Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 55 (1964)

Heft: 6

Artikel: Ionisierende Strahlen und unser Leben

Autor: Wagner, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916693

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: 10.07.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Ionisierende Strahlen und unser Leben

Von *G. Wagner*, Bern

539.12.047

1. Physiko-chemische Primärwirkungen ionisierender Strahlen

1.1 Direkte Wirkung auf Atome und Moleküle

Jede Strahlenwirkung ist primär eine Energieübertragung: Das Photon oder das Strahlungspartikel gibt seine Energie oder einen Teil davon an die von ihm getroffene bzw. durchsetzte Materie ab. Diese Energieübertragung spielt sich auf dem Niveau der Atome und Moleküle ab: Es werden Atomelektronen durch die sie treffende Strahlung auf eine energiereichere Quantenbahn gehoben (= Anregung) oder aus dem Atomverband gelöst (= Ionisation). Im vorliegenden Aufsatz steht nur die ionisierende Wirkung zur Diskussion.

Damit in irgendeinem Atom eine Ionisation zustande kommt, ist eine gewisse minimale Energie erforderlich: Das Ionisationspotential oder die Bindungsenergie des aus dem Atomverband zu lösenden Elektrons muss zum mindesten erreicht oder übertroffen werden. Die Bindungsenergie beträgt für die äusseren Elektronen ± unabhängig von der Ordnungszahl der Atome 10...15 eV. Für die inneren Elektronen steigt sie mit dem Quadrat der Ordnungszahl und liegt in der Grössenordnung von 10^5 eV = 100 keV.

Die Energie eines Photons ist proportional seiner Frequenz. Sie ergibt sich, in erg ausgedrückt, nach der Planckschen Beziehung als das Produkt:

$$E = h\nu \tag{1}$$

h Plancksche Konstante $= 6{,}625 \cdot 10^{-27}$ erg s
ν Schwingungszahl pro Sekunde (Frequenz)

Da 1 erg $= 6{,}24 \cdot 10^{11}$ eV, kann die Plancksche Konstante auch geschrieben werden als:

$$h = 6{,}625 \cdot 10^{-27} \cdot 6{,}24 \cdot 10^{11}\,\text{eV s} = 4{,}12 \cdot 10^{-15}\,\text{eV s} \tag{2}$$

Die Frequenz ν ergibt sich aus der in Angström ausgedrückten Wellenlänge durch die Beziehung:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^{18}}{\lambda_{[\text{Å}]}}\,[\text{s}^{-1}] \tag{3}$$

Die Gl. (2) und (3) in Gl. (1) eingesetzt ergibt:

$$E = h\nu = \frac{4{,}12 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^{18}}{\lambda_{[\text{Å}]}}\,\text{eV} = \frac{12{,}4 \cdot 10^{3}}{\lambda_{[\text{Å}]}}\,\text{eV}$$

oder

$$E = \frac{12{,}4}{\lambda_{[\text{Å}]}}\,\text{keV} \tag{4}$$

Aus dieser Formel (4) ergibt sich direkt die Energie in eV oder keV aus der Wellenlänge in Å:

für rotes Licht: $\lambda = 8000$ Å, $\quad E = \frac{12400}{8000} = 1{,}55$ eV

für blaues Licht: $\lambda = 4000$ Å, $\quad E = \frac{12400}{4000} = 3{,}1$ eV

für ultraviolettes Licht: $\lambda = 2000$ Å, $\quad E = \frac{12400}{2000} = 6{,}2$ eV

Ein Vergleich mit den eingangs angegebenen Ionisationspotentialen von 10...15 eV für die äusseren Elektronen zeigt, dass die Quantenenergie von sichtbarem und von ultraviolettem Licht für Ionisationen nicht ausreicht, sondern dass hiefür Wellenlängen unter ca. 1200 Å nötig sind. Damit kommt man in den Bereich der Röntgen- und Gammastrahlen, deren Wellenlänge bis zu Bruchteilen von Å hinunter und deren Energie bis in die Grössenordnung von MeV hinauf geht.

Durch Energieabgabe an die durchsetzte Materie wird die Intensität einer Strahlung geschwächt nach der Formel:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

I_0 Anfangsintensität
I_x Endintensität
x Dicke des durchsetzten Materials
μ Absorptionskoeffizient.

Der Absorptionskoeffizient ist abhängig von der Art des Materials (Atomnummer und spezifisches Gewicht) und von der Energie der Strahlung. Drei verschiedene Energie absorbierende Effekte bestimmen für eine gegebene Quantenenergie der Photonen und für ein bestimmtes Material den Gesamtabsorptionskoeffizienten μ.

1. 1. 1 Photoeffekt

Das Photon gibt seine ganze Energie E ab, indem ein Elektron aus dem Atom herausgeschlagen wird. Die Bindungsenergie E_i wird dabei überwunden, und zudem erhält das herausgeschlagene Elektron noch eine bestimmte kinetische Energie E_e:

$$E = E_i + E_e$$

Die Absorption durch den Photoeffekt ist sehr hoch für Strahlen niedriger Energie und für Stoffe mit grosser Ordnungszahl. Bei harten Strahlen mit Energien über 1 MeV sinkt sie auf vernachlässigbar kleine Werte.

1. 1. 2 Compton-Effekt

Das Photon gibt nur einen Teil seiner Energie E an ein herausgeschlagenes Elektron ab und fliegt mit verminderter Energie E' weiter als «Compton-Photon»:

$$E = E_i + E_e + E'$$

Die an die Elektronen abgegebene Energie E_e variiert hier, im Gegensatz zum Photoeffekt, zwischen 0 und $E_{e\,max} = E - E_i$, und ebenso variiert die Energie E' der Compton-

Photonen zwischen 0 und $E'_{max} = E - E_i$. Der Anteil des Compton-Effektes an der absorbierten Energie nimmt mit steigender Strahlungsenergie bis zu etwa 250 keV zu.

1. 1. 3 Paarbildung

In unmittelbarer Nachbarschaft eines Atomkerns spielt sich der interessanteste der drei Effekte ab: Ein Photon kann materialisiert werden durch Entstehung eines Elektron-Positron-Paares. Da die Ruhemasse von Elektron und Positron je 0,51 MeV äquivalent ist, braucht es für eine Paarbildung Photonen mit einer Minimalenergie von 1,02 MeV. Die Energie über 1,02 MeV wird in kinetische Energie des Elektrons und des Positrons verwandelt. Das entstandene Positron wird sofort wieder mit einem Elektron verstrahlen und dabei ein Photonenpaar von je 0,51 MeV produzieren. Das Elektron wird weitere Ionisationen verursachen.

Die drei beschriebenen Effekte überlagern sich je nach Strahlungsenergie und je nach dem absorbierenden Material zum gesamten Absorptionseffekt (Fig. 1).

In allen Fällen wird Energie vom Photon primär an ein Elektron abgegeben, welches nun seinerseits je nach seiner kinetischen Energie durch unelastische Stösse weitere Ionisationen auslöst.

Ähnlich wie Photonen wirken Betastrahlen und andere Partikularstrahlen ionisierend auf die getroffenen Atome. Die freien Elektronen selbst werden nach Verlust ihrer kinetischen Energie von Atomen mit positiver Elektronenaffinität eingefangen. Durch jede Ionisation entsteht also ein Ionenpaar.

1.2 Indirekte Wirkungen auf organische Makromoleküle

Die beschriebenen Wirkungen der Strahlung auf Atome und Moleküle können sich in einem organischen Makromolekül abspielen, welches damit, durch Lösung molekularer Bindungen, unmittelbar geschädigt werden kann (= direkte Strahlenwirkung).

