

# Über die Schwierigkeit mit Mikrosievert zu rechnen

*Ein Nachtrag zur Informationsveranstaltung im HZB über Tritium*

von Bernd Lisek

Wenn wir über den schwachen Betastrahler Tritium reden wollen, dann sollten wir damit anfangen uns klarzumachen, was der viel zitierte und leicht misszuverstehende Satz bedeutet: **Jede noch so geringe Strahlendosis ist gefährlich.** (Was heißt hier eigentlich Dosis, was Gefahr? Wie überleben wir trotzdem?)

Fangen wir ganz unten an:

- Ein einzelnes Energiequant (die theoretisch kleinste Energiemenge) kann eine chemische Bindung zerstören.
- Eine einzelne Veränderung (zerstörte Bindung) in einem DNS-Molekül (an ungünstiger Stelle) kann zum Auslöser eines Tumors werden.

Ionisierende Strahlung ist also zumindest immer dann potenziell krebgefährlich, **wenn** sie dorthin kommt, wo sie DNS-Schäden anrichten kann. (Dieses „wenn“ merken wir uns für später vor.)

Offenbar kommen Lebewesen dennoch mit schwacher Strahlung ganz gut zurecht. Warum? Weil wir im Laufe einer langen Evolution mehrere Ebenen von **Schutzmechanismen** gegen Strahlenschäden (wie auch gegen entsprechende chemische Gefahren) entwickelt haben. Das war nötig, weil die Belastung durch natürliche Radioaktivität nun einmal da war (radioaktives Kalium bestrahlt uns von innen, Radon aus der Erde von außen usw.).

Der erste Schutzwall wirkt bereits auf molekularer Ebene. Stellen wir uns ein DNS-Molekül als gewendelte Strickleiter vor, deren Sprossen aus den die Information darstellenden Basen-Paaren bestehen. Wird nun eine Base (eine halbe Sprosse) „zerschossen“, ist deren Information noch nicht verloren. Die andere Halbsprosse kann den defekten Partner korrekt ersetzen. Dieser Reparaturmechanismus ist einer der großen Vorteile unserer Erbsubstanz.

Die DNS-Reparatur versagt, wenn beide Basen einer Sprosse gleichzeitig zerstört werden. Dann gibt es mehrere Möglichkeiten:

- Die entstehende Mutation produziert ein so ungünstiges Resultat, dass die umgebende Zelle daran zugrunde geht. Das ist der weitaus häufigste Fall. Die gestorbene Zelle wird abgebaut. Der Zelltod ist also ein sehr effektiver Schutz des Organismus.
- Die Veränderung kann an einer nicht benutzten oder wenig relevanten Stelle der Erbsubstanz liegen. Dann passiert nichts Schlimmes.
- In wenigen, aber folgenschweren Fällen führt die Mutation zu einer weiter vererbaren Entartung der Zelle. Im Falle von erhöhter Vermehrungsneigung entsteht ein **Tumor**.

Die bis hierher beschriebenen Vorgänge finden ständig vieltausendfach in unserem Körper statt. Grob gesagt, erzeugt ein Mensch pro Tag im Mittel zwei neue Tumore. (---> *Erinnerung an eigene Arbeiten in den 80er Jahren.*) Jetzt müssen höher organisierte Abwehrmechanismen greifen (von Passunfähigkeit zur Zellumgebung (---> *S. Rose: Darwins gefährliche Erben. Biologie jenseits der egoistischen Gene. München, Beck, 2000*) bis zur ausgeprägten Immunabwehr). Tatsächlich werden die meisten kleinen Tumore wieder abgebaut, bevor sie größeren Schaden anrichten können (---> *u.a. mein Hautarzt*).

Trotzdem kommen auch bei natürlicher Strahlenbelastung einige Tumore durch. Einige Individuen sterben daran. Als Ergebnis einer langen Evolution hat sich ein **natürliches Gleichgewicht** zwischen Strahlenschäden und Abwehrmechanismen herausgebildet, das die Art überleben lässt. (---> [www.spektrum.de/lexikon/biologie/biologisches-gleichgewicht/8695](http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/biologisches-gleichgewicht/8695) und die Links darin, ---> *Wikipedia-Artikel: Ökologisches Gleichgewicht*)

Aus dem bisher Gesagten ergibt sich eine erste Schlussfolgerung: Die Gefahr für das Individuum ist dort am größten, wo es auf jede einzelne Zelle ankommt. Der Extremfall sind hier Keimzellen, aber auch Föten und Kinder (besonders in schnellen Entwicklungsphasen) sowie Gewebe im Umbau (z.B. Operationsnarben) sind durch Strahlung verstärkt gefährdet.

