

## **Strahlenschutzkommission**

Geschäftsstelle der  
Strahlenschutzkommission  
Postfach 12 06 29  
53048 Bonn

<http://www.ssk.de>

---

# **Bewertung des Risikos durch Neutronenstrahlung**

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

---

Verabschiedet in der 170. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 7. Dezember 2000

## 1 Vorbemerkung

Angesichts der bevorstehenden Wiederaufnahme von CASTOR-Transporten ist es zu erneuten Diskussionen um das Risiko von Neutronenstrahlung gekommen. Wegen dieser jüngsten Diskussionen hat das BMU die SSK ersucht, unter Heranziehung neuester Erkenntnisse zu überprüfen, ob die gegenwärtigen Festlegungen im Strahlenschutz, und insbesondere die Strahlungs-Wichtungsfaktoren, die Neutronen richtig bewerten und damit hinreichenden Schutz bei Neutronenstrahlung gewährleisten.

## 2 Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Der derzeitige Stand des strahlenbiologischen Wissens gibt, wie im Dokumentationsteil dargestellt, keinen Anlass, einen höheren Risikokoeffizienten als bisher und daher einen höheren Wichtungsfaktor für Neutronen im Strahlenschutz anzunehmen. Frühere Bestimmungen der Risikokoeffizienten für Neutronen hingen von der Extrapolation der Risikoschätzung für Photonen zu niedrigen Dosen ab. Grundlage dieser Empfehlung ist dagegen ein neuer Ansatz, der den Risikokoeffizienten für Neutronen von dieser Extrapolation entkoppelt und der allein von den RBE-Werten aus Tierversuchen und vom zusätzlichen relativen Risiko (ERR) für Krebsmortalität ausgeht, das bei 1 Gy in Hiroshima beobachtet wurde.

Mit dem Strahlungs-Wichtungsfaktor der ICRP wird die Gesamtwirkung der auf Menschen einfallenden Neutronen-Strahlung berücksichtigt, also sowohl die durch die Neutronen im Körper unmittelbar als auch die durch sie mittelbar über  $\gamma$ -Strahlung verursachte Dosis. In dem konkreten Fall eines CASTOR-Transportbehälters entsprechen die durch die ICRP-Publikation 60 vorgegebenen Wichtungsfaktoren einem Wichtungsfaktor von 16,8 für das gesamte Neutronenspektrum. Der in der nachfolgenden wissenschaftlichen Dokumentation abgeschätzte Risikofaktor für Neutronen entspricht demgegenüber einem Bewertungsfaktor von 12,8 für dasselbe Neutronenfeld. Die von der ICRP vorgeschlagenen und in die Europäischen Normen übernommenen Wichtungsfaktoren für Neutronen sind daher hinsichtlich der in der Umgebung eines CASTOR-Transportbehälters auftretenden Neutronenstrahlung nach dem derzeitigen Wissensstand konservativ. Die SSK wird auch künftig prüfen, ob neue Erkenntnisse – beispielsweise durch die Fortführung der epidemiologischen Beobachtung der Atombombenüberlebenden – zu einer Modifikation dieser Bewertung Anlass geben.

## 3 Wissenschaftliche Begründung

Der Dokumentationsteil erläutert die Bewertung der Neutronenstrahlung und basiert auf den derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnissen über die biologische Wirkung von Neutronen auf den Menschen.

### 3.1 Einleitung

Eine zentrale Größe hinsichtlich der Festlegung von Grenzwerten im Strahlenschutz ist die effektive Dosis,  $E$ , eine über alle relevanten Organe und Gewebe im menschlichen Körper und über die unterschiedlichen Strahlenarten gewichtete Größe [1]:

$$E = \sum_{R,T} w_R \cdot w_T \cdot D_{T,R}$$

$D_{T,R}$ : mittlere Energiedosis im Organ oder Gewebe T durch die externe Strahlungskomponente R

$w_T$ : Gewebe-Wichtungsfaktor für Organ oder Gewebe T ( $\sum w_T = 1$ )

$w_R$ : Strahlungs-Wichtungsfaktor für die externe Strahlungskomponente R

Die Energiedosis und die effektive Dosis haben die gleiche Einheit, J/kg. Zur besseren Unterscheidung wird jedoch für die Energiedosis der spezielle Name Gray (Gy) dieser Einheit verwendet und für die effektive Dosis der Name Sievert (Sv).

Die Werte der Gewebe- und Strahlungs-Wichtungsfaktoren sind 1990 von der Internationalen Kommission für Strahlenschutz (ICRP) empfohlen worden. Für Photonenstrahlung wurde, unabhängig von der Energie, der Strahlungs-Wichtungsfaktor  $w_R$  gleich 1 gesetzt. Für Neutronen ist er von deren Energie abhängig und im für schnelle Neutronen typischen Energiebereich von 0,1 MeV bis 2 MeV gleich 20. Die Wichtungsfaktoren für die unterschiedlichen Strahlenarten tragen der durch zahlreiche experimentelle Untersuchungen belegten Tatsache Rechnung, dass eine bestimmte Energiedosis dicht ionisierender Strahlung – wie es schnelle Neutronen sind – wirksamer ist als dieselbe Energiedosis durch locker ionisierende Strahlung, wie  $\gamma$ -Strahlung oder Röntgenstrahlung.

