

**DIETRICH FROST**  
**PRAKTISCHER STRAHLENSCHUTZ**



# **PRAKTISCHER STRAHLENSCHUTZ**

**Eine Einführung in die Technik  
des Schutzes vor ionisierenden Strahlen  
für Nichtphysiker**

von

**Dr.-Ing. DIETRICH FROST**

Leiter der Abteilung für Strahlungsphysik  
am Röntgen- und Strahleninstitut  
im Rudolf-Virchow-Krankenhaus, Berlin-West

Mit 107 Abbildungen

**WALTER DE GRUYTER & CO.**



vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung · J. Guttentag, Verlagsbuchhandlung  
Georg Reimer · Karl J. Trübner · Velt & Comp.

**BERLIN 1960**

©

Copyright 1980 by Walter de Gruyter & Co., vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung,  
J. Guttentag, Verlagsbuchhandlung, Georg Reimer, Karl J. Trübner, Veit & Comp., Berlin W 35

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der photomechanischen  
Wiedergabe, der Herstellung von Mikrofilmen und der Übersetzung, vorbehalten

Printed in Germany — Archiv.-Nr. 51 90 80

Satz: Walter de Gruyter & Co., Berlin W 35 — Druck: Paul Funk, Berlin

## Vorwort

Das vorliegende Buch wendet sich an den großen Kreis von „Lesern aller Fakultäten“, deren Fachgebiet sich in letzter Zeit auch auf Fragen des Strahlenschutzes erweitert hat. Hierzu gehören Bauingenieure, Architekten und Elektroingenieure, sowie alle anderen, die mit Bau und Einrichtung von Krankenhäusern, Reaktorstationen, industriellen- und wissenschaftlichen Radioaktivitätslaboratorien beruflich zu tun haben. Das Buch soll ferner dem mit Strahlung arbeitenden Arzt, Chemiker, Ingenieur oder Biologen die Grundkenntnisse des Strahlenschutzes vermitteln, die er zur Erfüllung der gesetzlichen Bestimmungen ebenso benötigt, wie zur Planung einer Strahlenabteilung.

Um dieses Buch für den großen Kreis von Nichtfachleuten leicht verständlich zu gestalten, müssen die theoretischen Voraussetzungen auf ein Minimum reduziert werden. Die gleichen Gründe führten auch zu der knappen Darstellung der Wirkungen der Strahlung auf Materie. Beide Kapitel erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, wofür ich die Fachleute um Verständnis bitte.

Es ist in deutschen Lehrbüchern üblich, das Tatsachenmaterial objektiv und gleichberechtigt unter möglichst vollständiger Literaturübersicht darzustellen. Dies ist gut und richtig in all denjenigen Fällen, in denen das Buch Fachleute anspricht. Für eine Einführung erschwert die genannte Darstellungsart aber die schnelle Auswahl des Stoffes und die Anwendung auf eigene Probleme. Im Verlauf der Schilderung von Methoden, Verfahren, Apparaturen und Geräten werden daher Anwendungsbreite und Kritik im Vordergrund stehen, während die Literaturangaben sich auf die für den Leser möglicherweise notwendigen Stellen beschränken.

Nur auf dem genannten Wege schien es dem Verfasser möglich, eine große Anzahl von Nichtfachleuten im „Schnellverfahren“ mit den notwendigen Grundlagen des Strahlenschutzes vertraut zu machen.

Berlin, Januar 1960

*Dietrich Frost*



# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>A. Systematik der Strahlungen</b> . . . . .	1
1. Röntgenstrahlen . . . . .	1
2. Natürliche und künstliche radioaktive Elemente . . . . .	2
a) Alphastrahlung . . . . .	3
b) Betastrahlung und Gammastrahlung . . . . .	4
c) Positronenstrahlung . . . . .	4
d) K-Strahlung . . . . .	4
e) Neutronenstrahlung . . . . .	4
<b>B. Definitionen und Einheiten der Strahlungen</b> . . . . .	6
1. Radioaktive Mengeneinheit (Präparatstärke) . . . . .	6
2. Einheiten der Strahlungsenergie. . . . .	6
3. Die Einheiten der Dosis und der Dosisleistung . . . . .	7
a) Ionendosis . . . . .	7
b) Ionendosisleistung . . . . .	8
c) Energiedosis . . . . .	8
d) Energiedosisleistung . . . . .	9
e) Die relative biologische Wirksamkeit (RBW). . . . .	10
f) Die Neutronendosis . . . . .	10
g) Die Dosiskonstante von Gamma-Strahlern . . . . .	11
h) Die Dosiskonstante für Beta-Strahler . . . . .	11
i) Gewebedosis . . . . .	11
<b>C. Die Wechselwirkung von Strahlung und Materie</b> . . . . .	14
1. Absorptionsvorgänge für Röntgen- und Gamma-Strahlen . . . . .	14
a) Photoeffekt . . . . .	14
b) Compton-Effekt . . . . .	14
c) Paarbildung-Effekt . . . . .	15
d) Das Absorptionsgesetz . . . . .	15
e) Die Streuung der Photonen . . . . .	16
f) Der Kernphotoeffekt . . . . .	16
2. Der Durchgang von Beta-Strahlung durch Materie . . . . .	16
3. Das Verhalten von Alpha-Teilchen und Protonen in Materie . . . . .	19
4. Das Verhalten von Neutronen in Materie. . . . .	20
<b>D. Strahlenbiologische Grundbegriffe</b> . . . . .	22
1. Physikalische Primärvorgänge . . . . .	22
2. Systematik der Strahlenschäden des menschlichen Organismus . . . . .	23

