

## **Antwort der Bundesregierung**

**auf die Kleine Anfrage des Abgeordneten Dr. Paul Schmidt und der  
Fraktion der AfD  
– Drucksache 21/4654 –**

### **Anwendung des Linear-Non-Threshold-Modells bei verschiedenen Arten ionisierender Strahlung**

#### Vorbemerkung der Fragesteller

In der Strahlenbiologie werden unterschiedliche Modelle zur Beschreibung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen ionisierender Strahlung verwendet. Derzeit dient das Linear-Non-Threshold-Modell (LNT) im Strahlenschutz vielfach als Grundlage der Risikobewertung, obwohl experimentelle Befunde insbesondere für dünn-ionisierende (oder auch niedrig-LET (Linearer Energietransfer) Strahlungsarten häufig nichtlineare Dosis-Wirkungs-Beziehungen ausweisen, die eine deutlich unterproportionale Wirkung niedriger Strahlungsdosen bedeuten (HallGiaccia: „Radiobiology for the Radiologist“, 8. Edition, Chapter 2 <https://doi.org/10.1007/s13246-018-0684-1>; IAEA „Radiation Biology: A Handbook for Teachers and Students“, Chapter 4, vgl. [www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-42\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-42_web.pdf); Tubiana, Dutreix, Wambersie: „Radiobiology“, Chapter 3, vgl. [https://catalog.nlm.nih.gov/discovery/fulldisplay/alma996788503406676/01NLM\\_INST:01NLM\\_INST](https://catalog.nlm.nih.gov/discovery/fulldisplay/alma996788503406676/01NLM_INST:01NLM_INST); Herrmann, Dörr, Baumann: Klinische Strahlenbiologie, Kapitel 2, vgl. [www.isbn.de/buch/9783437239601/klinische-strahlenbiologie](http://www.isbn.de/buch/9783437239601/klinische-strahlenbiologie); Suzuki & Hei [1996], vgl. [https://doi.org/10.1016/0027-5107\(95\)00123-9](https://doi.org/10.1016/0027-5107(95)00123-9); Paul Schmidt & Jürgen Kiefer: Deletion-pattern analysis of  $\alpha$ -particle and X-ray induced mutations at the HPRT locus of V79 Chinese hamster cells. In: Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis. Band 421, Nr. 2, 3. November 1998, ISSN 0027-5107, S. 149–161, vgl. [https://doi.org/10.1016/S0027-5107\(98\)00159-6](https://doi.org/10.1016/S0027-5107(98)00159-6); Dubrova & Plumb [2000], [https://doi.org/10.1016/S0027-5107\(2000\)002800-3](https://doi.org/10.1016/S0027-5107(2000)002800-3); alle Links aufgerufen am 16. Februar 2026). Dadurch ergeben sich bei den Fragestellern Fragen zur wissenschaftlichen Begründung und Differenzierung der zur Bemessung der Wirkung ionisierender Strahlen angewandten Modelle, insbesondere da diese in allen Bereichen des Strahlenschutzes angewendet werden und dadurch große volkswirtschaftliche Bedeutung besitzen.

Jede Exposition des menschlichen Körpers gegenüber Strahlung oder anderen Noxen (z. B. biologisch wirksame Faktoren bzw. Substanzen) kann bei hinreichend hoher Dosis bionegative Wirkungen entfalten. Um derartigen Gefahren vorzubeugen, ist es grundsätzlich sinnvoll, Emissions- und Immissionsgrenzwerte festzulegen. Nach Auffassung der Fragesteller setzt dies voraus, dass

oberhalb einer wissenschaftlich belegbaren Dosisgrenze mit hinreichender Sicherheit bionegative Wirkungen zu erwarten sind und das Risiko der Gesundheitsgefährdung ein nicht mehr akzeptables Maß erreicht.

