vielfaches des o.g. Mittelwerts.

Anhand der Analysen in 13 epidemiologischen Studien aus Europa (Darby et al. 2005) und 7 aus Nordamerika (Krewski et al. 2005) wurde ein dosisproportionaler Zusammenhang zwischen dem Anstieg von Lungenkrebs bei den Bewohnern und der mittleren Radonkonzentration in Häusern festgestellt.

Turner und Mitarbeiter bestätigten die Befunde 2011 in einer prospektiven Studie an 820 000 Kanadiern (Turner et al. 2011). Sie fanden pro zusätzlichen 100 Bq/m<sup>3</sup> Radon in Häusern einen Anstieg für die Lungenkrebsmortalität von 15 % (Darby et al. 16 %; Krewski et al. 11%; WHO 2009 16 %). Danach werden in Deutschland etwa 8 % des vorkommenden Lungenkrebses durch das Radon in Häusern erzeugt.

In der neuen EU-Richtlinie wird in Absatz 23 gefordert, dass die Mitgliedstaaten auf die neu bewerteten Gesundheitsgefahren reagieren und der Erkenntnis Rechnung tragen müssen, dass sich bei Rauchern das Krebsrisiko durch Radon vergrößert. Nach Absatz 22 soll die Empfehlung 90/143/Euratom als verbindlich gelten. Diese reicht aber nicht aus, da sie Referenzwerte von 400 Bq/m<sup>3</sup> (entsprechend 7,2 mSv effektiv pro Jahr) für Altbauten und 200 Bq/m<sup>3</sup> für zu errichtende Bauten fordert. Der BUND ist der Meinung, dass durch technische Maßnahmen auch im Altbau ein Wert von 50 Bq/m<sup>3</sup> erreichbar ist.<sup>5</sup>

### **3 Begründung der Forderung IX: Radiumgehalt in Mineral- und Trinkwasser**

Für die Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide im Trinkwasser hat die WHO einen Dosisrichtwert (ICD = Individual Dose Criterion) von 0,1 mSv pro Jahr angegeben (WHO 2011). Das BfS (2015) hat Aktivitätsmessungen in deutschen Mineralwässern vorgenommen. Die höchsten Dosiswerte wurden für Säuglinge ermittelt, für die Mineralwasser zur Zubereitung von Fertignahrung und als Trinkwasser verwendet wird. Für etwa 20 % der untersuchten Wässer errechneten sich Dosiswerte oberhalb von 0,1 mSv pro Jahr bei angenommenem Jahreskonsum von 170 Litern. Im Jahr 2003 wurde daher die Mineral- und Tafelwasserverordnung dahingehend verändert, dass der Zusatz „Geeignet für die Zubereitung von Säuglingsnahrung“ auf dem Flaschenetikett nur noch dann zulässig ist, wenn die Aktivitätskonzentration von Radium-226 den Wert 125 mBq pro Liter und für Radium-228 den Wert 20 mBq pro Liter nicht überschreiten. Sind beide Nuklide enthalten, darf die Summe der Konzentrationen 100 mBq pro Liter nicht überschreiten. (Radium-228 stammt aus der Thoriumreihe.)

Wegen der oben begründeten Forderung nach Senkung der Dosisgrenzwerte müssen die zulässigen Aktivitätskonzentrationen für Radium ebenfalls um den Faktor 10 gesenkt werden. Ferner müssen behördliche regelmäßige Kontrollen auf Einhaltung stattfinden und eine Deklarationspflicht für den Radiumgehalt eingeführt werden.

---

<sup>5</sup> Neben Maßnahmen der Abdichtung von Räumen oder Fußböden kann durch den Einbau einer geregelten Lüftungsanlage der Radongehalt dauerhaft unter 50 Bq/cbm gesenkt werden. Verbunden mit einer Wärmerückgewinnung können Wohnkomfort (Staubabscheidung, Geruchsabfuhr), Erhalt von Bausubstanz (Feuchtigkeitsabfuhr), Energieeinsparung sowie Strahlenschutz verbunden werden.

## 4 Begründung der Forderung X: Wirksamkeit von Neutronen und Protonen

Die Strahlungswichtungsfaktoren  $w_R$  für Neutronen sind in ICRP 103 geändert worden. Sie sollen die Relative Biologische Wirksamkeit (RBW) repräsentieren, die von der Energie der Neutronen abhängt. Für den Energiebereich  $\leq 1$  eV–10 000 MeV wird eine kontinuierliche Funktion für  $w_R$  angegeben, die einen maximalen Wert von 20 bei 1 MeV hat und zu niedrigeren und höheren Energien hin bis auf einen Wert 2,5 sinkt. Im intermediären Energiebereich (1-10 keV) wird damit  $w_R$  auf die Hälfte abgesenkt. Insgesamt ergibt sich für alle bekannten Situationen des praktischen Strahlenschutzes mit Beteiligung von Neutronen eine Absenkung der effektiven Dosis. Zu Grunde gelegt werden die Betrachtungen über die RBW von Strahlungen in ICRP-Publikation Nr. 92 von 2003. Für Protonen wird der frühere konstante energieunabhängige Faktor  $w_R = 5$  auf den Wert 2 abgesenkt.

Zu Neutronen werden aus der experimentellen Forschung für stochastische Effekte RBW-Werte von 2 - 300 angegeben (Engels et al. 1998), in ICRP 92 wird über Werte bis 100 berichtet. Die hohen Werte hängen auch damit zusammen, dass etliche Forscher angeben, dass die RBW jeweils von der Dosis abhängt. Mit geringer werdender Dosis nimmt sie zu. Für Katarakte, die nach neueren Erkenntnissen zu den stochastischen Effekten gezählt werden müssen, fanden Worgul et al. (1996b) Werte von 8-16 bei 250 mGy und 250-500 bei 2 mGy für Neutronen mit einer Energie von 400 keV.

In ICRP 103 wird dennoch behauptet (auf S. 285), die o.g. Funktion stelle eine „gute und konservative Näherung für die effektive Dosis bei den meisten Expositionsbedingungen“ dar. In ICRP 92 (2003) heißt es auf S. 83, dass die Dosis in Neutronenfeldern für Energien zwischen 50 keV und 2,5 MeV **konservativ** berechnet wird, aber außerhalb dieses Bereiches überschritten werden kann.

In zwei Anwendungsfeldern zeigt sich beim Menschen, dass die erstere Einschätzung nicht zutreffend sein kann. Erstens ergaben sich bei Analysen des Neutronenanteils in der Atombombenstrahlung von Hiroshima und Nagasaki, für den in der konventionellen Auswertung eine RBW von 10 verwendet wird, Werte von 100 bzw. 65 (Kellerer et al. 2006; Walsh 2013).

Zweitens wurden in zahlreichen Inzidenzstudien an Flugpersonal Strahlenschäden in Form von Krebserkrankungen beobachtet, die durch die offiziell erhobenen geringen Dosen nicht erklärbar sind. Nach Lindborg et al. (2007) und BfS (2011) wird bei ihnen annähernd die Hälfte der Dosis durch Neutronen und ihre Wechselwirkungsprodukte im Gewebe gebildet, sofern die Energiedosis nach dem Schema der ICRP gewichtet wird. Ab Flughöhen von 9 km aufwärts nimmt allerdings die Neutronendosis zugunsten der Protonendosis ab (Mares et al. 2014). Letztere bildet jedoch ebenfalls einen bedeutsamen Beitrag. Die effektive Dosis des Flugpersonals wird derzeit vom Bundesamt für Strahlenschutz zu 2-5 mSv jährlich angegeben (BfS 2011).

Untersuchungsergebnisse aus zusammenfassenden Inzidenzstudien sind in Tabelle 3 angegeben. Aufgeführt sind hier nur signifikante Ergebnisse und das Ergebnis für Leukämie. Als Kontrollgruppe diente jeweils die nationale Rate. Die deutlich erhöhten Risikowerte sind daher trotz des vielfach bestätigten erheblichen Healthy-Worker-Effekts bei Flugpersonal, der – im Vergleich z. B. zu den japanischen Atombombenüberlebenden – verhältnismäßig geringen Beobachtungsdauer und der zahlenmäßig kleinen Untersuchungskohorten bemerkenswert.

Die bekannteste Strahlenfolge, Leukämie, zeigt sich ebenfalls als erhöht an. Da es sich dabei um eine sehr seltene Krankheit handelt, ergab sich wahrscheinlich wegen zu geringer Fallzahlen in den zusammengefassten Studien nach Tabelle 3 kein signifikantes Ergebnis. In einer dort nicht einbezogenen dänischen Studie an männlichem Cockpit-Personal mit mehr als 5000 Flugstunden war akute myeloische Leukämie mit 3 Fällen sogar 5-fach signifikant



erhöht (Gundestrup et al. 1999). Die Gesamtkrebsrate im Vergleich zur dänischen Bevölkerung war in dieser Untersuchung signifikant um 20 % erhöht.

