

Messung radioaktiver Strahlung

Der Schreiber hat sich desöfteren daran gestört, dass bei der Beschreibung von radioaktiven Ereignissen alte und neue Einheiten durcheinandergewürfelt werden. Insbesondere einigen Journalisten, die über die Reaktorunfälle in Fukushima oder in Tschernobyl schrieben, mangelte es in dieser Hinsicht an den nötigen Fachkenntnissen. Aus diesem Grunde soll hier eine Einführung in die Radiometrische Messtechnik erfolgen.

Bei den Strahlungsarten werden Alpha-, Beta- und Gammastrahlen betrachtet, nicht aber die mit den Gammastrahlen verwandten Röntgenstrahlen und auch nicht die frei werdende Neutronenstrahlung bei gewissen Kernprozessen. Bei den Meßsystemen wird nur auf den Geiger-Müller-Zähler näher eingegangen. Nicht behandelt werden ortsfeste Systeme.

1 Strahlungsarten

Radioaktive Körper zerfallen nach einer spezifischen Halbwertszeit in leichtere Elemente. Dabei wird ionisierende Strahlung freigesetzt. Wir unterscheiden Alpha-, Beta- und Gammastrahlen, die aus den Atomkernen stammt (im Unterschied zu Röntgenstrahlen).

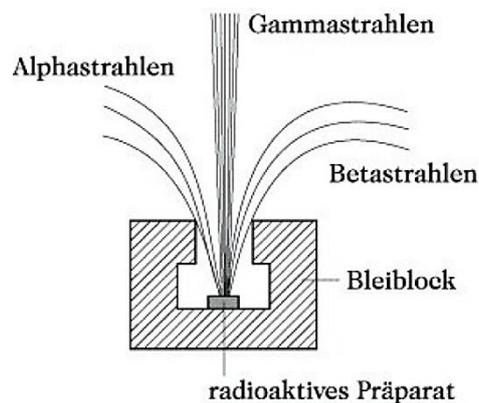


Abb. 1: Radioaktive Strahlung

Alphastrahlung ist wie Betastrahlung eine Korpuskelstrahlung, die infolge ihrer elektrischen Ladung durch magnetische oder elektrische Felder abgelenkt wird. Gammastrahlung gehört zum elektromagnetischen Spektrum und besteht aus Photonen mit einer Energie > 200 keV.

1.1 Alphastrahler

α -Strahlung¹ besteht aus Heliumkernen mit zwei Protonen und zwei Neutronen und entsteht nur bei Nukliden hoher Massenzahl. Typische und in der Natur vorkommende Alphastrahler sind Uran und Thorium sowie deren Zerfallsprodukt Radium. Auch das aus dem Erdboden aufsteigende Edelgas Radon ist ein Alphastrahler. Bis vor zwei Jahrzehnten wurden Ionisationsrauchmelder (IRM) mit einer relativ schwachen radioaktiven Probe aus Americium-241 hergestellt, das ebenfalls Alphastrahlen emittiert.

¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Alphastrahlung>

Die Reichweite dieser Strahlung ist gering. In Luft mit Normaldruck beträgt die freie mittlere Weglänge von Alphateilchen mit einer Energie von 10 MeV ungefähr 10 cm. Alphastrahlung lässt sich mit einem Karton von 2 mm Dicke abblocken. Problematisch dagegen kann sich aufgrund der stark ionisierenden Alphastrahlen die Einlagerung solcher Strahler im menschlichen Körper auswirken.

1.2 Betastrahler

β -Strahlung² besteht aus schnellen Elektronen beim β^- -Zerfall (Kerne mit relativem Neutronenüberschuss) oder schnellen Positronen beim β^+ -Zerfall (Kerne mit relativem Protonenüberschuss). Ausser den genannten Teilchen werden beim Betazerfall auch Neutrinos freigesetzt. Aufgrund der äusserst schwachen Wechselwirkung dieser geisterhaften Teilchen sind für diese keine Schutzmassnahmen erforderlich.

β^- -Zerfall kommt bspw. bei Kalium-40 vor. Auch Krypton-85 ist ein Betastrahler, bei dem energiereiche Elektronen freigesetzt werden. Kryptonquellen werden u.a. für Messzwecke in der Papierindustrie eingesetzt. Involvierte Servicetechniker müssen mit einem Dosimeter ausgerüstet sein.

Die Reichweite eines Betateilchens mit einer Energie von 1 MeV beträgt in Luft etwa 300 cm und kann mit Aluminiumblech von 2 mm Dicke abgeschirmt werden. Für hochenergetische Teilchen mit 20 MeV beträgt die Dicke des abschirmenden Aluminiums ca. 40 mm. Weil dabei Bremsstrahlung im Röntgenspektrum entsteht, sollte dahinter ein zweiter Absorber aus Schwermetall (Kupfer, Blei, Stahlbeton) angeordnet sein.

1.3 Gammstrahler

γ -Strahlung³ besteht aus energiereichen Photonen (γ -Quanten). Befindet sich ein Kern in einem angeregten Zustand, so wird bei genügender Energie Gammastrahlung erzeugt. Auch bei der Paarvernichtung von Elektronen und Positronen entsteht Gammastrahlung. Bei einer Kernexplosion kommen sämtliche Strahlenarten vor (inklusive der hier nicht behandelten Neutronenstrahlung), wobei im ersten Moment die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitende Gammastrahlung gefährlich ist.

Einige der beim "Fallout" auf dem Erdboden abgelagerten Spaltelemente können ausser Alpha- und Betastrahlung auch Gammastrahlung emittieren. So ist das bei einer Kernspaltung entstehende Cäsium-137 mit einer Halbwertszeit von 30 Jahren ein Betastrahler und infolge des Sekundärzerfalls auch ein gefährlicher Gammastrahler. Nach dem Tschernobyl-Reaktorunfall waren viele Menschen in Westeuropa deswegen äusserst besorgt. Aufgrund der grossflächigen Verteilung der Spaltprodukte (darunter auch Cäsium-137) bestand aber keine unmittelbare Gefährdung. Lediglich Geissenmilch aus erhöhten Lagen oder Pilze und Nüsse zeigten eine etwas erhöhte Radioaktivität an.

