

Medizinische Strahlenschäden

Neue Studien bestätigen die offizielle Unterschätzung von Gesundheitsschäden durch Radioaktivität und Röntgen

Inge Schmitz-Feuerhake, Hannover
Gesellschaft für Strahlenschutz e.V.

Einleitung

Atomenergie wird in politischen und wirtschaftlichen Kreisen erneut gepriesen, um als Übergangstechnik zur Bewältigung der Klimakrise zu dienen und auch als Kompensation des wegen des Ukrainekrieges untersagten Bezugs von russischem Gas. Man beruft sich dabei auf die WHO und andere internationale Komitees, nach deren Meinung die Reaktorunfälle von Tschernobyl und Fukushima keine nennenswerten Gesundheitsschäden in den betroffenen Bevölkerungen erzeugt haben. Auch hält man die zukünftige Gefahr großer Unfälle durch neue Generationen von Reaktoren für vernachlässigbar und die sichere Endlagerung für unproblematisch. Diese Haltung hat in der Atomdiskussion eine lange Tradition (1). Schädliche Emissionen und ihre Folgen wurden offiziell stets bestritten oder relativiert und der Strahlenschutz von Arbeitnehmer:innen weitgehend der Obhut der jeweiligen Betreiber überlassen. In Deutschland hat Kanzlerin Merkel den Ausstiegsbeschluss 2013 mit der Gefahr großer Unfälle (Fukushima 2011) begründet, aber nicht vergessen

zu betonen, dass die deutschen Kernkraftwerke zu den sichersten der Welt gehören.

Röntgen- und radioaktive Strahlen gelten als „energiereiche“ Strahlung, d.h. ein einzelnes Strahlenquant kann das Erbmaterial in einer Körperzelle verändern. Darauf hat bereits der U.S. Genetiker und Nobelpreisträger Herman Joseph Muller (1890-1967) hingewiesen, der entdeckte, dass Röntgenbestrahlung bei Tauflieden zu Fehlbildungen bei den Nachkommen führt. Primär erzeugt sie u.a. sichtbare Verformungen von Chromosomen, die als Träger des Erbmaterials in Zellen schon früh bekannt waren. Muller beschrieb des Weiteren die Entstehung von strahleninduziertem Krebs aus einer einzelnen mutierten Körper-(Soma-) Zelle, von der eine unkontrollierte Wucherung ausgehen kann. Er wies darauf hin, dass auch die natürliche Umgebungsstrahlung mutagen und karzinogen ist, und warnte vor einer Anhäufung von künstlich erzeugter Radioaktivität in der Umwelt.

Mullers Erkenntnisse waren nach dem 2. Weltkrieg

unerwünscht und er wurde als Kommunist und Staatsfeind verunglimpft. Sie führten jedoch zur Einführung der sog. LNT-Hypothese (Linear-No-Threshold) durch die Internationale Strahlenschutzkommission ICRP, deren Empfehlungen die Grundlage für unsere Strahlenschutzgesetzgebung bilden. Damit ist gemeint, dass bei Bestrahlung einer großen Personengruppe mit niedriger Dosis die Anzahl verursachter Schäden proportional zur Gesamtdosis ist, also zur Summe aller einzelnen Dosen (Kollektivdosis). Es bedeutet, dass jeweils bei halber Dosis noch der halbe Effekt zu erwarten ist und es keine unschädliche Dosis bzw. Dosischwelle (Threshold) geben kann, das bekannte Argument der Antiatombewegung.

Es bedeutet auch, dass jedweder Dosisgrenzwert im Strahlenschutz den Tod oder die Erkrankung einer realen Anzahl von Personen zulässt, und gerechtfertigt werden muss. Als Bezugsgröße dient die natürliche Umgebungsstrahlung, deren Dosis bei uns mit **2-3 mSv** (Millisievert) pro Jahr beziffert wird.

