

H. Kuni<sup>1</sup>

## **Grenzwerte - was sind sie wert? <sup>2</sup>**

### **Teil II Einwirkung niedriger Dosen**

#### **Mikrodosimetrie**

Zunächst ein Blick in die Mikrodosimetrie:

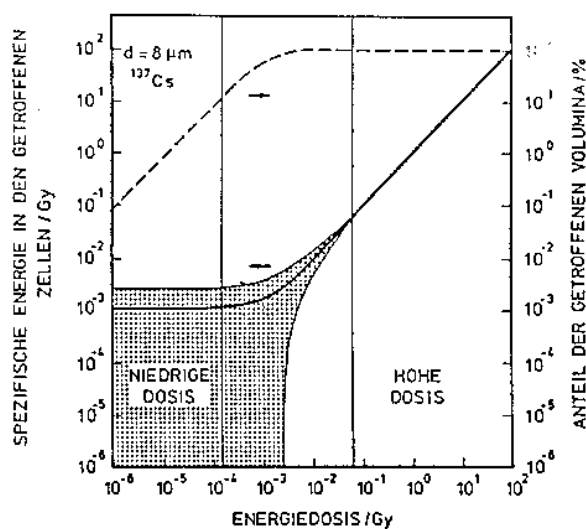
Als Dosis wird hier die Energiedosis in der Einheit Joule pro Kilogramm (J/kg) betrachtet. Um diese Dosis bei der Einwirkung ionisierender Strahlen von der Zufuhr beispielsweise von Wärme, z.B. Erwärmen von Kaffeewasser, abzugrenzen, wird hier die Einheit mit dem Namen Gray (Gy) belegt. Dies ist auch sinnvoll, da eine Dosis von 1 Gy, die Wasser nur um den Bruchteil eines Tausendstel Grades erwärmt, als Ganzkörperdosis eines Menschen schon deterministische Effekte auslöst.

Bei einer Verminderung der makroskopischen Dosis (x-Achse von Abb. 1) geht zunächst proportional auch die Dosis im Zellkern zurück (y-Achse von Abb. 1). Bei niedrigen Dosen in der Größenordnung von Milligray und weniger macht sich bemerkbar, daß die Energie nicht in einem gleichmäßigen Strom, sondern in Quanten (Portionen) übertragen wird. Deshalb spleißt sich in Abb. 1 die Kurve auf: Entweder ein Zellkern wird getroffen und erhält eine spezifische Dosis oder er bleibt verschont. Im Bereich des Zellkernes und seiner Strukturen (Erbmoleküle) gibt es also keine niedrigen Dosen. Die spezifische Dosis hängt von der Strahlenart ab.

---

<sup>1</sup> Universitätsprofessor, Klinische Nuklearmedizin, Philipps-Universität Marburg, D 35033 Marburg, <http://staff-www.uni-marburg.de/~kuni/h/>, [h.kuni@mail.uni-marburg.de](mailto:h.kuni@mail.uni-marburg.de)

<sup>2</sup> Vortrag im Interdisziplinären Seminar des WS 98/99 Bedrohte Umwelt: Indikatoren und Bewertung am 26.10.98



links: Zellkerndosis nach  
Feinendegen et  
al. (1985)

Abhängigkeit der Strahlen-  
belastung im Zellkern  
(fett) und des Anteils ge-  
troffener Volumina (ge-  
strichelt) von der Strah-  
lendosis. Schraffur: im  
Einzelfall mögliche Dosen.  
Angenommen wurde für den  
quantitativen Maßstab ein  
Einwirken von Cs-137-Gamma-  
strahlung mit einer middle-  
ren Ionisierungsdichte von  
0,35 keV/μm auf ein kriti-  
sches Volumen mit 8 μm  
Durchmesser des Zellkerns  
bei 1 Milliarde Zellen pro  
Gramm Gewebe.

Abb. 1: Abhängigkeit der Dosis im Zellkern (y-Achse) von der makroskopischen Dosis (x-Achse)  
[aus Kuni 1987 nach Feinendegen et al. 1985]

## Grenzwert für externe Strahlenbelastung veraltet

Als Grenzwert für eine externe Strahlenbelastung der Bevölkerung war 1977 durch die ICRP 1 mSv/a empfohlen worden, dabei aber für einen kleinen Teil der Bevölkerung vorübergehend auch eine Überschreitung bis 5 mSv/a für tolerierbar angesehen worden [ICRP 26 1977]. Die Empfehlungen von 1977 waren 1980 vom Ministerrat der EU in eine Richtlinie übernommen worden, sind aber erst 1989 in die deutsche Strahlenschutzverordnung eingeflossen. Da hier maximal 1,5 mSv/a zugelassen worden, erschien dies ein konservatives Vorgehen zu sein.

Die Empfehlungen der ICRP wirkten sich auch auf die Empfehlung der IAEA (Internationale Atomenergiebehörde, Wien) für Gefahrguttransporte aus. Dem Grenzwert für Gefahrguttransporte (100 μSv/h in zwei Meter Abstand) lag ein Szenario zugrunde, nach dem sich in einer Entfernung von zwei Meter nur berufstätige Erwachsene regelmäßig mehr als zehn Stunden pro Jahr aufhalten und auch dieser Aufenthalt auf maximal 50 Stunden pro Jahr beschränkt bleibt.

Unter dem Eindruck der neueren Erkenntnisse über die Folgen der Atombomben hat die ICRP bereits 1985 ihre Empfehlung revidiert: Die Jahresdosis der Bevölkerung sollte bei einer Dauer der Strahlenbelastung über mehr als ein Jahr 1 mSv nicht überschreiten [ICRP 45 1985]. 1991 wurde

diese Empfehlung einer grundsätzlichen Limitierung der Jahresdosis für die Bevölkerung auf 1 mSv bekräftigt, es sei denn, es handelt sich um beruflich Exponierte [ICRP 60 1991]. Die Konsequenz daraus müßte u.a. eine Absenkung des Grenzwertes für Gefahrguttransporte in zwei Meter Entfernung von 100 auf 20  $\mu\text{Sv/h}$  sein. Nach der neuen Empfehlung der IAEA soll offensichtlich diese Konsequenz dadurch umgangen werden, daß alle Personen, die einer Jahresdosis von mehr als 1 mSv ausgesetzt sein können, als beruflich Exponierte eingestuft werden. Dabei bleibt offen, wie der Personenkreis, den das angeht, von seiner Strahlenbelastung erfährt.

Die so bekräftigte Empfehlung ist 1986 vom Ministerrat der EU in eine Richtlinie adoptiert worden, ist aber noch nicht in eine Novelle der Strahlenschutzverordnung eingeflossen.

### **Welches ist die Referenzstrahlung**

Die Probleme reichen allerdings noch wesentlich weiter. Eine Strahlenbelastung kann nämlich nur dann zutreffend mit einem Grenzwert verglichen werden, wenn der Berechnung der Strahlenbelastung und des Grenzwertes übereinstimmende Bedingungen für die biologische Wirksamkeit zugrunde liegen. Dies ist aber hier nicht der Fall. Zunächst soll besprochen werden, welches die Referenzstrahlung für die Definition der Äquivalentdosis ist.

Mit dem Konzept der Äquivalentdosis soll im Strahlenschutz der unterschiedlichen biologischen Wirksamkeit Rechnung getragen werden, die ionisierende Strahlen bei gleicher Energiedosis zeigen. Dazu werden im Strahlenschutzrecht normativ (dimensionslose) Faktoren vorgegeben, mit denen die physikalische Energiedosis zu multiplizieren ist, um die Äquivalentdosis zu erhalten. Die Schutzwerte im Strahlenschutz sind in Einheiten der Äquivalentdosis angegeben. Die Äquivalentdosis hat die gleiche Einheit wie die Energiedosis (J/kg), wird aber zum Unterschied mit Sievert (Sv) benannt. Der Faktor heißt in der Strahlenschutzverordnung (noch) Qualitätsfaktor (Q), in der Empfehlung der ICRP wird er Strahlungswichtungsfaktor (weighting factor radiation)  $w_R$  genannt.

Als die internationale Strahlenschutzkommission ICRP die Werte für Q empfohlen hatte, galt als Referenzstrahlung, wie in der Strahlenbiologie üblich, eine 250 kVp-Röntgenstrahlung. Dies bringt auch die frühere Bezeichnung der Äquivalentdosis, die in der Bundesrepublik Deutschland bis zum 31.12.1975 gegolten hatte, zum Ausdruck: rem, d.h. roentgen equivalent man.

Ursprünglich war man der Ansicht, daß sich die RBW der verschiedenen lockerionisierenden Strahlen nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Für alle diese Strahlenarten war deshalb  $Q = 1$  empfohlen worden. Dies findet sich noch heute in der Strahlenschutzverordnung.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse haben sich aber wesentlich fortentwickelt. Heute gilt als erwiesen, daß, abhängig von der Strahlenenergie erhebliche Unterschiede bestehen. Wie noch

gezeigt wird, hat das auch erhebliche Konsequenzen für den Strahlenschutz. Dennoch hat die ICRP in ihrer jüngsten Empfehlung 1991 an einem einheitlichen Wichtungsfaktor von Eins festgehalten, da „ein wesentlicher Grad an Vereinfachung“ erforderlich sei (§ 85 in ICRP 60 [1991]). Nur folgerichtig ist es bei dieser Denkweise, daß es scheinbar gleichgültig ist, ob eine Röntgenstrahlung oder Gammastrahlung als Referenzstrahlung gewählt wird.

### **Grenzwerte vom Schicksal der Atombombenopfer abgeleitet**

Viele Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung gehen auf Schadenserwartungen zurück, die vom Schicksal der Atombombenopfer abgeleitet wurden. Die Häufigkeit der zusätzlichen Krebstodesfälle wird zur Strahlendosis in Beziehung gesetzt, denen die Opfer jeweils ausgesetzt waren. Die Strahlung bestand in Nagasaki fast ausschließlich, in Hiroshima weit überwiegend aus einer sehr energiereichen Gammastrahlung. Bis 1995 war angenommen worden, daß diese Energie etwa 1 MeV betragen hat, also der Strahlenenergie von  $^{60}\text{Co}$  entsprach.

