

Die Dosimetrie ionisierender Strahlen mit Hilfe von Exoelektronen

Autor(en): **Siegel, V.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **64 (1973)**

Heft 20

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915609>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

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'oxyde 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 reproductibilité 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 Wissenschaftler 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 einstrahlten 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.

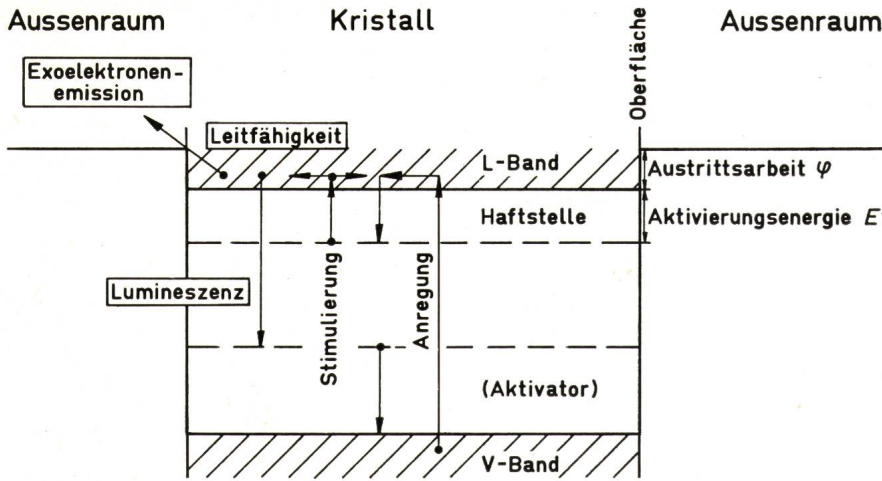


Fig. 1
Niveauschema für das Auftreten von elektrischer Leitfähigkeit, Lumineszenz und Exoelektronen-Emission [11]

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 $0,764 \text{ nC/kg}$ ($3 \cdot 10^{-6} \text{ R}$). Für Berylliumoxid wird eine um etwa zwei Grössenordnungen geringere Empfindlichkeit angenommen. Eine Steigerung der Empfindlichkeit von BeO -Keramikproben 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

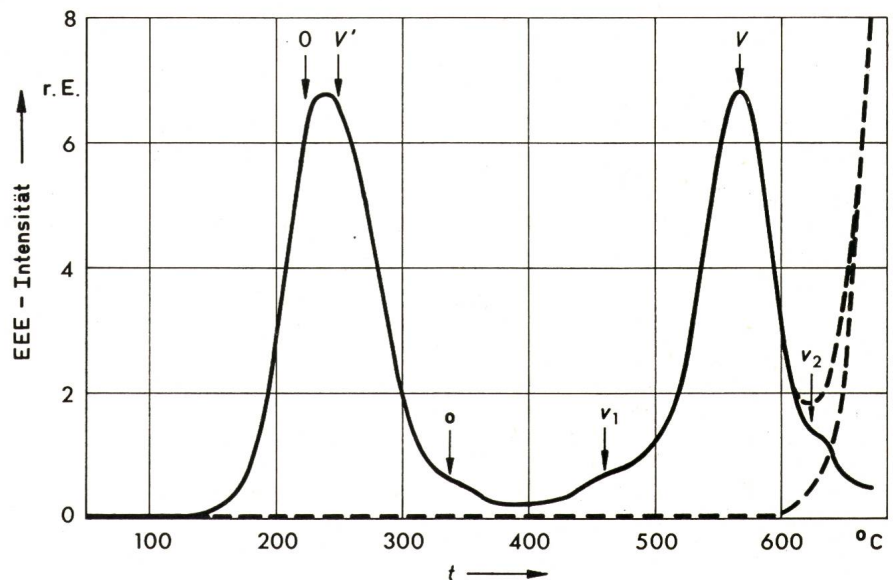


Fig. 2
Emissionsmaxima des Berylliumoxids bei einer Aufheizgeschwindigkeit von 1 K/s [11]

