



GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung

Station 2

Nachweis von γ -Strahlung mit einem
Geiger-Müller-Zählrohr

Inhalt

Nachweis von γ -Strahlung mit einem Geiger-Müller-Zählrohr	3
Worum es geht:	3
V.1. Der Experimentierplatz	3
V.2. Die Inbetriebnahme des Zählgerätes	4
V.3. Zählrate und Nulleffekt	4
V.4. Messung schwach radioaktiver Proben	7
V.5. Absorptionsmessung von Blei mit einer Co-60-Quelle	8
V.6. Überprüfung des Abstandsgesetzes	11
Hintergrundwissen	13
H.1. Radioaktivität und Strahlungsarten	13
Alpha-(α -)Strahler	14
Beta-(β -)Strahler	14
Gamma-(γ -)Strahler	15
H.2. Natürliche radioaktive Strahlung	15
Kosmische Strahlung und die Erzeugung neuer Radionuklide	15
Terrestrische Strahlung	16
H.3. Die Kobalt-60-Quelle	17
H.4. Die Ionisationswirkung von γ -Strahlung.	18
H.5. Schwächung von γ -Strahlen	19
H.6. Das Geiger- Müller-Zählrohr	20
H.7. Das Abstandsgesetz	21
H.8. Strahlenschutz	22
H.9. Statistik	22

Nachweis von γ -Strahlung mit einem Geiger-Müller-Zählrohr

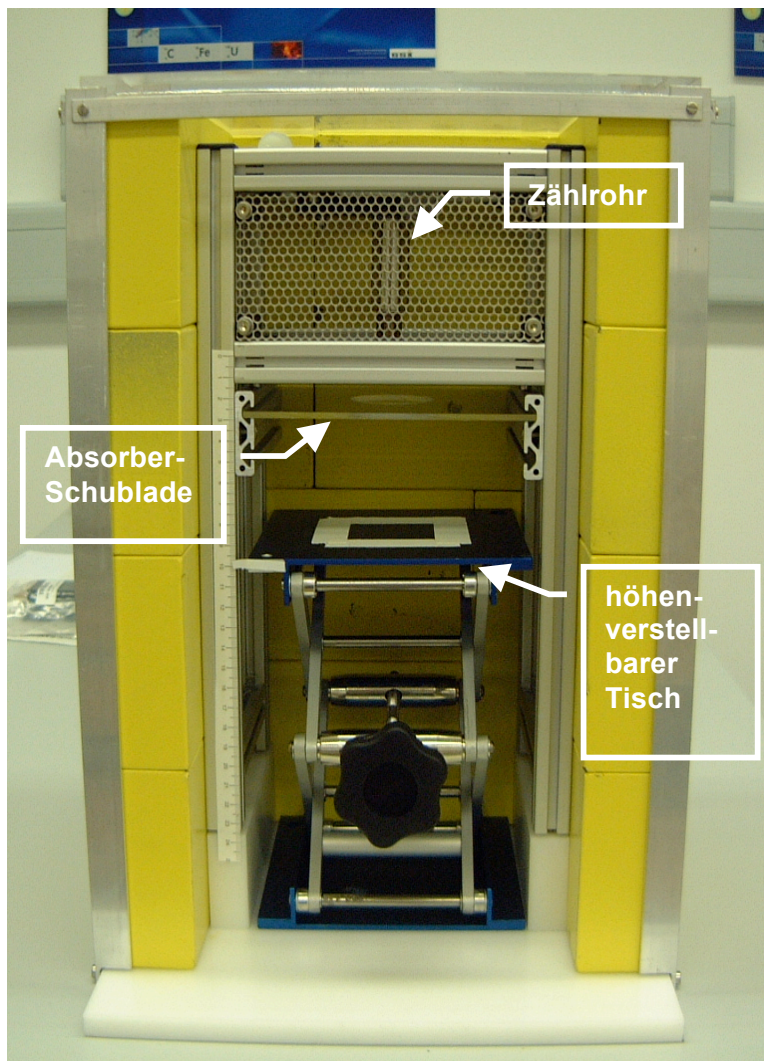
Worum es geht:

Radioaktive Strahlung wird in diesem Experiment mit einem **Geiger-Müller-Zählrohr** untersucht: zunächst die allgegenwärtige, **natürliche Untergrundstrahlung**, anschließend die sehr **schwache radioaktive Strahlung aus Alltagsgegenständen (Dünger, Steine...)**. Neben der Wirkungsweise des Zählrohrs und der Herkunft dieser Strahlung lernt man auch etwas über deren **statistischen Charakter**.

Mit einem radioaktiven „Strahlerstift“ werden dann in der gleichen Apparatur einige **Eigenschaften von γ -Strahlen** untersucht. Dazu gehört das **$1/r^2$ -Abstandsgesetz** und die Möglichkeit der **Abschirmung mit Bleiplatten**.

Die mit einem einfachen Zählgerät erhobenen Messwerte können **graphisch auf Millimeterpapier** oder mit einem **Tabellenkalkulationsprogramm** (z.B. MS-EXCEL) ausgewertet werden. Die Lokalisation einer in einem Plexiglaswürfel „versteckten“ Gammaquelle schließt die Experimentierreihe ab.

