

**Strahlenschutz**

# Senkung der Strahlungswichtungsfaktoren für Neutronen im neuen Strahlenschutzgesetz – Auswirkung auf die zu berechnende Dosis bei CASTOR-Behältern

Von Robert Schmitz\*

*Die biologische Wirkung von Neutronen wird in der Praxis des Strahlenschutzes seit Langem unterschätzt. Entgegen aller wissenschaftlichen Evidenz hat die ICRP im Jahr 2007 eine weitere Senkung der Strahlungswichtungsfaktoren für Neutronen empfohlen, die im neuen Strahlenschutzgesetz übernommen wird. Der Einfluss auf die Abschätzung der Neutronendosis bei Atommülltransporten wird an einem Beispiel ermittelt.*

**Einführung**

Hochradioaktive Abfälle aus dem Betrieb von Atomkraftwerken bestehen aus abgebrannten Brennelementen oder dem Material, das nach Wiederaufarbeitung des abgebrannten Kernbrennstoffs übrig bleibt. Für den Transport und die Lagerung benötigt man spezielle Behälter, die einerseits die ionisierenden Strahlen nach außen abschirmen und die andererseits die entstehende Wärme abführen.

Aus physikalischen Gründen kann die ionisierende Strahlung nicht vollständig abgeschirmt werden. Sie besteht, etwa bei einer bestimmten Art CASTOR-Behälter in 2 Meter Abstand, zu gut 80 Prozent aus Neutronen [BfS 1997].

Für beträchtliches Aufsehen in der deutschen Öffentlichkeit haben wiederholt CASTOR-Transporte mit wiederaufgearbeiteten Kernbrennstoffen aus La Hague (Frankreich) und Sellafield (Großbritannien) nach Gorleben gesorgt, wo sich ein großes oberirdisches Zwischenlager befindet. Weitere Zwischenlager sind an einigen deutschen Atomkraftwerken angesiedelt und dienen zur Aufnahme abgebrann-

ter Kernbrennstoffe, die für die direkte Endlagerung vorgesehen sind.

In Zukunft werden Zwischenlager ausgebaut bzw. neu angelegt. Dies ist im Rahmen des Atomausstiegs erforderlich, weil noch kein Endlager für hochradioaktive Abfälle zur Verfügung steht und durch den Rückbau von Atomkraftwerken sehr große Mengen an hochradioaktiven Abfällen zwischengelagert werden müssen.

Es ist eine hochsensible Frage, welcher Strahlenbelastung bzw. -dosis Personen ausgesetzt sind, die sich für kürzere oder längere Zeit im Umfeld von Behältern wie insbesondere

den CASTORen aufhalten, ob es sich um Bahnpersonal, Polizisten, Demonstranten oder Beschäftigte kerntechnischer Anlagen bzw. von Zwischenlagern handelt. Um diese Belastung einzuschätzen, gibt es einen verkehrsrechtlichen Grenzwert von 0,1 mSv/h für die effektive Dosis in 2 Meter Abstand vom Behälter [Bundesgesetzblatt 2007].

Mit geeigneten Detektoren ist es möglich, die sogenannte Fluenzrate  $\dot{\phi}$  zu messen, die die Zahl  $N$  der Neutronen, die eine bestimmte Energie  $E$  aufweisen, pro Fläche  $A$  und Zeiteinheit  $t$  ausdrückt:

$$\dot{\phi}(E) = dN(E)/Adt$$

Entsprechende Dosisgrößen müssen jedoch aus der Fluenzrate in nicht trivialer Weise berechnet werden, denn die in die Rechnung eingehenden Neutronen-Wichtungsfaktoren sind von der Energie abhängig.

Seit Langem gibt es Hinweise auf die Unterschätzung der biologischen Wirkung von Neutronen in den einschlägigen Rechenmodellen. Im Gegensatz dazu hat die Internationale Strahlenschutzkommission ICRP 2007 eine weitere Senkung der Strahlungswichtungsfaktoren für Neutronen empfohlen [ICRP 103]. Dies ist in der auch für Deutschland verbindlichen EURATOM-

Richtlinie 59 von 2013 übernommen worden. Es ist somit zu befürchten, dass die Strahlendosen, denen Personen im Umfeld von CASTOR-Behältern ausgesetzt sind, rechnerisch noch weiter unterbewertet und verharmlost werden.

