

	Elektroisolierstoffe Bestimmung der Wirkung ionisierender Strahlung Teil 1: Einfluß der Strahlenwirkung und Dosimetrie (IEC 544-1:1994) Deutsche Fassung EN 60544-1:1994	DIN EN 60544-1
VDE	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Vorstand beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter nebenstehenden Nummern in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der etz Elektrotechnische Zeitschrift bekanntgegeben worden.	Klassifikation VDE 0306 Teil 1
Diese Norm enthält die deutsche Übersetzung der Internationalen Norm IEC 544-1 ICS 29.040.20 Deskriptoren: Elektroisolierstoff, Bestrahlung, ionisierende Strahlung, Prüfverfahren, Dosimetrie Electrical insulating materials – Determination of the effects of ionizing radiation – Part 1: Radiation interaction and dosimetry (IEC 544-1:1994); German version EN 60544-1:1994 Matériaux isolants électriques – Détermination des effets des rayonnements ionisants – Partie 1: Interaction des rayonnements et dosimétrie (CEI 544-1:1994); Version allemande EN 60544-1:1994 Die Europäische Norm EN 60544-1:1994 hat den Status einer Deutschen Norm. Beginn der Gültigkeit Die EN 60544-1 wurde am 1994-07-05 angenommen. Norm-Inhalt war veröffentlicht als E DIN EN 60544-1 (VDE 0306 Teil 1):1994-02. Fortsetzung Seite 2 und 29 Seiten EN Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE) Normenausschuß Kerntechnik (NKe) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.		

Nationales Vorwort

Diese Norm enthält die Deutsche Fassung der EN 60544-1:1994, in der die Internationale Norm IEC 544-1, 2. Ausgabe 1994, „Electrical insulating materials – Determination of the effects of ionizing radiation – Part 1: Radiation interaction and dosimetry“, unverändert übernommen worden ist.

Für die vorliegende Norm ist in Deutschland das nationale Arbeitsgremium AK 181.1.22 „Verhalten gegen ionisierende Strahlung“ des UK 181.1 „Prüfverfahren für feste Isolierstoffe“ der DKE zuständig.

Der Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist nachstehend wiedergegeben.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Norm waren die angegebenen Ausgaben gültig.

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	IEC 544-2:1991	DIN IEC 544-2 (VDE 0306 Teil 2):1996-03	VDE 0306 Teil 2
–	IEC 544-4:1985	DIN VDE 0306-4 (VDE 0306 Teil 4):1987-04	VDE 0306 Teil 4

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

**DIN IEC 544-2
(VDE 0306 Teil 2)**

Leitlinie zur Bestimmung der Wirkung ionisierender Strahlung auf Isolierstoffe – Teil 2: Verfahren zur Bestrahlung und Prüfung;
(IEC 544-2:1991)

**DIN VDE 0306-4
(VDE 0306 Teil 4)**

Leitlinie zur Bestimmung der Wirkung ionisierender Strahlung auf Isolierstoffe – Klassifikationssystem für den Einsatz unter Strahlung;
Identisch mit IEC 544-4, Ausgabe 1985

ICS 29.040.20

Deskriptoren: Elektroisolierstoff, Strahlungswiderstand, Ionisierungsstrahlung, Wechselwirkung, radioaktive Dosis, Dosimetrie, Röntgenstrahlung, Gammastrahlung, Berechnung, elektromagnetische Absorption

Deutsche Fassung

Elektroisolierstoffe – Bestimmung der Wirkung ionisierender Strahlung

Teil 1: Einfluß der Strahlenwirkung und Dosimetrie
(IEC 544-1:1994)

Electrical insulating materials
Determination of the effects of ionizing radiation
Part 1: Radiation interaction and dosimetry
(IEC 544-1:1994)

Matériaux isolants électriques
Détermination des effets des rayonnements ionisants
Partie 1: Interaction des rayonnements et dosimétrie
(CEI 544-1 : 1994)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 1994-07-05 angenommen. Die CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Zentralsekretariat oder bei jedem CENELEC-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, der Schweiz, Spanien und dem Vereinigten Königreich.

CENELEC

Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

Zentralsekretariat: rue de Stassart 35, B-1050 Brüssel

Vorwort

Der Text des Schriftstücks IEC 15B(CO)91, wie ausgearbeitet vom Unterkomitee 15B: Endurance tests, des Technischen Komitees der IEC Nr. 15: Insulating materials, wurde im Oktober 1993 der IEC-CENELEC Parallelen Abstimmung unterworfen.

