

# Radioaktiver Kohlenstoff aus Atomexplosionen und die schwellenunabhängigen biologischen Auswirkungen

von Andrei Dmitrijewitsch Sacharow

## ***Vorwort von Frank von Hippel***

In diesem Artikel, der im Juni [! sic: im Juli; AdÜ] 1958 im sowjetischen Journal Atomenergie erschienen ist, berechnet Sacharow, dass in Folge einer oberirdischen Atomexplosion mit der Sprengkraft von einer Megatonne schlussendlich rund 10.000 Menschen durch die Radioaktivität an Krebserkrankungen, genetischen Defekten und anderen Störungen zu leiden haben würden. Diese Einschätzung bedeutet für den 1961 durch die Sowjets gezündeten Atomtest mit einer Sprengkraft von 58 Megatonnen (MT), dass auf lange Sicht nur durch diese eine Atomexplosion etwa eine halbe Million Menschen geschädigt werden bzw. den Tod finden. Die Detonation der Bombe erzeugte außerdem 10 % des Fallouts aller bis dahin durchgeführten oberirdischen Atomexplosionen.

Sacharow drang mit seinen Begründungen gegen diese Art von Tests bis zu Chruschtschow vor. Er wurde aber – laut eigenen Angaben – von Chruschtschow in schroffem Ton darauf hingewiesen, dass die Verantwortung der Wissenschaftler beim Entwurf der Waffen liege, dass es aber die Verantwortung der Regierung sei, darüber zu entscheiden, wie diese Waffen einzusetzen sind. Damit war es mit Sacharows Glauben vorbei, dass über den Dienstweg etwas zu erreichen sein könnte. Obwohl das sowjetische Journal, in dem dieser Artikel erschien, übersetzt wurde und in englischer Sprache erschien, und obwohl auch unabhängige US-amerikanische Wissenschaftler, insbesondere Linus Pauling, zu einer ähnlichen Einschätzung kamen, wurde dieser Aufsatz von Sacharow im Westen fast nicht wahrgenommen. Hat sich Sacharows Einschätzung über die Jahre also bewährt? In einem kurzen Anhang vergleiche ich seine Annahmen über die Strahlenbelastung und deren biologische Auswirkungen auf die Bevölkerung mit den neuesten Einschätzungen bei gleichen Ausgangsbedingungen. Sacharows Einschätzung der Dosisbelastung der einzelnen Mitglieder der Bevölkerung scheint etwas zu hoch zu sein, der Parameter, der die Gesundheitsauswirkungen durch die Belastung angibt, aber zu niedrig. Sein Ergebnis ist in guter Übereinstimmung mit den Annahmen, die heute für richtig gehalten werden, nämlich, dass die Niedrigstrahlung, die von dem bei den Explosionen erzeugten Kohlenstoff-14 ( $^{14}\text{C}$ ) ausgeht und anschließend über Jahrtausende in der Biosphäre zirkuliert, pro Megatonne Sprengkraft bei atmosphärischen Atomtests 10.000 Tote zu erwarten sind, sowie darüber hinausgehend die unterschiedlichsten Gesundheitsbeeinträchtigungen.

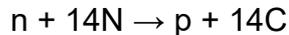
Frank von Hippel

Vorsitzender des US-amerikanischen Redaktionskollegiums

Dieser Artikel ist ursprünglich in der sowjetischen Zeitschrift Atomenergie (Атомная энергия), 4, 6, im Juni [sic!] 1958 erschienen und wurde von der Firma Consultants Bureau ins Englische übersetzt. Sie wurde in der Zeitschrift Science & Global Security 1, 4 im Jahr 1990 veröffentlicht. Der Neuabdruck erfolgte im Zuge des 20-jährigen Jubiläums dieser Zeitschrift.

## 1. Einleitung

Bei jeder Atomexplosion, und das schließt die sogenannten „sauberen“ (nicht auf Atomspaltung basierenden) Wasserstoffbomben ein, wird eine gewaltige Anzahl von Neutronen an die Atmosphäre abgegeben (siehe § 2), die dann von dem dort vorhandenem Stickstoff in der folgenden Reaktion



eingefangen werden, wodurch das langlebige radioaktive Kohlenstoff-Isotop  ${}^{14}\text{C}$  entsteht. Dieser radioaktive Kohlenstoff gelangt in menschliches Gewebe, wo er zerfällt und dadurch Strahlenschäden verursacht, und zwar mit einer Dosis von  $7,5 \cdot 10^{-4} \text{ R}$  [ $1 \text{ R} \sim 1 \text{ rad} \sim 0,01 \text{ Gray} \sim 10 \text{ mSv}$ ] pro Megatonne Sprengkraft (siehe § 3).