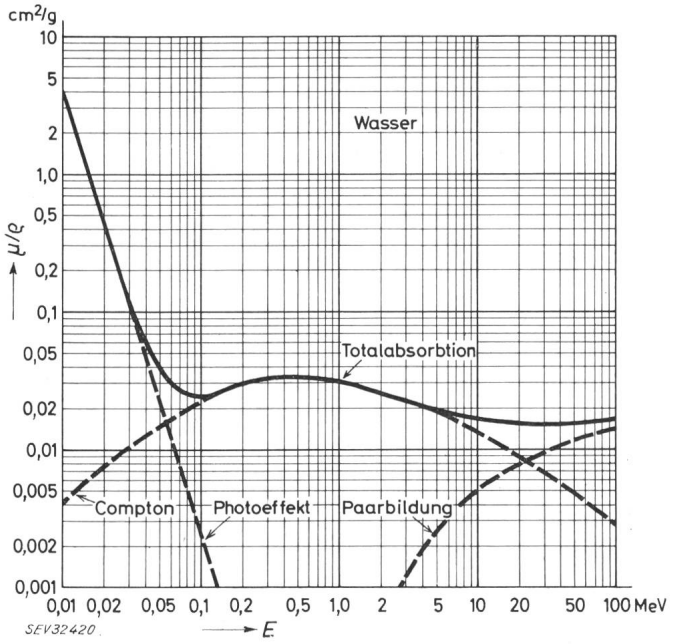


Fig. 1

Überlagerung der drei Wechselwirkungsprozesse zwischen Strahlung und Materie

Massenschwächungskoeffizient μ/ϱ bei verschiedenen Photonenenergien E
(nach *Bacq* und *Alexander*)

Sehr oft ist aber die Wirkung auf das organische Molekül eine indirekte, indem zunächst ein Wassermolekül das Strahlenquant absorbiert und damit ionisiert wird. Es entstehen dabei äusserst kurzlebige Ionentypen wie H_2O^+, HO^+, HO_2^+, selten auch O^+ und H_2^+. Diese gehen innerhalb von Mikrosekunden durch weitere Reaktionen in freie Radikale über. $OH^\cdot$ und $H^\cdot$ sind dabei die wichtigsten. Diese hochreaktiven Körper wirken nun ihrerseits auf organische Makromoleküle.

Es ist äusserst schwierig zu entscheiden, ob in einem konkreten Fall der biologische Schaden durch eine direkte oder durch eine indirekte Wirkung verursacht wird. Es lag nahe, anzunehmen, dass die Strahlenschutzwirkung verschiedener Chemikalien durch ein Abfangen von freien Radikalen zu erklären sei und demzufolge auf eine indirekte Wirkung hindeutet. Es konnte aber gezeigt werden, dass viele sog. Strahlenschutzstoffe[1]) auch vor direkten Wirkungen in gewissem Grade zu schützen vermögen.

Ähnlich verhält es sich mit dem Sauerstoffeffekt, der darin besteht, dass die meisten biologischen Systeme in Gegenwart von reichlich Sauerstoff durch Strahlung schwerer geschädigt werden als bei Sauerstoffmangel. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass die Anwesenheit von Sauerstoff die Bildung hochreaktiver Radikale wie $HO_2^\cdot$ und die Bildung von Peroxyd H_2O_2 begünstigt. Es konnte aber gezeigt werden, dass Sauerstoff auch bei direkten Strahlenwirkungen einen ungünstigen Einfluss hat, so dass auch dieser Effekt nicht zur klaren Unterscheidung von direkter und indirekter Wirkung verwendet werden kann.

Der einzige heute bekannte Effekt, der hiezu taugt, ist der Verdünnungseffekt: Eine indirekte Wirkung von Strahlung auf ein gelöstes bzw. suspendiertes Enzym oder Virus gibt sich dadurch zu erkennen, dass der Prozentsatz der geschädigten Moleküle bzw. Viren mit abnehmender Konzentration zunimmt; denn in einem gegebenen Volumen des Lösungsmittels werden immer gleich viele freie Radikale gebildet, welche sich bei einer geringen Konzentration auf wenige, bei einer grossen auf viele Moleküle bzw. Viren verteilen. Bei einer direkten Wirkung ist der Prozentsatz der Schädigung von der Konzentration unabhängig.

Leider lässt sich dieser Test nur in vitro, nicht in der lebenden Zelle durchführen, so dass bis heute keine Möglichkeit besteht, in vivo eindeutig zwischen direkter und indirekter Strahlenwirkung zu unterscheiden. Die Anteile der beiden Schadentypen am Gesamtschaden sind deshalb bis heute nicht genau bekannt.

1.3 Die Dosiseinheiten

1. 3. 1 Die physikalischen Dosiseinheiten

Die gesamte an die durchstrahlte Materie abgegebene Energie pro Masseneinheit wird als die «Dosis» bezeichnet:

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg absorbierter Energie pro g Materie} = 2{,}4 \cdot 10^{-6} \text{ cal}$$

Da die absorbierten Energien wegen ihrer äusserst geringen Beträge messtechnisch schwierig exakt zu erfassen sind, wird für die Praxis normalerweise die Einheit r (= Röntgen) verwendet, welche auf die durch die Strahlung in Luft verursachte Ionisation abstellt:

1 Röntgen ist diejenige Expositionsdosis, welche pro 0,001293 g trockener Luft (= 1 cm³ bei 0 °C und 760 mm Hg)

[1]) Stoffe, die, falls sie *während* der Bestrahlung im Gewebe vorhanden sind, den Strahlenschaden mildern: Cystein, Cysteamin, Cystamin, Cyanide und Nitrile, gewisse Hormone u. a.

durch die in der Luft verursachte Korpuskularemission so viele Ionen erzeugt, dass deren Ladung eine elektrostatische Einheit (ESE) jedes Vorzeichens beträgt.

Da für 1 ESE positiver und negativer Ladung $2{,}1 \cdot 10^9$ Ionenpaare erforderlich sind und da pro Ionenpaar in Luft der Durchschnitt 34 eV $= 34 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-12}$ erg absorbiert wird, ergibt sich, dass pro Röntgen in 1 cm^3 Luft

$$2{,}1 \cdot 10^9 \cdot 34 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-12} \text{ erg} = 0{,}114 \text{ erg}$$

absorbiert werden oder in 1 g Luft

$$770 \cdot 0{,}114 \text{ erg} \approx 87 \text{ erg}$$

Im Wasser ist das Massenbremsvermögen, d. h. das Absorptionsvermögen pro g Substanz, etwas höher als in Luft, d. h. eine Strahlendosis von 1 r bewirkt in Wasser eine höhere Energieabsorption als in Luft (durch Bildung einer grösseren Anzahl Ionen bei nahezu gleicher Energieabsorption pro Ionenpaar). Aus dem Verhältnis des Massenbremsvermögens für Luft und für Wasser ergibt sich, dass eine Dosis von Gamma- oder harten Röntgenstrahlen (über 200 keV), die in Luft zu einer Energieabsorption von 87 erg/g führt (= 1 Röntgen), in Wasser eine Absorption von annähernd 100 erg/g (= 1 rad) bewirkt. Das bedeutet aber, dass für Wasser und damit auch für weiches Körpergewebe (nicht für Knochen) ein Röntgen innerhalb der Fehlergrenzen gleich einem rad gesetzt werden darf.

1. 3. 2 Die biologische Dosiseinheit

Untersuchungen über die biologische Wirkung verschiedener Strahlendosen zeigen, dass eine und dieselbe in rad oder r gemessene Dosis sehr verschiedene biologische Wirkungen ausüben kann, je nach der Art und der Energie der Strahlung. 10 rad einer natürlichen Alphastrahlung haben beispielsweise für ein Gewebe etwa gleich schwere Folgen wie 100 rad einer Röntgenstrahlung von etwa 250 keV. Man sagt: Die «relative biologische Wirksamkeit» (RBW) von Alphastrahlen ist 10mal grösser als diejenige von Röntgenstrahlen. Man definiert dementsprechend allgemein:

$$\text{RBW} = \frac{\text{Biologische Wirkung der untersuchten Strahlung}}{\text{Biologische Wirkung von 250 keV Röntgenstrahlen}}$$

oder

$$\text{RBW} = \frac{\text{Dosis in rad, um einen bestimmten Effekt mit Röntgenstrahlen zu erzeugen}}{\text{Dosis in rad, um denselben Effekt mit den untersuchten Strahlen zu erzeugen}}$$

Selbstverständlich ist diese biologische Grösse weit weniger exakt bestimmbar als die physikalischen Dosisbegriffe, sind doch hier sehr viele biologische und physikalische Faktoren zugleich im Spiel. Streng genommen lässt sich eine relative biologische Wirkung nur auf ein bestimmtes pflanzliches oder tierisches Gewebe unter genau definierten Bedingungen und nur für eine einzige Energie einer bestimmten Strahlenart bestimmen. Für die Praxis verwendet man sehr vereinfachte Werte. (Tabelle I).