Das Referenzdokument wurde von CENELEC am 5. Juli 1994 als EN 60544-1 genehmigt.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum der Veröffentlichung
einer identischen nationalen Norm (dop): 1995-07-01
- spätestes Datum für die Zurückziehung
entgegenstehender nationaler Normen (dow): 1995-07-01

Für Erzeugnisse, die vor 1995-07-01 der einschlägigen nationalen Norm entsprochen haben, wie durch den Hersteller oder durch eine Zertifizierungsstelle nachgewiesen, darf diese vorhergehende Norm für die Fertigung bis 2000-07-01 noch weiter angewendet werden.

Anhänge, die als „normativ“ bezeichnet sind, gehören zum Norm-Inhalt. Anhänge die als „informativ“ bezeichnet sind, enthalten nur Informationen.

In dieser Norm sind die Anhänge A, B und ZA normativ, und Anhang C ist informativ.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 544-1:1994 wurde von CENELEC als Europäische Norm ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Inhalt

	Seite
Einleitung	4
1 Anwendungsbereich und Zweck	4
2 Normative Verweisungen	4
3 Begriffe [15] *)	4
4 Gesichtspunkte bei der Bestimmung der Strahlenbeständigkeit von Isolierstoffen	5
4.1 Messung des Strahlenfeldes	5
4.2 Messung der Energiedosis und der Energiedosisleistung	5
4.3 Strahleninduzierte Veränderungen und ihre Messung	5
5 Dosimetrie	6
5.1 Allgemeines	6
5.2 Absolutmethoden	7
5.3 Relative Methoden	7
5.4 Empfohlene Methoden zur Messung der Energiedosis	8
6 Berechnung der Energiedosis bei Röntgen- oder Gammastrahlung	8
6.1 Allgemeines	8
6.2 Berechnung der Energiedosis aus der Ionendosis [13], [14].	8
6.3 Berechnung der Energiedosis in einem Werkstoff aus derjenigen in einem anderen	9
6.4 Tiefendosisverteilung (Einschränkungen)	9
7 Dosisbestimmung bei Elektronenstrahlen	10
7.1 Allgemeines	10
7.2 Empfohlene Verfahren für die Elektronenstrahldosimetrie	10
7.3 Bestrahlung mit Elektronenstrahlen	11
7.4 Methoden zur Messung der Tiefendosisverteilung	11
Tabellen	13 bis 18
Bilder	19 bis 22
Anhang A (normativ) Dosisaufbaubereich und Sekundärelektronengleichgewicht.	23
Anhang B (normativ) Ableitung der Numerischen Faktoren f_i	27
Anhang C (informativ) Literaturhinweise	28
Anhang ZA (normativ) Andere in dieser Norm zitierte internationale Publikationen mit den Verweisungen auf die entsprechenden europäischen Publikationen.	29

Einleitung

Die Erarbeitung geeigneter Kriterien für die Bestimmung der Strahlenbeständigkeit von Elektroisierstoffen ist sehr komplex, da derartige Kriterien von den Bedingungen abhängen, unter denen die Werkstoffe eingesetzt werden. Wird beispielsweise ein isoliertes Kabel beim Brennelementwechsel in einem Kernreaktor gebogen, so wird die Gebrauchsdauer diejenige Zeit sein, in der das Kabel eine Energiedosis erhält, die eine oder mehrere der für die Flexibilität relevanten mechanischen Eigenschaften bis zu einem bestimmten Grad verschlechtert. Die Einsatztemperatur, die Zusammensetzung der umgebenden Atmosphäre und die Zeitspanne, in der die Energiedosis erhalten wird (abhängig von Dosisleistung oder Fluß), sind wichtige Faktoren für die Geschwindigkeit und den Mechanismus der strahleninduzierten chemischen Veränderungen. In einigen Anwendungsfällen wird die Anwendung durch vorübergehende Veränderungen begrenzt.