Gammstrahlung dringt tief in den menschlichen Körper ein und schädigt die Zellen. Zur Ab-

² <https://de.wikipedia.org/wiki/Betastrahlung>

³ <https://de.wikipedia.org/wiki/Gammastrahlung>

schirmung werden Bleiplatten und Bleiziegel verwendet. Die Lagerung medizinischer Radionuklide erfolgt in "Bleitresoren".

Anm.: Bekannt sind die beim Goiânia-Unfall entstandenen Auswirkungen. Am 13. September 1987 drangen die Altstoffsammler Wagner Pereira und Roberto Alves in ein stillgelegtes Institut für Strahlentherapie ein und entwendeten dort ein aus den USA stammendes Strahlentherapiegerät. Bei der Zerlegung beschädigten sie die Kapsel mit dem radioaktiven Material des Bestrahlungskopfs und erlitten Verbrennungen durch Gamma- und Betastrahlen. Weil ihnen die weitere Demontage nicht gelang, verkauften sie das Gerät an den Schrotthändler Devair Alves Ferreira. Beim weiteren Zerlegen des Geräts öffnete Ferreira einen Bleibehälter mit 93 Gramm hochradioaktiven Cäsiumchlorides, welches radioaktives Cäsium-137 enthält und in der Dunkelheit bläulich leuchtete. Aus diesem Grunde wollte Ferreira seiner Frau mit diesem Material ein Schmuckstück anfertigen. Kurz darauf verkaufte Ferreira den Behälter an einen anderen Schrotthändler. Dadurch gelangten die kontaminierten Metalle in verschiedene Hände. Ein Teil des Cäsiumchlorides landete in der Kanalisation. Sämtliche der vom Cäsiumstrahler kontaminierten Personen erkrankten. Einige starben an den Folgen der Strahlenkrankheit, etliche kamen mit Hautverbrennungen davon. Der Schrotthändler Ferreira erlitt eine ansonsten tödliche Dosis von 7 Gray, lebte erstaunlicherweise aber noch bis 1994. Seine Frau dagegen starb bereits zwei Wochen nach dem Gerätediebstahl.⁴

2 Radiometrische Grössen und Einheiten

2.1 Alte und neue Grössen

Seit 1986 gelten die SI-Einheiten.

| Grössen und Einheiten | Alte Einheiten | Umrechnung |
|------------------------------------|------------------|--------------------------------|
| Aktivität [A] = Becquerel (Bq) | Curie (Ci) | 1 Bq = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Ci |
| Energiedosis [D] = Gray (Gy) | Rad (rad od. rd) | 1 Gy = 100 rad |
| Ionendosis [J] = C/kg | Röntgen (R) | 1 Gy \approx 100 R |
| Äquivalentdosis [H] = Sievert (Sv) | Rem (rem) | 1 Sv = 100 rem |

► Die radiometrische **Aktivität** [A] wird in *Becquerel* (Bq) gemessen.

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad 1 \text{ Bq} = 1 \text{ Zerfall/s}$$

Bei Messungen wird die Aktivität auch in Zerfällen pro Minute resp. dpm (disintegrations per minute) angegeben.

Die frühere Einheit *Curie* (Ci) wird nicht mehr verwendet. 1 Curie wurde ursprünglich als die Aktivität von 1 g Radium-226 definiert ($1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$).

Auch veraltet sind die Einheiten *Rutherford* ($1 \text{ rd} = 10^6 \text{ Bq}$) und *Stat* ($1 \text{ St} = 1,345 \cdot 10^4 \text{ Bq}$).

⁴ <https://de.wikipedia.org/wiki/Goi%C3%A2nia-Unfall>

Anm.: 1 Bq ist ein radioaktiver Zerfall pro Sekunde. Die Energie und die Zerfallsprodukte sind je nach Isotop unterschiedlich. In unserem Körper besteht das Kalium zu 0,012 Prozent aus dem radioaktiven Kalium-Isotop K40. Diese Isotope erzeugen ständig 40 bis 60 Bq pro Kilogramm Körpergewicht. Die zweite große körpereigene Strahlenquelle ist das Kohlenstoff-Isotop C14. Zusammen mit einigen weiteren radioaktiven Isotopen als Spurenelemente strahlt es im Menschen mit rund 8'000 Bq. Die "innere" Strahlung beträgt in Deutschland etwa ein Zehntel der natürlichen Umgebungsstrahlung. Becquerel ist aber noch kein ausreichendes Maß für die Strahlenbelastung, da die Energie nicht angegeben wird.

- Die **Energiedosis**⁵ [D] wird in *Gray* (Gy) resp. *Joule pro kg* (J/kg) gemessen.

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

Die Einheit *Rad* (Radiation absorbed dose) wird nicht mehr verwendet (1 rad = 0,01 Gy).

Anm.: Gray ist die Strahlungsenergie (Dosis), die von einer Masse von 1 kg aufgenommen wird. Sie wird in Wattsekunden pro Kilogramm⁶ angegeben. Die radioaktive Strahlung besteht aus α -, β - und γ -Strahlung, die wegen ihrer verschiedenartigen Natur eine unterschiedliche Wirkung auf Organismen ausüben. Für die biologische Wirksamkeit werden daher Wichtungsfaktoren eingeführt. Die biologisch wirksame Strahlung (Strahlendosis) wird in Sievert gemessen.

- Die **Ionendosis** [J] wird in *Coulomb pro kg* (C/kg) gemessen. Bezogen auf 1 kg Luft entspricht die Standard-Ionendosis von 1 C/kg der Wirkung einer Energiedosis von 34 J/kg (= 34 Gy).

$$J = \frac{\Delta Q}{\Delta m} \quad \text{C/kg} \quad (1 \text{ C} = 1 \text{ As, Einheit der elektrischen Ladung Q}).$$

Die Einheit *Röntgen* war bis 1995 eine Dosis-Messgröße zur Quantifizierung ionisierender Strahlung (1 R = 2,58 · 10⁻⁴ C/kg).