V.1. Der Experimentierplatz



Im Innern eines „Bleiturms“ befindet sich ein höhenverstellbarer Tisch, mit dessen Hilfe radioaktive Proben in variablem Abstand unter einem Geiger-Müller-Zählrohr untersucht werden können. Die dicken Bleiwände dienen weniger dem Schutz der Experimentatoren vor radioaktiver Strahlung, denn die ist in diesem Experiment eher gering, sondern sind dazu da, um die allgegenwärtige, natürliche radioaktive Strahlung („Null-effekt“) am Zählrohr gering zu halten.

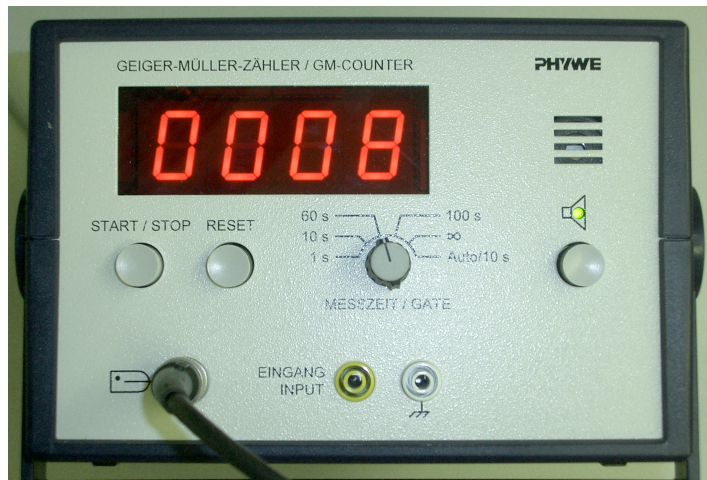
Das zylindrische Zählrohr befindet sich hinter dem Schutzgitter im oberen Teil des Turms. Auf einer Plexiglas-Schublade können Absorberplatten vor das Zählrohr geschoben werden.


Mit dem schwarzen Drehknopf kann der Tisch in seiner Höhe verstellt werden.

Als Messhilfe dient eine seitlich angebrachte mm-Skala.

V.2. Die Inbetriebnahme des Zählgerätes

☞ Nehmen Sie das Zählrohr durch Einschalten des Zählgerätes (Schalter an der Rückseite) in Betrieb! Dieses Gerät liefert automatisch die richtige Zählrohrspannung (500V) und erlaubt es, die gewünschte Messzeit (Messintervall) vorzuwählen.



☞ Jedes im Zählrohr nachgewiesene Teilchen (in der Hauptsache α - oder β -Teilchen sowie γ -Quanten) erzeugt einen elektrischen Impuls. Dieser kann durch Zuschalten des Lautsprechers (Taste mit dem Lautsprechersymbol ) als lautes Knacken hörbar gemacht werden. Eine grüne Leuchtdiode zeigt an, ob der Lautsprecher in Betrieb ist. Es empfiehlt sich, den Lautsprecher eingeschaltet zu lassen, da man bei diesem Gerät oft nur so erkennen kann, dass die Messzeit abgelaufen ist. Der Lautsprecher klickt nach Ablauf der vorgewählten Zeitspanne nach wie vor bei jedem registrierten Teilchen, jedoch hört die Anzeige auf zu zählen.

- Die Anzahl der registrierten Impulse wird auf dem Zifferndisplay dargestellt.
- Als Messintervalle stehen 1s, 10s, 60s und 100s zur Verfügung. In der Stellung „∞“ stoppt die Messung nicht von alleine. In der Stellung „Auto/10s“ wird nach einem einmaligen Start die Messzeit 10 s automatisch immer wieder neu gestartet. Während ein Messintervall läuft, wird die im vorangegangenen Messintervall gemessene Impulszahl am Display angezeigt.
- Eine Messung wird mit der „Start/Stop“-Taste begonnen und kann durch nochmaliges Drücken dieser Taste auch vor Ablauf der eingestellten Messzeit abgebrochen werden.
- „Reset“ stellt die Ziffernanzeige zurück auf den Wert „0000“.

V.3. Zählrate und Nulleffekt

Die Zahl der Impulse, die in einer bestimmten Zeit mit dem Zählrohr gemessen wird, ist die **Zählrate**. Sie ist ein Maß für die Intensität der Strahlung:

$$\text{Zählrate} := \frac{\text{Anzahl der Impulse}}{\text{Messzeit}} \quad [\text{Zählrate}] = \frac{\text{Imp}}{\text{s}}$$

Wenn man das Zählrohr in Betrieb genommen hat, stellt man fest, dass Impulse registriert werden, obwohl sich kein radioaktives Material in der Nähe des Zählrohres befindet. In diesem Fall wird die natürliche Radioaktivität aus der Umwelt registriert. Dieser **Nulleffekt** ist ständig vorhanden und tritt sehr unregelmäßig auf. Erst bei Messungen über einen längeren Zeitraum gleichen sich diese zufälligen Schwankungen aus. Die auf den Nulleffekt

