

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
15. April 2010 (15.04.2010)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2010/040330 A2

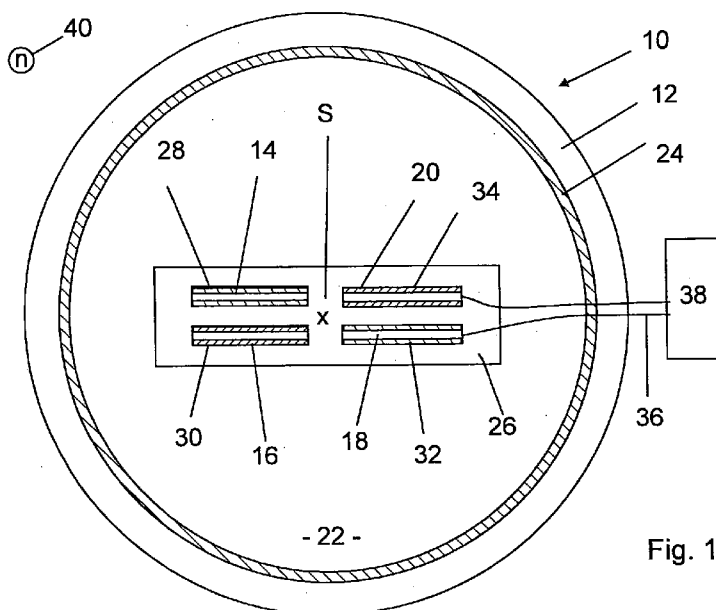
- (51) Internationale Patentklassifikation: Nicht klassifiziert
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2009/001199
- (22) Internationales Anmeldedatum:
26. August 2009 (26.08.2009)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
10 2008 050 731.8
8. Oktober 2008 (08.10.2008) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND, VERTRETEN DURCH DAS BUNDESMINISTERIUM F. WIRTSCHAFT U. TECHNOLOGIE, DIESES VERTRETEN D. D. PRÄSIDENTEN DER PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT [DE/DE];** Bundesallee 100, 38116 Braunschweig (DE).
- (72) Erfinder; und
- (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **LUSZIK-BHADRA, Marlies [DE/DE];** Neudammstrasse 24 C, 38116 Braunschweig (DE). **HOHMANN, Eike [DE/CH];** Buchenweg 7, CH-5200 Brugg (CH).
- (74) Anwalt: **PLÖGER, Jan;** Gramm, Lins & Partner GbR, Theodor-Heuss-Strasse 1, 38122 Braunschweig (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii)

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

- (54) Title: NEUTRON DOSIMETER
- (54) Bezeichnung : NEUTRONENDOSIMETER



(57) Abstract: The invention relates to a neutron dosimeter comprising a neutron moderator (12), a first radiation detector (14), which is situated in the neutron moderator (12) and is surrounded by a first metal body (28) containing material that can be activated by neutrons, a second radiation detector (16), which is situated in the neutron moderator (12) close to the first radiation detector (14) and is surrounded by a second metal body (30) that substantially cannot be activated by neutrons. The first metal body (28) and the second metal body (30) are designed in such a way that they substantially have the same degree of absorption of photons. The dosimeter also comprises an evaluation circuit, which is connected to the radiation detectors and is equipped to suppress electrical impulses generated by ionising radiation using a pulse intensity that lies below a predefined pulse intensity threshold.

Fig. 1

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Neutronendosimeter mit einem Neutronenmoderator (12), einem ersten Strahlungsdetektor (14), der in dem Neutronenmoderator (12) angeordnet und von einem ersten Metall-

körper (28) umgeben ist, der durch Neutronen aktivierbares Material enthält,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2010/040330 A2



— *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)*

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)*

einem zweiten Strahlungsdetektor (16), der in dem Neutronenmoderator (12) in unmittelbarer Nähe des ersten Strahlungsdetektors (14) angeordnet ist und von einem zweiten Metallkörper (30) umgeben ist, der durch Neutronen im Wesentlichen nicht aktivierbar ist, wobei der erste Metallkörper (28) und der zweite Metallkörper (30) so ausgebildet sind, dass sie im Wesentlichen die gleiche Absorption für Photonen haben, und einer Auswerteschaltung, die mit den Strahlungsdetektoren verbunden und eingerichtet ist, um von ionisierender Strahlung hervorgerufene elektrische Impulse mit einer Pulshöhe, die unterhalb einer vorgegebenen Pulshöhenschwelle liegt, zu unterdrücken.

Neutronendosimeter

Die Erfindung betrifft ein Neutronendosimeter. Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Messen einer Neutronendosis.

5

Neutronendosimeter werden im Strahlenschutz eingesetzt. Es hat sich gezeigt, das herkömmliche Neutronendosimeter, wie in DE 43 44 955 C1 beschrieben, die tatsächliche Dosis bei gepulsten Neutronenfeldern in Folge von Totzeiteffekten unterschätzen, was unerwünscht ist.

10

Es ist aus der EP 1 903 355 A2 bekannt, dass Neutronen in gepulsten Strahlenfeldern, wie sie an Hochenergie-Beschleunigeranlagen entstehen, dadurch nachgewiesen werden können, dass sie zur Reaktion mit einem ^{12}C oder ^9Be -haltigen Material gebracht werden, das durch die Neutronenbestrahlung aktiviert wird, wobei der aktivierte Kern beispielsweise Beta-Strahlung aussendet und die resultierende Beta-Strahlung detektiert wird. Nachteilig an bestehenden Neutronendosimetern dieser Bauart ist, dass sie Neutronen erst oberhalb einer Energieschwelle nachweisen können, die beispielsweise oberhalb von 1 MeV liegen kann. Andere bekannte Neutronendosimeter, wie in Health Physics 38 (1980), Seite 507-521 beschrieben, weisen Neutronen geringerer Energie über eine Aktivierung von Silber nach, haben aber zudem den Nachteil, dass inhomogene Strahlungsfelder mit begleitender Photonenstrahlung zu bedeutenden Messfehlern führen können und daher beim Wechsel in ein anderes Strahlungsfeld jeweils eine Feldkalibrierung durchgeführt werden muss.