In einem Kollektiv von 8507 weiblichen Flugbegleiterinnen aus 4 nordischen Ländern traten 14 Fälle von Leukämie auf, was einer signifikanten Erhöhung gegenüber der Nationalrate um den Faktor 1,89 entspricht (Pukkala et al. 2002). Brustkrebs- und Melanomanstiege ergaben ähnliche Werte wie in Tabelle 1. Die mittlere Beobachtungsdauer betrug 23,6 Jahre.

**Tabelle 3** Meta-Analysen über Krebserkrankungen (Inzidenz) bei Flugpersonal  
Auszug von Ergebnissen; Vergleich mit nationalen Raten

Art der Erkrankung	Anzahl ausgewerteter Studien	Relatives Risiko	Vertrauensbereich
<b>Piloten u. männliches Kabinenpersonal</b> (Buja et al. 2005)			
Alle Krebserkrankungen	3	1,67	1,15-2,45
Melanome	3	3,42	1,94-6,05
Anderer Hautkrebs	2	7,47	3,52-15,87
Non-Hodgkin-Lymphome	2	2,49	1,03-6,03
Leukämie	2	1,67	0,35-7,94
<b>Stewardessen</b>			
(a) Tokumaru et al. 2006	5 (a)		
(b) Buja et al. 2006	7 (b)		
Brustkrebs		1,41 (a) 1,40 (b)	1,22-1,62 1,19-1,65
Melanome		2,13 (a) 2,15 (b)	1,58-2,88 1,56-2,88

Manche Autoren halten das hohe Aufkommen von Melanomen und anderen Hautkrebserkrankungen bei Flugpersonal für nicht erklärbar, da die Haut (fälschlich, s. zu Forderung IV) als relativ unempfindlich gegenüber ionisierender Strahlung angesehen wird. Man muss aber bedenken, dass sich in der kosmischen Strahlung geladene Partikel befinden, die in Gewebe nur eine kurze Reichweite haben. Im Flugzeug sind das vor allem Protonen, die auf der Körperoberfläche absorbiert werden und eine höhere Hautdosis erzeugen als in den übrigen Geweben, die nur von dem durchdringenden Anteil der Strahlung betroffen sind.

Ein weiterer Mehrfachbefund bei männlichem Flugpersonal ist das Auftreten erhöhter Raten von Prostatakrebs (Band et al. 1996; Buja et al. 2005; Nicholas et al. 1998; Pukkala et al. 2002; Yamane 2006). Die Strahlenempfindlichkeit der Prostata hat sich insbesondere auch nach diagnostischem Röntgen gezeigt (Myles et al. 2008). Die zitierten Autoren untersuchten Männer unter 60 Jahren und schätzen den Beitrag des Röntgens zum Vorkommen von Prostatakrebs in Großbritannien in dieser Altersgruppe zu 20 % ab. Es ist sicherlich kein Zufall, dass neben Hautkrebs die außen liegenden Organe Prostata und weibliche Brust vergleichsweise hohe Effekte zeigen. Wiederum zeigt sich, dass die gemeinhin nur angegebene **effektive** Dosis kein geeignetes Maß für die Auswirkungen der kosmischen Strahlung auf die spezifischen Gewebe des menschlichen Körpers ist.

Rafnsson und Mitarbeiter (2005) untersuchten das Auftreten von **Katarakten** bei Zivilflugpiloten in einer Fall-Kontrollstudie. Als Kontrolle dienten männliche Einwohner aus Reykjavik. Das Auftreten war bei den Piloten dreifach signifikant erhöht.

Die langjährig durchgeführte deutsche Studie an Flugpersonal kann diese Erkenntnisse nicht widerlegen, da sie die **Mortalität** bei Piloten im Vergleich zur übrigen Bevölkerung untersucht und damit die erfolgreich therapierten Krebserkrankungen, die nicht auf dem Totenschein vermerkt sind, auslässt (Hammer et al. 2012). Es geht bei der Frage des Strahlenrisi-

kos für Piloten auch nicht darum, ob sie häufiger an Krebs erkranken als die Bevölkerung, sondern darum, ob eine Schädigung vorliegt, die nicht aufgetreten wäre, wenn der Betroffene diesen Beruf nicht ausgeübt hätte. Dieses genau wird in der deutschen Studie nicht untersucht.

Das Flugpersonal gehört nach ICRP 92 tatsächlich auch zu den Fällen, die durch die o.g. Aussagen über „Konservativität“ bei der Ableitung der Wichtungsfaktoren nicht gedeckt sind. Nach Abb. 4.5 (S. 79 in ICRP 2003), wo die Energiedosisrate in einem Flugzeug in Abhängigkeit von der Neutronenenergie aufgetragen ist, wird der weitaus überwiegende Teil der Dosis durch Neutronen von solchen mit höheren Energien als 2,5 MeV geliefert.

Bei Transport- und Lagebehältern für bestrahlte Brennelemente oder hoch radioaktive Wiederaufarbeitungsabfälle (z. B. CASTOR) liegen die austretenden Neutronen nach Messungen des BfS überwiegend in einem sehr viel niedrigeren Energiebereich als in Flughöhen, meistens unterhalb von 2,5 MeV mit einer maximalen Häufigkeit bei ungefähr 400 keV (Börst et al. 2000). Auch die von den Atombomben auf Japan ausgesandten Neutronen wiesen überwiegend Energien unterhalb von 2,5 MeV auf (Roesch 1987). Die o.g. Ergebnisse über ihre RBW zeigen ebenfalls keine Übereinstimmung mit den Annahmen der ICRP, die daher zu weiteren drastischen Unterschätzungen der von CASTOR-Behältern ausgehenden Gesundheitsgefahren führen werden.

Eine konservative Schätzung für chronische Exposition im Niederdosisbereich muss für alle Neutronenenergien einen Wert  $w_R$  von mindestens 90 benutzen.

Die Senkung des Strahlungswichtungsfaktors um mehr als die Hälfte für alle vorkommenden Protonen im Strahlenschutz kann ebenfalls nicht überzeugen. Sie wird in ICRP 92 ausschließlich mit Werten aus dem Hochdosisbereich begründet, der für die Strahlentherapie mit Protonen von Interesse ist. Es ist aber bekannt, dass auch die RBW von Protonen mit abnehmender Dosis und Dosisleistung ansteigt (Yang et al 1986; Mognato et al. 2003; Jones 2016).

Schmitz (2017) untersuchte die zu erwartende Absenkung der Dosis für das Flugpersonal durch die veränderte Wahl der Strahlungswichtungsfaktoren an einem Fallbeispiel, in dem er sich auf Angaben von Mares und Rühm (2014) über die Zusammensetzung der kosmischen Strahlung in 10-12 km Flughöhe in den Polarregionen bezog. Es ergibt sich eine um etwa 30 % geringere Dosis, die hauptsächlich durch den niedrigeren  $w_R$  für Protonen bestimmt wird. Damit ist zu befürchten, dass die rechnerische Absenkung dazu benutzt wird, das Flugpersonal aus der gesetzlich geschützten Kategorie beruflich Strahlenexponierter herauszunehmen.

Für den vom BUND geforderten  $w_R$  für Neutronen von 90 und die Beibehaltung von  $w_R = 5$  für Protonen ergibt sich nach Schmitz eine Erhöhung der Dosis gegenüber den früheren Annahmen in ICRP 60 (1991) um fast den Faktor 7.

## **5 Begründung der Forderung XI: Dosisfaktoren und Ausbreitungsmodelle**

Wie zu den Punkten I-VII dieser Stellungnahme belegt wurde, kann kein Zweifel daran bestehen, dass der Tschernobylunfall in zahlreichen Ländern somatische und genetische Schäden erzeugt hat. Die in einer umfangreichen wissenschaftlichen Literatur niedergelegten Ergebnisse werden jedoch von der ICRP nicht als Folge von Bestrahlungen anerkannt, da sie behauptet, dass die Dosis in den entsprechenden Bevölkerungen durch den Tschernobylfall viel zu klein gewesen sei, um statistisch erkennbare Effekte zu bewirken. Sie beruft sich dabei auf Angaben des Strahlenkomitees der Vereinten Nationen (UNSCEAR 1988). Selbst in den hochverstrahlten Gegenden der Anrainerländer mit mehr als 37 kBq/m<sup>2</sup> Bo-

denbelastung mit Cs-137 soll sie im Mittel nicht mehr als etwa 10 mSv betragen (effektive Lebenszeitdosis). Für die Türkei und die weiter entfernten Länder Zentraleuropas soll sie unterhalb von 1,2 mSv liegen.

