

Gesundheitliche Risiken durch energiereiche Strahlung von Atomkraftwerken¹

Hedi Fritz-Niggli
 Aus dem Strahlenbiologischen Institut der Universität Zürich

Seit Jahrmillionen ist der Mensch einer natürlichen Bestrahlung ausgesetzt. Neben den kosmischen Strahlen aus dem Weltall wird er ständig durch die Radioaktivität seiner Umgebung, sei es nun des Bodens oder der Häuser, in denen er lebt, mit Strahlen belastet. Zudem ist jeder Mensch radioaktiv, d. h. er inkorporiert radioaktive Elemente, die ihn von innen bestrahlen (Abb. 1). In der Schweiz variieren die Komponenten

Wie gross ist das Krankheitsrisiko durch die zusätzliche Strahlenbelastung aus dem Normalbetrieb von Kernkraftwerken? Schätzungen und Berechnungen zeigen, dass dieses Risiko gering ist.

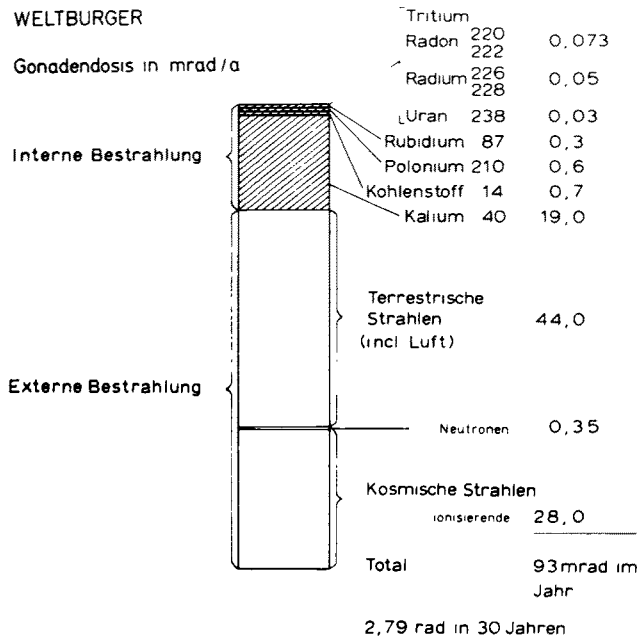
Strukturen, verändert, was sekundär Anomalien, Krankheit und Tod bedingt. Ionisierende Strahlen natürlicher und künstlicher Provenienz sind demnach stets lebensfeindlich, es sei denn, man benütze ihre tödliche Eigenart zur Vernichtung von Krebszellen, also zur Gesundung eines kranken Menschen oder man verwende die ionisierenden Strahlen sowie die radioaktiven Elemente in der Röntgendiagnostik und der Untersuchung des Stoffwechsels usw. Auch in Technik und Forschung dienen sie dem menschlichen Nutzen. Ebenso haben sich durch die Gewinnung von Kernenergie grosse Energiequellen erschlossen, die aber vorläufig stets begleitet sind mit der Emission von Strahlen und radioaktiven Stoffen und damit zur künstlichen Strahlenbelastung des Menschen beitragen können.

Es gilt nun, den Nutzen der ionisierenden Strahlung abzuwägen gegen die gesundheitlichen Risiken, die dem Menschen entstehen können. Seit Jahrzehnten ist die Strahlenwirkung auf das Lebewesen untersucht worden, so dass die ionisierende Strahlung den bestuntersuchten Umweltfaktor darstellt, den wir kennen. Nicht nur ist es möglich, eine Schädigungsskala dieses Agens darzustellen, sondern auch Schätzungen über Dosiseffektbeziehungen zu machen, die durchaus Realitätswert haben. Von keiner chemischen Noxe, seien es Pestizide, Insektizide und Pharmaka, sind nur annähernd derart viele Daten zusammengetragen worden.

1. Die Komponenten der künstlichen Strahlenbelastung

1.1 Allgemeines

Zur Darstellung der Strahlenbelastung benutzt man verschiedene Werte (Tab. 1). Während die Gonadendosen die Strahlenbelastung der Gonaden aller ausdrücken, wird mit der wichtigen genetisch signifikanten Gonadendosis die Reproduktionsfähigkeit be-



ten der kosmischen Bestrahlung (je nach Höhe des Wohnortes) über Meer und der terrestrischen Bestrahlung beträchtlich. Die durchschnittliche natürliche Strahlen-Belastung des Schweizers schwankt zwischen 90 und 330 millirad² pro Jahr. In millirem ausgedrückt, würden die Zahlen etwas höher liegen. Zu dieser natürlichen Strahlen-Belastung hat sich nun Ende 1895 mit der Entdeckung Röntgens die künstliche Belastung gesellt. Der Strahlenpegel des Menschen wird durch ihn selbst erhöht. Die grosse Bedeutung dieser unsichtbaren Strahlen und strahlender Stoffe für Medizin und Biologie wurde sowohl im positiven wie auch im negativen Sinne sofort erkannt. Strahlung bedeutet Energiewanderung durch den leeren oder mit Materie erfüllten Raum. Es versteht sich von selbst, dass eine nicht eingeplante Energiezufuhr von aussen im abgestimmten biochemischen Haushalt der Zelle, der Organe und der Individuen nur Unruhe stiften kann. Durch Ionisationen und Anregungen werden Biomoleküle,

