

Teil IV: Strahlentherapie

27 Brachytherapie: Lösungen

Frank Hensley

Lösung zu 27.1

Der Dosisabfall entsteht hauptsächlich durch das Abstandsquadratgesetz und zu einem geringeren Anteil durch Absorption und Streuung der Strahlung. Dies ist zum Beispiel ersichtlich am flacheren Abfall der radialen Dosisfunktion $g(r)$ oder auch in den Diagrammen der Abbildung 27.5 (siehe Seite 586).

Eine Kollimierung der Strahlung ist in den beengten geometrischen Verhältnissen der Brachytherapie kaum möglich, obwohl es abgeschirmte Applikatoren gibt und an teilweise abgeschirmten Applikatoren und Strahlern geforscht wird. In der Teletherapie ist die Kollimierung des Strahlenfeldes tatsächlich für den steilen seitlichen Abfall des Feldes und damit der Dosisverteilungen verantwortlich. In ähnlicher Weise können mit abgeschirmten Brachytherapie- Applikatoren Bereiche des umliegenden Gewebes vor der Strahlung geschützt werden. Beispiele für abgeschirmte Brachytherapie-Applikatoren sind der abgeschirmte Vaginalzylinder zur Abschirmung des Rektums oder auch Abschirmungen im Fletcher- Applikator zur Schonung der Schleimhaut sowie von Vagina und Rektum.

Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung von Applikatoren, die für niederenergetische Strahler variable Abschirmungen für eine „Direction Modulated Brachytherapy“ erzeugen. (Han et al. Int.J.Rad.Onc.Biol.Phys. **96**(2016)440-448)



Lösung zu 27.2

Das Abstandquadratgesetz gilt nur für Punktstrahler. Es beschreibt für einen gegebenen Raumwinkel die Verringerung der Strahlenfluenz mit dem Abstand von der Strahlenquelle aufgrund des Flächenzuwachses. Für einen ausgedehnten Strahler ist jeder Punkt der Aktivitätsverteilung der Ausgangspunkt für einen Raumwinkel und damit einer eigenen Abstandsabhängigkeit. Die Fluenzabnahme lässt sich als Integral des Abstandsquadrats über die gesamte Aktivitätsverteilung beschreiben. Dieses Verhalten beschreibt Gleichung 27.11:

$$G(r, \theta) = \frac{\int_V [\rho(r') dV' / |r - r'|^2]}{\int_V \rho(r') dV'}$$

TG43 verwendet hierfür die Vereinfachung in Gleichung 27.13:

$$G_L(r, \theta) = \begin{cases} \frac{\beta}{L \cdot r \cdot \sin \theta} & \theta \neq 0^\circ \\ \left(r^2 - \frac{L^2}{4}\right)^{-1} & \theta = 0^\circ \end{cases}$$

für einen ausgedehnten Strahler der Länge L , der von $P(r, \theta)$ aus gesehen einen Raumwinkel β (in Radiant, siehe Abbildung 27.4) einnimmt. Diese Näherungen gelten für einen „Linien“-Strahler mit homogener Aktivitätsverteilung. Der zylinderförmige aktive Strahlerkern (aller HDR, PDR-Strahler und vieler Seeds) wird von TG43 als linienförmiger Strahler approximiert.

Lösung zu 27.3

Alle in der Tabelle aufgeführten Radionuklide sind Beta-Strahler, aber bei allen Isotopen zerfallen kurzlebige Tochterzustände unter Emission von Gammastrahlung. (Langlebige reine Gammastrahler existieren in der Natur nicht. Es gilt die Grundregel, dass praktisch alle langlebigen Radionuklide Beta- oder Alpha-Strahler sind.) Bei praktisch allen Strahlern entsteht zusätzlich Röntgenstrahlung durch Elektroneneinfang und Bremsstrahlung im Strahlermaterial und in der Umhüllung. Keines der Nuklide ist deshalb ein reiner Beta-Strahler. Für die Brachytherapie wird allerdings nur die Gammastrahlung genutzt. Die Betastrahlung sowie niederenergetische Gamma- und Röntgenstrahlung werden durch Selbstabsorption im Strahler und durch die Umhüllung des Strahlers absorbiert, so dass sie für die Therapie keine Rolle spielen.



Lösung zu 27.4

In der Definition von Γ_δ nach Gleichung 27.3 werden nur die Energien der Gammastrahlung des Emissionsspektrums des Radioisotops addiert. Zusätzlich summiert man charakteristische Röntgenstrahlung und evtl. auch Bremsstrahlung aus Wechselwirkungen mit dem Strahlermaterial. In einem realistischen Strahler enthält das Spektrum zusätzlich die Streustrahlung aus Wechselwirkungen im ausgedehnten Strahler und in einer Umhüllung mit realistischer Geometrie.

$$\Gamma_\delta = \left(\frac{1}{4\pi}\right) \sum_i n_i E_i \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_{a,E_i} \quad (27.3)$$

