Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 64 (1973)

Heft: 20

Artikel: Die Dosimetrie ionisierender Strahlen mit Hilfe von Exoelektronen

Autor: Siegel, V.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915609

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Dosimetrie ionisierender Strahlen mit Hilfe von Exoelektronen

Von *V. Siegel*

537.533.3

Ausgehend von einem kurzen historischen Rückblick und einer qualitativen Beschreibung des Exoelektronen-Effekts wird in dem Übersichtsaufsatz auf die Anwendung der Exoelektronen-Emission in der Dosimetrie von Röntgen- und γ-Strahlen eingegangen. Neben anderen Exoelektronen-emittierenden anorganischen Substanzen werden insbesondere die dosimetrischen Eigenschaften des Berylliumoxids diskutiert, das sich sowohl in Pulverform als auch als keramisches Material als besonders geeignet erwies. In Anlehnung an die dosimetrischen Erfordernisse wird auf die Empfindlichkeit und den Messbereich, auf die Dosisproportionalität, die Reproduzierbarkeit der Messwerte, das Fading und auf das Langzeitverhalten von Exoelektronen-Dosimetern eingegangen. Ausserdem wird eine Darstellung der heute gebräuchlichen Auswertemethoden gebracht. Wenn auch die Forschung auf dem Gebiet der Exoelektronen-Dosimetrie noch sehr jung ist, so zeichnen sich doch schon heute gewisse Vorteile dieser Dosimeter für spezielle dosimetrische Anwendungen ab, so dass es nützlich erscheint, die Arbeiten in dieser Richtung zu verbreitern und zu intensivieren.

Partant d'une courte rétrospective historique et d'une description qualitative de l'effet des exoélectrons, ce résumé s'occupe de l'application de l'émission des exoélectrons dans la dosimétrie des rayons X et γ. Outre d'autres substances inorganiques émettant des exoélectrons, particulièrement les propriétés dosimétriques de l'oxides de béryllium sont discutées ce qui est spécialement approprié non seulement en forme de poudre mais aussi comme matériel céramique. Suivant les exigences dosimétriques, la sensibilité et le domaine de mesure, la proportionnalité des doses, la réproductibilité des valeurs mesurées, le fading et la tenue de longue durée des dosimètres exoélectroniques sont traités. De plus, les méthodes d'évaluation d'usage actuel sont représentées. Même si la recherche sur le domaine des dosimètres exoélectroniques est encore très jeune on peut y voir déjà aujourd'hui de certains avantages pour des applications dosimétriques spéciales, c'est pourquoi il semble être utile d'augmenter et d'intensifier les travaux dans cette direction.

1. Einleitung

Wie *Scharmann* [1][1]) in seinem historischen Rückblick zeigt, reicht die Kenntnis über die Existenz der Exoelektronen bis auf die Jahrhundertwende zurück. So ist z. B. der anfänglich erhöhte Nulleffekt von frisch hergestellten Geiger-Müller-Zählrohren, wie er von *Geiger* oft beobachtet wurde, auf eine spontane Exoelektronen-Emission zurückzuführen. Zwar haben sich *Lauterjung* und *Neuert* [2] mit diesem Effekt beschäftigt, konnten ihn jedoch nicht erklären. Erst *Kramer* [3; 4] untersuchte den Exoelektronen-Effekt systematisch an Metallen, Oxiden und Alkalihalogeniden und erkannte gewisse Parallelitäten zwischen der Emission «kalter» Elektronen (Exoelektronen) und «kalten» Lichts (Lumineszenz) [5]. Auf diesen Beziehungen aufbauend, entwickelte *Hanle* [6] Modellvorstellungen, die die Exoelektronen-Emission und die Lumineszenz qualitativ beschreiben. Ausgehend von eigenen Untersuchungen, versuchte *Bohun* [7], den Elementarmechanismus der «kalten» Elektronenemission an NaCl und NaCl (Ca) in Abhängigkeit von verschiedenen äusseren und inneren Parametern theoretisch zu deuten. In der Folgezeit waren neben *Bohun* [8], *Scharmann* und Mitarbeiter [9; 10], *Holzapfel* [11] und eine Reihe weiterer Wissenschafter um eine theoretische Erklärung des Exoelektronen-Effekts bemüht.

2. Mechanismus der Exoelektronen-Emission

Die theoretische Deutung des Elementarmechanismus für die Emission von Exoelektronen stützt sich im wesentlichen auf das Bändermodell für anorganische kristalline Festkörper, nachdem experimentelle Untersuchungen der Exoelektronen-Emission und Lumineszenz von *Bohun* [12] und von *Lepper* [13] ergeben hatten, dass beide Effekte mit dem Vorhandensein von Gitterstörungen verbunden sind, die als Haftstellen für Elektronen dienen können. Wenn auch von einer theoretischen Klärung des Exoelektronen-Effekts noch nicht gesprochen werden kann, so lässt er sich doch qualitativ beschreiben (Fig. 1). Nach [11] führt die Existenz tiefer Akzeptoren (Elektronenhaftstellen) unterhalb des Leitfähigkeitsbandes (L-Band) und tiefer Donatoren oberhalb des Valenzbandes (V-Band) in der verbotenen Zone, die zunächst neutral sind, zur Möglichkeit, Energie zu speichern. Beim Einstrahlen genügend kurzwelliger elektromagnetischer Strahlung, aber auch geladener Teilchen, gelangen Elektronen aus dem V-Band in das L-Band, wo sie frei beweglich sind, und können von den neutralen Akzeptoren eingefangen werden. Auf diese Weise wird ein Teil der eingestrahlten Energie gespeichert. Führt man dem Kristall weitere Energie z. B. in Form von Wärme zu (Stimulierung), so lassen sich im Prinzip die folgenden Phänomene gleichzeitig beobachten: elektrische Leitfähigkeit, Lumineszenz und Elektronen-Emission. Zur Stimulierung der Exoelektronen muss die durch Temperaturerhöhung der Probe zugeführte thermische Energie grösser sein als die Summe aus Aktivierungsenergie und Austrittsarbeit. Existieren im Kristall mehrere Haftstellen mit unterschiedlicher Aktivierungsenergie, dann beobachtet man beim Aufheizen Emissionsmaxima (Glow-Maxima) bei verschiedenen Temperaturen. Ausserdem hängt die Wahrscheinlichkeit für das thermische Ablösen eines eingefangenen Elektrons vom Gitterschwingungsspektrum am Ort der Haftstellen ab, das seinerseits ebenfalls eine Funktion der Temperatur ist.

Die Emissionsmaxima des BeO in Abhängigkeit von der Temperatur gehen aus Fig. 2 hervor [11]. Beim Aufheizen der mit Röntgenstrahlen bestrahlten Probe mit einer konstanten Aufheizgeschwindigkeit erscheinen ausser einigen Nebenmaxima ein Doppelmaximum (O, V') bei 240 °C und ein zweites Maximum (V) bei 570 °C. Für die Dosimetrie sind beide Maxima deshalb interessant, weil das Maximum bei 240 °C für eine häufigere (z. B. monatliche) Auswertung herangezogen werden könnte, während das Maximum bei der höheren Temperatur für eine z. B. jährliche Kontrollmessung geeignet ist.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

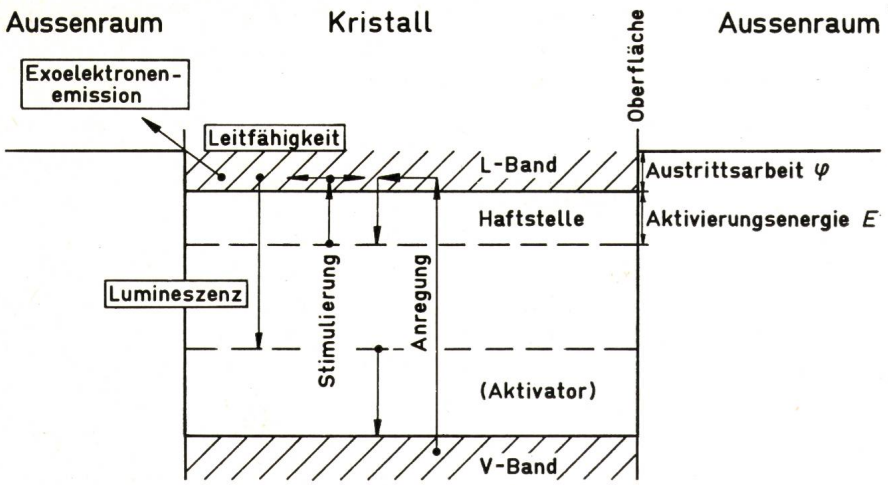


Fig. 1
Niveauschema für das Auftreten von elektrischer Leitfähigkeit, Lumineszenz und Exoelektronen-Emission [11]

3. Anwendung des Exoelektronen-Effekts in der Dosimetrie von Röntgen- und γ-Strahlen

Schon bei seinen ersten Untersuchungen fand *Kramer* [14] an Gips nach Bestrahlung mit Röntgenstrahlen eine direkte Beziehung zwischen der Ionendosis und der Exoelektronen-Ausbeute. Ähnliche Ergebnisse erhielt *Gourgé* [15] an Manganaktivierten $CaSO_4$-Proben. In beiden Fällen und auch bei den Messungen von *Gourgé* und *Hanle* [16] an einer Reihe weiterer Materialien, die nach Anregung mit Elektronen oder Röntgenstrahlen Exoelektronen emittieren, zeigte sich, dass die untersuchten Stoffe für die praktische Dosimetrie ungeeignet sind, weil sie teils zu unempfindlich sind und teils der Verlust an Information infolge Fading ($CaSO_4$) zu gross ist.