Tabelle 1

Bestrahlung der Gonaden	= Gonadendosis (GD)
Bestrahlung der Gonaden mit Berücksichtigung der Reproduktionsfähigkeit	= genetisch signifikante Dosis (GSD)
Bestrahlung des gesamten Körpers	= Gesamt-Körperdosis
Bestrahlung des Knochenmarks	= Knochenmarkdosis
Bestrahlung des «roten» Knochenmarks	= Leukämie signifikante Dosis (LSD)
Bestrahlung einzelner Organe	= Organdosen

¹ Prof. Dr. H. Muth zum 60. Geburtstag gewidmet

² millirad = 1/1000 rad
 rad = Einheit der Strahlenmessung für absorbierte Dosis
 rem = Äquivalent-Dosis = biologisch wirksame Dosis
 1 rem entspricht 1 rad, wenn konventionelle Strahlung zur Anwendung gelangt.

rücksichtigt. Die Belastung des ganzen Körpers wird durch die Gesamtkörperdosis gemessen; die Leukämiesignifikante Dosis beschränkt sich auf die Belastung des roten Knochenmarks usw.

Die künstliche Strahlenbelastung des Menschen setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen, aus der weltweiten Verseuchung durch radioaktive Spaltprodukte bereits explodierter Atomwaffen, aus der Strahlenemission verschiedener technischer Produkte, wie Leuchtzifferblätter, Televisionsgeräte, aus dem Betrieb von Kernkraftwerken und der medizinischen Anwendung von strahlenden Stoffen.

Wie aus Tab. 2 hervorgeht, ist der Anteil der medizinischen Strahlenbelastung weitaus der grösste. Diese Strahlenexposition, die sich stets auf jedes Mitglied der gesamten Bevölkerung bezieht, kommt durch die diagnostische Anwendung der Röntgenstrahlen zustande. Eine kürzliche Untersuchung von Poretti (noch nicht veröffentlicht) hat ergeben, dass sich innerhalb von 15 Jahren die genetisch signifikante Gonadendosis des Schweizers verdoppelt hat und nunmehr etwa 43 millirem pro Jahr beträgt. Die Belastung des Knochenmarks liegt weit höher und dürfte nach den Berechnungen von Minder (noch nicht veröffentlicht) mindestens 150–200 mrem pro Kopf der Bevölkerung betragen. Im Gegensatz zur Strahlenexposition durch medizinische Anwendungen, durch berufliche Beschäftigung und verschiedene Quellen, wie Leuchtzifferblätter, fallen unter den Begriff Umwelts-Strahlung (als von Menschen produzierter Umweltfaktor) die Verseuchung durch Atomwaffen-Teste, durch Kernexplosionen für friedliche Zwecke (wie Untersuchung von unterirdischen Öl- und Gasquellen) und durch Energieprodukten vermittelt Kernspaltung. Die Strahlenbelastung des Weltbürgers durch die weltweite Verseuchung explodierter Atomwaffen ist im Sinken begriffen und beträgt jährlich etwa 4 mrem (Wert für USA 1970).

Tabelle 2
Strahlenbelastung des Menschen (ganzer Körper) Werte für USA 1970 (nach BEIR-Bericht 1972). [1]

Strahlenquellen	mrem/Jahr
<i>natürliche*</i>	
Kosmische Strahlen	44
Radionuklide im Körper	18
Externe Gammastrahlen	40
Total	102
<i>künstliche</i>	
Medizin (inkl. Zahnmedizin)	73
* Fall out	4
Verschiedenes	2
Berufliche Exposition	0,8
* Kernenergie	0,003
Total	79,803

* Umwelts-Strahlung

1.2 Strahlenbelastung durch Kernkraftwerke (KKW)

Diese wird verursacht durch die Emission von radioaktiven Gasen und Aerosolen sowie von flüssigen

radioaktiven Stoffen während des Betriebes. Abgegeben werden als gasförmige Komponenten kurzlebige radioaktive Edelgase wie Argon-41, Krypton-87, 88, 89, Xenon-133 etc., ferner Jod-131. Langlebig ist Krypton-85, das zur weltweiten Belastung beiträgt. Durch eine Bestrahlung von aussen (externe Bestrahlung) wird der Mensch durch Beta- und Gammastrahlen dieser Luft-Komponenten erreicht, genau wie durch externe natürliche, terrestrische und kosmische Bestrahlung. Wenn die Radionuklide eingeatmet oder in der Nahrung aufgenommen werden, wie z. B. radioaktives Jod, können die strahlenden Stoffe in den Körper gelangen und den Menschen von innen bestrahlen. So ist es möglich, dass radioaktives Jod Gras verseucht, welches von Kühen gefressen wird, deren Milch wiederum radioaktives Jod enthalten kann und Menschen belastet, welche die radioaktive Milch trinken. Natürlicherweise inkorporiert ein Mensch ebenfalls ständig strahlende Stoffe, die ihn von innen bestrahlen.