Zuerst müssen die Strahlenfelder, denen die Werkstoffe ausgesetzt sind, und die von den Werkstoffen empfangene Energiedosis definiert werden. Danach müssen Verfahren für die Prüfung mechanischer und elektrischer Eigenschaften erarbeitet werden, die die Veränderungen des Werkstoffs durch die Strahlung erfassen, und es muß ein Zusammenhang zwischen diesen Eigenschaften und den praktischen Erfordernissen hergestellt werden, um ein geeignetes Klassifikationssystem zu erhalten.

Dieser Teil der IEC 544 ist Einführungsteil in eine Reihe, die sich mit der Wirkung ionisierender Strahlung auf Isolierstoffe befaßt. IEC 544-2 beschreibt ein Verfahren zur Einstellung und Kontrolle verschiedener Bedingungen während der Bestrahlung, so daß die gewünschte Beanspruchung erhalten wird. Ferner werden bestimmte wichtige Bestrahlungsbedingungen, die Prüfverfahren zur Bestimmung der Eigenschaftsänderungen und zugehörige Eigenschaftsgrenzwerte festgelegt. IEC 544-3:1979 wurde in die zweite Ausgabe von IEC 554-2 integriert. In IEC 544-4 wird ein Klassifikationssystem hinsichtlich der Strahlenbeständigkeit von Isolierstoffen festgelegt. Es enthält eine Reihe von Parametern zur Kennzeichnung der Brauchbarkeit für den Einsatz unter Strahlung. Es ist eine Leitlinie für die Auswahl und die Kennzeichnung von Isolierstoffen und für deren Spezifikation.

1 Anwendungsbereich und Zweck

Dieser Teil von IEC 544 befaßt sich eingehend mit den Gesichtspunkten, die bei der Ermittlung der Wirkung ionisierender Strahlung auf alle Arten organischer Elektroisierstoffe zu berücksichtigen sind. Er enthält ferner für Röntgen-, Gamma- und Elektronenstrahlen eine Einführung in die Begriffe der Dosimetrie, eine Übersicht über die gebräuchlichen dosimetrischen Verfahren und eine Anleitung zur Berechnung der Energiedosis.

2 Normative Verweisungen

Folgende Normen enthalten Festlegungen, die durch Verweisung in diesem Text Bestandteil der dieses Teiles der IEC 544 sind. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Norm gelten die angegebenen Ausgaben. Alle Normen unterliegen der Überarbeitung, und Anwender dieser Norm werden gebeten, die jeweils neueste Ausgabe der im folgenden genannten Normen anzuwenden. Mitglieder von IEC und ISO führen Verzeichnisse der gültigen Internationalen Normen.

IEC 544-2:1991 *Guide for determining the effects of ionizing radiation on insulating materials – Part 2: Procedures of irradiation and test*

IEC 544-4:1985 *Guide for determining the effects of ionizing radiation on insulating materials – Part 4: Classification system for service in radiation environments*

3 Begriffe [15] *)

Für die Anwendung dieser Norm gelten folgende Definitionen.

3.1 Ionendosis (X): Die Ionendosis ist ein Maß für ein elektromagnetisches Strahlenfeld (Röntgen- oder Gammastrahlen), dem ein Werkstoff ausgesetzt wird. Die Ionendosis ist der Quotient aus dQ und dm , wobei dQ der Absolutwert der gesamten elektrischen Ladung der Ionen eines Vorzeichens ist, die in Luft der Masse dm gebildet wird, wenn in diesem Masseelement alle Elektronen (und Positronen), die durch die Photonen freigesetzt werden, komplett gestoppt werden:

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

Die SI-Einheit der Ionendosis ist Coulomb (C) je Kilogramm: C/kg. Die alte Einheit ist Röntgen (R), dabei gilt: $1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$.

*) Die in Rechteckklammern angegebene Zahl verweist auf die im [Anhang C](#) aufgeführte Literatur.

Die Ionendosis beschreibt daher die Wirkung eines elektromagnetischen Feldes auf Materie in Form der Ionisation, die die Strahlung im Referenzmaterial Luft erzeugt.