Gegen die LNT-Hypothese führen die Atomlobby und etliche wissenschaftliche Expert:innen seit Langem einen heftigen Kampf. Und tatsächlich ist das Strahlenkomitee der Vereinten Nationen UNSCEAR¹, auf deren Datenerhebungen sich die ICRP stützt, seit 2016 darum bemüht, eine praktische Dosischwelle

von **100 mSv** für Effekte durch ionisierende Strahlung durchzusetzen. Sie behaupten, bei Dosen unterhalb von 100 mSv sei ein signifikanter Anstieg für die meisten Tumorarten nicht erkennbar (2). Zum genetischen Strahlenrisiko behaupten sie sowie auch im Gefolge die ICRP, beim Menschen liege kein Nachweis dafür vor, dass Kinder von bestrahlten Eltern einen Schaden davontragen (3). Fehlbildungen nach vorgeburtlicher Exposition (in utero) – ein klassischer Strahleneffekt – soll es nach ICRP neuerdings unterhalb einer Uterusdosis von 100 mSv auch nicht geben (4).

Die deutschen Fachinstanzen für den Strahlenschutz der Bevölkerung, das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und die deutsche Strahlenschutzkommission (SSK), Beraterin der Bundesumweltminister:in, haben mit dem Konzept von UNSCEAR und ICRP kein erkennbares Problem. Damit bleibt nicht nur eine Fülle von historischen Befunden nach Röntgendiagnostik und Umweltkontaminationen unbeachtet, sondern man ignoriert zahlreiche große Studien aus dem Berufsmilieu und nach Röntgendiagnostik aus den letzten 2 Jahrzehnten, die genau das Gegenteil zeigen (5;6).

Neue Ergebnisse zum somatischen Strahlenrisiko

Als Referenz für das Risiko pro Doseinheit werden weiterhin nur die Befunde an den japanischen

¹ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

Atombombenüberlebenden herangezogen (7;8). Auch diese zeigen jedoch keine Schwellendosis und das international hochangesehene Forschungsinstitut in Hiroshima weist darauf hin, dass Krebserkrankungen auch im Dosisbereich 0-100 mSv signifikant erhöht auftreten und nicht geringer sind, als es einem dosisproportionalen Risiko entspräche (9; 10).

Die LNT-Leugnung hätte spätestens aufgegeben werden müssen, nachdem ab den 1990er Jahren internationale etliche epidemiologische Studien an Werkträgern aus der Nuklearindustrie vorgelegt wurden, die bei durchschnittlichen Dosen im Kollektiv von nur 10-30 mSv deutliche Erhöhungen der Krebsmortalität zeigten. Dies führte zur Etablierung des Projektes INWORKS² bei der International Agency for Research on Cancer (IARC) der Weltgesundheitsorganisation (WHO) in Lyon, in dem sich Institutionen aus mehreren europäischen Ländern und den USA zusammenschließen. Dadurch wurde seit 2015 in Metaanalysen bestätigt, dass ein real erhöhtes Krebsrisiko für Arbeitnehmer:innen auch dann besteht, wenn die gesetzlichen Dosisgrenzwerte eingehalten werden.

Die neueste Analyse von INWORKS 2023 befasst sich speziell mit dem Dosisbereich 0-100 mSv (11). Sie ergibt, dass sich das Risiko eines berufsbedingten Krebstodes verdoppelt

gegenüber dem Risiko, das sich aus dem gesamten Dosisbereich bestimmen lässt. Im Niedrigdosisbereich zeigt sich, dass 10 mSv Arbeitszeitdosis das Risiko um 1 % erhöht. **Die Autoren weisen auf die Bedeutung für den Strahlenschutz hin.** Deutsche Daten sind in die Metaanalyse nicht eingeflossen.

