

DEZERNAT STRAHLENSCHUTZ

Welche Strahlenbelastung geht von medizinischen Einrichtungen aus?

Isabell Deuter, Christian Heid



Radioaktivität ist allgegenwärtig und kann sowohl natürlichen Ursprungs als auch menschengemacht sein. Sie tritt in verschiedenen Bereichen auf, wie beispielsweise in der Medizin, der Forschung und in Kernkraftwerken. Der Gesetzgeber hat festgelegt, dass es einen Grenzwert gibt, der nur in Ausnahmefällen überschritten werden darf, zum Beispiel bei medizinischen Behandlungen. Jede Einrichtung, die ionisierende Strahlung freisetzen kann, muss vor Beginn ihrer Tätigkeiten nachweisen, dass dieser Grenzwert auch für Unbeteiligte eingehalten wird. Außerdem wird jährlich überprüft, ob genehmigungspflichtige Einrichtungen die Grenzwerte einhalten. Das HLNUG wurde vom HMUKLV damit beauftragt, diese Untersuchungen durchzuführen.

Der Grenzwert liegt bei
1 mSv/Jahr
für genehmigungs- oder
anzeigebedürftige
Tätigkeiten.



Strahlenbelastung in Deutschland: Grenzwerte für eine Einzelperson der Bevölkerung

Für Personen, die beruflich oder medizinisch keiner Strahlung ausgesetzt sind, oder überwacht werden, wurden jährliche Grenzwerte festgelegt. Solche Personen werden auch „Einzelpersonen der Bevölkerung“ (EdB) genannt. Dabei wird zwischen natürlicher und zivilisatorischer Strahlenexposition unterschieden. Durch die natürliche Strahlenexposition erhält jeder Mensch durchschnittlich etwa eine Dosis von 2,1 Millisievert (mSv/a). Die Dosis ist hierbei ein Maß für die Belastung durch die Strahlung (Exposition). Die Zusammensetzung des Wertes kann aus Abbildung 2 entnommen werden [Bfs 2023a].

Demgegenüber steht die zivilisatorische Strahlenexposition. Den größten Anteil liefert dabei die Medizin durch die Röntgendiagnostik mit einem

Abb. 1: In der Brachytherapie wird meistens die Strahlung des Nuklids ^{192}Ir eingesetzt, um Karzinome zu zerstören © Negro Elkha/stock.adobe.com



Welche Strahlenbelastung geht von medizinischen Einrichtungen aus?

Wert von 1,7 mSv pro Jahr. Die Nuklearmedizin steht an zweiter Stelle mit 0,2 mSv pro Jahr. In Abbildung 3 sind weitere jährliche Jahresdosiswerte und deren Ursprung dargestellt [BfS 2023b].

Nach § 80 des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG) darf eine Einzelperson der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten eine jährliche Dosis von nicht mehr als 1 mSv erhalten. Im Falle von kerntechnischen Anlagen bedeutet das, dass der Grenzwert für die Summe der Strahlenexpositionen aus der Direktstrahlung und aus Ableitungen einzuhalten ist [§ 80 StrlSchG, §§ 99-101 StrlSchV].

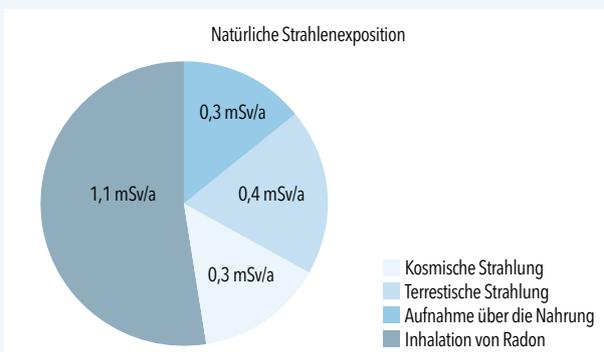


Abb. 2: Den größten Anteil der jährlichen erhaltenen natürlichen Strahlenexposition, macht die Inhalation von Radon mit einem Wert von 1,1 mSv/a aus

