

Am Rand der Geschichte – im Zentrum des Strahlenschutzes: Gamma-Strahlung



Abbildung 1: Paul Ulrich Villard (1908), Quelle: Wikimedia Commons

In der Zeit um die Jahrhundertwende vom 19. zum 20. Jahrhundert fanden in den Naturwissenschaften mehrere große Umbrüche statt. **Röntgen**, **Becquerel**, **Rutherford** und die **Curies** stießen experimentell in die Welt der Radioaktivität vor, **Planck** und **Einstein** schufen neue Theoriegebäude der Quantenwelt und der Relativität. Der Name des französischen Physikers und Chemikers **Paul Ulrich Villard** (28.09.1860 – 13.01.1934) (Abbildung 1) taucht in den Geschichtsbüchern kaum auf, obwohl er etwas entdeckte, das ebenfalls weitreichende Auswirkungen auf das moderne Leben hat: die Gamma-Strahlung.

Strahlung des Jahres 2025

Die „Strahlung des Jahres 2025“, die Gamma-Strahlung, wurde vor 125 Jahren von Paul Ulrich Villard entdeckt. Sie ist Teil unserer Lebensumwelt und ein faszinierendes physikalisches Phänomen.

In Form von technischen und medizinischen Anwendungen ist sie vielfach nützlich. Sie hat aber auch Risiken. Um diese Risiken unter Kontrolle zu halten, realisiert der Strahlenschutz wirkungsvolle Schutz- und Kontrollmaßnahmen sowohl für beruflich exponierte Personen in Betrieben als auch für die Personen der Bevölkerung.

Die Entdeckung der Gamma-Strahlung

Bei der Untersuchung der Eigenschaften von Radium stellte Villard fest, dass es einen magnetisch nicht ablenkbaren Anteil der vom Radium ausgehenden Strahlung gibt. Da dieser Anteil auch Aluminium- und dünne Blei-Platten durchdringen konnte, stellte er diese Strahlung als neue Strahlung vor, neben der bereits von Becquerel, den Eheleuten Curie und Rutherford beschriebenen Alpha- und Beta-Strahlung. Obwohl Villard die Ergebnisse seiner Experimente richtig interpretierte und damit die neue Strahlung entdeckte, wurde seine Entdeckung von der wissenschaftlichen Gemeinschaft zunächst weitgehend ignoriert. Erst im Jahre 1903 erfolgte eine erste namentliche Benennung dieser neuen Strahlung als „Gamma-Strahlen“ durch Rutherford.

Was ist Gamma-Strahlung? Wie entsteht sie?

Gamma-Strahlung (γ -Strahlung) ist im engeren Sinne eine elektromagnetische Strahlung, die bei radioaktiven Umwandlungen von Atomkernen entsteht und die wesentlich besser durch Materialsichten hindurchgeht als Alpha- oder Beta-Strahlung.

In der klassischen Physik ist Gamma-Strahlung eine elektromagnetische Welle, die Energie durch das Vakuum oder durch Materie transportiert. Eine scharfe Abgrenzung von Röntgen- und Gamma-Strahlen nach der Wellenlänge ist nicht möglich. Unter ca. 0,01 nm Wellenlänge dominiert aber Gamma-Strahlung.

In der Quantenphysik wird Gamma-Strahlung als Strahlung aus Photonen

beschrieben. Diese Photonen sind Strahlungskorpuskel (Gamma-Quanten) die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten und keine Ruhemasse haben.

Sichtbares Licht hat eine Energie im Bereich von Elektronenvolt (eV), während Gamma-Quanten viel energiereicher sind. Sie haben Energien von Kilo-Elektronenvolt (keV = 10^3 eV) bis Mega- Elektronenvolt (MeV = 10^6 eV). Die höchste bisher gemessene Energie eines Gamma-Quants entstand bei dem Gamma-Strahlenausbruch GRB 190114C in einer fernen Galaxie und lag im Bereich von Tera-Elektronenvolt (TeV = 10^{12} eV).