Obwohl die Internationale Kommission für Strahlenschutz (ICRP) die von ihr empfohlenen und später in die Europäischen Normen übernommenen Dosisgrenzwerte nicht starr an Zahlenwerte des Risikos für stochastische Spätschäden gekoppelt hat, hat sie doch einen nominalen Risikoeffizienten für tödliche Krebserkrankungen von 0,05/Sv angegeben. Dieser Wert bezieht sich auf den Bereich kleiner Dosen, d.h. auf Dosen, die die Größenordnung der Grenzwerte nicht wesentlich überschreiten und daher deutlich kleiner als 1 Sv sind. Um die Frage nach der richtigen Einschätzung der Neutronenstrahlung zu beantworten, hatte die SSK zu prüfen, ob die nach gegenwärtigem Kenntnisstand beste Risikoschätzung für schnelle Neutronen dem von der ICRP angegebenen Risikowert etwa entspricht oder diesen Wert wesentlich überschreitet.

## 3.2 Generelle Beobachtungen

Bisher liegen keine ausreichenden epidemiologischen Studien vor, um die durch Neutronenstrahlung hervorgerufenen Erhöhungen von Krebserkrankungen oder von Erbschäden direkt zu untersuchen. Die Risikoschätzungen für Neutronen stützen sich deshalb auf epidemiologische Beobachtungen für  $\gamma$ -Strahlung und auf strahlenbiologische Untersuchungen zum Vergleich der Wirkung von Neutronen und  $\gamma$ -Strahlung bzw. Röntgenstrahlung. Das Verhältnis der  $\gamma$ - und Neutronendosen mit gleicher Wirkung bezeichnet man als die relative biologische Wirksamkeit der Neutronen (*relative biological effectiveness, RBE*).

In Experimenten an Zellen oder an Tieren sind bei gegebener Energiedosis schnelle Neutronen generell deutlich wirksamer als  $\gamma$ -Strahlen. Dabei ist in fast allen Untersuchungen die Wirkung der Neutronen proportional zur Dosis. Die Dosisabhängigkeit für  $\gamma$ -Strahlung – oder auch Röntgenstrahlung – ist dagegen bei geringen Dosen weniger steil als bei hohen Dosen. Sie wird allgemein durch eine linear-quadratische Funktion beschrieben.

$$\text{Gammastrahlung:} \quad \text{Wirkung} \sim a_0 D_\gamma + b_0 D_\gamma^2 \quad (1)$$

$$\text{Neutronen:} \quad \text{Wirkung} \sim a_n D_n \quad (2)$$

Wegen dieses Unterschieds in der Dosisabhängigkeit ist die relative biologische Wirksamkeit *RBE* der Neutronen gegenüber der  $\gamma$ -Strahlung bei kleinsten Dosen am größten.

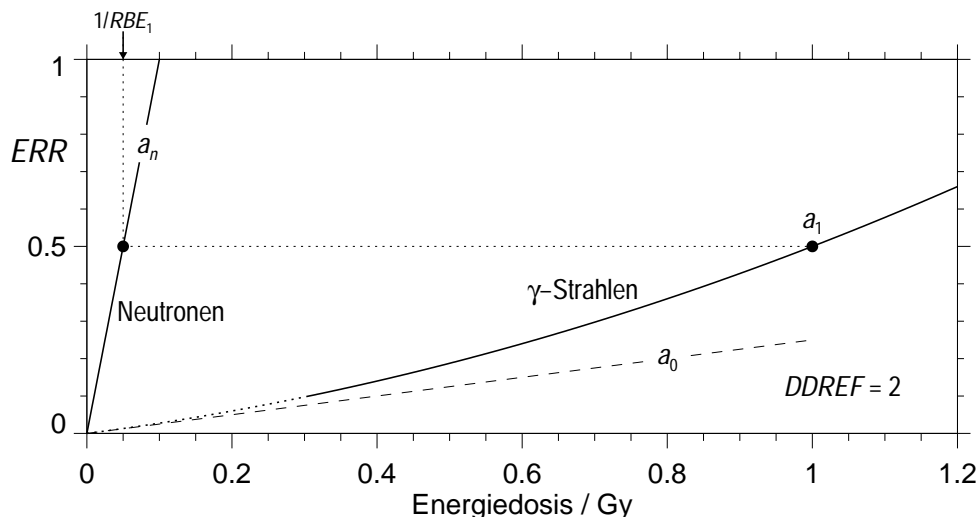
Die Wirkung der Strahlung auf den Menschen wird häufig ausgedrückt als zusätzliches relatives Risiko (*excess relative risk, ERR*, mit  $ERR = 0$  für  $D = 0$ ) für Krebsmortalität bzw. Krebserkrankungen. Als Risikokoeffizient bezeichnet man dann das zusätzliche relative Risiko pro Doseinheit,  $ERR / D$ , oder das dieser Größe entsprechende zusätzliche Lebenszeitrisko pro Doseinheit.

Die Anfangssteigung der Dosiswirkungskurve für die  $\gamma$ -Strahlung, d. h. der Risikokoeffizient  $a_0$ , ist meist nur mit beträchtlicher Unsicherheit zu bestimmen. Je kleiner ihr Wert angenommen wird, um so größer ist die berechnete *RBE* der Neutronen bei geringer Dosis.

### 3.3 Risikokoeffizient für $\gamma$ -Strahlung

Die direkt beobachtbare und durch epidemiologische Studien am besten bekannte Größe ist die Wirkung der  $\gamma$ -Strahlung bei einer mittleren Dosis, d.h. bei einer Dosis, die hoch genug ist für statistisch belastbare Beobachtungen. Ein geeigneter, im folgenden benutzter Referenzwert ist 1 Gy. Dieser Wert liegt erheblich oberhalb des im Strahlenschutz in der Regel interessierenden Bereiches von etwa 1 mGy bis 100 mGy für Photonenstrahlung. Das zusätzliche relative Risiko bei 1 Gy wird hier mit dem Wert  $a_1$  bezeichnet.

