

## Dosimetrie und Strahlenschutz

Von W. MINDER

Radiuminstitut, Bern

### Einleitung

Bei allen wissenschaftlichen, medizinischen oder technischen Bestrahlungen mit ionisierenden Strahlen bildet die Festlegung der dem bestrahlten System aus dem Strahlenfeld der Strahlenquelle übertragenen Energie die Voraussetzung der quantitativen Betrachtung irgendwelcher Strahlenwirkungen. Dies gilt uneingeschränkt sowohl für alle erwünschten Bestrahlungen eines Erfolgssystems beliebiger Art als auch für alle unerwünschten Bestrahlungen, denen Personen bei irgendwelchen Bestrahlungsvorgängen ausgesetzt sein können. Insofern besteht zwischen den beiden Wissensgebieten der Strahlentechnik, der «Dosimetrie» einerseits und dem «Strahlenschutz» andererseits, ein enger sachlicher Zusammenhang. Daß dabei wesentliche Unterschiede in der Zielsetzung und im quantitativen Ausmaß der in Frage stehenden Strahlenmengen bestehen, tut dieser Tatsache an sich keinen Abbruch. Es ist deshalb durchaus sinnvoll, die beiden Arbeitsgebiete im hier vorgegebenen engen Rahmen miteinander abzuhandeln.

### 1. Dosimetrie

#### 1.1. Allgemeines

Das Ziel der Dosimetrie besteht darin, die durch einen beliebigen Körper aus einem Strahlenfeld beliebiger Natur und Feldstärkeverteilung während einer beliebigen Zeit *aufgenommene Energie* zu bestimmen. Es ist dies in dieser allgemeinen Form eine theoretisch und experimentell sehr schwierige und kaum durchführbare Aufgabe. Zunächst muß festgehalten werden, daß Energien nur auf Grund von irgendwelchen *Wirkungen* nachgewiesen und damit gemessen werden können. Dabei ist die Wahl der Wirkung völlig willkürlich, und sie muß damit, ohne höchste Vorsicht und Kritik, das Ergebnis zum mindesten teilweise präjudizieren. Weiter variieren im Gebiet der Strahlendosimetrie die zu messenden Energiegrößen zwischen etwa  $10^{-4}$  und  $10^{12}$  erg, so daß ein und dasselbe Meßprinzip keineswegs den gesamten Bereich zu überdecken gestattet. Damit ergeben sich aber sofort Anschluß- und Vergleichsschwierigkeiten. Das ist aber noch nicht alles. Bei fast allen konkreten Strahlenquellen liegt eine starke bis sehr starke (Partikelstrahlungen) Strahlenfeldvariabilität vor, die neben der Geometrie durch schwächende Systeme bedingt wird. Schließlich müssen auch noch ernsthafte logisch-begriffliche Komplikationen bewältigt werden, da selbstverständlich zwischen der Definition der Dosisgröße und der dafür anwendbaren Meßtechnik eine möglichst sinnvolle und enge Korrelation bestehen sollte. Die ernsthaftesten Schwierigkeiten der Dosimetrie resultieren aber aus der Übertragung des dosimetrischen Ergebnisses auf die

Teleologie des Bestrahlungszweckes, weil gleiche Energien verschiedener Strahlenarten (Photonen und Elektronen einerseits und schwere Korpuskeln andererseits) qualitativ und quantitativ verschiedene Wirkungen verursachen können. Dosisbestimmungen in *Mischstrahlenfeldern* (Reaktorstrahlungen, beliebige radioaktive Substanzen) stellen deshalb die schwierigsten Aufgaben der Strahlendosimetrie dar, deren Lösung oftmals nur näherungsweise oder nur partiell möglich ist.

#### 1.2. Dosismessungen

Jede Strahlendosismessung beruht grundsätzlich auf dem quantitativen Nachweis einer Eigenschaftsänderung in einem materiellen System, welche durch die in demselben aufgenommene Strahlenenergie verursacht ist. Hierbei ist es zunächst gleichgültig, welcher Art das materielle System ist und welche Eigenschaftsänderung zur Dosismessung verwendet werden soll. Deshalb sind ja auch zahlreiche «Dosimetersysteme» im Gebrauch. Unumgänglich ist aber die Voraussetzung, daß das Ausmaß der Eigenschaftsänderung  $\Delta W$  durch jeden Zuwachs an aufgenommener Energie  $\Delta E$  über den ganzen zu messenden Dosisbereich *bekannt* und wenn immer möglich *konstant* ist. Nur wenn auch die Konstanzbedingung

$$\frac{\Delta W}{\Delta E} = k$$

erfüllt ist, darf im strengen Sinne von einer *Dosismessung* gesprochen werden; in allen andern Fällen handelt es sich nur um einen Dosisvergleich, bei dem das in Frage stehende System an einem der obgenannten Konstanzbedingung gehorchenden System, insbesondere an der *Luftionisierung*, geeicht werden muß. Die verwendete Eigenschaftsänderung muß also mindestens während der Messung entweder vollständig *irreversibel* sein, oder der obige Differenzenquotient muß sich während der ganzen Bestrahlung kontrollieren und über die gesamte verabfolgte Energie integrieren lassen.