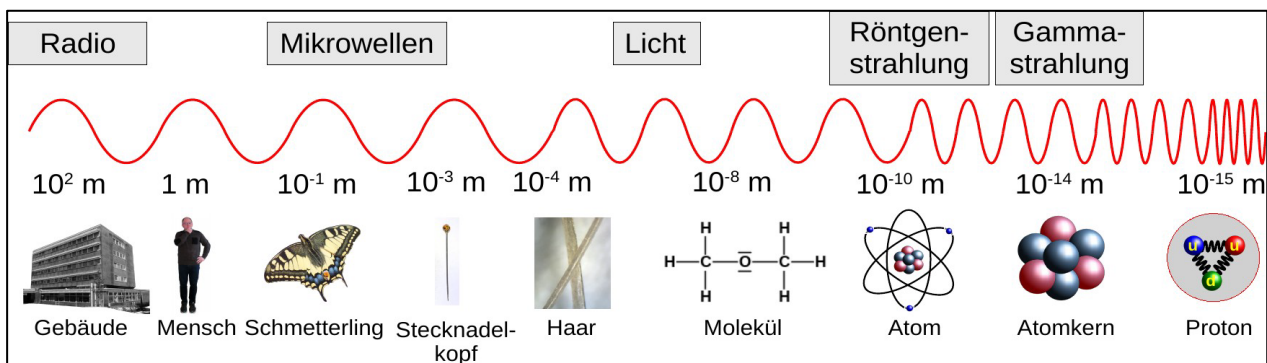


Abbildung 2: Wellenlängen im elektromagnetischen Spektrum im Vergleich mit makroskopischen und mikroskopischen Objekten unserer Welt.

Da solche Strahlung auch bei anderen Prozessen als den radioaktiven Umwandlungen, z.B. in Sternen, entstehen kann, wird die Bezeichnung „Gamma-Strahlung“ inzwischen für jede elektromagnetische Strahlung verwendet, die hinreichend kurze Wellenlängen aufweist. So entsteht Gamma-Strahlung auch, wenn ein (beim radioaktiven Zerfall entstandenes) Positron auf ein Elektron trifft und sie sich gegenseitig vernichten („Annihilation“).

Die als Teil der kosmischen Strahlung auf die Erde treffende Gamma-Strahlung stammt u.a. aus Regionen um Supernovae. Dort werden Protonen auf sehr hohe Energien beschleunigt, die danach auf Protonen von interstellarem Gas treffen. Dabei kommt es zu einer Teilchenreaktion zwischen den Protonen, bei der letztlich Gamma-Strahlung entsteht.

Natürliche Gamma-Strahlung

Gamma-Strahlung ist Teil unsere Lebensumwelt und verursacht einen bedeutenden Anteil der natürlichen Exposition des Menschen.

Terrestrische Strahlung

Eine wichtige natürliche Strahlenquelle sind die Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen von Thorium-232, Uran-238 und Uran-235, sowie das Kalium-40. Diese Radionuklide sind im Boden mit unterschiedlichen spezifischen Aktivitäten enthalten, siehe Tabelle 1. Die direkte, äußere Exposition der dadurch verursachten terrestrischen Strahlung beläuft sich auf ca. 0,4 mSv im Jahr. Das ist deutlich mehr als die zulässige Exposition durch die Entsorgung freigegebener Abfälle aus Kernkraftwerken, die auf 0,01 mSv im Jahr begrenzt ist.

Da diese terrestrische Strahlung weder vermeidbar noch praktisch begrenzbare ist, ist sie **von Strahlenschutzregelungen ausgenommen**.

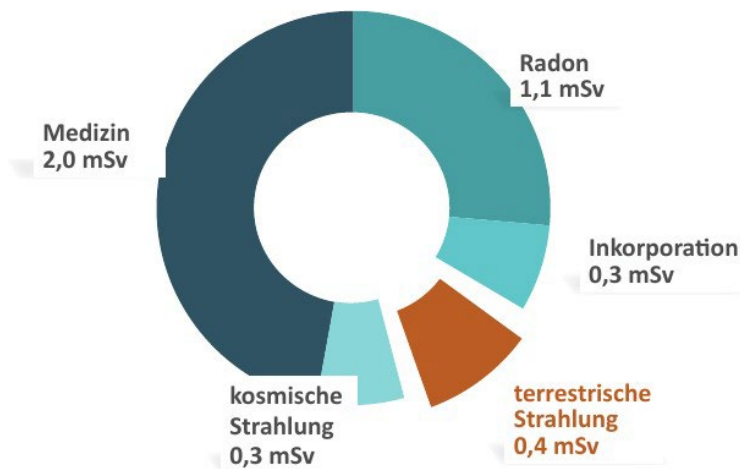


Abbildung 3: Mittlere effektive Dosis pro Jahr in Deutschland nach Angaben des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS).

