

## Strahlenschutz

# Neutronen als Strahlenschutzproblem bei Atommülltransporten

Von Inge Schmitz-Feuerhake\*

**Der Transport verglaster hochradioaktiver Abfälle im November 2008 von der französischen Wiederaufarbeitungsanlage für abgebrannte Brennelemente La Hague in das Zwischenlager nach Gorleben erfolgte in französischen Transportbehältern. Etwa 80 Prozent der nach offizieller Dosisbestimmung von ihnen ausgehenden Exposition wird durch Neutronen erzeugt. Würde man die biologische Wirkung von Neutronen deutlich höher einschätzen, als dieses in der Strahlenschutzverordnung angenommen wird, käme es zu einer Grenzwertüberschreitung. Über die Wirkung von dicht ionisierender Strahlung, zu der Neutronen gerechnet werden, gibt es seit langem Debatten in der Wissenschaft. Die Argumente von Kritikern des offiziellen Strahlenschutzes, die in der Vergangenheit eine erhebliche Unterschätzung der Neutronenwirkung geltend gemacht haben, werden durch neuere Befunde an Flugpersonal und anderen menschlichen Kollektiven, die dicht ionisierender Strahlung ausgesetzt waren, gestützt.**

## Einleitung

Anlässlich des Transports von verglasten hochradioaktiven Abfällen vom 7. bis 11. November 2008 von La Hague nach Gorleben wurden im Auftrag von Greenpeace Deutschland e.V. Messungen der von den 11 französischen Transportbehältern vom Typ TN 85 ausgehenden Neutronenstrahlung durchgeführt. Die Autoren Becker und Smital kommen zu dem Schluss, dass zusammen mit der austretenden Gammastrahlung nur etwa 20 Prozent des verkehrsrechtlichen Grenzwerts von 0,1 Millisievert pro Stunde (mSv/h) in 2 Metern Abstand vom Behälter erreicht werden. Es ergab sich eine „verhältnismäßig gute“ Übereinstimmung mit den von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) schon vor der Versendung in Frankreich an den Behältern gemessenen Werten.

Die Autoren halten die Ergebnisse dennoch für bedenklich, da die Dosiswerte nur aufgrund der derzeit gültigen Bewertung der biologischen Wirkung von Neutronen in der deutschen Strahlenschutzverordnung im Rahmen des Erlaubten liegen. Diese Bewertung ist aber wissenschaftlich umstritten. In der Tat gibt es gewichtige Gründe, von einer erheblich höheren Gefährdung durch Neutronen auszugehen, als diese Dosisangaben unterstellen. Der Neutronenanteil beträgt etwa 80 Prozent der jeweiligen Messergebnisse.

Greenpeace hatte bereits 1996 anlässlich des dritten Gorleben-transportes eine Kampagne

zur realistischeren Einschätzung von Neutronenwirkungen durchgeführt [Hirsch 1997] und sich dabei weitgehend auf die Arbeiten des Nuklearmediziners Kuni berufen. Dieser hatte sich bereits in den 1980er Jahren im Rahmen eines vom Bundesministerium für Forschung und Technologie geförderten Projektes des Deutschen Gewerkschaftsbundes: „Arbeitsbedingungen in nuklearen Wiederaufarbeitungsanlagen“ mit den vernachlässigten Gefährdungen durch Neutronen beschäftigt.

Den Forderungen von Umweltschutzverbänden [Dannheim u.a. 2000], bei der letzten Novellierung der Strahlenschutzverordnung die Neutronenbewertung drastisch anzuheben, ist die Bundesregierung nur in marginaler Weise nachgekommen.

Im Gegensatz dazu haben sich in den letzten Jahren die Erkenntnisse über die Wirkungen von Neutronen im obigen Sinne erhärtet, so dass erneute Anstrengungen erforderlich sind, um einen besseren Schutz vor Neutronen zu erreichen.

## Die Besonderheit der Neutronen innerhalb der verschiedenen Arten radioaktiver Strahlung

Die Atomkerne bestehen aus zwei Sorten von Teilchen, den positiv geladenen Protonen und den ungeladenen, also elektrisch neutralen Neutronen. Beide haben nahezu völlig gleiches Gewicht. Der Kern des einfachsten Atoms im System der chemischen Elemente – das häufigste Isotop des Wasserstoffs – wird durch ein Proton gebildet, in dessen Atomhülle sich ein Elektron befindet.

2 Protonen und 2 Neutronen bilden einen besonders stabilen Atomkern (den von Helium) und treten bei Abstrahlung aus einem schwereren Kern als „Alphateilchen“ auf. Alphateilchen werden als 2-fach geladene und verhältnismäßig schwere Korpuskel

schnell in Materie abgebremst (1 Blatt Papier genügt zur Abschirmung!). Sie gehören zur „ionisierenden“ Strahlung, denn sie geben ihre hohe Bewegungsenergie zum Teil dadurch ab, dass sie neutrale Moleküle ionisieren. Ionisieren heißt, dass Elektronen aus der äußeren Hülle von Atomen und Molekülen abgesprengt werden. Die so entstandenen elektrisch geladenen „Ionen“ reagieren mit anderen Molekülen und können im Gewebe zu Mutationen in dem Erbmolekül, der DNA, führen.