Für Expositionen unterhalb solcher Dosisgrenzen bzw. entsprechender Dosisleistungen ist die Wirkung vielfach nicht eindeutig belegt. Sie kann bionegativ, neutral oder unter bestimmten Umständen auch biopositiv sein (L. E. Feinendegen [British Journal of Radiology, 2005]: „Evidence for beneficial low level radiation effects and radiation hormesis“, <https://doi.org/10.1259/bjr/63353075>; Sharma et al. [Hell J Nucl Med., 2019]: „A concept of radiation hormesis: stimulation of antioxidant machinery in rats [...]“, <https://doi.org/10.1967/s002449910958>). Bereits Paracelsus stellte hierzu fest: „Alle Dinge sind Gift, und nichts ist ohne Gift; allein die Dosis macht, dass ein Ding kein Gift sei.“ Anschauliche Beispiele aus dem Alltag zeigen, dass zahlreiche Stoffe – etwa Vitamine, Arzneimittel oder Kochsalz – in hoher Dosis toxisch wirken, in niedriger Dosis jedoch lebensnotwendig oder therapeutisch wirksam sind.

Das LNT-Modell sieht aber gerade eine solche untere Grenze nicht vor und behandelt jede Dosis gleich, auch wenn sie so niedrig ist, dass sie sich im Bereich der natürlichen Strahlenbelastung bewegt, der Mensch und Tier auf der Erde ohnehin ausgesetzt sind. Da diese geringen Dosen – naturgemäß auch mit niedrigen Dosisleistungen – sehr häufig auftreten, sind sie für den Schutz der Bevölkerung von großer Bedeutung. Umso wichtiger ist es, dass sie gemäß ihrem tatsächlichen genotoxischen Potenzial bewertet werden, da die Entstehung von Keimbahnmutationen und Mutationen, die zu Krebs führen können, die relevanten Risiken der Wirkung ionisierender Strahlung sind.

Die Fragesteller gehen davon aus, dass das LNT-Modell zur Ableitung von Schutz- und Vorsorgemaßnahmen insbesondere bei Teilchenstrahlung (die dicht-ionisierend ist) wie zum Beispiel Alphastrahlung sinnvollerweise eingesetzt werden kann, dass es jedoch im Bereich von Gamma-, Röntgen-, und Elektronenstrahlung (dünn ionisierend) die auftretenden Dosis-Wirkungs-Beziehungen nicht optimal abbildet und dabei die Wirkung von niedrigen Dosen eher überschätzt. Daher dürfte es sinnvoll und geboten sein, in diesem Bereich andere Modelle auf ihre Anwendbarkeit hin zu untersuchen.

1. Auf welcher wissenschaftlichen Grundlage und in welcher Weise wendet die Bundesregierung das LNT-Modell bei der Bewertung gesundheitlicher Risiken durch ionisierende Strahlung an?

Gesundheitliche Risiken durch Strahlung werden anhand von Risikomodellen abgeschätzt. Diese basieren auf Daten aus epidemiologischen Studien und werden abhängig von der interessierenden Strahlenart bzw. Expositionssituation und Erkrankung entwickelt. Das LNT-Modell ist ein Risikomodell, das eine lineare Dosis-Wirkungsbeziehung ohne Schwellendosis annimmt. Es stellt eine plausible Grundlage für die im Strahlenschutz erforderlichen Abwägungsprozesse sowie einen wissenschaftlich fundierten und umsichtigen Strahlenschutz dar.

Details zu den wissenschaftlichen Grundlagen und zur Anwendung des Modells im Strahlenschutz finden sich in einem StrahlenschutzStandpunkt des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS) ([www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/ion/standpunkt-lnt.html](http://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/ion/standpunkt-lnt.html)).

2. Wie setzt das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) – und ggf. weitere zuständige Bundesämter – das LNT-Modell in deutsche Regelungen und Grenzwerte um?