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

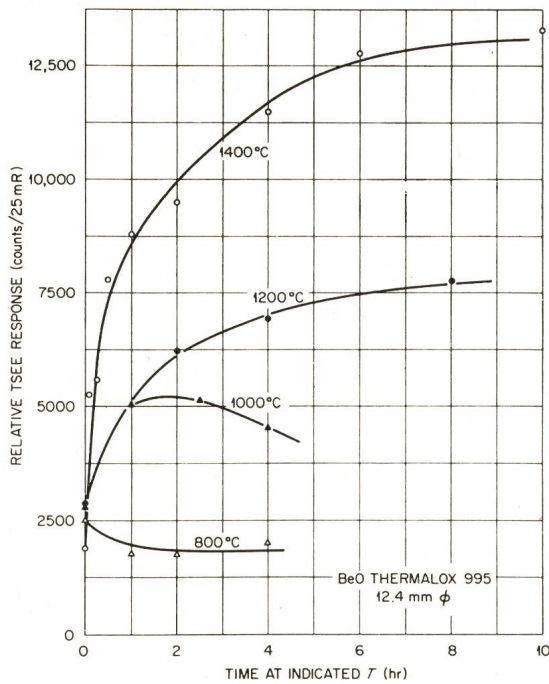


Fig. 3
Exoelektronen-Ausbeute von BeO-Keramik-Proben als Funktion der thermischen Vorbehandlungszeit T , in Luft bei verschiedenen Temperaturen [27]

Robinson und Oberhofer [29] bei Goldbedeckung (200 und 50 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) von BeO-Keramik-Proben. Einer Verdoppelung der Null-Zählrate von 180 min^{-1} entspricht eine untere Nachweisgrenze von $1,3 \mu\text{C}/\text{kg}$ ($0,5 \text{ mR}$). Einen anderen Weg beschreiben Regulla und Mitarbeiter [30], die BeO-Keramik-Scheibchen mit Lithium aktivieren. Die untere gemessene Nachweisgrenze liegt hier bei $2,58 \text{ nC}/\text{kg}$ (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 $\pm 10\%$ 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 $0,516 \mu\text{C}/\text{kg}$ (2 mR) und für 15 % BeO mit 85 % Graphit (Massenanteile) bei $12,9 \mu\text{C}/\text{kg}$ (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 $2,6 \mu\text{C}/\text{kg}$ (10 mR) hebt sich so deutlich vom Nulleffekt ab, dass auch noch eine Ionendosis von $0,26 \mu\text{C}/\text{kg}$ (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 $516 \text{ mC}/\text{kg}$ (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 $2,58 \text{ C}/\text{kg}$ (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

$2,58 \text{ C}/\text{kg}$ (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.

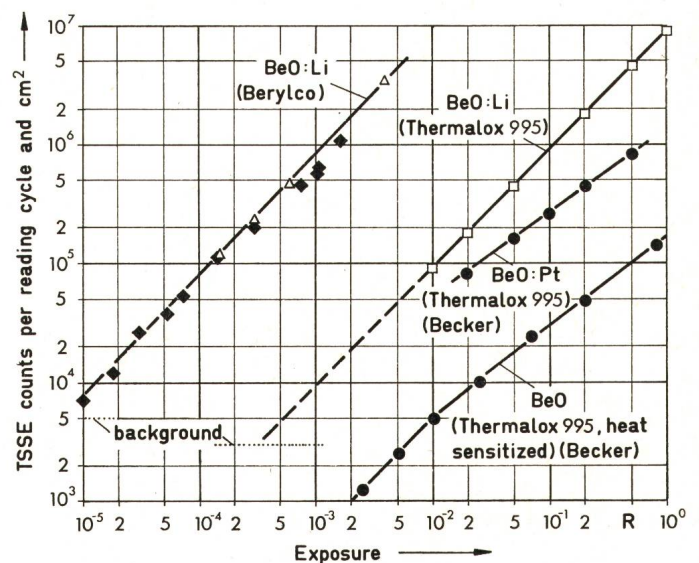


Fig. 4
Exoelektronen-Emission verschieden vorbehandelter BeO-Keramik-Proben als Funktion der Ionendosis (γ -Strahlen des ^{60}Co) [30]