RBW-Faktoren

Tabelle I

Strahlung	RBW-Faktor
Röntgen- und Gammastrahlen, Elektronen und Betastrahlen jeder Energie	1
Neutronen je nach Energie	3...10
Protonen bis zu 10 MeV	10
Alphastrahlen natürlicher radioaktiver Nuklide .	10
Schwere Rückstosskerne	20

Es leuchtet nun ohne weiteres ein, dass bei allen Dosismessungen sowie bei Vorschriften, die im Hinblick auf den Strahlenschutz vorgenommen bzw. aufgestellt werden, weniger die absorbierte physikalische Dosis interessiert als die biologische Wirkung, die von dieser Dosis ausgeübt werden kann. Man verwendet daher in der Theorie und in der Praxis des Strahlenschutzes heute statt der physikalischen Einheiten rad und r immer die physikalisch-biologische Einheit rem und definiert:

$$\text{Dosis in rem} = \text{Dosis in rad} \times \text{RBW-Faktor}$$

Da der RBW-Faktor für Röntgen-, Gamma- und Betastrahlen = 1 angenommen wird, ist für diese Strahlenarten die Dosis in rad = Dosis in rem [2]).

Die verschiedene Wirkung gleicher Strahlendosen bei verschiedenen Strahlenarten beruht auf ihrer sehr verschiedenen Ionisationsdichte und damit auf dem verschiedenen linearen Energietransfer (= Energieabgabe pro Längeneinheit). Während ein Alpha-Partikel von 2 MeV Energie in Wasser seine ganze Energie schon auf einer Strecke von 8 µm durch Ionisation verliert (und dabei vollständig gestoppt wird), wird ein Betateilchen gleicher Energie erst durch 1 cm Wasser gestoppt, und eine Gammastrahlung gleicher Energie verliert in 14 cm Wasser erst die Hälfte ihrer Energie.

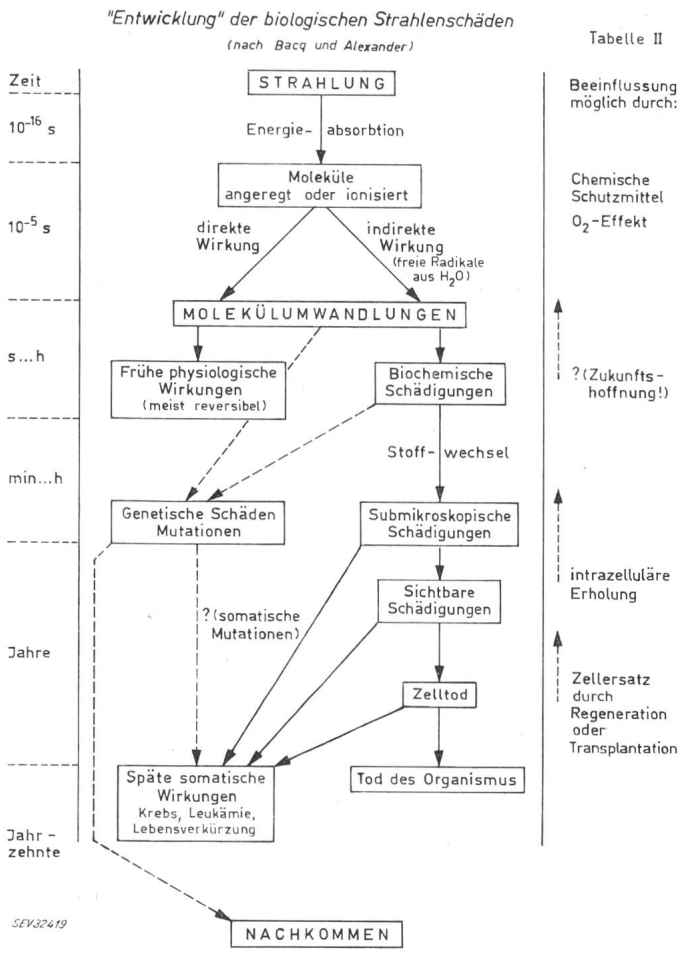
2. Die physiologische «Entwicklung» des Strahlenschadens

Ionisierende Strahlen werden auch in grosser Intensität von keinem Sinnesorgan wahrgenommen. Unmittelbar nach einer Bestrahlung, mag die Dosis auch noch so gross sein, lassen sich in einem biologischen System weder mit biochemischen, noch mit cytologischen oder histologischen Methoden irgendwelche Schäden feststellen. In einer Maus, die 1000 r erhalten hat, lassen sich einige Minuten nach der Bestrahlung keinerlei Veränderungen feststellen, obschon der Schaden, der innerhalb von 4 Tagen unweigerlich zum Tode führen wird, endgültig gesetzt ist. Der Schaden muss, bevor er manifest wird, «entwickelt» werden, ähnlich dem latent vorhandenen Bild auf einem belichteten, aber noch unentwickelten Film. Erst Stunden nach einer intensiven Bestrahlung treten die ersten erkennbaren Wirkungen auf.

Von den physiko-chemischen Primärwirkungen auf die Atome und Moleküle des lebenden Systems führt eine lange Kette physiologischer Wirkungen, deren einzelne Glieder bis heute noch sehr wenig bekannt sind, zur biologischen Endwirkung (Tabelle II). Sicher handelt es sich dabei um äusserst mannigfaltige und komplexe Phänomene. Im submikroskopischen Bereich setzen die Wirkungen im wesentlichen an den Fermenten und ihren Bildungsmechanismen an. Von dort führt die Wirkungskette zu ersten mikroskopisch feststellbaren Strukturveränderungen von Zellbestandteilen, die sich namentlich an den sich vermehrenden Zellen (d. h. beim Vorgang der Zellteilung oder Mitose) offenbaren.

Es ist eine der ältesten Erkenntnisse der Strahlenbiologie, dass die Strahlenempfindlichkeit der Gewebe mit zunehmender Stoffwechselaktivität wächst. Dies gilt in einem doppelten Sinne: Einerseits sind in einem Organismus generell diejenigen Gewebe am strahlenempfindlichsten, welche den intensivsten Stoffwechsel haben, und anderseits wird die «Entwicklung» des Strahlenschadens durch eine hohe Stoffwechselaktivität beschleunigt, durch eine geringe Aktivität verzögert. So bleiben

[2]) Der Begriff «RBW-Faktor» wird zur Zeit revidiert und soll in mehrere Faktoren aufgelöst werden, von denen der «Qualitätsfaktor» der wichtigste ist.



Frösche, die bei 23°C mit 3000...6000 r bestrahlt werden, zu 80...90% noch 3...4 Monate am Leben, wenn sie auf 5°C gehalten werden, sterben aber innerhalb von 3...6 Wochen, wenn sie auf 23°C gehalten werden.

Bei Säugern im Winterschlaf (stark erniedrigte Körpertemperatur und stark verlangsamter Stoffwechsel!) entwickelt sich der Strahlenschaden äusserst langsam; er entwickelt sich aber rapid, wenn sie aus dem Winterschlaf erwachen.

3. Die biologischen Endwirkungen

Bei den biologischen Endwirkungen ist zu unterscheiden zwischen körperlichen oder somatischen Wirkungen, welche das bestrahlte Individuum selbst schädigen, und erblichen oder genetischen Wirkungen, welche sich erst bei den Nachkommen des bestrahlten Individuums auswirken können.

3.1 Körperliche oder somatische Wirkungen

3. 1. 1 Haut

Die Haut ist in allen Fällen das zuerst und am direktesten betroffene Organ. Bei Beta- und bei weichen Röntgenstrahlen wird ein grosser Teil der Energie schon in der Haut absorbiert. Sie zeigt daher auch die ersten und deutlichsten Schäden wie Rötung oder Verbrennung, Kapillarerweiterungen, bei grösseren Dosen Haarausfall und Geschwüre, welche bösartig werden können.