Abb. 2 zeigt, daß bei einer solchen Strahlenenergie die biologische Wirksamkeit nur etwa halb so groß wie die der Referenzstrahlung ist. Grenzwerte, die von einer solchen Strahlung abgeleitet worden sind, können unmittelbar auch nur auf eine Exposition durch eine Strahlung vergleichbarer Energie angewendet werden. Tatsächlich wurde aber die Strahlendosis der Atombombenopfer mit einem  $Q = 1$  in Äquivalentdosis umgerechnet und die so ermittelten Grenzwerte für alle Strahlenenergien für anwendbar erklärt, also auch für Röntgenstrahlung und alle Strahlenarten, für die Röntgenstrahlung als Referenz dient, wie z.B. Alphastrahlen und Neutronen.

Richtig wäre es aber gewesen, die Strahlendosis mit einem  $Q$  von 0,5 in eine Äquivalentdosis umzurechnen. Eine in einer Dosisgruppe beobachtete Anzahl zusätzlicher Krebstodesfälle wäre dann einer nur halb so hohen Äquivalentdosis zuzuordnen gewesen. Pro Einheit Äquivalentdosis hätte sich dann die doppelte Anzahl von Schadensfällen errechnet. Die Konsequenz wäre eine Senkung der Grenzwerte auf die Hälfte gewesen. Diese Konsequenz hat die ICRP durch den „notwendigen Grad der Vereinfachung“ vermieden.

Inzwischen hat sich diese Situation noch deutlich verschärft. Im Dezember 1995 veröffentlichte Straume, Mitarbeiter des Lawrence Livermore National Laboratory, eines bedeutenden Forschungszentrums für Atomwaffen in den USA, eine Revision über die Energie der Gammastrahlung, die bei den Atombombenexplosionen freigesetzt worden ist [Straume 1995]. Danach muß eine mittlere Energie in einem Bereich von 1,7 bis 4,7 MeV angenommen werden. Die RBW dieser Strahlung beträgt nach Straume im Mittel nur etwa 0,25. Die Grenzwerte müßten also um das Vierfache gesenkt werden.

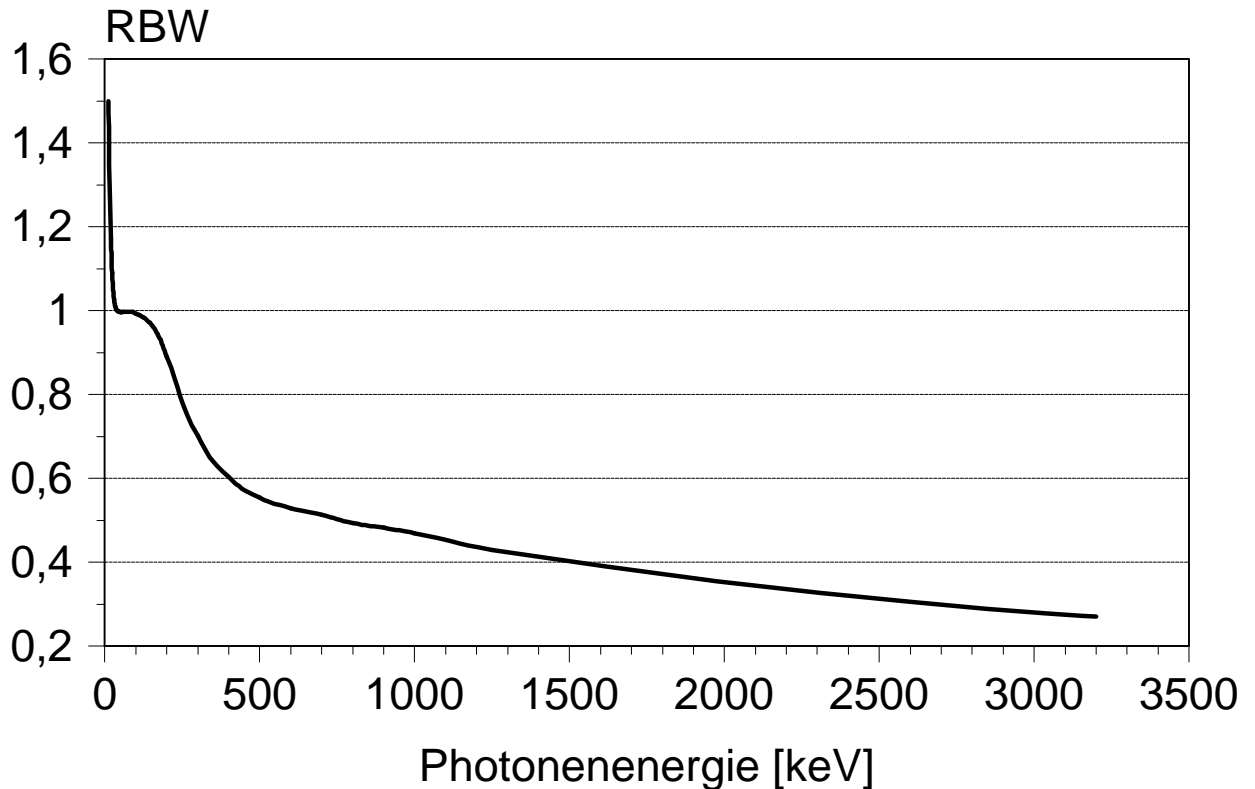


Abb. 2: Abhängigkeit der relativen biologischen Wirksamkeit von Photonen (z.B. Röntgenstrahlen, Gammastrahlen) für die Auslösung stochastischer Effekte (wie z.B. Krebsentstehung) von der Strahlenenergie in keV. Die Kurve nach ICRU 40 [1986] wurde nach Daten über die lineare Komponente der Produktion dizenrischer Chromosomenaberrationen extrapoliert [Straume 1995]. Die Werte wurden auf eine Röntgenstrahlung von 250 kVp standardisiert.

### **Ausgleich zwischen Stand der Wissenschaft und der Strahlenschutzverordnung**

Wie kann auf diese Erkenntnis reagiert werden? Natürlich ist die adäquate Reaktion eine Senkung der Grenzwerte, wie das der Autor auch mehrfach gefordert hat (zuletzt in [Kuni 1998]). Der Autor hat aber weder die Möglichkeit, den Grenzwert zu ändern noch die Definition der Äquivalentdosis und die Wichtungsfaktoren zu ihrer Berechnung. Er empfiehlt deshalb denen, die eine strahlenbiologisch zutreffendere Bewertung einer Äquivalentdosis bei einem Vergleich mit den Grenzwerten vornehmen wollen, einen Korrekturfaktor einzusetzen. Dieses Instrument legt die Strahlenschutzverordnung nahe.

Die vollständige Formel zur Berechnung der Äquivalentdosis H sieht nämlich außer der Multiplikation der physikalischen Energiedosis D mit dem Qualitätsfaktor Q die weitere Multiplikation mit einem „modifizierenden Faktor“ N vor.

$$H = D * Q * N$$

H	Äquivalentdosis
D	physikalische Energiedosis
Q	Qualitätsfaktor
N	modifizierender Faktor

Für den modifizierenden Faktor N war allerdings bislang niemals ein von Eins abweichender Wert empfohlen worden. Einer ähnlichen Anregung von Brenner und Hall [Brenner, Hall 1990] folgend wird deshalb vorgeschlagen, diesen Faktor zu verwenden, um Unterschiede zwischen dem aktuellen Stand der Wissenschaft und den amtlichen Vorschriften zur Berechnung der Äquivalentdosis auszugleichen. Die so ermittelte Dosis wird vom Autor „biologisch äquivalente Dosis“ genannt.

Für den Ausgleich des Wirkungsunterschiedes der Atombombenstrahlung und einer Gammastrahlung ist etwa  $N = 2$  anzusetzen. Dem Wirkungsunterschied zwischen der Atombombenstrahlung und Röntgenstrahlung, auch als Referenzstrahlung, z.B. für Neutronen, muß mit einem  $N = 4$  Rechnung getragen werden.

Mit diesen Ausgleichsmaßnahmen sind aber die notwendigen Korrekturen noch keineswegs erschöpft.

## **Wirkungsverlust im Niedrigdosisbereich - eine Hypothese im Strahlenschutz**

Die Empfehlungen der internationalen Strahlenschutzkommission ICRP leiten zwar die Grenzwerte von den Beobachtungen an den Atombombenopfern ab, übertragen sie aber nicht direkt auf die Verhältnisse des Strahlenschutzes im Bereich niedriger Dosen und Dosisleistungen. Vielmehr vermutet die ICRP eine geringere Wirkung der Strahlung unter diesen Verhältnissen. Zum Verständnis der Auseinandersetzung sollen zunächst die strahlenbiologischen Hintergründe erläutert werden.

Die ICRP geht davon aus, daß die Anzahl zusätzlicher Krebstodesfälle am zuverlässigsten im mittleren Dosisbereich der Atombombenopfer bestimmt werden kann, das entspricht etwa einer Dosis von 1,5 Sv. Für den praktischen Strahlenschutz ist der Bereich unterhalb dieser Dosis relevant, in der Regel sogar unter 0,2 Sv. Zur Feststellung der zusätzlichen relativen Gefährdung in diesem Bereich stehen sich drei Anschauungen gegenüber:

- Eine lineare Korrelation zwischen der Dosis und dem Effekt. Mit niedrigerer Dosis wird eine proportionale Verminderung der Wirkung angenommen, also eine konstante relative Übersterblichkeit an Krebs pro Dosis über den gesamten Dosisbereich.
- Eine linear-quadratische Korrelation zwischen der Dosis und dem Effekt. Mit niedrigerer Dosis wird eine überproportionale Verminderung der Wirkung angenommen, also eine niedrigere relative Übersterblichkeit pro Dosis im unteren Dosisbereich. Eine lineare Korrelation hätte in diesem Fall eine Überbewertung der Strahlengefahr im Bereich niedriger Dosen zur Folge.
- Ein überproportionaler Anstieg des Effektes im Bereich niedriger Dosen und eine Abflachung der Dosiswirkungskurve im Bereich hoher Dosen. Eine lineare Korrelation würde in diesem Fall zu einer Unterschätzung der Strahlengefahr führen.