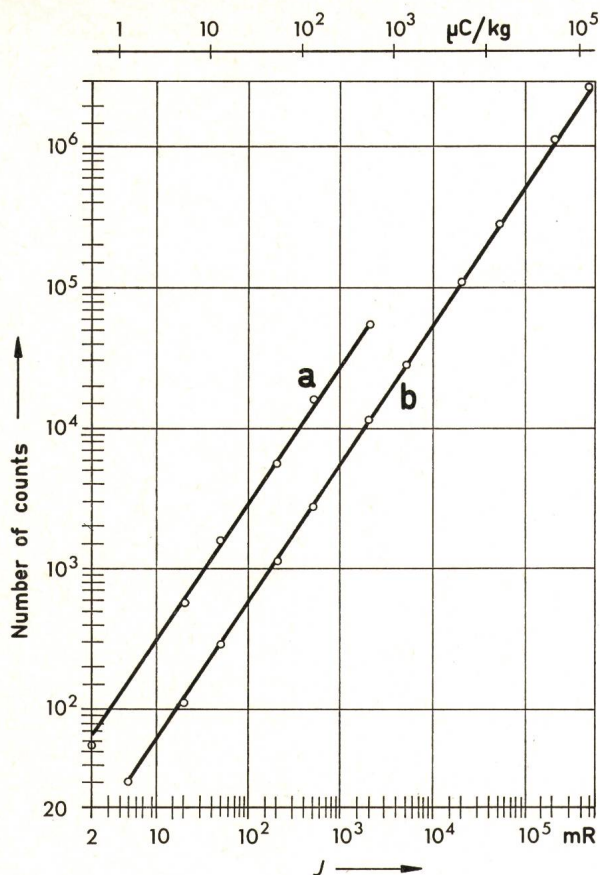


Fig. 5

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 $\alpha \leq 1$ 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 $60 \mu\text{g}/\text{cm}^2$). 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 eingengt werden, weil sich bei Überschreitungen dieser Werte gesetzliche

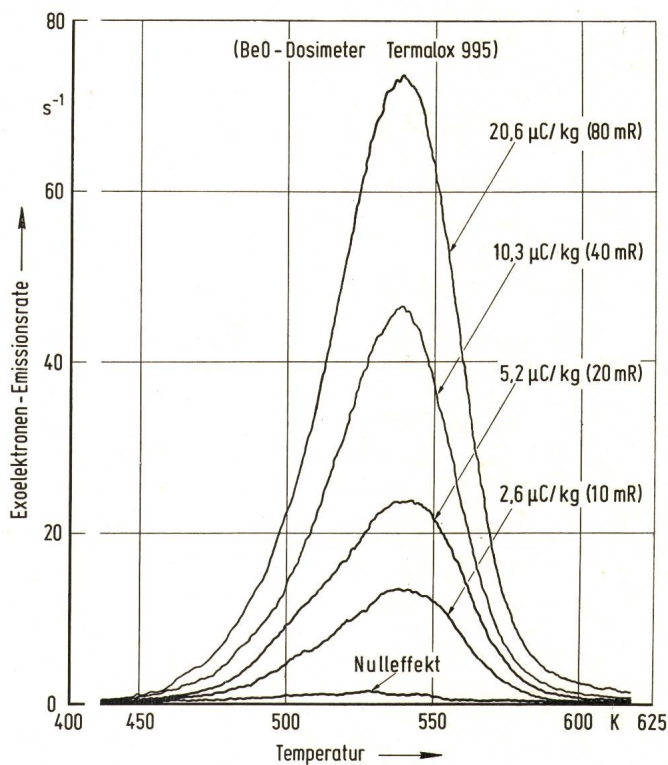
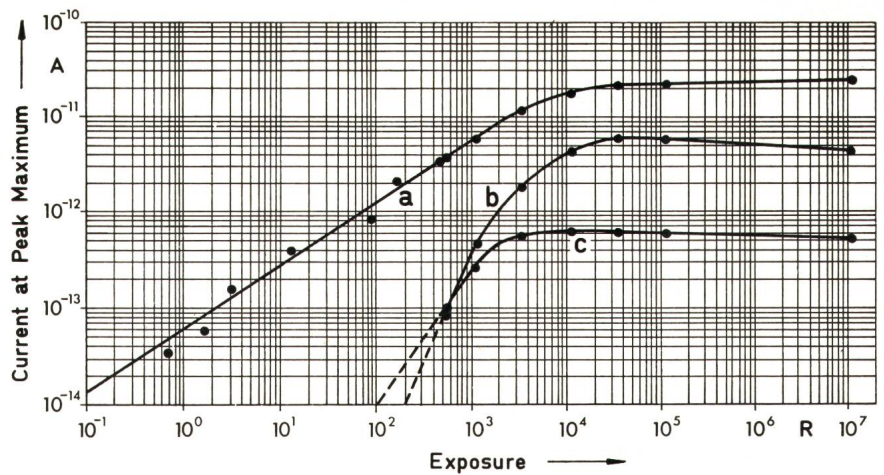