Kernkraftwerke geben aber auch in Flüssigkeiten radioaktive Komponenten ab, hauptsächlich Tritium, radioaktiven Wasserstoff, der den Menschen von aussen und von innen bestrahlen kann.

Die Strahlenbelastung durch KKW wurde errechnet unter Berücksichtigung der Verweildauer im Körper und der physikalischen Halbwertszeit der strahlenden Stoffe, sowie der Aufnahmemöglichkeit im menschlichen Körper etc. Die verschiedensten Messungen in Europa und in den USA (6,9) haben ergeben, dass in einem Umkreis von 0,5–10 km durchschnittlich mit einer jährlichen zusätzlichen Strahlenbelastung von 1 mrem zu rechnen ist, mit Spitzenwerten unmittelbar neben dem Kraftwerk von 5 mrem/pro Jahr (Tab. 3).

Tabelle 3
Strahlenbelastung durch Kernkraftwerke (USA) auf ungeschützte Personen in der Nähe im Jahre 1969 (nach UN-Bericht 1972). [9]

Kraftwerk	Population	m rad/a 6,4 km	Population	m rad/a 80 km Umkreis
Dresden	2 577	4,3	5 715 000	0,06
Humboldt Bay	18 940	3,6	101 000	1,1
Nine Mile Point	1 310	0,0008	533 000	0,00002
Big Rock	1 430	0,4	100 000	0,04

1.3 Einige Sonderberechnungen (nach 6)

Wenn beispielsweise ein Kind Milch von Kühen konsumieren würde, die innerhalb 500 m des KKW weiden, dann könnte dies zu einer jährlichen Belastung der Schilddrüse durch Jod-131 von weniger als 5 mrem führen. In Bradwell wurde die Strahlenbelastung durch mögliche Radionuklide studiert, die sich in Nahrungsmitteln akkumulieren könnten. So reichern Austern Zink und Silber an, Garneelen Cäsium. Es zeigte sich, dass Fischer, die sich in der Umgebung von KKW hauptsächlich mit diesen Nahrungsmitteln ernähren,

etwa 0,2–1,0 % der max. zulässigen Strahlenmengen ausgesetzt waren. Werden Verseuchungen in flüssiger Form betrachtet, zeigt es sich, dass ein Mensch, der lediglich das durch ein KKW verseuchte Wasser trinken würde, nur mit 1 % der maximal zulässigen Dosis belastet wäre. Die Berechnung beruht auf den höchsten festgestellten Verseuchungen.

Die kontrollierte Horgung von Radionukliden als Abfallprodukte der KKW wirft technische Probleme auf. Es ist zu erwarten, dass sie ohne Verseuchung der Umwelt möglich ist. Da keine Anhaltspunkte über eine eventuell mögliche Belastung der Menschen existieren und sich ebenso die Spekulationen über Naturkatastrophen und deren Auswirkungen unserer wissenschaftlichen Kompetenz entziehen, will ich mich nur auf die möglichen Folgen dieser gemessenen zusätzlichen Strahlenbelastung im normalen Betrieb eines KKW als neuem Umweltfaktor beschäftigen.

2. Gesundheitliche Risiken durch kleine Strahlenmengen

2.1 Grundsätzliches

1. Für die Beurteilung der Strahlengefährdung des Menschen sind folgende Strahlenwirkungen bedeutungsvoll, die mit kleinen Dosen erzeugt werden können und zum Teil schwerwiegende Folgen haben. Ein Minimum an Energie erzeugt ein Maximum an Wirkung: Genetische Änderungen (Mutationen) in Keimzellen und Körperzellen, Entwicklungsstörungen und Induktion von Krebs.

2. Für zumindest die Induktion von Mutationen in Körper und Keimzellen existieren keine Anhaltspunkte, dass es eine sog. unschädliche Dosis gibt. Die Dosis-effekt-Kurve verläuft durch den Nullpunkt, und jede zusätzliche Strahlenbelastung erhöht die Wahrscheinlichkeit einer Mutationsentstehung. Das gleiche gilt mit grösster Wahrscheinlichkeit für die Induktion von Krebs. Bei foetalen Strahlenbelastungen mit minimalen Dosen (im Bereich von 200 millirem) konnte beispielsweise (7) eine Erhöhung des Risikos, an Krebs zu erkranken, beobachtet werden. Auch für Entwicklungsstörungen liegen tierexperimentelle Beweise vor, dass Dosen von 5 rem signifikant die Missbildungsrate steigern. Für subtile Schäden dürfte die Wirkung minimaler Dosen ebenfalls gesichert sein.

Wir folgern, dass jede zusätzliche Strahlenbelastung unter Umständen schädlich sein kann.