Wirkt Radioaktivität aus nicht natürlichen Quellen prinzipiell anders? Nein und ja!

Selbstverständlich sind die physikalischen Vorgänge die gleichen. Erinnern wir uns daran, wie wir uns das natürliche Gleichgewicht veranschaulicht hatten. Klar, dass dieses Gleichgewicht ein gewisses Maß an Stabilität bietet. Wenn man das natürliche Isotopenspektrum hernähme (die gleichen Stoffe) und davon nur ein klein wenig mehr, dann würden die Gleichgewichtsmechanismen dazu führen, dass auch nicht viel mehr passierte.

Andererseits: Wenn eine künstliche Strahlenquelle

- eine ungewöhnliche Strahlungsart und/oder Quantität liefert,
- auf ungewöhnliche Art, an ungewöhnlichem Ort oder/und zu ungewöhnlicher Zeit in den Körper eindringt,
- sich dort festsetzt und lange strahlt,

dann muss das natürliche Gleichgewicht keine Sicherheit mehr bieten.

Schauen wir uns jetzt unter diesem Aspekt das Tritium an.

Als Wasser (z.B. HTO) oder innerhalb organischer Säuren gelangt es beinahe überall hin, auch im menschlichen Körper. Auch wenn die absolute Menge winzig erscheint (Herr Buchert hat m.E. korrekt vorgerechnet, dass das Beckenwasser des Forschungsreaktors nur Tritium im Milligrammbereich enthält), sind hier um Größenordnungen höhere Strahlungswerte entstanden als vom natürlichen Tritium her in unserer Umwelt allgegenwärtig sind. Für die Betriebsjahre wurde eine jährliche Ableitung von 10 bis 50 GBq aus Tritium genannt, während die gesamte Biosphäre der Erde aus natürlicher Quelle nur 3,5 kg Tritium enthält (---> *Handbuch der Physik Band 46/2. Berlin, Springer, 1967*).

Wie steht es um die Einwirkung der Tritiumstrahlung auf den menschlichen Körper? Dazu ein Gedankenexperiment: Ich stelle mir vor, vor mir stünde ein verschlossenes Schraubglas, gefüllt mit hoch angereichertem Tritium. Wenn ich meine Hände an das Glas legte, müsste ich keine Angst vor irgendwelchen Strahlenschäden haben. Die schwache Betastrahlung des Tritiums kann nämlich das Glas nicht durchdringen. (Das ist auch der Grund, weshalb man mit einem handelsüblichen Geiger-Müller-Zähler absolut nichts messen würde. Die Strahlung des Tritiums kann die Ummantelung des Zählrohrs nicht passieren.) Selbst wenn ich das Glas öffnete und einen Finger ins superschwere Wasser tauchte, würde mir nichts passieren (die Strahlung könnte die menschliche Außenhaut nicht überwinden), vorausgesetzt, ich schützte mich vor der Aufnahme verdunstenden Wassers. Atme ich allerdings den Tritium-Wasserdampf ein, und sei es nur in kleinster Menge, dann besteht sofort höchste Lebensgefahr. Der Schritt von akzeptabel-unbedenklich im Sinne des natürlichen Gleichgewichts zu hochgefährlich im Sinne des am Anfang formulierten „wenn“ ist also im Falle von Tritium kein allmählicher und stetiger (weil die genannten Bedingungen für die Unwirksamkeit des Gleichgewichts hier klar erfüllt sind).

Was lässt sich quantifizieren?

