

Berufskrankheiten durch ionisierende Strahlen – Erfahrungen mit der Anerkennungspraxis in Deutschland

Inge Schmitz-Feuerhake, Rainer Frentzel-Beyme und Roland Wolff

Die Kernenergie wird in etlichen wirtschaftlichen und politischen Kreisen als Klimaretter gepriesen. Diese berufen sich dabei auf das Strahlenkomitee der Vereinten Nationen UNSCEAR und die Internationale Strahlenschutzkommission ICRP, nach deren Meinung die Reaktorunfälle von Tschernobyl und Fukushima keine nennenswerten Gesundheitsfolgen in den betroffenen Bevölkerungen erzeugt haben. Sie behaupten ferner, dass Mutationen bei Kindern bestrahlter Eltern beim Menschen nicht nachgewiesen seien und Schädigungen bei Bestrahlung in utero unter 100 mSv nicht vorkommen. UNSCEAR hat im Jahr 2016 verkündet, dass beim Erwachsenen unterhalb 100 mSv auch praktisch keine Krebserkrankungen zu beobachten seien. Die Dosis 100 mSv in 5 Jahren ist gerade der Grenzwert für beruflich strahlenexponierte Personen. Die ICRP ist die normgebende Institution für unsere Strahlenschutzgesetzgebung. Die dringend notwendige Verbesserung der Anerkennung von strahlenbedingten Berufskrankheiten ist in diesem Rahmen nicht zu erwarten.

Schlüsselwörter: Strahlenrisiko, Nukleararbeiter, Medizinisches Personal, Flugpersonal, Uranbergarbeiter, Radarsoldaten, Sterilität
keywords: radiation risk, nuclear workers, medical personnel, flight personnel, uranium miners, military radar personnel, infertility

In den letzten Jahrzehnten wurde in umfangreichen epidemiologischen Studien gezeigt, dass bei beruflich strahlenexponierten Arbeitnehmern innerhalb der gesetzlichen Dosisgrenzwerte signifikant erhöhte Krebsraten in unerwarteter Höhe auftreten sowie andere bedeutende Systemerkrankungen, die vorher nicht als Strahlenfolge bekannt waren. Ferner treten bei den Nachkommen vermehrt Geburtsfehler auf. Im neuen deutschen Strahlenschutzgesetz von 2017 wird das nicht berücksichtigt (Schmitz-Feuerhake 2017).

Die zahlenmäßig größten Studien im Berufsmilieu erfolgten im Rahmen des Projektes INWORKS (International Nuclear Workers Study) an 308.297 überwachten Beschäftigten der Nuklearindustrie in Frankreich, U.K. und U.S.A. An der Untersuchung über die Mortalität durch maligne solide Tumoren waren 9 internationale Forschungsinstitute beteiligt (Richardson et al. 2015). Die mittlere akkumulierte Organdosis für den Darm (entsprechend der gewählten Referenzdosis wie bei den Atombombenüberlebenden) wurde zu 20,9 mGy* (Median 4,1 mGy) bestimmt. Entgegen früherer Annahmen zeigte sich, dass pro akkumulierter Dosis bei chronischer Niederdosisbestrahlung ein höheres Mortalitätsrisiko an Arbeitsplätzen besteht als nach Kurzzeitbestrahlung (japanische Atombombenüberlebende). Zahlreiche Untersuchungen im Berufsmilieu über Spätschäden an einzelnen Organen bestätigen dieses grundlegende Ergebnis, dennoch bilden die Überlebenden der Atombombenabwürfe auf Hiroshima und Nagasaki bis dato das offiziell bevorzugte Referenzkollektiv für Strahlenschäden am Menschen.

Der letzte vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) publizierte Stand der Erkenntnis ist die Wissenschaftliche Stellungnahme zur Berufskrankheit (BK) Nr. 2402 der Anlage 1 zur Berufskrankheitenverordnung (BKV) „Erkrankungen durch ionisierende Strahlung“ vom 24.11.2011. Dieser beruht auf Angaben des Strahlenkomitees der Vereinten Nationen

UNSCEAR aus dem Jahr 2006, die sich vornehmlich auf die Atombombenüberlebenden stützen. Danach kann es sich bei strahlenbedingten Berufskrankheiten innerhalb der zulässigen Dosisgrenzwerte nur um bestimmte Krebsleiden handeln.

Anerkennungspraxis bei beruflich strahlenexponierten Arbeitnehmern

In Deutschland gibt es laut Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) derzeit etwa 400.000 beruflich strahlenexponierte Arbeitnehmer. Wir haben in den zurückliegenden Jahrzehnten viele Erfahrungen über die Anerkennungsverfahren zu folgenden Berufsgruppen und ihre Probleme gesammelt:

- Beschäftigte in der westdeutschen und gesamtdeutschen Nuklearindustrie sowie dem neuerdings eingesetzten Personal zu Abbau und Dekontamination der Anlagen
- Medizinisches Personal, das in der Strahlentherapie und -diagnostik sowie bei Maßnahmen unter Röntgenkontrolle exponiert wird
- Flugpersonal
- Bergarbeiter, vornehmlich Beschäftigte des Uranabbauetriebs SDAG Wismut DDR
- „Radarsoldaten“, d.h. Soldaten und Personal der Bundeswehr und der NVA, die ab 1956 über einige Jahrzehnte ionisierender Strahlung ausgesetzt waren.

Für Betroffene aus den drei erstgenannten Gruppen gilt die BKV. Für die Wismut-Beschäftigten wird auch die BKV herangezogen, obwohl eine wichtige Voraussetzung zur Anwendung fehlt, nämlich das Vorhandensein individueller Dosismesswerte. Soldaten der Bundeswehr und NVA werden nach dem Soldatenversorgungsgesetz entschädigt und das Personal nach BKV.

* 1 mGy (Milligray) entspricht bei Röntgen- u. Gammastrahlung 1 mSv (Millisievert), der Dosisgrenzwert für die Bevölkerung beträgt 1 mSv pro Jahr; für beruflich strahlenexponierte Personen 100 mSv in 5 Jahren.

Als berufsbedingt durch ionisierende Strahlung anerkannt werden nach BKV (Krankheitsgruppe BK 2402) beim bestimmungsgemäßen Betrieb nur bestimmte Krebserkrankungen. Da diese auch „spontan“ auftreten können, wird eine Listenkrankheit der Gruppe 2402 nur als BK anerkannt, wenn die Wahrscheinlichkeit der Verursachung durch Strahlen größer ist als die Wahrscheinlichkeit des Spontanaufretens (Verursachenswahrscheinlichkeit größer als 50 %). Es muss daher eine relativ hohe Mindestdosis nachgewiesen werden, um dieses Kriterium zu erfüllen. Aus dieser Bedingung resultiert bereits, dass die meisten berufsbedingten Krebserkrankungen per Gesetz bei den Arbeitnehmern nicht anerkannt werden. Denn die Anzahl der verursachten Erkrankungen richtet sich nicht nach der Individualdosis der Exponierten, sondern nach der Summe aller Einzeldosen. Letztere sind in der BRD überwiegend sehr viel kleiner als die Mindestdosis, und die meisten BK treten nach Wahrscheinlichkeit in den unteren Dosisgruppen auf, da sich dort die allermeisten Beschäftigten befinden.