Es ist leicht einzusehen, daß diesen Bedingungen nur wenige Systeme wirklich zu genügen vermögen, weil vollständige Irreversibilitäten weder bei physikalischen noch bei chemischen Eigenschaftsänderungen unter Bestrahlung tatsächlich vorliegen (z. B. sogenanntes «Fading» elektronischer Zustände, wie latentes photographisches Bild und Farb- und Lumineszenzzentren in Festkörpern, oder entropiemäßig bedingte Rück- oder Weiterentwicklungen, wie Wärmeabfluß oder chemische Reaktionen, welche «von selbst» ablaufen). Deshalb ist es durchaus sinnvoll, wenn im Verlauf der letzten Zeit die Methodologien der Dosismessung dem stark erweiterten Auf-

gabenbereich hinsichtlich Natur der Strahlungen und dem Ausmaß der zu messenden Dosisbereiche angepaßt worden sind. Dabei ist aber, und dies soll hier mit Nachdruck erwähnt werden, für den der Theorie der Dosimetrie etwas Fernerstehenden eine gewisse Vorsicht am Platze.

Für Photonenstrahlungen bis 3 MeV Photonenenergie und für Bereiche, wie sie in Medizin und Strahlenbiologie von Bedeutung sind, bildet das Standardverfahren der Messung der durch die Strahlung verursachten *Luftionisation* auch heute noch und wohl auch für die Zukunft die sicherste, genaueste, einfachste und gerätetechnisch am besten ausgebildete Methode. Die Luftionisation liefert auch die Grundlage zur Definition der Einheit der *Bestrahlungsdosis* (Ionendosis, «exposure») dem «Röntgen» (R) «als derjenigen Röntgen- oder  $\gamma$ -Strahlenmenge, welche in 0,001293 g Luft (1 cm<sup>3</sup> bei NTP) durch die mit ihr verbundene Korpuskularemission soviele Ionen erzeugt, daß deren Ladung 1 ESE (cgs) jedes Vorzeichens beträgt». Es läßt sich leicht ausrechnen, daß

$$1 \text{ R} = 87,6 \text{ erg/g Luft}$$

an aufgenommener Energie entspricht. Das «Röntgen» kann jederzeit und ohne besonderen experimentellen Aufwand meßtechnisch realisiert werden und bildet damit die Grundlage für die andern Dosisdefinitionen und zugleich für die Verwendbarkeit anderer Meßprinzipien.

Bei Korpuskularstrahlungen und Elektronen und Photonen oberhalb 3 MeV sind die zur definitionsgemäßen «R»-Messung erforderlichen Bedingungen der homogenen Durchstrahlung des Meßvolumens einerseits und des Elektronengleichgewichtes in demselben andererseits nicht mehr ohne hohen Aufwand zu realisieren. Damit verliert auch das «R» als Dosiseneinheit seine logische, *nicht* aber seine *meßtechnische* Berechtigung. Man hat deshalb (ICRU, 1953) die Dosisdefinition allgemeiner und gleichzeitig logisch präziser (aber im strengen Sinne meßtechnisch unrealisierbar!) gefaßt und bezeichnet als «*absorbierte Dosis* (auch *Energiedosis*) den der Masseneinheit des bestrahlten Systems am interessierenden Ort zugeführten Energiebetrag. Das ‚rad‘ ist die Einheit der absorbierten Dosis und entspricht 100 erg/g.» Es gilt also

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g} = 62,5 \cdot 10^{12} \text{ eV/g.}$$

In Wasser und verdünnten wässrigen Lösungen (und in weichen biologischen Geweben) ist die Energieaufnahme aus Photonen pro g (nach dem Verhältnis der Elektronenzahlen pro g) 11% höher als in Luft. Für solche Systeme (inklusive menschlicher Körper) darf deshalb die Approximation

$$1 \text{ R} \triangleq 1 \text{ rad}$$

verwendet werden.

Bei allen Überlegungen und Maßnahmen die den Schutz von Personen gegen die Einwirkungen ionisierender

Strahlungen betreffen, muß als weitere Komplikation berücksichtigt werden, daß gleiche absorbierte Dosen (in «rad» ausgedrückt) von Strahlungen verschiedener Natur und Energie *verschiedene Wirkungen* verursachen. Dieser Tatsache kann Rechnung getragen werden durch die zusätzliche Einführung eines *Qualitätsfaktors* QF (früher als «relative biologische Wirksamkeit» RBW bezeichnet), mit welchem die Dosen in «rad» multipliziert werden müssen, um das Ausmaß der Wirkung zu bestimmen. Der Qualitätsfaktor QF ist das Verhältnis der Dosis in rad einer Röntgen-Normalstrahlung von 250 kV Erzeugungsspannung zu der Dosis in rad der in Frage stehenden Strahlung für die *Erzeugung derselben biologischen Wirkung*. Man kann nun diese gleiche Wirkung zum Ausgangspunkt des weitem Vorgehens nehmen und für die *biologische Wirkungsdosis* ein Symbol einführen, und als 1 «rem» (Roentgen equivalent man) diejenige Dosis einer Strahlung beliebiger Natur und Energie bezeichnen, welche dieselbe Wirkung verursacht, wie 1 rad Röntgenstrahlen der obgenannten Qualität. Damit muß die Beziehung

$$\text{Anzahl rem} = \text{Anzahl rad} \cdot \text{QF}$$

erfüllt sein. Die derzeit geltenden (mit erheblichen Variationen belasteten) Zahlenwerte des QF betragen (*Schweizerische Strahlenschutzverordnung*, Anhang II):