25

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, Nachteile im Stand der Technik zu vermindern.

30

Die Erfindung löst das Problem durch ein Neutronendosimeter mit (a) einem Neutronenmoderator, (b) einem ersten Strahlungsdetektor, der in dem Neutronenmoderator angeordnet ist und von einem ersten Metallkörper umgeben ist,

BESTÄTIGUNGSKOPIE

der durch Neutronen aktivierbares Material enthält, (c) einem zweiten Strahlungsdetektor, der in dem Neutronenmoderator in unmittelbarer Nähe des ersten Strahlungsdetektors angeordnet ist und von einem zweiten Metallkörper umgeben ist, der durch Neutronen im Wesentlichen nicht aktivierbar ist, (d) wobei der erste Metallkörper und der zweite Metallkörper so ausgebildet sind, dass sie im Wesentlichen die gleiche Absorption für Photonen haben, und (e) einer Auswerteschaltung, die mit den Strahlungsdetektoren verbunden und eingerichtet ist, um von ionisierender Strahlung hervorgerufene elektrische Impulse mit einer Pulshöhe, die unterhalb einer vorgegebenen Pulshöhenschwelle liegt, zu unterdrücken.

Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch ein Verfahren zum Messen einer Neutronendosis, mit den folgenden Schritten: (a) Erfassen von Zählraten mit einem ersten Strahlungsdetektor, der in einem Neutronenmoderator angeordnet ist und von einem ersten Metallkörper umgeben ist, der durch Neutronen aktivierbares Material enthält, (b) Erfassen von Zählraten mit einem zweiten Strahlungsdetektor, der in unmittelbarer Nähe des ersten Strahlungsdetektors in dem Neutronenmoderator angeordnet ist und von einem zweiten Metallkörper umgeben ist, wobei der erste Metallkörper und der zweite Metallkörper so ausgebildet sind, dass sie im Wesentlichen die gleiche Absorption für Photonen haben, und (c) Ermitteln der Neutronendosis aus den Zählraten durch Rechnen der von Beta-Strahlung herrührenden Zählrate aus der Zählrate des ersten Strahlungsdetektors einerseits und der Zählrate des zweiten Strahlungsdetektors andererseits und Errechnen der Neutronendosis aus der von Beta-Strahlung herrührenden Zählrate, wobei das Erfassen der Zählraten mit dem ersten Strahlungsdetektor und dem zweiten Strahlungsdetektor ein Unterdrücken von Zählereignissen unterhalb einer vorgegebenen Pulshöhenschwelle umfasst.

Vorteilhaft an der Erfindung ist, dass die Neutronendosis auch bei gepulsten Neutronenfeldern gut erfassbar ist und nicht unterschätzt wird. Es ist ein weite-

5 rer Vorteil, dass auch inhomogene Strahlungsfelder mit einer hohen Messgenauigkeit vermessen werden können. Des Weiteren werden im Wesentlichen nur Neutronen erfasst, wohingegen andere Strahlung ausgeblendet werden kann. So führt ein schwankender Gamma-Strahlungshintergrund nur zu einem geringen Messfehler. Es ist daher nicht notwendig, das Neutronendosimeter am Einsatzort auf das jeweilige Strahlungsfeld zu kalibrieren.

10 Vorteilhaft ist zudem, dass mit dem erfindungsgemäßen Neutronendosimeter eine kurze Ansprechzeit erreichbar ist. Ein Anstieg der Neutronendosisleistung kann damit schnell erkannt werden. Sofern notwendig, können Personen dann schnell in Sicherheit gebracht werden.

15 Durch die Auswerteschaltung, die mit den Strahlungsdetektoren verbunden und eingerichtet ist, um von ionisierender Strahlung hervorgerufene elektrische Impulse mit einer Pulshöhe, die unterhalb einer vorgegebenen Pulshöhenschwelle liegt, zu unterdrücken wird die Messgenauigkeit erhöht. Es hat sich nämlich gezeigt, dass – anders als erwartet – etwaige Hintergrundstrahlung, beispielsweise Gamma-Strahlung, zu einer deutlich verschlechterten Messgenauigkeit führen kann.

20 Im Rahmen der folgenden Beschreibung wird unter einem Neutronenmoderator insbesondere jedes Bauteil verstanden, das aus einem Material besteht, mit dem Neutronen abgebremst (thermalisiert) werden können. Der Neutronenmoderator ist zudem bevorzugt so ausgebildet, dass er eine zumindest im Wesentlichen geschlossene Hülle um die Strahlungsdetektoren bildet. Beispielsweise
25 enthält der Neutronenmoderator eine wasserstoffreiche Verbindung, beispielsweise ein Polyolefin wie Polyethylen.

30 Unter einem Strahlungsdetektor wird insbesondere jede Vorrichtung verstanden, die ionisierende Strahlung in elektrische Signale umsetzt. Unter dem Merkmal, dass der jeweilige Strahlungsdetektor in dem Neutronenmoderator

angeordnet ist, ist insbesondere zu verstehen, dass er vollständig von dem Neutronenmoderator umgeben ist. Es ist möglich, nicht aber notwendig, dass der Strahlungsdetektor in den Neutronenmoderator eingebettet ist. Beispielsweise kann der Neutronenmoderator als Kugelschale ausgebildet sein, in der die Strahlungsdetektoren angeordnet sind.

Unter dem Merkmal, dass der erste Metallkörper durch Neutronen aktivierbar ist, wird insbesondere verstanden, dass beispielsweise so viel eines Metalls enthalten ist, dass eine Bestrahlung des Metallkörpers mit Neutronen zu einer Kernreaktion führt, aus der mittelbar oder unmittelbar ein radioaktives Isotop hervorgeht. Die Halbwertszeit liegt dabei vorzugsweise insbesondere unter einer Minute. Unter dem Merkmal, dass der zweite Metallkörper durch Neutronen im Wesentlichen nicht aktivierbar ist, wird insbesondere verstanden, dass die Aktivierungswahrscheinlichkeit für das Material des zweiten Metallkörpers um Größenordnungen kleiner ist als die Aktivierungswahrscheinlichkeit des Materials des ersten Metallkörpers, beispielsweise kleiner als ein Tausendstel.