3. 1. 2 Blutbildungsgewebe

Während die im Blut zirkulierenden Zellen (rote und weisse Blutkörperchen) wenig strahlenempfindlich sind, gehört das blutbildende Gewebe (rotes Knochenmark und Lymphgefässsystem) zu den kritischsten Teilen des Körpers. Die Neubildung von Blutkörperchen wird reduziert oder fällt aus, was sich im Blutbild durch einen raschen Abfall der weissen und einen langsamen der roten Blutkörperchen auswirkt (weil die weissen Blutkörperchen eine mittlere Lebensdauer von nur wenigen Tagen, die roten eine solche von ca. 120 Tagen haben).

Ist das Blutbildungsgewebe so schwer geschädigt, dass die Blutbildung nicht wieder in Gang kommt, so ist der Patient nicht zu retten. Ist die Schädigung zwar lebensgefährlich, aber eine Erholung des Blutbildungsgewebes noch möglich, so kann ein Patient unter Umständen durch Übertragung von rotem Knochenmark von einem Spender gerettet werden. Dieses wird als «Gewebebrei» (ca. 200 cm^3) in die Blutbahn injiziert. Diese Behandlung wurde 1958 bei fünf verunfallten jugoslawischen Physikern angewendet. Vier von ihnen kamen mit dem Leben davon, was möglicherweise, aber nicht sicher, auf die Behandlung zurückzuführen ist.

Nebst der Zahl der Blutkörperchen nimmt auch die Zahl der Blutplättchen (Thrombozyten) rapid ab, was mit einer Verminderung der Gerinnungsfähigkeit des Blutes verbunden ist. Es treten daher gefährliche Schleimhautblutungen auf.

3. 1. 3 Magen-Darmkanal

Die Darmschleimhaut gehört als ein Gewebe mit sehr hoher Stoffwechselaktivität mit zu den strahlenempfindlichsten Organen. Die Nahrungs- und Wasserresorption wird gestört, was zu einem ruhrartigen Krankheitsbild führt. In den Notspitälern von Hiroshima glaubten die Ärzte, denen die akute Strahlenkrankheit völlig unbekannt war, es sei eine Ruhrepidemie ausgebrochen.

3. 1. 4 Keimdrüsen

Ionisierende Strahlung kann die Bildung befruchtungsfähiger Ei- und Samenzellen in den Ovarien bzw. Hoden unterdrücken und damit zu vorübergehender oder dauernder Sterilität führen. Dabei sind die männlichen Keimdrüsen empfindlicher und zugleich exponierter als die weiblichen.

3. 1. 5 Antikörpersystem

Die Fähigkeit des Körpers, Abwehrstoffe (Antikörper) gegen Krankheitserreger und ihre Gifte zu bilden, wird durch

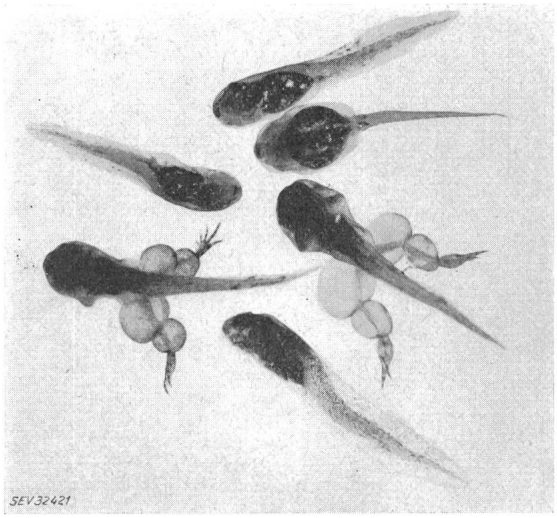
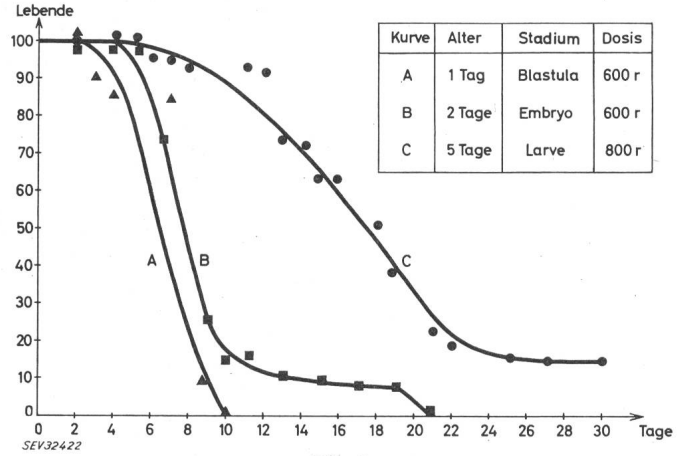


Fig. 2

Wirkung von Röntgenstrahlen auf Froschembryonen

Die letzten Überlebenden einer Serie von 100 bestrahlten Keimen nach 87 Tagen. (Bestrahlung 5 Tage nach der Befruchtung mit 800 r, 250-kV-Röntgenstrahlung.) Die unbestrahlten Tiere haben längst metamorphosiert zu vierfüssigen Fröschen. Bei den überlebenden Bestrahlten tritt die Metamorphose gar nicht oder mit starken Missbildungen ein.



Kurve	Alter	Stadium	Dosis
A	1 Tag	Blastula	600 r
B	2 Tage	Embryo	600 r
C	5 Tage	Larve	800 r

Fig. 3
Überlebenskurven von Froschlarven
die in verschiedenen Stadien der Embryonalentwicklung mit 250-kV-Röntgenstrahlen bestrahlt wurden: 1, 2 und 5 Tage nach der Befruchtung. Die jüngsten Stadien der Entwicklung sind am strahlenempfindlichsten

Strahlung sehr empfindlich geschädigt. Dadurch entsteht eine stark erhöhte Anfälligkeit für Infektionen, so dass viele Strahlenopfer nicht direkt der Strahlenkrankheit, sondern irgendeiner sekundären Infektion erliegen, der sie sonst ohne weiteres gewachsen wären.

3. 1. 6 Embryo

Embryonales Gewebe ist Gewebe mit sehr hoher Stoffwechselaktivität (viele Zellteilungen!) und daher besonders strahlenempfindlich (Fig. 2...4). Am allermeisten gefährdet ist der Embryo in den ersten Wochen der Entwicklung. Schon Dosen von 25 r können in einem kritischen Entwicklungsstadium Missbildungen zur Folge haben. Deshalb kamen in der überlebenden Bevölkerung von Hiroshima innerhalb von 9 Monaten nach dem Bombenwurf verhältnismässig sehr viele missgestaltete Kinder zur Welt. Die häufigste Anomalie war die Mikrokephalie (Kleinköpfigkeit), welche fast immer auch mit einer geistigen Unterentwicklung verbunden ist. Auch die Zahl der Totgeburten war stark erhöht.

Bei Mäusen bewirkt eine Dosis von 25 r in einem kritischen Stadium das Absterben von 40% der Embryonen.

3. 1. 7 Tumorgewebe

Tumore bestehen aus entarteten Geweben mit ausserordentlich hoher Stoffwechselaktivität (Zellteilungen!). Sie sind daher ebenfalls hochgradig strahlenempfindlich, was ihre Bekämpfung durch ionisierende Strahlen ermöglicht. Bei der Strahlentherapie werden also unerwünschte Zellen selektiv und gezielt getötet. Eine gewisse Schädigung des benachbarten gesunden Gewebes wird dabei in Kauf genommen.

Fig. 4
Strahlenwirkung auf einen Säugetierembryo
Eine im Mutterleib mit 100 rad bestrahlte Maus, bei der ein Auge fehlt (nach Frau Prof. Dr. H. Fritz-Niggli)

3. 1. 8 Allgemeinbefinden

Schon eine Teilkörperbestrahlung, wesentlich mehr aber eine Ganzkörperbestrahlung in der Grössenordnung von 100...200 rem, wirkt sich auch auf das Allgemeinbefinden aus in Form von Übelkeit, Erbrechen, Schwindel und Schwächegefühl. Diese Erscheinung ist den Radiologen als «Strahlenkater» bei den Patienten bekannt. Es ist eine Vorstufe der eigentlichen Strahlenkrankheit. Die akute Strahlenkrankheit oder das akute Strahlensyndrom besteht in einem der komplexesten und schwersten Krankheitsbilder, welche die Medizin kennt. Sämtliche Lebensfunktionen sind dabei betroffen. Eine Ganzkörperbestrahlung mit mehr als 700 rem führt mit Sicherheit innerhalb von 30 Tagen zum Tode (Tabelle III).