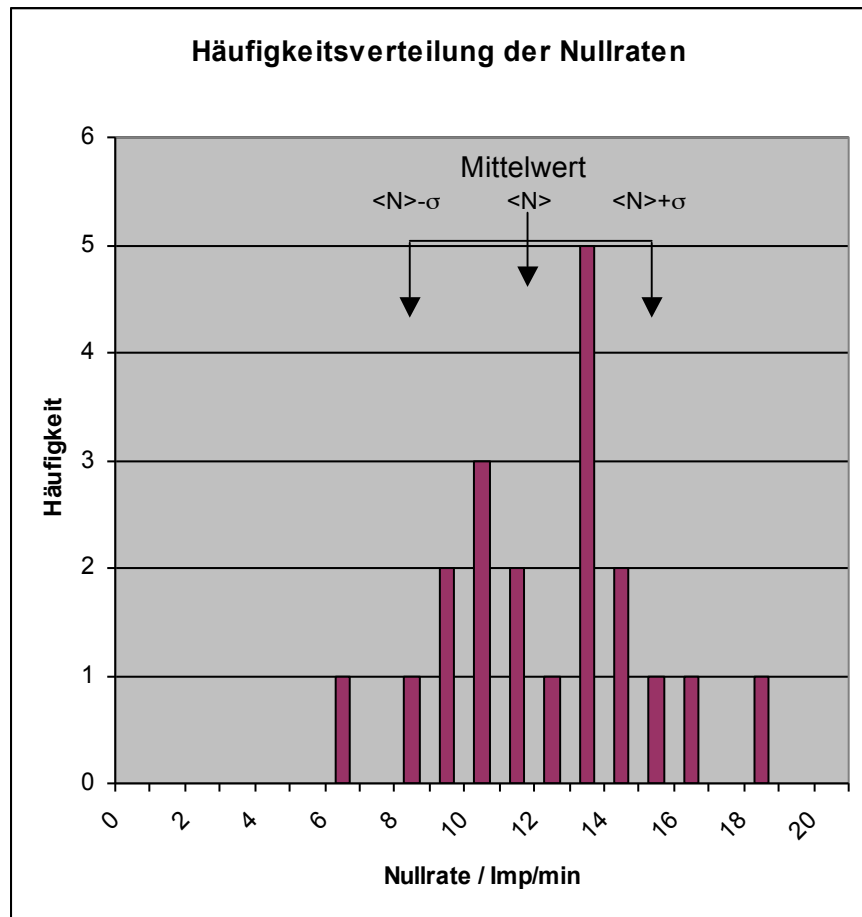
zurückzuführende Zählrate wird **Nullrate** genannt und ist bei allen Messungen zu berücksichtigen.

☞ Stellen Sie am Zählgerät eine **Messzeit von 1 Minute (60 Sekunden)** ein und bestimmen Sie in mindestens 10, besser mehr, **aufeinanderfolgenden Messungen die Nullrate**. Rechnen Sie die Messergebnisse zunächst nicht in „Teilchen pro Sekunde“ um

☞ Tragen Sie die Messergebnisse in einem **Histogramm** auf: auf der x-Achse die in 1 Minute gemessenen Impulszahlen N_i , auf der y-Achse die jeweiligen Häufigkeiten h_i , mit denen die entsprechende Impulszahl aufgetreten ist. Der Index „i“ bezeichnet hier die Nummer der Messung ($i= 1,\dots,20$), die Zahl „n“ steht für die Gesamtzahl der Messungen (hier $n=20$).

Verwenden Sie dazu den Diagrammassistenten von EXCEL oder, wenn Sie sich mit diesem Programm nicht so gut auskennen einfach Millimeterpapier. Das Beispiel zeigt eine Auswertung für 20 Messungen:

Nr. der Messung i	Nullrate Imp/min N_i
1	13
2	14
3	10
4	17
5	12
6	13
7	13
8	9
9	10
10	13
11	14
12	10
13	11
14	6
15	18
16	17
17	13
18	11
19	7
20	7
...	...



☞ Berechnen Sie nun den **Mittelwert $\langle N \rangle$** der **von Ihnen** gemessenen Nullraten sowie die **mittlere Schwankung σ** („Sigma“, griechischer Buchstabe) der Nullraten um diesen Mittelwert nach den Formeln:

$$\langle N \rangle = \frac{N_1 + \dots + N_i + \dots + N_n}{n} \quad \text{und} \quad \sigma = \sqrt{\langle N \rangle}$$

wobei $N_{\max/\min}$ den höchsten/niedrigsten Wert, den Sie gemessen haben, darstellt. Geben Sie das Resultat, wie allgemein üblich, in folgender Form an:

$$\langle N \rangle \pm \sigma$$

σ wird auch als **Standard-Abweichung** oder **mittlerer statistischer Fehler** bezeichnet.

Für das Beispiel, das oben in der Tabelle bzw. der Grafik dargestellt ist, erhält man als Mittelwert den Zahlenwert **$\langle N \rangle = 12$ mit der mittleren Schwankung $\sigma \approx 3,5$** .

Die mittlere Nullrate im Beispiel beträgt also **$12,0 \pm 3,5 \text{ Imp/Minute}$** .