Tabelle 1. Qualitätsfaktoren QF

Strahlung	QF
Röntgen- und $\gamma$ -Strahlen, Elektronen und $\beta$ -Strahlen jeder Energie	1
Neutronen	3 bis 10 *
Protonen bis 10 MeV	10
$\alpha$ -Strahlen radioaktiver Nuclide	10
Schwere Rückstoßkerne	20

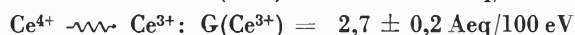
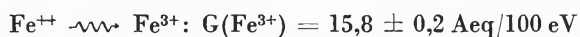
\* Untere Grenze bis 10 keV, obere Grenze über 0,1 MeV.

Neben Ionisationskammer- und Zählrohrgeräten verschiedener Bauart und Empfindlichkeit werden für die Kontrolle der Personendosen in sehr ausgedehntem Maße Filme in geeigneten Kassetten («Filmträger», «Filmdosimeter») verwendet. Sie gestatten neben der Registrierung der aufgenommenen Gesamtdosen zusätzlich durch das sogenannte *Filterdifferenzverfahren* eine teilweise Diskriminierung derselben nach Qualitätsbereichen, was für die Beurteilung der Wirksamkeiten wichtig ist. Die Verwendbarkeit der photographischen Schicht zur Dosismessung beruht auf der Tatsache, daß die *direkte Schwärzung* durch ionisierende Strahlungen für Schwärzungswerte  $S < 2$  mit der Dosis annähernd proportional ansteigt.

Für sehr hohe Dosiswerte, wie sie z. B. in der Strahlenchemie und in der Strahlentechnik verwendet werden müssen («Megaradbereich»), ist die Verwendung strah-

lenchemischer Reaktionen als Dosismesssysteme heute die Methode der Wahl geworden. Dabei stehen unter zahlreichen an sich geeigneten Reaktionen deren zwei wegen ihrer gründlichen Bearbeitung und ihrer Einfachheit besonders im Vordergrund, nämlich die Eisen(II)-Oxydation und die Cer(IV)-Reduktion, beide in schwefelsaurer, wässriger Lösung. Diese strahlenchemischen (Dosimeter)-Reaktionen haben sich als weitgehend unabhängig von äußeren Bedingungen, wie Konzentration der Meßlösung, Dosisleistung und Bestrahlungstemperatur erwiesen. Sie überdecken deshalb sehr große Dosis- und Dosisleistungsbereiche und lassen sich der konkreten Meßaufgabe leicht und sehr weitgehend anpassen. Bedingung ist in beiden Fällen eigentlich nur ein genügender Säuregehalt (standardisiert auf 0,8-n  $H_2SO_4$ ) und für die Eisen(II)-Oxydation zusätzlich die genügende Gegenwart von Sauerstoff.

Die Ausbeuten betragen für Photonen und Elektronen zwischen etwa 0,2 und 3 MeV



und dürfen für diese Energiebereiche als praktisch konstant angesehen werden. Diese Konstanz überdeckt damit fast alle Strahlungen radioaktiver Stoffe und einen Großteil derjenigen konventioneller Bestrahlungsmaschinen.

Eine größere Verbreitung haben in der letzten Zeit auch elektronische Zustandsänderungen in (vorwiegend durchsichtigen) Festkörpern, wie Spezialgläsern, Kunststoffen und Salzkristallen ( $CaF_2$ ,  $LiF$ ) als Dosismesssysteme erlangt. Dabei werden sowohl die Bildung von Farbzentren durch Bestrahlung (Gläser, Kunststoffe) als auch diejenige von Fluoreszenz- und Thermolumineszenzzentren (Gläser, Salzkristalle) als Dosimeterreaktionen verwendet, und es liegen bereits entsprechende Apparaturen im Handel vor, die sich der einen oder anderen elektronischen Änderung bedienen. Da aber Bildung und Zahl all dieser metastabilen elektronischen Zustände sehr wesentlich von der besonderen Natur des bestrahlten Festkörpers abhängen (besonders von geringen Beimengungen und thermodynamischen Bildungsbedingungen), ist eine strenge Reproduktion der Meßergebnisse nur mit ein und demselben Material möglich. Zusätzlich sind die obgenannten Änderungen grundsätzlich einem mehr oder weniger wesentlichen «Fading» unterworfen, so daß alle diese Meßsysteme nicht im strengen Sinne als Dosismessverfahren angesprochen werden dürfen.