Um das Ausmaß des Schadens für die Menschheit durch diese Produktion von radioaktivem Kohlenstoff abschätzen zu können, werde ich folgende Annahmen treffen:

- Die Bevölkerung der Erde über die nächsten paar tausend Jahre wird bei 30 Milliarden Menschen liegen
- Eine Belastung der Keimzellen mit  $1 \text{ R}$  führt in  $10^{-4}$  Fällen zu Erbkrankheiten
- Andere schwellenunabhängige biologische Effekte verdreifachen die Anzahl von Opfern (siehe § 4)

Die Gesamtzahl der Opfer von radioaktivem Kohlenstoff liegt also bei obigen Annahmen bei 6.600 Personen. Diese Anzahl verteilt sich über einen Zeitraum von zirka 8.000 Jahren. Hinweisen in den Daten von O.I. Leipunsky zufolge<sup>1</sup> erhöhen schwellenunabhängige biologische Effekte durch radioaktives Strontium und äußerliche Strahlung durch radioaktives Cäsium die Anzahl der Opfer in unserer Generation und in der darauf folgenden um den Faktor 1,5. Die Gesamtanzahl der Opfer auf Grund der bereits durchgeführten Tests (einer Sprengkraft von 50 Megatonnen) wird auf 50.000 geschätzt. Dies scheint eine konservative Annahme zu sein. Man kann legitimerweise nicht ausschließen, dass die Gesamtzahl von Opfern bereits bei einer Million liegt und dass diese Zahl jährlich um 200.000 bis 300.000 Menschen ansteigt.

Die Fortsetzung der Tests und alle Bestrebungen, Kernwaffen und deren Tests zu legalisieren, widersprechen der Humanität und dem internationalen Recht. Die von sogenannten „sauberen“ (nicht auf Atomspaltung basierende) Bomben ausgehende radioaktive Gefahr entzieht jeglichen propagandistischen Beteuerungen, dass es sich auf Grund des speziellen Charakters dieser Waffe nicht um ein Instrument der Massenvernichtung handle, die Basis.

## 2. Die Bildung von Neutronen bei Kernexplosionen

In einer Atomexplosion (durch Atomspaltung) wird jeder Zerfallsakt von einer Vergrößerung der Neutronenanzahl um den Faktor  $\nu - 1$  begleitet (wobei  $\nu$  der Anzahl der erzeugten Neutronen durch die bei der Spaltung eingefangenen Neutronen entspricht). Eine unbedeutende Zahl von Neutronen wird vom umhüllenden Material absorbiert (wobei Plutonium entsteht). Wir nehmen an, dass bei jeder einzelnen Spaltung (bei 180 MeV) die Anzahl der erzeugten Neutronen  $\nu - 1 = 1,5$  beträgt. Im Sprachgebrauch des Militärs wird die Explosionsenergie als TNT-Äquivalent angegeben. Eine Explosion von einer Megatonne TNT entspricht der Spaltung von 60 kg Uran oder Plutonium, mit einer

Abstrahlung von  $2,25 \times 10^{26}$  Neutronen.

Es gibt zwei verschiedenen Arten von thermonuklearen Bomben, und zwar solche, die flüssiges Deuterium, und solche, die ein chemisches Gemisch von Deuterium mit dem leichten Isotop  ${}^6\text{Li}$  nutzen. Die erste dieser Bomben erzeugt viel mehr Neutronen pro Energieeinheit. Wir werden jedoch unsere Überlegungen auf den zweiten Typ beschränken, denn es scheint, als ob es gerade dieser Typ ist, dem zurzeit am meisten Aufmerksamkeit geschenkt wird. Die grundlegenden Reaktionen, die in dieser Bombe ablaufen, sind:



Die effektive Wahrscheinlichkeit (also der Querschnitt multipliziert mit der Reaktionsintensität) ist bei den Reaktionen (3) und (4) ungefähr hundertmal größer als bei den Reaktionen (1) und (2).

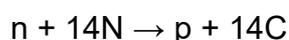
Die meiste Explosionsenergie kommt von den „schnellen“ Reaktionen (3) und (4). Diese Reaktionen unterstützen sich gegenseitig, und zusammengenommen lassen sie die Gesamtanzahl von Neutronen und Tritiumkernen unverändert. Die „langsamen“ Reaktionen (1) und (2) sind die anfänglichen Neutronen- und Tritiumquellen.