Abbildung 1 zeigt die Bahnen von Alphateilchen in Luft anhand von kleinen Wassertropfchen in einer sogenannten Nebelkammer. Es handelt sich um ein mit Luft und Wasserdampf gefülltes Gefäß, in das ein punktförmiges Radiumpräparat unten angebracht ist. Das Radium sendet Alphateilchen aus, die entlang ihres Weges die Luftmoleküle ionisieren. Wird nun das Kammervolumen vergrößert, kühlt sich die Luft ab und ein Teil des Wasserdampfes kondensiert zur flüssigen Phase. In sehr reiner Luft benötigt er dazu aber Kondensationskerne. Diese werden durch die entstandenen Ionen entlang der Bahn des Alphateilchens gebildet. Die Spur der mit bloßem Auge sichtbaren Nebeltropfchen entspricht also dem Weg eines Alphateilchens in Luft, bis am Ende der Bahn die gesamte Bewegungsenergie verbraucht ist.

Die Weglänge in Luft von Alphateilchen beträgt einige Zentimeter. In Abbildung 1 sieht man zwei Gruppen mit unterschiedlicher Weglänge. Das kommt daher, dass Radium Alphateilchen in zwei verschiedenen Energiebereichen abstrahlt. In Gewebe, das etwa 1.000 mal so dicht ist wie Luft, ist die Weglänge etwa 1.000 mal geringer (also einige Hundertstel Millimeter (mm) bzw. einige 10 Mikrometer ( $\mu\text{m}$ )).

\* Prof. Dr. Inge Schmitz-Feuerhake, Köln, Gesellschaft für Strahlenschutz e.V., [ingesf@uni-bremen.de](mailto:ingesf@uni-bremen.de)

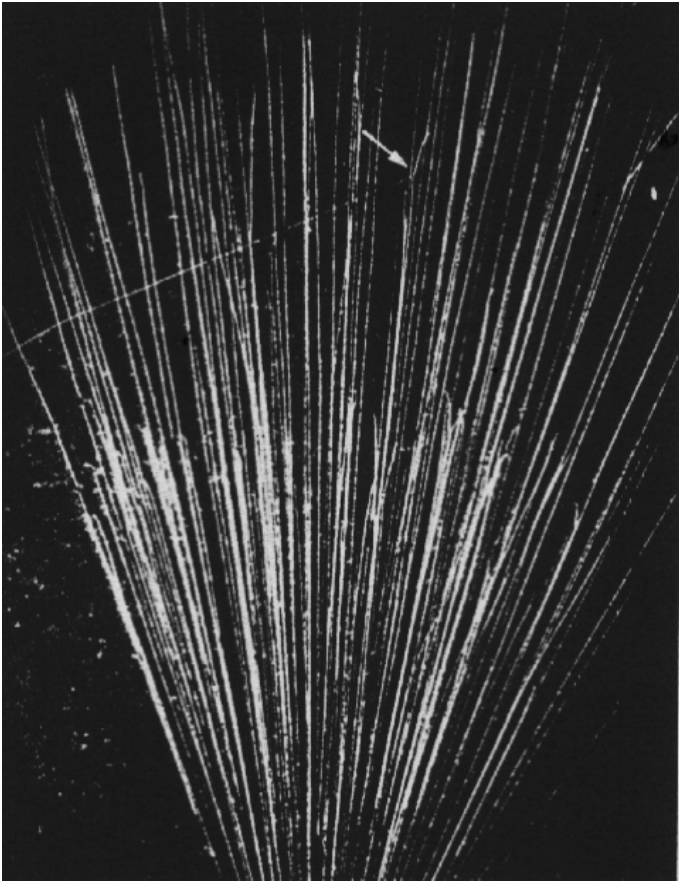


Abbildung 1: **Spuren von Alphateilchen aus einer Radiumquelle in einer Nebelkammer** (aus Gerthsen Physik, H. Vogel 1995)

Radium und seine Folgeprodukte senden Alphateilchen in 2 verschiedenen Energiebereichen aus. Daher zeigen sich 2 Gruppen von Weglängen.

Am Ort des Pfeils findet eine Kernreaktion statt. Ein Stickstoffkern absorbiert ein Alphateilchen, der neue Kern wandelt sich in einen Sauerstoffkern um, indem er ein Proton aussendet (lange feine Spur nach links).

Alphateilchen werden zur „dicht ionisierenden“ Strahlung gerechnet, weil sie ihre Energie auf so kurzer Strecke abgeben.

Betateilchen – also 1-fach negativ geladene Elektronen – würden in der Nebelkammer ebenfalls Ionisationen auslösen, fliegen aber wegen ihrer sehr viel geringeren Masse je nach Energie in Luft einige Meter weit, in Gewebe entsprechend einige Millimeter. Ihre erzeugten Nebeltröpfchen in der Kammer liegen so weit auseinander, dass man sie mit dem bloßen Auge nicht erkennt. Man spricht von „lokker ionisierender“ Strahlung.

Zur Gruppe der locker ionisierenden Strahlung werden ferner die Röntgen- und Gammastrahlen gezählt, elektroma-

gnetische Wellenstrahlungen von hoher Energie. Sie übertragen nämlich in Materie ihre Energie auf Elektronen, also wiederum auf die 1-fach geladenen leichten Korpuskel.

