

ACTA ALBERTINA RATISBONENSIA

REGENSBURGER NATURWISSENSCHAFTEN

MESSMETHODEN FÜR DEN STRAHLENSCHUTZ

VON

B. HESS UND I. KÖCK

HERAUSGEBER:
NATURWISSENSCHAFTLICHER VEREIN REGENSBURG E. V.

Band 28 - Regensburg 1967

Die Acta Albertina Ratisbonensia werden von dem Naturwissenschaftlichen Verein Regensburg e.V. unter der Schriftleitung von Prof. Dr. Ekkehard Preuss herausgegeben.

Sie dienen der naturwissenschaftlichen Forschung durch die Herausgabe von Arbeiten vornehmlich aus dem Regensburger Raum.

Bestellung und Versand erfolgt durch:

Naturwissenschaftlicher Verein, Bibliothek
84 Regensburg, Gesandtenstraße 13

1. Vorsitzender: Ob.-Stud.-Rat August F i n k l ,
84 Regensburg, Liskircherstr. 20
(Tel. 3 22 38)
2. Vorsitzender: Dr. Heinz Z i e h r ,
84 Regensburg, Hafnersteig 8
(Tel. 3 13 73)

Alle Rechte vorbehalten

Jegliche Vervielfältigung nur mit ausdrücklicher
Genehmigung durch den Herausgeber

Band 28: Abgeschlossen im April 1965
Ausgegeben im Juni 1967

Druck: Mikrokopie GmbH, München 22, Bruderstr. 9

I N H A L T

Vorbemerkung	5
G a m m a d o s i m e t e r	6
<u>A Optische Dosismethoden</u>	
<u>I. Absorptionsänderungen</u>	
1. Verfärbung	
a) Glas-, Plastik- und Kristalldosimeter	7
b) flüssiges Detektormaterial	9
2. Filmschwärzungsmethode	10
<u>II. Luminiszenzdosimeter</u>	11
1. Fluoreszenzdosimeter	
a) Messung mit der Leuchtschirmhelligkeit	12
b) Szintillationszähler	13
2. Phosphoreszenzdosimeter	15
a) Thermophosphoreszenz	16
b) Radiophoto-Phosphoreszenz	18
<u>B Elektrische Dosismethoden</u>	
<u>I. Leitfähigkeitsänderungen</u>	
1. Gasförmige Stoffe	
a) Ionisationskammern	20
b) Auslöse- und Proportionalzähler	21
2. Flüssigkeiten	22
3. Festkörper	
a) Kristallzähler	22
b) p-i-n-Gleichrichter	23
c) Lawinentladung bei Si-Dioden	23

II. <u>Exoelektronen</u>	24
III. <u>Spannungserzeugung durch Strahlung</u>	
1. a) Röntgen- oder Strahlungselement	24
b) Comptondosimeter	25
2. Halbleiterphotoelement	25
IV. <u>Änderung der Dielektrizitätskonstante</u>	26
C <u>Mechanische Dosismethoden</u>	26

N e u t r o n e n d o s i m e t e r

A <u>Rückstoßmethode</u>	
I. <u>Optische Methoden</u>	
1. Filmdosimetrie	28
2. Luminiszenzmethoden: Szintillationszähler	
a) feste Szintillatoren	30
b) gasförmige Szintillatoren	31
c) flüssige Szintillatoren	31
II. <u>Elektrische Methoden</u>	
1. Ionisationskammer	31
2. Rückstoßproportionalzähler	33
B <u>Kernumwandlungen</u>	
I. <u>Messung der induzierten Radioaktivität</u>	35
1. Dünnschicht-Aktivierungsindikatoren	36
a) Stoffe mit energieunabhängigem Wirkungs- querschnitt	37
b) Schwellenwertdetektoren	37
c) Aktivierung von Einzelfolien	38

2. Aktivierung von körpereigenen Stoffen	39
II. <u>Neutronen-Kernreaktionen</u>	40
1. Kernspaltung	41
2. Kernumbildung	41
(A) Optische Methoden: Luminiszenz	
a) Fluoreszenz: Szintillationszähler	41
b) Phosphoreszenz	
α) Thermophosphoreszenz	42
β) Radiophoto-Phosphoreszenz	43
(B) Elektrische Methoden	
Proportionalzähler (BF ₃)	43
III. <u>Kernanregung bei unelastischer Streuung von Neutronen</u>	44
C <u>Änderung der Halbleitereigenschaften</u>	
1. Leitfähigkeitsänderung	44
2. Änderung des Vorwärtsstroms einer p-n-Schicht	45
D i s k u s s i o n	46
<u>Gammadosimeter</u>	
A Messung der applizierten Dosis	
1. Maximaldosis	47
2. Wahre applizierte Dosis	49
B Messung der Dosisleistung der Verseuchungsstrahlung	
1. Personen-Dosisleistungsmesser	52
2. Labor-Dosisleistungsmesser	53

Neutronendosimeter

A	Messung der applizierten Dosis	
1.	Maximaldosis	53
2.	Wahre applizierte Dosis	54
B	Messung der Dosisleistung der Verseuchungs- strahlung	56
	Universal-Individualdosimeter	57
	Literatur	59 - 72

Vorbemerkung

Die rasche Erforschung und Handhabung der Kernreaktionen hat in drei Dezennien durch Ausnutzung der verschiedenartigen Atomkernstrahlungen, der großen Zeitskala der Zerfallsgeschwindigkeiten und der auf kleinstem Raum konzentrierten großen Energien schon zu einem sehr vielschichtigen Gebrauch derselben in Naturwissenschaft, Medizin und Technik geführt. Trotz dieser raschen Entwicklung ist dank der gleichzeitig entwickelten Schutzmaßnahmen die Zahl der gesundheitlich geschädigten Personen bei der friedlichen Nutzung der Kernreaktionen ausnehmend gering.

Dem Strahlenschutz obliegt es, neben der Überwachung der Wirksamkeit der Schutzvorrichtungen dafür zu sorgen, daß auch die bei Unglücksfällen und falscher Handhabung, mit deren Möglichkeit immer gerechnet werden muß, applizierten Personendosen festgestellt werden können. Da es ferner bei katastrophalen Ereignissen nicht zu umgehen sein wird, daß sich Rettungsmannschaften kurzzeitig größeren Momentandosen aussetzen, müssen Personendosimeter zur Verfügung stehen, die auch die jeweiligen örtlichen Dosisleistungen abzulesen gestatten.

In der folgenden Studie werden deshalb unter Beschränkung auf die für den Strahlenschutz in der Hauptsache in Frage kommenden Gamma- und Neutronenstrahlen sowohl Methoden behandelt, die noch sehr kleine Strahlungsleistungen radioaktiver Verseuchung und kleine applizierte Dosen zu messen gestatten, als Methoden zur Registrierung der Dosen kurzzeitiger intensiver Strahlenflüsse, wie sie bei Unglücksfällen an Reaktoren vorkommen können.

Im zweiten Teil (Diskussion) wird die Verwendbarkeit der Meßmethoden für die praktische Dosimetrie, insbesondere ihre Eignung zur Konstruktion von Individualdosimetern diskutiert.

Gammadosisimeter

Der veränderte Zustand, der durch die Einwirkung der zu messenden physikalischen Größe, hier der Strahlendosis bzw. -dosisleistung, zustande kommt, kann ein bleibender sein, der sich durch äußere Einwirkung entweder gar nicht oder schwer oder auch leicht in seinen Ausgangszustand zurückführen läßt, oder dieser Zustand geht von selbst in kürzerer oder längerer Zeit wieder in den Ausgangszustand über. Für integrale Personendosismessungen bei einem großen Personenkreis sind bleibende und möglichst nur schwer rückgängig zu machende strahleninduzierte Veränderungen als Meßgrößen wünschenswert. Für Dosisleistungsmessungen müssen, sofern man nicht zusätzlich eine Zeitmessung machen will, sich die strahleninduzierten Veränderungen von selbst zurückbilden.

Bei Strahlenschutzmessungen werden im Allgemeinen nur geringe Genauigkeiten, etwa $\pm 30\%$, verlangt. Es sind deshalb im Folgenden Genauigkeitswerte nur ausnahmsweise angegeben.

+ + +

Die Einteilung der Methoden und Geräte zum Nachweis von Gammastrahlung kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen wie z.B. nach einfachen und komplizierten, nach Laborgeräten und Geräten für die Personendosimetrie, oder nach der Art der Feststellung der strahleninduzierten Änderung, also nach optischen und elektrischen, als Ausnahmefall auch mechanischen Nachweismethoden.

Wir folgen soweit als tunlich der letztgenannten Einteilung und gliedern nach

- A optischen
- B elektrischen Dosismeßmethoden
- (C mechanischen Dosismeßmethoden).

A Optische Dosismethoden

An optischen Dosismethoden sind zu nennen

I. die Messung von strahleninduzierten Änderungen des Absorptionsvermögens, also feste und flüssige Verfärbungsdosimeter, Filmschwärzungsdosimeter

II. die Methoden, bei denen die Strahlungsenergie in Lichtenergie umgesetzt wird, also die Luminiszenzdosimeter, die hier in Fluoreszenz- und Phosphoreszenzdosimeter unterteilt werden.

I. Absorptionsänderungen

1. Verfärbung

a) Glas-, Plastik- und Kristalldosimeter, bei denen durch Bestrahlung eine Farbänderung (Färbung oder Entfärbung) dieses Materials eintritt. Sie haben den besonderen Vorzug, nur auf Gamma-, nicht auf Neutronenstrahlung anzusprechen.

Die Verfärbungsdosimeter werden bevorzugt zur Messung hoher Dosen insbesondere auch für den Gammablitz, verwendet. Fowler und Day 1955 (1) haben bei PMMA und Polystyrol einen linearen Anstieg des Absorptionskoeffizienten zwischen 10^6 und $2 \cdot 10^7$ bzw. $2 \cdot 10^8$ R festgestellt. Kreidl und Blair 1959 (2) benützen ein Glasdosimeter für Dosen zwischen 1 rad und $5 \cdot 10^6$ rad, Suckow 1961 (3) für Dosen zwischen 10^3 und $2 \cdot 10^6$ R; Ritz und Attix 1961 (4) benützen Mylarfolien bis 10^9 R. Harris (5) verwendet die optische Durchlässigkeit von Zellulose, die sich zwischen 10^4 und 10^7 R linear ändert.

Wenn auch das spezielle Anwendungsgebiet der Verfärbungsdosimeter sehr hohe Dosen sind, so ist doch ihre Anwendung bis herab zu 1 rad möglich: Kreidl s.o., Burns und Lockyer 1955 (6) messen mit einem Halogen-Kristalldosimeter von 10 bis zu mehreren 1000 R. Das Phosphatglasdosimeter von Peirson 1958 (7) hat bereits einen fein unterteilten Meßbereich bis 600 R. Aus der Bleichung von gefärbtem Cellophan können Dosen auch von 1 bis 150 mrad ermittelt werden (Charlesby und Woods 1963 (8)).

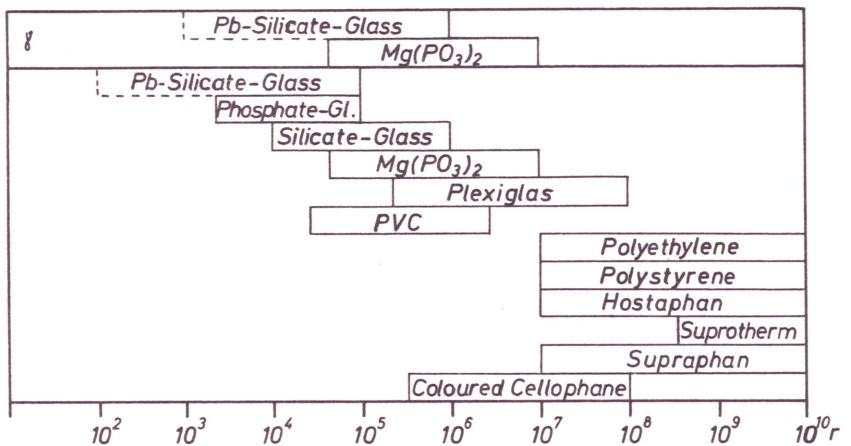
Energieunabhängigkeit: Schulman u.a. 1955 (9) weisen für ihr

Silberphosphatglas-Absorptionsdosimeter zwischen 200 keV und Co^{60} -Strahlung (1,2 und 1,3 MeV) praktische Energieunabhängigkeit nach, ebenso Peirson für sein oben genanntes Gerät.

Dosisleistungsunabhängigkeit wurde nachgewiesen zwischen $1 \cdot 10^4$ R/h und $7,8 \cdot 10^5$ R/h von Schulman s.o., von Kreidl s.o. bis 10^6 rad/sec, ebenso von Peirson s.o. im Dosisbereich von 0 bis 6000 R.

Die Genauigkeit der Verfärbungsdosimeter ist nicht sehr groß.

Die folgende Figur nach Scharmann (10) gibt einen Überblick über die verschiedenen Arten von Verfärbungsdosimetern.



Für die Brauchbarkeit einer Methode ist die Aufwendigkeit der Auswertung mit entscheidend. Bei den Verfärbungsdosimetern erlaubt die visuelle Erkennbarkeit, also die Auswertung ohne Zusatzgerät, nur eine rohe Abschätzung. Als untere Grenze erreicht auf diesem Wege Burns s.o. 75 R. Für hohe Dosen, 0,5 bis 5 Mrad, kann man mit einer Polyvinylchloridfolie nach Artandi und Stonehill 1958 (11) Stufen von 0,5 Mrad unterscheiden. Dasselbe gilt für das billige visuelle Gammadosimeter von Clarke u.a. 1961 (12) aus zellulosegefüllten Harzen, für das

3 Mrad als obere Grenze angegeben wird.

Spektralphotometrische Auswertungen erlauben eine wesentlich höhere Genauigkeit der Dosisbestimmung.

Außer Veränderungen im sichtbaren Gebiet wird auch die Erhöhung der optischen Dichte im UV z.B. an den bereits oben erwähnten Mylarfolien benutzt, z.B. bei 3250 \AA (Boag u.a. 1958 (13)). Ritz 1961 (14) mißt auf diese Weise Dosen von $5 \cdot 10^6$ bis 10^9 rad.

b) Flüssiges Detektormaterial

Oft verwendet wird die Verfärbung durch Oxydation von Ferro- in Ferri-Ionen (Ferrosulfatdosimeter von Fricke seit 1929). Der ursprüngliche Meßbereich von 4000 bis 40.000 R wurde inzwischen von Weiß und Schwarz 1955 (15) bis 200.000 R und nach Aglinzew 1961 (16) in Rußland bis 10^7 rad ausgedehnt. Auch die untere Grenze des Meßbereiches wurde inzwischen durch feinere Meßtechnik und Sensibilisatoren bis herunter auf 300 R (Thielens 1961 (17)) erweitert.

Die schon beim Fricke-Dosimeter vorhandene gute Unabhängigkeit von Energie und Dosisleistung - zwischen 1 und 30 MeV nur 5 % - ist heute "so gut wie bei konventionellen Methoden" (siehe Minder 1961 (18)). Dies gilt auch für Strahlung unter 100 keV.

Es können Genauigkeiten von 0,25 % erreicht werden: Wambersie 1964 (19).

Neben der Oxydation spielt auch die Reduktion von Ionen (Cer-Dosimeter) bei der Dosimetrie eine Rolle, s. zum Beispiel Taimuty u.a. 1959 (20) für Dosen von 10^5 bis 10^7 R; ferner Clarke 1961 (12), Miro 1964 (21).

Auch die strahleninduzierten pH-Wert-Änderungen in Lösungen werden durch Farbänderungen nachgewiesen. Das Tetrachlor-äthylensystem, entwickelt besonders von Sigoloff seit 1956 (zuletzt 1961 (22)), ist für Dosen von 5 bis 10^6 rad brauchbar und von 0,5 R/h bis zu Kernexplosionsdosen dosisleistungsunabhängig.

Leider zeigt es starke Energieabhängigkeit. Sigoloff sagt, sie sei parallel der von Photofilmen. Von 0,6 bis 4 MeV sei

keine Energieabhängigkeit vorhanden. Bei Verwendung von Bleifiltern wird Energieunabhängigkeit bis herab zu 100 keV angegeben.

Für visuelle Vergleichung mit Farbstandards ist für routinierte Beobachter Genauigkeit von 10 % angegeben.

Durch Nachweis des Phenolanteils in bestrahlten verdünnten wäßrigen Benzollösungen wurden von Day und Stein 1949 (23) und bei Verwendung von Absorptionsmessungen im UV durch Carr 1951 (24) zwischen 5000 und 25.000 R 3 % Genauigkeit erzielt.

Methylenblaulösungen wurden bis 10^6 rep benutzt: Lafuente u.a. 1958 (25), Davison u.a. 1953 (26).

Die Vorzüge der Verfärbungsdosimeter sind ihre geringe mechanische und fast immer auch geringe thermische Anfälligkeit, ferner ihre einfache Handhabung, ihre kleinen Ausmaße und die Unempfindlichkeit gegen Neutronen, bei geringen Ansprüchen ihre visuelle Auswertbarkeit, wodurch sie zur Registrierung von Personenintegraldosen auch unter schwierigen Umweltbedingungen geeignet sind. Leider ist die Messung kleiner Dosen auf diesem Wege ohne allzugroßen Aufwand bis heute nicht möglich.

2. Die Filmschwärzungsmethode

hat gegenüber der obigen optischen Methode, die Farbbänderungen zur Dosimetrie benutzt, den großen Nachteil, daß die Veränderung im Film, das latente Bild, erst durch eine nachträgliche chemische Behandlung in einen der Messung zugänglichen Zustand übergeführt werden muß, wenn wir absehen von der Benutzung der Sofortentwicklung oder der Verwendung der Silberabscheidung im latenten Bild bei extrem hohen Dosen.

Die direkte Silberabscheidung im latenten Bild bei sehr hohen Dosen wird von Chassende-Baroz 1961 (27) bis 50.000 R, nach Nitka 1957 (28) bis zu MR und nach MacLaughlin 1960 (29) bis zu 10^8 R verwendet.

Üblicherweise wird jedoch die der Strahlung ausgesetzte Photoplatte entwickelt und die Schwärzung zur Messung von Dosen zwischen 2 mR und 1000 R (Wachsmann 1961 (30)) verwendet. Bei Benutzung von Kernspurplatten können nach Cheka 1954 (31)

noch höhere Gammadosen gemessen werden.

