Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 85 (1994)

Heft: 22

Artikel: Radioaktive Strahlung : die grosse Unbekannte? : Beurteilung der Gesundheitsrisiken

Autor: Fritzsche, Andreas F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902619

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Radioaktivität ist für viele etwas Unbekanntes, Fremdes und deshalb oft auch etwas Unheimliches. Dabei löst sie Emotionen aus, und bei vielen Leuten kommt Besorgnis, ja Angst auf, wenn von der Kernenergie die Rede ist. Dabei ist die Radioaktivität eine so alltägliche Naturerscheinung wie die Sonnenstrahlung und das Wetter. Der Verfasser kommt zum Schluss, dass das gesundheitliche Risiko, hervorgehend aus der durch den Menschen genutzten radioaktiven Strahlung, einschliesslich der Nutzung der Kernenergie, verglichen mit anderen Risiken sehr klein ist.

Radioaktive Strahlung – die grosse Unbekannte?

Beurteilung der Gesundheitsrisiken

■ Andreas F. Fritzsche

Einleitung

Die radioaktive Strahlung ist für viele etwas Unbekanntes, Fremdes und deshalb oft auch etwas Unheimliches. Ist es da ein Wunder, wenn sie Emotionen auslöst und bei vielen Leuten Besorgnis, ja Angst aufkommt, wenn von Radioaktivität oder von der Kernenergie die Rede ist? Die Bombenabwürfe zur Beendigung des Krieges mit Japan sind nicht vergessen, ebensowenig die beispiellose Katastrophe in Tschernobyl. Dabei ist die Radioaktivität eine so alltägliche Naturerscheinung wie die Sonnenstrahlung und das Wetter.

So wie im Übermass «genossene» Sonnenstrahlung schädlich ist, kann auch eine hohe Dosis radioaktiver Strahlung den Menschen schädigen. Es ist alles nur eine Frage des Masses, denn wir sind während unseres ganzen Lebens dauernd radioaktiver Strahlung ausgesetzt. Diese stammt sowohl aus dem Weltall als auch aus dem Boden unter unseren Füssen, und sie ist allgegenwärtig in den Häusern, in denen wir wohnen, denn überall gibt es zumindest Spuren radioaktiver Stoffe – nicht zuletzt in unserem eigenen Körper.

Der Verfasser dieser Zeilen hält das verbreitete Unwissen über die Radioaktivität und über die erwähnten einfachen Tatsachen gerade im Zeitalter der Kernenergie für eine der schwerwiegendsten Bildungslücken, für die nur unsere Schulen verant-

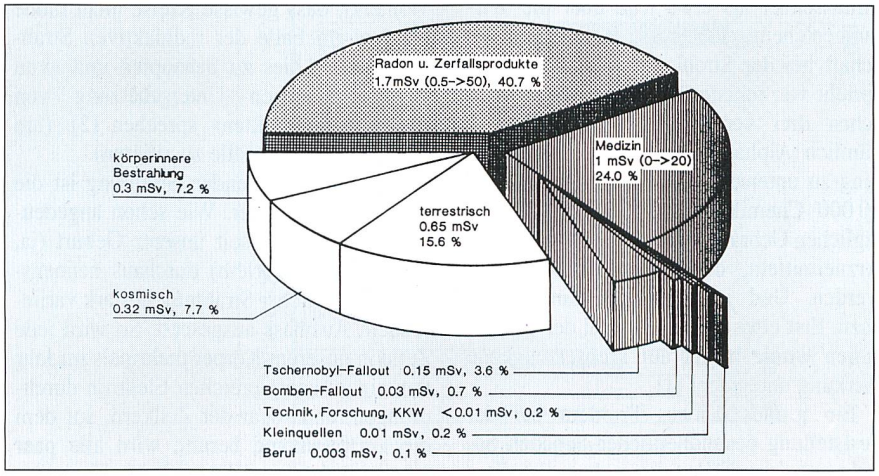

Bild 1 Durchschnittliche jährliche Strahlendosen der Schweizer Bevölkerung

Adresse des Autors:
Dr. sc. techn. *A.F. Fritzsche*, ehem. Eidg. Kommission für die Sicherheit der Kernanlagen, Chesa Crast'ota, 7504 Pontresina.

wortlich gemacht werden können. Ungeachtet dieser Lücke sind unsere Bürger seit Ende der 70er Jahre schon fünfmal aufgerufen worden, sich in Abstimmungen zu Kernenergiefragen zu äussern, womit sie die schweizerische Energiepolitik entscheidend geprägt haben. Dies muss zu denken geben.

In diesen wie in anderen politisch wichtigen Sachfragen führen Empfindungen nicht weiter. Ängste und Emotionen sind sehr subjektive, wenig konsequente und nicht selten ans irrationale grenzende Empfindungen. Über harte Fakten und Naturgesetze kann man auf die Dauer nicht ungestraft vorbeisehen. Dies gilt ganz besonders für die Wahrnehmung von Gefahren, die bei der Beurteilung der radioaktiven Strahlung eine zentrale Rolle spielen.

Eine sachgerechte Beschäftigung mit der Strahlung setzt zum einen voraus, dass man diese feststellen und messen kann. Interessiert man sich für deren gesundheitliche Gefahren, so sind, zweitens, verlässliche Informationen über deren Wirkungen auf den menschlichen Körper notwendig. Will man dann die Bedeutung dieser Gefahren beurteilen, so müssen sie schliesslich anderen Gefahren gegenübergestellt werden, denen wir ausgesetzt sind, und die uns vertrauter sind als die Gefahren der «unbekannten» radioaktiven Strahlung.

Stand des Wissens über Strahlung

Wenn sie auch für den Menschen nicht wahrnehmbar ist, so ist der Fachmann heute in der Lage, mit geeigneten Instrumenten minimste Mengen radioaktiver Strahlung festzustellen und ihre Intensität genauestens zu messen. Für ihn gibt es an dieser Strahlung nichts Unbekanntes, Fremdes oder Unheimliches.

Was die gesundheitlichen Wirkungen der verschiedenen Arten radioaktiver Strahlung auf den Menschen anbetrifft, so sind unsere Kenntnisse hierüber sehr viel umfassender als etwa jene über die Wirkungen chemischer Stoffe. Hat die Wissenschaft bei der Strahlung – der Fachmann spricht von ionisierender Strahlung – zwischen drei verschiedenen Strahlenarten, nämlich Alpha-, Beta- und Gammastrahlung zu unterscheiden, so ist sie mit etwa 60 000 Chemikalien konfrontiert, die im täglichen Gebrauch stehen und etwa 70 000 Arzneimitteln, die industriell produziert werden. Und jedes Jahr kommen neue dazu. Erst etwa der zehnte Teil der Chemikalien wurde bisher auf krebserzeugende Wirkung untersucht [1].

Ein grundsätzliches Problem bei der Feststellung gesundheitlicher Schäden besteht in beiden Fällen darin, dass dieselben Schäden noch zahlreiche weitere Ursachen haben können. Der gesuchte Effekt der Strahlung bzw. des chemischen Stoffes muss vor einem oft überwiegenden Hintergrund anderer Einwirkungsfaktoren erkannt werden, was im allgemeinen auch bei vergleichsweise hohen Dosen sehr sorgfältig durchgeführte statistische Analysen voraussetzt. Wesentliche Basis sind Tierversuche unter kontrollierten Bedingungen; beim Menschen verbieten sich meist solche Versuche aus ethischen Gründen, und man ist auf die Analyse von unbeabsichtigten oder aus anderen Gründen entstandenen Einwirkungen der Noxen angewiesen: medizinische Bestrahlungen und Überlebende der Atombombenabwürfe in Japan bei der Strahlung, unfallmässige Vergiftungen und erhöhte berufliche Belastungen bei Chemikalien.

So lassen sich meist verlässliche Daten über die gesundheitlichen Wirkungen bei hohen Dosen gewinnen. Eine neue Schwierigkeit kommt jedoch hinzu, wenn man sich für die Einwirkungen interessiert, unter Bedingungen, wie sie sich in der Praxis stellen, wo in aller Regel viel kleinere, ja vielfach ganz minimale Dosen vorherrschen. Bei solchen Dosen kann eine eventuelle Wirkung vor dem Hintergrund anderer Ursachen nur selten, vielfach aber überhaupt nicht mehr statistisch nachgewiesen werden, und man ist gezwungen, über den Verlauf der Dosis-Wirkungsbeziehung eine Hypothese zu machen.