Lineare Extrapolation von 1 Gy zur Dosis null ergibt die Steigung  $a_1$ , d. h. einen Risikokoeffizienten  $a_1$ . Der genaue Kurvenverlauf bei kleiner Dosis jedoch ist aus den epidemiologischen Daten nicht beobachtbar. Der Risikokoeffizient  $a_0$  für  $\gamma$ -Strahlung bei kleinen Dosen, d.h. die tatsächliche Anfangssteigung, kann daher nur durch Extrapolation abgeschätzt werden (s. Abb. 1). Das Verhältnis  $a_1/a_0$  wird von ICRP als *DDREF* (*dose and dose rate effectiveness factor*) bezeichnet. Ist *DDREF* gleich 2, so ist der Risikokoeffizient für kleine Dosen halb so groß wie der Wert  $a_1$ , der sich aus der einfachen linearen Extrapolation ergibt [1].



**Abb.1:** Schematische Darstellung des zusätzlichen relativen Risikos für  $\gamma$ -Strahlung und für energiereiche Neutronen (durchgezogene Kurven) in Abhängigkeit von den Energiedosen. Für  $\gamma$ -Strahlung ist *DDREF* = 2 angenommen; die gestrichelte Linie gibt die Anfangsneigung  $a_0$  an.

Für die Neutronen ist im Diagramm die relative biologische Wirksamkeit,  $RBE_1 = 20$ , gegenüber 1 Gy  $\gamma$ -Strahlung angenommen. Die numerischen Werte des zusätzlichen relativen Risikos (*ERR*) geben die richtige Größenordnung an, sind jedoch abhängig von Details des Risikomodells.

Aus Untersuchungen von dizentrischen Chromosomenaberrationen ergab sich mit  $\gamma$ -Strahlung der Faktor  $DDREF = 6$  [3]<sup>1</sup>. Für Tierexperimente sind quantitative Aussagen zur Dosiswirkungsbeziehungen unterhalb 1 Gy schwierig, jedoch sind die Daten mit  $DDREF = 5$  oder sogar mit höheren Werten vereinbar [4].

Die Einschränkung, dass aus epidemiologischen Daten  $DDREF$  nicht stabil geschätzt werden kann, gilt auch für die Daten der Atombombenüberlebenden, obwohl sie im Bereich kleiner Dosen aussagekräftiger sind als die medizinischen Studien und deshalb zur hauptsächlichen Basis der Risikoschätzungen wurden.

Die Leukämiedaten der Atombombenüberlebenden entsprechen einem  $DDREF$  von 2-3 [8]. Die Daten für solide Tumoren zeigen keine Abweichungen von einer linearen Abhängigkeit ( $DDREF = 1$ ), sind aber statistisch mit  $DDREF = 2$  noch vereinbar. Als Kompromiss zwischen experimentellen Daten und den epidemiologischen Beobachtungen an den Atombombenüberlebenden wählte die ICRP [1] daher den Wert  $DDREF = 2$ :

Für  $DDREF = 2$  gilt:

$$a_0 = a_1 / 2 \quad (3)$$

wobei  $a_1$  der Risikoeffizient ist, der sich aus der Wirkung von 1 Gy  $\gamma$ -Strahlung ergibt. Bei Vernachlässigung des Neutronenanteils, der in der früheren Analyse, auf die sich ICRP stützte, rechnerisch unbedeutend war, ist der Wert von  $a_1$  nahezu gleich  $a_H = ERR / 1 \text{ Gy}$ , wobei  $ERR$  das zusätzliche relative Risiko bei der Dosis 1 Gy in Hiroshima ist. ICRP leitete also den Risikoeffizienten 0,05/Sv (gleich 0,05/Gy bei Gammastrahlung) aus der angenommenen Anfangssteigung  $a_0 = a_H / 2$  ab.

Dazu ist allerdings zu bemerken, dass in den Berechnungen für ICRP 60 [1] das zusätzliche relative Risiko altersunabhängig als konstant angenommen wurde (*age at exposure model*), was gegenüber dem inzwischen bestätigten Modell eines mit dem Alter abnehmenden zusätzlichen relativen Risikos (*age attained model*) das zusätzliche Lebenszeitrisiko etwa um den Faktor 2 überschätzte [9, 6]. Insofern entspricht der gegenwärtig benutzte Risikoeffizient von 0,05/Sv für  $\gamma$ -Strahlung tatsächlich nicht dem reduzierten Wert  $a_H / 2$ , sondern etwa der einfachen linearen Extrapolation und daher auch dem Wert von  $a_H$  aus Hiroshima. Dieser Hinweis ist wichtig für die folgenden Überlegungen zum Risikoeffizienten für Neutronen.

Unabhängig vom tatsächlich angenommenen Wert für  $DDREF$  ist festzuhalten, dass  $a_1$  eine Größe ist, die sich direkt aus Untersuchungen ergibt,  $a_0$  dagegen das Resultat einer mit weit größerer Unsicherheit behafteten Extrapolation zu kleinen Dosiswerten.

