

Strahlenbelastung des fliegenden Personals – Bewertung und gesundheitliche Konsequenzen

Horst Kuni, Marburg

Zusammenfassung

Das Strahlenfeld aus natürlichen Quellen beim Fliegen muss in Zukunft im Strahlenschutz nach denselben Regeln beachtet werden wie das einer künstlichen Quelle. Um Messungen im Flugbetrieb zu umgehen, wird von deutschen Behörden das kosmische Strahlenfeld in räumlicher und zeitlicher Dimension als berechenbar dargestellt und die Jahresdosen für das fliegende Personal mit weniger als 6 mSv so bewertet, dass es nicht als beruflich Strahlenexponierte der Kategorie A behandelt werden muss.

Solare Eruptionen erhöhen die Dosisleistung häufig über Stunden, im Durchschnitt wöchentlich einmal um ca. 0,1 mSv/h. Säkulare Ereignisse lieferten bis zu 10 mSv/h, dreifach mehr als es terrestrisch die Einrichtung eines Sperrbereich verlangt.

Ein Überblick über erste epidemiologische Erfahrungen zur Krebsinduktion beim fliegenden Personal ergibt eine erhebliche Unterschätzung der biologischen Wirksamkeit der Höhenstrahlung durch die terrestrische Bewertung als Äquivalentdosis, wohl verursacht durch die dicht ionisierende Komponente. Die biologische Äquivalenz ist mindestens 16fach höher als die Wirkung der Atombombenstrahlung. Daraus resultiert eine erhebliche gesundheitliche Gefährdung, die entschiedene Maßnahmen verlangt: Reduktion und Begrenzung der Flughöhen, Begrenzung der Einsatzzeiten für das Personal, strahlenmedizinisch optimierte Flugrouten und eine Überwachung und Beachtung der solaren Eruptionen durch ein Frühwarnsystem.

Summary

In the future radiation protection practice the natural radiation sources in flight must be monitored by the same regulations as artificial sources. In order to avoid radiation monitoring during flights German authorities stated the cosmic radiation could be calculated in spatial and temporal dimensions. Thus yearly doses for cabin attendants and pilots were assessed to be below 6 mSv. Therefore, a classification of this group as occupationally exposed persons of category A was avoided.

Solar flares frequently enhance the dose rate over hours on the average once a week about 0.1 mSv/h. Secular events reaching up to 10 mSv/h, three times the value that would demand the setup of a restricted area on the surface.

A review of the first epidemiological experiences of additional cancer induced in flight personnel shows a marked underestimation of the biological effectiveness of the cosmic rays by terrestrial judgement as equivalent dose, probably due to the densely ionising component. The biological equivalent is at least 16fold higher than the effectiveness of the radiation of the atomic bombs. The resulting considerable detriment of health demands suitable action: Reduction and limitation of flight level, limitation of working hours of flight personnel, flying routes optimised regarding radiation doses, surveillance and consideration of solar flares by an early warning system.

Einleitung

Zu Beginn soll das abgehandelte Thema in den aktuellen Stand des Strahlenschutzes eingeordnet werden. Die Strahlenbelastung des fliegenden Personals hat weit überwiegend natürliche Quellen. Es gehört zur vorherrschenden Methodik, die gesundheitlichen Gefahren der ionisierenden Strahlen aus künstlichen Quellen dadurch zu relativieren, dass künstliche Quellen mit natürlichen Quellen verglichen werden. Offensichtlich wird für natürliche Quellen eine Akzeptanz unterstellt und der Eindruck erweckt, die Strahlenbelastung aus natürlichen Quellen sei unabänderbar. Konsequenz wurde die Strahlenbelastung aus natürlichen Quellen bislang auch aus der Strahlenschutzverordnung ausgespart. Die Internationale Strahlenschutzkommission ICRP hat dagegen wiederholt, zuletzt prononciert in ihrer Empfehlung Nr. 60 von 1991, angemahnt, dass eine Strahlenbelastung aus natürlichen Quellen, wenn sie durch zivilisatorische Einflüsse das normale Maß übersteigt, wie eine künstliche Strahlenbelastung behandelt werden sollte, d.h. konkret beim fliegenden Personal als berufliche Strahlenbelastung zu bewerten ist [6].