- Die **Äquivalentdosis**⁷ [H] wird in *Sievert* (Sv) angegeben und gewichtet die Energiedosis mit dem sogenannten *Strahlungswichtungsfaktor* [w_R].

$$H = D \cdot w_R \quad 1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$$

Die Einheit *Rem* (Röntgen equivalent man) für die Äquivalentdosis (1 Sv = 100 rem) wird nicht mehr verwendet und ist nur noch in älterer Literatur anzutreffen (1 rem = $q \cdot 1 \text{ rad}$). Die Äquivalentdosis berücksichtigt ausser der übertragenen Energiedosis auch die biologische Wirksamkeit der verschiedenen Strahlenarten. Beispielsweise ist bei gleicher Energiedosis Alphastrahlung um ein Vielfaches schädlicher als Gamma- oder Röntgenstrahlung.

Anm.: Sievert ist die biologisch wirksame Äquivalenzenergie einer radioaktiven Strahlung. Auch Sievert wird in Wattsekunden pro Kilogramm angegeben, für Gamma- oder Röntgenstrahlung ist der Wichtungsfaktor 1. Alpha- und Beta-Strahlung haben höhere Wichtungsfaktoren, bspw. gilt für α -Strahlung ein Faktor von 20. Mit der Gewichtung lassen sich die Dosen unterschiedlicher

⁵ <https://de.wikipedia.org/wiki/Gray>

⁶ 1 Ws = 1 J (Joule)

⁷ [https://de.wikipedia.org/wiki/Sievert_\(Einheit\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Sievert_(Einheit))

Strahlenarten direkt vergleichen. Dies bedeutet, dass ein Gammastrahler mit einer Energiedosis von 100 mSv im Organismus die gleiche biologische Wirkung erzielt wie ein Alphastrahler mit einer Energiedosis von 5 mSv ($D \times 20 = 100$).

| Strahlengewichtung | w_R |
|---|-------|
| Photonen (γ - und Röntgenstrahlung) | 1 |
| Elektronen (β -Strahlung) und Myonen | 1 |
| Neutronen < 10 keV | 5 |
| Neutronen 10 keV bis 100 keV | 10 |
| Neutronen > 100 keV bis 2 MeV | 20 |
| Neutronen > 2 MeV bis 20 MeV | 10 |
| Neutronen > 20 MeV | 5 |
| Protonen > 2 MeV | 5 |
| α -Teilchen, Spaltfragmente, schwere Kerne | 20 |

► In der Nuklearmedizin wird die **Organdosis** [H_T] in Sievert (Sv) benötigt (also diejenige Dosis, mit der ein bestimmtes Organ tatsächlich belastet wurde). Die *effektive Dosis* ist die auf den gesamten Körper umgerechnete Dosis.

► Die **Halbwertszeit** [$T_{1/2}$] ist die Zeitdauer, in welcher die Hälfte eines radioaktiven Isotops in Tochterkerne zerfallen ist.

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t) \rightarrow N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

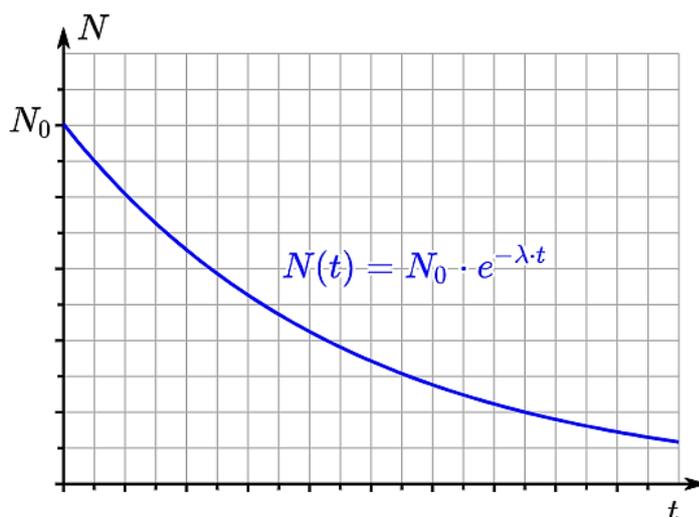


Abb. 2: Radioaktives Zerfallsgesetz ⁸

Zwischen der Zerfallskonstanten λ und der Halbwertszeit $T_{1/2}$ besteht folgender Zusammen-

⁸⁸ <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/radioaktivitaet-fortfuehrung/grundwissen/zerfallsgesetz-zerfallskonstante-und-halbwertszeit>

hang:

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \rightarrow N(t) = N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}}$$

| | |
|-----------|---|
| $N(t)$ | Anzahl Kerne nach der Zeit t |
| N_0 | Anfängliche Anzahl Kerne zur Zeit $t = 0$ |
| t | Zeit |
| $T_{1/2}$ | Halbwertszeit |

3 Richt- und Grenzwerte

3.1 Vorkommnisse radioaktiver Strahlungsquellen

Ein relativ geringer Anteil der auf Meereshöhe messbaren radioaktiven Strahlung stammt aus der kosmischen Höhenstrahlung. Bei dieser handelt es sich um schnelle Elektronen und Protonen, die mit dem Sonnenwind zur Erde gelangen, und um hochenergetische Gammastrahlung aus dem Weltall. Über 1'000 m über Meer ist die Strahlung bereits doppelt so stark, in 10 km Höhe hat sie bereits den hundertfachen Wert. Sehr hohe Strahlungswerte sind im Van-Allen-Gürtel zu verzeichnen, der die Erde torusförmig umgibt und aus zwei Strahlungszonen besteht.

Der grösste Teil der radioaktiven Strahlung kommt aber von Stoffen, die im Erdboden vorhanden sind (sog. terrestrische Strahlung). Die Strahlung ist von der Beschaffenheit des Bodens abhängig. Wer im Schwarzwald auf Gesteinsböden mit hohen Anteilen an Uran und Radium lebt, ist einer stärkeren Strahlung ausgesetzt als jemand, der auf kalkreichem Boden im Alpenvorland lebt.