	Seite
<b>E. Dosiswerte für die Strahlenexposition des Menschen</b> . . . . .	25
1. Die natürliche Strahlenbelastung . . . . .	25
2. Die zivilisatorische Strahlenbelastung . . . . .	28
a) Exposition der Gesamtbevölkerung . . . . .	28
b) Die berufliche Strahlenexposition . . . . .	31
3. Höchstzulässige Strahlenbelastungen . . . . .	36
a) Höchstzulässige Strahlenbelastung ohne Rücksicht auf genetische Schäden . . . . .	36
b) Höchstzulässige Belastung unter Berücksichtigung genetischer Schäden . . . . .	37
<b>F. Die Grundlagen der Strahlungsmeßverfahren</b> . . . . .	54
1. Ionisationskammer und Zählrohr . . . . .	54
a) Ionisationskammer-Bereich ungesättigt . . . . .	55
b) Ionisationskammer-Bereich gesättigt . . . . .	55
c) Proportional-Bereich . . . . .	56
d) Geiger-Müller-Bereich . . . . .	57
e) Entladungs-Bereich . . . . .	58
f) Zählrohrcharakteristik . . . . .	58
g) Auflösungsvermögen . . . . .	58
2. Gamma- und Betazählrohre . . . . .	59
3. Der Szintillationszähler . . . . .	59
a) Wirkungsweise und Aufbau . . . . .	61
b) Die verschiedenen Szintillatoren . . . . .	62
4. Gammaspektroskopie . . . . .	64
a) Nulleffekt und Abschirmung . . . . .	65
5. Impulsverstärker und Anzeigegeräte . . . . .	66
6. Statistischer Meßfehler . . . . .	69
<b>G. Die Meßtechnik der Strahlungen</b> . . . . .	72
1. Röntgenstrahlen und ihre Messung . . . . .	72
a) Strahlenschutzmessungen an kontinuierlich betriebenen Röhren . . . . .	72
b) Strahlenschutzmessungen an Röntgen-Aufnahme-Geräten . . . . .	75
c) Strahlenschutzmessungen an Betatron-Geräten im Targetbetrieb . . . . .	78
2. Gammastrahlen und ihre Messung . . . . .	78
a) Strahlenschutzmessungen an geschlossenen Gamma-Quellen . . . . .	78
b) Strahlenschutzmessungen von offenen Gammastrahlern . . . . .	79
3. Betastrahlen und ihre Messung . . . . .	81
a) Strahlenschutzmessungen an geschlossenen Beta-Quellen . . . . .	81
b) Strahlenschutzmessungen von offenen Betastrahlern . . . . .	82
4. Alphastrahlen und ihre Messung . . . . .	83
5. Neutronen-Strahlung und ihre Messung . . . . .	84
<b>H. Die Überwachung der individuellen Strahlenbelastung</b> . . . . .	88
1. Das Füllhalterdosimeter . . . . .	88
2. Filmplaketten . . . . .	90
3. Individuelle Strahlenwarnung . . . . .	91