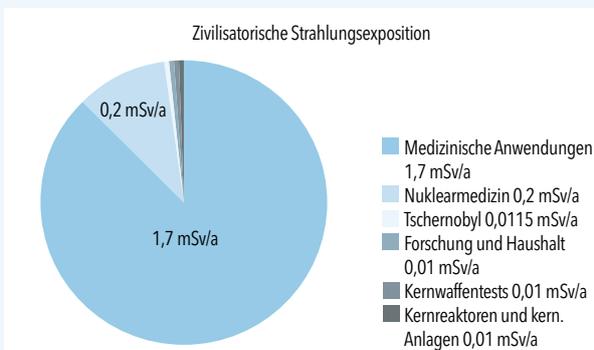


Abb. 3: In dieser Graphik wird verdeutlicht, wie sich die jährliche zivilisatorische Strahlungsexposition in Deutschland zusammensetzt

Ermittlung der tatsächlichen Exposition

Wie oben beschrieben ist für jede Einrichtung, die ionisierende Strahlung erzeugt, nach § 100 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) nachgewiesen worden, dass die erforderlichen Grenzwerte des § 80 StrlSchG und § 99 StrlSchV eingehalten werden. Dabei wird eine repräsentative Person angenommen und mit konservativen Annahmen wie den höchst zugelassenen Werten (z.B. Aktivität, Behandlungen pro Jahr oder



Als Beispiel wären dies für eine medizinische Einrichtung: Arbeiter, die bei einer Drittfirma angestellt sind, Patienten im Nachbarzimmer oder Besucher sowie Belegärzte.



Abb. 4: Hier wird beispielhaft die Messung der Ortsdosisleistung während einer Patientenbehandlung bei einer Brachytherapie gezeigt. Die rot eingerahmte Messsonde zeichnet dabei die Messwerte auf.

Aufenthaltsdauer) gerechnet. Dadurch kommt es zu einer Überschätzung (konservative Annahme) der zu erwartenden jährlichen Strahlenexposition.

Dieses auf Annahmen beruhende Vorgehen wird auch als prospektive Ermittlung oder zu erwartende Strahlenexposition bezeichnet. Alle Personen, die nicht beruflich oder medizinisch strahlenüberwacht werden oder keinen direkten Bezug dazu haben, gehören dieser Gruppe an.

Nach § 101 der StrlSchV wird geprüft, welche Dosis eine EdB tatsächlich pro Kalenderjahr erhalten hat. Dieser Vorgang wird auch retrospektive Ermittlung genannt.

Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) wurde vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) als zuständige Behörde beauftragt, die jährliche Einhaltung der Grenzwerte nach § 101 der StrlSchV zu überprüfen. Liegt der gemessene bzw. ermittelte Wert gleich oder unter 0,1 mSv pro Jahr, sind keine weiteren Messungen notwendig und das HLNUG wird wieder aktiv, wenn sich etwas an den Genehmigungsvoraussetzungen ändert. Dies ist das sogenannte 10 %-Kriterium. Dies besagt, wenn von der Direktstrahlung nicht mehr als 0,1 mSv in die Summe aus allen Belastungspfaden bzw. in den Grenzwert von § 80 einfließt, müssen keine weiteren Berechnungen vorgenommen werden. Da die höchsten Aktivitäten im Bereich der Medizin, insbesondere bei den Brachytherapien und Radio-Jod-Therapien, erwartet werden, fängt das HLNUG dort mit den Messungen an.

Die bisher durchgeführten Messungen in Brachytherapie-Einrichtungen sind im „Jahresbericht: Berichterstattung der von Einzelpersonen der Bevölkerung erhaltenen Expositionen nach § 101 StrlSchV“ veröffentlicht [2023c]. Das Ziel bei der Bestimmung der jährlichen Strahlenexposition nach § 101 ist es, zu keiner Unterschätzung der retrospektiven Ermittlung zu kommen [BANz 2019, BfS Leitfaden (2019), BfS Beispiele (2022)].

Was passiert bei einer Brachytherapie?

Bei einer Brachytherapie, auch als interne Strahlentherapie bezeichnet, werden bösartige Tumore mithilfe bestimmter radioaktiver Strahlenquellen (z. B. ^{192}Ir) innerhalb des Körpers gezielt zerstört. Dabei werden Radionuklide verwendet, die auf einer kurzen Strecke eine hohe Dosis erzeugen. Die Strahlenquelle kann entweder direkt in den Tumor oder in die unmittelbare Nähe geführt werden. Dabei wird sehr darauf geachtet, das gesunde Gewebe in unmittelbarer Nähe nicht zu verletzen.