### 3.4 Ableitung des Risikoeffizienten für Neutronen aus dem Risikoeffizienten für $\gamma$ -Strahlung

Solange Neutronen hinsichtlich des Strahlenschutzes von untergeordneter Bedeutung waren, wurde der Risikoeffizient für Neutronen einfach mit Hilfe des Risikoeffizienten für  $\gamma$ -Strahlung ermittelt, indem  $a_0$  mit  $RBE_{\max}$ , dem bei kleinen Dosen erreichten Maximalwert der  $RBE$  für Neutronen, multipliziert wurde:

$$a_n = RBE_{\max} \cdot a_0 = (RBE_{\max} / DDREF) \cdot a_1 \quad (4)$$

<sup>1</sup> Die Dosiskoeffizienten waren:  $\alpha_0 = (1,07 \pm 0,41) \cdot 10^{-2} / \text{Gy}$  und  $b = (5,55 \pm 0,28) \cdot 10^{-2} / \text{Gy}^2$  [3].

Da der Quotient  $RBE_{\max}/DDREF$  zwei extrapolierte Parameter enthält, ist seine Unsicherheit groß. Das erklärt, warum sich bei Benutzung dieser Formel sehr unterschiedliche Werte von  $a_n$  ergeben können. Radiobiologische Untersuchungen an verschiedenen Systemen mit unterschiedlichen Endpunkten in Verbindung mit der Extrapolation zu niedrigen Dosen ergaben eine große Bandbreite von  $RBE_{\max}$ -Werten im Bereich von 10 bis 100. Wählt man aus dieser Bandbreite das Minimum (also  $RBE_{\max} = 10$ ) und in der Bandbreite möglicher Werte von  $DDREF$  (1-6) den höchsten Wert (also  $DDREF = 6$ ), so erhält man den Faktor 1,6. Beim umgekehrten Vorgehen (Maximum für  $RBE_{\max}$  und Minimum für  $DDREF$ ) ergibt sich der hohe Wert von 100. Insgesamt kann man also je nach individueller Beurteilung Werte von 1,6 bis 100 erhalten. Dies erklärt die große Bandbreite bisher diskutierter Risikokoeffizienten für Neutronen.

### 3.5 Die direkte Bestimmung des Risikokoeffizienten für Neutronen aus Werten der RBE

Die große Unsicherheit des Risikokoeffizienten für Neutronen kann erheblich verringert werden, wenn man die doppelte Extrapolation zu kleinen Dosen vermeidet und sich direkt auf die  $\gamma$ -Dosis von 1 Gy bezieht. Dann gilt angesichts der linearen Dosis-Wirkungsrelation für Neutronen die einfachere Beziehung:

$$a_n = RBE_1 \cdot a_1 \quad (5)$$

Diese Beziehung enthält keine extrapolierten Parameter, sondern nur die tatsächlich beobachtete – wenn auch mit statistischem Fehler – behaftete Größe  $RBE_1$ , die experimentell bestimmte relative biologische Wirksamkeit der Neutronen gegenüber 1 Gy  $\gamma$ -Strahlung, sowie  $a_1$ , die aus epidemiologischen Daten abgeleitete Wirkung von 1 Gy  $\gamma$ -Strahlung.

In verschiedenen biologischen Systemen wurden unterschiedliche Werte von  $RBE_1$  für energiereiche Neutronen beobachtet. Beispiele sind  $RBE_1 = 12$  für dizentrische Chromosomenaberrationen in menschlichen Lymphozyten [2, 3], und, unter den besonders relevanten größeren tierexperimentellen Studien zur Tumorinduktion mit Spaltneutronen, als untere Grenze  $RBE_1 = 20$  für Mäuse [10, 11] und als obere Grenze  $RBE_1 = 50$  in den ausgedehnten experimentellen Studien von Lafuma et al. an Ratten [12, 13].

Um den Bereich möglicher Werte des Risikokoeffizienten für energiereiche Neutronen abzuschätzen, liegt es nahe, die dem Wertebereich 20-50 von  $RBE_1$  entsprechenden Werte von  $a_n$  zu berechnen. Hierzu können Daten von Hiroshima verwendet werden. Hinsichtlich der Daten von Hiroshima ist allerdings zu berücksichtigen, dass es sich um keine reine  $\gamma$ -Strahlung handelte, sondern dass sich – nach dem Dosimetriesystem von 1986, DS86 [14], und bestätigt durch neuere Untersuchungen – die Dosis 1 Gy in Hiroshima aus 0,985 Gy  $\gamma$ -Strahlung und einer Neutronendosis von 0,015 Gy zusammensetzt. Wird  $RBE_1 = 35$  als mittlerer Wert aus den Tierversuchen angenommen, so ist eine Neutronendosis von  $1/35$  Gy = 0,029 Gy der  $\gamma$ -Dosis von 1 Gy äquivalent. 0,015 Gy Neutronen haben demnach etwa 52 % der Wirkung von 1 Gy  $\gamma$ -Strahlung. Daraus folgt, dass den Neutronen ein Anteil von  $0,52/(0,52+0,985) = 35$  % der bei 1 Gy in Hiroshima beobachteten Wirkung,  $a_H$ , zuzuschreiben ist. Aus:

$$a_H = 0,015 a_n + 0,985 a_\gamma \quad \text{und:} \quad a_\gamma = a_n / 35 \quad (6)$$

ergibt sich daher:

$$a_n = 23 a_H \quad (7)$$

Wie in Abschnitt 3 festgestellt, entspricht  $a_H$  etwa dem von ICRP angegebenen Risikokoeffizienten für Photonen. Der hier aufgrund experimentell ermittelter  $RBE$ -Werte abgeleitete – auf die Energiedosis bezogene – Risikokoeffizient für Neutronen ist also 23mal höher als der gegenwärtig angenommene Risikokoeffizient für Photonen.