3. Nicht nur die Strahlen-Belastung der Gonaden muss berücksichtigt werden, sondern auch die Exposition anderer Organe, der Haut, des Knochenmarks, usw., des gesamten Körpers. Für die Belange einer Strahlengefährdung der menschlichen Population als Ganzes ist die Zahl der induzierten genetischen Schäden in den Keimzellen wesentlich, die auf die Nachkommen übertragen werden und das Mutationsgut des Menschen auf fatale Weise vermehren können. Zur

Beurteilung der Strahlenschädigung des Individuums aber muss auch die somatische Strahlenbelastung berücksichtigt werden, die für den Einzelnen schicksalhaft sein könnte.

4. Die strahlenbiologische Forschung der neuen Zeit zeigte eindrücklich, dass die Strahlenwirkung nicht nur abhängig ist von der Qualität der Strahlen, sondern auch von der zeitlichen Verteilung der Dosis. Eine zeitlich-räumlich konzentrierte Energieabgabe fördert nicht nur Schädigungsmechanismen, die auf mehreren Ereignissen beruhen, sondern verhindert zum Teil die Erholung vom Strahlenschaden. Das Erholungsvermögen der geschädigten Biomoleküle, Strukturen, Zellen und Organe modifiziert in grossem Masse die Strahlenschädigung. Die verdünnte oder fraktionierte Bestrahlung, eine chronische Einwirkung kleinster Strahlenmengen ist deshalb für die gebräuchlichen Strahlenarten stets weniger wirksam als eine konzentrierte Applikation. Für die Schätzung der Gefahren einer medizinischen Anwendung der Strahlen sind deshalb Werte zur Risikoschätzung heranzuziehen, die mit konzentrierten Strahlenexpositionen gewonnen wurden, während bei der Beurteilung der Gefahren durch Kernkraftwerke die Wirkung verdünnter Dosen wesentlich ist.

2.2 Einige neue Schätzungen über den Zusammenhang: kleine Dosis – Effekt (siehe auch 4,5).

Die Schätzungen beruhen stets auf der hypothetischen Annahme, dass die Dosis-effekt-Kurve linear durch den Nullpunkt verläuft.

2.2.1. Mutationen in Keimzellen

Ionisierende Strahlen lösen verschiedene Typen von genetischen Änderungen in den Keimzellen aus, sog. (Gen)-Mutationen und Anomalien in der Struktur oder der Zahl von Chromosomen. Für jeden Mutationstyp existieren in Abhängigkeit vom Geschlecht des Bestrahlten, vom Alter der Keimzelle, von Milieufaktoren usw. verschieden hohe strahleninduzierte Mutationsraten. Durch eine verdünnte Strahlenapplikation wird (nach Mäuse-Experimenten) für alle Mutationstypen durchschnittlich eine Verdoppelungsdosis von etwa 100 rem geschätzt. Für konzentriertere Bestrahlungen dürfte die Verdoppelungsdosis (= die Dosis, welche die gleiche Zahl Mutationen induziert, wie sie natürlicherweise entstehen) zwischen 20–30 rem liegen.

2.2.2. Somatische Effekte

Mutationen in Körperzellen: Untersuchungen von Blutzellkulturen bestrahlter Menschen (beruflich strahlenexponierte Personen, Überlebende der Atombombenexplosionen etc.) zeigen, dass die Verdoppelungsdosen ähnlich denjenigen für Mutationen in Keimzellen sein dürften. Strahleninduzierte somatische Mutationen sind noch lange nach Exposition nachweisbar. Ihre Bedeutung ist nicht geklärt.

Tabelle 4

Schätzungen von Lewis der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Leukämie in verschiedenen Studien (aus Tsukamoto 1969). [8]

Studie	Strahlenart	Bestrahlte Körperregion	Wahrscheinlichkeit Fälle/10 ⁴ /rad/Jahr		
			Geschätzte Grenzen		Beste Schätzung
			untere	obere	
Atombomben-Überlebende	γ-Strahlen	Ganzer Körper	0,7	3	2
Spondylitis ankylopoetica	Röntgenstrahlen	Wirbelsäule	0,6	2	1
Thymusvergrößerung	Röntgenstrahlen	Oberkörper (Brust)	0,4	0,6	1
Radiologen	Röntgenstrahlen von Radium	Teile des Körpers	0,4	11	2

Sie könnten zum vorzeitigen Altern, resp. frühzeitigen Tod, zu immunologischen und hormonellen Disfunktionen führen oder aber auch Ausgangspunkt zur malignen Entartung der Zellen sein.

Entwicklungsstörungen: Das Ausmass und die Art der strahleninduzierten Entwicklungsstörung sind weitgehend abhängig vom Stadium des sich entwickelnden Lebewesens. Während der Organogenese appliziert, vermögen minimale Dosen verschiedene Anomalien auszulösen. Es konnte nachgewiesen werden, dass bestimmte Pharmaka wie Antibiotika, für Strahlenwirkungen sensibilisieren. Embryonale Strahlenschädigungen lassen sich in der medizinischen Strahlenanwendung weitgehend vermeiden, wenn die sog. 10-Tage-Regel befolgt wird, d. h. eine Frau im reproduktionsfähigen Alter sollte (lebensbedrohliche Umstände selbstverständlich ausgeschlossen) abdominal nur in den ersten 10 Tagen des Ovarialzyklus strahlendiagnostisch untersucht werden.