In Abbildung 1 sieht man einen Querschläger. Am Ort des Pfeils passiert eine Kernreaktion. Ein Alphateilchen trifft auf einen Stickstoffkern, dringt in denselben ein und dann wird ein Proton herausgeschossen, das die linke dünnere Spur bildet. Der entstehende Kern ist der eines Sauerstoffisotops. Protonen sind ebenfalls dicht ionisierend. Sie sind für unsere Fragestellung wichtig, weil schnelle Neutronen ihre Energie in Luft und Gewebe vorzugsweise auf Protonen übertragen.

Neutronen sind unter Strahlenschutzaspekten unangenehm, da sie als elektrisch neutrale Teilchen die Materie gut durchdringen können. Sie können nicht wie die Alpha-, Beta- und Gammastrahlung gut durch schweres Material wie Blei abgeschirmt werden, oder in den Transportbehältern durch Stahl. Sie reagieren je nach Energie auf verschiedene Weise mit Materie. Vorzugsweise bei niedriger Energie dringen sie in Atomkerne ein und machen sie radioaktiv. Dadurch entstehen in Kernreaktoren sehr viele radioaktive Stoffe (Aktivierungsprodukte), die meistens Betastrahler sind. In den schweren Atomkernen der Kernbrennstoffe (üblicherweise Uran) entstehen durch Neutronenbeschuss noch schwerere gefährliche Transurane (zum Beispiel Plutonium).

Neutronen können schwere Atome spalten, wie es in Kernreaktoren ausgenutzt wird. Bei hoher Energie kann man die Neutronen durch leichtes Material abbremsen, da sie dann ihre Energie durch elastische Stöße übertragen. Am besten funktioniert das bei Wasserstoff (Protonen) wegen der gleichen Masse. Wasser und Kunststoffe sind daher als Abschirmmaterial geeignet. In Gewebe werden schnelle Neutronen ebenfalls wegen des hohen Wassergehalts durch elastische Stöße gebremst, d.h. es werden Protonen als ionisierende Teilchen in Gang gesetzt.

Im natürlichen Strahlenumfeld des Menschen spielen Neutronen kaum eine Rolle. Die Atomkerne schwerer Stoffe in den Mineralien wie Uran zerfallen zu einem gewissen Anteil durch „spontane“ Spaltung in leichtere Kerne, dabei werden Neutronen freigesetzt. Ihr Dosisbeitrag zur Exposition ist gegenüber der natürlichen Alpha-, Beta- und Gammastrahlung vernachlässigbar.

In der Höhenstrahlung sind ebenfalls Neutronen enthalten.

Diese entsteht dadurch, dass hochenergetische geladene Teilchen aus dem Weltraum in die Erdatmosphäre eindringen. Durch Reaktionen mit den dort vorhandenen Stoffen werden auch schnelle Neutronen freigesetzt. Im Vakuum ist ihre Lebensdauer begrenzt, denn sie zerfallen spontan mit einer Halbwertszeit von 10 Minuten in ein Proton und ein Elektron (Betateilchen).

Die Neutronen in der Höhenstrahlung werden durch Kernprozesse in der Atmosphäre so weit abgebremst und umgewandelt, dass sie in Meereshöhe praktisch keinen nennenswerten Beitrag zur Exposition liefern. Das ändert sich aber mit zunehmender Höhenlage.

Der Neutronenanteil im Atommüll kommt dadurch zustande, dass einerseits schwere Atomkerne wie Uran und Transurane spontan zerfallen und dabei schnelle – sehr energiereiche – Spaltneutronen aussenden. Andererseits werden Kernreaktionen durch die mannigfach vorhandenen Alphastrahlen in den umgebenden Materialien ausgelöst, bei denen ebenfalls vorzugsweise schnelle Neutronen freigesetzt werden.

Der breite Energiebereich, in dem Neutronen in der Höhenstrahlung, in der Kerntechnik und im Atommüll auftreten, macht wegen der unterschiedlichen Wechselwirkungen mit Materie nicht nur die messtechnische Erfassung besonders schwierig, sondern auch die Beurteilung der biologischen Folgen.

### Dosisbegriff und Strahlungswichtungsfaktoren für Neutronen

Die internationale Strahlenschutzkommission (ICRP), auf deren Empfehlungen die deutsche Strahlenschutzverordnung beruht, hat die Dosis-einheit Sievert (Sv) eingeführt, die alle Bestrahlungsar-

ten vergleichbar machen soll. Sie heisst deshalb „Äquivalentdosis“. Die Äquivalentdosis soll jeweils das Maß für die biologische Wirkung in dem bestrahlten Gewebe sein – nach ICRP die dort ausgelöste Krebserkrankung bzw. bei Bestrahlung der Gonaden die genetischen Folgen für die Nachkommen.

Physikalisch ist die Dosis definiert als eine absorbierte Energie pro Kilogramm (kg) Gewebe, die „Energiedosis“ in Joule/kg. Sie wird in der Einheit Gy (Gray) gemessen. 1 Gy entspricht 1 Joule/kg.

Die verschiedenen Strahlen haben jedoch bei gleicher Energiedosis verschiedene Wirkungen im Gewebe. Dicht ionisierende Strahlung hat aufgrund der genannten sehr viel höheren Energieabgabe pro Wegstrecke in Zellen eine viel höhere Wirkung als Röntgen-, Gamma- oder Betastrahlung. Daher wird die Energiedosis mit einem Strahlungswichtungsfaktor  $w_R$  versehen, um die Äquivalentdosis zu erhalten. Für Alphastrahlen hat dieser nach ICRP den Wert 20. Allgemein wird angesetzt:

Äquivalentdosis in Sv =  $w_R \times$  Energiedosis in Gy

Die Referenzstrahlung ist Röntgenstrahlung von 250 kVp Erzeugerspannung. Für sie wird  $w_R = 1$  gesetzt. Aber auch für alle anderen locker ionisierenden Strahlen nimmt die ICRP  $w_R = 1$  an. Bei diesen soll die Äquivalentdosis also gleich der Energiedosis sein.