Fig. 6

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-letal und letal Bereich ist dagegen vom medizinischen Standpunkt aus eine möglichst genaue Dosisbestimmung notwendig. Für den Bereich oberhalb 3 rd wird deshalb eine Messunsicherheit von höchstens $\pm 25\%$ bis $\pm 40\%$ 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

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 $\mu\text{C}/\text{kg}$ 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-

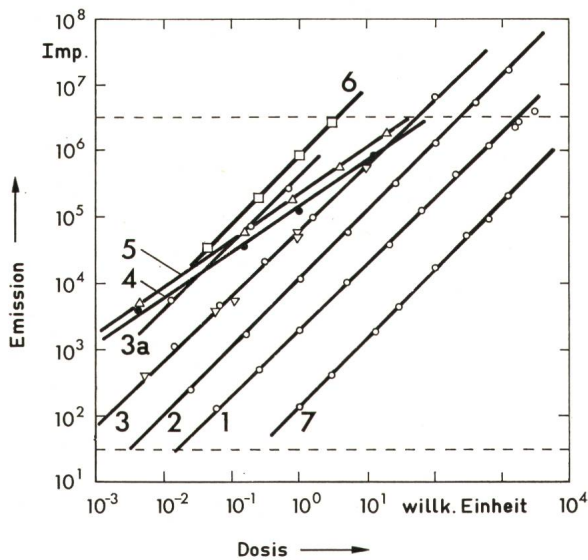


Fig. 8
Exoelektronen-Emission von Mischungen aus CaSO_4 mit Graphit
als Funktion der Ionendosis von Röntgenstrahlen [25]
Kurven 1 bis 3a und 6: 20,5...83% CaSO_4
Kurven 4 und 5: 91 und 100% CaSO_4
Kurve 7: 20,5% CaSO_4 bei optischer Stimulierung

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%.