Induktion von Krebs: Verschiedene statistische Untersuchungen über die Strahleninduktion von Leukämie beim Adulten zeigten überraschende Überein-

Tabelle 5

Absolutes Karzinom-Risiko für Individuen (10 Jahre alt und mehr während der Bestrahlung) (nach BEIR-Bericht 1972). [1]

Ca-Risiko (absolut)	Tote (Fälle)* /10 ⁴ /a/rem
Leukämie	1*
Schilddrüse	1-4*
Brust-Ca (nur ♀)	1,5
GI-Trakt (inkl. Magen)	1,0
Knochen	0,2
Andere Ca	1,0
Lungen-Ca	1,3
	7,0-10,0 total

stimmungen in der Schätzung des Risikos durch geringe Strahlenmengen (Tab. 4). Untersuchungen der letzten Zeit bewiesen, dass eine zusätzliche Strahlenbelastung nicht nur die Bereitschaft, an Leukämie zu erkranken, vergrössert, sondern auch das maligne Wachstum in andern Organen stimuliert (Tab. 5).

Tab. 6 stellt das Krebsrisiko für alle Altersgruppen unter den Atombomben-Überlebenden dar. Da gerade in Japan die «natürliche Rate» von Krebs des Gastro-Intestinaltraktes hoch ist, stellt sich für diesen Tumor eine hohe Verdoppelungsdosis ein. Das gleiche gilt für Bronchialkarzinome. Interessant ist die niedrige Verdoppelungsdosis für die Induktion von Brustkrebs. Tatsächlich vermehrt auch die wiederholte Strahlenbelastung des Brustgewebes durch Durchleuchtungen das Risiko, an Mammakarzinom zu erkranken.

Tabelle 6

Karzinom-Risiko für alle Altersgruppen unter den Atombomben-Überlebenden (nach BEIR-Bericht 1972). [1]

	«spontan» in 1 Mill.	1 rad in 1 Mill.	Verdoppelungsdosis in rad
Leukämie	45	1,71	26
Lungen-Ca	178	0,85	215
Brust-Ca	67	2,43	28
GI (ohne Magen-Ca)	618	0,76	813

Das Risiko, an Krebs durch kleine Strahlenmengen zu erkranken, steigt mit abnehmendem Alter. Der Jugendliche, das Kind, die Neugeborenen sind gefährdeter und selbst eine Strahlenexposition des Embryos im Mutterleib durch eine röntgendiagnostische Untersuchung der Mutter mit Filmaufnahmen scheint nach den Untersuchungen von Stewart (7) das Risiko, später an Krebs zu erkranken, eindeutig zu erhöhen.

3. Betrachtungen über die genetischen und somatischen Folgen der künstlichen zusätzlichen Strahlenbelastung durch Kernkraftwerke

Betrachtungen über mögliche gesundheitliche Schädigungen durch die künstliche Strahlenbelastung können nur unter Berücksichtigung der natürlichen Strahlenbelastung und des «natürlichen» Auftretens der möglichen gesundheitlichen Schäden angestellt werden. Den nachfolgenden Überlegungen liegt die Hypothese zugrunde, dass die Dosis-Effekt-Beziehung auch im untersten Dosisbereich linear und durch den Nullpunkt verläuft.

3.1. Genetische Schäden

Die natürliche Mutationsrate in den Keim- und Körperzellen ist sehr gross. Vermutlich sind Stoffwechselstörungen und unbekannte chemische Faktoren an der Entstehung der sog. spontanen Mutationen beteiligt. In Tab. 7 ist die mögliche Erhöhung der natür-

lichen Mutationsrate durch die künstliche Belastung (Kernkraftwerke und medizinische Anwendung als Beispiele dargestellt. Für den gesamten Mutationsbereich wird für kleine Dosen und verdünnte Bestrahlung eine Verdoppelungsdosis von 100 rem = 100 000 millirem angenommen. Sie gilt für die chronische natürliche Belastung und die künstliche Belastung durch Kernkraftwerke. Für die medizinische Anwendung ionisierender Strahlen muss die Verdoppelungsdosis für konzentrierte Bestrahlung verwendet werden, d. h. 20 rem = 20 000 millirem. Wir sehen, dass in der Umgebung eines Kernkraftwerkes (innerhalb 10 km) durch das Maximum an Strahlenbelastung von 5 mrem pro Jahr, ausgerechnet für 30 Jahre Belastung = 150 mrem, die natürliche Mutationsrate um 1/700 erhöht wäre. Die medizinische Belastung dürfte für 30 Jahre mit 1500 mrem die natürliche Mutationsrate um etwa 1/14 erhöhen.