Kosmischen Strahlung

Auch die Gamma-Komponente der kosmischen Strahlung ist Teil unsere Lebensumwelt. Sie verursacht (gemeinsam mit anderen Teilen der kosmischen Strahlung) eine Jahresdosis von ca. 0,3 mSv und ist zumindest bei einem Aufenthalt auf der Erdoberfläche ebenfalls weder vermeidbar noch praktisch begrenzbare.

Auch sie ist **von Strahlenschutzregelungen ausgenommen**.

Radionuklide in der Nahrung

Durch die Nahrung nehmen Menschen ebenfalls Radionuklide, wie beispielsweise Tritium (^3H), Kohlenstoff-14 und Kalium-40 auf, wobei Letzteres ein Gamma-Strahler ist. Etwa die Hälfte der Jahresdosis von 0,3 mSv an innerer Exposition des Menschen wird vom Kalium-40 verursacht.

Da Kalium ein essenzielles Element des Stoffwechsels und der Gamma-Strahler Kalium-40 ein fester Bestandteil des natürlichen Kaliums ist, ist auch die **Strahlung des Kalium-40 von Strahlenschutzregelungen ausgenommen**.

Kalium-40 hat eine Halbwertszeit von $1,25 \cdot 10^9$ Jahren und zerfällt im Wesentlichen über den Beta-Minus-Zerfall sowie über Elektroneneinfang zu Kalzium-40 bzw. zu Argon-40. Letzteres geht in den Grundzustand über, indem es ein Gamma-Quant mit einer Energie von 1461 eV emittiert. Die in einem Meter Abstand entstehende Haut-Dosisleistung durch den Beta-Zerfall eines punktförmigen Kalium-40-Präparats ist etwa 57-mal größer als die Gamma-Dosisleistung desselben Präparats im gleichen Abstand.

Interessant ist auch, dass die Ingestionsdosis beim Kalium-40 etwa dreimal größer ist als seine Inhalationsdosis.

Tabelle 1: Variationsbreite der spezifischen Aktivität verschiedener natürlicher Radionuklide im Erdboden in Deutschland

Radionuklid	Spezifische Aktivität in Bq/kg
Kalium-40	50 bis 1500
Uran-238	10 bis 350
Thorium-232	10 bis 150

Wie wirkt Gamma-Strahlung auf Materie?

Die Wirkung der Gamma-Strahlung auf Materie ist von zentraler Bedeutung für den Strahlenschutz, da sie nicht nur ein gesundheitliches Risiko birgt, sondern auch durch ihre Wechselwirkungen bereits mit einfachen Messgeräten nachweisbar ist.

Arten, wie Gamma-Strahlung mit Materie wechselwirkt

Die wichtigsten Arten, wie Gamma-Strahlung mit Materie wechselwirkt, sind

- der Photoeffekt (Abbildung 4 a)),
- der Compton-Effekt (Abbildung 4 b)) und
- die Paarbildung (Abbildung 4 c)).

Beim Photoeffekt wird ein Gamma-Quant vom Material absorbiert. Als Folge dessen wird ein Elektron aus der Elektronenhülle des betroffenen Atoms freigesetzt.

