

Strahlentelex

mit ElektromogReport

Unabhängiger Informationsdienst zu Radioaktivität, Strahlung und Gesundheit

ISSN 0931-4288

www.strahlentelex.de

Nr. 712-713 / 30.Jahrgang, 1. September 2016

Kosmische Strahlung:

Höhenstrahlung im Flugzeug enthält einen erheblichen Anteil an hochenergetischer Neutronenstrahlung. Ihr Dosisbeitrag wird international erheblich unterschätzt. Auch in Deutschland soll die Belastung des Flugpersonals kleingerechnet werden. Ein Beitrag von Inge Schmitz-Feuerhake.

Seite 1

Medizinische Strahlenbelastung:

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat die diagnostischen Referenzwerte für diagnostische und interventionelle Röntgenanwendungen um bis zu 50 Prozent und im Mittel um 20 Prozent gesenkt und neue Referenzwerte für Untersuchungen eingeführt, die bisher nicht berücksichtigt wurden.

Seite 7

Atomtüll:

Bundesumweltministerin Barbara Hendricks hat wesentliche personelle Entscheidungen zur Umsetzung der neuen Organisationsstruktur im Endlagerbereich in einem klandestinen Verfahren, ohne öffentliche Ausschreibung, getroffen.

Seite 7

Kosmische Strahlung

Die Minimierung der Strahlenbelastung des Flugpersonals durch Rechenkunst

Die EURATOM-Richtlinie 59 von 2013 macht´s möglich

Von Inge Schmitz-Feuerhake*

Das Flugpersonal wird nach Strahlenschutzverordnung zu den „beruflich strahlenexponierten“ Personen gerechnet. Wie auch aus anderen Sparten bekannt, zeigen sich bei ihm erhöhte Raten an Krebserkrankungen, nicht malignen Hirntumoren und Katarakten. Ihr Gesundheitsrisiko erscheint im

Vergleich zu anderen chronisch exponierten Kollektiven als unerwartet hoch, da laut Bundesamt für Strahlenschutz die Jahresdosen nur bei 2 bis 5 Millisievert (mSv) liegen sollen. Wegen der komplexen Zusammensetzung der Höhenstrahlung im Flugzeug mit Anteilen von hochenergetischen

Neutronen und geladenen Partikeln wird die Dosis nicht kontinuierlich gemessen, sondern anhand von Annahmen über die Verhältnisse bei Standardflugrouten berechnet. Kritiker beklagen seit Langem die Unterbewertung der biologischen Wirkung von Neutronen, die einen erheblichen Dosisbeitrag liefern. Entgegen zahlreichen Befunden, die diese Kritik bestätigen, hat die Internationale Strahlenschutzkommission ICRP 2007 eine weitere Senkung der Strahlungswichtungsfaktoren für Neutronen und Protonen empfohlen. Die auch für Deutschland verbindliche EURATOM-Richtlinie 59 von 2013 hat dieses übernommen. Es ist anzunehmen, dass damit die zukünftigen Strahlendosen des Flugpersonals so klein gerechnet werden, dass das Flugpersonal wegen zu kleiner Dosis von Strahlenschäden freigesprochen wird.

Die Besonderheit der kosmischen Strahlung

Die kosmische Strahlung entsteht dadurch, dass hochenergetische geladene Teilchen aus dem Weltraum auf die irdische Atmosphäre treffen, begleitet von einem geringen Anteil hochenergetischer Gammastrahlung. Die Teilchen und Wellen reagieren mit den Bestandteilen der Lufthülle und bilden Kaskaden neuer Teilchen und Wellen. Auf ihrem Weg zur Erdoberfläche wird die kosmische Strahlung mit zunehmender Dichte der Atmosphäre schwächer. Umgekehrt nimmt die Strahlung mit zunehmender Flughöhe erheblich zu. Ihre Intensität hängt aber nicht nur von der Höhe ab, sondern auch von der geomagnetischen Breite, weil die geladenen Teilchen aus dem Weltraum im Magnetfeld der Erde abgelenkt werden. Die Intensität ist daher in den nördlichen und südlichen Regionen der Erde deutlich höher als am Äquator.

Der Strahlungsfluss aus dem Weltraum ist nicht konstant, sondern hängt zusätzlich von

Strahlentelex, Th. Dersee, Waldstr. 49, 15566 Schöneiche b.Bln.
Postvertriebsstück, DPAG, „Entgelt bezahlt“ A 10161 E

* Prof. Dr. Inge Schmitz-Feuerhake,
ingesf@uni-bremen.de

der „Sonnenaktivität“ ab, einem von der Sonne ausgehenden Strom von geladenen Teilchen. Die Sonnenaktivität ändert sich nahezu regelmäßig in einem Zyklus von 11 Jahren und äußert sich in Zeiten hoher Aktivität durch vermehrte „Sonnenflecken“ (BfS 2011). Außerdem kommt es zu plötzlichen, abrupten und intensiven Ausstrahlungen von solarer magnetischer Energie, so genannten Sonneneruptionen. Diese können in höheren atmosphärischen Schichten (Höhen von ca. 10 bis 15 km) die Strahlungsintensität auf ein Vielfaches erhöhen (Schalch 1995).