Zahlreiche Studien über Chromosomenaberrationen in den weißen Blutkörperchen der Bewohner solcher Gegenden, die man als „Biologische Dosimetrie“ auffassen kann, zeigen jedoch, dass die Dosen tatsächlich um den Faktor 10 bis 100 höher liegen müssen (Yablokov et al. 2009). Die biologische Dosimetrie erfasst dabei auch die Beiträge der inkorporierten radioaktiven Stoffe. So entsprachen zum Beispiel kurz nach dem Unfall gemessene Werte für dizentrische Chromosomen in Salzburg etwa 60 mSv Ganzkörperdosis, im benachbarten Berchtesgaden etwa 30 mSv (Pohl-Rüling et al. 1991; Stephan et al 1993). In der größten Gruppe an untersuchten Personen aus den höchstbelasteten Gebieten von Weissrussland – 330 gesunde Erwachsene – wurde eine Aberrationsrate gemessen, die etwa 150 mSv entspricht (Domracheva et al. 2000).

Die Dosis bei Personen, die Radionuklide durch Inhalation oder Aufnahme in den Magen/Darm-Trakt (Ingestion) aufnehmen, kann nicht direkt gemessen werden. Deshalb wird mit Modellrechnungen gearbeitet, bei denen durchweg vereinfachte Annahmen gemacht werden müssen. Das UNSCEAR-Komitee hat u. a. angenommen, dass außer den Radionukliden Cs-137 und Cs-134 alle dosisrelevanten Spalt- und Brutprodukte sowie Bestandteile des Kernbrennstoffs außerhalb eines 100 km-Umkreises vom Tschernobylreaktor keine Rolle mehr spielen. Aus den gemessenen Bodenkontaminationen für diese Isotope haben sie die Dosis durch die Bodenstrahlung und durch Inhalation ermittelt.

Für die Dosis nach Inkorporation von Radionukliden hat die ICRP Stoffwechselmodelle entwickelt, die den Anteil und Verbleib des jeweiligen chemischen Elements in den verschiedenen Kompartimenten des Körpers beschreiben, damit daraus die jeweilige Organdosis berechnet werden kann. Das Ergebnis sind Dosisfaktoren in der Einheit Sv pro Bq für Inhalation und Ingestion für verschiedene Altersklassen, die nach StrlSchV verbindlich im Strahlenschutz für die Umwelt und an Arbeitsplätzen einzusetzen sind. Sie werden je nach Fragestellung einerseits als konservativ, im anderen Fall als real betrachtet, ohne dass jeweils ein wissenschaftlicher Beleg dafür vorliegt, denn die Werte werden ohne Vertrauensbereich angegeben. Dieses wurde vom BUND schon früher kritisiert (Dannheim et al. 2000).

In die Modellrechnungen gehen naturgemäß zahlreiche Parameter ein, die wiederum ohne Vertrauensbereich verwendet werden. Internationale Untersuchungen haben gezeigt, dass die Unsicherheit der Dosisfaktoren mehrere Größenordnungen betragen kann (Roy et al. 1998; Dannheim et al. 2000). Dennoch wird anhand solcher Dosisfaktoren entschieden, ob z. B. Grenzwerte eingehalten werden oder die Anerkennung einer Berufskrankheit abgelehnt werden kann.

Das gleiche grundsätzliche Problem besteht bei den vorgeschriebenen Ausbreitungsrechnungen für Radionuklide, wenn es darum geht, aus den Emissionen einer Quelle die Dosis bei den Anwohnern zu ermitteln. Bevor die o. g. Dosisfaktoren zur Anwendung kommen, müssen die Nuklidkonzentrationen am Aufenthaltsort der Personen ermittelt werden (Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu §47 StrlSchV, AVV).

Die Verdünnung der luftgetragenen Radionuklide (gasförmig oder als Aerosol) erfolgt mit den Parameterwerten des Anhangs 7 der AVV. Für 6 Diffusionskategorien werden von der Emissionshöhe und von der Entfernung zur Quelle abhängige Ausbreitungsparameter angegeben, die als Mittelwerte von Experimenten, die in Jülich und Karlsruhe durchgeführt wurden, bestimmt wurden. Diese Vorgehensweise kann die Variabilität der atmosphärischen Ausbreitungsbedingungen nicht annähernd korrekt abbilden.

Bei der Ausbreitungsrechnung nach AVV wird angenommen, dass

- das Gelände eben ist,
- die Emissionsrate konstant ist,

- das meteorologische Windfeld stationär und homogen ist,
- die Turbulenz stationär und homogen ist,
- die Diffusion in Transportrichtung vernachlässigbar gegenüber dem horizontalen Transport ist,
- die Schadstofffahne einmal am Boden reflektiert wird.

Sofern das Gelände nicht eben ist, soll das durch Korrekturfaktoren berücksichtigt werden.

Eine Kritik der AVV wurde von Schumacher und Hinrichsen in einem Strahlenbiologischen Gutachten vorgenommen, das das schleswig-holsteinische Energieministerium im Zusammenhang mit den Aufklärungsbemühungen um das Leukämievorkommen beim AKW Krümmel in Auftrag gegeben hatte (Hinrichsen 2001; Schumacher 2001). Zu den Ausbreitungsrechnungen wurden in der Zusammenfassung des Gutachtens folgende Feststellungen getroffen:

- „Ein gravierender Schwachpunkt des Gaußschen Modells liegt darin, dass es nur bei bestimmten orografischen Voraussetzungen Gültigkeit hat, die mehr oder minder idealisierte Bedingungen darstellen, die kaum anzutreffen sind. So können insbesondere in komplex gegliedertem Gelände oder bei Vorliegen einer komplexen Meteorologie (wie das Vorhandensein eines größeren Gewässers) Gauß-Modelle zu falschen Ergebnissen betreffend der Bestimmung der ortsabhängigen Schadstoffkonzentration in der Luft führen.“
- Ein weiteres Problem liegt in der Anwendung vereinfachter Schemata für die genannten Ausbreitungskategorien. Außerdem kann es zu einer Fehlzurordnung von Ausbreitungskategorien kommen. Ein Zusammenwirken dieser beiden Fehlerquellen kann zu signifikanten Unterschätzungen der Expositionen führen.
- Weiterhin sind Diskrepanzen zwischen theoretisch errechneten und gemessenen Werten für die Ausbreitung von Radioaktivität in Abhängigkeit von der Emissionshöhe und Entfernung von der Quelle beobachtet worden. Die Anwendung von gemittelten Werten aus Langzeitausbreitungen für die Berechnung von Kurzeitausbreitungen kann zu Verfälschungen und folglich Unterschätzungen führen. Von besonderem Interesse ist auch, was als Quasi-Langzeitausbreitung bezeichnet wird, charakterisiert durch eine Vielzahl von Kurzzeit-Emissionen (eine Stunde Dauer) über einen längeren Zeitraum, z.B. von einem Jahr, anstatt einer kontinuierlichen Emission. Die gesamte Jahresexposition aus der Summe solcher kurzen Emissionen kann den Grenzwert für Langzeitausbreitungen um einen Faktor von 5,5 höher legen, wenn ersatzweise mit Langzeitausbreitung gerechnet wird.“

Beim Normalbetrieb eines Leichtwasserreaktors, wie sie in Deutschland betrieben werden, geht man für den Luftpfad davon aus, dass die Knochenmarksdosis eines Kleinkindes oder Erwachsenen zu etwa 2 Dritteln durch äußere Gammastrahlung zustande kommt, indem die Person sich einerseits in einer radioaktiven Atmosphäre aufhält, andererseits durch im Boden abgelagerte Nuklide bestrahlt wird (Bonka 1982). Ein weiteres Drittel ergibt sich durch Ingestion, die die Person durch die aus der Luft abgelagerte Radioaktivität in der Nahrungskette erfährt. Die Inhalation der Radioaktivität gilt demgegenüber als vernachlässigbar.

Man muss also berechnen, wieviel von der Luftradioaktivität durch trockene Ablagerung (sie kann z. B. bei elementarem Jod um den Faktor 80 variieren) und durch Regen in den Boden gelangt. Des Weiteren ermittelt man die Ingestion. Dazu berechnet man die Kontaminationen der Nutzpflanzen, die in der betreffenden Region angebaut werden mit Hilfe sog. Transferfaktoren, die in der AVV aufgeführt sind. Diese geben z. B. für den Weide-Kuh-Milchpfad an, wieviel Aktivität vom Boden in die Pflanze, von der Pflanze in die Kuh und von da in die Milch gelangt. Als weitere Faktoren gehen die tägliche Verzehrmenge und Wasseraufnahme der Kuh, Ernährungsgewohnheiten der Referenzperson usw. ein.

Die mangelnde Konservativität der Ergebnisse in den verschiedenen Zwischenschritten der Modellierung war bereits von Teufel, Franke und Steinhilber-Schwab in der früheren Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages „Zukünftige Kernenergie-Politik“ kritisiert worden (Teufel et al. 1980). Insbesondere hatten sie nachgewiesen, dass die Transferfaktoren Boden-Pflanze um Größenordnungen größer sein können als die damals von der SSK nach ICRP vorgeschlagenen Werte. Auch für die Transferfaktoren werden bis heute keine Vertrauensbereiche angegeben.