Die Abhängigkeit von der Quantenenergie ist heute stark reduziert. So gibt Wachsmann s.o. für einen Härtebereich von 5 keV bis zu mehreren MeV bei günstigen Bedingungen \pm 20 % an. M.Ehrlich 1957 (32) erhält geringe kV-Abhängigkeit zwischen 30 keV und 1 MeV.

Die Meßgenauigkeit wird von Ehrlich s.o. mit 20 bis 30 % angegeben. Für die Auswertung der unentwickelten Schwärzung bei hohen Dosen gibt Nitka s.o. 30 % Genauigkeit an.

Die Vorzüge der Filmdosimetrie sind wieder ihre geringe mechanische und thermische Anfälligkeit sowie ihre einfache Handhabung und die kleinen Abmessungen, die sie - sogar im gemischten Neutronen-Gammastrahlenfeld - zur Registrierung von Personendosen geeignet machen. Was die erreichbare Genauigkeit betrifft, so ist sowohl die visuelle als die photometrische, jeweils verglichen mit der mit Farbdosimetern erreichbaren, geringer. Dazu kommt, daß die oben angegebenen erzielbaren Genauigkeiten sogar nur bei gleichen Entwicklungsbedingungen und bei Entwicklung am gleichen Ort gelten. Der starke Einfluß der Entwicklungsfaktoren führte z.B. dazu, daß bei der in Deutschland im Großen durchgeführten Filmdosimetrie nur vier zentrale Stellen für die Dosimeterfilmentwicklung ausgewählt wurden.

II. Luminiszenzdosimeter

Die zweite Gruppe von Meßgeräten, bei der optische Methoden zum Nachweis von Strahlenwirkung und damit zur Strahlenmessung verwendet werden, benutzt nicht die Veränderung der Absorption im Indikator, sondern weist die strahleninduzierte Veränderung durch die auf diese zurückgehende Lichtaussendung nach.

Für unsere Zwecke ist es vorteilhaft, die Luminiszenz wie früher in Fluoreszenz und Phosphoreszenz zu unterteilen, d.h. in luminiszierende Stoffe, die die absorbierte Strahlenenergie "sofort" wieder abgeben, und in solche, die sie erst nach längerer Zeit oder erst durch Zuführung weiterer Energie (in Form

von Wärme, Ultraschall) aussenden.

Hierher gehören 1. die Fluoreszenzdosimeter, bei denen zwei Arten unterschieden werden können, a) Dosimeter, bei denen das kontinuierlich abstrahlende Fluoreszenzlicht zur Messung benutzt wird, und b) die Szintillationszähler, mit denen die einzelnen Lichtblitze verfolgt werden, 2. die Phosphoreszenzdosimeter, die sich je nach der Methode zur Auslösung der gespeicherten Energie unterteilen in die Thermophosphoreszenzdosimeter, welche bei Zufuhr von Wärme oder Ultraschall oder Ultrarotstrahlung die aufgespeicherte applizierte Strahlenenergie in Form von Lichtenergie abgeben, und die Radiophotophosphoreszenzdosimeter, bei denen die optische Energieabgabe durch Ausleuchten mit UV verursacht wird.

1. Fluoreszenzdosimeter

a) Messung mit der Leuchtschirmhelligkeit

Die Abhängigkeit der Helligkeit fluoreszierender Stoffe von der Dosisleistung der einfallenden energiereichen Strahlung wird in der ärztlichen und technischen Diagnostik weitgehend verwendet. Zur Dosismessung kann man die Helligkeit des Leuchtschirmleuchtens benutzen, die man physikalisch oder visuell bestimmen kann.

Die physikalische Messung der Leuchtschirmhelligkeit spielte früher, als man Geigerzähler und Szintillationszähler noch nicht kannte, eine gewisse Rolle: Patentschrift von Heinrich Hertz (kleiner Röntgensschirm in einer Photozelle).

Schuch 1954 (33) bestimmt mit Hilfe der Fluoreszenz flüssiger und fester Phosphore und einer Photozelle Dosisleistungen von 12.000 bis 360.000 R/h aus 1,3 MeV-Gammastrahlen ("Photovoltaic scintillation detector"). Gangadharan u.a. 1964 (34) erhalten mit einem ZnS-CdS (Ag)-Szintillator energieunabhängig zwischen 100 und 180 kV-Röntgenstrahlung 0,28 $\mu\text{A/R}$ pro min. - Wir wollen diese Methode nicht eingehender diskutieren.

Der Dosismessung durch visuelle Helligkeitsbestimmung eines Leuchtschirms mißt B.Heß jedoch auf Grund seiner Erfahrung

eine große Bedeutung zu, wenn es sich um Strahlenschutzkontrollen und Strahlenschutzmessungen an Strahlengebern oder strahlenverseuchten Plätzen handelt. Die heutigen Leuchtstoffe erreichen Empfindlichkeiten, die es, wenn man das Auge vor dem Licht der Umgebung schützt, gestatten, noch Dosisleistungen von 0,3 mR/h zu bestimmen. Die Messung sehr hoher Dosisleistungen kann man durch Vorschalten von Filtern ermöglichen.

Bei Strahlenschutzkontrollen ist das Absuchen der in Frage kommenden Stellen auf Undichtigkeiten der Schutzmaßnahmen mit dem Leuchtschirm unerlässlich. Heß 1954 (35) benutzt die Leuchtschirmanzeige strahlenundichter Stellen auch gleich zur Messung, indem er mit einem gekapselten Strontiumpräparat, dessen Strahlung durch verschiedene Filter geschwächt werden kann, eine gleiche oder ähnliche Vergleichshelligkeit an den hellen Stellen des Leuchtschirms erzeugt. Ist diese Vergleichshelligkeit mit der gleichen Strahlenqualität geeicht wie die zur Messung anstehende, so kann die Dosisleistung auf 1 % genau, bei stark abweichender Qualität immer noch mit einer für den Strahlenschutz hinreichenden Genauigkeit bestimmt werden.

b) Szintillationszähler

Die Auszählung der von radioaktiver Strahlung verursachten Lichtblitze in fluoreszierenden Stoffen zur Bestimmung der Intensität der Strahlung wurde schon bei den ersten kernphysikalischen Untersuchungen, so von Geiger und Marsden 1909 (36), durchgeführt. Die Genauigkeit dieser subjektiven Lichtblitzzählmethode ist so groß, daß sie sogar zur Bestimmung der Loschmidtschen Zahl benutzt wurde (Regener 1909 (37)).

Die objektiven Zählmethoden, also die Szintillationszähler im eigentlichen Sinn, erfuhren eine intensive Entwicklung, die sich auf die Phosphore, die Umwandlung der Lichtimpulse in elektrische Impulse und auf die elektrische Registrierung erstreckte. Ein Vorteil der Szintillationszähler gegenüber den Proportional- und Auslösezählrohren ist die

bessere Zeitauflösung (bis 10^{-10} sec gegenüber 10^{-6} sec bei Proportionalzählern).

Für Quantenstrahlung liegt die Ausbeute, d.h. das Verhältnis der entstehenden Lichtenergie zum Ionisationsenergieverlust des geladenen Teilchens, unter 10 %. Mit schweratomigen Stoffen wie thalliumaktivierten NaJ-Kristallen wurden 8 % Ausbeute erzielt. Mit Anthrazen, also einem organischen Kristall, ließen sich 6 % Ausbeute erzielen. Die organischen Substanzen, Kristalle oder Kunststoff mit darin fein verteiltem anorganischem Material, haben gegenüber den anorganischen den Vorteil, dem lebenden Gewebe ähnlicher zu sein.

Da die Meßgröße, also die Anzahl der Lichtblitze bzw. die Lichtintensität, von der Dosisleistung abhängig ist, sind die Szintillationszähler ebenso wie die unter a) genannte Leuchtschirmmethode geeignet zur Dosisleistungsmessung und, da Umwandlung in eine elektrische Meßgröße erfolgt, auch zur Dosismessung.

Als erfaßbarer Dosisleistungsbereich, bedingt durch die endliche Abklingzeit der Szintillation, wird für das aufwendige Gerät von Herbert 1956 (38) 250 R/h angegeben (gesamter Meßbereich 10 bis 250 R/h). Blasek und Kempe 1962 (39) nennen als Verwendungsbereich (bei Co^{60} -Strahlung) 1 bis 10^5 mR/h, dasselbe Reiffel 1950 (40).

Das von Boulenger u.a. 1961 (41) entwickelte, von ihnen als "äußerst einfaches und robustes kleines Instrument" bezeichnete Gerät von 3,5 kg Gewicht hat als untere Meßgrenze 0,3 mR/h (bis 3.000 mR/h).

Erstaunliche Härteunabhängigkeit wurde bei dem von Belcher und Geitlinger 1957 (42) entwickelten Szintillator aus Kunststoff mit fein verteiltem silberaktiviertem Zinksulfid erreicht: Für den ganzen Bereich zwischen 20 keV- und 2 MeV-Strahlung wird eine Messungsgenauigkeit von ± 10 % angegeben. Geringe Härteabhängigkeit gibt Kempe 1962 (43) zwischen 30 keV und 3 MeV für plastische Szintillationszähler mit eingebauten Quecksilber- oder Jodverbindungen an (Meßbereich 1 bis 10^4 mR/h).

Bei den mit Vorteil verwendeten (s.o.) organischen Kristal-

len, z.B. Anthrazen, macht sich zu weichen Röntgenstrahlen hin die Wellenlängenabhängigkeit stark bemerkbar, bei einem 6 mm dicken Anthrazenkristall etwa von 300 keV abwärts.

Zu erwähnen sind noch die Gas-Szintillationszähler, z.B. 5 % He⁴, 95 % Xe bei 100 Atm mit einer Magnesium-Oxalschicht und aufgedampftem Diphenyl-Stilben. Ein Vorteil dieser Szintillatoren ist die sehr kurze Abklingzeit von der Größenordnung 10^{-8} sec (Babenko u.a. 1964 (44)).

Da die erfassbaren maximalen Dosisleistungen (s.o.) nicht groß sind, sind die Szintillationszähler zur Erfassung der Dosisleistung von intensiven Strahlungsstößen ungeeignet. Zur Feststellung der Personendosis kommen sie wegen der apparativen Aufwendigkeit und wegen des Gewichtes nicht in Betracht.

Organische Kristalle und anorganische, in Kunststoff eingelagerte Szintillatoren sind auch gegen schnelle Neutronen empfindlich (s.u. S. 26 und 37).

2. Phosphoreszenzdosimeter

Bei den Phosphoreszenzdosimetern wird ein Teil der applizierten Strahlenenergie gespeichert und kann als Lichtenergie wieder freigemacht werden. Die zur Messung benutzte physikalische Größe entspricht daher nicht wie bei den Fluoreszenzdosimetern primär der Dosisleistung, sondern der Dosis.

Wir unterscheiden, wie bereits gesagt, in der Hauptsache zwei Gruppen je nach der Manipulation, die die Abgabe der gespeicherten Strahlenenergie in Form von Lichtenergie bewerkstelligt, a) die Thermophosphoreszenz-, meist genannt Thermoluminiszenzdosimeter, die durch Energiezufuhr in Form von Wärme oder Ultrarotstrahlung (oder Ultraschall) zur Lichtenergieabgabe veranlaßt werden, und b) die Radiophoto-Phosphoreszenzdosimeter, die die gespeicherte Energie bei Anregung durch UV in Lichtenergie verwandeln.

a) Thermophosphoreszenzdosimeter

Von Daniels u.a. 1953 (45) stammt der Gedanke, die Thermophosphoreszenz für die konventionelle Dosimetrie und die Gewebedosimetrie zu verwenden. Die Methode wurde 1954 weiterentwickelt von Kossel (46). Bei Bestrahlung mit energiereicher Strahlung entstehen freie Elektronen und Löcher. Erwärmung macht die Ladungsträger in ihren Haftstellen wieder frei und bei der Rückkehr entsteht Licht. Die hierzu notwendige Temperatur darf aus praktischen Gründen nicht zu tief liegen, möglichst nicht unter etwa 200° C. Bis 1956 waren diese Dosimeter jedoch entweder zu unempfindlich oder die "glow peaks" lagen bei zu tiefer Temperatur, d.h. die Elektronen kehrten also bei zu niedriger Temperatur bereits in ihre Normallage zurück. 1956 stellte Ginther (47) einen manaktivierten Calciumfluorid-Phosphor mit tiefen Fallen her, welcher besonders für niedere Dosen geeignet war. Die diesem Phosphor noch anhaftende Tribophosphoreszenz wurde von Schulman, Ginther u.a. 1960 (48) stark verringert.

Die Thermophosphoreszenzdosimeter eignen sich heute sowohl zur Messung sehr hoher Dosen bis 10^5 rad wie auch sehr kleiner Dosen bis herab zu 10^{-5} rad, s. Malskey u.a. 1962 (49) mit CaF_2 -Kristallen; Björngard 1962 (50) mißt von 0,02 bis 1 mR mit CaSO_4 (Mn). Schulman, Attix u.a. 1961 (51) geben einen Meßbereich von 7 Dekaden (von ein paar mR bis 10^4 R) an (Strahlenquelle Co^{60}), wobei bei CaF_2 (Mn) Dosisproportionalität bis $3 \cdot 10^5$ R besteht: Marrone und Attix 1964 (52). Frank und Herforth 1962 (53) geben ebenfalls für CaF_2 -Kristalle als Anwendungsbereich 1 bis 10^4 rad, Spurný 1962 (54) mit Mn-aktiviertem CuSO_4 0,01 bis 10^4 R, Nosenko u.a. (55) 0,05 bis 40 R (mit CaSO_4) und Cameron u.a. 1960 (56) für LiF von mR bis kR als Meßbereich an. Nach Bräunlich und Scharmann 1962 (57) ist LiF bis 10^3 R dosisproportional. Karzmark u.a. 1964 (58) verwenden LiF von 1 bis 10^5 rad mit Dosisleistungsunabhängigkeit von 10^2 bis 10^8 rad/sec auf Grund der niedrigen Ordnungszahl von LiF (dazu s. auch

Cameron u.a. 1964 (59)), wobei zu bemerken ist, daß LiF temperaturempfindlich ist, s. Frank 1963 (60).

Wie üblich bei Festkörperdetektoren besteht eine erhebliche Energieabhängigkeit. Durch geeignete Filter, z.B. Zinnhülle von geeigneter Dicke und mit Löchern versehen, läßt sich nach Schulman, Attix u.a. (51) die Energieabhängigkeit auf 30 % erniedrigen, wobei noch weitere Verbesserungen bis zu einer praktischen Energieunabhängigkeit von 40 keV- bis 1,2 MeV-Strahlung möglich sein soll. Aglinzew (16) gibt an (S. 228), daß durch Bleifilter mit Eu-aktiviertem Strontiumsulfid oder Sm-aktiviertem Strontiumsulfid die Energieabhängigkeit zwischen 0,3 und 1,2 MeV-Strahlung stark geglättet werden kann.

Dosisleistungsunabhängigkeit geben Schulman, Attix u.a. (51) bei dem beschriebenen Dosimeter für den Dosisleistungsbereich 10 mR/min bis 7000 R/min an.

Neben den Vorzügen der kleinen Dimension, Unempfindlichkeit gegen rauhe Behandlung, Möglichkeit billiger Massenerstellung, raschen Auswertung (weniger als 1 min nach Schulman) müssen zur Beurteilung der Thermophosphoreszenzmethode noch einige die Anwendung einschränkende Eigenschaften erwähnt werden. Die von Schulman, Attix u.a. (51) mitgeteilte Eigenschaft, daß bei Messungen unmittelbar nach starker Bestrahlung aus der Helligkeit zu hohe Dosen ermittelt wurden, fällt weniger ins Gewicht, da nach 15 bis 20 min die zusätzliche Helligkeit im Vergleich zu der Thermophosphoreszenzanzeige vernachlässigbar klein geworden ist. Entscheidenderen Einfluß gewinnt jedoch die nicht vollkommene Speicherung im Phosphor analog zum Fading des latenten Bildes. Wenn die Zeit zwischen Bestrahlung und Auswertung bekannt ist, kann der Fehler durch einen Korrektionsfaktor ausgeglichen werden. Wenn diese Zeit unbekannt ist, also wenn die Bestrahlung mit schwankender Intensität sich über eine gewisse Zeit erstreckt, ist der mögliche Fehler zu beachten. Schulman, Attix u.a. (51) geben an, daß bei einer Expositi-

onsperiode von 30 Tagen der Fehler nicht mehr als $\pm 20\%$ beträgt, wenn das Dosimeter auf eine Bestrahlungszeit von 15 Tagen geeicht ist. Um die zuerstgenannte zu große Helligkeit auszuschalten, wird dabei das Dosimeter 1 Tag nach der letzten Bestrahlungsmöglichkeit ausgewertet. Größere Expositionsperioden "are hardly feasible". Nach Schulman und West 1963 (61) kann sogar die ständige Phosphoreszenzhelligkeit zur Dosisbestimmung benutzt werden, was den Vorteil einer mehrfachen Ablesungsmöglichkeit bringt.

Nach Häring und Schoen 1961 (62) kann die Thermophosphoreszenz ab 100 R mit bloßem Auge im Dunkeln gesehen werden. "Dadurch ist es möglich, bei Unfällen die Dosis mit bloßem Auge zu schätzen, indem man die Dosimetersubstanz auf eine heiße Unterlage legt" (S. 547).

Die Lichtenergieabgabe kann außer durch Wärmeenergie auch durch Zufuhr von Ultraschallenergie (Frank und Herforth 1960 (63)) bewirkt werden.

b) Radiophoto-Phosphoreszenzdosimeter

Bei der zweiten Gruppe der Phosphoreszenzdosimeter, bei den Radiophoto-Phosphoreszenzdosimetern, wird die Lichtabgabe der bestrahlten phosphoreszierenden Substanzen durch UV-Bestrahlung veranlaßt. Bei diesen handelt es sich um eine andere strahleninduzierte Veränderung (Bildung von F-Zentren) als bei den Thermophosphoreszenzstoffen (Festhalten der Elektronen an Haftstellen), woraus sich ein anderes Verhalten derselben ergibt. Der Vorzug der Radiophoto-Phosphoreszenzstoffe ist der, daß die Speicherung hier sicherer ist und sich monatelang hält.

