

Was kann ein selbstgebauter PIN-Dioden Zähler messen?

Bernd Laquai, 6.6.2012

Wer viel misst, misst viel Mist. Das ist eine alte Weisheit unter Messtechnikern. Es ist also durchaus sinnvoll, das zu hinterfragen, was ein Messgerät oder ein Detektor anzeigt.

Grundsätzlich ist eine quantitative Messung der Radioaktivität ein recht schwieriges Thema. Das fängt schon mit den Einheiten an. Einfach ist noch die Einheit der Aktivität zu verstehen, das Becquerel. 1 Becquerel steht dabei für einen „Zerfall“ oder besser gesagt für einen Wechsel des Energiezustands eines Nuklids, denn nicht immer „zerfällt“ das Nuklid dabei im wahren Sinne des Wortes. Manchmal sendet es nur Kernstrahlung aus bzw. ändert dabei nur die Neutronenanzahl im Kern ohne sich chemisch zu ändern (Änderungen in den Elektronenschalen).

Mit einem Zerfall verbunden ist zunächst einmal die Aussendung von Teilchenstrahlung, wobei die Teilchen meist entweder Alphateilchen, Betateilchen bzw. Neutronen sind. Mit dem Verlassen dieser Teilchen befindet sich der Tochterkern dann meistens noch in einem energetisch höheren „angeregten Zustand“. Zur Ruhe kommt er erst nach Aussendung von weiterer elektromagnetischer Strahlung der Gamma-Strahlung. Diese Aussendung von elektromagnetischer Strahlung kann recht kompliziert ablaufen und es können mehrere Energien (Frequenzen) im Spiel sein die aber charakteristisch für das Mutternuklid sind (siehe auch Gammaspektroskopie). Oft wird aber die zu einem Zerfall gehörende Gammastrahlung gar nicht angegeben, höchstens wenn sie besonders stark ist oder nur eine sehr dominante Energie auftaucht. Die mit einem Zerfall einhergehende Gammastrahlung kann aber in den allermeisten Fällen nachgewiesen werden. Allerdings gibt die Stärke der Gammastrahlung nur wenig Hinweis auf die Stärke der gesamten Teilchenstrahlung eines Zerfalls.

Wenn also eine alte Uhr als Probe vorliegt, bei der Radium-haltige Leuchtfarbe für Zeiger und Ziffern verwendet wurde, dann stellt man mit dem selbstgebaute Zähler ein Ticken fest, das so gut wie sicher nicht von der Alphastrahlung des Radiumzerfalls entsteht. Radium-226 zerfällt nämlich zu 94,6% unter Aussendung eines Alphapartikels mit 4,868MeV Energie in Radon-222. Mit Lichtabdeckung und einer BPW34 im Kunststoffgehäuse kann man diese Alphastrahlung nicht nachweisen. Allerdings zerfallen 5,4% des Radiums-226 zunächst einmal in einen Zwischenzustand des Tochternuklids Radon-222, der erst nach Aussendung einer Gammastrahlung mit 187keV in den energetisch niedrigsten Zustand des Radon 222-übergeht. Diese Gammastrahlung aber kann ein Gamma-empfindlicher Detektor erkennen.

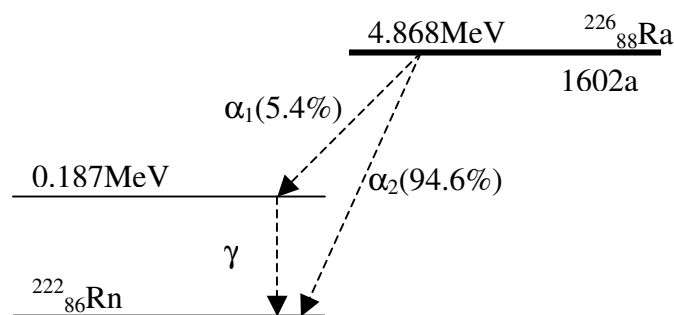


Abb. 1: Zerfallsschema von 226-Radium

Dazu kommt, dass der Zerfall von Radium-226 in Radon-222 mit einer Halbwertszeit von 1602 Jahren keineswegs zu Ende ist. Das Radon-222 zerfällt weiter in Polonium-218 auch