<b>I. Die Kontaminationskontrolle des Arbeitsplatzes . . . . .</b>	<b>97</b>
<b>K. Die Strahlungsüberwachung von Luft und Wasser . . . . .</b>	<b>100</b>
1. Die Messung der Luftaktivität . . . . .	100
a) Das Filterverfahren . . . . .	100
b) Das elektrostatische Verfahren . . . . .	102
2. Die Messung der Wasseraktivität . . . . .	102
a) Verfahren ohne Anreicherung . . . . .	106
b) Verfahren mit Anreicherung . . . . .	107
<b>L. Aktivitätsmessungen am Menschen . . . . .</b>	<b>109</b>
1. Kontaminationskontrollen . . . . .	109
2. Ganzkörpermessungen . . . . .	109
3. Urinkontrollen . . . . .	111
4. Verteilungsuntersuchungen . . . . .	111
<b>M. Die Abschirmung der Strahlungen . . . . .</b>	<b>114</b>
1. Voraussetzungen . . . . .	114
2. Abschirmwerte für Röntgenstrahlen . . . . .	114
3. Abschirmwerte für Gammastrahlen . . . . .	124
4. Bleigleichwerte von Schutzstoffen und Baumaterialien . . . . .	136
a) Bleigleichwerte von Baumaterialien . . . . .	136
b) Bleigleichwerte von Bleigummi und Bleiglas . . . . .	138
5. Abschirmwerte für Betastrahlen . . . . .	138
6. Die Abschirmung von Neutronen . . . . .	140
<b>N. Bautechnischer Strahlenschutz . . . . .</b>	<b>142</b>
1. Allgemeines . . . . .	142
2. Röntgen-Diagnostik . . . . .	142
3. Röntgen-Therapie . . . . .	143
4. Hochvolt- und Telegammaanlagen . . . . .	144
5. Eine klinische Abteilung für Radioisotope . . . . .	146
6. Industrielle Laboratorien für Radioisotope . . . . .	155
a) Chemische Laboratorien . . . . .	155
b) Laboratorien zur Herstellung von radioaktiven Präparaten . . . . .	156
c) Betriebslaboratorien für Radioisotope . . . . .	158
d) Laboratorien von Geräteherstellern . . . . .	158
7. Gamma-Großquellen in Industrie und Landwirtschaft . . . . .	158
8. Kleinere geschlossene Strahler als industrielles Hilfsmittel . . . . .	159
9. Reaktor-Schutz . . . . .	159
<b>O. Der Strahlenschutz des Arbeitsplatzes . . . . .</b>	<b>163</b>
1. Allgemeines . . . . .	163
2. Röntgen-Arbeitsplätze . . . . .	163
3. Arbeitsplätze an Telegamma- und Hochvolt-Röntgenanlagen . . . . .	167

	Seite
4. Arbeitsplätze für geschlossene Gamma-Strahler . . . . .	167
5. Arbeitsplätze für offene Gamma-Strahler . . . . .	170
6. Arbeitsplätze für Beta- und Alpha-Strahler . . . . .	173
7. Arbeitsplätze in Reaktorbetrieben . . . . .	175
8. Arbeitsplätze in der Uranindustrie. . . . .	176
<b>P. Abfall- und Abwasserbeseitigung . . . . .</b>	<b>178</b>
1. Beseitigung radioaktiver Abfälle . . . . .	178
2. Abwasserbeseitigung. . . . .	178
<b>Q. Dekontaminierung . . . . .</b>	<b>180</b>
1. Dekontaminierung von Kleidung . . . . .	180
2. Dekontaminierung von Personal . . . . .	180
3. Dekontaminierung von Arbeitsgerät . . . . .	181
4. Dekontaminierung von Arbeitsplätzen . . . . .	182
<b>R. Verhaltensmaßregeln für Labor- und Pflegepersonal . . . . .</b>	<b>183</b>
a) Anweisung für Arbeiten mit radioaktiven Stoffen . . . . .	183
b) Anweisung für Arbeiten mit geschlossenen radioaktiven Präparaten . . . . .	185
c) Umgang mit radioaktiv behandelten Patienten . . . . .	186
d) Allgemeine Verpflichtungen . . . . .	187
Zusammenfassende Literatur. . . . .	188
Schrifttum. . . . .	189
Sachverzeichnis . . . . .	190

## A. Systematik der Strahlungen

### 1. Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen entstehen, wenn schnell bewegte Elektronen auf ein Hindernis auftreffen. Bei der Abbremsung der Elektronen im Feld der Atomkerne des Anodenmaterials wird ein bestimmter Energiebetrag frei, der in Form von elektromagnetischer Strahlung nach außen abgegeben wird. Diese sog. Röntgen-Bremsstrahlung stellt ein Kontinuum dar, das sich von den längsten Wellen bis zu einer scharfen kurzwelligen Grenze, der „Grenzwellenlänge“ erstreckt. Die Grenzwellenlänge entspricht dabei der Maximalenergie der schnellsten abgebremsten Elektronen. Das Maximum der spektralen Bremsstrahlenverteilung liegt also stets bei einer größeren, als der Grenzwellenlänge; d. h. die dem Strahlungsmaximum zugeordnete kV-Zahl ist wesentlich geringer als die zur Grenzwellenlänge gehörige. Dies veranschaulicht **Abbildung 1**.

Neben der Bremsstrahlung wird stets noch eine für das Material der Anode charakteristische Strahlung erzeugt. Diese sog. „Eigenstrahlung“ ist dem Bremskontinuum als Linienspektrum überlagert. Auf ihrer Anwendung beruht das große Gebiet der Röntgenstrukturanalyse.

Die spektrale Bremsstrahlungsverteilung ist gemäß **Abbildung 1** von der Beschleunigungsspannung der Elektronen abhängig. Sie ist aber weiterhin auch abhängig von der Kurvenform der Beschleunigungsspannung. D. h. die Art des benutzten Röntgenstrahlerzeugers, wie Halbwellenapparat, 4-Ventilapparat, 6-Ventilapparat, Betatron, Bandgenerator beeinflusst das Bremsspektrum. In noch weiterem Umfange wird die Bremsverteilung durch die Filterung der Röhre bestimmt. Mit zunehmender Filterdicke vor dem Austrittsfenster wird ein steigender Anteil an langwelliger Strahlung absorbiert. Damit rückt das Maximum der Bremsverteilung, wie in **Abbildung 2** dargestellt, nach der kurzwelligen Grenze.