Der größte angegebene Meßbereich stammt von Yokota 1961 (64). Er gibt für Silberphosphatglas einen Dosismeßbereich von 50 mR bis 5000 R, also 5 Dekaden an, wobei die untere Grenze als Nachweisgrenze zu werten ist. Peirson 1958 (65) gibt einen Meßbereich von 0 bis 6000 R an (kleinster nachweisbarer Dosiszuwachs 5 R), also 3,5 Dekaden; Kondo 1961 (66) von 50 bis 10^4 rad, ebenfalls 3,5 Dekaden. Die Firma

Bausch & Lomb (67) stellt ein Glasdosimeter mit 2 Meßbereichen von 10 bis 10^4 rad (Silberphosphatglas) und von 10^4 bis $5 \cdot 10^5$ rad (Co-aktiviertes Borsilikatglas) her. Als höchste meßbare Bestrahlungsdosis wird von Auxier u.a. 1961 (68) 10.000 R angegeben. Die untere Grenze liegt nach der Peirson'schen (65) Angabe bei 5 R.

Nach Peirson ist ein Phosphatglasdosimeter sowohl von der Quantenenergie wie von der Dosisleistung unabhängig. Auxier u.a. (68) geben ebenfalls Unabhängigkeit von der Dosisleistung an und suchen die größere Empfindlichkeit im photoelektrischen Gebiet (unter 300 keV) durch Filter auszugleichen.

Das erste Silberphosphatglasdosimeter entwickelten Schulman, Ginther und Klick 1951 (69) für 50 bis 500 R, später für einen Meßbereich von 5 bis einigen 1000 R.

Eventuell kann sich als Nachteil der Radiophoto-Phosphoreszenzdosimeter auswirken, daß erst einige Stunden nach der Bestrahlung die volle Luminiszenz erreicht wird, sie also erst nach dieser Zeit den richtigen Wert liefern.

Außer dem bereits oben genannten Vorteil der gegenüber Thermophosphoreszenzdosimetern sichereren Speicherung ist noch zu erwähnen, daß sie gegen Temperatur und optisches Licht und wie alle Glasdosimeter gegen chemische Einflüsse und Luftfeuchtigkeit unempfindlich sind. Die Phosphatglasdosimeter sind deshalb für die Individualdosimetrie hoher Gammastrahlendosen geeignet (Hardt u.a. 1963 (70)).

B Elektrische Dosismethoden

Veränderungen von vier verschiedenen elektrischen Größen werden zur Dosisbestimmung benutzt: I. Leitfähigkeitsänderungen, II. freiwerdende Exoelektronen, III. Spannungserzeugung und - von geringerer Bedeutung - IV. Änderungen der Dielektrizitätskonstante.

I. Leitfähigkeitsänderungen

Leitfähigkeitsänderungen sowohl von gasförmigen wie von flüssigen und festen Stoffen eignen sich zur Dosisbestimmung (Dosisleistungsmessung mit Hilfe der Strommessung, Dosismessung aus der Spannungsänderung eines Kondensators).

1. Gasförmige Stoffe

a) Ionisationskammern

Die wichtigste Methode im Röntgengebiet, die zur Definition des Röntgen benutzt wurde, ist die Bestimmung der Ionisationsgröße in einem bestrahlten Gasvolumen. Luftäquivalente Ionisationskammern, d.h. Ionisationskammern, deren Wände sich photoelektrisch wie aus komprimierter Luft bestehend verhalten, sind also unabhängig von der Quantenenergie, und wenn man mit Sättigungsspannung arbeitet, auch von der Dosisleistung. Bei nicht vorhandener Sättigungsspannung läßt sich der Sättigungsstrom nach der Boag-Formel berechnen. Die erzeugte Ionenladung ist proportional der applizierten Dosis. Durch Verkleinern oder Vergrößern der Dimensionen einer Ionisationskammer läßt sich bei gleichem elektrischem Meßgerät der Dosismessbereich nach oben und nach unten erweitern. Bylander 1960 (71) hat Dosisleistungen bis zu 10^5 R/sec mit einer Saugspannung von 3 kV gemessen, Ritz und Attix 1962 (72) Dosisleistungen von 1 bis 10^7 R/h.

Das zur Messung sehr kleiner Dosisleistungen notwendige größere Kammervolumen kann durch Verwendung komprimierten Gases in Hochdruckkammern druckproportional vermindert werden. Ein anderer Weg wurde von Heß 1942 (73) angegeben, der in die Kammer Metallfolien einbringt, wodurch das Kammervolumen bei glei-

cher Empfindlichkeit ungefähr um den Faktor 50 verringert werden konnte und gleichzeitig durch Kombination verschiedener dicker Folien Quantenenergieunabhängigkeit für einen größeren Bereich erreicht wird. Auch mit kleinsten Metallkammern, Größenordnungen von $0,1 \text{ mm}^3$, lassen sich noch Messungen durchführen: Balk 1963 (74).

Zur Überwachung der Personendosis fanden Luftionisationskammern von einigen cm^3 als sog. Pens weite Verbreitung. Diese sind zur unmittelbaren Dosisfeststellung mit einem Fadenelektrometer ausgerüstet oder auf die Auswertung mit einem Zusatzgerät angewiesen. Es gibt handelsübliche Ausführungen mit empfindlichsten Meßbereichen von 0,2 R für die ganze Skala (s. Riezler (75) S. 257) bis zu 100.000 R bei niederem Gasdruck: Bozóky 1961 (76). Die Pen-Dosimeter werden auf eine bestimmte Spannung (auf Teilstrich 0) aufgeladen. Der sich einstellende Spannungsabfall ist in R ge-
eicht.

b) Auslöse- und Proportionalzähler

Bei den Auslöse- (Geiger-Müller-) und den Proportionalzählern wird die strahleninduzierte Ladung durch Stoßionisation stark vervielfacht.

Die Geiger-Müller-Zähler finden in der Strahlenschutzpraxis hauptsächlich als Monitore Verwendung. Ein einfacher käuflicher Halogen-Geigerzähler für Messung des Gamma-Anteils im gemischten Feld mit starkem Neutronenanteil für Dosisleistungen zwischen 0,1 mR/h und 300 R/h wird von Hurst und Wagner 1961 (77) erwähnt. Man kann ihn leicht energieunabhängig für Gammastrahlung über 150 keV machen. Seine Empfindlichkeit für thermische und schnelle Neutronen sei leicht zu beseitigen.

Die Proportionalzähler mit ihrem geringen Gammastrahlenansprechvermögen (0,1 bis 1 %) wurden durch die Szintillationszähler verdrängt, die ihnen durch größeres Ansprechvermögen und größere Zeitauflösung überlegen sind.

2. Flüssigkeiten

Die Ionisationswirkung energiereicher Strahlung in Flüssigkeiten hat besonders theoretisches Interesse, weil die Ionisationswirkungen im Körper sich ähnlich verhalten müssen. Für die praktische Dosimetrie haben die Versuche jedoch schon wegen der notwendigen hohen Saugspannung noch keine Bedeutung erlangt. Adamczewski (78) hat seit 1932 mehrere Ionisationskammern mit flüssigen Dielektrika (Pentan, Hexan, Heptan) für Röntgen- und Gammastrahlung gebaut. Bei Dosisleistung 1 R/min steigt ihre Leitfähigkeit um den Faktor 40.000. Er verfolgt die Wirkungen von Dosisleistungen bis herunter zu 0,02 $\mu\text{R}/\text{sec}$. Trotz hoher Saugspannungen kann keine Sättigung erreicht werden.

Andrews und Shore 1950 (79) messen elektrisch das in Chloralhydrat entstehende HCl und bestimmen daraus Dosen zwischen 0 und 10.000 R dosisleistungsunabhängig. Es besteht starke Temperaturabhängigkeit.

3. Festkörper

a) Kristallzähler

Halbleitereigenschaften werden ausgenutzt beim sog. Kristallzähler. Anders als beim Szintillationskristall benützt man hier die Leitfähigkeitsänderung, welche die durch die absorbierte Strahlung freigemachten Elektronen bewirken. Da jedes absorbierte Strahlenquant eine größere Anzahl Elektronen freimacht, ändert sich die Leitfähigkeit diskontinuierlich und erlaubt dadurch wie beim Szintillationszähler eine Impulsmessung.

Gegenüber den Zählrohren mit Lebensdauern von 10^8 bis 10^{10} Impulsen ist ihre geringere Lebensdauer von nur 10^6 Impulsen ein Nachteil (Fünfer-Neuert (80), S. 171).

Vielfach verwendet wurde CdS wegen seiner relativ guten Temperatureigenschaften und der ihm eigenen Primärstromverstärkung. Da die Impulsdauer relativ groß ist, liegt der Meßbereich bei kleinen Dosen. Klick u.a. 1955 (81) messen im Bereich von 0,1 bis 1000 R/h; durch Anlegen einer höheren Batte-

rienspannung lassen sich auch geringere Dosen messen. Ungefähr im selben Bereich messen Broser u.a. 1953 (82).

Die CdS-Kristalle haben einige für die Dosismessung nachteilige Eigenschaften, so ihre Energieabhängigkeit, die durch Filter herabgesetzt werden kann. Hollander 1956 (83) erreicht mit einem durchlöcherten Bleifilter von 2 mm Stärke zwischen 80 keV und 1,3 MeV eine Energieabhängigkeit von nur 12 %.

Da die Anzahl der in Alkalihalogenidkristallen gebildeten F-Zentren dosisproportional ist, kann die Photoleitung derselben zur Feststellung der applizierten Strahlendosis verwendet werden. Kahn 1956 (84) benützt die Photoleitung in KBr bei 175 keV und 16 bis 31 MeV. Die Empfindlichkeit ist im Gebiet der harten Strahlung konstant, bei 175 keV fünfmal so groß.

b) p-i-n-Gleichrichter

Auch die durch Bestrahlung von Festkörpergleichrichtern eintretenden Widerstandsänderungen werden zur Dosismessung benutzt. Nach Baily und G. Kramer 1964 (85) ist die Methode dosisleistungsunabhängig. Für Röntgenstrahlung mit Halbwertsschicht größer als 5 mm Kupfer besteht nur geringe Härteabhängigkeit.

Der Gleichrichter kann auch als Impulszähler sowie durch Bestimmung der entstehenden Spannung zur Dosismessung benutzt werden. Über Letzteres s. unter III, 2.

c) Die Lawinentladung bei Durchbruchspannungen von Si-Dioden kann durch ionisierende Strahlung ausgelöst werden. Die so erreichbare Primärstromverstärkung läßt sich für Dosismessungen benutzen. Ruge und Keil 1963 (86) messen mit legierten Si-Dioden mit Durchbruchspannung 10 V linear von der einfallenden Quantenzahl abhängige Impulsraten bei Dosisleistungen von 10 bis 10^4 R/h. 10^7 R/h sollen möglich sein.

II. Exoelektronen

J. Kramer 1960 (87) weist die dosisleistungsproportionale strahleninduzierte Änderung im Festkörper (Elektronen an Haftstellen) nicht wie bei der Luminiszenzmethode durch das bei der Rekombination entstehende Licht, sondern durch die bei der Erwärmung oder UV-Bestrahlung freiwerdenden Exoelektronen nach. Die Methode wird zur Zeit vom Entdecker der Exoelektronen, J. Kramer Braunschweig, ausgearbeitet.

III. Spannungserzeugung durch Strahlung

Bei den oben besprochenen strahleninduzierten Leitfähigkeitsänderungen wird zum Nachweis des Bestrahlungseffektes eine Fremdspannung benötigt. Beim Röntgenelement, auch Strahlungselement genannt, und beim Comptondosimeter sowie beim Halbleiter-Photoelement wird durch die zu messende Strahlung eine Spannung erzeugt. Beim einen wird die verschieden starke strahleninduzierte Elektronenabgabe aus Oberflächen verschiedener Stoffe bzw. die Winkelverteilung der Comptonelektronen (bevorzugt in Strahlrichtung) (Warrickhoff 1964 (88)), beim Halbleiter-Photoelement die in der Grenzschicht entstehende Spannung zur Strahlenmessung ausgenutzt.

1. a) Röntgen- oder Strahlungselement

Beim Röntgenelement (B. Heß 1941 (89), 1959 (90)) stehen sich Oberflächen mit verschieden starker strahleninduzierter Elektronenabgabe, getrennt durch Vakuum oder einen anderen photoelektronendurchlässigen Isolator, gegenüber, wodurch ein resultierender, von der Dosisleistung abhängiger Elektronenstrom entsteht. Da für die durchdringende Strahlung viele dünne Flächen hintereinander angebracht werden können, können mit Gammastrahlung große Ströme erzeugt werden. Heß erreichte mit porösem Tantalblech und angesäuertem Wasser als Gegenelektrode und einer Tantaloxydhaut als Isolator pro cm^2 Strahlenquerschnitt $10^{-4} \text{ A/R} \cdot \text{sec}^{-1}$. Die Methode kann zur Messung kleinster und großer Dosisleistungen und Dosen

verwendet werden. Die Spannung, die durch die transportierte Ladung zwischen Flächen mit verschieden starker Elektrodenabgabe erzeugt wird, ist ein Maß für die applizierte Dosis.

Das nach diesem Prinzip arbeitende Pen-Dosimeter (Heß, Hosemann, Warrikhoff 1957 (91)) hat eine Empfindlichkeit von 0,5 Volt/R und einen Meßbereich von 2 bis 500 R und zwischen 80 keV und 1,25 MeV nur 8 % Härteabhängigkeit.

Diese Methode eignet sich, da keine Sättigungs- und Verzögerungseffekte vorhanden sind, zur Messung allergrößter Dosen und Dosisleistungen. Das Röntgenelement benötigt keine Fremdspannung.

Semirad

Das von Kronenberg und Murphy 1958 (92) entwickelte sog. "Semirad"-Dosimeter ist anscheinend ein Röntgenelement, bei dem, wie bereits in der Patentschrift "Röntgenelement" von Heß (90) vorgeschlagen, der Photoelektronenstrom durch Sekundärelektronen aus Oberflächenschichten verstärkt wird.

b) Comptondosimeter

Groß und Murphy seit 1959 (93 bis 95) benutzen die bevorzugte Vorwärtsstreuung der Compton-Elektronen, um eine strahleninduzierte elektrische Spannung zu erzeugen.

Die für ein tragbares Gerät berechnete Spannungsempfindlichkeit wird mit 0,5 V/R angegeben.

Das Gerät eignet sich zur Messung im Compton-Bereich, also etwa zwischen 0,3 und 3 MeV.

2. Halbleiter-Photoelement

Mit Photoelementen, wie sie von der Lichtmessung her bekannt sind, können auch Röntgen- und Gammadosisleistungen gemessen werden. Nach Baily und Kramer 1964 (85) besteht für Röntgenstrahlen mit HWS größer 5 mm Kupfer nur geringe Härteabhängigkeit. Ulrich 1964 (96) mißt mit einem mit Platin oder Gold verkleideten Silicium-Photoelement zwischen

0,1 und 1 MeV im Meßbereich zwischen 5 und 10^6 R/h energieunabhängig. Mit einem p-n-Trennschicht-Silicium-Detektor (Plättchen in Plexiglas) mit Cu- und Pb-Filter wird für Röntgenstrahlung zwischen 0,8 und 1,14 mm Cu HWS härteunabhängig bis hinab zu 0,3 R/min gemessen. Ab 750 R/min ist die Anzeige nicht mehr dosisleistungsproportional. Ab 10^5 R nimmt die Empfindlichkeit ab.

IV. Änderung der Dielektrizitätskonstante

Die an verschiedenen Stoffen beobachtete Änderung der Dielektrizitätskonstante bei Bestrahlung mit Quantenstrahlung wollen Skoglund und Ore 1956 (97) zur Strahlenmessung ausnutzen. Beobachtet wird bei den mitgeteilten Versuchen die Kapazitätzunahme eines Kondensators mit dem strahlenempfindlichen Dielektrikum. Ergebnisse werden noch nicht mitgeteilt.

Eine vielleicht elegantere, nach demselben Prinzip arbeitende Methode, die sowohl für Neutronen- als für Gammastrahlung geeignet ist, wird unten S. 29 bei der Neutronenmessung erwähnt (126).

C Mechanische Dosismessmethoden

Viskositäts- und Plastizitätsänderungen

Auch strahleninduzierte Viskositätsänderungen und Plastizitätsänderungen wurden zur Dosismessung benutzt.

1954 bestimmten Alexander u.a. (98) viskosimetrisch den Depolymerisationsgrad von bestrahlten festen Polymethylmetacrylaten in Abhängigkeit von der Dosis zwischen $5 \cdot 10^5$ und $5 \cdot 10^7$ rad. Feng 1958 (99) benutzte Lösungen von Polystyrenen in Tetrachlorkohlenstoff. Wiesner 1961 (100) mißt mit in organischen Lösungsmitteln gelösten Polyisobutylenen von verschiedenem mittlerem Molekulargewicht von 10^3 bis 10^{10} rad. Boni 1961 (100 a) erhält von 200 bis 5000 R lineare Zunahme der Viskosität mit R bei Polyacrylamiden.

Nelson 1964 (101) gibt für in destilliertem Wasser gelöste Polyacrylamide Energieunabhängigkeit zwischen 280 keV und

0,1 und 1 MeV im Meßbereich zwischen 5 und 10^6 R/h energieunabhängig. Mit einem p-n-Trennschicht-Silicium-Detektor (Plättchen in Plexiglas) mit Cu- und Pb-Filter wird für Röntgenstrahlung zwischen 0,8 und 1,14 mm Cu HWS härteunabhängig bis hinab zu 0,3 R/min gemessen. Ab 750 R/min ist die Anzeige nicht mehr dosisleistungsproportional. Ab 10^5 R nimmt die Empfindlichkeit ab.

IV. Änderung der Dielektrizitätskonstante

Die an verschiedenen Stoffen beobachtete Änderung der Dielektrizitätskonstante bei Bestrahlung mit Quantenstrahlung wollen Skoglund und Ore 1956 (97) zur Strahlenmessung ausnutzen. Beobachtet wird bei den mitgeteilten Versuchen die Kapazitätzunahme eines Kondensators mit dem strahlenempfindlichen Dielektrikum. Ergebnisse werden noch nicht mitgeteilt.

Eine vielleicht elegantere, nach demselben Prinzip arbeitende Methode, die sowohl für Neutronen- als für Gammastrahlung geeignet ist, wird unten S. 29 bei der Neutronenmessung erwähnt (126).

C Mechanische Dosismessmethoden

Viskositäts- und Plastizitätsänderungen

Auch strahleninduzierte Viskositätsänderungen und Plastizitätsänderungen wurden zur Dosismessung benutzt.