Machen Sie sich klar was Ihr Ergebnis bedeutet.

Sicher werden Sie wissen was ein „Mittelwert“ ist. Über die Standardabweichung sollten Sie aber genau nachdenken, da diese nicht so häufig in der Schule verwendet wird. Sie hat folgende Bedeutung:

Wenn die gemessene Strahlung wie in diesem Falle statistischer Natur ist, d.h. zufällig auftritt, kann man das Ergebnis nun folgendermaßen interpretieren:

	68%	95%	99,7%	aller Einzelmessungen N_i
haben Werte im Intervall:	$\pm \sigma$	$\pm 2\sigma$	$\pm 3\sigma$	um den Mittelwert $\langle N \rangle$ herum

oder:

Eine Abweichung einer Einzelmessung von $\langle N \rangle$ um mehr als:	$\pm \sigma$	$\pm 2\sigma$	$\pm 3\sigma$
hat die Wahrscheinlichkeit:	32%	5%	0,3%


Das wollen wir zunächst in unserem **Beispiel** prüfen: Dort sind es **14 von 20** bzw. **70%** aller gemessenen Nullraten, die **zwischen 8,5 und 15,5 Imp/min** liegen (sogenannte „**1 σ -Umgebung**“). Wenn man weiter zählt, stellt man fest, dass bereits alle gemessenen Raten (20 von 20), d.h. 100% der Raten in der **2 σ -Umgebung** zwischen 5 und 19 Imp/min liegen. Die Vorgaben der σ -Tabelle sind damit recht gut erfüllt, und damit auch die Annahme bestätigt, dass die Prozesse, die zum Nulleffekt führen, rein zufälligen Charakter haben.


☞ Prüfen Sie **in Ihrer Messung**, ob auch wirklich annähernd 68% der Messwerte innerhalb der **1 σ -Umgebung** um $\langle N \rangle$ herum liegen, d.h. zwischen $\langle N \rangle - \sigma$ und $\langle N \rangle + \sigma$. Wie hoch sind die Anteile in der **2 σ -** und **3 σ -Umgebung**? Vergleichen Sie mit der σ -Tabelle! Da die Prozesse bei denen die natürliche Hintergrundstrahlung entsteht rein zufälliger Natur sind, werden Ihre Messwerte umso besser den Tabellen entsprechen je mehr Messungen Sie gemacht haben. Bei „nur“ 10 Messungen kann es noch zu ziemlichen Abweichungen kommen, bei 20 Messungen sind die Tabellen i.d.R. schon recht gut erfüllt und bei 30 oder gar mehr Messungen stimmen sie bereits (fast) genau.

V.4. Messung schwach radioaktiver Proben

Nun soll eine von drei bereitliegenden Proben auf ihre Radioaktivität untersucht werden. Zu empfehlen sind mindestens 5 Messungen von jeweils 60 Sekunden Dauer. **Suchen Sie sich entweder den bereitliegenden Stein oder die Dose mit Kunstdünger (kleine blaue Kügelchen) oder das KCl (Salzverbindung) aus.** Bei der Messung steht man vor dem Problem, dass die von diesen Objekten ausgehende Strahlung nur sehr schwach ist (es handelt sich ja um „Alltagsgegenstände“). Die Strahlung dieser Proben wird inmitten der immer gegenwärtigen natürlichen Untergrundstrahlung daher leicht übersehen.

Natürlich hat man in diesem Experimentaufbau durch geeignete Abschirmung mit Blei versucht, die Nullrate so weit wie möglich zu reduzieren, doch selbst mit noch aufwändigerer Abschirmung ließe sich die im vorigen Abschnitt gemessene Umgebungsstrahlung nicht vollständig unterdrücken.

 Legen Sie die Proben wie in der Abbildung gezeigt auf den Holzklotz und fahren Sie die Proben jeweils **möglichst unmittelbar unter das Zählrohr**. Entfernen Sie dazu die Kunststoffplatte! Verpackungen stören die Messung nur unwesentlich und sollen bitte nicht entfernt werden!)

 Stellen Sie eine **Messzeit von 1 min** ein und führen Sie **mindestens 5 Messungen** durch. Berechnen Sie, genau so wie Sie im vorigen Abschnitt die mittlere Nullrate bestimmt haben, hier die **mittlere Zählrate $\langle Z \rangle$** und deren **mittlere Schwankung σ** .



Nun ist es spannend herauszufinden, ob die Probe tatsächlich radioaktive Strahlung aussendet. Betrachten Sie sich die Ergebnisse Ihrer Nullratenmessung und das Ergebnis ihrer Zählratenmessung noch einmal genau. Versuchen Sie eine begründete Aussage darüber zu machen, ob die untersuchte Substanz strahlt oder nicht. Fragen Sie den Betreuer, damit er Ihnen notfalls bei der Interpretation der Ergebnisse hilft.

Sie können die Ergebnisse auch mathematisch interpretieren. Dazu sind allerdings etwas weiterreichende Mathematikkenntnisse erforderlich. Bilden Sie dazu zuerst die **Differenz $D = \langle Z \rangle - \langle N \rangle$** der Zählrate und der Nullrate.