Um nun die „Qualität“ einer Röntgenstrahlung durch einen Zahlenwert zu charakterisieren, wurde der Begriff der „Halbwertschicht“-HWS eingeführt. Als Halbwertschicht HWS wird diejenige Schichtdicke in Kupfer oder Aluminium angegeben, die bei konstanter Meßgeometrie die Intensität der Primärstrahlung auf die Hälfte herabsetzt.

Eine höhere Strahlenenergie mit schwacher Filterung kann die gleiche HWS ergeben, wie eine niedrigere Strahlenenergie mit starker Filterung.

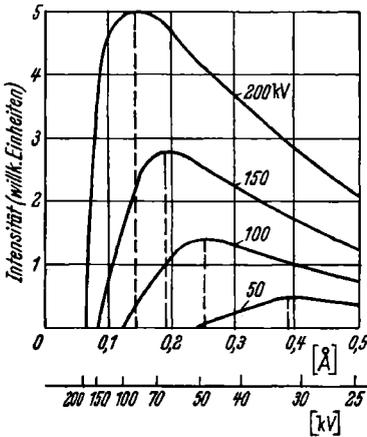


Abb. 1. Spektrale Intensitätsverteilung der Röntgen-Bremsstrahlung

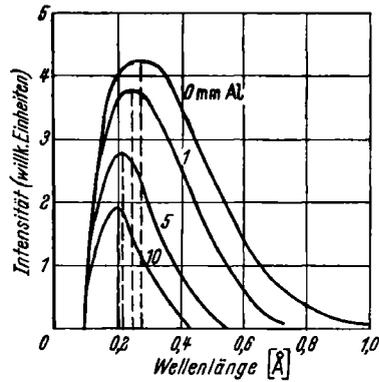


Abb. 2. Spektrale Intensitätsverteilung bei Filterung der Bremsstrahlung

Die HWS gestattet also die Angabe der Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlung durch einen einzigen Zahlenwert.

Eine Röntgenstrahlung, die so weitgehend gefiltert wurde, daß das Maximum der Bremsverteilung bei dem doppelten der Grenzwellenlänge bzw. bei der halben kV-Zahl liegt, wird „Normalstrahlung“ genannt. An dieser Stelle ist auf den Vergleich einer Röntgenstrahlung mit einer monochromatischen Strahlung (z. B. Gammastrahlung) gleicher zahlenmäßiger Energieangabe hinzuweisen. Im Falle der Röntgenstrahlung bezieht sich die Energieangabe stets auf die kurzwellige Grenze der Bremsverteilung, während bei einer monochromatischen Strahlung die volle Intensität einer einzigen Linie zugeordnet ist. Wird eine Röntgen-Normalstrahlung mit einer Gamma-Strahlung gleicher Energiezahl verglichen, so ist die Gamma-Strahlung etwa doppelt so energiereich.

## 2. Natürliche und künstliche radioaktive Elemente

Ein Atomkern läßt sich symbolisch durch die Massenzahl  $A$  und die Ordnungszahl  $Z$  kennzeichnen. Dabei wird  $A$  als oberer Index an das chemische Symbol des Elementes angeschrieben und die Ordnungszahl  $Z$  als unterer Index. Die Kernladungs- oder Ordnungszahl kann als bekannt vorausgesetzt werden, so daß auf ihre Angabe häufig verzichtet werden kann. Nach dieser Bezeichnung gilt z. B. für

einen Sauerstoffkern die Schreibweise  ${}^8\text{O}^{16}$  oder  $\text{O}^{16}$   
 einen Wasserstoffkern die Schreibweise  ${}^1\text{H}^1$   
 ein Proton die Schreibweise  ${}^1\text{p}^1$   
 ein Neutron die Schreibweise  ${}^0\text{n}^1$

Als Isotope bezeichnet man allgemein Stoffe, die sich bei gleicher Ordnungszahl durch verschiedene Neutronenzahlen unterscheiden.

Die schwersten Elemente des natürlichen periodischen Systems der Elemente erleiden einen dauernden Umwandlungsprozeß. Diese spontanen Zerfallsvorgänge wandeln eine Atomart in eine andere um. Die Zahl dieser Umwandlungen kann eine ganze Reihe von Elementen durchlaufen, bis sie mit einem stabilen Isotop ihr Ende findet. Bei jeder der genannten Atomumwandlungen wird ein gewisser Energiebetrag frei. Diese Energie wird in Form von korpuskularer Strahlung, z. T. begleitet durch Quantenstrahlung, abgestrahlt.

Wir kennen vier radioaktive Zerfallsreihen:

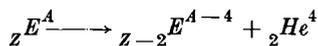
- Die Thorium-Reihe,
- die Neptunium-Reihe,
- die Uran-Radium-Reihe,
- die Uran-Aktinium-Reihe.