Üblicherweise wird dabei postuliert, dass die schädigende Wirkung bei abnehmender Dosis proportional zu dieser abnimmt. Es ist dies die sogenannte lineare Hypothese, die erst bei der Dosis Null ein Ausbleiben jeglichen Schadens voraussagt. Bei den meisten chemischen Stoffen, die dem menschlichen Körper völlig fremd sind, dürfte diese Annahme eine brauchbare Annäherung an die Wirklichkeit darstellen, ist es doch kaum einsehbar, wieso ausgerechnet kleine Dosen überproportional schädlich sein sollen. Es sei allerdings vermerkt, dass gewisse Kreise nicht müde werden, im Falle der radioaktiven Strahlung gerade dies zu behaupten und «von einer drastischen Unterschätzung von Niedrigdoseneffekten» sprechen [2], (um nur eine neuere Quelle zu zitieren).

Bei der ionisierenden Strahlung ist die Sachlage komplexer. Wie schon angedeutet, sind wir alle seit unserer Geburt (ja, bereits im Mutterleib) durchaus nennenswerter natürlicher Strahlung in stark variierendem Ausmass ausgesetzt. So wird jede Zelle in unserem Körper mehrmals im Jahr von einem energiereichen Elektron durchdrungen, und sogar der Zellkern, auf dem die Fortpflanzung beruht, wird alle paar Jahre geschädigt. Während der Evolution des Menschen in dieser übelscheinenden Umgebung haben sich aber Reparaturmechanismen entwickelt, welche so wirksam sind, dass sogar nach mehreren Jahrzehnten die meisten Teile unseres Körpers noch recht gut funktionieren [3]. Bei den zahllosen, für den menschlichen Körper grösstenteils fremden chemischen Stoffen konnten sich solche Reparaturmechanismen nicht entwickeln.

Vor dieser Erkenntnis muss nun die Frage beantwortet werden, ob eine kleine Erhöhung der dauernd empfangenen natürlichen Strahlendosis tatsächlich zu einer Schädigung führt, auch wenn diese statistisch nicht feststellbar ist. Oder sind nicht auch unter diesen Bedingungen die erwähnten Reparaturmechanismen wirksam? In neuerer Zeit gibt es sogar zunehmend Anhaltspunkte, wonach kleine Strahlendosen eine positive Wirkung haben (Strahlenhormesis) [4].

Diese Fragen sind aus statistischen Gründen praktisch kaum beantwortbar. Daher wird für den Gebrauch im Strahlenschutz die lineare Dosis-Wirkungshypothese ohne Schwellenwert zugrunde gelegt, in der Gewissheit, dass diese Annahme in praktisch allen Situationen pessimistisch ist, also auf der sicheren Seite liegt. Diese Hypothese wird nun aber mangels anderer, realistischerer Annahmen bisher auch verwendet, um das Ausmass wirklich zu erwartender gesundheitlicher Schäden in der Folge von Bestrahlungen durch kleine Dosen zu bestimmen, was nach dem eben Gesagten unangemessen ist [5]. Diese Annahme wird auch für alle in der Folge zitierten, aus Bestrahlungen hervorgehenden Risikozahlen gemacht.

Grundsätzliches zu Vergleichen

Der abschliessende Schritt zu einem sachgerechten Umgang mit der Strahlung ist eine Beurteilung der Bedeutung deren Wirkungen auf den Menschen, und zwar anhand von Vergleichen der betrachteten strahlenbedingten Situation mit anderen Lebenssituationen, die ihrerseits schädigende Folgen haben. Mit solchen Vergleichen wollen wir uns in der Folge befassen.

Wie wir alle wissen, ist es mit Vergleichen immer so eine Sache. Wer hat bei einem angestellten Vergleich nicht schon den Vorwurf entgegennehmen müssen, er vergleiche Äpfel mit Birnen? Streng genommen sollte man in der Tat nur Gleiches mit Gleichem vergleichen. Aber Hand aufs Herz, es ist doch selten, dass wir im täglichen Leben Situationen antreffen, die in diesem strengen Sinne wirklich unmittelbar miteinander vergleichbar sind. «Jeder Vergleich hinkt»! Ein Vergleich ist etwas Eindimensionales. Er kann nur bezüglich eines einzigen Aspekts einer Situation vorge-

nommen werden, wogegen diese durch zahlreiche weitere Aspekte charakterisiert ist. Dennoch haben wir uns längst daran gewöhnt, Vergleiche auch in solchen Situationen anzustellen und sie als valable Entscheidungsgrundlagen zu akzeptieren, gegebenenfalls unter gleichzeitiger gedanklicher Berücksichtigung weiterer Umstände. Gelegentlich kann jedoch auch eine Gegenüberstellung von ganz Verschiedenartigem, Gegensätzlichem, verblüffende Einsichten vermitteln und interessante neue Perspektiven eröffnen.

Die Strahlenexposition ist ein gutes Beispiel für die Vielschichtigkeit einer Gefahrensituation. Grundsätzlich sind Erkrankungen verschiedener Organe und verschiedenen Schweregrades möglich. Diese können, mit unterschiedlicher Aussicht auf Erfolg, geheilt oder behandelt werden, sie können aber auch zum vorzeitigen Tode führen, und zwar in kurzer Zeit oder erst nach Jahrzehnten. Auch das ungeborene Kind im Mutterleib kann dauerhafte Schäden erleiden, während durch Schädigung der menschlichen Erbsubstanz die Nachkommen geschädigt werden können. Diese so unterschiedlichen Schäden, von denen in vielen Situationen gleich mehrere auftreten können, prägen verständlicherweise die subjektive Einschätzung einer Gefahr ausserordentlich stark und individuell recht verschieden. Auf diesen subjektiven Aspekt ist noch zurückzukommen.

Im weiteren ist Strahlung nicht einfach gleich Strahlung. Die Wirkungen der Alpha-, Beta- und Gammastrahlung sind verschieden, äussere und innere Bestrahlung müssen unterschieden werden, das biologische Verhalten inkorporierter Radionukleide unterscheidet sich stark. Zur Bewältigung der sich hier stellenden Vergleichsprobleme kann man sich auf pragmatische Modelle stützen, die unter anderem eine Umrechnung vieler besonderer Strahlenexpositionen auf eine äquivalente effektive Ganzkörperdosis erlauben. Die Mehrzahl aller Bestrahlungen sind ohnehin Ganzkörperbestrahlungen, und nur von diesen sei hier die Rede.

Wenn nun aber im Zuge der erwähnten emotionalen Reaktion auf Gefahren auch noch die Gammastrahlung natürlichen Ursprungs, jene im Rahmen einer medizinischen Behandlung und schliesslich die Immissionen eines Kernkraftwerks als drei völlig verschiedene Gefahren empfunden werden, so kann der Fachmann nur den Kopf schütteln! Dies ruft geradezu imperativ nach einer vergleichenden Quantifizierung dieser Gefahren.

Die Möglichkeiten, Vergleiche anzustellen, werden im weiteren auch aus der Quellenlage stark eingeschränkt. Die Quantifizierung einer Gefahr und damit die Bestimmung eines Risikos geht überwiegend auf statistische Daten, und zwar im allgemeinen auf Todesfallstatistiken zurück. Zwar gibt es auch Statistiken über die Häufigkeit von Krankheiten und Verletzungen der verschiedensten Art. Deren unterschiedliche Schwere kann aber nur ungenau erfasst werden, und die diesbezüglichen Statistiken sind deshalb heterogen und wenig zuverlässig. Statistisch eindeutig ist allein der Tod. So kommt es, dass gesundheitliche Risiken fast nur als Todesfallrisiken dargestellt werden können. Angesichts der Tatsache, dass in fast jeder Klasse von Gefahrensituationen die Häufigkeit von Todesfällen und die Häufigkeit der verschiedenen Kategorien nicht tödlicher Ereignisse in einer gewissen, wenn auch situationsspezifisch durchaus unterschiedlichen Relation stehen, gibt ein Todesfallrisiko, als Indikator aufgefasst, auch viel Auskunft über die Gesamtgefährlichkeit einer Situation.

Bevor auf Vergleiche der Strahlenrisiken mit anderen Risiken näher eingegangen wird, muss schliesslich auf einige vor allem praktische Schwierigkeiten hingewiesen werden. Diese können teilweise die Skepsis und das Unverständnis erklären, welche viele Leute Risikovergleichen gegenüber entgegenbringen.