Da sowohl die Nullraten „N“ als auch die Zählraten „Z“ keine konstanten Werte waren sondern eben einer gewissen Schwankung unterworfen sind, kann man natürlich nicht erwarten, dass die Differenz aus beiden plötzlich eine konstante Zahl ist. Auch die Differenz aus beiden wird schwanken, also mit einer Standardabweichung angegeben werden müssen.

Nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz erhält man den **mittleren statistischen Fehler $\bar{\sigma}_D$ der Differenz D** durch quadratisches Addieren der Standardabweichung der Mittelwerte $\bar{\sigma}_Z$ (mittl. Schwankung der Ratenmessung mit Probe) und $\bar{\sigma}_N$ (mittl. Schwankung der Nullratenmessung). Diese Größen erhält man, indem man die bei den entsprechenden Experimenten errechneten Standardabweichungen noch durch die Wurzel der Anzahl an Messungen teilt:

$$\bar{\sigma}_z = \frac{\sigma_z}{\sqrt{n}} \quad \text{und} \quad \bar{\sigma}_N = \frac{\sigma_N}{\sqrt{n}}$$

$$\bar{\sigma}_D = \sqrt{\bar{\sigma}_Z^2 + \bar{\sigma}_N^2}$$

Dies schreibt man meist als: $D = (\langle Z \rangle - \langle N \rangle) \pm \bar{\sigma}_D$


Nun müssen Sie ihr Ergebnis interpretieren: Wenn die Differenz wesentlich größer ausfällt als die Standardabweichungen Ihrer Nullratenmessung ist davon auszugehen, dass eine Radioaktivität der Probe vorliegt. Ein Beispiel: In der Nullratenmessung, die oben in der Anleitung als Beispiel steht, ergibt sich:

$$\langle N \rangle = 12 \pm 3,5$$


Angenommen Sie erhalten nun für Ihre Differenz einen Wert von 14, so liegt dieser Wert weit über der Standardabweichung von 3,5. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Nullrate allein aufgrund von zufälligen Schwankungen soweit erhöht ist, ist praktisch gleich Null (achten sie auf die σ -Tabellen und bedenken Sie dass eine Abweichung von mehr als 3σ aufgrund von zufälligen Prozessen nur eine Wahrscheinlichkeit von 0,3% hat. 14 ist aber deutlich mehr als 3σ).

Allgemein müssen Sie also die Differenz mit der Standardabweichung Ihrer Nullratenmessung vergleichen. Liegt eine Abweichung von σ vor, ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Probe die Radioaktivität durch ihre Eigenstrahlung erhöht hat 68%, bei einer Abweichung von 2σ ist die Wahrscheinlichkeit 95%, usw.

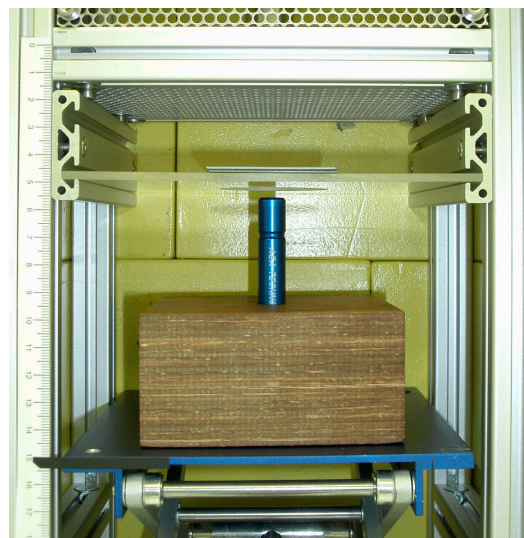
Liegt eine Abweichung von 3σ und mehr vor, spricht man von einer **hochsignifikanten Abweichung**.

 Berechnen Sie für ihre gewählte Probe D und σ_D ! Können Sie eine signifikante Aussage über die Radioaktivität der einzelnen Proben machen?

V.5. Absorptionsmessung von Blei mit einer Co-60-Quelle

 Lassen Sie sich von ihrem Betreuer die Co-60-Quelle geben und stellen Sie diese in Verlängerung der Zählrohrachse auf den blauen Tisch. Als Quellenhalter dient der Holzklotz. Die Tischhöhe sollte auf 18 cm eingestellt werden.

- Die Absorberplatten **aus Blei (Pb)** sind in dem Sortimentkasten untergebracht. Sie werden nach und nach so auf die Plexiglasplatte mit der großen Aussparung gelegt, dass die Quelle vom Zählrohr aus gesehen vollständig abgedeckt wird.
- **Bei allen Absorptionsmessungen darf der Abstand der Quelle zum Detektor nicht geändert werden!**