Dieses grundsätzliche Problem wird in verschiedenen Industrienationen zum Teil anders gehandhabt. Die Kritik an der Anerkennungspraxis innerhalb der gesetzlichen Vorgaben beruht auf der Erfahrung, dass die Strahlenschäden beim Menschen nach überholten Vorstellungen über Dosiswirkungszusammenhänge beurteilt werden. Die Sachverständigen der Berufsgenossenschaften, bei denen die potenziellen Berufskrankheiten gemeldet werden, nehmen die nach 2006 erschienenen Untersuchungsergebnisse nicht zur Kenntnis. Die Sozialgerichte beziehen sich häufig auf ein beliebtes Standardwerk der Arbeitsmedizin „Schönberger-Mertens-Valentin: Arbeitsunfall und Berufskrankheit“, das jetzt in der 9. Auflage von 2017 vorliegt. Es gibt vor, den aktuellen Stand der Wissenschaft wiederzugeben, ist jedoch nicht weitergekommen als ebenfalls zur genannten Version der Anlage 1 zur BKV für Nr. 2402 von 2011. Darüber hinaus enthält es noch Passagen aus älteren Zeiten, die im Widerspruch zur Version von 2011 stehen.

Beschäftigte der Nuklearindustrie und Dekontaminationsarbeiter

Bei Arbeitern in Atomanlagen stellt die Möglichkeit der Inkorporation von radioaktivem Staub ein besonderes dosimetrisches Problem dar. Dieses wird sich durch den inzwischen begonnenen Abbruch von Atomanlagen noch verschärfen, da die Beschäftigten bei der Dekontamination solcher Anlagen mit offener Radioaktivität zu tun haben. Durch gutachterliche Beauftragung des medizinischen Sachverständigen Frentzel-Beyme sind wir zufällig mit drei Fällen von Leiharbeitern befasst worden, die in Hanau bei vormalig NUKEM mit dem Abriss einer Anlage für die Herstellung von MOX-Brennelementen beschäftigt waren und danach in relativ jungen Jahren an einem Non-Hodgkin-Lymphom erkrankten. Diese Krebskrankheit gehört offiziell bei uns zu solchen mit geringem Strahlenrisiko, tritt aber typischerweise bei Nukleararbeitern auf (Richardson et al. 2009). Bei den drei Fällen lässt sich an Hand der dosimetrischen Angaben nachweisen, dass sie sich in einer plutoniumhaltigen Atmosphäre aufgehalten haben (Wolff et al. 2018). Als Fallbericht in Deutschland wurde diese Häufung im Zentralblatt für Arbeitsmedizin publiziert (Frentzel-Beyme et al. 2020). Die zugehörige BG ETEM streitet jedweden Zusammenhang ab.

Interessanterweise hat sie aber im Mai 2019 einen Beitrag „Rückbau von Kernkraftwerken: Arbeitsschutz frühzeitig einplanen“ in Form eines Interviews veröffentlicht. Interviewt wird der Leiter des Fachgebiets Strahlenschutz der BG ETEM Thomas Ludwig, es ist also ein Interview mit sich selbst. Defizite in der bisherigen Handhabung oder mangelnde Vorsorge werden von Ludwig darin nicht beklagt.

Medizinisches Personal

Nach Angaben des BfS sind in Deutschland etwa 287.000 Beschäftigte im Medizinbereich strahlenexponiert (BfS 2014). Ihre mittlere Strahlendosis ist von 0,53 mSv im Jahr 2003 auf 0,35 mSv im Jahr 2014 gesunken. Es gibt aber eine höher belastete Untergruppe („Radiografie“) von etwa 3.000 Personen (2014), die chirurgische Interventionen unter Röntgenkontrolle am Patienten durchführen (z. B. Herzkatheter) oder begleiten und durch Streustrahlung durch die untersuchte Person exponiert werden. Ihre mittlere Dosis wird zu 1,24 mSv im Jahr 2014 angegeben, das entspricht einem Rückgang gegenüber 2007 um fast 50 %. Es gibt allerdings auch bei gleicher Maßnahme sehr große individuelle Unterschiede in der Exposition von über einem Faktor 10 (Linet et al. 2010).

Durch den Einsatz von CT-gesteuerten Interventionen wird sich die Dosis zukünftig wieder erhöhen (Rathmann et al. 2014). Generell liegen in dieser Untergruppe Lebenszeitarbeitsdosen vor, die denen der INWORKS-Studie an Nukleararbeitern entsprechen. Aber es bedarf nach deren Beispiel sehr großer Personenzahlen, um die gesundheitlichen Folgen bei Ärzten und medizinischem Personal an radiologischen Arbeitsplätzen zu untersuchen.

In älteren Kohorten wurden erhöhte Krebsraten festgestellt. Bei 2.359 britischen männlichen Ärzten, die zwischen 1920 und 1979 in eine radiologische Gesellschaft eintraten, war die Sterblichkeit für alle Krebsarten gesamt (Faktor 1,17) sowie für Leukämie (2,40), Non-Hodgkin-Lymphome (3,08) und Prostatakarzinome (1,61) signifikant erhöht. Für die Gruppe nach Eintritt 1954 ergab sich keine signifikante Erhöhung mehr (Berrington et al. 2001).

In Studien an Röntgenassistentinnen bestätigte sich u.a. die Strahlenempfindlichkeit der weiblichen Brust. Sigurdson und Mitarbeiter (2003) untersuchten die Inzidenz von Krebserkrankungen bei 90.305 Röntgenassistenten (davon 77 % weiblich) in den USA im Zeitraum von 1983-1998. Sie waren zwischen 1926 und 1982 für diesen Beruf registriert worden. Bei den Frauen ergaben sich signifikante Erhöhungen für die soliden Tumoren zusammengefasst (Faktor 1,06), die Brust (Faktor 1,16) und für die Schilddrüse (Faktor 2,23). Bei den Männern waren Melanome der Haut (Faktor 1,39) und Schilddrüsenkrebs (Faktor 2,23) signifikant erhöht.

In einer Fallkontrollstudie zur Ursachenforschung über die Entstehung von Melanomen der Haut, ausgehend von 2.780 Fällen in einer Population von 1,2 Million Bürgern, wurde bei Dentisten mit einer Röntgenexposition eine signifikante Erhöhung um den Faktor 2,01 festgestellt (Pion et al. 1995). Für die gesamte Berufsgruppe mit Röntgenexposition ergab sich eine signifikante Erhöhung um den Faktor 1,37.

Von den deutschen Autoren Wiesel und Queißer-Wahrendorf (2016) wurde ermittelt, dass beruflich strahlenexponierte Frauen bei uns ein etwa 4-fach erhöhtes Risiko haben, ein Kind mit Fehlbildungen zu bekommen, siehe unten.