Im Flugzeug sind es hauptsächlich sekundäre Neutronen, hochenergetische Protonen und Gammastrahlen, die das menschliche Gewebe schädigen (Mares 2014). Neutronen sind die ungeladenen Bausteine der Atomkerne, die bei entsprechend hoher Bewegungsenergie die Materie sehr weit durchdringen können. Sie zählen zur ionisierenden Strahlung, weil sie im Gewebe Reaktionen auslösen, die einerseits zur Aussendung von Protonen führen und andererseits durch Wechselwirkung mit Atomkernen zur Entstehung radioaktiver Stoffe. Protonen sind die positiv geladenen Bausteine der Atomkerne und wurden früher zur Gruppe der „dicht“ ionisierenden Strahlung gezählt.

Die Art der Wechselwirkung von Neutronen mit Materie und entsprechend speziell mit Gewebe hängt von der Energie E_n der Neutronen ab.¹ Man unterscheidet folgende Gruppen (Vogt 1992):

Hochenergetisch: $E_n > 20$ MeV (Mehrteilchenprozesse wahrscheinlich)

Schnell: $10 \text{ keV} < E_n \leq 20$ MeV (unelastische Stöße)

Intermediär: $0,5 \text{ eV} < E_n \leq 10$ keV (überwiegend elastische Stöße)

Langsam: $E_n \leq 0,5$ eV (erhebliche Absorptionswahrscheinlichkeit)

Die Dosismittlung bei Flugpersonal: Prinzipielle Probleme

Die Dosis in Sievert (Sv) als Maß für einen Strahlenschaden ist keine physikalische, sondern eine abgeleitete Größe. Sie geht aus von einem physikalisch eindeutig bestimmten Begriff, der so genannten Energiedosis, die als die durch Strahlung bewirkte absorbierte Energie pro Gewebemasse definiert ist und in der Einheit Joule pro Kilogramm Gewebe gemessen wird.

Bei gleicher Energiedosis haben die verschiedenen Strahlenarten aber unterschiedliche biologische Wirkungen. Alphastrahlen und andere schwere geladene Teilchen, wie sie in der kosmischen Strahlung vorkommen, gehören zur Klasse der „dicht“ ionisierenden Strahlung, weil sie ihre Energie auf sehr kurzer Strecke im Gewebe abgeben. Betastrahlen und die elektromagnetischen Wellen der Röntgen- und Gammastrahlung sind „locker“ ionisierend. Um die Wirkungen der verschiedenen ionisierenden Strahlungen vergleichbar zu machen, hat die Internationale Strahlenschutzkommission (ICRP) die „Äquivalentdosis“ in Sv eingeführt, die man

erhält, indem man die Energiedosis mit dem dimensionslosen Strahlungswichtungsfaktor w_R multipliziert.

Als Referenzstrahlung mit $w_R = 1$ werden alle Wellenstrahlen im Energiebereich von Röntgen und Gammastrahlen angesetzt. Den anderen locker ionisierenden Strahlen, wozu die Betastrahlen und die schnellen Elektronen aus dem Weltraum gehören, wird ebenfalls ein $w_R = 1$ zugeordnet. Das ist eine Vereinfachung, da die biologische Wirkung auch noch von der jeweiligen Energie der spezifischen Strahlungspartikel oder -quanten abhängt.

Den Alphastrahlen wird ein $w_R = 20$ zugeordnet. Dieser bedeutet, dass 1/20 der Energiedosis durch Alphastrahlung die gleiche Wirkung im Gewebe haben soll wie die gleiche Energiedosis durch Röntgenstrahlung. Für Protonen gilt bislang ein $w_R = 5$. Der Strahlungswichtungsfaktor für Neutronen wird als sehr stark abhängig von der Energie der Neutronen angesetzt.

Man erkennt leicht, dass das Prinzip der Äquivalentdosis beim Strahlenschutz des Flugpersonals an seine Grenzen kommt, weil die pauschalisierten Wichtungsfaktoren nur Näherungsgrößen mit erheblichen Unsicherheiten sind. Da die Zusammensetzung des Strahlenfeldes auf den jewei-

ligen Flugrouten stark variiert, hat man auch messtechnisch ein Problem, da ja der Strahlenfluss und die Energieverteilung von jeder Strahlenart bekannt sein müssten, um die Äquivalentdosis zu berechnen. Es gibt aber kein einheitliches Messverfahren für alle diese physikalischen Parameter, sondern einzelne Komponenten müssen getrennt bestimmt werden. Das ist nicht zeitnah und begleitend möglich, so dass auch nach Kategorisierung des Flugpersonals als beruflich strahlenexponierte Personen bei der Novellierung der Strahlenschutzverordnung 2001 keine Dauermessungen durch Monitore in den Flugzeugen durchgeführt werden, wie es an anderen Arbeitsplätzen z. B. in Kernkraftwerken oder in medizinischen Bereichen vorgeschrieben ist.