Ein individuelles Todesfallrisiko, von dem hier die Rede ist, ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine gefährdete Person im Verlaufe eines Jahres in der betrachteten Situation den Tod findet. Es ist also gegeben durch die jährliche Zahl der diesbezüglichen Todesfälle dividiert durch die Anzahl der gefährdet gewesenen Personen. Diese beiden Bestandteile sind nun oft nur ungenau bestimmbar. Die Zahl der Todesfälle mag zwar eindeutig sein, die diesbezügliche Statistik ist aber vielfach zu undifferenziert. Andererseits ist es oft schwierig, die Anzahl der wirklich Gefährdeten zu eruieren. So sind Risikowerte meist relativ grobe Näherungen.

Sie sind aber immer auch Durchschnittswerte. Das Verhalten eines bestimmten Individuums kann stark vom Durchschnittsverhalten abweichen, womit auch sein persönliches Risiko erheblich verschieden ist. Gerade dieser Aspekt statistischer Daten bereitet vielen Leuten Verständnisschwierigkeiten.

Bei der Vornahme von Risikovergleichen muss auf solches Rücksicht genommen werden. Im allgemeinen sind Unterschiede um einen Faktor von 2 kaum aussagekräftig. Dennoch können Vergleiche recht vielsagend sein, sind doch oft Unterschiede um das 10fache oder gar um mehrere Grössenordnungen durchaus nicht selten.

Im folgenden soll nun auf bestehende, konkrete Möglichkeiten hingewiesen werden, um eine gegebene Strahlengefährdung mit anderen und vielleicht geläufigeren Gefahren zu vergleichen. Es sollen dabei Beispiele aufgeführt werden, welche im Sinne der goldenen Vergleichsregel schrittweise von wissenschaftlich weitgehend einwandfreien zu immer fragwürdigeren Vergleichen führen, um schliesslich eine Gegen-

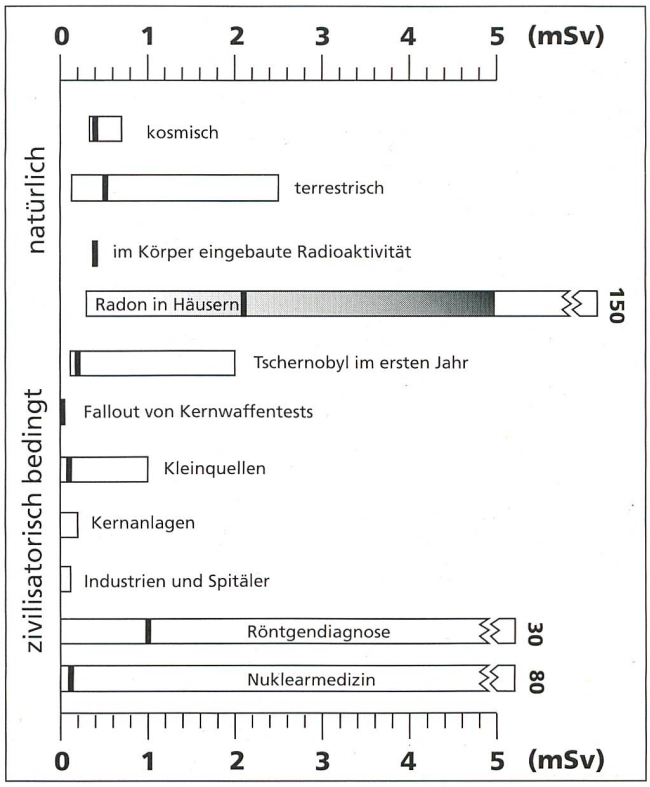

Bild 2 Jährliche Strahlendosen der Schweizer Bevölkerung und ihre Schwankungsbreite (nach [6])

überstellung von ausgesprochen Verschiedenartigem vorzunehmen.

Vergleiche Strahlung mit Strahlung

Es wurde bereits erwähnt, dass ionisierende Strahlung allgegenwärtig ist. Man kann daher eine gegebene Strahlenexposition direkt mit Bestrahlungen aus anderen Quellen vergleichen und so den problematischen Übergang von der Dosis zum Schaden umgehen.

Die Strahlenexposition des/der durchschnittlichen Schweizers und Schweizerin geht aus Bild 1 hervor, gegliedert nach der natürlichen Strahlung (hell, insgesamt 30,5%), der ebenfalls natürlichen Bestrahlung durch Radon und seine Zerfallsprodukte (punktiert, 40,7%, zusammen also gut 70%) und der «künstlichen» Bestrahlung (schraffiert, 28,8%). Bei letzterer stehen die medizinischen Bestrahlungen im Vordergrund (24,0%), gefolgt vom Fallout zufolge des Unfalles in Tschernobyl, dies nur gültig für das Unfalljahr 1986. Alle anderen Anteile «künstlicher» Bestrahlung sind sehr klein.

Diesen durchschnittlichen Bestrahlungsdosen bzw. einzelnen von diesen, welche am unmittelbarsten vergleichbar sind, kann nun eine gegebene Dosis gegenübergestellt und damit relativiert werden. Dabei ist es aber wichtig, daran zu denken, dass die tatsächliche Strahlenexposition einer bestimmten Person stark von diesen Durchschnittswerten abweichen kann. Dies ist aus einer anderen Darstellung (Bild 2) besser ersichtlich ([6], ergänzt), wo die Jahresdosen mit ihrer Streuung in absoluten Zahlen aufgezeichnet sind. Im folgenden werden für die Dosen durchgehend dieselben Einheiten, nämlich milli-Sievert pro Jahr (1 mSv = 100 mrem) verwendet.

Der grösste und auch der am stärksten variierende Anteil der natürlichen Bestrahlung stammt aus dem radioaktiven Zerfall des Urans, das im Erdboden in Spuren verbreitet vorkommt. Dieser stufenweise Zerfall führt über Radium zum ebenfalls radioaktiven Gas Radon, das sich im Erdboden ausbreitet und auch den Weg in die Häuser findet. Je nach der Belüftung der Räume wird sich in diesen eine höhere oder niedrigere durchschnittliche Konzentration des Gases einstellen. Gemäss Bild 2 variiert die von Radon in den Gebäuden empfangene Dosis hauptsächlich zwischen etwa 0,7 und 5 mSv pro Jahr (punktiert). Es sind aber vereinzelt Werte bis 150 mSv pro Jahr gemessen worden. Nun hat der Gesetzgeber nur die Strahlenexposition durch nicht natürliche Quellen geregelt. So wird es zweifellos überraschen, dass die letztgenannte Dosis bereits der 3fachen höchstzulässigen Einjahresdosis für beruflich strahlenexponierte Personen entspricht und sogar dem 150fachen Betrag, der für eine «künstliche» Bestrahlung einer Person in der allgemeinen Bevölkerung zugelassen ist (medizinische Anwendungen ausgeklammert).

Der zweitgrösste Anteil natürlicher Strahlung stammt aus vielen anderen radioaktiven Stoffen im Erdboden, dann folgen die Strahlung, die wir aus dem Weltall empfangen und, durchschnittlich im gleichen Ausmass von 0,3 mSv pro Jahr, die Bestrahlung durch radioaktive Stoffe, die in unserem Körper eingelagert sind. Die kosmische Strahlung nimmt mit der Höhe zu. In Meereshöhe ebenfalls rund 0,3 mSv pro Jahr, steigt sie auf dem Jungfraujoch auf das 5fache an und wird in der Höhe eines Transatlantikfluges (10 000 m) 25 mSv pro Jahr, also um das 80fache höher. Bild 3 [7] führt die örtliche Variation der natürlichen terrestrischen und kosmischen Strahlendosis für einige Standorte in der Schweiz noch etwas anschaulicher vor Augen.

Die individuellen Unterschiede in der medizinisch bedingten Strahlendosis sind verständlicherweise besonders gross. Diese wird vielfach Null sein. Wenn sich jedoch eine Person einer radiodiagnostischen Untersuchung oder einer nuklearmedizinischen Behandlung unterziehen musste, dann wird die empfangene Strahlendosis oft weit höher sein als sie dem Landesdurchschnitt entspricht.