In Deutschland veröffentlichte Prof. Dr. Michael Hauptmann von der Med. Hochschule Brandenburg Theodor Fontane zusammen mit 15 Kolleg:innen aus europäischen Ländern und den USA 2020 die Ergebnisse einer Metaanalyse anhand von 26 epidemiologischen Studien aus dem Niedrigdosisbereich über Krebserkrankungen, die nach 2006 erschienen sind (12). Alle untersuchten Kollektive wiesen eine mittlere Dosis unterhalb von 100 mSv auf. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Untersuchungen reale Erhöhungen des Strahlenrisikos durch sehr niedrige Dosen belegen.

Weitere Belege für Krebserkrankungen durch Niedrigdosisexposition liefert von jeher die Röntgendiagnostik. 1956 veröffentlichte die englische Epidemiologin Alice Stewart, dass das Röntgen von Schwangeren – damals ausgeführt bei Lageanomalien oder Zwillingsverdacht – Leukämie bei den später geborenen Kindern auslösen kann (13). Es ergab sich, dass eine einzige Röntgenaufnahme mit damaliger Dosis – etwa 5 mSv –

das Leukämierisiko verdoppelt, also um 100 % erhöht. Die Untersuchungen wurden im Rahmen eines Forschungsprogramms über die Ursachen von Krebserkrankungen bei Kindern fortgesetzt und zeigten, dass auch andere Krebserkrankungen erzeugt werden können. Erst 40 Jahre später wurden diese Ergebnisse von der ICRP akzeptiert.

Während die Dosis von normalen Röntgenaufnahmen mit der Zeit gesenkt werden konnte, traten ab 1970 die CT- (Computer-Tomographie) Scanner auf den Plan, mit denen aus einer Vielzahl von Röntgenaufnahmen ein Querschnittsbild erstellt wird. **Nach Angaben des BfS entspricht die Dosis eines CT-Scans in Deutschland im Mittel etwa der Dosis von 30 konventionellen Röntgenaufnahmen**, s. unten. Daher liegen internationale Ergebnisse über Krebserkrankungen nach CT bei Kindern und Erwachsenen vor (5).

2011 wurde bei der IARC ein Projekt EPI-CT (von „EPIdemologisch“) gegründet, um die Risiken durch pädiatrische CT zu untersuchen. Hauptmann und 20 weitere Autor:innen befassten sich mit dem Zusammenhang zwischen malignen Hirntumoren und CT-Untersuchungen des Kopfes bei Kindern und Jugendlichen anhand von Daten aus 8 europäischen Ländern (14). Die Ergebnisse, publiziert 2023, zeigen einen dosisproportionalen Zusammenhang und

die Autoren bestätigen ausdrücklich die LNT-Hypothese. Bei einer mittleren Hirndosis des Kollektivs von 47,4 mSv zeigten sich die malignen Tumore um 60 % erhöht und die Verdopplungsdosis³ ergibt sich somit zu 79 mSv.

Hauptmann ist auch Mitautor der jüngst erschienenen Auswertung der EPI-CT-Daten, die sich mit Leukämie und anderen Blutkrebserkrankungen befasst (15). Die Verdopplungsdosis ergibt sich zu 51 mSv, die mittlere Dosis pro Untersuchung in Deutschland zu 23 mSv.

Aus der Fachliteratur ist zudem seit Langem bekannt, dass auch nicht maligne Erkrankungen durch niedrige Dosen ionisierender Strahlung erzeugt werden können, dazu gehören gutartige Tumoren in verschiedenen Organen und Geweben, Herz/Kreislaufleiden, Erkrankungen des Blutes, des Atemtrakts, der Harnwege, der Leber, des Magen/Darm-Trakts und der Augen sowie Schädigungen des Immunsystems und Entzündungsreaktionen (5; 6).