Unter dem Merkmal, dass der erste Metallkörper und der zweite Metallkörper so ausgebildet sind, dass sie im Wesentlichen die gleiche Absorption für Photonen haben, ist insbesondere zu verstehen, dass sie über einen breiten Bereich an Photonenenergie, beispielsweise 1 MeV bis 3 MeV, sich um weniger als 20% in ihrer Absorption unterscheiden. Das kann beispielsweise dadurch erreicht werden, dass die Metallkörper aus Metallen aufgebaut werden, die sich in ihren Kernladungszahlen nur geringfügig unterscheiden.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform umfasst das Dosimeter einen dritten Strahlungsdetektor, der in dem Neutronenmoderator angeordnet und von einem dritten Metallkörper umgeben ist, der durch Neutronen aktivierbares Material enthält, und einen vierten Strahlungsdetektor, der ebenfalls in dem Neutronenmoderator angeordnet und von einem vierten Metallkörper umgeben ist, der durch Neutronen im Wesentlichen nicht aktivierbar ist, wobei die Strah-

lungsdetektoren drehsymmetrisch angeordnet sind. Dadurch wird erreicht, dass das Neutronendosimeter inhomogene Strahlungsfelder besonders gut vermessen kann.

5 Besonders bevorzugt sind die vier Strahlungsdetektoren so angeordnet, dass sie eine Symmetrie, insbesondere eine 180°-Drehsymmetrie, aufweisen. Es ist aber auch möglich, mehr als vier Strahlungsdetektoren vorzusehen.

10 Als geeignete Strahlungsdetektoren haben sich Halbleiterdetektoren herausgestellt, insbesondere Silizium-Halbleiterdetektoren.

15 Besonders bevorzugt liegt die Pulshöhenschwelle bei mehr als 600 keV, beispielsweise bei 660 keV. Dadurch werden von Cs-137 emittierte Quanten effektiv diskriminiert. Damit die Messgenauigkeit nicht leidet, sollte die Pulshöhenschwelle unterhalb von 1 MeV liegen, insbesondere unter 800 keV.

20 In einer bevorzugten Ausführungsform ist die Auswerteschaltung eingerichtet, um von ionisierender Strahlung hervorgerufene elektrische Impulse mit einer Pulshöhe, die oberhalb einer vorgegebenen Pulshöhenschwelle liegt, zu unterdrücken. Gut geeignet sind Pulshöhenschwelle von höchstens 800 keV. Denkbar ist aber auch, diese obere Pulshöhenschwelle kleiner als 1000 keV oder gar 2000 keV zu wählen. Auf diese Weise wird ein hochenergetischer Hintergrund unterdrückt und die Messgenauigkeit weiter gesteigert.

25 Ein besonders einfach zu fertigendes und genaues Neutronendosimeter wird erhalten, wenn der Neutronenmoderator kugelschalenförmig ist und die Strahlungsdetektoren in unmittelbarer Nähe zum Kugelmittelpunkt der Kugelschale angeordnet sind. Hierunter ist insbesondere zu verstehen, dass die Strahlungsdetektoren so angeordnet sind, dass der Schwerpunkt dieser Anordnung dicht
30 beim Kugelmittelpunkt liegt, beispielsweise innerhalb des inneren Drittels be-

züglich des Radius der Kugel. Besonders geeignete Radien für die Kugel liegen zwischen 10 und 20 cm, insbesondere bei 15 cm.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform umfasst der erste Metallkörper eine Silberfolie. Silber kommt natürlicherweise in den Isotopen ^{109}Ag und ^{107}Ag vor, die beide Neutronen unter Aussendung von Gammastrahlung absorbieren und als Betastrahler zu Cadmium zerfallen. Dies geschieht einerseits nach der Gleichung



der thermische Wirkungsquerschnitt beträgt 90,5 barn, die Halbwertszeit von ^{110}Ag ist 25 Sekunden, die maximale Energie der Betastrahlung ist $E_{\text{max}}=2,9$ MeV. Die andere Gleichung ist



der Wirkungsquerschnitt ist 38,6 barn, die Halbwertszeit 144 Sekunden, die maximale Energie beim Betazerfall $E_{\text{max}}=1,7$ MeV.

Die Dicke der Silberfolie ist bevorzugt so gewählt, dass sie in etwa der mittleren Reichweite der jeweiligen Betastrahlung in Silber entspricht.

Bevorzugt umfasst der zweite Metallkörper eine Zinnfolie. Zinn weist bezüglich der Photonenabsorption eine ähnliche Charakteristik wie Silber auf, ist aber durch Neutronen nur geringfügig (Wirkungsquerschnitt eine mbarn) aktivierbar.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform umfasst das Neutronendosimeter eine Auswerteeinheit, die eingerichtet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten (i) Erfassen von Zählraten der Strahlungsdetektoren und Errechnen der von Beta-Strahlung herrührenden Zählrate aus der Zähl-

rate des ersten Strahlungsdetektors und gegebenenfalls des dritten Strahlungsdetektors einerseits und der Zählrate des zweiten und gegebenenfalls des vierten Strahlungsdetektors andererseits. Sofern mehr als vier Strahlungsdetektoren vorhanden sind, wird die von Betastrahlung herrührende Zählrate entsprechend den aus den Zählraten aller Strahlungsdetektoren errechnet. Da die Absorption für Photonen für beide Metallkörper gleich groß ist, aber nur der erste Metallkörper durch Neutronen aktivierbar ist, kann ein Photonen-Hintergrund herausgerechnet werden. Auf diese Weise kann die Neutronendosis besonders genau gemessen werden. Es sei darauf hingewiesen, dass externe Alpha- und Beta-Strahlung bereits durch den Neutronenmoderator weitgehend abgeschirmt wird.