Die in Bild 1 für das erste Jahr nach der Katastrophe in Tschernobyl geltende mittlere Dosis durch den radioaktiven Fallout ist inzwischen auf einen kleinen Bruchteil hiervon gesunken. Auch alle anderen vom Menschen verursachten Bestrahlungen, inklusive die Emissionen aus Kernkraftwerken, führen auf sehr kleine Dosen in der Grössenordnung von Bruchteilen eines Prozents oder dem hundertsten Teil eines mSv pro Jahr.

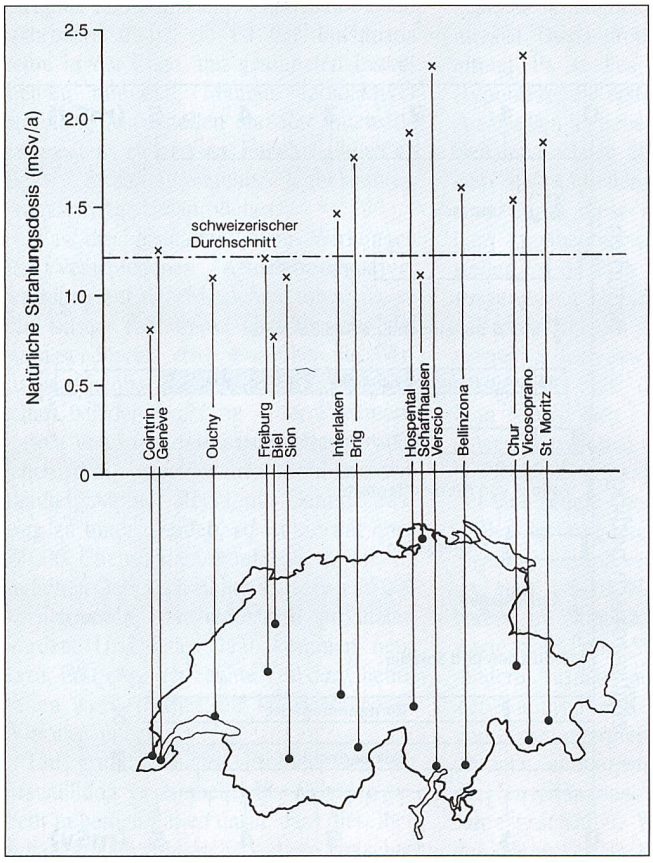

Bild 3 Geographische Variation der jährlichen Strahlendosen zufolge terrestrischer und kosmischer Strahlung in der Schweiz

Toleranzdosen

Eine weitere Möglichkeit, die Bedeutung einer Strahlenexposition zu ermessen, kann aus einer Gegenüberstellung der entsprechenden Strahlendosis mit den gesetzlich festgelegten Toleranzdosen gewonnen werden. Diese sind in der schweizerischen Strahlenschutzverordnung aufgrund der vor einigen Jahren modifizierten Empfehlungen der International Commission on Radiological Protection (ICRP, [8]) wie folgt festgelegt. Eine empfangene Ganzkörperdosis ionisierender Strahlung nicht natürlichen Ursprungs soll, summiert über ein Jahr, bei Personen in der allgemeinen Bevölkerung 1 mSv und bei beruflich strahlenexponierten Personen 50 mSv nicht übersteigen. Bei letzteren soll sich aber die Dosis in einer Fünf-Jahres-Periode nicht auf mehr als 100 mSv summieren.

Im Falle medizinischer Bestrahlungen hat ein Patient, im Gegensatz zu den mei-

sten anderen Bestrahlungssituationen, sowohl den Nutzen als auch den Schaden der Behandlung. Hier liegt es im Verantwortungsbereich des Arztes, Nutzen und Schaden abzuwägen, unter Berücksichtigung des ebenfalls von der ICRP aufgestellten Grundprinzips, wonach eine Bestrahlungsdosis immer so tief gehalten werden soll, wie dies vernünftigerweise erreichbar ist (ALARA-Prinzip).

Wirft man den Blick zurück auf die Bilder 1–3 so stellt man fest, dass alle Bestrahlungen der Bevölkerung, die menschlichen Ursprungs sind, unter und grösstenteils weit unter der gesetzlich tolerierten Limite liegen. Bestrahlungen natürlichen Ursprungs (sowie medizinische Bestrahlungen) können jedoch in Einzelfällen weit darüber hinausgehen.

Vergleiche Strahlung mit chemischen Schadstoffen

Gewisse Ähnlichkeiten zwischen der schädigenden Wirkung ionisierender Strahlung und jener chemischer Noxen sind schon angedeutet worden. In Fällen, in denen ein chemischer Stoff denselben Schaden bewirkt wie die Strahlung (z.B. Krebs, genetischer Schaden) und – zumindest über einen gewissen Bereich – dieser Schaden durch eine ähnliche Dosis-Wirkungsbeziehung wiedergegeben werden kann, dann ist es möglich, aus einem direkten Vergleich dieser Beziehungen eine sogenannte «äquivalente Strahlendosis» anzugeben (Konzept des rad-äquivalents, [9]). Einige Zahlenbeispiele mögen als Hinweis dienen, dass die Luftbelastung durch chemische Stoffe nicht immer mit derselben Strenge reguliert wird wie die ionisierende Strahlung.

Eine der wichtigsten heutigen Innenluftnoxen ist Formaldehyd, das in der Fabrikation von Kunststoffen Verwendung findet, in Baumaterialien, Möbelstoffen, Teppichen und Farben vorkommt und auch ein Bestandteil von Erdgas darstellt. In Gebieten Südfrankreichs mit Erdgasvorkommen sind Luftkonzentrationen festgestellt worden, welche bezüglich Lungenkrebsrisiko einer Strahlendosis von bis zu 50 mSv pro Jahr entsprechen würden.

Die schlimmste Innenluftnoxe ist natürlich der Zigarettenrauch. Der unfreiwillige Sekundärraucher, insbesondere das arme Kind stark rauchender Eltern, unterliegt nachweislich dem anderthalbfachen bis doppelten Krebsrisiko einer rauchverschonten Person. Die Raucher selbst gehen ein 20- und mehrfaches Lungenkrebsrisiko ein [16]. Äthylen ist nur eine der vielen Komponenten des Zigarettenrauchs. Ein Raucher oder eine Raucherin von 20 Zigaretten pro Tag gehen das gleiche genetische Risiko ein, allein zufolge des inhalierten Äthylens, wie wenn sie mit 35 mSv pro Jahr bestrahlt würden.

Das bei unvollständiger Verbrennung, etwa von Holz im Kaminfeuer, vorkommende Benz-a-pyren (BaP) ist sehr kanzerogen. Luftkonzentrationen, wie sie in vielen grossen Städten vorkommen, entsprechen einer äquivalenten Strahlendosis von etwa 10 mSv pro Jahr; im Umkreis von Emittern im Ruhrgebiet kommen jedoch Konzentrationen von BaP vor, die 120 mSv pro Jahr und mehr entsprechen [10].

Will man das gesundheitliche Risiko einer Bestrahlung mit dem Risiko vergleichen, das in irgendeiner landläufigen Lebenssituation oder Tätigkeit besteht, so muss man den früher erläuterten problematischen Schritt von der Strahlendosis zum Risiko machen. In Ermangelung einer realistischeren Annahme müssen wir diesem Übergang die für die Anwendung im Strahlenschutz gedachte lineare Dosis-Wirkungshypothese zugrunde legen, unter Verwendung der von der ICRP empfohlenen Risikofaktoren. Bezüglich der Mortalität zufolge Krebs, die wir in der Folge allein betrachten wollen, beträgt dieser Faktor für die allgemeine Bevölkerung 5×10^{-2} Krebstodesfälle pro Personen-Sievert. Dies besagt, dass man einen Krebstodesfall zu erwarten hat, wenn zum Beispiel 2000 Personen einer Ganzkörperdosis von 10 mSv ausgesetzt gewesen sind.

Das Strahlenrisiko bei der Kernenergieerzeugung

Die Stromerzeugung durch Kernenergie ist eine der in der Öffentlichkeit am häufigsten diskutierten Quellen ionisierender Strahlung. Will man sich über die gesundheitlichen Auswirkungen dieser Nutzung der Kerntechnik ein Bild machen, so ist es informativ, diese anderen Alternativen zur Erzeugung elektrischer Energie gegenüberzustellen.