Auf die strahlenbiologische Modelle, mit denen diese drei Vorstellungen begründet werden, kann hier nicht eingegangen werden. Wesentlicher ist es, die Beobachtungen in der Praxis darauf zu überprüfen, durch welche Kurvenform sie am besten beschrieben werden können.

Der Verlauf der linear-quadratischen Korrelation hat eine nach oben gekrümmte Form (s. Abb. 3). Er beginnt mit einem geraden Verlauf, auf den sich eine quadratische Kurve addiert. Wenn er bei einer Dosis von 1,5 Sv<sup>3</sup> zu demselben Effekt führt wie der Verlauf einer linearen Korrelation, bedeutet das im Bereich niedriger Dosen um 0,2 Sv deutlich niedrigere Werte der Übersterblichkeit pro Dosis. Den flacheren linearen Anfang der linear-quadratischen Korrelation hat die ICRP sogar in den Bereich hoher Dosen extrapoliert und ihn für anwendbar erklärt, wenn die Dosisleistung, also Dosis pro Zeit, niedrig ist. Die Konsequenz dieser Hypothese ist ein doppelt so hoher Grenzwert, als er bei Gültigkeit einer linearen Korrelation zutreffend gewesen wäre.

An dieser Interpretation der Dosiswirkungskurve hat die ICRP in ihrer letzten Empfehlung Nr. 60 von 1991 festgehalten. Den Faktor, um den die Wirksamkeit einer lockerionisierenden Strahlung im Bereich einer niedrigen Dosis (unter 200 mSv) oder einer niedrigen Dosisleistung (unter 100 mSv/h) geringer sein soll und um den deshalb der Grenzwert angehoben worden ist, hat die ICRP mit DDREF (**D**ose and **D**oserate **E**ffectiveness **F**actor) bezeichnet.

---

<sup>3</sup> Diese Dosis errechnet sich für die Kohorte der Atombombenopfer, wenn die Auswertung, wie international üblich, auf Dosen bis vier Gray beschränkt wird. Für die höheren Dosen wird ein zu großer Fehler bei der Rekonstruktion der Dosis angenommen.

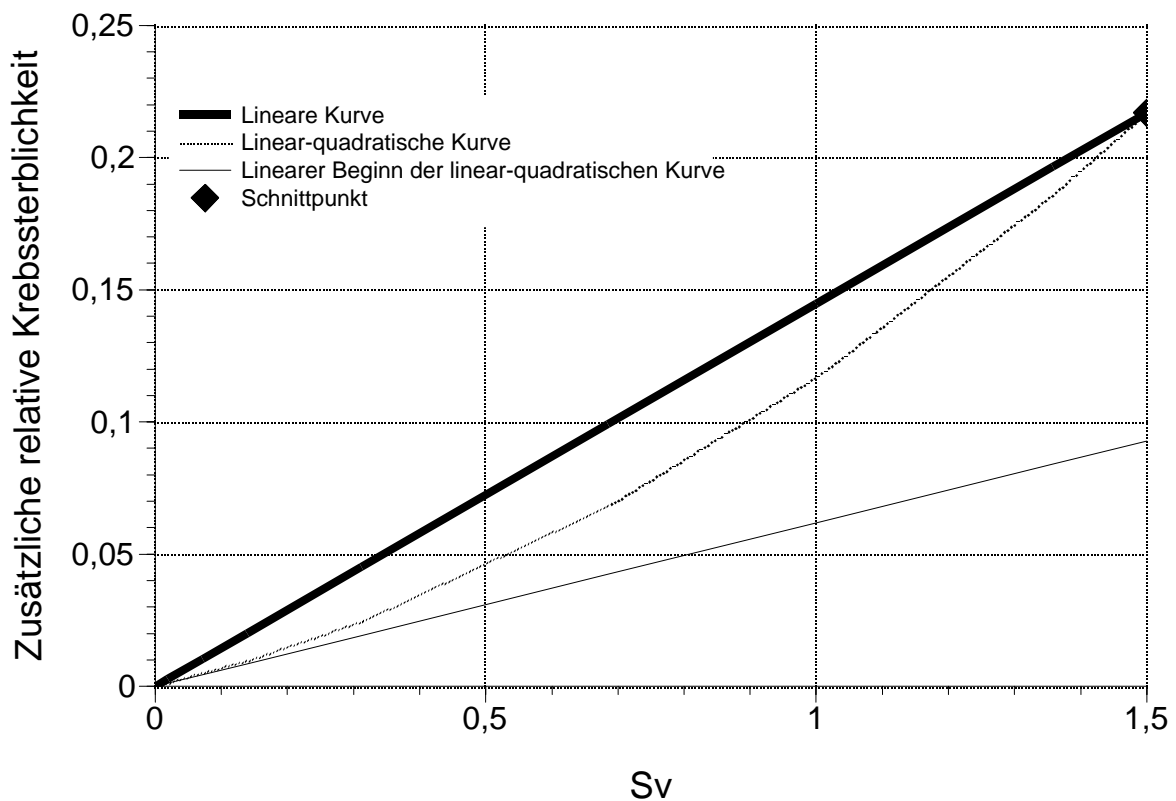


Abb. 3: Dosiswirkungskurven nach verschiedenen strahlenbiologischen Modellen.

Die quantitativen Annahmen entsprechen der Empfehlung der internationalen Strahlenschutzkommission von 1977 [ICRP 26 1977]

Trifft die Hypothese einer linear-quadratischen Korrelation aber nicht zu oder ist die quadratische Komponente viel unbedeutender als angenommen, müßten die Grenzwerte erniedrigt oder sogar halbiert werden - oder - um in der hier gewählten Systematik zu bleiben, die Dosis zum Ausgleich mit einem Faktor Zwei multipliziert werden, bevor sie mit den unkorrigierten Grenzwerten verglichen wird.

## Die Realität der Atombombenopfer

Wohl aus gutem Grund findet sich auch in den Empfehlungen der ICRP keine Abbildung, die die Hypothese eines DDREF den realen Beobachtungen in Hiroshima und Nagasaki gegenüberstellt. Schon das BEIR V-Komitee hat für die soliden Tumore, die für etwa 90% der zusätzlichen Sterblichkeit verantwortlich sind, keine Krümmung der Dosiswirkungskurve erkennen können, die einen DDREF von Zwei rechtfertigen würde [BEIR V 1990].

Die Wissenschaftler der RERF, des Institutes in Hiroshima zur Erforschung der Folgen der Atombombenabwürfe, heben hervor, daß die Dosiswirkungskurve für solide Tumore so geringfügig

von einer linearen Korrelation abweicht, daß dies keinen DDREF von Zwei rechtfertigt. Dies soll ein Blick auf Abb. 4 verdeutlichen.

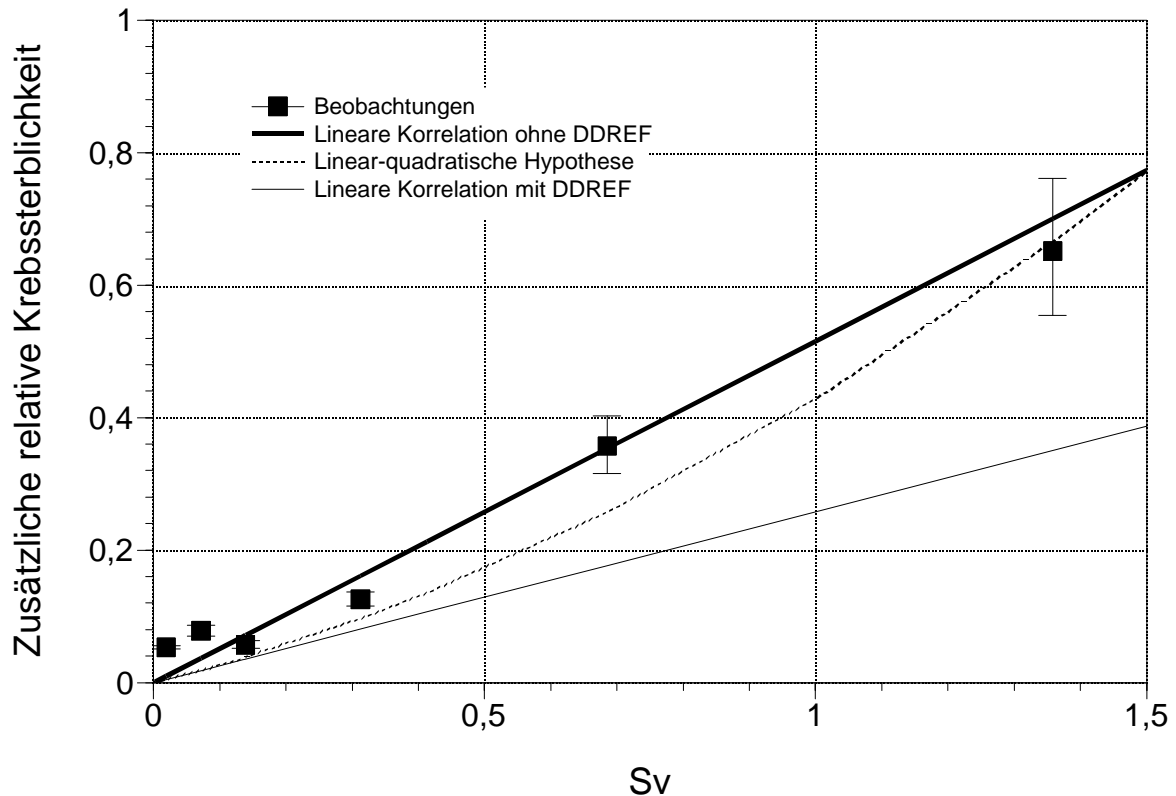


Abb. 4: Zusätzliche relative Übersterblichkeit an soliden Tumoren in Abhängigkeit von der Dosis (Dosis des Dickdarms als repräsentative Dosis für alle Organe). Die durch ICRP 60 angenommene lineare Korrelation ohne DDREF, die von ihr hypothetisch angesetzte linear-quadratische Korrelation und die daraus abgeleitete lineare Korrelation mit einem DDREF von Zwei sind den Beobachtungen gegenübergestellt. Die Breite der Fehlerbalken zeigt den 95%-Vertrauensbereich (Beobachtungen nach [Shimizu et al. 1988]). Dem Vergleich zwischen der zusätzlichen absoluten und relativen Krebssterblichkeit liegt eine mittlere Krebsmortalität von 19% zugrunde.

