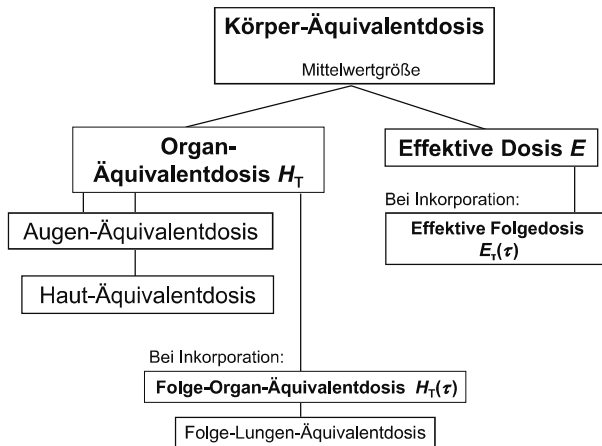


dosis anzurechnen sind, die durch die Aktivitätszufuhr im untersuchten Zeitraum zustande kommen (siehe Bild 6.2).

### 6.2.1.1 Organ-Äquivalentdosis

Basisgröße für die Schutzgrößen im Strahlenschutz ist die Organ-Energiedosis  $D_{T,R}$ . Darunter ist die über die Masse eines bestrahlten Gewebes, Organs oder Körperteils  $T$  gemittelte Energiedosis zu verstehen, die durch externe und interne Strahlenexposition der Strahlungsqualität  $R$  (Strahlungsart und -energie) zustande kommt. Die Einheit der Organ-Energiedosis  $D_{T,R}$  ist Gray (Gy).



**Bild 6.2** Körperbezogene Dosisbegriffe (Schutzgrößen)

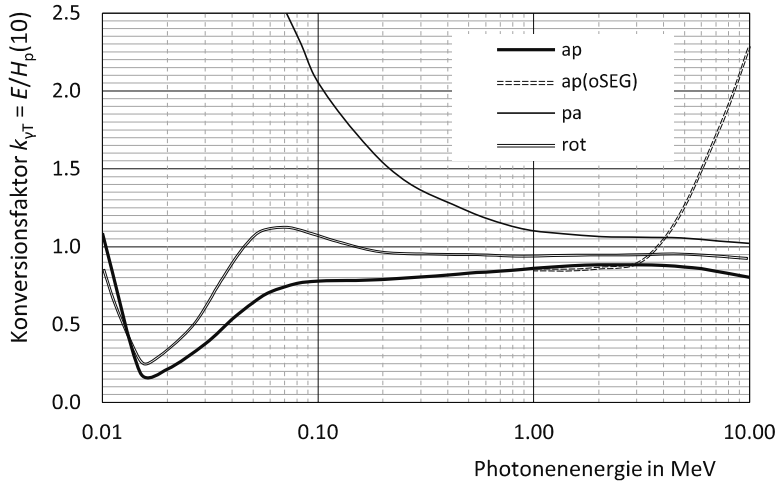
Für die Berücksichtigung der biologischen Wirkung verschiedener Strahlungsqualitäten wird bei der Definition der Schutzgrößen der sogenannte Strahlungs-Wichtungsfaktor  $w_R$  verwendet. Dieser bezieht sich auf das primäre Strahlungsfeld an einem Ort, d. h. das Strahlungsfeld ohne bestrahlte Substanz, und wird in Abhängigkeit von Strahlungsart und -energie angegeben. Im Gegensatz zum Ansatz  $H = Q \cdot D$ , der zur *Punktgröße* Mess-Äquivalentdosis führt (Abschnitt 6.2.2.1), liefert das Produkt aus der Organ-Energiedosis und dem Strahlungs-Wichtungsfaktor eine *Mittelwertgröße*, die als Organ-Äquivalentdosis  $H_{T,R}$  (ICRP: *organ equivalent dose*) bezeichnet wird.