Ein neuer Anstoss in Richtung zur Dosimetrie ionisierender Strahlen mit Hilfe von Exoelektronen kam erneut von *Kramer* [17], der diesmal eine Mischung von BeO-Pulver und Graphit als Exoelektronen-Material verwendete. Zwar wurden in der Folgezeit auch andere Materialien auf ihre Eignung als Exoelektronen-Dosimeter untersucht, so von *Puite* und *Arends* [18] dotiertes und undotiertes CaF_2, von *Ziemer* und Mitarbeitern [19] zusätzlich $BaSO_4$ und LiF, letzteres ebenfalls von *Brown* [20] und *Niewiadomski* [21], von *Hanle, Scharmann* und Mitarbeitern [22; 23] eine Reihe oxidischer Gemische und $BaSO_4$ sowie von *Kramer* [24] ein Gemisch aus $SrSO_4$ und Graphit, doch erwies sich bisher Berylliumoxid als das für die Dosimetrie am besten geeignete Material.

Aus der Fülle der vorliegenden Messergebnisse sollen im folgenden nur die ausgewählt werden, die die Dosimetrie von Röntgen- und Gammastrahlen betreffen. Hierbei wird zu prüfen sein, inwieweit die Forderungen von seiten des praktischen Strahlenschutzes mit Exoelektronen-Dosimetern auf der Basis von BeO erfüllt werden können. Hinzugezogen werden auch an anderen Materialien erzielte Ergebnisse, sofern diese zum Verständnis des Exoelektronen-Effekts beitragen.

3.1 Empfindlichkeit und Messbereich

Bereits die ersten Messungen von *Kramer* [25] an $CaSO_4$-Proben zeigten, dass nach Röntgenbestrahlung die Exoelektronen-Ausbeute schon bei einer geringen Ionendosis sehr gross ist. An frisch hergestellten Gipsproben, die wenige Stunden der natürlichen Umgebungsstrahlung ausgesetzt waren, konnte *Kramer* [26] einen deutlichen Messeffekt beobachten, und er schätzte die untere Nachweisgrenze in seinem Falle auf 0,764 nC/kg ($3 \cdot 10^{-6}$ R). Für Berylliumoxid wird eine um etwa zwei Grössenordnungen geringere Empfindlichkeit angenommen. Eine Steigerung der Empfindlichkeit von BeO-Keramik-Proben erreichen *Becker* und Mitarbeiter [27; 28] einmal mit Hilfe einer mehrstündigen thermischen Vorbehandlung bei 1400 °C (Fig. 3), zum anderen durch Bedampfen der Oberfläche mit Platin, Palladium oder Gold unter der Annahme, dass die Exoelektronen-Ausbeute ansteigt, wenn die aktive Oberflächenschicht leitfähig ist. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen

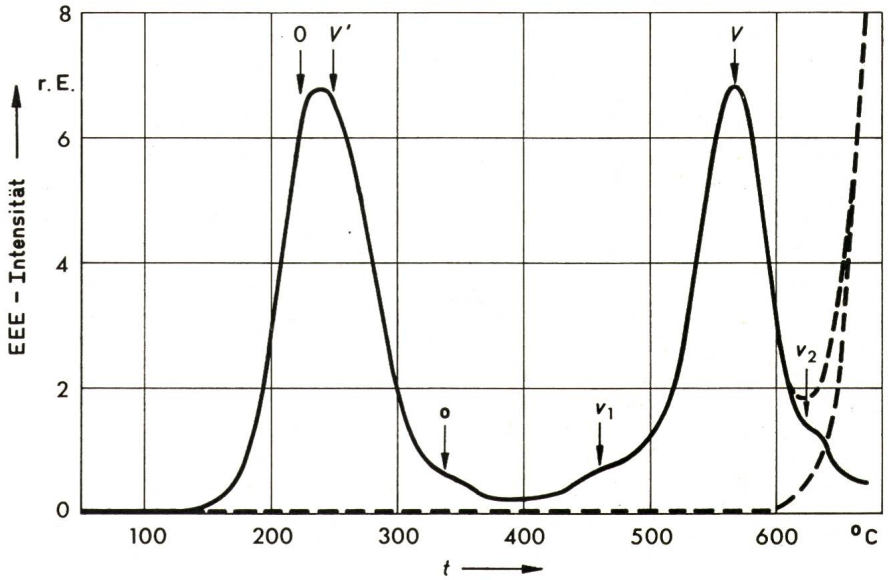


Fig. 2
Emissionsmaxima des Berylliumoxids bei einer Aufheizgeschwindigkeit von 1 K/s [11]

t	Temperatur
V, V'	Hauptmaxima der Volumenhaftstellen
v_1, v_2	Nebenmaxima der Volumenhaftstellen
O, o	Haupt- und Nebenmaximum der Oberflächenhaftstellen

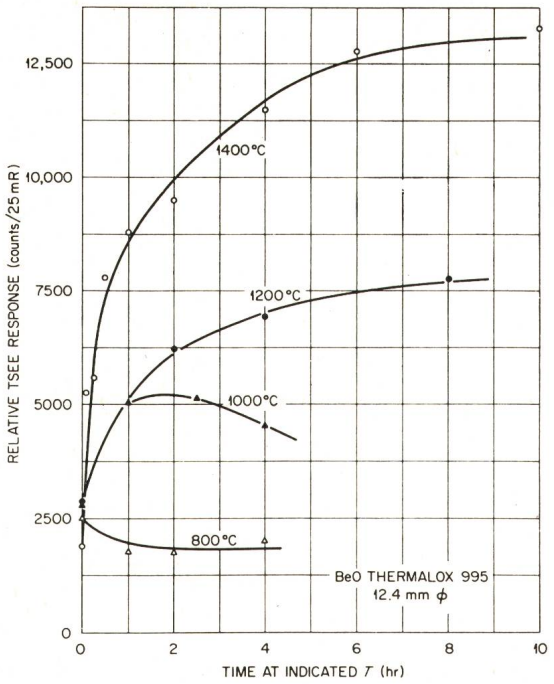


Fig. 3
Exoelektronen-Ausbeute von BeO-Keramik-Proben als Funktion der thermischen Vorbehandlungszeit *T*, in Luft bei verschiedenen Temperaturen [27]

Robinson und *Oberhofer* [29] bei Goldbedeckung (200 und 50 μg/cm²) von BeO-Keramik-Proben. Einer Verdoppelung der Null-Zählrate von 180 min^{-1} entspricht eine untere Nachweisgrenze von 1,3 μC/kg (0,5 mR). Einen anderen Weg beschreiten *Regulla* und Mitarbeiter [30], die BeO-Keramik-Scheibchen mit Lithium aktivieren. Die untere gemessene Nachweisgrenze liegt hier bei 2,58 nC/kg (10^{-5} R) (Fig. 4). Umfangreiche Messungen von *Kriks* [31; 32] an BeO-Pulver/Graphit-Mischungen zeigen, dass man die Empfindlichkeit derartiger Proben steuern kann, indem man die Mischungsanteile variiert. Bei einer Unsicherheit von ±10 % für den Mittelwert aus 6 Einzelmessungen und mit der von *Kriks* und *Schaare* [33] beschriebenen Messanordnung liegt die untere Nachweisgrenze für reines BeO-Pulver bei 0,516 μC/kg (2 mR) und für 15 % BeO mit 85 % Graphit (Massenanteile) bei 12,9 μC/kg (5 mR) (Fig. 5).

Die Ausheizkurven in Fig. 6 zeigen die mit der Ionendosis von γ-Strahlen des ^{60}Co ansteigende Exoelektronen-Ausbeute einer unbehandelten BeO-Keramik-Probe. Das Integral unter dem Ausheizmaximum bei einer Ionendosis von 2,6 μC/kg (10 mR) hebt sich so deutlich vom Nulleffekt ab, dass auch noch eine Ionendosis von 0,26 μC/kg (1 mR) mit ausreichender Sicherheit gemessen werden kann.

Neben der hohen Empfindlichkeit besitzen BeO-Dosimeter einen weiten linearen Bereich der Exoelektronen-Ausbeute in Abhängigkeit von der Ionendosis der Photonenstrahlen. Nach *Kriks* [34] wird bis zu einer mit γ-Strahlen des ^{137}Cs erzeugten Ionendosis von 516 mC/kg (2000 R) an einer Mischung von 15 % BeO-Pulver mit 85 % Graphit keine Abweichung von der Dosisproportionalität beobachtet. *Crase* und Mitarbeiter [35] haben BeO-Keramik-Proben mit γ-Strahlen der ^{60}Co bestrahlt und stellen für das Ausheizmaximum bei 325 °C eine Sättigung fest (Fig. 7), die bei etwa 2,58 C/kg (10^4 R) liegt.

Aus den bisher bekannten Messungen an sensibilisierten BeO-Keramik-Dosimetern [30] und der Proportionalität zwischen Exoelektronen-Ausbeute und Ionendosis bis zu etwa 2,58 C/kg (10^4 R) [35] an unbehandelten BeO-Keramik-Proben folgt, dass man mit einer Kombination beider Dosimeter theoretisch einen Messbereich von 9 Grössenordnungen erfassen kann.