Analog ergeben sich bei Annahme der unteren Grenze  $RBE_1 = 20$  bzw. der oberen Grenze  $RBE_1 = 50$  relative Wirkungsanteile der Neutronen von 0,23 bzw. 0,44 bei 1 Gy in Hiroshima, und daher statt 23  $a_H$  Werte des Risikokoeffizienten von 15,9  $a_H$  bzw. 28,8  $a_H$ .

### 3.6 Strahlungs-Wichtungsfaktor für Neutronen

Der von der ICRP empfohlene und durch die EU-Grundnormen in Europa eingeführte Strahlungs-Wichtungsfaktor für Neutronen hat im für Spaltneutronen charakteristischen Energiebereich von 0,1 MeV bis 2 MeV den Wert  $w_R = 20$ . Dieser Wert ist nur wenig kleiner als der Wert von 23, der sich nach Abschnitt 5 aus den Hiroshima-Daten ergibt.

Hinsichtlich der Frage, ob Neutronen in der Definition der effektiven Dosis richtig bewertet werden, ist eine – im Rahmen der Unsicherheit von  $\pm 30\%$  ohnehin geringfügige – Divergenz von 15% (23 statt 20) zwischen Risikoschätzung und Strahlungs-Wichtungsfaktor an sich von untergeordneter Bedeutung. Wichtig für die Beurteilung ist jedoch eine Tatsache, die sich aus der Besonderheit der Definition des Strahlungs-Wichtungsfaktors ergibt, nämlich aus der Festsetzung der ICRP von 1990, dass bei externer Bestrahlung der Strahlungs-Wichtungsfaktor  $w_R$  auf das externe Strahlungsfeld zu beziehen ist, das die Organdosen im Menschen verursacht.

Ein externes Feld energiereicher Neutronen erzeugt in kleinen Versuchstieren, wie Ratten oder Mäusen, eine reine Neutronendosis, d.h. eine Dosis, die von schweren geladenen Teilchen erzeugt wird. In einem größeren Objekt, wie dem menschlichen Körper, ist die Situation komplizierter, da die externen Neutronen einen nennenswerten Teil der Dosis über den Umweg im Körper erzeugter  $\gamma$ -Strahlung verursachen. Bei der Analyse der Daten der Atombombenüberlebenden spielt dies keine Rolle, da nur der in den einzelnen Organen unmittelbar durch Neutronen erzeugte Beitrag als Neutronendosis berücksichtigt wird. Der hier abgeleitete Risikokoeffizient für Neutronen und der Bewertungsfaktor 23 beziehen sich also, sowohl hinsichtlich der Experimente als auch hinsichtlich der Analyse der Daten von Hiroshima, auf reine Neutronendosen. ICRP benützt dagegen bei der Definition der effektiven Dosis eine andere Konvention, die dem externen Neutronenfeld nicht nur die im Körper unmittelbar durch Neutronen erzeugte Dosis, sondern auch die über induzierte  $\gamma$ -Strahlung erzeugte Dosis zurechnet. Nach Festsetzung der ICRP ist  $w_R$  also auf die gesamte durch das externe Strahlungsfeld im Körper verursachte Dosis zu beziehen. Der Bewertungsfaktor  $w_R$  bezieht sich demnach auf eine gemischte Dosis im Körper, die sich aus einer Neutronendosis im eigentlichen Sinne und einer  $\gamma$ -Dosis zusammensetzt. Die eigentliche Neutronendosis im Körper wird dementsprechend faktisch höher bewertet als es aus dem Vergleich des Zahlenwertes von  $w_R$  mit dem oben abgeleiteten Bewertungsfaktor 23 für die reine Neutronendosis deutlich wird. Dies läßt sich durch Berechnung desjenigen Bewertungsfaktors für die gemischte Dosis verdeutlichen, der sich mit dem Faktor 23 für die reine Neutronendosis und dem Bewertungsfaktor 1 für die  $\gamma$ -Strahlungskomponente der Dosis ergibt.

Es sei  $f$  der Bruchteil der mit Hilfe der Gewebe-Wichtungsfaktoren über die Organe gemittelten Energiedosis, der durch die von den Neutronen im Körper erzeugte  $\gamma$ -Strahlung verursacht wird. Mit dem Bewertungsfaktor von 23 für die reine Neutronendosis ergibt sich dann ein gemittelter Bewertungsfaktor  $w_{23}$  für die gemischte Neutronen- $\gamma$ -Dosis aus der Gleichung:

$$w_{23} = 23 \cdot (1-f) + f \quad (8)$$

Für den Energiebereich 0,1 MeV bis 2 MeV, d.h. für den Bereich der wirksamsten Neutronenenergien, sind in Spalte 2 der Tabelle 1 die Strahlungs-Wichtungsfaktoren  $w_R$  der ICRP angegeben, in Spalte 3 die Werte  $f$ , die sich rechnerisch für eine (anterior-posteriore) Exposition des menschlichen Körpers ergeben [18], und in Spalte 4 die Wichtungsfaktoren  $w_{23}$ , die dem Wichtungsfaktor 23 für die eigentliche Neutronendosis - und daher dem hier für schnelle Neutronen abgeleiteten Risikokoeffizienten - entsprechen. Der Vergleich von  $w_R$  in Spalte 2 und  $w_{23}$  in Spalte 4 zeigt, dass die gegenwärtig benutzten Wichtungsfaktoren,  $w_R$ , für Neutronenenergien unterhalb 1 MeV konservativ sind. Bei Neutronenenergien unterhalb 0,1 MeV wird der Grad der Konservativität noch dadurch verstärkt, dass auch die experimentell beobachteten Werte der *RBE* in diesem Energiebereich deutlich abnehmen.

