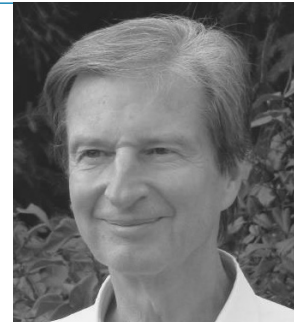


Dr. sc. nat. Walter Rüegg



Grenzwertig

Grenzwerte sind heute nicht mehr die Grenze zwischen gefährlich und ungefährlich. Manchmal liegen sie mitten im Risikobereich, oft sind sie aber weit weg von jedem nachweisbaren Risiko. Bei der Radioaktivität wurden sie so extrem gesenkt, dass man eigentlich die natürliche Strahlung verbieten müsste. Und da die Lebensdosen in Fukushima und den Alpen vergleichbar gross sind, müsste man letztere auch evakuieren. Eine gute Risikokommunikation – mit Vergleichen – wäre dringend notwendig.

Tödliches Gesteinspulver

Eine kleine Schweizer Firma stellt seit ein paar Jahren heilkräftige Halsketten her. Das Grundmaterial, ein als gesundheitsfördernd angepriesenes Gesteinspulver, wurde aus China importiert. Anfang 2018 fiel eine solche Sendung im Flughafen von Frankfurt durch erhöhte natürliche Radioaktivität auf. Dies löste sowohl in Deutschland als auch in der Schweiz eine behördliche Kettenreaktion aus: Strahlenschutz und Polizei schritten ein, es folgten Verhöre und Strafanzeigen. Denn gemäss den Analysen des Bundesamts für Gesundheit (BAG) verletzt das Gesteinspulver die heutigen Grenzwerte massiv, um das 13'000-fache. Eine tödliche Gefahr?

Jedes Gestein ist von Natur aus radioaktiv. Ein m^3 enthält im Durchschnitt 5 g Uran, neben rund 60 anderen radioaktiven Substanzen. Uran «produziert» beim Zerfall unter anderem Radium, Radon und Polonium (bekannt für politische Giftmorde). Die Konzentrationen schwanken beträchtlich, je nach Gesteinsart und Ort. Beim beanstandeten Gesteinspulver fand man eine besonders hohe Konzentration von Radium. Gefährlich? Das grösste Risiko besteht bei einer Einnahme. Das BAG führt aus: «Angenommen schon nur 5 g dieses Pulvers gelangt über die Atemwege oder den Mund in ihren Körper, würden Sie eine gesetzlich zulässige Jahresdosis von 1 mSv überschreiten». Mit Sievert (Sv) wird der gesundheitliche Einfluss der Strahlung ange-

geben. 5 Sv auf einen Schlag sind meistens tödlich, 1 mSv ist 1/1000 Sv. Bei 5 g/mSv muss man 25 kg dieses Pulvers auf einmal essen (nicht ganz einfach), um sich radiotoxisch umzubringen. Eine Krebsgefahr ist, gemäss den anerkanntesten Radiumstudien, nicht vorhanden. Dieses Gedankenspiel funktioniert auch mit gewöhnlicher Erde. Denn Erde enthält immer auch kleine Mengen hochtoxischer, krebserregender, teratogener und mutagener Substanzen wie Arsen (ca. 2 g/ m^3), Beryllium, Bor, Barium, Blei, Cadmium und Quecksilber. Eine Abschätzung zeigt: In 25 kg normaler Erde steckt im Durchschnitt mindestens auch eine «chemisch» tödliche Dosis.

Der Umgang mit normalem Erdmaterial, sei es im Gemüsegarten oder im Kindersandkasten, ist völlig legal. Beim etwa gleich gefährlichen Gesteinspulver ist schon der Besitz einer verpackten Menge ein Officialdelikt (wie beispielsweise ein Mord) und muss von Amtes wegen verfolgt und der Bundesanwaltschaft gemeldet werden. Das Pulver muss auch korrekt endgelagert werden. Eigentlich müsste man auch die Alpen entsorgen, denn die Konzentration von Radium im Alpengestein (bei beispielsweise Granit bis 500 Bq/kg) übersteigt den Grenzwert von 10 Bq/kg bei Weitem.

Könnte es sein, dass wir es mit unseren «radioaktiven» Grenzwerten etwas übertreiben? →

Akute Wirkungen der Strahlung

Es gibt keine chemische oder physikalische Einwirkung auf Lebewesen, die auch nur annähernd so gut erforscht wurde wie die radioaktiven Strahlen; in den letzten 120 Jahren wurden dafür viele Milliarden Dollar ausgegeben. Praktisch jede Hochschule war – oder ist immer noch – daran beteiligt.