1954 bestimmten Alexander u.a. (98) viskosimetrisch den Depolymerisationsgrad von bestrahlten festen Polymethylmetacrylaten in Abhängigkeit von der Dosis zwischen $5 \cdot 10^5$ und $5 \cdot 10^7$ rad. Feng 1958 (99) benutzte Lösungen von Polystyrenen in Tetrachlorkohlenstoff. Wiesner 1961 (100) mißt mit in organischen Lösungsmitteln gelösten Polyisobutylenen von verschiedenem mittlerem Molekulargewicht von 10^3 bis 10^{10} rad. Boni 1961 (100 a) erhält von 200 bis 5000 R lineare Zunahme der Viskosität mit R bei Polyacrylamiden.

Nelson 1964 (101) gibt für in destilliertem Wasser gelöste Polyacrylamide Energieunabhängigkeit zwischen 280 keV und

35 MeV, Dosisleistungsunabhängigkeit zwischen 6 und 150 rad/min und eine Genauigkeit von 6 % für 100 rad an.

Hervorzuheben ist bezüglich der Viskositätsmethode die Möglichkeit der Anpassung der benutzten Flüssigkeit an die Zusammensetzung der Körpersubstanz, was besonders bei Applizierung von gemischter Gamma- und Neutronenstrahlung von Bedeutung sein kann.

Wilski 1959 (102) mißt zwischen 0,5 und 50 Mrad die mit zunehmender Bestrahlung sich ändernde Plastizität bei Polyäthylen.

Neutronendosimeter

Zum Nachweis schneller Neutronen benutzt man entweder
 A die Rückstoßmethode, bei der durch elastischen Stoß energiereiche ionisierende Teilchen erzeugt werden (Ionisationskammer; Proportionalzähler; fast alle Szintillationszähler; Änderung von Halbleitereigenschaften)

B Kernumwandlungen: I. Messung der durch Neutronen induzierten Radioaktivität, II. Ausnutzung der "sofort" bei Kernreaktionen freiwerdenden Energie: 1. Kernspaltung, 2. Kernumbildung, 3. Kernanregung bei unelastischer Streuung.

A Rückstoßmethode

I. Optische Methoden zum Nachweis der Rückstoßteilchen

1. Filmdosimetrie

Die Film-Neutronendosimetrie spielt bei der Personendosisüberwachung eine große Rolle. Die Dosis wird nicht wie bei der Gamma-Filmdosimetrie aus der Schwärzung ermittelt, sondern durch Auszählen der Spuren in Kernspurplatten, was höchst mühsam und zeitraubend ist.

Die Spuren sind hervorgerufen durch die Rückstoßprotonen oder auch den Rückstoßkohlenstoff aus der Emulsion. Die Anzahl der Spuren pro Flächeneinheit ist bei gleichbleibendem Geschwindigkeitsspektrum der Neutronen der applizierten Neu-

tronenmenge proportional. Aus der Anzahl und der Länge der Protonenspuren läßt sich die Neutronendosis ermitteln. Dieses Verfahren ist wegen der notwendigen Ausmessung der Spurlänge besonders zeitraubend.

Ähnlich wie die Röntgendosis in einem bestrahlten Volumen durch die seitlich und von rückwärts zugestrahlte Röntgenstreustrahlung gegenüber der Einfallsdosis vergrößert wird, so wird in schnellen Neutronenstrahlen auch der Rückstoßprotonenfluß (bezw. der Fluß thermischer oder epithermischer Neutronen) an einem Ort des Strahlungsfeldes durch die seitlich und von hinten eingestreuten Protonen bzw. Neutronen größer, wenn sich dort wasserstoffhaltige Materie befindet. Der wirksame Umgebungsbereich wird umso größer, je energiereicher die Neutronen sind. Diesen Einfluß des umgebenden Materials ausnutzend kann man es durch geeigneten Aufbau der Emulsion erreichen, daß die Anzahl der Spuren auf der Flächeneinheit der photographischen Schicht dosisproportional wird.

Cheka gab 1954 (103) einen entsprechend aufgebauten Film zur Bestimmung der Neutronendosis aus der Anzahl der Kernspuren pro Flächeneinheit an. Vor und hinter der Emulsion befinden sich abwechselnd verschieden dicke Streuschichten aus Zellulose und Absorberschichten aus Aluminium.

Die Schwärzung durch gleichzeitige Gammastrahlung darf nicht zu groß, höchstens durch einige R verursacht sein (Hagsgård und Widell 1963 (104)). Temperatur und Feuchtigkeit beeinflussen das Meßresultat.

Der Meßbereich liegt zwischen 10 mrem und 10 rem (Hagsgård und Widell s.o.). Der erfaßbare Härtebereich liegt nach Wallace u.a. 1961 (105) zwischen 0,8 und 10 MeV. Nach Cheka s.o. wird zwischen 0,5 und 14 MeV Dosisproportionalität erreicht.

Die Auswertung solcher Cheka-Filme bei der Personen-Neutronendosisüberwachung wird wie bei der Röntgen-Filmdosimetrie in Deutschland zentral von vier Filmüberwachungsstellen durchgeführt.

2. Luminiszenzmethoden: Szintillationszähler

a) feste Szintillatoren

Als Szintillatoren benutzt man bei der Neutronenmessung stark wasserstoffhaltige Stoffe, z.B. Anthrazen- und Stilben-Kristalle, oder statt solcher homogener Szintillatoren Gemische aus anorganischen Szintillationssubstanzen mit hoher Protonenempfindlichkeit und stark wasserstoffhaltigen Materialien wie silberaktiviertes ZnS in Paraffin oder Plexiglas. Sie wurden zuerst entwickelt von Hornyak 1952 (106) (ZnS(Ag) in Polystyren), Emmerich 1954 (107) (ZnS(Ag) in Paraffin) und Skjöldebrand 1955 (108).

Die vom Leuchtstoff abgegebene Lichtenergie ist der von ihm absorbierten Energie proportional, so daß bei Benutzung von gewebeähnlichen Stoffen die Eichung in rem für den ganzen erfaßten Energiebereich gilt.

Alle Szintillatoren sind gammastrahlenempfindlich. Durch genügend hohe Vorspannung kann man den Gammauntergrund schwächen. Auch durch einen entsprechenden Aufbau des Detektors, z.B. dünne Schichten wasserstoffhaltiger Substanzen abwechselnd mit dünnen Schichten eines organischen Szintillators (Thompson 1964 (109), Skjöldebrand s.o.), kann das Verhältnis von Neutronen- zu Gamma-Ansprechvermögen wesentlich verbessert werden. Eine andere Methode der Diskriminierung benutzt die verschiedene Wirkung der auf Gamma- bzw. Neutroneneinwirkung zurückgehenden Anteile auf den Intensitätsabfall bei der Szintillation (Brooks 1956 (110), dazu u.a. Forte und Konsta 1961 (111)). Je besser die Diskriminierung, desto geringer ist die Nachweisempfindlichkeit.

Die Wahrscheinlichkeit für den Nachweis eines auftretenden Neutrons liegt bei den in der Literatur genannten Dosimetern zwischen 10^{-2} % und 30 %. Die Nachweis-Wahrscheinlichkeit eines z.B. aus Schichten von ZnS-Phosphoren und Polyäthylen bestehenden Detektors beträgt $5 \cdot 10^{-2}$ % für 3 MeV-Neutronen (Fünfer-Neuert (80) S. 218).

Die untere Dosisleistungsmeßgrenze für den von Hankins seit 1961 (112) entwickelten Multisphere- bzw. Singlesphere-

Zähler soll 0,1 bzw. 0,5 mrem/h betragen.

Der meßbare Energiebereich liegt zwischen thermischen Neutronen und Neutronen von einigen MeV (Hankins s.o.: bis 7 MeV).

b) gasförmige Szintillatoren

In Gas-Szintillationszählern von hohem Druck und mit Frequenzwandler versehen, z.B. bei Engelke 1960 (113) mit Stickstoff-Xenon-Gemisch unter 75 Atm oder bei Baldin 1963 (114) mit He-Xe-Mischung bei erhöhtem Druck, zur Dosismessung schneller Neutronen sind die Abklingzeiten sehr kurz und der Gammauntergrund geringer als bei festen Szintillatoren. Die Impulshöhe ist eine lineare Funktion der Teilchenenergie. Die untere Grenze für lineare Abhängigkeit der Impulsamplitude von der Neutronen-Energie liegt bei dem He⁴-Szintillationszähler von Otstawnow 1964 (115) bei 500 keV.

c) Die Herstellung großer flüssiger Szintillatoren macht im Gegensatz zu Einkristall-Szintillatoren keine Schwierigkeit. Lanter und Bannermann 1962 (116) beschreiben einen "nahezu 4 π -Flüssigkeits-Szintillationszähler", der sowohl durch Rückstoßprotonen als auch durch Neutron-Proton-Einfangprozesse angeregt wird und sich zur Messung der Neutronendosis in kurzdauernden intensiven Strahlenstößen eignet.

II. Elektrische Methoden zum Nachweis von Rückstoßteilchen

1. Ionisationskammer

Der älteste Vertreter ist die Ionisationskammer, die nach dem Bragg-Gray-Prinzip (1912, 1926) arbeitet. Das heißt Kammer- und Wanddimensionen sind so gewählt, daß die gemessene Ionisation der im Wandmaterial absorbierten Energie proportional ist (Gasraum klein gegen die Reichweite der geladenen Teilchen im Gas, dagegen Wandstärke größer als die Reichweite der geladenen Teilchen im Wandmaterial). Diese Methode zur Messung schneller Neutronen wurde von Gray 1939 (117) und K.G. Zimmer 1938 bis 1940 (118 bis 120) (dazu s. auch

Heß-Zimmer 1944 (121)) ausführlich bearbeitet. Als Wandmaterial nimmt man am besten gewebeäquivalentes Material, so daß das Dosimeter in rad geeicht werden kann unabhängig von der Geschwindigkeit der Neutronen. Nimmt man auch noch gewebeähnliches Gas, so darf der Gasraum groß sein und die gemessene Ionisation pro Masseneinheit ist direkt, also ohne Umrechnungsfaktor, die gesuchte spezifische Gewebe-Ionisation.

Um die Neutronendosisleistung bei Anwesenheit von Gammastrahlung messen zu können, entwickelte Heß 1941 eine Ionisationskammer, die nur auf Neutronenstrahlen anspricht. Sie besteht aus einer Luftionisationskammer mit kondensatorartig angeordneten H-haltigen Wänden, die sowohl auf Neutronen- wie auf Gammastrahlung anspricht; diese ist kombiniert mit zwei Ionisationskammern mit Al-Wänden, die nur auf Gammastrahlung ansprechen. Durch geeignete Dimensionierung wurde bei Bestrahlung mit Quantenstrahlung hinreichende Kompensation der Ionisationsströme der Schichtkammer und der Al-Kammern für einen Härtebereich von 300 keV bis 3 MeV erreicht. Mit dieser Kammer wurde 1943 die Dosisleistung des Pariser 5 MeV-Zyklotrons und die Neutronendosisverteilung im Zyklotronraum ausgemessen (122).

Nach demselben Prinzip arbeiteten die Kammer von Chang und Eng 1943, Reinhardt 1947 und Failla und Rossi 1956 (123).

Wenn das Gammasppektrum sich über einen großen Härtebereich erstreckt, dann stört bei höheren Ansprüchen die über einen großen Härtebereich nicht überall völlig zu erreichende Kompensation des Gammastrahlenanteils.

Bezüglich des ausmeßbaren Dosisleistungsbereichs gilt für die Neutronen-Ionisationskammern dasselbe wie für die Gamma-Ionisationskammern. Für sehr kleine Dosisleistungen sind große Kammervolumina nötig; z.B. mißt Heß (122) mit einer 10 Liter-Kammer bis herab zu $5 \cdot 10^{-5}$ R/sec. Rossi veröffentlichte 1963 eine Differenz-Ionisationskammer, mit der die Total-RBE-Dosis, 20 mrem/h, genau gemessen werden soll (124), während die Begrenzung zu sehr hohen Dosisleistungen hin

durch das Überschreiten des Sättigungsbereiches gegeben ist, so daß die Methode für Neutronenblitze nicht geeignet ist.

Härtebereich: Rossi gibt für seine oben erwähnte Kammer (124) einen Härtemeßbereich von 100 keV bis 14 MeV an. Abson und Henderson 1963 (125) wollen mit ihrer Gas-Doppelkammer, die eine mit 20 Atm-H₂-Gas für Neutronen, die andere mit Neon + Argon für Gammastrahlung, zwischen 0,2 und 10 MeV rem-äquivalente Neutronenionisation erhalten und im selben Energiebereich die Dosisleistung in rem auf $\pm 30\%$ genau messen.

Eine sehr sinnvolle Weiterentwicklung der Ionisationskammer mit wasserstoffhaltigen Wänden wird von Balk 1959 angegeben (126). Balk bestrahlt einen Schaumstoff, also ein Gemisch aus einem dielektrischen wasserstoffhaltigen Festkörper und Gas, und bestimmt mit einem Schwingkreis die Gasionisation aus der Änderung der Dielektrizitätskonstante des Gases infolge der Ionisation. Der Gammastrahlenanteil der Ionisation muß ebenfalls durch eine zweite neutronenunempfindliche Kammer bestimmt werden.

2. Rückstoß-Proportionalzähler

Die Rückstoßproportionalzähler sind für die Neutronenmessung von Bedeutung, weil bei ihnen eine Diskriminierung zwischen Neutronen- und Gammastrahlen gut möglich ist. Bei einfacher Ausführung bestimmt man mit dem Rückstoßproportionalzähler zunächst den Fluß schneller Neutronen, wozu das Ionisationsvermögen des Rückstoßteilchens in Abhängigkeit von der Energie bzw. auch seine Energie-Reichweite-Beziehung bekannt sein muß. Für Energien zwischen 50 keV und 2 MeV werden Zählrohre mit wasserstoffhaltigem Füllgas verwendet, während für Neutronen von 500 keV bis zu einigen MeV die Rückstoßteilchen in der wasserstoffhaltigen Zählrohrwand erzeugt werden.

Zur Berechnung der "first collision dose" (dazu jedoch Jaeger 1963 (127)) ist jedoch außer dem Neutronenfluß noch

die Kenntnis der Neutronenenergie notwendig. Hurst, Ritchie und Wilson umgingen diese Voraussetzung durch ihre Konstruktion aus dem Jahr 1951 (128), einen methangefüllten Proportionalzähler mit zwei Paraffinradiatoren, von denen der eine mit einer Al-Folie bedeckt war. Bei richtigem Abgleichen von Gasdruck und Größe und Dicke des Paraffins und Aluminiums konnte die Abhängigkeit der Neutronenflußanzeige von der Neutronenenergie der Abhängigkeit der Änderung der applizierten Dosis von der Energie des Neutronenflusses angepaßt werden. Bei diesem Zähler bereitete die Gammadiskriminierung jedoch noch Schwierigkeiten.

Eine verbesserte Form dieses Zählertyps wird von Dennis und Loosemore 1961 (129) angegeben. Sie besteht aus mehreren polyäthylengefüllten Zellen, die mit Methan und Argon gefüllt sind und zwischen 0,1 und 14 MeV eine der Dosisleistung proportionale Zählrate anzeigen. Die Empfindlichkeit für Gammastrahlen ist hundertmal geringer als für Neutronen.

Eine relativ geringe Abhängigkeit der Anzeige von der Neutronenenergie (zwischen 0,4 und 11 MeV Ansteigen auf ungefähr das Dreifache) erreichte Andersson 1961 (130) mit einem einfachen Methanzähler mit Polyäthylenwänden. Die Gammaempfindlichkeit ist 250 mal geringer als die Neutronenempfindlichkeit.

Ein Endstadium der methodischen Entwicklung des Rückstoßproportionalzählers stellt der von Hurst 1954 angegebene Absolut-Proportionalzähler für schnelle Neutronen dar (131). Ein Zähler mit Polyäthylenwänden ($C_n H_{2n}$) ist gefüllt mit C_2H_4 oder Zyklopropan C_3H_6 (mit 75 bzw. 50 cm Hg-Druck), so daß die Zählrohrwand und das Füllgas die gleiche atomare Zusammensetzung haben. Er verbindet die Messung nach dem Bragg-Gray-Prinzip wie bei der oben S. 27 genannten Ionisationskammer mit den Vorteilen eines Zählrohres, d.h. der Möglichkeit, einen Gammastrahlenuntergrund hinwegzudiskriminieren, und der wesentlich höheren Empfindlichkeit.

Bei einer Neutronendosisleistung (einer Po-Be-Quelle) von 1 mrad/h und bei einem Gamma-Untergrund (Co^{60}) von 1 R/h geht durch die Diskriminierung des Gammaanteils 10 %, bei 25 R/h

18 % der Gesamtrückstoßionisation verloren (Hurst und Wagner 1961 (132)). Durch graphische Auswertung läßt sich sogar bei Gammadosen von 10 bis 100 R/h und Dosisleistungen der schnellen Neutronen von weniger als 100 mrad/h noch eine präzise Messung durchführen.

Der Hurst-Zähler mißt im gesamten Geschwindigkeitsbereich der schnellen Neutronen bis 20 MeV.

B Kernumwandlungen

Man kann die Kernumwandlung auf zweierlei Weise zur Neutronendosismessung benutzen. Entweder man benutzt die ionisierende Strahlung, die bei der Bildung eines neuen Kerns durch Neutronen ausgesandt wird bzw. die Energie der Spaltprodukte, oder man mißt die induzierte Radioaktivität mit Hilfe der ionisierenden Strahlen, die bei der Änderung des instabilen neuen Kerns oder der entstandenen Kerntrümmer ausgesandt werden. Ebenso wie die Strahlung bei Kernumwandlung kann auch die bei unelastischer Streuung auftretende Gammastrahlung gemessen werden.

Wir beginnen mit der an zweiter Stelle genannten Methode, mit der Umwandlung der durch die Neutronen gebildeten instabilen Kerne oder instabilen Spaltprodukte, also mit der Ausnutzung der induzierten Radioaktivität.

Vorschläge zur Erzielung von Richtungsunabhängigkeit werden in der folgenden Abhandlung beiseitegelassen.

I. Messung der induzierten Radioaktivität

Bei der Aktivierungsmethode dient die Größe der künstlichen Radioaktivität zur Bestimmung der Neutronenintensität. Zur Messung des Flusses schneller Neutronen benutzt man Stoffe mit großem Wirkungsquerschnitt für schnelle Neutronen. Werden die schnellen Neutronen zuerst auf thermische Geschwindigkeiten abgebremst und als Aktivierungssubstanzen Stoffe mit großem Wirkungsquerschnitt benutzt, so erhält man aus der Aktivität die Neutronendichte der thermi-

18 % der Gesamtrückstoßionisation verloren (Hurst und Wagner 1961 (132)). Durch graphische Auswertung läßt sich sogar bei Gammadosen von 10 bis 100 R/h und Dosisleistungen der schnellen Neutronen von weniger als 100 mrad/h noch eine präzise Messung durchführen.