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R} \quad (6.1)$$

Der Strahlungs-Wichtungsfaktor hat die Dimension 1 und entspricht zahlenmäßig weitgehend dem früher gebräuchlichen Bewertungsfaktor  $q$ . Die Einheit der Organ-Äquivalentdosis ist Sievert (Sv). Dabei gilt analog zur Energiedosiseinheit Gy

Bei der Berechnung des Konversionsfaktors wird der Einfachheit halber zumeist von der Näherungslösung mit Annahme von Sekundärelektronen-Gleichgewicht ausgegangen (Kurve ap, pa, rot, siehe Abschnitt 6.1.3 und Abschnitt 6.2.2.2). Diese Bedingung ist jedoch bei Bestrahlung von vorn bei Photonenenergien oberhalb von 3 MeV nicht erfüllt, da der Dosisaufbau in 10 mm Tiefe des Phantoms noch nicht abgeschlossen ist.

Genauere Berechnungen des Konversionsfaktors entsprechend Kurve ap(oSEG) in Bild 6.9 zeigen, dass die Tiefen-Personendosis  $H_p(10)$  die effektive Dosis bei Photonen von mehr als 3 MeV und Bestrahlung von vorn deutlich unterschätzt.



**Bild 6.9** Konversionsfaktor  $k_T$ : Verhältnis aus der effektiven Dosis  $E$  zur Tiefen-Personendosis  $H_p(10)$  in Abhängigkeit von der Photonenenergie [vei11, zan99]

ap paralleles Strahlenbündel von vorn

ap(oSEG) paralleles Strahlenbündel von vorn, ohne Annahme von Sekundärelektronen-Gleichgewicht

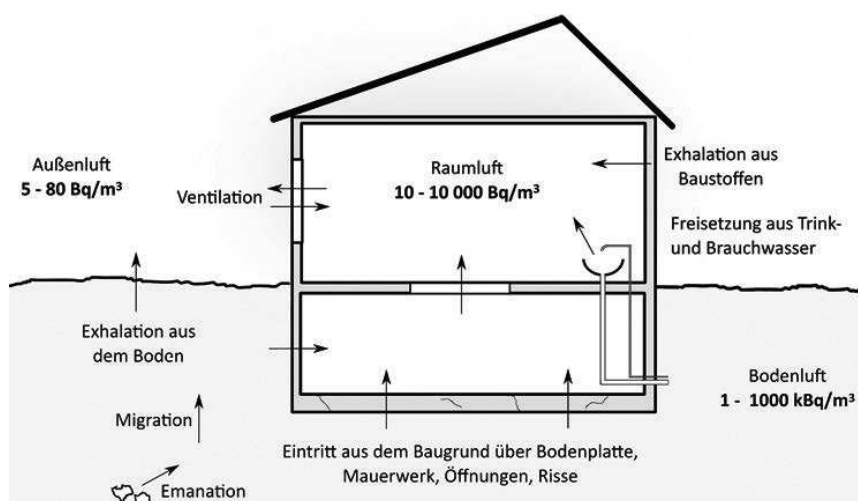
pa paralleles Strahlenbündel von hinten

rot paralleles rotierendes Strahlenbündel

Erhebliche Unterschätzungen der effektiven Dosis sind auch möglich, falls die Bestrahlung – bei vorn getragenen Dosimeter – von hinten (pa) erfolgt. Dies gilt stets auch dann, wenn das Personendosimeter nicht an einer für das Strahlungsfeld repräsentativen Stelle der Körperoberfläche getragen wird, z. B. der Bestrahlungsrichtung entgegengesetzt. Aus dem Messwert  $H_p(10)$  in einem senkrecht auftreffenden, parallelen Strahlenbündel ergibt sich mit den Kurven aus Bild 6.9 je nach der Bestrahlungssituation eine genauere Abschätzung der effektiven Dosis  $E$  gemäß Formel (6.10):

$$E = k_{T} \cdot H_p(10) \quad (6.10)$$

schicht, aus der die Exhalation in die Außenluft erfolgt (siehe Bild 7.3). Die Radonkonzentration in der Bodenluft in 1 m Tiefe gilt dementsprechend als Kenngröße zur Identifizierung von Gebieten, in denen vermehrt radonbelastete Häuser anzutreffen sind. Bei Aktivitätskonzentrationen unter  $10 \text{ kBq/m}^3$  in der Bodenluft sind erhöhte Radonkonzentrationen in Häusern kaum zu erwarten. Dies betrifft etwa 20% der Fläche Deutschlands, insbesondere das norddeutsche Tiefland.