Eine detaillierte Untersuchung der Kinetik der Reaktionen (1) – (4) zeigt, dass, sobald das  ${}^6\text{Li}$  ausreichend abgebrannt ist, ein Zyklus der Reaktionen (3) und (4) ungefähr 0,2 Neutronen und 0,2 Tritiumkerne hinterlässt, die als Resultat aus (1) und (2) entstehen. In diesem Zyklus werden 22 MeV Energie frei, was bedeutet, dass ein Neutron pro 110 MeV Puls frei wird. Diese Zahl ist der von  $180 \text{ MeV} / 1,5 = 120 \text{ MeV}$  für eine einzelne Atomspaltung sehr nahe.

In einer Wasserstoffbombe mit einer Uranummantelung resultiert ein großer Teil der Energie aus der Spaltung von  ${}^{238}\text{U}$  durch schnelle Neutronen aus den Reaktionen (4) und (1). Da aber die Anzahl von Neutronen pro Energieeinheit für eine Kernspaltung und einen thermonuklearen Puls fast gleich sind, können wir sagen, dass in letzterem Fall ebenso  $2,25 \times 10^{26}$  Neutronen pro Megatonne entstehen.

### **3. Berechnung der Strahlungsdosis**

Wir werden experimentell erhobene Daten benutzen, die sich auf  ${}^{14}\text{C}$  natürlicher Herkunft beziehen<sup>2,3</sup>. Die kosmische Strahlung löst eine Vielzahl an atomaren Reaktionen in den oberen Schichten der Atmosphäre aus, und ein Resultat dieser Reaktionen ist die Bildung von Neutronen mit einer Rate von 2,6 – 2,4 Neutronen pro  $\text{cm}^2$  und Sekunde. Ungefähr 95% davon werden, nachdem die Neutronen abgebremst wurden, von atmosphärischem Stickstoff eingefangen, wodurch mittels nachfolgender Reaktion  ${}^{14}\text{C}$  entsteht:



Die Halbwertszeit von  ${}^{14}\text{C}$  beträgt 5570 Jahre. Auch in biochemischen Abläufen verhält sich  ${}^{14}\text{C}$  sehr ähnlich wie stabiler Kohlenstoff. Während dieser Verweildauer erreicht die Konzentration von  ${}^{14}\text{C}$  ein Gleichgewicht mit dem stabilen Kohlenstoff im sogenannten

Austauschreservoir, also atmosphärischem Kohlenstoff in Form von CO<sub>2</sub>, dem Kohlenstoff in Flüssen und Meereswasser in löslichen Verbindungen und schließlich dem Kohlenstoff in Lebewesen. Die Konzentration von natürlichem <sup>14</sup>C wurde experimentell festgestellt. In 1 Gramm natürlichem Kohlenstoff aus dem Tauschreservoir finden 0,25 Zerfälle pro Sekunde statt, was  $6 \cdot 10^{10}$  Atomen <sup>14</sup>C in  $5 \cdot 10^{22}$  Atomen Kohlenstoff entspricht. Die Oberfläche der Erde misst  $5 \cdot 10^{18}$  cm<sup>2</sup>. Daraus ergibt sich, dass die Wahrscheinlichkeit für den Zerfall eines einzigen <sup>14</sup>C Atoms in der Atmosphäre pro Gramm Kohlenstoff im Austauschreservoir bei  $0,25 / (2,6 \cdot 5 \cdot 10^{18}) = 2 \cdot 10^{-20}$  liegt.

Wir werden annehmen, dass sich das geochemische Umfeld der Erde über die nächsten paar tausend Jahre nicht wesentlich verändert. Dann aber gilt die Zerfallswahrscheinlichkeit für ein Gramm Kohlenstoff, welches wir für natürliches <sup>14</sup>C ermittelt haben, auch für die Kohlenstoffisotope, welche bei der Detonation von Atombomben entstehen.

Die gleiche Aussage kann auch durch lineare Gleichungen beschrieben werden. Jede Lösung eines linearen Gleichungssystems (mit den unabhängigen Variablen x und t), dessen rechte Seite q(t) am Punkt x = 0 ist, kann durch eine Superposition von einzelnen Lösungen nach folgender Art ausgedrückt werden:

### Einzellösung

$$\text{Ansatz: } \delta(x)\delta(t-t_0)$$

$$\text{Lösung: } n(x, \tau)$$

### Überlagerung

$$\text{Ansatz: } \delta(x)q(t)$$

$$\text{Lösung: } N(x, t) = \int_0^{\infty} q(t-\tau)n(x, \tau) dx$$

wobei gilt:  $\tau = t - t_0$  und n eine Greensche Funktion ist.