Seit 2003 werden in Deutschland dennoch individuelle Dosiswerte für das Flugpersonal im zivilen Luftverkehr erhoben und halbjährlich beim Bundesamt für Strahlenschutz gesammelt. Man hat sich ersatzweise darauf geeinigt, die Expositionen anhand von Rechenprogrammen zu bestimmen, denen musterhaft Daten zu Grunde liegen, die man zu den wichtigsten Flugrouten gemessen hat. Diese Programme müssen vom Luftfahrt-Bundesamt zugelassen werden. Während andere beruflich strahlenexponierte Arbeitnehmer anhand ihrer persönlich getragenen Filmdosimeter behördlich überwacht werden, ist es den Arbeitgebern wie Lufthansa usw. überlassen, anhand solcher Programme die individuellen Expositionen zu bestimmen.

Relative Biologische Wirksamkeit und Strahlungswichtungsfaktoren für Neutronen

In Flughöhen von 0,9 bis 9 Kilometer (km) wird annähernd die Hälfte der Dosis beim Flugpersonal durch Neutronen und ihre Wechselwirkungsprodukte im Gewebe ge-

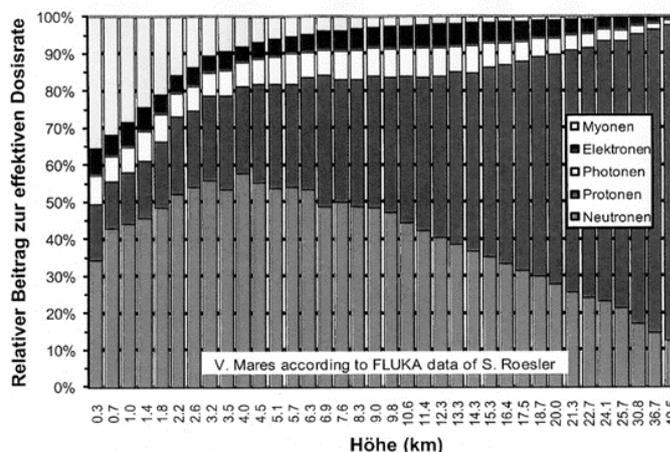


Abbildung 1: Relativer Beitrag zur effektiven Dosis als Funktion der Höhe über dem Meeresniveau, berechnet für eine Periode niedriger solarer Aktivität für die Polarregionen aus (Mares 2014)

¹ eV = Elektronenvolt

keV = Kiloelektronenvolt

MeV = Megaelektronenvolt

bildet, sofern die Energiedosis nach dem Schema der ICRP gewichtet wird. In Höhen oberhalb von etwa 9 km nimmt allerdings der Neutronenanteil ab und die Dosis wird zunehmend auch durch hochenergetische Protonen erzeugt (Mares 2014), s. Abbildung 1 (dunkelgraue Fläche).

Bereits 1986 schlug die International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), die im Auftrag der ICRP eine Aktualisierung der Strahlungswichtungsfaktoren vorgenommen hatte, ein konstantes $w_R = 25$ für Neutronen aller Energien vor, entsprechend einer deutlichen Anhebung der Werte nach der vormals gültigen ICRP-Empfehlung Nr. 90 (ICRP 1991) und derzeit noch gültigen Strahlenschutzverordnung (s. Abbildung 2). Grundlage war eine Reihe von Ergebnissen aus der experimentellen Forschung mit Neutronen (an Zellsystemen und Säugetieren). Die ICRP hat dieses ohne nachvollziehbare Begründung ignoriert.

Kuni (1995, 1998) 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 und Analysen zum

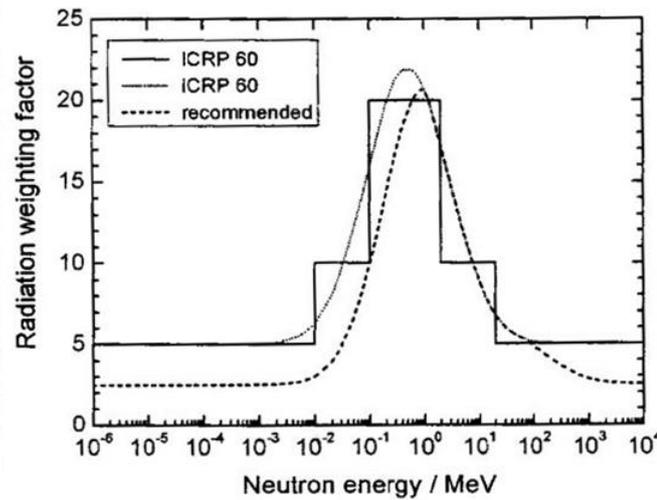


Abbildung 2: **Strahlungswichtungsfaktoren für Neutronen nach ICRP in Abhängigkeit von der Energie der Neutronen** (aus ICRP 2007)
 Kastenförmige Linien: Werte nach ICRP 60 (1990)
 Feingestrichelt: Anpassung der Werte von ICRP 60 durch kontinuierliche Funktion
 Grob gestrichelte Linie: neue Empfehlung in ICRP 103

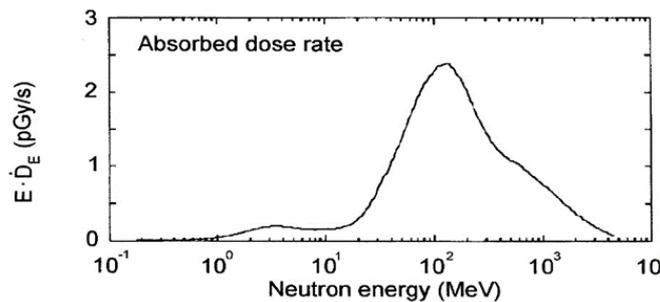


Abbildung 3: **Energiedosisrate durch Neutronen in einer Flughöhe von 5 km in Abhängigkeit von der Neutronenenergie** (Fig. 4.5 aus ICRP 92, 2003)

Neutronenanteil in der Hiroshima- und Nagasaki-Strahlung bestärkten ihn in seiner Einschätzung.