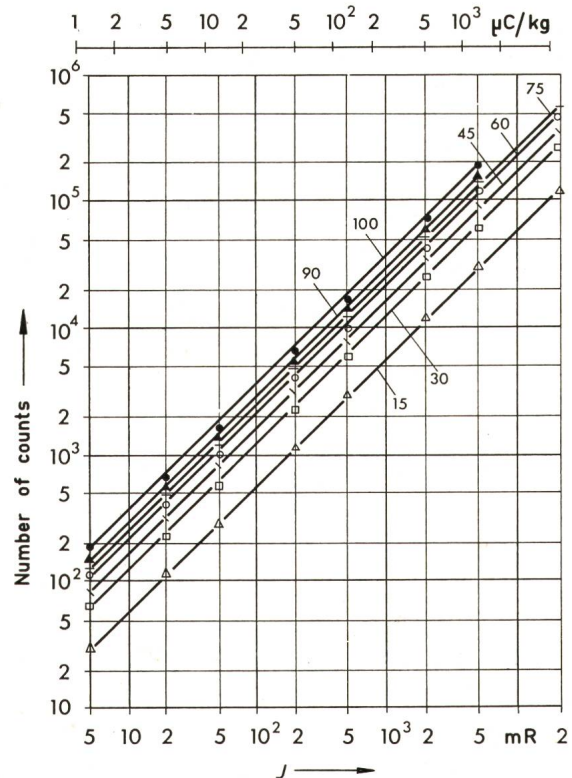
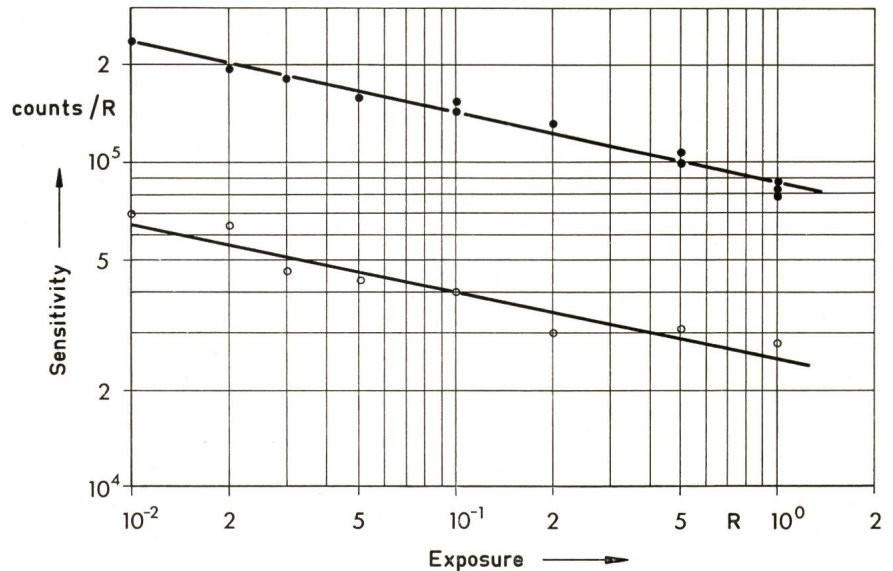


Fig. 9
Exoelektronen-Emission von Mischungen aus BeO-Pulver mit Graphit
als Funktion der Ionendosis J von γ -Strahlen des ^{60}Co
Parameter ist der BeO-Massenanteil in Prozent [32]

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

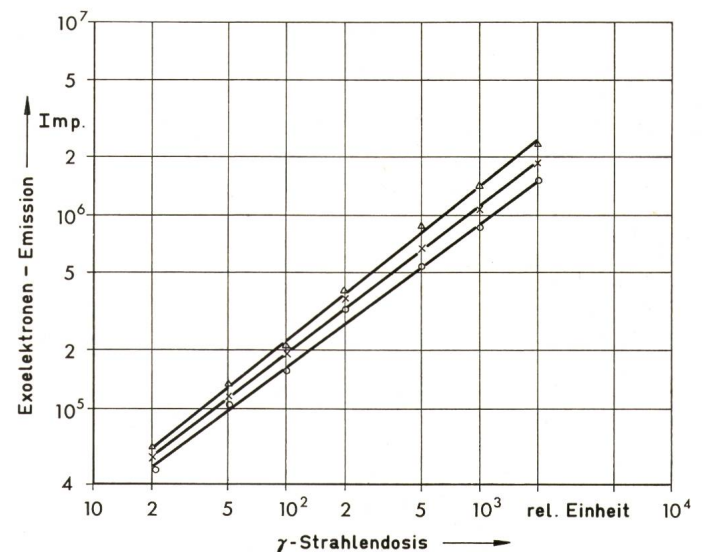
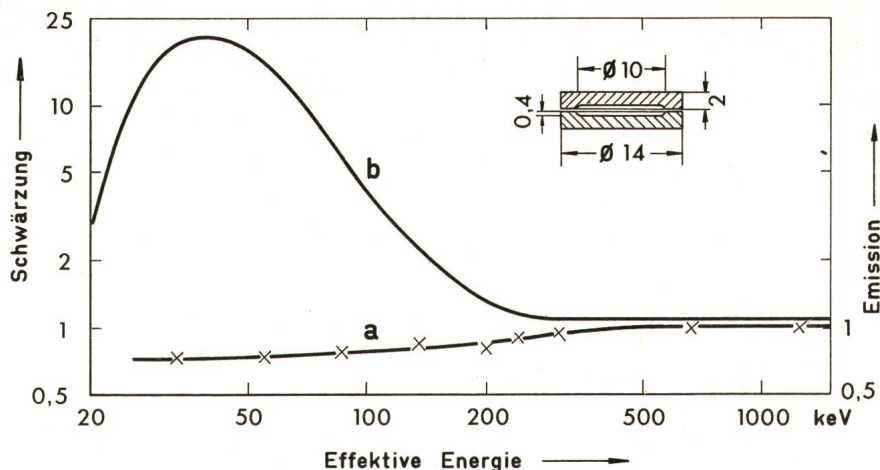


