

DER KORREKTIONSFAKTOR k_E FÜR DIE STRAHLENQUALITÄT DER ELEKTRONENSTRAHLUNG

Gunter Christ

Medizinische Physik Universität Tübingen

Einleitung

In der Ionisationsdosimetrie berücksichtigen Korrektionsfaktoren die Abweichungen zwischen den Bedingungen bei der Messung einerseits und den Bedingungen der Kalibrierung andererseits. Die Korrektionsfaktoren beziehen sich auf sogenannte Einflußgrößen, die die Messung bzw. das Meßergebnis beeinflussen. Beim Bezugswert der Einflußgrößen (in der Regel unter Kalibrierbedingung) ist der Zahlenwert der Korrektionsfaktoren gleich eins.

Einer dieser Korrektionsfaktoren ist der Faktor k_g , der den Einfluß der Strahlenqualität der Elektronenstrahlung berücksichtigt. Hierbei werden zwei Aspekte erfaßt und zwar zum einen das unterschiedliche Verhältnis des Bremsvermögens Wasser zu Luft bei der interessierenden Elektronenstrahlung im Vergleich zur 60_{Co} -Strahlung und zum anderen die unterschiedliche Feldstörung unter Meß- bzw. Kalibrierbedingung. Im folgenden wird die Bedeutung des Korrektionsfaktors k_g sowie verschiedene Wege zur Bestimmung dieser Größe aufgezeigt.

Bestimmung der Wasserenergiedosis

Gegeben sei eine Kompaktkammer mit einem Kalibrierfaktor für 60_{Co} -Strahlung. Gesucht ist die Wasserenergiedosis für Elektronenstrahlung an einem Punkt im Phantom bei Abwesenheit der Meßkammer. Dann ergibt sich die Wasserenergiedosis D_w nach:

$$D_w = k N M \quad (1)$$

wobei k das Produkt der Korrektionsfaktoren für Einflußgrößen, N der Kalibrierfaktor und M die Meßanzeige bedeuten. Das Produkt k ergibt sich aus:

$$k = k_E k_p k_r k_s k_p k_T \quad (2)$$

k_g ist der hier interessierende Korrektionsfaktor, der die Strahlenqualität der Elektronenstrahlung berücksichtigt. k_p erfaßt die Korrektion bezüglich der Luftdichte, k_r die unterschiedliche Behandlung des Verdrängungseffektes bei der Kalibrierung und der Messung, k_s die Sättigung, k_{pol} die Polarität und k_T den Einfluß der Temperatur, soweit er nicht schon in der Luftdichtekorrektion enthalten ist.

Der Korrektionsfaktor k_g

Der Korrektionsfaktor k_g wird analog zum Korrektionsfaktor k_Q für die Strahlenqualität der Photonenstrahlung in das Produkt zweier Faktoren zerlegt:

$$k_E = k_E' \cdot k_E'' \quad (3)$$

Der bauartabhängige Faktor k_g berücksichtigt den unterschiedlichen Einfluß der Feldstörung bei der Kalibrierung und der Messung:

$$k_E'' = \frac{P_E}{P_{Co}} \quad (4)$$

P_B ist der Feldstörungskorrektionsfaktor bei der Messung im Elektronenstrahl und P_{QJ} derjenige bei der Kalibrierung im $60Co$ -strahl. Die Ursache der Feldstörung liegt darin, daß in der Ionisationsdosimetrie als Meßsonde ein luftgefüllter Hohlraum benutzt wird, der von einer Kammerwand umgeben ist, während die Dosis im Umgebungsmaterial bei Abwesenheit der Meßsonde bestimmt werden soll. Die Berücksichtigung dieser unterschiedlichen Verhältnisse erfolgt zum Teil mit Hilfe der Feldstörungskorrektionsfaktoren.