Diese Beurteilung erhärtet sich durch die jetzt vorliegenden Ergebnisse über Strahlenschäden bei Flugpersonal (s. unten). Dessen Dosis wird bei uns je nach Flughöhe zu 2 bis 5 Millisievert (mSv) jährlich angegeben (BfS 2011). Durch solche kleinen Strahlenexpositionen sind die in der Tabelle genannten Risikoerhöhungen nicht zu erklären. Auch Chromosomenaberrationen in Flugpersonal zeigen an, dass die offiziell genannten Jahresdosen den Effekt nicht erklären können (Heimers 1995). Ferner ergab eine biologische Dosimetrie bei 18 Concorde-Piloten, die in 18 bis 20 km

Höhe fliegen, dass die biologische Wirkung der Neutronen und Protonen in der Höhenstrahlung unterbewertet wird (Heimers 2000). Die Rate der dizentrischen Chromosomen in weißen Blutkörperchen war bei ihnen gegenüber normal im Mittel zehnfach erhöht.

Heimers hat am europäischen Forschungszentrum CERN in Genf eine Bestimmung der RBW von Höhenstrahlung und separat von Neutronen vorgenommen (1999). Dort besteht eine Einrichtung, in der die Zusammensetzung der Höhenstrahlung und ihre Dosisleistung in ziviler Flughöhe nachgebildet werden kann. In Blutproben, die diesem Strahlenfeld ausgesetzt waren, wurden die erzeugten Chromoso-

menaberrationen ausgewertet. Für Neutronen ergab sich eine RBW von 105.

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 Material der Zelle handelt als bei der Krebsinduktion. Zu einem ganz ähnlichen Ergebnis kommen aber Kellerer und Mitarbeiter (2006) bei der Bestimmung 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. Eine neuere Analyse durch die Mitautorin Walsh ergibt allerdings einen kleineren Wert von 65 (Walsh 2013).

Auch andere Autoren berichten über höhere w_R -Werte aus der experimentellen Forschung. Engels und Wambersie (1998) geben für stochastische Effekte Werte von 2 bis 300 an und weisen auf die Zunahme bei niedriger Dosis und Dosisleistung hin. In ICRP 92 (2003), auf die sich die neueste Empfehlung der ICRP bezieht, wird über Werte bis 100 berichtet. Für Katarakte, die nach neueren Erkenntnissen zu den stochastischen Effekten gezählt werden müssen, fanden Worgul et al. (1996) Werte von 8 bis 16 bei 250 Milligray (mGy) und 250 bis 500 bei 2 mGy für Neutronen mit Energie von 400 keV.

Insgesamt lässt sich aus den Ergebnissen von Kuni, Hei-

mers und den Atombombenüberlebenden u.a. derzeit für den w_R der Neutronen ein Mittelwert von etwa 90 ableiten. Damit wäre der Ansatz nach ICRP 90 und gültiger Strahlenschutzverordnung für die schnellen und hochenergetischen Neutronen der kosmischen Strahlung ganz erheblich – weit mehr als ein Faktor 4,5 – unterschätzt.

Die Neubewertung der Strahlungswichtungsfaktoren für Neutronen nach ICRP 103 von 2007

Die EURATOM-Richtlinie 59 vom 5.12.2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung muss bis zum 06.02.2018 in nationales Recht der Mitgliedstaaten umgesetzt werden. Sie enthält Mindestvorschriften. Der Erlass einheitlicher Sicherheitsnormen für den Gesundheitsschutz schließt nicht aus, dass ein Mitgliedsstaat strengere Schutzmaßnahmen festlegt, sofern dies in der Verordnung nicht ausdrücklich anders geregelt ist.

Die Erwägungsgründe der Richtlinie sind die neueren Empfehlungen der ICRP in ihrer Publikation 103 von 2007. Diese löst die Risikoangaben und Grenzwertempfehlungen der ICRP-Publikation 60 von 1990 ab, auf der die Regelungen der noch gültigen Strahlenschutzverordnung beruhen.