### 1.3. Dosisberechnungen

Für den (allgemeinen) Fall, daß Dosisbestimmungen über einen weiten Qualitäts- oder Energiebereich durchgeführt werden müssen (z.B. radioaktive Stoffe, Reaktorstrahlungen), ist bei allen Meßverfahren eine

sehr strenge Kritik erforderlich. Dies gilt ganz besonders, wenn mehrere Verfahren kombiniert werden müssen. Hohe Kritik ist auch notwendig, wenn starke Variationen der geometrischen Strahlenfeldverteilung vorliegen. In solchen Fällen kann nur eine Dosisberechnung, entweder direkt, oder zur Korrektur der Meßergebnisse, zu verlässlichen Dosiswerten führen. Die Dosisberechnung ist in den vergangenen Jahren zu einem recht weit ausgebauten Wissenszweig geworden, so daß hier nicht im einzelnen darauf eingegangen werden kann. Es soll nur auf entsprechende zusammenfassende Darstellungen von WILSON (1944), ROCKWELL (1952), HINE und BROWNELL (1958) und MINDER (1961) und etwas eingehender auf zwei häufig in Forschung und Verfahrenstechnik vorkommende Fälle verwiesen werden.

#### 1.31. Maschinelles Elektronenstrahler

Strahlenmaschinen für Elektronen liefern, weitgehend unabhängig von ihrer besonderen Bauart, ein Elektronenbündel mit bestimmtem Elektronenfluß und praktisch einheitlicher Elektronenenergie. Sind diese beiden (maschinell bedingten) Bestimmungsgrößen bekannt, ist die Dosimetrie relativ einfach. Es entspricht dann die gesamte Dosisleistung annähernd, im Idealfall tatsächlich, der im Elektronenbündel umgesetzten elektrischen Leistung  $L$ . Ist  $I$  die Stromstärke des Elektronenbündels am Austrittsfenster in  $\mu A$  und  $U$  die durchlaufende Spannung in MV, so folgt

$$L = I \cdot U \text{ Watt.}$$

Da  $1 \text{ W} = 10^7 \text{ erg/sec}$  und  $100 \text{ erg/g} = 1 \text{ rad}$  entsprechen, so bedeutet die Strahlenleistung von 1 W eine Energiezufuhr von  $10^7 \text{ erg/sec}$  über die ganze Masse des zu bestrahlenden Systems. Falls dieses System gerade die Masse von 1 g aufweisen sollte, so würde dies einer mittleren Dosisleistung von  $10^5 \text{ rad/sec}$  entsprechen. Die Hauptaufgabe der Dosisberechnung besteht somit darin, die sich aus der Strahlenleistung ergebende gesamte Energiezufuhr auf die Masse des bestrahlten Systems zu beziehen und dabei auf die einzelnen Massenelemente umzurechnen. Damit ergibt sich die «absorbierte Dosis am interessierenden Ort» während der Bestrahlungszeit  $t$  zu

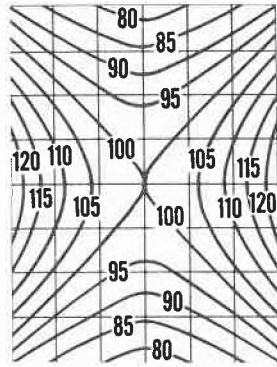
$$D = 10^5 \cdot \frac{dL}{dM} \cdot t \text{ rad,}$$

wenn  $L$  in Watt,  $M$  in g und  $t$  in sec gemessen werden.

#### 1.32. Gammazelle

Diese weitverbreitete Bestrahlungseinheit besteht im Prinzip aus einem Hohlzylinder von 20 cm Durchmesser und 20 cm Höhe, dessen Mantel von 2,5 cm Dicke bis zu 54 stabförmig angeordnete  $^{60}Co$ -Quellen enthält. Der strahlende Hohlzylinder ist einer expliziten Berechnung zugänglich (MINDER, 1947). Für seine Achse sind die Verhältnisse relativ einfach und sollen hier kurz skizziert werden.

Abb. 1. Dosisverteilung im Bestrahlungsraum der sogenannten Gammazelle (strahlender Hohlzylinder); Dosisangaben in % der Dosis in der Mitte der Zylinderachse



Der Zylindermantel von der Dicke  $2\frac{1}{2}a$  enthalte die Gesamtaktivität  $A$ . Er habe die Höhe  $h$  und den Radius  $R$ . Das Mantelmaterial (inklusive Kobaltstäbe) schwäche die  $\gamma$ -Strahlung mit dem Schwächungskoeffizienten  $\mu$ , und die Luftschwächung soll vernachlässigt werden. Dann ergibt sich für einen Punkt auf der Zylinderachse, für welchen die Zylinderenden mit dem Radius unter den Winkeln  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  erscheinen, die Dosisleistung

$$D = \frac{K \cdot A}{R \cdot h} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} e^{-\frac{\mu a}{\cos \varphi}} d\varphi.$$

Der Integralausdruck kann nicht elementar gelöst werden. Eine graphische Darstellung desselben findet sich für verschiedene Argumente ( $\varphi$ ,  $\mu a$ ) z.B. bei MINDER (1961).