**Bild 7.3** Exposition durch Radon

Aktivitätskonzentrationen über  $80 \text{ kBq/m}^3$  in der Bodenluft, die etwa bei 9% der Fläche Deutschlands anzutreffen sind, führen dagegen in älteren Häusern häufig zu Radonkonzentrationen von mehr als  $400 \text{ Bq/m}^3$ . Die in etwa 50 000 Wohnungen in Deutschland durchgeführten Untersuchungen der Radonkonzentration in der Raumluft von Häusern liefern stark schwankende Messergebnisse. Die Messwerte liegen im Bereich zwischen einigen und über  $10\,000 \text{ Bq/m}^3$ , wobei ein Mittelwert von etwa  $50 \text{ Bq/m}^3$  angegeben wird. In Bergbaugebieten wurden in Einzelfällen kurzzeitig bis zu  $600 \text{ kBq/m}^3$  und im Jahresmittel  $15 \text{ kBq/m}^3$  erreicht. Verschiedentlich sind auch die verwendeten Baustoffe (z. B. bei Verwendung von Bergwerksabfällen) als Ursache erhöhter Radonkonzentration in Gebäuden ermittelt worden. Der Beitrag durch die Exhalation aus Baustoffen ist jedoch zumeist deutlich geringer als  $100 \text{ Bq/m}^3$  und beträgt im Durchschnitt etwa  $30 \text{ Bq/m}^3$  [bfs93c, bfs95, bfs97b, bfs05a].

Die World Health Organization (WHO) empfiehlt die Einhaltung eines Referenzwerts von  $100 \text{ Bq/m}^3$  in Wohnungen, um Gesundheitsschäden zu minimieren. Gemäß Euratom-Grundnormrichtlinie sollte, abgesehen von Sonderfällen, der Refe-



**Bild 8.24** Fingerringdosimeter für Photonen- und Betastrahlung: Einweg-Plastikringkörper; Detektorelement, TLD:  $^7\text{LiF}$ : Mg, Cu, P; Dicke:  $5 \text{ mg/cm}^2$ ; Abdeckung:  $3,3 \text{ mg/cm}^2$  (Bildquelle: MPA NRW)

Bild 8.25 zeigt ein elektronisches Personendosimeter, das auf Si-Dioden-Technologie basiert und für die Messung von Photonen- und Betastrahlung geeignet ist. Es liefert die Oberflächen-Personendosis  $H_p(0,07)$  und die Tiefen-Personendosis  $H_p(10)$ .



**Bild 8.25** Personendosimeter für Photonen- und Betastrahlung (EPD TruDose, Thermo Fisher Scientific)

Der Messbereich des EPD TruDose reicht bei  $H_p(10)$  von  $1 \mu\text{Sv}$  bis  $10 \text{ Sv}$  und bei  $H_p(0,07)$  von  $500 \mu\text{Sv}$  bis  $10 \text{ Sv}$ . Für Dosisleistungsmessungen gelten die entsprechenden Messbereiche von  $50 \text{ nSv/h}$  bis  $10 \text{ Sv/h}$  bzw.  $1 \mu\text{Sv/h}$  bis  $10 \text{ Sv/h}$ . Der nutzbare Energiebereich erstreckt sich bei Photonenstrahlung von  $16 \text{ keV}$  bis  $10 \text{ MeV}$  und bei Betastrahlung von  $200 \text{ keV}$  bis  $1,5 \text{ MeV}$ . Das Gerät ist zur Baumusterprüfung für Photonenstrahlung ( $H_p(10)$ ) angemeldet. Es werden diverse Speicherfunktionen angeboten: Maximalwert-, Kurz- und Langzeitaufzeichnung von Daten und eine Alarmschwellenfunktion für Dosis und Dosisleistung. Es können optische und akustische Alarmsignale eingestellt werden. Kommunikation erfolgt über USB-Verbindung, IR-Technologie und Bluetooth.