Dass gut ein Jahrzehnt nach den ersten Formulierungen der ICRP 60 dies immer noch nicht umgesetzt ist, beleuchtet die enormen wirtschaftlichen und machtpolitischen Interessen, die hier berührt werden. Darüber hinaus ist der Gegenstand mit vielen nicht rationalen Gedanken und Gefühlen befrachtet. Das Fliegen, das Zurücklassen der irdischen Last, der Aufenthalt im Himmel, wird von zahlreichen Mythen vieler Völker angesprochen und erreicht religiöse Dimensionen. Da fällt es schwer, diesen Raum mit überdurchschnittlichen Gefahren zu assoziieren. In der aktuellen Diskussion sehe ich zwei Strömungen: Neben der Tendenz zur Ver-

harmlosung der Strahlengefährdung, die kein neuer Aspekt ist, wird die Strahlenbelastung beim Fliegen als über die Zeit relativ gleichförmig und aus irdischen Messungen leicht zu rekonstruieren dargestellt. Eine Beeinflussung sei nicht möglich. Die Strahlenbelastung könne daher lediglich dokumentiert werden, wobei eine Messung während des einzelnen Fluges unnötig sei [17]. In der folgenden Abhandlung sollen deshalb diese beiden Prämissen besonders überprüft werden.

Kurze Erläuterung des Strahlenfeldes

Beim Abheben von der Erdoberfläche geht auch die Strahlenbelastung aus terrestrischen Quellen zurück. Bereits 1912 hat der österreichische Physiker Hess entdeckt, dass nach einem Minimum in wenigen Tausend Metern Höhe die Dosisleistung dadurch wieder zunimmt, dass eine kosmische Höhenstrahlung von der dünner werdenden Atmosphäre immer weniger abgeschirmt wird [Übersicht sowie Literatur: 17].

Ursache sind in erster Linie Atomkerne praktisch aller Elemente, die aus unbekannt galaktischen Quellen mit unvorstellbar hoher Energie relativ gleichmäßig auf die Erde prallen. Die Energien reichen bis in den Exa-eV-Bereich, also eine Milliarde mal eine Milliarde eV. Ob der Partikelstrom auch in Zukunft so gleichmäßig bleibt, ist offen. Schließlich gibt es ernst zu nehmende Theorien über katastrophale Artensterben in der Erdgeschichte, die als Ursache ein vorübergehendes Anwachsen der Dosisleistung auf der Erdoberfläche in hohe Dosisbereiche vermuten. Die Astronomen beruhigen immerhin damit, dass im Umkreis von etwa 30 Lichtjahren kein Stern zu finden ist, der als Kandidat für eine Supernovaexplosion eine für Säugtiere und den Menschen tödliche Dosis auf der Erdoberfläche auslösen könnte. Da

auch entferntere Supernovaexplosionen wohl zuverlässig zeitnah erkannt werden dürften, ist aufgrund der unterschiedlichen Laufzeiten für Licht und den Partikelstrom durch die laufende astronomische Beobachtung ein rechtzeitiger Hinweis auf mögliche Dosiserhöhungen, die auch im Flugbetrieb relevant sind, ohne zusätzliche Maßnahmen sichergestellt.

Durch Wechselwirkung mit den Stickstoff und Sauerstoffatomen unserer Gashülle entstehen ganze Kaskaden mit einem bunten Zoo ionisierender Wellen- und Partikelstrahlen. Die beiden wichtigsten Komponenten sind eine harte Gammastrahlung und Neutronen. Mit der zunehmenden atmosphärischen Tiefe werden vor allem die schweren Kerne absorbiert, weshalb die Erdoberfläche aus der primären Strahlung praktisch nur noch von hoch energetischen Protonen erreicht wird.

Zudem bewirkt das magnetische Feld der Erde, dass nur geladene Teilchen oberhalb einer Abschneideenergie in die Tiefe vordringen können. Die niedrigste Abschneidesteifigkeit herrscht in den Polregionen. Deshalb ist dort auch die Dosisleistung höher. Die Bedeutung der geomagnetisch verursachten Veränderungen des Strahlenfeldes hängt ganz wesentlich davon ab, welche strahlenbiologische Bewertung den Neutronen zugemessen wird. In den üblichen Flughöhen um 10km macht in unseren Breiten die physikalische Dosisleistung durch die Neutronen nur etwa 1/6 der Dosisleistung durch Gammastrahlung aus. Die Dosisleistung der Neutronen wird aber erheblich stärker durch die geomagnetische Breite beeinflusst als die der Gammastrahlung. Der Einfluss dieser Varianz auf die Summe der physikalischen Dosis bleibt also minimal, wird aber dominierend, wenn die hohe biologische Wirksamkeit der Neutronen angemessen berücksichtigt wird.