Die Dosisleistungskonstante für  $^{60}\text{Co}$  beträgt  $K = 13,20 R \cdot \text{cm}^2 / \text{mc} \cdot \text{h}$ , der Radius zwischen den Mitten der Kobaltstäbe und der Zylinderachse  $R = 8,75 \text{ cm}$ . Für die Mitte der Zylinderachse wird  $\varphi_1 = \varphi_2 = 49^\circ$ . Der Schwächungsterm der  $\gamma$ -Strahlung soll mit  $\mu a = 0,35$  angenommen werden. Damit ergibt sich der Zahlenwert des Integrals zu  $2F(49^\circ, 0,35) \triangleq 1,20$ . Bei der Totalaktivität von  $1 \text{ kc} = 10^6 \text{ mc } ^{60}\text{Co}$  berechnet sich die Dosisleistung in der Mitte des Zylinders zu

$$D_c = \frac{13,20 \cdot 10^6}{8,75 \cdot 20} \cdot 1,20 = 9,05 \cdot 10^5 R/h.$$

Für die Mitte der Stirnflächen wird  $\varphi_1 = 71,5^\circ$  und  $\varphi_2 = 0$ . Der Integralausdruck hat hier den Wert  $F(71,5^\circ, 0,35) \triangleq 0,75$  und damit wird die Dosisleistung

$$D_s = \frac{13,20 \cdot 10^6}{8,75 \cdot 20} \cdot 0,75 = 5,65 \cdot 10^5 R/h.$$

Für Punkte außerhalb der Zylinderachse muß an Stelle der Radius  $R$  der Ausdruck  $\sqrt{R^2 + d^2 - 2Rd \cos \psi}$  in den Nenner gesetzt werden, wobei  $d$  den Abstand von der Zylinderachse und  $\psi$  den Winkel des Fahrstrahles auf den Zylindermantel bedeuten. Die reziproken Mittelwerte dieses Ausdruckes betragen für die Exzentrizitäten  $d = R/5, R/2$  und  $4R/5$  im Radius ausgedrückt 1,015, 1,08 und 1,25. Die Dosisverteilung ist also im Innern des strahlenden Hohlzylindermantels, wie Abb. 1 zeigt, bis fast an seine Peripherie hin relativ sehr homogen.

## 2. Strahlenschutz

### 2.1. Allgemeines

Es soll hier in erster Linie von der physikalisch-technischen Seite des Strahlenschutzes die Rede sein und gar nicht auf die großen Anstrengungen, welche die Grundlagen aller praktischen Realisierungen eines genügenden Strahlenschutzes darstellen, eingegangen werden. Diese sind in den Publikationen der ICRP (International Commission on Radiological Protection) niedergelegt und, soweit nötig, in der *Eidgenössischen Strahlenschutzverordnung* und den darauf basierenden Verfügungen in der juristischen Form gesetzlicher Vorschriften enthalten. Es soll aber erwähnt werden, daß der Inhalt dieser Rechtsmittel jedermann, der in irgendeiner Weise mit ionisierenden Strahlungen oder deren Quellen umgeht, bekannt sein muß, da Unkenntnis derselben ja nicht vor ihren Folgen schützt (Bezugsquelle: Schweizerische Bundeskanzlei, Bern; Sammlung aller einschlägigen Erlasse und Führer dazu im offiziellen Handbuch *Atomenergie und Strahlenschutz in der Schweiz*, Fachschriften-Verlag, Zürich).

Einige der wichtigsten Punkte sollen aber hier doch kurz angeführt werden. Alle Personen, die auf Grund ihrer Tätigkeit eine jährliche Strahlendosis von mehr als 1,5 rem erhalten können, gelten als «beruflich strahlenexponierte Personen». Die für dieselben maximal zulässige Jahresdosis beträgt 5 rem. Räumliche Bereiche, in denen Dosen von mehr als 1,5 rem/Jahr erhalten werden können, sind «kontrollierte Zonen». Beruflich strahlenexponierte Personen müssen ständig physikalisch überwacht und periodisch medizinisch untersucht werden. Sie müssen ein Mindestalter von 18 Jahren aufweisen. Kontrollierte Zonen sind als solche besonders zu kennzeichnen, und das darin potentiell vorhandene Strahlenfeld muß durch Ortsdosisbestimmungen abgeschätzt werden können. Jedem Strahlenbetrieb muß ein «qualifizierter Sachverständiger» zur Verfügung stehen, der für die konkreten Strahlenschutzmaßnahmen verantwortlich ist und insbesondere auch die *Arbeitsdisziplin* des Personals zu überwachen hat. Er muß mit den entsprechenden Kompetenzen ausgerüstet sein. Kontrollierte Zonen sollen allgemein nur beruflich strahlenexponierten Personen, die über eine anerkannte Ausbildung verfügen müssen, zugänglich sein. Sie sind baulich so zu disponieren oder mit andern Schutzmitteln zu versehen, daß die *maximal zulässige Dosis von 5 rem pro Jahr* = 100 mrem pro Woche (= 2 mrem/h bei 45 stündiger Arbeitszeit) unter Einhaltung der für den Betrieb geltenden (besondern) Vorschriften nicht überschritten werden kann. Voraussetzung der Einrichtung der Schutzmittel einer Bestrahlungsanlage ist also die Kenntnis ihrer jährlichen oder besser *wöchentlichen Betriebszeit*. Für viele Anlagen (besonders medizinisch-therapeutische) wird eine solche von 15 h/Woche und damit eine maximal zulässige Dosisleistung für das strahlenexponierte Personal von 7 mrem/h angenom-