3.2 Elektronenladungsfluß (Q'): Die Elektronenladung dQ , die während der Zeit t die Fläche dA durchdringt, dividiert durch dA :

$$Q' = \frac{dQ}{dA}$$

3.3 Elektronenstromdichte (j): Der Elektronenladungsfluß dQ' im Zeitintervall dt , dividiert durch dt .

$$j = \frac{dQ'}{dt} = \frac{d^2 Q}{dA dt}$$

3.4 Energiedosis (D): Die Energiedosis ist ein Maß für die vom bestrahlten Werkstoff aufgenommene Energie, unabhängig von der Art des Strahlenfeldes. Die Energiedosis D ist der Quotient aus $d\bar{\epsilon}$ und dm , wobei $d\bar{\epsilon}$ die mittlere Energie bedeutet, die von der ionisierenden Strahlung auf den Werkstoff in einem Massenelement dm übertragen wird:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

Die SI-Einheit ist Gray (Gy). Die alte Einheit ist Rad (rd):

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} (= 10^2 \text{ rd}).$$

Diese Definition für die Energiedosis berücksichtigt die Art des absorbierenden Stoffes nicht, und das Gray kann nur mit Bezug auf ein bestimmtes Material verwendet werden. Die Energiedosis wird von der Zusammensetzung des bestrahlten Materials mitbestimmt. In demselben Strahlenfeld erhalten daher verschiedene Materialien gewöhnlich unterschiedliche Energiedosiswerte.

3.5 Energiedosisleistung ($\dot{D}$): Ableitung der Energiedosis dD nach der Zeit dt :

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

Die SI-Einheit der Energiedosisleistung ist Gray durch Sekunde oder Watt durch Kilogramm:

$$1 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1} (= 10^2 \text{ rd} \cdot \text{s}^{-1} = 0,36 \text{ Mrd} \cdot \text{h}^{-1}).$$

4 Gesichtspunkte bei der Bestimmung der Strahlenbeständigkeit von Isolierstoffen

4.1 Messung des Strahlenfeldes

Für die verschiedenen Strahlenarten wird das jeweilige Strahlenfeld unterschiedlich beschrieben.

4.1.1 Ein elektromagnetisches Strahlenfeld kann mit Hilfe der Photonenflußdichte und der Energieverteilung beschrieben werden, jedoch ist es üblich, die Felder von Röntgen- und Gammastrahlen bis zu Energien von 3 MeV durch die ionisierende Wirkung auf Luft zu beschreiben. Dafür wird die Größe „Ionendosis“ verwendet.

4.1.2 Ein Teilchenfeld wird gewöhnlich durch die Flußdichte charakterisiert. Wenn die Teilchen eine Energieverteilung besitzen, etwa bei Elektronenstrahlen, werden zusätzliche Informationen über das Energiespektrum benötigt.

4.1.3 In jedem Fall muß das Strahlenfeld so charakterisiert werden, daß die Energiedosis irgendeines in diesem Feld bestrahlten Werkstoffes errechnet werden kann. Wenn unterschiedliche Werkstoffe demselben Fluß von Photonen oder Teilchen ausgesetzt werden, können sie unterschiedliche Energiemengen absorbieren. Es werden daher Standardmethoden zur Messung dieser Charakteristika der Strahlenfelder beschrieben. [Abschnitt 5](#) enthält zu diesem Zweck eine Zusammenstellung von Methoden der Strahlendosismetrie mit Literaturhinweisen.

4.2 Messung der Energiedosis und der Energiedosisleistung

Im Rahmen der Strahlungsmeßtechnik liefern Strahldetektoren, wie Ionisationskammern, Kalorimeter oder chemische Dosimeter, Meßwerte, aus denen die Energiedosis bzw. die Energiedosisleistung für einen bestrahlten Werkstoff berechnet werden können. [Abschnitt 5](#) enthält zuverlässige herkömmliche Strahlungsmessmethoden. [Abschnitt 6](#) enthält werkstoff- und energieabhängige Umrechnungsfaktoren für die Berechnung der Energiedosis oder der Energiedosisleistung in Werkstoffen aus den Meßwerten für Röntgen- und Gammastrahlung, während [Abschnitt 7](#) Bestimmungsmethoden für Elektronenstrahlung behandelt.

4.3 Strahleninduzierte Veränderungen und ihre Messung

Obwohl die Wechselwirkung verschiedener Strahlenarten mit Materie in unterschiedlicher Weise verläuft, ist der Primärprozeß stets die Bildung von Ionen und angeregten Zuständen der Moleküle, aus denen sich freie Radikale bilden können. Ferner werden Elektronen freigesetzt, die an Stellen niedriger Potentialenergie eingefangen werden. Das erste Phänomen führt zu bleibenden chemischen Änderungen des Materials und der elektrischen und mechanischen Eigenschaften. Das zweite Phänomen führt zu vorübergehenden Änderungen elektrischer Gebrauchseigenschaften [\[10\]](#).

