

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

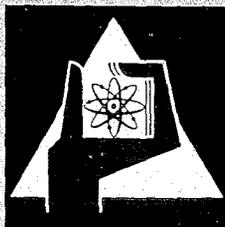
März/April 1969

KFK 977

Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit

Die Ermittlung der Strahlenqualität und der Dosis von Röntgenstrahlung
über eine Tiefendosismessung in silberaktivierten Phosphatgläsern

H. Kiefer, E. Piesch



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

Internationale Monatszeitschrift für angewandte Atomenergie in Technik, Industrie, Naturwissenschaften, Medizin einschließlich Biophysik und Strahlenschutz unter besonderer Berücksichtigung der Raumfahrtforschung und -technik

Hauptschriftleiter: Prof. Dr. rer. nat. Dr. med. E. H. Graul, 355 Marburg/Lahn, Lahnstraße 4 a

Verlag G. Braun, 75 Karlsruhe 1, Karl-Friedrich-Straße 14—18 · Postfach 1709 · Telefon: *26951 · Telex: 7826 904 vgb d

Die Ermittlung der Strahlenqualität und der Dosis von Röntgenstrahlung über eine Tiefendosismessung in silberaktivierten Phosphatgläsern

Aus dem
Kernforschungszentrum Karlsruhe

Von H. Kiefer und E. Piesch

1. Einleitung

Silberaktivierte Metaphosphatgläser werden bei der dosimetrischen Auswertung im allgemeinen im gesamten Glaskörper zur Fluoreszenz angeregt. Wie die ersten Ergebnisse [1] zeigten, können Phosphatgläser bei einer differentiellen Auswertung in beliebigen Glästiefen kontinuierlich abgetastet werden. Damit läßt sich die Tiefendosisverteilung im Glas in Strahleneinfallrichtung ermitteln. Diese multi-scanning-Technik bietet weiter die Möglichkeit, aus dem Abfall der differentiellen Fluoreszenzintensität in Abhängigkeit von der Glästiefe eine Strahlenqualität zu bestimmen. Bei Kenntnis der Strahlenqualität und der entsprechenden Dosisempfindlichkeit des Glases erhält man aus dem Meßwert in einer vorgegebenen Glästiefe die Freiluftdosis. Bei Auswertung in drei zueinander senkrechten Ebenen können unter Umständen Strahlenaustritt- und Strahleneintrittseite ermittelt werden.

Dieses neue Meßverfahren bietet im Strahlenschutz, insbesondere in der Personendosimetrie den Vorteil, neben einer genauen Dosisbestimmung für jeden vorliegenden Bestrahlungsfall Aussagen über die Strahlenqualität und Strahleneinfallrichtung und darüberhinaus über die absorbierte Dosis in geringeren und größeren Gewebetiefen zu liefern.

Von der praktischen Anwendung dieser multi-scanning-Technik sollen zunächst Messungen der Dosis und der Strahlenqualität im Rahmen der Ortsdosimetrie beschrieben werden. In diesen Bestrahlungsfällen ist die Strahleneinfallrichtung im allgemeinen bekannt, so daß die Tiefendosisverteilung im Glas in einfacher Weise zu ermitteln ist. Neben einer Beschreibung der Meßtechnik, Auswertemethode und Kalibrierung wird hier vor allem auch die Genauigkeit der Dosismessung beim Vorliegen von Strahlungsgemischen näher untersucht. Dosismessungen bei unbekannter Strahleneinfallrichtung sowie die speziellen Anwendungsmöglichkeiten in der Personendosimetrie sollen hier nicht behandelt werden.

2. Meßmethode

Zur Ermittlung der Tiefendosisverteilung wird der homogene Festkörper in kleinen Teilbereichen kontinuierlich abgetastet. Abbildung 1 zeigt die verwendete Vorrichtung zur Auswertung eines quaderförmigen Phosphatglases der Größe $8 \times 8 \times 4,7 \text{ mm}^3$. Das Phosphatglas ist über eine Halterung auf einem Schlitten montiert und wird während der Auswertung über eine Spindel-führung durch einen Motor in x -Richtung bewegt. Eine auf

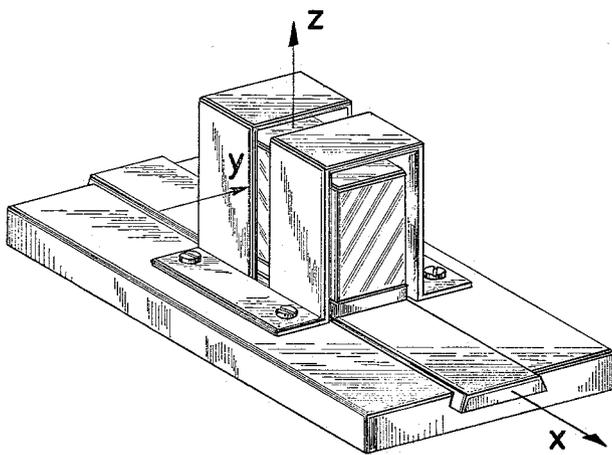


Abbildung 1. Vorrichtung zur differentiellen Abtastung eines quaderförmigen Phosphatglases: Bewegung des Glases in x-Richtung, Fluoreszenz-anregung des Glases in y-Richtung, Messung der Fluoreszenzintensität in z-Richtung

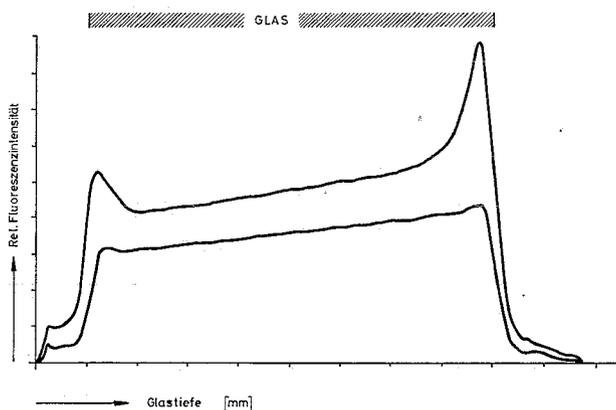


Abbildung 2. Die Fluoreszenzintensität eines Phosphatglases bei Abtastung mit einer Schlitzblende von 0,3 mm Breite in Abhängigkeit von der Glastiefe. Herabsetzung der Lichtreflexion an den Glaskanten durch Schwärzung der Glassteinflächen

dem feststehenden Support-Teil befestigte Schlitzblende sorgt dafür, daß das Phosphatglas nur in Teilbereichen in y-Richtung mit einer UV-Strahlung angeregt und in z-Richtung ausgemessen wird.