men. Solche reduzierte Betriebszeiten bedeuten aber eine verbindliche Auflage für den Betrieb der Anlage und müssen eingehalten und in Form einer in unmittelbarer Nähe des Schaltaggregates der Anlage fest angebrachten Vorschrift deutlich sichtbar vermerkt sein. Die maximal zulässige Dosis erlaubt eine gewisse Beweglichkeit des Betriebes, indem zugelassen wird, daß die Dosis während 13 aufeinanderfolgenden Wochen (¼ Jahr) bis auf höchstens 3 rem erhöht werden darf, natürlich nur unter der Voraussetzung, daß dabei die total zulässige Jahresdosis von 5 rem nicht überschritten wird.

2.2. Betrachtung konkreter Fälle

Der Betrieb einer Bestrahlungsanlage ist bewilligungspflichtig. Die wichtigste technische Voraussetzung zur Erteilung der Bewilligung ist die Gewährleistung des Strahlenschutzes. Derselbe muß deshalb vor der Installation der Anlage unter den besondern Voraussetzungen ihrer Installation und ihres Betriebes und Zweckes geplant werden. Da eine solche Planung den wissenschaftlich interessantesten und auch wohl wichtigsten Teil der Aufgabe des qualifizierten Sachverständigen darstellt, soll sie an den zwei schon im ersten Teil erwähnten Beispielen kurz erläutert werden.

2.21. Gammazelle

Dieselbe soll mit 2 kc <sup>60</sup>Co beschickt sein. Die Dosisleistung soll (nach Vorschrift) in 1 m Abstand von der Oberfläche der Anlage 10 mR/h nicht überschreiten. Wie dick muß die Bleiabschirmung sein, wenn der Abstand von der Achse der Quelle zur Oberfläche 30 cm beträgt?

Die Dosisleistungskonstante auf 1 m Abstand und auf 1 c bezogen beziffert sich auf 1,32 R · m<sup>2</sup>/c · h. Die Aktivität von 2 kc verursacht also in 1 m Abstand im freien Raum die Dosisleistung von 2640 R/h = 2,64 · 10<sup>6</sup> mR/h. Die Gleichung für den Abschwächungsfaktor S lautet:

$$S = \frac{K_D \cdot A \cdot t}{r^2 \cdot D_m}$$

Dabei bedeuten:

- $K_D$  Dosisleistungskonstante in mR · m<sup>2</sup>/c · h (1320)
- $A$  Aktivität in c (2000)
- $r$  Abstand in m (1,3)
- $D_m$  Maximal zulässige Dosisleistung in mR/h (10).

Unter Verwendung der obgenannten Bedingungen ergibt sich

$$S = \frac{1320 \cdot 2000}{1,3^2 \cdot 10} = 1,565 \cdot 10^5$$

Der weitere Verlauf der Berechnung wird dann besonders einfach und praktisch, wenn man ihn auf sogenannte Zehntelwertschichten (ZWS) des Schutzstoffes bezieht, also auf Schichtdicken, welche die Dosisleistung auf einen Zehntel reduzieren. Diese sind definiert durch

$$J = \frac{J_0}{10} = J_0 e^{-\mu \cdot ZWS}; ZWS = \frac{\lg 10}{\mu} = \frac{2,3}{\mu}$$

Durch den Schutzstoff soll die Dosisleistung von  $J_0$  auf  $\frac{J_0}{S} = J_0 e^{-\mu \cdot n \cdot ZWS}$  reduziert werden. Es gilt also  $\log S = \mu \cdot n \cdot ZWS = 2,3 \lg S$ . Ersetzt man  $\mu$  nach der Definition der ZWS durch  $\mu = \frac{2,3}{ZWS}$ , so ergibt sich die Zahl der ZWS zu

$$n = \log S.$$

Für das gewählte Beispiel (2 kc <sup>60</sup>Co in 1,3 m vom Strahlenfeldzentrum, Schwächung auf 10 mR/h) folgt

$$n = \log 156500 \cong 5,2 \text{ ZWS.}$$

Wie der Abb.2 entnommen werden kann, beträgt die erste ZWS in Blei für die <sup>60</sup>Co-γ-Strahlung 4,5 cm, für die folgenden 4,0 cm. Damit wird die erforderliche Bleidicke der Umhüllung der Gammazelle 21,3 cm Pb.