Ein solcher Vergleich ist nur korrekt, wenn die Gesundheitsrisiken aller Prozessstufen erfasst werden, welche direkt oder indirekt zur Energieerzeugung beitragen. Ebenso müssen alle Arten von Gesundheitsrisiken in Betracht gezogen werden. Für eine Gesamtbeurteilung der Alternativen müssten darüber hinaus natürlich noch andere Charakteristiken berücksichtigt werden. Hier sollen lediglich die Todesfallrisiken der allgemeinen Bevölkerung zufolge Krebserkrankungen näher beleuchtet werden. Zusätzlich ist die Bevölkerung gewissen Unfallrisiken wegen Materialtransporten ausgesetzt, doch liefern diese nur einen vergleichsweise kleinen Beitrag.

Tabelle 1 Krebsrisiko der Bevölkerung bei der Stromerzeugung durch Kohle und Kernkraft (Todesfälle je GWa(e), nach [11])

Prozessstufe	Gefährdung	Kohle	Kernkraft
Kraftwerkbetrieb	Strahlung	0,005–0,3	0,001–0,02
	SO_x + Staub	2–5 (–15)	
	BaP	0,01–1	
Alle anderen Prozessstufen	Strahlung		0,004–0,18
Total		2–6 (–16)	0,005–0,2

Die Tabelle 1 zeigt den Vergleich der Krebsrisiken bei der Erzeugung elektrischer Energie auf der Basis von Kohle bzw. von Kernkraft in Todesfällen pro GWa(e). Die Zahlen entstammen einer kritischen Analyse weltweiter Abschätzungen und gelten für moderne Anlagen, wie sie heute in Mitteleuropa erstellt werden könnten [11]. So wird bei der Kohle die Einhaltung der strengen Abgasvorschriften gemäss schweizerischer Luftreinhalte-Verordnung vorausgesetzt und zur Bestimmung der Krebsfälle wie bei der Strahlung eine lineare Dosis-Wirkungshypothese gemacht.

Das Krebsrisiko als Folge der Kernenergieerzeugung ist durch die Abgabe kleiner Mengen radioaktiver Stoffe an die Umgebung aus den verschiedenen Prozessstufen bedingt, wobei der Anteil aus dem eigentlichen Kraftwerksbetrieb den kleineren Teil des Totals ausmacht (Tabelle 1).

Nicht so bekannt ist, dass auch Kohlekraftwerke Radioaktivität abgeben. Der Gehalt der verschiedenen Kohlesorten an radioaktiven Isotopen kann allerdings bis zu einem Faktor 100 variieren. Im allgemeinen sind die Dosen in der Umgebung des Werks aber eher höher als beim Kernkraftwerk. Bei der Kohle dominiert das Risiko herrührend von den chemischen Schadstoffen in den Abgasen bei weitem. Das gesamte krebsbedingte Todesfallrisiko ist deshalb hier rund zwei Grössenordnungen höher als bei der nuklearen Stromerzeugung.

Bei der Kernenergie muss aber noch eine Frage gesondert angesprochen werden, nämlich das Risiko, das aus der nicht auszuschliessenden Möglichkeit besteht, dass ein Kernkraftwerk einen sehr schweren Unfall erleidet, der Folgen auch für die Bevölkerung nach sich ziehen würde. Weil bei den im Westen und auch in der Schweiz betriebenen Kernkraftwerken ein solches Ereignis extrem unwahrscheinlich ist, ist

das gesundheitliche Risiko (Erwartungswert) für die Bevölkerung sehr klein, von der gleichen Grössenordnung wie das Risiko des Normalbetriebs. Wenn jedoch dieses Ereignis einmal doch eintreffen sollte, dann könnten die Folgen für die Umgebung des Werks sehr schwerwiegend sein.

Die Langzeitfolgen der Katastrophe in Tschernobyl wurden vom UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR, [12]) abgeschätzt und mit etwa 10 000 Krebstodesfällen unter der Bevölkerung der früheren Sowjetunion in den kommenden Jahrzehnten angegeben. Dies würde einer Zunahme der normalen Krebsrate von unter 0,03% entsprechen. Ein Teil dieser prognostizierten Fälle sind das Ergebnis einer Aufrechnung kleiner und kleinster Dosen über eine Millionenzahl leicht bestrahlter Personen, und sie sind deshalb im Sinne der einleitenden Ausführungen als hypothetisch zu bezeichnen.

Dies gilt zweifellos für die damaligen Auswirkungen des Ereignisses auf die Schweizer Bevölkerung, die möglicherweise überhaupt keine Schäden hervorriefen. Während des ersten Jahres nach dem Unfall empfing diese gemäss dem Bericht des Bundesrates an das Parlament [13] eine durchschnittliche Strahlendosis zwischen 0,1 und 0,2 mSv, mit Spitzenwerten bis etwa 2,3 mSv für eine kleine Bevölkerungsgruppe im Tessin. Weil die Reaktoren in der Schweiz grundverschieden sind von der verhängnisvollen Anlage in Tschernobyl, wären die Auswirkungen auch des schlimmsten überhaupt denkbaren Unfalls bestimmt weit geringer als bei dieser. Die Entwicklungsanstrengungen in der westlichen Welt und in Japan gehen heute dahin, eine neue Generation von Anlagen mit passiver Sicherheit so zu konzipieren, dass auch nach der schwersten Störung Auswirkungen auf die Bevölkerung ganz vermieden würden.

Zur Beurteilung der Gesundheitsrisiken der Kernenergie kann man zudem an Perspektive gewinnen, wenn die Frage gestellt wird, wie gross der Anteil der Kernenergienutzung an der Krebssterblichkeit in der Bevölkerung heute ist. Bild 4 zeigt die relative Bedeutung der Hauptursachen von Krebs nach den Schätzungen der bekannten Epidemiologen R. Doll und R. Peto [14]. Ernährung und Tabak sind für rund 35% bzw. 30% der Krebsfälle verantwortlich, das Sonnenlicht und die natürliche Strahlenexposition für je etwa 1,5%. Gemäss einer Abschätzung der Deutschen Strahlenschutz-Kommission ist demgegenüber der Beitrag der Kernkraftwerke im normalen Betrieb kleiner als 0,0001% [15].

Gegenüberstellung anderer Lebensrisiken

Man kann schliesslich einem Strahlenrisiko irgend ein anderes Risiko gegenüberstellen, wenn man glaubt, dadurch eine Beurteilung zu erleichtern. Die spezifischen Eigenarten der Gefahrensituationen und ihren Folgen werden sich dann allerdings meist derart stark unterscheiden, dass ein Vergleich untereinander eine erhebliche gedankliche Beweglichkeit verlangt, die viele Leute weder erbringen können, noch wollen. So werden solche «Vergleiche» bei einem Gesprächspartner oder -partnerin gelegentlich nur «ja-aber»-Reaktionen auslösen. Eine Konfrontation von Gegensätzlichem kann dennoch häufig zu verblüffenden Einsichten verhelfen.

Alle Risikowerte, die im folgenden genannt werden, sind wieder in ein und derselben Einheit ausgedrückt, so dass sie – als Zahlen – unmittelbar vergleichbar sind, nämlich als Anzahl Todesfälle pro 100 000 gefährdete Personen und pro Jahr. Um den Anschluss an das Strahlenrisiko herzustellen, greifen wir zurück auf den Risikofaktor der ICRP. Die Toleranzdosis für die allgemeine Bevölkerung von 1 mSv pro Jahr entspricht so einem Todesfallrisiko zufolge Krebs von fünf Todesfällen pro 100 000 und Jahr, geschrieben als: 5×10^{-5} pro Jahr. Mit diesem Umrechnungsfaktor kann jede Ganzkörper-Strahlendosis in ein (zwar vielfach hypothetisches) Todesfallrisiko umgewandelt werden.

Nun wird es niemanden überraschen, dass Todesfallrisiken, denen wir je nach unserer Lebensweise ausgesetzt sein können, sehr unterschiedlich gross sind. Tabelle 2, gewonnen aus dem Risikokatalog des Schreibenden: «Wie gefährlich leben wir?» [16] vermittelt hierzu einige Eckwerte und zeigt, dass sich die Spanne über mehr als sechs Grössenordnungen erstreckt. Es gibt also sehr grosse Risiken, die mehr als eine Million Male grösser sind als viele sehr kleine Risiken, die nichtsdestoweniger durchaus noch Beachtung finden. Diese weite Spanne dürfte allein schon ein Grund sein, weshalb viele so leicht durch die Kenntnisnahme eines Risikos – je überraschender um so eher – verängstigt werden können. Risiko bedeutet doch Gefahr! Wer unter uns hat in der Schule ein «Gefühl» für Grössenordnungen oder nur schon für eine Million mitbekommen?