Das deutsche Regelwerk zum Strahlenschutz setzt – auch hinsichtlich Grenzwerten – gemäß Euratom-Vertrag die entsprechenden europäischen Richtlinien

um, die sich an den Empfehlungen der internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) orientieren. Generell berücksichtigt das deutsche Regelwerk zum Strahlenschutz den jeweils aktuellen Stand der etablierten wissenschaftlichen Erkenntnis, wie er in zusammenfassenden Bewertungen von UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), ICRP (International Commission on Radiological Protection), Euratom Artikel 31 Group of Experts und der deutschen Strahlenschutzkommission dokumentiert ist. Nach dem Grundsatz der Dosisreduzierung (siehe auch § 8 Absatz 2 des Strahlenschutzgesetzes) sind auch unterhalb der Dosisgrenzwerte Expositionen und Kontaminationen so gering wie möglich zu halten. Hierzu sind unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls der Stand der Wissenschaft und Technik zu beachten.

3. Welche Regeln bzw. Prozeduren wendet die Bundesregierung bzw. wenden die zuständigen Bundesämter an, um für die verschiedenen Arten ionisierender Strahlung jeweils aus der großen Menge an experimentellen Ergebnissen ein vertretbares Modell zur Abbildung der Dosis-Wirkungs-Beziehungen herzuleiten?

Die vorhandenen Studien zum ursächlichen Zusammenhang zwischen Exposition und Erkrankung – wie epidemiologische Studien, experimenteller Humanstudien, Tierstudien und auch In-vitro-Studien – werden nach sorgfältiger Prüfung in die Auswertung einbezogen. Weitere Details zum Vorgehen bei der Bewertung gesundheitsbezogener Risiken beschreibt das BfS in einem Strahlenschutzstandpunkt ([www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/risikobewertung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](http://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/risikobewertung.pdf?__blob=publicationFile&v=1)). Die in diesem Standpunkt erläuterten Prinzipien gelten grundsätzlich auch für die Herleitung von Modellen für die Dosis-Wirkungsbeziehung, die bei der Risikobewertung eine wichtige Rolle spielen, und für alle Arten von ionisierender Strahlung. Insbesondere ist auch hierfür das Gesamtbild der wissenschaftlichen Ergebnisse ausschlaggebend und die Einbeziehung der Einschätzungen nationaler und internationaler Gremien.

4. Auf welche Weise bestimmt die Bundesregierung bzw. bestimmen die zuständigen Bundesämter für die verschiedenen Arten ionisierender Strahlung jeweils aus der großen Menge an experimentellen Ergebnissen Dosis-Grenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen einerseits und die zu schützende Bevölkerung andererseits?

Es wird auf die Antwort zu Frage 2 verwiesen.

5. Welche Bedingungen im Sinne des Vorsorgeprinzips stellt die Bundesregierung für die Festlegung von Grenzwerten, und warum?

Es wird auf die Antworten zu den Fragen 1 und 2 verwiesen.

6. Für welche Strahlungsarten (z. B. Alphastrahlung, Betastrahlung, Röntgen- und Gammastrahlung, Neutronen, Schwerionen) wird das LNT-Modell durch die Bundesregierung als geeignet angesehen?

7. Unterscheidet die Bundesregierung bei der wissenschaftlichen Begründung des LNT-Modells zwischen dicht-ionisierender Strahlung (z. B. Alpha-Teilchen, Schwerionen) und dünn-ionisierender Strahlung (z. B. Röntgen- und Gammastrahlung), und wenn ja, in welcher Weise, und aus welchen Gründen?

Die Fragen 6 und 7 werden zusammen beantwortet.

Für Strahlungsarten mit hohem LET ist auf Basis der wissenschaftlichen Evidenz das LNT Modell als plausibel einzuschätzen (siehe Antwort zu Frage 8).