Der Mensch lebte schon immer inmitten radioaktiver Isotope. Von Natur aus bereits relativ stark strahlend sind Paranüsse. Am Verzehr solche Nüsse stirbt aber niemand. Mit der Nahrung werden radioaktive Isotope wie Kalium-40, Iod-131 und Cäsium-137 aufgenommen.⁹ Die "natürliche Aktivität" eines Menschen von 75 kg Lebendgewicht aufgrund des inkorporierten Kaliums und weiterer Isotope beträgt etwa 8'000 Bq.

In Kellern akkumuliert sich Radon-222 und im Gebirge enthalten Gesteine wie der "Gotthardgranit" stets auch kleinere Mengen von Uran und Thorium. Dazu kommt die Reststrahlung aus der kosmischen Strahlung, die auch für das in der Atmosphäre produzierte Kohlenstoffisotop C-14 ursächlich ist, das für radiometrische Datierungen verwendet wird.

Ferner gibt es auf der Erde markante Bereiche mit einer merklich erhöhten Radioaktivität, darunter das Tiefland im indischen Bundesstaat Kerala, wo Sandstrände mit Monazit, einem thoriumhaltigen Phosphat anzutreffen sind. Der schwarze Sand enthält 1 % Monazit, das zu 8 bis 10 % aus strahlendem Thorium besteht. In den angrenzenden Fischerdörfern beträgt die mittlere Ortsdosis 17 mSv p.a.¹⁰ – ohne dass strahlenbedingte Probleme bei den Bewohnern zu verzeichnen sind. Auch in Brasilien sind solche Sandstrände zu finden.

Zur natürlichen Belastung durch die Hintergrundstrahlung summiert sich Strahlungsenergie aus künstlichen radioaktiven Quellen (Röntgengeräte, Computertomographen, medizinische

⁹ Das im Menschen befindliche Kalium 40 strahlt mit etwa 4'000 Bq (was einer Strahlenbelastung von ungefähr 0,18 mSv/a entspricht).

¹⁰ mSv p.a. bedeutet mSv pro anno, d.h. pro Jahr oder jährlich; auch als mSv/a geschrieben.

Radionuklide¹¹ für Diagnostik und Therapiezwecke).

3.1 Historischer Exkurs

In den Anfängen der Radioaktivität ging die Menschheit ziemlich sorglos mit radioaktiven Präparaten um. Offensichtlich waren sich längst nicht alle Nutzer über das Gefahrenpotential der unsichtbaren Strahlen (wozu auch die Röntgenstrahlen gehören) im Klaren.

1) Es gab Heilbäder und medizinische Trinkkuren mit radonhaltigem Wasser. Für Kosmetika wurde gerne Radium verwendet, dessen Strahlung die oberen Hautschichten anregt und auf "natürliche Weise" einen rosaroten Teint erzeugte. Bekannt war die französische Kosmetikapalette THO-RADIA (patentiert 1932). Eine 100 g Dose enthielt 0,5 g Thoriumchlorid und 0,35 g Radium. Die "Radion Haarkrafttinktur" eines Dr. Hartmann war ebenso gefragt wie die radioaktive Doramad-Zahncreme für "strahlend weisse Zähne".

2) Selbst Lebensmittel blieben von der Radioaktivität nicht verschont. Als "verjüngendes Genussmittel" vertrieb Burk und Braun in Cottbus eine "Radiumschokolade". Eine Bäckerei in St. Joachimsthal produzierte Radium-Wasserzwieback. Das sind nur zwei Beispiele von vielen.

3) Auch bei gewerblichen Produkten wurden radioaktive Substanzen verwendet. Schön anzusehen ist "Vaseline-Glas" (Uraglas) mit Beimischungen von Uranoxid, welches bei Lichteinfall gelblich bis grünlich fluoresziert. In Böhmen mit seinen vielen Glashütten war von "Anna-Gelb" und "Eleonoren-Grün" die Rede. Solche Gläser wurden bereits von den Römern hergestellt, die das dafür benötigte Uranerz aus Nordafrika einfuhrten.

Wandfliesen mit uranoxidhaltiger Glasur wurden bis in die 1970er Jahre produziert. Im Baselbiet mussten bei dreissig Privatwohnungen die Decor-Fliesen ersetzt werden, weil die Freigrenze von 400 Bq für Uran überschritten wurde.

a) Haartinktur



b) Zahncreme



c) uranhaltiges Weinglas



d) Decor-Fliese mit radioaktiver Glasur



Abb. 3: Radioaktive Nutzobjekte¹²

4) Last but not least wurden auch für technische Erzeugnisse radioaktive Substanzen eingesetzt. Die Zeiger und Zifferblätter von Uhren wurden mit lumineszierenden Farben bestrichen,

¹¹ Einige der in der medizinischen Diagnostik/Therapie verwendeten Radioisotope: Technetium 99 (γ -Strahler); Jod 123 (γ -Strahler); Jod 131 (β - und γ -Strahler).

¹² <https://www.mta-r.de/blog/strahlend-schoen-gesund-radioaktive-produkte/>

die Radiumsalze und Promethium enthielten. Ab 1960 wurden mit Tritium angereicherte Farbstoffe benutzt, deren effektive Dosis geringer als 0,1 $\mu\text{Sv/a}$ ist. Eine eigentliche Gefahr ging davon nicht aus.

Anm.: Unrühmlich bekannt wurden die "Radium Girls", deren Angewohnheit es war, die verwendeten Pinsel für den radioaktiven Leuchtstoff mit Zunge und Lippen anzufeuchten, um feinere Linien ziehen zu können. Viele dieser Frauen erkrankten schwer und einige verstarben sogar. Schliesslich kam es zu einem Gerichtsprozess, der 1928 mit einem Vergleich endete.¹³

Noch immer findet man in alten Gaslampen und auf Flohmärkten thoriumhaltige Glühstrümpfe¹⁴, die aus den Auer-Werken stammen. Eine Gefährdung ist gering, wenn die üblichen Hygieneregeln befolgt und das Einatmen des aus verbrannten Glühstrümpfen stammenden radioaktiven Staubes vermieden wird. Mittlerweile werden nur noch Oxidverbindungen aus nicht radioaktiven Elementen wie Cer und Yttrium verwendet.