Insbesondere werden Zählergebnisse unterdrückt, die eine Pulshöhe unterhalb einer vorgegebenen Pulshöhenschwelle von beispielsweise 600 keV, insbesondere 660 keV, haben, um den ^{137}Cs -Hintergrund zu unterdrücken.

Um besonders hochenergetische Neutronen mit Energien oberhalb von 10 MeV zu erfassen, kann, innerhalb des Moderators eine Zwischenschicht (z.B. Blei) angeordnet werden. In dieser Schicht erzeugen hochenergetische Neutronen durch eine Spallationsreaktion an den Atomkernen mehrere niederenergetische Neutronen, was zu einer Erhöhung des Ansprechvermögens des Detektors im Zentrum des Moderators führt.

Im Folgenden wird die Erfindung anhand eines exemplarischen Ausführungsbeispiels näher erläutert. Dabei zeigt

Figur 1 einen Querschnitt durch ein erfindungsgemäßes Neutronendosimeter,

Figur 2 ein Pulshöhenspektrum, das mit dem Neutronendosimeter gemäß Figur 1 unter Bestrahlung mit einer ^{252}Cf -Quelle aufgenommen worden ist,

5 Figur 3 ein Pulshöhenspektrum, das mit einem Silizium-Halbleiterdetektor aus dem Neutronendosimeter gemäß Figur 1 unter Bestrahlung mit ^{137}Cs , ^{60}Co und Photonen mit einer Energie zwischen 6 und 7 MeV aufgenommen wurde.

10 Figur 4 zeigt eine Zählrate bezogen auf 10 Sekunden Messzeit, die mit dem Neutronendosimeter gemäß Figur 1 nach Bestrahlung mit einer ^{252}Cf -Quelle aufgenommen wurde.

15 Figur 1 zeigt ein Neutronendosimeter 10 mit einem Neutronenmoderator 12 aus Polyethylen, einem ersten Strahlungsdetektor 14, einem zweiten Strahlungsdetektor 16, einem dritten Strahlungsdetektor 18 und einem vierten Strahlungsdetektor 20.

20 Alle Strahlungsdetektoren 14, 16, 18, 20 sind Silizium Halbleiterdetektoren, im vorliegenden Fall mit einer Fläche von $8,5 \times 10,5 \text{ mm}^2$ und einer effektiven Schichtdicke von 0,48 mm (bei Anlegen einer Spannung von 80 V), und im Neutronenmoderator 12 angeordnet und von diesem umgeben. Zwischen dem Neutronenmoderator 12 und einem Aufnahmeraum 22, in dem die Strahlungsdetektoren 14, 16, 18, 20 angeordnet sind, ist eine Kugelhöhle 24 aus Aluminium angeordnet. Der Aufnahmeraum 22 ist mit Luft gefüllt. Der Neutronenmode-
25 rator 12 ist eine Polyethylen-Kugelhülle mit einem Außendurchmesser von circa 30 cm (12").

30 Die Strahlungsdetektoren 14, 16, 18, 20 sind in Epoxydharz 26 eingebettet und so räumlich relativ zueinander fixiert. Die Anordnung der Strahlungsdetektoren hat einen Schwerpunkt S, der mit einem Kugelschwerpunkt des kugelhüllenför-

migen Neutronenmoderators 12 zusammenfällt. Der erste Strahlungsdetektor 14 ist von einem ersten Metallkörper 28 in Form einer Silberfolie mit einer Dicke von 250 µm umgeben. Der zweite Strahlungsdetektor 16 ist von einem zweiten Metallkörper 30 in Form einer 360 µm dicken Zinn-Folie umgeben. Auf gleiche Weise ist der dritte Strahlungsdetektor 18 von einem dritten Metallkörper 32 umgeben, der wie der erste Metallkörper 28 aufgebaut ist. Der vierte Strahlungsdetektor 20 ist von einem vierten Teilkörper 34 umgeben, der wie der zweite Metallkörper 30 aufgebaut ist.

Die vier Strahlungsdetektoren 14, 16, 18 und 20 sind über schematisch eingezeichnete Kabel 36 mit einer Auswerteeinheit 38 verbunden.

Fällt ein schematisch eingezeichnetes Neutron 40 in das Neutronendosimeter 10 ein, so wird es zunächst vom Neutronenmoderator thermalisiert und kommt dann beispielsweise mit dem ersten Metallkörper 28. Es laufen dann die Reaktionen

$$^{109}\text{Ag} + n \rightarrow \gamma + ^{110}\text{Ag} \rightarrow ^{110}\text{Cd} + \beta^- \quad (1) \quad \text{und} \quad (2)$$

$$^{107}\text{Ag} + n \rightarrow \gamma + ^{108}\text{Ag} \rightarrow ^{108}\text{Cd} + \beta^- \quad (\text{siehe oben}) \text{ ab.}$$

Der erste Strahlungsdetektor 14 erfasst dann die Beta-Strahlung, die durch den Zerfall der ^{110}Ag und ^{108}Ag -Isotope emittiert wird und leitet den entsprechenden Zählimpuls an die Auswerteeinheit 38 weiter.

Fällt das Neutron 40 im zweiten Metallkörper 30 ein, so erfolgt keine Aktivierung und das Neutron wird nicht erfasst. Beide Strahlungsdetektoren, 14 und 16 erfassen, jedoch Gamma-Quanten, die sich ebenfalls im Strahlenfeld befinden.

Die Auswerteeinheit 38 erfasst die Zählrate von erstem und drittem Strahlungsdetektor einerseits und zweitem und viertem Strahlungsdetektor andererseits und zieht die Zählraten, gegebenenfalls gewichtet, voneinander ab, so dass diejenige Zählrate erhalten wird, die nur auf die Neutronenaktivierung des Sil-

bers – im Wesentlichen Beta-Strahlung zurückgeht. In anderen Worten wird der Gamma-Hintergrund durch die Auswerteeinheit 38 eliminiert.