Im Gegensatz zu den lange bekannten, natürlich radioaktiven Kernen kennen wir heute rund 1000 verschiedene, in der Natur nicht vorhandene instabile Atomarten. Sie können durch äußere Einwirkung mit Hilfe von Kernreaktionen erzeugt werden. Bei diesen künstlich radioaktiven Kernen oder Radioisotopen handelt es sich um strahlende Kernarten von Elementen, die in der Natur meist nur stabile Isotope besitzen. Der Zerfall von künstlich radioaktiven Isotopen erfolgt hauptsächlich unter Emission von Elektronen ( $\beta^-$ ), seltener von Positronen ( $\beta^+$ ), nicht so häufig auch durch Elektroneneinfang (K-Strahlung). Nur in seltensten Fällen läßt sich bei Radioisotopen eine  $\alpha$ -Emission beobachten.

### a) Alphastrahlung

Als Alphastrahlung werden die beim Zerfallsakt emittierten Helium-Atomkerne  ${}_2\text{He}^4$  bezeichnet. Bei der Emission eines Alpha-Teilchens wird der Kern um 4 Masseneinheiten und 2 Ladungseinheiten verringert. Nach dem Verschiebungssatz von FAJANS rückt daher der Kern um 2 Stellen nach links im periodischen System der Elemente.

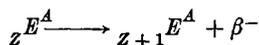
Charakteristisch für den Alpha-Zerfall ist die Gleichung:



Die Alpha-Teilchen eines bestimmten radioaktiven Isotops haben alle die gleiche Reichweite.

### b) Betastrahlung und Gammastrahlung

Die Emission von Kernelektronen wird als Betastrahlung bezeichnet. Symbolisch können wir schreiben:



Der entstehende Kern rückt im periodischen System um eine Stelle nach rechts. Im Gegensatz zum Alpha-Zerfall ergibt der Beta-Prozeß ein kontinuierliches Energiespektrum. Der Übergang eines Atomkerns in einen Folgekern unter  $\beta^-$ -Emission ist aus Gründen der Energiebilanz häufig von einer Gamma-Strahlung begleitet. Die Energie dieser quantenhaften Gamma-Strahlung (Photonen-Strahlung) entspricht dabei dem Betrag der überschüssigen Anregungsenergie des Folgekernes.

### c) Positronenstrahlung

Eine Anzahl künstlich radioaktiver Isotope sendet eine Strahlung aus, die von derjenigen der natürlichen Strahler verschieden ist. Die bei diesem sog.  $\beta^+$ -Zerfall entstehende Positronenstrahlung besteht aus positiven Elektronen, die in Gegenwart von Materie nur kurzzeitig frei existieren können. Bei der Vereinigung eines Positrons mit einem negativen Elektron wird das „Elektronenpaar“ vernichtet und wandelt sich nach der Äquivalenzgleichung in zwei Gammaquanten um. Dieser Umkehrungsprozeß zur Paarbildung läuft nur bei Überschußenergien von mehr als 1 MeV ab.

### d) K-Strahlung

Bei Kernen, deren Instabilität auf einer zu großen Protonenzahl beruht, besteht die Möglichkeit, daß der Kern nicht unter Positronenemission zerfällt, sondern umgekehrt ein Elektron einfängt. Dieses Elektron wird vorzugsweise der kernnächsten, der K-Schale, entnommen. Beim Übergang eines kernferneren Elektrons in die Elektronenlücke der K-Schale wird dann die jeweilige Röntgen-K-Strahlung emittiert. Durch Bahnelektroneneinfang wandeln sich fast alle schweren, instabilen Kerne mit einem Protonenüberschuß in stabile Isotope um.

### e) Neutronenstrahlung

Neutronen bilden mit Protonen zusammen die Bausteine der Atomkerne. Sie haben die Ladung 0 und erleiden daher keinerlei Abstoßung in anderen Kernfeldern. Sie besitzen die Masse eines Wasserstoffkernes und können sich trotzdem praktisch ungehindert durch die Hüllen anderer Atome hindurchbewegen. Wenn sie nicht mit einem Atomkern zusammenstoßen gehen sie mit einer Halbwertzeit von 13 min unter Beta-Zerfall in Protonen über. Normalerweise kommen Neutronen nicht in der Natur vor.

Durch eine Gruppe von Kernreaktionen können Neutronen erzeugt werden. Dies geschieht vorzugsweise in Kernreaktoren. Freie Neutronen sind durch Ionisation der Materie nicht direkt nachzuweisen. Nachweis und Messung müssen wieder über eine Kernreaktion vorgenommen werden. Zu diesem Zweck werden Kernreaktionen bevorzugt, die ionisierende Teilchen oder Strahlung hervorrufen.