Dennoch wird von Verfechtern der Hypothesen der ICRP damit argumentiert, bei Dosen unter 0,2 Sv liege kein signifikanter Dosisseffekt vor und deshalb könnten die entsprechenden Beobachtungen nicht zur Entscheidung herangezogen werden, welche der Hypothesen richtig sei. Dabei wird übersehen, daß auch in den beiden niedrigsten Dosisklassen die relative Übersterblichkeit an soliden Tumoren signifikant erhöht ist und darüber hinaus auch signifikant über der linearen Korrelation liegt. Köhnlein und Nußbaum haben frühzeitig auf diesen Sachverhalt aufmerksam gemacht, der inzwischen auch von den Forschern des RERF bestätigt worden ist [Pierce et al. 1996]. Sie leiten aus dieser Tatsache die Hypothese ab, daß die Strahlenwirkung im Bereich niedriger Dosen auch dann noch deutlich

unterschätzt wird, wenn eine lineare Korrelation ohne DDREF verwendet wird [Köhnlein, Nußbaum 1990, 1991, Nußbaum 1998].

Die Entscheidung zwischen der linearen und der linear-quadratischen Hypothese ist auch keineswegs, wie behauptet wird, nur auf die Beobachtungen im Bereich niedriger Dosen angewiesen. Auch die Beobachtungen im Bereich hoher Dosen tragen dazu bei. Denn bei Dosen, die den Schnittpunkt bei 1,5 Sv übersteigen, muß die linear-quadratische Kurve weiterhin wesentlich steiler ansteigen als die lineare. Abb. 5 zeigt, daß im Bereich hoher Dosen eine Fortsetzung der hypothetischen linear-quadratischen Kurve nicht festzustellen ist. Wenn auch die Abweichungen vom linearen Verlauf nach unten noch nicht den 95%-Vertrauensbereich überschreiten, deutet sich eher bereits der Trend an, daß sich die Kurve im Bereich sehr hoher Dosen abflacht. Diese Beobachtung wird teils einer wachsenden Ungenauigkeit der Dosen, teils einem zunehmenden konkurrierenden Zellkilling-Effekt zugeschrieben.

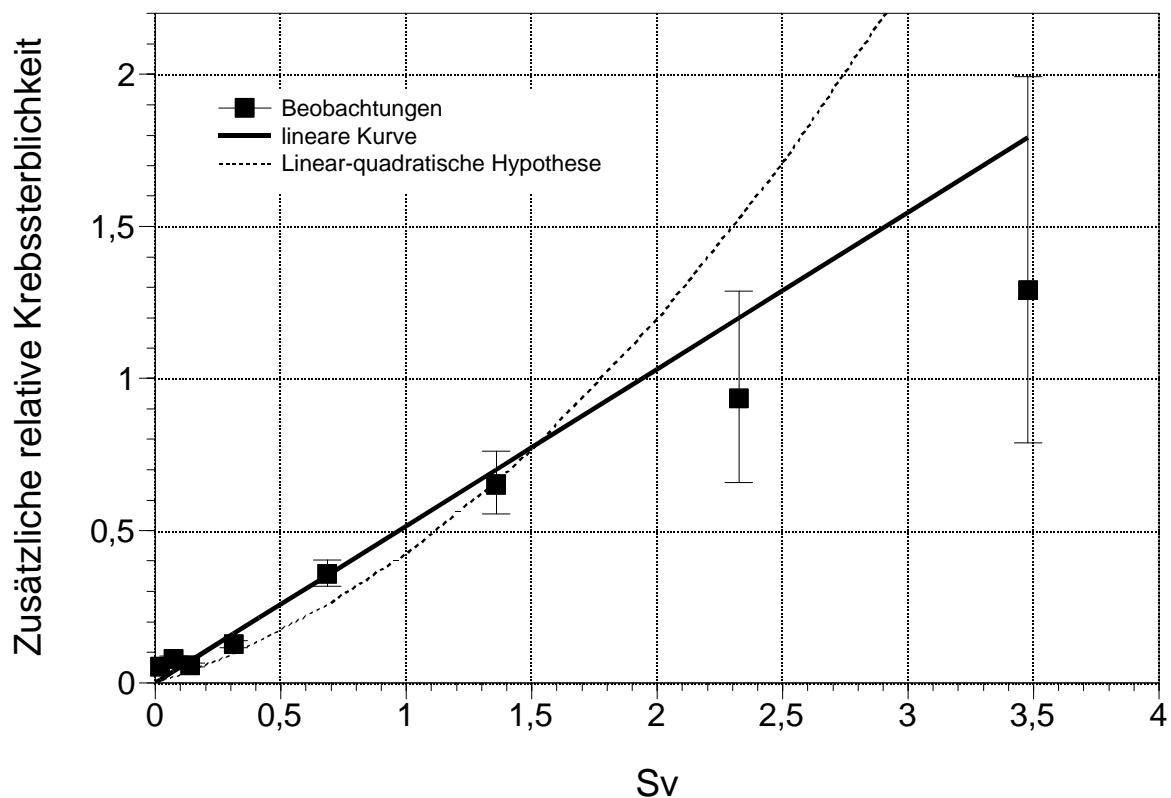


Abb. 5: Vergleich der linearen Korrelation und der linear-quadratischen Hypothese mit den Beobachtungen bis 4 Sv (Daten nach [Shimizu et al. 1988]).

Noch wesentlich ist jedoch, daß inzwischen die Statistiken über die Inzidenz, also Erkrankungen, an soliden Tumoren vorliegen [Thompson et al. 1992/1994]. Dabei zeigte sich, daß besonders bei Tumoren mit guter Heilbarkeit, wie z.B. in ausgeprägtem Maße der Hautkrebs, die

Sterblichkeitsstatistiken die Strahlengefährdung nicht nur absolut, sondern auch in der relativen Gefährdung deutlich unterschätzen (s. Abb. 6) [Ron et al. 1994]. Durch die verbesserte Statistik sind nun auch die Zahlen im Bereich niedriger Dosen aussagekräftiger.

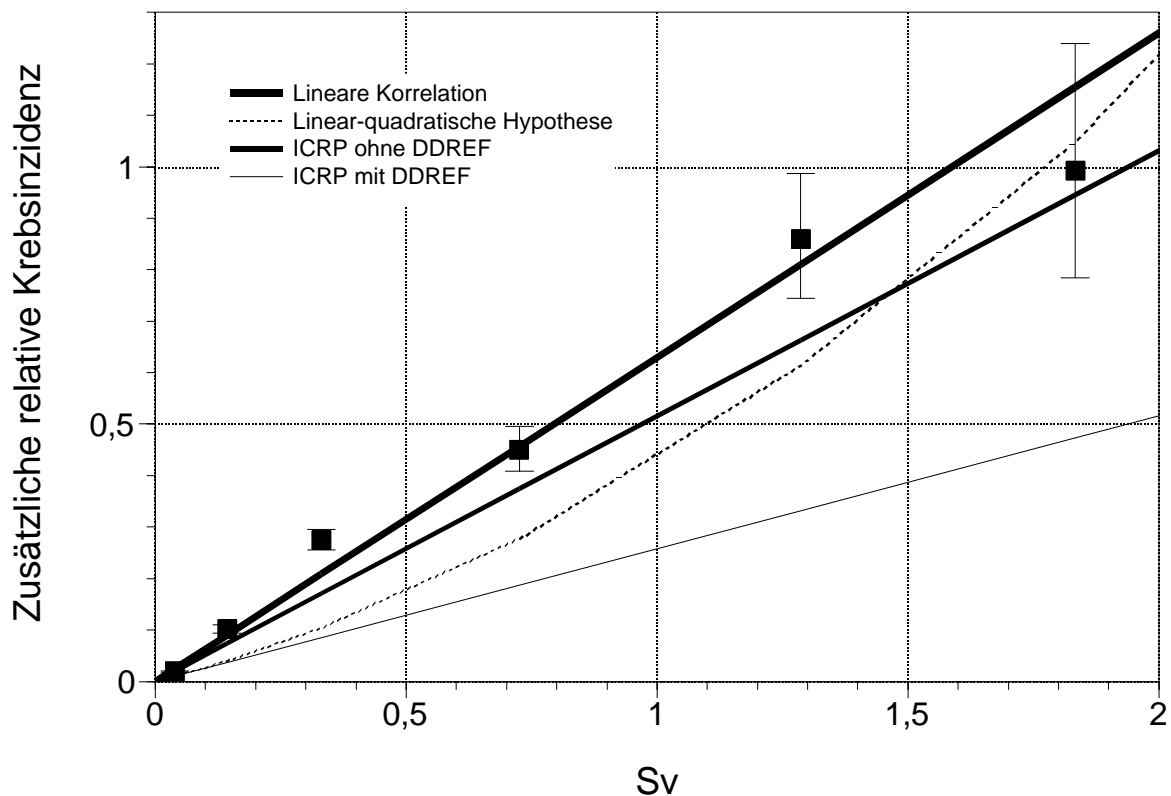


Abb. 6: Zusätzliche relative Häufigkeit an Erkrankungen mit soliden Tumoren in Abhängigkeit von der Dosis (Dosis des Dickdarms als repräsentative Dosis für alle Organe). Die durch ICRP 60 angenommene lineare Korrelation ohne DDREF, die von ihr hypothetisch angesetzte linear-quadratische Korrelation und die daraus abgeleitete lineare Korrelation mit einem DDREF von Zwei sind den Beobachtungen gegenübergestellt. Die Breite der Fehlerbalken zeigt den 95%-Vertrauensbereich (Beobachtungen nach [Thompson et al. 1992/1994]).