Radioaktive Strahlen haben nicht grundlegend andere gesundheitliche Folgen als «normale» Giftstoffe. Hohe Einzeldosen (Ganzkörper-Schockdosen) über 1 Sv verursachen eine akute Strahlenkrankheit. Die Symptome sind denjenigen einer Chemotherapie mit Zytostatika sehr ähnlich. Dies ist kein Zufall, denn in beiden Fällen werden vorwiegend die sich schnell teilenden Blutstammzellen und Epithelzellen angegriffen. Die Epithelzellen bedecken alle inneren und äusseren Körperoberflächen (Beispiele: Hautzellen, Darmzellen). Typische Folgen sind Haarausfall und schwere Magen-Darm-Probleme. Bei einer tödlichen Ganzkörper-Schockdosis (5 Sv und mehr) sterben die meisten blutbildenden Stammzellen im Knochenmark. Nach einigen Tagen beginnt sowohl die Anzahl gewisser Immunzellen als auch die der Blutplättchen – verantwortlich für die Blutgerinnung – bedrohlich zu sinken. Man stirbt daher meistens an einer «normalen» Infektion und/oder an inneren Blutungen. Ganz brutal traf es die Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki: Ohne Nahrung, traumatisiert, mit fürchterlichen Brandwunden (durch Hitzestrahlung und Feuersturm), lange ohne medizinische Betreuung und ohne Antibiotika. Die meisten starben bereits bei einer Dosis von 3 Sv. Gesunde Menschen, mit guter medizinischer Betreuung, können Schockdosen bis gegen 10 Sv überleben.

Nach der Erholung von einer Strahlenkrankheit, die typischerweise einige Wochen dauert, folgt praktisch immer eine lange, gesundheitlich völlig normale Lebensphase. Dies traf auch für 98% der rund 50'000 bestrahlten Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki zu. Die wissenschaftlichen Berichte und die Statistiken der lokalen Gesundheitsbehörden sind sich darüber weitgehend einig. Eine wichtige Ausnahme: Bei hohen Dosen kann innert wenigen Jahren eine Leukämie oder ein Schilddrüsentumor ausbrechen. Bei einer Schockdosis knapp unter der tödlichen Dosis sind rund 3% der Bestrahlten davon betroffen. Es zeigte sich aber auch ein positiver Effekt: Unter einer Dosis von rund 200 mSv ist die Leukämierate kleiner als bei den Unbestrahlten. Zufall? Kaum, immerhin handelt es sich hier um die wohl aussagekräftigste aller Leukämie-Humanstudien. Zudem: Die bisher gründlichsten Tier-

versuche («Megamouse-Study») bestätigen diesen positiven Effekt eindrucklich.

Hohe Strahlendosen können die Wahrscheinlichkeit für grauen Star erhöhen. Hohe Hautdosen führen zu sonnenbrandähnlichen Rötungen, im Extremfall zu üblen Verbrennungen. Dafür scheinen hohe Strahlendosen die Wahrscheinlichkeit von grünem Star (Glaukom) zu reduzieren, dies auch bei Tierstudien. Die Bestrahlten leiden auch weniger unter Makulopathie (Netzhauterkrankung).

Eine Gefahr stellt eine Bestrahlung von mehr als einigen 100 mSv zwischen der 8. und der 15. Schwangerschaftswoche dar. Die spätere geistige Entwicklung der Kinder kann sich dadurch beeinträchtigen (tieferer IQ). Sehr hohe Dosen führen zu einem starken Anstieg der Aborte. Diese Effekte sind auch bei ungesundem Lebensstil der Schwangeren zu beobachten. Die grösste Gefahr für den Fötus sind aber gewisse Chemikalien: Viele wirken stark fruchtschädigend (teratogen), vergleichbare starke Effekte fehlen hingegen bei einer Bestrahlung. Das Beruhigungs- und Schlafmittel «Contergan», von 1957 bis 1961 vertrieben, verursachte 5000–10'000 schwere Missbildungen und eine unbekannte Zahl von Totgeburten.

Die Langzeitwirkungen der Atombombenabwürfe

Die Grundlage unserer Risikoabschätzungen sind die Untersuchungen nach den Atombombenabwürfen auf Hiroshima und Nagasaki Anfang August 1945. Sie werden allgemein akzeptiert, was kein Wunder ist: Die Untersuchungen wurden (und werden immer noch) äusserst professionell von grossen multinationalen Teams durchgeführt; alles ist transparent, man kann jederzeit die involvierten Institute (Radiation Effects Research Foundation, RERF) besuchen. Selbst Rohdaten stehen jedem Interessierten zur Verfügung. Ich bekam sie 2016, knapp 200'000 Datensätze!

Gemäss mehreren unabhängigen Schätzungen sind rund 10% aller frühen Todesopfer der Bomben auf die nukleare Strahlung zurückzuführen. Die grossen Killer waren Hitzewelle, Druckwelle und der nachfolgende Feuersturm. Aber wie steht es um die Langzeitfolgen? Bei einer hohen Schockdosis kann im Alter eine Krebserkrankung früher ausbrechen als bei Unbestrahlten. Die radioaktiven Strahlen unterscheiden sich nicht von den vielen anderen krebserregenden oder krebserfördernden Einwirkungen, wie Tabakrauch, Feinstaub, Fettleibigkeit, viele chemische Substanzen, Sonnenlicht oder hoher Fleischkonsum. Die Langzeitwirkung

kann man als Wahrscheinlichkeit, an Krebs zu sterben, quantifizieren. Da eine allfällige Erkrankung meist erst im Alter auftritt, ist es sinnvoller, die Anzahl verlorener Lebensjahre anzugeben, wie beispielsweise beim Tabakrauch. So muss ein starker Raucher mit einem Lebensdauerverlust von fünf bis zehn Jahren rechnen.