Die Intensität des Fluoreszenzlichtes entspricht hierbei derjenigen Strahlungsdosis, die in dem durch die Schlitzblende begrenzten Bereich des Phosphatglases absorbiert wurde. Die Fluoreszenzintensität wird während der kontinuierlichen Abtastung des Glases über einen synchron zum Schlittenantrieb laufenden Schreiber in Abhängigkeit von der Glastiefe registriert.

Für die vorliegenden Messungen wurde ein Glasdosimeterauswertegerät Modell Toshiba FD-3B sowie ein x-y-Schreiber verwendet. Die Kalibrierung des Schreibers erfolgte mit einem Referenzglas über die Ratemeteranzeige des Auswertegerätes.

Die Breite der Schlitzblende beträgt 0,3 mm; die Abtastzeit für eine Glastiefe von 8 mm etwa 3 sec. Um eine Reflexion des Fluoreszenzlichtes an den Kanten des Glases herabzusetzen, wurden die Stirnflächen des Glases mit Tusche geschwärzt. Abbildung 2 zeigt die Tiefendosisverteilung in einem Glas, welches einmal mit und einmal ohne schwarzgefärbte Seitenflächen ausgewertet wurde. Innerhalb einer Glastiefe von 0,3 mm — entsprechend der Schlitzbreite — wird an den Glaskanten ein Anstieg bzw. Abfall der Fluoreszenzintensität festgestellt. Eine differentielle Tiefendosis kann daher bei der hier gewählten Schlitzbreite erst in Glastiefen größer als 0,3 mm nachgewiesen werden. Die untere Nachweisgrenze liegt bei der differentiellen Auswertung im Dosisbereich von 1 R.

3. Bestimmung der Strahlenqualität von Röntgenstrahlung

Silberaktivierte Metaphosphatgläser der Größe $8 \times 8 \times 4,7 \text{ mm}^3$ wurden im Energiebereich 10 keV bis 240 keV mit Röntgenbremsstrahlung unterschiedlicher Homogenität und Energie sowie mit ^{137}Cs - und ^{60}Co - γ -Strahlung mit gleicher Dosis bestrahlt (Tabelle 1). Die Bestrahlung erfolgte jeweils in definierter Strahleneinfallsrichtung auf die Schmalseite des Glases.

Für die Meßreihen wurden hierbei zwei Glassorten mit unterschiedlichen Absorptionseigenschaften verwendet, nämlich das in der Routinedosimetrie allgemein verwendete japanische Yokota-Glas [2] sowie ein Schott-Experimentalglas [3] (Tabelle 2). Diese Gläser zeigen bei einer Dosisauswertung im Energiebereich von 50 keV gegenüber einer energiereichen ^{60}Co - γ -Strahlung eine um den Faktor 7 bzw. 3,5 (Schott-Glas) größere Anzeige. Versuche haben aber gezeigt, daß auch energieabhängige Glasdosimeter zur Bestimmung einer Strahlenqualität über eine Tiefendosisverteilung im Glas verwendet werden können [1].

Tabelle 1. Zur Kalibrierung verwendete Strahlenqualitäten

Röhrenspannung [kV]	Zusatzfilter [mm]	Angenommene effektive Quantenenergie [keV]
^{60}Co		
^{137}Cs		
300	2 Al + 5 Cu + 3,5 Pb	240
250	2 Al + 5 Cu + 2 Pb	200
200	2 Al + 5 Cu + 0,9 Pb	150
150	2 Al + 7 Cu	110
120	2 Al + 3,5 Cu	87
100	2 Al + 2 Cu	71
80	2 Al + 0,7 Cu	55
70	2 Al + 0,4 Cu	46
60	2 Al + 0,2 Cu	38
45	2 Al + 0,45 Cu	40
35	2 Al + 0,2 Cu	30
25	2,5 Al	20
15	0,2 Al	10
	Normalstrahlung	
300	1,7 Cu	150
250	1,5 Cu	125
200	1,2 Cu	100
150	0,75 Cu	75
130	0,6 Cu	65
100	10,5 Al	50
78	7 Al	39
56	3,4 Al	28
45	2 Al	22

Tabelle 2. Zusammensetzung der verwendeten silberaktivierten Phosphatgläser

Zusammensetzung	Yokota-Glas (2)	Schott-Experimentalglas (3)
Ag	3,7	0,62
Al	4,6	0,51
Li	3,6	7,34
P	33,5	34,7
O	53,7	55,85
B	0,85	0,95
Energieabhängigkeit*	Faktor 7	Faktor 3,5

* Experimentell erhaltene relative Dosisempfindlichkeit: Verhältnis der maximalen Empfindlichkeit bei etwa 45 keV zur Empfindlichkeit bei ^{60}Co - γ -Strahlung

Die Auswertung erfolgte differentiell mit der beschriebenen Meßanordnung. Die relative Fluoreszenzintensität ist in den Abbildungen 3a und 3b für verschiedene Quantenenergien in Abhängigkeit von der Glastiefe für beide Glassorten dargestellt. Die differentielle Fluoreszenzintensität wurde hierbei auf die Fluoreszenzintensität im Maximum in 0,3 mm Glastiefe bezogen. Der unterschiedliche Abfall der Tiefendosiskurven kann zur quantitativen Bestimmung der Strahlenqualität bzw. einer effektiven Quantenenergie herangezogen werden. Hierfür ist das Yokota-Glas offensichtlich besser geeignet als das weniger energieabhängige Schott-Glas. Eine Strahlenqualität kann bevorzugt im Energiebereich der Röntgenstrahlung unterhalb 300 keV bis etwa 10 keV ermittelt werden. Bei energiereicherer Quantenstrahlung kann die Tiefendosisverteilung bis zu größeren Glastiefen, beispielsweise 16 bzw. 24 mm, verfolgt werden.