Es verwundert nicht, dass Herz-Kreislauf-Erkrankungen, gerade im vorgerückten Alter, für die höchsten Todesfallrisiken verantwortlich sind, sind doch diese Krankheiten die häufigste Todesursache überhaupt. Ebensowenig ist das hohe Todesfallrisiko der Konsumenten «harter» Drogen unerwartet; schon eher die Prominenz von Sturzunfällen im hohen Alter.

Äusserst kleine Risiken, von denen im zweiten Teil der Tabelle 2 einige aufgeführt sind, gibt es natürlich ungezählt viele. Trotz ihrer objektiven Bedeutungslosigkeit beschäftigen einzelne unter ihnen die Mas-

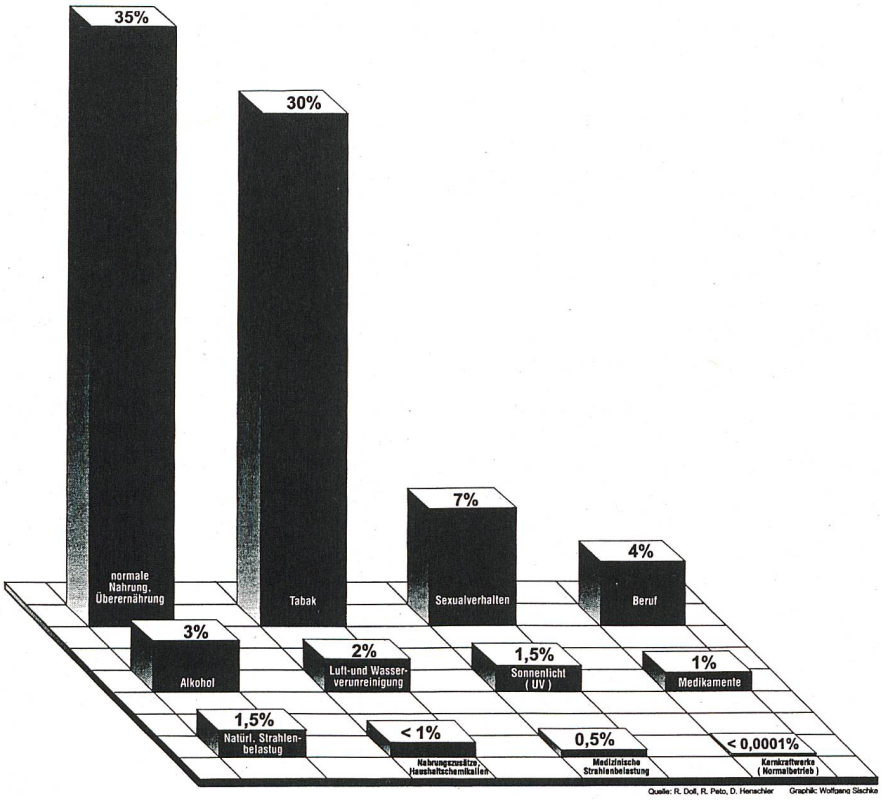

Bild 4 Relative Bedeutung der Hauptfaktoren, die als Ursachen von Krebs angenommen werden nach [14, 15])

senmedien und eine breite Bevölkerung in ganz unverhältnismässiger Weise. Die Risiken nun, die sich aus den allermeisten der für die Öffentlichkeit relevanten Strahlenexpositionen menschlichen Ursprungs ergeben, und welche weit unter der Toleranzdosis liegen, würden sich in der zweiten Hälfte dieser Tabelle einreihen.

Aus der Tabelle kann man aber auch entnehmen, wie wichtig es ist, bei einer Risikoangabe die Gruppe der jeweils gefährdeten Personen zum Beispiel nach Alter zu erfassen. Wenn man überhaupt je einmal Risikozahlen zu Gesicht bekommt, so sind dies meist die auf die Gesamtbevölkerung bezogenen, sogenannten Sterbeziffern. In der Einheit: «soundsoviele Todesfälle pro Jahr» stellen diese ein Mass für das gesellschaftliche oder kollektive Risiko dar. Aus der Sichtweise des einzelnen Individuums können solche Angaben sehr irreführend sein. So sagt zum Beispiel die Feststellung: «Ende der 80er Jahre ereigneten sich in der Schweiz beim Segelfliegen pro Jahr durchschnittlich sechs Todesfälle» nichts aus über die Risiken dieses Sports. Erst wenn man weiss, dass es damals rund 3400 aktive Segelflieger gab, kann man deren individuelles Risiko zu 180×10^{-5} pro Jahr bestimmen, ein vergleichsweise sehr hohes Risiko also.

Die Tabellen 3 und 4 geben nun eine kleine Auswahl von Risikoangaben aus den verschiedensten Lebensbereichen wieder. Eine kurze Diskussion soll andeuten, wie unterschiedlich solche Risiken durch den Mann und die Frau auf der Strasse wahrgenommen werden, so dass kaum eine Korrelation besteht zwischen dieser Wahrnehmung und der Höhe der entsprechenden Risikowerte.

Krankheiten, ebenso wie Naturereignisse werden weitgehend als unbeeinflussbare Fügungen des Schicksals empfunden, welche einfach erduldet werden müssen. Zuwenig wird zur Kenntnis genommen, dass gerade die hohen Gesundheitsrisiken (Herz-Kreislauf-Erkrankungen, der Konsum von Tabak und Alkohol) durch die Lebensweise bedingt sind und so durchaus persönlich beeinflusst werden könnten.

Demgegenüber wird die Ausübung eines Sports oder die Teilnahme am motorisierten Strassenverkehr als vertraute, selbstgewählte Tätigkeiten, ja als ein Ausdruck der Freiheit selbst empfunden. Sie bringen grossen unmittelbaren Gewinn, während das eingegangene Risiko unter direkter eigener Kontrolle ist – oder mindestens zu sein scheint. Da ist man bereit, vergleichsweise hohe bis sehr hohe Risiken einzugehen.

Das Verhalten im häuslichen Bereich wiederum wird dominiert vom Gefühl der

	Gefährdete Personen Geschlecht	Alter	Todesfallrisiko pro 10^5 und Jahr
Extrem hohe Risiken			
Herz-Kreislauf-Erkrankungen	M	90+	17 000
	M	75–80	5 200
	M	55+	2 200
Konsum «harter» Drogen	M+W		1200–1600
Sturzunfall	W	85+	770
Säuglingssterblichkeit	M	0–1	760
Vernachlässigbare Risiken			
Milchkonsum, 0,5 l/Tag (Krebsrisiko, Aflatoxine)		alle	etwa 1
Nahrungsmittelvergiftung:			
Salmonellen	M+W	60+	0,5
andere Ursachen	M+W	alle	0,012
Elektrisierung im Haushalt	M+W	alle	0,17
Blitzschlag (Gesamtmittel)			0,05
Schlangenbiss			unter 0,001

Tabelle 2 Die Variationsbreite gesellschaftlicher Todesfallrisiken (nach [16])

Todesursache		gefährdete Personen Geschlecht	Alter	Todesfallrisiko pro 10^5 und Jahr
Krankheiten: Krebs:	alle Arten	M	45+	780
	Lunge (Nichtraucher)	M	alle	20
	Leukämie	M	35+	15
		M+W	1–25	1,5
Infektionskrankheiten:	alle Arten	M	alle	10
	Aids	M	30–39	19
Blinddarmentzündung		M+W	55+	1,2
Rauchen: Lungenkrebs:	Raucher (mittel)	M	alle	190
Ehefrau eines Rauchers		W	alle	etwa 40
Alkohol: Erkrankung (>80 g/Tag)		M	alle	270
Indirekt (Unfälle usw.)		M	alle	etwa 270
Ernährung: Nahrungsmittelvergiftung: (mittel)		M+W	alle	0,12
Zusatzstoffe				0 (?)