Bei der Wahl der Flugroute kann deshalb ein längerer Weg unter Vermeidung polnaher Regionen die Strahlenbelastung beim fliegenden Personal wie bei Passagieren drastisch senken.

Ähnliche Verhältnisse sind beim Vergleich verschiedener Flughöhen zu beachten. Die Dosisleistung der Neutronen wächst mit der Flughöhe überproportional und erreicht in ca. 25km ein Maximum. Die Strahlenbelastung beim Einsatz von Überschallflugzeugen zum Personentransport (SST), der solche Regionen anpeilt, wurde durch Berechnungen relativiert, nach denen eine wesentlich kürzere Flugzeit die Auswirkungen der höheren Dosisleistung so kompensieren soll, dass die Strahlenbelastung für eine bestimmte Flugstrecke nicht höher als beim Einsatz konventioneller Düsenverkehrsflugzeuge sein sollte. Dieser Vergleich war jedoch nur zutreffend mit den längst verlassenen niedrigen Wichtungsfaktoren für Neutronen. Sowohl die Bewertung der Neutronen als auch die gesundheitliche Gefährdung durch eine Strahlenbelastung überhaupt erscheinen heute in einem völlig veränderten Licht. Aus der Sicht des Strahlenschutzes erscheint die derzeit wieder belebte Diskussion des SST in den USA geradezu makaber, insbesondere angesichts der Forderung, aus Gründen des Strahlenschutzes die Reise Flughöhen der konventionellen Düsenverkehrsflugzeuge zu senken und zu begrenzen.

Die Abschirmung galaktischer Teilchen wird durch die Änderung des Sonnenwindes innerhalb der solaren Zyklen moduliert. Die Zahl der Sonnenflecken korreliert gegenläufig mit der Dosisleistung der Höhenstrahlung. Allerdings wächst mit der Zahl der Sonnenflecken die Häufigkeit solarer Eruptionen. Bei rückläufiger Zahl der Sonnenflecken wurden Eruptionen mit besonders hoher Intensität beobachtet.

Solare Eruptionen führen zu einer Störung der Abschirmung geladener Teilchen und zugleich zu einer Vermehrung der Protonen aus solarer Quelle, deren Energie allerdings im Durchschnitt erheblich geringer ist als die der Teilchen aus galaktischen Quellen. Die Erhöhung der Dosisleistung hält oft viele Stunden an und kann damit die Exposition während eines gesamten Langstreckenfluges prägen. Die Häufigkeit der Ereignisse korreliert umgekehrt zur Dosisleistung. Immerhin ist im Durchschnitt in jeder Woche mit einer Erhöhung der Dosisleistung um ca. 0,1 mSv/h zu rechnen. In jedem Solarzyklus (elf Jahre) wurden bisher drei bis fünf Ereignisse mit Dosisleistungen um 1,5 mSv/h beobachtet, bei säkulären Ereignissen, zuletzt im Februar 1956, sogar Spitzenwerte um 10 mSv/h. Zur Erinnerung: Die Strahlenschutzverordnung fordert dann, wenn die Dosisleistung höher als 3 mSv/h sein kann (kann, nicht ist!), die Einrichtung eines Sperrbereiches.

Bevor die Bedeutung der erhöhten Dosisleistung gewürdigt werden kann, stellt sich das gleiche Problem wie bei der Beurteilung der Strahlenexposition während des Fliegens überhaupt: Wie muss die relative biologische Wirksamkeit dieses komplexen Strahlenfeldes quantifiziert werden, vor allem im Hinblick auf seine dicht ionisierende Komponente, also insbesondere der Neutronen.