3.2 Dosisproportionalität

Dosisproportionalität liegt vor, wenn in der von *Kramer* [25] beobachteten Beziehung $E = J^{\alpha}$ zwischen der Exoelektronen-Ausbeute E und der Ionendosis J der Exponent $\alpha = 1$ ist. *Kramer* [26] erhält an Mischungen von $CaSO_4$ mit Graphit und von BeO mit Graphit Proportionalität, wenn der Graphitanteil grösser als 20 % ist. Für die beobachtete Abweichung von der Proportionalität werden Aufladungseffekte auf der Oberfläche des hochohmigen Exoelektronen-Materials verantwortlich gemacht. So ist für $CaSO_4$ mit Graphit (Fig. 8) $\alpha < 1$, Kurven 4 und 5, wenn der $CaSO_4$-Anteil 91 % bzw. 100 % beträgt. Bei einem Graphitanteil von 20 bis 80 % verlaufen dagegen die Kurven 1 bis 3a sowie 6 und 7 unter einem Winkel von 45° gegen die Dosisachse, wobei sie sich mit abnehmendem Graphitanteil in Richtung zu höheren Empfindlichkeiten hin verschieben. Eine Dosisproportionalität erhält *Kriks* [32] für verschiedene Mischungen von BeO-Pulver mit Graphit (Fig. 9), wobei auch die Kurve für reines BeO unter 45° verläuft. Auch die Messungen von *Regulla* und Mitarbeitern [30] (vgl. Fig. 4) an Li-dotierten BeO-Keramik-Proben ergeben eine dosisproportionale Exoelektronen-Ausbeute, während dies für Gold-bedampfte BeO-Keramiken nach Messungen von *Becker* [28] nicht der Fall ist. Wie aus Fig. 10 zu ersehen ist, nimmt die Empfindlichkeit der Proben mit wachsender Ionendosis ab. Es ergibt sich zwar im doppelt-logarithmischen Maßstab eine Gerade für die Empfindlichkeit als Funktion der Ionendosis, aber keine direkte Dosisproportionalität. Diese wird um so eher erreicht, je stärker die Metallbedeckung, d. h. je grösser die Leitfähigkeit der Oberfläche ist [36]. *Rasp* und *Siegel* [37] variierten die Aufheizgeschwindigkeit bei BeO-Keramik-Proben mit nicht behandelter Oberfläche während der thermischen Stimulierung (Fig. 11). Sie beobachteten, dass sich die Exoelektronen-Emission der angestrebten Dosisproportionalität um so mehr nähert, je langsamer die Probe aufgeheizt wird, obwohl die Oberflächen-Leitfähigkeit nicht verändert wurde.

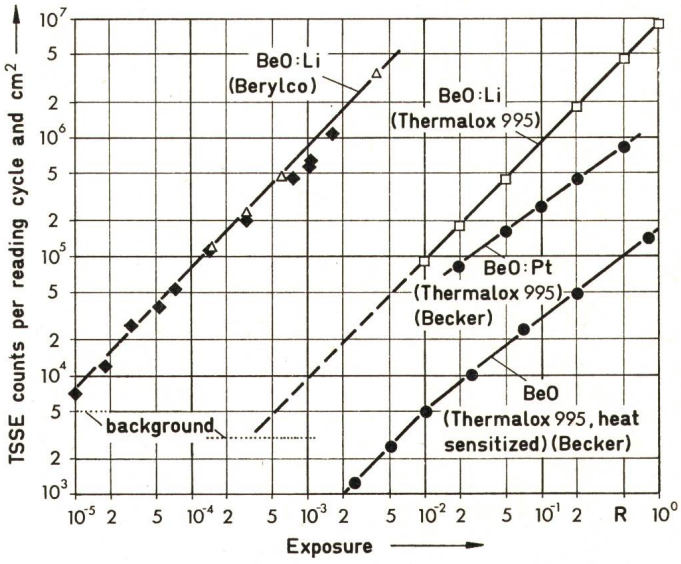


Fig. 4
Exoelektronen-Emission verschieden vorbehandelter BeO-Keramik-Proben als Funktion der Ionendosis
(γ-Strahlen des ^{60}Co) [30]

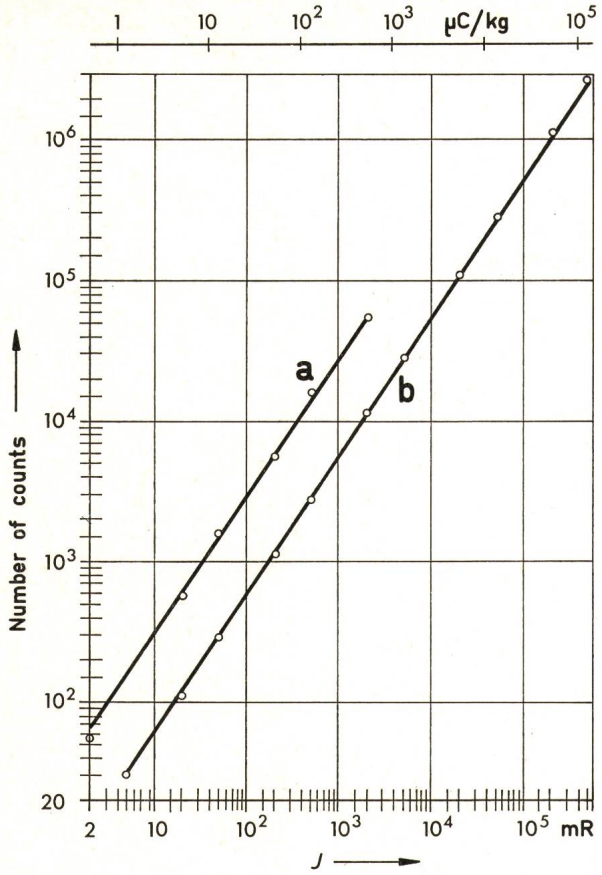


Fig. 5
Exoelektronen-Emission in Abhängigkeit von der Ionendosis J
Kurve a: reines BeO-Pulver
Kurve b: 15 % BeO-Pulver/85 % Graphit [32]

Wenn auch die erwünschte Dosisproportionalität nicht in allen Fällen erreicht wird, so ist es für die Dosimetrie jedoch notwendig, dass der Exponent $\alpha \leqq 1$ in der Beziehung $E \approx J^{\alpha}$ bei wiederholten Messungen konstant bleibt.

3.3 Energieabhängigkeit

Zur Exoelektronen-Emission können nur diejenigen Elektronen beitragen, deren Haftstellen sehr nahe an der Oberfläche liegen. Nach [11] soll diese Schicht nur 50 bis 100 Å dick sein. Für derartig dünne Schichten ist eine direkte Wechselwirkung der Photonenstrahlung mit der darin enthaltenen Materie sehr unwahrscheinlich. Dagegen spielt das umgebende Material eine grosse Rolle, in dem auf Grund des Photo- und Compton-Effekts Sekundärelektronen erzeugt werden, die eine Haftstellenbesetzung im Exoelektronen-aktiven Stoff induzieren. Demzufolge hängt die Wahrscheinlichkeit für eine Besetzung der Haftstellen, insbesondere im Bereich, wo der Photoeffekt vorherrscht, von der Kernladungszahl Z des umgebenden Materials und von der Reichweite der Sekundärelektronen in ihm ab. Eine weitgehend energieunabhängige Proportionalität zur Ionendosis ist dann zu erwarten, wenn die effektive Kernladungszahl dieses Materials etwa gleich der von Luft mit $Z^* = 7{,}6$ ist. Dies trifft für Berylliumoxid und Graphit angenähert zu.

Die Verminderung der Exoelektronen-Ausbeute bei kleinen Photonenenergien hängt damit zusammen, dass der Massenabsorptionskoeffizient des umgebenden Materials, bezogen auf den von Luft bei Photonenenergien unterhalb 200 keV, kleiner wird. Bezogen auf die Gammastrahlung der ^{60}Co (mittlere Energie 1,25 MeV) fällt deshalb die Exoelektronen-Ausbeute bei einer γ-Strahlen-Energie von 100 keV auf 80 % und bei 20 keV auf 40 % ab [34].

Eine ähnliche, aber nicht so stark ausgeprägte Abhängigkeit der Exoelektronen-Emission von der Photonenenergie bei gleicher Ionendosis zeigen erste Messungen von *Kramer* [17] (Fig. 12, rechte Ordinate) an einer Mischung aus 45 % BeO und 55 % Graphit. *Regulla* und Mitarbeiter [30] vergleichen die Energieabhängigkeit von gesintertem Berylliumoxid, das mit Lithium aktiviert war, mit der des LiF-Thermolumineszenz-Dosimeters TLD-100 (Fig. 13). Mit eingezeichnet ist nach Messungen von *Becker* [28] die Energieabhängigkeit von BeO-Keramik-Proben, die mit Palladium bedampft waren (etwa 60 μg/cm²). Das Ansteigen der Empfindlichkeit im Energiebereich der Photonen von 20 bis 200 keV ist auf die starke Änderung des Massenabsorptionskoeffizienten τ/ϱ für den Photoeffekt am Palladium relativ zu dem für Luft zurückzuführen, der sich etwa proportional zu Z^4 verhält (Z Ordnungszahl).

Aus den voraufgegangenen Überlegungen und Messungen folgt, dass das BeO mit einer effektiven Kernladungszahl von 6,6 ein annähernd luftäquivalentes Material ist, mit dem eine weitgehend energieunabhängige Messung der Ionendosis von Photonenstrahlen bis zu Energien von 100 keV herab möglich ist. Allerdings muss auch die Kapselung des BeO aus annähernd luftäquivalentem Material bestehen.

3.4 Reproduzierbarkeit der Messwerte

Die erforderliche Messgenauigkeit in der Personendosimetrie richtet sich nach der Grösse der zu bestimmenden Dosis. Während im Bereich niedriger Dosen die Messunsicherheit relativ gross sein kann, muss sie bei der Ermittlung der maximal zulässigen 13-Wochen-Dosis oder der Jahresdosis eingeengt werden, weil sich bei Überschreitungen dieser Werte gesetzliche

