

Kalibrierung des „Stuttgarter Geigerle“ PIN-Dioden Zählers

Bernd Laquai 19.7.2012

Zu jedem guten Messgerät gehört eine Kalibrierung, die dazu dient, zwischen den Messwerten und einer zu messenden physikalischen Größe eine quantitative Beziehung herzustellen. Um es aber vorwegzunehmen: Ein Strahlungsmessgerät für Radioaktivität zu kalibrieren ist eine denkbar komplizierte Angelegenheit und im nicht-professionellen Bereich nur ganz grob möglich.

Die am einfachsten zu kalibrierende Größe ist die Zerfallsaktivität in Becquerel, die aus der Zahl der detektierten Impulse ableitbar ist. Das einfachste zugrundelegbare Modell ist, dass die Aktivität direkt proportional zur registrierten Impulsrate ist. Die günstigste Anordnung für die Kalibrierung des PIN-Dioden Zählers ist dabei von einem Flächenstrahler auszugehen, der einen gleichmäßigen Strahlungsfluss in Bq/m^2 zu den PIN-Dioden hin erzeugt. Da die aktive Fläche der Dioden bekannt ist, kann man nun berechnen, welcher Strahlungsfluss die aktive Fläche des Detektors durchdringt und eigentlich zu einem Zählimpuls pro Zerfall führen müsste. Man kann nun den Quotient aus tatsächlich gemessener Impulsrate und theoretisch berechnetem Strahlungsfluss pro Detektorfläche bestimmen. Dieser Quotient ist ein Maß für die Effizienz, das in etwa beschreibt, welcher Anteil des Strahlungsflusses vom Detektor in Zählimpulse umgesetzt wird.

Die Ursache, dass nur ein gewisser Anteil des erwarteten Strahlungsflusses detektiert wird, ist darin zu suchen, dass im Strahler bereits eine Selbstabschirmung der Quanten aus tieferen Schichten auftritt. Dazu hin schirmt die Luft, das Detektorfenster und das Kunststoffmaterial des Detektorgehäuses noch einen Teil der Strahlung ab. Der großer Teil der nicht registrierten Impulse wird aber vom Komparator unterdrückt, wenn die Impulshöhe zu klein ist um die Komparatorschwelle zu überschreiten. Andererseits aber zeigen die Messungen am Messverstärker, dass die Impulshöhen negativ exponentiell verteilt sind, das heißt die kleinen Impulshöhen sind deutlich häufiger als die großen. Da aber auch das Rauschen des Verstärkers als Impuls gewertet werden könnte, muss die Komparatorschwelle groß genug gewählt werden um eine Fehlmessung durch Rauschen auszuschließen. Der Kompromiss dafür ist die geringere Zählrate.

Als Prüfstrahler besonders geeignet ist das natürliche Kalium. Es enthält zu 0.0117% das Kalium-40 Isotop, welches radioaktiv ist. Die Aktivität ist zwar relativ schwach und erfordert daher lange Messzeiten, aber dafür ist die Strahlung relativ eindeutig. Ein Kalium-40 Kern zerfällt nämlich in 89,5% der Fälle in das stabile Calcium-40 und sendet dabei ein β Strahlungsquantum mit 1.3 MeV aus und in 10.5% der Fälle in das stabile Argon-40, wobei ein 1.5MeV γ -Strahlungsquantum ausgesandt wird. Da beide Zerfallsarten zu stabilen Zerfallsprodukten führen, entstehen keine weiteren radioaktiven Zerfallsprodukte, welche auf andere Weise zur Gesamtaktivität beitragen. Die Halbwertszeit des K-40 Zerfalls beträgt $1.277 \cdot 10^9$ Jahre. Aus der prozentualen Zusammensetzung des natürlichen Kaliums und der Halbwertszeit des K-40 ergibt sich eine Aktivität von 30Bq/g für das natürliche Kalium in der Natur. Natürliches Kalium ist allerdings schwierig hand zuhaben, da es leicht entzündlich ist und nur unter Luftabschluss lagerfähig ist. Es bietet sich daher eher an, ein Salz des Kalium als Strahler zu benutzen. Da das Kaliumchlorid auch in der Medizin eingesetzt wird, ist es in der Apotheke in hoher Reinheit (99.9%) für wenige Euro 100g-weise erhältlich. Aus der

stöchiometrischen Zusammensetzung des Kaliumchlorid Moleküls (39u Kalium zu 35.5u Chlor) ergibt sich die Aktivität des natürlichen KCl zu 16Bq/g.