Für den speziellen Fall eines steten Ausgangs q<sub>0</sub> am Punkt x = 0 ist die Lösung für x = x<sub>0</sub>

$$N_0(x_0) = q_0 \int_0^{\infty} n(x, \tau) d\tau \Rightarrow \int n d\tau = \frac{N_0}{q_0}$$

In unserem Fall beschreibt x die Koordinaten von Punkten im Austauschreservoir und x = 0 die oberste Schicht der Atmosphäre; q<sub>0</sub> = 2,6 / 4πR<sup>2</sup> Neutronen cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>; N<sub>0</sub> = 0,25 Zerfälle s<sup>-1</sup> g<sup>-1</sup>; R = 6,3 · 10<sup>8</sup> ist der Radius der Erde in Zentimetern; n(x<sub>0</sub>, t – t<sub>0</sub>) ist die Anzahl von Zerfällen pro Gramm natürlichen Kohlenstoffes pro Sekunde am Punkt x<sub>0</sub> zur Zeit t dividiert durch die in der Atmosphäre zum Zeitpunkt t<sub>0</sub> produzierte Anzahl von <sup>14</sup>C Atomen.

Wir erhalten somit  $\int n \, dt = 2 \cdot 10^{-20}$  pro Gramm.

Bei einer Explosion von einer Megatonne erhalten wir  $(2,25 \cdot 10^{26}) \cdot (2 \cdot 10^{-20}) = 4,5 \cdot 10^6$  Zerfälle pro Megatonne und Gramm.

Wir drücken die Strahlungs-dosis in Röntgen aus, setzen ein Röntgen ungefähr einem Rad (rd) gleich, also jener Dosis, die zirka 100 erg ionisierender Energie pro Gramm Gewebe entspricht.

Die maximale Energie des  $^{14}\text{C}$  Beta-Zerfalls beträgt 0,154 MeV, von dem ungefähr zwei Drittel durch Abgabe eines Neutrinos entweichen. Daher werden im Gewebe rund 0,05 MeV frei, oder  $8 \cdot 10^{-8}$  erg pro Zerfall.

Unter der weiteren Annahme, dass Kohlenstoff einen Anteil von rund 18% am Körpergewicht hat, ergibt sich als Gesamtenergie, die pro Gramm Gewebe als Resultat einer 1 Megatonnen-Bombe frei gesetzt wird:  $0,18 \cdot 4,5 \cdot 10^6 \cdot 8 \cdot 10^{-8} = 7,0 \cdot 10^{-2}$  erg/g =  $7,5 \cdot 10^{-4}$  R

Die Daten sind nicht so gut, wenn wir zur Verteilung des Zerfalls auf der Zeitachse kommen, also dem Aufbau der Funktion  $n(x_0, t)$ . Unter der Nutzung von Andersons<sup>3</sup> Schätzung von  $8,5 \text{ g/cm}^2$  für die Masse im Austauschreservoir können wir annehmen, dass sich ein Gleichgewicht in relativ kurzer Zeit einstellt, jedenfalls gemessen an der Halbwertszeit von  $^{14}\text{C}$ , und dass das  $^{14}\text{C}$  das Reservoir nur in einem vernachlässigbaren Ausmaß wieder verlässt. Auf Grund dieser Annahmen wird die Zeitabhängigkeit des Zerfalls ein Exponential der Form  $\exp(-t/8000 \text{ Jahre})$  sein.

#### **4. Schwellenunabhängige biologische Auswirkungen von Strahlung**

Ein thermonuklearer Krieg beinhaltet die potentielle Gefahr, dass die gesamte Menschheit einer tödlichen Strahlendosis ausgesetzt werden könnte (ungefähr 600 rad). Diese Gefahr scheint durch die Atombombentests nicht gegeben zu sein, da bei der jetzigen Anzahl von Tests die Dosis pro Person 1 Röntgen nicht übersteigt. Nichtsdestoweniger werden Milliarden von Menschen dieser Dosis zusätzlich zur Hintergrundstrahlung ausgesetzt und sie werden es (im Falle von  $^{14}\text{C}$ ) für hunderte Generationen bleiben. Das Maß an Krankheit, das durch die zusätzliche Strahlung der Atombombentests unter diesen Bedingungen hervorgerufen wird, ist durch die sogenannten schwellenunabhängigen biologischen Effekte gegeben. Die Anzahl ist proportional zur Gesamtdosis für die ganze Menschheit (also die Dosis in Röntgen pro Person multipliziert mit der Anzahl von Menschen), unabhängig von der Aufteilung der Strahlung in der Population oder ihrer Abhängigkeit von der Zeitachse.