Biologische Wirksamkeit der Höhenstrahlung

Die meisten Erkenntnisse zur relativen biologischen Wirksamkeit (RBW) der Neutronen waren aus Experimenten mit Tieren und Zellkulturen gewonnen worden. Inzwischen liegen aber auch erste Erfahrungen mit menschlichen Daten vor, die am fliegenden Personal erhoben worden sind. Es wird nun die biologisch äquivalente Do-

sis berechnet, die nach den Erfahrungen in Hiroshima und Nagasaki den gleichen Effekt auf die Krebsinzidenz oder -sterblichkeit hervorgerufen hätte, wie er beim fliegenden Personal beobachtet worden ist. Diese Dosis wird der Strahlenbelastung gegenübergestellt, die für die untersuchten Kohorten vermutet worden ist oder nach bisherigen Annahmen abgeschätzt werden kann. Für die Analyse wurden epidemiologische Untersuchungen aus Kanada [1], Finnland [13] und Japan [9] herangezogen (s. Tab 1).

Da beim Brustkrebs gewissermaßen ein inverser Healthy-Worker-Effekt beobachtet wird (Angehörige einer höheren sozialen Klasse haben in Finnland eine etwa 30% höhere Brustkrebsinzidenz), wurde der auf die soziale Klasse korrigierte Wert für die Gruppe verwendet, die mehr als 15 Jahre lang nach Beginn der Beschäftigung verfolgt worden war. Die SMR der japanischen Piloten wurde auf die extrem erhöhte konkurrierende Mortalität durch Flugzeugunfälle korrigiert [12]. Bei der Leukämie wurde der Wert für SIR ohne chronisch lymphatische Leukämie verwendet, da für diese Krankheit eine abweichende Dosis-Wirkungsrelation gelten dürfte.

Alle Werte für das excess relative risk (ERR) wurden wie SIR und SMR auf die Basis 100 bezogen. Die Werte für das excess relative risk bei einer Dosis von 1 Gy wurden für die Inzidenz aller soliden Tumore und den Brustkrebs der Frau für die Altersgruppe 20-39 Jahre (bei Exposition) der neuen Auswertung der Inzidenzstatistik des RERF entnommen [20]. Das geschlechtsspezifische excess risk für Mortalität an allen Krebsarten stammt aus der Tab. 4-2 des BEIR V-Reports (Frauen 5%, Männer 3,7% für 0,1 Sv). Dieser Wert wurde nach Tab. 4-3 um den Anteil korrigiert, den die Altersgruppe für Männer von 35 Jahren (bei Exposition) an der für alle

Altersgruppen gemittelten Sterblichkeit hat [2]. Bei Frauen wurde dabei der Mittelwert der Altersgruppen 25 und 35 Jahre (bei Exposition) verwendet.

Für die Leukämien haben bereits Band et al. das ERR nach BEIR V unter Berücksichtigung der Altersverteilung in ihrer Kohorte ermittelt und die Werte für das relative risk für verschiedene angenommene Dosisleistungen angeben. In der Tab. 2 wurde dieser Wert auf ein ERR bei 1 Sv umgerechnet. Von der SIR oder SMR wird die Basis 100 subtrahiert, um das gefundene excess relative risk zu errechnen, und das Ergebnis in Relation zum ERR bei 1 Sv gesetzt, um die biologisch äquivalente Dosis Atombombenstrahlung zu erhalten, die denselben Effekt hervorgerufen hätte.

Die mittlere Dosisleistung für die kanadischen Piloten haben Band et al. unter Beachtung der geomagnetischen Breite auf 6 mSv/a abgeschätzt. Daraus wurde die mittlere Lebensdosis (LD) durch Multiplikation mit der durchschnittlichen Lebensarbeitszeit der Kohorte errechnet. LD für das finnische Kabinenpersonal wurde der Originalarbeit entnommen. Die Lebensdosis für die japanischen Piloten wurde auf der Grundlage einer Jahresdosis von 5,0 mSv errechnet [3].

Schließlich wurde die Vielfache V bestimmt, um die die biologisch äquivalente Dosis größer ist als die Lebensdosis LD. Das Ergebnis der Berechnungen zeigen Tab. 2 und Abb. 1. Während die Vielfache V für alle Krebsarten und die nicht-lymphatischen Leukämien sich um 20 bewegen und für alle drei Kohorten relativ gut übereinstimmen, ergibt sich für den Brustkrebs ein etwa doppelt so hoher Wert.