Natürliche und zivilisationsbedingte Strahlenexpositionen im System der so definierten Äquivalentdosis sind in Tabelle 1 angegeben.

Für Neutronen werden wegen des komplexen Verhaltens in Materie in Abhängigkeit von der Energie verschiedene Strahlungswichtungsfaktoren angesetzt, siehe Tabelle 2. Um diese Werte geht es in der De-

Tabelle 1: Exposition durch natürliche und zivilisatorische Strahlenquellen

| Quelle                              | Dosis          | Bemerkungen           |
|-------------------------------------|----------------|-----------------------|
| Natürlicher Untergrund              | ca. 1 mSv/Jahr | Ganzkörperdosis       |
| Höhenstrahlungsanstieg in 1500 m    | 0,3 mSv/Jahr   | Ganzkörperdosis       |
| Radon in Häusern                    | 5 – 50 mSv     | Mittlere Lungendosis  |
| Konventionelles Röntgen             | < einige mSv   | Mittlere Gewebisdosis |
| Computertomographie                 | 10 – 100 mSv   | Mittlere Gewebisdosis |
| Strahlentherapie                    | einige 10 Sv   | Mittlere Gewebisdosis |
| Grenzwert für berufliche Exposition | 20 mSv/Jahr    | Effektive Dosis*      |
| Grenzwert für die Bevölkerung       | 1 mSv/Jahr     | Effektive Dosis*      |

\* entspricht einer nach Organempfindlichkeit gewichteten Ganzkörperdosis, ist bei homogener Bestrahlung gleich der Ganzkörperdosis

batte um die richtige Einschätzung ihrer Gefährlichkeit.

Die in unseren Leichtwasserreaktoren abgebremsten Neutronen, die weitere Urkerne spalten sollen, um die Kettenreaktion aufrecht zu erhalten, heißen thermische Neutronen und liegen im Energiebereich größer als 0,2 Elektronenvolt (eV). Sie gehören zur 1. Gruppe in Tabelle 2. „Epithermische“ Neutronen liegen im Energiebereich 0,2 eV bis 100 Kiloelektronenvolt (keV).

Neutronen von höherer Energie werden „schnelle“ Neutronen genannt, bis zur Energie 2 Megaelektronenvolt (MeV) werden sie nach Tabelle 1 mit dem höchsten  $w_R$  von 20 versehen. Diese übertragen in Gewebe ihre Energie vorzugsweise auf Wasserstoffkerne, d.h. Protonen. Protonen größer 2 MeV haben nach Strahlenschutzverordnung ein  $w_R = 5$ .

Die Energieverteilung der Neutronen bei den jetzt verwendeten französischen Behältern wurde beim Transport im November 2008 nicht mitgeteilt. Das Neutronenspektrum eines typischen früher verwendeten CASTOR-Behälters ist in Tabelle 3 angegeben.

Danach liegen 87,8 Prozent der abgestrahlten Neutronen im Energiebereich mit dem Strahlungswichtungsfaktor 20 und gehören zu den schnellen Neutronen.

Tabelle 2: Strahlungswichtungsfaktoren für Neutronen nach Strahlenschutzverordnung

| Energiebereich      | Strahlungswichtungsfaktor $w_R$ |
|---------------------|---------------------------------|
| < 10 keV            | 5                               |
| 10 keV bis 100 keV  | 10                              |
| > 100 keV bis 2 MeV | 20                              |
| > 2 MeV bis 20 MeV  | 10                              |
| > 20 MeV            | 5                               |

Tabelle 3: Neutronenspektrum am Mantel eines CASTOR aus [DGB 1986]. Unterstrichener Bereich:  $w_R = 20$

| Energiebereich             | relativer Anteil in Prozent |
|----------------------------|-----------------------------|
| 0 bis 10 keV               | 4,5                         |
| 10 keV bis 100 keV         | 6,7                         |
| <u>100 keV bis 400 keV</u> | <u>36,7</u>                 |
| <u>400 keV bis 900 keV</u> | <u>42,4</u>                 |
| <u>900 keV bis 2 MeV</u>   | <u>8,7</u>                  |
| 2 MeV bis 3 MeV            | 0,6                         |
| 3 MeV bis 3,7 MeV          | 0,073                       |
| 3,7 MeV bis 4,5 MeV        | 0,065                       |
| 4,5 MeV bis 5,5 MeV        | 0,082                       |
| 5,5 MeV bis 6,7 MeV        | 0,042                       |
| 6,7 MeV bis 10 MeV         | 0,036                       |
| > 10 MeV                   | 0,0048                      |

### Bedeutung der Biologischen Dosimetrie für die Beurteilung von Strahlenfolgen im Niederdosisbereich

Eine sehr hilfreiche Information über eine stattgefundene Strahlenexposition liefert die Biologische Dosimetrie mittels Chromosomenaberrationen. Es ist schon sehr lange bekannt, dass dizentrische Chromosomen (Abbildung 2) in weißen Blutkörperchen ein sehr empfindlicher und spezi-

fischer Nachweis für eine Strahlenbelastung sind. Sie können aus einer Blutprobe bestimmt werden.