Flugpersonal

Das zivile Flugpersonal wird in Deutschland zu den beruflich strahlenexponierten Personen gerechnet. Bei ihm zeigen sich erhöhte Raten an Krebserkrankungen und Grauem Star. Ihr Gesundheitsrisiko erscheint als unerwartet hoch, denn laut Bundesamt für Strahlenschutz liegt ihre Jahresdosis im Mittel nur bei 2 mSv und soll einen Wert von 8 mSv nicht überschreiten.

Die Höhenstrahlung (kosmische Strahlung) wird durch energiereiche Partikel aus dem Weltraum erzeugt, die mit den Molekülen der Atmosphäre reagieren und dadurch verschiedene Sekundärstrahlungen erzeugen. Im Flugzeug sind es hauptsächlich Neutronen, hochenergetische Protonen und Gammastrahlen, die das menschliche Gewebe schädigen. 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 z. B. im Gewebe Reaktionen auslösen, die einerseits zur Aussendung von Protonen führen und andererseits durch Wechselwirkung mit Atomkernen radioaktive Stoffe entstehen lassen. Protonen sind die positiv geladenen Bausteine der Atomkerne.

Das Prinzip der Äquivalentdosis in Sv kommt beim Strahlenschutz für das Flugpersonal an seine Grenzen. Diese Größe soll die Wirkung aller Strahlenarten gleichsetzen. Das ist aber nur näherungsweise möglich. Weil die Zusammensetzung des Strahlenfeldes komplex ist und zudem stark von der Flughöhe abhängt, hat man auch messtechnisch ein Problem. Man verzichtet daher in den Flugzeugen auf Dauermessungen durch Monitore, wie es an anderen Arbeitsplätzen vorgeschrieben ist. Seit 2003 werden in Deutschland dennoch individuelle Dosiswerte für das Flugpersonal im zivilen Luftverkehr erhoben und halbjährlich beim BfS gesammelt. Die Expositionen werden ersatzweise anhand von Rechenprogrammen bestimmt, denen musterhaft Strahlungsdaten zugrunde liegen, die man zu den wichtigsten Flugrouten gemessen hat. Diese Programme müssen vom Luftfahrt-Bundesamt (LBA) zugelassen werden. Während andere strahlenexponierte Arbeitnehmer anhand ihrer persönlich getragenen Dosimeter behördlich überwacht werden, ist es den Arbeitgebern wie Lufthansa etc. überlassen, anhand solcher Rechenprogramme die individuelle Dosis zu ermitteln. Es steht inzwischen fest, dass Piloten und Flugpersonal im zivilen Luftverkehr etwa doppelt so häufig an Melanomen der Haut leiden wie die übrige Bevölkerung (Miura et al. 2019) und weibliches Flugpersonal etwa 50 % mehr Brustkrebsfälle aufweist (McNeely et al. 2018). Die erstgenannten Autoren erwarben diese Erkenntnis anhand einer zusammenfassenden Analyse von 12 ausgewählten internationalen Studien.

Der Brustkrebsbefund vom McNeely und Mitarbeitern ist eine Bestätigung von Ergebnissen etlicher vorangegangener Inzidenzstudien aus verschiedenen Ländern. Außerdem treten weitere Krebserkrankungen häufiger als erwartet auf (Gudmundsdottir et al. 2017; McNeely et al. 2018). Versuche, diese Effekte

auf andere Ursachen als die kosmische Strahlung zurückzuführen, können nicht überzeugen. Darauf wurde in einer Stellungnahme des Bund für Umwelt- und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) zum neuen Strahlenschutzgesetz von 2017 näher eingegangen (dort Kap. 4).

Eine Chance zur Anerkennung einer BK besteht bei uns dennoch nicht, da die zugehörige BG Verkehr auf die angeblich sehr niedrigen Dosiswerte verweist und auf die Ergebnisse der deutschen Untersuchung an Flugpersonal, die als Mortalitätsstudie eine Untererfassung der realen Neuerkrankungsfälle bedingt und in der aufgetretene überzählige Krebstodesfälle kurzerhand als nicht strahleninduzierbar erklärt werden.

Die erste Publikation der Autorengruppe (Blettner et al. 2002) beobachtete nur 170 Todesfälle insgesamt bei 4.537 vorwiegend jüngerem männlichem Flugpersonal, davon 21 mit der Todesursache Krebs. Die Krebstodesrate unterschied sich mit 0,71 nicht signifikant von der entsprechenden der Bevölkerung, da der Vertrauensbereich von 0,41 bis 1,18 eine Verminderung bis zu 59 % und eine Erhöhung bis 18 % gegenüber der Bevölkerung zugelassen hätte. Überhaupt war in der Studie keine einzelne Krebsart statistisch abweichend.

Die Gruppe der untersuchten Frauen war größer und wurde aber mit im Mittel 11,8 Jahren noch kürzere Zeit beobachtet, 44 Krebstode traten auf. Die mit 19 Fällen von Brustkrebs höchste Todesrate ergab eine nicht signifikante Erhöhung von 28 % und wird diskutiert, weil sich in Studien aus anderen Ländern eine Brustkrebserhöhung gezeigt hatte. Die Autoren kommen jedoch zu dem Schluss, dass andere Faktoren als Strahlung dafür verantwortlich sind. Aufgrund der geringen statistischen Aussagekraft ihrer Daten hielten sie aber längere Beobachtungsdauern für belastbare Auswertungen für erforderlich. Insgesamt zeigte sich Studie 1 in keiner Richtung für aussagefähig. Dennoch schlussfolgern die Autoren in der Zusammenfassung als Pauschalaussage: „Berufliche Gründe scheinen nicht ernsthaft zur Sterblichkeit von Flugbegleitern beizutragen.“

Inzwischen wurde die Untersuchung mehrfach erweitert und erfasst derzeit die Sterblichkeit bei 26.846 Personen in einem Zeitraum von 1960 bis 2014, die mittlere Beobachtungszeit beträgt 28 Jahre, das Alter der Personen am Ende der Studie im Mittel nur 53,2 Jahre (Dreger et al. 2020). Als Ziel der prospektiven Studie erklären die Autoren, das Risiko mittels Vergleichs der Krebssterblichkeit in der Kohorte mit derjenigen in der Bevölkerung zu quantifizieren. Außerdem sollen für bestimmte Krebsarten Dosiswirkungszusammenhänge ermittelt werden.