- ☞ Messen Sie nun bei konstantem Abstand zwischen Quelle und Zählrohr die Zählrate in Abhängigkeit von der Dicke der Pb-Absorberplatten. Die dünnen Absorberplatten sind 1mm, die dicken 5mm dick. Messen Sie die Zählraten bei folgenden Absorberdicken: 0 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 5 mm, 10 mm und 20 mm **jeweils drei mal**. Bilden Sie den Mittelwert aus den drei Messungen für jede Schichtdicke und ziehen Sie jeweils die in V.3. ermittelte Nullrate ab. Empfohlene Messzeit: jeweils 1 Minute.
- ☞ Machen Sie sich klar, dass auch diese Messungen Schwankungen statistischer Natur unterworfen sind. Die Standardabweichungen können sie wieder näherungsweise als Wurzel aus dem jeweiligen Mittelwert errechnen.
- ☞ Stellen Sie Ihre Messwerte in einem Koordinatensystem grafisch dar. Tragen Sie auf der x-Achse die Schichtdicke in mm, auf der y-Achse die Mittelwerte der um den Nulleffekt korrigierten Zählraten auf. Verwenden Sie dazu entweder Millimeterpapier oder den Diagrammassistenten von EXCEL. Tragen Sie evtl. nach Rücksprache mit dem Betreuer die Standardabweichungen als Fehlerbalken ein. Bestimmen Sie aus Ihren Messwerten die Halbwertsschichtdicke d_h bzw. den Schwächungskoeffizienten k von Blei.

V.5.b. Tipps zur Auswertung

Wie erwartet, streuen die Messergebnisse um den erwarteten theoretischen Verlauf herum. Gerade bei einer Schichtdicke von einem Millimeter Blei gehen die Messwerte gegenüber der Messung ohne Abschirmung sogar teilweise nach oben. Das ist kein Messfehler sondern hat einen bestimmten Grund auf den weiter unten genauer eingegangen wird. Zunächst sollten sie diese Schwankungen bei einem Millimeter Blei – falls sie auftreten – ignorieren.

- Auf Millimeterpapier kann man versuchen, "per Hand" eine möglichst glatte Kurve durch die Messpunkte zu legen, die diese im Mittel gut beschreibt. Anhand dieser Kurve kann man dann recht gut untersuchen, nach wie viel Millimeter Absorberdicke nur noch jeweils die Hälfte der Zählrate gemessen wird. Diese Dicke ist die sogenannte Halbwertsdicke d_h .
- Einfacher geht es mit dem Diagrammassistenten von EXCEL, der es gestattet, eine exponentielle Trendlinie durch die Daten zu legen. Dazu klicken Sie im Diagramm mit der rechten Maustaste auf einen der Messpunkte und fügen eine Trendlinie vom Typ „Exponentiell“ hinzu. Unter dem Punkt „Trendlinie formatieren“ können Sie unter den Optionen die Formel mit anzeigen lassen und so den Schwächungskoeffizienten k von Blei direkt im Exponenten der angezeigten Exponentialfunktion ablesen.
- Da man theoretisch einen exponentiellen Verlauf erwartet, kann man die Interpolation der gemessenen Daten auch in halblogarithmischer Auftragungsart leicht durchführen. In dieser Auftragungsart müssen die Daten auf einer Geraden liegen, aus deren Steigung auf den Schwächungskoeffizienten k geschlossen werden kann.

V.5.c. Die Schwankungen bei einem Millimeter Schichtdicke

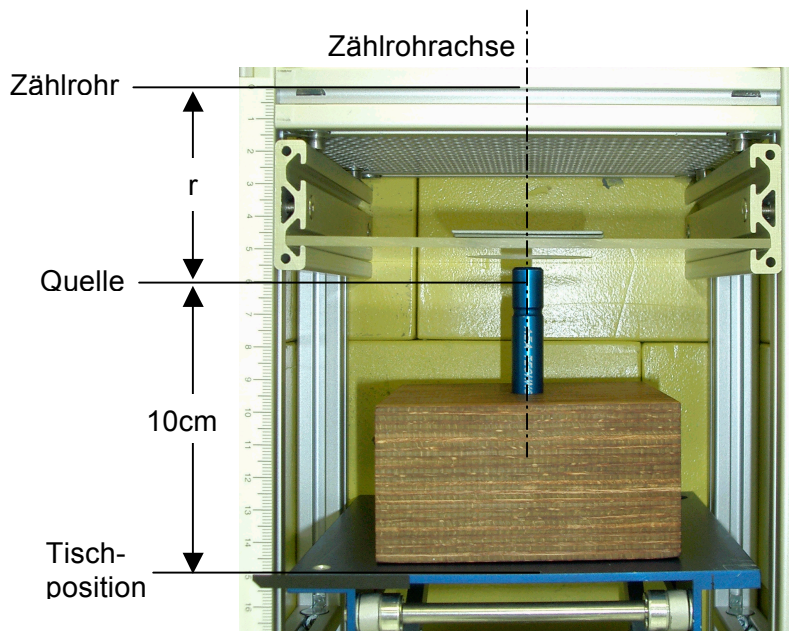
Wie bereits oben erwähnt, kann es bei einer Abschirmung der Quelle durch einem Millimeter Blei dazu kommen, dass sie eine höhere Zählrate messen, als ganz ohne Abschirmung. Dieses sehr merkwürdige Ergebnis, kann nicht nur mit „statistischen Schwankungen“ erklärt werden.