Dizentrische Chromosomen sind normalerweise nur sehr selten aufzufinden. Nach diagnostischer Röntgenstrahlung findet man sie nur einzeln auftretend in einer Zelle.

Abbildung 3 zeigt eine Zelle nach Durchgang eines Alpha-Teilchens. Durch ihre hohe Energieabgabe pro Wegstrecke kommt es zur Ausbildung

von Mehrfach-Aberrationen innerhalb eines Zellkerns. Hier sind es mehrere dizentrische Chromosomen und einige trizentrische. Derartige Anhäufungen sind ein charakteristisches Merkmal bei dicht ionisierender Strahlung, auch für Neutronen und Protonen, die die Körpergewebe durchsetzen.

**Biologische Wirksamkeit von Neutronen**

Bereits 1986 schlug die ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements), die im Auftrag der ICRP eine Aktualisierung der Strahlungswichtungsfaktoren vorgenommen hatte, ein  $w_R = 25$  für Neutronen aller Energien vor, also eine deutliche Anhebung der Werte in Tabelle 2. Grundlage waren eine Reihe von Ergebnissen aus der experimentellen Forschung mit Neutronen (an Zellsystemen und Säugetieren). Die ICRP hat dieses ohne nachvollziehbare Begründung ignoriert.

Kuni hat im folgenden die zunehmend publizierten Befunde über dicht ionisierende Strahlung aus dem Niederdosisbereich analysiert. Es hatte sich in einer Reihe von Arbeiten mit Tiermodellen und bei Menschen mit inkorporierten Alphastrahlern gezeigt, dass Tumorbildungen und andere Effekte bei abnehmender Dosis- und Dosisleistung nicht dosisproportional abnehmen, sondern – entgegen den Erwartungen – relativ ansteigen. Im Vergleich mit der Referenz-Röntgenstrahlung war somit eine Zunahme der Relativen Biologischen Wirksamkeit (RBW) – das ist die Größe, die durch den  $w_R$  schematisch repräsentiert werden soll – mit sinkender Dosis- und Dosisleistung zu beobachten. Diesen Anstieg bewertete Kuni mit mindestens einem Faktor 3, so dass  $w_R = 75$  zu verwenden wäre. Erste Befunde an Flugpersonal, das einem erhöhten Pegel

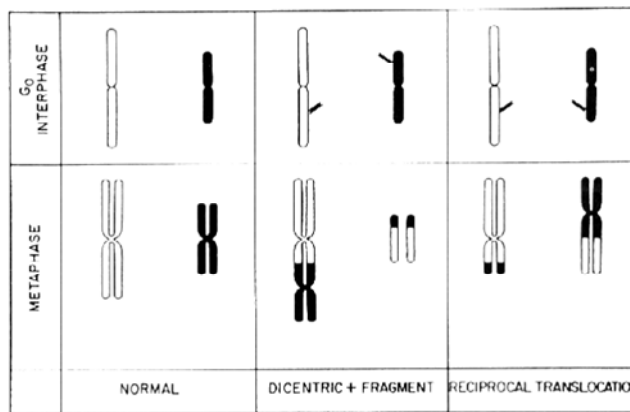


Abbildung 2: **Strahleninduzierte interchromosomale Aberrationen**



Abbildung 3: **Multiaberrante Zelle**

an Neutronen und Protonen ausgesetzt ist, und Analysen zum Neutronenanteil in der Hiroshima- und Nagasaki-Strahlung bestärkten ihn in seiner Einschätzung.

Diese Beurteilung erhärtet sich in neuerer Zeit unter anderem durch weitere Untersuchungen an Flugpersonal. Die Dosis wird mit den Vorgaben von ICRP und Strahlenschutzverordnung je nach Flughöhe zu 2 bis 5 mSv jährlich angegeben [Buja u.a. 2005]. Demgegenüber zeigen Chromosomenaberrationen in Flugpersonal an, das derartig kleine Jahresdosen den Effekt nicht erklären können [Hei-

mers u.a. 1995]. Auch eine biologische Dosimetrie bei 18 Concorde-Piloten, die in 18 bis 20 km Höhe fliegen, ergab, dass die biologische Wirkung der Neutronen und Protonen in der Höhenstrahlung unterbewertet wird [Heimers 2000]. Die Rate der dizentrischen Chromosomen war bei ihnen im Mittel zehnfach erhöht.

Heimers hat am europäischen Forschungszentrum CERN in Genf eine Bestimmung der RBW von Höhenstrahlung und separat von Neutronen vorgenommen [2000]. Dort besteht eine Einrichtung, in der die Zusammensetzung der

Höhenstrahlung und ihre Dosisleistung in ziviler Flughöhe nachgebildet werden kann. Bei Blutproben, die diesem Strahlenfeld ausgesetzt waren, wurden die erzeugten Chromosomenaberrationen ausgewertet. Für Neutronen ergab sich eine RBW von 105.

Nach Lindborg u.a. [2007] wird etwa die Hälfte der Dosis beim Flugpersonal durch Neutronen und ihre Wechselwirkungsprodukte im Gewebe gebildet, sofern die Energiedosis nach dem Schema der Tabelle 2 gewichtet wird. Die ersten Beobachtungen über Krebserkrankungen betrafen Hirn- und Hauttumore sowie Brustkrebs bei weiblichen Flugbegleitern. Die weibliche Brust ist das strahlenempfindlichste Gewebe bei Erwachsenen [Kuni u.a. 2003].