Bei den Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki zeigten bei etwa 0,1 Sv (100 mSv) erste Langzeiteffekte (leicht erhöhte Krebsrate im Alter um rund 1%). Bei einer Dosis knapp unter der tödlichen verdoppelt sich die «normale» Krebsrate. Das Risiko ist einigermaßen linear, das heisst doppelte Dosis = doppeltes Risiko. Allerdings sind die Streuungen recht gross, und neuere Daten ergeben kleinere Werte. Die statistisch bisher beste Arbeit¹ zeigt eine relativ kleine Krebswahrscheinlichkeit (Inzidenzrate). Zudem weichen die Resultate bei den Männern stark von der Linearitätshypothese (LNT) ab, unter ca. 500 mSv wurde praktisch kein Risiko festgestellt. Nicht erklärbar sind die immer grösseren Unterschiede zwischen Frauen und Männern. Und die Lebensdauer? Bis etwa 1 Sv ist nichts

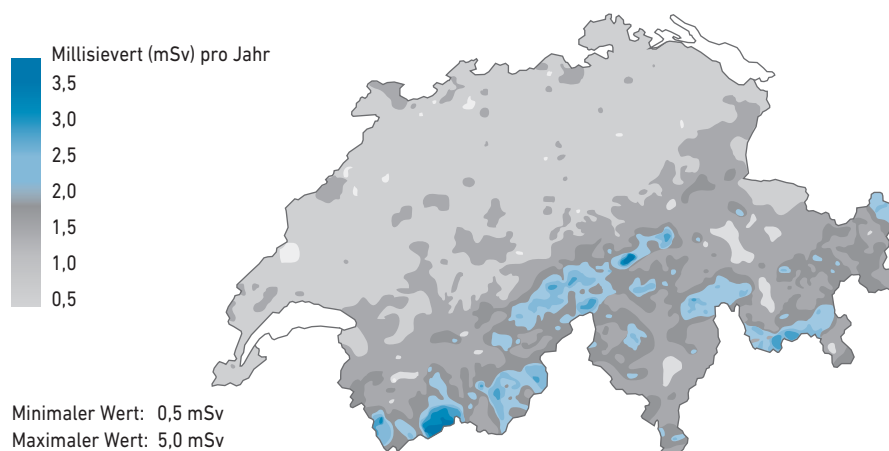
Auffälliges sichtbar, darüber scheint sie sich um 1–2 Jahre pro Sv zu reduzieren. Allerdings sind die Unsicherheiten gross.

Etwa 25% aller Japaner sterben an Krebs, ein Drittel bis die Hälfte dürfte auf ungesunden Lebenswandel zurückzuführen sein. Die Strahlung der Bomben ist für «nur» etwa 2% der Langzeittodesfälle unter den Atombombenopfern verantwortlich. Es besteht kein Zweifel, ein ungesunder Lebenswandel (wie Tabak- und Alkoholkonsum, einseitige Ernährung oder mangelnde Bewegung) beeinflusst die Gesundheit wesentlich stärker als eine starke Bestrahlung.

Wie steht es mit den Missgeburten? Die gründlichen Untersuchungen an etwa 80'000 Nachkommen bestrahlter Eltern ergaben ein eindeutiges Resultat: Keine Spur einer Erhöhung der Mutationsrate, die Nachkommen sind so gesund wie diejenigen von unbestrahlten Eltern. Diese Resultate wurden mehrfach bestätigt, und bis heute zeigen sich keine genetischen Folgen. Selbst klonale Expansionen (Vermehrung) von stark bestrahlten Zellen in Zellkulturen, welche 20 Generationen entsprechen, zeigten nichts Auffälliges. Auch die Kinder der sehr stark bestrahlten, strahlenkranken Einsatzkräfte von Tschernobyl sind gesund. Diese Resultate stehen im Widerspruch zu Versuchen mit Mäusen und vor allem mit Fruchtfliegen. Diese zei-

¹ Grant E.J. et al. (2017). Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958–2009. In *Radiation Research* 187(5), p. 513–537

Äussere jährliche Strahlendosis in der Schweiz (ohne Radon in Wohnräumen und Medizin)



Quelle: Rybach et al., *Journal of Environmental Radioactivity*, 62/2002

© 2019 Nuklearforum Schweiz

gen eine kleine, aber gut messbare Erhöhung der Mutationsrate bei hohen Strahlendosen. Falls die Strahlung einen Einfluss auf die Mutationsrate bei Menschen hat, ist er sehr klein.

Positive Effekte der Strahlung werden meistens unterschlagen. Bereits erwähnt wurde die kleinere Leukämierate im unteren Dosisbereich. Zudem hatten die bestrahlten Überlebenden jahrzehntelang bei Dosen bis ca. 500 mSv eine kleinere Mortalität als die Unbestrahlten (siehe die «offizielle» Arbeit von Ozasa et al.²). Erstaunlich ist auch die deutlich tiefere Mortalität der Bestrahlten in der Nagasaki-Kohorte (nicht aber in der Hiroshima-Kohorte, was immer noch ein Rätsel ist). Tierversuche mit ähnlichen Dosen zeigen oft auch solche positiven Effekte.