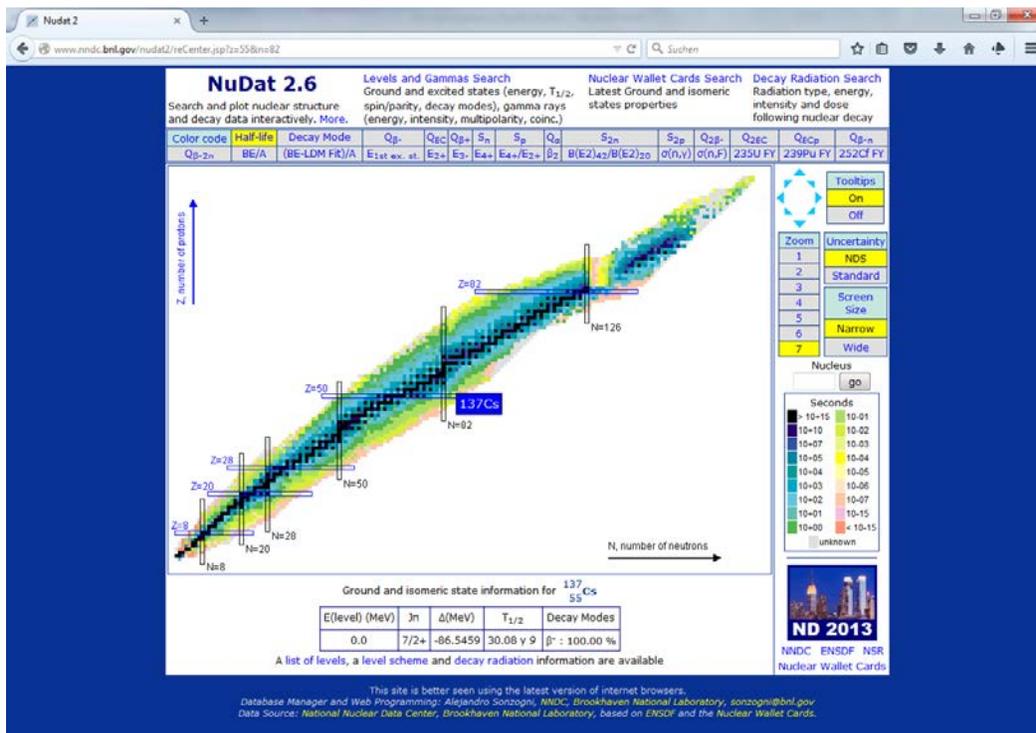
Lösung zu 27.5

Die Berechnung erfolgt nach der Gleichung

$$\Gamma_\delta = \left(\frac{1}{4\pi}\right) \sum_i n_i E_i \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_{a,E_i} \quad (27.3)$$

Zunächst benötigt man das Spektrum des Cs-137. Dies kann in der interaktiven Isotopenkarte auf der NuDat 2 Website durch Anklicken des Isotops $^{137}_{55}\text{Cs}$ mit der Maus oder durch Eingabe des Isotops über den Reiter „Decay Radiation Search“ aufgerufen werden:

www.nndc.bnl.gov/nudat2



Gamma and X-ray radiation:

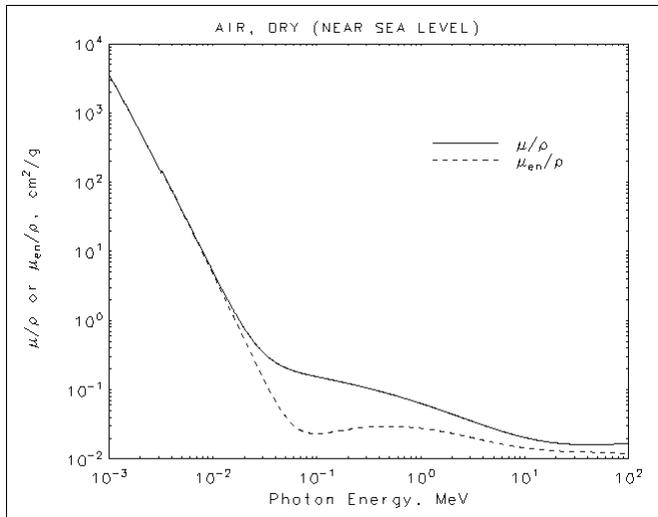
Energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)	
XR I	4.47	0.91 % 4	4.09E-5 19
XR ka2	31.817	1.99 % 5	6.34E-4 17
XR ka1	32.194	3.64 % 10	0.00117 3
XR kβ3	36.304	0.348 % 9	1.26E-4 3
XR kβ1	36.378	0.672 % 18	2.44E-4 6
XR kβ2	37.255	0.213 % 6	7.92E-5 21
	283.5 1	5.8E-4 % 8	1.64E-6 23
	661.657 3	85.10 % 20	0.5631 13

Die Röntgenlinie XR1 des L-Einfangs im Cs-137 wird nicht berücksichtigt, da die Röntgenenergie von 4.47 keV unter der Abschneideenergie $\delta=10$ keV liegt.

Aus der XCOM-Datenbank der Massen-Energietransfer-Koeffizienten

<https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients> benutzen Sie die Tabelle für trockene Luft.





Die Darstellung der Absorptionskoeffizienten aus XCOM zeigt, dass der log von μ/ρ und μ_{en}/ρ gegen $\log(E)$ einen linearen Verlauf hat. Die Absorptionskoeffizienten für die Röntgenlinien werden deshalb doppelt logarithmisch interpoliert mit $\log\mu(E) = \log\mu(E_i) - \frac{\log\mu(E_i) - \log\mu(E_{i-1})}{\log E_i - \log E_{i-1}} \cdot (\log E_i - \log E)$.

Air
 ASCII format

Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1,000E-03	3,606E+03	3,599E+03
1,500E-03	1,191E+03	1,188E+03
1,839E-03	7,416E+02	7,394E+02
1,839E-03	7,416E+02	7,394E+02
2,000E-03	5,279E+02	5,262E+02
3,000E-03	1,625E+02	1,614E+02
3,203E-03	1,340E+02	1,330E+02
3,203E-03	1,485E+02	1,460E+02
4,000E-03	7,788E+01	7,636E+01
5,000E-03	4,027E+01	3,931E+01
6,000E-03	2,341E+01	2,270E+01
8,000E-03	9,921E+00	9,446E+00
1,000E-02	5,120E+00	4,742E+00
1,500E-02	1,614E+00	1,334E+00
2,000E-02	7,779E-01	5,389E-01
3,000E-02	3,538E-01	1,537E-01



4,000E-02	2,485E-01	6,833E-02
5,000E-02	2,080E-01	4,098E-02
6,000E-02	1,875E-01	3,041E-02
8,000E-02	1,662E-01	2,407E-02
1,000E-01	1,541E-01	2,325E-02
1,500E-01	1,356E-01	2,496E-02
2,000E-01	1,233E-01	2,672E-02
3,000E-01	1,067E-01	2,872E-02
4,000E-01	9,549E-02	2,949E-02
5,000E-01	8,712E-02	2,966E-02
6,000E-01	8,055E-02	2,953E-02
8,000E-01	7,074E-02	2,882E-02
1,000E+00	6,358E-02	2,789E-02
1,250E+00	5,687E-02	2,666E-02
1,500E+00	5,175E-02	2,547E-02
2,000E+00	4,447E-02	2,345E-02
3,000E+00	3,581E-02	2,057E-02
4,000E+00	3,079E-02	1,870E-02
5,000E+00	2,751E-02	1,740E-02
6,000E+00	2,522E-02	1,647E-02
8,000E+00	2,225E-02	1,525E-02
1,000E+01	2,045E-02	1,450E-02
1,500E+01	1,810E-02	1,353E-02
2,000E+01	1,705E-02	1,311E-02