Figur 2 zeigt eine Darstellung der Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$, gegen die Pulshöhe bei Bestrahlung mit einer ^{252}Cf -Quelle. Die Definition der Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ kann der ICRP Publication 74, Annals of the ICRP 26, No. 3-4, Pergamon Press, Oxford, 1996 entnommen werden.

Es ist zu erkennen, dass der erste Strahlungsdetektor 14, der mit einer Silberfolie umgeben ist, für die Pulshöhe eine höhere Zählrate liefert als der zweite Strahlungsdetektor 16, der mit einer Zinn-Folie umgeben ist. Die Differenz zwischen den beiden Kurven wird durch die Beta-Strahlung hervorgerufen, die ihrerseits aus der oben dargelegten Kernreaktion resultiert.

Figur 3 zeigt eine Darstellung der $H^*(10)$ -Antwort des ersten Strahlungsdetektors 14 bei Bestrahlung mit reiner Gamma-Strahlung durch die Quellen ^{137}Cs , ^{60}Co und Photonen mit einer Energie zwischen 6 und 7 MeV. Es ist zu erkennen, dass Photonen der ^{137}Cs -Quelle jenseits einer Pulshöhe von cirka 660 keV im Wesentlichen keinen Beitrag mehr zur $H^*(10)$ -Antwort liefern. Aus diesem Grund wird bei einer bevorzugten Ausführungsform ein Pulshöhenschwellenwert von 600 keV bis 660 keV gewählt, da so ein starker ^{137}Cs -Hintergrund diskriminiert werden kann. Der zweite Strahlungsdetektor liefert bei Bestrahlung mit Gamma-Strahlung Pulshöhenspektren, die von denen des Strahlungsdetektors 14 m im Rahmen der Messunsicherheiten nicht unterschieden werden können.

Figur 4 zeigt die mit dem Neutronendosimeter gemäß Figur 1 aufgenommene Zählrate bei Bestrahlung mit einer ^{252}Cf -Quelle, die zum Zeitpunkt $t=0$ ausgeschaltet wird. Es ist zu erkennen, dass die Zählrate mit der Zeit abklingt, wobei sich zwei exponentielle Abklingkurven überlagern. Die erste Abklingkurve, die gepunktet mit der Geraden g1 dargestellt ist, gehört zur Halbwertszeit 25 Se-

kunden und bezieht sich auf den Zerfall ^{110}Ag . Die mit der Ausgleichsgerade g2 dargestellte Abklingkurve gehört zu der Halbwertszeit 144 Sekunden für den Zerfall von ^{109}Ag .

5 Bei einer Bestrahlung mit Neutronen bilden sich ^{110}Ag und ^{108}Ag in einem Verhältnis von etwa 2,2:1, das ihrem anteiligen Vorkommen in $^{\text{nat}}\text{Ag}$ (48% und 52%) und dem Verhältnis der Wirkungsquerschnitte der beteiligten Kernreaktionen (90,5:38,6) entspricht. Da die mittlere Energie der Beta-Strahlung des ^{100}Ag -Isotops jedoch höher ist als die des ^{108}Ag Isotops, werden bedingt durch
10 die Pulshöhenschwelle bei 660 keV die Beta-Signale des ^{110}Ag effektiver nachweisen als die des ^{108}Ag . Aus den gemessenen Abklingkurven ergibt sich ein Faktor 8. Damit dominieren die Pulse des ^{110}Ag , was mit einer kurzen Halbwertszeit zerfällt und daher schnell nachweisbare Beta-Strahlung produziert. Auf diese Weise kann schon kurz nach dem Einsetzen der intensiven Neutronenstrahlung diese Neutronenstrahlung nachgewiesen werden. Das erfindungsgemäße Neutronendosimeter hat damit eine sehr kurze Reaktionszeit von
15 wenigen Sekunden.

Die in Figur 1 gezeigte Auswerteeinheit 38 ist ausgebildet, um von den Strahlungsdetektoren 14, 16, 18, 20 Energiepulse zu empfangen, und solche Impulse zu verwerfen, die bei einer Pulshöhe von unterhalb eines Pulshöhenschwellenwerts von 660 keV und von oberhalb eines Pulshöhenschwellenwerts von 1 MeV liegen. Die verbleibenden Impulse des ersten und dritten Strahlungsdetektors 14, 18 einerseits sowie des zweiten und vierten Strahlungsdetektors 16, 20
20 andererseits werden voneinander subtrahiert. Gegebenenfalls wird eine Gewichtssubtraktion unter Verwendung von während eines Kalibrierprozesses festgelegten Kalibrierparametern durchgeführt.

Aus dieser Differenz wird durch Multiplizieren mit einem ebenfalls durch Kalibrierung gewonnenen Faktor der $H^*(10)$ -Messwert ermittelt und über eine nicht
30 eingezeichnete Schnittstelle ausgegeben. Bei dieser Schnittstelle kann es sich

beispielsweise um ein Display oder um eine Funkschnittstelle handeln, mit der das Neutronendosimeter 10 die Messwerte an einen zentralen Rechner weiterleitet.

5 Zum Kalibrieren des Neutronendosimeters 10 wird es mit Quellen benannter Stärke bestrahlt und etwaige Messabweichungen werden durch Korrekturfaktoren kompensiert. In der folgenden Tabelle sind Messwerte angegeben, die die Zählraten für verschiedene Strahlungsarten darstellen.