**Die Neutronen-Wichtungsfaktoren**

In dieser Studie wird die Frage untersucht, wie sich verschiedene Wertzuweisungen für den Strahlungswichtungsfaktor  $w_R$  auf die Berechnung der effektiven Dosis  $H_E$  durch Neutronenstrahlung in der Nähe eines mit abgebrannten Brennelementen beladenen CASTOR-Behälters auswirken. Die Rechnung erfolgt in Analogie zur Arbeit Schmitz (2017).

Die effektive Dosis ist für monoenergetische Strahlung gegeben durch:

$$H_E = \sum w_T H_T = w_R \sum w_T D_T$$

Dabei sind  $w_T$  die Gewebewichtungsfaktoren,  $H_T$  die Äquivalentdosis eines Organs oder Gewebes,  $w_R$  die Strahlungswichtungsfaktoren und  $D_T$  die entsprechende Energiedosis im Organ. Wir vergleichen folgende Wertzuweisungen für Neutronenstrahlung:

$$(1) w_R = 5 + 17e^{-\frac{(\ln 2E)^2}{6}}$$

(derzeit gültig nach ICRP 60, 1990/91)

$$(2) w_R = \begin{cases} 2,5 + 18,2 e^{-\frac{(\ln E)^2}{6}}, & E < 1 \text{ MeV} \\ 5 + 17 e^{-\frac{(\ln 2E)^2}{6}}, & 1 \text{ MeV} \leq E \leq 50 \text{ MeV} \\ 2,5 + 3,25 e^{-\frac{(\ln 0,04E)^2}{6}}, & E > 50 \text{ MeV} \end{cases}$$

(ICRP 103)

$$(3) w_R = 90$$

(Schmitz-Feuerhake 2016)

$E$  ist die Strahlungsenergie in MeV. In der Abbildung 1 sind die genannten Strahlungswichtungsfaktoren für Neutronen zu sehen, nach ICRP in Abhängigkeit von der Neutronenenergie (aus ICRP 2007), kastenförmige Linien: Werte nach ICRP 60, feingestrichelt:

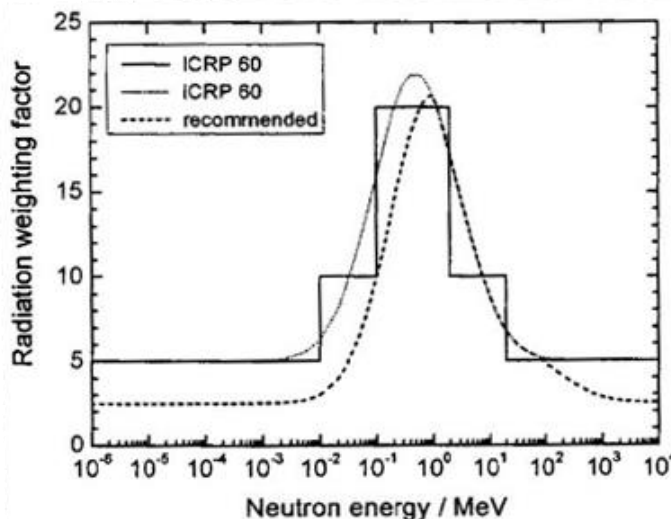


Abbildung 1: Neutronen-Wichtungsfaktoren in Abhängigkeit von der Neutronenenergie nach ICRP 60 (1991) und 103 (2008)

\* Dr. rer. nat. Robert Schmitz ist selbständiger Physiker in Hannover, [Robert.Schmitz@gmx.net](mailto:Robert.Schmitz@gmx.net)

Anpassung der Werte von ICRP 60 durch kontinuierliche Funktion, grob gestrichelte Linie: neue Empfehlung in ICRP 103.

Wir wollen im Folgenden prüfen, welchen Einfluss Veränderungen in der Ansetzung der Strahlungswichtungsfaktoren auf die Berechnung effektiver Dosen haben.

### Berechnung effektiver Dosen aus Neutronenspektren

Die Neutronenstrahlung, von der wir ausgehen, ist nicht monoenergetisch, sondern entspricht einem Spektrum. Dieses ist in Form der Fluenzrate  $\phi = \phi(E)$  in Abhängigkeit von der Energie gegeben. Wir entnehmen sie der Quelle BfS (2000), wo sie für einen mit Brennelementen beladenen CASTOR V/19 angegeben ist. Dabei wird die Oberfläche des Mantels auf halber Höhe betrachtet (den ebenfalls erwähnten CASTOR HAW 20/28, der verglaste Abfälle enthält, untersuchen wir nicht):

Wir sehen hier, dass sich die Neutronenstrahlung über einen weiten Energiebereich von einigen Größenordnungen von eV erstreckt. Das Maximum ist zwischen 0,1 und 1 MeV angesiedelt.