Dass die Modellrechnungen bei kerntechnischen Anlagen auch im Normalbetrieb nicht zutreffen können, ergibt sich aus zahlreichen Beobachtungen über Strahleneffekte in der Umgebung solcher Anlagen, es sei denn, diese gäben deutlich mehr Radioaktivität ab als genehmigt. Insbesondere sind in etlichen europäischen Ländern sowie in den USA und Japan Leukämieerkrankungen bei Kindern und Erwachsenen in der Umgebung von Atomkraftwerken und anderen Nuklearanlagen aufgetreten (Baker 2007; Gardner et al. 1990; Goldsmith 1992; Hoffmann et al. 1990, 1996, 2007; Körblein et al. 2012a; Körblein 2012b; Möhner et al. 1993; Morris et al. 1996; Pobel et al. 1997; Roman et al. 1987). Überall hieß es offiziell, die zugehörige Bevölkerungsdosis sei viel zu klein für einen Strahleneffekt.

Andere Risikofaktoren konnten jedoch nicht ausgemacht werden und die einzige Übereinstimmung besteht darin, dass die jeweilige Anlage radioaktive Stoffe emittiert. Es ist daher wissenschaftlich unsinnig, die auf Schätzwerten ohne Vertrauensbereich basierende Dosisangabe gegen die Evidenz auszuspielen.

In Deutschland ergab sich in der sog. KiKK-Studie sogar ein signifikanter Aufwärtstrend des Leukämierisikos bei Kleinkindern der Altersgruppe 0-4 Jahre mit abnehmender Entfernung vom AKW. Untersucht wurde die Umgebung für alle AKWs zusammengenommen für den Zeitraum 1980-2003. Im 5 km-Umkreis ergab sich eine signifikante 61%-ige Erhöhung der Gesamtkrebsrate bei Kindern bis zu 5 Jahren, wobei als Kontrolle entsprechende Fälle außerhalb dieses Gebietes gewählt wurden (Spix et al. 2008).

Die Leukämierate war im 5 km-Umkreis in dieser Gruppe um 119% erhöht, das ist etwas mehr als eine Verdopplung gegenüber normal. Die Autoren und die SSK behaupten, für diesen Effekt sei eine Dosis von 2 Sv erforderlich und dies sei mehr als das Tausendfache der realen Dosis (reale Dosis demnach < 2 mSv angenommen). Die Verdopplungsdosis für Leukämie bei Kleinkindern wird jedoch selbst bei den japanischen Überlebenden nicht als so hoch eingeschätzt. **Aus den Angaben über Leukämie durch natürliche Hintergrundstrahlung von Kendall et al. (2013) leitet sich eine Verdopplungsdosis von ca. 8 mSv ab. Das entspräche demnach nur mehr als dem 4-fachen der angenommenen realen Dosis.**

Zu den somatischen Folgen müssten aber die Beiträge der Leukämieinduktion durch vorgeburtliche und genetische Strahleninduktion addiert werden, die sich bei chronischer Exposition derzeit nicht quantifizieren lassen.

Auf jeden Fall ist es unumgänglich, mögliche Fehler der Modellrechnungen anzuerkennen, sowie die Tatsache, dass sich die Expositionen der Bevölkerung durch physikalische Betrachtungen nicht präzise bestimmen lassen.

## **6 Begründung der Forderung XII: Änderung der Freigaberegulung**

Die Strahlenschutzverordnung sieht in § 29 vor, dass eine Freigabe von radioaktiven Stoffen erfolgen kann, wenn festgelegte Höchstwerte der Aktivitäten einzelner Radionuklide eingehalten werden. Es erfolgt eine Differenzierung nach einer uneingeschränkten Freigabe (beliebige Verwendung oder Entsorgung) bzw. eingeschränkten Freigaben in verschiedenen Pfaden (Deponie, Müllverbrennung, Metallschmelze). Die jeweiligen Stoffe werden durch die

Freigabe als nicht radioaktiv deklariert und können in Stoffströme oder die Umwelt gelangen und auf verschiedenen Pfaden Mensch und Natur Strahlendosen aussetzen. Während die ursprüngliche Freigaberegulung (vor dem Jahr 2001) sich auf geringe Mengen von Stoffen mit geringster Aktivität bezog, umfasst die Freigaberegulung der StrlSchV 2001/2011 sehr große Mengen von mehreren 100.000 Tonnen Material (Neumann 2013).

Die EU-Richtlinie legt in Anhang VII, Tabelle A Höchstwerte für die Freigabe von Materialien, die „für jede Menge und jede Art von Feststoff als Standardwerte dienen können“ fest. Diese Werte liegen in der Größenordnung der Höchstwerte für die uneingeschränkte Freigabe nach § 29 StrlSchV/Anlage III Tabelle 1. In Anhang III Ziffer 3 der EU-Richtlinie werden allgemeine Freistellungs- und Freigabekriterien etabliert, wenn „die radiologischen Risiken (...) so gering sind, dass kein Regelungsbedarf besteht“ und „die Tätigkeit als gerechtfertigt eingestuft“ wurde. In Punkt 3. d) wird die Möglichkeit einer Bewertung eröffnet, wenn die Mengen nicht den Tabellen A und B entsprechen und – für künstliche Radionuklide – für eine Einzelperson die erwartete effektive Dosis „im Bereich von 10  $\mu$ Sv jährlich oder weniger“ liegt. Dies bedeutet, dass über die EU-Richtlinie das „10  $\mu$ Sv-Konzept“ weitergeführt wird. Dieser Ansatz ist nicht akzeptabel:

Grundsätzlich widerspricht die Freigaberegulung den Prinzipien des Strahlenschutzes, wonach jegliche zusätzliche und vermeidbare Strahlenbelastung zu unterlassen ist (Minimierungsgebot der Strahlenschutzverordnung). Eine Rechtfertigung der Unterlassung und der Missachtung des Minimierungsgebotes liegt bei der Freigabe von Atommüll aus dem Abriss von Atomkraftwerken nicht vor – ein Alternativenvergleich erfolgt regelhaft nicht.

Auch gemäß dem Grundgesetz ist zum Schutz von Leben und Gesundheit jegliche Freisetzung von gesundheitsgefährdenden Stoffen so gering wie möglich zu halten. Im Falle der Freigabe haben mögliche Betroffene durch die Nicht-Deklaration keine Information über mögliche und tatsächliche Strahlendosen, so dass eine Kontrolle der Ausbreitung der radioaktiven Stoffe und passive oder aktive Schutzmaßnahmen nicht möglich sind. Durch die Art des (erlaubten) Umgangs mit freigemessenem Abfall ist eine Rückholbarkeit nicht möglich.

Die aktuellen Freigabewerte (Anlage III StrlSchV) beruhen auf zahlreichen Annahmen und Voraussetzungen, die nach den Ausführungen zu I bis VII überholt sind. Die Regelungen in der StrlSchV sowie in der EU-Richtlinie entziehen zudem die Freigabepaxis sowohl der Rechtfertigung als auch der Minimierungspflicht. Dies erfolgt durch Setzung eines Dosisrichtwertes von 10  $\mu$ Sv pro potentiell durch Strahlung aus freigegebenen Stoffen belasteter Person im Jahr. Dieser Wert grenzt willkürlich diesen Bereich von Strahlenbelastungen durch Freigabe aus dem Regelungsbereich des Strahlenschutzes aus. Dieser Wert, der durch die IAEA und nicht durch demokratisch legitimierte Gremien vorgegeben ist, unterstellt, dass das durch diese Dosen hervorgerufene Risiko von Erkrankungen und Todesfällen hinzunehmen ist. Dies widerspricht dem Erkenntnisstand im Strahlenschutz, dass es keine untere Schwelle der Ungefährlichkeit gibt. Daher widerspricht die Freigaberegulung grundsätzlich den Zielen des Strahlenschutzes. Anstelle einer Freigabe ist eine geordnete Deponierung mit hohen Schutzanforderungen vorzunehmen.

Bei der Ableitung der Freigabewerte nach Anlage III StrlSchV wurden in Modellberechnungen zahlreiche Annahmen unterstellt, die nicht mehr gelten, in der Praxis der Freigabe nicht vorgeschrieben sind oder nicht kontrolliert werden (können) (Neumann 2014). Die aufgrund der derzeitigen Freigaberegulung durch den Abriss von Atomkraftwerken zu erwartenden Abfallmengen sind weitaus größer als ursprünglich unterstellt wurde. Modellannahmen zur Ableitung der Freigabewerte, z.B. über erforderliche Jahres-Kapazitäten von Deponien oder Arbeitsmodalitäten die Strahlenbelastung aufzuteilen, werden in der Realität weder vorgeschrieben, noch eingehalten, noch kontrolliert.