Bei Photonenstrahlung - und damit auch bei der Kalibrierung im $60Co$ -strahl wird die Ionisation im Luftvolumen hauptsächlich durch Elektronen verursacht, die in der Kammerwand durch Wechselwirkung der Photonen entstehen. Bei Abwesenheit der Kammer entstehen diese Elektronen aber nicht im Wandmaterial, sondern im Umgebungsmaterial. Ist die Kammerwand umgebungsäquivalent, so entstehen die Sekundärelektronen jeweils im gleichen Material, so daß in diesem Fall P_{QJ} gleich 1 wird. Für nicht umgebungsäquivalente Wandmaterialien kann P_{QJ} berechnet werden:

$$P_{Co} = \frac{\alpha \cdot s_{Wand/a} \cdot t_{w/Wand}^{en} + (1 - \alpha) \cdot s_{w/a}}{s_{w/a}} \quad (5)$$

p_c bedeutet den Bruchteil der Sekundärelektronen aus der Wand, die zur Ionisierung in der Kammer beitragen und $(1 - p_c)$ denjenigen aus dem Umgebungsmaterial, s ist jeweils das Verhältnis des Bremsvermögens und t^{\wedge} , /Wand $^{\wedge}$ Verhältnis der Massenenergieabsorptionskoeffizienten Wasser zu Wandmaterial für die Photonenstrahlung. Im Grunde geht es darum, wieviele Sekundärelektronen in der Kammerwand bzw. im Umgebungsmaterial entstehen und wie diese durch die verschiedenen Materialien unterschiedlich gebremst werden. Die folgende Tabelle zeigt einige Zahlenwerte für den Feldstörungskorrektionsfaktor $P Q_0$.

Tabelle 1: Der Feldstörungskorrektionsfaktor p_c für Kompaktkammern

PTW 23331	PTW 233641	NE 2571	CAP PR-06C
1,001	1,001	0,993	0 991

Die Abweichungen gegenüber eins liegen in der Größenordnung zwischen 1 Promille und 1 Prozent.

Der Feldstörungskorrektionsfaktor p_c berücksichtigt den von Abou Mandour und Härder [1] beschriebenen Hereinstreueffekt. Das unterschiedliche lineare Streuvermögen von kompaktem Material im Gegensatz zur Luft in der Kammer bewirkt, daß mehr Elektronen von der Seite in das Luftvolumen hereingestreut werden als aus dem Hohlraum herausgestreut werden. Dadurch ergibt sich im durch Luft verdrängten Hohlraum eine größere Ionisierung als im nichtverdrängten Umgebungsmaterial. Deshalb ist $p_c > 1$. Für Flachkammern mit genügend breitem Schutzring wird p_c zu 1 angenommen. Für Kompaktkammern kann p_c berechnet werden:

$$p_c(r, E(z)) = 1 - 0,2155 \cdot r \cdot \exp(-0,1224 \cdot E(z)) \quad (6)$$

wobei r der Kammerradius in cm und $E(z)$ die mittlere Energie in MeV am Meßort bedeuten.

Die nächste Tabelle zeigt einige Zahlenwerte für p_g [7].

Tabelle 2: Der Feldstörungskorrektionsfaktor p_g für Kompaktkammern

E(z) (MeV)	Kammerradius r		
	1,5 mm	2,5 mm	3,5 mm
4	0,981	0,967	0,955
8	0,988	0,980	0,971
12	0,993	0,988	0,984
20	0,997	0,995	0,994

Mit zunehmender Elektronenenergie nähert sich p_g dem Wert 1. Umgekehrt wird mit zunehmendem Kammerradius der Wert kleiner. Von daher ist es verständlich, daß in der Ionisationsdosimetrie die Verwendung kleinvolumiger Kammern, bzw. bei niedrigen Elektronenenergien die Verwendung von Flachkammern empfohlen wird. Zusammenfassend zeigt die folgende Tabelle einige Zahlenwerte für k_g [7].

Tabelle 3: Der Korrektionsfaktor k_g für Kompaktkammern

E(z) (MeV)	PTW 23331 (1 cm ³)	PTW 23364 (0,3 cm ³)	NE 2571 (0,6 cm ³)	CAP PR-06C (0,65 cm ³)
4	0,937	0,956	0,957	0,959
8	0,958	0,970	0,974	0,975
12	0,970	0,978	0,983	0,985
20	0,982	0,987	0,993	0,995

Der Korrektionsfaktor k_g

Mit dem Korrektionsfaktor k_g wird das unterschiedliche Bremsvermögen der Elektronen in Wasser bzw. Luft bei der Messung im Elektronenstrahl und bei der Kalibrierung bei ^{60}Co berücksichtigt, d.h. zum einen erfolgt hiermit die Umrechnung der Ionendosis in Wasserenergiedosis und zum anderen wird die bei der Messung gegenüber der Kalibrierung abweichende Strahlenqualität berücksichtigt, k_g ergibt sich zu:

$$k_g = \frac{(s_{w,a})_E}{(s_{w,a})_{\text{Co}}} \quad (7)$$

Der Zahlenwert für $(s_{w/a})_0$ ergibt sich in Spencer-Attix Näherung aus der Literatur zu 1,133. Etwas umfangreicher ist die Bestimmung von (s^a) bei der interessierenden Elektronenstrahlung.