Das Problem der verteilten Strahlendosen

Verteilte Dosen sind schwierig zu erforschen. Dies hat einerseits damit zu tun, dass die Wirkungen klein sind und oft in den normalen Variationen der Gesundheit untergehen. Und andererseits kämpft man mit zwei Problemen:

1. Alle der Strahlung zugeschriebenen Krankheiten (insbesondere Krebs) kommen auch «natürlich» vor, sie unterscheiden sich nicht von den «normalen» Krankheiten. Die «natürliche» Krebssterblichkeitsrate liegt um 25%. Diese Rate ist sehr grossen örtlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen. Selbst in der kleinen Schweiz variieren sie von Kanton zu Kanton um bis zu 30%. Zeitlich sind die Änderungen noch grösser. Bei solchen starken Schwankungen ist es praktisch unmöglich, beim Menschen die Wirkungen von zeitlich verteilten (und/oder kleinen) Strahlendosen zu studieren.
2. Die Latenzzeiten betragen durchschnittlich viele Jahrzehnte. Nach einer so langen Zeitspanne ist es äusserst schwierig, alle anderen Einflüsse auf Krebsrate oder Lebensspanne genau zu berücksichtigen.

Diese Probleme führen dazu, dass die meisten Humanstudien keine eindeutigen Resultate zeigen und sich oft gegenseitig widersprechen. Durch eine entsprechende Auswahl kann jede gewünschte Aussage «belegt» werden: Kleinstdosen sind ab 0 mSv schädlich («es gibt keine unschädliche Dosis»), Dosen um 100 mSv sind gesundheitsfördernd (senken die Krebsrate) oder Dosen bis 1 Sv/J sind ohne gesundheitliche Folgen. Insgesamt kommt man, nach bestem Wissen und Gewissen, zum Schluss, dass praktisch alle hochwertigen Studien bei kleinen bis mittleren verteilten Dosen keine oder eher positive gesundheitliche Effekte aufzeigen. Trotzdem rechnen die Strahlenschutzbehörden bei einer zeitlich verteilten Dosis, recht willkürlich und umstritten, meist mit der Hälfte des Risikos einer Schockdosis, also 5% Krebsrisiko und 8 Monaten Lebensdauerverlust pro Sv. Die Tatsache bleibt, dass selbst bei 10 Sv (als Schockdosis 100% tödlich), verteilt über Jahrzehnte, weder eine Erhöhung der Krebsrate noch eine Lebensdauerreduktion beobachtet werden kann (Bewohner von Ramsar in Iran, Radiummalerinnen, Tierversuche).

Was zeichnet eine aussagekräftige Humanstudie aus? Sie sollte mit einer grossen, homogenen Gruppe mit ähnlichem sozioökonomischem Niveau, Lebensstil, Umwelt und Gesundheit durchgeführt werden. Wichtig ist eine gute Dosimetrie (Bestimmung der erhaltenen Dosis), ein grosser Dosisbereich und/oder eine geeignete Referenzgruppe. Ein Vergleich mit analogen Tierstudien und/oder Modellrechnungen erhöht die Aussagekraft.

Nimmt man diese Kriterien, dürften die Untersuchungen der amerikanischen Radiummalerinnen die wohl beste Humanstudie für verteilte Bestrahlungen sein. Mehrere tausend Arbeiterinnen mussten in den 1920er-Jahren radioaktive Leuchtfarbe auf die Ziffern von Uhren malen. Dabei spitzten sie die Pinsel mit ihren Lippen. Dadurch gerieten beachtliche Mengen radioaktiven Radiums in den Körper, lagerten sich im Skelett ab und strahlten dort jahrelang. Mehrere hundert Malerinnen erkrankten, etwa 30 starben an akuten Effekten und etwa hundert viele Jahre später an Knochenkrebs. Die nachfolgenden Studien zeigten, dass der Körper bei zeitlich verteilter Bestrahlung erstaunlich hohe Dosen ohne negative Folgen tolerieren kann. Erst ab etwa 200 Sv (!) akkumulierter Knochendosis können Reparaturmechanismen und Immunsystem nicht mehr alle Schäden beheben. Die Krebswahrscheinlichkeit macht demnach einen abrupten Sprung nach oben, auf etwa 30%, ohne eine weitere Steigerung bei noch höheren Dosen. Noch bemerkenswerter: Unterhalb der

² Ozasa K. et al. (2012). Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950–2003: An Overview of Cancer and Noncancer Diseases. In: Radiation Research 177(3), p. 229–243. https://www.rerf.or.jp/library/rr_e/rr1104.pdf

Schwellendosis zeigten sich weniger Krebsfälle als bei unbestrahlten Personen.

Diese Studien gewannen zusätzlich an Aussagekraft durch die Analysen von Prof. Otto Raabe. Er fand eine verblüffend gute Übereinstimmung mit hochwertigen Tierstudien (ebenfalls mit Radium, aber auch mit anderen Substanzen wie Plutonium). Allerdings sind seine Modelle³ eine mathematische Herausforderung für den Strahlenschutz. Da diese Studien zudem eine hohe Schwellendosis belegen, werden sie meistens ignoriert. Wie auch dieses Resultat: 25 kg des eingangs erwähnten Gesteinspulver enthalten rund 3 MBq Radium. Doch eine Einnahme von bis zu 3 MBq Radium führte zu keinen Folgen. Mit Becquerel (Bq) wird die Aktivität einer radioaktiven Substanz angegeben, 1 Bq ist ein Zerfall pro Sekunde, 1 MBq sind 1'000'000 Bq.