Fig. 11
Exoelektronen-Emission von BeO-Keramik als Funktion der Ionendosis von γ -Strahlen bei verschiedenen Aufheizgeschwindigkeiten [37]

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

Fig. 12
**Abhängigkeit der Exoelektronen-Emission
 von der Photonenergie 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 $10^2 \text{ lx} \cdot \text{min}$ 2 % und bei $10^5 \text{ lx} \cdot \text{min}$ 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

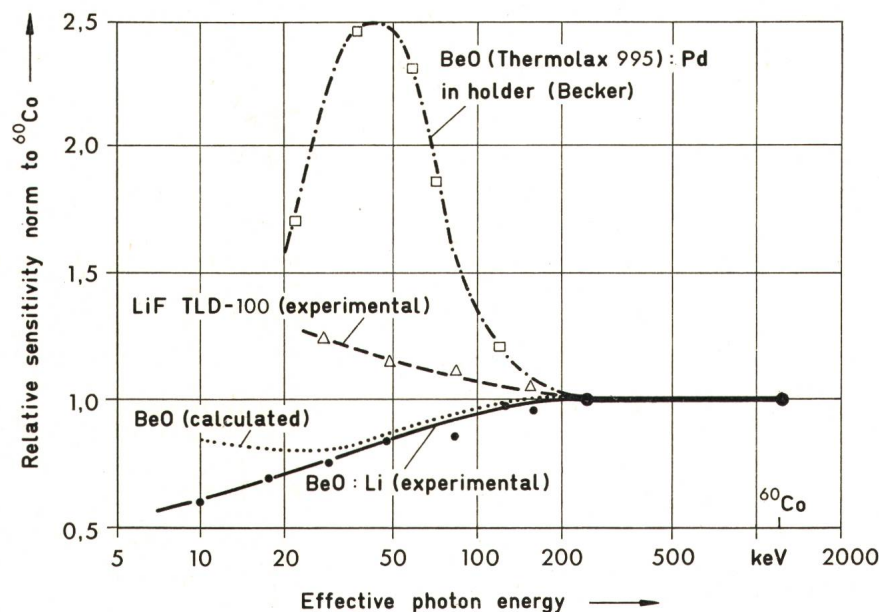
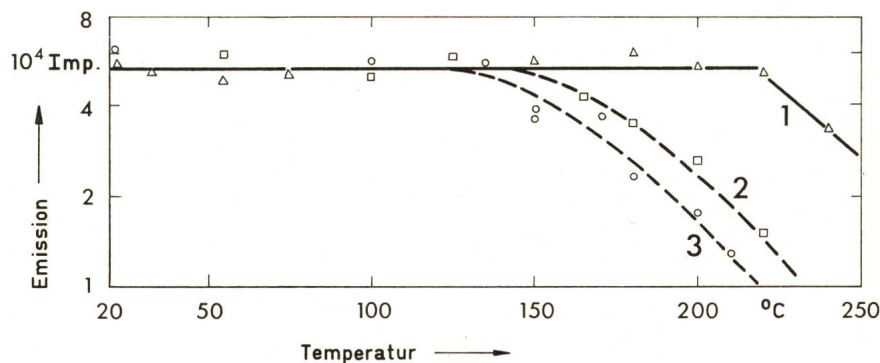