Da der Anteil der Leukämien, für die möglicherweise eine lineare Dosiswirkungskurve nicht zutrifft, es handelt sich dabei um die akuten myeloischen Leukämien, nur wenige Prozent der gesamten zusätzlichen strahlenbedingten Krebserkrankungen ausmacht, ist ihr Einfluß auf die Form der Dosiswirkungskurve für alle Erkrankungen insgesamt vernachlässigbar geworden.

Es kann nun keinen Zweifel mehr daran geben, daß die linear-quadratische Hypothese verworfen werden muß. Der DDREF hat seine Berechtigung endgültig verloren. Seine fehlerhafte Berücksichtigung bei der Festsetzung der Grenzwerte muß durch einen Faktor Zwei ausgeglichen werden. Da nicht nur der Tod, sondern auch bereits die Erkrankung an Krebs das Grundrecht auf körperliche Unversehrtheit beeinträchtigt, muß das Verhältnis Schadenserwartung aus der

Inzidenzstatistik im Vergleich zum Wert aus der Mortalitätsstatistik mit einem Faktor 1,4 berücksichtigt werden.

## Verbesserung der konventionellen Arbeitsbedingungen

Nicht nur die Grenzwerte für beruflich Strahlenexponierte, sondern auch für die Bevölkerung wurden von der ICRP durch einen Vergleich mit den gesundheitlichen Beeinträchtigungen im konventionellen Arbeitsleben gerechtfertigt. Für Berufstätige ist ein solcher Vergleich unmittelbar einleuchtend. Für die Bevölkerung wurde unterstellt, daß nur ein Bruchteil der Gefährdung Berufstätiger akzeptiert wird.

Nun ist die gesundheitliche Gefährdung im Berufsleben nicht konstant. In praktisch allen Industrienationen ist ein Rückgang der Arbeitsunfälle mit einem langfristigen Trend von etwa 3% pro Jahr festzustellen. In der Bundesrepublik Deutschland fiel die Häufigkeit tödlicher Arbeitsunfälle in drei Jahrzehnten auf ungefähr ein Viertel (s. Abb. 7).

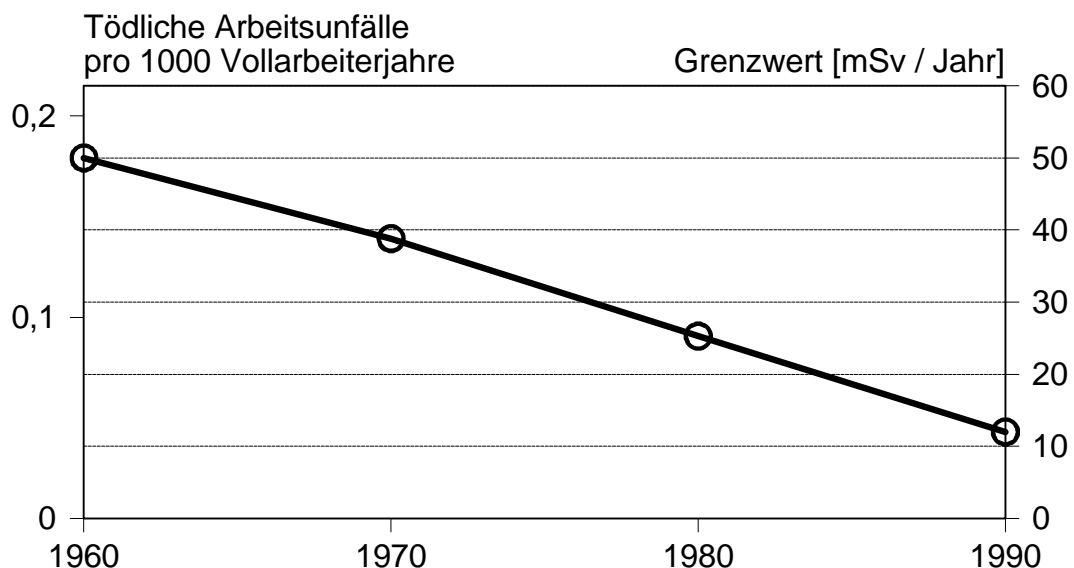


Abb. 7: Notwendige Senkung des Jahresgrenzwertes für beruflich Strahlenexponierte, um der Verbesserung der konventionellen Arbeitsbedingungen proportional zu folgen. Die tödlichen Arbeitsunfälle sind Mittelwerte über alle Branchen ohne Wegeunfälle. Daten nach [BMA 1991]

Unabhängig von allen neuen Erkenntnissen zur Strahlenwirkung müssen also alleine aus diesem Grund die Grenzwerte um den Faktor Vier gesenkt werden.

### Der Einfluß der Bevölkerungsstruktur und Krebssterblichkeit

Je länger die Beobachtung der überlebenden Atombombenopfer fortgesetzt werden kann, umso klarer zeigt sich, daß für die Beschreibung des Dosis-Wirkungszusammenhangs das relative risk-Modell zutrifft. Das bedeutet, daß durch eine bestimmte Strahlendosis die zusätzlich auftretenden Tumore sich proportional zur Anzahl der spontanen Tumorfrequenz vermehren. Nimmt in einer Bevölkerung die Häufigkeit spontaner Tumore zu, wächst entsprechend auch die Schadenserwartung nach einer Strahlenbelastung.

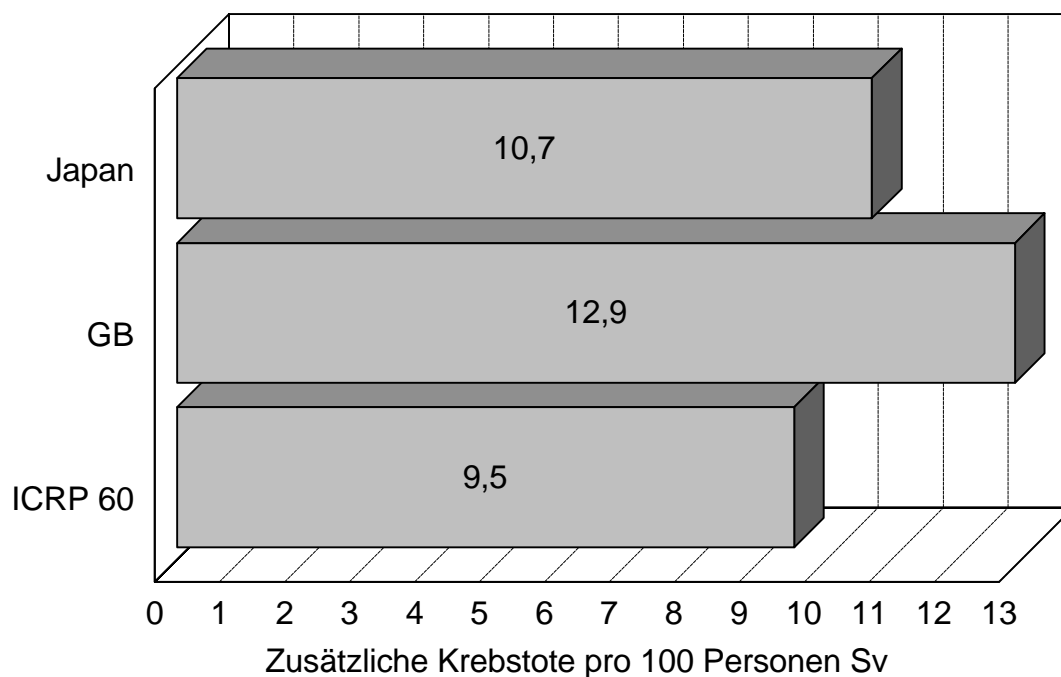


Abb. 8: Schadenserwartung für Krebstodesfälle, wie sie für die Bevölkerung von Japan errechnet worden ist, verglichen mit der Extrapolation auf die Bevölkerung von Großbritannien als Beispiel eines europäischen Landes mit hoher Lebenserwartung und Festsetzung der ICRP für eine „Weltbevölkerung“ als Grundlage der Grenzwerte [ICRP 60 1991].

In europäischen Ländern mit einer hohen Lebenserwartung liegt die Wahrscheinlichkeit, an einer Krebserkrankung zu sterben, aus verschiedenen Gründen 20% höher als in Japan, wie es am Beispiel von Großbritannien, das im Gegensatz zu Deutschland ein Krebsregister besitzt, gezeigt werden

konnte (s. Abb. 8). Die ICRP hat aber zur Begründung ihrer Grenzwerte eine spezielle „Weltbevölkerung“ mit einer reduzierten Lebenserwartung konstruiert, ein Mittel aus China, Großbritannien, Japan, Puerto Rico und USA. Bei einer adäquaten Berücksichtigung der Bevölkerungsstruktur und der Krebshäufigkeit in europäischen Ländern mit einer hohen Lebenserwartung, zu denen auch Deutschland zählt, muß der Grenzwert um den Faktor 1,4 vermindert werden.

## **Biologische Wirksamkeit der Neutronen**

Neutronen sind als Strahlungskomponente für Angehörige der normalen Bevölkerung beim Fliegen mit Düsenverkehrsflugzeuge bedeutsam und zudem für Anwohner von Transportstrecken und Lagerstätten von hochradioaktivem Müll. Neutronen haben als dichtungisierende Strahlen, bezogen auf die gleiche physikalische Dosis, eine größere strahlenbiologische Wirksamkeit als lockerionisierende Strahlen, zu denen auch die Gammastrahlen zählen. Dem versucht die Strahlenschutzverordnung Rechnung zu tragen, in dem die physikalische Neutronendosis durch Multiplikation mit einem Qualitätsfaktor Q von Zehn bei unbekannter Energieverteilung in die Äquivalentdosis umgerechnet wird. Seit mehr als einem Jahrzehnt besteht wissenschaftlicher Konsens, daß dieser Qualitätsfaktor nicht dem Stand der Wissenschaft entspricht. Bereits im September 1990 hat die Internationale Strahlenschutzkommission ICRP für den Fall eines unbekanntes Spektrums einen Strahlungswichtungsfaktor von 20 beschlossen [ICRP 60 1991].