Tabelle 3 Einige Todesfallrisiken infolge von Erkrankungen (nach [16])

Todesursache		Gefährdete Personen Geschlecht	Alter	Todesfallrisiko pro 10^5 und Jahr
Sport	Segelfliegen			180
	Deltasegeln			100
	Hochgebirgstouren			30
	Baden und Schwimmen			10
	Bergwandern			4
	Pisten-Skifahren			1
Strassenverkehr				
	Personenwagen, Lenker	M	20–24	33
		M+W	18+	7,2
	Fussgänger	M+W	0–59	1,3
			60+	9,6
Im familiären Bereich				
	Landwirtschaft, Traktorunfälle	M+W	1–14	9
	Aufenthalt zu Hause	M+W	alle	8,5
	Basteln			0,75
	Wohnungsbrand			0,27

Tabelle 4 Einige Todesfallrisiken infolge von Unfällen (nach [16])

Sicherheit in vertrautem Kreis und in überblickbarer Umgebung. Hier bestimmen wir tatsächlich allein: «My home is my castle». Das Abstreifen der Anspannungen von Beruf und Aussenwelt verleitet aber zu Sorglosigkeit, die mit beträchtlichen Risiken verbunden sein kann. Traktorunfälle von Kindern in landwirtschaftlichen Betrieben sind da ein ominöses Beispiel.

Wieder anders ist es in einem Bereich wie der unserer Ernährung (Tabellen 2 und 3). Wenn wir bei der Deckung dieses existenziellen Grundbedürfnisses auf eine wirkliche oder eine auch nur suggerierte Gefahr aufmerksam werden, da sind viele unter uns zutiefst entsetzt, auch wenn das objektive Risiko sehr klein (Salmonellenvergiftung) oder gar völlig vernachlässigbar ist (andere Nahrungsmittelvergiftung, Nahrungsmittel-Zusatzstoffe).

Wie die besprochenen Tabellen zeigen, sind viele der Risiken stark altersabhängig. Aber auch sonst kann das Risiko einer bestimmten Einzelperson je nach ihrem Verhalten stark von den hier aufgeführten Mittelwerten abweichen. So hat etwa K. Halperin [17] aus den US-Statistiken abgeleitet, dass das Todesfallrisiko einer vorsichtigen Autofahrerin um das 600fache kleiner sein kann als jenes eines rücksichtslos fahrenden Jünglings.

Alle diese so grundverschiedenen Situationen sind nicht auf einen Nenner zu bringen. Die Höhe eines Todesfallrisikos ist nur ein Parameter unter mehreren, die unsere Einschätzung bestimmen. Stellt man solchen Risikowerten nun ein bestimmtes Strahlenrisiko gegenüber, so sind dies zweierlei Dinge. Da werden statistisch belegte Risikowerte mit Rechenwerten verglichen, die sich aus einer zu Strahlenschutzzwecken aufgestellten, konservativen Hypothese ergeben. Niemand weiss, ob die in so vielen Fällen kleinen, in Frage kommenden Strahlendosen für den Menschen wirklich schädlich sind (Strahlenhormesis). Die erheblichen Schwankungen des natürlichen Strahlungspegels lassen kleine bis kleinste Zusatzdosen – einen sinnvollen Nutzen vorausgesetzt – als belanglos erscheinen.

Akzeptables Risiko

Abschliessend kann man erneut die Frage stellen, wozu Risikoabschätzungen dienen können. Kann mit Hilfe von Risikovergleichen vielleicht die Akzeptanz gewisser Risiken gefördert werden? Gibt es etwa ein «akzeptables Risiko», also einen Wert des Todesfallrisikos, unterhalb dessen eine Gefahrensituation allgemein für tragbar gehalten wird?

Hier muss unterschieden werden zwischen der Akzeptabilität oder Tolerierbarkeit einer Gefahrensituation bzw. eines Risikos auf der einen Seite und deren faktische Akzeptanz auf der anderen. Wenn eine Behörde oder andere Instanz sich der Sicherheit der Bürger annimmt und beispielsweise einen Toleranzwert festlegt oder eine Sicherheitsmassnahme verfügt, so sieht sie sich vor die Frage gestellt: «Wie sicher ist sicher genug?» Nach dem Durchlaufen eines ordentlichen Verfahrens wird dann festgesetzt, unter welchen Bedingungen es die betreffende Situation verdient, generell akzeptiert zu werden. Hier ist eine objektive Beurteilung gefragt, in welcher eine Gegenüberstellung auch unterschiedlicher, ja sogar gegensätzlicher Gefahrensituationen nützlich sein kann, um zu einem Entscheid zu gelangen.

Aber auch Kosten-Nutzen-Erwägungen spielen dabei eine wichtige Rolle, denn mehr Sicherheit kostet auch mehr, und dies zudem immer nach Massgabe des Gesetzes des abnehmenden Ertrages. Dass da unter Rücksichtnahme auf emotional bedingte, im wahren Sinn des Wortes irrationale Reaktionen in der Öffentlichkeit aus gesellschaftspolitischen Gründen immer wieder gesündigt wird – und dies nicht selten im Bereich der Strahlenrisiken – können einige wenige Zahlen aus den USA belegen (Tabelle 5).

Aufgeführt sind Zahlenwerte für die Kosten von unternommenen oder gewünschten Sicherheitsmassnahmen in $ pro verhinderten statistischen Todesfall. Um es vielleicht etwas unfein auszudrücken, deuten die ersten zwei Zeilen dieser Tabelle quasi den heute geltenden wirtschaftlichen und gesellschaftlichen «Tarif» an, nämlich: die Einführung des Gurtenobligatoriums in vielen Ländern vor etwa zehn Jahren bei Kosten von bis zu 100 000 $ pro verhinderten statistischen Todesfall sowie der in neuester Zeit von einigen Automobilherstellern offerierte Aufprallschutz durch einen automatisch aufblasbaren Luftsack, bei einem um ein Mehrfaches höheren Aufwand.

Nun scheinen aber im Bereich der nicht natürlichen Strahlung offenbar ganz andere Sitten zu gelten, wenn auch die in der Tabelle genannten Beispiele zum Teil Extremfälle darstellen dürften. Dies gilt insbesondere für die Entsorgung von 8700 m^3 schwach radioaktiver Wässer, herrührend von den Aufräumarbeiten in den Gebäulichkeiten des Unfallreaktors Three Mile Island.

Diese hätten unter Einhaltung der Abwasservorschriften in den Fluss abgeleitet werden können, ohne in der Bevölkerung eine Kollektivdosis von 0,01 Personen-Sievert zu überschreiten. Wegen massiver öffentlicher Opposition musste schliesslich das Abwasser durch Verdampfen entsorgt werden, was dem ungeheuren Aufwand von etwa 25 Milliarden $ pro verhinderten Todesfall entspricht. In der Öffentlichkeit geäusserte Schutzbegehren sind gelegentlich noch extremer, wie das aufgeführte Endlager-Beispiel zeigt [18]. Ist es da ein Trost, dass bei dem in letzter Zeit hohe Wellen schlagenden Thema «Asbest» derartige Exzesse ebenfalls vorkommen [19]? Müssen wir uns, muss sich unsere Gesellschaft mit Blick auf die zum Teil massiven Radon-Dosen nicht ernsthaft fragen, ob unsere beschränkten Mittel am richtigen Ort eingesetzt werden?

Man hat in der Vergangenheit immer wieder versucht, auf die eine oder andere Weise ein akzeptables Risiko zu bestimmen, das ganz generell gültig wäre, wenn es um unfreiwillig auf sich zu nehmende Risiken geht. Die vielen diesbezüglich gemachten Vorschläge (Bild 5) erstrecken sich aber insgesamt über einen Bereich der Todesfallrisiken von bis zu vier Grössenordnungen, allerdings mit einer gewissen Häufung zwischen 10×10^{-5} und $0{,}1 \times 10^{-5}$ pro Jahr in den hier verwendeten Einheiten. Es ist allerdings auffallend, dass für Gefahren, die der Bevölkerung aus grossindustriellen Anlagen entstehen können,

	Sicherheitsmassnahmen	Kosten ($)
Auto	Sicherheitsgurten	80 000–100 000
	Luftsackschutz	100 000–300 000
Kerntechnik	– Grenzwerte für Emissionen aus Kernkraftwerken, generell	$8 \cdot 10^6$
	Iod	$100 \cdot 10^6$
	– H_2-Rekombinatoren in KKW	$3 \cdot 10^9$
	– Verdampfung leicht radioaktiver Wässer aus TMI-Unfall	$25 \cdot 10^9$
	– Zusätzlich gewünschte Massnahmen bei Endlager für leichtaktive Abfälle	$>10^{12}$
Asbest	Elimination aus Schulhäusern	$75–1400 \cdot 10^6$

Tabelle 5 Kosten für Sicherheitsmassnahmen in $ je verhinderten statistischen Todesfall (Beispiele nach [18, 19, 20])

noch erheblich kleinere Werte genannt werden [20].