## B. Definitionen und Einheiten der Strahlungen

### 1. Radioaktive Mengeneinheit (Präparatstärke)

Nach der Definition der Internationalen Radium-Standard-Kommission aus dem Jahre 1930 ist 1 Curie (C) diejenige Menge einer Substanz der Uran-Radium-Reihe, die mit 1 g Radium im Gleichgewicht steht. Die Aktivität 1 C beträgt  $3,7 \cdot 10^{10}$  Zerfälle/sec. Im Jahre 1950 wurde die Definition verallgemeinert: Das Curie ist diejenige Menge irgendeiner radioaktiven Kernart, deren Aktivität  $3,7 \cdot 10^{10}$  Zerfälle/sec. beträgt. Also:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Curie} \quad (\text{C}) &= 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Zerfälle/sec.} \\ 1 \text{ Millicurie} \quad (\text{mC}) &= 3,7 \cdot 10^7 \text{ Zerfälle/sec.} \\ 1 \text{ Mikrocurie} \quad (\mu\text{C}) &= 3,7 \cdot 10^4 \text{ Zerfälle/sec.} \end{aligned}$$

Als spezifische Aktivität wird die im Gramm einer strahlenden Substanz enthaltene Aktivität bezeichnet (C/g, mC/g oder  $\mu\text{C/g}$ ). Die spezifische Aktivität ist für alle biologischen Untersuchungen eine sehr wichtige Größe.

### 2. Einheiten der Strahlungsenergie

Die beim radioaktiven Zerfall freiwerdenden und die durch Beschleunigungsanlagen erzeugten Partikel besitzen eine bestimmte kinetische Energie. Sie kann auf Grund folgender Definition angegeben werden:

Durchläuft ein geladenes Teilchen im Vakuum eine elektrische Potentialdifferenz von 1 Volt, so hat es am Ende seines Beschleunigungsweges die Energie 1 „Elektronenvolt“.

Wegen der Kleinheit dieser Grundeinheit verwendet man in der Praxis meist die größeren Einheiten:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Kiloelektronenvolt} \quad (\text{keV}) &= 10^3 \text{ eV} \\ 1 \text{ Megaelektronenvolt} \quad (\text{MeV}) &= 10^6 \text{ eV} \end{aligned}$$

Der Definition nach handelt es sich um die Angabe einer kinetischen Energie. Die Einheit kann daher auch für ungeladene Teilchen, wie Neutronen verwendet werden. Eine Anwendung der Einheit auf Röntgen- und Gammastrahlung setzt einen gedanklichen Umweg voraus: Die elektromagnetische Photonenstrahlung von  $x$  MeV entspricht einer mit  $x$  MeV beschleunigten Elektronenstrahlung, die auf eine Anode auf-

trifft und deren Röntgenbremsstrahlung eine kurzwellige Grenze von  $x$  MeV aufweist. Im Falle einer Röntgenstrahlung ist die Einheit noch plausibel, während ihre Anwendung auf Gamma-Strahler bereits abstrakt erscheint.

### 3. Die Einheiten der Dosis und der Dosisleistung

Über den Begriff der Dosis ist in den letzten Jahren vielfach diskutiert worden. Die Einheit „Röntgen“ galt nur für Röntgen- und Gamma-Strahlung bis zu einer Energie von etwa 3 MeV. Die Anwendung von Photonen-Strahlungen höherer Energie, sowie vor allem der Korpuskularstrahlung bedingte eine Verallgemeinerung des Dosisbegriffes. Der Fachnormenausschuß Radiologie hat in seinem Vornormblatt 6809 allgemeingültige Definitionen gefunden, die für Photonen und Korpuskeln gleichermaßen angewendet werden können.

#### a) Ionendosis

Die Ionendosis  $J$  einer ionisierenden Strahlung ist der Grenzwert des Quotienten aus der elektrischen Ladung  $\Delta Q$  eines Vorzeichens der Ionenpaare, die in einem Luftelement von der Masse  $\Delta m$  durch die Strahlung unmittelbar erzeugt werden, und der Masse  $\Delta m$ :

$$J = \frac{dQ}{dm} . \quad (1)$$

Die Standard-Ionendosis  $J_{st}$  ist die Ionendosis einer Röntgen- oder Gammastrahlung bei Elektronengleichgewicht:

$$J_{st} = \left( \frac{dQ}{dm} \right)_{st} \quad (2)$$

Elektronengleichgewicht in einem Material bedeutet, daß die in dem Volumenelement  $\Delta v$  von allen es durchsetzenden Sekundärelektronen abgegebene Energie gleich derjenigen Energie ist, welche die in  $\Delta v$  durch die Röntgen- oder Gammastrahlung gebildeten Sekundärelektronen auf ihrem gesamten Wege in dem Material abgeben.

Die Einheit der Ionendosis ist das „Röntgen“ ( $r$ ).

$$1 r = 2,58 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Coulomb (c)}}{\text{Kilogramm (kg)}} .$$

Dabei ist 1 Röntgen ( $r$ ) auch derjenige Betrag an Photonenstrahlung, der in 1 cm<sup>3</sup> trockener Luft von 760 mmHg Luftdruck und 0° C (Dichte 0,001293 g/cm<sup>3</sup>) eine Ionenmenge erzeugt, die einer elektrostatischen Ladungseinheit entspricht.