4.3.1 *Bleibende Veränderungen*

In polymeren Werkstoffen führt die Bildung freier Radikale während der Bestrahlung zu Abbau- und Vernetzungsprozessen, die die chemische Struktur des Isolierstoffes verändern, was im allgemeinen zur Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führt. Diese Verschlechterung führt häufig zu bedeutenden Änderungen der elektrischen Eigenschaften. Jedoch können Änderungen wichtiger elektrischer Eigenschaften schon vor einer deutlichen Verschlechterung der mechanischen eintreten. So kann eine Änderung des Verlustfaktors oder der Dielektrizitätszahl die Funktion eines Resonanzkreises erheblich beeinträchtigen. Das Ausmaß an Spaltung und Vernetzung hängt von der Energiedosis, der Energiedosisleistung, der Geometrie des Materials und von den Umgebungsbedingungen während der Bestrahlung ab. Da die freien Radikale manchmal langsam zerfallen, muß mit weiteren Veränderungen durch Nachreaktionen nach Beendigung der Bestrahlung gerechnet werden.

4.3.1.1 *Umgebungsbedingungen und Materialgeometrie*

Die Umgebungsbedingungen und die Form und Abmessung der Probekörper müssen bei der Messung der Strahlenwirkung gut kontrolliert und dokumentiert werden. Wichtige Umgebungsbedingungen sind die Temperatur, reaktive Medien und mechanische bzw. elektrische Beanspruchungen während der Bestrahlung. Bei Bestrahlung in Luft hat sich die Bestrahlungszeit (Fluß- oder Dosisleistung) als sehr wichtiger Parameter erwiesen, da die Sauerstoffdiffusion und die Zerfallskonstante der gebildeten Peroxide von Einfluß sind. Beide Einflußgrößen sind zeitabhängig. Die Bedingungen, die die Sauerstoffdiffusion und die Gleichgewichtskonzentration in Werkstoffen beeinflussen, müssen kontrolliert werden. Dazu gehören Temperatur, Sauerstoffdruck, Materialgeometrie und Zeitspanne, während der die Energiedosis aufgebracht wird.

Wenn eine simultane Beanspruchung, z. B. Strahlung bei höherer Temperatur, durch aufeinanderfolgende Beanspruchungen simuliert werden soll, muß mit anderen Ergebnissen gerechnet werden. Ferner kann es zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen, je nachdem, ob die Proben erst bestrahlt und dann erhitzt werden oder umgekehrt.

4.3.1.2 *Nachreaktionen*

In organischen Polymeren muß mit weiteren Veränderungen nach Beendigung der Strahleneinwirkung infolge von Nachreaktionen gerechnet werden, die auf den Zerfall oder die Reaktion verschiedener noch vorhandener strahleninduzierter Reaktionsprodukte, wie freier Radikale, zurückzuführen sind. Die Reaktion von Luftsauerstoff mit den verbliebenen freien Radikalen kann einen weiteren Abbau bewirken.

4.3.2 *Vorübergehende Veränderungen*

4.3.2.1 Messungen während der Bestrahlung gehören nicht zum Anwendungsbereich dieser Norm. Trotzdem sollen einige grundlegende Gesichtspunkte kurz erläutert werden. Die vorübergehenden Strahlenwirkungen erscheinen primär als Änderungen elektrischer Eigenschaften, etwa der induzierten Leitfähigkeit, sowohl während als auch für eine gewisse Zeit nach der Bestrahlung. Daher können Messungen der induzierten Leitfähigkeit zur Bestimmung vorübergehender Veränderungen dienen. Diese sind abhängig von der Dosisleistung.

4.3.2.2 Die Erfahrung hat gezeigt, daß die induzierte Leitfähigkeit gewöhnlich nicht exakt proportional der Energiedosisleistung $\dot{D}$ ist, sondern daß

$$\sigma_i = k \dot{D}^\alpha$$

gilt, wobei $\alpha < 1$.

Zur Bestimmung von k und α sind mindestens zwei Messungen erforderlich. Der Zusammenhang wird noch dadurch kompliziert, daß k und α auch von der aufgetragenen Energiedosis abhängen.