Zur Frage strahleninduzierter Herz-Kreislauf-Erkrankungen berichtete 2023 der Medizinstatistiker Mark P. Little zusammen mit 15 internationalen Kolleg:innen über eine weitergehende Metaanalyse (16). Erfasst wurden vier Krankheitsgruppen an Erkrankungen von Herz- oder Hirngefäßen sowie anderen Herz-Kreislauf-Erkrankungen aus 93 Artikeln der

² International Nuclear Workers Study

³ Die Verdopplungsdosis ist diejenige Dosis, bei der sich

die Krebsrate um 100 % gegenüber dem

Normalvorkommen erhöht, also verdoppelt.

wissenschaftlichen Literatur. Die Expositionen waren durch medizinische Anwendungen, berufliche Exposition oder Umweltkontaminationen erfolgt. Die Studie bestätigt die grundsätzliche Induzierbarkeit von tödlichen Herzinfarkten und Schlaganfällen durch ionisierende Strahlung. Bei niedriger Dosis sind die Ergebnisse weniger kompatibel. Jedoch nahmen die Effekte pro Dosisleistung generell bei geringer werdender Dosisleistung, also bei chronischer Bestrahlung, zu. **Die Autor:innen kommen zu dem Schluss, dass das Strahlenrisiko bisher wahrscheinlich deutlich unterschätzt worden ist und fordern, dass der Strahlenschutz und die Bemühungen zur Dosisreduzierung überdacht werden sollten.**

Neue Ergebnisse zum genetischen Strahlenrisiko

Die groteske Leugnung eines Strahlenrisikos für die Kinder bestrahlter Eltern durch UNSCEAR und ICRP (1) stützt sich auf Befunde von den japanischen Atombombenüberlebenden. Bei ihnen wird eine einmalige Exposition während der Explosion angenommen. Strahlenkritiker haben darauf hingewiesen, dass die unterschiedliche Empfindlichkeit der Keimzellen in ihren verschiedenen Entwicklungsstadien beachtet werden muss (5).

Die Stammzellen in den Gonaden sind bei beiden Geschlechtern relativ unempfindlich gegenüber der Ausbildung lebensfähiger Mutationen. Bis zur Entstehung der reifen Spermien

bei Männern durchlaufen die Tochterzellen verschiedene Teilungsstadien bis sie durch die sogenannte Reifeteilung (Meiose) in solche mit halbem Chromosomensatz übergehen (haploid). Die Zeitdauer der Spermatogenese beträgt etwa 86 Tage. Nach Erkenntnissen der Strahlenbiologie muss man Erbschäden besonders nach Exposition in einem Zeitraum kurz vor der Zeugung erwarten, bei den Atombombenüberlebenden also bei Konzeptionen kurz nach der Explosion. Die systematische Untersuchung der gesundheitlichen Folgen in Hiroshima begann aber erst 5 Jahre nach den Explosionen. Außerdem waren die Überlebenden in Japan eine sozial geächtete Population und es ist anzunehmen, dass betroffene Eltern Schädigungen bei ihren Kindern verschwiegen haben, so dass das wahre Ausmaß in den späteren Studien unterschätzt wurde.

Die unterschiedliche Strahlenempfindlichkeit der Spermien wird durch Arbeiten einer deutschen Forschungsgruppe bestätigt (17). Prof. Dr. Björn Schumacher vom *Institut für Genomstabilität in Alterung und Erkrankung* der Universität zu Köln leitet das Projekt, das von der Deutschen Krebshilfe gefördert wurde. Für die Autoren besteht kein Zweifel, dass es genetisch generierte Strahlenschäden beim Menschen gibt. Nach ihren Angaben entstehen etwa 80% der aus der Elterngeneration übertragenen Mutationen in der männlichen Keimbahn. Die Arbeit diene der

Aufklärung der zu Grunde liegenden Prozesse. Ihre Experimente führten sie zunächst an einem Fadenwurm als Modellsystem aus und konnten sie später auf menschliche Zellen übertragen. Sie fanden heraus, dass die reifen Spermien besonders strahlenempfindlich sind, weil aufgrund ihrer spezifischen Struktur Reparatursysteme ausfallen. **Sie fordern den Schutz vor mutagenen Expositionen besonders in den zwei Monaten vor Konzeption.** Ihre weiteren Forschungen sollen von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert werden.