Wahrscheinliche Auswirkungen einer einmaligen Ganzkörperbestrahlung des Menschen mit Gamma-Strahlen
(nach Rajewsky und Mitarbeitern)

Tabelle III

Dosis		Auswirkungen
25 r	«Gefährdungsdosis»	Maximal zulässige Dosis, wenn klinische Schäden sicher vermieden werden sollen
100 r	«Kritische Dosis»	«Strahlenkrankheit», erste Todesfälle
400 r	Mittlere Letaldosis	Schwere «Strahlenkrankheit» zu erwarten, in etwa 50 Prozent der Fälle tödlich
700 r	Letale Dosis	Fast sicher tödliche Dosis

3. 1. 9 Spätwirkungen: Auslösung von Krebs und Leukämie

Können mit ionisierender Strahlung entartete Zellen getötet und damit bösartige Tumore geheilt werden, so kann sie anderseits auch zur Entstehung einzelner entarteter Zellen Anlass geben, welche, oft erst nach vielen Jahren, zu einer bösartigen Krankheit führen können. Welches der Mechanismus dieser Wirkung ist, kann heute noch nicht mit Sicherheit angegeben werden; auch ist die Frage, ob es für eine solche Wirkung einer bestimmten Mindestdosis (einer Schwellendosis) bedarf, noch nicht mit Sicherheit beantwortet. Möglicherweise handelt es sich um Veränderungen (somatische Mutationen) am Erbgut der Zellen. In diesem Falle wäre anzunehmen, dass es keine untere Dosisgrenze für die Auslösung solcher Wirkungen gibt. Die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens würde zwar bei kleinen Dosen verschwindend klein, aber nie ganz Null sein.

Für grosse Dosen ist diese Wirkung einwandfrei nachgewiesen: In Hiroshima war die Leukämiehäufigkeit im Jahre 1954 (9 Jahre nach dem Bombenwurf) unter den Personen, die im Umkreis von 1000 m mit dem Leben davongekommen waren, 100mal grösser als in der übrigen japanischen Bevölkerung. Und eine Statistik unter amerikanischen Radiologen zeigte, dass sie 9mal häufiger von Leukämie befallen wurden als andere amerikanische Ärzte.

3.2 Erbliche oder genetische Wirkungen

Die Wissenschaft der Strahlengenetik begann im Jahre 1927 mit der Entdeckung des amerikanischen Genetikers und spä-

teren Nobelpreisträgers *H. J. Muller*, dass Röntgenstrahlen bei dem Versuchstier Drosophila (Frucht- oder Taufliege) genetische Mutationen, das heisst sprunghafte Veränderungen des in den Chromosomen der Zellkerne lokalisierten Erbgutes auslösen können. Das Phänomen wurde daraufhin an sehr vielen anderen tierischen und pflanzlichen Organismen überprüft und ausnahmslos bestätigt gefunden. Es besteht kein Zweifel, dass es auch für den Menschen gilt.

Folgende Tatsachen sind nach dem heutigen Stand des Wissens für die Beurteilung der genetischen Strahlengefährdung von grundlegender Bedeutung:

a) Genetisch wirksam ist nur diejenige Strahlung, welche die Keimdrüsen (Eierstöcke und Hoden) vor der Zeugung von Nachkommen trifft (= «genetische Dosis»).

b) Die Wirkung ist proportional der Strahlendosis.

c) Es gibt wahrscheinlich keine untere Grenze (keinen Schwellenwert) der mutationsauslösenden Wirkung.

d) Die strahleninduzierten Mutationen sind dieselben, wie sie auch in der Natur auftreten. Ihre Häufigkeit wird aber erhöht, und die schwerwiegenden Mutationen treten relativ häufiger auf.

e) Die allermeisten Mutationen (über 99 %) bedeuten Verschlechterungen des Erbgutes, sehr viele sind tödlich (letal). Eine gezielte Mutationsauslösung ist unmöglich.

f) Genetische Schädigungen sind als solche unheilbar.

g) Die allermeisten Mutationen (über 99 %) sind rezessiv, das heisst sie manifestieren sich bei einem Individuum nur dann, wenn es sie von beiden Eltern erhalten hat.

Die in lit. g) genannte Tatsache ist in dem Sinne positiv zu werten, dass sie eine Hinauszögerung der erkennbaren genetischen Strahlenschädigung um Generationen bedeutet. Erst wenn durch Vermehrung und Neumutationen ein gewisser Prozentsatz der Bevölkerung Träger derselben mutierten Anlagen geworden ist, ist ein häufigeres Auftreten von sichtbaren Trägern des Erbschadens zu erwarten. Da nun aber der Mensch schon mit einer beträchtlichen Mutationslast das Atomzeitalter angetreten hat, ist jede Vermehrung der Mutationen genetisch bedenklich. *Muller* nimmt an, dass beim Menschen ohnehin mindestens jede zehnte Ei- oder Spermazelle, also mindestens jedes fünfte Individuum, eine neu aufgetretene Mutation enthält. Ihre durchschnittliche Lebensdauer wird mit 40 Generationen angenommen. Dies bedeutet, dass jeder Mensch im Durchschnitt 8 mutierte Erbanlagen enthält.

Mutationen sind also an sich nichts Neues: Sie sind normale Naturerscheinungen, ja sie haben mit Sicherheit bei der Evolution, der Veränderung und Höherentwicklung der Organismen in der Erdgeschichte, eine entscheidende Rolle gespielt. Die Evolution beruhte aber auf einem wohlabgewogenen Gleichgewichtssystem zwischen der Häufigkeit der Mutationen und der Schärfe der natürlichen Zuchtwahl (Selektion). Durch Selektion wurden die vielen Träger ungünstiger Mutationen immer wieder ausgemerzt, indem sie gegenüber den wenigen Trägern günstiger Mutationen im Nachteil waren. Die Natur «heilt» also die auftretenden Erbschäden dadurch, dass sie sie ausmerzt.

Bei der Züchtung neuer Rassen von Kulturpflanzen kommt dieses Prinzip in verschärfter Form zur Anwendung: Die Zahl der auftretenden Mutationen wird künstlich durch grosse Dosen von ionisierender Strahlung gewaltig erhöht. Die zahlreichen Träger unerwünschter Erbänderungen werden dann rücksichtslos ausgemerzt, nur die vereinzelten Träger erwünschter Erbänderungen werden zur Zucht verwendet.

Beim Menschen geschieht indessen das Gegenteil: Der gesteigerten Mutationshäufigkeit steht nicht nur keine verschärfte Zuchtwahl gegenüber, wie sie zur Erhaltung des Evolutionsgleichgewichtes nötig wäre, sondern durch hohen Lebensstandard und durch die Medizin wird in hohem Masse dafür gesorgt, dass sich auch Träger negativer Erbeigenschaften erhalten und fortpflanzen können. Es wird also das biologische Gleichgewicht durch Eingriffe an beiden Waagschalen gestört: Man vermehrt auf der einen Seite die Zahl der ungünstigen Erbeigenschaften und mildert auf der andern Seite die Schärfe der Selektion. Dieser doppelte Eingriff kann auf die Dauer nur eine Verschlechterung der menschlichen Erbsubstanz zur Folge haben.

In welchem Grade die natürlich auftretenden Mutationen durch die natürliche Strahlung (vgl. Abschnitt 5) verursacht werden, ist noch nicht befriedigend geklärt. Um die natürliche Mutationshäufigkeit bei Versuchstieren (Drosophila, Mäuse u. a.) zu verdoppeln, bedarf es im Experiment einer Strahlendosis von 10...100 r (wahrscheinlichster Wert etwa 40 r), und es liegen Anzeichen dafür vor, dass die Verdoppelungsdosis auch beim Menschen in dieser Grössenordnung liegt. Daraus kann geschlossen werden, dass die natürliche Bestrahlung, die im Mittel eine «genetische Dosis» (= Gonadendosis in 30 Jahren) von etwa 5 r ausmacht, etwa 1/8 der natürlichen Mutationen verursacht.