Die Strahlungswichtungsfaktoren w_R für Neutronen sind in ICRP 103 geändert worden (Abbildung 2). Für den Energiebereich ≤ 1 eV bis 10.000 MeV wird eine kontinuierliche Funktion für w_R angegeben, die einen maximalen Wert von 20 bei 1 MeV hat und zu niedrigeren und höheren Energien hin bis auf einen Wert 2,5 sinkt. Im intermediären Energiebereich (1 eV bis 10 keV) wird damit w_R auf die Hälfte abgesenkt und oberhalb von 1.000 MeV ebenfalls. Zu Grunde gelegt werden die Betrachtungen über die RBW

Tabelle: **Meta-Analysen über Krebserkrankungen (Inzidenz) bei Flugpersonal**
Auszug von Ergebnissen bis 2005; Kontrolle Nationalrate

Art der Erkrankung	Anzahl ausgewerteter Studien	Risiko	Relatives Vertrauensbereich
Piloten u. männliches Kabinenpersonal (Buja 2005)			
Alle Krebserkrankungen	3	1,67	1,14-2,45
Melanome der Haut	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
Stewardessen			
(a) Tokumaru 2006	5 (a)		
(b) Buja 2006	7 (b)		
Brustkrebs		1,41 (a)	1,22-1,62
		1,40 (b)	1,19-1,65
Melanome der Haut		2,13 (a)	1,58-2,88
		2,15 (b)	1,56-2,88

von Strahlungen in der ICRP-Publikation Nr. 92 von 2003.

In ICRP 103 wird behauptet (auf Seite 285), die oben genannte Funktion stelle eine „gute und konservative Näherung für die effektive Dosis bei den meisten Expositionsbedingungen“ dar. In ICRP 92 heißt es auf Seite 83, dass die Dosis in Neutronenfeldern für Energien zwischen 50 keV und 2,5 MeV **konservativ** berechnet wird, aber außerhalb dieses Bereiches überschritten werden kann. Letzteres ist bei der Luftfahrt der Fall: nach Abbildung 3 wird in 5 km Flughöhe ein nennenswerter Energiedosisbeitrag nur von Neutronen mit einer Energie oberhalb von 2,5 MeV geliefert.

Der Sachverhalt, dass die Neutronenenergien bei der Luftfahrt nicht mehr in dem Bereich liegen, in dem die nach ICRP zu verwendenden Strahlungswichtungsfaktoren überschritten werden können, wird in der gültigen Empfehlung 103 nicht erwähnt.

Neubewertung des Strahlungswichtungsfaktors für Protonen in ICRP 103

Der Strahlungswichtungsfaktor für Protonen wird in ICRP 103 entsprechend ICRP 92 von dem Wert 5 auf ein $w_R = 2$ gesenkt. In letzterer Emp-

fehlung von 2003 findet sich der Hinweis, dass mit dem vorherigen Wert das Flugpersonal zu den beruflich exponierten Arbeitnehmern zu zählen wäre. Auch daraus ist zu schließen, dass Protonen an der Exposition einen bedeutenden Anteil haben.

Die Senkung um den Faktor 2,5 für alle vorkommenden Protonen im Strahlenschutz kann nicht überzeugen. Sie wird in ICRP 92 ausschließlich mit Werten aus dem Hochdosisbereich begründet, der für die Strahlentherapie mit Protonen von Interesse ist. Es ist aber bekannt, dass auch die RBW von Protonen mit abnehmender Dosis und Dosisleistung ansteigt (Yang 1986; Brenner 1990; Bettega 2004; Cuaron 2016; Jones 2016).

Befunde über Gesundheitsschäden beim Flugpersonal

In zahlreichen Inzidenzstudien an Flugpersonal wurden Strahlungsschäden in Form von Krebserkrankungen beobachtet, die durch die offiziell erhobenen geringen Dosen nicht erklärbar sind. Die Untersuchungsergebnisse in der Tabelle entstammen zusammenfassenden Untersuchungen bis 2005. Aufgeführt sind hier nur signifikante Ergebnisse und das für Leukämie. Als Kon-

trollgruppe diente jeweils die nationale Rate.

Die deutlich erhöhten Risikowerte sind trotz der – im Vergleich z. B. zu den japanischen Atombombenüberlebenden – geringen Beobachtungsdauern und zahlenmäßig kleinen Untersuchungskohorten (männlich ca. 11.000, weiblich ca. 16.000 Personen) bemerkenswert. Die mittleren Beobachtungsdauern (seit Eintritt in den Beruf) lagen beim weiblichen Personal unter 20 Jahren, beim männlichen zwischen 9 und 27 Jahren.

Hinzu kommt der bei diesen Berufen sehr ausgeprägte „Healthy-Worker-Effekt“, der bedeutet, dass eine gesundheitliche Auslese stattgefunden hat. Sie äußert sich durch eine längere Lebenserwartung der Arbeitnehmer im Vergleich zur übrigen Bevölkerung und geringere Erkrankungsrate, sofern keine berufsbedingten Schädigungen relevant werden.

Der Healthy-Worker-Effekt ist bei den Piloten am deutlichsten ausgeprägt. In einer Studie aus 10 Ländern ergab sich für diese eine Mortalität von nur 0,56 im Vergleich zur gemittelten Nationalrate (Hammer 2014). Für Stewardessen lag sie bei 0,73. Das berufsbedingte Krebsrisiko für das Flugpersonal ist also höher

anzusetzen, als es in der Tabelle beziffert wird.