Bei Strahlungsarten mit niedrigem LET sind bei Zellexperimenten bei kleinen Strahlendosen zelluläre Reparaturmechanismen beobachtet worden. Sollten diese Mechanismen auch bei der Krebsentstehung eine Rolle spielen (was nicht bewiesen ist), dann ergäben sich bei kleinen Strahlendosen in der Dosis-Wirkungskurve Abweichungen von einem linearen Verlauf. Im Strahlenschutz wird dies dadurch berücksichtigt, dass die im LNT-Modell verwendete Steigung der Dosis-Wirkungskurve bei Strahlendosen, die im Strahlenschutz relevant sind, um einen Faktor 2 reduziert wird. Die Bundesregierung sieht daher für die Belange des Strahlenschutzes die Anwendung des LNT-Modells für alle Strahlungsarten als gerechtfertigt.

8. Inwiefern teilt die Bundesregierung ggf. die Auffassung, dass für dicht-ionisierende Strahlung u. a. aufgrund der fehlenden Schulter in Zellüberlebenskurven und wegen des linearen Zusammenhangs zwischen der Dosis und der Anzahl hervorgerufener Mutationen in Mutations-Induktionskurven eine lineare Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwelle biologisch plausibel ist (vgl. Vorbemerkung der Fragesteller, bitte ausführlich erläutern)?

Die Bundesregierung teilt die Auffassung, dass für Strahlung mit hohem linearem Energietransfer (hoch-LET) ein linearer Zusammenhang ohne Schwellenwert zwischen Dosis und Wirkung besteht. Ein linearer oder annähernd linearer Zusammenhang wurde für mehrere hoch-LET-Strahlungsarten zwischen Dosis und Mutationsinduktion für verschiedene Zelltypen mit diversen Assay-Systemen konsistent nachgewiesen. Auch bei der Induktion molekularer Parameter, wie DNA-Doppelstrangbrüchen und chromosomalen Veränderungen, zeigt hoch-LET-Strahlung einen gut belegten linearen Verlauf mit einer Steigung, die deutlich über der von locker ionisierender Strahlung liegt, was die höhere relative biologische Wirksamkeit von hoch-LET zeigt. Experimentelle Untersuchungen im Bereich sehr niedriger Dosen, bis zu einigen mGy, ergaben keine Hinweise auf einen Schwellenwert in diesen zellbiologischen Analysen (siehe auch Antwort zu Frage 11).

9. Auf welche wissenschaftlichen Erkenntnisse und Empfehlungen nationaler oder internationaler Fachgremien stützt sich die Bundesregierung bei Anwendung des LNT-Modells auf dicht-ionisierende Strahlung einerseits und auf dünn-ionisierende Strahlung andererseits?

Es wird auf die Antworten zu den Fragen 1 bis 3 verwiesen.

10. Welche Befunde berücksichtigt die Bundesregierung bzw. das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) bei der Bewertung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen im Niedrigdosisbereich unterhalb von 20 Millisievert für dünn-ionisierende-Strahlungsarten?

Bei der Bewertung von Dosis-Wirkungsbeziehungen im Niedrigdosisbereich werden vor allem strahlenbiologische Untersuchungen zu frühen molekularen und genetischen Veränderungen herangezogen, die wesentliche Funktionen bei der Krebsentstehung haben (z. B. DNA-Schäden und Mutationen). Beispielsweise zeigten moderne empfindliche Testsysteme mittels Proteinaggregaten einen linearen Zusammenhang von DNA-Schäden nach Exposition im Bereich zwischen 1 und 20 mGy. Generell berücksichtigt das BfS neben eigenen Einschätzungen besonders die Schlussfolgerungen des 2021 erschienen UNSCEAR Bericht „Biological mechanisms relevant for the inference of cancer risks from low-dose and low-dose-rate radiation“, der für verschiedene zellbiologische Endpunkte einen linearen Dosis-Wirkungszusammenhang ohne Schwellenwert unterstützt. Unter anderem wurde hier auch unter 20 mSv ein linearer Zusammenhang zwischen Mutationen bzw. chromosomalen Aberrationen und Strahlenexposition geschlussfolgert.