Ersteres ist aber nicht die hier interessierende Fragestellung, sondern es geht darum, ob diese Beschäftigten ein zusätzliches Risiko durch ihren Beruf erlitten haben. Und dieser Untersuchung steht der sog. Healthy-Worker-Effekt (HWE) im Wege. Denn bei gesundheitlich ausgelesenen Personen wie besonders bei Piloten werden ohne Exposition eine geringere Gesamtsterblichkeit und eine geringere Rate an Krebserkrankungen beobachtet als bei der Allgemeinbevölkerung (sog. Allgemein- oder Normalpopulation als Kontrolle). Die Personen in dieser deutschen Studie setzen sich aus drei unterschiedlichen Gruppen zusammen, für die unterschiedliche HWE von den Autoren gefunden werden. Für 6.006 männliche Piloten und Cockpit-Begleitpersonal wird

ein HWE von 0,48 für die Gesamtsterblichkeit gefunden, d.h. die Sterblichkeit dieser Gruppe liegt bei nur 48 % derjenigen in der altersmäßig vergleichbaren aus der Gesamtbevölkerung. Die entsprechenden Werte für HWE bei 17.017 (weiblichen) Flugbegleiterinnen und 3.733 männlichen Personen des Bordpersonals betragen 0,70 und 0,76, d. h. Cockpit- und Bordpersonal sind epidemiologisch als getrennte Kohorten zu betrachten, wie es auch in anderen Studien üblich ist.

Um den Einfluss des Healthy-Worker-Effekts bei beruflich exponierten Personen, deren Strahlenrisiko man feststellen will, zu umgehen, gibt es theoretisch zwei Möglichkeiten: 1) man wählt eine Vergleichsgruppe mit den gleichen gesundheitlichen und sozio-ökonomischen Voraussetzungen aus, ersatzweise wird dazu oft die Untergruppe mit der geringsten Strahlendosis herangezogen, oder 2) man verzichtet auf eine Vergleichsgruppe, teilt die Kohorte in Dosisgruppen auf und erstellt einen Dosiswirkungszusammenhang, d. h. eine mathematische Funktion über den Strahleneffekt in Abhängigkeit von der Dosis (so wird z. B. bei den Atombombenüberlebenden vorgegangen).

Letzteres Verfahren kann in der deutschen Studie von 2020 wegen zu geringer Fallzahlen an Krebssterbefällen (210 bei Piloten; 309 bei Bordpersonal) nur begrenzt eingesetzt werden. Im Vergleich zur Bevölkerung finden die Autoren durchweg niedrigere Sterblichkeitswerte. Eine Ausnahme bilden maligne Hirntumoren mit einer erhöhten Risikorate 2.01 (signifikant) und maligne Melanome mit RR 1.88 (nicht signifikant), womit die Ergebnisse von Miura et al. (2019) bestätigt wurden. Für Brustkrebs beim weiblichen Personal finden sie hingegen keine Abweichung gegenüber der Bevölkerung (RR 1.06 mit Vertrauensbereich 0,77 – 1,44). Brustkrebs ist nun allerdings eine durch niedrige Strahlendosen besonders bei jungen Frauen empfindlich erzeugbare Erkrankung, und das Ergebnis steht wegen des HWE nicht im Widerspruch zu den o. g. Daten aus den Inzidenzstudien nach McNeely et al. (2018) unter Einbeziehung lebender Krebserkrankter. Auf die Schwächen von Mortalitätsstudien zur Feststellung eines Strahleneffektes wird in der deutschen Studie nicht hingewiesen.

Brustkrebs führt in Deutschland inzwischen (2013) in etwa 80 % der Fälle nicht zum Tod der Erkrankten (RKI 2016), d. h. man kann davon ausgehen, dass die überwiegende Anzahl an Fällen in der deutschen Studie an Flugpersonal gar nicht erfasst wird. Statt der 71 registrierten Todesfälle können real bis zu 350 Brustkrebskrankungen aufgetreten sein und eine solche Anzahl würde statistisch größere Aussagekraft besitzen. Bei der Frage der Berufsbedingtheit geht es wiederum nicht um die Mortalität an einem Krebsleiden, sondern um das Auftreten überhaupt, das bei gut therapierbaren Erkrankungen wie eben Brust- oder auch Prostata-, Haut- und Hodenkrebs sowie Non-Hodgkin-Lymphomen in Mortalitätsstudien nur teilweise oder bei zu geringer Kohortengröße gar nicht erfasst werden kann.

Die Autoren geben an, dass keine signifikanten Zusammenhänge zwischen Dosis- und Wirkung für die betrachteten Krebsarten aufgefunden werden konnten. Damit wird offensichtlich nachzuweisen versucht, dass ein Strahlenrisiko für das Flugpersonal in Deutschland nicht besteht. Die Autoren betonen, dass ihre Studie registrierte Daten mit hohem Qualitätsstandard enthält. Die Zuordnung individueller Dosen im Strahlenschutzregister

erfolgte aber erst ab 2004, für den davor liegenden Zeitraum von 44 Jahren wurden die jeweiligen Jahresdosen durch Vergleiche mit den Flugrouten der späteren Beschäftigten rekonstruiert.

Wie schon ausgeführt, können die individuellen Dosen beim Flugpersonal sehr variabel sein, messbar sind sie aus prinzipiellen Gründen nicht. In der wissenschaftlichen Literatur gibt es zudem eine Debatte über systematische Fehler durch die Verwendung der von der ICRP eingesetzten Strahlungswichtungsfaktoren für die unterschiedlichen Komponenten der kosmischen Strahlung (BUND 2017). Die Ergebnisse der Musterflugroutenberechnung können daher allenfalls als grobe Abschätzung dienen.

Das Flugpersonal in der deutschen Studie repräsentiert bei der angegebenen Anzahl Gestorbener von 1591 und damit 5,9 % der untersuchten Personen eine noch vergleichsweise junge Kohorte. Um das mögliche Strahlenrisiko zu erfassen, müsste man wesentlich länger untersuchen und statt der Sterblichkeit die Erkrankungshäufigkeit ermitteln.

Nicht nur beim Flugpersonal, sondern auch in etlichen anderen Studien zum Berufskrebs ist auffallend, dass jeweils am Ende sachdienlicher Auswertungen „andere Ursachen“ als die quantifizierten Risikofaktoren wie eine Pflichtübung erwähnt werden, die ebenfalls kausal sein könnten. Das ist legitim und bei der durchweg multikausalen Krebsentstehung auch angebracht, wenn es nicht zu Skepsis beiträgt und dazu führt, nur den Zufall als Grund ansehen zu wollen für das unerwünschte Auffinden eines über den Zufallsschwankungen liegenden Ergebnisses (Blettner 2015). Die Bedeutung von in Berufssparten auftretenden Gruppenerkrankungen wurde erkannt und ergab die Einführung des Modus, solche Erkrankungen „wie eine Berufskrankheit“ anzuerkennen, die in einer definierten Personengruppe statistisch gesichert häufiger als in der Allgemeinbevölkerung auftreten. Am Beispiel der wiederholt für fliegendes Personal gefundenen Brustkrebsrisiken ist insofern erkennbar, dass die untere Vertrauensgrenze einer Risikoschätzung bei Einbeziehung größerer Probandinnenzahlen deutlich über 1,0 einen starken Hinweis auf ein erhöhtes Risiko anzeigt. Dies gilt insbesondere und vor allem bei Verwendung von Neuerkrankungsziffern statt nur der Sterbefälle, wenn die günstigen Heilungsverläufe nach Brustkrebskrankung eine Unterschätzung des Risikos durch letal verlaufende Schicksale vermeiden helfen. Beispielsweise haben sich für chronisch lymphatische Leukämien solche Effekte deutlicher Unterschätzung des Strahlenrisikos erkennen lassen, wodurch die Rolle von Krebsregistern aufgewertet wird, um Neuerkrankungsfälle für epidemiologische Studien statt nur der Sterbefälle aus der bundesweiten Mortalitätsstatistik einzubeziehen.