Diskussion

Während die SIR-Werte für den Brustkrebs der Frau und für die nichtlymphozytären Leukämien des Mannes statistisch signifi-

kant erhöht sind, gilt dies nicht für die SIR- und SMR-Werte aller Krebserkrankungen in den beiden analysierten Studien aus Japan und Finnland. Dennoch dürften auch diese Werte belastbar sein, nicht nur, weil sie in der Größenordnung übereinstimmen, sondern auch vergleichbar sind mit dem signifikanten Wert der proportionalen Mortalitätsrate (PMR) von 131, der in einer britischen Studie an Männern (Piloten) gefunden worden war [8]. Sie liegen sogar niedriger als ein nach Fallzahl gewichteter, signifikant erhöhten Wert der PMR von 151, der sich bei einer metaanalytischen Zusammenfassung vier bislang zugänglicher Studien an Männern (Piloten) ergeben hatte [12]. Dabei waren aus zwei kanadischen Quellen noch ein wesentlich stärker und signifikant erhöhter Wert der PMR von 203 eingeflossen [14] und ein nicht signifikanter, aber ähnlich erhöhter Wert wie in den hier analysierten Gruppen von 121 [1]. Der auf konkurrierende Mortalität korrigierte Wert der PMR der neuen kanadischen Kohorte ist auf den nicht signifikanten Wert von 1,13 erhöht.

Zur Notwendigkeit einer Korrektur der Verzerrung der SIR und SMR durch die konkurrierende Mortalität aufgrund gehäufte Todesfälle bei Flugzeugunfällen ist bereits an anderer Stelle eingegangen worden [14, 12]. Das quantitative Vorgehen im Einzelnen ist ebenfalls bereits erläutert worden [12]. Die Publikation über die finnische Studie enthält keine Daten zur (konkurrierenden) Mortalität.

Beim Vergleich der Effekte konnten für den Referenzwert der zu erwartenden Inzidenz aus den Beobachtungen von Hiroshima und Nagasaki nur die soliden Tumore herangezogen werden, da die Leukämien nach einem anderen Modell (absolut statt relativ) ausgewertet veröffentlicht worden sind. Deshalb waren für den Vergleich in Zeile 2 der Tabellen 1 und 2 aus den finni-

schen Daten die Lymphome und Leukämien herausgenommen worden. In Zeile 3 dieser Tabellen wurde zum Vergleich mit der Inzidenz aller Krebsarten das ERR für Mortalität herangezogen.

Während die Lebensarbeitszeit in der finnischen Publikation auf Teilzeitbeschäftigung und Arbeitsunterbrechung durch Schwangerschaft etc. korrigiert worden war, gibt es dafür in der japanischen Arbeit keine Angaben. Die dadurch bedingte Überschätzung dürfte allerdings bei einem männlichen Kollektiv nur eine geringe Bedeutung haben.

Dass die biologisch äquivalente Dosis die konventionell berechnete Lebensdosis um mehr als eine Größenordnung übersteigt, bestätigt Erwartungen aus der bisherigen Diskussion zur systematischen Unterbewertung der Neutronen bei der Empfehlung von Qualitäts- und Strahlungswichtungsfaktoren für die Berechnung der Äquivalentdosis [10, 11]. Bei einem Vergleich der Wirkung von Neutronen mit der Atombombenstrahlung muss die höhere Wirksamkeit der Röntgenstrahlung (als Referenzstrahlung für die Bewertung der Neutronen) um den Faktor Vier ausgegangen werden [18]. Wegen der inversen Dosis- und Dosisleistungsabhängigkeit der RBW kann im hier betrachteten Niedrigdosisbereich nochmals ein zusätzlicher Faktor von etwa Drei erwartet werden [11]. Auf der Basis des Qualitätsfaktors der ICRU von 25 [7] beträgt die Relation gegenüber dem Strahlungswichtungsfaktor nach ICRP 60 von 20: 1,25. Plausibel wäre also ein Wert für die Vielfache V von etwa 16 gegenüber einer konventionell mit einem Strahlungswichtungsfaktor 20 nach ICRP 60 berechneten Lebensdosis ($4 \times 3 \times 1,25 = 16$).