unter Alphastrahlung innerhalb relativ kurzer Zeit (im Minutenbereich). Das Polonium zerfällt weiter in Astat-218 im Sekundenbereich (oder in Blei-214) also schnell verglichen mit den 1602 Jahren des Radiums. Daraufhin folgt das Wismut-214, das wie das sehr kurzlebige Astat-218 eine Betastrahlung abgibt. Der Zerfall des Radium-226 erfolgt also in einer Zerfallskette, wobei die ebenfalls strahlenden Tochternuklide vergleichsweise kurzlebig sind. Die Tochterkerne sind daher „genetisch abhängig“. Durch die Kurzlebigkeit der Tochternuklide wird praktisch für jedes zerfallene Radium-226 eine Serie Tochternuklide gebildet, die viel schneller zerfallen. D.h. die Aktivität der Tochternuklide wird durch das Mutternuklid bestimmt. Um jetzt beispielsweise die Aktivität des Tochternuklids Radon-222 zu bestimmen, muss man die Zerfallsgleichung wie folgt formulieren:

$$A_b = \frac{dN_b}{dt} = -\lambda_b N_b + \lambda_a N_a \quad (1)$$

Darin steht der Index b für das Tochternuklid Radon-222 und der Index a für das Mutternuklid Radium-226. Die Aktivität wird also durch den Zerfall von Radon mit der Zerfallskonstante λ_b und die dem Zerfall entgegenwirkenden Nachbildung von Radon durch das zerfallende Radium mit der Zerfallskonstante λ_a bestimmt.. Diese Differentialgleichung lässt sich lösen mit:

$$N_b = \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} N_a(t=0) \cdot (e^{-\lambda_a t} - e^{-\lambda_b t}) \quad (2)$$

Gleichzeitig gilt:

$$N_a = N_a(t=0) \cdot e^{-\lambda_a t} \quad (3)$$

Daher kann man die Lösung auch so schreiben:

$$N_b = \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} N_a \cdot (1 - e^{-(\lambda_b - \lambda_a)t}) \quad (4)$$

Jetzt sieht man, dass für $\lambda_a \ll \lambda_b$, und gleichbedeutend in Halbwertszeiten ausgedrückt für $T_a \gg T_b$, der exponentielle Term für große t gegen Null geht und somit gilt:

$$N_b = \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} N_a \quad (5)$$

Wegen $A = \lambda N$ und mit $T = \ln 2 / \lambda$, gilt dann auch:

$$A_b = \frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_a} A_a = \frac{T_a}{T_a - T_b} A_a \quad (6)$$

Man kann somit erkennen, dass sich im Falle $T_a \gg T_b$ die Aktivität des Tochternuklids zunächst aufbaut bis annähernd $A_b = A_a$ gilt, und somit ein Gleichgewicht erreicht ist, bei dem genau so viele Tochternuklide zerfallen, wie durch zerfallene Mutternuklide wieder entstehen (radioaktives Gleichgewicht).

Wenn dagegen die Halbwertszeit eines Tochternuklids deutlich größer ist als die des Mutternuklids, entstehen aus den schnell zerfallenden Mutternukliden annähernd so viele Tochternuklide, die nach dem Zerfall der Muttersubstanz an deren Stelle mit der langen Halbwertszeit der Tochternuklide sehr langsam zerfallen.

Auch hier kann man von Gleichung (2) ausgehen und sich überlegen, dass der erste Exponentialterm relativ schnell unbedeutend wird, also dass gilt:

$$N_b = \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} N_a(t=0) \cdot e^{-\lambda_b t} \quad (7)$$

In die Aktivität umgerechnet und mit Halbwertszeiten ausgedrückt (und für $T_b \gg T_a$) bedeutet das:

$$A_b = A_a(t=0) \cdot \frac{T_a}{T_b} e^{-\frac{\ln 2}{T_b} t} \quad (8)$$

Das heißt, man bekommt auch in diesem Fall eine von dem Verhältnis der Halbwertszeiten abhängige Aktivität der Tochtergeneration, die dann jedoch bedeutend geringer ausfällt.