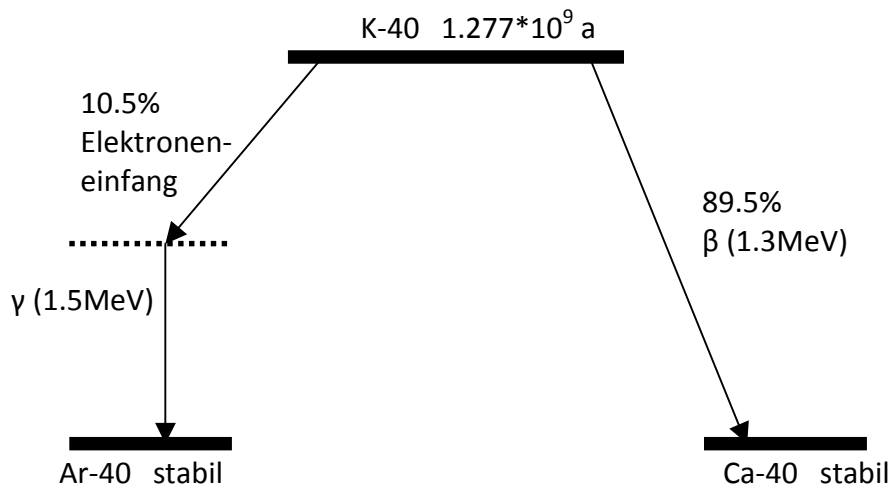


Abb. 1: Zerfallsschema des Kalium-40

Wenn man nun beispielsweise eine Menge von 50g KCl nimmt, dann entspricht das einer Gesamtaktivität von 893.5Bq. Verteilt man die Menge auf eine Fläche von 10x10mm erhält man eine Aktivität von 44675Bq/m² an spezifischen Strahlungsfluss nach oben und genauso viel nach unten. Geht man von 3 PIN-Dioden wie beim Stuttgarter Geigerle aus mit einer Fläche von 7.5mm², ergibt sich für den Detektor eine aktive Fläche von 2.250*10⁻⁵ m². Damit fängt die Detektorfläche ziemlich genau 1Bq des Strahlungsflusses ein.



Abb. 2: Reinstes Kaliumchlorid als Prüfstrahler aus der Apotheke (3.50 Eur)

Man muss daher mit einer sehr geringen Aktivität rechnen und daher sehr lange messen (etwa 1 Stunde Messzeit gibt brauchbare Werte). Man zeichnet am besten das Messsignal mit der PC-Soundkarte mit niedriger Bandbreite auf (z.B. 8kHz, mono, um die Dateigröße klein zu halten) und wertet die Daten danach mit dem PC aus. In einer derartig langen Messzeit detektiert man möglicherweise auch den einen oder anderen Radon-Zerfall in der Luft. Unter Umständen könnte auch das Rauschen im Messverstärker zu dem einen oder anderen falschen Zählimpuls führen. Daher sollte man zuerst eine Nullmessung mit dem gleichen Messaufbau machen. Dann macht man die Messung mit ungefähr der gleichen Messzeit mit dem KCl als Prüfstrahler.