Diffusion in die Messkammer. Durch direkte spektrometrische Messung mit Si-Halbleiterdetektoren können die Aktivitätskonzentrationen der kurzlebigen Radontöchter und damit die gleichgewichtsäquivalente Radonkonzentration bzw. die potenzielle Alphaenergie-Konzentration ermittelt werden.



**Bild 8.30** Radonexposimeter, Typ Altrac B97 (Bildquelle: LPS-Personendosismessstelle/ALTRAC Radon-Prüflabor)



a)



b)

**Bild 8.31**

Geräte zur Messung von Radonzerfallsprodukten in Luft:  
a) Radonmessgerät mit Membranpumpe (DOSEmanPRO, Sarad); b) Radonmessgerät mit Diffusionskammer (Corentium Home, Airthings)

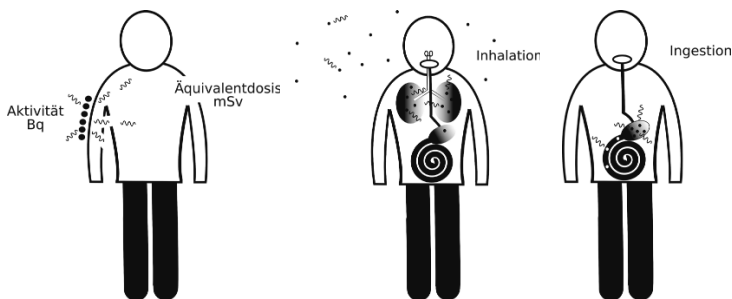
Das DOSEmanPRO-Gerät nutzt eine Membranpumpe, die die zu untersuchende Luft durch ein 3 mm Kunststofffilter saugt. Eine Aktivitätskonzentration von  $370 \text{ Bq/m}^3$  erzeugt die Impulsrate von 56 Ipm. Bedingt durch die Halbwertszeiten der entscheidenden Radonfolgeprodukte beträgt die Mindestantwortzeit etwa 2 h, damit 90 % des Endwerts erreicht werden. Als Anzeigegröße kann zwischen PAEC, PAEE und EEC gewählt werden (siehe Abschnitt 6.4). Über die Eingabe des Konversionskoeffizienten kommt die entsprechende effektive Dosis zur Anzeige (siehe Abschnitt 10.3.1).



## ■ 10.1 Gefährdung durch Kontaminationen

Die Erzeugung von offenen radioaktiven Stoffen sowie der Umgang mit diesen Substanzen erfordern wegen der Möglichkeit ihrer Verschleppung durch Abrieb, Leckverluste, Zerstäubung, Verdampfung oder Vergasung besondere Vorsicht. Die Ansammlung von radioaktiven Stoffen in Gasen, Flüssigkeiten, Feststoffen und biologischem Gewebe oder an Oberflächen wird Kontamination genannt. Diese führt zu einer äußeren Bestrahlung, wenn sich die Quellen außerhalb des Körpers befinden und zu einer inneren Bestrahlung, wenn die radioaktiven Stoffe in den Körper aufgenommen werden (siehe Bild 10.1).

Zum Schutz gegen die äußere Bestrahlung, die von kleinen kontaminierten Gegenständen oder Flächen ausgeht, können grundsätzlich dieselben Regeln angewendet werden wie bei umschlossenen kleinen Strahlungsquellen. Bei ausgedehnten kontaminierten Flächen ist allerdings die geringere Abnahme der Dosisleistung in der Nähe der Fläche zu beachten (siehe Abschnitt 9.4). Wenn die Kontamination gleichmäßig in der Umgebung verteilt ist, z. B. in der Luft oder an den Wänden, sind keine wesentlichen örtlichen Unterschiede in der Strahlenexposition zu erwarten.