Bozkurt und Koautoren (2000) haben anhand eines detaillierten Modells für den menschlichen Körper eine Berechnung für weite Energieintervalle durchgeführt, die angibt, welche Neutronen-Fluenzrate welche Dosis hervorruft. Mit den entsprechenden Transformationskoeffizienten  $C = C(E)$  in AP-Strahlungsgeometrie berechnen wir die effektive Dosisleistung  $\dot{h}_E = \dot{h}_E(E) = C \cdot \phi$ .

Integration ergibt  $\dot{H}_E = \int \dot{h}_E dE$ . Da  $\dot{h}_E$  jeweils für einen bestimmten Wert der Energie  $E$  proportional zu  $w_R = w_R(E)$  ist, können wir die drei Wertzuweisungen (1)-(3) dafür in unserer Rechnung handhaben.

Unsere Berechnung der effektiven Dosis pro Zeiteinheit

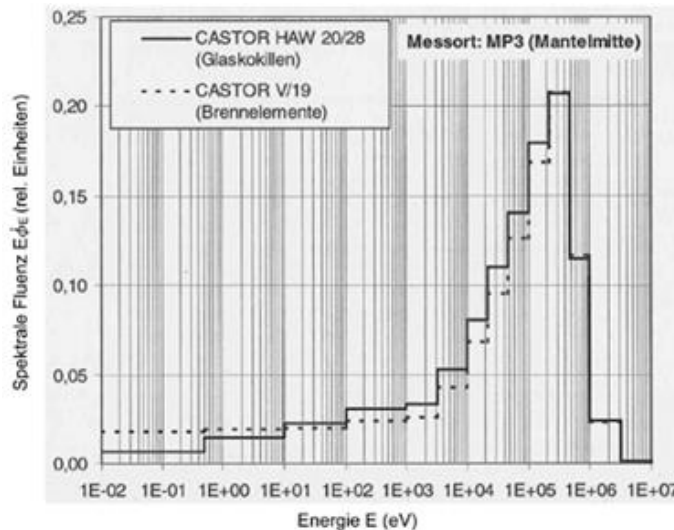


Abbildung 2: Vom BfS gemessene Neutronenspektren an verschiedenen CASTOREn

ergibt für die Neutronenstrahlung – auf der Oberfläche des Behälters, auf halber Höhe – mit den verschiedenen Strahlungswichtungsfaktoren  $w_R$ :

- (1)  $\dot{H}_E = 33 \mu\text{Sv/h}$  (ICRP 60)
- (2)  $\dot{H}_E = 20 \mu\text{Sv/h}$  (ICRP 103)
- (3)  $\dot{H}_E = 321 \mu\text{Sv/h}$  ( $w_R=90$ )

### Diskussion

Der Wert (1) weicht etwas von der Quelle BfS (2000) ab, die  $26,5 \mu\text{Sv/h}$  angibt. Dies ist leicht zu erklären, weil die Transformationskoeffizienten  $C$  nach Bozkurt, die wir verwenden, zweifellos etwas anders festgelegt sind als die entsprechenden Größen, die der Bestimmung in BfS (2000) zugrunde liegen.

Die Werte (1) und (2) reproduzieren beide die Größenordnung der bereits bekannten  $26,5 \mu\text{Sv/h}$  nach BfS (2000), was plausibel ist, weil sie nach ähnlichen Maßgaben, sowohl der Wichtungsfaktoren, als auch der Modelle für die Berechnung von Dosen aus Fluenzraten, ermittelt wurden.

Die neue Bewertung von ICRP 103 gegenüber ICRP 60 führt dazu, dass Wert (2) etwa 39 Prozent niedriger berechnet wird als Wert (1). Das ist unter bestimmten Bedingungen durchaus für die Frage relevant, ob ein Grenzwert eingehalten wird. Die Absenkung der Wichtungsfaktoren durch

ICRP 103 macht sich also bemerkbar, wenn auch nicht in einer drastischen Weise.