Fig. 13
**Die auf die γ -Strahlung des ^{60}Co bezogene
 Energieabhängigkeit der Exoelektronen-Emission
 von BeO-Keramik-Proben**
 Zum Vergleich ist die Energieabhängigkeit
 der Thermolumineszenz für das LiF-Dosimeter
 TLD-100 eingezeichnet [30]

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]



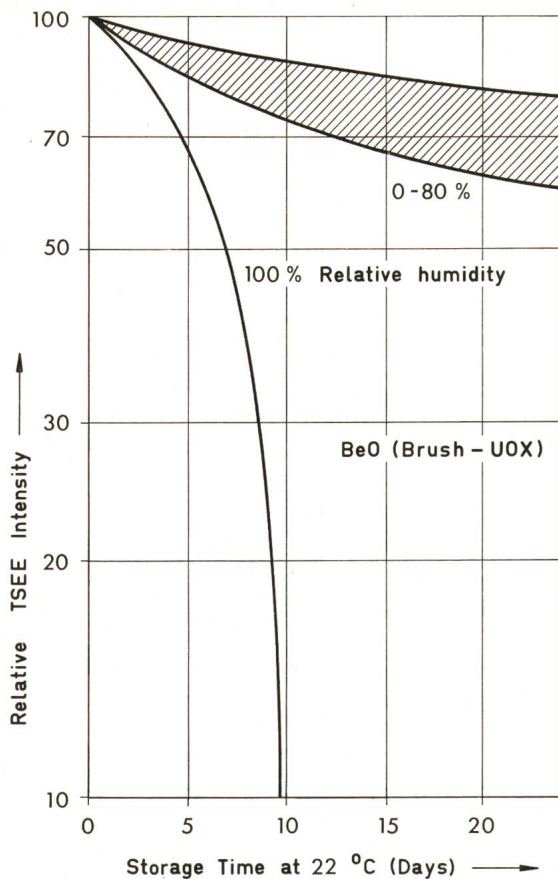


Fig. 15

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 Röhren-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 Auswertearraturen erläutert werden. Ausgehend von den in der Kern-

strahlungsmesstechnik 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 Zählendraht 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 $5 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ ohne merkliche Zählverluste zu verarbeiten. Dagegen kommen *Crane* 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] beschreiben einen anderen Weg, indem sie eine Parallelplattenkammer als Ionisationskammer betreiben und so bei Stromstärken von 10^{-13} bis $3 \cdot 10^{-10}$ A