Die vom Hauptkomitee der ICRP empfohlenen Strahlungswichtungsfaktoren für Neutronen haben in der Fachwelt überrascht, da sie deutlich hinter der Empfehlung einer Wissenschaftlergruppe zurückgeblieben sind, die die ICRP selbst und ihre Schwesterorganisation ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements) zur Ausarbeitung neuer Qualitätsfaktoren eingesetzt hatte. Wegen der zahlreichen Hinweise in strahlenbiologischen Versuchen, daß insbesondere im Bereich niedriger Dosen die relative biologische Wirksamkeit der Neutronen noch viel höher ist als ursprünglich angenommen, hatte diese Wissenschaftlergruppe unabhängig von der Energie der Neutronen einen Qualitätsfaktor von 25 vorgeschlagen [ICRU 40 1986].

Die bisher diskutierten Qualitätsfaktoren und Strahlungswichtungsfaktoren für Neutronen sind aus strahlenbiologischen Experimenten mit relativ hohen Dosen und Dosisleistungen abgeleitet worden. Für niedrigere Dosen und Dosisleistungen, wie sie bei der Konfrontation mit den hier diskutierten Grenzwerten zu beachten sind, zeigen Neutronen einen sog. inversen Dosis- und Dosisleistungseffekt [Kuni 1993]. Das bedeutet, daß mit abnehmender Dosis und abnehmender Dosisleistung die biologische Wirksamkeit pro Dosis zunimmt. Diesem Effekt muß mit dem Faktor Drei Rechnung getragen werden, was auf der Basis des Qualitätsfaktors der ICRU von 25 zu einem Strahlungswichtungsfaktor von 75 führt.

Die meisten Erkenntnisse zur RBW der Neutronen waren aus Experimenten mit Tieren und Zellkulturen gewonnen worden. Inzwischen liegen aber auch erste Erfahrungen mit menschlichen Daten vor, die am fliegenden Personal erhoben worden sind. Das fliegende Personal ist beruflich durch den langen Aufenthalt in großen Flughöhen einer erhöhten Strahlenbelastung vor allem durch Neutronen mit einer niedrigen Dosisleistung ausgesetzt. Diese Daten könnten verwendet werden, um die These zu überprüfen, daß für die Berechnung der Äquivalentdosis mindestens ein Strahlungswichtungsfaktor von 75 verwendet werden muß [Kuni 1996]. Nach dieser These müßte die beobachtete Steigerung der Krebshäufigkeit etwa 16fach größer sein, als es die nach den Empfehlungen der ICRP 60 berechnete Äquivalentdosis erwarten läßt (Wirkungsunterschied der Röntgenstrahlung als Referenzstrahlung der Neutronen gegenüber der Atombombenstrahlung: 4, inverser Dosisleistungseffekt für Neutronen: 3, Relation des Qualitätsfaktors nach ICRU 40 gegenüber Strahlungswichtungsfaktor nach ICRP 60: 1,25 ergibt:  $4 \cdot 3 \cdot 1,25 = 16$ ). Die beobachteten Vielfachen zwischen 16 und 41 sprechen nicht nur für die Richtigkeit dieser These (s. Abb. 9), sondern wecken sogar den Verdacht, daß die RBW der Neutronen auch noch mit diesem Ansatz unterschätzt wird (Ausführlichere Diskussion dazu s. Kuni 1996). Speziell für den Fall des Brustkrebses gibt es auch aus Tierexperimenten Hinweise auf eine besondere Empfindlichkeit dieses Organs gegenüber Neutronen [Shellabarger et al. 1980].

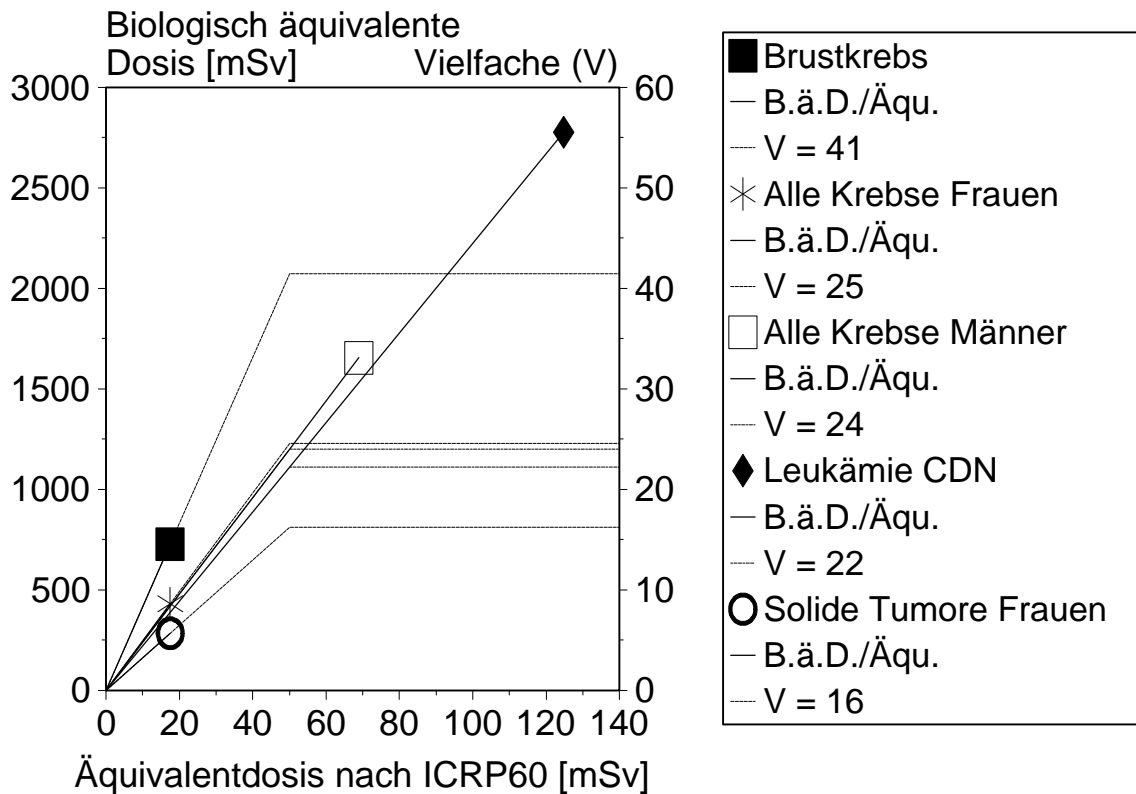


Abb. 9: Vergleich der beruflichen Lebensdosis verschiedener Gruppen des fliegenden Personals, berechnet als Äquivalentdosis mit den Strahlungswichtungsfaktoren der ICRP 60, mit der biologisch äquivalenten Dosis, die erforderlich ist, um die beobachtete Zunahme der Krebshäufigkeit zu erklären (linke Skala). Die Vielfache (V) aus der Division dieser biologisch äquivalenten Dosis (B.ä.D./Äqu.) durch die Äquivalentdosis nach ICRP 60 (Äqu.) ist auf der rechten Skala aufgeführt. Die Daten für Brustkrebs, alle Krebserkrankungen der Frauen und die soliden Tumore der Frauen nach [Pukkala et al. 1995], für alle Krebstodesfälle der Männer nach [Kaji et al. 1993] und der Leukämien kanadischer Piloten nach [Band et al. 1996].

## Bilanz der Korrekturfaktoren

Hier sollen nun die Korrekturfaktoren systematisch zusammengefaßt werden, um das wahre Ausmaß der gesundheitlichen Gefährdung beim Vergleich mit Grenzwerten zu bewerten, die auf Empfehlungen der ICRP zurückgehen. Zugleich soll in dieser Bilanz die Weiterentwicklung der Korrekturfaktoren in den letzten Jahren veranschaulicht werden, um den Überblick behalten zu können (s. Tab. 1). Schließlich kann leicht Verwirrung entstehen, wenn ständig von neuen Korrekturfaktoren die Rede ist. Es erscheint fast wie in einem Kriminalstück: Wenn im Vorgarten eines Serienmörders eine Leiche entdeckt worden ist und nun neugierig weiter gegraben wird, kommt im Laufe der Zeit eine weitere Leiche nach der anderen zum Vorschein. Der Einfallsreichtum, mit dem an den verschiedensten

Stellen immer etwas an Faktoren zurück geschraubt worden ist, um das gefährliche Niveau der Grenzwerte halten zu können, kann nur erstaunen. Da alle Rundungen, „Vereinfachungen“ und Anpassungen immer in die gleichen Richtung gehen, nämlich eine Unterbewertung der Gefährlichkeit, und sich in ihrer Auswirkung multiplizieren, resultiert aus der Kettenmultiplikation der notwendigen Korrekturen eine geradezu abstruse Abweichung zwischen Ist und Soll im Strahlenschutz.

Für alle Strahlenarten war bisher der Faktor 2 zum Ausgleich des fehlerhaft angewendeten DDREF zu beachten, 1998 sind hinzugekommen: Faktor 1,4 zum Ausgleich des Unterschiedes zwischen Inzidenz- und Mortalitätsstatistik, Faktor 4 zur Nachführung an die Verbesserung der konventionellen Arbeitssicherheit, Faktor 1,4 zum Ausgleich der stärkeren Gefährdung der europäischen Bevölkerung, zusammen jetzt also  $2 \cdot 1,4 \cdot 4 \cdot 1,4 = 15,7$ , das sind rund 16.

Für die Gammastrahlung des CASTOR muß seit 1996 als Konsequenz aus der Publikation Straumes vom Dezember 1995 zusätzlich noch mit dem Faktor 2 dem Wirkungsunterschied gegenüber der Atombombenstrahlung Rechnung getragen werden. Insgesamt ergibt sich aus heutiger Sicht für Gammastrahlung also ein Faktor von 32.