Die Strahlenqualität einer Röntgenstrahlung kann nicht nur in einfacher Weise durch direkten Vergleich der Tiefendosiskurve mit den Kalibrierkurven ermittelt werden, es kann auch der relative Dosisabfall in einer bestimmten Glastiefe oder ein Dosisabfall auf 50% als direktes Maß für die effektive Quantenenergie angesehen werden.

In Abbildung 4 ist der relative Meßwertverlust in verschiedenen Glastiefen, bezogen auf den Meßwert in 0,3 mm Glastiefe, in Abhängigkeit von der Quantenenergie wiedergegeben.

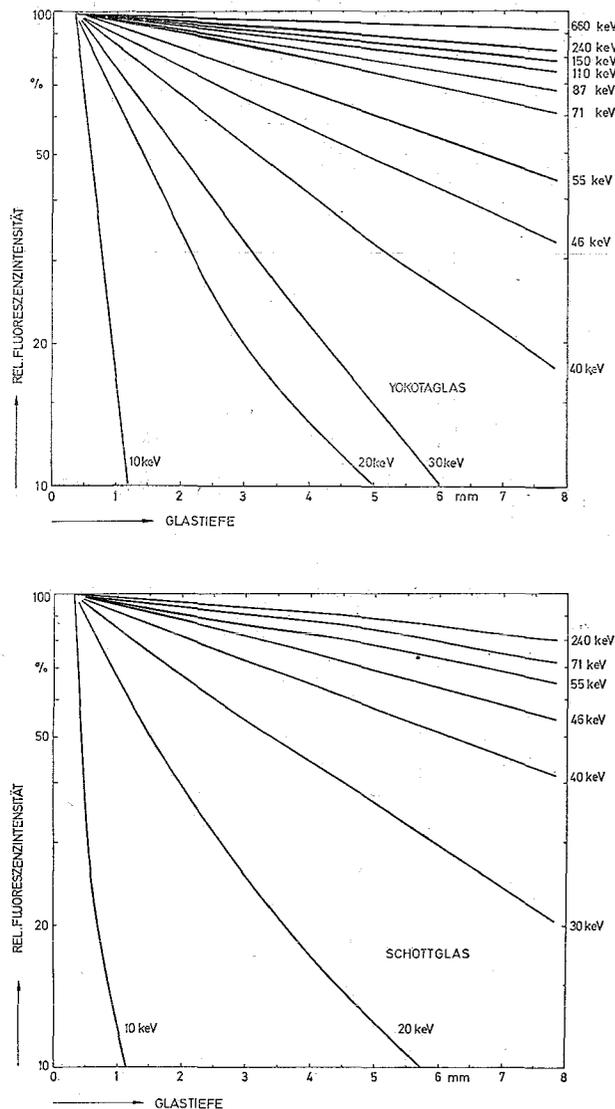


Abbildung 3. Die relative Fluoreszenzintensität eines Phosphatglases bei differentieller Auswertung mit einer Schlitzblende von 0,3 mm Breite für verschiedene Quantenenergien in Abhängigkeit von der Glastiefe für a) Yokota-Glas, b) Schott-Experimentalglas

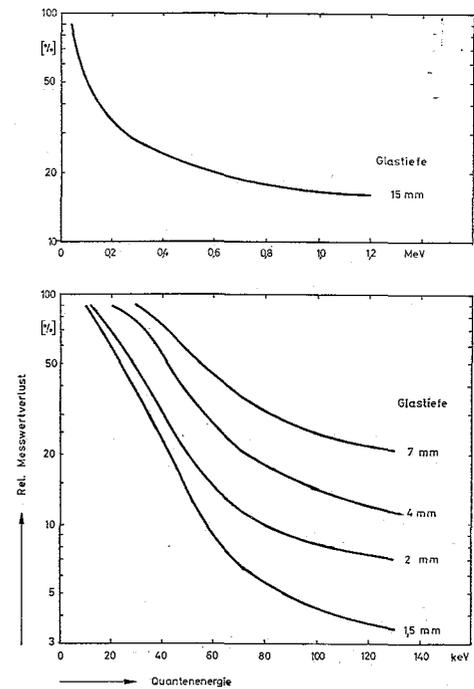


Abbildung 4. Der relative Meßwertverlust in verschiedenen Glastiefen bei differentieller Fluoreszenzmessung, bezogen auf den Meßwert von 0,3 mm Glastiefe, in Abhängigkeit von der Quantenenergie

In der medizinischen Bestrahlungstechnik dient die sogenannte Halbwertschicht (HWS) zur Kennzeichnung der Strahlenqualität. Unter der HWS einer Röntgenbremsstrahlung versteht man diejenige Schichtdicke aus Aluminium oder Kupfer in mm, welche die ursprüngliche Strahlungsintensität einer Röntgenstrahlung durch Schwächung auf ihren halben Wert herabsetzt. Die HWS wird experimentell dadurch ermittelt, daß man zwischen Röhrenfenster der Röntgenröhre und einer entsprechenden energieunabhängigen Ionisationskammer Aluminium- bzw. Kupferfilter unterschiedlicher Dicke einlegt und die für jede Filterdicke ermittelten Dosiswerte in halblogarithmischer Darstellung über der jeweiligen Filterdicke aufträgt. Durch graphische Interpolation läßt sich die HWS ermitteln.