2.22. Maschinelles Elektronenbeschleuniger

Derselbe soll bei 3 MeV Elektronenenergie eine Strahlstromstärke von 500 μA, also eine Strahlenleistung von 1,5 kW aufweisen. Wie dick muß der bauliche Schutz aus Normalbeton (spezifisches Gewicht 2,35) gegen das 4 m entfernte Schaltaggregat sein, wenn die Einschaltzeit der Anlage maximal 15 h pro Woche beträgt?

Da die Reichweite der primären Elektronen in kondensierter Materie nur gering ist, stellt der Schutz gegen dieselben kein Problem dar. Für die bauliche Disposition müssen deshalb nur die Verhältnisse der Röntgen-

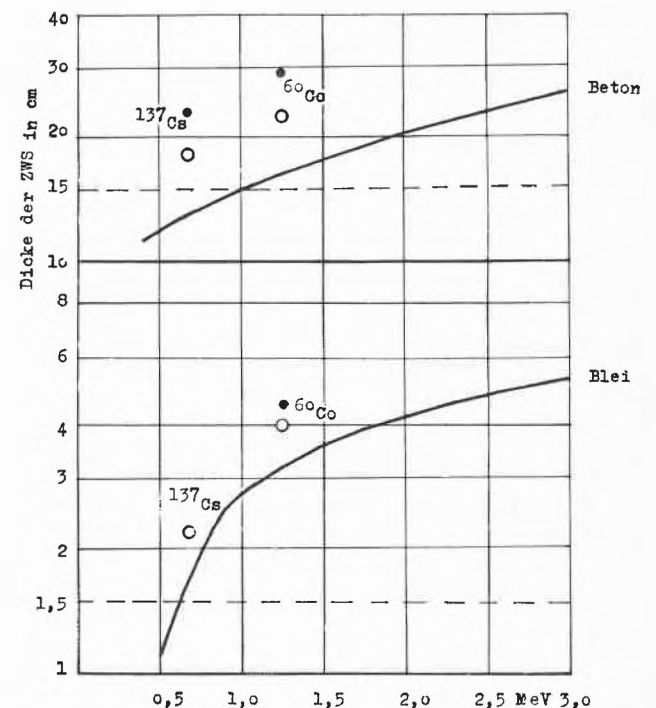


Abb. 2. Dicke der Zehntelwertschichten in Blei (spezifisches Gewicht: 11,3 g/cm<sup>3</sup>) und Normalbeton (spezifisches Gewicht 2,35 g/cm<sup>3</sup>) für Röntgenstrahlen in Abhängigkeit von der Elektronenenergie (Abszisse). Ebenfalls eingetragen die Zahlenwerte für die γ-Strahlung von <sup>60</sup>Co und <sup>137</sup>Cs (ausgefüllte Punkte: 1. ZWS; Kreise: ff. ZWS)

Bremsstrahlenerzeugung berücksichtigt werden. Ihr Anteil beträgt nach der Approximation der *Bethe-Heitler*-Formel

$$\frac{\Delta E_p}{\Delta E_i} = \frac{Z \cdot E}{850},$$

wobei  $Z$  die Kernladungszahl des Bremsstoffes und  $E$  die Elektronenenergie in MeV bedeuten.

In Abb. 3 sind die Röntgenstrahlen-Dosisleistungen in R/min pro mA Elektronenstromstärke für verschiedene Elektronenenergien in 1 m Abstand (in Richtung des Elektronenbündels gemessen) von einem Schwermetallabsorber (Au, Pt, W) nach Messungen zahlreicher Autoren dargestellt.

Aus der Abbildung kann entnommen werden, daß bei 3 MeV und 0,5 mA die Röntgenstrahlendosisleistung in 1 m Abstand vom Elektronenabsorber