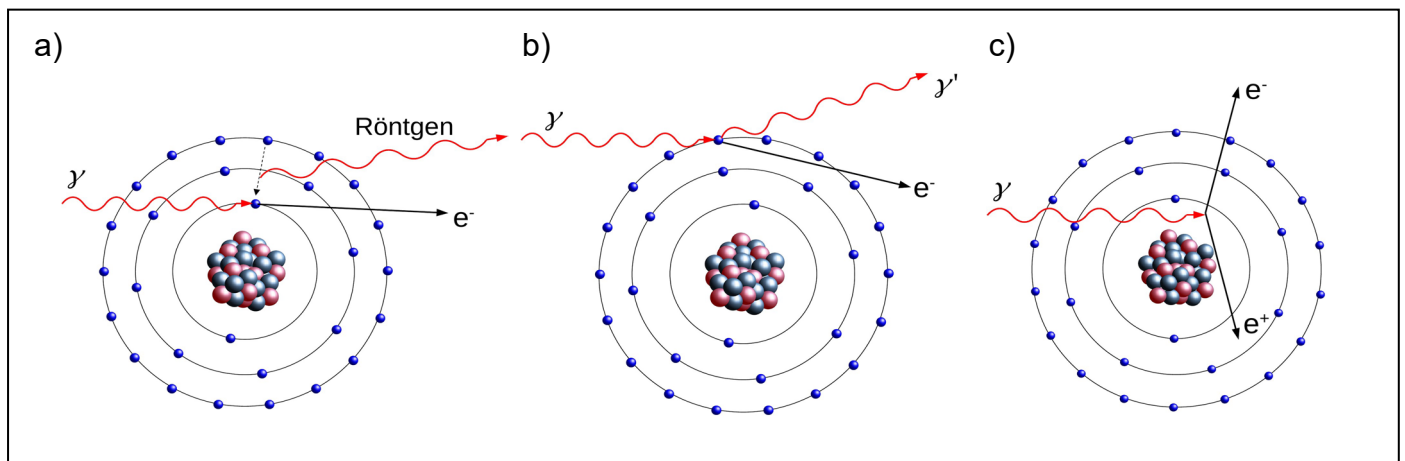


Abbildung 4: Prinzipskizzen zum Photoeffekt a), Compton-Effekt b) und zur Paarbildung c).

Beim Compton-Effekt trifft ein Gamma-Quant ein Elektron der Atomhülle und wird an diesem gestreut. Dabei verliert das Gamma-Quant Energie und ändert meist seine Richtung. Der Energieübertrag auf das Elektron ist in der Regel so hoch, dass es die Elektronenhülle verlässt.

Paarbildung: In der Nähe eines Atomkerns kann ein Gamma-Quant mit einer Energie von mindestens 1022 keV in ein Elektron-Positron-Paar zerfallen. Das so entstandene Positron koppelt kurze Zeit später wieder mit einem anderen Elektron, wobei beide Teilchen vernichtet werden und 2 Gamma-Quanten mit einer Energie von 511 keV entstehen. In allen 3 Prozessen kommt es also zur Ionisation von Atomen. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass Gamma-Strahlung über einen der 3 oben genannten Prozesse eine Ionisation bewirkt, ist verglichen mit der Alpha- und Beta-Strahlung deutlich kleiner. Ihre Reichweite in Materie ist daher deutlich größer als die von Alpha- und Beta-Strahlung. Deshalb wird sie auch als durchdringende Strahlung bezeichnet.

Nutzung der Gamma-Strahlung

Die Gamma-Strahlung wird **in der Industrie** zum Beispiel zur Prüfung von Schweißnähten, (siehe Abbildung 5) zur Füllstandsmessung oder zur Sterilisation von Gegenständen und Produkten meist für die Medizin oder die Pharmazie verwendet.

In der Medizin wird die Gamma-Strahlung für die Diagnostik und zum Teil noch für die Tumorthherapie eingesetzt.

Aus der Sicht der Wissenschaft ist sie gerade **in der Kern- und Teilchenphysik** sowie in der Astrophysik, aber auch in der Physik der Atmosphäre eine unverzichtbare Sonde zur Untersuchung von komplexen Vorgängen auf mikroskopischer Größenskala. Aber auch makroskopisch betrachtet ist sie wichtig. So ermöglicht sie es zum Beispiel in der Radioökologie oder Friedensforschung, die Verteilung von Radionukliden in der Umwelt zu untersuchen.



Abbildung 5: Zerörungsfreie Werkstoffprüfung – Prüfen von Schweißnähten mit einer Gamma- Strahlenquelle, Quelle: www.shutterstock.com.