Diese Messung ist verhältnismäßig umständlich und aufwendig. Demgegenüber besteht bei der differentiellen Tiefendosisbestimmung im Glas die Möglichkeit, nach einmaliger Bestrahlung durch einen einzigen Meßvorgang die vollständige Schwächungskurve im Glas wiederzugeben. Die kontinuierliche Verteilung der absorbierten Dosis im Glas kann, ähnlich wie die Schwächung der Röntgenstrahlung in Aluminium bzw. Kupfer, zur Ermittlung einer HWS herangezogen werden. Silberaktivierte Phosphatgläser bzw. andere Lumineszenzgläser sind als gleichwertige Referenzsubstanzen anzusehen, da sie vom Hersteller in bekannter, sehr konstanter Zusammensetzung und Homogenität geliefert werden müssen.

Für die verwendeten Glassorten wurde aus den Tiefendosiskurven die erste HWS in Abbildung 5 als Funktion der Quantenenergie aufgetragen. Im Gegensatz zum Schott-Glas zeigt das Yokota-Glas bei 20 bis 30 keV eine Unstetigkeitsstelle. Beide Glassorten unterscheiden sich vor allem durch einen unterschiedlichen Gehalt an Silber. Die bevorzugte Anregung der Röntgenfluoreszenzstrahlung (K-Kante des Silbers bei ca. 22,5 keV) führt vor allem beim Yokota-Glas zu einer signifikanten Schwächung der Bremsstrahlung in größeren Glastiefen, infolgedessen zu einem größeren HWS-Wert.

Inwieweit die im Phosphatglas ermittelte erste HWS eine gleichwertige Aussage zur ersten HWS im Aluminium darstellt, ist in Abbildung 6 wiedergegeben. Sie zeigt, daß Phosphatgläser mit geringerem Silberanteil für die Bestimmung der HWS bevorzugt geeignet sind.

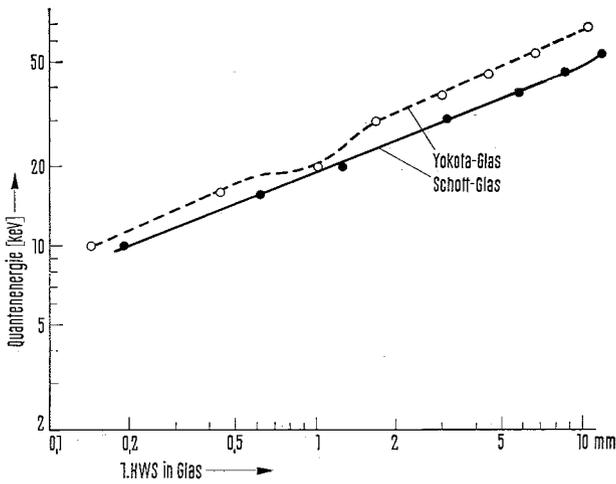


Abbildung 5. Die Zuordnung einer Quantenenergie zur ersten Halbwertschicht im Phosphatglas für Yokota-Glas und Schott-Experimentalglas

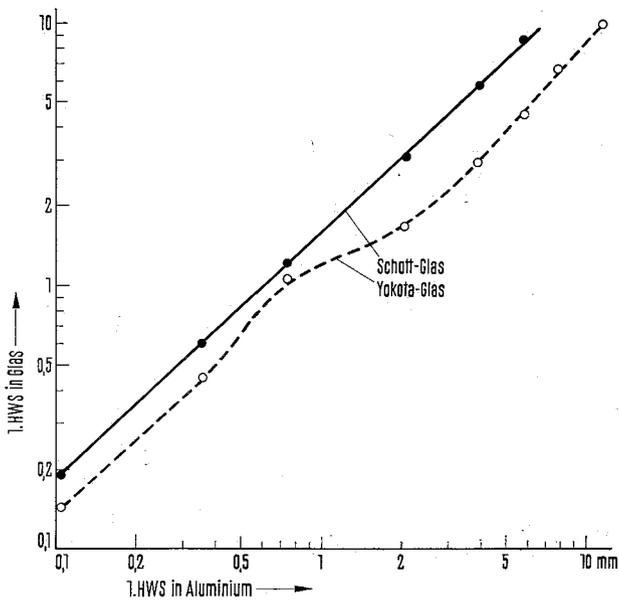
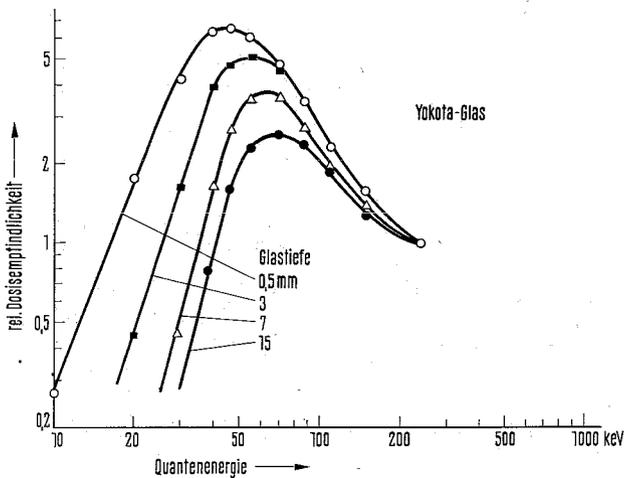


Abbildung 6. Die erste Halbwertschicht im Phosphatglas in Abhängigkeit von der ersten Halbwertschicht im Aluminium für Yokota-Glas und Schott-Experimentalglas



a)

4. Bestimmung der Dosis

Infolge der energieabhängigen Dosisempfindlichkeit des Glases sowie der energieabhängigen Schwächung der Strahlung im Glas sowie der energieabhängigen Schwächung der Strahlung im Glas ist der Meßwert, bezogen auf die Freiluftdosis ($\mu\text{A/R}$), von der Strahlenqualität und der jeweiligen Glastiefe abhängig. In den Abbildungen 7a und 7b ist die Dosisanzeige ($\mu\text{A/R}$) des Yokota-Glases und des Schott-Glases in Abhängigkeit von der Quantenenergie für verschiedene Glastiefen bei differentieller Auswertung des Glases wiedergegeben. Bei Kenntnis der Strahlenqualität und der aus den Abbildungen 7a und 7b ersichtlichen, in der jeweiligen Glastiefe vorhandenen Dosisempfindlichkeit läßt sich die Freiluftdosis berechnen.