Eine von diesen Erwartungen abweichende Vielfache V kann außer durch die noch enorme statistische Unsicherheit durch folgende Einflüsse systematisch bedingt

sein, die sich gegenseitig nicht ausschließen. Sie kann zu hoch sein durch sonstige, für die Arbeitsbedingungen spezifische Einflussfaktoren für einzelne Krebsarten, eine Unterschätzung einzelner Komponenten der physikalischen Strahlendosis sowie eine zusätzliche systematische Unterbewertung der Neutronen bei der Berechnung der Äquivalentdosis über die diskutierten Faktoren hinaus. Sie kann zu niedrig sein durch: fehlende Korrektur des Healthy-Worker-Effektes; niedrig exponierte Teilgruppen, insbesondere Piloten von kleineren Flugzeugen und Hubschraubern sowie einen überproportionalen Anteil von Personen in den Untergruppen mit längster Beobachtungszeit, die Dienst auf Verkehrsflugzeugen mit niedrigerer Flughöhe vor Einsatz der Düsenflugzeuge verrichteten.

Darüber hinaus muss für den exzessiv erhöhten Wert der Vielfachen V des Brustkrebses darauf hingewiesen werden, dass auch aus Tierversuchen eine starke Variabilität der RBW bei verschiedenen biologischen Endpunkten beobachtet worden ist. Dabei gehören die Mammatumore der Ratte zu den Geschwülsten, bei denen mit die höchsten Werte in der Literatur berichtet werden. Bei deutlicher inverser Dosisrelation ist bei Versuchen mit Röntgenstrahlung als Referenzstrahlung mit 1 mGy Neutronendosis, das entspricht bei einem Strahlungswichtungsfaktor von 20 einer Äquivalentdosis von 20 mSv, noch ein signifikanter Tumoreffekt erzielt worden. Der RBW erreichte bei dieser Dosis etwa den Wert 280 (!) [16].

Die epidemiologischen Untersuchungen zeigen ein spezifisches Muster der von zusätzlichen Tumoren betroffenen Organe, das von der Beobachtung nach einer Exposition gegenüber locker ionisierenden Strahlen abweicht: Basaliom, Brustdrüse, Magen-Darm-Trakt, Hirn, Leukämie, Lunge und Melanom. Diese Liste zeigt eine

beachtliche Übereinstimmung mit der Liste von Tumoren, für die eine besondere genetische Prädisposition diskutiert wird [4, 15]. Mit dieser Prädisposition kann eine erhöhte Strahlensensibilität verknüpft sein. Ein zusätzliches Merkmal ist häufig ein früheres Erkrankungsalter. Es stellt sich deshalb die Frage, ob der bei einer Prädisposition zur entgeltigen Induktion des Tumors noch erforderliche Verlust der Heterozygotizität durch Schädigung des kontrollierenden Gens nicht durch eine dicht ionisierende Strahlung besonders effektiv ausgelöst werden kann. Ein Beitrag durch genetische Prädisposition zur erhöhten Tumorfrequenz würde auch erklären, dass bei Untersuchungen an Kohorten mit längerer Beobachtungszeit die SMR und SIR wieder rückläufig ist, da es sich teilweise nicht um tatsächlich zusätzliche Tumore, sondern lediglich um ein Auftreten in jüngerem Alter gehandelt haben kann. Bei der Bewertung ist allerdings zu beachten, dass nicht nur ein zusätzlicher Tumor, sondern bei einer prädeterninierten Erkrankung ein Verlust an tumorfreien Jahren auch eine massive Minderung der Lebensqualität bedeutet.

Auf der Basis der so ermittelten biologisch äquivalenten Dosisleistung kann nun eine Abschätzung der Schadenserwartung durch die solaren Eruptionen erfolgen. Dazu werden folgende Annahmen gemacht: Vielfache $V = 16$ (niedrigster abgeleiteter Wert); 3×10^9 Personenflugstunden pro Jahr [5], also durchschnittlich 342.466 Personen im Flug; Krebstote nach BEIRV für die Bevölkerung der USA 7,9 Tote pro 100 Personensievert [2], Abschlag wegen abweichender Altersstruktur (im wesentlichen Erwachsene als Passagiere) -20% , Zuschlag für höhere Lebenserwartung $+15\%$. Bereits die relativ geringfügige Erhöhung der Dosisleistung durch die häufigste Form der solaren Eruptionen verursacht eine

Schadenserwartung, die die Einrichtung eines Frühwarnsystems rechtfertigt. Auch ohne die solaren Eruptionen stellt das kosmische Strahlenfeld eine Gefährdung für das fliegende Personal und die Passagiere dar, die entschiedene Maßnahmen verlangt: Reduktion und Begrenzung der Flughöhen, Begrenzung der Einsatzzeiten für das Personal sowie strahlenmedizinisch optimierte Flugrouten.