Nach BfS (1997) kann man das Abstandsverhalten der Neutronenstrahlung so verstehen, dass ihre Intensität bzw. Fluenz in 2 Meter Abstand in etwa um einen Faktor 4 gegenüber der unmittelbaren Nähe zur Oberfläche des Behälters reduziert ist. Der eingangs genannte Grenzwert von  $0,1 \text{ mSv/h}$  in 2 Meter Abstand wird somit von den berechneten Werten (1) und (2) deutlich unterschritten. Ein erheblicher Unterschied ist dagegen durch den Wert (3) gegeben. In diesem Fall wird mit  $0,08 \text{ mSv/h}$  der Grenzwert von  $0,1 \text{ mSv/h}$  bereits fast erreicht, und das von einem einzigen Behälter in 2 Meter Abstand.

Man beachte, dass sich bei Transporten zum einen insbesondere Polizisten immer wieder in Bereichen aufhalten, die näher als 2 Meter an den Behältern sind [Becker 2012]!

Zum anderen wird bei CASTOR-Transporten oft nicht ein einzelner Behälter, sondern eine Anzahl davon befördert. Der letzte Transport, der im Jahr 2017 von Obrigheim auf dem Wasserweg (dem Neckar) ins Zwischenlager nach Neckarwestheim durchgeführt wurde, umfasste 15 Transportbehälter [BfE 2017].

Ein CASTOR-Behälter ist zylinderförmig und typischerweise 6 Meter hoch bei einem Durchmesser von 2,75 Meter [Becker 2012]. Die CASTOREn werden liegend transportiert, aber in den Zwischenlagern senkrecht aufgestellt [GNS 2017]. Man kann mit einer einfachen Betrachtung einsehen, dass es in bestimmten Bereichen durch Überlagerung der Strahlungsfelder zu beträchtlichen Neutronendosen kommt. Die Behälter werden im Lager nebeneinander, wie auf einem Quadratgitter, aufgestellt [GNS 2017]. Im Lager kann es bei der Inspektion der Behälter beispielsweise zu Situationen kommen, in denen sich Personen auf halber Höhe eines CASTORs 2 Meter entfernt von zwei CASTOREn befinden – oder, wie leicht aufgrund der Geometrie zu erkennen ist, an Positionen mit derselben Belastung durch Neutronenstrahlung. Nach dem oben diskutierten Fall (3) entspricht dies einer effektiven Dosis von  $0,16 \text{ mSv/h}$ , das ist deutlich mehr als der verkehrsrechtliche Grenzwert von  $0,1 \text{ mSv/h}$  in 2 Meter Abstand von einem Transportbehälter nach der Quelle „Bundesgesetzblatt“ (2007).

Beim Strahlungswichtungsfaktor im Fall (3) handelt es sich um einen begründeten Vorschlag, der drastische Konsequenzen aufzeigt. Diese sind weiter zu untersuchen.

### Literatur

- Becker, O.: Messung der Neutronen- und Gammastrahlung während des Atommülltransports ins oberirdische Zwischenlager Gorleben im November 2011, Hannover (2012), Greenpeace-Pressemitteilung
- BfE. Transporte bestrahlter Brennelemente nach Neckarwestheim genehmigt: Pressemitteilung 16.5.2017
- BfS. Heimlich, F.H. (Hg.): Messungen im Neutronen- und Gamma-Strahlungsfeld eines beladenen CASTOR-IIa-Behälters im Transportbehälterlager Gorleben und Vergleich der Messergebnisse für Neutronen mit Mon-

te-Carlo-Rechnungen, BfS-ET-24/97 (1997)

BfS. Börst, F.-M., Rimpler, A., Scheib, H.: Strahlungsmessungen an Transport- und Lagerbehältern zur Beförderung von hochaktiven Glaskokillen aus der Wiederaufarbeitung und von bestrahlten Brennelementen, BfS-ET-32/00 (2000)

Bozkurt, A., Chao, T.C., Xu, X.G.: Fluence-to-Dose Conversion Coefficients From Monoenergetic Neutrons below 20 MeV based on the VIP-Man Anatomical Model. Phys. Med. Biol. 45 (2000) 3059

Bundesgesetzblatt. Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR), Bundesgesetzblatt Jahrgang 2007, Teil II, Nr. 27, S. 1399

GNS. Informationsmaterial der Gesellschaft für Nuklear-Service vom 7.7.2017

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

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

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

Schmitz, R., Der Einfluss der Strahlungswichtungsfaktoren für Neutronen und Protonen auf die Bestimmung der Strahlenexposition von Flugpersonal, Strahlentelex Nr. 724-725, 1 (2017), [www.strahlentelex.de/Stx\\_17\\_724-725\\_S01-03.pdf](http://www.strahlentelex.de/Stx_17_724-725_S01-03.pdf)