Tab. 1: Übersicht über die Korrekturfaktoren zur Berechnung einer biologisch äquivalenten Dosis zum Vergleich mit Grenzwerten nach den Empfehlungen der ICRP und ihre Entwicklung im Laufe der letzten Jahre.

	1995	1996	1998
Alle Strahlenarten	2	2	$2 \cdot 1,4 \cdot 4 \cdot 1,4 \approx 16$
Gammastrahlung	2	$2 \cdot 2 = 4$	$2 \cdot 1,4 \cdot 4 \cdot 1,4 \cdot 2 \approx 32$
Röntgenstrahlung	$2 \cdot 2 = 4$	$2 \cdot 4 = 8$	$2 \cdot 1,4 \cdot 4 \cdot 1,4 \cdot 4 \approx 64$
Neutronen	$2 \cdot 2 \cdot 7,5 = 30$	$2 \cdot 4 \cdot 7,5 = 60$	$2 \cdot 1,4 \cdot 4 \cdot 1,4 \cdot 4 \cdot 7,5 \approx 480$

Für Röntgenstrahlung als Referenzstrahlung für die Bewertung der Neutronen war der Wirkungsunterschied zur Atombombenstrahlung bis zum Dezember 1995 mit dem Faktor 2 zu bemessen, danach als Konsequenz aus der Publikation Straumes mit Faktor 4. Dadurch stieg der Faktor insgesamt von 4 auf 8. Aus heutiger Sicht beträgt er 64.

Im Vergleich zur Röntgenstrahlung ist von einer RBW der Neutronen im Bereich niedriger Dosen und Dosisleistungen von 75 auszugehen. Der Korrekturfaktor hängt nun davon ab, mit welchem Qualitätsfaktor oder Strahlungswichtungsfaktor bei der Dosimetrie gearbeitet worden ist. Es errechnet sich ein Faktor 7,5 gegenüber der Dosisleistung, die nach der Strahlenschutzverordnung und damit nach den Empfehlungen der ICRP 21 [1973] ermittelt wurde und bei der ein Q von 10 zur Anwendung kam. 1995 betrug deshalb der Faktor insgesamt 30, 1996 stieg er auf 60, aus heutiger Sicht muß 480 angewendet werden!

## Auswirkungen auf die Bevölkerung

Um die Auswirkungen auf der Grenzwerte auf die Bevölkerung zu veranschaulichen, soll das Ausmaß der gesundheitlichen Gefährdung der Berufstätigen gezeigt werden, deren Strahlenbelastung derzeit etwa in der Größenordnung liegt, die als Grenzwert für die Bevölkerung gesetzt werden soll.

In der Bundesrepublik Deutschland ereignete sich pro Jahr auf 10.000 Vollbeschäftigte etwa ein Todesfall durch einen Arbeitsunfall oder eine anerkannte Berufskrankheit (ohne Wegeunfälle) [BMA 1991] (s. Abb. 10). Die Bedeutung der Strahlenbelastung wird zunächst am Beispiel der Arbeiter in Leistungsatomkraftwerken gezeigt. Hier waren deutlich weniger Todesfälle durch konventionelle Ursachen als im Spartendurchschnitt zu beklagen. Durch die zusätzliche Strahlenbelastung nimmt aber die Anzahl der zu erwartenden tödlichen Krebserkrankungen so zu, daß der Gewinn durch die unterdurchschnittliche Gefährdung aus dem konventionellen Bereich mehr als ausgeglichen wird. Dabei liegt die durchschnittliche Strahlenbelastung dieser Beschäftigten mit ca. 1 mSv/a weit unter dem festgesetzten Grenzwert für Berufstätige von 50 mSv/Jahr [BMU 1992].

Bei diesem Szenario ist die Wahrscheinlichkeit tödlicher Krebserkrankungen von den Auswertungen des BEIR-Komitees abgeleitet worden [BEIR V 1990]. Dieses Wissenschaftlerkomitee verwendet (mit Ausnahme für Leukämien) eine lineare Dosiswirkungskurve, die keinen Raum für einen Reduktionsfaktor für niedrige Dosen und Dosisleistungen läßt. Deshalb ist eine Korrektur der Dosis auf DDREF nicht erforderlich. Die Schadenserwartung war für eine heutige Population berechnet worden, so daß eine demographische Korrektur nicht notwendig ist. Da dieser Wert der aktuellen Situation im konventionellen Arbeitsbereich gegenübergestellt wird, ist auch keine Korrektur für veränderte Arbeitssicherheit erforderlich. Lediglich die Anpassung an den Wirksamkeitsunterschied der Gammastrahlung im Vergleich zur Atombombenstrahlung (Faktor 2) wurde vorgenommen. Bei der Neutronenkomponente wurde der Wirksamkeitsunterschied der Referenzstrahlung im Vergleich zur Atombombenstrahlung (Faktor 4) sowie der Unterschied des geforderten Qualitätsfaktors von 75 im Vergleich zu dem der Strahlenschutzverordnung von 10 beachtet (Faktor 7,5).

Für den Fall, daß eine Belastung mit den in ihrer Wirkung besonders stark unterschätzten Neutronen erfolgt, wird eine Gefährdung in dieser Größenordnung bereits mit einem Bruchteil des Grenzwertes erreicht. Als Beispiel wird gezeigt, wie es sich auswirkt, wenn der Grenzwert der Gefahrgutverordnung (Dosisleistung von 100  $\mu$ Sv/h in 2m Abstand) mit den konkreten Anteilen von Neutronen und Gammastrahlung wie beim CASTOR IIa eine Stunde eingewirkt hätte (entspricht einer Dosis von 0,1 mSv). Dann übersteigt die Wahrscheinlichkeit zusätzlicher Todesfälle durch die Strahlenbelastung nicht nur das konventionelle Todesrisiko erheblich, sondern liegt auch noch höher als das, dem die beruflich Strahlenexponierten in den Atomkraftwerken ausgesetzt sind.

Für Angehörige der normalen Bevölkerung werden diese Abschätzungen noch deutlich überschritten, da Kinder und Jugendliche eine erheblich höhere Empfindlichkeit gegenüber ionisierender Strahlung haben.

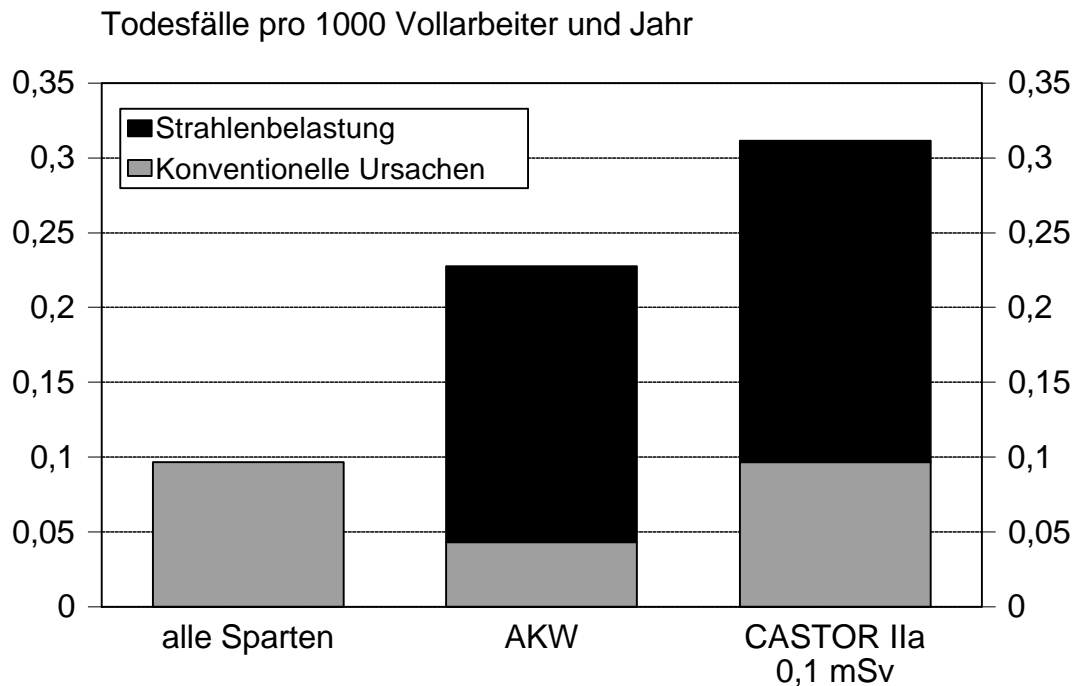


Abb. 10: Relative jährliche Häufigkeit der Todesfälle durch Arbeitsunfälle und anerkannte Berufskrankheiten im Spartendurchschnitt (alte Bundesländer 1990) und bei Beschäftigten in deutschen Leistungsatomkraftwerken im Vergleich zu der Häufigkeit zusätzlicher Krebstodesfälle durch die jährliche Strahlenbelastung dort und im Strahlenfeld eines CASTOR IIa mit einer Dosis von 0,1 mSv

Werden die zusätzlichen Gesundheitsschäden durch nicht tödlich verlaufende Krebserkrankungen in die Betrachtung einbezogen, übersteigt die Gesundheitsgefährdung den Durchschnitt aller Sparten noch deutlicher, obwohl dort die Häufigkeit anerkannter Berufskrankheiten hinzugerechnet worden ist (s. Abb. 11).