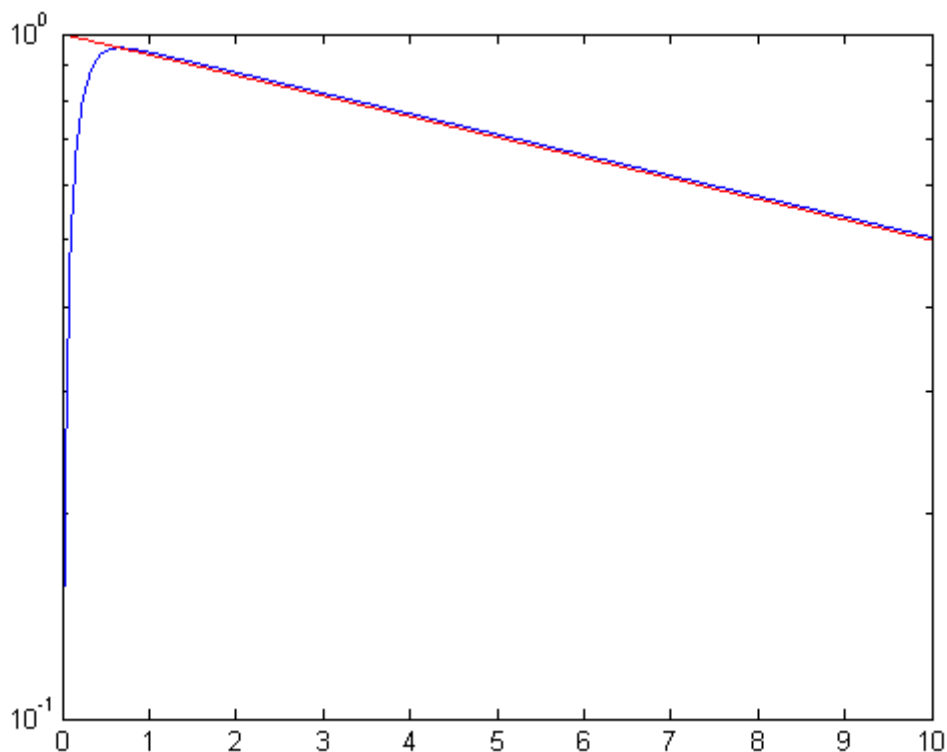


Abb. 2: Zerfallsaktivitäten für $T_a=10$ $T_b=0.1$ (rot Mutternuklid a, blau Tochternuklid b)

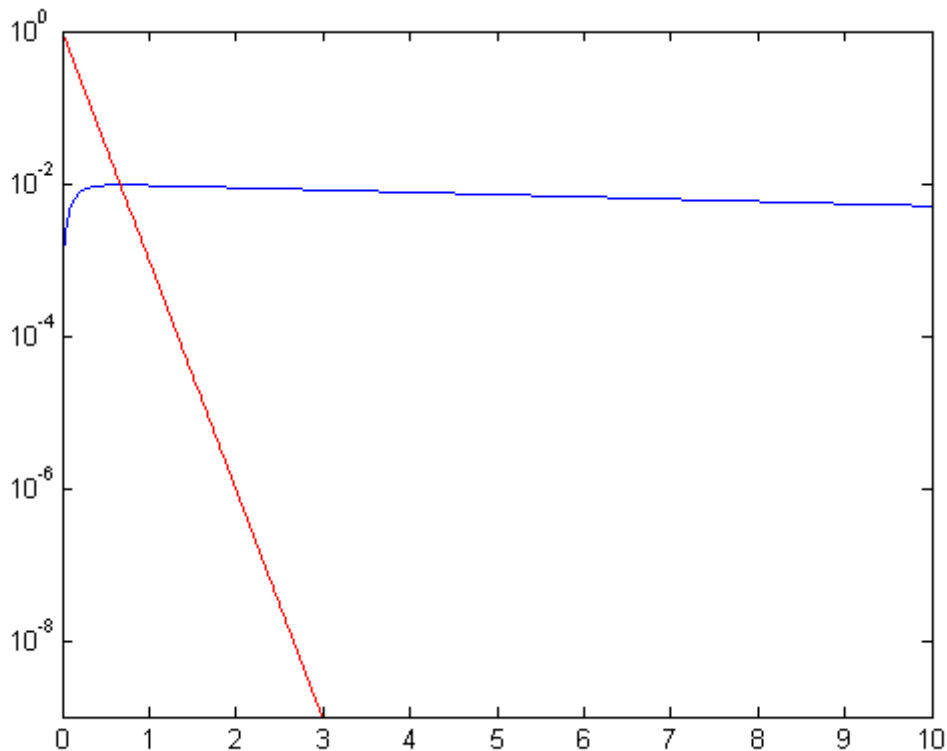


Abb. 3: Zerfallsaktivitäten für $T_a=0.1$ $T_b=10$ (rot Mutternuklid a, blau Tochternuklid b)