Strahlungsquelle	mit Ag-Folie / μSv^{-1}	mit Sn-Folie / μSv^{-1}	Neutronen / μSv^{-1}
^{60}Co , 0°	112.3 ± 0.3	113.5 ± 0.3	-1.2 ± 0.4
^{60}Co , 90° rechts	87.5 ± 0.3	87.2 ± 0.3	0.4 ± 0.4
^{60}Co , 90° links	82.6 ± 0.3	81.4 ± 0.3	1.2 ± 0.4
^{60}Co , 90° oben	100.5 ± 0.3	101.3 ± 0.3	-0.8 ± 0.4
^{60}Co , 90° unten	103.8 ± 0.3	102.5 ± 0.3	1.2 ± 0.4
6-7 MeV γ -Str., 0°	195.6 ± 1.0	196.7 ± 1.0	-1.1 ± 1.4
6-7 MeV γ -Str., 90° rechts	181.3 ± 1.0	180.1 ± 1.0	1.2 ± 1.3
6-7 MeV γ -Str., 90° links	179.0 ± 1.0	177.3 ± 0.9	1.6 ± 1.3
6-7 MeV γ -Str., 90° oben	181.0 ± 1.0	181.6 ± 1.0	-0.7 ± 1.3
6-7 MeV γ -Str., 90° unten	176.6 ± 0.9	175.2 ± 0.9	1.4 ± 1.3
Thermische Neutronen	18.4 ± 0.3	12.5 ± 0.3	5.9 ± 0.5
144 keV Neutronen	10.9 ± 0.2	4.3 ± 0.1	6.6 ± 0.3
250 keV Neutronen	9.3 ± 0.2	3.5 ± 0.1	5.8 ± 0.2
565 keV Neutronen	8.3 ± 0.1	2.5 ± 0.04	5.8 ± 0.1
1,2 MeV Neutronen	10.1 ± 0.05	2.2 ± 0.02	7.9 ± 0.1
2,5 MeV Neutronen	14.1 ± 0.04	2.7 ± 0.02	11.4 ± 0.1
5,0 MeV Neutronen	14.2 ± 0.06	3.2 ± 0.03	11.0 ± 0.1
8,0 MeV Neutronen	13.3 ± 0.05	3.4 ± 0.03	9.9 ± 0.1
14,8 MeV Neutronen	7.5 ± 0.04	2.3 ± 0.02	5.2 ± 0.1
^{252}Cf (offen)	14.6 ± 0.3	5.6 ± 0.2	9.0 ± 0.4
^{252}Cf (D_2O moderiert)	25.0 ± 0.9	14.7 ± 0.51	10.3 ± 1.2
$^{241}\text{Am-Be}$	10.3 ± 0.3	4.1 ± 0.2	6.2 ± 0.4

10

Es ist zu erkennen, dass das Neutronendosimeter im Rahmen der statischen Abweichungen selektiv nur Neutronenstrahlung mit einer hohen Empfindlichkeit von $9,0 \pm 0,4$ Zählereignissen pro μSv (siehe ^{252}Cf -Quelle) erfasst.

Bezugszeichenliste

	10	Neutronendosimeter
	12	Neutronenmoderator
5	14	erster Strahlungsdetektor
	16	zweiter Strahlungsdetektor
	18	dritter Strahlungsdetektor
	20	vierter Strahlungsdetektor
10	22	Aufnahmeraum
	24	Kugelhülle
	26	Epoxydharz
	28	erster Metallkörper
15	30	zweiter Metallkörper
	32	dritter Metallkörper
	34	vierter Metallkörper
	36	Kabel
	38	Auswerteeinheit
20	S	Schwerpunkt

Patentansprüche

1. Neutronendosimeter mit

- 5 (a) einem Neutronenmoderator (12),
- (b) einem ersten Strahlungsdetektor (14),
- der in dem Neutronenmoderator (12) angeordnet und
 - von einem ersten Metallkörper (28) umgeben ist, der durch Neutronen aktivierbares Material enthält,
- 10 (c) einem zweiten Strahlungsdetektor (16), der
- in dem Neutronenmoderator (12) in unmittelbarer Nähe des ersten Strahlungsdetektors (14) angeordnet ist und
 - von einem zweiten Metallkörper (30) umgeben ist, der durch Neutronen im Wesentlichen nicht aktivierbar ist,
- 15 (d) wobei der erste Metallkörper (28) und der zweite Metallkörper (30) so ausgebildet sind, dass sie im Wesentlichen die gleiche Absorption für Photonen haben und
- (e) einer Auswerteschaltung, die
- mit den Strahlungsdetektoren verbunden und
 - eingerichtet ist, um von ionisierender Strahlung hervorgerufene elektrische Impulse mit einer Pulshöhe, die unterhalb einer vorgegebenen Pulshöhenschwelle liegt, zu unterdrücken.
- 20

2. Neutronendosimeter nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch
- (f) einen dritten Strahlungsdetektor (18),
 - der in dem Neutronenmoderator (12) angeordnet und
 - von einem dritte Metallkörper (32) umgeben ist, der durch Neutronen aktivierbares Material enthält, und
 - (g) einen vierten Strahlungsdetektor (20),
 - der in dem Neutronenmoderator (12) angeordnet und
 - von einem vierten Metallkörper (34) umgeben ist, der durch Neutronen im Wesentlichen nicht aktivierbar ist,
 - (h) wobei die Strahlungsdetektoren symmetrisch, insbesondere dreh-symmetrisch angeordnet sind.
3. Neutronendosimeter nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Pulshöhenschwelle bei mehr als 300 keV, in besondere bei mehr als 600 keV, liegt.
4. Neutronendosimeter nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Auswerteschaltung eingerichtet ist, um von ionisierender Strahlung hervorgerufene elektrische Impulse mit einer Pulshöhe, die oberhalb einer vorgegebenen, zweiten Pulshöhenschwelle liegt, zu unterdrücken, wobei die zweite Pulshöhenschwelle bei mindestens 800 keV, insbesondere bei mindestens 1000 keV, liegt.
5. Neutronendosimeter nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens einer der Strahlungsdetektoren ein Halbleiterdetektor ist.

6. Neutronendosimeter nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Metallkörper (28) eine Silberfolie umfasst.
7. Neutronendosimeter nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Metallkörper (30) eine Zinnfolie umfasst.
8. Neutronendosimeter nach einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Auswerteeinheit, die eingerichtet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten:
- (i) Erfassen von Zählraten der Strahlungsdetektoren,
 - (ii) Errechnen der von Beta-Strahlung herrührenden Zählrate aus der Zählrate des ersten (14) Strahlungsdetektors und gegebenenfalls des dritten Strahlungsdetektors (18) einerseits und der Zählrate des zweiten Strahlungsdetektors (16) und gegebenenfalls des vierten Strahlungsdetektors (20) andererseits.