Im folgenden soll kurz auf das im IAEA-Report Nr. 277 [6] vorgeschlagene Verfahren eingegangen werden, da das dort verwendete Datenmaterial auch die Basis des von Herrn Härder vorgeschlagenen Verfahrens der Ersatzanfangsenergie darstellt.

Für monoenergetische Elektronen kann mit Hilfe des Monte-Carlo Verfahrens die Abbremsung der Elektronen in Wasser und damit können in Spencer-Attix Näherung die $s_{w/a}$ - Werte als Funktion der Tiefe sowie als Funktion der an der Oberfläche monoenergetischen Elektronen berechnet werden. Für Zahlenwerte von $s_{w/a}$ bzw. k_g sei auf die Literatur verwiesen [4,6].

Klinische Elektronenbeschleuniger liefern in der Regel jedoch ein breites Energiespektrum der Elektronen. Daher können die für monoenergetische Elektronen berechneten Daten nicht ohne weiteres übernommen werden. Im IAEA-Report wird deshalb eine Skalierung der Tiefe mit dem Verhältnis der praktischen Reichweite monoenergetischer Elektronen und der experimentell gewonnenen Reichweite vorgeschlagen. Dieses Verfahren hat jedoch keine große Akzeptanz gefunden. Im Din-Entwurf 6800/2 [4] wurde daher ein anderer Weg beschritten.

Zur Berechnung der Bremsvermögensverhältnisse muß strenggenommen das gesamte Elektronenspektrum berücksichtigt werden. Da das Energiespektrum der Elektronen in der "Regel nicht bekannt ist, verwendet man zu seiner Charakterisierung die mittlere Energie sowie die wahrscheinlichste Energie jeweils an der Phantomoberfläche. Erstere erhält man aus der 50 % - Reichweite und

letztere aus der praktischen Reichweite. Auf die Problematik der Energiebestimmung sei hier im einzelnen nicht näher eingegangen. Zum Verständnis des folgenden sei jedoch erwähnt, daß für monoenergetische Elektronen mittlere und wahrscheinlichste Energie an der Oberfläche identisch sind und daß mit zunehmender Abbremsung der Elektronen die mittlere Energie stärker als die wahrscheinlichste fällt, wie es Abbildung 1 zeigt.

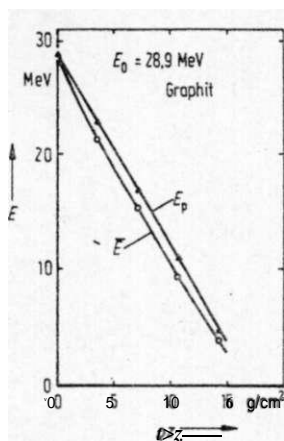


Abb. 1 Mittlere und wahrscheinlichste Energie als Funktion der Massenbelegung Graphit für ursprünglich 28,9 MeV monoenergetische Elektronen

Die relative Abweichung von wahrscheinlichster und mittlerer Energie steigt über weite Bereiche mit zunehmender Tiefe an und ist damit ein Maß für die Verbreiterung des Energiespektrums der Elektronen.

Bestimmung von k_g nach dem Ersatzanfangsenergie-Verfahren

Anfangs monoenergetische Elektronen erfahren insbesondere in den Streufolien, aber auch durch Streuprozesse an Kollimatoren, Blenden und Tubusse Energieverluste, was zu einer Verbreiterung des Spektrums führt, so daß bereits an der Phantomoberfläche ein breites Energiespektrum vorliegt. Nun wird die Annahme gemacht, daß die Abbremsung der ursprünglich monoenergetischen Elektronen und die damit verbundene Energieverbreiterung durch eine Wasserschicht erfolgt sei, das heißt anders ausgedrückt, daß man sich an der Phantomoberfläche schon in einer gewissen Wassertiefe befindet. Durch diese Transformation der Tiefenachse ist die Verwendung der IAEA-Daten möglich. Abbildung 2 beschreibt diese Modellvorstellung.