Manche Autoren halten das hohe Aufkommen von Melanomen und anderen Hautkrebskrankungen bei Flugpersonal durch kosmische Strahlung für nicht erklärbar, da die Haut fälschlich als relativ unempfindlich gegenüber ionisierender Strahlung angesehen wird. Man muss aber bedenken, dass geladene Partikel beteiligt sind, die in Gewebe nur eine sehr kurze Reichweite haben. Diese werden auf der Körperoberfläche absorbiert und erzeugen eine höhere Hautdosis als in den übrigen Geweben, die nur von dem durchdringenden Anteil der Strahlung betroffen sind. Außerdem hat sich in epidemiologischen Studien an anderen beruflich Strahlenexponierten und nach diagnostischer Röntgenstrahlung gezeigt, dass die Haut zu den besonders strahlenempfindlichen Geweben gezählt werden muss (Schmitz-Feuerhake 2014; Mämpel 2015).

Ein weiterer Mehrfachbefund bei männlichem Flugpersonal ist das Auftreten erhöhter Raten von **Prostatakrebs** (Band 1996; Buja 2005; Nicholas 1998; Pukkala 2002; Yamane 2006). Die Strahlenempfindlichkeit der Prostata hat sich insbesondere auch nach diagnostischem Röntgen gezeigt (Myles 2008). Es ist sicherlich kein Zufall, dass neben Hautkrebs die oberflächlich liegenden Organe Prostata und weibliche Brust vergleichsweise hohe Effekte zeigen. Die in den epidemiologischen Studien gemeinhin nur betrachtete **effektive** Dosis ist sicherlich kein geeignetes Maß für die Auswirkungen der kosmischen Strahlung auf die spezifischen Gewebe des menschlichen Körpers.

Die bekannteste Strahlenfolge, Leukämie, zeigt sich ebenfalls erhöht. Da es sich dabei um eine seltene Krankheit handelt, ergab sich wahrscheinlich wegen zu geringer Fall-

zahlen in den zusammengefassten Studien laut Tabelle kein signifikantes Ergebnis. In einer dort nicht einbezogenen dänischen Studie an männlichem Cockpit-Personal mit mehr als 5.000 Flugstunden war akute myeloische Leukämie mit 3 Fällen sogar 5-fach signifikant erhöht (Gundestrup 1999). Die Gesamtkrebsrate im Vergleich zur dänischen Bevölkerung war in dieser Untersuchung signifikant um 20 Prozent erhöht.

In einem Kollektiv von 8.507 weiblichen Flugbegleitern aus 4 nordischen Ländern traten 14 Fälle von Leukämie auf, was einer signifikanten Erhöhung gegenüber der Nationalrate um den Faktor 1,89 entspricht (Pukkala 2012). Brustkrebs- und Melanomanstiege ergaben ähnliche Werte wie in der Tabelle angegeben. Die mittlere Beobachtungsdauer betrug 23,6 Jahre.

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

Die deutsche Studie über die Krebsmortalität von Flugpersonal

In Deutschland findet eine Fortsetzungsstudie unter Federführung des Instituts für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik (IMBEI) der Universität Mainz statt, die die Todesursachen von Piloten und Flugingenieuren der Zivilluftfahrt und dem Kabinenpersonal im Vergleich zur übrigen Bevölkerung untersucht (Zeeb 2010). Bis 1997 wurde keinerlei Erhöhung von Krebskrankungen gefunden. Der Berufsverband Transport und Verkehrswirtschaft dient dieser Befund zur Ablehnung von Anträgen potentiell Geschädigter.

Eine Mortalitätsstudie ist nicht

besonders gut geeignet, das Strahlenrisiko bei niedrigen Dosen zu erfassen, da darin die erfolgreich therapierten Krebserkrankungen, die nicht auf dem Totenschein vermerkt sind, ausgelassen werden. Gerade die bei Flugpersonal häufig beobachteten Erkrankungen wie Brust-, Prostata- und Hautkrebs sind meistens nicht die Todesursache. Auch führt der Vergleich mit der Gesamtbevölkerung wegen des Healthy-Worker-Effekts in die Irre.

Bei der Frage des berufsbedingten Krankheitsrisiko für Piloten und Flugbegleiter geht es nicht darum, ob sie häufiger an Krebs erkranken als die Bevölkerung, sondern darum, ob eine Schädigung vorliegt, die nicht aufgetreten wäre, wenn der Betreffende diesen Beruf nicht ausgeübt hätte. Dieses genau wird in der deutschen Studie nicht untersucht.

In der Analyse, die die Todesfälle bis 2003 erfasst (Zeeb 2010), ergaben sich signifikante Erhöhungen bei den Piloten für Hirntumore (2,1-fach) und den weiblichen Flugbegleitern für Non-Hodgkin-Lymphome (4,2-fach). Diese Erkrankungen werden von den Autoren als nicht strahleninduzierbar angesehen, wenngleich diese Auffassung seit Langem überholt ist (Mämpel 2015). Auch müsste bedacht werden, dass eine Mortalitätsstudie eben keine vollständige Information liefert.