Der einfachste schwellenunabhängige Effekt der Strahlung ist die Auswirkung auf das Erbmaterial<sup>4-6</sup>. Die Erbeigenschaften werden durch die Gene weitergegeben, eine spezielle Struktur in den Chromosomen der Zellkerne. Eine einzige Ionisation ist ausreichend dafür, dass es zu einer unumkehrbaren Veränderung in einem Gen kommen kann (eine sogenannte Mutation), sodass genetische Veränderungen als Resultat von schwächsten Strahlungsdosen auftreten können, und zwar mit einer Wahrscheinlichkeit, die sich zur Dosis streng proportional verhält.

Jedes Gen ist in gewisser Weise ein Buchstabe im biochemischen Ablauf der Entwicklung eines Embryos. Daher kann eine Veränderung in einem Gen in manchen Fällen (im Falle von dominanten Mutationen oder einer Häufung von Mutationen) zu sehr bedeutsamen erblichen Veränderungen führen.

Zum jetzigen Zeitpunkt sind vielleicht 2 % der Geburten von Erberkrankungen betroffen, die durch eine Mutation ausgelöst wurden (Schizophrenie, Hämophilie, Diabetes, und viele andere). Die Anzahl von tatsächlichen Mutationen ist kleiner, denn einige Menschen mit Erbkrankheiten pflanzen sich fort, und eine einzige Mutation kann Auswirkungen über mehrere Generationen hinweg haben. Dies stört allerdings nicht die Proportionalität zwischen der Anzahl von Mutationen und der Anzahl von Erberkrankungen. Der heute akzeptierten Ansicht zufolge, die sich auf die Mäuseexperimente von Meller stützt, werden 5 Prozent der Mutationen, also auch der Erberkrankungen, durch die natürliche Radioaktivität bedingt (10 R über ein Menschenleben von 60 Jahren gerechnet). Wenn wir diese Zahlen bedenken, können wir einen Koeffizienten erstellen, der den durch Strahlung verursachten Anstieg von Erbkrankheiten beschreibt:

$$(0,02 * 0,05) / 10 = 10^{-4} \text{ pro Röntgen}$$

Die durchschnittliche menschliche Bevölkerung während der Zeit, in der das  $^{14}\text{C}$  abklingt, wird wahrscheinlich 30 Milliarden Menschen betragen (ca. 10- oder 11-mal mehr als heute). Diese Schätzung ist nicht unvereinbar mit der Erhöhung der Produktivität der Erde durch den wissenschaftlichen Fortschritt.

Wenn wir diese Zahl benutzen, erhalten wir (nur für radioaktiven Kohlenstoff)  $3 * 10^{10} * 10^{-4} * 7,5 * 10^{-4} = 2.200$  Fälle von Erbkrankheiten für eine Bombe der Größe von einer Megatonne, oder 110.000 Fälle durch alle bereits durchgeführten Tests.

Bei Tieren und Pflanzen entstehen durch Mutationen manchmal auch höhere Formen. Es ist denkbar, dass Mutationen beim Menschen (und auch Erbkrankheiten) gutgeheißen werden sollten, da sie für ein notwendiges Übel in der biologischen Fortentwicklung des Menschen gehalten werden könnten. In Wahrheit aber verändert sich die menschliche Natur nun viel stärker durch soziale Faktoren. Wir neigen also dazu, unkontrollierbare Mutationen schlicht für etwas Böses zu halten, und Experimente mit Atomwaffen lediglich als einen zusätzlichen Grund für den Tod von zehntausenden, ja sogar hunderttausenden von Menschen.

Ein weiteres Beispiel für den schwellenunabhängigen Effekt der Auswirkungen von Strahlung ist möglicherweise die Anzahl von Krebserkrankungen (7.) und von Leukämiefällen.

Es konnte gezeigt werden, dass die krebserzeugenden Effekte verschiedener karzinogener Stoffe sich addieren. Es gibt keinen Grund zur Annahme, dass die aktiven Radikale, die durch die Ionisation entstehen, sich qualitativ irgendwie anders verhalten. Daher wird der Anstieg von Krebserkrankungen oder, was das Gleiche ist, das Absinken des Alters, in dem der Krebs auftritt, eine lineare Funktion jener Dosis sein, der die Menschheit ausgesetzt ist. Der Gesamtkoeffizient für alle Krebsarten und Leukämie, so wird angenommen, ist in derselben Größenordnung wie der für genetische Schäden, also  $1 - 2 * 10^{-4}$  Fälle/R. Teilweise bestätigt wird diese Vermutung durch die Unterlagen zur Häufigkeit von Leukämiefällen, einer Berufskrankheit von Radiologen und in mancher Hinsicht dem Krebs verwandt. Der Effekt von Strahlung auf diese Krankheit ist einfach zu studieren, denn sie tritt in der Natur nur selten auf. Eine Dosis von einem einzigen Röntgen im Jahr ergibt einen Anstieg von Todesfällen durch Leukämie um einen Faktor von  $2 * 10^{-6}$ , und über die Spanne von 30 Jahren der Berufsausübung ergibt das  $6 * 10^{-5}$ . Dieser Faktor hat die gleiche Größenordnung wie derjenige, der für andere Krebsformen angenommen wird.