Die beste Übersicht über Studien zur Wirkung von Tritium bietet das WHO-Papier (--->

[https://www.unscear.org/docs/publications/2016/UNSCEAR\\_2016\\_Report-CORR.pdf](https://www.unscear.org/docs/publications/2016/UNSCEAR_2016_Report-CORR.pdf), Annex C). Recht gut verstanden wird schon die Wirkung von Tritium auf verschiedene Organe bei hoher Strahlendosis. Die Unsicherheit liegt hier bei höchstens 300 bis 500% (was ich schon als vergleichsweise gut bewerte). In der gleichen Größenordnung von Sicherheit liegen die Vergleiche mit der Wirkung von Gammastrahlung, allerdings auch hier bei einem hohen Dosisniveau (wie es für uns nicht von Interesse ist) und oft nur bei einmaliger Exposition. Kommt man in den Niedrigstrahlungsbereich, wie er z.B. für die Festlegung von Grenzwerten wichtig wäre, dann wird die Studienlage erschreckend dünn. Die in diesem Bereich noch verbleibenden Studien (mit sehr unterschiedlichen Fragestellungen, Methodiken und Umfängen) bieten wenig sichere und verallgemeinerungsfähige Aussagen. Dass soll an einigen Beispielen erläutert werden, die uns S. Wörseck vor der Informationsveranstaltung im HZB zur Verfügung gestellt hatte.

Dass das Tritium aus der Emission von Atomkraftwerken noch in großen Entfernungen (mehr als 10 km) nachgewiesen wurde (---> *Tritium in the Canadian Environment: Level and Health Effects. Report RSP-0153-1 (2003)*), ist zwar beunruhigend, aber nicht erstaunlich. Wasser kommt eben überall hin.

Anhand einer Studie mit Mäusen (*In Vivo Animal Studies Help Achieve International Consensus on Standards and Guidelines for Health Risk Estimates for Chronic Exposure to Low Levels of Tritium in Drinking Water. Environmental and Molecular Mutagenesis 59: 586-594 (2018)*) möchte ich eine durchaus übliche Schlussweise aufzeigen. Die Mäuse-Studie sagt aus (neben ihrem eigentlichen Gegenstand, den Organ-Wirkungen bei hohen Dosen), dass unter 10.000 Bq/l aus Tritium im Trinkwasser der Mäuse keine Auswirkungen mehr feststellbar waren. Will man von Mäusen auf Menschen schließen, dann ist es durchaus üblich (---> *eigene Erfahrung in der Forschung*), eine Größenordnung vorsichtiger zu sein (10.000 Bq/l -> 1.000 Bq/l). Will man einen Grenzwert festlegen, ist man noch einmal eine Größenordnung vorsichtiger (1.000 Bq/l -> 100 Bq/l). Der Wert von 100 Bq/l ist unser aktueller Trinkwassergrenzwert für Tritium. Also alles konsistent? Aber wie über den Daumen gepeilt!

Nun könnte die Idee entstehen, das zu entsorgende Tritiumwasser des Forschungsreaktors hinreichend stark mit Leitungswasser zu verdünnen und in große natürliche Gewässer einzuleiten. Auf direktem Wege dürften Menschen dann nach Studienlage nicht mehr gefährdet sein. Aber Vorsicht! Es gibt Studien zu Anreicherungseffekten von Tritium in Fischen. (---> „*The Dynamics of Tritium – Including OBT – in the Aquatic Food Chain*“ DOI: 10.13182/FST05-A1036.) Solche Erkenntnisse sind der Grund dafür, dass sich japanische Fischer lange Zeit erfolgreich gegen die Verklappung von Tritiumwasser vom Gelände der Fukushima-Katastrophe ins Meer wehren konnten. (Auf dem Kraftwerksgelände von Fukushima lagert Abwasser mit einem Tritiumgehalt in der gleichen Größenordnung, wie sie das verbleibende Wasser des BERII aufweist, in riesigen Tank-Kolonnen. ---> <https://mainichi.jp/english/articles/20180906/p2a/00m/0na/004000c>. Deren Zukunft ist noch unklar.) Es wäre also wohl doch keine gute Idee, das Tritiumwasser des HZB in die Potsdamer Seen fließen zu lassen.