4.3.2.3 Die Messung der strahleninduzierten Leitfähigkeit ist dadurch problematisch, daß Photo- und Comptonelektronen im Elektrodenmaterial dazu neigen, den in den Probekörpern selbst induzierten Strom zu beeinflussen. Auch Ionenströme durch die ionisierte Atmosphäre können Fehler in die Messung bringen, wenn sie nicht eliminiert werden. Es sollen Meßverfahren angegeben werden, die die Störfaktoren soweit wie möglich ausschalten und die dennoch relativ einfach durchzuführen sind.

4.3.2.4 Es wäre zweckmäßig, einen einfachen Wert, wie etwa die induzierte Leitfähigkeit (σ_i) oder deren Verhältnis zu der unter gleichen Bedingungen gemessenen Dunkelleitfähigkeit (σ_0), σ_i/σ_0 , bezogen auf die Einheit der Dosisleistung, zur Charakterisierung der Empfindlichkeit eines Materials gegen vorübergehende Veränderungen zu verwenden.

5 Dosimetrie

5.1 Allgemeines

Absolutmethoden sind solche, die eine Messung der Ionendosis, der Flußdichte oder der Energiedosis mit physikalischen Messungen ohne Kalibrierung der Meßgeräte in einem bekannten Strahlenfeld gestatten. Aufgrund vieler Untersuchungen auf dem Gebiet der instrumentellen Technik und der Grundlagen der strahleninduzierten Reaktionen gibt es Absolutmethoden, wie die Kalorimetrie, die allgemein als primäre dosimetrische Standardmethoden angesehen werden. Diese Methoden werden bei der Untersuchung der Strahlenwirkung gewöhnlich nicht angewendet, weil sie aufwendig sind, stehen aber bei nationalen und internationalen Prüfanstalten für die

Kalibrierung von Strahlenquellen zur Verfügung. Bei Photonenstrahlern beträgt die Meßunsicherheit der Kalibrierung 2 % bis 3 %. Diese Methoden können bei Vergleichen zwischen verschiedenen Laboratorien verwendet werden.

Außer den Dosimetern, die auf den absoluten Standardmethoden beruhen, gibt es zahlreiche andere, gegen diese kalibrierte Dosimeter, die als relative Dosimeter zur Messung der Energiedosis weit verbreitet sind [21]. Sie beruhen auf den verschiedensten meßbaren chemischen Reaktionen oder Energieumwandlungen, hervorgerufen durch die Energieübertragung auf das Dosimetermaterial aufgrund der Wechselwirkung mit dem Strahlenfeld. Es gibt eine große Anzahl von Strahlungssensoren, wie Kunststofffilme oder anorganische Festkörper, die als Dosimeter verwendet werden, die relativ einfach zu handhaben sind und eine bereits analysierte Anzeige bieten. Sie sind in vielen Fällen von Vorteil, in denen die Anforderung an die Genauigkeit weniger hoch ist.

5.2 Absolutmethoden

5.2.1 Gammastrahlen

5.2.1.1 Die offenen luftgefüllten Ionisationskammern werden zur Messung der Ionendosis X bis 3 MeV verwendet. Sie sind so ausgelegt, daß sie die in Luft gebildete Ladungsmenge dQ und die Luftmasse dm , in der die ionisierenden Elektronen freigesetzt werden, messen.

5.2.1.2 Die Hohlraumionisationskammern sind Strahlendetektoren, die zur Messung der Ionendosis verwendet werden können, wenn die Energiedosisleistung $\dot{D}$ nicht zu hoch ist und Gleichgewichtsbedingungen herrschen [9]. Wenn sie zur Messung der Energiedosis in einem bestimmten Medium verwendet werden, dann müssen sowohl die Wandungen als auch das Meßgas an dieses Medium angepaßt sein. Zwei Materialien sind dann für eine bestimmte Strahlenart aneinander angepaßt, wenn die Absorption dieser Strahlung in beiden Medien zu der gleichen Flußdichte und Energieverteilung der sekundär ionisierenden Teilchen führt.