Die Bestrahlungsdosis ergibt sich damit zu

$$D = f_k \cdot f_e(d, E) \cdot F(d)$$

f_k ist der Kalibrierfaktor der differentiellen Auswertung in $\mu\text{A/R}$, $f_e(d, E)$ der Korrekturfaktor der relativen Dosisempfindlichkeit bezogen auf eine 240-keV-Röntgenstrahlung, $F(d)$ die differentielle Fluoreszenzintensität in μA in der Glastiefe d und d die Glastiefe in mm.

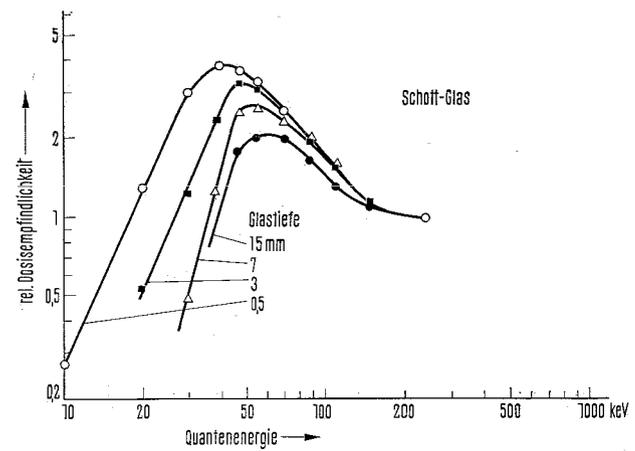
4.1 Graphisches Auswerteverfahren

Beim Vorliegen eines Strahlengemisches versucht man, zwei Energiekomponenten anzusetzen und deren Meßwertanteil aus der Tiefendosiskurve getrennt zu ermitteln. Hierfür sind verschiedene Auswertemethoden möglich. Im folgenden wird am Beispiel einer relativ einfachen graphischen Analyse gezeigt, mit welcher Genauigkeit die Dosisanteile eines Strahlengemisches, bestehend aus einer energiearmen Komponente (38 keV-Röntgenbremsstrahlung) und einer energiereichen Komponente (240 keV-Röntgenbremsstrahlung), ermittelt werden können. Die im folgenden näher erläuterten Schritte innerhalb der Auswertung sind in Abbildung 8 wiedergegeben.

1. Ermittlung der Strahlenqualität des energiearmen Strahlenteils I aus dem Abfall der Tiefendosiskurve a in Glastiefe $d = 0,3$ mm durch Zuordnung einer Eichkurve b mit gleichem Abfall (gleiche Tangente in $d = 0,3$ mm).

2. Ermittlung des Meßwertanteils einer energiereichen Strahlenkomponente II unter der Annahme einer Strahlenqualität von ≥ 240 keV. Diese Komponente erhält man in 15 mm Glastiefe durch Subtraktion der energiearmen Komponente von der Gesamtdosis, in 0,3 mm Glastiefe durch Anlegen der entsprechenden Eichkurve c.

3. Erste Korrektur der energiearmen Komponente in 0,3 mm Glastiefe durch Subtraktion des energiereichen Anteils von der Gesamtdosis. Anlegen der Eichkurve b und Ermittlung des korrigierten energiereichen Anteils in 7 mm Glastiefe.



b)

Abbildung 7. Die relative Dosisanzeige des Phosphatglases bei differentieller Auswertung in verschiedenen Glastiefen in Abhängigkeit von der Quantenenergie: a) Yokota-Glas, b) Schott-Experimentalglas

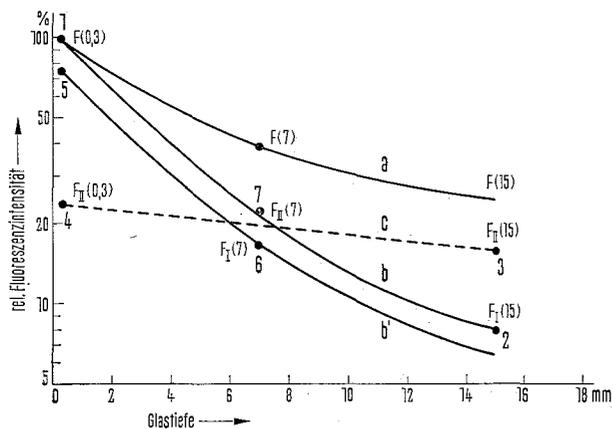


Abbildung 8. Beispiel für das graphische Dosisauswerteverfahren beim Vorliegen eines Strahlengemisches (38 keV und 240 keV Röntgenbremsstrahlung). Erläuterung der Auswerteschritte 1 bis 7, siehe Text. — a) Tiefendosiskurve des Strahlengemisches, b) Tiefendosiskurve des energiearmen Strahlenanteils, c) Tiefendosiskurve des energiereichen Strahlenanteils