Studien über Studien

Eine der interessantesten Studien kommt aus Taiwan. Zwischen 1982 und 1984 wurden etwa 1600 Wohnungen, Schulen und Geschäfte gebaut, mit einem Baustahl, welcher stark strahlendes Kobalt-60 enthielt. Rund 10'000 Personen wurden jahrelang mit durchschnittlich 50 mSv/J bestrahlt, mit Spitzen von knapp 1 Sv/J. Die Bewohner wurden gründlich untersucht, teilweise auch in einem spezialisierten Spital in Hiroshima. Die Strahlung hat den Bewohnern nicht geschadet, im Gegenteil: Die Untersuchungen, von 13 medizinischen Experten durchgeführt, ergaben eine stark reduzierte Krebsrate gegenüber Unbestrahlten. Erstaunlich: Sowohl in der Sperrzone von Fukushima als auch in derjenigen von Tschernobyl liegen die durchschnittlichen Dosen deutlich unter denjenigen in den betroffenen Gebäuden in Taiwan.

Eine weitere Gruppe von Humanstatistiken betrifft Gebiete mit hoher Untergrundstrahlung. Die vielen Untersuchungen zeigen kaum negative Auswirkungen auf die Gesundheit. Es gibt im Gegenteil eher Anzeichen von positiven Wirkungen. Ich gehe weiter unten auf die natürliche Untergrundstrahlung ein.

Und schliesslich gibt es unzählige Untersuchungen an beruflich strahlenexponierten Menschen (Mitarbeiter von Kernanlagen, fliegendes Personal, Uranminenarbeiter, Liquidatoren, Röntgenärzte usw.). Die Dosen

sind oft klein, die Fehler und die Störfaktoren gross. Es gibt sowohl Hinweise auf positive Effekte als auch auf negative. Bei Uranmineuren und Arbeitern von Majak (ehemalige UdSSR) dominieren auf Grund von sehr hohen Dosen die negativen Effekte. In Majak, dem ehemaligen Zentrum der sowjetischen Plutoniumproduktion, wurden ab 1948 fünf grosse Graphitreaktoren (ein früher Tschernobyl-Typ) betrieben. Rund 10'000 Arbeiter erhielten typische Dosen von 1 Sv, mit Spitzen von über 10 Sv. Auch die umliegende Bevölkerung litt, etwa 47'000 Menschen wurden stark bestrahlt, mit Dosen bis zu 4 Sv. 2–3% starben an Krebs durch Strahlung. Allerdings ist die Dosimetrie mangelhaft, zudem waren die Menschen gesundheitlich oft angeschlagen (Lebensdauer kaum über 50 Jahren). Deshalb ist die Aussagekraft beschränkt. Mitarbeiter von westlichen Nuklearanlagen erhielten typischerweise 10 bis 100 Mal kleinere Dosen. Die vielen Untersuchungen zeigen kein einheitliches Bild, mal findet man weniger Krebsfälle, mal mehr.

Die Langzeitfolgen medizinischer Bestrahlungen zu therapeutischen oder diagnostischen Zwecken wurden auch oft untersucht. Früher wurde mit zum Teil beträchtlichen Dosen gearbeitet. Die Resultate sind kontrovers: Manchmal zeigen sich negative Effekte, oft aber auch keine oder positive.

Strahlenexpositionen durch Unfälle sind vergleichsweise selten. Ausser bei Tschernobyl wurde nie eine grössere Anzahl Personen mit grösseren Dosen (>1 Sv) bestrahlt. Die Auswirkungen hoher Dosen sind unbestritten (akute Fälle bei Einsatzkräften und Schilddrüsentumore bei Kindern). Die Auswirkungen auf die vielen Millionen Bewohner bleiben jedoch umstritten. Eigentlich erwartet man keine Wirkungen, denn die Dosen sind deutlich kleiner als die natürlichen Dosen.

Studien mit Zellen und Tieren

Werden bestrahlte Zellen mit molekularbiologischen Methoden untersucht, findet man eine Fülle von Effekten. Die Zellen aktivieren Abwehrmassnahmen gegen zu viele freie Radikale, sie reparieren die Schäden, treffen vorsorglich Abwehrmassnahmen gegen nachfolgende Bestrahlungen und alarmieren das Immunsystem. Die Zelle kann auch zum Schluss kommen, dass eine Reparatur nicht sinnvoll ist und ein Selbstmordprogramm starten, die Apoptose. Oft beobachtet man auch negative Effekte: genomische Instabilitäten, Hypersensibilitäten (überproportional viele Zellen begehen Selbstmord) und Bystander-Effekte (Signale an unbestrahlte Nachbarzellen, die manchmal Zusatzschäden erzeugen). Allerdings ist die Auswirkung auf