Es wurden bei der Verabschiedung der StrlSchV 2001 durch das BMU auch Kriterien wirtschaftlicher Abwägung angewendet (ALARA-Prinzip). Dies widerspricht den Grundsätzen des Strahlenschutzes zur Minimierung der Strahlenbelastung (ALASTA-Prinzip). Aus diesen

Gründen besteht keine belastbare, nachvollziehbare Begründung für die Freigabewerte. Bei der Ableitung der Werte wurde sich darauf verlassen, dass ein bestimmter Freigabepfad aus einer Quelle der freizugebenden Materialien bestimmend ist. Tatsächlich muss jedoch aufgrund höherer Mengen von Abfällen, die zeitlich konzentriert durch parallelen Abriss von Anlagen anfallen, sowie durch gleichzeitige Expositionen aus mehreren Freigabepfaden mit einer Kumulierung von Strahlendosen gerechnet werden.

Die Stoffe, für die eine Freigabe nach StrlSchV vorgesehen war, sind gesondert und gegen Freisetzen gesichert aufzubewahren. Sie können in besonders gesicherte Deponien oder in ein oberflächennahes Endlager verbracht werden. Auch möglich ist die Lagerung in entkernten Gebäuden des Atomkraftwerkes oder verbunkert auf dessen Gelände. Diese vier Optionen sollten gleichwertig verfolgt und geprüft werden.

## **7 Begründung der Forderung XIII: Besetzung von Fachgremien**

Die ICRP besitzt weder eine abdeckende fachliche noch eine demokratische Legitimation. Ihre Mitglieder rekrutieren sich vielmehr selbst. Ihre einseitig auf Anwenderinteressen ausgerichtete Denkweise erkennt man an der Tatsache, dass zahlreiche internationale Befunde über Niederdosiseffekte wie z. B. die genannten über kardiovaskuläre oder genetisch induzierte Erkrankungen ausgeblendet oder erst nach Jahrzehnten berücksichtigt werden wie die Effekte nach Röntgenexposition in utero. Die deutsche Strahlenschutzkommission repräsentiert in großer Mehrheit eine gleiche selektive Wahrnehmung. Einer wissenschaftlich seriösen Diskussion der Ergebnisse der KiKK-Studie (Kinderkrebs bei deutschen AKW) von 2007 ist sie ausgewichen. Die realen und noch zu erwartenden Gesundheitsschäden der Reaktorkatastrophen von Tschernobyl und Fukushima werden von ihr bis heute negiert oder verharmlost, ebenso wie die Untersuchungen über Schäden durch diagnostisches Röntgen oder berufliche Exposition.

Angesichts der großen Bedeutung einer objektiven Einschätzung der Gesundheitsrisiken durch niedrige Dosen ionisierender Strahlung müssen die beauftragten Fachgremien:

- das gesamte Spektrum der relevanten Fachdisziplinen abdecken (Dosimetrie, physikalische Strahlenwirkung, biologische Strahlenwirkungen, Strahlenepidemiologie, Ethik, Risikokommunikation)
- die Unabhängigkeit ihrer Mitglieder sicherstellen. Alle Teilnehmer, insbesondere auch jene aus dem Bereich der Industrie und aus drittmittelabhängiger Forschung an Universitäten müssen ihre Interessenkonflikte offenlegen. An Diskussionen und Entscheidungen, die direkt oder indirekt die Interessen ihrer Arbeit- oder Geldgeber betreffen, dürfen diese Mitglieder sich nicht beteiligen
- ihre Arbeit transparent gestalten. Vertreter von Betroffenen sind anzuhören und in Abwägungsprozesse einzubeziehen. Die Öffentlichkeit ist angemessen zu informieren und einzubeziehen
- sich regelmäßig einer externen Begutachtung stellen (Peer review)
- ihre Methoden, Verfahren und Abwägungsgründe regelmäßig vor den zuständigen staatlichen Organen offenlegen und begründen
- mit Fachgremien der einschlägigen wissenschaftlichen Fachgesellschaften in einen Dialog auf Augenhöhe eintreten sowie deren Rat berücksichtigen.

## **8 Begründung der Forderung XIV: Einrichtung von Universitätslehrstühlen für unabhängige Strahlenbiologie und Strahlen-genetik**

Angesichts eines eklatanten Mangels an universitärer Forschung und Lehre im Bereich einer unabhängigen Strahlenbiologie bzw. Strahlen-genetik – angesichts auch des Umstandes, dass Wirtschaftsunternehmen zunehmend Einfluss auf Universitäten über die Finanzierung

von Professuren gewinnen - sollen die Wissenschaftsministerien von Bund und Ländern die Einrichtung unabhängiger Lehrstühle an den Universitäten initiieren.

## 9 Literaturangaben

- Ainsbury, E.A., Bouffler, S.D., Dörr, W. et al.: Radiation cataractogenesis: a review of recent studies. *Radiat. Res.* 172 (2009) 1-9
- Akiyama, M.: Late effects of radiation on the human immune system: an overview of immune response among the atomic-bomb survivors. *Int. J. Radiat. Biol.* 68 (1995) 497-508
- Baker, P.J., Hoel, D.G.: Meta-analysis of standardized incidence and mortality rates of childhood leukaemia in proximity to nuclear facilities. *Europ. J. Cancer Care* 16 (2007) 355-363
- Band, P.R., Le, N., Fang, R. et al.: Cohort study of Air Canada pilots: mortality, cancer incidence, and leukemia risk. *Am. J. Epidemiol.* 143 (1996) 137-143
- BEIR VII PHASE 2: Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, Nat. Academies Press, Washington D.C. 2006, [www.nap.edu](http://www.nap.edu)
- BfS Bundesamt für Strahlenschutz: Positionsbestimmung des BfS zu Grundsatzfragen des Strahlenschutzes. Leitlinien Strahlenschutz des BfS. 01.06.2005, [www.bfs.de](http://www.bfs.de)
- BfS Bundesamt für Strahlenschutz Frasc, G., Kammerer, L., Karofsky, R., Schlosser, A., Spiesl, J., Stegeman, R.: Die berufliche Strahlenexposition des fliegenden Personals in Deutschland 2004-2009. 2011 [urn:nbn:de:0221-201108016029](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0221-201108016029)
- BfS Bundesamt für Strahlenschutz: Natürliche Radionuklide in Mineralwässern. Informationen Stand 05.10.2015
- BfS Bundesamt für Strahlenschutz: Radon – ein kaum wahrgenommenes Risiko. Broschüre Strahlenschutz Konkret. Stand Juli 2016. [www.bfs.de](http://www.bfs.de)
- Börst, F.-M., Rimpler, A., Scheib, H.: Strahlungsmessungen an Transport- und Lagebehältern zur Beförderung von hochaktiven Glaskokillen aus der Wiederaufarbeitung und von bestrahlten Brennelementen. Bundesamt für Strahlenschutz, BfS-ET-32/00, Salzgitter, Juli 2000
- Bonka, H.: Strahlenexposition durch radioaktive Emission aus kerntechnischen Anlagen im Normalbetrieb. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1982
- Brenner, D.J., Hall, E.J.: The inverse dose-rate effect for oncogenic transformation by neutrons and charged particles: a plausible interpretation consistent with published data. *Int. J. Radiat. Biol.* 58 (1990) 745-758
- Brenner, D.: The significance of dose-rate in assessing the hazards of domestic radon exposure. *Health Phys.* 67 (1994) 76-79
- Buja, A., Lange, J.H., Perissinotto, E. et al.: Cancer incidence among military and civil pilots and flight attendants: an analysis on published data. *Toxicol. Ind. Health* 21 (2005) 273-282
- Buja, A., Mastrangelo, G., Perissinotto, E. et al.: Cancer incidence among female flight attendants: a meta-analysis of published data. *J. Womens Health* 15 (2006) 98-105
- Busby, C., Lengfelder, E., Pflugbeil, S., Schmitz-Feuerhake, I.: The evidence of radiation effects in embryos and fetuses exposed to Chernobyl fallout and the question of dose response. *Medicine, Conflict and Survival* 25 (2009) 20-40
- Cardis, E.: Commentary: Low dose-rate exposures to ionizing radiation. *Int. J. Epidemiol.* 36 (2007) 1046-1047
- Cox, D.W.: An investigation of possible genetic damage in the offspring of women receiving multiple diagnostic pelvic X-rays. *Am J Human Genetics* 16 (1964) 214-230
- Choi, J.W., Mehrotra, P., MacDonald, L.A. et al.: Sex proportion of offspring and exposure to radiation in male invasive cardiologists. *Proc. (Bayl. Univ. Med. Cent.)* 20 (2007) 231-234
- Dannheim, B., Franke, B., Hirsch, H., Hoffmann, W., Köhnlein, W., Kuni, H., Neumann, W., Schmitz-Feuerhake, I., Zahrt, A.: Strahlengefahr für Mensch und Umwelt. Bewertungen der Anpassung der deutschen Strahlenschutzverordnung an die Forderungen der EU-Richtlinie 96/29/Euratom. Berichte des Otto Hug Strahleninstituts Nr. 21-22, 2000, 118 S.
- Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros, J.M. et al.: Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *Brit. Med. J.* 2005 Jan.29; 330 (7485) 223-228
- Dickinson, H.O., Parker, I., Binks, K., Wakeford, R., Smith, J.: The sex ratio of children in relation to paternal pre-conceptional radiation dose: a study in Cumbria, northern England. *J. Epidemiol. Community Health* 50 (1996) 645-652
- Domracheva, E.V., Aseeva, E.A., Obukhova, T.N. et al.: Cytogenetic features of leukaemias diagnosed in residents of areas contaminated after the Chernobyl nuclear accident. *Appl. Radiat. Is.* 53 (2000) 1171-1177
- Engels, H., Wambersie, A.: Relative biological effectiveness of neutrons for cancer induction and other late effects: a review of radiobiological data. *Recent Results Cancer Res.* 150 (1998) 54-87
- Fritz-Niggli, Hedi (1997): Strahlengefährdung/Strahlenschutz. Ein Leitfaden für die Praxis. Verlag Hans Huber, Bern
- Fucic, A., Aghajanyan, A., Druzhinin, V. et al. : Follow-up studies on genome damage in children after Chernobyl nuclear power plant accident. *Arch. Toxicol. Online*: 22 June 2016 DOI 10.1007/s00204-016-1766-z
- Gardner, M.J., Snee, M.P., Hall, A.J. et al.: Results of case-control study of leukaemia and lymphoma among young people near Sellafield nuclear plant in West Cumbria. *Brit. Med. J.* 300 (1990) 423-429