**b) Ionendosisleistung**

Die Ionendosisleistung  $j$  ist der Differentialquotient der Ionendosis nach der Zeit

$$j = \frac{dJ}{dt}. \quad (3)$$

Unter einer Dosisleistung versteht man allgemein die in der Zeiteinheit absorbierte Strahlungsdosis.

Die Standard-Ionendosisleistung  $j_{st}$  ist die Ionendosisleistung einer Röntgen- oder Gammastrahlung bei Elektronengleichgewicht:

$$j_{st} = \frac{dJ_{st}}{dt}. \quad (4)$$

Die Einheit der Ionendosisleistung ist das Röntgen/Sekunde (r/s).

**Tab. 1.** Beziehungen zwischen gebräuchlichen Vielfachen der Einheit der Ionendosisleistung

Dosisleistung	mr/h	$\mu$ r/s	r/h	r/min	r/s
1 mr/h	1	0,28	0,001	0,000017	0,00000028
1 $\mu$ r/s	3,6	1	0,0036	0,00006	0,000001
1 r/h	1000	280	1	0,017	0,00028
1 r/min	60000	17000	60	1	0,017
1 r/s	3600000	1000000	3600	60	1

**c) Energiedosis**

Die Röntgeneinheit ist exakt allein für das Material Luft gültig. Hierfür beträgt:

$$1 \text{ r} = 83,7 \text{ erg Energieabsorption in 1 g Luft.} \quad (5)$$

Bei Absorption der Strahlung in einem Material, dessen Ordnungszahl von derjenigen der Luft abweicht, ergibt das  $r$  nur nach Umrechnung ein brauchbares Maß.

Setzt man die Elektronenzahl in 1 g Luft willkürlich gleich 1, so ist die entsprechende Elektronenzahl für 1 g Wasser 1,13. Damit gilt:

$$1 \text{ r} = 83,7 \cdot 1,13 = 94 \text{ erg Energieabsorption in 1 g Wasser.} \quad (6)$$

Eine Strahlungsdosis, die in 1 g Wasser (bzw. Gewebe) einer Energieabsorption von 93 erg/g (oft auch 91 erg/g in der Literatur angegeben) entspricht, bezeichnet man als 1 Röntgen Equivalent Physical (rep).

Zur Allgemeingültigkeit der Energiedosis trägt daher die folgende Definition bei,

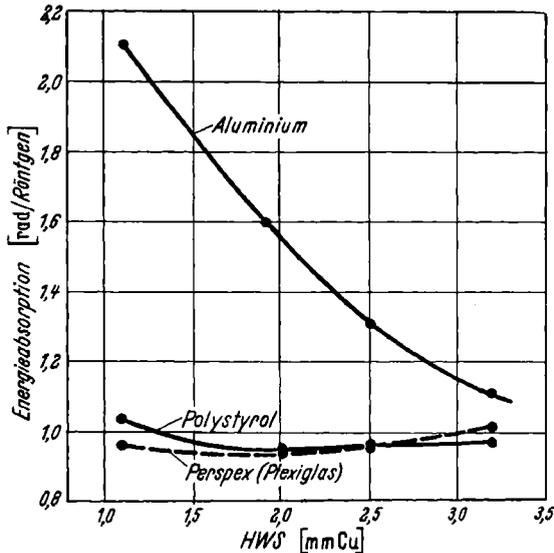


Abb. 3. Energieabsorption in rad/r in Abhängigkeit von der HWS für Röntgenstrahlen nach (P. N. GOODWIN)

Die Energiedosis  $K$  einer ionisierenden Strahlung ist der Grenzwert des Quotienten aus der Energie  $\Delta W$ , die einem Körperelement von der Masse  $\Delta m$  durch die Strahlung unmittelbar oder mittelbar zugeführt wird, und der Masse  $\Delta m$ :

$$K = \frac{dW}{dm}. \quad (7)$$

Die Einheit der Energiedosis ist das „Rad“ (rad).

$$1 \text{ rad} = 100 \frac{\text{erg}}{\text{Gramm}} \left[ \frac{\text{erg}}{\text{g}} \right]. \quad (8)$$

Beträgt also die in 1 g einer Substanz unabhängig von der Art der Strahlung absorbierte Energie 100 erg, so bezeichnet man die Dosis als 1 rad.

#### d) Energiedosisleistung

Die Energiedosisleistung  $k$  ist der Differentialquotient der Energiedosis nach der Zeit

$$k = \frac{dK}{dt}. \quad (9)$$

Die Einheit der Energiedosisleistung ist das Rad/Sekunde  $\left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$

$$1 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 100 \frac{\text{erg}}{\text{Gramm} \cdot \text{Sekunde}} \left[ \frac{\text{erg}}{\text{g} \cdot \text{s}} \right]. \quad (10)$$

Für die Beziehungen zwischen gebräuchlichen Vielfachen der Einheit der Energiedosisleistung gelten dieselben Zahlenwerte wie in Tabelle 1.