Es ergibt sich

$$\Gamma_{\delta} = 7,6920E-02 \quad \mu\text{Gy h}^{-1} \text{ MBq}^{-1}\text{m}^2$$

Als weitere Übung können Sie mit den obigen Daten die Fluenz-gemittelte Energie E_{mean} und die effektive Energie E_{eff} berechnen:

$$E_{mean} = \frac{\sum_i n_i E_i}{\sum_i n_i} = 6,147E+02 \text{ keV}$$

$$E_{eff} = \frac{\sum_i n_i (E_i)^2 \cdot \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_{a,E_i}}{\sum_i n_i E_i \cdot \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_{a,E_i}} = 6,515E+02 \text{ keV}$$



Lösung zu 27.6

Zur Berechnung von $(\mu_{tr}/\rho)_a^W$ benutzen Sie die Absorptionskoeffizienten für Luft und Wasser aus der XCOM-Datenbank:

Air, Dry (Near Sea Level)

ASCII format

Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1,00000E-03	3,606E+03	3,599E+03
1,50000E-03	1,191E+03	1,188E+03
2,00000E-03	5,279E+02	5,262E+02
3,00000E-03	1,625E+02	1,614E+02
3,20290E-03	1,340E+02	1,330E+02
18 K 3,20290E-03	1,485E+02	1,460E+02
4,00000E-03	7,788E+01	7,636E+01
5,00000E-03	4,027E+01	3,931E+01
6,00000E-03	2,341E+01	2,270E+01
8,00000E-03	9,921E+00	9,446E+00
1,00000E-02	5,120E+00	4,742E+00
1,50000E-02	1,614E+00	1,334E+00
2,00000E-02	7,779E-01	5,389E-01
3,00000E-02	3,538E-01	1,537E-01
4,00000E-02	2,485E-01	6,833E-02
5,00000E-02	2,080E-01	4,098E-02
6,00000E-02	1,875E-01	3,041E-02
8,00000E-02	1,662E-01	2,407E-02
1,00000E-01	1,541E-01	2,325E-02
1,50000E-01	1,356E-01	2,496E-02
2,00000E-01	1,233E-01	2,672E-02
3,00000E-01	1,067E-01	2,872E-02
4,00000E-01	9,549E-02	2,949E-02
5,00000E-01	8,712E-02	2,966E-02
6,00000E-01	8,055E-02	2,953E-02
8,00000E-01	7,074E-02	2,882E-02
1,00000E+00	6,358E-02	2,789E-02
1,25000E+00	5,687E-02	2,666E-02
1,50000E+00	5,175E-02	2,547E-02
2,00000E+00	4,447E-02	2,345E-02

Water, Liquid

ASCII format

Energy (MeV)	μ/ρ (cm ² /g)	μ_{en}/ρ (cm ² /g)
1,00000E-03	4,078E+03	4,065E+03
1,50000E-03	1,376E+03	1,372E+03
2,00000E-03	6,173E+02	6,152E+02
3,00000E-03	1,929E+02	1,917E+02
4,00000E-03	8,278E+01	8,191E+01
5,00000E-03	4,258E+01	4,188E+01
6,00000E-03	2,464E+01	2,405E+01
8,00000E-03	1,037E+01	9,915E+00
1,00000E-02	5,329E+00	4,944E+00
1,50000E-02	1,673E+00	1,374E+00
2,00000E-02	8,096E-01	5,503E-01
3,00000E-02	3,756E-01	1,557E-01
4,00000E-02	2,683E-01	6,947E-02
5,00000E-02	2,269E-01	4,223E-02
6,00000E-02	2,059E-01	3,190E-02
8,00000E-02	1,837E-01	2,597E-02
1,00000E-01	1,707E-01	2,546E-02
1,50000E-01	1,505E-01	2,764E-02
2,00000E-01	1,370E-01	2,967E-02
3,00000E-01	1,186E-01	3,192E-02
4,00000E-01	1,061E-01	3,279E-02
5,00000E-01	9,687E-02	3,299E-02
6,00000E-01	8,956E-02	3,284E-02
8,00000E-01	7,865E-02	3,206E-02
1,00000E+00	7,072E-02	3,103E-02
1,25000E+00	6,323E-02	2,965E-02
1,50000E+00	5,754E-02	2,833E-02
2,00000E+00	4,942E-02	2,608E-02
3,00000E+00	3,969E-02	2,281E-02
4,00000E+00	3,403E-02	2,066E-02



3,00000E+00	3,581E-02	2,057E-02	5,00000E+00	3,031E-02	1,915E-02
4,00000E+00	3,079E-02	1,870E-02	6,00000E+00	2,770E-02	1,806E-02
5,00000E+00	2,751E-02	1,740E-02	8,00000E+00	2,429E-02	1,658E-02
6,00000E+00	2,522E-02	1,647E-02	1,00000E+01	2,219E-02	1,566E-02
8,00000E+00	2,225E-02	1,525E-02	1,50000E+01	1,941E-02	1,441E-02
1,00000E+01	2,045E-02	1,450E-02	2,00000E+01	1,813E-02	1,382E-02
1,50000E+01	1,810E-02	1,353E-02			
2,00000E+01	1,705E-02	1,311E-02			

Zur Berechnung des Absorptionskoeffizienten für die effektive Energie $E_{eff} = 0.3719$ MeV wird zwischen den Tabellenwerten doppelt logarithmisch interpoliert:

$$\log\mu(E) = \log\mu(E_i) - \frac{\log\mu(E_i) - \log\mu(E_{i-1})}{\log E_i - \log E_{i-1}} \cdot (\log E_i - \log E)$$

Es ergibt sich nach Gl. 27.5:

$$\begin{aligned} \dot{D}_W(r) &= \dot{K}_a(r_0) \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \cdot (\mu_{tr}/\rho)_a^W \cdot (1 - g_a) \cdot k_r(r) \\ &= 41.4 \frac{\text{mGy}}{\text{h}} \cdot \frac{100^2}{2^2} \cdot 1,11 \cdot 1,0 \cdot (1,0128 + 5,019 \cdot 10^{-3} \cdot 2 - 1,178 \cdot 10^{-3} \cdot 4 - 2,008 \cdot 10^{-5} \cdot 8) \\ &= 116948,95 \text{ mGyh} = 116,94_{895} \text{ Gy/h} \end{aligned}$$