Tabelle 7
Strahlenbelastung, Anteil an der natürlichen Mutationsrate

natürliche Belastung des Schweizlers (verdünnte Bestr.) für 30 Jahre	2700-9900 mrem	1/10-1/40
medizinische Belastung (konz.) für 30 Jahre	1500 mrem	1/14
Kernkraftwerke (verdünnt) für 30 Jahre	30 mrem max 150 mrem	1/3500 1/700

Werden die genetisch bedingten Anomalien und Defekte berechnet, die in der ersten Generation sichtbar werden, dann würden in der Umgebung eines Kernkraftwerkes (auf 10 000 Geburten berechnet) im pessimistischen Falle 0,04 Fälle pro Jahr bemerkt werden, im optimistischen Falle 0,002. Dieser Risikoanstieg ist vernachlässigbar klein im Verhältnis zu den genetischen Schäden, welche durch die medizinische Belastung und durch die natürliche Strahlenbelastung entstehen könnten. Natürlicherweise entstehen in der Schweiz etwa 6000 neue Mutationen in den Geburten

Tabelle 8
«Natürliche» und strahleninduzierte neue Mutationen bei den Geburten in der Schweiz (Annahme 100 000 Geburten pro Jahr).

natürlicherweise neue Mutationen in Geburten pro Jahr	6000		
konzentrierte Bestrahlung medizinische Anwendung genetisch signifikante Gonadendosis	1 Jahr	50 mrem:	9
	30 Jahre	1500 mrem:	270
verdünnte Bestrahlung Kernkraftwerke Umgebung (10 000 Personen)	1 Jahr	5 mrem	0,0006
	30 Jahre	150 mrem	0,018
wenn ganze Schweiz in Umgebung	1 Jahr	5 mrem	0,3

pro Jahr. Selbst wenn die ganze Schweizer Bevölkerung in der Umgebung von Kernkraftwerken leben würde, könnte diese zusätzliche Belastung lediglich 0,3 neue Mutationen in den Geburten pro Jahr erzeugen (Tab. 8).

3.2. Somatische Schäden

Die Erzeugung von Entwicklungsstörungen, also embryonalen Strahlenschäden, ist besonders für die medizinische Belastung von Bedeutung, da nur bestimmte Entwicklungs-Stadien nach kleinen aber konzentrierten Belastungen mit Anomalien antworten. Eine verdünnte chronische Bestrahlung, verteilt über 1 Jahr, wie sie durch die Belastung durch Kernkraftwerke zustande kommt, wird nicht wirksam sein.

Hingegen ist es wahrscheinlich, dass das Risiko an Krebs zu erkranken, auch durch kleinste chronische Einwirkungen minimal erhöht wird. Für das Risiko der Induktion von Krebs darf nicht die genetisch signifikante Gonadendosis berücksichtigt werden, sondern die gesamte Körperbelastung, wiederum unter der hypothetischen Annahme einer linearen Dosis-Effekt-Beziehung im niedrigsten Dosis-Bereich. Die angegebenen Werte sind wahrscheinlich eher zu hoch, könnten aber auch stimmen oder sogar zu niedrig sein. Während infolge der medizinischen Belastung mit 100-200 mrem pro Jahr mit etlichen zusätzlichen Krebs-Todesfällen in der gesamten Population der Schweiz pro Jahr gerechnet werden kann, würde in der Umgebung eines Kernkraftwerkes mit der maximalen Belastung von 5 mrem (gerechnet auf 10 000 Bewohner), sich eine zusätzliche Zunahme von 0,001 Fällen ergeben (Tab. 9),

Tabelle 9
Total Krebs-Todesfälle und künstliche Strahlenbelastung

Krebstodesfälle		
natürlicherweise (Schweiz)		12 000/Jahr
Schätzung (pessimistisch, wenig wahrscheinlich)		
KKW Umgebung		
1 KKW: 10 000 Pers.		
1 mrem (max 5 mrem)	0,0002 (0,001)/Jahr	
10 KKW: 10 x 10 000 Pers.	0,002 (0,01) /Jahr	

Tabelle 10
Leukämien und Strahlenbelastung durch KKW

Leukämien natürlicherweise (Schweiz)		60-70 in 1 Million
Bei zusätzlicher Strahlenbelastung 1000 mrem (Vergleich Lungenkrebsinzidenz in der Schweiz		+ 1-2 in 1 Million 250 in 1 Million)
Leukämien natürlicherweise (Schweiz)		60 000-70 000 in 1 Milliarde
Umgebung KKW 1 mrem		+ 1-2 in 1 Milliarde
		Bestrahlter
(max 5 mrem)		+ 5-10 in 1 Milliarde
(Vergleich: Lungenkrebsinzidenz in der Schweiz		250 000 in 1 Milliarde)

dies unter pessimistischen (wenig wahrscheinlichen) Annahmen.