Ein Beispiel demonstriert den Unterschied von Energiedosis und Standard-Ionendosis am besten. Von P. N. GOODWIN (London) wurde im Rahmen des IX ICR in München die Energieabsorption in rad/r in Abhängigkeit von der Energie der Röntgenstrahlung (ausgedrückt durch die HWS) mitgeteilt. Abbildung 3 zeigt diese außerordentlich interessanten Messungen.

### e) Die relative biologische Wirksamkeit (RBW)

Bei Absorption des gleichen Energiebetrages in einem bestimmten Gewebebezirk jedoch von verschiedenen Strahlenarten ist auch die biologische Wirkung verschieden.

In den USA wurde daher folgende Definition bekannt: Unter 1 rem (Röntgen Equivalent Man) versteht man diejenige Dosis irgendeiner ionisierenden Strahlungsart, die unter gleichen Bedingungen den gleichen biologischen Effekt wie 1 rep harter Röntgenstrahlung hervorruft. Für die Umrechnung gilt:

$$\text{Dosis in rem} = \text{Dosis in rep} \cdot \text{RBW} \quad (11)$$

Tab. 2. Relative biologische Wirksamkeit (RBW) der Strahlungen

Art der Strahlung	RBW-Faktor
Röntgen-, Gamma- und Beta-Strahlung	1
Protonenstrahlung . . . . .	etwa 5
Alpha-Strahlung . . . . .	10—20
Schnelle Neutronen . . . . .	10
Langsame Neutronen . . . . .	5

### f) Die Neutronendosis

Die Einheit der Neutronendosis basiert auf dem Energieverlust bei der Abbremsung der Neutronen im Absorbermaterial. Die Neutronendosis ist damit auf die bekannte „Energiedosis“ zurückgeführt und kann in rad angegeben werden. Die Meßtechnik wird in einem späteren Kapitel beschrieben.

Für den Fall, daß kein Neutronenindikator zur Verfügung steht, kann folgende Definition nützlich sein:

*1 n ist diejenige Menge schneller Neutronen, die in einem 100 r-Victoreen-Dosimeter (mit Standard-Luftwände-Fingerhutkammer) die gleiche Ionisation hervorruft, wie 1 r Röntgenstrahlen harter Qualität.*

Die Einheit 1 n stellt also ein Provisorium aus Gründen der Meßtechnik dar. Zwischen der Dosis schneller Neutronen, dem Neutronenfluß und der Energiedosis besteht folgende Beziehung:

$$1 n = 5,8 \cdot 10^8 \text{ schnelle Neutronen/cm}^2 \approx 2 \text{ rad} \approx 200 \text{ erg/g Gewebe} \quad (12)$$

### g) Die Dosiskonstante von Gamma-Strahlern

Die Dosiskonstante  $J_\gamma$  von Gammastrahlern gibt die Standard-Ionendosisleistung  $j_{st}$  eines Strahlers mit der Aktivität  $A_\gamma$  im Abstände  $b$  an. Dabei soll der Abstand  $b$  groß sein gegen die Abmessungen der Strahlenquelle. Dann ist:

$$J_\gamma = \frac{j_{st} \cdot b^2}{A_\gamma}. \quad (13)$$

Die Dosiskonstante wird für ungefilterte Strahlung angegeben, mit Ausnahme des Radiums, dessen Dosiskonstante für 0,5 mm Platinfilter gilt.

Die Einheit der Dosiskonstanten ist das

$$\frac{\text{Röntgen}}{\text{Stunde}} \cdot \frac{\text{Quadratmeter}}{\text{Curie}} \left[ \frac{\text{r} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{C}} \right].$$

Häufig wird die Dosiskonstante auch in  $\frac{\text{r} \cdot \text{cm}^2}{\text{h} \cdot \text{mC}}$  angegeben.

Die Zahlenwerte der **Tabelle 3** müssen in diesem Fall mit dem Faktor 10 multipliziert werden.

### h) Die Dosiskonstante für Beta-Strahler

Um eine Dosimetrie am biologischen Objekt zu ermöglichen, haben MAYNEORD und SINCLAIR [2] auch für Beta-Strahler eine Dosiskonstante ermittelt. Diese Konstante  $I_\beta$  gibt die Ionendosis von 1 mC in einem Luftabstand von 1 cm am Ende einer Bestrahlungszeit von einer Stunde an.  $I_\beta$  in Abhängigkeit von der Strahlungsenergie gibt **Tabelle 4** an.

### i) Gewebedosis

Wenn in einem Organ der Masse  $M$  der Anteil  $p$  einer Aktivitätsmenge  $A$  gespeichert wird, so enthält das Organ

$$U = p \cdot A \quad (14)$$

Aktivitätseinheiten. Diese werden je nach Art der Isotops mit einer ge-