4. «Höchstzulässige» Strahlendosen

4.1 Äussere Bestrahlung

Ein internationales Gremium von hervorragenden Fachleuten der Strahlenbiologie, die «International Commission on Radiological Protection» (ICRP), hat für die Praxis des Umganges mit ionisierenden Strahlen «höchstzulässige Strahlendosen» festgelegt. Bei der Festlegung dieser Dosen waren populationsgenetische Überlegungen massgebend: Es wird eine Erhöhung der natürlichen Mutationshäufigkeit um 1/4 bis 1/3 als tragbar betrachtet, während eine Verdoppelung auf die Dauer für das Erbgut der Art wahrscheinlich untragbare Konsequenzen hätte. Solche Überlegungen führten zu der Festsetzung einer höchstzulässigen genetischen Bevölkerungsdosis (d. h. mittlere Dosis während der 30 ersten Lebensjahre für die Gesamtbevölkerung) von 10 rem. Davon werden zum vornherein ca. 5 rem für die medizinische Diagnostik «reserviert». Es bleiben also 5 rem als zulässige künstliche Strahlenbelastung des Durchschnittsmenschen in 30 Jahren durch andere als medizinische Strahlenquellen; das ist etwa gleichviel wie die natürliche Strahlenbelastung.

Da es sich hiebei um eine Überlegung für den Durchschnitt der Gesamtbevölkerung handelt (aus der Erkenntnis, dass das Erbgut einer Population im Laufe der Generationen ± vollständig durchmischt wird und gewissermassen einen Gemeinschaftsbesitz der Population darstellt), dürfen einzelne Individuen oder einzelne Bevölkerungsgruppen mehr erhalten, solange die grosse Mehrheit der Bevölkerung weit unter dem zulässigen Durchschnitt bleibt.

Folgende Werte gelten heute als «maximal zulässige Dosen» für die verschiedenen Bevölkerungsteile:

Beruflich strahlenexponierte Personen . . .	5 rem/Jahr
Besondere Bevölkerungsgruppen	0,5...1,5 rem/Jahr
Durchschnitt der Gesamtbevölkerung . . .	0,15 rem/Jahr

Die Werte für beruflich strahlenexponierte Personen gelten als Durchschnittswerte vom 19. Lebensjahr an. Vorher soll niemand beruflich ionisierenden Strahlen ausgesetzt werden.

Liegt der Durchschnitt pro Jahr unter 5 rem, so dürfen höhere Jahreswerte in Kauf genommen werden, jedoch nicht mehr als 3 rem pro Vierteljahr bzw. 12 rem pro Jahr. Die vom 19. Lebensjahr an akkumulierte Gesamtdosis D soll den Wert

$$D = (N - 18) \cdot 5 \text{ rem}$$

nicht überschreiten, wobei N das Alter der in Frage stehenden Person in Jahren bedeutet.

Auch die für beruflich strahlenexponierte Personen festgelegten Dosen sind noch weit davon entfernt, irgendwelche erkennbaren somatischen Schäden zu verursachen. Es wäre daher sinnlos, für Bestrahlungen, die nur einzelne Organe treffen, aber nicht die Gonaden, ebenso niedrige höchstzulässige Dosen festzulegen. Es wird deshalb grundsätzlich für alle andern innern Organe ausser den Gonaden und den blutbildenden Organen eine Dosis von 0,3 rem/Woche gestattet, für die Schilddrüse und die Haut 0,6 rem/Woche, für Hände und Füsse sogar 1,5 rem/Woche (alles für beruflich strahlenexponierte Personen).

Es ist auch wichtig, zu wissen, dass eine Überschreitung der «höchstzulässigen Dosen» noch keineswegs eine Gefährdung für das Individuum bedeutet. Es handelt sich vielmehr um Richtwerte für die Praxis, bei deren Einhaltung mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit jeder Schaden ausgeschlossen werden kann.

4.2 Innere Bestrahlung

Beim Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen, besonders wenn diese in leicht flüchtiger Form vorliegen (Gas, Dampf, Staub usw.), kommt zu der Gefahr einer äusseren Bestrahlung diejenige der Aufnahme solcher Stoffe in den Körper (durch Atemluft, Nahrung, Verletzungen) und damit die Gefahr einer inneren Bestrahlung. Es lässt sich relativ leicht berechnen, welche Konzentration eines radioaktiven Nuklides, das in einem Organ eingelagert ist, die «höchstzulässige Strahlendosis» an dieses Organ abgibt. Man kann dabei zunächst annehmen, dass die gesamte Strahlungsenergie, die man aus der MeV-Zahl leicht in erg umrechnen kann, an das betreffende Organ abgegeben wird (was für Alpha- und Beta-Strahlen richtig ist, während von den Gamma-Strahlen effektiv nur ein Bruchteil der Energie absorbiert wird), und man findet durch Multiplikation mit dem RBW-Faktor die Dosis in rem.

Die von einer bestimmten Menge A eines eingelagerten radioaktiven Nuklides während einer bestimmten Zeit (Woche) an das betreffende Organ abgegebene Strahlendosis D lässt sich dann nach folgender Formel berechnen:

$$D_{[rem]} = \frac{A_{[\mu c]} \cdot 3{,}7 \cdot 10^4 \cdot E_{[MeV]} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot 6{,}05 \cdot 10^5 \text{ RBW}}{100 \; m_{[g]}}$$

wobei:

$D_{[rem]}$ Wochendosis in rem
$A_{[\mu c]}$ Aktivität in μc (Microcurie = 10^{-6} Curie) im Körper oder im Organ
$E_{[MeV]}$ Energie pro Zerfall in MeV
m Masse des Körpers oder des Organs in g
RBW relativer biologischer Wirkungsfaktor (= Anzahl rem pro rad)

Im weiteren werden angenommen:
$3{,}7 \cdot 10^4$ Zerfälle pro μc und s
$1{,}6 \cdot 10^{-6}$ erg pro MeV
$6{,}05 \cdot 10^5$ Sekunden pro Woche
100 erg pro rad und pro g Materie

Durch Auflösung dieser Gleichung nach $A_{[\mu c]}$ für eine bestimmte höchstzulässige Wochendosis D (z. B. 0,1 rem) lässt sich die «höchstzulässige body burden» berechnen, d. h. die höchstzulässige Menge des betreffenden Nuklides im gesamten Körper.

Wesentlich schwieriger als diese physikalischen Überlegungen und Berechnungen ist es nun, rückschliessend zu ermitteln, welche Konzentration eines radioaktiven Nuklides in der Atemluft oder in der Nahrung bei dauerndem Gebrauch vorhanden sein darf, bis im Körper — im Gleichgewichtszustand zwischen Zuwachs und Abgang — die höchstzulässige Menge («body burden») des betreffenden Nuklides vorhanden ist. Bei dieser Berechnung spielen nebst den gut bekannten physikalischen und chemischen Daten (Halbwertszeit, Art und Energie der Strahlung, chemische Verbindung, in der sich das Nuklid befindet usw.) auch zahlreiche viel weniger genau bekannte physiologische Faktoren eine wichtige Rolle (Resorptionsfähigkeit des Körpers für die betreffende Verbindung, Affinität des Nuklides oder der Verbindung zu bestimmten Organen, die Geschwindigkeit der Ausscheidung des im Körpergewebe eingelagerten Nuklids usw.).