Verglichen mit der natürlichen Krebshäufigkeit tritt ein kaum registrierbares kleines Risiko auf. Für die Induktion von Leukämie ist in Tab. 10 eine weitere Risikoschätzung dargestellt, die einen Vergleich mit der spontanen Krebsrate und der Häufigkeit des Bronchialkarzinoms, das zum grössten Teil durch Rauchen induziert wird, gestattet.

3.3. Vergleich mit andern Umweltfaktoren

Es muss angenommen werden, dass sowohl Mutationen als auch embryonale Schädigungen und Krebsinduktion durch Stoffwechselfaktoren und Chemikalien unserer Biosphäre verursacht werden. Bereits sind Hunderte von Chemikalien bekannt, die Mutationen und Krebs auslösen können, und heute wird die wichtige Frage untersucht, welche Pestizide, Pharmaka, Narkotika, Nahrungsmittel und Zusätze schädigend wirken können. Die Fragestellung ist schwierig und kaum lösbar, wenn man über jeden Stoff soviel Informationen gewinnen möchte, wie über die energiereiche Strahlung. Man denke sich eine Arbeit über 30 Jahren an mehreren Zentren für ein zu testendes Agens unter Hunderten. Bekannt sind nicht nur mutagene und kanzerogene Agentien, sondern auch Stoffe, welche die Heilung von DNS-Schäden verhindern, wie Coffein, und damit die Mutationsrate erhöhen.

Als Beispiel sei eine Arbeit von Ehrenberg (3) zitiert:

Er berechnet für Aethylenoxid, einen Stoff, der in der Industrie häufig Verwendung findet und auch zur Sterilisierung von Nahrungsmitteln gebraucht wird, dass eine Gewebedosis von 1 millimol pro Stunde einer Strahlen-Dosis von 80 rem entspricht. Arbeiter in Aethylenoxidfabriken können so eine wöchentliche Gonadendosis erhalten, die genetisch etwa 4000-8000 mrem pro Woche entspricht. Dieses Risiko wäre etwa 50mal grösser als die maximal zulässige Dosis für mit Strahlen Beschäftigte (100 mrem pro Woche).

4. Schlussfolgerungen

Die maximale zusätzliche Strahlenbelastung in der Umgebung eines Kernkraftwerkes bewegt sich mit 5 millirem im Jahr innerhalb der natürlichen Strahlenbelastung, die für den Schweizer durchschnittlich zwischen 90 mrem und 330 mrem schwankt. Mit grösster Wahrscheinlichkeit existieren für genetische Effekte und für die Krebsinduktion keine absolut ungefährlichen Dosen. Da natürliche und künstliche Strahlen, natürliche und künstlich erzeugte Radionuklide biologisch gleich wirken, dürfte auch eine höhere natürliche Strahlenbelastung gesundheitliche Folgen haben. Untersuchungen der jüngsten Zeit (z. B.), die sich mit diesem Problem beschäftigten, konnten bislang keine erhöhte Gefährdung durch eine grössere natürliche Strahlenbelastung nachweisen. Vermutlich verschleiern

zusätzliche Umweltfaktoren das Bild oder entziehen sich die vermutlich seltenen Ereignisse der Schädigung durch kleinere Strahlenmengen der statistischen Erfassung.

Eine zeitlich verteilte (verdünnte, fraktionierte) Bestrahlung ist zum mindesten für eine räumlich nicht konzentrierte Energieabgabe stets weniger wirksam als eine konzentrierte. Selbst die maximal festgestellte Strahlenbelastung von 5 mrem pro Jahr im 10-km-Umkreis eines Kernkraftwerkes dürfte berechnet für 30 Jahre Belastung lediglich 1/700 der natürlichen Mutationsrate bewirken und ist im Vergleich zur natürlichen Strahlenbelastung vernachlässigbar. Das gleiche gilt für die Induktion von Krebs und für andere körperliche Schädigungen.

Für die im Kernkraftwerk Arbeitenden gelten selbstverständlich wie für alle mit Strahlen Beschäftigten die Vorschriften des Strahlenschutzes. Nach den heutigen Vorstellungen besteht keine Veranlassung, die bislang konzipierten maximal zulässigen Dosen zu ändern. Im Gegenteil, die Beurteilung sowohl des genetischen Strahlenrisikos als auch des Krebsrisikos ist in den unteren Bereichen eher zu pessimistisch, da die lineare Dosis-effekt-Beziehung nicht bewiesen ist. Immerhin gilt es nach wie vor, jede nichtgerechtfertigte Strahlenbelastung zu vermeiden, eine Forderung, die mit Nachdruck an all diejenigen gerichtet ist, die zur künstlichen Strahlenbelastung des Menschen beitragen.