In älteren Gebäuden sind gelegentlich Brandmelder anzutreffen, die das radioaktive Isotop Americium-241 verwenden. An der Decke montiert stellen diese Melder keine Gefahr dar. Allerdings sollte man die Geräte nicht in der Hosentasche herumtragen – wie dies früher oft aus Unkenntnis geschah (auch der Schreibende gehörte seinerzeit zu dieser Spezies von Elektroinstallateuren).

Anm.: Nicht nur die sorglose Verwendung von Ionisationsrauchmeldern in der Elektrobranche, sondern auch der fahrlässige Umgang mit asbesthaltigen Stoffen war früher unter Handwerkern verbreitet. Der Schreibende zerschnitt mehr als nur mit seinem Taschenmesser die als Wärmeisolation dienenden Asbeste. Davor gewarnt hatte ihn keiner. Heute dürfen nur noch asbestfreie Ersatzstoffe verwendet werden. Bei Demontagen von alten Leuchtstofflampen mit Asbestunterlagen muss eine FFP3-Feinstaubmaske und ein Einwegschutzanzug der Kategorie 3 (Typ 5/6) getragen werden.

3.2 Grenzwerte

Um die Belastung des menschlichen Körpers in Grenzen zu halten, wurden nationale und internationale Grenzwerte festgelegt. In Deutschland beträgt die mittlere jährliche Strahlenbelastung:

| Art der Strahlenquelle | mS p.a. |
|---|---------|
| Natürliche Strahlenquellen | |
| Kosmische Strahlung | 0,3 |
| Terrestrische Strahlung: | |
| • Äußerliche Bestrahlung | 0,4 |
| • Einatmen von Radon (und Folgeprodukten) | 1,1 |

¹³ https://de.wikipedia.org/wiki/Radium_Girls

¹⁴ <https://de.wikipedia.org/wiki/Gl%C3%BChstrumpf>

| | |
|--|---------|
| • Sonstige innere Strahlung (Ingestion natürlicher Radionuklide) | 0,3 |
| Summe natürlicher Strahlenquellen | ≈ 2 |
| Künstliche Strahlenquellen | |
| Medizinische Anwendungen | 1,9 |
| Kernkraftwerke (Normalbetrieb) | < 0,01 |
| Folgen des Tschernobyl-Unfalls | < 0,011 |
| Atombombenversuche/Kernwaffentests | < 0,01 |
| Sonstige künstliche Strahlung | |
| • Anw. radioakt. Stoffe und ion. Str. in Forschung Technik, Haushalt | < 0,02 |
| • Berufliche Strahlenexposition | |
| Summe künstlicher Strahlenquellen | ≈ 2 |
| Summe natürlicher + künstlicher Strahlenquellen ¹⁵ | ≈ 4 |

Die natürliche Exposition von Personen beträgt in der Schweiz – abhängig vom Standort – 2 bis 4 mSv p.a.¹⁶

In einer ENSI¹⁷ Mitteilung war zu lesen:

In der Schweiz nimmt jede Person durchschnittlich pro Jahr eine Strahlendosis von 5,5 Millisievert auf (entspricht 0,5 µSv pro Std.). Davon stammen 1,2 mSv von der medizinischen Diagnostik, der Rest ist natürlichen Ursprungs: kosmische und terrestrische Strahlung, Radon in Gebäuden sowie Radionuklide im menschlichen Körper).¹⁸

Technisches Personal in Kernkraftwerken ist funktionsbedingt einer erhöhten Exposition ausgesetzt. Für beruflich exponierte Personen gilt in Europa ein Grenzwert von 20 mSv p.a. (in den USA bis 50 mSv p.a.). Über ein Berufsleben akkumuliert dürfen nicht mehr als 400 mSv zusammenkommen.

3.3 Schädigende und letale Dosiswerte

Selbst bei nur kurzzeitiger Exposition von hohen Dosiswerten radioaktiver Strahlung ist mit Schädigungen des Gewebes bis hin zu irreparablen Organversagen zu rechnen.

Einige Zahlenwerte dazu:

- Die Schädigung eines Ungeborenen erfolgt ab 100 mSv.
- Hautschäden bei Erwachsenen sind ab 500 mSv zu verzeichnen.
- Eine "Schockdosis" von 1'000 mSv bei Erwachsenen wird vom gesunden Körper noch verkraftet. Mit zunehmendem Alter ist aber mit einer erhöhten Krebsrate zu rechnen.

¹⁵ <https://de.wikipedia.org/wiki/Strahlenexposition>

¹⁶ mSv p.a. bedeutet mSv pro anno, d.h. pro Jahr oder jährlich; auch als mSv/a geschrieben.

¹⁷ ENSI = Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat.

¹⁸ <https://www.ensi.ch/de/2012/07/13/>

- Die letale Dosis für Erwachsene liegt bei 3'000 bis 4'000 mSv. Ohne medizinische Behandlung stirbt die Hälfte der exponierten Personen nach 3 bis 6 Wochen.
- Die letale "Einmaldosis" beträgt 5'000 mSv.

| Dosis | Wirkung |
|---------|--|
| 1-6 Sv | Einige Stunden nach der Bestrahlung kommt es zu Übelkeit und Erbrechen, ab 3 Gy zu Haarausfall; die Überlebensprognosen sind noch gut. |
| 5-20 Sv | Schon ab einer Viertelstunde nach Bestrahlung kommt es zu Übelkeit, Erbrechen, Kopfschmerzen und getrübttem Bewusstsein. Ab 15 Gy bestehen kaum Überlebenschancen. |
| > 20 Sv | Es kommt praktisch sofort zum Versagen des zentralen Nervensystems und des Herz-Kreislauf-Systems mit Schock, Krämpfen und Bewusstlosigkeit. Nach spätestens zwei Tagen tritt der Tod ein. |

4 Messgeräte für radioaktive Strahlung

Nachfolgend sind einige der gebräuchlichsten Meßsysteme aufgeführt.