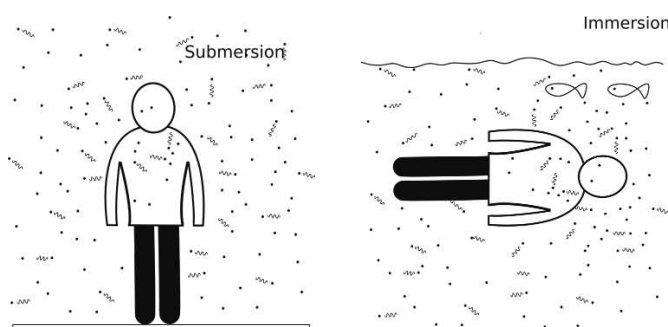
**Bild 10.1** Strahlenexposition durch äußere und innere Kontamination

Den Formeln (10.12) und (10.14) entsprechende Beziehungen gelten mit den Größen  $\dot{A}_S(t)$ ,  $\dot{e}_h(t)$ ,  $\dot{e}_g(t)$  und  $f_S$  auch für die Ausscheidung über Stuhl. Anhang 15.106 zeigt beispielhaft die Exkretionsfunktion  $\dot{e}_g(t)$  für Stuhl nach Ingestion von Radionukliden. Bezüglich weiterer Zahlenangaben sei auf die Fachliteratur verwiesen [icrp98c].

## ■ 10.5 Strahlenexposition bei kontaminierter Umgebung

### 10.5.1 Submersion und Immersion

Als Submersion wird die äußere Strahlenexposition von Personen bezeichnet, die sich an der Trennfläche eines aktivitätshaltigen Halbraums (Erdboden, Wasseroberfläche) aufhalten. Erfolgt die Strahlenexposition aus allen Richtungen, z. B. beim Tauchen, Fliegen oder Schwimmen, wird von Immersion gesprochen (siehe Bild 10.6).



**Bild 10.6** Strahlenexposition durch Submersion und Immersion

Bei bekannter homogener Aktivitätskonzentration  $a_V$  in einem als unendlich ausgedehnt anzusehenden Halbraum lässt sich die Submersionsdosisleistung durch Formel (10.15) ausdrücken:

$$\dot{H}_S = a_V \cdot g_S^{\infty} \quad (10.15)$$

Darin bezeichnet  $g_S^{\infty}$  den Dosisleistungskoeffizienten für Submersion für Luft aus dem unendlichen Halbraum. Praktisch liegt ein unendlich ausgedehnter Halbraum vor, wenn der bei halbkugelförmig angenäherter Geometrie resultierende effektive Radius des Raums, je nach der zu betrachtenden Strahlungsart, größer ist als die Reichweite ( $\beta$ ) bzw. fünf Halbwertsschichtdicken ( $\gamma$ ) dieser Strahlung (in Luft bzw.