Eine beflissene Spekulation mit „anderen Ursachen“ ist somit verdächtig für Bias und sicherlich nicht Zeichen für unabhängige Forschung. Blettner hat in einem Editorial für die bekannte britische Zeitschrift *The Lancet* 2015 sehr bemerkenswerte Forderungen aufgestellt, die sie in Mortalitätsstudien aber nur verzerrt angewendet oder gar ignoriert hat. Dadurch besteht Anlass zur Vermutung, dass nicht nur mittels des HWE wie bei männlichen Piloten auch bei dem weiblichen Flugpersonal, durch günstige Prognosen der Tumoren bedingt, enorme Unterschätzungen der wahren Risiken resultieren. Die Verwendung

von Krebsregisterdaten für prospektive Studien ist in Skandinavien und anderen Regionen selbstverständlich und sollte endlich auch in Deutschland irrtümliche Schlussfolgerungen vermeiden helfen.

Uranbergarbeiter

1946 wurde durch das sowjetische Militär der Abbau von Uran in Ostdeutschland angeordnet. In Sachsen und Thüringen entstand das drittgrößte Uranfördergebiet der Welt, das später von der sowjetisch-deutschen Gesellschaft SDAG Wismut betrieben wurde. Es ging nach dem Ende der DDR in den Besitz der Bundesrepublik über. Die Förderung wurde 1990 wegen Erschöpfung der Uranflöze und Unwirtschaftlichkeit des Weiterbetriebs eingestellt. Die Sanierungsaufgaben wurden dem Bundeswirtschaftsministerium übertragen, die notwendigen Mittel dazu aus dem Bundeshaushalt bereitgestellt.

Die WISMUT hatte bis dahin etwa 600.000 Bergleute und andere Personen beschäftigt. Die Kompensation der Folgen von Berufskrankheiten wurde den gewerblichen Berufsgenossenschaften übertragen. Bis 1990 waren in der DDR bei der WISMUT etwa 14.500 Silikosen und 5.500 Lungenkrebsfälle als Berufskrankheit anerkannt worden (Koppisch 2005). Mit dem Ende der SDAG Wismut war das Auftreten von Berufskrankheiten jedoch naturgemäß nicht beendet. In den folgenden 8 Jahren (1991 – 2008) wurden weitere 3.500 Bronchialkarzinome und 4.000 andere Berufskrankheiten anerkannt. Im gleichen Zeitraum wurden 12.000 Anträge auf Anerkennung einer Berufskrankheit abgelehnt, 1.200 Wismut-Kumpel klagten gegen diese Entscheidung, davon waren 60 erfolgreich.

Typische Folgeerkrankungen bei den Uranbergarbeitern sind Lungenkrebs, der auf das eingeatmete Radon in den Stollen zurückgeführt wird, und Lungenfibrose, die durch eine Kombinationswirkung von Radon und Erzstaub verursacht wird. Ein Lungenkrebs wird nur dann ohne weiteres Gutachtergezerre als Berufskrankheit anerkannt, wenn die Lungendosis so hoch ist, dass sie, nach heutiger Vorgabe der Internationalen Strahlenschutzkommission ICRP aus der Radonexposition abgeleitet, den Wert 20 Sv (!) überschreitet. Als Bewertungsgrundlage für den Dosiswirkungszusammenhang beziehen sich die Berufsgenossenschaften auf ein 1992 erstelltes Gutachten von Prof. Wolfgang Jacobi, Physiker und langjähriges ICRP-Mitglied. Er nebst Mitarbeitern Henrichs und Barclay führte in seiner Modellrechnung u. a. fälschlich einen starken Rückgang des Lungenkrebsrisikos mit der Zeit nach der Exposition ein. Dadurch haben Bergleute, die jetzt erst oder zukünftig noch erkranken, überhaupt keine Chance auf Kompensation mehr (Schmitz-F., Pflugbeil 2008). Die Latenzzeiten für strahleninduzierten Lungenkrebs können aber mehrere Jahrzehnte betragen.

Bezüglich Krebserkrankungen außerhalb der Lunge gutachtete Jacobi 1995. Danach bedarf es ausnehmend riesiger Dosen für einen Anerkennungsfall, obwohl eine Reihe derartiger Erkrankungen bei Uranbergarbeitern gut dokumentiert ist. Bei Lungenfibrosen wird eine Lungendosis ab 12 Sv zur Anerkennung verlangt, die Herkunft dieses hohen Schwellenwertes ist wissenschaftlich nicht nachvollziehbar (Schmitz-F., Pflugbeil 2010).

* Die Verdopplungsdosis ist diejenige Dosis, die zusätzlich so viele Erkrankungsfälle erzeugt wie der Spontanhäufigkeit entspricht

Die vom BfS begonnene und bis dato weitergeführte Deutsche Uranbergarbeiterstudie, die von den Berufsgenossenschaften auch herangezogen wird, ist wenig hilfreich, da sie eine Mortalitätsstudie ist, d. h. großenteils nur auf Totenscheinen fußt, und die angenommenen Individualdosen mit großen Unsicherheiten behaftet sind (Eigenwillig 2004, 2007, 2020).

Radarsoldaten

Über die Probleme der „Radarsoldaten“ hat die Gesellschaft für Strahlenschutz 2015 einen Bericht veröffentlicht (Mämpel et al.). Diese waren während des Kalten Krieges in Radaranlagen der Bundeswehr einer Röntgenbremsstrahlung und Beschriftungen mit Radiumleuchtfarbe ausgesetzt. Der Bericht enthält Daten für die in Tabelle 1 aufgeführten „radiogenen“ Erkrankungen bei erwachsenen Männern. Des Weiteren werden dazu Verdopplungsdosen* abgeleitet oder diskutiert. Letztere sind durchweg wesentlich niedriger, als sich aus den Befunden an den japanischen Atombombenüberlebenden ergibt.

Krebserkrankungen	andere Erkrankungen
Non-Hodgkin-Lymphome	Gutartige Tumoren, insbesondere Hirntumoren
Chronisch lymphatische Leukämie	Katarakte
Prostata	Fertilitätsstörungen
Rektum	Herz-/Kreislaufkrankungen
Maligne Melanome	Nicht-maligne Erkrankungen des Magen-/Darmtrakts
Multiples Myelom	Nicht-maligne Erkrankungen des Atemtrakts
Larynx	Psychisch-neurologische Erkrankungen
Pankreas	Schäden an Knochen, Knorpel und Zähnen
Hoden	Schädigungen des Immunsystems und Entzündungen

Tab. 1: Strahlenfolgen im Niedrigdosisbereich für erwachsene Männer

Nur in einem langen, zähen Kampf, der von den Betroffenen selbst ausging, konnte eine teilweise Kompensation der zahlreichen Gesundheitsschäden in dieser Personengruppe erreicht werden. Eine epidemiologische Untersuchung wurde nur in Belgien ausgeführt. Sie betraf 4400 belgische Berufssoldaten, die zwischen 1963 und 1994 zum Personal von 2 Flugabwehrsystemen in NRW gehörten (Degraeve et al. 2009). Trotz der geringen Größe des untersuchten Kollektivs ergab sich eine erhöhte Mortalität an Leukämien und Lymphomen um den Faktor 7,2 gegenüber der Kontrollgruppe.