Untersuchungsergebnisse aus zusammenfassenden Studien über Flugpersonal sind in Tabelle 4 angegeben. Aufgeführt sind hier nur signifikante Ergebnisse und das für die bekannte Strahlenkrankheit Leukämie. Da diese eine sehr seltene Erkrankung ist und die untersuchten Kollektive nicht sehr umfangreich sind, ist die gefundene Erhöhung dennoch bemerkenswert.

Unter dem relativen Risiko versteht man das Verhältnis der Krebsrate in der exponierten Gruppe zu der (altersstandardisierten) Krebsrate in der Kontrollgruppe, hier der Normalbevölkerung.

Die gefundene Höhe der Effekte ist nicht annähernd kompatibel mit den physikalisch bestimmten Dosen in Flugzeugen. Umgekehrt ist ein quantitativer Rückschluss auf die Neutronen-RBW aus diesen Untersuchungen nicht möglich.

Die von Heimers gefundene Neutronen-RBW bei dizentrischen Chromosomen von 105 ist nicht unbedingt verbindlich für strahlenbedingten Krebs, da es sich um einen anderen Effekt im genetischen Mate-

rial der Zelle handelt als bei der Krebsinduktion. Zu einem ganz ähnlichen Ergebnis kommen aber Kellerer und Mitarbeiter [2006] bei der Analyse des Neutronenanteils in der Atombombenstrahlung von Hiroshima und Nagasaki, für die in der konventionellen Auswertung eine RBW von 10 verwendet wird. Durch die Körperabschirmung werden Organe an der Körperoberfläche relativ höheren Neutronendosen ausgesetzt, und da die berechneten Dosen zu relativ höheren Krebsraten führen, kann das auf die falsche Bewertung der Neutronenwirkung zurückgeführt werden. Die Autoren schließen aus ihren Untersuchungen auf eine RBW – und damit ein  $w_R$  – von etwa 100.

Insgesamt lässt sich aus den Ergebnissen von Kuni, Heimers und Kellerer u.a. derzeit für den  $w_R$  der Neutronen ein Mittelwert von etwa 90 ableiten. Damit wäre der Ansatz nach Strahlenschutzverordnung um mindestens den Faktor 4,5 unterschätzt.

### Die Frage der Übertragbarkeit von Risikoangaben, die anhand der japanischen Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki gewonnen wurden

Die Grenzwerte für die Bevölkerung durch zivilisationsbedingte Strahlenbelastungen und die deutlich höheren für beruflich Strahlenexponierte (Tabelle 2) wurden von der ICRP empfohlen. Sie orientieren sich an den Vorstellungen der ICRP über die Höhe des Strahlenrisikos, die sie aus Befunden an Personen in Hiroshima und Nagasaki abgeleitet hat, die 1945 die Atombombenabwürfe überlebten. Von diesen wurde ein sehr großes Kollektiv (anfänglich etwa 120.000 Personen) ab 1950 bis in die Gegenwart – also über einen sehr großen Zeitraum – durch ein japanisch-amerikanisches Forschungsinstitut untersucht.

Tabelle 4: **Meta-Analysen über Krebserkrankungen bei Flugpersonal.** Auszug von Ergebnissen [Tokumaru u.a. 2006; Buja u.a. 2005]

| Art der Erkrankung                | Anzahl ausgewerteter Studien | Relatives Risiko | Vertrauensbereich |
|-----------------------------------|------------------------------|------------------|-------------------|
| <b>Stewardessen</b>               |                              |                  |                   |
| Brustkrebs                        | 5                            | 1,41             | 1,22-1,62         |
| Melanome                          | 5                            | 2,13             | 1,58-2,88         |
| <b>männliches Kabinenpersonal</b> |                              |                  |                   |
| alle Krebserkrankungen            | 3                            | <b>1,67</b>      | 1,14-2,45         |
| 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         |

Tabelle 5: **Strahleninduzierte genetische Effekte/Krebs im Kindesalter nach präkonzeptioneller Niederdosisbestrahlung**

| Bestrahtetes Kollektiv                                  | Krankheit           | Gonadendosis in mSv | Relatives Risiko |
|---|---------------------|---------------------|------------------|
| <b>Seascale Väter (Gardner u.a. 1990)</b>               |                     |                     |                  |
| alle Stadien der Spermatogenese 6 Monate vor Konzeption | Leukämie + Lymphome | 200<br>10           | 7<br>7           |
| Sellafield Arbeiter (Dickinson, Parker 2002)            | "                   |                     | 1,9              |
| Beruflich exponiert W.Cumbria (McKinney u.a. 1991)      | "                   |                     | 3,2              |
| <b>Präkonzeptionelle Röntgendiagnostik</b>              |                     |                     |                  |
| Väter (Graham u.a. 1966)                                | Leukämie            |                     | 1,3              |
| Väter (Shu u.a. 1988)                                   | Leukämie            | 3-30                | 1,4-3,9          |
| Väter (Shu u.a. 1994)                                   | Leukämie            |                     | 3,8              |
| Mütter (Stewart u.a. 1958)                              | Leukämie            |                     | 1,7              |
| Mütter (Graham u.a. 1966)                               | Leukämie            |                     | 1,7              |
| Mütter (Natarajan, Bross 1973)                          | Leukämie            |                     | 1,4              |
| Mütter (Shiono u.a. 1980)                               | Krebs               |                     | 2,6              |
| Berufliche Exposition (Hicks u.a. 1984)                 | Krebs               |                     | 2,7              |

Der große Zeitraum ist wichtig, da außer Leukämie die meisten strahlenbedingten Krebserkrankungen erst viele Jahre nach der Bestrahlung auftreten.