Der Hurst-Zähler mißt im gesamten Geschwindigkeitsbereich der schnellen Neutronen bis 20 MeV.

B Kernumwandlungen

Man kann die Kernumwandlung auf zweierlei Weise zur Neutronendosismessung benutzen. Entweder man benutzt die ionisierende Strahlung, die bei der Bildung eines neuen Kerns durch Neutronen ausgesandt wird bzw. die Energie der Spaltprodukte, oder man mißt die induzierte Radioaktivität mit Hilfe der ionisierenden Strahlen, die bei der Änderung des instabilen neuen Kerns oder der entstandenen Kerntrümmer ausgesandt werden. Ebenso wie die Strahlung bei Kernumwandlung kann auch die bei unelastischer Streuung auftretende Gammastrahlung gemessen werden.

Wir beginnen mit der an zweiter Stelle genannten Methode, mit der Umwandlung der durch die Neutronen gebildeten instabilen Kerne oder instabilen Spaltprodukte, also mit der Ausnutzung der induzierten Radioaktivität.

Vorschläge zur Erzielung von Richtungsunabhängigkeit werden in der folgenden Abhandlung beiseitegelassen.

I. Messung der induzierten Radioaktivität

Bei der Aktivierungsmethode dient die Größe der künstlichen Radioaktivität zur Bestimmung der Neutronenintensität. Zur Messung des Flusses schneller Neutronen benutzt man Stoffe mit großem Wirkungsquerschnitt für schnelle Neutronen. Werden die schnellen Neutronen zuerst auf thermische Geschwindigkeiten abgebremst und als Aktivierungssubstanzen Stoffe mit großem Wirkungsquerschnitt benutzt, so erhält man aus der Aktivität die Neutronendichte der thermi-

schen Neutronen, welche dem Neutronenfluß thermischer Neutronen proportional ist. Bei dieser Methode ist zu beachten, daß die Neutronendichte, also die mittlere Anzahl der thermischen Neutronen in der Volumeneinheit, abhängt von den aus allen Richtungen der Umgebung zudiffundierenden thermischen Neutronen.

Der Schluß von der bei der Messung festgestellten Aktivierung auf die Neutronenintensität setzt die Kenntnis der zeitlichen Verteilung von Aktivierung und Messung voraus. Der einfachste Fall liegt vor, wenn das Material nur einer, verglichen mit seiner Halbwertszeit kurzen Bestrahlung ausgesetzt war und die Zeitdistanz zwischen Bestrahlung und Messung bekannt ist. Handelt es sich um eine längerdauernde bekannte Aktivierungszeit bei gleichbleibendem Neutronenfluß und ebenfalls bekannter Zeitdistanz zwischen der Messung und dem Abbruch der Aktivierung, so lassen sich die Neutronenstrahlgrößen ebenfalls berechnen. Bei im Verhältnis zur Halbwertszeit länger andauernder Neutronenbestrahlung mit ungleichem Neutronenfluß können aus der - bestimmte Zeit nach dem Abschluß der Bestrahlung gemessenen - Aktivität die Größen der Neutronenbestrahlung nur ungenau bestimmt werden.

Der Nachweis der Kernreaktionen kann mit der Ionisationskammer, dem Zählrohr oder mit Szintillatoren erfolgen, wobei hinzuzufügen ist, daß die aktive Probe auch in einer Szintillatorflüssigkeit gelöst werden kann: Józefowicz 1963 (133) s.u. S. 35.

Ein großer Vorteil der Aktivierungsmethode ist, daß sie nur auf Neutronen, nicht auf Gammastrahlen anspricht.

Wir unterscheiden bei den Dosismessern für schnelle Neutronen mittels induzierter Radioaktivität zwei Methoden: 1. die Dünnschicht-Aktivierungsindikatoren, 2. die Messung der induzierten Körpersubstanz- bzw. Phantomaktivität.

1. Dünnschicht-Aktivierungsindikatoren

Während bei den Rückstoßmethoden die absorbierte Energie

gemessen werden konnte, kann aus einer Aktivierung mit Neutronen verschiedener Geschwindigkeit bei Kenntnis des makroskopischen Wirkungsquerschnittes nur der Neutronenfluß bzw. die Neutronendichte ermittelt werden.

a) Stoffe mit energieunabhängigem Wirkungsquerschnitt

Besonders einfach wird das Aktivierungsdosimeter, wenn das Detektormaterial für das gesamte interessierende Geschwindigkeitsspektrum einen ungefähr konstanten Wirkungsquerschnitt hat. Es gibt mehrere Substanzen, z.B. die radioaktive Spaltprodukte liefernden Np^{237} , U^{236} und U^{238} , die für hohe Neutronengeschwindigkeiten (zwischen 0,4 und 1,4 MeV) einen gleichbleibenden Wirkungsquerschnitt haben. Einen sogar von geringen Neutronengeschwindigkeiten bis zu 20 MeV gleichbleibenden Wirkungsquerschnitt besitzt die Umwandlung von Co^{59} in Co^{60} , das von Smith 1961 (134) als Detektormaterial verwendet wurde. Dieser Stoff, verbunden mit einem thalliumaktivierten NaJ-Szintillationszähler, kann noch eine applizierte Neutronenmenge (einen integralen Neutronenfluß) bis herab zu 10^7n messen.

b) Schwellenwertdetektoren

Um aus Aktivitätsmessungen die applizierte Dosis ermitteln zu können, muß außer dem Neutronenfluß auch die Geschwindigkeitsverteilung der Neutronen bekannt sein. Zu diesem Zweck benutzt man Aktivitätsdetektoren mit bekanntem energieabhängigem Wirkungsquerschnitt, insbesondere Stoffe, die jeweils nur in einem kleinen Energie-Intervall (Resonanzstelle) einen großen Wirkungsquerschnitt haben. Man kombiniert mehrere, z.B. 5 solche Materialien, deren große Wirkungsquerschnitte über den ganzen in Frage kommenden Energiebereich verteilt sind, zu einem Detektor. Aus den Messungen solcher zusammengesetzter Detektoren, deren Folien einzeln ausgemessen werden, können dann die Geschwindigkeitsverteilung der Neutronen, der Neutronenfluß und die pro Volumeneinheit absorbierte gesamte Neutronenenergie, die Dosis, berechnet werden.

Der Meßbereich dieser aus mehreren Folien (oder auch Kügelchen) bestehenden Detektoren reicht bis zu den größten Dosen (Eignung für Kernexplosionsmessung bei Unfällen), jedoch liegt die untere Grenze bei Flüssen von einigen 10 bis 100 $\text{n/cm}^2\text{sec}$ (Schalnow (135), S. 184) (Toleranz-Neutronenfluß: 18 bis 20 $\text{n/cm}^2\text{sec}$ für 1 bis 5 MeV-Neutronen).

Für ein Geschwindigkeitsspektrum von thermischen Neutronen bis zu Neutronen mehrerer MeV benutzt man z.B. für thermische Neutronen die Aktivierung von Gold, für schnelle Neutronen die Aktivität der Spaltprodukte von Pu^{239} , eingepackt in Bor, von Np^{237} , U^{238} und die Aktivierung von Schwefel (Hurst u.a. 1956 (136)).

Gamertsfelder u.a. 1963 (137) benützen die Hoy'sche Kombination (1960 (138)): zwischen 2 Cd-Folien je 2 Indium- und Goldfolien, 1 Kupferfolie und ein Schwefelkugelchen, dazu In^{115} .

Der Energiebereich geht von 0,025 eV (also thermischen Neutronen) bis über 2,9 MeV (Gamertsfelder s.o.).

Braun und Nilsson 1961 (139) geben für ihr Unfalldosimeter (Goldfolie mit und ohne Cd-Bedeckung und Phosphorfolie) einen Meßbereich von 5 bis 1000 rem an, wobei als besonderer Vorzug die Auswertung mit Geigerzählern mit einer Auswertungszeit von 60 min ohne die Rechnung angegeben wird. (Die Aktivität der Phosphorfolie kann erst nach 2 Stunden gemessen werden.) Der Härtebereich liegt zwischen thermischen und 3 MeV-Neutronen.

c) Aktivierung von Einzelfolien

Die Aktivierung nur einzelner Folien ist für die Personen-Neutronendosisüberwachung von Wichtigkeit. Während mit Kernspurplatten eine Bestimmung der Personendosis möglich ist, erlauben die aktivierten Folien nur eine rohe Abschätzung, jedoch mit dem Vorteil des Wegfalls der bei den Photoplaten notwendigen vorherigen chemischen Behandlung im Entwickler.

Als aktivierbares Material werden dafür hauptsächlich Gold und Indium benützt. Da sie nur auf langsame Neutronen ansprechen, müssen die schnellen Neutronen erst durch einen zusätz-

lichen Moderator gebremst werden. Als Moderator wird oft der menschliche Körper selbst benützt, wobei eine Bestimmung der Gesamtbestrahlung des Körpers jedoch nicht möglich ist.

Anzuführen ist an dieser Stelle noch die in Oak Ridge benutzte Film-Plakette (nach Morgan 1961 (140)). Sie enthält zur Messung von Röntgen- und Gammastrahlen zwischen 0,02 und 3 MeV mit $\pm 15\%$ Genauigkeit und einem Dosisbereich von 0,05 rad bis 500 rad (spezielle Ausführung bis 5000 rad) 3 Filme mit verschiedener Emulsion; ferner für Dosen bis 10.000 rad Silberphosphatglas und chemische Dosimeter; einen Film mit Kernspuremulsion zur Messung der Neutronendosis zwischen 0,02 und 10 rad; Schwefel zur Messung von Neutronen über 0,05 rad mit Energien unter 2,5 MeV; Gold und mit Cadmium bedecktes Gold zur Messung thermischer Neutronen über 0,3 mrad sowie Gold und Indium für Reaktorunfälle.

Mit in flüssigen Szintillatoren aufgelösten aktiven Proben, z.B. Phosphor, Natrium, Jod, Mangan und Indium, können Neutronendichten von 10^{-2} bis 10^9 n/cm³ auf 4 % genau gemessen werden (Józefowicz 1963 (133)).

2. Aktivierung von körpereigenen Stoffen bezw. Phantomen

Eine körpernahe Methode der Neutronenmessung beruht auf dem Aktivierungsnachweis körpereigener Stoffe. Als wichtig erwies sich diese Methode sowohl bei Unfällen an Kernreaktoren wie bei länger dauernder mäßiger Neutroneneinwirkung.

Besonders eignet sich hier das im Blut enthaltene Natrium (Halbwertszeit 15 Stunden), da es einen verhältnismäßig grossen Wirkungsquerschnitt für thermische Neutronen hat und in kurzer Zeit im ganzen Körper ausgetauscht wird, wodurch auch bei lokaler Bestrahlung eine gleichmäßige Aktivitätsverteilung hervorgerufen wird.

Aus der Aktivität einer bestimmten Blutmenge ergibt sich dann die dem Körper insgesamt applizierte Neutronenmenge. Zur Dosisbestimmung muß noch das Geschwindigkeitsspektrum der schnellen Neutronen z.B. aus der Ermittlung mit Schwellendetektoren - unter Abschirmung eines eventuell großen

Flusses thermischer Neutronen - bekannt sein. Schalnow (135) S. 185 berichtet jedoch, daß für Spaltneutronen (mit dem Geschwindigkeitsmaximum ungefähr bei 2 MeV) die Neutronendosis in rem der Natriumaktivität bei kurzzeitiger Einwirkung direkt proportional sei. "Bei Havarien an Reaktoren und nach Atombombenabwürfen ist daher die Messung der induzierten Aktivität des Gewebes ein einfaches und ausreichend genaues Verfahren zur Bestimmung der aufgenommenen Dosis" - oder genauer: einer auf das Körpergewicht umgerechneten durchschnittlichen Dosis (bezw. der gesamten vom Körper absorbierten Energie), da "Dosis" für die Masse-Einheit definiert ist.

Die Aktivität von Na^{24} wird am einfachsten aus der bei der Umwandlung entstehenden Gammastrahlung mit Szintillationszählern ermittelt.

In Abwandlung dieses Verfahrens wird ein rascher Nachweis für erfolgte Bestrahlung einer Person durch Messung der direkt aus dem Körper austretenden, bei der Umwandlung von Na^{24} und K^{42} entstehenden Gammastrahlung geführt. In Hanford wurden so auf dem Bauch einer Person, die 24 rad bei einem Reaktorunfall erhalten hatte, 80 Imp/min pro rad gemessen (Gamertsfelder 137).

Bei Verwendung eines Phantoms an Stelle des menschlichen Körpers arbeitet man meist mit Natriumchlorid oder Natriumoxalat in Lösung.

II. Neutronen-Kernreaktionen

Bei der jetzt zu nennenden Methode wird die bei der Reaktion mit den Neutronen "sofort" entstehende ionisierende Strahlung bzw. die kinetische Energie der Spaltprodukte zur Messung verwendet. Die entstehende Ionisation ist bei gleichbleibender Geschwindigkeitsverteilung der Neutronen dem Neutronenfluß der schnellen bzw. der Dichte der thermischen Neutronen proportional.

1. Kernspaltung

Im voranstehenden Abschnitt wurden bereits Stoffe genannt, deren Wirkungsquerschnitte über einen großen Energiebereich der Neutronen ungefähr konstant sind. Der Spaltungsquerschnitt von U^{235} steigt bei 0,62 MeV von praktisch 0 steil zu dem konstanten Wert von 1,3 barn an. Für U^{238} liegt der steile Anstieg bei ca. 1,5 MeV. Die Anstiege noch anderer spaltbarer Elemente liegen dazwischen.

Die stark ionisierenden Spaltbruchstücke werden mit einer Impulsionskammer (Spaltkammer, teilweise auch mit B^{10} ausgekleidet) gemessen. Große Bedeutung haben diese Kammern bei Messungen im Strahlungsfeld des Reaktors wegen ihrer grossen Gamma-Unempfindlichkeit (Kirn 1963 (141)). Bei der Unfalldosimetrie spielen sie jedoch keine Rolle im Gegensatz zu der oben genannten Verwendung derselben Materialien bei Neutronenflußbestimmungen aus der Aktivität der entstandenen Spaltprodukte.

2. Kernumbildung

Andere Neutronendetektoren benutzen Stoffe mit großen Wirkungsquerschnitten bei langsamen Neutronengeschwindigkeiten in Verbindung mit einem Moderator, z.B. Paraffin, der die schnellen Neutronen bis zu thermischen oder nahezu thermischen Geschwindigkeiten abremst. Die Anzahl der Kernreaktionen in der Zeiteinheit ist der Dichte der thermischen Neutronen proportional. Sehr viel benutzt wird die (n, α) -Reaktion von B^{10} .

Wir gliedern wieder wie bei der Gammadosimetrie nach der Art der Feststellung des strahleninduzierten Vorgangs, also nach optischen und elektrischen Nachweismethoden.

(A) Optische Methoden: Luminiszenz

a) Fluoreszenz: Szintillationszähler

Die Szintillationsmethode, die wir zum Nachweis der Rückstoßprotonen schon erwähnt haben, läßt sich auch zum Nachweis und zur Messung der bei den Neutronen-Kernreaktionen entste-

henden ionisierenden Teilchen- oder Gammastrahlen verwenden.

Zum Nachweis der Alphastrahlung bei der (n, α) -Reaktion von B^{10} verwendet man z.B. Pasten, die einen Szintillator, z.B. Zinksulfid und Bor enthalten. Sun u.a. 1956 (142) erreichten eine Nachweiswahrscheinlichkeit von 10 % bzw. 33 % für Neutronen (Fünfer-Neuert (80) S.216). Mit Lithiumdisilikat ($Li^6 (n, \alpha) T$) erzielte man bei thermischen Neutronen 40 % Ausbeute (ebd. S. 215). Der Gammastrahleneinfluß läßt sich wegdiskriminieren (143).

Auch mit flüssigen Szintillatoren werden stattfindende Neutronen-Kernreaktionen registriert. Pikelner u.a. 1963 (144) benutzen die n, γ -Reaktion in Methylborat in Toluol mit Para-Terphenyl, Lanter (116) die Neutron-Proton-Einfangreaktion.

b) Phosphoreszenz

α) Thermophosphoreszenz

Neutronenmessung mit Hilfe von Thermophosphoreszenz wurde von Häring und Schoen seit 1959 (145) versucht. Eine CaF_2 (Mn)-Schicht wird mit einer Li^6 -Schicht umgeben. Bei Bestrahlung mit langsamen Neutronen erzeugen die α -Strahlen der $Li^6 (n, \alpha) H^3$ -Reaktion Thermophosphoreszenz. Auch das bei dieser Reaktion entstehende Tritium trägt zur Anregung bei. Untere Nachweisgrenze $5 \cdot 10^3$ n. Bei Anwesenheit von Gammastrahlung ist Differenzmessung mit und ohne Li^6 -Schicht nötig (Häring und Schoen 1961 (146)).

Ebenso muß bei dem Neutronen-Thermophosphoreszenzdosimeter von Surjadi 1963 (147) der Einfluß eines starken Gammauntergrundes durch Differenzmessung eliminiert werden. Benutzt wird hier ebenfalls Mn-aktiviertes CaF_2 -Pulver, das mit einer B^{10} -haltigen Formvarfolie oder einer Li^6F -haltigen Polystyrolfolie abgedeckt und von einer Paraffinkugel von 10 cm Radius umgeben ist. Untere Nachweisgrenze 200 mrem (etwa 10^7 schnelle Neutronen pro cm^2). Reproduzierbarkeit 2 %. Fading 2 % pro Woche bei Zimmertemperatur.

β) Radiophoto-Phosphoreszenzdetektor

Wie bereits bei der Messung der Gammastrahlung mit Hilfe der Radiophoto-Phosphoreszenz erwähnt wurde (s.o. S. 15), haben die von Schulman entwickelten Silberphosphatglasdosimeter auch eine geringe Empfindlichkeit gegen Neutronen. Auxier u.a. (68) berichten, daß bei Schulman-Glas der Fluoreszenz von 1 rad Gammastrahlung die Fluoreszenz von 100 rad schnellen Neutronen (elastische Neutronenstreuung) bezw. von $3 \cdot 10^9$ thermischen Neutronen/cm³ (Neutroneneinfang durch Ag¹⁰⁷ und Ag¹⁰⁹) und nach Zusatz von Li⁶ und B¹⁰ (Yokota (64), Kondo (66)) $3 \cdot 10^8$ thermische Neutronen/cm³ entspricht. Durch Differenzmessung mit gefilterter und ungefilterter gemischter Strahlung ist eine Bestimmung der Flußdichte der thermischen Neutronen möglich.