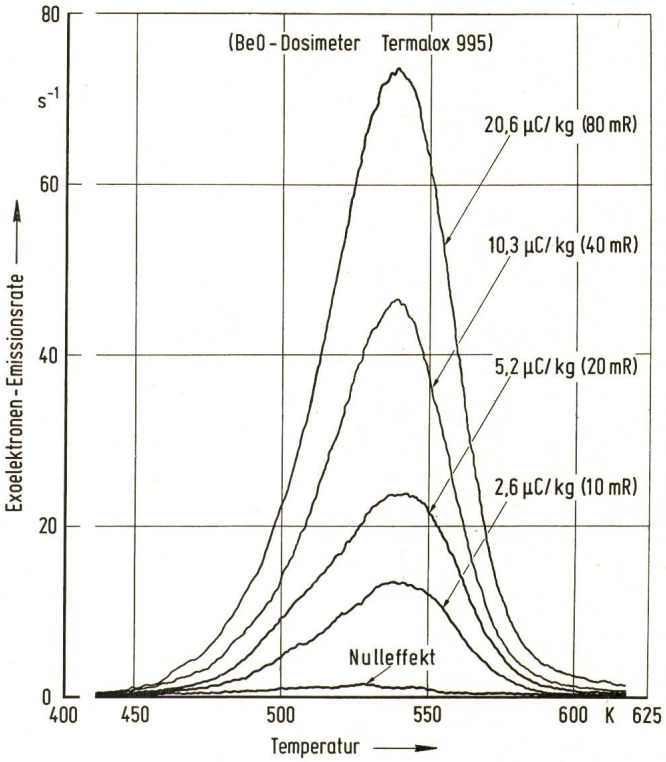
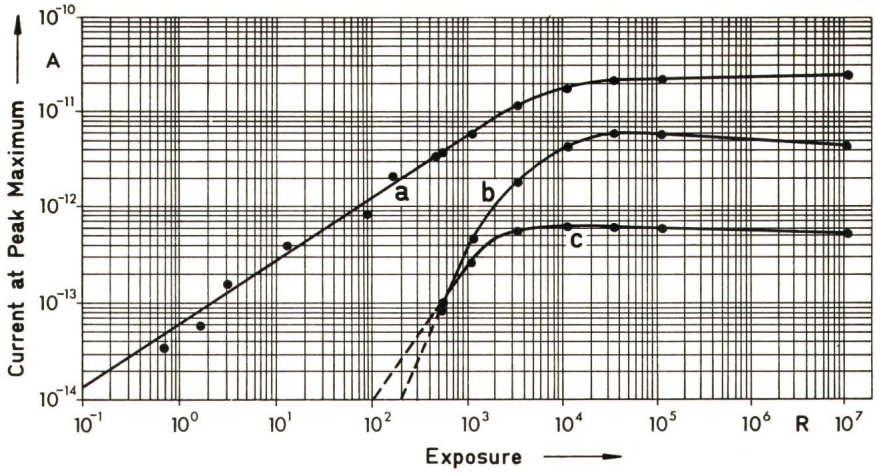


Fig. 6
Ausheizkurven einer BeO-Keramik-Probe bei verschiedenen Ionendosen
(γ-Strahlen des ^{60}Co)

Fig. 7
Exoelektronen-Emission von BeO-Keramik als Funktion der Ionendosis von γ-Strahlen des ^{60}Co
Parameter sind die Ausheizmaxima bei 325 °C (Kurve *a*), 450 °C (Kurve *b*), 535 °C (Kurve *c*) [35]



Konsequenzen ergeben können [38]. Im halb-letalen und letalen Bereich ist dagegen vom medizinischen Standpunkt aus eine möglichst genaue Dosisbestimmung notwendig. Für den Bereich oberhalb 3 rd wird deshalb eine Messunsicherheit von höchstens ±25 % bis ±40 % gefordert.

Diese Bedingungen dürften BeO-Exoelektronen-Dosimeter erfüllen, wenn man die Reproduzierbarkeit der Messwerte für ein kalibriertes Exemplar betrachtet. An BeO(Li)-Keramik-Proben, die vorher einer Oxidations- und Hydrationsbehandlung unterworfen wurden, erhalten *Regulla* und Mitarbeiter [30] nach 15 Auswertungen eine Standardabweichung für den Mittelwert von 4,5 %. *Kriks* [32] schätzt die Unsicherheit des Mittelwerts aus 66 Messungen an sechs ausgesuchten Proben (15 % BeO-Pulver mit 85 % Graphit) zu 10 % ab. *Becker* und Mitarbeiter [28] untersuchten an einem BeO-Keramik-Scheibchen, das mit Edelmetallen bedampft war, die Reproduzierbarkeit der Messwerte und erhielten eine Standardabweichung des Mittelwertes von 10 bis 20 %. Die Autoren diskutieren die Ursachen für diese relativ grossen Abweichungen. Erneute Messungen an einer sorgfältig vorbehandelten Probe erbrachten bei 20 aufeinanderfolgenden Messungen für den Mittelwert eine Standardabweichung von 2 %.

Ohne auf die speziellen Probleme einer geeigneten Vorbehandlung des gesinterten Berylliumoxids einzugehen, die zum Ziel haben, auf sehr unterschiedlichen Wegen die Reproduzierbarkeit der Messwerte zu verbessern, soll hier nur festgestellt werden, dass es möglich ist, zumindest die Exemplarstreuung zu verbessern.

Für den praktischen Gebrauch ist es aber notwendig, dass sich auch die Unsicherheit der Messwerte vieler Exemplare in den oben geforderten Grenzen hält. *Kriks* [34] hat an etwa 80 Proben aus BeO-Pulver und Graphit mit unterschiedlichem Anteil der Komponenten die Exoelektronen-Ausbeute bei Ionendosen von 0,516 μC/kg bis 0,13 C/kg (2 mR bis 500 R) gemessen (vgl. Fig. 9) und die Standardabweichung der auf 1 R genormten Messwerte für die übrigen Messpunkte berechnet. Ohne Berücksichtigung der Zählstatistik, die bei kleinen Impulszahlen, d. h. bei kleinen Ionendosen, erhebliche Messunsicherheiten verursachen kann, ergibt sich eine Standard-

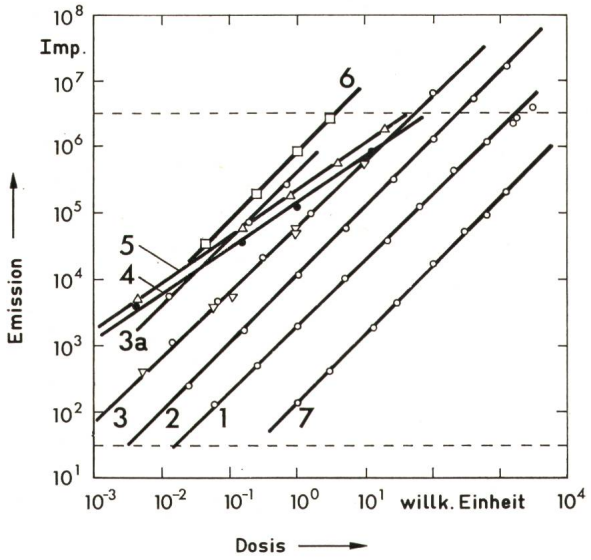


Fig. 8
Exoelektronen-Emission von Mischungen aus $CaSO_4$ mit Graphit als Funktion der Ionendosis von Röntgenstrahlen [25]
Kurven *1* bis *3a* und *6*: 20,5...83 % $CaSO_4$
Kurven *4* und *5*: 91 und 100 % $CaSO_4$
Kurve *7*: 20,5 % $CaSO_4$ bei optischer Stimulierung

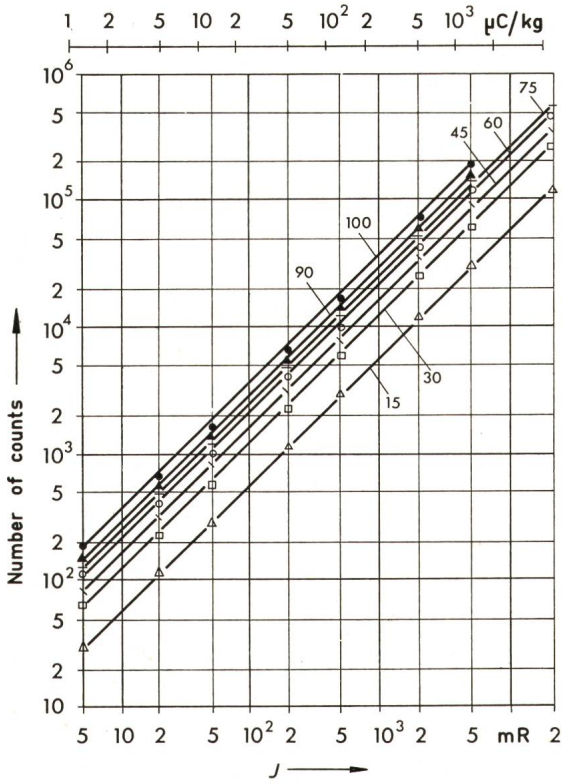
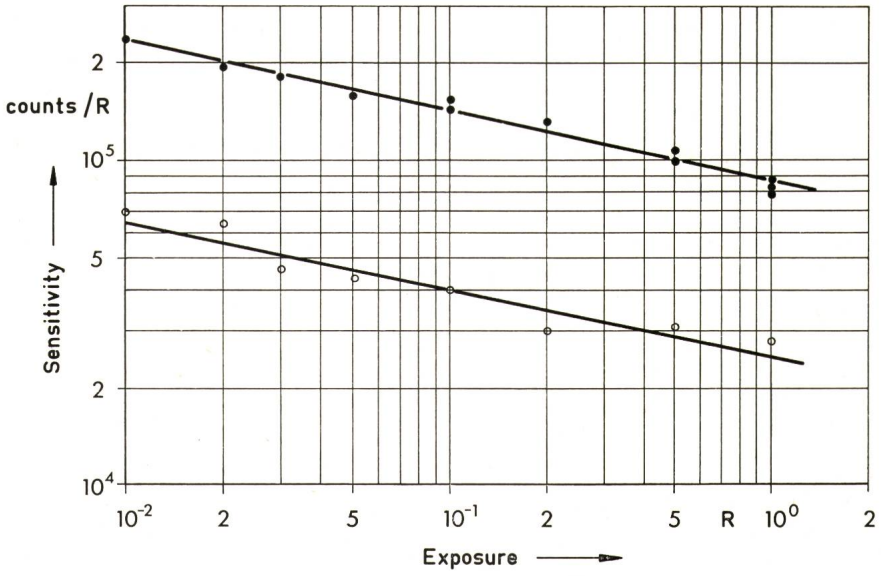


Fig. 9
Exoelektronen-Emission von Mischungen aus BeO-Pulver mit Graphit als Funktion der Ionendosis J von γ-Strahlen des ^{60}Co
Parameter ist der BeO-Massenanteil in Prozent [32]

Fig. 10
Empfindlichkeit von BeO-Keramik-Proben, die mit Gold bedampft waren, als Funktion der Ionendosis von γ-Strahlen

obere Kurve: Ausheizmaximum bei 175...375 °C

untere Kurve: Ausheizmaxima bei 375...600 °C [28]



abweichung von 4 %. Eigene Messungen [39] an BeO-Keramik-Scheibchen, die nach Temperung bei verschiedenen Temperaturen schnell oder langsam abgekühlt wurden, deren Oberfläche mit Quarzsand oder mit Ultraschall gereinigt war oder die verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten ausgesetzt waren, zeigten relativ grosse Schwankungen der Messwerte nach Bestrahlungen mit gleichen Ionendosen. So schwankte die Standardabweichung der Einzelmessung für Gruppen von 20 Proben zwischen 73 und 45 % und die Standardabweichung des aus 20 Messungen gebildeten Mittelwerts zwischen 18 und 10 %. Zwar kann man die Reproduzierbarkeit verbessern, wenn man gewisse Parameter bei der Vorbehandlung und bei der Auswertung der Proben konstant hält, aber das Ergebnis bleibt bis heute unbefriedigend im Hinblick auf den praktischen Gebrauch einer grossen Zahl keramischer Exoelektronen-Dosimeter.