Ein möglicher (wenn auch nicht experimentell bewiesener) schwellenunabhängiger Effekt der Strahlung ist eine Verringerung der immunologischen Reaktionen des Organismus. Höchstwahrscheinlich sind auch vorzeitiges Altern und Tod eine schwellenunabhängige Auswirkung. Die durchschnittliche Lebenserwartung von Radiologen (die einer durchschnittlichen Belastung von wahrscheinlich nicht mehr als 1000 R ausgesetzt sind) beträgt 5 Jahre weniger als für den Bevölkerungsdurchschnitt. Das bedeutet, dass ein vorzeitiger Tod mit einer in  $10^{-4}$  Fällen pro Röntgen eintreten dürfte.

Weiters sollten wir vielleicht anmerken, dass Mutationen zwar für die Menschheit nicht sonderlich erstrebenswert sind, bei Viren und Bakterien aber die Überlebenswahrscheinlichkeit stark erhöhen können. Ein Beispiel ist die Mutation, die in der Mitte des 19. Jahrhunderts bei der Diphtherie auftrat, weitere Beispiele die periodisch auftretenden Grippeepidemien, die einen großen Anteil der Weltbevölkerung erfassen. Es ist schwer, diesen Effekt einzuschätzen, obwohl es plausibel erscheint, anzunehmen, dass er genauso schädlich ist wie der genetische. Alles in allem beträgt nach unserer annäherungsweise und wahrscheinlich konservativen Einschätzung der Verlust an Menschenleben durch alle schwellenunabhängigen biologischen Effekte mindestens das Dreifache der genetischen Auswirkungen, das bedeutet eine Rate von  $3 \cdot 10^{-4}$  pro Röntgen. Die Summe aller oben genannten Faktoren (ohne Abzüge für „Unklarheit“) ergäbe  $6 \cdot 10^{-4}$  pro Röntgen.

Der Radiokohlenstoff aus den Tests, die bereits stattgefunden haben, wird sich daher auf zirka 330.000 Menschen auswirken.

Wie bestens bekannt, ist ein wichtiger Faktor der Fallout von radioaktivem Strontium und Cäsium. Leipunskys Ergebnissen zufolge erwarten wir, dass die Schäden am Knochengewebe durch Strontium und die externen Effekte durch Cäsium in etwa 0,5-mal die von  $^{14}\text{C}$  sind. Der Vollständigkeit halber geben wir hier noch einen kurzen Überblick über die entsprechenden Berechnungen. Wenn die Tests auf dem jetzigen Niveau fortgesetzt werden (also 10 bis 15 Megatonnen pro Jahr), wird die Konzentration von radioaktivem Strontium in den Knochen ungefähr 65 Strontium-Einheiten (pCi/g Kalzium) ausmachen, was bedeutet, dass die Strahlungsdosis pro Jahr  $160 \cdot 10^{-3}$  R/Jahr oder  $1 - 1,5 \cdot 10^{-2}$  R pro Megatonne beträgt. Diese Dosis ist krankheitserzeugend mit in etwa der halben Häufigkeit der  $7,5 \cdot 10^{-4}$  R pro Megatonne für Radiokohlenstoff, da sie eine Population von 2,5 Milliarden Menschen (entspricht einem Faktor von 1/12) und dort nur das Skelett betrifft, das ergibt einen Faktor von 1/3. Der Effekt von äußerlicher Bestrahlung durch Gammastrahlen auf Grund von Cäsium ist in der Größenordnung von  $10^{-3}$  R pro Megatonne, und wenn man die kleinere Population einrechnet, so führt das zu etwa 10 % des  $^{14}\text{C}$ -Effektes. Daraus folgt, dass der Verlust an Menschenleben bei einer Explosion von einer Megatonne rund 10.000 Personen betrifft und der Verlust insgesamt, in Folge aller Atomtests, rund 500.000. Dies ist eine konservative Schätzung; wenn wir noch weitere radioaktive Isotope einschließen würden, andere Arten der schädigenden Wirkung von Strahlung und eine umfassendere Berechnung aller schwellenunabhängigen und schwellenabhängigen Effekte, dann wäre die Zahl noch größer. Wir können nicht ausschließen, dass die Gesamtanzahl von Opfern bereits eine Million von Menschen erreicht hat und dass jedes Jahr der Fortsetzung von Atomtests diese Anzahl um 200.000 bis 300.000 Menschen erhöht.