9. Verfahren zum Messen einer Neutronendosis, mit den folgenden Schritten:

(a) Erfassen von Zählraten mit einem ersten Strahlungsdetektor (14),
- der in einem Neutronenmoderator (12) angeordnet und
- von einem ersten Metallkörper (28) umgeben ist, der durch Neutronen aktivierbares Material enthält,

(b) Erfassen von Zählraten mit einem zweiten Strahlungsdetektor (16),
- der in unmittelbarer Nähe des ersten Strahlungsdetektors (14) in dem Neutronenmoderator (12) angeordnet und
- von einem zweiten Metallkörper (30) umgeben ist, der durch Neutronen im Wesentlichen nicht aktivierbar ist,

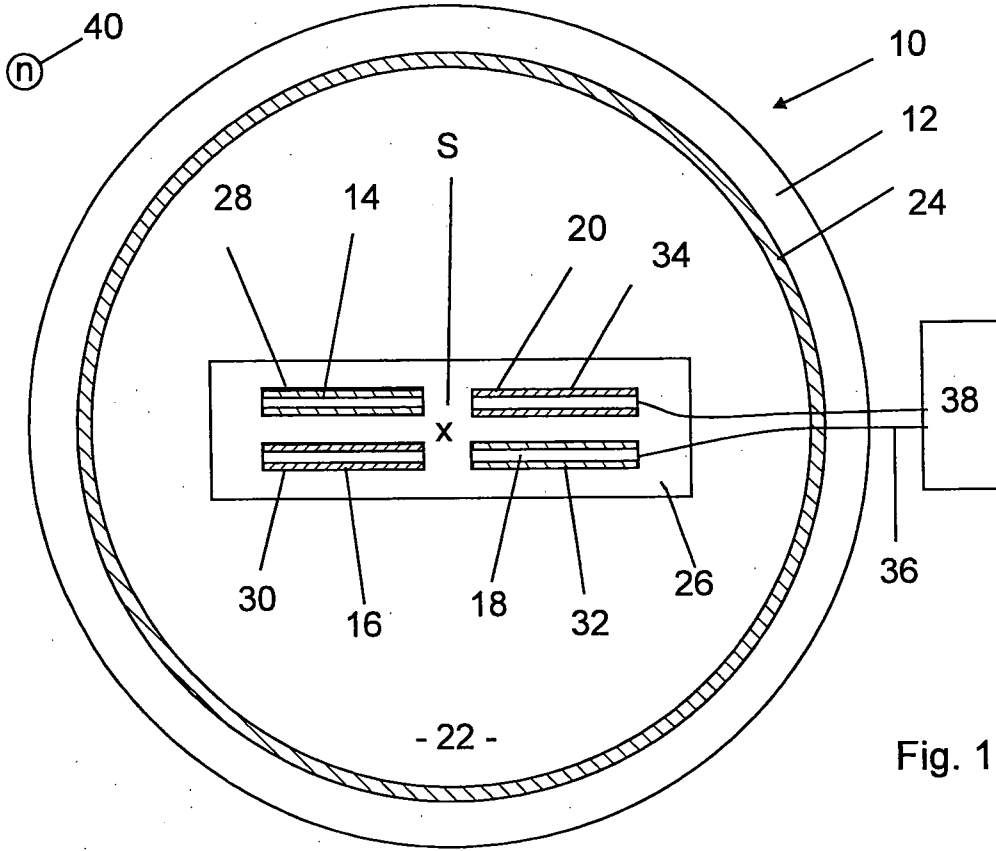
wobei der erste Metallkörper (28) und der zweite Metallkörper (30) so ausgebildet sind, dass sie im Wesentlichen die gleiche Absorption für Photonen haben, und

(c) Ermitteln der Neutronendosis aus den Zählraten durch
- Errechnen der von Beta-Strahlung herrührenden Zählrate aus der Zählrate des ersten Strahlungsdetektors (14) einerseits und der Zählrate des zweiten Strahlungsdetektors (16) andererseits und

- Errechnen der Neutronendosis aus der von Beta-Strahlung herrührenden Zählrate,

(d) wobei das Erfassen der Zählraten mit dem ersten Strahlungsdetektor (14) und dem zweiten Strahlungsdetektor (16) ein Unterdrücken von Zählereignissen unterhalb einer vorgegebenen Pulshöhenschwelle umfasst.

10. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Pulshöhenschwelle oberhalb von 600 keV liegt.