Offenbar hängt die schlechte Reproduzierbarkeit der Messwerte bei den BeO-Keramik-Proben mit dem unterschiedlichen Gehalt an verschiedenen Fremdstoffen zusammen [40]. Dies wird durch eigene Beobachtungen an etwa 300 Keramik-Proben bestätigt, die sich bezüglich ihrer Exoelektronen-Ausbeute bei gleicher Ionendosis in mehrere Gruppen mit jeweils gleichartigen Eigenschaften einteilen lassen.

3.5 Fading

Ein Verlust an Information dadurch, dass die Haftstellen schon bei den üblichen Umgebungstemperaturen entleert werden, ist um so unwahrscheinlicher, je höher die Temperatur für das nutzbare Ausheizmaximum liegt. Für BeO-Pulver liegt das untere Ausheizmaximum bei etwa 270 °C und für BeO-Keramik bei etwa 325 °C. Messungen von *Kramer* [17] zeigen, dass an BeO/Graphit-Mischungen mit einem merklichen Fading erst bei 120 °C zu rechnen ist (Fig. 14). Dieses Ergebnis wird von *Kriks* [34] bestätigt, wobei im Gegensatz zu *Kramer* die Proben nicht bei erhöhter Temperatur bestrahlt wurden, sondern bei 20 °C. Auch die Untersuchungen von *Becker* und Mitarbeitern [28] an mit Gold bedampften BeO-Keramik-Proben (Fig. 15) zeigen, dass auch in verschiedenen Gasatmosphären ein Fading erst oberhalb 100 °C wesentlich wird.

Während also dieses Temperatur-Fading erst oberhalb etwa 100 °C auftritt, kann Luftfeuchtigkeit auch schon bei 20 °C ein Fading bewirken. Insbesondere werden bei sehr hohen relativen Luftfeuchtigkeiten (Fig. 15) [28] offenbar durch Adsorptions-Desorptions-Prozesse auf der Oberfläche Haftstellen entleert, so dass ein Teil der gespeicherten Information verlorengeht. Da aber bei der Personendosimetrie im allgemeinen nicht mit höherer als der Körpertemperatur zu rechnen ist, braucht lediglich mit Hilfe einer geeigneten Kapselung verhindert zu werden, dass hohe relative Luftfeuchtigkeiten die akkumulierte Information verfälschen.

3.6 Langzeitverhalten und Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen

Über das Langzeitverhalten von BeO-Dosimetern liegen nur wenige Daten vor, weil man sich bisher vor allem um eine bessere Reproduzierbarkeit der Messwerte bemüht hat. Vom Fading und von der Beständigkeit des Materials her dürfte aber einer langdauernden Wiederverwendung nichts im Wege stehen, wenn insbesondere bei der Auswertung gewisse Vorsichtsmassnahmen beachtet werden.

So führte eine 100malige Wiederverwendung einer BeO(Li)-Probe nach *Regulla* und Mitarbeitern [29] sowie *Boros* [41] zu keiner wesentlichen Änderung ihrer Empfindlichkeit. Auch

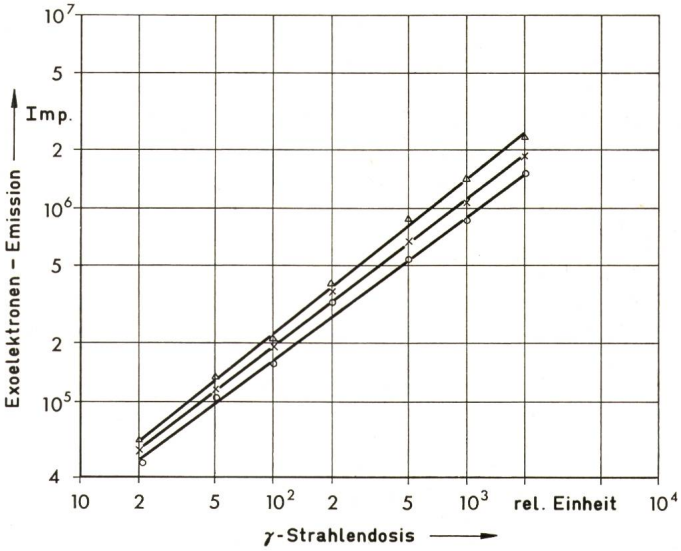


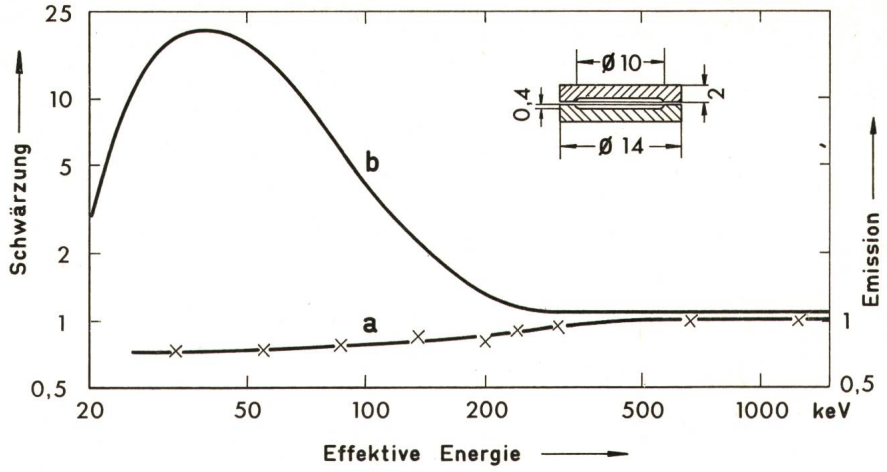
Fig. 11
Exoelektronen-Emission von BeO-Keramik als Funktion der Ionendosis von γ-Strahlen bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten [37]

△ Aufheizgeschwindigkeit 0,1 °C/s
× Aufheizgeschwindigkeit 0,5 °C/s
○ Aufheizgeschwindigkeit 2,0 °C/s

Fig. 12
Abhängigkeit der Exoelektronen-Emission von der Photonenenergie bei gleicher Ionendosis

Kurve *a:* 45 % BeO-Pulver mit 55 % Graphit auf Graphit-Träger;

Kurve *b:* Filmdosimeter [17]



Becker und *Robinson* [42] beobachteten an Proben aus 50 % BeO-Pulver und 50 % Graphit keine Änderung des Nulleffekts und der Empfindlichkeit nach einer Reihe von Bestrahlungen und Temperungen der Proben. Zum selben Ergebnis kommt auch *Kriks* [34], stellt aber fest, dass sich die Haftung des aufgeschlämmten BeO-Pulvers auf der Graphitunterlage nach einer mehr oder minder grossen Zahl von Auswertungen verschlechtert, so dass sich das Pulver ablöst. Wegen der besseren Reproduzierbarkeit der Messwerte von Dosimetern auf der Grundlage von BeO-Pulver sollte versucht werden, es dauerhaft an die Unterlage zu binden. Andernfalls könnte die Verwendung von BeO-Pulver auch durch seine Toxizität behindert werden.

Wie bereits erwähnt, müssen BeO-Dosimeter während der Exposition vor höheren Temperaturen und einer hohen Luftfeuchtigkeit geschützt werden. Auch eine starke Belichtung kann zu einem Fading führen, wie Messungen von *Kramer* [17] zeigen. Der Verlust an Information beträgt bei einer Belichtung mit Sonnenlicht von 10^2 lx · min 2 % und bei 10^5 lx · min 46 %. Für das Fading ist Licht mit einer Wellenlänge unterhalb 500 nm verantwortlich. Dagegen bewirkt das künstliche Licht bei Belichtungszeiten, wie sie für eine Routinemessung benötigt werden, kein wesentliches Fading.