Welche Moral und politische Schlussfolgerungen ergeben sich auf Basis der obigen Zahlenwerte?

Eines der Argumente, das von denen präsentiert wird, welche die Theorie vertreten, Atomtests seien „harmlos“, ist, dass die kosmische Strahlung zu Dosen führt, die größer sind als jene der Tests. Dieses Argument berücksichtigt nicht, dass wir das Ausmaß von Leid und Tod auf dieser Welt erhöhen, das Leid und den Tod von hunderttausenden zusätzlichen Opfern, einschließlich derer in neutralen Staaten und in zukünftigen Generationen. Zwei Weltkriege haben die Sterberate auch nur um weniger als 10 % erhöht, aber das macht den Krieg nicht zu einem normalen Ereignis.

Ein anderes Argument, das in der Literatur einer ganzen Reihe von Ländern zu finden ist, besagt im Kern, dass der Fortschritt der Zivilisation und neue technische Errungenschaften in vielen Fällen zu menschlichem Leiden geführt haben - zum Beispiel werden oft Autounfälle als Vergleich herangezogen. Aber dieser Vergleich ist nicht zulässig. Das Automobil erhöht den allgemeinen Lebensstandard, führt aber nur in Einzelfällen zu Unfällen, und zwar in direkter Folge von Unvorsichtigkeit einzelner Personen, die dann auch rechtlich haften. Das durch die Atomtests verursachte Leid aber folgt unauslöschlich nach jeder Explosion. Dem Autor scheint es, dass alle moralischen Implikationen des Problems in der Tatsache gründen, dass das Verbrechen nicht bestraft werden kann (da unmöglich nachzuweisen ist, dass ein spezifischer Todesfall durch Strahlung ausgelöst wurde), sowie in der Wehrlosigkeit zukünftiger Generationen unseren Handlungen gegenüber.

Ein Teststopp führt direkt zur Rettung von hunderttausenden Menschenleben und wird das noch wichtigere indirekte Resultat mit sich bringen, die internationalen Spannungen abzubauen und damit die Gefahr eines Atomkrieges, der grundlegenden Bedrohung in unserer Zeit.

### **Dank**

Der Autor möchte die Gelegenheit wahrnehmen, O. I. Leipunsky seinen Dank für seine wertvollen Erörterungen auszudrücken.

Redigiert am 8. Juli 1958

### **Anmerkungen und Literaturhinweise**

1. O. I. Leipunsky: Atomenergie (Атомная энергия) III, 12, 530, 1957
2. E.C. Anderson: Annual Review of Nuclear Science 2, 63, 1953
3. W. F. Libby: Radiocarbon Dating, University of Chicago Press, 1953
4. H. J. Müller: Acta radiologica 41, 5, 1954
5. N. P. Lubinin: Strahlung und menschliches Erbgut (Радиация и наследственность человека), Manuskript
6. S. N. Ardaschnickow, N. Schapiro: Mögliche Einflüsse der durch Atomwaffentests erhöhten Strahlung auf das menschliche Erbgut (О возможности влияния на наследственность человека повышения уровня радиации, вызванного испытаниями атомного оружия), Manuskript
7. Biologische Gefahren der Atomkraft (Biological Hazards of Atomic Energy), herausgegeben von Glucksmann, Clarendon Press, Oxford, 1953

### ***Anhang: Sacharows Annahmen noch einmal aufgerollt***

Frank von Hippel

Sacharows Einschätzung ist das Produkt zweier Faktoren:

- Die Strahlendosis für die Gesamtbevölkerung: die Summe aller Strahlenbelastungen von Einzelpersonen durch Radioaktivität als Folge oberirdischer Atomexplosionen bis zu deren Abklingen
- Die Summe von dosisabhängigen Koeffizienten, die für jedes einzelne Individuum die Wahrscheinlichkeit von Gesundheitsauswirkungen angeben

Ich möchte nachfolgend einen Überblick darüber geben, was wir über diese Fragen wissen.