Abb. 3: Kalibriermessung mit Kaliumchlorid für das Stuttgarter Geigerle

Ich habe eine derartige Messung durchgeführt (mit 50g in einer etwas kleineren Fläche) und habe eine theoretisch zu detektierende Aktivität von 2.3Bq dafür berechnet. Die Messung der Nullrate ergab eine Impulsrate von 0.004 ips (Impuls/s = ips) und die eigentliche Messung mit dem KCl eine Rate von 0.041 ips, so dass man von einer Rate von 0.037 Impulsen/s für das KCl ausgehen kann, die den zu erwartenden 2.3 Zerfällen/s, welche die Detektorfläche treffen sollten, gegenüberstehen. Daraus kann man nun den Quotienten bilden und kommt damit auf eine Effizienz von 0.0161 ips/Bq oder dem Kehrwert davon mit 62Bq/ips.

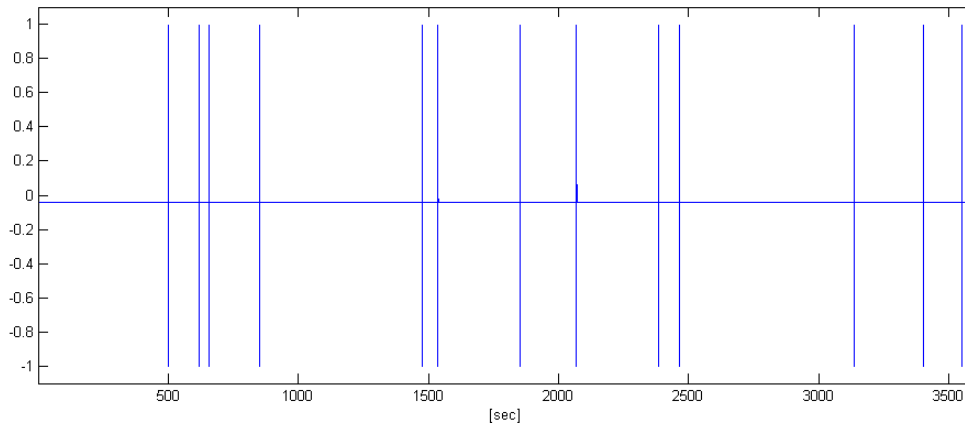


Abb. 4: Nullmessung (1h, 0.004 ips)

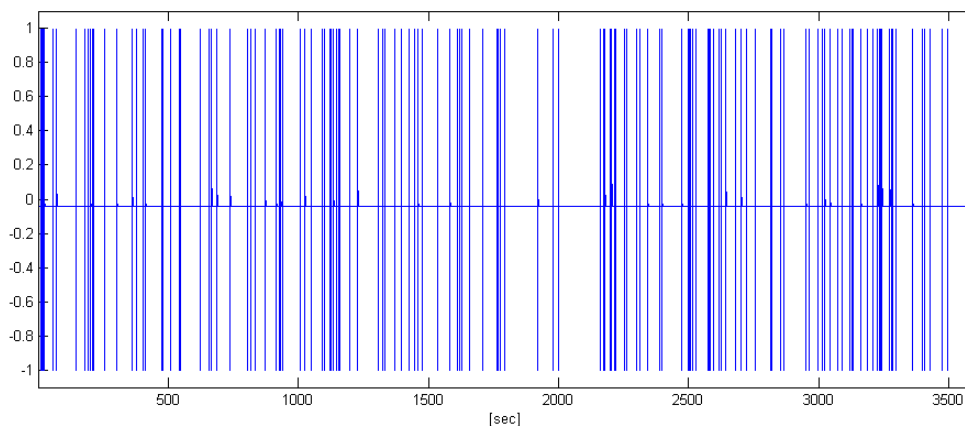


Abb. 5: Messung des KCl-Flächenstrahlers (1h, 0.041 ips)

Wenn der Zähler daher x Impulse/s detektiert, entsprechen dem in Wirklichkeit $x \cdot \text{ips} \cdot 62 \text{ Bq/ips}$. Berücksichtigt man nun wieder die Detektorfläche, so kommt man auf $x \cdot \text{ips} \cdot 62 \text{ Bq/ips} / 2.250 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = x \cdot \text{ips} \cdot 276 \text{ Bq}/(\text{ips} \cdot \text{cm}^2)$. Man kann also $k = 276 \text{ Bq}/(\text{ips} \cdot \text{cm}^2)$ als einen Kalibrierfaktor für die Flächenstrahlung ansehen, der die detektierten Impulse/s unter den gegebenen Messbedingungen in Bq/cm^2 umrechnet.