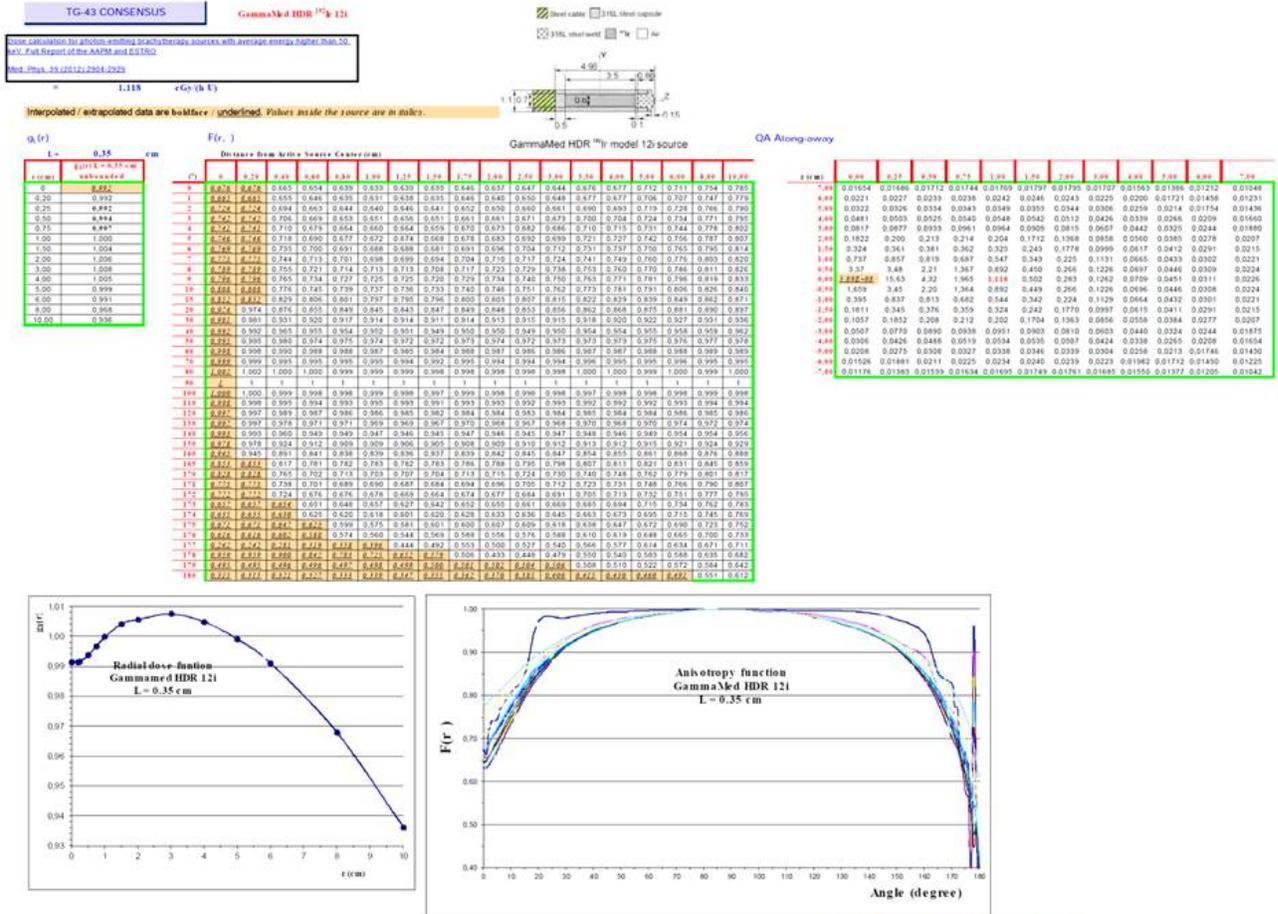
Lösung zu 27.7

Die Berechnung erfolgt nach Gleichung 27.7:

$$\dot{D}(r, \theta) = S_K \cdot \Lambda \cdot \frac{G(r, \theta)}{G(r_0, \theta_0)} \cdot g(r) \cdot F(r, \theta)$$

Die TG43-Parameter Λ , $g(r)$ und $F(r, \theta)$ werden aus den Tabellen der TG43 Datenbank übernommen, S_K und $G_L(r, \theta)$ müssen berechnet werden.





<http://www.uv.es/braphyqs/>
http://www.physics.carleton.ca/crp/seed_database

Abbildung: TG43-Tabellen für den Ir-192-Strahler GammaMed 12i

$\dot{K}_{a,0} = 41.4 \text{ mGy/h in } 1 \text{ m} \rightarrow S_K = 41400 \text{ } \mu\text{Gy/h} = 41400 \text{ U}$

$\Lambda = 1.118 \text{ cGy/(h} \cdot \text{U)}$ (HDR) (aus TG43 -Tabelle)

$g(r) = 1.006$ für $r=2\text{cm}$ aus Braphyqs-Tabelle

$F(r, \theta) = 0.913$ für $r=2\text{cm}, \theta = 30^\circ$ aus TG43-Tabelle



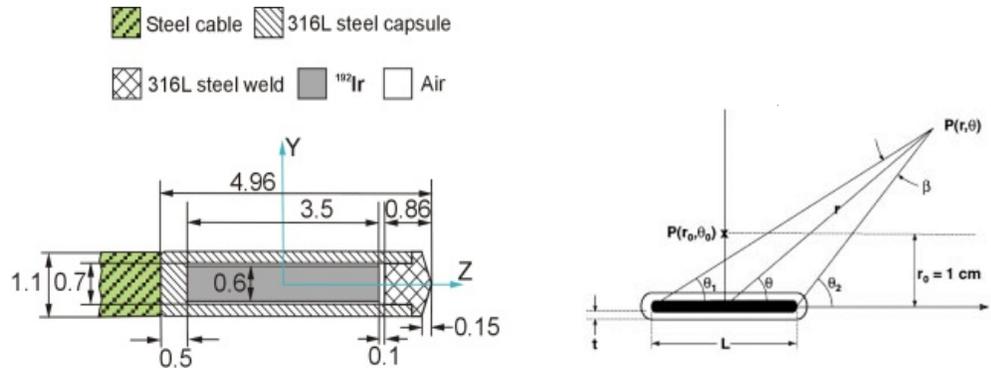
siehe hier: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.de>