- Gloster, H.M., Neal, K.: Skin cancer in skin of color. *J. Am. Acad. Dermatol.* 55 (2006) 741-760
- Goldsmith, J.R.: Nuclear installations and childhood cancer in the UK: mortality and incidence for 0-9-year-old children, 1971-1980. *Sci. Total Environment* 127 (1992) 13-35
- Gundestrup, M., Storm, H.H.: Radiation-induced acute myeloid leukaemia and other cancers in commercial jet cockpit crew: a population-based cohort study. *Lancet* 354(9195) (1999) 2029-2031
- Hammer, G.P., Blettner, M., Langner, I., Zeeb, H.: Cosmic radiation and mortality from cancer among male German airline pilots: extended cohort follow-up. *Eur. J. Epidemiol.* 27 (2012) 419-429
- Heiervang, K.S., Mednick, S., Sundet, K., Rund, B.R.: The Chernobyl accident and cognitive functioning: a study of Norwegian adolescents exposed in utero. *Dev. Neuropsychol.* 35 (2010) 643-655
- Herrmann, T., Thiede, G., Trott, K.-R., Voigtman, L.: Nachkommen präkonzeptionell bestrahlter Eltern. Abschlussbericht einer Longitudinalstudie 1976-1994 und Empfehlungen zur Patientenberatung. *Strahlentherapie und Onkologie* 180 (2004) 21-30
- Hinrichsen, K. (2001): Kritische Würdigung der meteorologischen Basis im Zusammenhang mit den AVV, Anhang D in s. Stevenson.
- Hoffmann, W., Kuni, H., Artmann, S. et al.: Leukämiefälle in Birkenfeld und Umgebung. Eine erste Bestandsaufnahme. In: Köhnelein, W., Kuni, H., Schmitz-Feuerhake, I. (Eds.), *Niedrigdosisstrahlung und Gesundheit*. Berlin, Springer Verlag 1990, 127-135
- Hoffmann, W., Kuni, H., Ziggel, H.: Leukaemia and lymphoma mortality in the vicinity of nuclear power stations in Japan 1973-1987. *J. Radiol. Prot.* 16 (1996) 213-215
- Hoffmann, W.: Fallout from Chernobyl nuclear disaster and congenital malformations in Europe. *Arch Environ Health* 56 (2001) 478-484
- Hoffmann, W., Terschüren, C., Richardson, D.B.: Childhood leukemia in the vicinity of the Geesthacht nuclear establishments near Hamburg, Germany. *Environ. Health Persp.* 117 (2007) 947-952
- Hunter, N., Muirhead, C.R.: Review of relative biological effectiveness dependence on linear energy transfer for low-LET radiations. *J. Radiol. Prot.* 29 (2009) 5-21
- ICRP, International Commission on Radiological Protection: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publ. 60, Ann. ICRP 21 (1991) No.1-3
- ICRP, International Commission on Radiological Protection: Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus). ICRP Publication 90. *Annals of the ICRP* 33 (2003) No.1-2
- ICRP, International Commission on Radiological Protection: Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q), and radiation weighting factor ( $w_R$ ). ICRP-Publication 92. *Ann. ICRP* 33 (2003) No.4
- ICRP, International Commission on Radiological Protection: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP-Publication 103, Ann. ICRP 37 Nos. 2-4 (2008)
- ICRP, International Commission on Radiological Protection: Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures. ICRP-Publication 116, Ann. ICRP 40 Nos. 2-5 (2010)
- ICRP, International Commission on Radiological Protection: ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs – threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP-Publication 118, Ann. ICRP 41 (2012) Nos. 1-2
- ICRP, International Commission on Radiological Protection: Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP-Publication 119, Ann. ICRP 41 Suppl. 1 (2012) 1-130
- IPPNW Deutsche Sektion der Internationalen Ärzte für die Verhütung des Atomkriegs/Ärzte in sozialer Verantwortung e.V.: Gefahren ionisierender Strahlung. Berlin, Jan. 2014.  
[www.ippnw.de/commonFiles/pdfs/Atomenergie/Ulmer Expertentreffen-Gefahren ionisierender Strahlung.pdf](http://www.ippnw.de/commonFiles/pdfs/Atomenergie/Ulmer%20Expertentreffen-Gefahren%20ionisierender%20Strahlung.pdf)
- Jones, B.: Why RBE must be a variable and not a constant in proton therapy. *Br. J. Radiol.* 89 (2016)  
doi:10.1259/bjr.20160116
- Kellerer, A.M., Rühm, W., Walsh, L. Indications of the neutron effect contribution in the solid cancer data of the A-bomb survivors. *Health Phys.* 90 (2006) 554-564
- Kendall, G.M., Little, M.P., Wakeford, R., Bunch, K.J., Miles, J.C., Vincent, T.J., Meara, J.R., Murphy, M.F.: A record-based case-control study of natural background radiation and the incidence of childhood leukaemia and other cancers in Great Britain during 1980-2006. *Leukemia* 27 (2013) 3-9
- Körblein, A., Küchenhoff, H. (1997): Perinatal mortality in Germany following the Chernobyl accident, *Rad. Environ. Biophys.* 36: 3-7
- Körblein A: Strontium fallout from Chernobyl and perinatal mortality in Ukraine and Belarus. *Radiat Biol Radioecol* 2003, 43(2),197-202
- Körblein, A., Fairlie, I.: French geocap study confirms increased leukemia risks in young children near nuclear power plants. *Int. J. Cancer* 131 (2012)a 2970-2971
- Körblein, A.: CANUPIS study strengthens evidence of increased leukaemia rates near nuclear power plants. *Int. J. Epidemiol.* 41 (2012)b 318-319
- Kreisheimer, M.: The inverse dose-rate effect for radon induced lung cancer: a modified approach for risk modeling. *Radiat. Environ. Biophys.* 45 (2006) 27-32
- Krestinina, L.Y., Preston, D.L., Ostroumova, E.V., Degteva, M.O., Ron, E., Vyushkova, O.V., Startsev, N.V., Kosenko, M.M., Akleyev, A.V.: Protracted radiation exposure and cancer mortality in the Techa River Cohort. *Radiat. Res.* 164 (2005) 602-611
- Krewski, D., Lubin, J.H., Zielinski, J.M. et al.: Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies. *Epidemiol.* 16 (2005) 137-145