- 22 -

Fig. 1

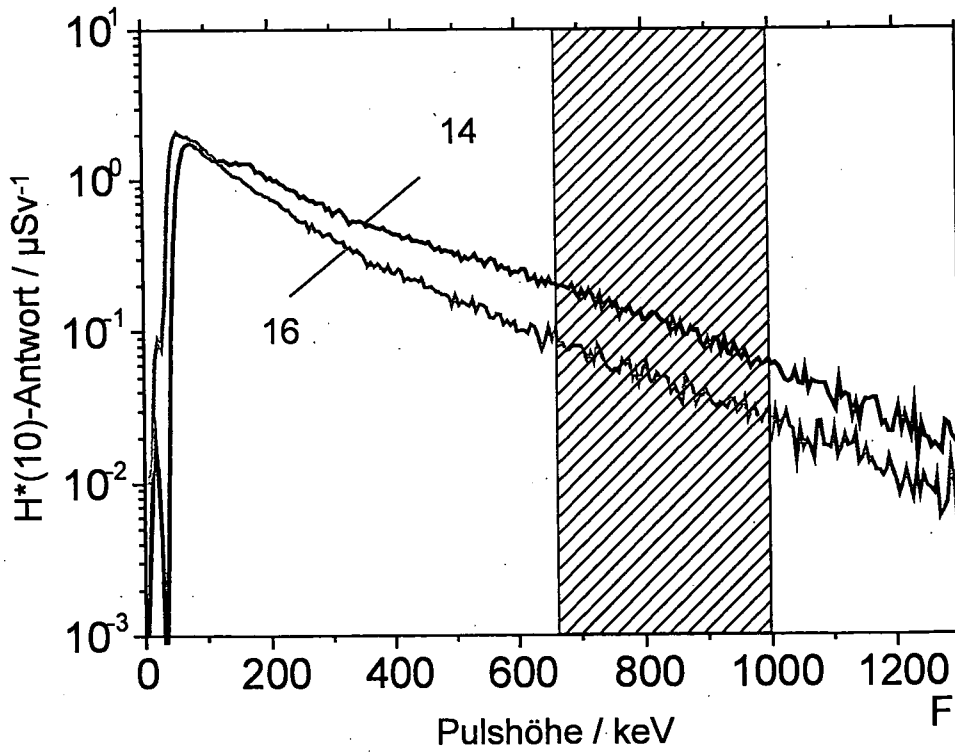


Fig. 2

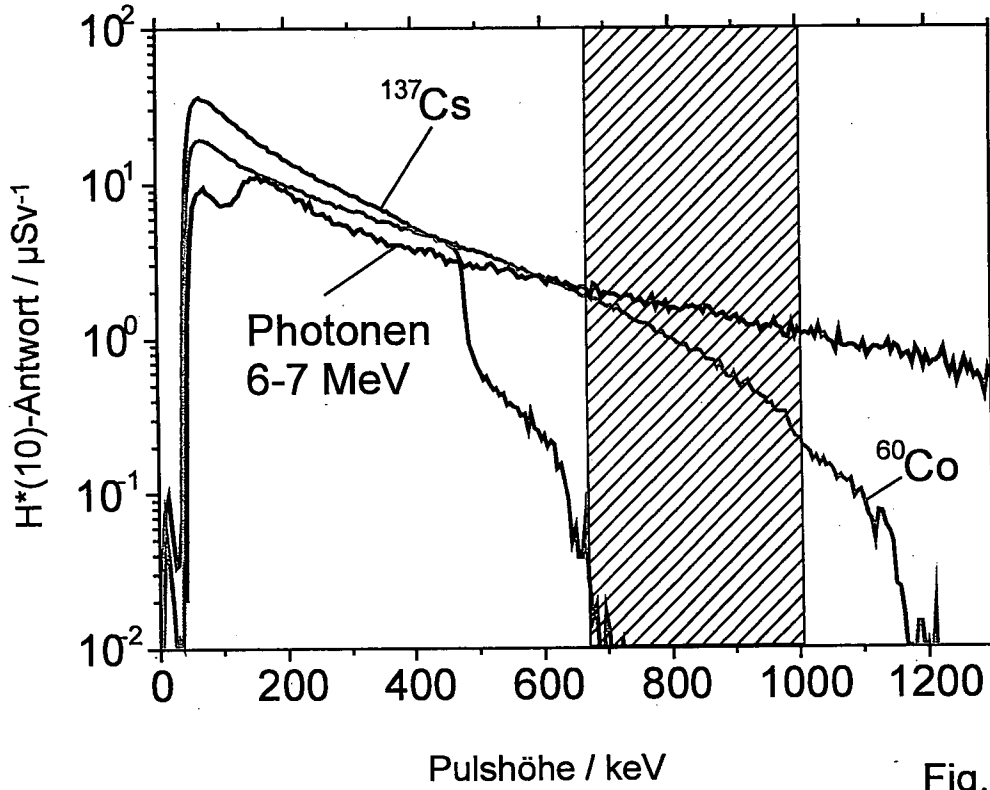


Fig. 3

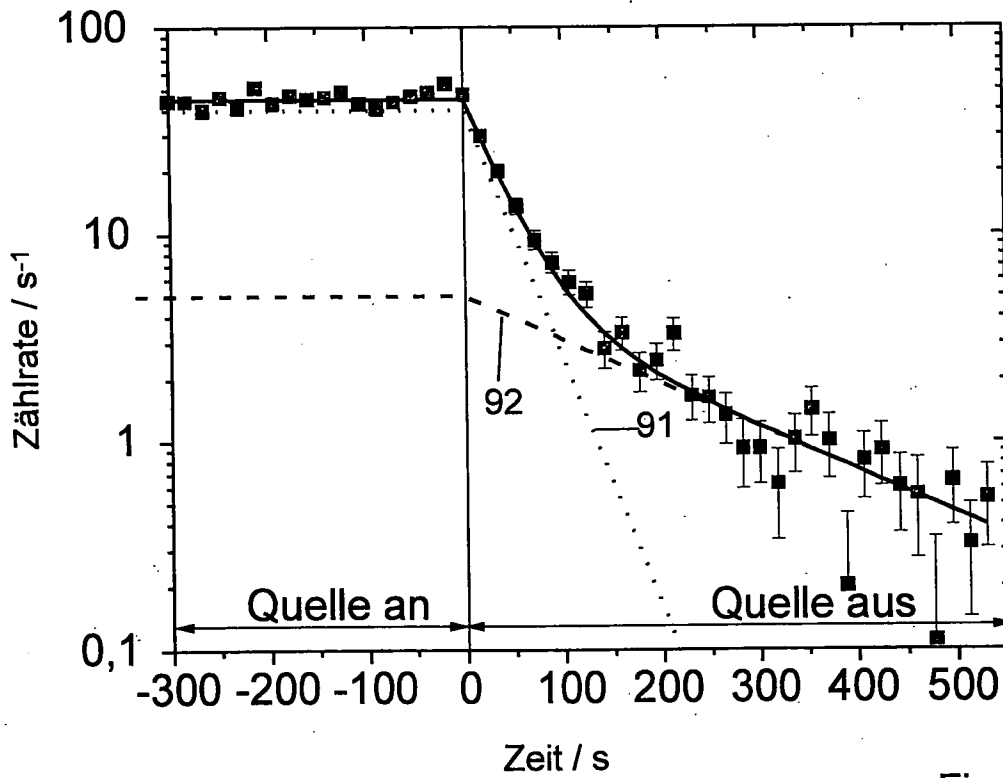


Fig. 4