Es liegt viel mehr daran, dass die hochenergetischen Gammastrahlen, die auf die Bleiplatte treffen, in dieser Ionisationen, also die Herauslösung von Elektronen aus den Bleiatomen verursachen, und ihre gesamte Energie auf diese Elektronen übertragen (Photoeffekt)

Die Elektronen haben dann eine so hohe Energie, dass sie zum Teil die Bleiplatte verlassen und mit der „restlichen“ Gammastrahlung, die noch keine Ionisationen verursacht hat, in den Geiger – Müller - Zähler fallen. Deshalb scheint eine höhere Anzahl an Strahlungs-Teilchen registriert zu werden. Diese Strahlung besteht nun aber nicht mehr nur aus Gammastrahlung, sondern aus einer „Mischung“ aus Gammastrahlen und hochenergetischen Photoelektronen. Dieses Phänomen“ bezeichnet man als „Aufbaueffekt“ Das Problem ist, dass nicht alle Elektronen aus dem Blei austreten. Elektronen – selbst solche mit hoher Energie – werden in Blei sehr schnell absorbiert, können also nur eine kurze Strecke zurücklegen. Schon bei einem Millimeter Blei tritt der oben erwähnte Effekt deshalb nicht in voller Deutlichkeit auf und wird manchmal von den ohnehin immer vorhandenen statistischen Schwankungen überdeckt. Bei mehr als zwei Millimeter Blei tritt der Effekt dann aus demselben Grund gar nicht mehr in Erscheinung.

V.6. Überprüfung des Abstandsgesetzes

Mit der γ -Strahlung der Co-60-Quelle soll nun das quadratische Abstandsgesetz überprüft werden.