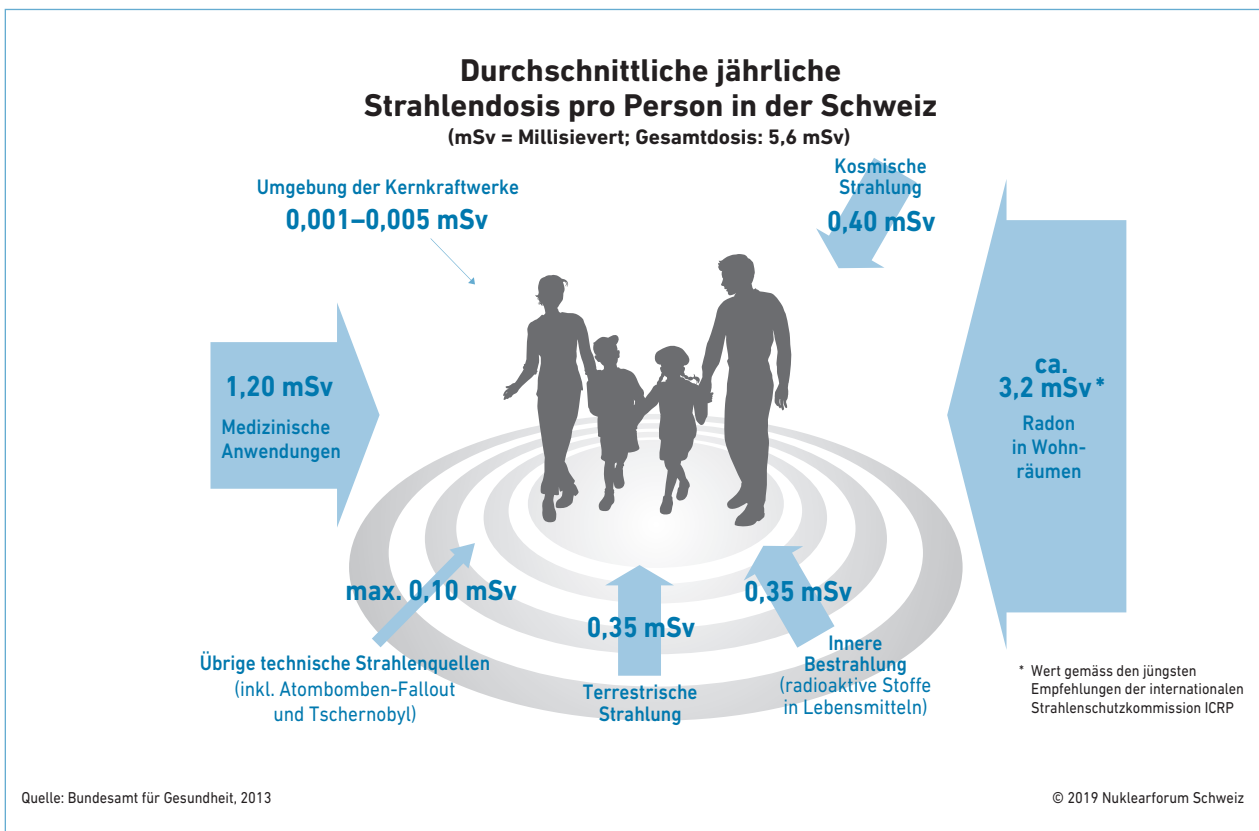
³ Raabe O. (2010). Concerning the Health Effects of Internally Deposited Radionuclides. In: Health Physics 98(3), p. 515–536.
<https://insights.ovid.com/crossrefan=00004032-201003000-00006>

den Gesamtorganismus umstritten. So ist das Auslösen eines Selbstmordprogramms aus Sicht der betroffenen Zelle negativ. Für den Gesamtorganismus ist es aber positiv, denn er wird auf diese Weise potenziell krebsauslösende Zellen los.

Tierexperimente hingegen sind aussagekräftiger. Man kann Tiere wie Labormäuse, unter streng identischen Bedingungen halten und studieren. Bestrahlt man dann einen Teil der Tiere und vergleicht sie mit den unbestrahlten, kann man recht zuverlässige Resultate erhalten. Dabei zeigen sich oft positive Effekte kleiner Strahlendosen wie längeres Leben oder weniger Krebs. Mittlerweile versteht man die Mechanismen, welche zu solchen positiven Effekten führen, recht gut. Viele namhafte Radiobiologen und Nuklearmediziner sind heute überzeugt, dass kleine Dosen eher positiv als negativ wirken.

LNT und das Problem der kleinen Dosen

Bei kleinen Dosen ortet man gerne Probleme. Immer wieder wird behauptet, dass man zu wenig darüber wisse, trotz 120 Jahren Forschung. Man vergisst, dass es bei allen Einwirkungen, egal ob physikalisch, chemisch oder radioaktiv, eine untere Dosisgrenze gibt, darunter werden die Auswirkungen unmessbar klein. Dies gilt beispielsweise auch für Wein: Für einen Durchschnittsmenschen sind 3 bis 4 Liter Wein, an einem Abend getrunken, tödlich. Was aber bewirkt ein Tropfen Wein, verteilt auf einen Monat? Eine dumme Frage? Gar nicht, denn ein Tropfen Wein pro Monat entspricht dem heutigen Grenzwert der Strahlendosis (1 mSv/J), in beiden Fällen handelt es sich um 1/60'000 einer tödlichen Dosis. Noch erstaunlicher: Gemäss Strahlenschutzverordnung muss man ab 10 µSv/J eine Bewilligung beantragen, was sehr aufwendig ist. Diese Dosis entspricht einem Tropfen Wein alle 8 Jahre.



Unsere heutigen Grenz- und Regulierungswerte liegen extrem tief, man versucht damit winzigste, völlig unmessbare, rein hypothetische Risiken zu eliminieren. Man liefert zwei Begründungen dafür:

1. Das Vorsorgeprinzip. Etwas salopp formuliert: Solange man nicht beweisen kann, dass etwas völlig unschädlich ist, muss man es verbieten. Nur: Bei Kleinstdosen kann man gar nichts beweisen.
2. Die LNT-Hypothese (**L**inear, **N**o **T**hreshold). Sie besagt, dass das Risiko einer Erkrankung wie Krebs linear mit der Dosis zunimmt, das heisst doppelte Dosis gleich doppeltes Risiko. Zudem gebe es keine untere Grenze (no threshold), also selbst die winzigste Dosis erzeugt ein (winziges) Risiko. Also sind auch winzige Dosen zu verbieten.