- Kusunoki, Y., Hayashi, T.: Long-lasting alterations of the immune system by ionizing radiation exposure: Implications for disease development among atomic bomb survivors. *Int. J. Radiat. Biol.* 84 (2008) 1-14
- Lazjuk GI, Nikolaev DL, Novikova IV (1997) Changes in registered congenital anomalies in the Republic of Belarus after the Chernobyl accident. *Stem Cells* 15, Suppl 2:255-260
- Lazjuk, G., Verger, P., Gagnière, B. et al.: The congenital anomalies registry in Belarus: a tool for assessing the public health impact of the Chernobyl accident. *Reprod. Toxicol.* 17 (2003) 659-666
- Lindborg, L., Beck, P., Bottolier-Depois, J.F. et al.: Determinations of H\*(10) and its dose components onboard aircraft. *Radiat. Prot. Dosimetry* 126 (2007) 577-580
- Little, M.P. und 26 Autoren: Systematic review and meta-analysis of circulatory disease from exposure to low-level ionizing radiation and estimates of potential population mortality risks. *Environ Health Perspect.* 120 (2012) 1503-1511
- Lyaginskaja, A.M., Tukov, A.R., Osipov, V.A. et al.: Congenital malformations at posterity of the liquidators of the consequences from Chernobyl accident. *Radiazionnaya Biologiya* 49 (2009) 694-702 (Russ.)
- Macht, S., Lawrence, P.: National Survey of congenital malformations resulting from exposure to Roentgen radiation. *Am. J. Roentgenol.* 73 (1955) 442-466
- Mämpel, W., Pflugbeil, S., Schmitz, R., Schmitz-Feuerhake, I.: Unterschätzte Gesundheitsgefahren durch Radioaktivität am Beispiel der Radarsoldaten. *Berichte des Otto Hug Strahleninstituts, Bericht Nr. 25* (2015) Gesellschaft für Strahlenschutz e.V. [www.strahlenschutz-gesellschaft.de](http://www.strahlenschutz-gesellschaft.de)
- Mares, V., Rühm, W.: Computerprogramm zur Dosisberechnung beim Fliegen am Beispiel von EPCARD. *Strahlenschutzpraxis Heft 2* (2014) 18-21
- Mathews, J.D., Forsyth, A.V., Brady, Z. et al.: Cancer risk in 680 000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *Brit. Med. J.* 346 (2013) f2360
- Matveenko, E.G., Borovykova, M.P., Davidov, G.A. (2005): Physical characteristics and primary morbidity in liquidator's children. *Konferenzproceed. "Chernobyl 20 Years After"*, zitiert nach Yablokow 2009, S. 148
- Miller, R.W.: Effects of prenatal exposure to ionizing radiation. *Health Physics* 59 (1990) 57-61
- Mognato, M., Bortoletto, E., Ferraro, P. et al.: Genetic damage induced by in vitro irradiation of human G0 lymphocytes with low-energy protons (28 keV/microm): HPRT mutations and chromosome aberrations. *Radiat. Res.* 160 (2003) 52-60
- Möhner, M., Stabenow, R.: Childhood malignancies around nuclear installations in the former GDR. *Medizinische Forschung* 6 (1993) 59-67
- Morris, M.S., Knorr, R.S.: Adult leukemia and proximity-based surrogates for exposure to Pilgrim plant's nuclear emissions. *Arch. Environ. Health* 51 (1996) 266-274
- Myles, P., Evans, S., Lophatananon, A., Dimitropoulou, P. et al.: Diagnostic radiation procedures and risk of prostate cancer. *Brit. J. Cancer* 98 (2008) 1852-1856
- Neumann, Werner: Bis zu 1000faches Strahlenrisiko bei der Freigabe von Atommüll aus dem Abriss von Atomkraftwerken. *Strahlentelex Nr. 662-663 v. 7.08.2014, 1-8*, [http://www.strahlentelex.de/Stx\\_14\\_662-663\\_S01-08.pdf](http://www.strahlentelex.de/Stx_14_662-663_S01-08.pdf)
- Neumann, Wolfgang: Stellungnahme zu Defiziten der Regelungen zu Freigaben radioaktiver Stoffe, i.A. des BUND, intac Hannover 2013  
[http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/pdfs/atomkraft/140716\\_bund\\_atomkraft\\_freimessung\\_studie.pdf](http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/pdfs/atomkraft/140716_bund_atomkraft_freimessung_studie.pdf)
- Nicholas, J.S., Lackland, D.T., Dosemeci, M. et al.: Mortality among US commercial pilots and navigators. *J. Occup. Environ. Med.* 40 (1998) 980-985
- Nomura T.: Parental exposure to X-rays and chemicals induces heritable tumours and anomalies in mice *Nature* 296 (1982), S. 575-7
- Nomura, T.: Transgenerational effects of radiation and chemicals in mice and humans. *J. Radiat. Res.* 47, Suppl. (2006) B83-B97
- Ozasa, K., Shimizu, Y., Suyama, A. et al.: Studies of the mortality of atomic bomb survivors, Report 14, 1950-2003: an overview of cancer and noncancer diseases. *Radiat Res.* 177 (2012) 229-43
- Parker, L., Pearce, M.S., Dickinson, H.O. et al.: Stillbirths among offspring of male radiation workers at Sellafield nuclear reprocessing plant. *Lancet* 354 (1999) 1407-1414
- Pearce, M.S., Salotti, J.A., Little, M.P. et al.: Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumors: a retrospective cohort study. *Lancet* 380 (2012) 499-505
- Pflugbeil, S., Paulitz, H., Claußen, A., Schmitz-Feuerhake, I.: Gesundheitliche Folgen von Tschernobyl. 20 Jahre nach der Reaktorkatastrophe. In IPPNW, Ges. f. Strahlenschutz e.V. Berlin, April 2006, 76 S.
- Pobel, D., Viel, J.-F.: Case-control study of leukaemia among young people near La Hague nuclear reactor reprocessing plant: the environmental hypothesis revisited. *Br. Med. J.* 314 (1997) 101-106
- Pohl-Rüling, J., Haas, O., Brogger, A. et al.: The effect on lymphocyte chromosomes of additional burden due to fallout in Salzburg (Austria) from the Chernobyl accident. *Mutat. Res.* 262 (1991) 209-217
- Preston, D.L., Kusumi, S., Tomonoga, M. et al.: Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III: Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987. *Radiat. Res.* 137 (1994), S68-S97
- Pukkala, E., Aspholm, R., Auvinen, A. et al.: Incidence of cancer among Nordic airline pilots over five decades: occupational cohort study. *Brit. Med. J.* 325 (2002) 1-5
- Rafnsson, V., Olafsdottir, E., Hrafnkelsson, J. et al.: Cosmic radiation increases the risk of nuclear cataract in airline pilots. *Arch. Ophthalmol.* 123, 2005, 1102-1105

- Richardson, D.B., Cardis, E., Daniels, R.D. et al.: Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). *BMJ* 351 (2015)
- Roesch, W.C. (Ed.): Atomic Bomb Radiation Dosimetry in Hiroshima and Nagasaki. Final Report, Vol.1, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima 1987
- Roman, E., Beral, V., Carpenter, L. et al.: Childhood leukaemia in the West Berkshire and Basingstoke and North Hampshire district health authorities in relation to nuclear establishments in the vicinity. *Brit. Med. J.* 294 (1987) 597-602
- Roy, M. A.: Reliability of dose coefficients calculated with the respiratory tract model of the ICRP. *Radiat. Prot. Dos.* 79 (1998) 237-240
- Scherb, H., Weigelt, E., Brüske-Hohlfeld, I.: European stillbirth proportions before and after the Chernobyl accident. *Int J Epidemiol* 28 (1999) 932-940
- Scherb, H., Weigelt, E.: Congenital malformation and stillbirth in Germany and Europe before and after the Chernobyl nuclear power plant accident. *Environ. Sci.&Pollut. Res.* 10, Special (1) (2003) 117-125
- Scherb, H., Weigelt, E.: Spaltgeburtenrate in Bayern vor und nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl. *Mund Kiefer Gesichtschir.* 8 (2004) 106-110
- Scherb, H., Voigt, K.: Trends in the human sex odds at birth in Europe and the Chernobyl Nuclear Power Plant accident. *Reprod Toxicol* 23 (2007) 593-599
- Scherb, H., Voigt, K.: The human sex odds at birth after the atmospheric atomic bomb tests, after Chernobyl, and in the vicinity of nuclear facilities. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 18 (2011) 697-707
- Scherb, H., Voigt, K., Kusmierz, R.: Ionizing radiation and the human gender proportion at birth – A concise review of the literature and complementary analyses of historical and recent data. *Early Hum. Dev.* 91 (2015) 841-850
- Scherb, H., Kusmierz, R., Voigt, K.: Human sex ratio at birth and residential proximity to nuclear facilities in France. *Reprod. Toxicol.* 60 (2016) 104-111
- Schmitz, R.: Der Einfluss der Strahlungswichtungsfaktoren für Neutronen und Protonen auf die Bestimmung der Strahlenexposition von Flugpersonal. *Strahlentelex* Nr. 724-725 v. 2.03.2017, im Druck
- Schmitz-Feuerhake: Ionisierende Strahlung und Hautkrebs. *Strahlentelex* Nr. 658-659 v. 5.06.2014, 1-7
- Schmitz-Feuerhake, I., Busby, C., Pflugbeil, S.: Genetic radiation risks – a neglected topic in the low dose debate. *Environ. Health Toxicol* 31 (2016) Article ID: e2016001, 13 p.
- Schumacher, O. (2001): Zuverlässigkeit der AVV hinsichtlich der Emissionsausbreitungs-Berechnungen und Dosisermittlung, Anhang C1 in s. Stevenson
- Sever, L.E., Gilbert, E.S., Hessel, N.A., McIntyre, J.M.: A case-control study of congenital malformations and occupational exposure to low-level ionizing radiation. *Am. J. Epidemiol.* 127 (1988) 226-242
- Shaknatreh, F.M.: Reproductive health of male radiographers. *Saudi Med. J.* 22 (2001) 150-152
- Shimizu, Y., Kodama, K., Nishi, N. et al.: Radiation exposure and circulatory disease risk: Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivor data, 1950-2003. *BMJ* (2010) 340:b5349
- Shore, R.E., Neriishi, K., Nakshima, E.: Epidemiological studies of cataract risk at low to moderate radiation doses: (not) seeing is believing. *Radiat. Res.* 174 (2010) 889-894
- Sperling, K. et al: Gemeinschaftsstudie zur saisonalen und regionalen Häufigkeit pränatal diagnostizierter Chromosomenanomalien für die Bundesrepublik Deutschland einschl. Berlins im Jahre 1986. *Ann. Univ. Sarah. Med. Suppl.* 7 (1987) 307-313
- Sperling, K., Pelz, J., Wegner, R.-D., Schulzke, I., Struck, E.: Frequency of trisomy 21 in Germany before and after the Chernobyl accident. *Biomed. Pharmacother.* 45 (1991) 255-262
- Sperling, K., Pelz, J., Wegner, R.-D., Dörries, A., Grüters, A., Mikkelsen, M.: Significant increase in trisomy 21 in Berlin nine months after the Chernobyl reactor accident: temporal correlation or causal relation? *Brit. Med. J.* 309 (1994a) 1299
- Sperling, K., Pelz, J., Wegner, R.-D., Dörries, A., Grüters, A., Mikkelsen, M.: Bewertung eines Trisomie 21 Clusters. *Med. Genetik* 6 (1994b) 378-385
- Sperling, K., Neitzel, H., Scherb, H.: Evidence for an increase in trisomy 21 (Down syndrome) in Europe after the Chernobyl reactor accident. *Genet. Epidemiol.* 36 (2012) 48-55
- Spix, C., Schmiedel, S., Kaatsch, P., Schulze-Rath, R., Blettner, M.: Case-control study on childhood cancer in the vicinity of nuclear power plants in Germany 1980-2003. *Eur. J. Cancer* 44 (2008) 275-284
- Spycher, B.D., Lupatsch, E.L., Zwahlen, M. et al.: Background Ionizing Radiation and the risk of childhood cancer: a census-based nationwide cohort study. *Environ Health Persp.* 123 (2015) 622-828
- SSK Strahlenschutzkommission: Strahleninduzierte Katarakte. Empfehlungen der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung. Bonn 14.5.2009, [www.ssk.de](http://www.ssk.de)
- SSK Strahlenschutzkommission: Krebsrisiko durch mehrjährige Expositionen mit Dosen im Bereich des Grenzwerts für die Berufslebensdosis nach § 56 StrlSchV. Empfehlung der SSK vom 20.04.07, Bundesanzeiger Nr. 183a vom 28.09.2007
- SSK Strahlenschutzkommission: Jahresbericht der Strahlenschutzkommission 2015. Bonn, Febr. 2016, [www.ssk.de](http://www.ssk.de) (a)
- SSK Strahlenschutzkommission: Dosis- und Dosisleistungs-Effektivitätsfaktor (DDREF) Empfehlung der SSK vom 13.02.2014, Bundesanzeiger am 03.05.2016 (b)
- Stephan, G., Oestreicher, U.: Chromosome investigation of individuals living in areas of southern Germany contaminated by fallout from the Chernobyl reactor accident. *Mutat. Res.* 319 (1993) 189-196