**Tabelle 1:** Der Strahlungs-Wichtungsfaktor  $w_R$  für die durch ein externes Neutronenfeld erzeugte gemischte  $\gamma$ - und Neutronendosis im Körper, der Anteil  $f$  der  $\gamma$ -Strahlung an der Energiedosis und der Faktor  $w_{23}$ , der dem Bewertungsfaktor 23 für die reine Neutronendosis und dem Bewertungsfaktor 1 für die  $\gamma$ -Komponente entspricht

Neutronenenergie MeV	Wichtungsfaktor für $\gamma$ - und Neutronen- Komponente $w_R$ (ICRP 60)	Relativer Dosisanteil der $\gamma$ -Komponente $f$	Dem Bewertungsfaktor 23 für die reine Neutronen- dosis entsprechender Bewertungsfaktor für beide Komponenten $w_{23}$
0,01	10	0,862	4,0
0,02	10	0,830	4,7
0,05	10	0,735	6,8
0,1	20	0,606	9,7
0,2	20	0,460	12,9
0,5	20	0,232	17,9
1	20	0,154	19,6
2	20	0,089	21,0

Tabelle 2 verdeutlicht die entsprechenden Berechnungen für das Beispiel eines Neutronenspektrums, wie es für einen CASTOR-Behälter charakteristisch ist. Über den Bereich der Neutronenenergie von 0,01 MeV bis 2 MeV sind – normiert auf 1  $\mu$ Gy – die gesamte durch die externen Neutronen erzeugten Dosisanteile, die Beiträge zur effektiven Dosis, die Beiträge zur reinen, d.h. direkt durch Neutronen erzeugten Dosis und schließlich die mit  $w_{23}$  statt mit  $w_R$  bewerteten Dosisbeiträge aufgelistet.

Der mit den Strahlungs-Wichtungsfaktoren  $w_R$  errechneten effektiven Dosis von 16,8  $\mu$ Sv steht eine mit dem Faktor 23 für die reine Neutronenkomponente und dem Bewertungsfaktor 1 für die Photonenkomponente bewertete Dosis von  $(23 \cdot 0,535 + 0,465) \mu$ Sv = 12,8  $\mu$ Sv gegenüber. Die gegenwärtig benutzten Strahlungs-Wichtungsfaktoren für Neutronen sind also im Fall eines moderierten Spaltneutronenspektrums gegenüber dem hier abgeschätzten Risikokoeffizienten für Spaltneutronen konservativ.

Die Werte in Tabelle 2 beziehen sich auf einen CASTOR-Transportbehälter. Die französischen und englischen Transportbehälter weisen ein stärker moderiertes, d.h. ein zu noch geringeren Neutronenenergien verschobenes Feld auf; die Strahlungs-Wichtungsfaktoren  $w_R$  liegen dann noch deutlicher auf der sicheren Seite.

**Tabelle 2:** Beiträge zur Dosis und zur effektiven Dosis durch das Neutronenspektrum eines CASTOR-Behälters [19] und Vergleich der effektiven Dosis, berechnet mit dem auf die externe Neutronenstrahlung angewandten Strahlungs-Wichtungsfaktor  $w_R$ , mit der Dosis, gewichtet mit dem Faktor  $w_{23}$ , die dem Wichtungsfaktor 23 für die reine Neutronendosis und dem Wichtungsfaktor 1 für die  $\gamma$ -Komponente entspricht.

Energie der externen Neutronenstrahlung (MeV)	Gesamtdosis durch externe Neutronen ( $\mu\text{Gy}$ )	Reine Neutronendosis ( $\mu\text{Gy}$ )	Effektive Dosis ( $\mu\text{Sv}$ )	Mit $w_{23}$ gewichtete Dosis ( $\mu\text{Sv}$ )
0,01 - 0,02	0,05	0,01	0,5	0,27
0,02 - 0,05	0,12	0,03	1,2	0,78
0,05 - 0,1	0,15	0,05	1,5	1,25
0,1 - 0,2	0,22	0,11	4,4	2,64
0,2 - 0,5	0,30	0,20	6,0	4,7
0,5 - 1	0,12	0,10	2,4	2,32
1 - 2	0,04	0,035	0,8	0,81
<b>insgesamt:</b>	<b>1</b>	<b>0,535</b>	<b>16,8</b>	<b>12,8<sup>2</sup></b>

### 3.7 Direkte Folgerungen zum Neutronenrisiko aus den Daten der Atombombenüberlebenden

Jede Übertragung tierexperimenteller Daten auf den Menschen ist mit Unsicherheit behaftet. Insofern kann die Ableitung des Risikokoeffizienten für Neutronen mit Hilfe experimentell bestimmter Werte der *RBE* von Neutronen die direkte Ableitung aus epidemiologischen Daten nicht ersetzen. Dies schien bisher aus den Daten von Hiroshima und Nagasaki wegen der notwendigen Extrapolation zu niedrigen Dosen nicht möglich.

Da, wie oben ausgeführt, jedoch der Beitrag der Neutronen in Hiroshima im Bereich höherer Dosen, wie 1 Gy, nicht unbedeutend ist, müsste er auch im Vergleich von Hiroshima und Nagasaki erkennbar werden. Nach DS86 [14] sind bei gegebener Gesamtdosis die Neutronendosen in Hiroshima dreimal größer als in Nagasaki. Der Unterschied der in Hiroshima und Nagasaki bei bestimmter Dosis beobachteten Wirkung repräsentiert daher – wenn von anderen Faktoren abgesehen werden kann –  $2/3$  des Beitrages der Neutronen in Hiroshima. Aufgrund dieser Überlegungen kann im Prinzip der Risikokoeffizient für Neutronen durch relativ einfache Berechnungen abgeleitet werden, sofern nur das Wirkungsverhältnis Hiroshima/Nagasaki (*city ratio*) mit genügender Genauigkeit bestimmt werden kann.