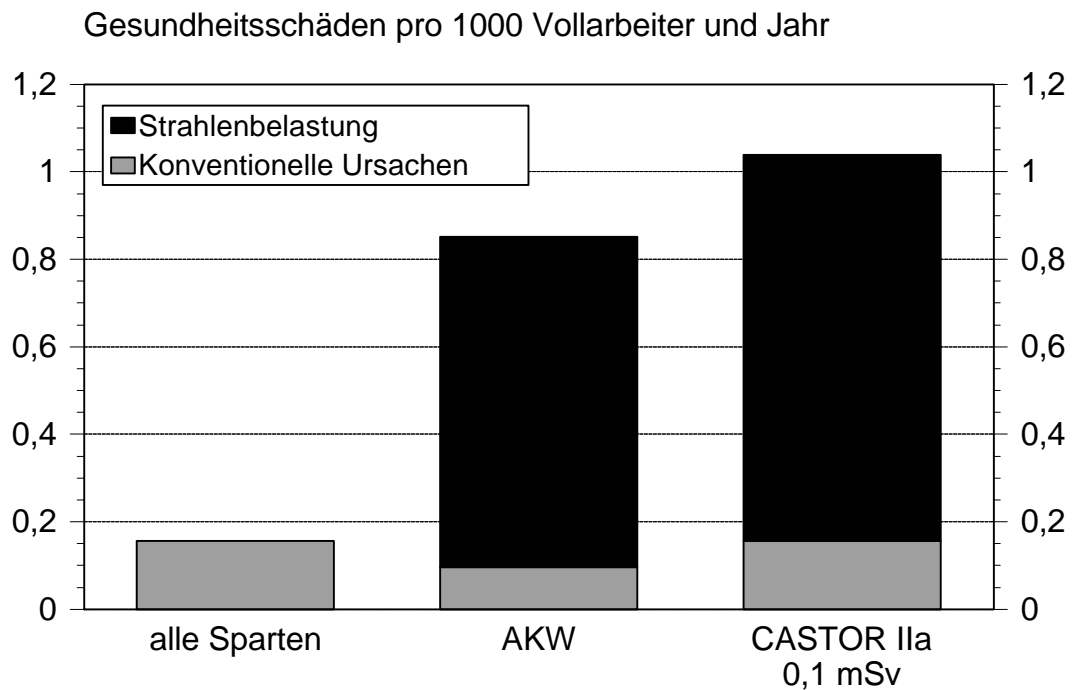


Abb. 11: Wie Abb. 710, jedoch unter zusätzlicher Berücksichtigung nichttödlicher Krebserkrankungen als Folge der Strahlenbelastung und anerkannter Berufserkrankungen im konventionellen Bereich

## Die Reaktion der Politik

Die Forderung nach einer drastischen Senkung der Grenzwerte hat auch politische Reaktionen ausgelöst. Dazu zwei Beispiele:

"Es kann ja nicht sein, daß wir zum Schluß keine einzige Röntgenaufnahme mehr in Deutschland transportieren können." (Frau Ministerin Merkel, Info-Radio Berlin-Brandenburg, 11. Juli 1998)

Ich denke, die naturwissenschaftliche Bildung der Leserinnen und Leser reicht aus, um dieses Argument zu beurteilen.

„80% der Bevölkerung Deutschlands müßten evakuiert werden, weil diese Dosis weit unter den Strahlenwerten liege, die durch natürliche Quellen entstünden.“ (Frau Ministerin Merkel)

Hier wird der Bereich eines naturwissenschaftlichen Diskurses verlassen. Abgesehen davon, daß es Bereiche gibt, in denen die natürliche Strahlenbelastung der Menschen durch zivilisatorische Eingriffe erhöht worden ist und dort natürlich auch kontrolliert und reduziert werden sollte, unterliegt es in unserer Gesellschaft einer unterschiedlichen ethischen Bewertung, ob ein Schaden wegen eines

unausweichlichen Naturereignis hingenommen werden muß, oder von anderen Menschen zugefügt worden ist.

## Literatur

**Band, S. R., Le, N.D., Fang, R., Deschamps, M., Coldman, A.J., Gallagher, R.S. , Moody, J. 1996**  
Cohort Study of Air Canada Pilots: Mortality, Cancer Incidence, and Leukemia Risk  
Am. J. Epidemiol. 143, 137-143

BEIR V 1990  
Committee on the **B**iological **E**ffects of Ionizing **R**adiations  
Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation  
National Academy Press, Washington DC, 1990

BMA 1991  
Der **B**undesminister für **A**rbeit und **S**ozialordnung  
Arbeitssicherheit '91, Unfallverhütungsbericht  
Reihe Berichte und Dokumentationen, Bonn, 1991

BMU 1992  
Der **B**undesminister für **U**mwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bericht der  
Bundesregierung über Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 1990  
Drucksache 12/2677, Verlag Dr. Heger, Bonn, 1992

**Brenner, D.J., Hall, E.J.** 1990  
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, 745-758

**Feinendegen, L:E., Mühlensiepen, H., Lindberg, C., Marx, J., Porschen, W., Booz, J.** 1985  
Akute und temporäre Reaktion von Knochenmarkzellen der Maus nach in-vivo-Exposition von  
sehr kleinen Dosen Gamma-Strahlung  
In: Leppin, W., Meißner, J., Börner, W., Messerschmidt, O. (Hrsg.): Die Hypothesen im  
Strahlenschutz, Strahlenschutz in Forschung und Praxis, Bd. XXV, Thieme, Stuttgart, 1985,  
S. 92ff.

ICRP 21 1973  
International **C**ommission on **R**adiological **P**rotection  
Publication 21  
Data for Protection against Ionizing Radiation from External Sources: Supplement to ICRP  
Publication 15, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection  
Pergamon Press, Oxford, New York

**ICRP 26 1977**

**International Commission on Radiological Protection**  
Publication 26  
Recommendations of the International Commission on Radiological Protection  
Annals of the ICRP Vol. 1, No. 3, Pergamon Press, Oxford, New York

**ICRP 45 1985**

**International Commission on Radiological Protection**  
Publication 45  
Quantitative Bases for Developing a Unified Index  
of Harm  
Annals of the ICRP Vol. 15, No. 3, Pergamon Press, Oxford, New York

**ICRP 60 1991**

**International Commission on Radiological Protection**  
Publication 60  
1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection  
Annals of the ICRP Vol. 21, No. 1-3  
Pergamon Press, Oxford, New York, Seoul, Tokyo

**ICRU 40 1986**

**International Commission on Radiation Units and Measurements**  
The Quality Factor in Radiation Protection, Report of a Joint Task Group of the ICRP and ICRU to  
the ICRP and ICRU  
Report 40, Bethesda, Maryland 20814, USA

**Kaji, M., Tango, T., Asukata, I., Tajima, N., Yamamoto, K., Yamamoto, Y., Hokari, M. 1993**

Mortality Experience of Cockpit Crewmembers from Japan Airlines  
Aviat. Space Environ. Med. 748-750

**Köhnlein, W., Nußbaum, R.H. 1990**

Die neueste Krebsstatistik der Hiroshima-Nagasaki-Überlebenden: Erhöhtes Strahlenrisiko bei  
Dosen unterhalb 50 cGy (rad); Konsequenzen für den Strahlenschutz  
In: Köhnlein, Kuni, Schmitz-Feuerhake (Hrsg.):  
Niedrigdosisstrahlung und Gesundheit, Medizinische, rechtliche und technische Aspekte mit  
dem Schwerpunkt Radon  
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, HongKong, Barcelona,  
1990, S. 201-214

**Köhnlein, W., Nußbaum, R.H. 1991**

Reassessment of Radiogenic Cancer Risk and Mutagenesis at Low Doses of Ionizing Radiation  
Adv. Mutag. Res. 3, 53-80

**Kuni, H. 1987**

Gefahr von Strahlenschäden durch Plutonium  
Konsequenzen für das Atom- und Strahlenschutzrecht  
aus medizinischer Sicht  
Der Minister für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie  
des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 197 S., 1987

**Kuni, H. 1993**

Die Bewertung von Alpha- und Neutronenstrahlen bei der Berechnung der Äquivalentdosis  
In: Lengfelder, E., Wendhausen, H. (Hrsg.): Neue Bewertung des Strahlenrisikos, Niedrigdosis-Strahlung und Gesundheit, MMV Medizin Verlag, München, 1993, S. 19-27

**Kuni, H. 1996**

Epidemiologische Hinweise zur RBW von Neutronen  
Update 5/96, Marburg, Download: <http://staff-www.uni-marburg.de/~kuni/all-doc/rbw-epi.pdf>  
(29 kB)

**Kuni, H. 1998**

The Concept of Equivalent Dose and Dose Limits - Urgent Improvements  
STOA Workshop Survey and evaluation of criticism of basic safety standards for the protection of workers and the public against ionising radiation, Brüssel, 5.02.98,  
Download: <http://staff-www.uni-marburg.de/~kuni/all-doc/stoakuni.pdf> (75 kB)

**Nussbaum, R.H. 1998**

The Linear No-Threshold Dose Effect Relation: Is it Relevant to Radiation Protection Regulation  
Med. Physics 25, 291-299

**Pierce, D.A., Shimizu, Y., Preston, D.L., Vaeth, M., Mabuchi, K. 1996**

Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors. Report 12, Part I. Cancer: 1950-1990  
Radiat. Res. 146, 1-27

**Pukkala, E., Auvinen, A., Wahlberg, G. 1995**

Incidence of Cancer among Finnish Airline Cabin Attendants, 1967-92  
Brit. Med. J. 311, 649-652

**Ron, E., Preston, D.L., Mabuchi, K., Thompson, D.E., Soda, M. 1994**

Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors. Part IV: Comparison of Cancer Incidence and Mortality  
Radiat. Res. 137, 98-112

**Shellabarger, C.J., Chmelevsky, D., Kellerer, A.M. 1980**

Induction of Mammary Neoplasms in the Sprague-Dawley Rat by 430-keV Neutrons and X-Rays  
J. Natl. Cancer 64, 821-833

**Shimizu, Y., Kato, H., Schull, W.J. 1988**

Life Span Study Report 11, Part 2. Cancer Mortality in the Years 1950-85 Based on the Recently Revised Doses (DS86)  
Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima, Technical Report, RERF TR 5-88, 1988

**Straume, T. 1995**

High-Energy Gamma Rays in Hiroshima and Nagasaki: Implications for Risk and  $w_R$   
Health Phys. 69, 954-956

**Thompson, D.E., Mabuchi, K., Ron, E., Soda, M., Tokunaga, M., Ochikubo, S., Sugimoto, S., Ikeda, T., Terasaki, M., Izumi, S., Preston, D.L. 1992/1994**  
Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors. Part II: Solid Tumors, 1958-1987  
Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima, Technical Report, 1992, RERF TR 5-92  
Radiat. Res. 137 (1994), S17-S67