Dazu siehe auch Piesch 1964 (148).

(B) Elektrische Methoden

Proportionalzähler

Sehr viel wird zur Neutronendosismessung benutzt die (n, α)-Reaktion von B¹⁰, wobei ein mit B¹⁰ bis zu 96 % angereichertes B in einem BF₃-Proportionalzähler verwendet wird.

Bei einfacher Abbremsung der schnellen Neutronen in einem mit Paraffin umgebenen BF₃-Zählrohr entspricht jedoch der ermittelten Dichte der thermischen Neutronen ein verschiedener Neutronenfluß der einfallenden schnellen Neutronen je nach ihrer Geschwindigkeit. Hanson und McKibben 1947 (149) haben diese Geschwindigkeitsabhängigkeit der Neutronendichte durch einen speziellen Aufbau zum Verschwinden gebracht im sogenannten Long counter.

Beim Long counter handelt es sich um ein BF₃-Zählrohr (oder auch um eine BF₃-Ionisationskammer). Der große Wirkungsquerschnitt (670 barn) von B¹⁰, das zu 18,8 % im natürlichen Bor enthalten ist, liegt bei 0,025 eV, also bei thermischen Neutronen. Durch spezielle Dimensionen des Zählrohrs und eine es umgebende Paraffinwand läßt sich eine

gleichmäßige Ansprechwahrscheinlichkeit von 0,5 bis 8 MeV erreichen, wenn die Zählrohrachse gegen die Neutronenquelle gerichtet ist. Mit diesem Zähler können Neutronenflüsse bis herab zu den Toleranzflüssen ($18 \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ bei 8 MeV) noch gemessen werden.

Mit dem sogenannten doppeltmoderierten Borzähler nach De Pangher 1958 (150) mit zwei Paraffinmänteln wird darüberhinaus sogar dosisäquivalente Anzeige erzielt. Bei Abnahme des zweiten Paraffinmantels mißt das Gerät wieder den Neutronenfluß.

Zur Messung der kinetischen Energie schneller Neutronen bis 1 MeV eignet sich die (n,p)-Reaktion in einem mit He^3 gefüllten Proportionalzähler. Die gemessene Gesamtenergie setzt sich aus der Neutronenenergie plus 770 keV zusammen (Fünfer-Neuert S. 214). Neuerdings konnte dessen Energiebereich über 1 MeV hinaus erweitert werden (Brown 1964 (151)).

III. Kernanregung bei unelastischer Streuung von Neutronen

Für Neutronenenergien etwa $> 1 \text{ MeV}$ wird als Nachweismethode auch die bei der unelastischen Streuung von Neutronen am Jod entstehende Gammastrahlung, die in dem verwendeten NaJ-Kristall sofort die Szintillationen erzeugt, verwendet (Fünfer-Neuert S. 216). Die Nachweiswahrscheinlichkeit wird mit 10 % angegeben. Die Diskriminierung eines Gamma-Hintergrundes ist nicht einfach.

C Änderung der Halbleitereigenschaften

1. Leitfähigkeitsänderung

Schließlich ist noch die Änderung der Halbleitereigenschaften bei Bestrahlung mit schnellen Neutronen als Methode zur Bestimmung der Neutronenbestrahlung bei sehr großen Neutronenflüssen zu erwähnen. Aleksandrowicz und Bartenbach 1961 (152) benutzen die Leitfähigkeitsänderung in mit Cd-Folie umgebenen Germanium-Kristallen von der Größe $1,5 \times 1,5 \times 10 \text{ mm}$ für rasche Relativmessungen des integralen Neutronenflusses schneller (über 300 eV-) Neutronen im Reaktor. Bei dieser

gleichmäßige Ansprechwahrscheinlichkeit von 0,5 bis 8 MeV erreichen, wenn die Zählrohrachse gegen die Neutronenquelle gerichtet ist. Mit diesem Zähler können Neutronenflüsse bis herab zu den Toleranzflüssen ($18 \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ bei 8 MeV) noch gemessen werden.

Mit dem sogenannten doppeltmoderierten Borzähler nach De Pangher 1958 (150) mit zwei Paraffinmänteln wird darüberhinaus sogar dosisäquivalente Anzeige erzielt. Bei Abnahme des zweiten Paraffinmantels mißt das Gerät wieder den Neutronenfluß.

Zur Messung der kinetischen Energie schneller Neutronen bis 1 MeV eignet sich die (n,p)-Reaktion in einem mit He^3 gefüllten Proportionalzähler. Die gemessene Gesamtenergie setzt sich aus der Neutronenenergie plus 770 keV zusammen (Fünfer-Neuert S. 214). Neuerdings konnte dessen Energiebereich über 1 MeV hinaus erweitert werden (Brown 1964 (151)).

III. Kernanregung bei unelastischer Streuung von Neutronen

Für Neutronenenergien etwa $> 1 \text{ MeV}$ wird als Nachweismethode auch die bei der unelastischen Streuung von Neutronen am Jod entstehende Gammastrahlung, die in dem verwendeten NaJ-Kristall sofort die Szintillationen erzeugt, verwendet (Fünfer-Neuert S. 216). Die Nachweiswahrscheinlichkeit wird mit 10 % angegeben. Die Diskriminierung eines Gamma-Hintergrundes ist nicht einfach.

C Änderung der Halbleitereigenschaften

1. Leitfähigkeitsänderung

Schließlich ist noch die Änderung der Halbleitereigenschaften bei Bestrahlung mit schnellen Neutronen als Methode zur Bestimmung der Neutronenbestrahlung bei sehr großen Neutronenflüssen zu erwähnen. Aleksandrowicz und Bartenbach 1961 (152) benutzen die Leitfähigkeitsänderung in mit Cd-Folie umgebenen Germanium-Kristallen von der Größe $1,5 \times 1,5 \times 10 \text{ mm}$ für rasche Relativmessungen des integralen Neutronenflusses schneller (über 300 eV-) Neutronen im Reaktor. Bei dieser

von Davis u.a. 1948 (153) angegebenen Methode ändert sich durch die Bestrahlung das n-Germanium kontinuierlich in p-Germanium. Der Einfluß der thermischen Neutronen ist vernachlässigbar klein. Für Gammastrahlung sind diese Detektoren praktisch unempfindlich (Aglinzew S. 394).

2. Änderung des Vorwärtsstroms einer p-n-Schicht

Ausgehend von der Arbeit von Gorton 1960 (154) entwickelten Gamertsfelder u.a. 1963 (137) ein Dosimeter, das für Personenüberwachung brauchbar werden könnte, aus verschiedenen dicken Silicium-Dioden, deren Vorwärtswiderstand sich um ungefähr 0,2 % pro rad für Neutronen zwischen 0,5 und 4 MeV ändert. Es ist geeignet zur Messung sehr hoher Dosen bis herunter zu 0,5 rad. Gegen 500 R Gammastrahlung ist es unempfindlich.

Diskussion

Die vorliegende kurze Studie über die bei der Messung von Gamma- und Neutronenstrahlen verwendeten Methoden soll einen Überblick über die derzeitigen Möglichkeiten geben, wie die intensive Strahlung bei einem Katastrophenfall und die folgende Verseuchungsstrahlung von den davon Betroffenen gemessen werden kann.

Diese Messungen von ortsgebundenen Meßstationen durchführen zu lassen, ist wegen der Variation der Bestrahlungsmöglichkeiten von Person zu Person nicht ausreichend. Es ist nicht zu umgehen, auch ungeschulten Einzelpersonen die Feststellung der Bestrahlungsgrößen mit Hilfe von Individualdosimetern zu ermöglichen. Da für diese eine rauhere Behandlung und eine stärkere Variation der Umweltbedingungen vorausgesetzt werden muß, sollen hier vor allem die Individualdosimeter zu stellenden Forderungen behandelt werden.

Meßaufgabe

Mit den Detektoren sollen mehrere Meßaufgaben ausgeführt werden. Es müssen gemessen werden können: zunächst die beiden Strahlenarten, Gamma- und Neutronenstrahlen; ferner eine extrem hohe kurzdauernde Strahlung (Initialstrahlung) und eine extrem schwache Strahlung (Verseuchungsstrahlung); schließlich interessiert sowohl die applizierte Dosis als auch die Dosisleistung der kontinuierlich einwirkenden Verseuchungsstrahlung am Aufenthaltsort des Dosimeterträgers.

Zu diesen Variationen der zu messenden physikalischen Größe kommt noch eine Reihe von Forderungen, die sich für die Herstellung der Geräte und für die Durchführung in den verschiedensten Meßsituationen ergeben.

Meßsituation

Zunächst ist für eine Massenherstellung ein einfach aufgebautes Gerät einem komplizierteren vorzuziehen, da es billiger in der Herstellung ist und in der Regel weniger Fehlerquellen enthält. Auch einfache Handhabung und Wertermittlung

ist zu fordern, damit die Geräte auch von Ungeschulten benutzt werden können. Die "Vorbehandlung", die die Geräte dabei eventuell erfahren können, verlangt außer fester Abkapselung auch noch, daß eine mechanische und technische Beeinflussbarkeit soweit als möglich ausgeschaltet ist. Da die Individualdosimeter getragen werden, müssen sie leicht und klein sein. Die Geräte dürfen sich schließlich in unbestrahltem Zustand nicht verändern und der Dosiswert muß auch noch längere Zeit nach der Bestrahlung feststellbar sein.

Das Individualdosimeter muß folgende 3 Informationen enthalten:

1. Der Träger muß erkennen, ob er sich noch weiterer Strahlenbelastung aussetzen kann oder ob er schon die "Maximal"-dosis appliziert erhalten hat.

2. muß die applizierte Dosis, auch wenn sie über der Maximaldosis, d.h. der Ableseskala liegt, vom Gerät registriert werden.

3. Der Träger muß die jeweilige örtliche Strahlenverseuchung erkennen, d.h. am Gerät die Dosisleistung bzw. den Strahlenfluß derselben ablesen können.

Im Folgenden sollen die vorhandenen Meßmethoden und Gerätetypen in Bezug auf jede dieser Forderungen behandelt werden.

Gammadosimeter

A Messung der applizierten Dosis

1. Maximaldosis

Verlangt man vom Individualdosimeter zunächst nur, daß es das Überschreiten einer Maximaldosis dem Träger anzeigen soll und zwar unter den Bedingungen einfacher Handhabung, geringen Gewichts und Volumens, der Sicherheit der Wertermittlung und geringer mechanischer und thermischer Anfälligkeit, so kommen von den erwähnten Dosimetertypen nur in Frage:

Verfärbungsdosimeter
Ionisationskammer
Strahlungselement.

Von diesen wären die Verfärbungsdosimeter durch ihre besonderen Vorzüge: Billigkeit, geringes Gewicht und Volumen, sehr geringe mechanische und thermische Anfälligkeit und Unveränderlichkeit des Endwertes, Unempfindlichkeit gegen Neutronen wohl außer Konkurrenz, wenn es gelänge, einen visuell sicher erkennbaren Farbwert oder Farbumschlag bei dem gewünschten Dosismaximalwert zu erreichen. Bisher wird als kleinster, an einer Farbänderung visuell erkennbarer applizierter Dosisbeitrag 75 R (Burns (6)) angegeben.

Wahrscheinlich wird aber ein Dosimeter, das nur die Information enthält: "zulässige 'Maximal'dosis ist erreicht (oder nahezu erreicht)", der Gefahrensituation nicht gerecht. Es würde für den Gefährdeten eine starke Beunruhigung bedeuten, wenn er überhaupt keine Kenntnis erhalten könnte, wieweit die empfangene Bestrahlung von der "Maximal"dosis entfernt ist. Er muß also am Dosimeter wenigstens ungefähr ablesen können, wie stark er sich ohne zu großes Risiko noch einige Zeit einer weiteren Bestrahlung aussetzen darf. Da die Abschirmmöglichkeiten von Person zu Person stark schwanken können, muß diese zusätzliche Information in jedem Individualdosimeter enthalten sein.

Für einfache visuelle Feststellungen der jeweils applizierten Dosen ist die Farbänderungsmethode noch nicht geeignet. Nur Ionisationskammern und Röntgenelemente (deren Skalen die Ablesung der Maximaldosis gestatten) sind unter den genannten Voraussetzungen für Individualmeßgeräte brauchbar. Sie können für rauhe Behandlung ausgeführt werden.

Sowohl die handelsüblichen Ionisations-Pens als auch die als Pen ausgeführten Röntgenelemente erlauben bereits für einen größeren Dosisbereich eine Dosisbestimmung mit genügender Genauigkeit. Die Ausmaße des Röntgenelements betragen zur Zeit jedoch noch das Anderthalbfache des Ionisations-Pens. Andererseits aber ist das Röntgenelement dem Ionisations-Pen

entscheidend überlegen, da es bei allen Dosisleistungen richtig mißt und nicht wie das Ionisations-Pen bei großen kurzzeitigen Dosisleistungen wegen dem Sättigungseffekt unbrauchbar wird. Der zweite entscheidende Vorteil zugunsten des Strahlungs- oder Röntgenelements ist der, daß das Strahlungselement keine Fremdspannung benötigt, sondern unbestrahlt die Spannung Null hat und deshalb keine Fehler durch Entladungen vor der Bestrahlung auftreten können.

Für die Aufgabe: Feststellung der applizierten Dosis am Individualdosimeter wenigstens bis zu einem Maximalwert durch den Träger ist also an erster Stelle

das als Pen ausgeführte Strahlungselement
an zweiter das Ionisations-Pen

zu nennen.

2. Wahre applizierte Dosis

Das Individualdosimeter muß auch bei sehr hohen Werten die wahre applizierte Dosis festhalten, die dann mit Geräten im Laboratorium ermittelt werden kann.

Diese Forderung ist weniger weitgehend als die unter 1. genannte Bedingung, denn jetzt muß der Detektor nur speichern, ohne eine visuell beobachtbare, eine sichtbare Veränderung zu erleiden. Deshalb können dafür neben den beiden obigen Methoden auch andere Detektoren benutzt werden. Ausser Ionisation (Ionisations-Pen) und Ladungstransport durch die Strahlung (Strahlungselement) eignet sich dafür die Verfärbungsmethode, die Filmschwärzung, die Thermophosphoreszenz und die Radiophoto-Phosphoreszenz sowie die Thermo- und Radio-Exoelektronenmethode.

An Stelle eines Pens, bestehend aus Ionisationskammer und Elektrometer, ist für die jetzt zur Diskussion stehende Meßaufgabe nur eine kleine Ionisationskammer nötig etwa in Form kleiner abgekapselter zylindrischer oder runder Luftkondensatoren, wie sie in der Strahlentherapie Verwendung finden (Hersteller PTW Freiburg i.Br.), oder in irgendeiner noch geeigneteren Form. Das Strahlungselement ist jetzt ebenfalls nur

noch ein etwa gleichgroßer Vakuumkondensator mit verschiedenen Elektroden.

Die Ionisations- bzw. Strahlungselement-Detektoren sind für die Herstellung jedoch aufwendiger als Verfärbungssubstanzen (jetzt für apparative Auswertung im Laboratorium), Filme, Thermo- und Radiophotosubstanzen, die abgekapselt mitgetragen werden. Diese sind unter sich in etwa gleichwertig, was Einfachheit, Billigkeit, geringes Gewicht und Volumen und geringe mechanische Anfälligkeit des Detektors betrifft. Auch sind alle in dem hier interessierenden Meßbereich über einer festgesetzten noch ablesbaren Maximaldosis von vielleicht 50 R bis zur Letaldosis von ca. 500 R und darüber zu gebrauchen.

Da ein Gesamturteil darüber, welche der aufgeführten Meßmethoden für die durch eine Meßstelle festzustellende wahre applizierte Dosis am geeignetsten ist, von der Wertung der einzelnen Vor- und Nachteile abhängt, wollen wir die wichtigsten Eigenschaften noch einmal im Einzelnen zusammenstellen und die einzelnen Detektoren nach ihrer Bonität in absteigender Reihenfolge ordnen:

a) Was die Zuverlässigkeit der zur Speicherung benutzten Reaktion betrifft, so können alle 7 Typen als gleichwertig angesehen werden ausgenommen die Ionisationskammer, welche bei hohen Dosisleistungen wegen des Sättigungseffektes nicht brauchbar ist.

b) Bezüglich der Inkonstanz der gespeicherten Größe gibt es Unterschiede: Die Thermophosphoreszenz zeigt in den ersten 16 Stunden etwa 10 % Verlust und in der Folgezeit etwa 1 % pro Tag. Die Radiophoto-Phosphoreszenz gibt eine sicherere Speicherung.

Die Ordnung nach der Bonität dürfte etwa folgende sein:

Verfärbungsdosimeter

Strahlungselement und Ionisationskammer

Radiophoto-Phosphoreszenz bzw. Radio-Exoelektronen
Film

Thermophosphoreszenz bzw. Thermo-Exoelektronen-
methode.

c) Mechanische und thermische Beeinflußbarkeit des Detektors vor oder nach der Bestrahlung: Hier steht an erster Stelle wohl das Glasverfärbungsdosimeter, an zweiter das Strahlungselement und die Ionisationskammer, die stoßfest und für verhältnismäßig hohe Temperaturen ausgeführt werden können. Auch die Thermophosphoreszenzstoffe benötigen heute zum Ausleuchten schon verhältnismäßig hohe Temperaturen (zwischen 200 und 300° C). Die Filme dagegen sind durch Temperatur zu beeinflussen. Die Reihenfolge der Bonität dürfte etwa folgende sein:

Verfärbungsdosimeter
 Strahlungselement und Ionisationskammer
 Radiophoto- bzw. Radio-Exoelektronenmethode
 Thermophosphoreszenz- bzw. Thermo-Exoelektronenmethode
 Filme.

d) Was die Möglichkeit der sofortigen Auswertung betrifft, so fällt nur die Radiophoto-Phosphoreszenzmethode heraus, die erst einige Stunden nach der Bestrahlung ihren Endwert erreicht.

e) Die Möglichkeit der Nachmessung ist gegeben bei den Verfärbungsdosimetern und den Filmen und neuerdings bei der Dosisbestimmung mit Hilfe der kontinuierlichen Abstrahlung von Thermophosphoreszenzstoffen (Schulman (61)). Die Bonitätsfolge dürfte lauten:

Verfärbungsdosimeter und Filme
 Thermophosphoreszenzstoffe.