Ihre Forderung entspricht der in den BUND-Stellungnahmen zum genetischen Strahlenrisiko (1; 5) vorgetragenen Notwendigkeit der Beachtung der unterschiedlichen Strahlenempfindlichkeit der Keimzellen während der Spermatogenese. Diese wurde auch nicht in der 2021 publizierten Studie von Yeager et al. (18) berücksichtigt, in der die genetischen Effekte bei Nachkommen schlicht abgestritten werden. Sie stützt sich auf unspezifische Abweichungen im Vergleich von DNA-Analysen bei Eltern und Kindern von sog. Liquidatoren, die mit Dekontaminationen nach dem Reaktorunfall 1986 in Tschernobyl beschäftigt waren.

Ein anderer Entstehungsmechanismus liegt beim Down-Syndrom vor, das ebenfalls durch ionisierende Strahlung – vornehmlich bei der Mutter – erzeugt werden kann. Dies hatte sich insbesondere

nach Tschernobyl gezeigt. Darüber berichten Sperling, Scherb und Neitzel 2023 und fordern ein Monitoring (19).

Schlussfolgerungen

Die LNT-Hypothese ist keine äußerst vorsichtig und konservativ angenommene Schutzannahme für den Umgang mit ionisierender Strahlung, die nach Ansicht früherer SSK-Mitglieder aus statistischen Gründen niemals bewiesen werden kann und wahrscheinlich gar nicht zutrifft, sondern sie ist biologisch und biophysikalisch begründet und wird in großen epidemiologischen Studien überzeugend belegt. Darüber hinaus ergibt sich aus diesen Studien durchweg ein deutlich höheres Strahlenrisiko für Krebs als es offiziell anhand der japanischen Daten angenommen wird, in der Studie INWORKS von 2023 etwa 3-mal so hoch (11). Die oben dargestellten Ergebnisse zeigen ferner, dass nicht nur Krebserkrankungen als die entscheidende Strahlengefahr bei niedrigen Dosen gelten dürfen, wie noch im Jahre 2023 von der SSK angesetzt wird (7), sondern ein reichhaltiges Spektrum an weiteren somatischen Erkrankungen sowie insbesondere auch die mit Sicherheit anzunehmenden gravierenden Schädigungen der Nachkommen.

Wir müssen davon ausgehen, dass man im offiziellen Strahlenschutz keinen Handlungsbedarf zur Verringerung von Strahlenbelastungen der Bevölkerung sieht, da man ja internationale Standards einhält. Im Jahr 2011 (!) hatten

Forscher:innen an Hand des Geburtenregisters Mainzer Modell erhöhte Fehlbildungsraten bei Kindern von Frauen gefunden, die in der Radiologie gearbeitet hatten (20). In der Folgestudie wiesen bei 27 Geburten 8 Neugeborene schwere Fehlbildungen auf (21). Dies entspricht im Vergleich zur Kontrollrate einer Erhöhung um 380 %! Dieser alarmierende Befund, der aber den offiziellen Annahmen über vorgeburtlich erzeugte Strahlenfolgen widerspricht, fand kein Forschungsinteresse bei SSK und BfS. Stattdessen wurde das Geburtenregister in Mainz nicht weitergeführt.

Dieses Desinteresse dient nicht nur den Propagandisten für Kernenergie als Klimaretter und dem nicht so peniblen Umgang mit den Relikten dieser Technik. Es dient auch einem zu wenig kritischen Umgang mit Röntgen- und nuklearmedizinischen Untersuchungen in der Medizindiagnostik.