Abb. 5: Die Strahlenquelle befindet sich im after-loading-Gerät. Mit Hilfe dünner kleiner Röhrchen wird die Strahlungsquelle an der gewünschten Stelle im Körper positioniert. © blackboxguild/stock.adobe.com

Es werden drei Formen unterschieden: Die erste Form ist die Oberflächenapplikation. Hier wird die Strahlenquelle direkt auf die Haut geführt. Dies ist bei Hautkrebs der Fall. Eine weitere Form ist die intrakavitäre Brachytherapie. In diesem Fall wird die Strahlenquelle in Hohlräume des Körpers geführt, wie z. B. die Gebärmutter oder Speiseröhre. Die letzte Form ist die interstitielle Brachytherapie. Dort wird die Strahlenquelle in das Gewebe geführt, wie z. B. die Prostata oder die Brust.

Da sich die Strahlenquelle bei allen Formen nur für eine kurze Zeit und in der Nähe zum Tumor befindet, geht von der behandelten Person selbst keine Strahlung aus. Die Brachytherapie wird im sogenannten Nachladeverfahren (Afterloading) durchgeführt. Die radioaktive Strahlungsquelle befindet sich dabei im Afterloading-Gerät. Das Einführen der Strahlenquelle erfolgt ferngesteuert mithilfe kleiner dünner Röhrchen, die aus Metall oder Kunststoff bestehen und an den gewünschten Orten im Körper positioniert werden. Wie oft und wie lange die Strahlungsquelle im Körper verbleibt, hängt von der Art des Tumors ab [2023d, 2023e].

Vorgehensweise bei der Ermittlung der tatsächlichen Exposition

Unter den veröffentlichten Berichten und Beispielen vom BfS [BfS Leitfaden (2019), BfS Beispiele (2022)] werden zwei Vorgehensweisen erklärt, wie die tatsächliche Jahresexposition ermittelt werden kann. Entweder wird die jährliche Strahlenexposition mithilfe von Simulationsprogrammen und den tatsächlichen Parametern berechnet, oder es werden Messungen vor Ort durchgeführt, während die Anlage in Betrieb ist.



Da die Strahlen einen kurzen Weg im Körper zurücklegen und im Griechischen „brachys“ „kurz“ bedeutet, ist daraus der Name Brachytherapie entstanden.

Das HLNUG hat sich für die zweite Methode entschieden, um die Dosis zu ermitteln, die der tatsächlichen Praxis möglichst nahekommt. Entweder wurden die Messungen begleitend zu einer Patientenbehandlung oder mit einem Phantom, das die Präsenz eines Patienten simuliert, durchgeführt. Diese reichen von $T = 0,1$ (Aufenthalt Toilette, Warteräume) bis $T = 1$ (Arbeitsplätze, Daueraufenthaltsplätze).

Für die Aufzeichnung der Werte wurden Ortsdosisleistung-Sonden (ODL-Sonden) vom Typ MIRA-100-L4-B verwendet. Sie besitzen einen Messwertebereich von 10 Nanosievert pro Stunde (nSv/h) bis 10 Sievert pro Stunde (Sv/h) [Envinet 2023f]. Die Messsonden wurden an ihren entsprechenden Messpunkten aufgestellt. Die Messpunkte sind so zu wählen, dass sich dort potentiell eine EdB aufhalten könnte und sie möglichst nahe an der Bestrahlungsquelle liegen. Das kann z. B. der angrenzende Flur sein oder ein Aufenthaltsraum, der von nicht strahlenüberwachten Personen benutzt wird. Abbildung 6 kann beispielhaft entnommen werden, wo die Messsonden während der Bestrahlung aufgestellt wurden. Das x' kennzeichnet dabei den darüber liegenden Raum, in dem sich eine EdB befinden könnte.