Literatur

- 1 Band, S. R., Le, N.D., Fang, R., Deschamps, M., Coldman, A.J., Gallagher, R.S., Moody, J. 1996, Cohort Study of Air Canada Pilots: Mortality, Cancer Incidence, and Leukemia Risk Am. J. Epidemiol. 143, 137-143
- 2 BEIR V 1990, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, National Academy Press, Washington DC, 1990
- 3 BMU 1992, Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bericht der Bundesregierung über Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 1990, Drucksache 12/2677, Verlag Dr. Heger, Bonn, 1992
- 4 Burkart, C. 1994, Das Tumorsuppressorprotein p53, Dtsch. Ärztebl. 91, A-898-904
- 5 ICAO, International Civil Aviation Organization, <http://www.icao.org/>
- 6 ICRP 60 1991, International Commission on Radiological Protection, Publication 60, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Annals of the ICRP Vol. 21, No. 1-3, Pergamon Press, Oxford, New York, Seoul, Tokyo
- 7 ICRU 40 1986, International Commission on Radiation Units and Measurements, The Quality Factor in Radiation Protection, Report of a Joint Task Group of the ICRP and ICRU to the ICRP and ICRU, Report 40, Bethesda, Maryland 20814, USA
- 8 Irvine, D., Davies, D.M. 1992, The Mortality of British Airways Pilots, 1966-1989: A Proportional Mortality Study, Aviat. Space Environ. Med. 276-279

- 9 Kaji, M., Tango, T., Asukata, I., Tajima, N., Yamamoto, K., Yamamoto, Y., Hokari, M. 1993, Mortality Experience of Cockpit Crewmembers from Japan Airlines, *Aviat. Space Environ. Med.* 748-750
- 10 Kuni, H. 1991, Zur Strahlenbelastung des fliegenden Personals - Neutronen und ihre Bewertung, *Vereinigung Cockpit, Frankfurt*, 39 S.
- 11 Kuni, H. 1993, Die Bewertung von Alpha- und Neutronenstrahlen bei der Berechnung der Äquivalentdosis, In: Lengfelder, E., Wendhausen, H. (Hrsg.): *Neue Bewertung des Strahlenrisikos, Niedrigdosis-Strahlung und Gesundheit*, MMV Medizin Verlag, München, 1993, S. 19-27
- 12 Kuni, H. 1994, Studies on Increased Cancer Risk of Flight Personnel, *Radiation Symposium of the International Federation of Air Line Pilots Associations, Frankfurt*, 9.05.1994, Download: <http://staff-www.uni-marburg.de/~kunih/all-doc/epi-fp.pdf> (184 kB)
- 13 Pukkala, E., Auvinen, A., Wahlberg, G. 1995, Incidence of Cancer among Finnish Airline Cabin Attendants, 1967-92, *Brit. Med. J.* 311, 649-652
- 14 Salisbury, D.A., Band, P.R., Threlfall, W.J., Gallagher, R.P. 1991, Mortality Among British Columbia Pilots, *Aviat. Space Environ. Med.* 351-352
- 15 Sankaranarayanan, K., Chakraborty, R. 1995, Cancer Predisposition, Radiosensitivity and the Risk of Radiation-induced Cancers. I. Background. *Radiat. Res.* 143, 121-143
- 16 Shellabarger, C.J., Chmelevsky, D., Kellerer, A.M. 1980, Induction of Mammary Neoplasms in the Sprague-Dawley Rat by 430-keV Neutrons and X-Rays, *J. Natl. Cancer* 64, 821-833
- 17 SSK 1995, *Berichte der Strahlenschutzkommission, Heft 1, Die Ermittlung der durch kosmische Strahlung verursachten Strahlenexposition des fliegenden Personals, Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 128. Sitzung am 8./9.12.1994*, Gustav Fischer Verlag Stuttgart, Jena, New York
- 18 Straume, T. 1995, High-Energy Gamma Rays in Hiroshima and Nagasaki: Implications for Risk and wR, *Health Phys.* 69, 954-956
- 19 StrlSchV 1989, Zweite Verordnung zur Änderung der Strahlenschutzverordnung vom 18.Mai 1989, *BGBI I S.* 943. Bekanntmachung der ab 1.November 1989 geltenden Fassung vom 30.Juni 1989. *BGBI. I S.* 1321, berichtigt 16.10.1989 *BGBI. I S.* 1926
- 20 Thompson, D.E., Mabuchi, K., Ron, E., Soda, M., Tokunaga, M., Ochikubo, S., Sugimoto, S., Ikeda, T., Terasaki, M., Izumi, S., Preston, D.L. 1992/1994, *Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors. Part II: Solid Tumors, 1958-1987*, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima, Technical Report, 1992, RERF TR 5-92, *Radiat. Res.* 137 (1994), S17-S67
- 21 Tokunaga, M., Land, C.E., Tokuoka, S., Nishimori, I., Soda, M., Akiba, S. 1994, Incidence of Female Breast Cancer among Atomic Bomb Survivors, 1950-1985, *Radiat. Res.* 138, 209-223