Das BfS berichtet im Jahr 2023, dass etwa 13 Millionen CT-Untersuchungen jährlich in der BRD durchgeführt werden, die mittlere effektive⁴ Dosis pro Untersuchung sei durch den Einsatz moderner Techniken auf 5,9 mSv gesenkt worden gegenüber 7 mSv von früher. Das bedeutet, dass im Mittel jede Bürger:in alle 6,4 Jahre eine CT-Untersuchung erfährt, in 70 Jahren dann auf 11 CTs zurückblicken

kann (64,9mSv). Das gälte dann, wenn die Zahl der CTs nicht noch weiter ansteigen würde.

Für die mittlere effektive Dosis von konventionellen Röntgenuntersuchungen wird vom BfS ein Wert von 0,22 mSv angegeben (22).

Es geht nicht darum, das diagnostische Röntgen abzuschaffen, es ist anscheinend unverzichtbar. Jedoch bleibt das Prinzip der „rechtfertigenden Indikation“, dem genügt werden soll, eine hohle Phrase, wenn den Ärzt:innen nicht bekannt gemacht wird, dass konkrete schwerwiegende Strahlenschäden durch niedrige Strahlenexpositionen tatsächlich erzeugt werden und nicht nur eine übervorsichtig angenommene äußerst seltene Nebenwirkung darstellen.

Das Argument, dass die absolute Anzahl an Schädigungen bei sehr niedriger Dosis nur sehr gering sei, berücksichtigt nicht, dass z.B. die gesamten CT-Befunde nur in beschränkten Zeitfenstern erhoben wurden, in der Hirntumorstudie von Hauptmann et al. (14) betrug es im Mittel nur 5-6 Jahre. Bekanntlich können strahleninduzierte Krebserkrankungen aber lebenslang auftreten. Bei Krebs im Kindesalter war das medizinische Streben stets darauf gerichtet, die Fallzahlen trotz ihrer relativen Seltenheit zu reduzieren. Stattdessen sind sie seit den 1970-er Jahren erheblich angestiegen.

Man geht davon aus, dass die meisten Untersuchungen bei alten Menschen erfolgen, wo dann Spätfolgen nicht mehr eintreten. Da die letzten spezifischen Angaben des BfS dazu nur bis in das Jahr 2014 reichen und einen erheblichen CT-Anstieg in allen Altersklassen zeigen (22), gibt es dazu aber keine gesicherten Zahlen.

Neuerdings empfiehlt das BfS auch das Lungenkrebscreening für Raucher durch „Low-dose“ CT. Das halte ich für unverantwortlich. Denn Niedrigdosis-CT kann es gar nicht geben, da eine CT immer mehrfache Röntgenaufnahmen am Objekt erfordert. Screeningprogramme mittels Röntgen bedürfen der Genehmigung, da sie an gesunden Personen durchgeführt werden. Bislang war das einzige zugelassene Screening in Deutschland dasjenige mit Mammographie (MSP). Dieses wurde 2005 eingeführt mit der Erwartung, dass die Sterblichkeit an Brustkrebs dadurch um 30% gesenkt werden könne. Bereits vor dieser Zeit begann die Brustkrebssterblichkeit (altersstandardisiert) geringfügig aber kontinuierlich zu sinken, was auf verbesserte Therapien zurückgeführt wird. Seit der Jahrhundertwende bis 2020 ist sie um etwa 19 % gesunken. Bislang fehlt jedoch der Nachweis, dass das MSP dazu irgendeinen Beitrag liefert (s. Berichte des Robert Koch-Instituts zum

Krebsgeschehen in Deutschland 2013 bis 2020).

Das BfS hat 2017 ein Forschungsprojekt zur Evaluierung des MSP begonnen, ein Ergebnis wird für 2025 angekündigt. Warum wird dieses nicht abgewartet, bevor man ein neues karzinogenes „Vorsorgeprogramm“ befürwortet? Wir wissen aus den Radonstudien, dass die Lunge zu den strahlenempfindlichsten Organen gehört, erst recht bei Rauchern mit einer vorgeschädigten Lunge. Dosisangaben zu dem Projekt habe ich bisher nicht gefunden. Bei der Brustkrebsmammographie werden neuerdings tomografische Verfahren eingesetzt, die wiederum mit einer Dosiserhöhung einhergehen.