- Ionisationskammer
- Proportionalzählrohr
- Geiger-Müller-Zählrohr
- Szintillationszähler
- Halbleiterzähler
- Dosimeter

Für eine umfangreichere Betrachtung dieser interessanten Thematik ist die einschlägige Literatur (Kleinknecht, Rapp) zu konsultieren.

4.1 Geiger-Müller-Counter

Weil viele Laien, aber auch Prepper und Wissenschaftler, im Bedarfsfall einen "Geigerzähler" benutzen, soll hier auf dieses nützlich Messgerät etwas näher eingegangen werden. Erfunden wurde das Geiger-Müller-Zählrohr 1928 vom deutschen Physiker Hans Geiger (1882-1945) und seinem Doktoranden Walther Müller (1905-1979). Ein weiteres Zählrohr, das noch immer verwendet wird, ist das Proportional-Zählrohr.

Bereits bekannt zu dieser Zeit war der von Geiger und Greinacher entwickelte "Spitzenzähler". Zuvor konnten einzelne Teilchen nur nach langwieriger Beobachtung mit dem von William Crookes (1832-1919) erfundenen "Spinthariskop" angezeigt werden. Heutzutage werden stattdessen "Szintillationszähler" verwendet.

Prinzipiell besteht ein Geigerzähler aus einem mit einem Edelgas gefüllten Zählrohr, einer Elektronik, einer Spannungsversorgung und einer Anzeige. Als Zählgase werden Argon und Neon mit einem Druck von etwa 100 mbar verwendet. Um Alphastrahlung zu detektieren muss das Zählrohr mit einem Fenster aus Glimmer oder Plastikfolie ausgestattet sein.

Wenn ein ionisierendes Teilchen in das Zählrohr eindringt, erzeugt es durch Primär- und Sekundärionisation eine Lawine geladener Partikel, welche in der zentralen Drahtanode einen Stromstoß auslösen. Die so erzeugten Impulse werden verstärkt und einem Zähler zugeführt. In einfachen Geräten ist ein Lautsprecher eingebaut, mit dem die Impulsfolge hörbar gemacht wird. Komfortablere Geräte besitzen eine Messanzeige.

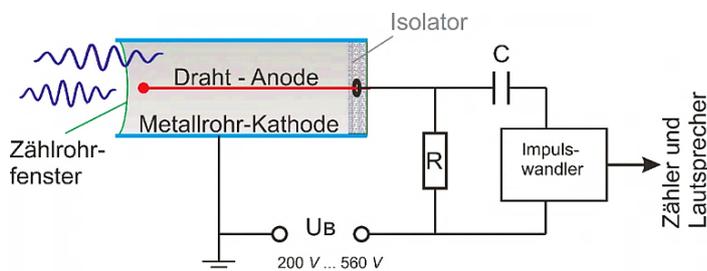


Abb. 4: Geiger-Müller-Zähler (Prinzipschaltung)¹⁹



Abb. 5: Verschiedene Zählrohre²⁰

Das Metallrohr ist mit dem Minuspol der Spannungsquelle verbunden. Werden Glasröhrchen verwendet, muss ausser dem Anodendraht eine "Kathodenwendel" oder eine elektrisch leitende Beschichtung vorhanden sein.

Mit einigen Geräten lässt sich Alpha, Beta- und Gammastrahlung detektieren. Für eine schnelle Überprüfung von kontaminierten Gegenständen genügt bereits die Detektion von Beta- und Gammastrahlung.

Angezeigt wird die **Zählrate** [Z] in Counts pro Zeiteinheit. Bei einer Messung werden nicht alle einfallenden Teilchen registriert.

Ausser der Totzeit und der Rekombination ist die Strahlungsart für die **Ansprechwahrscheinlichkeit** [A] massgebend.

$$A = \frac{\text{Anzahl der registrierten Teilchen}}{\text{Anzahl der einfallenden Teilchen}}$$

Strontium-90 bspw. sendet Betastrahlen mit einer max. Energie von 0,55 MeV aus. Die Ansprechwahrscheinlichkeit beträgt $\approx 0,46$, d. h. von 100 eindringenden Teilchen werden im Mittel deren 46 Teilchen registriert.

4.2 Betriebsbereiche

Für den Einsatz von Ionisationsdetektoren sind die unterschiedlichen Betriebsbereiche zu beachten. Das Geiger-Müller-Zählrohr arbeitet – im Unterschied zum Proportionalzählrohr – im sog. *Plateaubereich* (auch als Geiger-Müller-Region bezeichnet).

1) **Rekombinationsbereich** → Bei niedriger Spannung ist die elektrische Feldstärke zu gering, um Ladungsträger (Ionen, Elektronen) wirksam zu beschleunigen, so dass diese nach kurzer Zeit rekombinieren und somit für eine Detektion nicht in Betracht kommen.

¹⁹ <https://www.ulfkonrad.de/physik/ph-13-kern-gmz>

²⁰ <http://www.grzesina.de/avr/geigerzaehler/geiger.html>

2) **Ionisationsbereich** → Im Ionisationsbereich bewirkt ein Spannungsanstieg keinen wesentlichen Anstieg der Ionenpaare. Eine merkliche Gasverstärkung (Sekundärionisation) findet noch nicht statt.

3) **Proportionalbereich** → In diesem Bereich nimmt die gesammelte Ladung mit einem weiteren Anstieg der Detektorspannung zu, während die Anzahl der primären Ionenpaare unverändert bleibt. Die durch Stossionisation erzeugten Sekundärionen werden genügend beschleunigt, um einen elektrischer Impuls von etwa 5 mV zu erzeugen.