Schmitz-Feuerhake, I., Die Minimierung der Strahlenbelastung des Flugpersonals durch Rechenkunst, Strahlentelex Nr. 712-713, 1 (2016),

[www.strahlentelex.de/Stx\\_16\\_712-713\\_S01-06.pdf](http://www.strahlentelex.de/Stx_16_712-713_S01-06.pdf) ●

## Sechs Jahre nach der Katastrophe von Fukushima

### Das Viertel der Alten

#### Reise-Tagebuch des japanischen Journalisten FUKUMOTO Masao<sup>1</sup>

Es gibt jetzt zwei Möglichkeiten, mit öffentlichen Verkehrsmitteln die Stadt Minamisoma in der japanischen Präfektur Fukushima zu erreichen, und zwar von Norden mit der Bahn, oder von der Stadt Fukushima über das Dorf Iitate mit dem Bus. Für die Hinfahrt entschied ich mich für die Bahn und für die Rückfahrt für den Bus.

#### Die Joban-Linie

Von Norden kommend, muss man zuerst nach Sendai fahren, die Hauptstadt der nördlich von der Präfektur Fukushima befindlichen Präfektur Miyagi. Eigentlich fährt die Joban-Linie an der Pazifikküste zwischen Tokio und Sendai, und die Gesamtlänge beläuft sich auf circa 350 Kilometer. Aber diese Strecke war vom Tsunami und vom Reaktorunfall stark betroffen und kann jetzt noch nicht durchgehend befahren werden. Vom Süden kommend kann man bis zum Bahnhof Tatsuta fahren, der sich in der im September 2015 für die Rückkehr freigegebenen Ortschaft Naraha<sup>2</sup> befindet, und vom Norden bis zum Bahnhof Nami'e, die Stadt, die südlich von Minamisoma liegt und Ende März dieses Jahres für die Rückkehr freigegeben wurde. Zwischen Tatsuta und Minamisoma ist die radioaktive Belastung noch sehr hoch, weshalb die Strecke erst im März 2020 für die Durchfahrt freigegeben werden soll.

<sup>1</sup> FUKUMOTO Masao lebt und arbeitet in Berlin, [fkmtms@t-online.de](mailto:fkmtms@t-online.de)

<sup>2</sup> Für die Einzelheiten siehe den Beitrag „Zurückkehren oder nicht“ von FUKUMOTO Masao im Strahlentelex Nr. 692-693 / 29. Jahrgang, 5. November 2015 ([http://www.strahlentelex.de/Stx\\_15\\_692-693\\_S01-07.pdf](http://www.strahlentelex.de/Stx_15_692-693_S01-07.pdf)).

sen nur Unkräuter, und ich habe niemanden gesehen, der dort gearbeitet hat. Lebenszeichen konnte ich nur an der Küste und auf der Straße wahrnehmen. An der Küste wird mit Baggern für den Damm-



An der Küste wird der Damm gebaut.



Vom Zugfenster aus sieht man nur Unkräuter im Reisfeld

Ich bin zuerst von Fukushima nach Sendai gefahren und dort in die Joban-Linie umgestiegen. Am Anfang fand ich, dass alles so normal aussieht, aber je südlicher ich gefahren kam, desto verwüsteter sah es aus beim Blick aus dem Zugfenster. Ich bemerkte ferner, dass die Strecke teilweise erneuert worden war. Eine Teilstrecke durch Reisfelder wurde wegen Tsunami-Gefahr mittels einer Brücke etwas höher gelegt. Es gibt auch neu gebaute Bahnhöfe. Die neu gebaute Strecke soll erst seit Dezember 2016 befahrbar sein. In den Reisfeldern wach-

bau noch viel gearbeitet und auf der Straße fährt eine Schlange von Lastkraftwagen. Je näher ich Minamisoma komme, desto älter sieht die Strecke aus, insbesondere zwischen dem Bahnhof Soma und Haranomachi in der Stadt Minamisoma. Das liegt daran, dass dieser Streckenabschnitt etwas weiter von der Küste entfernt ist und von Erdbeben und Tsunami nur wenig betroffen war. Er ist bereits seit Dezember 2011 in Betrieb. Im Bahnhof Haranomachi sind nach der Katastrophe viele Züge stehen geblieben, da sie weder nach Norden noch nach