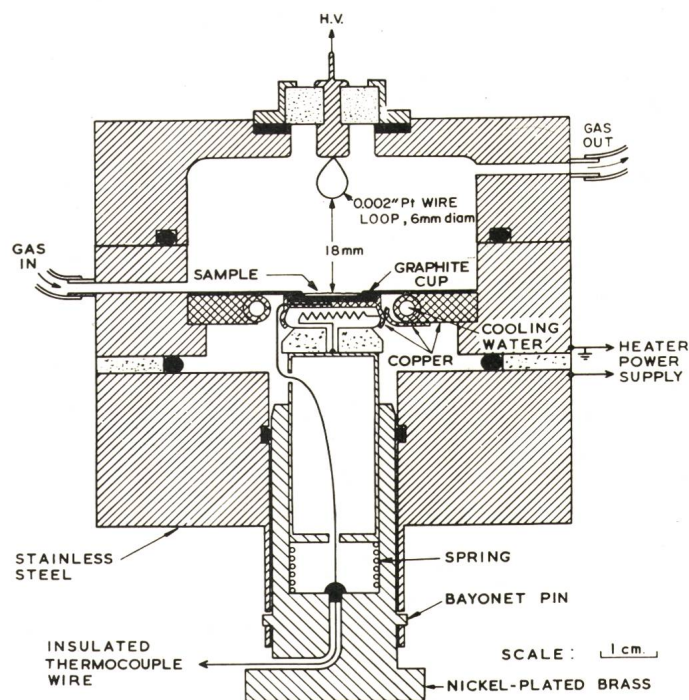


Fig. 16

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 Wechsellvorrichtung 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

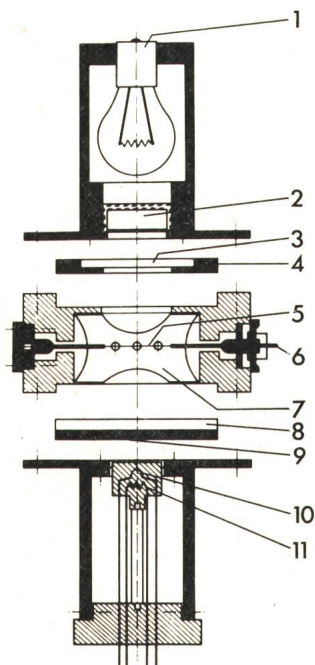


Fig. 17

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]

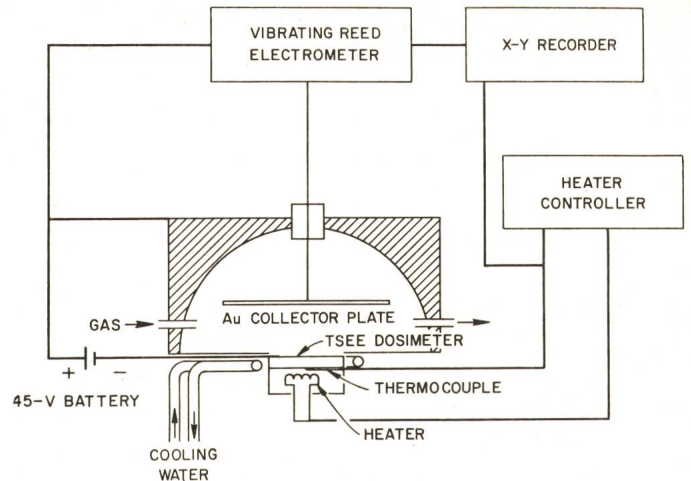


Fig. 18

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 angeleiteten Kräften ausgeführt werden.

Bei den dosimetrischen Eigenschaften bestehen die hohe Nachweis-Empfindlichkeit und der grosse Messbereich. So dürfte es möglich sein, mit Hilfe eines einzigen Dosimeters Ionendosen zwischen einigen nC/kg (μ R) 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 luft-äquivalente 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 Ruprecht 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 und 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 und 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 Elektronenemission 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 und J. Arends: Trapping centers in CaF₂: Mn from thermoluminescence and thermally stimulated exoelectron emission measurements on undoped and Mn doped CaF₂ samples. Proceedings of the Third International Conference on Luminescence Dosimetry. Risø 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. Risø 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. Risø Report No. 249, December 1971; p. 654...679.
- [21] T. Niewiadomski: TSEE dosimetry studies. Proceedings of the Third International Conference on Luminescence Dosimetry. Risø Report No. 249, December 1971; p. 612...621.
- [22] M. Euler, W. Kriegseis und A. Scharmann: Exoelectron dosimetry with oxide mixtures. Proceedings of the Third International Conference on Luminescence Dosimetry. Risø Report No. 249, December 1971; p. 589...600.
- [23] W. Hanle u. a.: Über die Eignung der Exoelektronen-Nachmission von CaSO₄ 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. Risø 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 response 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 und 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. Stepiński: 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 glassflow 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. Jaderná 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.