11. Inwiefern berücksichtigt die Bundesregierung bei Anwendung des LNT-Modells ggf., dass zellbiologische Experimente bei dünn-ionisierender Strahlung regelmäßig Schulterkurven beim Zellüberleben als Funktion der Dosis zeigen und bei der Mutationsinduktion eine linear-quadratische Funktion der Dosis (beides deutet für dünn-ionisierende Strahlung auf überproportional geringere Schadenshäufigkeiten und/oder wirksamere Reparaturmechanismen bei niedrigen im Vergleich zu hohen Dosen hin, vgl. Vorbemerkung der Fragesteller)?

Der Prozess der Tumorentstehung nach Strahlungseinwirkung ist ein äußerst komplexer, mehrstufiger und lange verlaufender Vorgang, der diverse biologische Veränderungen auf zellulärer, geweblicher und Organebene einschließt. Ein zentraler Mechanismus dabei ist die Induktion somatischer Mutationen, die zur Initiierung von Tumoren führen. Diese Mutationen werden durch DNA-Schäden ausgelöst, die nicht korrekt repariert wurden. Strahlenbiologische Daten unterstützen einen linearen Dosis-Wirkungs-Zusammenhang bis in den Bereich niedriger Dosen locker ionisierender Strahlung für die Induktion von DNA-Schäden. Nach UNSCEAR 2021 liegen auch ausreichend wissenschaftliche Daten vor, um für die daraus resultierenden DNA-Mutationen einen linearen Zusammenhang anzunehmen.

Die Interpretation von Zellüberlebenskurven liefert keine belastbaren Erkenntnisse zur Transformation von normalen Zellen in Tumorzellen und ist damit für das LNT-Modell weniger relevant.

12. Inwiefern teilt die Bundesregierung ggf. die Einschätzung, dass aus solchen zellbiologischen Experimenten, die aufgrund der notwendigen Messbarkeit der Strahlenwirkung bei nennenswerten Dosen durchgeführt werden müssen, keine belastbaren Aussagen über die Häufigkeit strahleninduzierter Erkrankungen in großen Bevölkerungsgruppen, die sehr niedrige Strahlendosen erhalten haben, abgeleitet werden können (vgl. Vorbemerkung der Fragesteller), und inwieweit gibt es hier Unterschiede zwischen dicht- und dünn-ionisierender Strahlung (bitte ausführlich erläutern)?

Nach Einschätzung der Bundesregierung können aus den Ergebnissen zellbiologischer Experimente bei hohen Dosen allein keine belastbaren Aussagen über

die Häufigkeit strahleninduzierter Erkrankungen beim Menschen bei sehr niedrigen Strahlendosen abgeleitet werden. Die Ergebnisse zellbiologischer Experimente helfen, die bei der Bestrahlung hervorgerufenen zellbiologischen Reaktionen zu untersuchen. Allerdings treten derartige Reaktionen zeitnah nach einer Bestrahlung auf und beschreiben die Reaktion von Zellen auf Bestrahlung. Sie können jedoch nur bedingt Aufschluss geben über die Reaktion eines Organismus als Ganzes Jahrzehnte nach der Bestrahlung, wie es für die strahleninduzierte Krebsentstehung beim Menschen typisch ist.

Während also die Häufigkeit von strahleninduzierten Erkrankungen beim Menschen aus zellbiologischen Daten nicht abgeleitet werden kann, können zellbiologische Befunde belastbare Anhaltspunkte zum Verlauf von Dosis-Wirkungsbeziehung und zum Vorliegen von möglichen Schwellenwerten für spezifische Zellreaktionen liefern, die zur Tumorentstehung beitragen. Beispielsweise zeigen zahlreiche Untersuchungen einen linearen Zusammenhang zwischen niedrigen Dosen locker-ionisierender Strahlung und DNA-Schädigungen. Diese Schädigungen treten auch bei Dosen von einigen wenigen mGy noch auf und zeigen keinen Schwellenwert. Da jeder DNA-Schaden auch bei vorhandenen Reparaturmechanismen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit (wenn auch einer geringen) zu Mutationen führen kann, unterstützt dieses zellbiologische Resultat das LNT-Modell.