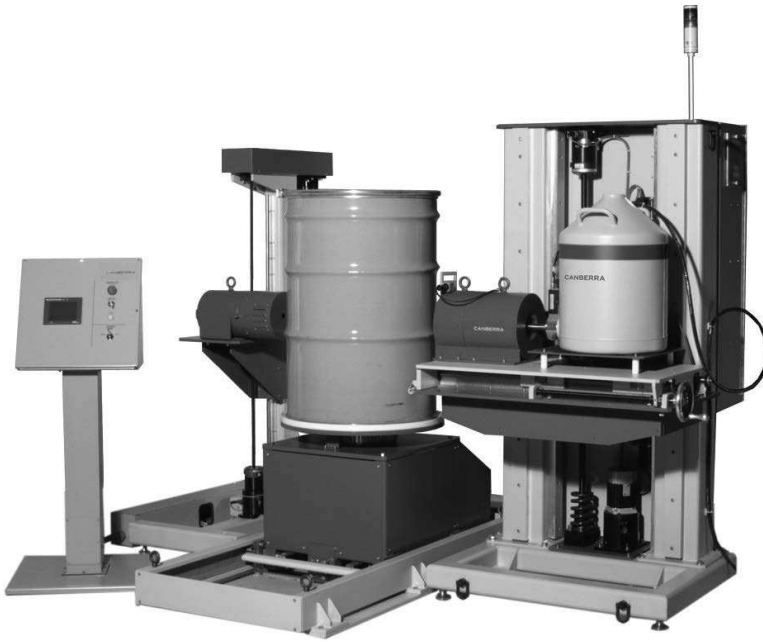


Mit den Durchstrahlungsarbeiten in der Materialprüfung dürfen nur Personen beauftragt werden, die das notwendige Wissen und die notwendigen Fertigkeiten im Strahlenschutz besitzen. In der Regel ist sowohl ein amtliches als auch ein jederzeit ablesbares Dosimeter zu tragen. Bei ortsveränderlichem Betrieb wird darüber hinaus ein akustisches Dosisleistungswarngerät verlangt. Beim Wechsel des Strahlers oder des Strahlerhalters, die besonderer Schutzvorkehrungen und Genehmigungen bedürfen, sollte zusätzlich auch ein Dosimeter an der Hand getragen werden. Üblicherweise unterliegen die Beschäftigten (als beruflich exponierte Personen der Kategorie A) auch der arbeitsmedizinischen Vorsorge. Als Aufsichtspersonal wird beim ortsveränderlichen Umgang neben dem Strahlenschutzbeauftragten für den gesamten Umgang stets auch ein Strahlenschutzbeauftragter für den Umgang vor Ort mit der entsprechenden Fachkunde verlangt.

Bei ortsveränderlichem Umgang außerhalb des Firmengeländes sind Art und Umfang jeweils vor Aufnahme der Tätigkeit der zuständigen Behörde rechtzeitig mitzuteilen und im Rahmen einer Buchführung alle personellen und gerätetechnischen Daten festzuhalten [din54115-3]. Es ist zu beachten, dass Geräte für die Gammarradiografie jährlich mindestens einmal gewartet und zwischen den Wartungen von einem behördlich bestimmten Sachverständigen überprüft werden müssen. Die Frist für die Überprüfung kann bis auf drei Jahre verlängert werden [StrISchV18].

#### 12.1.4 Bestrahlungsanlagen

Zur Inaktivierung von Mikroorganismen auf Medizinprodukten sowie Produkten der Lebensmittel- und Arzneimittelindustrie oder bei Anwendungen in der strahlenbiologischen Forschung wird sowohl Beta- als auch Gammastrahlung eingesetzt. Vorteilhaft ist dabei in vielen Fällen, dass die Produkte in ihrer Verpackung sterilisiert werden können, bei Verwendung von hochenergetischer Gammastrahlung auch in großen Verpackungseinheiten. Wegen der geringeren Eindringtiefe kann Betastrahlung nur bei Produkten in Primärverpackung eingesetzt werden. Der Einsatzbereich erstreckt sich von chirurgischem Nahtmaterial über pharmazeutische Verpackungsmittel bis zur Behandlung von Joghurtbechern. Insbesondere temperatur- oder feuchtigkeitsempfindliche Produkte sind für Strahlensterilisation geeignet. Die Sterilisierung von Lebens- und Arzneimitteln mit ionisierender Strahlung ist in Deutschland nur in Ausnahmefällen zugelassen [AMRadV07, LMBestrV00]. Bei Einsatz radioaktiver Stoffe sind ausschließlich Co-60 und Cs-137 als Strahlenquellen zugelassen. Die Bestrahlung von Lebensmitteln ist auf getrocknete aromatische Kräuter und Gewürze beschränkt, wobei die absorbierte Energiedosis 10 kGy nicht überschreiten darf. Für eine hinreichende Sterilisation von Arzneimitteln wird eine Mindestenergiedosis von 25 kGy angegeben. Andererseits wird die maximale absorbierte Energiedosis gemäß AMRadV07 auf 32 kGy be-



**Bild 12.39** Tomografischer Gamma-Scanner (WM2900 TGS, mit freundlicher Genehmigung von Mirion Technologies (Canberra) GmbH)

*Der Gamma-Scanner arbeitet mit einem HPGe-Detektor. Das System ist mit Drehteller für das Fass und mit Hubeinrichtung für Quelle und Detektor ausgestattet. Typische Nachweisgrenzen für ein 200-l-Fass (Dichte <math>< 0,3 \text{ g/cm}^3</math>) werden bei 60 min Messzeit mit 8 kBq für Cs-137 und 0,4 g Pu-239 angegeben.*