Da sich der Exoelektronen-Effekt in einer sehr dünnen Oberflächenschicht abspielt, reagiert er besonders empfindlich auf mechanische und chemische Einflüsse. Das lässt sich mit

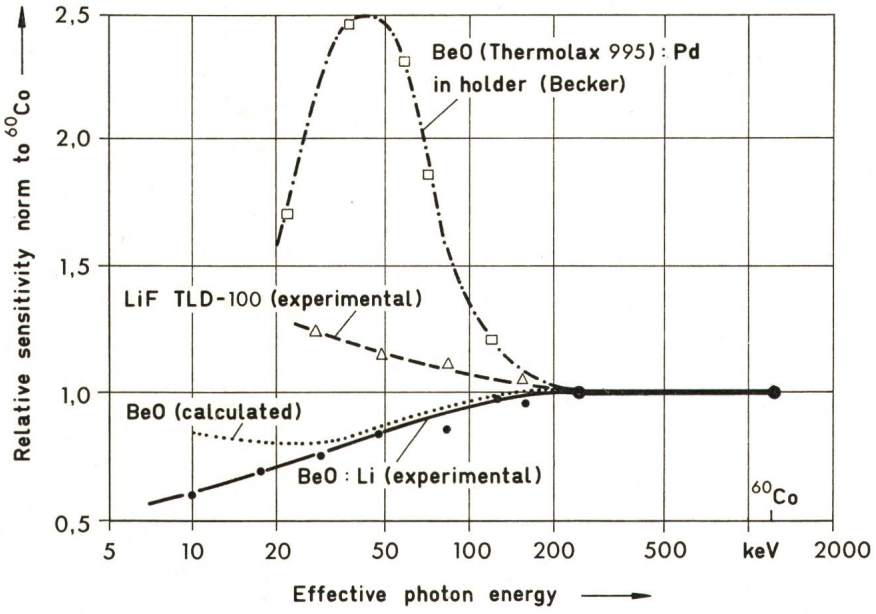


Fig. 13
Die auf die γ-Strahlung des ^{60}Co bezogene Energieabhängigkeit der Exoelektronen-Emission von BeO-Keramik-Proben

Zum Vergleich ist die Energieabhängigkeit der Thermolumineszenz für das LiF-Dosimeter TLD-100 eingezeichnet [30]

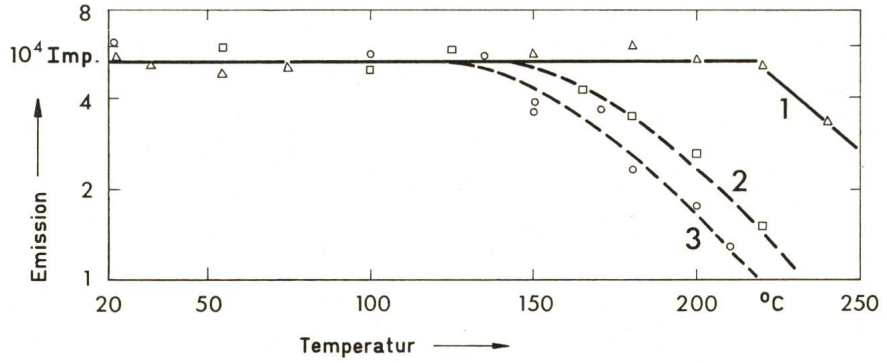


Fig. 14
Fading der Exoelektronen-Emission von Proben aus 45 % BeO-Pulver mit 55 % Graphit in Abhängigkeit von der Temperatur

Kurve *1:* Auswertung der Proben unmittelbar nach der Bestrahlung mit Röntgenstrahlen

Kurve *2:* Auswertung nach einer Wartezeit von 10 min

Kurve *3:* Wartezeit 60 min [17]

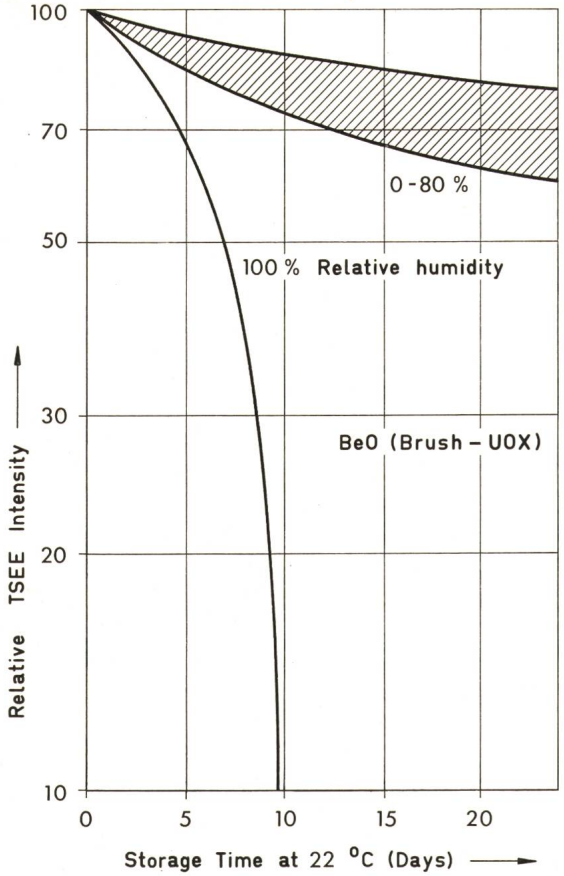


Fig. 15
Fading der Exoelektronen-Emission von Proben aus BeO-Pulver mit Graphit auf Graphit-Trägern bei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten bei 22 °C [28]

Hilfe einer geeigneten Kapselung vermeiden. Insbesondere darf die Oberfläche nicht berührt werden, da schon der kleinste Kratzer zur Emission von Tribo-Exoelektronen führt, die das Messergebnis völlig verfälschen können. Eigene Messungen an gesinterten BeO-Scheibchen haben gezeigt, dass Tribo-Exoelektronen schon auftreten, wenn der Rand des Scheibchens beim Einbringen in den Zähler den Präparateschieber berührt. Aus diesem Grunde deckt im Zähler ein Ring die Randzone ab.

Bei einem sorgfältigen Umgang mit den Exoelektronen-Dosimetern, einer spannungs- und stossunempfindlichen Kapselung, die auch Schutz gegen die Luftfeuchtigkeit bietet, und einer regelmässigen Kalibrierung dürfte eine wiederholte sichere Bestimmung der Personendosis möglich sein. Daneben sind andere Dosimeterformen denkbar, bei denen die oberflächenaktive Schicht dauernd geschützt ist, so die von *Kramer* [26] vorgeschlagenen Röhrchen-Dosimeter, bei denen die aktive Schicht auf die innere Wand eines Zylinders aufgetragen ist.

3.7 Auswertemethoden

Wegen der sehr geringen Energie, mit der die Exoelektronen aus der Oberfläche austreten, können sie nur in fensterlosen Zählern nachgewiesen werden. Offene Sekundärelektronen-Vervielfacher scheiden jedoch für eine routinemässige Auswertung aus, da ihre Handhabung schwierig und zeitraubend ist.

Ohne auf die ersten Messungen von *Kramer* [14] einzugehen, der zunächst ein Elektrometer benutzte, sollen im folgenden nur die heute gebräuchlichen Zählertypen und Auswerteapparaturen erläutert werden. Ausgehend von den in der Kernstrahlungsmesstechnik bekannten Geiger-Müller-Zählrohren, werden für den Nachweis von Exoelektronen fensterlose Modifikationen verwendet, die mit verschiedenen Gasgemischen durchspült werden und im Auslösebereich arbeiten. Varianten mit einem parallel zum scheibenförmigen Dosimeter gespannten Zähldraht werden u. a. von *Kramer* [25], *Holzapfel* [11], *Becker* [43], *Sujak* [44] sowie *Oberhofer* und *Robinson* [45] beschrieben. *Bohun* [46], *Spurny* und Mitarbeiter [47], *Brown* [20] sowie *Engelland* [48] verwenden dagegen einen Methandurchflusszähler mit einer Spitzenanode. Nachteilig bei den vorgenannten Zählern ist ihre grosse Totzeit, die 200 bis 300 µs beträgt. Damit ist ihr Anwendungsbereich stark beschränkt, weil bei höheren Zählraten merkliche Zählverluste auftreten. Auch eine Verkürzung der Totzeit auf 50 µs, wie sie *Eckey* [49] in seinem heizbaren Zählrohr mit einer Schlingenanode erreicht, beseitigt diesen Nachteil nicht ganz.

Wesentlich bessere Zähleigenschaften besitzen Gasdurchflusszähler, die im Proportionalitätsbereich betrieben werden, da ihre geringe Totzeit vernachlässigt werden kann. So entwickelte *Attix* [50] aus einem 2π-Durchflusszähler einen Proportionalzähler für den Nachweis von Exoelektronen, der als Anode eine Drahtschleife besitzt (Fig. 16). Beim Entwurf des Zählers von *Kriks* und *Schaare* [33] diente als Vorlage ein 4π-Proportionalzähler für die Absolutmessung radioaktiver Nuklide (Fig. 17). Die Auflösungszeit ihrer Messanordnung liegt bei 2 µs, so dass es möglich ist, Zählraten bis zu $5 \cdot 10^4\ s^{-1}$ ohne merkliche Zählverluste zu verarbeiten. Dagegen kommen *Crase* und Mitarbeiter [35] bei ihren Messungen an BeO-Dosimetern bis in den Sättigungsbereich der Haftstellenbesetzung hinein auf die elektrometrische Methode zur Strommessung zurück (Fig. 18). Bei Stromstärken von 10^{-14} bis 10^{-10} A erfassen sie unter den dargestellten Messbedingungen einen Bereich der Energiedosis von 3 mJ/kg bis 10^5 J/kg (0,3 bis 10^7 rd). *La Rivière* und *Tochilin* [51] beschreiten einen anderen Weg, indem sie eine Parallelplattenkammer als Ionisationskammer betreiben und so bei Stromstärken von 10^{-13} bis $3 \cdot 10^{-10}$ A

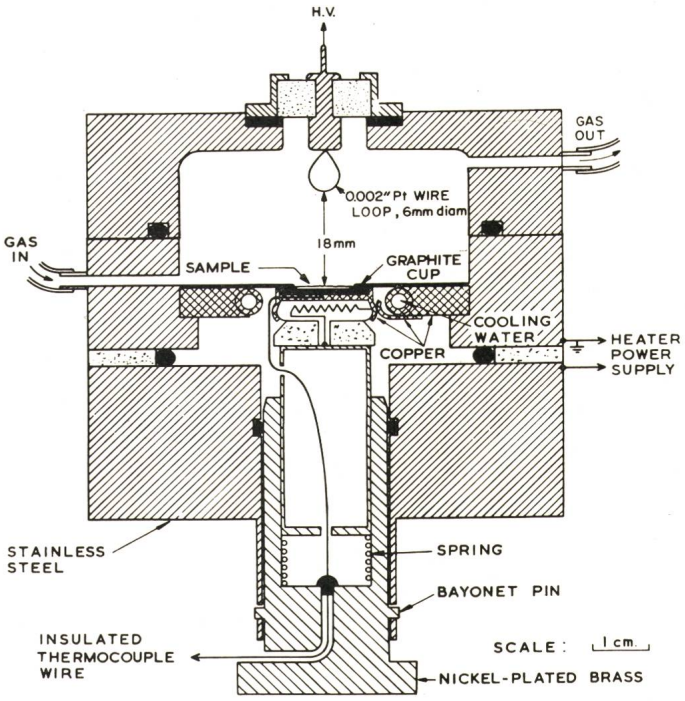


Fig. 16
Schematische Darstellung eines Gasdurchfluss-Proportionalzählers für den Nachweis von Exoelektronen [50]

Ionendosen von 2,58 mC/kg bis 2,58 C/kg (10 bis 10^4 R) messen können.