### *Strahlendosen für die Gesamtbevölkerung*

Der Report der Vereinten Nationen (UN) aus dem Jahr 1982: „Ursprung und Auswirkung Ionisierender Strahlen“ (S.243) enthält die Einschätzung, dass die Weltbevölkerung durch atmosphärische Atomtests einer Belastung von 0,26 rad durch <sup>14</sup>C und ca 0,12 rad durch andere Spaltprodukte ausgesetzt ist (1 rad = 10<sup>-2</sup> Sievert). Die Dosen werden im Wesentlichen auf die gleiche Art berechnet wie von Sacharow. Die wirksame Dosis ist dann über die durchschnittliche Belastung definiert, integriert über die Zeit:

$$\text{Absorbierte Dosis} = \int_0^{\infty} d(t) dt$$

Fast die ganze wirksame Dosis des <sup>14</sup>C steht noch aus. <sup>14</sup>C hat eine Halbwertszeit von 5.600 Jahren und verschwindet nur äußerst langsam, über Jahrtausende hinweg, aus dem Kreislauf zwischen Atmosphäre und Wasseroberflächen der Biosphäre in tiefe Ozeanschichten. Ein Großteil der wirksamen Dosis aus kurzlebigeren Spaltprodukten ist bereits aufgetreten. Dem gleichen UN Report zufolge (S. 227) lag die gesamte Sprengkraft aller atmosphärischen Atomtests bei 545 Megatonnen. Daher führen die obigen Annahmen zu einer wirksamen <sup>14</sup>C Dosis von 0,26 / 545 = 5 x 10<sup>-4</sup> rad pro Person für jede Megatonne. Sacharows Annahme ist etwa 1,5-mal größer.

Die Bevölkerungsgesamtdosis erhält man, wenn man die individuell wirksame Dosis mit der anzunehmenden Weltbevölkerung für den Zeitraum multipliziert, in dem die Belastung anhält. Eine angemessene Weltbevölkerung, mit der man die Belastung durch die Spaltprodukte multiplizieren könnte, ist um die 4 Milliarden (1960 war die Bevölkerung ca 3 Milliarden, und heute [1992] sind es über 5 Milliarden). Im Falle des dominanten Isotops <sup>14</sup>C aber werden 90 % der Belastungen erst nach 2050 auftreten. Die angemessene Größe für die Weltbevölkerung in einer derart fernen Zukunft ist unbekannt.

Sacharow nahm das Eintreten einer Stabilisierung der Weltbevölkerung bei 30 Milliarden an – sechs Mal so groß wie in den späten 1980ern. Diese Zahl erscheint heute als zu hoch gegriffen. Die Vorhersage der UN ist rund 10 Milliarden. Wenn wir von dieser Zahl ausgehen, so wäre die Bevölkerungsgesamtdosis durch <sup>14</sup>C bei einer 1 Megatonnen-Bombe 5 \* 10<sup>-3</sup> \* 10<sup>10</sup> = 5 \* 10<sup>6</sup> rad pro Person – ein Sechstel von Sacharows Annahme. Die Strahlendosis durch andere, bei Atombombenexplosionen freigesetzte Isotope würde diese Zahl wegen der geringeren Weltbevölkerung zur Zeit ihrer Wirksamkeit um nicht mehr als 20 % vergrößern.

### *Dosis-Wirkungs-Beziehung*

Dem Report der National Academy of Sciences (NAS) von 1990 zufolge,

„Gesundheitsauswirkungen durch Niedrigstrahlungsexposition“, liegt die Einschätzung des Risikos für Krebstod durch Ganzkörperbelastung von Gamma- und Betastrahlen in niedrigen Dosen bei  $0,9 \cdot 10^{-3}$  pro rad, mit einem Unsicherheitsfaktor von 30 %. Diese Einschätzung könnte vermutlich auf  $1,8 \cdot 10^{-3}$  verdoppelt werden, wenn nicht tödlich verlaufende Krebserkrankungen ebenfalls inkludiert werden. Der NAS Report geht weiters von einem Risiko von  $0,06 \cdot 10^{-3}$  Fällen schwerer Gendefekte in künftigen Generationen pro rad aus, allerdings mit einem großen Unsicherheitsfaktor.

Diese Parameter resultieren also in einer Annahme von ungefähr  $2 \cdot 10^{-3}$  Krebserkrankungen und Gendefekten pro rad. Zum Vergleich: Sacharow benutzte eine Annahme von  $3 \cdot 10^{-4}$ , Effekte wie die Beschädigung des Immunsystems und der Mutation von Grippeviren sowie von Bakterien eingeschlossen, für die ich aber keine offiziellen, neueren Einschätzungen finde. Aber auch so ist Sacharows Dosis-Effekt Koeffizient nur ein Sechstel der heutigen offiziellen durchschnittlichen Einschätzung für Krebs und Gendefekte.

Zusammenfassend erscheint Sacharows Einschätzung bei der Bevölkerungs-Dosis zurzeit als um einen Faktor von vier zu hoch und die Summe seiner Dosis-Wirkungs-Beziehung um einen Faktor von sechs zu niedrig, aber das Produkt dieser Faktoren hat sich nicht wesentlich verändert, besonders, wenn man die großen Unsicherheiten bei beiden in Betracht zieht.