Rechenbeispiel mit Kalibrierfaktor: Das Gerät zeigt auf der Oberfläche eines $10 \times 10 \text{ cm}^2$ großen Prüfstrahlers 1 ips, dann sind das $276 \text{ Bq}/\text{cm}^2$ und auf die gesamte Fläche hochgerechnet 27.6 kBq .

Aus der spezifischen Flächenaktivität in Bq/m^2 kann mit Hilfe von Dosiskonversionsfaktoren auf die Äquivalenzdosisleistung (Personendosis) geschlossen werden, wenn das strahlende Radionuklid bekannt ist. Dazu veröffentlicht das Bundesministerium für Strahlenschutz die sogenannten „Dosisleistungskoeffizienten bei äußerer Strahlenexposition“ in einer Tabelle (siehe www.bfs.de). Für die γ -Bodenstrahlung wird beispielsweise für das K-40 Radionuklid der Wert $1.4 \cdot 10^{-16} \text{ (Sv/s)}/(\text{Bq}/\text{m}^2)$ angegeben. Aus der flächenspezifischen Aktivität von $276 \text{ Bq}/\text{cm}^2$ lässt sich damit jetzt eine Äquivalentdosisleistung von $1.4 \mu\text{Sv}/\text{h}$ berechnen.

Oft hat man jedoch auch Strahlungsquellen, die man eher als Punktquellen und nicht als Flächenquellen ansehen muss. Dafür geht man nun davon aus, dass die gesamte Aktivität der Quelle in einem Punkt konzentriert ist und man den Strahlungsfluss durch die aktive Fläche A , welche sich in einer gewissen Distanz befindet, bestimmt. Schon für eine typische

Distanz von $r=10\text{cm}$ beispielsweise kann man bei der Diodenanordnung im Stuttgarter Geigerle in erster Näherung davon ausgehen, dass die gesamte Strahlung der Punktquelle durch eine Kugel mit Radius r hindurchgehen muss, von welcher der Detektor ein Teil ist. Die Oberfläche einer Kugel ist $O=4\pi r^2$ und in diesem speziellen Fall ergibt sich $O=0.127\text{m}^2$. Geht man wieder von der Detektorfläche von $A=2.250\cdot 10^{-5}\text{m}^2$ aus, die man als Teil der Kugeloberfläche annimmt, dann sieht man von der Punktquelle im Zentrum nur den Anteil $A/O=1.79\text{E-}4$. Umgekehrt muss man den theoretisch detektierten Anteil mit $O/A=5644$ (dem Kehrwert) multiplizieren um auf die Aktivität der Punktquelle zu kommen. Geht man nun noch davon aus, dass auch die Effizienz des Detektors mit 62Bq/ips berücksichtigt werden muss, dann bedeutet das, dass man den Messwert mit $62\text{Bq/ips}\cdot 5644=3.49\cdot 10^5\text{Bq/ips}$ multiplizieren muss, um auf die Aktivität zu schließen zu können. Der Kalibrierfaktor für den Fall des Kugelstrahlers wäre also unter diesen Messbedingungen ungefähr $k=3.49\cdot 10^5\text{Bq/ips}$. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass eine etwaige Schwächung der Betastrahlung in Luft über den gegebenen Messabstand von 100mm dabei unberücksichtigt bleibt.

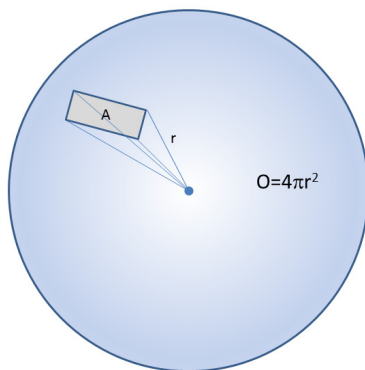


Abb. 6: Detektorfläche als Teil der durchstrahlten Kugeloberfläche eines Punktstrahlers

Ein Rechenbeispiel mit dem Kalibrierfaktor: Detektiert das Gerät in 10cm Abstand zu einer Punktquelle 1 ips , so hat die Quelle etwa die Aktivität von 34.9kBq .