Abb. 6: Hier wird beispielhaft gezeigt, wie die Messsonden während der Messung aufgestellt wurden



Herausforderungen bei der Dosisermittlung

Eine Schwierigkeit ist die Ermittlung von Aufenthaltsorten der EdB mit den dazugehörigen Aufenthaltszeiten. Nur aufgrund der Dokumentenlage kann keine realitätsnahe Bewertung erfolgen, da meistens Abweichungen zu den Bauplänen oder der aktuellen Raumnutzung vorliegen. Dies ist zwingend vorher mit den verantwortlichen Strahlenschutzbeauftragten zu besprechen, um die aktuellen Gegebenheiten zu berücksichtigen und eine realitätsnahe Dosisermittlung vorzunehmen.

Die Messsonden sollten möglichst nahe der Bestrahlungsquelle aufgestellt werden. Werden die Sonden z. B. zu weit links oder rechts aufgestellt, vergrößert sich der Abstand und die zu veranschlagende Dosisleistung wird unterschätzt.

Ergebnisse

Aktuell wurden Messungen in vier Brachytherapien durchgeführt. Bei zwei davon sind die Auswertungen abgeschlossen und diese Ergebnisse werden im „Jahresbericht: Berichterstattung der von Einzelpersonen der Bevölkerung erhaltenen Expositionen nach § 101 StrlSchV“, präsentiert. Es wurden Messungen begleitend zu einer Patientenbehandlung sowie mit einem Phantom durchgeführt. Je nachdem, welche Behandlung durchgeführt wurde und wie lange der letzte Quellenwechsel zurücklag, lag die Bestrahlungszeit zwischen vier und zehn Minuten. Die Aktivitäten der Iridium-Quellen lagen dabei zwischen 264 und 288 Gigabecquerel (GBq).

Die ausgehende Strahlenexposition während der Behandlung wurde mit vier MIRA-Sonden aufgezeichnet. Die Messsonden wurden an ihren entsprechenden Messpunkten aufgestellt. Befindet sich eine EdB hinter den Messpunkten (Aufenthaltsräume bzw. Räume), wurde die ODL konservativ ohne Berücksichtigung von zusätzlichen Abschirmungen über die Entfernung bestimmt [2023c].

Vor und nach der Bestrahlung wurde an den Messpunkten der Nulleffekt (NE) aufgenommen, siehe Abbildung 7. Auch ohne Anwesenheit einer radioaktiven Quelle zeichnen die Messsonden eine Ortsdosisleistung auf. Eine Ursache dafür kann die natürliche Hintergrundstrahlung (terrestrische Strahlung) sein. Dies wird dann als Nulleffekt bezeichnet.

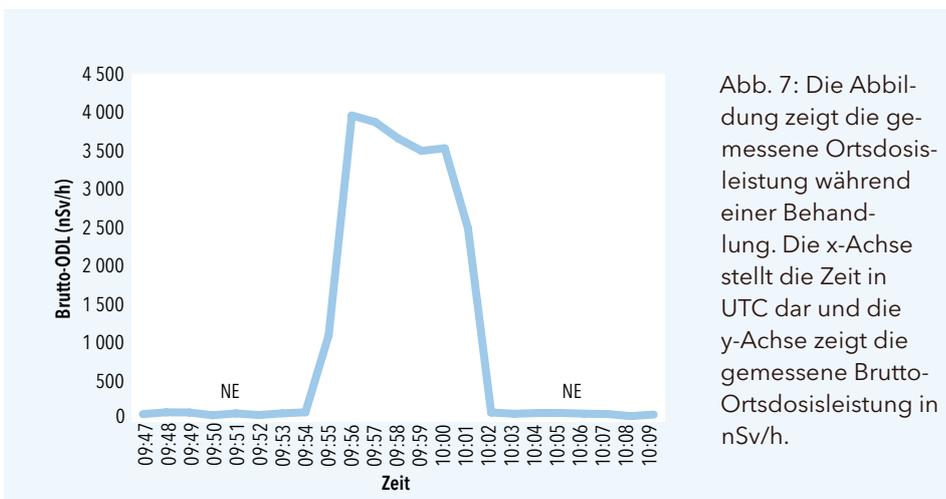


Abb. 7: Die Abbildung zeigt die gemessene Ortsdosisleistung während einer Behandlung. Die x-Achse stellt die Zeit in UTC dar und die y-Achse zeigt die gemessene Brutto-Ortsdosisleistung in nSv/h.