Das Gleiche gilt nun für alle folgenden Tochternuklide die genetisch in einem Art Stammbaum mit dem Radiumzerfall verknüpft sind, so dass man durch rekursives Lösen der verketteten Gleichungen die Aktivität der kompletten Kette bestimmen kann. Was sich dann ergibt ist immer ein „bunter Blumenstrauß“ von meist allen Strahlungsarten mit den verschiedensten Energien. Die Wahrscheinlichkeit, dass man mit einem selbstgebauten Zähler mindestens eine der Gamma- oder Beta-Komponenten der Zerfallskette erkennen kann, ist sehr hoch, wenn sie auch wegen einiger Extremfälle nicht ganz 100% ist.

Hinsichtlich der Wechselwirkung von Materie mit der unterschiedlichen Strahlungsart gibt es erhebliche Unterschiede, die bei einer quantitativen Messung zu beachten sind. Auch der PIN-Detektor lebt von dieser Wechselwirkung. Ein Strahlung transportiert zunächst einmal diese Energie weg vom Strahler hin zum Detektor. Das heißt die Energie der Strahlung ist sehr entscheidend für die Wirkung. Zu jedem Strahlungsquantum der Strahlung gehört diese Energie und zu jedem Zerfall gehört ein Strahlungsquantum. Nun ist aber noch entscheidend, dass die wechselwirkende Materie z.B. der Detektor die ausgestrahlte Energie auch absorbiert bzw. messbar umsetzt. Wenn also die Strahlung ohne Wechselwirkung bzw. Absorption durch den Detektor hindurchgeht ist die Strahlung auch nicht messbar.

Sobald Materie etwas absorbiert spricht man von einer „Dosis“. Das heißt man bekommt in einem bestimmten Material je nach Strahlung und Material eine gewisse absorbierte Energiedosis, die in der Einheit Gray oder J/kg gemessen wird. Die meisten Naturwissenschaftler gehen davon aus, dass die Wirkung auf biologisches Gewebe auch an dieser absorbierten Energie hängt. Es gibt aber auch Leute, die davon ausgehen, dass schon bereits das Vorhandensein der Strahlung selbst ohne Energieübertrag zu biologischen Effekten führen kann. Beachtet man die Energie-Absorption, dann ist die gemessene Energiedosis von einem Detektormaterial oder einem Gewebetyp abhängig.

Allein die an ein absorbierendes Material übertragene Energie ist in den meisten Fällen immer noch uninteressant. Sie muss ja auch eine Wirkung haben. Die Wirkung ob im Detektor oder in einem biologischen Gewebe hängt in aller Regel von der Möglichkeit ab ob die absorbierenden Atome ionisiert werden können oder nicht. Mit der Ionisierung verbunden ist das Freisetzen von negativ geladenen Elektronen und das Verbleiben eines positiven Atomkerns. Erst das kann in einem elektrisch oder elektronisch betriebenen Detektor nachgewiesen werden und man geht auch davon aus, dass Schädigungen von Zellen eine Ionisation voraussetzen. Es gibt aber auch noch weitere Energieüberträge durch Absorption, die nicht mit der Ionisation verbunden sind, sie bleiben meist unberücksichtigt. Die Ionendosis, welche in der Einheit Röntgen oder Coulomb/kg gemessen wird kann technisch relativ einfach gemessen werden. Aus der gemessenen Ionendosis versucht man nun auf die verursachende Energiedosis der Strahlung zu schließen. Bei der Umrechnung der Ionen- in die Energiedosis muss aber das Material bekannt sein, in dem Ionen gebildet wurden genauso wie die verursachende Strahlung.

Nun muss beachtet werden, dass bevor die Strahlung auf den Detektor auftrifft, sie durch ein Fenster in ein Gehäuse eintritt. Das Zähler-Fenster besteht beispielsweise aus Alufolie um Licht abzuschirmen und bei einer Photodiode wie der BPW34 ist der Halbleiterchip mit dem PIN-Übergang in einen dünnen, transparenten Kunststoff eingebettet. Bereits die Alufolie und der Kunststoff kann Strahlung absorbieren, genau wie die oberen Hautschichten oder die Kleidung des menschlichen Körpers.