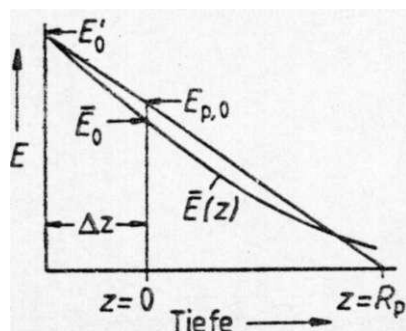


Abb. 2 Veranschaulichung des Ersatzanfangsenergie-Verfahrens

Ein durch wahrscheinlichste und mittlere Energie an der Phantomoberfläche charakterisiertes Elektronenspektrum sei durch eine Wasserschicht Az aus ursprünglich monoenergetischen Elektronen der Energie E_0 , der sogenannten Ersatzanfangsenergie, entstanden. An der Phantomoberfläche ($z=0$) besitzen die Elektronen eine Restreichweite von $(R_p - Az)$. Ist diese Ersatzanfangsenergie bekannt, so kann k_g als Funktion der Restreichweite nach dem IAEA-Report bestimmt werden. Abbildung 3 zeigt k_g -Werte als Funktion der Restreichweite für verschiedene Monoenergien von 4 MeV bis 50 MeV nach IAEA.

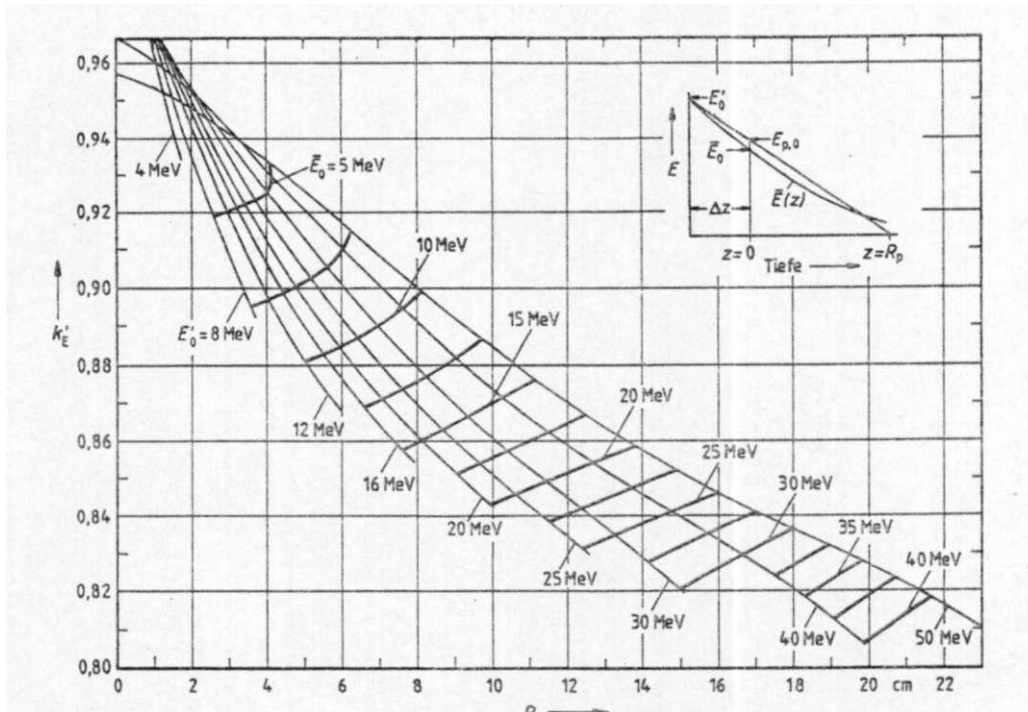


Abb.3 k_g -Werte als Funktion der Restreichweite

In Abbildung 3 ist eine weitere Kurvenschar mit der mittleren Energie (5 bis 40 MeV) als Parameter eingezeichnet. Mittels Monte-Carlo Verfahren haben Großwendt und Roos [5] die Abbremsung von Elektronen in Wasser und daraus die mittlere Energie als Funktion der Restreichweite berechnet. Beträgt als Beispiel die mittlere Energie bei einer Restreichweite von 10 cm 20 MeV, so handelt es sich um monoenergetische Elektronen der Energie 20 