(Bei Strahlenschutzmessungen mit speichernden Detektoren in medizinischen und technischen Strahlenbetrieben ist es zur Vergrößerung der Sicherheit der Messung üblich, jeweils drei zusammengefaßte Detektoren zu verwenden.)

f) Zusätzliche Manipulation. Von entscheidender Bedeutung kann es eventuell sein, ob die zur Messung benutzte physikalische Größe schon bei der Bestrahlung erzeugt wird oder erst durch eine zusätzliche Manipulation mit dem bestrahlten Detektor (Entwicklung, Ausheizung, Ausleuchtung) entsteht,

Dieser Punkt ist deshalb wichtig, weil dadurch eine zusätzliche Abhängigkeit von notwendigen Manipulierungsvorgängen entsteht, die bei einem Unglück größeren Ausmaßes erschwert sein können, und aus dieser Nachbehandlung neue Fehlerquellen erwachsen können.

Hier schneidet das Filmdosimeter wohl am schlechtesten ab, da einerseits für Entwicklung und Messung zwei völlig getrennte Arbeitsvorgänge nötig sind und andererseits die Entwicklungsfehler leicht sehr groß werden können.

An vorletzter Stelle folgt vielleicht die Ausheizung der Thermophosphoreszenzstoffe und davor die Ausleuchtung der Radiophoto-Phosphoreszenz. Wenn man die Farbtönungsbestimmung des Verfärbungsdosimeters mit Hilfe einer Vergleichsskala wohl berechtigterweise hinter der Ladungsmessung rangieren läßt, so ergibt sich als Bonitätsfolge:

Strahlungselement, Ionisationskammer und feste
Verfärbungsdosimeter
Flüssige Verfärbungsdosimeter
Radiophoto-Phosphoreszenz
Thermophosphoreszenz
Film.

g) Für Dosisablesung bis zu einer Maximaldosis und die Feststellung der eventuell sehr großen wahren applizierten Dosis oberhalb des Anzeigebereichs im Laboratorium ist bei Strahlungselement und Ionisationskammer nur ein Detektor nötig, was für die anderen Systeme nicht zutrifft.

B Messung der Dosisleistung einer Verseuchungsstrahlung

1. Personen-Dosisleistungsmesser

Die Feststellung der örtlichen Dosisleistung bei einer eventuellen radioaktiven Verseuchung ist für den Gefährdeten neben der Messung der bereits applizierten Dosis ebenfalls notwendig. Zur Feststellung einer an einem Ort herrschenden geringen Dosisleistung benötigt man hochempfindliche Dosisleistungsmesser. Aber hochempfindliche Dosis-

leistungsmesser, die zugleich auch den eventuellen großen Beanspruchungen eines Individualdosimeters gewachsen sind, gibt es noch nicht.

2. Labor-Dosisleistungsmesser

Bei Laborbedingungen, also für Stationsdosimeter, können alle Geräte mit entsprechendem Meß- und Härtebereich mehr oder weniger gut verwendet werden. Eine gegenseitige Abwägung der verschiedenen Methoden - Szintillationszähler, Zählrohre, Strahlungselemente, Ionisationskammern - scheint ohne Kenntnis eventuell in Frage kommender Gesichtspunkte nicht angebracht.

Neutronendosimeter

Da der menschliche Körper als Moderator für Neutronen wirkt, muß bei der Neutronendosismessung die Stellung von Detektor und Körper zur Einfallsrichtung der schnellen Neutronen berücksichtigt werden. In der folgenden Abhandlung wird darauf nicht eingegangen.

A Messung der applizierten Dosis

1. Maximaldosis

Analog zur Disposition für das Gammadosimeter lauten die Bedingungen 1a und 1b für das Neutronen-Personendosimeter: Es soll vom Gerät mindestens das Überschreiten einer festgesetzten Maximaldosis angezeigt werden bzw. die applizierte Dosis bis zu diesem Maximalwert ablesbar sein.

Bei dem heutigen Stand der Technik kommt als einzige Methode die Ionisationsmessung, entweder in einer Ionisationskammer mit raschablaufenden Kernreaktionen (Spaltung oder Umwandlung) oder in einer Rückstoßkammer, in Frage, wobei bei letzterer der Gamma-Einfluß kompensiert sein muß. Doch nach dieser Methode arbeitende Detektoren, die zusätzlich den beschriebenen, an ein Individualdosimeter zu stellenden For-

derungen genügen, gibt es zur Zeit noch nicht.

2. Wahre applizierte Dosis

Zur Zeit muß man sich also darauf beschränken, den Personen Detektoren mitzugeben, die einen der applizierten Neutronendosis äquivalenten Strahlungseffekt speichern, der dann im Labor ermittelt wird. Hierfür stehen mehrere Methoden zur Verfügung.

Einfach ist der Detektor, wenn man nicht die applizierte Neutronendosis verlangt, sondern sich mit der applizierten Anzahl der Neutronen, dem sogenannten integralen Neutronenfluß, begnügt. Dann kommt man mit einem Detektormaterial, z.B. Co^{59} , Np^{237} , U^{236} , U^{238} , den sogenannten Dünnschichtaktivierungs-Indikatoren, aus, die für schnelle Neutronen einen wenig energieabhängigen Wirkungsquerschnitt haben.

Auch auf langsame Neutronen ansprechende Stoffe wie Gold und Indium können in Verbindung mit Moderatoren dabei Verwendung finden.

Eine Aussage über die wahre applizierte Neutronendosis der schnellen Neutronen kann nur durch Kombination mehrerer solcher Indikatoren mit energieabhängigem Wirkungsquerschnitt (Schwellenwertdetektoren) erreicht werden. Doch dürfte die Bestimmung der applizierten Anzahl schneller Neutronen bei den Individualdosimetern genügen. Mit einem Umrechnungsfaktor, der aus theoretischen Überlegungen oder aus Messungen des Geschwindigkeitsspektrums der Neutronen mit Laboratoriumsgeräten zur Verfügung steht, könnte die Umrechnung der applizierten Neutronenmenge in die applizierte Neutronendosis mit hinreichender Genauigkeit erfolgen.

Brauchbar für Personendetektoren zur Messung der applizierten Neutronenmenge oder Neutronendosis scheint nach den vorliegenden letzten Veröffentlichungen auch die Thermophosphoreszenz- (untere Grenze 200 mrem, Surjadi (147)) und die Radiophoto-Phosphoreszenzmethode (untere Grenze 2 rem, Yokota (64)) zu sein.

Auch die Änderung des Vorwärtswiderstands von Si-Dioden mit 0,5 rad als untere Grenze (Gamertsfelder (137)) ist zur Bestimmung der applizierten Dosis geeignet.

Bei den Kernspurplatten fällt der bei der Gammadosimetrie mit Filmen genannte große Einfluß der Entwicklungsbedingungen zwar weitgehend weg, da es sich hier um Einzelspuren handelt. Sie dürften aber, obwohl sie die applizierte Dosis zu bestimmen gestatten, wegen der Mühseligkeit der Auswertung für eine schnelle Dosisbestimmung z.B. bei einem Unglücksfall weniger in Frage kommen.

Schließlich sind für die Messung der applizierten Dosis wieder die Ionisationskammer mit rasch ablaufenden Kernreaktionen oder gammakompensierte Rückstoßkammern, die wieder wie bei der Gammadosimetrie als kleine abgekapselte Kammern ausgeführt werden können, geeignet.

Neben der Messung der applizierten Dosis mit Hilfe von Detektoren besteht bei Neutronenbestrahlung noch die Möglichkeit, die Summe der dem Körper applizierten Neutronen aus der Aktivierung körpereigener Substanzen, insbesondere dem Na^{24} des Blutes, zu bestimmen.

Wie bei den Gammadosimetern wollen wir die Bonität der einzelnen Methoden an Hand der wichtigsten zu fordernden Eigenschaften besprechen.

a) Zuverlässigkeit der Speicherung. Wie die zu geringen Speicherungswerte in der Ionisationskammer wegen des Sättigungseffektes können auch bei den Aktivierungsindikatoren zu geringe Dosiswerte anfallen, wenn die Dosisleistung für die Halbwertszeit zu gering ist.

b) Was die Inkonstanz der gespeicherten Größe betrifft, so muß für eine richtige Messung mit Aktivierungsindikatoren die Zeit zwischen Speicherung und Messung bekannt sein, es sei denn, die Halbwertszeit der aktivierten Substanz ist sehr groß gegen diese Zeitspanne.

Für Neutronendosimetrie mit Thermophosphoreszenz und Radiophoto-Phosphoreszenz und wahrscheinlich auch für die Exoelektronen-Detektoren gilt das bei der Gammadosimetrie

(S. 46) Gesagte, so daß die Bonitätsfolge lauten dürfte:
Aktivierungssubstanzen bei Kenntnis der Zeit von
Bestrahlung bis Messung

Ionisationskammer

Radiophoto-Phosphoreszenz bzw. Radioexoelektronen

Thermophosphoreszenz bzw. Thermoexoelektronen.

c) Mechanische und thermische Beeinflußbarkeit vor und nach der Bestrahlung. Die Reihenfolge der Bonität dürfte etwa folgende sein:

Aktivierungsmethode

Kernspurplatten

Ionisationskammer

Radiophoto- bzw. Radioexoelektronenmethode

Thermophosphoreszenz bzw. Thermoexoelektronen.

d) Nur die Radiophoto-Phosphoreszenzstoffe können nicht sofort ausgewertet werden, da sie erst einige Stunden nach der Bestrahlung ihren Endwert erreichen.

e) Die Möglichkeit der Nachmessung ist gegeben bei den Kernspurplatten, den aktivierten Stoffen und den kontinuierlich abstrahlenden Thermophosphoreszenzstoffen, wenn bei diesen die Nachmessung in nicht zu großer Zeitdistanz bzw. bei genauer Kenntnis der Zeitdistanz erfolgt.

f) Zusätzliche Manipulationen. Hier dürfte die Bonitätsfolge sein:

Aktivierungsmethode und Ionisationskammer

Radiophoto-Phosphoreszenz

Thermophosphoreszenz

Kernspurplatten.

B Messung der Dosisleistung der Verseuchungsstrahlung

Personendosisleistungsmessung

Die Messung der Neutronendosisleistung mit Hilfe von Individualdosimetern, die den eingangs erwähnten Bedingungen genügen, ist noch nicht möglich.

Labor-Neutronendosisleistungsmesser

Die hierfür in Frage kommenden Meßmethoden sind im Teil "Neutronendosimeter" zusammengestellt. Es waren:

Ionisationskammer: a) nach der Rückstoßmethode arbeitende,
b) Spaltungskammern

einfacher Proportionalzähler } unter Verwendung von
Hurst-Proportionalzähler } Rückstoßkernen

Szintillationszähler mit Anregung

a) durch Rückstoßkerne

b) durch Teilchen- oder Gammastrahlung aus Kernreaktion

Borzähler bzw. Long counter unter Verwendung von
Kernreaktionen.

Universal-Individualdosimeter

Der verschiedene biologische Effekt von Gamma- und Neutronenstrahlen macht es wünschenswert, die Gamma- und Neutronendosis sowie die Gamma- und Neutronendosisleistung getrennt zu messen. Ein Universaldosimeter, das für alle Bestrahlungsmöglichkeiten ausgerüstet ist, besteht somit aus wenigstens vier Meßgeräten, wenn vorausgesetzt werden darf, daß sowohl die ablesbaren wie die über der Meßskala liegenden eventuell sehr großen applizierten Gamma- und Neutronendosen von nur je einem Gerät registriert werden. Zur Zeit sind dafür nur das Strahlungselement und die Ionisationskammer geeignet.

L i t e r a t u r

Die zur Kennzeichnung des derzeitigen Standes der Dosimetrie angeführten Arbeiten bilden nur einen kleinen Teil der sehr umfangreichen Literatur.

Gammadosimeter

A Optische Dosismethoden

I. Absorptionsänderungen

- (1) J.F. Fowler and M.J. Day, High-dose measurement by optical absorption. Nucl. 13, 1955, S. 52
- (2) N.J. Kreidl and G.E. Blair, Glass dosimetry. Nucl. 17, 1959, S. 58
- (3) W. Suckow, Verfahren zur routinemäßigen Bestimmung hoher Gammadosen im Strahlenfeld des abgeschalteten Reaktors. Kernen. 4, 1961, S. 830
- (4) V.H. Ritz and F.H. Attix, A solid-state Bragg-Gray cavity chamber. Selected Topics in Radiation Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 481 - 490, hierfür S. 485 ff.
- (5) K.K. Harris, A thin plastic radiation dosimeter. Int.J. appl. Radiation 11, 1961, S. 114 - 122
- (6) W.G. Burns and R. Lockyer, Dosimetry of X- and gamma-rays by alkali-halide crystals containing U-centres. J. sci. Instr. 32, 1955, S. 316 - 319
- (7) D.H. Peirson, The phosphate glass dosimeter. Atom. Energy Res. Establ. Rep. 1958, Nr. E1/R 2590, S. 1 - 23
- (8) A. Charlesby and R.J. Woods, Radiation dosimetry with dyed cellophane. Int. J. appl. Radiat. 14, 1963, S. 413-419
- (9) J.H. Schulman, C.K. Click and H. Rabin, Measuring high doses by absorption changes in glass. Nucl. 13, 1955,

S. 30 - 33

- (10) A. Scharmann, Dosimetry of large doses of radiation by coloration or decoloration of glasses and plastics. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 511 - 519
- (11) Ch. Artandi and A.A. Stonehill, Polyvinyl chloride - new high-level dosimeter. Nucl. 16, 1958, S. 118 - 120
- (12) R.W. Clarke, J.B. Price and F. Rogers, Some aspects of dosimetry on a spent fuel gamma-irradiation facility. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 667-672
- (13) J.W. Boag, G.W. Dolphin and J. Rotblat, Radiation dosimetry of transparent plastics. Rad. Res. 9, 1958, S.589
- (14) V. Ritz, A note on Mylar film dosimetry. Rad. Res. 15, 1961, S. 460 - 466
- (15) I. Weiß, A.O. Allen and H.A. Schwarz, Use of the Fricke ferrous sulfate dosimeter for gamma-rays in the range 4 to 40 kV. Genf 1955, 14, S. 179
- (16) K.K. Aglinzew, Dosimetrie ionisierender Strahlung, Berlin 1961, S. 257
- (17) G. Thielens, Limite d'utilisation du dosimètre à sulfate ferreux pour la mesure de faibles doses de rayons gamma. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 325 - 329
- (18) W. Minder, Chemical dose measurements of high-energy photons and electrons. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 315 - 323
- (19) A. Wambersie, La dosimétrie chimique au sulfate ferreux. Ann. Radiol. (Paris) 7, 1964, S. 237
- (20) S.J. Taimuty, H.L. Towle, D.L. Peterson, Ceric dosimetry: routine use at 10^5 - 10^7 rads. Nucl. 17, 1959, S. 103
- (21) M. and M. Miró, Effect of copper sulfate on the ceric dosimetry system. Int. J. appl. Radiat. Isotopes 15,

1964, S. 3

- (22) S.C. Sigoloff, Chemical and colorimetric dosimetry: the tetrachlorethylene chemical dosimeter system. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S.337 - 359
- (23) M.J. Day and G. Stein, Chemical measurement of ionizing radiations. Nature 164, 1949, S. 671
- (24) M.E.J. Carr, A simplified chemical method of radiation dosimetry. Nature 167, 1951, Nr. 4244
- (25) B. Lafuente, S.A. Goldblith and B.E. Proctor, Weitere Untersuchungen über die Verwendung von Methylenblau in wäßriger Lösung als Dosimeter für intensive hochenergetische Strahlung. Int. J. appl. Radiat. Isotopes 3, 1958, S. 119 - 124
- (26) S. Davison, Dosimetry of a kilocurie Cobalt-60 source. Nucl. 11, 1953, S. 22 - 26
- (27) N. Chassende-Baroz, Utilisation des émulsions photographiques pour la mesure de fortes doses. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 285 - 288
- (28) H.F. Nitka and D.P. Jones, Photographic method for megareöntgen dosimetry. Nucl. 15, 1957, S. 128 - 133
- (29) W.L. MacLaughlin, Megareöntgen dosimetry employing photographic film without processing. Rad. Res. 13, 1960, S. 594 - 609
- (30) F. Wachsmann, The customary method in Germany for personnel monitoring by film badges. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 275 - 283
- (31) J.S. Cheka, Nuclear emulsion instability. Nucl. 12, 1954, S. 58
- (32) M. Ehrlich, A photographic personnel dosimeter for X-radiation in the range from 30 keV beyond 1 MeV. Radiology 68, 1957, S. 549 - 554

II. Luminiszenzdosimeter

- (33) H.L. Schuch, R.D. Hiebert and F.N. Hayes, Photovoltaic scintillation detector for high dose rates. Nucl. 12, 1954, S. 16
- (34) P. Ganghadaran, S. Jayaraman, H.K. Pendurkar and A. Sankaran, Photovoltaic cell X-ray exposure rate meter. Health Phys. 10, 1964, S. 323 - 330
- (35) B. Heß, Strahlenschutzkontrolle mit dem Leuchtschirm, Röntgenbl. 7, 1954, S. 411 - 415
- (36) H. Geiger and E. Marsden, On a diffuse reflection of the α -particles. Proc. Roy. Soc. London A 82, 1909, S. 495
- (37) E. Regener, Berl. Ber. 1909, II, 948
- (38) R.J.T. Herbert, A scintillation dose-rate meter using a tuned low-frequency amplifier. Brit. J. Radiol. 29, 1956, S. 345 - 349
- (39) G. Blasek und R. Kempe, Ein Gamma-Szintillationsdosimeter. Kernenergie 5, 1962, S. 550 - 553
- (40) L. Reiffel, Gamma-ray radiation monitor. Electronics 23, 1950, S. 107 - 109
- (41) R. Boulenger, E. Gourski and C. Jonckheere, An electrometer with logarithmic response. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 123 - 130
- (42) E.H. Belcher and J.E. Geitlinger, Improved scintillating media for radiation dosimetry. Brit. J. Radiology 30, 1957, S. 103 - 105
- (43) R. Kempe, Korrektur der Energieabhängigkeit plastischer Szintillatoren durch Einbau von Elementen höherer Ordnungszahl. Kernenergie 5, 1962, S. 487
- (44) N.P. Babenko, I.O. Konstantinow und Ju.A. Nemilow, Ein Gas-Szintillationszähler hohen Drucks. Pribory i tech. exper. 9, 1964, S. 164 - 166
- (45) F. Daniels, Ch.A. Boyd and D.F. Saunders, Thermoluminis-