Die Ausscheidungsgeschwindigkeit eines inkorporierten Nuklids wird durch die biologische Halbwertszeit, d. h. die Zeit, in der die Hälfte des eingelagerten Nuklids ausgeschieden wird, gemessen (Tabelle IV). Die biologische Halbwertszeit ($T_{biol.}$) überlagert sich mit der physikalischen ($T_{phys.}$) zu der effektiven Halbwertszeit (T_{eff}) im Körper nach der Formel

$$T_{eff} = \frac{T_{phys.} \cdot T_{biol.}}{T_{phys.} + T_{biol.}}$$

Physikalische, biologische und effektive Halbwertzeit im Körper

Tabelle IV

Nuklid (kritisches Organ)	$T_{phys.}$	$T_{biol.}$	T_{eff}	Anteil im kritischen Organ
Jod 131 (Schilddrüse)	8 Tage	138 Tage	7,6 Tage	0,2
Strontium 90 (Knochen)	28 Jahre	50 Jahre	18 Jahre	0,99
Radium 226 (Knochen)	1620 Jahre	45 Jahre	44 Jahre	0,99

Der Gleichgewichtszustand zwischen Zuwachs und Abgang wird bei den meisten radioaktiven Nukliden im Laufe von einigen Jahren erreicht. Bei gewissen Nukliden mit sehr grossen effektiven Halbwertszeiten wird jedoch der Gleichgewichtszustand in einem ganzen Menschenalter nicht erreicht, so z. B. bei Sr 90 und bei Ra 226.

Für diese Nuklide wurden die in den Empfehlungen der ICRP enthaltenen maximal zulässigen Konzentrationen so berechnet, dass die nach 50 Jahren im Körper bzw. im Knochen vorhandene Menge die höchstzulässige Dosis verursacht (Sr 90 erreicht nach 50 Jahren 86%, Ra 226 56% des Gleichgewichtszustandes). Das bedeutet also: Wenn man heute die «höchstzulässige Konzentration» von Sr 90 in der Milch hätte, so bekämen die Knochen der Menschen dadurch jahrelang nur einen kleinen Bruchteil der höchstzulässigen Dosis. Erst nach 50 Jahren dauernder Aufnahme solcher Milch würde die höchstzulässige Dosis pro Jahr erreicht.

Zudem sind die «höchstzulässigen Konzentrationen» für das Trinkwasser so berechnet, dass die gesamte Flüssigkeit, die wir aufnehmen, diese Konzentration enthalten darf, inklusive die Flüssigkeit in den Lebensmitteln (2200 cm³ pro Tag).

Erschwerend fällt ins Gewicht, dass sich die «höchstzulässige Konzentration» immer nur auf ein einziges radioaktives Nuklid bezieht. Sind mehrere radioaktive Nuklide gleichzeitig in demselben Organ oder im Ganzkörper vorhanden, so dürfen sie zusammen nicht mehr als die «höchstzulässige Dosis» abgeben, d. h. ihre «höchstzulässige Konzentration» ist dann entsprechend niedriger anzusetzen. Bei Gemischen unbekannter Zusammensetzung darf die Gesamtkonzentration die für die gefährlichsten Nuklide festgelegte Konzentration nicht überschreiten (Tabelle V).

Beispiele von höchstzulässigen Konzentrationen (für beruflich strahlenexponierte Personen bei dauerndem Gebrauch; für die Gesamtbevölkerung gilt $^1/_{30}$ dieser Werte) und von höchstzulässigen «body burden»

Tabelle V

Nuklid	Höchstzulässige Konzentration im Trinkwasser µc/cm³	Höchstzulässige Konzentration in der Atemluft µc/cm³	Höchstzulässige «body burden» µc	Kritisches Organ
H3 (Tritium)	$3 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-6}$	10^3	ganzer Körper
Sr 90	10^{-6}	10^{-10}	2	Knochen
I 131	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-9}$	0,7	Schilddrüse
Ra 226	10^{-7}	10^{-11}	0,1	Knochen
Pu 239	$5 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-13}$	0,04	Knochen

Beim Strontium spielt wegen seiner grossen chemischen Verwandtschaft mit Calcium das Verhältnis Sr/Ca in der Nahrung eine ausschlaggebende Rolle. Als höchstzulässiges Sr 90/Ca-Verhältnis in Knochen wurde für die Gesamtbevölkerung eine Konzentration von 100 pc [3]) pro g Ca berechnet (= 100 Strontium Einheiten = 100 Sunshine Units = 100 SU). Das entspricht einem Gewichtsverhältnis von $0{,}5 \cdot 10^{-12}$ g Sr 90 auf 1 g Ca.

Enthält die Nahrung reichlich Calcium, wie dies bei der Milch, dem wesentlichsten Ca-Lieferanten, der Fall ist, so wird verhältnismässig weniger Strontium in den Körper aufgenommen, als wenn wenig oder kein Ca vorhanden ist. Zwischen Milch und Knochengewebe besteht ein Diskriminationsfaktor von rund 4, d. h. das Sr/Ca-Verhältnis wird in Knochen ca. viermal günstiger sein als in der Milch.

5. Natürliche und künstliche Strahlenbelastung

Der Mensch war zu allen Zeiten einer gewissen Belastung durch ionisierende Strahlen natürlichen Ursprungs ausgesetzt (kosmische Strahlung, terrestrische Strahlung und körpereigene Strahlung). Ob diese natürliche Bestrahlung in der Evolution des Menschen und der übrigen Organismen eine negative oder eine positive Rolle gespielt hat, kann heute nicht entschieden werden. Je nach dem geologischen Untergrund, nach dem Baumaterial der Häuser, nach der Höhe über Meer, nach der Lebensgewohnheit usw. ist die natürliche Strahlenbelastung sehr verschieden.

In der Schweiz hat das Eidg. Gesundheitsamt im Sommer 1961, als praktisch keine Aktivität von Atombombenversuchen vorhanden war, in Zusammenarbeit mit dem Radiologischen Institut der Universität Freiburg i. Br. mit Hilfe eines besonderen Messwagens die natürliche Strahlung im ganzen Gebiet der Schweiz an rund 300 Punkten gemessen.

Nach Abzug der kosmischen Komponente ergaben sich für den durchdringenden Anteil der Umgebungsstrahlung in 50 cm Höhe über dem Boden die folgenden Durchschnittswerte:

	mr/Jahr
Jura, Mittelland und nördliche Kalkalpen	70...80
Alpen, nichtkristalline Gebiete	100
Alpen kristalline Gebiete	115...155

Die mittlere natürliche Strahlenbelastung der schweizerischen Bevölkerung unter Berücksichtigung der verschiedenen Bevölkerungsdichte der einzelnen Landesteile und des geschätzten mittleren Aufenthaltes im Freien und in Häusern ergibt sich zu:

31 mr/Jahr für die kosmische Strahlung
91 mr/Jahr für die Umgebungsstrahlung
122 mr/Jahr für die gesamte natürliche äussere Strahlung.

Dazu kommt die natürliche körpereigene Strahlung (K 40 und C 14) mit ca. 20 mr/Jahr, so dass die gesamte natürliche Strahlenbelastung des Durchschnittsschweizers ca. 142 mr pro Jahr beträgt.

Die zusätzliche Strahlenbelastung aus künstlichen Quellen macht demgegenüber heute nur einen kleinen Anteil aus (Tabelle VI).

Strahlenbelastung aus künstlichen Quellen

Tabelle VI

Strahlenquellen	Dosis/Jahr mr
Medizinische Diagnostik (auf Keimdrüsen bezogen)	≈22
Auswirkungen von Atomexplosionen (Stand 1959)	≈10
Leuchtzifferblätter	≈ 5
Schuhdurchleuchtungsapparate, Fernsehen u. a.	≈ 1
Total	≈38

6. Strahlenschutzgesetzgebung in der Schweiz

Am 19. April 1963 hat der Schweiz. Bundesrat die eidgenössische Verordnung über den Strahlenschutz genehmigt und auf 1. Mai 1963 in Kraft gesetzt. Die Verordnung führt die Bewilligungs- und Kontrollpflicht ein für jede Art des Umganges mit radioaktiven Stoffen sowie mit Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlen (Röntgenapparate etc.). Die Bewilligungen werden grundsätzlich vom Kanton erteilt mit der Zustimmung des Eidgenössichen Gesundheitsamtes (Sektion für Strahlenschutz) und gegebenenfalls der SUVA und der eidgenössischen Fabrikinspektorate. Die Kontrollen werden dagegen im allgemeinen durch gesamtschweizerische Stellen durchgeführt (Eidg. Gesundheitsamt und SUVA). Der Schweizerische Elektrotechnische Verein wird im Auftrag des Eidg. Gesundheitsamtes die Strahlenschutzkontrolle der Schuhdurchleuchtungsapparate durchführen.