Die Vorrichtung zum Ausheizen der Proben ist gewöhnlich mit dem Zähler direkt verbunden, wobei bei den verschiedenen Bauarten auf einen guten Wärmekontakt zwischen der Heizfläche und der Probe geachtet wird. Obwohl *Kriks* [34] an Proben aus BeO-Pulver und Graphit zeigen konnte, dass die Ausheizgeschwindigkeit im Bereich zwischen 1,5 K/s und 30 K/s die Exoelektronen-Ausbeute nicht beeinflusst, ergaben eigene Messungen [37] an BeO-Keramik-Scheibchen ein anderes Bild (vgl. Fig. 11). Da die Exoelektronen-Ausbeute an diesen Keramik-Scheibchen deutlich von der Ausheizgeschwindigkeit abhängt, sollte auf eine Heizvorrichtung mit konstanter Ausheizgeschwindigkeit nicht verzichtet werden.

Als Mass für die Exoelektronen-Emission als Funktion der Ionendosis wird im allgemeinen die Gesamtzahl der Impulse beim Durchfahren des Ausheizmaximums verwendet und nicht die Impulsrate im Maximum.

Für eine routinemässige Auswertung von Exoelektronen-Dosimetern dürften Durchfluss-Proportionalzähler mit einer automatischen Wechselvorrichtung am besten geeignet sein. Über einen digitalen Impulszähler kann das Ergebnis ausgedruckt werden. Um bei sehr hohen Impulsraten Zählverluste und damit Fehlmessungen zu vermeiden, könnte die Ausheizvorrichtung von einem Zählratenmesser so gesteuert werden, dass eine maximale Zählrate nicht überschritten wird. Die Änderungen der Ausheizgeschwindigkeit sind dabei so gering, dass die Dosisempfindlichkeit der Probe dadurch nicht beeinflusst wird.

Bei der Darstellung der Auswertemethoden wurde auf die optische Stimulierung der Exoelektronen-Dosimeter verzichtet, da sie sich bis heute nicht durchsetzen konnte, obwohl, wie *Kramer* [24] ausführt, diese dann die einzig mögliche ist, wenn

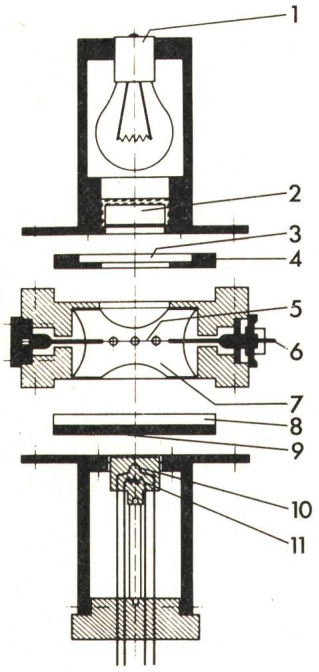


Fig. 17
Schematische Darstellung eines Proportionalzählers für den Nachweis von Exoelektronen mit thermischer oder optischer Stimulierungsmöglichkeit der Proben

1 Glühlampe; *2* Wasserfilter; *3* Farbfilter; *4* Schieber für Farbfilter; *5* Anode; *6* Hochspannungszuführung; *7* Kathode; *8* Schieber für Dosimeter; *9* Exoelektronen-Dosimeter; *10* Thermoelement; *11* Heizelement [33]

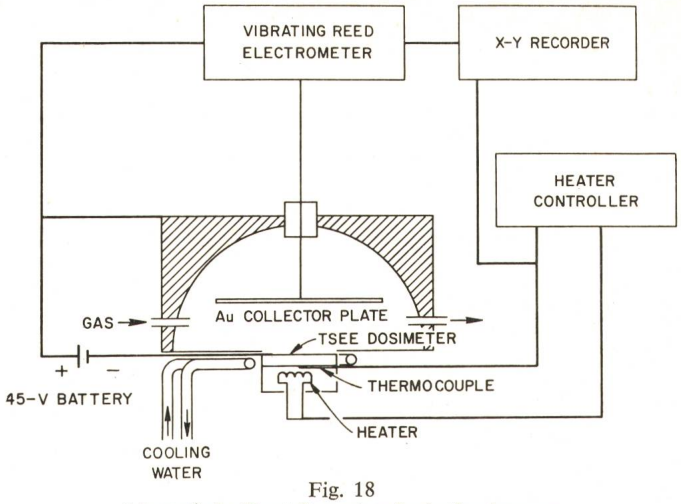


Fig. 18
Schematische Darstellung einer Ionisationskammer
Messung der Exoelektronen-Emission bei hohen Ionendosen mit Hilfe einer Strommessung [35]

das Trägermaterial für die Exoelektronen-aktive Schicht z. B. aus Papier oder einem Kunststoff besteht und keine höheren Temperaturen verträgt.

4. Diskussion und Ausblick

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Dosimetrie ionisierender Strahlen mit Hilfe des Exoelektronen-Effekts im Prinzip möglich ist. Einschränkend muss bemerkt werden – und dies ergab auch die Diskussion auf einem von der Kommission der Europäischen Gemeinschaften und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig veranstalteten Seminar [52] –, dass die Untersuchungen der dosimetrischen Eigenschaften von Exoelektronen-Materialien erst am Anfang stehen. Hinzu kommt, dass die Dosimetrie mit Exoelektronen in eine Zeit fällt, zu der sich andere Festkörper-Dosimeter bereits bewährt haben. Aus diesem Grunde ist zu fragen, welche besonderen Vorteile die Exoelektronen-Dosimeter gegenüber diesen besitzen. Zunächst muss bemerkt werden, dass viele Festkörper Exoelektronen emittieren, so dass man zwischen vielen Substanzen wählen kann. Da, wie beim Berylliumoxid, das Material durch die Stimulierung nicht verändert oder zerstört wird, dürfte ein Exoelektronen-Dosimeter beliebig oft verwendbar sein. Die notwendige Messapparatur ist einfach, und die Auswertung kann auch von angelernten Kräften ausgeführt werden.

Bei den dosimetrischen Eigenschaften bestechen die hohe Nachweis-Empfindlichkeit und der grosse Messbereich. So dürfte es möglich sein, mit Hilfe eines einzigen Dosimeters Ionendosen zwischen einigen nC/kg (μR) und einigen C/kg (kR) zu erfassen. Wegen der grossen Empfindlichkeit kann man auch dort, wo niedrige Dosen zu bestimmen sind, mit sehr kleinen Dosimetern auskommen.

Von Vorteil ist auch die geringe Energieabhängigkeit bis zu niedrigen Photonenenergien hin, wenn man annähernd luftäquivalente Substanzen verwendet. Der Verlust an Information infolge Fading kann klein gehalten werden, wenn das Ausheizmaximum bei Temperaturen um etwa 300 °C liegt, wie die Messungen am Berylliumoxid gezeigt haben. Die Reproduzierbarkeit der Messwerte befriedigt für ausgesuchte Exemplare die Forderungen der Personendosimetrie.

Dem Einsatz vieler Exoelektronen-Dosimeter z. B. auf der Grundlage von BeO-Keramik steht jedoch die grosse Streuung

der Messwerte entgegen. Das mag auch daran liegen, dass die verwendeten Proben nicht speziell für dosimetrische Zwecke hergestellt wurden und Verunreinigungen unterschiedlicher Art und Konzentration enthalten. Eine befriedigende Antwort auf die Art und Struktur der Gitterdefekte, an die der Exoelektronen-Effekt gebunden ist, können nur grundlegende physikalische Untersuchungen liefern.

Nachteilig ist ebenfalls die grosse Empfindlichkeit der Oberfläche gegenüber mechanischen und chemischen Einflüssen. Unkontrollierte Adsorptions- und Desorptionsprozesse können das Messergebnis völlig verfälschen. Inwieweit eine geeignete Kapselung diese Einflüsse ausschalten kann, lässt sich heute noch nicht abschliessend sagen. Bei der Auswertung geht die akkumulierte Information durch die Stimulierung verloren, und eine Fehlmessung kann nicht mehr korrigiert werden. Damit ergeben sich Probleme, die die Nachprüfbarkeit der Messung und ihre Dokumentation berühren.

Wie jede neue Forschungsrichtung steht die Exoelektronen-Dosimetrie vor einer Reihe von Fragen, deren Beantwortung noch aussteht. Davon hängen aber die Einsatzmöglichkeiten dieser neuen Dosimeter ab, die schon an anderer Stelle diskutiert wurden [52...55]. Sicher wird das Exoelektronen-Dosimeter in seiner ausgereiften Form eines Tages die Möglichkeiten zur Dosimetrie ionisierender Strahlen wirkungsvoll ergänzen.

Literatur

[1] *A. Scharmann:* History and principles of exoelectron emission. PTB-Mitt. 80(1970)5, p. 318...320.

[2] *K. H. Lauterjung* und *H. Neuert:* Über einen Nachwirkungseffekt an Zählrohren. Zeitschrift für Physik. 122(1944)2, S. 266...268.

[3] *J. Kramer:* Der metallische Zustand. Göttingen, Vandenhoeck und Rupprecht Verlag, 1950.

[4] *J. Kramer:* Spitzenzähler und Zählrohr bei metallographischen Oberflächenuntersuchungen. Zeitschrift für Physik 125(1949)11/12 S. 739...756.