Berechnung von $\frac{G(r,\theta)}{G(r_0,\theta_0)}$:

Für die Berechnung wird der Strahler in den Koordinaten-Ursprung gelegt.

$$G_L(r, \theta) = \begin{cases} \frac{\beta}{L \cdot r \cdot \sin \theta} & \theta \neq 0^\circ \\ \left(r^2 - \frac{L^2}{4}\right)^{-1} & \theta = 0^\circ \end{cases}$$

Hierfür die Geometrie des Strahlers (aus der TG43-Datenbank):



GammaMed HDR ^{192}Ir model 12i source

$$L = 0.35 \text{ cm}$$

$$\beta = 5.0390^\circ = 0.0879 \text{ radiant (die Eingabe erfolgt im Bogenmaß)}$$

$$G_L(r, \theta) = \frac{0.0879}{0.35 \cdot 2 \cdot \sin 30^\circ} = 0.2513$$

$$G_L(r_0, \theta_0) = \left(1^2 - \frac{0.35^2}{4}\right)^{-1} = 1.032$$

$$\frac{G(r,\theta)}{G(r_0,\theta_0)} = 0.2435 \quad \text{zum Vergleich: } 1/r^2 = 0.25$$

Es ergibt sich:

$$\begin{aligned} \dot{D}(r, \theta) &= S_K \cdot \Lambda \cdot \frac{G(r,\theta)}{G(r_0,\theta_0)} \cdot g(r) \cdot F(r, \theta) \\ &= 41400 \text{ U} \cdot 1.118 \frac{\text{cGy}}{\text{h} \cdot \text{U}} \cdot 0.2435 \cdot 1.006 \cdot 0.913 = 1035.17 \frac{\text{cGy}}{\text{h}} = 103.5 \text{ Gy/h} \end{aligned}$$

Zum Vergleich: bei der Berechnung nach dem alten Formalismus in Aufgabe 27.6 ergab sich ohne Anisotropie-Korrektur und bei Verwendung de $1/r^2$ - Gesetzes

$$\dot{D}(r = 2\text{cm}) = 116,94_{895} \text{ Gy/h.}$$

$$103.5 \text{ Gy/h} \cdot \frac{0.25}{0.2435} / 0.913 = 116.39 \text{ Gy/h}$$



Zusatzaufgabe 27.7a

Lösen Sie die gleiche Aufgabe 27.7 für einen Ir-192 Typs GammaMed PDR 12i (Strahlerlänge 1.4 mm), ebenfalls für eine (in Realität um den Faktor 10 zu hohe) Referenz-Luftkermaleistung von $\dot{K}_{a,0} = 41.4 \text{ mGy/h}$.

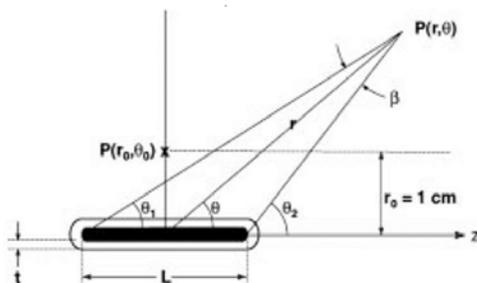
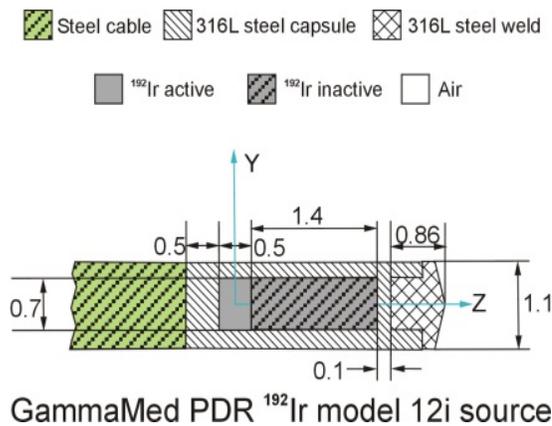
Lösung:

Für den PDR-Strahler gelten die Parameter:

$$L = 0.14 \text{ cm}$$

$$\Lambda = 1.126 \text{ cGy}/(\text{h} \cdot \text{U}) \text{ (PDR)} \quad (\text{aus TG43-Tabelle})$$

Hierfür die Geometrie des Strahlers (aus der TG43-Datenbank):



$$\beta = 2.007^\circ = 0.035 \text{ Radiant (die Eingabe erfolgt im Bogenmaß)}$$



$$G_L(r, \theta) = \frac{0.035}{0.14 \cdot 2 \cdot \sin 30^\circ} = 0.25$$

$$G_L(r_0, \theta_0) = \left(1^2 - \frac{0.14^2}{4}\right)^{-1} = 1.0049$$

$$\frac{G(r, \theta)}{G(r_0, \theta_0)} = 0.2495 \quad \text{zum Vergleich: } 1/r^2 = 0.25$$

$$g(r) = 1.006 \quad \text{für } r=2\text{cm} \text{ aus TG43-Tabelle}$$

$$F(r, \theta) = 0.994 \quad \text{für } r=2\text{cm}, \theta = 30^\circ \text{ aus TG43-Tabelle}$$

Es ergibt sich:

$$\dot{D}(r, \theta) = 41400 \text{ U} \cdot 1.126 \text{ cGy}/(\text{h} \cdot \text{U}) \cdot 0.2495 \cdot 1.006 \cdot 0.994 = 11561.01 \text{ cGy/h} = 115.6 \text{ Gy/h}$$

Beachten Sie, dass realistische PDR-Strahler nur etwa 1/10 der Aktivität eines HDR-Strahlers haben.

Somit hätte ein realistischer Strahler z.B. eine Luftkerma-Stärke von 4140 U und damit eine Dosisleistung von 11.56 Gy/h.