Eine große Klasse von Studien sind heute Metastudien, die versuchen die Erkenntnisse vieler Einzelstudien zusammenzufassen. Ein typisches Beispiel ist das Vorgehen einer kanadischen Trinkwasserbehörde (---> *Report and Advice on the Ontario Drinking Water Quality Standard for Tritium. Ontario Drinking Water Advisory Council (May 21, 2009)*.) Die zitierte Metastudie betrachtet eine große Zahl von Einzelstudien, deren Qualität als nicht unterscheidbar bezeichnet wird und die Grenzwert-Vorschläge von 7 bis 109 Bq/l für Tritium im Trinkwasser nahelegen. (Der natürliche Tritiumgehalt im Rohwasser wird für Kanada mit 2-3 (bei uns bis 5) Bq/l angegeben.) Was tut nun die Behörde? Sie konsultiert wichtige Emittenten bezüglich der technischen Machbarkeit und legt danach 20 Bq/l als Trinkwassergrenzwert fest. Dieser Wert gilt nun als wissenschaftlich fundierter Grenzwert.

Wie sollten wir mit Studienergebnissen der referierten Art umgehen?

Seit Jahrzehnten beruht der praktische Strahlenschutz auf Zahlenangaben mit der Maßeinheit Sievert (Millisievert, Mikrosievert). Beginnend in den 30er Jahren des vorigen Jahrhunderts hatte der schwedische Arzt Sievert umfangreiche Untersuchungen zur schädlichen Wirkung von Röntgenstrahlen durchgeführt. Die Idee war und ist, die schädliche Wirkung jeglicher Strahlung auf den Menschen in einer Maßzahl auszudrücken. So sollen verschiedene Strahlungsarten unterschiedlicher Herkunft (Energiequellen, Isotope) und Einwirkungsarten (Außenbestrahlung, Verschlucken, Einatmen) vergleichbar (und addierbar) gemacht werden. Hierfür sind spezielle Studien erforderlich, die den Zusammenhang von (z.B.) Zerfallswerten (in Becquerel) zu „Schädigungswerten“ (in Sievert) aufklären. Bei der Einführung des Sievert-Konzepts hatte man die berechtigte Hoffnung, dies erreichen zu können. Wie klar, wie sicher, wie genau das die existierenden Studien im Falle von Tritium leisten, haben wir uns gerade angeschaut.

Es ist ein wirkliches Dilemma:

- (1) Hätte man standardisierte Studien, wie sie in der Medikamentenforschung und in der Beurteilung von Giften üblich sind, für den Zusammenhang Bq – Sv für alle relevanten Isotope, Einwirkungsarten und Größenordnungen der Konzentration, dann bekäme man saubere, vergleichbare  $\mu\text{Sv}$ -Zahlen, mit denen man rechnen könnte. Die Annahme, dass das so sei, ist die Grundlage jeden praktischen Strahlenschutzes (und muss es wohl auch sein).
- (2) Benutzt man dagegen alle verfügbaren Studien trotz unterschiedlicher Ansätze und Aussagekraft (etwa so wie oben beispielhaft erläutert), dann sind ggf. abgeleitete  $\mu\text{Sv}$ -Werte prinzipiell nicht vergleichbar oder gar addierbar.

Als Wissenschaftler neige ich dazu, alle seriösen wissenschaftlichen Arbeiten wertzuschätzen. Erhebt man diese Einstellung zum Prinzip, dann muss man sich damit abfinden,  $\mu\text{Sv}$ -Zahlen nicht vergleichen und addieren zu können.

Das Problem ist heute, dass die Fiktion aufrechterhalten wird, Fall (1) sei gegeben oder zumindest in naher Zukunft erreichbar (---> Strahlenschutzverordnung 2018: [http://www.gesetze-im-internet.de/strlsv\\_2018/StrlSchV.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/strlsv_2018/StrlSchV.pdf)). In einigen Bereichen mag das so sein, aber gerade bei schwachen Strahlern wie Tritium, die vom Menschen unvorsichtig in der Umwelt verteilt werden, ist Fall (1) weit von der Realität entfernt, und eine Verbesserung ist so schnell nicht zu erwarten.

Dennoch begegnet uns allzu oft eine Argumentationskette der folgenden Art: Die fragliche zusätzliche, künstliche Strahlenbelastung (in Mikrosievert) ist hundert- oder tausendfach kleiner als die natürliche Hintergrundstrahlung. Also kann die zusätzliche Belastung vernachlässigt werden. Das klingt überwältigend logisch. Doch die stillschweigende Voraussetzung war: Die verglichenen Mikrosievert-Werte seien tatsächlich vergleichbar. Wir dürfen einer solchen Argumentation nur dann vertrauen, wenn wir uns vorher von der Vergleichbarkeit der Werte überzeugt haben! - Aber wie?