Die Verordnung führt ferner die obligatorische Überwachung aller «beruflich strahlenexponierten Personen» im Bezug auf die empfangenen Dosen (physikalische Überwachung) wie auf ihren Gesundheitszustand (medizinische Überwachung) ein. Für die physikalische Überwachung kommen individuelle Taschenionisationskammern oder Dosismessfilme in Frage. Die Filme werden von einer zentralen Auswertestelle geliefert und verarbeitet. Eine solche Auswertestelle wird zur Zeit beim Eidg. Gesundheitsamt geschaffen. Weitere Stellen existieren schon seit längerer Zeit bei den Kantonsspitälern in Basel, Bern, Lausanne, Genf und Zürich, bei der Comet AG in Bern sowie beim Eidg. Institut für Reaktorforschung in Würenlingen.

Die grundsätzlichen Forderungen des Strahlenschutzes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

[3]) 1 pc = 1 picocurie = 10^{-12} c.

A) Anforderungen an Apparate und Installationen

a) *Richtige Bauart der Apparate:* die Strahlenquelle (Röntgenröhre, radioaktives Nuklid) muss darin so eingeschlossen und abgeschirmt sein, dass das Bedienungspersonal bei sachgemässem Verhalten keine unzulässigen Strahlendosen erhalten kann.

b) *Richtige Abschirmung der Räume,* in denen starke Strahlenquellen installiert sind und betrieben werden, gegen Nebenräume, in denen sich Personen aufhalten.

c) *Richtige Einrichtung der Laboratorien,* in denen mit offenen radioaktiven Strahlenquellen umgegangen wird. Es werden je nach Art und Menge der gehandhabten Nuklide 4 Labortypen (Typ A = Hot Labor, Typ B, Typ C, Typ D) unterschieden mit abgestuften Vorschriften.

d) *Richtige Beseitigung der radioaktiven Abfälle.* Diese Abfälle dürfen nicht mit Kehricht und Abwasser beseitigt werden, sondern sind an einen zentralen, vom Eidg. Gesundheitsamt geschaffenen und betriebenen Stapelplatz abzuliefern.

B) Anforderungen an die Arbeitsdisziplin.

a) *Abstand* von der Strahlenquelle ist der billigste Strahlenschutz!

b) *Abschirmungen* (Blei, Bleiglas, Beton u. a.) halten die Strahlung auf oder schwächen sie wirksam ab.

c) *Zeit:* Man beschränke jede Strahlenexposition auf eine möglichst kurze Dauer!

d) *Sauberes Arbeiten*: Man vermeide peinlichst jede Zerstreuung radioaktiver Stoffe!

Die heutige Situation im Bezug auf die Strahlenbelastung der Bevölkerung braucht in keiner Weise als alarmierend bezeichnet zu werden. Es sind aber grosse Anstrengungen nötig, damit bei der unaufhaltsam wachsenden Zahl von Anwendungen ionisierender Strahlen in Industrie, Medizin und Forschung die Strahlenbelastung der beruflich exponierten Personen und diejenige der Gesamtbevölkerung genügend tief gehalten werden kann. Wesentliche Verbesserungen im Bezug auf Arbeitsmethoden und Arbeitsdisziplin sind vor allem bei der Anwendung von radioaktiven Leuchtfarben dringlich. Missbräuchliche und fahrlässige Anwendung von Strahlenquellen, wie sie da und dort leider noch vorkommen und zu einer übermässigen Bestrahlung einzelner Personen führen, müssen unbedingt verschwinden.

Zu den allerwichtigsten Postulaten des Strahlenschutzes für die Gesamtbevölkerung, nicht nur der Schweiz, sondern der Erde, gehört die Forderung nach einer dauernden Einstellung oder wenigstens einer strikten Rationierung der oberirdischen Kernwaffenversuche. Eine stetige Zunahme dieser Versuche könnte auch ohne Atomkrieg zu einer Situation führen, die vom Standpunkt des Strahlenschutzes aus als bedenklich bezeichnet werden müsste. Die strahlenbiologischen Konsequenzen eines grossen Atomkrieges wären — ganz abgesehen von den unvorstellbaren direkten Zerstörungen — mit keiner Phantasie auszumalen: seine Vermeidung ist heute das dringlichste Gebot der Selbsterhaltung der Menschheit.

Adresse des Autors:
Dr. *G. Wagner,* Chef der Sektion Strahlenschutz des Eidg. Gesundheitsamtes, Bern.

L'électronique rapide dans la physique nucléaire des hautes énergies

Version réduite d'une conférence donnée à la 27e Journée de la haute fréquence de l'ASE, le 24 octobre 1963 à Neuchâtel,

par *H. Verweij,* Genève

539.1.08

Le CERN dispose de deux accélérateurs de particules nucléaires: un synchro-cyclotron accélérant des protons à une énergie de 600 MeV et un synchrotron à protons de 28 GeV. Dans les faisceaux sortant de ces machines des expériences sont exécutées. La détection de ces particules est faite par différents moyens, une des méthodes la plus utilisée est la combinaison d'un scintillateur et d'un photomultiplicateur. Le passage d'une particule chargée par un médium luminescent (scintillateur) peut créer un flash de lumière dans cette matière. Ce signal lumineux est converti dans une impulsion de courant électrique par le photomultiplicateur. En formant des combinaisons de ces compteurs (scintillateur et photomultiplicateur) on peut mesurer le nombre de particules passantes, le temps de vol d'une particule, sélectionner des particules, etc. Dans la plupart des cas, la mesure consiste en la détermination d'un intervalle de temps de l'ordre de la nanoseconde (10^{-9} s). Les méthodes de mesure les plus appliquées sont la coïncidence retardée et la conversion temps-en-amplitude. Une gamme d'instruments électroniques est utilisée dans les expériences et a été développée au CERN.

Der CERN verfügt über zwei Teilchenbeschleuniger: ein Synchro-Zyklotron, welcher die Protonen mit einer Energie von 600 MeV beschleunigt, und ein Protonen-Synchrotron, von 28 GeV. In den aus diesen Maschinen herausströmenden Strahlen werden Experimente ausgeführt. Die Teilchen werden mit verschiedenen Mitteln aufgespürt: eine der am meisten verwendeten Methoden ist die Verbindung eines Szintillations-Zählers mit einem Photozellenvervielfacher. Der Durchgang eines geladenen Teilchens durch ein lumineszierendes Medium (Szintillator) kann darin einen Lichtstrahl auslösen. Dieses Lichtsignal wird durch den Photozellenvervielfacher in einen elektrischen Stromstoss umgewandelt. Durch Kombinationen dieser Zähler (Szintillations-Zähler und Photozellenvervielfacher) wird es möglich, die Zahl der vorbeigehenden Teilchen sowie die Flugdauer eines Teilchens zu messen, oder eine Auswahl der Teilchen zu treffen, usw. In der Mehrheit der Fälle, besteht die Messung im Festlegen einer Zeitspanne von ungefähr einer Nanosekunde (10^{-9} s). Die am meisten verwendeten Messmethoden sind die verzögerte Koinzidenz und die Zeit-Amplitude-Umwandlung. Eine ganze Reihe von elektronischen Geräten wurde für die Versuche durch den CERN entwickelt und verwendet.

Comme vous le savez, le CERN dispose de deux accélérateurs de particules nucléaires: un synchro-cyclotron accélérant des protons à une énergie de 600 MeV et un synchrotron à protons d'une énergie de 28 GeV. Les faisceaux de particules sortant de ces machines et dans lesquelles les expériences sont exécutées, sont très intenses, en particulier ceux du synchroton à protons. Cette machine est capable de donner une impulsion de protons d'une durée de 250 ms contenant $8 \cdot 10^{11}$ protons, une fois par trois secondes.

La détection de ces particules de haute énergie est faite par différents moyens. Les plus appliqués sont aujourd'hui:

a) la combinaison d'un scintillateur ou radiateur et un photomultiplicateur;
b) la chambre à étincelles;
c) la chambre à bulles;
d) l'émulsion photographique;
e) le détecteur à semi-conducteur;
f) la chambre de Wilson.