Ionisierende Strahlung ist mutagen und karzinogen. Die ICRP betrachtet für niedrige Dosen ausschließlich diese Effekte bei Kindern und Erwachsenen. Die Wirkungen auf Embryonen und Feten im Mutterleib hält sie für vernachlässigbar.

Aus den Ergebnissen an den Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki leitet sie das Risiko für Krebs wie folgt ab: Wenn man eine Bevölkerung (aller Alter) mit

1 Sievert (Sv) bestrahlt, werden 5,5 Prozent davon eine strahlenbedingte Krebserkrankung erleiden [ICRP 2007]. Wenn man nach Tabelle 2 das Radon in der Lunge außer Acht lässt, das für 5 bis 10 Prozent des bei uns beobachteten Lungenkrebses verantwortlich sein soll, erzeugen 1 Millisievert (mSv) jährlich an natürlicher Strahlenexposition 1 Tausendstel von 5,5 Prozent Krebserkrankungen, d.h. in 100.000 Personen werden jährlich 5,5 Krebstode durch natürliche Strahlung erzeugt. Die Folgen von 1 mSv pro Jahr zusätzlich hält die ICRP daher für vernachlässigbar.

Der Grenzwert von 0,1 mSv

pro Stunde am CASTOR-Transportbehälter in 2 Meter Entfernung bedeutet, dass der Grenzwert für die Bevölkerung bei zivilisatorischen Expositionen von 1 mSv pro Jahr in 10 Stunden Aufenthalt erreicht wird.

Es gibt aber mindestens zwei Gründe, weshalb die Ergebnisse von Hiroshima und Nagasaki nicht auf dicht ionisierende Strahlungen übertragbar sind, weil die Überlebenden überwiegend einer Gammastrahlung von hoher Dosisleistung (Dosis pro Zeiteinheit) ausgesetzt waren, einer „Blitzbestrahlung“ (den radioaktiven Fallout der Bomben hält man für vernachlässigbar).

Erstens hat man früher fälschlicherweise angenommen, dass eine Exposition mit geringer Dosisleistung bei locker ionisierender Strahlung deutlich weniger Wirkungen zeigt. Obwohl das inzwischen anhand der Dosiswirkungskurven an den Japanern selbst widerlegt wurde, benutzt die ICRP bei ihrer Risikoangabe noch einen Reduktionsfaktor 2 [ICRP 2007] und müsste zumindest bei dicht ionisierender Strahlung, bei der entsprechendes nicht angenommen wurde, ein Risiko von 11 Prozent pro Sv angeben.

Zweitens war die Bombenstrahlung von extrem hoher Energie und man weiss aus zahlreichen Befunden, dass die biologische Wirkung dieser Gammastrahlung 2- bis 4-mal niedriger ist als die der Röntgen-Referenzstrahlung. Die Setzung eines einheitlichen Strahlungswichtungsfaktors 1 für alle diese Strahlungen führt daher zu einer weiteren relevanten Unterschätzung des Strahlenrisikos.

Daraus lässt sich insbesondere ableiten, dass ein Grenzwert 20 mSv pro Jahr für beruflich Strahlenexponierte nicht vertretbar ist.

### Genetisches Risiko

Das genetische Risiko, d.h. die Rate der bei den Nachkommen erzeugten Erbschäden, wurde von der ICRP im Jahr 2007 von 1,3 Prozent pro Sv auf 0,2 Prozent pro Sv gesenkt. Sie sieht es für niedrige Dosen in Wirklichkeit als nicht erwiesen und wahrscheinlich nicht vorhanden an.

Demgegenüber hatten Martin Gardner und Mitarbeiter gezeigt, dass die bei der britischen Wiederaufarbeitungsanlage Sellafield aufgetretenen Leukämien bei Kindern und Jugendlichen auf die Bestrahlung der Väter zurückzuführen ist, die in der Anlage vor der Zeugung gearbeitet hatten. Dieser viel diskutierte und von der ICRP sowie breiten Kreisen der Fachwelt

bislang nicht akzeptierte Befund wird durch Untersuchungen nach Röntgendiagnostik und in anderen beruflich exponierten Kollektiven bestätigt (siehe Tabelle 5).

### Schlussfolgerungen

Auch wenn sich die Unterschätzung der Neutronendosis gegenwärtig nur sehr ungenau quantifizieren lässt, sollte man davon ausgehen, dass sie erheblich ist. Ein Faktor von mindestens 4,5 ist wissenschaftlich gut begründet. Die Strahlenexposition bei den französischen Transportbehältern in 2 Metern Entfernung würde daher den für geeignet gehaltenen Grenzwert um etwa das Vierfache überschreiten.

Im Gegensatz dazu hat die ICRP in 2007 die Strahlungswichtungsfaktoren für Neutronen nach Tabelle 2 durch eine kontinuierliche Funktion in Abhängigkeit von der Energie ersetzt und noch weiter gesenkt. Der maximale Wert 20 soll jetzt nur noch im Bereich um 1 MeV gelten.