4) **Geiger-Müller-Region** → Im Plateaubereich ist die Feldstärke infolge der hohen Spannung stark genug, um eine Lawine von geladenen Teilchen zu erzeugen. Es besteht nicht länger eine Proportionalität zwischen Strahlungsenergie und Signalladung. Um die Ladungslawine zu löschen werden der Gasfüllung bestimmte Löschgase beigemischt. Detektoren, die in der Geiger-Müller-Region betrieben werden, können Gammastrahlen und elektrisch geladene Partikel (Alpha- und Betastrahlen), die bis ins Zählrohr gelangen, detektieren.

5) **Entladungsbereich** → Wird die Spannung noch weiter erhöht, so setzt eine kontinuierliche Gasentladung ein, die durch geeignete Massnahmen begrenzt werden muss, damit die Röhre nicht zerstört wird. Bekannt ist dieses Phänomen von der Glimmröhre, die nur mit einem Vorwiderstand betrieben werden darf.

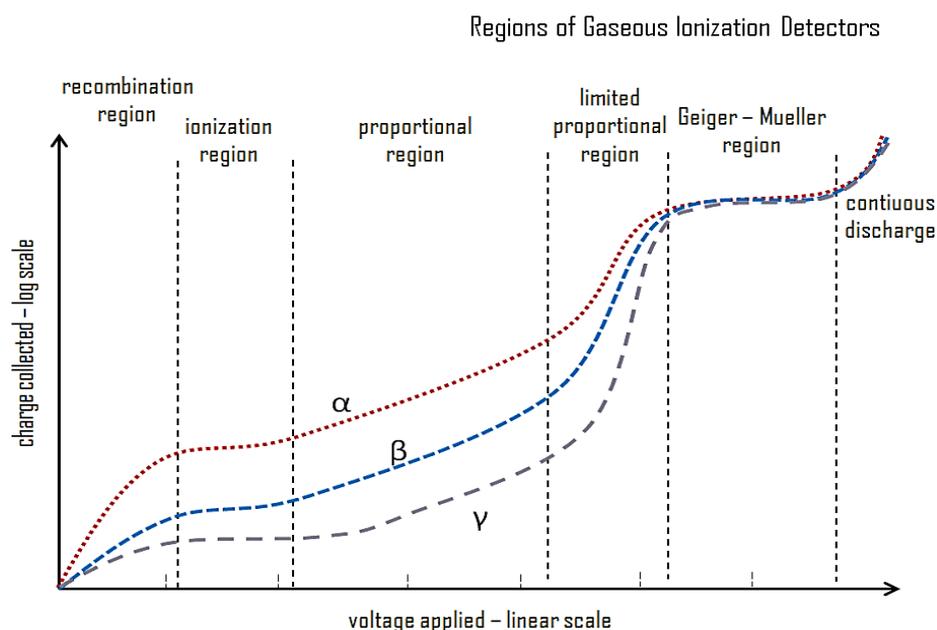


Abb. 6: Unterschiedliche Betriebsbereiche für Ionisationsdetektoren²¹

4.3 Ausführungen von Countern

Die folgenden Abbildungen zeigen zwei ältere Geräte, eines mit besonders massiver (Heavy-duty) Bauweise.

²¹ <https://www.radiation-dosimetry.org/de/was-ist-gasionisationsdetektor-gasgefullter-detektor-definition/>



Abb. 7: Ältere Geiger-Müller-Counter mit analoger Anzeige

Moderne Handgeräte wie der "Colloidmaster" sind in Sievert normiert und können als Counter ($\mu\text{Sv/h}$) oder als Dosimeter (mSv) eingesetzt werden. Adäquates gilt für den "Gamma-Scout", bei dem sich laut Hersteller das im Gerät befindliche Zählrohr mit einem Schieber abdecken lässt, um so eine Selektion der zu messenden Strahlungart zu ermöglichen.

Colloidmaster



Gamma-Scout²²



gut zu sehen (oben) ist das Zählrohr



Abb. 8: Parametrierbare digitale Counter

Abb. 9: Gamma-Scout geöffnet

Einige Geräte besitzen eine USB- oder eine Bluetooth-Schnittstelle, so dass sich die Messdaten am PC auswerten lassen.

4.4 Bausätze

Beliebt bei einigen Elektronikfreunden sind bekanntlich Bausätze. Ausser Grundkenntnissen der Elektronik und handwerklichem Geschick setzt diese Variante möglicherweise auch Programmierkenntnisse voraus, zumal, wenn der Counter mit einer Textanzeige und weiteren Features ausgestattet werden soll. Dies sollte beim Kauf eines Bausatzes stets berücksichtigt werden.

Der unten abgebildete Bausatz stammt von der Firma Pollin, die bei Elektronikanwendern

²² <https://www.gamma-scout.com/online/>

auch aus anderen Gründen bekannt sein dürfte.²³

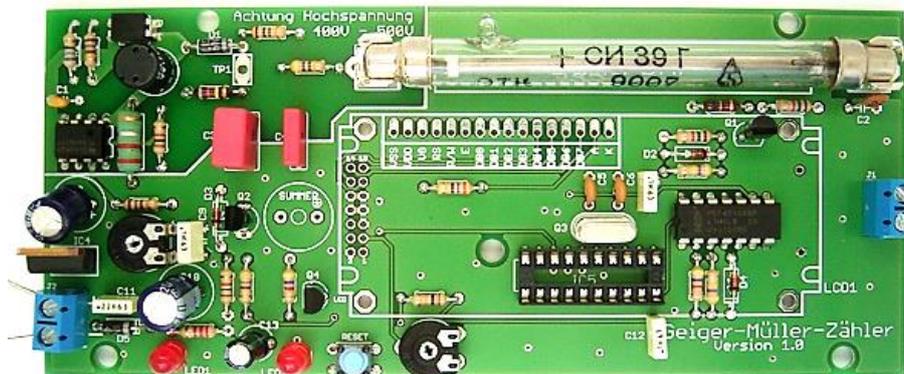


Abb. 10: Geiger-Müller-Counter als Bausatz²⁴

MightyOhm²⁵ hat einen Bausatz im Angebot, der optional mit dem GPIO-Anschluss eines Raspberry Pi²⁶ verbunden werden kann. Vorteilhaft ist, wenn sich ein Anwender bereits zuvor mit dieser Programmierumgebung vertraut gemacht hat. Wesentlich einfacher bei diesem Bausatz ist die Verwendung der seriellen Schnittstelle, weil hier die Messdaten bereits als normierte Strahlungswerte ausgegeben werden.