Strahleninduzierte somatische Effekte außer Krebs

Wie in dem Forschungsbericht zu Radarsoldaten (Mämpel et al. 2015) dargelegt wird, steht inzwischen fest, dass eine Reihe von Nicht-Krebserkrankungen als Strahlenfolge bei beruflich Strahlenexponierten innerhalb der Dosisgrenzwerte auftritt. Ein Effekt, der in Anlage 1 von 2011 zur BKV, Abschnitt III B, ausschließlich als Folge akuter Bestrahlung der Keimdrüsen mit hoher Dosis aufgeführt wird, ist **Sterilität beim Mann** (GMBL Nr. 49-51, 2011, S.987). Strahlenbiologisch ist aber bekannt, dass bestimmte Stadien der Keimzellen sehr strahlenempfindlich sind (Fritz-Niggli 1997). In etlichen Studien an beruflich strahlenexponierten Männern zeigten sich Sterilitätsfälle bei niedriger Dosis (Mämpel et al. 2015). Die hohe Empfindlichkeit wird bestätigt durch Untersuchungen an der Universität des Saarlandes, die dauerhafte Schädigungen bei Spermatogonien nach chronischer Niederdosisbestrahlung im Tierversuch festgestellt haben (Grewenich et al. 2015). Von Bemühungen behördlicher Art, diese bedeutsamen Strahleneffekte in den Katalog der Berufskrankheiten aufzunehmen, ist uns nichts bekannt. In der Fachwelt sind dazu lediglich mögliche Dosissschwellen in der Diskussion.

Fehlbildungen bei Kindern beruflich Strahlenexponierter in Deutschland

Über die Vernachlässigung des genetischen Strahlenrisikos im offiziellen Strahlenschutz haben wir schon früher berichtet (Schmitz-Feuerhake 2015). Neuerdings sind gerade in Deutschland erhöhte Fehlbildungsraten bei Kindern beruflich Exponierter festgestellt worden. An der Universitätskinderklinik Mainz wurde von 1990 bis 2019 als Pilotprojekt ein lokales Geburtenregister über angeborene Geburtsfehler geführt (Geburtenregister Mainzer Modell). Dadurch ergab sich die Möglichkeit der Zuordnung zu beruflich strahlenexponierten Frauen. Schon 2011 wurde veröffentlicht, dass sich erhöhte Fehlbildungsraten bei Kindern von beruflich strahlenexponierten Frauen aus dem medizinischen Bereich gezeigt hatten. Diese Untersuchungen wurden fortgesetzt (Wiesel et al. 2016). Bei 27 Geburten wiesen 8 Neugeborene „große“ Fehlbildungen auf. Dies entspricht im Vergleich zur Kontrollrate einer Erhöhung um den Faktor 3,8! Dabei ist die Kontrollrate bereits extrem hoch, wie aus Daten von EUROCAT (zentrale Sammelstelle für Geburtsfehler) hervorgeht (Morris et al. 2018).

Mit „großen“ Fehlbildungen sind im Mainzer Register Formabweichungen des Körpers gemeint, die die Lebensfähigkeit beeinträchtigen und interventionsbedürftig sind (Queisser-Wahrendorf et al. 2016; Beispiele: Offener Rücken, Darmverschluss, Herzfehler, Gehirnverformung, Gesichtsspalt, fehlende Gliedmaßen). Dennoch haben die Ergebnisse bislang zu keinen Maßnahmen in der Gesundheitspolitik oder bei Strahlenschutzgremien geführt. Ihren Befund an Neugeborenen von strahlenexponierten Frauen interpretieren die Autoren als teratogenen Effekt nach Exposition in utero.

Im Jahr 2018 konnten Forscher aus Berlin und Bonn durch Gensequenzierung an 12 Familien nachweisen, dass aufgefallene Fehlbildungen bei Kindern von „Radarsoldaten“ über die Keimbahn des Vaters genetisch induziert worden sind (Holtgrewe

et al.). Das gewählte Verfahren wurde erstmalig für diesen Forschungszweck eingesetzt, es erlaubt eine genauere Bestimmung von Mutationsraten als bisher möglich war. Bezeichnend ist, dass diese Untersuchung durch Spendengelder finanziert wurde und dem Einsatz eines Selbsthilfevereins, dem Bund zur Unterstützung Radarstrahlengeschädigter e.V., zu verdanken ist. Die Bundeswehr hat nunmehr Forschungsgelder zur Fortsetzung des Projektes bereitgestellt.

Aufarbeitung von Erkenntnisdefiziten über Strahlenfolgen im Beruf

Wir vermissen in Deutschland eine ausreichende begleitende Diskussion und Forschung zu den inzwischen vorliegenden Befunden und damit eine angemessene Vorsorge. Außer der vom BfS durchgeführten Mortalitätsstudie an Uranbergarbeitern und der von den Professoren Blettner und Zeeb von den Universitäten Mainz und Bremen initiierten Mortalitätsstudie an Flugpersonal gibt es nur eine weitere Kohortenstudie an beruflich strahlenexponierten Personen. Es handelt sich um eine prospektive Studie an Beschäftigten der Atomindustrie (Merzenich et al. 2014), ebenfalls durchgeführt von Blettner und Zeeb. Sie finden auch in dieser Kohorte einen ausgeprägten Healthy-Worker-Effekt – nur 50 % der Mortalität wie in der entsprechenden westdeutschen Bevölkerung – und keine signifikante Erhöhung der Krebssterblichkeit über dem Erwartungswert beim Vergleich mit den Daten der westdeutschen Bevölkerung, ferner keinen signifikanten Dosiswirkungszusammenhang für Todesfälle durch bestimmte Krebserkrankungen.

Daraus schließen Autoren und Berufsgenossenschaften, dass ein Krebsrisiko für deutsche Nukleararbeiter nicht besteht. Gefragt ist aber auch hier nicht der Vergleich mit der Bevölkerung, sondern das zusätzliche Risiko durch den Beruf sowie die Neuerkrankungsrate statt der Sterblichkeit. Wegen zu geringer Fallzahlen und Beobachtungsdauern können die internationalen Befunde mit dieser Untersuchung nicht widerlegt werden. Unser Befund über die drei Fälle von Non-Hodgkin-Lymphom bei Leiharbeitern, der keinesfalls als zufällig eingestuft werden kann, wie die BG behauptet, hat kein Forschungsinteresse bei den verantwortlichen Instanzen geweckt.