Zusammenfassung

Die Arbeit zeigt Schätzungen und Berechnungen bezüglich des Risiko, durch die im Normalbetrieb eines Kernkraftwerkes erzeugte Strahlenbelastung an Leukämien, andern Neubildungen, Missbildungen oder durch Mutationen bedingte Leiden zu erkranken. Das Risiko wird verglichen mit der natürlichen Inzidenz dieser Krankheiten und mit dem durch die medizinische Strahlenbelastung erzeugten Risiko. So wird beispielsweise geschätzt, dass in der Schweiz je nach Gegend die natürliche Strahlenbelastung etwa $1/10$ bis $1/40$ der natürlichen Mutationsrate und die medizinische Belastung etwa $1/14$ induzieren könnte. Das Wohnen im Umkreis eines Kernkraftwerkes erhöht die Mutationsrate dagegen höchstens um $1/1000$. Ähnliches gilt für die andern erwähnten Krankheiten.

Résumé

Risques pour la santé dus aux radiations produites par les centrales nucléaires

Ce travail présente des estimations et des calculs portant sur les risques de leucoses et autres néoplasies, de malformations ou d'affections provoquées par des mutations, inhérentes au fonctionnement normal des centrales nucléaires.

Ces différents risques sont comparés d'abord à l'incidence naturelle de ces affections, puis aux risques liés à l'utilisation médicale des radiations ionisantes; une dernière comparaison s'effectue avec l'irradiation naturelle individuelle, qui varie considérablement d'un endroit à l'autre en Suisse. C'est ainsi qu'on estime, par exemple, que, suivant les régions, un dixième à un quarantième du taux naturel de mutation peut être attribué aux sources naturelles d'irradiation et qu'en moyenne, l'irradiation iatrogène devrait augmenter ce taux d'environ un quatorzième. Quant à la résidence au voisinage d'une centrale nucléaire, elle ne contribuerait à accroître ce taux que de un sept-centième au plus. Pour les autres affections mentionnées, on obtient des accroissements du même ordre de grandeur.

Summary

Health risks from high energy radiation emanating from nuclear power plants

The article gives estimates and calculations of the supplemental risk of leukemia or other neoplasias, malformations or disease by mutation that has to be expected from radiation produced through normal use of nuclear power plants. This risk is compared to the normal risk of these illnesses and the supplemental risk due to medical uses of radiation. A further comparison is made with the natural radiation load of the Swiss, which shows considerable variation depending on location of residence. Thus, it is estimated that in various regions of Switzerland, $1/10$ to $1/40$ of the natural rate of mutation is due to natural sources of radiation, whereas radiation from medical sources increases the rate of mutation by $1/14$. On the other hand, living in the surroundings of a nuclear power plant would increase the mutation rate at the most by $1/700$. Similar orders of magnitude apply for the other above-mentioned diseases.

Literatur

- [1] *BEIR-Bericht 1972: The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation.* National Academy of Sciences, Nat. Research Council Washington, D.C. 20006, Nov. 1972
- [2] *Eckhoff N. D., Shultis J. K., Clack R. W. and Ramer E. R.: Correlation of Leukemia Mortality Rates with Altitude in the United States.* Health Physics (Pergamon Press) Vol. 27, 1974, p. 377.
- [3] *Ehrenberg L., Hiesche K. D., Osterman-Golkar S., Wennberg I.: Evaluation of genetic risks of alkylating agents tissue doses in the mouse from air contaminated with ethylene oxide.* Mutation Research 24, p. 83 (1974).
- [4] *Fritz-Niggli Hedi: Anforderungen an die Reaktorsicherheit aus der Sicht der Strahlenbiologie – Genetische Aspekte.* In: Schweiz. Vereinigung für Atomenergie (Hrsg.) Informationstagung Sicherheit von Kernkraftwerken, Tagungsreferate 25./26.11.74 Zürich/Oerlikon, p. II-1.
- [5] *Hug O.: Anforderungen an die Reaktorsicherheit aus der Sicht der Strahlenbiologie – Somatische Aspekte.* In: Schweiz. Vereinigung für Atomenergie (Hrsg.) Informationstagung Sicherheit von Kernkraftwerken, Tagungsreferate 25./26.11.74 Zürich-Oerlikon, p. I-1.
- [6] *Report of the Commission of the European Communities: Radioactive effluents from nuclear power stations in the Community – Discharge Data – Radiological Aspects, April 1974.* Direktorat of Health Protection – Doc. V/1973/74 e Centre Louvigny, Luxembourg (GD).
- [7] *Stewart A.: An Epidemiologist takes a look at Radiation Risks.* DHEW Publication No. (FDA) 73-8024, BRH/DBE 73-2. Jan. 1973 (US Department of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, Food and Drug Administration, Bureau of Radiological Health, Rockville, Maryland 20852).
- [8] *Tsukamoto K.: Biological effects of atomic bomb survivors in Hiroshima and Nagasaki.* In: Duhamel A.M.F. (Hrsg.) Progress in Nuclear Energy, Series XII, Health Physics 2, Part 1, Pergamon Press, Oxford 1969, p. 105.
- [9] *United Nations Report: Ionizing Radiation. Levels and Effects, Vol. I and II. Vol. I: Levels, Vol. II: Effects, New York 1972.*

Adresse des Autors

Prof. Dr. Hedi Fritz-Niggli, Strahlenbiologisches Institut der Universität Zürich, August-Forel-Str. 7, CH-8029 Zürich.