13. Welche wissenschaftlichen Erkenntnisse oder epidemiologischen Daten liegen der Bundesregierung ggf. vor, auf deren Basis man bei niedrigen Expositionen durch dünn-ionisierende Strahlung zusätzliche Erkrankungsfälle vorhersagen müsste?
14. Inwiefern teilt die Bundesregierung ggf. die Auffassung der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) (ICRP-Report 103), dass das LNT-Modell bei dünn-ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich mit erheblichen wissenschaftlichen Unsicherheiten behaftet und nicht zur quantitativen Vorhersage von Erkrankungshäufigkeiten in der allgemeinen Bevölkerung geeignet ist (bitte ausführlich erläutern)?

Die Fragen 13 und 14 werden zusammen beantwortet.

Seit der Veröffentlichung von ICRP-Report 103 vor 19 Jahren hat sich die wissenschaftliche Erkenntnislage insbesondere bei epidemiologischen Studien, in denen hunderttausende Menschen untersucht werden, die ionisierender Strahlung ausgesetzt waren, weiter verbessert. Dadurch konnten die Unsicherheiten bei der Risikoabschätzung durch ionisierende Strahlung unterhalb von etwa 100 mSv reduziert werden. In ihrer Gesamtheit unterstützen die dabei gewonnenen Erkenntnisse weiterhin die im Strahlenschutz getroffene Annahme eines linearen Verlaufs der Krebsentstehung beim Menschen als Funktion der Dosis. Allerdings sind bei sehr kleinen Dosen die verbleibenden Unsicherheiten immer noch beträchtlich, so dass eine belastbare quantitative Vorhersage von Erkrankungshäufigkeiten in der allgemeinen Bevölkerung weiterhin nicht möglich ist. Damit teilt die Bundesregierung weiterhin die Auffassung der Internationalen Strahlenschutzkommission in ICRP-Report 103.

15. Welche Bewertungsansätze prüft die Bundesregierung ggf., um bei sehr niedrigen Strahlenexpositionen eine Abwägung zwischen Vorsorge, Gesundheitsschutz und wirtschaftlichen Folgen vorzunehmen?

Aus Sicht der Bundesregierung stellt das LNT-Modell eine plausible Grundlage dar, um auch bei nicht gesicherter Evidenz dennoch die für einen wissenschaftlich fundierten und umsichtigen Strahlenschutz erforderlichen Abwägungen –

auch in Bezug auf weitere, nicht-radiologische Randbedingungen – durchzuführen. Im Übrigen wird auf die Antwort zu Frage 16 verwiesen.

16. Inwiefern teilt die Bundesregierung ggf. die Auffassung der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP-Report 103), dass das LNT-Modell kein Instrument der allgemeinen Gesundheitsplanung ist (bitte ausführlich erläutern)?

Die Bundesregierung ist wie die Internationale Strahlenschutzkommission der Auffassung, dass das LNT-Modell ein praktisches und einfaches Werkzeug für den operationellen Strahlenschutz darstellt. Näheres dazu wird im BfS-Strahlenschutzstandpunkt zum LNT-Modell erläutert ([www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/ion/standpunkt-lnt.html](http://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/ion/standpunkt-lnt.html)).

Bezüglich allgemeiner Gesundheitsplanung ist anzumerken, dass Vorhersagen zu strahlenbedingten Erkrankungsfällen in großen Personengruppen mit niedrigen bzw. sehr niedrigen Strahlendosen über einen sehr langen Zeitraum mit großen Unsicherheiten verbunden ist.

Des Weiteren wird auf die Antworten zu den Fragen 13 und 14 verwiesen.

17. Inwiefern teilt die Bundesregierung darüber hinaus ggf. die Auffassung (ICRP-Report 103), dass verlässliche Vorhersagen von Erkrankungen bei niedrigen Strahlenexpositionen einer hohen Personenzahl auf Grundlage des LNT-Modells nicht möglich sind (bitte ausführlich erläutern)?