Zusatzaufgabe 27.7b

Berechnen Sie die Dosisleistung des HDR-Strahlers GammaMed 12i mit einer Referenz-Luftkermaleistung von $\dot{K}_{a,0} = 41.4 \text{ mGy/h}$ die Wasser-Energiedosisleistung im Punkt P($r=2\text{cm}$, $\theta = 30^\circ$) mit der Along-Away-Tabelle.

Lösung:

Die Berechnung erfolgt in kartesischen Koordinaten. Der Strahler wird für die Rechnung wieder in den Koordinaten-Ursprung gelegt. Die Rechenpunkt P($r=2\text{cm}$, $\theta = 30^\circ$) liegt dann in den Koordinaten:

$$x = r \cdot \cos \theta = 1.73 \text{ cm}$$

$$z = r \cdot \sin \theta = 1.0 \text{ cm}$$

Die Werte in der Along-Away-Tabelle geben direkt die Dosisleistung eines Strahlers mit der Luftkerma-Stärke $S_K = 1 \text{ U}$ an.

Der Tabellenwert T muss interpoliert werden:

$$T(1.73 \text{ cm}, 1.0 \text{ cm}) = 0.343 + (1.73 - 1.5) \cdot \frac{0.343 - 0.225}{1.5 - 2.0} = 0.288 .$$



Für die Luftkerma-Stärke $S_K = 41400$ U ergibt sich also eine Dosisleistung von 119.2 Gy/h.

Die Rechnung mit den Tabellen in Polarkoordinaten ergab 116.39 Gy/h.

Die Abweichung von 2.4% liegt an der geringeren Rechengenauigkeit bei einer erneuten Interpolation der bereits interpolierten Werte aus der Along-Away-Tabelle. Die manuelle Überprüfung von geplanten Dosiswerten sollte deshalb immer mit den Originaltabellen in Polarkoordinaten erfolgen. Die Along-Away-Tabellen sind zur Überprüfung der TG43-Rechnung des Planungssystems beabsichtigt: mit dem Planungssystem wird eine Dosisleistung für einen in der Tabelle aufgeführten Rechenpunkt berechnet und mit dem Tabellenwert verglichen.

Lösung zu 27.8

Die Korrektionsfunktion $k_r(r)$ für Streuung und Absorption rechnet in Abhängigkeit vom Abstand r vom Strahler die Luftkerma in einer Vakuum-Umgebung um in Wasser-Energiedosis in Wasser-Umgebung. Dazu wird die Kerma um den Anteil reduziert, der auf dem Weg vom Strahler zum Ort r vom Wasser absorbiert und weggestreut wird, und es wird die Streustrahlung aus dem umliegenden Wasser am Ort r dazu addiert. $k_r(r)$ gibt damit das Verhältnis $\dot{D}_W(r)/\dot{K}_a(r)$ an.

Am TG43-Referenzpunkt $P_0(r_0 = 1\text{cm}, \theta_0 = 90^\circ)$ hat deshalb $k_r(r)$ den gleichen Wert wie die Dosisleistungskonstante Λ des TG43-Formalismus: $k_r(r_0 = 1\text{cm}) = \Lambda$.

Die radiale Dosisfunktion $g(r)$ gibt das Verhältnis der Wasser-Energiedosis im radialen Abstand r zur Wasser-Energiedosis im TG43-Referenzpunkt $P_0(r_0 = 1\text{cm}, \theta_0 = 90^\circ)$ unter Ausschluss der Abstandabhängigkeit durch die Geometriefunktion an:

$$g(r) = \frac{\dot{D}(r, \theta_0)}{\dot{D}(r_0, \theta_0)} \cdot \frac{G(r_0, \theta_0)}{G(r, \theta_0)} \quad (27.14)$$

$g(r)$ ist damit ein Verhältnis von Wasser-Energiedosen.

Beide Funktionen werden häufig als Polynome des Abstands r dargestellt um eine kontinuierliche Berechnung in jedem Abstand zu ermöglichen.



Lösung zu 27.9

Nachfolgende Abbildung 27.9.1 zeigt das Strahlerzertifikat des gelieferten Strahlers.

Auf dem Zertifikat findet man

- die Referenz-Luftkermaleistung von 41.40 mGy/h
- das Kalibrierdatum 08.10.2013 um 9:52 MEZ

Die Kenndosisleistung bei der Verifikation ergibt sich aus dem radioaktiven Zerfall des Ir-192 zwischen dem Kalibrierdatum und dem Zeitpunkt der Verifikationsmessung. Die Halbwertszeit des Ir-192 beträgt nach Tabelle 28.1 $t_{1/2} = 73.8$ Tage. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt gibt zurzeit einen Wert von $t_{1/2} = 73.824$ Tagen an [Schötzig, U. und Schrader, H.: Halbwertszeiten und Photonen-Emissionswahrscheinlichkeiten von häufig verwendeten Radionukliden. PTB-Bericht PTB-Ra-16/5, 5. erweiterte und korrigierte Auflage, Braunschweig, Mai 2000]. Dies entspricht einem Zerfall von etwa 1% pro Tag. Für eine ausreichend genaue Bestimmung des Zerfalls werden deshalb Halbwertszeit und Zerfallszeit in Einheiten von Stunden eingesetzt:

$$t_{1/2} = 73.824 \text{ d} = 1771.78 \text{ h}$$

$$t(12.10. 16:30 - 08.10.9:52) = 102.63 \text{ h}$$

$$\dot{K}_a(12.10. 16:30) = \dot{K}_a(8.10. 9:52) \cdot e^{-\ln 2 \cdot (102.63/1771.78)} = 39.77 \text{ mGy/h} .$$

Der Verifikationswert sollte ausreichend genau mit dem errechneten Wert übereinstimmen. Als Mindestwert kann man eine Übereinstimmung innerhalb von 2% fordern, typischerweise erreicht man eine Übereinstimmung von besser als 1%.

Im Planungssystem kann nach erfolgreicher Verifikation die selbst gemessene Referenz-Luftkermaleistung \dot{K}_a bzw. die entsprechende Luftkerma-Stärke S_k eingesetzt werden (siehe Aufgabe 27.10). Es sollte nicht die scheinbare Aktivität eingesetzt werden, da diese erst mit einer Kermaleistungskonstante Γ_δ berechnet werden muss, die eine zusätzliche Unsicherheit enthält. Alternativ kann die Angabe des Zertifikats eingesetzt werden. Die Entscheidung für die eigene Messung oder die Zertifikatangabe hängt z.B. davon ab, ob man die Unsicherheit und Qualitätssicherung des eigenen Mess-Systems für besser oder schlechter als die des Herstellers einschätzt.