Alle Gesundheits- und Strahlenschutzbehörden (einschliesslich WHO) vertreten LNT. In weiten Kreisen wird aber verdrängt, dass LNT eine unbeweisbare Hypothese ist, zwar heftig verteidigt von der International Commission on Radiological Protection (ICRP), der Fachvereinigung der Strahlenschutzbeamten, aber auch heftig kritisiert⁴. Die wissenschaftlichen Gremien sind gespalten. Das gewichtigste Gremium, das UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), anerkennt positive Effekte kleiner Dosen, diese koexistieren mit negativen. Unbestritten ist, dass unter 100 mSv keine negativen Effekte nachweisbar sind. Die einflussreiche National Academy of Science in den USA, findet, dass der Strahlenschutz auf LNT basieren soll. Andererseits kommt die französische Académie des Sciences gemeinsam mit der Académie nationale de Médecine in einer gründlichen Studie von 600 Seiten zum Schluss, dass kleine Dosen gesundheitlich positiv wirken können. Die LNT-Hypothese verwerfen sie also.

Medien und Öffentlichkeit sind der festen Meinung, dass es wissenschaftlich bewiesen ist, dass auch die aller kleinste Dosis schädlich ist. Und eine Mehrheit ist sogar überzeugt, dass jede Dosis tödlich ist: Gemäss einer ETH-Umfrage (Risikosurvey 2013 «Risikowahrnehmung der Schweizerinnen und Schweizer») sind 80% der Befragten der Meinung, dass jede beliebige Dosis (also auch die kleinste) für Menschen tödlich ist.

Und 74% sind der Meinung, dass alles Radioaktive menschengemacht ist. Und so kommt es, dass man sich heute vor jedem einzelnen Strahlenteilchen fürchtet. Man vergisst völlig, dass wir von der natürlichen Radioaktivität aus unserem eigenen Körper, aus dem Boden, der Luft und dem All ununterbrochen heftig bestrahlt werden. Jede Sekunde werden wir von etwa 20'000 Strahlenteilchen getroffen. Je nach Zusammensetzung des Untergrundes können es auch weit über 100'000 sein. Doch selbst dann zeigen sich keine negativen Effekte. Warum dies zu erwarten ist, erkläre ich im nächsten Abschnitt.

Radioaktive Strahlen, selbst in winzigen Dosen, werden mehr gefürchtet als viel stärkere chemische Gifte, ein völlig irrationales Verhalten. Gewiss ist die Radioaktivität unheimlich: Weder sieht, hört, noch fühlt man sie. Aber dasselbe gilt auch für andere Giftstoffe, ganz zu schweigen von pathogenen Mikroorganismen. Ein «Vorteil» hat die Radioaktivität: Im Gegensatz zu den meisten anderen Giftstoffen kann man sie sehr einfach nachweisen, ein kleines Gerät ab rund 100 Dollar oder Euro genügt.

100 mSv und unsere Sauerstoffatmung

Bei einer Ganzkörperdosis (mit Gammastrahlen) von 100 mSv, dem 100-fachen des heutigen Grenzwertes, entfällt auf jede Körperzelle etwa ein Gammaquant. Das Resultat: In jeder Zelle werden 100–200 freie Radikale (ROS) erzeugt und 1–10 Doppelstrangbrüche (DSB). Eigentlich müssten wir gleich tot umfallen. Doch die Erfahrung zeigt, dass wir eine solche Bestrahlung nicht einmal bemerken, auch klinisch ist nichts festzustellen. Des Rätsels Lösung liegt in der Tatsache verborgen, dass wir atmen. Unsere Zellen benötigen Energie, viel Energie. Sie «verbrennen» zu diesen Zweck Nährstoffe, am liebsten Zucker. Jede Zelle benötigt dazu pro Sekunde mehrere Millionen Sauerstoffmoleküle. Dabei entstehen auch Giftstoffe, primär in Form von mehreren tausend ROS/s. Diese schädigen auch die DNA, unter anderem muss man mit mehreren DSB pro Tag rechnen. Einfache DNA-Schäden (wie ein Einzelstrangbruch) werden innert Minuten repariert, aber für einen DSB benötigt die Zelle bis zu mehreren Stunden. In jeder Zelle ist deshalb praktisch immer ein natürlich entstandener DSB vorhanden (neben tausenden einfachen DNA-Fehlern). Unsere Zellen sind eine einzige, gigantische Reparaturwerkstatt.

Eine Bestrahlung mit 100 mSv, gleichmässig verteilt auf ein Jahr, realisieren unsere Zellen kaum. Die natürliche ROS-Produktionsrate ist millionenfach höher und die paar zusätzlichen DSB sind vernachlässigbar ge-

⁴ Eines von vielen Beispielen: Sacks B., Meyerson G, Siegel J.A. (2016). Epidemiology Without Biology: False Paradigms, Unfounded Assumptions, and Specious Statistics in Radiation Science (with Commentaries by Inge Schmitz-Feuerhake and Christopher Busby and a Reply by the Authors). In: *Biological Theory* 11(2), p. 69–101. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13752-016-0244-4>

genüber den rund 1000 natürlich produzierten. Zugegeben, dies sind sehr einfache Modellrechnungen. Aber selbst wenn sie zehnmal zu optimistisch wäre: Man kann sich kaum der Schlussfolgerung entziehen, dass 100 mSv pro Jahr harmlos sind. Mittlerweile sind aber die Grenzwerte in unserer Angstgesellschaft von durchaus vernünftigen 150 mSv/J (1950) auf 1 mSv/J (für die Bevölkerung) beziehungsweise 20 mSv/J (für Berufsleute) gesunken, eindeutig zu viel des Guten.