Es wird auf die Antworten zu den Fragen 13 und 14 verwiesen.

18. Inwiefern hält die Bundesregierung das LNT-Modell ggf. für übertragbar auf weitere Immissionen, wie z. B. Radon in der Atemluft (bitte ausführlich erläutern)?

Radon als Alphastrahler emittiert Hoch-LET-Strahlung. Im Übrigen wird auf die Antworten zu den Fragen 6, 7 und 8 verwiesen.

19. Inwiefern hält die Bundesregierung ggf. das LNT-Modell als Basis anwendbar für die Festsetzung von Grenzwerten für die nach der Strahlenschutzverordnung zulässigen Immissionen von Zwischen- und Endlagern für radioaktive Abfälle, und inwieweit wird dabei zwischen dicht- und dünn-ionisierenden Strahlenarten unterschieden (bitte ausführlich erläutern)?

Zur Anwendbarkeit des LNT-Modells bei verschiedenen Strahlungsarten wird auf die Antworten zu den Fragen 1 bis 3, 6, 7 und 12 verwiesen.

20. Welche Bedeutung misst die Bundesregierung ggf. LET-abhängigen Unterschieden der biologischen Wirksamkeit bei der Ableitung von Risikomodellen im Strahlenschutz bei?

Es wird auf die Antworten zu den Fragen 1, 7, 8, 11, 13 und 14 verwiesen.

21. Wie begründet die Bundesregierung ihre Anwendung des LNT-Modells vor dem Hintergrund, dass internationale Fachgremien Risikoabschätzungen bei sehr niedrigen Dosen wissenschaftlich nicht für verifizierbar halten (ICRP, siehe Vorbemerkung der Fragesteller)?

Die Bundesregierung ist weiterhin der Auffassung, dass das LNT-Modell ein praktisches und einfaches Werkzeug für den operationellen Strahlenschutz darstellt, welches nicht im Widerspruch zu den wissenschaftlichen Erkenntnissen zur biologischen Wirkung ionisierender Strahlung steht. Die Bundesregierung stützt sich dabei auf Einschätzungen von nationalen und internationalen Fachgremien (siehe Antworten zu den Fragen 1 und 3).

22. Welche Rolle spielen für die Bundesregierung ggf. alternativ diskutierte Modelle (z. B. Schwellenmodelle, hormetische Modelle (L. E. Feinendegen, siehe Einleitung), linear-quadratische Modelle) in der wissenschaftlichen Beratung des Strahlenschutzes?
23. Welche weiteren Dosis-Wirkungs-Modelle (z. B. Schwellenmodelle, hormetische Modelle, linear-quadratische Modelle) werden nach Kenntnis der Bundesregierung für dünn-ionisierende Strahlung wissenschaftlich diskutiert, und welche Relevanz misst sie diesen ggf. für den Strahlenschutz bei?

Die Fragen 22 und 23 werden gemeinsam beantwortet.

Nach Ansicht der Bundesregierung gibt es aus wissenschaftlichen Studien weder überzeugende Belege für eine generelle Dosischwelle noch für generelle positive Wirkungen von ionisierender Strahlung beim Menschen. Die wissenschaftliche Erkenntnislage spricht insgesamt auch nicht für gravierende Abweichungen von einem linearen Zusammenhang zwischen Strahlendosis und dem allgemeinen Krebsrisiko. Daher sind die genannten alternativen Modelle zurzeit nicht geeignet als Grundlage für den Strahlenschutz.

24. Inwiefern sieht die Bundesregierung möglicherweise weiteren Forschungsbedarf, um die Eignung des LNT-Modells für dünn-ionisierende Strahlung besser zu untersuchen (bitte ausführlich erläutern)?