Certificate For sealed Sources G2-00025U

ID:

Customer name and address:

Issue Date: 2013-10-10 ⁽¹⁾

Product Code:	REF	105.002 (DRN 07736)
Serial number:	SN	NLF 01 D36E9719
Production Code:	LOT	10016/03

Serial no. Transport Container: 225C6
Serial no. Check Cable: n.a.
Certificate number: p2KZj 0xu80 kCXXN mpRTc o2

SOURCE SPECIFICATIONS

Reference Air Kerma Rate: 41.40 mGy h⁻¹ +/- 5% at 1 m ⁽²⁾
Measured at: 2013-10-08 09:52 CET ⁽¹⁾
Apparent Activity: 376.36 GBq (10.17 Ci) at date of measurement (3,4)

Source Type: MICROSELECTRON V2
Capsule dimensions: 0.90 mm diameter, 4.50 mm length
Source pellet dimensions: 0.65 mm diameter, 3.60 mm length
Source pellet form: solid Iridium
Radionuclide: Ir192
Encapsulation: single
Capsule material: stainless steel, AISI 316L
ISO Classification: ISO/80/C63211
Special form certificate number: D/0070/S-96(REV.4)

QUALITY CONTROL

Cable Visual Inspection: passed
Source Visual Inspection: passed
Laser Weld Visual Check: passed
Source Capsule Integrity (15N pull test): passed
Leakage test: leakfree ⁽⁵⁾
Surface contamination test: < 185 Bq (5nCi) ⁽⁶⁾

The undersigned, authorized officer of Mallinckrodt Medical B.V., certifies that this source complies with the requirements of ISO2919 and that all of the information given in this certificate is true and correct.

QUALITY CONTROL SUPERVISOR

(1) Date format yyyy-mm-dd
(2) At Confidence level of 99.7%
(3) The apparent Activity is determined by applying a conversion factor (0.110 mGy m² h⁻¹GBq⁻¹) to the measured gamma radiation output of the sealed source determined with a calibration instrument. The instrument is calibrated against the standard of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Germany.
(4) The Apparent Activity is the Iridium-192 activity; other radionuclides not detectable
(5) Leakage test method according to ISO9978 method Liquid nitrogen bubble test (6.2.4)
(6) Surface contamination test according to ISO9978 method Wet wipe test (5.3.1)

Manufactured by Mallinckrodt Medical B.V. * Westerduinweg 3 * NL-1755 LE Petten * Telephone +31 224 567890
Manufacturer's code in accordance with Council Directive 2003/122/EURATOM: NLF 01
On behalf of Nucletron B.V.* Waardgelder 1 * NL-3900AX Veenendaal

Abbildung 27.9.1: Strahlerzertifikat für den in Aufgabe 27.9 verwendeten Ir-192-Strahler



Abbildung 27.9.2 zeigt zum Vergleich ein Strahlerzertifikat eines anderen Herstellers (Bebig) für einen Co-60 Strahler. Abbildung 27.9.3 zeigt die Seite 2 des Strahlerzertifikats mit den vom Hersteller empfohlenen Umrechengrößen für diesen Strahler.

**Zertifikat für umschlossene radioaktive Stoffe
(Afterloader-Quellen)
Certificate for sealed radioactive sources
(afterloading sources)**



Eckert & Ziegler

Allgemeine Angaben <i>general information</i>				
Zertifikat-Nr. <i>certificate no.</i>	Kunde <i>customer</i>		Auftragsnummer <i>order no.</i>	
999999example.....		ICS-BBD999999	
Produkt-Code <i>product code</i>	Quellennummer (Bezeichnung als Hochradioaktive Quelle) <i>source no. (high-activity-sealed-source no. - HASS)</i>		zertifiziert als radioakt. Stoff in besonderer Form <i>special form certificate</i>	
Co0.A86	BB-XX999		RUS/5900/S-96	
Nuklid <i>nuclide</i>	Nominataktivität [GBq] <i>nominal activity [GBq]</i>	Betriebsbeschränkung [Zyklen] <i>limitation of use [transfers]</i>	empfohlene Nutzungsdauer* <i>recommended working life*</i>	ISO-Klassifikation <i>ISO- classification</i>
Co-60	74	100 000	5 years	C65444

Mess- und Prüfbericht
test report
weitere Informationen siehe Rückseite
see over leaf for more information.

Referenz Luftkerma Leistung ^b <i>Reference air-kerma rate^b</i>	scheinbare Aktivität ^c <i>apparent activity^c</i>		Referenzdatum <i>reference date</i>
[mGy/h]	[GBq]	[Ci]	
23.21.	75.85	2.05	2014-03-21
Sichtprüfung <i>visual test</i>	Dichtheitsprüfung <i>leakage test</i>		Kontaminationstest <i>contamination test</i>
Datum <i>date passed</i>	Datum <i>date passed</i>		Datum <i>date passed</i>
204-01-22	2014-01-22		2014-01-22

Bemerkungen, Anlagen
notes, annexes

Datumsformat: **jjj-mm-tt**
Date format: **yyyy-mm-dd**

Dieses Zertifikat entspricht den Anforderungen nach ISO 2919
This certificate complies with the requirements of ISO 2919

Ausstellungsdatum <i>date of issue</i>	2014-03-21	Unterschrift <i>signature</i>	---	Name <i>name</i>	---
Eckert&Ziegler BEBIG GmbH•Robert-Rössle-Str.10•13125 Berlin•Germany•Tel.+49-30-941084-0•Fax +49-30-941084-112•e-mail.info@bebig.com					

P09FD11 / Rev. 09

Abbildung 27.9.2: Strahlerzertifikat eines anderen Herstellers (Bebig) für einen Co-60-Strahler



HDR-Afterloader-Strahler

Die zertifizierten HDR-Strahler wurden für die Afterloader der Eckert&Ziegler BEBIG GmbH entwickelt. Ihre Bauart wird durch ihren Produktcode spezifiziert.
 Weitere Details sowie Informationen zur Anwendung sind der Gebrauchsanweisung des Gerätes zu entnehmen.