$$L_R \cong 0,7 \cdot 10^3 \text{ R/min} \cong 42 \cdot 10^6 \text{ mR/h}$$

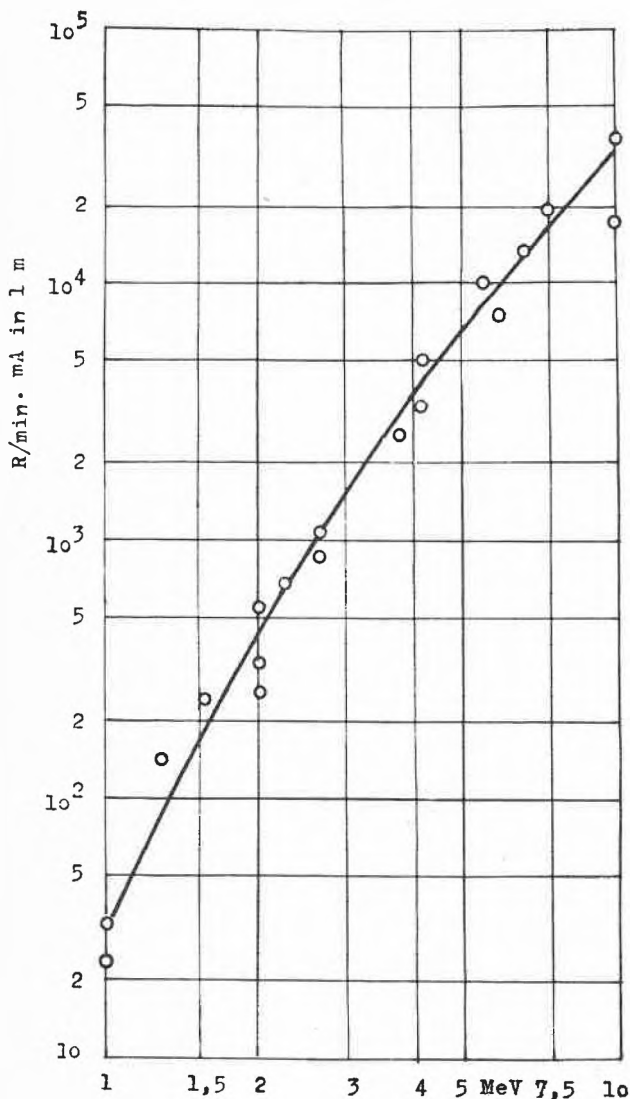


Abb. 3. Ausbeute der Röntgenstrahlenerzeugung  $L_R$  in R/min pro mA Röhrenstrom in 1 m von der «Antikathode» aus Schwermetall (Au, Pt, W) in Richtung des Elektronenbündels gemessen, zusammengestellt von H. E. C.

beträgt. Für die Röntgendirektstrahlung berechnet sich der erforderliche Abschwächungsfaktor zu

$$S = \frac{L_R}{D_m \cdot r^2} = \frac{42 \cdot 10^6}{7 \cdot 16} = 3,75 \cdot 10^5.$$

Die Zahl der erforderlichen Zehntelwertschichten wird damit zu

$$n = \log S \cong 5,6 \text{ ZWS.}$$

Der Abb. 2 kann entnommen werden, daß die ZWS Normalbeton für Röntgenstrahlen von 3 MV Erzeugungsspannung 26 cm beträgt. Die Abschirmung muß also  $5,6 \cdot 26 = 146$  cm Normalbeton betragen.

Für Bereiche, deren Richtung mehr als  $10^\circ$  von der Richtung des Elektronenbündels abweicht, sind erheblich geringere Schutzdicken erforderlich. Ebenso dürfte die geringere Röntgendosisleistung bei leichteren Absorbermaterialien nach der Proportionalität zur Kernladungszahl berücksichtigt werden.

### 3. Literaturhinweise

Das Verzeichnis enthält nur neuere Bücher, deren Inhalt sich besonders oder ausschließlich mit dem behandelten Gegenstand beschäftigt.

1. ASTIN H.V. (Herausgeber), Report of the International Commission on Radiological Units and Measurements, *U. S. Nat. Bur. Stand. Handbook 62* (Washington 1956).
2. BECK H. R., H. DRESEL und H. J. MELCHING, *Leitfaden des Strahlenschutzes*, Verlag Thieme, Stuttgart 1959.
3. BRAESTRUP C. B. und H. O. WYCKOFF, *Radiation Protection*, Thomas, Springfield 1958.
4. FROST D., *Praktischer Strahlenschutz*, Verlag de Gruyter, Berlin 1960.
5. GUSSEW N. G., *Leitfaden für Radioaktivität und Strahlenschutz*, VEB-Verlag Technik, Berlin 1957.
6. HINE G. J. und G. L. BROWNELL (Herausgeber), *Radiation Dosimetry*, Academic Press, New York 1956.
7. JÄGER R. G., *Dosimetrie und Strahlenschutz*, Verlag Thieme, Stuttgart 1958.
8. I. C. R. P., *Report of Committee III, Protection Against X-Rays up to Energies of 3 MeV and Beta- and Gamma-Rays from Sealed Sources*, Pergamon Press, London 1960.
9. KIEFER H. und R. MAUSHART, *Strahlenschutzmeßtechnik*, Verlag Braun, Karlsruhe 1964.
10. MARLEY W. G. und K. Z. MORGAN (Herausgeber), *Health Physics*, Pergamon Press, London/New York 1959.
11. MEREDITH J. W., *Radium Dosage*, Livingstone, Edinburgh 1947.
12. MINDER W., *Dosimetrie der Strahlungen radioaktiver Stoffe*, Springer-Verlag, Wien 1961.
13. MOHLER H. (Herausgeber), *Chemische Reaktionen ionisierender Strahlen*, Verlag Sauerländer, Aarau und Frankfurt am Main 1958.
14. PRICE B. T., C. C. HORTON und K. T. SPINNY, *Radiation Shielding*, Pergamon Press, London 1957.
15. RAJEWSKY B., *Strahlendosis und Strahlenwirkung*, Verlag Thieme, Stuttgart 1956.
16. ROCKWELL TH., *Reactor Shielding*, Von Norstrand, New York 1956.
17. WHITE G. N., *Principles of Radiation Dosimetry*, John Wiley & Sons, New York 1959.
18. WILSON C. W., *Radium Therapy; its Physical Aspects*, Chapman & Hall, London 1944.