Horst Kuni: Strahlenbelastung des fliegenden Personals – Bewertung und gesundheitliche Konsequenzen

Tabelle 1: Erläuterung der analysierten Parameter: SIR: Standardisierte Inzidenzrate, SMR: Standardisierte Mortalitätsrate, CLL: Chronisch lymphatische Leukämie

Nr.	Organ	registriert wurden	verglichen wurde mit der Bevölkerung	Rate	Ort der Exposition	Land	Fälle Anzahl
1	Mamma	Brustkrebs der Frau	Inzidenz	SIR	Kabine	FIN	20
2	Sol. F	Solide Tumore der Frauen	Inzidenz	SIR	Kabine	FIN	32
3	Alle F	Alle Krebsarten der Frauen	Inzidenz	SIR	Kabine	FIN	35
4	Alle M	Alle Krebsarten der Männer	Mortalität	SMR	Cockpit	J	20
5	Knochenmark	Leukämie ohne CLL	Inzidenz	SIR	Cockpit	CDN	7

Tabelle 2: Biologisch äquivalente Dosis zur Erklärung der epidemiologisch gefundenen Effekte
Organ: s. Tab. 1, Rate: SIR oder SMR, ERR: Excess relative risk
b.ä.D.: biologisch äquivalente Dosis, LAZ: Lebensarbeitszeit, LD: Lebensdosis, V: Vielfache b.ä.D./LD

Nr.	Organ	Rate	ERR Gy ⁻¹	b.ä.D. mSv	LAZ a	LD mSv	V
1	Mamma	190	124	726	8,3	17,5	41
2	Sol. F	120	70	284	8,3	17,5	16
3	Alle F	123	54	430	8,3	17,5	25
4	Alle M	145	27	1.655	13,8	69	24
5	Knochenmark	188	32	2.777	20,8	124,8	22

Tabelle 3: Schadens Erwartung durch solare Eruptionen
Annahmen: Exposition der Personen weltweit durch erhöhte Dosisleistung während einer Flugstunde, Vielfache für biologische Äquivalenz der Höhenstrahlung gegenüber der Atombombenstrahlung V = 16, weltweit 342.466 Personen im Flug, Krebstote pro Personensievert modifiziert nach BEIR V

Häufigkeit	Dosis mSv	Biol. äqu. Dosis mSv	Kollektivdosis PersonenSv	Krebstote
50-60 pro Jahr	0,1	1,6	548	159
pro Zyklus 3-5x	1,5	24	8.219	2.389
säkular	10	160	54.795	15.930

Abbildung 1:

Vergleich der beruflichen Lebensdosis verschiedener Gruppen des fliegenden Personals, berechnet als Äquivalentdosis mit den Strahlungswichtungsfaktoren der ICRP 60, mit der biologisch äquivalenten Dosis, die erforderlich ist, um die beobachtete Zunahme der Krebshäufigkeit zu erklären (linke Skala). Die Vielfache (V) aus der Division dieser biologisch äquivalenten Dosis (B.ä.D.) durch die Äquivalentdosis nach ICRP 60 (Äqu.) ist auf der rechten Skala aufgeführt.