MeV. Eine mittlere Energie von 20 MeV kann jedoch auch durch Abbremsung von z.B. 30 MeV Elektronen zustande gekommen sein. Dann ist allerdings die Restreichweite größer und entsprechend auch der k_g -Wert. Für ein gegebenes Wertepaar $E_{p,0}$ und E_0 wird also anhand von Abbildung 3 die zugehörige Ersatzanfangsenergie bestimmt. Anschließend bewegt

man sich auf dieser Kurve und bestimmt für eine gewünschte Tiefe (Restreichweite = praktische Reichweite - Tiefe) den kg-Wert. Zwei Beispiele mögen die Vorgehensweise noch einmal veranschaulichen.

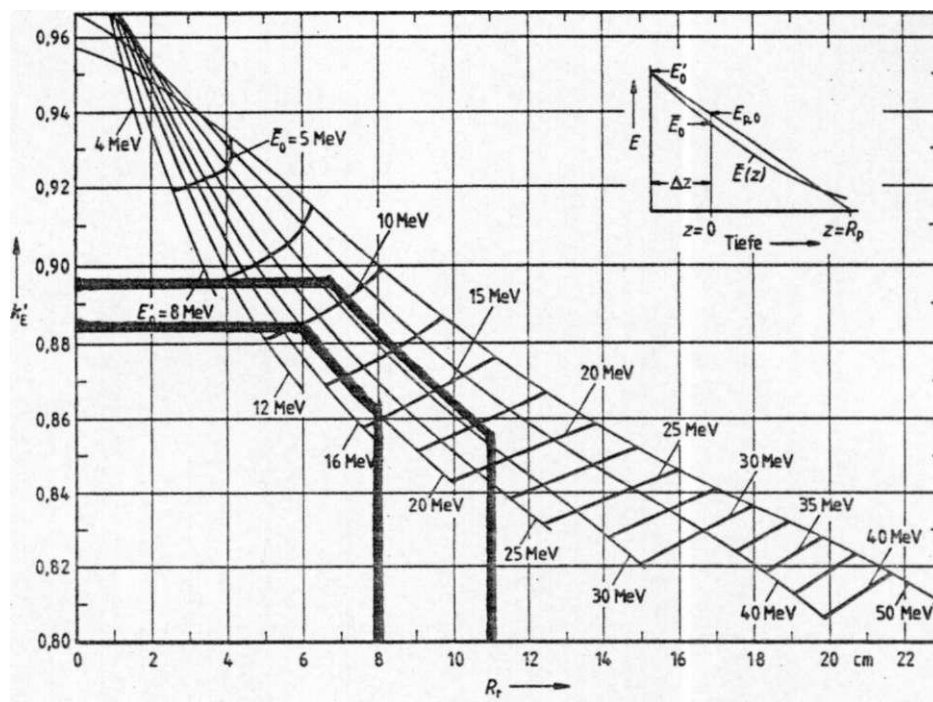


Abb. 4 Zwei Beispiele zum Ersatzanfangsenergie-Verfahren (Erläuterung siehe Text)

Bei einer praktischen Reichweite von 8 cm und einer mittleren Energie von 15 MeV ergibt sich die Ersatzanfangsenergie zu 20 MeV. Für eine Tiefe von 2 cm, also einer Restreichweite von 6 cm, bestimmt man den kg-Wert zu 0,885. Im zweiten Beispiel sei eine Reichweite von 11 cm und eine mittlere Energie von 18 MeV vorgegeben. Die Ersatzanfangsenergie wird über graphische Interpolation zu 34 MeV ermittelt. Für eine Tiefe von 4 cm ergibt sich dann ein kg-Wert von 0,895. Etwas problematisch kann bei diesem Verfahren die zweifache graphische Interpolation sein.