- cence as a research tool. Science 117, 1953, S.343-349
- (46) W. Kossel, U. Mayer and H.C. Wolf, Simultaneous dosimetry of radiation fields in living objects. Naturwissenschaften 41, 1954, S. 209
- (47) R.J. Ginther and R.D. Kirk, Thermoluminescence of CaF_2 : Mn and its application to dosimetry. Naval Res. Lab., Washington, Report of NRL-Progress, 1956, Sept. 12 - 20
- (48) J.H. Schulman, R.J. Ginther, R.D. Kirk and S. Goulart, Thermoluminescent dosimeter has storage stability, linearity. Nucl. 18, 1960, S. 92 - 102
- (49) St. Malskey, A preliminary study of thermoluminescence dosimetry. Radiology 78, 1962, S. 277
- (50) B. Bjärngard, $\text{CaSO}_4(\text{Mn})$ thermoluminescence dosimeters for small doses of gamma-radiation. Rev. sci. Instr. 33, 1962, S. 1129
- (51) J.H. Schulman, F.H. Attix, E.J. West and R.J. Ginther, A new thermoluminescent dosimeter. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 531 - 539
- (52) M.J. Marrone and F.H. Attix, Damage effects in CaF_2 : Mn and LiF thermoluminescence dosimeters. Health Phys. 10, 1964, S. 431
- (53) M. Frank und L. Herforth, Zur Thermolumineszenz mit CaF_2 : Mn. Kernenergie 5, 1962, S. 173 - 176
- (54) Z. Spurný, Ein Thermolumineszenzdosimeter. Kernen. 5, 1962, S. 611 - 615
- (55) B.M. Nosenko, L.S. Revzin and Ia. Iaskolko, Use of CaSO_4 : Mn for dosimetry. Soviet Phys.-Tech. Phys. 1, 1957, S. 1983 - 1985
- (56) J.R. Cameron, Radiation dosimeter utilizing the thermoluminescence of LiF. Science 134, 1961, S. 333 - 334
- (57) P. Bräunlich und A. Scharmann, Dosimetrie mit Hilfe der Thermolumineszenz von Lithiumfluorid. Nukleonik 4, 1962,

S. 65 - 67

- (58) C.J. Karzmark, J. White and J.F. Fowler, Lithium fluoride thermoluminescence dosimetry. Phys. in Med. Biol. 9, 1964, S. 273 - 286
- (59) J.R. Cameron, D. Zimmermann, G. Menney, R. Buch, R. Bland and R. Grant, Thermoluminescent radiation dosimetry using LiF. Health Phys. 10, 1964, S.25 - 29
- (60) M. Frank, Thermoluminiszenzdosimetrie mit LiF und Energieabhängigkeit von Thermoluminiszenzdosimetern der Phosphore CaF₂: Mn und LiF. Kernen. 6, 1963, S. 76
- (61) J.H. Schulman and E.J. West, Phosphorescence method of reading thermoluminescence dosimeters. Rev.sci. Instr. 34, 1963, S. 863
- (62) N. Häring and M. Schoen, Dosimetry of ionizing radiation and neutrons with the aid of thermoluminescence. Sel.Topics in Rad.Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S.541-548
- (63) M. Frank und L. Herforth, Zur Beta- und Gammastrahlendosimetrie durch Ultraschallausleuchtung von bestrahlten Kristallphosphoren. Monatsber. dt. Ak. Wiss. Berlin, 2, 1960, S. 259 - 261; Kernen. 4, 1961
- (64) R. Yokota and E. Sakai, New high-sensitive silver-activated phosphate glass for thermal neutrons. Sel. Topics in Rad.Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 497-501
- (65) D.H. Peirson, The phosphate glass dosimeter. Atomic Energy Res. Establ., Rep. 1958, Nr. E1/R 2590, S. 1-23
- (66) S. Kondo, Simultaneous measurements of thermal neutron fluxes and Gamma-contamination dose by silver-activated phosphate glass. Sel.Topics in Rad.Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 491 - 496
- (67) Strahlenmessung durch Glasdosimetrie. Umschau 1963, S. 542 - 543
- (68) J.A. Auxier, C.H. Bernard and W.T. Thornton, Silver

metaphosphate glass for Gamma-ray measurements in co-existent neutron and Gamma-radiation fields. Sel.Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 503 - 510

- (69) J.H. Schulman, R.J. Ginther and C.C. Klick, Dosimetry of X-rays and gamma-rays by radiophotoluminescence. J. appl. Phys. 22, 1951, S. 1479
- (70) H.J. Hardt, J. Heuser und A. Rudloff, Phosphatglasdosimetrie. Atompraxis 9, 1963, S. 45 - 48

B Elektrische Dosismessmethoden

I. Leitfähigkeitsänderungen

- (71) E.G. Bylander, Ion-chamber response in high-level radiation field. Nucl. 18, 1960, S. 102 - 104
- (72) V. Ritz and F.H. Attix, An ionization chamber for kilocurie source calibrations. Radiat. Res. 16, 1962, S.401-415
- (73) B. Heß, Verh.dt.Phys.Ges.(3), 23, 1942, S.90 und DRP 1943
- (74) O. Balk, "Ionisationskammer oder dergl.", Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe 8.1.64
- (75) W. Riezler, Einführung in die Kernphysik⁶, München 1959, S. 257
- (76) L. Bozóky, Ionization chambers for measuring large radiation doses. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 151 - 155
- (77) G.S. Hurst and E.B. Wagner, Special counting techniques in mixed-radiation dosimetry. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 409 - 417
- (78) I. Adamczewski, Ionization chambers with liquid and their practical application. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 191 - 201
- (79) H.L. Andrews and P.A. Shore, X-ray determination with

chloral hydrate. J. Chem. Phys. 18, 1950, S. 1165 - 1168

- (80) E. Fünfer und H. Neuert, Zählrohre und Szintillationszähler², Karlsruhe 1959
- (81) C.C. Klick, H.J. Peake, P.T. Cole, H. Rabin and J.J. Lambe, Simple fall-out meter uses CdS. Nucl. 13, 1955, S. 48 f.
- (82) I. Broser, H. Oeser und R. Warminsky, Die Dosimetrie von Gamma-Strahlen mit Cadmiumsulfidkristallen. Strahlenth. 90, 1953, S. 399 - 407
- (83) L.E. Hollander jr., Special CdS cells have high X-and gamma-ray sensitivity. Nucl. 14, 1956, S. 68 - 71
- (84) D. Kahn, Radiation dosimetry using alkali crystals and the absorption of betatron bremsstrahlung in water and bone. Acta radiol. Stockholm, 46, 1956, S. 563 - 569
- (85) N.A. Baily and G. Kramer, The lithium-drifted silicon p-i-n junction as an X-ray and gamma-ray dosimeter. Radiat. Res. 22, 1964, S. 53
- (86) I. Ruge and G. Keil, Microplasmas in silicon p-n junctions as detectors for gamma radiation. Rev. sci. Instr. 34, 1963, S. 390 - 392

II. Exoelektronen

- (87) J. Kramer, Untersuchungen chemischer Reaktionen an Festkörperoberflächen mit Exoelektronen nach Röntgenbestrahlung, I. Dissoziationsreaktionen. Z. phys. Chem. 25, 1960, S. 289 - 309
- (87a) J. Kramer, Untersuchungen chemischer Reaktionen an Festkörperoberflächen, II. Reaktionen an Luft, mit Wasser und zwischen festen Partnern. Z. phys. Chem. 26, 1960, S. 300 - 312

III. Spannungserzeugung

- (88) H.F.H. Warrikhoff, Röntgenelemente für die Dosimetrie
I. Z. ang. Phys. 18, 1964, S. 44 - 53; II. S. 89 - 95;
III. S. 95 - 105
- (89) B. Heß, Deutsche Patentschrift 940 847 vom 29.3.1941
"Einrichtung zum Nachweis und zur Messung von Röntgen-,
Gamma- und Neutronenstrahlen"
- (90) B. Heß, Röntgenelement. Z. ang. Phys. 11, 1959, S.449-
453
- (91) B. Heß, R. Hosemann, H. Warrikhoff, Deutsche Patent-
schrift 1 067 535 vom 24.5.1957 "Taschendosimeter"
- (92) St. Kronenberg and H. Murphy, Evaluation of Semirad for
dose-rate-independent measurements of fast neutron and
gamma-radiation. Army Signal Res. and Devel. Lab. 1958,
NP 7577
- (93) B. Groß, The Compton current. Z. f. Physik 155, 1959,
S. 479
- (94) P. Murphy, Annual Rep. to the Comissão Nacional de
Energia Nuclear, 1960, Part I
- (95) B. Groß and P. Murphy, Solid-state neutron-gamma dosi-
meter. Sel.Topics in Rad.Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S.
549 - 554
- (96) H. Ulrich, Siliciumphotoelemente zur Messung hoher
Gammadosisleistungen. Kernenergie 7, 1964

IV. Änderung der Dielektrizitätskonstante

- (97) A. Skoglund and A. Ore, Changes in the dielectric con-
stant of crystal-phosphors irradiated with X-rays.
Arch. Math. Naturv. (Oslo) 53, 1956, Nr. 2

C Mechanische Dosismethoden

- (98) P. Alexander, A. Charlesby and M. Ross, Proc. Roy. Soc. 223, 1954, S. 392
- (99) P.Y. Feng, Polymer degradation-wide-range dosimeter. Nucl. 16, 1958, 114
- (100) L. Wiesner, The use of polyisobutylene solutions for measuring doses from 10^3 rad up to about 10^{10} rad. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 361 - 370
- (100a) A. Boni, A polyacrylamide gamma dosimeter. Rad. Res. 14, 1961, S. 374 - 380
- (101) R.F. Nelson, The polyacrylamide dosimeter. Radiology 83, 1964, S. 120
- (102) H. Wilski, Ein neues Dosismethoden für den Megarad-Bereich. Atomkernenergie 4, 1959, S. 402 f.

Neutronendosimeter

A Rückstoßmethoden

I. optische

- (103) J.S. Cheka, Recent developments in film monitoring of fast neutrons. Nucl. 12, 1954, S. 40
- (104) S. Hagsgård and C.-O. Widell, Personnel neutron monitoring at AB Atomenergi. Neutron-Dosimetry II, IAEA, Wien 1963, S. 249 - 258
- (105) R. Wallace, B.J. Moyer, H.W. Patterson, A.R. Smith and L.D. Stephens, The dosimetry of high-energy neutrons produced by 6,2 GeV protons accelerated in the Bevatron. Neutron Dosimetry II, IAEA, Wien 1963, S. 579-

588, hierfür S. 584

- (106) W.F. Hornyak, A fast neutron detector. Rev. sci. Instr. 23, 1952, S. 264
- (107) W.S. Emmerich, A fast neutron scintillator. Rev. sci. Instr. 25, 1954, S. 69
- (108) R. Skjöldebrand, A fast neutron scintillation counter with tissue response. Journ. nucl. Energy 1, 1955, S. 299
- (109) L.C. Thompson, Neutron effects in a NaI(Tl) scintillation spectrometer. Nucl. Instr. 25, 1964, S.333 - 337
- (110) F.D. Brooks, Progress in nuclear physics 5, 1956
- (111) M. Forte and A. Konsta, Scintillation methods for discrimination of particles according to their specific ionisation. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 243 - 252
- (112) D.E. Hankins, New methods of neutron-dose-rate evaluation. Neutron-Dosimetry II, IAEA, Wien 1963, S. 123-137
- (113) C.E. Engelke, High pressure gas scintillators. Trans. Inst. Radio Engrs., N.Y. NS 7, 1960, S. 32 - 35
- (114) S.A. Baldin und W.W. Matwejew, Gas-Szintillationszähler. Pribory i tech. exp. 1963, S. 5 - 18
- (115) P.S. Odstawnow, Ein Helium-Szintillationszähler hoher Ansprechwahrscheinlichkeit zur Registrierung von Neutronen. Pribory i tech. exp. 9, 1964, S. 201
- (116) R.J. Lanter and D.E. Bannermann, A nearly-four-pi liquid scintillation counter for bursts of fast neutrons. Trans. Inst. Radio Engrs., N.Y. NS 9, 1962, S. 352 - 356

II. Elektrische Methoden

- (117) L.H. Gray and J. Read, Measurement of neutron dose in biological experiments. Nature 144, 1939, S. 439
- (118) K.G. Zimmer, Dosimetrische und strahlenbiologische Versuche mit schnellen Neutronen I. Strahlenther. 63, 1938, S. 517
- (119) K.G. Zimmer, Dosimetrische und strahlenbiologische Versuche mit schnellen Neutronen III. Strahlenther. 68, 1940, S. 74
- (120) K.G. Zimmer und N.W. Timoféeff-Ressovsky, Dosimetrische und strahlenbiologische Versuche mit schnellen Neutronen II. Strahlenther. 63, 1938, S. 528
- (121) B. Heß und K.G. Zimmer, Dosimetrische und strahlenbiologische Versuche mit schnellen Neutronen IV. Strahlenther. 75, 1944, S. 70
- (122) B. Heß, Neutronen-Dosismessung. Z. ang. Phys. 5, 1953, S. 297 - 303
- (123) H.H. Rossi and G. Failla, Tissue-equivalent ionization chambers. Nucl. 14, 1956, S. 32 - 37
- (124) H.H. Rossi, Ionization chambers in neutron dosimetry. Neutron Dosimetry II, IAEA, Wien 1963, S. 55 - 66
- (125) W. Abson and R.P. Henderson, A twin ion-chamber system for continuous monitoring of dose and dose-rate from mixed neutron and gamma radiations. Neutron Dosimetry II, IAEA, Wien 1963, S. 331 - 340
- (126) O. Balk, Deutsche Patentschrift 1 158 186 vom 28.8.1959 "An Wechselspannung betriebene Ionisationskammer"
- (127) R. Jaeger, Einleitung zu Neutron Dosimetry I, IAEA, Wien 1963, S. 1 - 10
- (128) G.S. Hurst, R.H. Ritchie, H.N. Wilson, A count-rate method of measuring fast neutron tissue dose. Rev. sci. Instr. 22, 1951, S. 981

- (129) J. Dennis and W.R. Loosemore, A fast neutron counter for dosimetry. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 443 - 452
- (130) I.Ö. Andersson, A proton-recoil proportional counter for fast-neutron dosimetry. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 453 - 461
- (131) G.S. Hurst, An absolute tissue dosimeter for fast neutrons. Brit. J. Radiology 27, 1954, S. 353 - 357
- (132) G.S. Hurst and E.B. Wagner, Special counting techniques in mixed-radiation dosimetry. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 409 - 417

B Kernumwandlungen

I. Induzierte Radioaktivität

- (133) E.T. Józefowicz, Absolute thermal neutron density measurements by the activation method. Nukleonika 8, 1963, S. 429 - 435
- (134) A.R. Smith, A cobalt neutron-flux integrator. Health Phys. 7, 1961, S. 40 - 47
- (135) M.I. Schalnow, Neutronen-Gewebedosimetrie, Berlin 1963
- (136) Hurst, Harter, Hensley, Mills, Slater and Reinhardt, Rev. sci. Instr. 27, 1956, S. 153
- (137) C.C. Gamertsfelder, P.E. Bramson, G.W.R. Endres and R.H. Wilson, Some notes on practical neutron dosimetry. Neutron Dosimetry II, IAEA, Wien 1963, S. 109-122

II. Neutronen-Kernreaktionen

- (138) J.E. Hoy, An emergency neutron dosimeter. DP-472, 1960
- (139) J. Braun and R. Nilsson, An emergency dosimeter for

- neutrons. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 623 - 638
- (140) K.Z. Morgan, Dosimetry requirements for protection from ionizing radiation. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 3 - 23
- (141) F.S. Kirn, Neutron detection with an absolute fission counter. Neutron Dosimetry II, IAEA, Wien 1963, S. 497 - 512
- (142) K.H. Sun, P.R. Malmberg and F.A. Pecjak, High efficiency slow-neutron scintillation counter. Nucl. 14, 1956, S. 46
- (143) Latest developments in scintillation counting. Nucl. 10, 1952, S. 46
- (144) L.B. Pikelner, M.I. Pschitula, Kim Chi San, Tschen Lin-jan und E.I. Scharapow, Ein Szintillationszähler zur Registrierung gestreuter Neutronen. Exp. Vorricht. und Techn. Exp. 1963, S. 51 - 54
- (145) N. Häring und M. Schoen, Dosimetrie von ionisierender und Neutronenstrahlung mit Hilfe der Thermolumineszenz. 13. Internat. Radiologenkongreß, München 1959
- (146) dies., Dosimetry of ionizing radiation and neutrons with the aid of thermoluminescence. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA, Wien 1961, S. 541 - 548, hierfür S. 547
- (147) A.J. Surjadi, Neutronendosimetrie mit Hilfe der Thermolumineszenz. Atomkernenergie 8, 1963, S. 435
- (148) E. Piesch, Die Verwendung von silberaktivierten Metaphosphatgläsern zur Bestimmung einer Personen- und Ortsdosis von Gamma- und Neutronenstrahlung. Atompraxis 10, 1964, S. 268
- (149) A.O. Hanson and J.L. McKibben, A neutron detector having uniform sensitivity from 0,1 to 3,0 MeV. Phys. Rev. 100, 1947, S. 1793

- (150) De Pangher, Double moderator neutron dosimeter.
H.W. 57293, 1958
- (151) W. Brown, A method of extending the energy range of
the Helium-3 neutron spectrometer. Nuclear Instr. 26,
1964, S. 1 - 6

C Halbleiter

- (152) J. Aleksandrowicz and M. Bartenbach, Germanium dosi-
meter for evaluation of fast neutron distribution in
the reactor core. Sel. Topics in Rad. Dosimetry, IAEA,
Wien 1961, S. 639 - 641
- (153) R. Davis, W. Johnson, L. Lark-Horovitz and S. Siegel,
Neutron bombarded germanium semiconductors. Phys. Rev.
74, 1948, S. 1255
- (154) H.C. Gorton et al., Final summary report on experi-
mental and research work in neutron dosimetry. US
Army Signal Res. and Devel.Lab., Contract No. BA-36-
039-SC-78924, 15. Juni 1960

Prof. Dr. B. Heß und
Dr. I. Köck

Physikalisches Institut der Phil.-
theol. Hochschule Regensburg
84 Regensburg, Ägidienplatz 2