5 Aufgaben zur Vertiefung des Lehrstoffs

1) Wie gross ist die Aktivität von 1 g Indium-115, das sich durch sporadische Emission von Betastrahlen (Elektronen) in ein leichteres Element umwandelt?

Ein Mol Indium-115 enthält $6 \cdot 10^{23}$ Indium-Atome und wiegt 115 g. Die Halbwertszeit beträgt $6 \cdot 10^{14}$ Jahre. Nach dieser Zeitspanne ist folglich die Hälfte, also $3 \cdot 10^{23}$ Atome, zerfallen. Während einer Sekunde zerfallen $3 \cdot 10^{23} \div (3,1 \cdot 10^7 \cdot 6 \cdot 10^{14}) = 16$ Atome (was der Aktivität von 16 Bq entspricht). Natürliches Indium enthält 96 % Indium 115.

Die Aktivität von 1 g Indium-115 beträgt 0,14 Bq.

2) Eine Probe mit 1 mg reinem Radium-226 enthält ca. $2,7 \cdot 10^{18}$ Kerne. Die Halbwertszeit dieses Alphastrahlers beträgt 1'600 Jahren.

Wie gross ist die Aktivität dieser Probe, wieviele Kerne zerfallen in 15 Minuten?

Nach 1'600 Jahren sind $1,35 \cdot 10^{18}$ Kerne zerfallen.

Die Aktivität der Probe beträgt $1,35 \cdot 10^{18} \div (3,1 \cdot 10^7 \cdot 1'600 \text{ s}) = 2,72 \cdot 10^7 \text{ Bq}$

In 15 Minuten zerfallen $2,5 \cdot 10^{10}$ Radiumkerne.

3) Bei Ausgrabungen werden Holzkohlenreste gefunden, deren Alter nach der C-14 Methode²⁷ bestimmt werden kann (C-14 hat eine Halbwertszeit von 5'730 Jahren). Dabei wird

²³ <https://www.pollin.de/>

²⁴ <https://www.elektronik-labor.de/Projekte/Gamma5.html>

²⁵ <https://mightyohm.com/blog/products/geiger-counter/>

²⁶ https://de.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi

²⁷ <https://de.wikipedia.org/wiki/Radiokarbonmethode>

die Aktivität der alten Probe mit der Aktivität einer frischen Holzkohlenprobe (Referenzprobe) verglichen. Die alte Probe besitzt eine Aktivität von 21,2 Zerfällen pro Minute, die Referenzprobe eine Aktivität von 32,3 Zerfällen pro Minute.

Berechnen Sie das Alter der gefundenen Holzkohlenprobe.

Um die Aufgabe zu lösen, muss bekannt sein, wie sich die Aktivität im Laufe der Zeit ändert. Es gilt derselbe funktionale Zusammenhang wie beim Zerfallsgesetz.

$$A(t) = A_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}}$$

| | |
|------------------|---------------------------|
| A(t) | Aktivität nach der Zeit t |
| A ₀ | Anfängliche Aktivität |
| t | Zeit |
| T _{1/2} | Halbwertszeit |

Nach t aufgelöst, ergibt sich:

$$t = -\frac{\ln \frac{A(t)}{A_0}}{\ln(2)} \cdot T_{1/2}$$

| | |
|------------------|--------------------------|
| A(t) | 21,2 Zerfälle pro Minute |
| A ₀ | 32,3 Zerfälle pro Minute |
| T _{1/2} | 5'730 Jahre |

Nach Einsetzen der Werte erhalten wir das Alter der Probe von 3'480 Jahren.

4) Die Zählrate einer Probe wird mit einem Geiger-Müller-Zählrohr bestimmt. Die Ansprechwahrscheinlichkeit [A] beträgt 0,039. Wie viele Teilchen müssen einfallen, damit im Mittel 100 Teilchen registriert werden?

$$A = 0,039 = \frac{100}{n} \rightarrow n = 2'564$$

Folglich müssen 2'564 Teilchen in das Zählrohr eindringen, damit 100 Teilchen registriert werden.

6 Quellenverweise

6.1 Fachliteratur

- Werner Stolz: Radioaktivität (Teubner).
- Hermann Hinsch: Radioaktivität – Aberglaube und Wissenschaft (BoD).
- Hanno Krieger: Strahlungsmessung und Dosimetrie (Springer Spektrum).
- Hans-Geritt Vogt, Jan-Willem Vahlbruch: Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes (Hanser).

6.2 Literatur über Experimente und Selbstbau

- Günter Wahl: Experimente mit Radioaktivität (Franzis).
- Peter Lay: Selbstgebaute Detektoren für Strahlenquellen in der Umwelt (Franzis).
- Thomas Rapp: Experimente mit selbst gebauten Geigerzählern, Funken- & Nebelkammern (Franzis).

6.3 Bausätze

<https://myscope.net/geigerzaehler/>

<http://www.b-kainka.de/bastel76.htm>

<https://www.elektronik-labor.de/Projekte/Gamma5.html>

<https://www.rapp-instruments.de/Radioaktivitaet/Detektoren/Geigercounter/Geigercounter.htm>

6.4 Weblinks

<https://www.fs-ev.org/service/fragen-und-antworten-zum-strahlenschut>

https://www.kernenergie.ch/de/radioaktivitaet-_content---1--1086.html

<https://www.aerztezeitung.de/Panorama/Gy-Sv-Bq-Glossar-zum-Strahlenschutz-342291.html>

<https://de.ifixit.com/Anleitung/Gamma+Scout+Geigerz%C3%A4hler+Batteriewechsel/128988>

<https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/radioaktivitaet-einfuehrung>

Beachte: Bei Weblinks, die zur Zeit der Abfassung dieses Artikels aktiv waren, besteht die Möglichkeit, dass sie zu einer späteren Zeit nicht mehr verfügbar sind.