Der BUND hatte Forderungen für höhere Schutzstandards – u. a. eine Senkung der Dosisgrenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen um den Faktor 10 – in einer Stellungnahme zum Entwurf des neuen Strahlenschutzgesetzes in Zusammenarbeit mit der deutschen Sektion der IPPNW (Int. Ärzte gegen den Atomkrieg) vorgelegt. Diesen hat sich vom Bundestag nur die Fraktion der Linken angeschlossen.

Wegen der Befunde bei den Nachkommen strahlenexponierter Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer in Deutschland hatte der BUND u. a. in einem offenen Brief an die Bundesministerin für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und Bundesminister für Gesundheit Maßnahmen zur Verringerung von Strahlenbelastungen bei Schwangeren und reproduktionsfähigen Personen gefordert. Diese Fragen werden nunmehr unseres Wissens von der Bundesärztekammer bearbeitet, ohne dass bislang eine überzeugende Strategie zur Prävention erkennbar wird.

Allerdings gibt es eine Neuerung im Sozialgesetzbuch VII, das für die Behandlung von Berufskrankheiten zuständig ist. Ab Januar 2021 gilt der neue Abs. 1a in § 9 SGB VII, der die Arbeit des Ärztlichen Sachverständigenbeirats Berufskrankheiten beim BMAS aufwertet. Das ist ein Schritt in die richtige Richtung, da es darum gehen muss, die alleinige Deutungshoheit der Berufsgenossenschaften bei der Anerkennung einer BK von der Zulassung des Antrags bis zur Beurteilung seiner Berechtigung abzulösen.

Das von uns vorgetragene Problem, die gerechtere Anerkennung von strahlenbedingten Berufserkrankungen, wird dadurch vermutlich nicht gelöst, da fraglich ist, mit welchen Personen dieses Gremium besetzt werden wird. Zurzeit befindet sich darin u. W. derzeit kein Wissenschaftler mit Forschungshintergrund Strahlenbiologie.

Die deutsche Strahlenschutzkommission (SSK), Beraterin des BMU, hat im Sept. 2018 einen Bericht *Grundlagen zur Begründung von Grenzwerten für beruflich strahlenexponierte Personen. Empfehlung der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung* vorgelegt. In diesem werden die Vorgaben von ICRP 103 (2008), die auch dem Strahlenschutzgesetz zugrunde liegen; übernommen und sofern Ergebnisse mit deutlichen Abweichungen gegenüber dem Referenzkollektiv der Atombombenüberlebenden genannt werden, verweist man mögliche Konsequenzen wegen noch nicht ausreichender Bestätigungen auf eine fernere Zukunft.

Ein Beispiel für die Anpassungsfähigkeit der SSK ist ihr Rückzieher bezüglich des sog. Dosis- und Dosisleistungseffektivitätsfaktors DDREF (S. 45). Die ICRP behauptet immer noch, bei chronischer Bestrahlung wie an Arbeitsplätzen wäre bei gleicher Gesamtdosis der Effekt nur halb so groß wie bei Kurzzeitbestrahlung. Sie übernimmt daher die Ergebnisse für das Strahlenrisiko der Organe von den Atombombenüberlebenden und teilt sie durch 2, bevor sie diese für die Bevölkerung und die Arbeitnehmer für gültig erklärt. Die SSK hatte das im Jahr

2006 als nicht mehr vertretbar angesehen und die Abschaffung des Faktors empfohlen, hat auch im Jahr 2018 keinen Grund für eine Revision dieser Einsicht genannt. Für Arbeitnehmer mit einer Krebserkrankung kann ein Faktor 2 bei der Frage einer berufsbedingten Schädigung aber sehr wesentlich sein.

Wir sehen daher mit Besorgnis auch der Ankündigung des BfS entgegen, demnächst ein neues Programm „ProZES“ vorzulegen, das im Auftrag des BfS und des BMU entwickelt wurde. „Es berechnet die Wahrscheinlichkeit, dass eine Erkrankung durch eine vorangegangene Strahlenexposition ausgelöst wurde“ (Text Website BfS v. Nov. 2020).

Die weitere Verharmlosung des genetischen Risikos durch die ICRP in Publikation 103 gegenüber früher sowie die neu getroffene Behauptung, es gäbe unter 100 mSv Uterusdosis keine Schäden für Embryo oder Fötus, wird von der SSK und entsprechend von BfS und BMU ebenfalls nicht kritisiert.

Schlussfolgerungen

Bestrebungen zur Schaffung eines zeitgemäßen Strahlenschutzes und einer angemesseneren Kompensation bei strahlenbedingten Berufskrankheiten sind derzeit von offizieller Seite nicht zu erwarten. Daher ist es erforderlich, dass sich möglichst viele Ärzte über die Probleme informieren und bei der Erkennung und Anmeldung berufsbedingter Strahlenfolgen mithelfen.

Autorinnen und Autoren:

Prof. Dr. med. Rainer Frentzel-Beyme
Contrescarpe 51, 28195 Bremen
E-Mail: beyme@uni-bremen.de

Prof. Dr. rer. nat. Inge Schmitz-Feuerhake
Grenzstr. 20, 30627 Hannover
E-Mail: ingesf@uni-bremen.de

Dipl. Phys. Roland Wolff
Lausanner Str. 47, 28325 Bremen
E-Mail: rwstrahlen@online.de

Quellen

Berrington A, Darby SC, Weiss HA et al. 100 years of observation on British radiologists: mortality from cancer and other causes. *Brit J Radiol* 2001; 74: 507-519

Blettner M. The merits and limits of pooling data from nuclear power worker studies. www.thelancet.com/haematology 2015; 2: 268-269

Blettner M, Zeeb H, Langner I et al. Mortality from cancer and other causes among airline cabin attendants in Germany, 1960-1007. *Am J Epidemiol* 2002; 156: 556-567

BfS Bundesamt für Strahlenschutz, Frasch et al. Die berufliche Strahlenexposition in Deutschland 2013-2014. Bericht des Strahlenschutzregisters SSR 2015

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland: BUND-Stellungnahme zum Entwurf des Strahlenschutzgesetzes, Berlin 24. März 2017; Bundestag Ausschussdrucksache 18 (16) 539-6 zur Anhörung am 27.03.2017; www.strahlenschutz-gesellschaft.de

Dreger S, Wollschläger D, Schafft T et al. Cohort study of occupational cosmic radiation dose and cancer mortality in German aircrew, 1960-2014. *Occup Environ Med* 2020; 77: 285-291

Degrave E, Meensen B, Grivegnée A-R et al.: Causes of death among Belgian professional military radar operators: a 37-year retrospective cohort study. *Int J Cancer* 2009; 124: 945-951

Eigenwillig GG. Radon und Radon-Zerfallsprodukte im Uranerzbergbau der WISMUT – Ermittlung von Exposition, zusätzlichen Randbedingungen u. Verbesserungen. *Zbl Arbeitsmed* 2004; 54: 420-429

Eigenwillig GG.: Fehlerhafte Ermittlung und Zuordnung von Expositionswerten für Hauer in den Objekten 02, 03 und 09 der WISMUT in den Jahren 1946 bis 1976. *Zbl Arbeitsmed* 2007; 57: 375-390

Eigenwillig, Gerd Georg. Der Uranerzbergbau im Erzgebirge - die dadurch bedingten Strahlenexpositionen und Erkrankungen der Bergleute. Eine kritische Bewertung. Frankfurt am Main, 31.01.2020, 32 S.