100 mSv als Schockdosis, innert weniger Sekunden oder Minuten erhalten, könnten schon eher einen Effekt haben. Dann wird nämlich für kurze Zeit die ROS-Konzentration merklich angehoben, und die paar zusätzlichen DSB könnten die Reparaturmechanismen manchmal überfordern. In der Tat: Bei den Überlebenden von Hiroshima/Nagasaki (Schockdosis von einer Sekunde Dauer) lassen die Studien bei 100 mSv auf eine leichte Krebsratenzunahme im Alter schliessen.

Die natürliche Untergrundstrahlung

Die Erde war früher stark radioaktiv. Heute existieren nur noch extrem langlebige Radionuklide wie Uran-238 und ihre Zerfallsprodukte. Die kosmische Strahlung produziert aber fortwährend neue Radionuklide. Man findet deshalb radioaktive Substanzen überall, in jedem Staubkorn, in jeder Zelle und in jedem Milligramm Bio-Babynahrung. Die Mengen sind beachtlich: Die Erdkruste enthält tausend Mal mehr Radioaktivität als alle Kernkraftwerke dieser Welt je erzeugen können. Die radioaktiven Substanzen sind ungleich verteilt, ausgerechnet an Orten mit hoher Konzentration befinden sich viele bekannte Kurorte.

Der berühmteste Kurort in Iran ist Ramsar, Beiname «Behesht roye Zamin», das «Paradies auf Erden». Der Schah von Persien hatte hier seinen Sommerpalast. Aber gleichzeitig herrscht dort die weltweit höchste radioaktive Strahlung in einem dicht bewohnten Gebiet (typisch 10 $\mu\text{Sv/h}$ mit Spitzen von über 100 $\mu\text{Sv/h}$). Zusammen mit den inneren Dosen werden Werte von 1 Sv/J erreicht, was tausend Mal über unserem Grenzwert liegt. Der Grund ist vor allem eine hohe Konzentration von Radium im Boden. Es wurden Werte bis 350 kBq/kg gemessen, was 35'000-fach über dem heutigen Grenzwert liegt! Negative Wirkungen auf die Gesundheit konnten jedoch keine festgestellt werden. Im Gegenteil: Der Aufenthalt in Ramsar gilt als Jungbrunnen. Das gleiche kann von Guarapari in Brasilien, gesagt werden. Diese Grossstadt mit teilweise mehreren $\mu\text{Sv/h}$ im Zentrum und bis 100 $\mu\text{Sv/h}$ am beliebtesten Strand der Stadt, trägt den Beinamen «Cidade Saúde», die gesunde

Stadt. Im Übrigen findet man in praktisch jedem Land Orte mit vielen $\mu\text{Sv/h}$. So auch in den Schweizer Alpen und in Deutschland (Schwarzwald, Erzgebirge). Umgekehrt gibt es auch Orte mit nur 0,04 $\mu\text{Sv/h}$.

Schon bald nach der Entdeckung der Radioaktivität staunte man über die stark erhöhte Radioaktivität in den meisten Kurorten. Im Buch «Das Radium und die Erscheinungen der Radioaktivität» von Dr. Hugo Kauffmann, erschienen 1910, wundert sich der Autor (Seite 83): «Es muss doch mehr als ein Spiel des blinden Zufalls walten, wenn hochberühmte Quellen wie etwa das Gasteiner Wasser, das so gut wie chemisch rein ist und darum eigentlich keine spezifische Wirkung ausüben sollte, wenn solche Quellen durch einen geradezu auffallend hohen Emanationswert glänzen.» Mit «Emanation» wurden die radioaktiven «Ausdünstungen» von Radium (beziehungsweise Uran oder Thorium als Ausgangsmaterial) bezeichnet, heute sagt man Radon dazu. Inzwischen hat man die positiven gesundheitlichen Wirkungen radioaktiver Kuren durch klinische Studien nach allen Regeln der Kunst (prospektive, randomisierte Doppelblind-Studien) einwandfrei bewiesen. Dogmatisch jeden gesundheitlichen Nutzen von kleinen Dosen zu negieren, ist sehr gewagt, entspricht aber dem Zeitgeist und dem Glaubensbekenntnis gewisser politischer Parteien und Interessensverbände.

Fortsetzung folgt im Bulletin 2/2019.

Dr. Walter Rüegg ist Kernphysiker mit einem starken Interesse an der Strahlenbiologie. Er war 20 Jahre lang an der ETH Zürich und am Schweizerischen Institut für Nuklearphysik (SIN), heute Paul Scherrer Institut (PSI), in der Grundlagenforschung tätig und arbeitete später im Bereich Elektronik und Messtechnik der Asea Brown Boveri (ABB). Als langjähriger Chefphysiker der Schweizer Armee hat er sich intensiv mit der Radioaktivität und ihren Wirkungen auf Mensch und Umwelt befasst. Heute ist er selbständiger Berater und Entwickler elektronischer Systeme für die Energietechnik, unter anderem auch für Windenergieanlagen.