Wenn man nun eine Abschätzung der biologischen Körperdosis machen möchte, muss die Strahlungsquelle und der zugehörige Dosiskonversionsfaktor für die Körperdosis bekannt sein. Für das K-40 Isotop beträgt der Konversionsfaktor für die effektive Körperdosis für Ingestion laut den aktuellen Angaben des Bundesamts für Strahlenschutz („Dosiskoeffizienten bei innerer Strahlenexposition für Einzelpersonen der Bevölkerung“) $6.2\cdot 10^{-9}$ für Erwachsene. Damit entsprechen den 34.9kBq der KCl Punktquelle, wenn sie vom Körper komplett aufgenommen wird, eine effektive Körperdosis von etwa 0.2mSv (50-Jahre-Folgeäquivalentdosis).

Zum Vergleich beträgt der Grenzwert der effektiven Dosis für beruflich strahlenexponierte Personen in den europäischen Ländern 20 Millisievert pro Kalenderjahr und 1mSv pro Jahr für die allgemeine Bevölkerung (Stand 2012).

Misst man nun beispielsweise eine Pechblendenstufe (ca. $4\times 2\text{cm}$) aus 10cm Abstand mit dem Stuttgarter Geigerle, erhält man eine Zählrate von etwa 3.8 ips , was unter der (grobem) Annahme einer Punktquelle zu einer Aktivität von 133kBq führt, was durchaus als sinnvolles Ergebnis angesehen werden kann.

Misst man auf der Fläche einer uranglasierten Keramik mit dem Stuttgarter Geigerle, erhält man eine Zählrate von etwa 4.3 ips, was auf $1.187\text{kBq}/\text{cm}^2$ führt, was auch als plausibel angesehen werden kann.

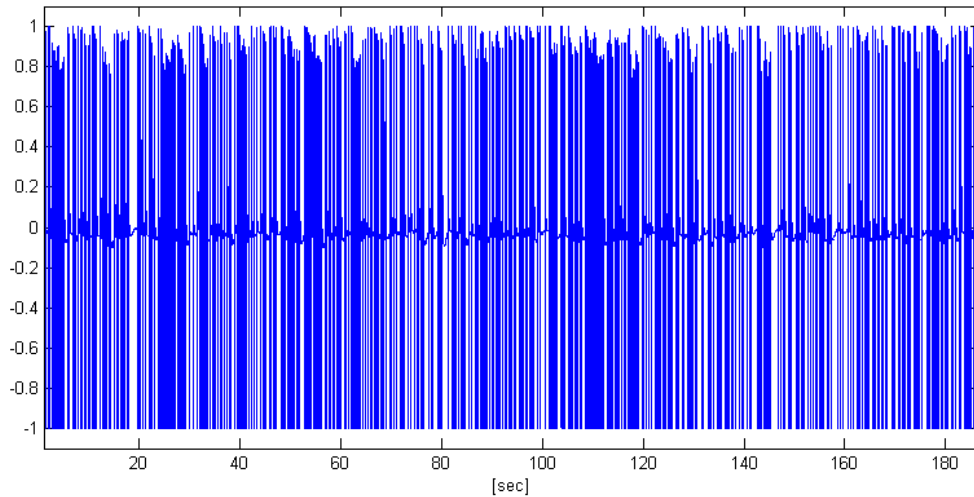


Abb. 7: Messung der Pechblendenstufe aus 10cm Distanz (3 min, 4.3 ips)

Daher kann man sagen, dass sich mit Hilfe der Flächenmessung eines Kaliumchlorid Prüfstrahlers hergestellt aus entsprechendem Salz aus der Apotheke recht einfach und kostengünstig eine ganz brauchbare und glaubwürdige Kalibrierung durchführen lässt.