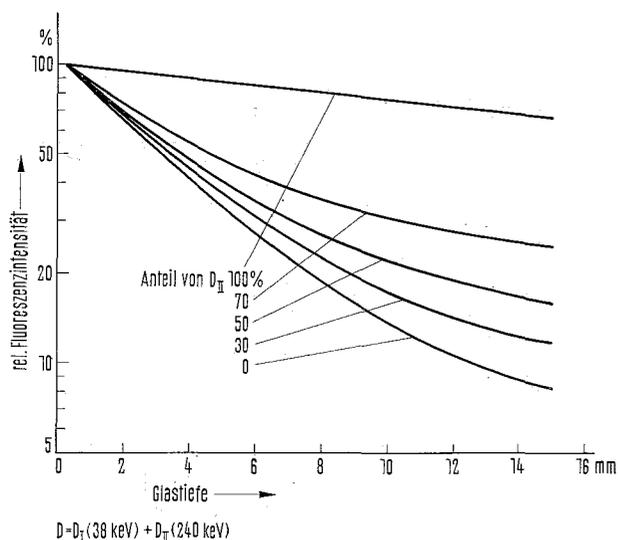


Abbildung 9. Die Tiefendosiskurven beim Vorliegen von Strahlengemischen mit verschiedenen Dosisanteilen einer 240 keV- und 38 keV-Röntgenbremsstrahlung (Yokota-Glas)

4. Ermittlung der Gesamtdosis in Glastiefe 7 mm: Die Gesamtdosis ergibt sich unter Berücksichtigung der Dosisempfindlichkeit f_e des energiearmen Strahlungsanteils in 7 mm Glastiefe [$f_e(7 \text{ mm}) = 1,5$ aus Abbildung 7] und eines Kalibrierfaktors des Auswertegerätes f_k zu:

$$D = f_k \cdot [F_{II}(7 \text{ mm}) + f_e \cdot F_I(7 \text{ mm})].$$

F ist der Gesamtmeßwert (7 mm),

$F_I(7 \text{ mm})$ der Meßwert des energiearmen Strahlungsanteils und $F_{II}(7 \text{ mm}) = F(7 \text{ mm}) - F_I(7 \text{ mm})$ der Meßwert des energiereichen Strahlungsanteils.

Bei der hier beschriebenen Auswertemethode wurden die beiden Meßwertanteile nur in erster Näherung ermittelt. Die Meßgenauigkeit läßt sich durch Iteration verbessern.

Zur Erprobung der Leistungsfähigkeit des graphischen Auswerteverfahrens wurden Glasdosimeter mit verschiedenen Dosisanteilen einer 240 keV und 38 keV Röntgenstrahlung bestrahlt. Die entsprechenden Tiefendosiskurven sind in Abbildung 9 wiedergegeben.

Tabelle 3 zeigt die nach der ersten Abschätzung (nur Verwendung der Eichkurve b) und der zweiten Abschätzung (Verwendung der Eichkurve b') ermittelten Dosisanteile der bestrahlten Gläser.

Tabelle 3. Graphisch ermittelte Dosisanteile beim Vorliegen eines Strahlengemisches einer Röntgenstrahlung von 38 keV und 240 keV

Relativer Dosisanteil der 240 keV-Komponente			
Bestrahlung	30%	50%	70%
1. Abschätzung	32,5%	54,5%	67%
2. Abschätzung	29%	49,7%	69,5%

Eine weitere Iteration bringt wegen der Ungenauigkeit in der graphischen Darstellung keine Verbesserung der Meßgenauigkeit. Eine Vereinfachung des Auswerteverfahrens ist durch eine Computerauswertung denkbar. Das beschriebene Auswerteverfahren ist in diesem Sinne nur eines von vielen möglichen Auswerteverfahren, welches lediglich die prinzipiellen Methoden einer Dosisbestimmung mit Hilfe der Tiefendosisverteilungskurven veranschaulichen soll.

4.2 Vereinfachte Auswertung

In welchen Fällen auf eine graphische Auswertung verzichtet werden kann, läßt sich in einfacher Weise aus den HWS-Werten und den daraus ermittelten Homogenitätsgraden ermitteln. In Tabelle 4 wurde die erste, zweite und dritte HWS im Yokota-Glas für homogene Röntgenstrahlung, für inhomogene Röntgenstrahlung (Normalstrahlung) und für ungefilterte Röntgenstrahlung sowie für Zweikomponenten-Strahlengemische wiedergegeben. Die Analysen zeigen, daß trotz relativ inhomogener Normalstrahlung der erste und zweite HWS-Wert sich nur geringfügig unterscheiden. Zur Kennzeichnung der Strahlenhomogenität dient daher das Verhältnis $b = 1. \text{HWS} / 3. \text{HWS}$.

Für homogene Strahlung ($b > 0,85$) und unter Umständen auch für Normalstrahlung mit gleichmäßiger Energieverteilung verzichtet werden. Bei ungefilterter Röntgenbremsstrahlung, vor allem aber bei Strahlengemischen unterschiedlicher Energieanteile ($b > 0,5$), empfiehlt sich zur Dosisbestimmung eine graphische Auswertung.

Eine vereinfachte Auswertung ist auch bei einer inhomogenen Strahlung mit gleichmäßiger Energieverteilung möglich, z. B. bei Normalstrahlung und unter Umständen auch bei ungefilterter Röntgenbremsstrahlung. Die Dosis wird dann aus dem ersten HWS-Wert bzw. einem Meßwertabfall im Glas unter Berücksichtigung des entsprechenden Energiekorrekturfaktors ermittelt.

Tabelle 4. Die im Phosphatglas ermittelten Halbwertschichten und Homogenitätsgrade für verschiedene Röntgenstrahlengemische

	1. HWS [mm Glas]	2. HWS [mm Glas]	3. HWS [mm Glas]	$b = \frac{1. \text{HWS}}{3. \text{HWS}}$
<i>Homogene Röntgenstrahlung</i>				
30 keV	1,65	1,75	1,75	0,94
40 keV	2,9	3,0	3,3	0,87
<i>Normalstrahlung</i>				
45 kV	1,65	1,85	2,5	0,66
56 kV	2,25	2,45	3,6	0,62
<i>Ungefilterte Röntgenbremsstrahlung</i>				
25 kV	0,2	0,7	1,0	0,2
45 kV	0,4	1,0	1,1	0,36
<i>Strahlengemische</i>				
38 keV + X 240 keV				
X = 30%	3,1	3,8	6,6	0,47
50%	3,4	5,0	≈ 10	≈ 0,34
70%	4,3	10,4	≈ 22	≈ 0,2