Zur Bestimmung der Quellstärke der Strahler wird die Referenz-Luftkerma-Leistung⁽¹⁾ $\dot{K}_{ref} = (\dot{K}_{a,100})_0$ in einer Schachtkontaminationskammer gemessen. Die Angabe der Quellstärke als Luftkerma-Stärke nach AAPM TG-43 erhält man durch folgende Äquivalenz:

$$\frac{S_k}{[U]} = \frac{\dot{K}_{ref}}{[mGy/h]} \cdot d_0^2 \cdot 10^3$$

⁽¹⁾ Die „scheinbare Aktivität“ wird durch Division der Messgröße durch die entsprechende Konstante der Luftkermaleistung Γ_3 berechnet.

Tabelle 1:

Nuklid	$T_{1/2}$ in d	Γ_3 in $\mu\text{Gym}^2\text{h}^{-1}\text{GBq}^{-1}$
Co-60	1925,3	306

Die scheinbare Aktivität kann für dieses Nuklid mit ausreichender Genauigkeit auch an Stelle der enthaltenen Aktivität verwendet werden.

Das verwendete Messgerät wird regelmäßig kalibriert, wobei die Kalibrierung auf die Primärstandards der PTB Deutschland rückführbar ist. Die relative kombinierte Messunsicherheit $u(\dot{K}_{ref})/\dot{K}_{ref}$ und wird in Tabelle 2 für den Vertrauensbereich 95% angegeben.

Tabelle 2:

Typ	$u(\dot{K}_{ref})/\dot{K}_{ref}$ in %
Co0.A86	3,2

Vor der Auslieferung erfolgt bei allen Strahlern eine Prüfung gem. ISO 9978 auf Dichtheit und Oberflächenkontamination. Die Tests sind in Tabelle 3 mit Bezug auf die Kapitel dieser Norm spezifiziert.

Tabelle 3:

Typ	Dichtheitstest	Oberflächen-Kontaminationstest
Co0.A86	5.1.2	5.3.1

⁽⁴⁾ Die Lebensdauer ist limitiert durch die maximale Anzahl der Fahrzyklen und maximal 5 Jahren Nutzung unter normalen Betriebsbedingungen und unter Verwendung von freigegebenen Applikatoren und unter Einhaltung der Systemspezifikation.

HDR-Afterloading Sources

Eckert&Ziegler BEBIG GmbH afterloading units. Their source type is specified by the product code. For additional details as well as information on application refer to the instructions for use of the unit.

In order to determine the source strength, the reference air-kerma rate⁽¹⁾ $\dot{K}_{ref} = (\dot{K}_{a,100})_0$ is measured in a well-type ionisation chamber. Conversion to air-kerma strength according to AAPM TG-43 is defined by the following relation:

$$\frac{S_k}{[U]} = \frac{\dot{K}_{ref}}{[mGy/h]} \cdot d_0^2 \cdot 10^3$$

⁽¹⁾ The "apparent activity" is calculated by dividing the measured value by the corresponding air kerma rate constant Γ_3 .

table 1:

nuclide	$T_{1/2}$ in d	Γ_3 in $\mu\text{Gym}^2\text{h}^{-1}\text{GBq}^{-1}$
Co-60	1925.3	306

For this nuclide, data of "apparent activity" may be also used as contained activity with sufficient accuracy.

The measuring device is periodically recalibrated. The calibration is traceable to the primary standards of the PTB Germany. The relative combined uncertainty $u(\dot{K}_{ref})/\dot{K}_{ref}$ is stated in table 2 with confidence level 95%.

table 2:

type	$u(\dot{K}_{ref})/\dot{K}_{ref}$ in %
Co0.A86	3.2

Before shipment, all sources are checked for leak tightness and surface contamination, according to ISO 9978. The tests are specified in table 3 with reference to the corresponding chapter of this standard.

table 3:

type	Tightness	Surface-contamination
Co0.A86	5.1.2	5.3.1

⁽⁴⁾ The source lifetime is limited due to the maximum number of duty cycles and a maximum of 5 years of use under normal operating conditions with approved applicators and in accordance with device specifications.

Abbildung 27.9.3: Seite 2 des Strahlerzertifikats mit den vom Hersteller empfohlenen Umrechengrößen für diesen Strahler



Lösung zu 27.10

Die Referenz-Luftkermaleistung $\dot{K}_{a,0}$ wird in 1m Abstand, die Luftkerma-Stärke S_k wird in 1cm Abstand vom Schwerpunkt der Aktivitätsverteilung des Strahlers angegeben.

Es ergibt sich also: $S_k = 41.4 \cdot 10000 \text{ mGy/h} = 41400 \text{ cGy/h}$

Lösung zu 27.11

1.

Die Standzeit jeder Strahlerposition und damit die Gesamtzeit verlängern sich aufgrund des radioaktiven Zerfalls des Ir-192 um den Faktor:

$$1/e^{-\ln 2(t-t_0)/t_{1/2}} = 1/e^{-\ln 2 \cdot (48h/1771.8h)} = 1.019$$

Die neue Gesamt-Bestrahlungszeit beträgt demnach 733.7 sec.

Um den Rundungsfehler klein zu halten, werden die Zeit zwischen Rechnung und Bestrahlung sowie die Halbwertszeit in Einheiten von Stunden eingesetzt:

$$t - t_0 = 48 \text{ h}$$

$$t_{1/2} = 73.824 \text{ d} = 1771.78 \text{ h}$$

2.

Die Bestrahlungszeit ändert sich entsprechend dem Verhältnis der Referenz-Luftkermaleistung des alten Strahlers zum Berechnungszeitpunkt zur Referenz-Luftkermaleistung des neuen Strahlers zum Zeitpunkt der Bestrahlung:

$$\dot{K}_a \text{ (alter Strahler am 10.10.2013 um 10:30 Uhr)} = 24.6 \text{ mGy/h}$$

$$\dot{K}_a \text{ (neuer Strahler am 12.10.2013 um 11:00 Uhr)}$$

$$= 44.1 \text{ mGy/h} \cdot e^{-\ln 2 \cdot 97.13h/1771.8h} = 42.46 \text{ mGy/h}$$

$$\text{Neue Gesamt-Bestrahlungszeit: } 720s \cdot \left(\frac{24.6}{42.46}\right) = 417.2 \text{ s}$$