Die Autoren der deutschen Studie wie auch andere Untersucher befleißigen sich hingegen, andere Ursachen als kosmische Strahlung für die Erkrankungen des Flugpersonals ausfindig zu machen, als da sind: Tag/Nacht-Verschiebungen, freizeitbetonter Lebensstil mit UV-Strahlung, Alkoholkonsum, Aids und andere Besonderheiten. Selbstverständlich können modifizierende Faktoren bei dieser speziellen Berufsgruppe eine Rolle spielen. Man sollte aber beachten, dass ionisierende Strahlung

auch bei niedriger Dosis erwiesenermaßen messbar mutagen und karzinogen ist. Dies hat sich in den letzten Jahrzehnten durch zahlreiche Untersuchungen bei beruflich strahlenexponierten Arbeitnehmern, nach diagnostischer Röntgenbestrahlung und durch natürliche Untergrundstrahlung gezeigt (Kitahara 2015; Mämpel 2015).

In der vorläufig letzten Publikation zu der deutschen Studie wird über die Ergebnisse an 6.006 Piloten berichtet, von denen 407 bis Ende des Jahres 2004 starben (Hammer 2012). Die allgemeine Sterblichkeit liegt mit 50 Prozent im Vergleich zur Bevölkerung erwartungsgemäß niedrig. Mit 127 Todesfällen an Krebs ist aber dessen Anteil mit 31 Prozent an den Todesursachen relativ hoch bei einer verhältnismäßig jungen Kohorte (Durchschnittsalter am Ende der Untersuchung 51,5 Jahre). Für alle Krebsarten zusammengekommen, ergab sich wie schon früher ein signifikanter Anstieg der Krebsmortalität mit der Strahlendosis in dem Kollektiv. So etwas wird normalerweise als Nachweis eines Strahleneffektes gedeutet. Die Autoren halten das aber nicht für zwingend.

Schlussfolgerungen

Das gesellschaftliche und kommerzielle Interesse an der zivilen Luftfahrt ist gewaltig. Die traditionell wirtschaftsfreundliche ICRP versucht ihr gefälliges Dosiskonzept aufrecht zu erhalten, das die Nebenwirkungen für das Personal bedeutungslos erscheinen lässt. Auch aus anderen Problemfeldern des Strahlenschutzes kennen wir das Totschlagargument zur Leugnung von Strahlenschäden mittels Dosisberechnung. Die europäischen Tschernobylfolgen werden international und national abgestritten mit dem Argument, die – mit vereinfachten Modellen abgeschätzten und ohne Vertrauensbereich angegebenen – Bevölkerungsdosen

seien viel zu klein, um messbare Gesundheitseffekte zu erzeugen. Ebenso werden die beobachteten Erhöhungen von kindlichen Krebserkrankungen in der Umgebung von Nuklearanlagen im Normalbetrieb als bislang unerklärliches Phänomen dargestellt.

Bei der kosmischen Strahlung wird es auf Dauer schwierig werden, ein solches Konzept durchzuhalten. Im Vergleich zu anderen Arbeitsplätzen mit Strahlenexposition werden ihre Wirkungen durch die „Äquivalentdosis“ nach ICRP sicherlich um mehr als eine Größenordnung unterschätzt. Das zeigen z. B. die zytogenetischen Untersuchungen an Flugpersonal.

Deshalb muss eine Strategie eingeschlagen werden – einschließlich der Aufklärung der Betroffenen –, die das Problem des Äquivalentdosiskonstrukts benennt. Nur dann kann man im Rahmen der Möglichkeiten Konzepte zur realen Risikominimierung beim Flugpersonal entwickeln.

Band, P.R., Le, N., Fang, R. et al.: Cohort study of Air Canada pilots: mortality, cancer incidence, and leukemia risk. *Am. J. Epidemiol.* 143 (1996) 137-143

Bettega, D.: Cell transformation by light charged particles: review of available data. *Radiother. Oncol.* 73 (2004) Suppl.2, S155-157

BfS, Frasch, G., Kammerer, L., Karofsky, R., Schlosser, A., Spiesl, J., Stegeman, R.: Die berufliche Strahlenexposition des fliegenden Personals in Deutschland 2004-2009. Bundesamt für Strahlenschutz 2011 urn:nbn:de:0221-201108016029

Brenner, D.J., Hall, E.J.: The inverse dose-rate effect for oncogenic transformation by neutrons and charged particles: a plausible interpretation consistent with published data. *Int. J. Radiat. Biol.* 58 (1990) 745-758

Buja, A., Lange, J.H., Perissinotto, E. et al.: Cancer incidence among military and civil pilots and flight attendants: an analysis on published data. *Toxicol. Ind. Health* 21 (2005) 273-282

Buja, A., Mastrangelo, G., Perissinotto, E. et al.: Cancer incidence among female flight attendants: a meta-analysis of published data. *J. Womens Health* 15 (2006) 98-105

Cuaron, J.J., Chang Chang, Lovelock, M. et al.: Exponential increase in Relative Biological Effectiveness along distal edge of a proton Bragg peak as measured by deoxyribonucleic acid double-strand breaks. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 95 (2016) 62-69

Engels, H., Wambersie, A.: Relative biological effectiveness of neutrons for cancer induction and other late effects: a review of radiobiological data. *Recent Results Cancer Res.* 150 (1998) 54-87

Gundestrup, M., Storm, H.H.: Radiation-induced acute myeloid leukaemia and other cancers in commercial jet cockpit crew: a population-based cohort study. *Lancet* 354 (1999) 2029-2031