- Stevenson, A.F.G. (2001), Institut für Toxikologie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel: Strahlenbiologisches Gutachten zur Ermittlung des Standes wissenschaftlicher Erkenntnisse und der Verlässlichkeit der Strahlenschutzbestimmungen unter besonderer Berücksichtigung der Belastung durch Radioaktivität in der Umgebung von Kernkraftwerken und zur Frage der Strahleninduktion kindlicher Leukämien, durchgeführt im Auftrag des Ministeriums für Finanzen und Energie des Landes Schleswig-Holstein, Kiel.
- Straume, T.: High-energy gamma rays in Hiroshima and Nagasaki: implications for risk and  $w_R$ . *Health Physics* 69 (1995) 954-956
- Teufel, D., Franke, B., Steinhilber-Schwab, B. (Institut für Energie- und Umweltforschung IFEU, Heidelberg): Stellungnahme zum Fragenkatalog „Strahlenrisiko“ (Antworten und Fragen 3 bis 5 des Fragenkatalogs der Enquetekommission), Vorlage II/K/22, Deutscher Bundestag, Enquete-Kommission „Zukünftige Kernenergie-Politik“, Bonn, 6. Mai 1980
- Tokumaru, O., Haruki, K., Bacal, K. et al.: Incidence of cancer among female flight attendants a meta-analysis. *J. Travel Med.* 13 (2006) 127-132
- Tsyb, A.F., Souchkevitch, G.N., Lyasko, L.I. et al.: General characterization of health in the first-generation offspring born to liquidators of the Chernobyl NPP accident consequences. *Int. Journal of Radiation Medicine (Kiev)* 2004, 6(1-4) 116-121
- Turner, M.C., Krewski, D., Chen, Y. et al.: Radon and lung cancer in the American Cancer Society cohort. *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev.* 20 (2011) 438-448
- UNSCEAR United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly, United Nations, New York 1988
- UVP-Gesellschaft e.V., AG Menschliche Gesundheit (Herausg.): Leitlinien Schutzgut Menschliche Gesundheit. Kap.5.5.1. S. 111-122. Selbstverlag UVP-Ges., 1. Aufl. Juni 2014
- Vogel, Friedrich et al. (1969): Strahlengenetik der Säuger. Band 1. Fortschritte der allg. und klinischen Humangenetik. Herausgeber E. Becker et al., Georg Thieme Verlag Stuttgart
- Walsh, L.: Neutron relative biological effectiveness for solid cancer incidence in the Japanese A-bomb survivors : an analysis considering the degree of independent effects from  $\gamma$ -ray and neutron absorbed doses with hierarchical partitioning. *Radiat. Environ. Biophys.* 52 (2013) 29-36
- Wertelecki, W.: Malformations in a Chornobyl-impacted region. *Pediatrics* 125 (2010) 836-843
- Wertelecki, W., Yevtushok, L., Zymak-Zakutnia, N. et al.: Blastopathies and microcephaly in a Chornobyl impacted region of Ukraine. *Congenital Anomalies* 54 (2014) 125-149
- WHO, World Health Organisation: Radon and cancer. Fact Sheet No. 291, Geneva Sept. 2009
- WHO, World Health Organisation: Guidelines for drinking-water quality. 4<sup>th</sup> Edition, Geneva 2011
- WHO, World Health Organisation: Health risk assessment for the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami based on a preliminary dose estimation. Febr. 28, 2013, p.32 [www.who.int/ionizing\\_radiation/pub\\_meet/fukushima\\_report/en/index.html](http://www.who.int/ionizing_radiation/pub_meet/fukushima_report/en/index.html)
- Wiesel, A., Spix, C., Mergenthaler, A., Queißer-Luft, A.: Maternal occupational exposure to ionizing radiation and birth defects. *Radiat. Environ. Biophys.* 50 (2011) 325-328
- Worgul, B.V., Kundiev, Y., Likhtarev, I. et al.: Use of subjective and nonsubjective methodologies to evaluate lens radiation damage in exposed populations - an overview. *Radiat. Environ. Biophys.* 35 (1996)a 137-144
- Worgul, B.V., Medvedovsky, C., Huang, Y. et al.: Quantitative assessment of the cataractogenic potential of very low doses of neutrons. *Radiat. Res.* 145 (1996)b 343-349
- Yablokov, A.V.: The Chernobyl catastrophe – 20 years later. In C.C. Busby, A.V. Yablokov (Eds.), *European Committee on Radiation Risk ECRR, Chernobyl: 20 Years on. Green Audit, 2006, www.euradcom.org*
- Yablokov, A.V., Nesterenko, V.B., Nesterenko, A.V.: Chernobyl. Consequences of the catastrophe for people and environment. *Ann. New York Acad. Sci.* 1181 (2009) 327 Seiten
- Yamada, M., Wong, F.L., Fujiwara, S., Akahoshi, M., Susuki, G.: Noncancer disease incidence in atomic bomb survivors, 1958-1998. *Radiat. Res.* 161 (2004) 622-632
- Yamane G.K.: Cancer incidence in the U.S. Air Force: 1989-2002. *Aviation, Space, Environ. Med.* 77 (2006) 789-794
- Yamasaki, J.N., Schull, W.J.: Perinatal loss and neurological abnormalities among children of the Atomic bomb. Nagasaki and Hiroshima revisited, 1949 to 1989. *JAMA* 264 (1990) 605-609
- Yang, T.C.-H., Craise, L.M., Mei, M.-T., Tobias, C.A.: Dose protraction studies with low- and high-LET radiations on neoplastic cell transformation in vitro. *Adv. Space Res.* 6 (1986) 137-147
- Zatsepin, I., Verger, P., Robert-Gnansia, E. et al.: Down syndrome time-clustering in January 1987 in Belarus: link with the Chernobyl accident? *Reprod. Toxicol.* 24 (2007) 289-295

Informationen und Rückfragen bei:  
Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND)  
Thorben Becker  
Leiter Atompolitik  
Am Köllnischen Park 1  
10179 Berlin  
030-27586-421  
thorben.becker@bund.net