- Berechnungen auf der Basis der vorliegenden Inzidenzraten für solide Tumoren für Hiroshima und Nagasaki [16] ergeben den Wert 1,26 für das Wirkungsverhältnis Hiroshima/Nagasaki. Dies entspricht einem Wirkungsanteil der Neutronen von 30% in Hiroshima bei einer Gesamtdosis 1 Gy und dem Risikokoeffizienten  $a_n = 21 a_H$ . Dieser Wert stimmt

<sup>2</sup> Wird den Berechnungen statt des mittleren Wertes  $RBE_1 = 35$  aus den tierexperimentellen Daten die untere Grenze 20 oder die obere Grenze 50 zu Grunde gelegt, so errechnen sich - wie in Abschnitt 5 angegeben - statt des Faktors 23 die Werte 15,9 bzw. 28,8. Zusammen mit dem Bewertungsfaktor 1 für die Photonenkomponente ergeben diese Faktoren eine gewichtete Dosis von 8,8  $\mu\text{Sv}$  bzw. 15,9  $\mu\text{Sv}$ .

zwar gut mit der gegenwärtigen Risikoschätzung für Neutronen und mit dem Ergebnis überein, das aus den im Tierversuch ermittelten Werten der *RBE* abgeleitet wurde, jedoch ist diese Übereinstimmung nur von beschränkter Aussagekraft, da die Berechnung des Wirkungsverhältnisses Hiroshima/Nagasaki vorläufig ist und auf den von RERF freigegebenen Daten mit ihren großen Dosisintervallen beruht. Wichtiger ist, dass selbst diese Berechnungen eine enge obere Grenze für den Risikokoeffizienten der Neutronen setzen. Wenn das Wirkungsverhältnis Hiroshima/Nagasaki 1,5 wäre - ein Wert, der nach gegenwärtigem Kenntnisstand eher als unrealistisch hoch anzusehen ist - so entspräche das statt  $a_n = 21 a_H$  dem Wert  $a_n = 33 a_H$ . Selbst diese grobe Abschätzung zeigt bereits, dass auch ohne Bezug auf tierexperimentelle Studien zum *RBE* der Neutronen Risikokoeffizienten für Neutronen ausgeschlossen werden können, die - wie in früheren Diskussionen vermutet, aber schon allein aus den Daten von Hiroshima widerlegt [17] - den gegenwärtig angenommenen Wert weit überschreiten.

## 4 Zusätzlicher Kommentar

In einer Pressemitteilung der GSF wurde kürzlich festgestellt, dass Aktivierungsmessungen an Proben aus Hiroshima auf eine Unterschätzung der Neutronendosen im Bereich kleiner Dosen durch DS86 [14] hinweisen. Dies wurde in den öffentlichen Medien fälschlich nicht als Unterschätzung der Neutronendosis, sondern als Unterschätzung der Neutronenwirkung interpretiert. Tatsächlich bedeutet jedoch jede Erhöhung der Neutronendosen bei gegebenen Beobachtungen der Krebshäufigkeiten eine Erniedrigung und nicht eine Erhöhung des Risikokoeffizienten. Allerdings ist es unwahrscheinlich, dass die endgültige Klärung der Neutronendiscrepanz in Hiroshima zu einer wesentlichen Verringerung der Risikoschätzung für Neutronen führen wird. Der Grund dafür ist, dass die bisherigen Messungen von  $^{63}\text{Ni}$  in Kupferproben aus Hiroshima das Dosimetriesystem DS86 bei 1 Gy im wesentlichen bestätigten. Deutlich erhöhte Werte sind nur bei geringeren Gesamtdosen gefunden worden. Wenn sich diese bestätigen, so wird das die Risikoschätzung für Neutronen nicht ändern, sondern lediglich bedeuten, dass die  $\gamma$ -Strahlen weniger zu den bei geringen Dosen beobachteten Wirkungen beigetragen haben, dass also ein höherer *DDREF* für  $\gamma$ -Strahlen mit den epidemiologischen Beobachtungen vereinbar ist.

Zu kommentieren ist auch eine neuere Untersuchung, die einen relativ hohen Wert der *RBE* von Neutronen von etwa 70 für dizentrische Chromosomenaberrationen im Bereich kleiner Dosen ergeben hat [2]. Dieses schon in früheren Untersuchungen gefundene Ergebnis [15] wurde verschiedentlich als Hinweis auf eine Unterschätzung des Risikofaktors für Neutronen angesehen. Tatsächlich ergab sich jedoch [2,3] - wie anfangs erwähnt - ein relativ geringer Wert  $RBE_1 = 12$  für die *RBE* von Neutronen für Chromosomenaberrationen gegenüber einer  $\gamma$ -Dosis von 1 Gy. Dass die *RBE* unterhalb von 1 Gy  $\gamma$ -Strahlung noch um den Faktor von etwa 6 zunimmt, bedeutet nicht, dass die Neutronen - deren Dosisabhängigkeit ja linear ist - bei kleinen Dosen wirksamer werden; es ist lediglich Ausdruck der Tatsache, dass die Dosisabhängigkeit für  $\gamma$ -Strahlung unterhalb 1 Gy stark gekrümmt ist, d.h. die Wirksamkeit der  $\gamma$ -Strahlen sich bei kleinen Dosen deutlich verringert. Leitet man den Risikokoeffizienten für Neutronen mittels des Wertes  $RBE_1 = 12$  für Chromosomenaberrationen ab, so erhält man - analog der Berechnung für  $RBE_1 = 35$  - den relativ geringen Wert  $a_n = 10 a_H$ . Andererseits ergibt dann der hohe *DDREF* von 6 den niedrigen Risikokoeffizienten  $a_0 = 0,17 a_H$  für  $\gamma$ -Strahlung.