Messung der Gamma-Strahlung

Für die Identifizierung und Ermittlung der Aktivität von Radionukliden zum Beispiel in der Umwelt oder in Lebensmitteln lässt sich die Gamma-Strahlung mit verhältnismäßig kleinem Probenaufbereitungsaufwand hinsichtlich ihrer Energie und Intensität gammaspektrometrisch messen. Dabei werden meist hochreine Germanium-Detektoren eingesetzt. Die Abbildung 6 zeigt ein Gamma- Spektrum, in dem die Linien des Argon-41 und der Annihilationsstrahlung der Positronen-Strahler ^{11}C , ^{13}N und ^{15}O in der Abluft einer Beschleunigeranlage zu sehen sind. Die Gamma-Spektrometrie ist darüber hinaus auch für die Freigabe bzw. Entsorgung von radioaktiv kontaminierten Stoffen wichtig.

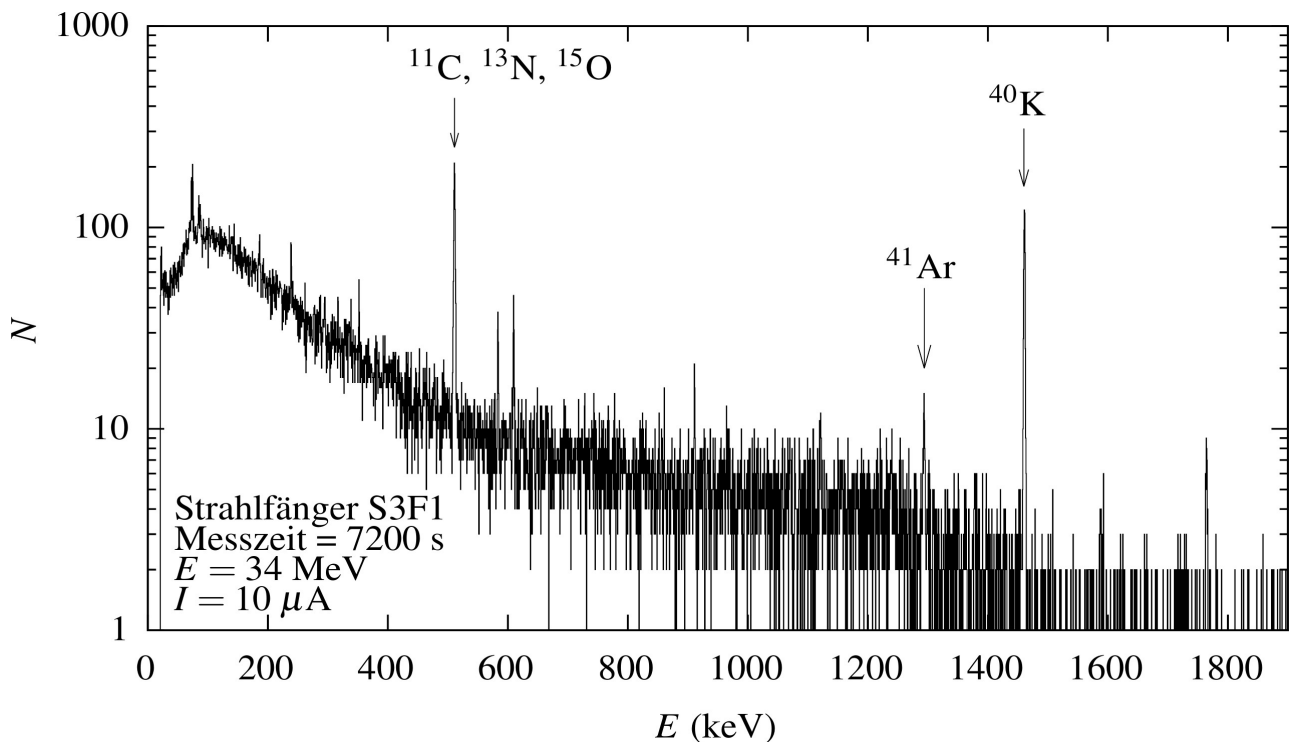


Abbildung 6: Gamma-Spektrum zur Identifizierung und Aktivitätsbestimmung der Radionuklide ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O bei 511 keV (Annihilationsstrahlung) und ^{41}Ar bei 1294 keV in einer Luftprobe der Beschleunigeranlage S-DALINAC (TU Darmstadt).