Tabelle 5. Dosisbestimmung von Röntgenstrahlung über die erste HWS bzw. den Meßwertabfall in 1,5 mm Glastiefe

	Auswertung über 1. HWS					Auswertung über relativen Meßwertabfall			
	$F(0,5 \text{ mm})$ [μA]	1. HWS in Glas	keV	$f_e(0,5 \text{ mm})$	$D = f_e \cdot F$	Meßwertabfall in 1,5 mm		$f_e(0,5 \text{ mm})$	$D = f_e \cdot F$
						[%]	[keV]		
<i>Normalstrahlung</i>									
300 kV	11,5					~4,5			3,8
250 kV	13					~4,5	95	3,05	4,25
200 kV	16,5					5,5	80	4,0	4,1
150 kV	24,8	9,7	66	5,2	4,8	6,5	72	4,8	5,15
130 kV	28	8,56	61	5,7	4,9	8,5	62	5,5	5,1
100 kV	33	6,65	53	6,2	5,3	14	50	6,4	5,16
78 kV	34,5	4,1	44	6,5	5,3	20	43	6,5	5,3
56 kV	31	2,65	36	5,7	5,45	30,5	35	5,5	5,6
45 kV	20	1,9	31	4,4	4,55	40,5	28	3,95	5,1
<i>Röntgenbremsstrahlung</i>									
45 kV	3,6	0,4	15,0	0,87	4,2	71	15	0,87	4,15
35 kV	2,5	0,2	11,5	0,42	6,0	74	14	0,72	3,5
25 kV	1,5	0,15	10	0,27	5,6	80,5	12	0,47	3,2
<i>Dosisbestrahlung mit 240 keV</i>					5,4				5,4

Tabelle 6. Relativer Meßfehler bei der Dosisbestimmung von Normalstrahlung unterschiedlicher Energie über die Auswertung der Tiefendosiskurve

Normalstrahlung	Vergleich mit Kalibrierkurven				Relativer Meßfehler bei Auswertung über		
	$F(0,5 \mu\text{A})$	ermittelte Energie [keV]	$f_e(0,5 \mu\text{A})$	$D = f_e \cdot F$	Kalibrierkurve [%]	1. HWS [%]	Meßwertabfall [%]
300 kV	11,5	≈ 110	2,35	4,9	- 9		-30
250 kV	13	≈ 100	2,7	4,8	-11		-21
200 kV	16,5	≈ 87	3,5	4,7	-13		-24
150 kV	24,8	≈ 71	4,85	5,1	- 6	-11	- 5
130 kV	28	≈ 63	5,5	5,1	- 6	- 9	- 6
100 kV	33	≈ 55	6,1	5,4	± 0	- 2	- 5
78 kV	34,5	≈ 46	6,5	5,3	- 2	- 2	- 2
56 kV	31	≈ 40	6,3	4,95	- 8	+ 2	+ 4
45 kV	20	≈ 30	4,2	4,75	-12	-16	- 6

Oft reicht sogar ein direkter Vergleich mit den Kalibrierkurven aus.

Die Tabellen 5 und 6 zeigen die Dosiswerte bei einer Bestrahlung mit inhomogener Röntgenstrahlung (Normalstrahlung), die mit vereinfachten Auswerteverfahren gewonnen wurden. Alle Glasdosimeter sind hierbei mit derselben Dosis von 5,4R bestrahlt worden.

Bei unseren Experimenten ließen sich bei der Dosisermittlung aus der Tiefendosiskurve in erster Näherung folgende Meßgenauigkeiten erzielen:

- Graphische Auswertemethode:
 - erste Abschätzung ca. 5% } Zwei-Strahlenkomponenten-
 - zweite Abschätzung ca. 3% } Gemisch
- Vergleich mit Kalibrierkurven: bis zu 12%
- Ermittlung der ersten HWS: bis zu 16%
- Ermittlung des Meßwertabfalls:
 - bis zu 30%, < 150 kV 6%

Die Meßgenauigkeit der Dosisermittlung ist außerdem von der Art des Strahlengemisches, dem Grad der Inhomogenität und dem Betrag der Dosis, aber auch von der Stabilität und Gleichmäßigkeit der Tiefendosismessung abhängig.

Im Vergleich zu ähnlichen analytischen Meßmethoden, beispielsweise dem filteranalytischen Verfahren der Filmdosimetrie, bietet das hier beschriebene Verfahren offensichtlich folgende Vorteile:

- Bei der kontinuierlichen Registrierung der Tiefendosiskurve wird eine unsichere Extrapolation zwischen 4 Meßwerten vermieden.
- Die Energieabhängigkeit der Dosisempfindlichkeit (Glas: Faktor 6, Film: Faktor 40) führt bei der Korrektur zu wesentlich geringeren Fehlerbreiten.
- Die differentiell Dosisverteilung im Glas läßt sich mit einer besseren Meßgenauigkeit ermitteln als dies bei der fotometrischen Schwärzungsmessung möglich ist.
- Ein Vergleich der Tiefendosiskurve mit der Eichkurve ist über die gesamte Glastiefe und damit genauer möglich.

5. Anwendung der Methode

Die hier beschriebene Meßmethode, die Strahlenqualität und die Dosis einer Quantenstrahlung über die Tiefendosisbestimmung in silberaktivierten Phosphatgläsern zu ermitteln, hat im Strahlenschutz folgende Anwendungen (Ortsdosimetrie bei definierter Strahleneinfallrichtung):

- Die Ermittlung der HWS-Werte sowie des Homogenitätsgrades einer Röntgenbremsstrahlung aus einer medizinischen bzw. technischen Röntgenröhre dient zur Ermittlung der Strahlenqualität und damit auch zur Überprüfung der Röhre sowie der verwendeten Zusatzfilterung.