Mit sogenannten tomografischen Gamma-Scannern (TGS) können Radionuklide nicht nur aktivitätsmäßig erfasst werden, sondern es wird näherungsweise auch ein dreidimensionales Bild der Aktivitätsverteilung des Messguts im Abfallfass erhalten (siehe Bild 12.39). Dazu muss allerdings außer der vom Messgut emittierten Strahlung auch bei „Durchstrahlungsmessungen“ das Schwächungsvermögen des Messguts mit einer Gammastrahlungsquelle (Eu-152) untersucht werden.

*Der Scanvorgang erfolgt horizontal bei stufenweiser Höhenänderung und Rotation des Abfallfasses. Typischerweise wird das Fass in 16 senkrechte Elemente unterteilt. In jedem Segment werden Emissionsmessungen sowie Durchstrahlungsmessungen mit einem schmalen Gammastrahlenbündel durchgeführt. Durch die Unterteilung des Fassquerschnitts in  $10 \times 10$  horizontale Elemente wird die Quelle in 1 600 Voxel<sup>3</sup> zer-*

<sup>3)</sup> Volumenelemente (analog zu Pixel)

scheidend von der jeweils gegebenen Phase des Sonnenzyklus abhängen. In Tabelle 12.3 sind die Strahlenexpositionen einiger Raumfahrtmissionen wiedergegeben. Sofern für eine bemannte Raumfahrt zum Mars die Bedingungen der Curiosity-Mission zugrunde gelegt werden (bei einer minimalen Flugzeit von 180 Tagen), ist allein für Hin- und Rückflug mit mindestens 660 mSv zu rechnen. Für den Aufenthalt auf der Marsoberfläche ist ein weiterer bedeutsamer Dosisanteil zu berücksichtigen, der von den Abschirmungsmöglichkeiten und der Aufenthaltsdauer abhängt. Ein Gesamtwert der effektiven Dosis von 1 Sv für die Mannschaft einer Marsmission scheint daher durchaus realistisch.

**Tabelle 12.3** Strahlenexposition bei Raumfahrtmissionen [ber17b, unscear08, zeil3]

Mission	Höhe km	Dauer	Mittlere Dosisrate* μSv/h	Gesamtdosis* mSv
Apollo 17 (1972, letzte Mondlandung)		302 h	30	9,2
STS-61-A (D-1) (1985)	383	168 h	20	3,3
Sojus TM-14 (1992)	385	3 494 h	27	5,1
STS-55 (D-2) (1993)	296	240 h	8	1,9
STS-65 (1994)	300	354 h	11	3,8
ISS	400	1 a	27	237
Curiosity Rover (2011, Marsmission)		253 d	77	466
Bemannte Mars-Mission (Hin- und Rückflug)		360 d	77	660

STS: Space Transportation System

\* Mess-Äquivalentdosis

## Fachliteratur

[ber17b], [boe14], [plo13], [sch00], [sch02], [ssk03b], [unscear08], [zeil3]

### 12.4.2 Strahlenexposition durch uran- und thoriumhaltige Stoffe

In Zusammenhang mit Stoffen, die natürlich vorkommende Radionuklide enthalten, ist einerseits sicherzustellen, dass weder Einzelpersonen der allgemeinen Bevölkerung noch Personen bei ihrer Tätigkeit mit solchen Stoffen unzulässig exponiert werden. So ist nach StrlSchG dafür zu sorgen, dass bei Anfall von Rückständen aus industriellen und bergbaulichen Prozessen ein Richtwert der effektiven Dosis von 1 mSv im Kalenderjahr für Einzelpersonen der Bevölkerung nicht überschritten wird. Andererseits müssen Tätigkeiten im Zusammenhang mit Rückständen oder sonstigen uran- bzw. thoriumhaltigen Stoffen bei der zuständigen Behörde angezeigt werden, sofern die betroffenen Personen als beruflich exponiert eingestuft werden müssen.