5.2.1.3 Kalorimeter wirken über die Absorption von Strahlenenergie aus dem umgebenden Strahlenfeld und deren Umwandlung in Wärme, und die Messung dieser Wärmemenge durch Messung des Temperaturanstiegs [4]. Die erforderliche Kalibrierung der Wärmekapazität erfolgt elektrisch durch Messung der Menge an elektrischer Energie, die aufgenommen werden muß, um den gleichen Temperaturanstieg wie durch die Strahlung zu erreichen. In einigen Systemen sind geringe Abweichungen der Energiemenge aufgrund exo- oder endothermer chemischer Reaktionen beobachtet worden, für die aber Korrekturen angebracht werden können. Infolge der Umwandlung der absorbierten Energie nahezu unabhängig von der Strahlenart, stellt das Kalorimeter eine Absolutmethode dar, mit der andere Standardmethoden kalibriert worden sind.

5.2.2 Elektronenstrahlen

5.2.2.1 Dosimetrische oder radiometrische Methoden ermöglichen die Bestimmung der Energiedosis oder der Elektronenfluenz mit physikalischen Messungen ohne eine Kalibrierung. Zwei Absolutmethoden werden als dosimetrische oder radiometrische Referenzmethoden angesehen: die eine ist die kalorimetrische, die andere die Elektronenstrom-Densitometrie. Diese Absolutmethoden werden hauptsächlich zur Kalibrierung von Routinedosimetern verwendet, und es ist allgemein schwierig, die Tiefendosisverteilung ohne die Verwendung von routinemäßigen Filmdosimetern zu bestimmen.

5.2.2.2 Die Kalorimeter werden zur Messung der Energiedosis oder der Energiefluenz verwendet. Die Messung der absorbierten Energie je Flächeneinheit des Targets ermöglicht die Kalibrierung der Energiedosis und von Routinedosimetern durch Integrierung über die relative Tiefendosisverteilung, wenn diese in demselben Targetmaterial durch Verwendung von Routinedosimetern mit hoher räumlicher Auflösung bekannt ist. Einfache quasiadiabatische Methoden können als partiell absorbierendes [25] oder total absorbierendes Kalorimeter eingesetzt werden.

5.2.2.3 Die Messung der Elektronenstromdichte ist eine radiometrische Methode [33] zur Messung der Elektronenladung oder des Elektronenstroms je Flächeneinheit in Strahlenfeldern von Elektronenbeschleunigern. Diese Methode ist keine dosimetrische Methode, ermöglicht aber die Kalibrierung der Energiedosis, wenn die durchschnittliche Elektronenenergie, die den Ladungsabsorber des Densidometers durchdringt, und die relative Tiefendosisverteilung in demselben Material durch Verwendung eines Routinedosimeters bekannt ist. Der Faradaykäfig ist für die Ladungsmessung von Elektronenstrahlen verwendet worden, ist aber nicht geeignet für die genaue Messung von Elektronenladungen oder Elektronenstrom je Flächeneinheit bei breiten Elektronenstrahlbündeln mit breiter Winkelverteilung. Eine vereinfachte Methode, die eine Anordnung von Graphitabsorbern ohne Vakuumkammer verwendet, ist bei aufgestreuten breiten Strahlen von Elektronenbeschleunigern anwendbar [33], [35].

Die effektive Absorptionsfläche ist exakt definiert durch die spezielle Anordnung des Absorbers und die Elektronenrückstreuungskorrektur bei Berücksichtigung schräger Einstrahlung. Der Einfluß der ionisierten Ladung aus der umgebenden Luft kann durch Minimierung der externen elektrischen Feldbildung um den zentralen Absorber vermieden werden.

5.3 Relative Methoden

5.3.1 Die chemische Dosimetrie beruht auf dem Prinzip, daß durch Strahlung gewisse quantitative Reaktionen ausgelöst werden, deren Umsatz direkt proportional der absorbierten Dosis ist. Am meisten verbreitet ist die Eisensulfat-(Fricke-)Dosimetrie, die auch für Vergleiche zwischen Laboratorien geeignet ist [4], [9], [1]. Die Bedeutung anderer Systeme beruht darauf, daß sie außerhalb des Meßbereichs der Eisensulfat-Dosimetrie anwendbar sind.

Das Alanine-Dosimeter (Aminosäure-Typ) wird von der IAEA als Transferstandard empfohlen [28], [29], [20]. Kunststoffe, mit und ohne Farbstoff, sind ebenso als chemische Dosimeter geeignet [18], [22], [23], [34], [32].