Die Arbeiten von Hauptmann etc. zeigen erneut die Unsinnigkeit auf, das Strahlenrisiko des Röntgens durch die **effektive** Dosis zu beschreiben. Über die genetische Belastung erfährt man dadurch z.B. gar nichts.

Dringend zu fordern ist daher die Berücksichtigung des aktuellen Standes der Wissenschaft zum Strahlenrisiko im Niedrigdosisbereich und damit die Korrektur von überholten, fehlerhaften und unzutreffenden Annahmen im offiziellen Strahlenschutz.

Unsere Autorin **Frau Prof. Dr. rer. nat. Inge Schmitz-Feuerhake** ist

⁴ Die effektive Dosis wurde als Maß für das Strahlenrisiko eingeführt, um alle

Teilkörperbestrahlungen bezüglich der Folgen vergleichbar machen. Sie bezieht sich aber überwiegend nur auf die

Krebsmortalität. Zur Ermittlung wird die jeweilige Organ dosis je nach Strahlenempfindlichkeit mit einem

Gewebswichtungsfaktor versehen, die Summe aller so gewichteten Teilkörperdosen ergibt die effektive Dosis.

Präsidentin der Gesellschaft für Strahlenschutz e.V. und emeritierte Hochschullehrerin für Physik an der Universität Bremen.

1. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND): Unsichtbare Opfer der Atomkraftnutzung. Strahlende Arbeitsplätze und Umgebungskontaminationen. Autoren Schmitz-Feuerhake I, Hoffmann W, Becker O, Wurzbacher K, Berlin Sept. 2022, 61 S.
2. UNSCEAR United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UN-SCEAR 2008, Report to the General Assembly with Scientific Annexes Vol. II, Annex D (Health effects due to radiation from the Chernobyl accident) Corrigendum to Sales No.E.11.IX.3, May 18, Page 183, § D251, United Nations New York, 2011
3. International Commission on Radiological Protection: The 2007 Recommendations of the ICRP. ICRP-Publication 103, Ann ICRP 37 Nos. 2-4 (2008)
4. International Commission on Radiological Protection: Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus). ICRP Publication 90 Ann ICRP 33 (2003) No.1-2
5. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V.: BUND-Stellungnahme zum Entwurf des Strahlenschutzgesetzes. Autoren Hoffmann W et al., Berlin 24.03.2017, zur Anhörung vor dem Bundestagsausschuss für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit am 27.03.2017, Ausschussdrucksache 18(16)539-G, 29 S.
6. 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

7. Strahlenschutzkommission: Grundlagen zur Begründung von Grenzwerten der Strahlenexposition für die Bevölkerung. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission vom 9.Mai 2023, 23 S.
8. Schmitz-Feuerhake I, Frenzel-Beyme R, Wolff R: Berufskrankheiten durch ionisierende Strahlen – Erfahrungen mit der Anerkennungspraxis in Deutschland. Umwelt Medizin Gesellschaft 34/2 2021, 34-51 (auch Open Access)
9. Pierce DA, Preston DL: Radiation-related cancer risks at low doses among atomic bomb survivors. Radiat Res 154 (2000) 178-186
10. Grant EJ et al: Solid cancer incidence among the Life Span Study of atomic bomb survivors: 1958-2009. Radiat Res 2017; 187: 513-537
11. Richardson D et al: Cancer mortality after low dose exposure to ionising radiation in workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS); cohort study. Brit Med J 382 (2023) e074529
12. Hauptmann M, Daniels RD, Cardis E et al: Epidemiological studies of low-dose ionizing radiation and cancer: summary bias assessment and meta-analysis. J Natl Cancer Inst Monogr 2020 (2020) 188-200
13. Stewart A, Webb J, Giles D, Hewitt D: Malignant disease in childhood and diagnostic irradiation in utero. Lancet 1956;2 :447
14. Hauptmann M et al: Brain cancer after radiation exposure from CT examinations of children and young adults: results from the EPI-CT cohort study. Lancet Oncology 2023 Jan;24(1):45-53/online Dec.2022
15. Bosch de Basea M et al: Risk of hematological malignancies from CT radiation exposure in Children, adolescents and young adults. Nature Medicine, published online 09 November