Ganz grob kann man sagen, dass je größer die Energie einer Strahlung ist desto höher ist auch die ionisierende Wirkung, aber wie gesagt, das gilt nur ganz grob und ist nicht physikalisch so noch nicht exakt. Da die Alphastrahlung die höchste Energie hat und die Teilchen relativ langsam sind, ist die Wechselwirkung mit Materie besonders groß und damit auch ihre ionisierende Wirkung und ihre Absorption. Das bedeutet, dass bei einem einfachen selbst gebauten PIN-Dioden Zähler, die Strahlung gar nicht bis in den PIN-Übergang gelangt.

Die Reichweite der Alphastrahlung in Luft ist nur einige cm. Auf dieser Flugstrecke haben die Teilchen bereits schon sehr viele Luftmoleküle ionisiert und ihre Energie bereits komplett abgegeben. Selbst wenn man mit einem normalen Selbstbau-Zähler ganz nahe an einen Alphastrahler herangeht, werden die Teilchen in der Alufolie, die man zum Lichtschutz angebracht hat absorbiert. Mit der starken Wechselwirkung der Alphateilchen ist es auch zu erklären, dass bereits die Kleidung und die oberen Hautschichten die Alphastrahlung daran hindern weit in den Körpern einzudringen. Für den Körper ist die Alphastrahlung erst dann sehr gefährlich, wenn sie über Lebensmittel oder durch Einatmen in den Körper gelangt. Dann nämlich gibt sie ihre hohe Energie ganz an innere Körperzellen ab, die dazu hin auch noch besonders empfindlich sind.

Man kann nun die Probe und den Zähler ohne Lichtschutz in eine Dunkelkammer bringen, um die Alphastrahlung zu messen, aber auch das wird zunächst nichts helfen. So zeigt z.B. ein Am241 Strahler aus einem alten Rauchmelder so gut wie keine Zählimpulse mit der normalen in Kunststoff eingebetteten BPW34. Erst wenn man anstelle der BPW34 eine Photodiode in einem TO-5 Gehäuse nimmt, die ein Glasfenster hat und man dieses Glasfenster vorsichtig abschleift, dann wird man sehr viele und starke Pulse sehen, wenn man in der Dunkelkammer nahe genug an den Strahler herangeht. Dabei ist es jetzt auch nicht nötig dass man eine PIN-Photodiode nimmt, bei der harten, energiereichen Alphastrahlung wird jeder PN-Übergang ionisiert, sofern die Strahlung nicht vorher bereits schon in anderen Materialien oder der Luft (bei mehr als 4cm Entfernung) absorbiert wurde.

Die Gamma-Strahlung ist eher eine „energiearme“ Kernstrahlung, da sie eine elektromagnetische und keine Strahlung schwerer Teilchen ist. Sie breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit aus und die Wechselwirkung mit Materie ist vergleichsweise geringer. Daher hat sie eine sehr hohe Reichweite und kann so gut wie gar nicht vollständig, auch nicht von Blei, abgeschirmt werden. Dadurch dass die Wechselwirkung eher gering ist, ist auch die ionisierende Wirkung geringer. Der Detektor wird also relativ sicher erreicht (mit Alufolie und Kunststoff-Diodengehäuse) und erzeugt dann allerdings auch ein deutlich geringeres Detektorsignal als die Alphastrahlung. Das bedeutet ein PIN-Diodenzähler wird die in der aktiven Fläche absorbierte Gammastrahlung gut anzeigen, wenn man das Signal ordentlich verstärkt. Da die aktive Fläche aber viel kleiner ist, als die eines Geiger-Müller Zählrohrs, erhält man mit einer einzelnen BPW34 Diode deutlich weniger Zählimpulse als mit einem Zählrohr-Zähler. Wenn man nicht auf die hohe Ortsauflösung einer einzelnen kleinen Diode aus ist, dann sollte man also mehrere Dioden zu einer größeren aktiven Fläche zusammenschalten, so dass die absorbierte Ionendosis größer wird.

Die Betastrahlung liegt irgendwo zwischen der Alpha- und der Gammastrahlung hinsichtlich Reichweite und ionisierender Wirkung. Die Betastrahlung wird erst durch ein einige mm dickes Alu- oder Kupferblech abgeschirmt. Deswegen verwenden einige kommerzielle Zähler ein abnehmbaren Deckel mit Kupferblech um Beta- und Gammastrahlung unterscheiden zu können. Ein selbstgebauter Zähler wird daher ohne besondere Vorkehrung auch einen Grossteil der Betastrahlung, die von der aktiven Fläche eingefangen werden kann in Zählimpulse umsetzen.