Hammer, G.P., Blettner, M., Langner, I., Zeeb, H.: Cosmic radiation and mortality from cancer among male German airline pilots: extended cohort follow-up. *Eur. J. Epidemiol.* 27 (2012) 419-429

Hammer, G.P., Auvinen, A., De Stavola, B.L. et al.: Mortality from cancer and other causes in commercial airline crews: a joint analysis of cohorts from 10 countries. *Occup. Environ. Med.* 71 (2014) 313-322

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

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

ICRP, International Commission on Radiological Protection: Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q), and radiation weighting factor (w_R). ICRP-Publication 92. Ann. ICRP 33 (2003) No.4

ICRP, International Commission on Radiological Protection: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP-Publication 103, Ann. ICRP 37 (2008) Nos. 2-4

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

Jones, B.: Why RBE must be a variable and not a constant in proton therapy. *Br. J. Radiol.* 89 (2016) doi:10.1259/bjr.20160116

Kellerer, A.M., Rühm, W., Walsh, L. Indications of the neutron effect contribution in the solid cancer data of the A-bomb survivors. *Health Phys.* 90 (2006) 554-564

Kitahara, C.M., Linet, M.S., Rajaraman, P. et al.: A new era of low-dose radiation epidemiology. *Curr. Envir. Health Rpt.* 2 (2015) 236-249

Kuni, H.: CASTOR gefährdet Gesundheit. Berichte des Otto Hug Strahleninstituts Nr. 19-20 (1998) 11-42, www.staff.uni-marburg.de/~kunih/all-doc/castor98.pdf

Kuni, H.: RBW der Neutronen und Epidemiologie der Atombombenopfer in Hiroshima und Nagasaki. Marburg 1995.

www.staff.uni-marburg.de/~kunih/all-doc/index.htm

Mämpel, W., Pflugbeil, S., Schmitz, R., Schmitz-Feuerhake, I.: Unterschätzte Gesundheitsgefahren durch Radioaktivität am Beispiel der Radarsoldaten. Berichte des Otto Hug Strahleninstituts, Bericht Nr. 25 (2015) Gesellschaft für Strahlenschutz e.V. www.strahlenschutz-gesellschaft.de

Mares, V., Rühm, W.: Computerprogramm zur Dosisberechnung beim Fliegen am Beispiel von EPCARD. Strahlenschutzpraxis Heft 2 (2014) 18-21

Myles, P., Evans, S., Lophatananon, A. et al.: Diagnostic radiation procedures and risk of prostate cancer. *Brit. J. Cancer* 98 (2008) 1852-1856

Nicholas, J.S., Lackland, D.T., Dosemeci, M. et al.: Mortality among US commercial pilots and navigators. *J. Occup. Environ. Med.* 40 (1998) 980-985

Pukkala, E., Aspholm, R., Auvinen, A. et al.: Incidence of cancer among Nordic airline pilots over five decades: occupa-

tional cohort study. *Brit. Med. J.* 325 (2002) 1-5

Pukkala, E., Helminen, M., Haldorsen, T. et al.: Cancer incidence among Nordic airline cabin crew. *Int. J. Cancer* 131 (2012) 2886-2897

Rafnsson, V., Olafsdottir, E., Hrafnkelsson, J. et al.: Cosmic radiation increases the risk of nuclear cataract in airline pilots. *Arch. Ophthalmol.* 123 (2005) 1102-1105

Schalch, D., Scharmann, A.: Strahlenexposition in Reiseflughöhen. *Spektrum der Wissenschaft* 1995, Heft 8, 80-84

Schmitz-Feuerhake: Ionisierende Strahlung und Hautkrebs. *Strahlentelex* Nr. 658-659 v. 5.06. 2014, 1-7

Tokumaru, O., Haruki, K., Bacal, K. et al.: Incidence of cancer among female flight attendants: a metaanalysis. *J. Travel Med.* 13 (2006) 127-132

Vogt, H.-G., Schultz, H.: Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes. 2. Aufl. 1992, Carl Hanser Verlag München Wien

Walsh, L.: Neutron relative biological effectiveness for solid cancer incidence in the Japanese A-bomb survivors: an analysis considering the degree of independent effects from γ -ray and neutron absorbed doses with hierarchical partitioning. *Radiat. Environ. Biophys.* 52 (2013) 29-36

Worgul, B.V., Medvedovsky, C., Huang, Y. et al.: Quantitative assessment of the cataractogenic potential of very low doses of neutrons. *Radiat. Res.* 145 (1996) 343-349

Yamane G.K.: Cancer incidence in the U.S. Air Force: 1989-2002. *Aviation, Space, Environ. Med.* 77 (2006) 789-794

Yang, T.C.-H., Craise, L.M., Mei, M.-T., Tobias, C.A.: Dose protraction studies with low- and high-LET radiations on neoplastic cell transformation in vitro. *Adv. Space Res.* 6 (1986) 137-147

Zeeb, H., Hammer, G.P., Langner, I., Schafft, T., Bennack, S., Blettner, M.: Cancer mortality among German aircrew: second follow-up. *Radiat. Environ. Biophys.* 49 (2010) 187-194 ●