Risiken und Schutz vor der Gamma-Strahlung

Der Nutzen einer kontrollierten Anwendung von Gamma-Strahlung ist zweifelsfrei eine echte Chance für die Gesellschaft. Aber sie birgt auch Risiken.

Durch ihre ionisierende Wirkung auf zellulärer Ebene kann sie je nach Intensität einer Bestrahlung auch eine schädliche Wirkung auf den menschlichen Körper haben. Wegen ihrer vergleichsweise geringen Wechselwirkungswahrscheinlichkeit sind es vor allem die unkontrollierten Expositionen mit hoher Strahlungsintensität, die ein Risiko darstellen können. Solche Situationen können bei Strahlenunfällen auftreten. ***Deshalb ist der Schutz vor einer Exposition insbesondere durch Gamma-Strahlung ein zentraler Baustein des Strahlenschutzes.***

Abschirmung

Ein wichtiger Aspekt ist die Auslegung von Abschirmungen gegen Gamma-Strahlung. Materialien mit hoher Dichte oder mit großer Dicke schaffen es, die Strahlungsintensität wirkungsvoll herabzusetzen. Üblicherweise wird für Gamma-Strahlung Blei oder Beton als Abschirmmaterial verwendet. Bei Abschirmungen aus Beton fallen die Wandstärken größer aus, weil seine Dichte kleiner ist als die von Blei.

Messung

Da Gamma-Strahlung, wie einige der anderen Strahlenarten auch, nicht mit menschlichen Sinnen wahrnehmbar ist, kommt den Messgeräten, die insbesondere die Gamma-Strahlung detektieren können, eine große Bedeutung zu. Dies wird besonders deutlich in kritischen Situationen wie zum Beispiel bei den Strahlenunfällen von Tschernobyl und Fukushima, wenn zudem präzise Messungen entscheidend sind, um die Strahlenexposition zu bewerten.

Um präzise und vertrauenswürdige Messergebnisse zu erzielen, ist die Wahl eines geeigneten Messgeräts wichtig. Dieses Gerät sollte nicht nur in der Lage sein, die spezifische Strahlenart zu detektieren, sondern auch hinreichend empfindlich im Energiebereich der Strahlungs-Quanten sein.



Abbildung 7: Handmessgerät für Dosisleistung im praktischen Strahlenschutz mit Gesteinsprobe

Der messtechnische Aufwand, um Gamma-Strahlung nachzuweisen, ist verhältnismäßig klein. Bereits ein einfaches Geiger-Müller-Zählrohr ist in der Lage, Gamma-Quanten mit hoher Verlässlichkeit zu messen.

Daher ist ein Geiger-Müller-Zählrohr auch heute noch die am häufigsten verbaute Sonde in den gängigen Handmessgeräten für Dosisleistungen im Strahlenschutz (siehe Abbildung 7). Auch wenn die spektrometrische Messung der Energie und Häufigkeiten von Gamma-Quanten mit einem hochreinen Germanium-Detektor technisch wesentlich aufwändiger und vor allem kostenintensiver ist, so wird diese Tatsache durch den Umstand kompensiert, dass sich viele gammastrahlende Radionuklide in einer Probe auf einmal messen und identifizieren lassen.

Strahlung des Jahres 2025

Die „Strahlung des Jahres 2025“, die Gamma-Strahlung, wurde vor 125 Jahren von Paul Ulrich Villard entdeckt. Sie ist Teil unserer Lebensumwelt und ein faszinierendes physikalisches Phänomen. In Form von technischen und medizinischen Anwendungen ist sie vielfach nützlich. Sie hat aber auch Risiken. Um diese Risiken unter Kontrolle zu halten, realisiert der Strahlenschutz wirkungsvolle Schutz- und Kontrollmaßnahmen sowohl für beruflich exponierte Personen in Betrieben als auch für die Personen der Bevölkerung.

Jonny Birkhan, Matthias Bothe, Jörg Feinhals, Rainer Gellermann, Christoph Wilhelm

[1] Wikipedia Commons, Paul_Villard.jpg, Abfrage 21.11.2024_
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paul_Villard.jpg?uselang=en#Licensing