Auch das Strahlenrisiko selbst wird durch die Annahmen der ICRP verharmlost. Ein reales und höher angesetztes genetisches Risiko als dort angenommen sollte berücksichtigt werden, wenn Personal und Begleitschutz in zeugungsfähigem Alter mit den Transportbehältern umgehen.

### Widmung

Diesen Beitrag widme ich meinem Freund und Vorbild Prof. Dr. med. Horst Kuni zum 70. Geburtstag.

### Anmerkung

Es handelt sich um die überarbeitete Fassung eines Referats auf der öffentlichen Sitzung des Rates der Stadt Dannenberg (Elbe) am 12. Februar 2009.

### Quellenverzeichnis

Becker, O., Smital, H.: Messungen von Neutronenstrahlung an Behältern vom Typ TN 85. Dannenberg Nov. 2008. Bericht für Greenpeace Deutschland e.V. Hannover, 24.11.2008.  
Buja, A., Lange, J.H., Perissinotto, E., Rausa, G., Grigoletto,

F., Canova, C., Mastrangelo, G.: Cancer incidence among military and civil pilots and flight attendants: an analysis on published data. *Toxicol. Ind. Health* 21(2005) 273-282.

Dannheim, B. et al.: Strahlengefahr für Mensch und Umwelt. Bewertungen der Anpassung der deutschen Strahlenschutzverordnung an die Forderungen der EURichtlinie 96/29/Euratom. Berichte des Otto Hug Strahleninstituts Nr. 21-22, 2000.

DGB-Bundesvorstand. Arbeitsbedingungen in (nuklearen) Wiederaufarbeitungsanlagen. Multidisziplinäres Forschungsprojekt TECHNIK UND ARBEITSWELT (ARGETA) des DGB-Bundesvorstandes. Abschlussbericht Düsseldorf, Dezember 1986.

Heimers, A., Schröder, H., Lengfelder, E., Schmitz-Feuerhake, I.: Chromosome aberration analysis in aircrew members. *Radiat. Prot. Dos.* 60 (1995) 171-175.

Heimers, A.: Cytogenetic analysis in human lymphocytes after exposure to simulated cosmic radiation which reflects the inflight radiation environment. *Int. J. Radiat. Biol.* 75 (1999) 691-698.

Heimers, A.: Chromosome aberration analysis in Concorde pilots. *Mutat. Res.* 467 (2000) 169-170.

Hirsch, Helmut: Die biologische Wirkung von Neutronenstrahlung wird weiterhin unterschätzt. *Strahlentelex* 254-255 (1997) 4 pp. [www.strahlentelex.de](http://www.strahlentelex.de)

ICRP Int. Commission on Radiological Protection: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publ. 60, Ann. ICRP 21 (1991) No.1-3.

ICRP, Int. Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP-Publ.103, Ann. ICRP 37 (2007) (No.2/4).

ICRU: International Commission on Radiation Units and Measurements: The quality factor in radiation protection. ICRU Report 40, Bethesda 1986.

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.

Kuni, H.: CASTOR gefährdet Gesundheit. Berichte des Otto Hug Strahleninstituts Nr. 19-20 (1998) 11-42. <http://www.staff.uni-marburg.de/~kunih/all-doc/castro98.pdf>

Kuni, H.: RBW der Neutronen und Epidemiologie der Atombombenopfer in Hiroshima und Nagasaki. Marburg 1995. <http://www.staff.uni-marburg.de/~kunih/all-doc/index.htm>

Kuni, H., Schmitz-Feuerhake, I., Dieckmann, H.: Mammography screening – neglected aspects of radiation risks. *Gesundheitswesen* 65, 2003, 443-446.

Lindborg, L. u.a.: Determinations of H(10) and its dose components onboard aircraft. *Radiat. Prot. Dosimetry* 126 (2007) 577-580.

Tokumaru, O., Haruki, K., Bacal, K., Katagiri, T., Yamamoto, T., Sakurai, Y.: Incidence of cancer among female flight attendants: a meta-analysis. *J. Travel Med.* 13 (2006) 388-389. ●

## AKW Rheinsberg

### Keine grüne Wiese mehr

Das Reaktorgebäude des ehemaligen DDR-Atomkraftwerks Rheinsberg soll nun doch noch nicht abgerissen werden. Die Betonkonstruktion ist stärker radioaktiv belastet, als ursprünglich angenommen und müsste unter Strahlenschutzbedingungen erfolgen, meldete der Fernsender von Rundfunk Berlin Brandenburg (rbb) am 18. Februar 2009. Aus Kostengründen wollen die Energiewerke Nord (EWN) deshalb die Strahlung zunächst etwas abklingen lassen und das Gebäude erst in einigen Jahrzehnten abreißen, erklärte der zuständige Abteilungsleiter des Energieunternehmens dem Sender. Zuvor war verkündet worden, auf dem Gelände ein Innovationszentrum für Klimafolgenanpassung zu errichten. Seit der Stilllegung des Reaktors im Jahr 1991 beschäftigen sich die Energiewerke Nord mit dessen Abbau. Das einst im Mai 1966 offiziell in Betrieb genommene AKW Rheinsberg sollte das erste sein, das wieder vollständig verschwindet und an dem der Rückbau zur grünen Wiese geprobt werden sollte. ●