2. Die Bestimmung der Dosis nach einer vorgegebenen Bestrahlungsdosis kann gleichzeitig zur Überprüfung der Röntgenröhrenleistung sowie des verwendeten Sekundärstandards, bei Einsatz mehrerer Gläser zur Ausmessung des Nutzstrahlenkegels bzw. dessen Gleichmäßigkeit dienen.

3. Nach Exposition des Glasdosimeters in Strahlungs- und Streustrahlungsfeldern an Reaktoren, Heißen Zellen, Beschleunigern oder Röntgenröhren hinter der biologischen Abschirmung läßt sich eine effektive Quantenenergie und eine Dosis ermitteln („Akkumulationslangzeitspektrometer“).

Besonderen Dank schulden wir Herrn Ing. (grad.) B. Burgkhardt für die sorgfältige Kalibrierung und Auswertung der Phosphatgläser.

Literatur

- [1] Kiefer, H. und Piesch, E.: Atompraxis 11/12, Direct Information 10/67 (1967)
- [2] Yokota, R., Nakajima, S. und Sakai, E.: Health Physics 5, 219 (1961)
- [3] Becker, K.: Nucl. Instrum. Meth. 36, 323 (1965)

Anschrift der Verfasser: Priv. Doz. Dr. H. Kiefer und Dipl.-Phys. E. Piesch, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 75 Karlsruhe, Postfach 3640

H. KIEFER, E. PIESCH

Die Ermittlung der Strahlenqualität und der Dosis von Röntgenstrahlung über eine Tiefendosismessung in silberaktivierten Phosphatgläsern

Es wird eine differentielle Fluoreszenzauswertemethode zur Bestimmung der Strahlenqualität und der Dosis einer Röntgenstrahlung mit Hilfe von silberaktivierten Phosphatglasdosimetern beschrieben, bei der der homogene Festkörper kontinuierlich abgetastet wird. Aus der Tiefendosisverteilung im Glas läßt sich bei definierter Strahleneinfallrichtung in einfacher Weise eine effektive Quantenenergie ermitteln, nämlich durch Vergleich mit Kalibrierkurven, aus dem relativen Dosisabfall (Verhältnis der Dosis in einer bestimmten Glastiefe zur Oberflächendosis) und aus der ersten HWS im Glas. Bei Kenntnis der Strahlenqualität kann unter Berücksichtigung der in der jeweiligen Glastiefe vorhandenen Dosisempfindlichkeit die Freiluftdosis ermittelt werden. Die Methode der Dosisermittlung wird am Beispiel eines graphischen Auswerteverfahrens sowie vereinfachter Auswertungen für Zweistrahlkomponenten-Gemische und inhomogene Röntgenbremsstrahlung im Energiebereich 10 bis 300 keV beschrieben. Es konnten Meßgenauigkeiten bis zu 5 bzw. 30% erzielt werden. Die beschriebene Methode kann zur Überprüfung und Kontrolle von medizinischen und technischen Röntgenanlagen (Strahlenqualität, Röhrenleistung) dienen. Das Phosphatglas eignet sich aber auch als „Akkumulations-Langzeitspektrometer“ zur Ausmessung von Nutzstrahlungs- und Streustrahlungsfeldern im Strahlenschutz.

H. KIEFER, E. PIESCH

The Estimation of Radiation Quality and Exposure of X-Rays from the Depth Dose Distribution in Silver-activated Phosphate Glasses

A differential fluorescence evaluation method is described to determine the radiation quality and the exposure of X-rays using silver-activated metaphosphate glasses and scanning continuously the homogeneous solid state detector. In this way it is possible to derive the effective quantum energy from the depth dose distribution in the glass for defined radiation incidences by a comparison with the calibration curves, by a relative dose decrease (ratio of dose reading in a definite glass depth to the dose reading on the surface), and by the first HVL in the glass. With the knowledge of the radiation quality, a free-air exposure may be ascertained by considering the dose sensitivity in the corresponding glass depth. The method of dose determination is explained by employing a graphic evaluation technique as well as simplified evaluations techniques for two component radiation mixtures and inhomogeneous X-rays bremsstrahlung in the energy range of 10 to 300 keV achieving a measuring accuracy of 5 to 30%. The described method is appropriate for the check and control of medical and technical X-ray machines (radiation quality, tube output). The phosphate glass can be used, too, as a long-time accumulation spectrometer to measure radiation and stray radiation fields in radiation protection.

H. KIEFER, E. PIESCH

Détermination de la qualité et la dose d'un rayonnement X à l'aide de dosimètres de verre au phosphate activés à l'argent

Une méthode différentielle d'évaluation par fluorescence est décrite qui sert à déterminer la qualité et la dose d'un rayonnement X à l'aide de dosimètres de verre au phosphate activés à l'argent et qui est caractérisée par un balayage continu des corps solides homogènes. A partir de la distribution de la dose en profondeur dans le verre et pour une direction d'incidence connue du rayonnement, on peut facilement déterminer une énergie quantique effective par une comparaison aux courbes d'étalonnage, par la réduction relative de la dose (rapport de la dose dans une profondeur déterminée du verre à la dose de surface), et par la première couche de demi-atténuation dans le verre. Connaissant la qualité du rayonnement, on peut déterminer la dose dans l'air en tenant compte de la sensibilité à la dose intervenant à la profondeur correspondante d'un verre. La méthode de détection de la dose est décrite pour l'exemple d'un procédé d'évaluation graphique et pour des évaluations simplifiées valables pour des mélanges formés par deux constituants de rayons et le rayonnement X de freinage inhomogène dans le domaine d'énergie de 10 à 300 keV. Des précisions de mesure jusqu'à 5 et 30% respectivement pouvaient être obtenues. La méthode décrite peut être utilisée pour l'inspection et le contrôle d'appareils aux rayons X utilisés dans les secteurs médicaux et techniques (qualité du rayonnement, puissance des tubes). Cependant, le verre au phosphate se prête également à l'utilisation comme «spectromètre d'accumulation à longue échéance» pour mesurer les champs de la radiation utile et diffusée dans le cadre de la protection contre les rayonnements.