Um 09:54 Uhr steigt die Brutto-Ortsdosisleistung an. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Bestrahlungsquelle (Ir-192) aus dem Afterloading-Gerät ausgefahren wurde. Mithilfe eines Plastikröhrchens, welches vor Beginn der Bestrahlung der Patientin in den Gebärmutterhals eingelegt wird, wird die Bestrahlungsquelle über die Schläuche in unmittelbarer Nähe des Tumors platziert. Nach ungefähr sechs Minuten (10:01 Uhr) wurde die Iridium-192-Quelle aus der Patientin geführt und zurück in das Afterloading-Gerät gefahren. Um 10:02 Uhr endete die Bestrahlung. Die Brutto-Ortsdosisleistung ist auf den Wert des Nulleffektes zurückgegangen. Für die Auswertung wurden die minütlichen Werte betrachtet. Da die Messwerte pro Stunde ausgegeben werden, müssen diese zuerst auf pro Minute umgerechnet werden. Um den tatsächlichen erhöhten Wert (Nettowert) während der Bestrahlungszeit zu erhalten, wird vom gemessenen Wert (Bruttowert) der zuvor ermittelte Nulleffekt abgezogen. Dieser berechnete Nettowert wird noch mit der Anzahl der Behandlung des jeweiligen Jahres (Brachytherapie 1: 49 Behandlungen, Brachytherapie 2: 68 Behandlungen) und dem entsprechenden Aufenthaltsfaktor ($T=0,1$) multipliziert, um die jährliche Strahlenexposition an den verschiedenen Messpunkten zu erhalten. Mit den vorhandenen tatsächlich berechneten Werten wird der ungünstigste Punkt bestimmt. Aus Tabelle 1 kann der ungünstigste Punkt für die jeweilige Einrichtung bestimmt werden (Brachytherapie 1: Messpunkt 4 und Brachytherapie 2: Messpunkt 1).

Tab. 1: Die Tabelle zeigt die ermittelten Jahresdosen für die abgeschlossenen Brachytherapien

Einrichtung	Messpunkt 1	Messpunkt 2	Messpunkt 3	Messpunkt 4
Brachytherapie 1	2.UG: Archiv 0,98 $\mu\text{Sv/a}$	1.UG: Flur 1 0,19 $\mu\text{Sv/a}$	1.UG: Flur 2 0,59 $\mu\text{Sv/a}$	EG: Flur 3 (CT) 1,8 $\mu\text{Sv/a}$
Brachytherapie 2	1.UG: Wartezimmer 0,23 $\mu\text{Sv/a}$	1.UG: Schaltraum 0,14 $\mu\text{Sv/a}$	1.UG: Toilette -	EG: Wiese -

Bei beiden ausgewerteten Einrichtungen liegen die gemessenen Werte deutlich unter den geforderten 1 mSv pro Jahr, siehe Tabelle 1. Die gemessenen Jahresdosen liegen zwischen 0,0018 und 0,00023 mSv pro Jahr. Eine Erhöhung der Brutto-Ortsdosisleistung konnte bei den Messpunkten 3 und 4 der Brachytherapie 2, während der Bestrahlung nicht festgestellt werden. Da sie auch unter dem 10 %-Kriterium liegen, müssen hier keine weiteren Messungen bzw. Berechnungen durchgeführt werden. Werden diese Ergebnisse mit der höchst zugelassenen Anzahl der Behandlungen pro Jahr (520) multipliziert, liegen dann die Werte zwischen 0,0187 und 0,0007 mSv pro Jahr. Auch hier liegen die Werte deutlich unter dem geforderten Wert von 1 mSv pro Jahr.

Vorab durchgeführte Berechnungen haben gezeigt, dass bei den anderen beiden Einrichtungen die jährliche Strahlenexposition auch unter 0,1 mSv pro Jahr liegen wird. Hier zeigt die Tendenz, dass die vorab ermittelten Werte niedriger ausfallen werden als bei den abgeschlossenen Einrichtungen. Die Messungen haben außerdem gezeigt, dass jede Einrichtung vom Aufbau, der Abschirmung oder der Nutzung der angrenzenden Räumlichkeiten unterschiedlich ist. Sie sind somit als nicht homogen zu betrachten.



Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Messkonzept für die Brachytherapien sich als tragfähig erweist. Bei beiden Einrichtungen liegen die gemessenen Werte deutlich unter dem geforderten Grenzwert nach § 80 des StrlSchG. Dies gilt sowohl für die tatsächlichen Werte als auch für die höchstzulässigen Parameter. Die Berechnungen nach § 101 der StrlSchV sind für diese Einrichtungen abgeschlossen. Erst wenn sich bei diesen Einrichtungen etwas an den Genehmigungsvoraussetzungen ändert, wird das HLNUG aktiv und neue Messungen werden durchgeführt.

Bei den beiden durchgenommenen Brachytherapien würde eine EdB eine Strahlenexposition von 0,0018 mSv bzw. 0,00023 mSv pro Jahr erhalten. Zum Vergleich würde eine Person bei einem Flug von Frankfurt nach New York eine Dosis zwischen 0,032 und 0,075 mSv erhalten. Eine Patientin würde bei einer Mammographie eine Dosis zwischen 0,2 und 0,4 mSv erhalten und bei einer durchgeführten Computertomographie (CT) des Abdomens (Bauch) eine Dosis zwischen 8 und 20 mSv [2023g, 2023h].

Das HLNUG wird weitere Messungen in Brachytherapie-Einrichtungen vornehmen. In absehbarer Zeit sollen auch Messungen in Kliniken vorgenommen werden, die eine Radio-Jod-Therapie durchführen. Unter dem Link <https://www.hlnug.de/themen/strahlenschutz/avv-taetigkeiten> sind die aktuellen Ergebnisse veröffentlicht.

Literatur

- BfS-Bundesamt für Strahlenschutz (2023a): Natürliche Strahlung in Deutschland. [https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/natuerliche-strahlung/natuerliche-strahlung_node.html; Stand: 12.06.2023].
- Ulkfonrad (2023b): Natürliche Strahlenbelastung. [<https://www.ulfkonrad.de/physik/9-10/kern/natuerliche-strahlenbelastung>; Stand: 26.07.2023].
- Strahlenschutzgesetz – StrlSchG (27.06.2017): Zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung. Zuletzt geändert durch Art. 1, 2 Erstes ÄndG vom 20.05.2021; Teil 2 Abschnitt 9 Kapitel 5 §80.
- Strahlenschutzverordnung – StrlSchV: Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (29.11.2018): Teil 2 Kapitel 6 Abschnitt 6 §99-101.
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2023c): AVVV Tätigkeiten/§ 101 StrlSchG [<https://www.hlnug.de/themen/strahlenschutz/avv-taetigkeiten>; Stand: 22.09.2023]
- BAnz – Bundesanzeiger (16.06.2020): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten (AVV Tätigkeiten).
- BfS – Bundesamt für Strahlenschutz (11.2019): Leitfaden zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch ionisierende Strahlung aus Anlagen oder Einrichtungen (Direktstrahlung).
- BfS – Bundesamt für Strahlenschutz (2022): Beispiele für Einzelpersonen der Bevölkerung.
- Gesundheitsinformation (2023d): Was ist eine Brachytherapie? [<https://www.gesundheitsinformation.de/was-ist-eine-brachytherapie.html>; Stand: 26.07.2023]
- BfS – Bundesamt für Strahlenschutz (2023e): Brachytherapie. [<https://www.bfs.de/DE/themen/ion/anwendung-medizin/strahlentherapie/formen/brachytherapie.html>; Stand: 25.09.2023]
- ENVINET GmbH München (2023f): MIRA-Gamma Dose Rate Detection System. [<https://scientaenvinet.com/en/products/mira.html>; Stand: 26.07.2023]

Welche Strahlenbelastung geht von medizinischen Einrichtungen aus?

Deutsche Norm: DIN 6853-2 (10.2005) - Medizinische ferngesteuerte, automatische betriebene Afterloading Anlagen - Teil 2: Strahlenschutzregeln für die Errichtung.

Deutsche Norm: DIN 6844-3 (07.2020) - Nuklearmedizinische Betriebe - Teil3: Strahlenschutzberechnungen.

BfS - Bundesamt für Strahlenschutz (2023g): Höhenstrahlung beim Fliegen. [<https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/luft-boden/flug/flug.html>; Stand: 28.06.2023].

Medizinio (2023h): Tipp: Strahlung beim Röntgen und im CT. [<https://medizinio.de/blog/roentgen-strahlung-ct>; Stand: 27.07.2023].