Es besteht weiterhin ein erheblicher Bedarf an vertiefter Forschung sowohl im Bereich der Epidemiologie als auch der Strahlenbiologie, insbesondere im Dosisbereich unterhalb von 100 mGy. Aus epidemiologischer Sicht sind sowohl neue Studien als auch die gemeinsame Auswertung von bestehenden Einzelstudien erforderlich.

Aus strahlenbiologischer Perspektive rücken zunehmend Prozesse in den Fokus, die nicht primär auf DNA-Schäden und Mutationen zentriert sind. Insbesondere auf Gewebeebene sind epigenetische Veränderungen sowie sogenannte Bystander-Effekte bislang nur unzureichend verstanden. Auf Organ- und Organismusebene besteht ein besonderer Forschungsbedarf hinsichtlich der Rolle der Tumormikroumgebung sowie immunologischer Prozesse bei der strahleninduzierten Tumorentstehung.

Ein zentrales zukünftiges Ziel besteht darin, die Dosisabhängigkeit dieser biologischen Mechanismen systematisch zu charakterisieren. Einen wichtigen Meilenstein stellt hierbei die Anwendung moderner Zellkulturmodellsysteme, insbesondere dreidimensionaler Organoidmodelle, dar. Diese eröffnen nicht nur vielversprechende Möglichkeiten zur Untersuchung strahleninduzierter Effekte unter physiologisch relevanteren Bedingungen, sondern tragen zugleich dazu

bei, Unsicherheiten in Tierexperimenten zu reduzieren und deren Einsatz perspektivisch zu minimieren.

25. Inwiefern sieht die Bundesregierung angesichts neuerer strahlenbiologischer Erkenntnisse (L. E. Feinendegen, s. Einleitung) ggf. Anpassungs- oder Forschungsbedarf hinsichtlich der derzeit im Strahlenschutz verwendeten Risikomodelle (bitte ausführlich erläutern)?

Auf Basis der derzeitigen Datenlage sieht die Bundesregierung keinen Anpassungsbedarf. Bezüglich des Forschungsbedarfs wird auf die Antwort zu Frage 24 verwiesen.

26. Welche Forschungsergebnisse hält die Bundesregierung – inklusive der jeweils zuständigen Bundesämter – bei Neutronenstrahlen über das gesamte Energiespektrum für ausschlaggebend, um daraus die jeweilige Relative Biologische Wirksamkeit und das zu verwendende Modell zur Beschreibung der biologischen Strahlenwirkung im Niedrigdosisbereich herzuleiten, zu welchen allgemeingültigen Regelungen führt dies, und inwieweit ist für die verschiedenen Neutronenenergien, die bisher als Strahlenbelastung von Menschen nur selten, aber künftig mit dem geplanten Ausbau der Kernfusion deutlich häufiger auftreten werden, weitere Forschung für ein besseres Verständnis der tatsächlich auftretenden Mutagenität erforderlich (bitte detailliert begründen)?

Die wichtigste epidemiologische Studie der Wirkung von ionisierender Strahlung auf den Menschen stellt die Studie an den Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki dar. Die Überlebenden waren sowohl Gammastrahlung als auch Neutronenstrahlung ausgesetzt. Hier besteht aus Sicht der Bundesregierung weiterer Forschungsbedarf, um den Anteil der Neutronenstrahlung an der Entstehung von Krebs, Leukämie und anderer Erkrankungen der Überlebenden besser bestimmen zu können. Dadurch können weitere Erkenntnisse zum RBW(Relative Biologische Wirksamkeit)-Wert der Neutronen in Bezug auf die Entstehung dieser Erkrankungen beim Menschen gewonnen werden.

Darüber hinaus zeichnen sich die bei der Kernfusion entstehenden Neutronen durch zum Teil hohe Energien oberhalb von 10 MeV aus, die bei der Kernspaltung nicht auftreten. In Hinblick auf die biologische Wirkung derartiger hochenergetischer Neutronen sieht die Bundesregierung weiteren Forschungsbedarf.