Aus diesem Grund sind im DGMP-Bericht Nr.6 [3] analytische Näherungsformeln zur Berechnung der Ersatzanfangsenergie sowie der kg-Werte angegeben [2]:

$$E'_0 = \bar{E}_0 + m(\bar{E}_0) \cdot [R_p - (0,5136 \bar{E}_0 - 0,2465)] \quad \text{Gl.8}$$

$$\text{mit } m(\bar{E}_0) = \begin{cases} 0,0075 \bar{E}_0^2 - 0,4813 \bar{E}_0 + 14,2365 & \text{für } \bar{E}_0 < 28 \text{ MeV} \\ -0,02 \bar{E}_0 + 7,2 & \text{für } \bar{E}_0 \geq 28 \text{ MeV} \end{cases}$$

Die Ersatzanfangsenergie ergibt sich zu E_0 , wenn der letzte Term in Gl.8 zu Null wird. Dies ist dann der Fall, wenn die praktische Reichweite gleich der nach der Markus-Formel berechneten Reichweite für E_0 wird. In diesem Fall handelt es sich um eine Monoenergie. In jedem anderen Fall wird R_p größer als die Reichweite monoenergetischer Elektronen sein und es ergibt sich eine Geradengleichung, deren Steigung m noch eine Funktion der mittleren Energie an der Oberfläche ist.

Der gesuchte kg -Wert ergibt sich nach:

$$k'_E = a(R_p - z)^2 + b(R_p - z) + c \quad \text{Gl. 9}$$

für $E'_0 < 28 \text{ MeV}$ gilt:

$$a = 3,6153 \cdot 10^{-6} E_0'^2 - 2,1271 \cdot 10^{-4} E_0' + 3,4455 \cdot 10^{-3}$$

$$b = -4,2200 \cdot 10^{-5} E_0'^2 + 2,5269 \cdot 10^{-3} E_0' - 5,3930 \cdot 10^{-2}$$

$$c = 2,5613 \cdot 10^{-5} E_0'^2 - 1,6920 \cdot 10^{-3} E_0' + 1,0104$$

für $\bar{E}_0 \geq 28 \text{ MeV}$ gilt:

$$a = 4,2699 \cdot 10^{-7} E_0'^2 - 4,4884 \cdot 10^{-5} E_0' + 1,2551 \cdot 10^{-3}$$

$$b = -6,7042 \cdot 10^{-6} E_0'^2 + 8,6189 \cdot 10^{-4} E_0' - 3,4876 \cdot 10^{-2}$$

$$c = -3,4128 \cdot 10^{-6} E_0'^2 - 6,0502 \cdot 10^{-4} E_0' + 1,0029$$

Die Gl. 9 stellen Näherungsformeln der IAEA-Daten für kg dar. Die Variable $(R_p - z)$ entspricht der Restreichweite R_r . Die Koeffizienten a , b und c sind als Funktion von E_0 angegeben. Mit einem kleinen Rechenprogramm können die Werte schnell berechnet werden.

Literatur

- 1.) Abou Mandour, M., D. Härder,
Electron fluence Perturbation by cylindrical gas-filled ionization Chambers with
axes parallel the beam, Nucl. Instr. Meth. 204, 511-516 (1983)
- 2.) Christ, G., R. Bödi, M. Bauer, D. Härder
Ein Interpolationsverfahren zur Bestimmung der Ersatzanfangsenergie und
der kg-Werte nach dem Härder-Verfahren
in: H.K. Leetz, Medizinische Physik, 305 - 309 (1989)
- 3.) DGMP-Bericht Nr.6, Anleitung zur Dosimetrie von Elektronenstrahlung mit
Ionisationskammern
- 4.) DIN 6800 Teil 2 (Entwurf), Dosimeßverfahren nach der Sondenmethode für
Photonen- und Elektronenstrahlung, Ionisationsdosimetrie August 1990
- 5.) Großwendt B., M. Roos
Degradation hochenergetischer Elektronen in Wasser: Mittlere Elektronen-
energien
in: H. K. Leetz, Medizinische Physik, 323 - 329 (1989)
- 6.) IAEA-Report Nr. 277, Absorbed dose determination in photon and electron
beams
- 7.) Reich, H. ,Dosimetrie ionisierender Strahlung, B.G. Teubner Stuttgart