5.3.2 Andere, auf physikalischen Effekten basierende relative Methoden sind die Photolumineszenz und die Thermolumineszenz [3], [26], [8].

5.3.3 Wenn die relativen Dosimeter von Umgebungsbedingungen (Temperatur und Feuchte vor und nach der Bestrahlung, Atmosphäre, Licht usw.), Dosisleistung und Strahlenspektrum beeinflusst werden, ist ihre Nutzung auf Bedingungen beschränkt, die denen entsprechen, unter denen sie kalibriert worden sind. Die Genauigkeit kann ferner durch Instabilität vor und nach der Bestrahlung, Änderung von Charge zu Charge, Nichtlinearität in der Ansprechcharakteristik, Veränderungen in den Abmessungen, Verunreinigungen oder chemische Effekte u. a., beeinträchtigt werden.

5.3.4 In einigen Fällen können die Kalibrierkonstanten oder die Kalibrierkurven, die in Gammastrahlen erhalten wurden, auch auf Elektronenstrahlen angewendet werden, wenn die Dosimetercharakteristiken von den Bestrahlungsparametern, wie Temperatur, Energiespektrum, Dosisleistung, Bestrahlungszeit u. a., bei Gamma- und Elektronenstrahlen nicht unterschiedlich abhängen.

5.4 Empfohlene Methoden zur Messung der Energiedosis

5.4.1 In [Tabelle 1](#) sind, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, Absolutmethoden und relative Methoden mit einigen ihrer Charakteristiken aufgeführt:

- Bereich der Energiedosis und -leistung;
- Einfluß der Energie der Strahlung;
- Einfluß von Temperatur und Feuchte;
- Werkstoff und Dicke von Film oder Target;
- Art der Anzeige;
- Besondere Vermerke zur Anwendung;
- Literaturhinweise.

5.4.2 Eine Schwierigkeit bei der Dosimetrie hoher Energiedosiswerte oder hoher Energiedosisleistungen, wie sie bei der Bestrahlung von Isolierstoffen üblich sind, beruht auf mögliche Strahlenwirkungen oder -schäden in Teilen des Dosimeters (z. B. Schädigung des Isolators einer Ionisationskammer).

Zur Vermeidung solcher Fehlerquellen sind besondere Prüfungen und Verfahren erforderlich. Für mehr Details zu den meisten der tabellierten Methoden siehe [\[4\]](#) und die anderen Literaturhinweise in [Tabelle 1](#).

6 Berechnung der Energiedosis bei Röntgen- oder Gammastrahlung

6.1 Allgemeines

Die Energiedosis ist der Parameter, auf den die Strahlenwirkungen bezogen werden.

Mit Hilfe der empfohlenen Methode kann die Energiedosis aus den Daten des Röntgen- oder Gammastrahlenfeldes und der Zusammensetzung des Materials errechnet werden [\[1\]](#), [\[2\]](#). Aus der Energiedosis in einem Material kann die Energiedosis in einem anderen Material, das demselben Strahlenfeld ausgesetzt wird, berechnet werden.

6.2 Berechnung der Energiedosis aus der Ionendosis [\[13\]](#), [\[14\]](#)

6.2.1 Die Energiedosis ist die Grundlage für den Vergleich der Wirkung verschiedener Strahlungen geworden und ihre Bestimmung in einem bestrahlten Material ist daher notwendig. Sie kann aus der Ionendosis, die in Luft an der Stelle des bestrahlten Probekörpers gemessen wird, errechnet werden. Die folgenden Abschnitte enthalten die dafür notwendigen Beziehungen. Die [Tabellen 2](#) und [3](#) liefern die erforderlichen Umrechnungsfaktoren und geben Berechnungsbeispiele.

6.2.2 Die in einem Material m absorbierte Energiedosis D_m wird errechnet nach

$$D_m = f_m X \quad (1)$$

wobei der Umrechnungsfaktor f_m der Quotient aus der Energiedosis und der Einheit der Ionendosis bedeutet. Zur Berechnung von f_m müssen die Zusammensetzung des Materials und die f_i -Werte für die enthaltenen Elemente i bekannt sein. Es gilt dann

$$f_m = \sum_i a_i f_i, \quad (2)$$

Dabei sind:

a_i Massenanteil des Elements i im Werkstoff

f_i Energiedosis je Einheit der Ionendosis für das Element i .