Tatsache ist jedoch, dass die faktische Akzeptanz von Risiken kaum eine Systematik widerspiegelt. Es werden in verschiedenen Bereichen Todesfallrisiken bis gegen 1000×10^{-5} pro Jahr tatsächlich akzeptiert. Handkehrum wird aber in Einzelfällen ein Eingehen von Risiken bis hinunter gegen $0{,}001 \times 10^{-5}$ pro Jahr verbreitet, und dazu gelegentlich kategorisch abgelehnt. Hier herrscht die subjektive und emotionelle Einschätzung von Gefahren vor. Sie ist wenig hilfreich, wenn es darum geht, gesellschaftliche Probleme sachlich und einvernehmlich zu lösen. Es wäre wünschbar, die Wahrnehmung von Gefahren etwas besser in Einklang zu bringen mit dem objektiven Ausmass dieser Gefahren. Dazu können Risikovergleiche und Kosten-Nutzen-Überlegungen viel beitragen.

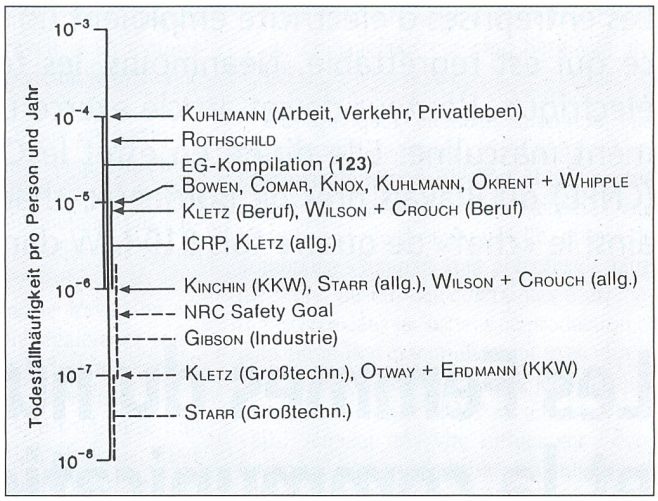

Bild 5 Vorschläge für ein generell akzeptables individuelles Todesfallrisiko (nach [20])

Schlussfolgerungen

Aufgrund solcher Überlegungen haben wir gesehen, dass das gesundheitliche Risiko, hervorgehend aus der durch den Menschen genutzten radioaktiven Strahlung, einschliesslich der Nutzung der Kernenergie, verglichen mit anderen, meist gedankenlos eingegangenen Risiken, sehr klein ist. Diese Strahlenanwendungen (ausser gewisse medizinische Anwendungen) sind lediglich für einen sehr kleinen Bruchteil der Strahlenexposition des Menschen verantwortlich.

Bei der Beurteilung der Wirkungen der hier in Frage kommenden kleinen Strahlendosen besteht freilich Ungewissheit. Diese Ungewissheit, und dies muss abschliessend eindringlich in Erinnerung gerufen werden, besteht nur, weil diese Wirkungen derart klein sind, dass sie als solche gar nicht feststellbar sind. Bei den Abschätzungen der diesbezüglichen Risiken werden jedoch Annahmen getroffen, welche etwelche Wirkungen überschätzen. Aus dieser Ungewissheit eine unüberschaubare Gefahr abzuleiten, oder eine solche auch nur zu insinuieren, wie dies durch gewisse Kreise immer wieder geschieht, muss als groben Unfug bezeichnet werden.

Literaturverzeichnis

[1] *P. Schlegel*: Der Luftaustausch bei der Gebäudeplanung, Kapitel 4 in: Impulsprogramm Haustechnik 1988, Luftaustausch in Gebäuden, EDMZ Bern.

[2] Bundesamt für Konjunkturfragen, Bundesamt für Energiewirtschaft, Amt für Bundesbauten: Externe Kosten und kalkulatorische Energiepreiszuschläge für den Strom- und Wärmebereich, Synthesebericht, EDMZ Bern, August 1994.

[3] *J.H. Fremlin*: Power Production, What are the Risks? Adam Hilger Ltd., 1985.

[4] *H. Fritz-Niggli:* Was bewirken kleine Dosen energiereicher Strahlung? «Neue Zürcher Zeitung», Forschung und Technik, Nr. 45, 24. Februar 1993.

[5] *L.E. Feinendegen:* Das Problem der kleinen Strahlendosen, eine Herausforderung für die Beurteilung von Schadensfolgen, GRS-Fachgespräch 1986, Köln, 12./13. Nov. 1986, GRS Köln, 1987.

[6] KUeR: 29. Bericht der Eidg. Kommission zur Überwachung der Radioaktivität für die Jahre 1985 und 1986 zuhanden des Bundesrates, EDMZ Bern, April 1989.

[7] *E. Halm, W. Herbst, A. Mastrocola*: Messung des natürlichen Strahlenpegels in der Schweiz, Bulletin des Eidg. Gesundheitsamtes, Beilage B, Nr. 6, 1962.

[8] ICRP: 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 60, Pergamon Press, 1991.

[9] *H. Glubrecht:* Dose comparisons in the effects of radiation and of chemical pollutants, Atomkernenergie-Kerntechnik, 33, 1979, S. 126–130.

[10] World Energy Conference, Report 1988: Environmental Effects Arising from Electricity Supply and Utilization and the Resulting Costs to the Utility, October 1988, S. 204.

[11] *A.F. Fritzsche*: Gesundheitsrisiken von Energieversorgungssystemen – Von der Kohle bis zu Energien der Zukunft und den Rohstoffen bis zur Entsorgung, Verlag TUeV Rheinland, Köln, 1988; vgl. auch: The Health Risks of Energy Production, Risk Analysis, 9, No. 4, 1989, 565–577.

[12] UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR): Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, 1988.

[13] Schweiz. Bundesrat: Bericht über die Sicherheit der schweizerischen Kernkraftwerke nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl, EDMZ Bern, November 1987.

[14] *R. Doll, R. Peto*: The Causes of Cancer, Oxford University Press, 1981.

[15] *D. Henschler*: Stochastische Risiken von Stoffen; Risikoerkennung, Risikosituation, Grenzwerte, 1. Weltkongress für Sicherheitswissenschaft «Leben in Sicherheit», Tagungsbericht Teil 1, Verlag TUeV Rheinland, Köln, 1991, 427–437.

[16] *A.F. Fritzsche*: Wie gefährlich leben wir? Der Risikokatalog, Verlag TUeV Rheinland, Köln, 1992.

[17] *K. Halperin*: A Comparative Analysis of Six Methods for Calculating Travel Fatality Risk, Risk, 15, Winter 1993, 15–33.

[18] *M. Eisenbud*: Disparate Costs of Risk Avoidance, Science, 241, 9. September 1988 , S.1277.

[19] *B.T. Mossman* et al.: Asbestos: Scientific Developments and Implications for Public Policy, Science, 247, 19. January 1990, S. 294–301.

[20] *A.F. Fritzsche*: Wie sicher leben wir? Risikobeurteilung und -bewältigung in unserer Gesellschaft, Verlag TUeV Rheinland, Köln, 1986.

Le rayonnement radioactif – un élément inconnu? Evaluation des risques pour la santé

Le rayonnement radioactif est pour une grande partie de la population un élément inconnu, étrange et, de ce fait, aussi quelque peu inquiétant. Il n'est donc pas étonnant qu'il suscite une certaine émotion et que nombreuses personnes ressentent de l'inquiétude, voire de la peur lorsqu'il est question de radioactivité ou d'énergie nucléaire. Pourtant le rayonnement radioactif est un phénomène naturel aussi quotidien que le rayonnement solaire et le temps.

Une longue exposition à un rayonnement radioactif, à l'instar de celle aux rayons du soleil, peut être nuisible à l'être humain. Il s'agit de ne pas dépasser la mesure, car nous sommes continuellement exposés durant notre vie à un rayonnement radioactif naturel.

Ces considérations nous ont permis de voir que le risque représenté pour la santé par l'utilisation d'un rayonnement radioactif (énergie nucléaire comprise) est très faible par rapport à certains autres risques pris souvent à la légère. Ces utilisations (à l'exception de quelques applications médicales) ne sont que pour une part infime à l'origine de l'exposition des êtres humains aux radiations.