Was die meisten Benutzer interessiert sind nicht nur die Zählimpulse sondern auch die Frage wie viel Schaden kann die gezählte Strahlung anrichten. Das ist nun noch viel schwerer quantitativ auszudrücken. Denn zwischen dem Schaden in den Zellen eines Gewebes und den erzeugten Ionen im Detektor besteht nur ein äußerst komplexer Zusammenhang.

Einmal muss man zwischen den genetischen Schäden in Keimzellen, die erst nach der Vererbung sichtbar werden und den Schäden auf die augenblickliche betroffene Generation unterscheiden. Bei der betroffenen Generation muss man zwischen den unmittelbaren Schäden und den Spätschäden nach vielen Jahren unterscheiden. Für die unmittelbaren Schäden hat das Immunsystem sofern es intakt ist einen Reparaturmechanismus parat. Eine spontane mäßige Überdosis kann daher nach dem abklingen eines „Strahlenkaters“ mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit wie bei einem starken Sonnenbrand ohne Nachwirkungen überstanden werden. Die genetische Information im ausgewachsenen Körper ist mehrfach vorhanden und das Immunsystem kann durch Strahlung entstandene Schäden erkennen und reparieren. Wenn aber zu viele Zell-Defekte in kurzer Zeit erzeugt werden oder durch die ionisierende Strahlung in großem Stil Zellgifte entstehen, dann kommt es zum Ausbruch einer massiven Strahlenkrankheit, die meist tödlich endet. Wie die Spätschäden zustanden kommen (z.B. Krebserkrankungen) ist dagegen noch nicht vollständig geklärt. Man geht allerdings davon aus, dass es hier keine Schwelle gibt, unterhalb der eine Dosis ohne Folgen bleibt sondern ein proportionaler Zusammenhang mit der absorbierten Dosis besteht (Linear-no Threshold, LNT-Modell).

Um aber trotzdem quantitative Richtlinien für den Strahlenschutz schaffen zu können führt man nun noch zwei weitere biologische Faktoren ein, den biologischen Wirkungsfaktor, der die Strahlungsart bewertet und einen Gewebewichtungsfaktor, der das jeweilig betroffene Gewebe bewertet. Man geht nun von der gemessenen Ionendosis aus und schätzt damit die Energiedosis ab, dann multipliziert diese mit dem biologischen Wirkungsfaktor und kommt

damit zur Äquivalenzdosis, die in Sievert angegeben wird. Diese wird nochmals mit dem Gewebewichtungsfaktor multipliziert und dann hat man die effektive Äquivalenzdosis für die auch die Einheit Sievert (Sv) benutzt wird. Schließlich kann man nun noch die Dosisleistung in Sv/h berechnen, in dem man berücksichtigt wie lange es gedauert hat, bis die Dosis absorbiert war. Bedingt durch die biologischen Reparaturmechanismen und die schwellenlosen Spätschäden muss man sowohl für die Momentandosis als auch die Langzeitdosisleistung z.B. in Mikrosievert pro Jahr einen Grenzwert bestimmen und dann messtechnisch erfassen.

Die meisten quantitativen Angaben im Zusammenhang mit dem Strahlenschutz werden daher auch in Sievert und in Sievert/Jahr gemacht. Ein geeichtes Gerät muss dazu auch die Art der Kalibrierprobe benennen, auf die sich die Anzeige bezieht. Ein anderer Strahler kann dann zu Anzeigewerten führen, die nicht unbedingt völlig vergleichbar sind.

Daher kann ein selbstgebauter PIN-Dioden Zähler so gut wie keine korrekte quantitative Aussage zur Äquivalenzdosis machen. Er kann nur als Detektor wirken, der die Stärke der Gamma- und Betastrahlung ganz grob andeuten kann, und meist nur die ebenfalls vorhandene Alphastrahlung vermuten lässt (sofern sie nicht am offenen PIN-Übergang in der Dunkelkammer gemessen wurde). Der Wert des Selbstbau-Zählers besteht also vor allem in der warnenden Aussage „Es besteht Gefahr“ ähnlich wie beim Gasetektor oder Rauchmelder, der in Hotels und vielen Eigenheimen weltweit praktisch Standard ist. Für die exakte quantitative Messung sind dafür unheimlich teure Ausrüstung nötig und eine immense Fachkenntnis, wie sie in anderen Disziplinen eher selten ist.