Die in Abschnitt 5 diskutierten Werte von 20 bis 50 für die *RBE* der Neutronen gegenüber 1 Gy  $\gamma$ -Strahlung beziehen sich auf tierexperimentelle Studien hinsichtlich der Induktion soli-

der Tumoren und sind nicht repräsentativ für Leukämien. Für Leukämien werden im Experiment deutlich geringere Werte der *RBE* von Neutronen beobachtet. Eine Berücksichtigung auch der Leukämien führt also zu einem etwas verringerten Risikokoeffizienten für Neutronen.

## 5 Literatur

- [1] International Commission on Radiological Protection:  
Annals of the ICRP. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3), Pergamon Press, Oxford (1991)
- [2] Schmid E, Regulla D, Guldbakke S, Schlegel D, Bauchinger M.:  
The effectiveness of monoenergetic neutrons at 560 keV in producing dicentric chromosomes in human lymphocytes at low doses. Radiat. Res. 154, 307-312 (2000)
- [3] Bauchinger M, Schmid E, Streng S, Dresch J.:  
Quantitative Analysis of the Chromosome Damage at First Division of Human Lymphocytes After  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ -Irradiation. Radiat. Env. Biophys. 22, 225-229 (1983)
- [4] National Council on Radiation Protection and Measurements:  
NCRP Report 64, Influence of dose and its distribution in time on dose-response relationships for low-LET radiations, NCRP, Bethesda (1980)
- [5] UNSCEAR:  
Sources and Effects of Ionizing Radiation, Vol. 2, Annex I, Epidemiological evaluation of radiation-induced cancer, 297-450. United Nations, New York (2000)
- [6] Pierce DA, Shimizu Y, Preston DL, Vaeth M, Mabuchi K:  
Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 12, Part I. Cancer. Radiat. Res. 146, 1-27 (1996)
- [7] Thompson DE, Mabuchi K, Ron E, Soda M, Tokunaga M, Oshikubo S, Sugimoto S, Ikeda T, Terasaki M, Izumi S, Preston DL:  
Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part II: Solid tumors, 1958-1987. Radiat. Res. 137, 17-67 (1994)
- [8] Preston DL, Kusumi S, Tomonaga M, Izumi S, Ron E, Kuramoto A, Kamada N, Dohy H, Matsuo T, Nonaka H, Thompson DE, Soda M, Mabuchi K:  
Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III. Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987. Radiat. Res. 137, S68-S97 (1994)
- [9] Kellerer AM, Barclay D:  
Age dependences in the modelling of radiation carcinogenesis. In: Age-Dependent Factors in the Biokinetics and Dosimetry of Radionuclides (DM Taylor, GB Gerber, JW Stather eds.). Radiat. Prot. Dosim. 41/2-4, 273-281 (1992)

- [10] Carnes BA, Grahn D, Thomson JF:  
Dose-response modeling of life in a retrospective analysis of the combined data from the Janus Program at Argonne National Laboratory. *Radiat. Res.* 119, 39-56 (1989)
- [11] Covelli V, Coppola M, Di Majo V, Rebessi S, and Bassini B:  
Tumor induction and life shortening in BC3F1 female mice at low doses of fast neutrons and x-rays. *Radiat. Res.* 113, 362-374 (1989)
- [12] Lafuma J, Chmelevsky D, Chameaud J, Morin M, Masse R, Kellerer AM:  
Lung carcinomas in Sprague-Dawley rats after exposure to low doses of radon daughters, fission neutrons, or  $\gamma$ -rays. *Radiat. Res.* 118, 230-245 (1989)
- [13] Wolf C, Lafuma J, Masse R, Morin M, Kellerer AM:  
Neutron RBE for induction of tumors with high lethality in Sprague-Dawley rats. *Radiat. Res.* 154, 412-420 (2000)
- [14] US-Japan Joint Reassessment of Atomic Bomb Radiation Dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, Vols.1, 2 (WC Roesch ed.). RERF, Hiroshima (1987)
- [15] Dobson RL, Straume T, Carrano AV, Minkler JL, Deaven LL, Littlefield LG, Awa AA:  
Biological effectiveness of neutrons from Hiroshima bomb replica: results of a collaborative cytogenetic study. *Radiat. Res.* 128, 143-149 (1991)
- [16] Kellerer AM, Walsh L:  
Risk coefficient for fast neutrons with regard to solid cancer  
(submitted for publication)
- [17] Kellerer AM, Nekolla E:  
Neutron versus  $\gamma$ -ray risk estimates. Inferences from the cancer incidence and mortality data in Hiroshima. *Radiat. Environ. Biophys.* 36, 73-83 (1997)
- [18] Dietze G, Siebert BRL:  
Photon and neutron dose contributions and mean quality factors in phantom of different size irradiated by monoenergetic neutrons. *Radiat. Res.* 140, 30-133 (1994)
- [19] Bentele W, Kinzelmann Th:  
Erfahrungen mit dem Beladen und dem Transport von Brennelement-Behältern einschließlich CASTOR-Behältern und die Strahlenexposition von Mitarbeitern und Begleitpersonal. *Atw* 45, Heft 4, 225-229 (2000)