[5] *J. Kramer:* Untersuchungen mit dem Geiger-Spitzenzähler an bestrahlten Kristallen. Zeitschrift für Physik 129(1951)1, S. 43...44.

[6] *W. Hanle:* Exoelektronenemission und Lumineszenz. Acta Physica Austriaca 10(1957)4, S. 339...352.

[7] *A. Bohun:* Zur Frage des Elementarmechanismus der kalten Elektronenemission bei den Festkörpern. Acta Physica Austriaca 10(1957)4, S. 353...364.

[8] *A. Bohun:* The Physics of exoelectron emission on ionic crystals. PTB-Mitt. 80(1970)5, p. 320...329.

[9] *P. Gordan, A. Scharmann* and *J. Seibert:* The discrimination of charged particles during exoelectron emission. Physica Status Solidi 33(1969)2, p. K 97...K 98.

[10] *A. Scharmann, W. Kriegseis* and *J. Seibert:* Surface effects of exoelectron emitting solids. PTB-Mitt. 80(1970)5, p. 329..333

[11a] *G. Holzapfel:* Zur Exoelektronen-Emission (Kramer-Effekt) von Berylliumoxid. Dissertation der Technischen Universität Berlin, 1968.

[11b] *G. Holzapfel:* Analysis of exoelectron glow curves. Physica Status Solidi 33(1969)2, p. 235...240.

[12] *A. Bohun*: Thermoemission und Thermolumineszenz bei Flußspat. Czechoslovak Journal of Physics 5(1955)2, S. 224...238.

[13] *J. Lepper:* Zusammenhang von Ektronenemission und Lumineszenzerscheinungen angeregter Kristalle. Zeitschrift für Naturforschung Teil a: Astrophysik, Physik, Physikalische Chemie 10(1955)1, S. 47...52.

[14] *J. Kramer:* Anwendung der Exoelektronen. Acta Physica Austriaca 10(1957)4, S. 392...398.

[15] *G. Gourgé:* Untersuchungen der Exoelektronenemission und Lumineszenz anorganischer Kristalle. Zeitschrift für Physik 153(1958)2, S. 186...206.

[16] *G. Gourgé* und *W. Hanle:* Neue Ergebnisse über Exoelektronenemission an Nichtmetallen. Acta Physica Austriaca 10(1957)4, S. 427...447.

[17] *J. Kramer:* Exoelektronen-Dosimeter für Röntgen- und Gammastrahlen. Zeitschrift für Angewandte Physik 20(1966)5, S. 411...417.

[18] *K. J. Puite* and *J. Arends:* Trapping centers in CaF_2: Mn from thermoluminescence and thermally stimulated exoelectron emission measurements on undoped and Mn doped CaF_2 samples. Proceedings of the Third International Conference on Liminescence Dosimetry. Risö Report No. 249, December 1971; p. 680...691.

[19] *P. L. Ziemer* a. o: Characteristics of selected phosphors for stimulated exoelectron emission dosimetry. Proceedings of the Third International Conference on Luminescence Dosimetry. Risö Report No. 249, December 1971; p. 632...653.

[20] *L. D. Brown:* Problems in the use of proportional counters for TSEE measurements. Proceedings of the Third International Conference on Luminescence Dosimetry. Risö Report No. 249, December 1971; p. 654...679.

[21] *T. Niewiadomski:* TSEE dosimetry studies. Proceedings of the Third International Conference on Luminescence Dosimetry. Risö Report No. 249, December 1971; p. 612...621.

[22] *M. Euler, W. Kriegseis* and *A. Scharmann:* Exoelectron dosimetry with oxide mixtures. Proceedings of the Third International Conference on Luminescence Dosimetry. Risö Report No. 249, December 1971; p. 589...600.

[23] *W. Hanle* u. a.: Über die Eignung der Exoelektronen-Nachemission von $CaSO_4$ zur Dosimetrie. Nukleonik 8(1966)3, S. 129...132.

[24] *J. Kramer:* New aspects in application of exoelectrons. PTB-Mitt. 80(1970)5, p 343...350.

[25] *J. Kramer:* Der Nachweis ionisierender Strahlung mit Exoelektronen. Zeitschrift für Angewandte Physik 15(1963)1, S. 20...28.

[26] *J. Kramer:* Dosimetrie mit Exoelektronen. PTB-Mitt. 79(1969)1, S. 9...14.

[27] *K. Becker* a. o: New exoelectron dosimeters. Proceedings of the IAEA-Symposium on Advances in Physical and Biological Radiation Detectors, Vienna 1971; p 25...26.

[28] *K. Becker, J. S. Cheka* and *R. B.* Gammage: Progress in exoelectron dosimetry. PTB-Mitt. 80(1970)5, p. 334...342.

[29] *E. M. Robinson* and *M. Oberhofer:* A sensitive ceramic BeO-TSEE-Dosimeter. Health Physics 18(1970)4, p. 434...437.

[30] *D. F. Regulla, G. Drexler* and *L. Boros:* Low-Z activated beryllium oxide as a high sensitive radiation detector in TSEE dosimetry. Proceedings of the Third International Conference on Luminescence Dosimetry. Risö Report No. 249, December 1971; p. 702...611.

[31] *H.-J. Kriks:* Über die Anwendung der Exoelektronen-Emission (EE) von BeO in der Dosimetrie ionisierender Strahlen. PTB-Mitt. 80(1970)4, S. 250...254.

[32] *H.-J. Kriks:* Investigations on Exoelectrons with a special proportional counter. Proceedings of the IAEA-Symposium on Advances in Physical and Biological Radiation Detectors, Vienna 1971; p. 17...24.

[33] *H.-J. Kriks* und *W. Schaare:* Ein Proportionalzähler zum Nachweis von Exoelektronen. PTB-Mitt. 81(1971)1, S. 10...13.

[34] *H.-J. Kriks:* Zur Dosimetrie von Röntgen- und γ-Strahlen mit Exoelektronen. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Jahresbericht 1971. Braunschweig, PTB, 1972; S. 166.

[35] *K. W. Crase, R. B. Gammage* and *K. Becker:* High dose-level responce of ceramic BeO. Health Physics 22(1972)4, p. 402...405.

[36] *K. W. Crase, K. Becker* and *R. B. Gammage:* Parameters affecting the radiation-induced thermally stimulated exoelectron emission from ceramic beryllium oxide. ORNL-TM 3572, November 1971.

[37] *W. Rasp* und *V. Siegel:* Neutronendosimetrie mit Hilfe von Exoelektronen. Proceedings of the First Symposium on Neutron Dosimetry in Biology and Medicine, Luxembourg, September 1972, EUR 4896, p. 383...394.

[38] *E. Piesch:* Zukunftstendenzen der Personendosimetrie. Tagungsbericht der 6. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e. V., Kernforschungszentrum Karlsruhe, 17...19. Mai 1972; S. 307...220.

[39] *V. Siegel:* Erste Ergebnisse einer Neutronendosismessung mit Hilfe von Exoelektronen. Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Seminar über die Anwendungsmöglichkeiten der Exoelektronen für die Dosimetrie, Luxembourg 1972, EUR 4905, S. 99...101.

[40] *K. Becker, M. Oberhofer* and *J. S. Cheka:* TSEE, TL and impurities. 14th Annual Meeting of the Health Physics Society, Pittsburgh, June 1969.

[41] *L. Boros, D. F. Regulla, G. Drexler:* Miniatur-Exoelektronen-Dosimeter mit hoher Strahlenempfindlichkeit. Magyar Radiologia 23(1971)-, S. 257...260.

[42] *K. Becker* and *E. M. Robinson:* Integrated dosimetry by thermally stimulated exoelectron (after)-emission. Health Physics 15(1968)5, p. 463...466.

[43] *K. Becker:* Some studies on radiation dosimetry by thermally stimulated exoelectron emission (TSEE). Proceedings on the Second International Conference on Luminescence Dosimetry, Gatlinburg/Tennessee, September 1968; p. 200...219.

[44] *B. Sujak, R. Pietrzak* and *I. Stepniowski:* Open cylindrical counter with quenching vapour above the free surface of liquid (detector for exoelectrons). Acta Physica Polonica 32(1967)6, p. 949...957.

[45] *M. Oberhofer* and *E. M. Robinson:* A TSEE G-M glasflow counter. Kerntechnik 12(1970)1, p. 34...38.

[46] *A. Bohun:* Exoelektronenemission von Ionenkristallen. Physica Status Solidi 3(1963)5, S. 779...804.

[47] *Z. Spurný, L. Hava* and *J. Novotný:* Ein offener Spitzenzähler (zur Registrierung) für ultraweiche β-Strahlen. Jadarná Energie 14(1968)4, S. 137...139.

[48] *W. Engelland:* Ein Methanflusszähler zur schnellen Auswertung von Exoelektronen-Dosimetern. PTB-Mitt. 79(1969)1, S. 15...19.

[49] *H. Eckey:* Heizbares Zählrohr mit Schlingenanode. Nuclear Instruments and Methods 70(1969)4, S. 107...108.

[50] *F. H. Attix:* A proportional counter for thermally stimulated exoelectrons. International Journal of Applied Radiation and Isotopes 22(1971)3, p. 185...197.

[51] *P. D. La Rivière* and *E. Tochilin:* A ionization chamber for the measurement of thermally stimulated exoelectrons. Health Physics 22(1972)2, P. 198...201.

[52] Seminar über die Anwendungsmöglichkeiten der Exoelektronen für die Dosimetrie. Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Luxembourg 1972, EUR 4904.

[53] *J. Kramer:* Dosimetrie mit Exoelektronen. Tagungsbericht der 4. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e. V. Berlin, 28...30. Mai 1969; S. 441...463.

[54] *K. Becker:* Principles of thermally stimulated exoelectron emission (TSEE) dosimetry. IAEA Atomic Energy Review 8(1970)3, p. 173...218.

[55] *W. Kriegseis, A. Scharmann* und *J. Seibert:* Dosimetrie mit Exoelektronen. Kerntechnik 13(1971)1, S. 11...14.

Adresse des Autors:

V. Siegel, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, D-33 Braunschweig.