Frentzel-Beyme R, Schmitz-Feuerhake I, Wolff R. Non Hodgkin-Lymphome bei strahlenexponierten Arbeitnehmern. Fallbericht aus Deutschland. *Zbl Arbeitsmed* 2020; 70:193-195

Grewenig A, Schuler N, Rübe CE. Persistent DNA damage in spermatogonial stem cells after fractionated low-dose irradiation of testicular tissue. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2015; 92: 1123-1131

Gudmundsdottir EM, Hrafnkelsson J, Rafnsson V. Incidence of cancer among licenced commercial pilots flying North Atlantic routes. *Environ Health* 2017; 16 (1):86

Hammer GP, Blettner M, Langner I et al.: Cosmic radiation and mortality from cancer among male German airline pilots: extended cohort follow-up. *Eur J Epidemiol* 2012; 27: 419-429

Holtgrewe M, Knaus A, Hildebrand G et al. Multisite de novo mutations in human offspring after paternal exposure to ionizing radiation. *Scientific Reports* 2018 nature. www.com/articles/s41598-018-33066-x

Holtgrewe M, Sperling K, Krawitz P. Exposition gegenüber Röntgenstrahlung von Radarsoldaten: Nachweis genetischer Veränderungen bei den Nachkommen. *Strahlentelex* Nr. 764-765 v. 1. Nov. 2018 www.strahlentelex.de

- ICRP, International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP-Publication 103, Ann ICRP 2008; 37 Nos. 2-4
- Koppisch D, Otten H. Der Beitrag der Berufsgenossenschaften zur "Wismut"-Forschung. Die BG 2005; 05: 291-292
- Linnet MS, Kim KP, Miller DL, Kleinerman RA et al. Historical review of cancer risks in medical radiation workers. *Radiat. Res.* 174 (2010) 793-808
- Mämpel W, Pflugbeil S, Schmitz R et al. Unterschätzte Gesundheitsgefahren durch Radioaktivität am Beispiel der Radarsoldaten. Berichte des Otto Hug Strahleninstituts, 2015, Bericht Nr. 25 Gesellschaft für Strahlenschutz e.V. www.strahlenschutz-gesellschaft.de
- McNeely E, Mordukhovich I, Staffa S et al. Cancer prevalence among flight attendants compared to the general population. *Environ Health* 2018; 17:49 <https://doi.org/10.1186/s12940-018-0396-8>
- Merzenich H, Hammer GH, Tröltzsch K et al. Mortality risk in a historical cohort of nuclear power plant workers in Germany: results from a second follow-up. *Radiat Environ Biophys* 2014; 53: 405-416
- Miura K, Olsen CM, Rea S et al.: Do airline pilots and cabin crew have raised risks of melanoma and other skin cancers? *Br J Dermatol* 2019; 181: 55-64
- Morris JK, Springlett AL, Greenless R et al. Trends in congenital anomalies in Europe from 1990 to 2012. *PLoS ONE* 2018; 13(4) e0194986. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194986>
- Myles P, Evans S, Lophatananon A et al. Diagnostic radiation procedures and risk of prostate cancer. *Brit J Cancer* 2008; 98: 1852-1856
- Pion IA, Rigel DS, Garfinkel L et al. Occupation and the risk of malignant melanoma. *Cancer* 1995; 75 Suppl. 2: 637-644
- Queisser-Wahrendorf A, Wiesel A, Stolz G. Fehlbildungen – Häufigkeiten und Risikofaktoren. Aktuelle Daten aus dem Geburtenregister Mainzer Modell (MaMo). *Kinder- und Jugendarzt* 2016; 47(6): 668-672
- Rathmann N, Häusler U, Diezler P et al. Evaluation of radiation exposure of medical staff during CT-guided interventions. *J Am Coll Radiol* 2015; 12: 82-89
- Richardson DB, Sugiyama H, Wing S et al. Positive associations between ionizing radiation and lymphoma mortality among men. *Am J Epidemiol* 2009; 169: 969-976
- Richardson DB, Cardis E, Daniels RD et al. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). *BMJ* 2015; 351 <http://www.bmj.com/content/bmj/351/bmj.h5359.full.pdf>
- RKI Robert Koch Institut. Bericht zum Krebsgeschehen in Deutschland 2016, Berlin, Nov. 2016
- Schmitz-Feuerhake I, Pflugbeil S. Unterschätzte Gesundheitseffekte durch inkorporierte Radioaktivität und die Folgen des Uranbergbaus der SDAG WISMUT. *Ärzteblatt Thüringen* 2008; 7-8: 413-418
- Schmitz-Feuerhake I, Pflugbeil S. Lungenfibrose bei Wismut-Bergleuten. *Ärzteblatt Thüringen* 2010; 10: 574-578
- Schmitz-Feuerhake I. Das vergessene Risiko durch ionisierende Strahlung für die Nachkommen exponierter Eltern. *umwelt · medizin · gesellschaft* 2015; 28: 264-269
- Schmitz-Feuerhake I. Das neue Strahlenschutzgesetz – Fortschreibung des Lehrgebäudes der Atomlobby. *umwelt · medizin · gesellschaft* 2017; 30 (3): 36-37
- Sigurdson AJ, Morin Doody M, Sowmya Rao R, Freedman DM et al. Cancer incidence in the U.S. Radiologic Technologists Health Study. *Cancer* 2003; 97: 3080-3081
- SSK. Krebsrisiko durch mehrjährige Expositionen mit Dosen im Bereich des Grenzwertes für die Berufslebensdosis nach § 56 StrlSchV. Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet auf der 215. Sitzung der SSK am 20.04.2007, veröffentlicht im Banz Nr. 183a vom 28.08.2007
- UNSCEAR United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2006, Report to the General Assembly with Scientific Annexes Vol.I. United Nations, New York 2008
- Wiesel A, Stolz G, Queisser-Wahrendorf A. Evidence for a teratogenic risk in the offspring of health personnel exposed to ionizing radiation?! *Birth Defects Research (Part A)* 2016; 106: 475-479
- Wolff R, Frentzel-Beyme R, Schmitz-Feuerhake I. High prevalence of chronic lymphocytic leukemia and B cell lymphomas in nuclear workers after incorporation of alpha emitters. Case report and review of the literature. *Conference Proceedings RAD 2018 vol.3* (2018) 143-148 <https://radproceedings.org/paper.php?id=196>
- Zeeb H, Hammer GP, Langner I et al. Cancer mortality among German aircrew: second follow-up. *Radiat Environ Biophys* 2010; 49: 187-194