2023, <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02620-0>

16. Little MP et al: Ionising radiation and cardiovascular disease: Systematic review and meta-analysis. Brit Med J 2023;380:e072924 <https://doi.org/10.101136/bmj-2022-072924>
17. Wang S, Meyer DH, Schumacher B: Inheritance of paternal DNA damage by histone-mediated repair restriction (Vererbung väterlicher DNS-Schäden durch Hemmung der histongesteuerten Reparatur) Nature 613 (2023) 365-374 Open Access
18. Yeager M et al: Lack of transgenerational effects of ionizing radiation exposure from the Chernobyl accident. Science 372 (2021)725 -729
19. Sperling K, Scherb H, Neitzel H: Population monitoring of trisomy 21: problems and approaches. Molecular Cytogenetics (2023)16.6 <https://doi.org/10.1186/s13039-023-00637-1>
20. Wiesel A, Spix C, Mergenthaler A, Queißer-Luft A: Maternal occupational exposure to ionizing radiation and birth defects. Radiat Environ Biophys 50 (2011) 325-328
21. 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) 106 (2016) 475-479
22. Nekolla EA, Schegerer AA, Griebel J, Brix G: Häufigkeit und Dosis diagnostischer und interventioneller Röntgenanwendungen. Trends zwischen 2007 und 2014. Radiologie 7 (2017) 555-562

Strahlungsdosis in Radiologie und Nuklearmedizin

Nuklearmedizinische und radiologische Leistungen finden breite Anwendung bei diagnostischen Untersuchungen und therapeutischen Maßnahmen.

Das Röntgen wirkt kurzzeitig für eine 2D-Aufnahme, die fächerförmige axiale Röntgenstrahlung der Computertomografie (CT) liefert 3D-Bilder über einen eingestellten Untersuchungszeitraum. Eine Abschätzung der Dosis ist durch teilexponierte und heterogene Organ- bzw. Gewebeuntersuchungen erschwert. Die Strahlendosis bei einer nuklearmedizinischen Untersuchung hängt von der applizierten Aktivitätsmenge ab, die für ausreichende diagnostischen Informationen oder dem angestrebten Therapieeffekt benötigt wird. Die Strahlendosis ist auch hierbei zeitabhängig, zusätzlich bestimmt durch Art, Halbwertszeit, Anwendungsstellen und Verbleib der verwendeten Isotope u.a.m. Die relevante Größe zur Einschätzung der Exposition von Patienten und zur sinnvollen Risiko-Nutzen-Bewertung ist die Energiedosis im bestrahlten Gewebe. Messbar sind die Dosen, egal ob als Organ- oder errechnete Effektivdosis ohnehin nicht, so dass Hilfsgrößen zur Schätzung eingeführt wurden. Die effektive Dosis (Abb. 1) dient der Vergleichbarkeit von Dosen unterschiedlicher ionisierter Diagnoseverfahren, ähnlicher Techniken oder Verfahren sowie deren Anwendung in verschiedenen medizinischen Einrichtungen. Die Berechnung beruht auf der jeweils eingesetzten Energiedosis, auf Wichtungsfaktoren (Strahlungsartenzuordnung wR und Gewebewichtung wT) zzgl. körperbezogener Referenzwerte. „Daher basiert die effektive