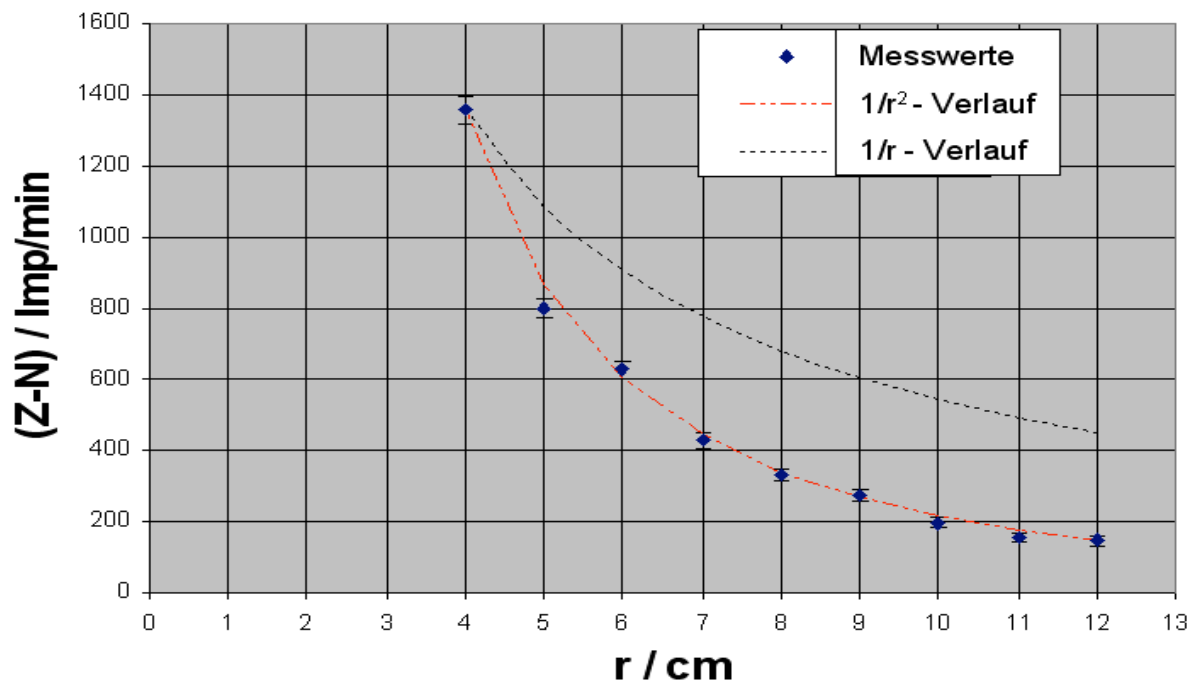


- ☞ Stellen Sie die Quelle wieder wie in V.5. in den Quellenhalter und achten Sie darauf, dass der Quellenhalter möglichst genau in der Zählrohrachse steht. Entfernen Sie alle Absorber aus der Schublade und stellen Sie eine Messzeit von einer Minute ein.
- ☞ Stellen Sie den Tisch auf die Position $d=22\text{cm}$ ein. Beachten Sie, dass sich der wirkliche Quellenort 10cm oberhalb der Tischkante befindet (In der Abb. ist $d=15\text{cm}$). Der Nullpunkt der Skala befindet sich am mittleren Nachweisort für γ -Strahlen im Zählrohr. Der wirkliche Quellenabstand r ist dann: $r = 22\text{cm} - 10\text{cm} = 12\text{cm}$.
- ☞ Messen Sie nun die Zählrate als Funktion des jeweiligen Abstandes r der Quelle vom Zählrohr. Verringern Sie dazu r jeweils in 1-cm -Schritten und korrigieren Sie die Zählraten bezüglich der in V.4. gemessenen Nullraten. Führen Sie die Messungen wie im vorherigen Versuch 3 mal für jeden Abstand durch. Bestimmen Sie den jeweiligen Mittelwert, ziehen Sie die Nullrate ab und bestimmen Sie die Standardabweichung.
- ☞ Stellen Sie Ihre Messwerte in einem Koordinatensystem grafisch dar. Tragen Sie auf der x-Achse die Quellenentfernung in cm, auf der y-Achse die um den Nulleffekt korrigierten Zählraten auf. Verwenden Sie dazu entweder Millimeterpapier oder den Diagrammassistenten von EXCEL. Tragen Sie wie im vorherigen Versuch nach Rücksprache mit dem Betreuer Fehlerbalken ein.
- ☞ Ergänzen Sie Ihre Grafik, indem Sie den theoretischen Zählratenverlauf für das quadratische Abstandsgesetz einzeichnen:

$$Z(r) = C * \frac{1}{r^2}$$

- ☞ Passen Sie dazu die theoretische Kurve mit Hilfe des Faktors C an den Messwert mit der **niedrigsten** Zählrate an. Prüfen Sie (wie in der nächsten Abbildung gezeigt) auch andere mögliche Abstandsgesetze (z.B. $1/r$ oder $1/r^3$).

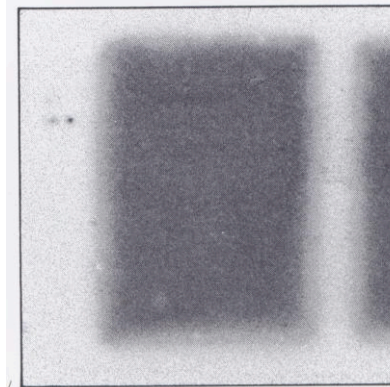
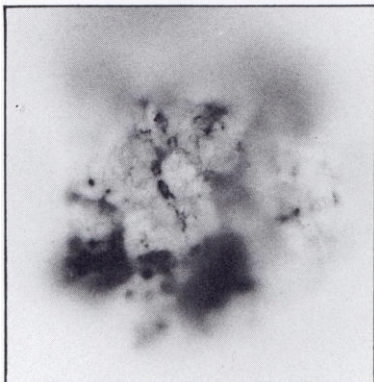
Abstandsmessung mit Co-Quelle



Hintergrundwissen

H.1. Radioaktivität und Strahlungsarten

Legt man ein Stück Steinkohle (linke Abbildung) oder ein Päckchen Pottasche (rechte Abbildung) längere Zeit auf einen lichtdicht verpackten fotografischen Film und entwickelt diesen anschließend, so ist er geschwärzt. Normalerweise schwärzen sich Filme nur an den Stellen, an denen sie von Licht, oder allgemein: „Strahlung“ getroffen werden. Auf diese Weise entdeckte Antoine-Henri Becquerel 1896, dass Verbindungen des Urans spontan, also ohne äußeren Einfluss, offenbar Strahlen aussenden, die aber für Menschen unsichtbar sind



Wie man am Beispiel der Pottasche sieht, kann man auch bei anderen Elementen diese Strahlen nachweisen.

Die Strahlen können unter anderem:

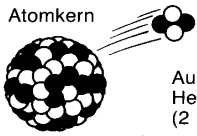
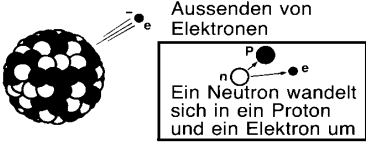
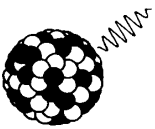
- Materie durchdringen
- Fotoplatten schwärzen
- Fluoreszenz (Leuchterscheinungen) hervorrufen
- Gase ionisieren, d.h. Elektronen aus Gasmolekülen – oder Atomen heraus schlagen, die dadurch zu (positiven) Ionen werden. Die Gase werden dadurch elektrisch leitend.

Wegen der zuletzt erwähnten Eigenschaft spricht man oft auch von ionisierender Strahlung. Die Atomkerne dieser Elemente – man nennt sie Radionuklide - sind nicht stabil. Sie zerfallen, um in einen stabileren Zustand überzugehen, d.h. sie wandeln sich ohne äußere

Einwirkung in Kerne anderer, oft wiederum radioaktiver Nuklide um. Erst am Ende einer solchen Zerfallsreihe steht dann ein stabiles Element.

Dabei wird Energie in Form von Teilchen (α - oder β -Strahlung) oder elektromagnetischen Wellen (γ -Strahlung) abgegeben. Diese Eigenschaft heißt Radioaktivität.

Eine Übersicht über die Herkunft und die Eigenschaften dieser Strahlungsarten gibt die folgende Tabelle:

Strahlungsarten	typische Energie	Reichweite in Luft	Abschirmung	Beispiele
Alpha-(α-)Strahler  <p>Atomkern Aussenden von Heliumkernen (2 p + 2 n)</p>	5 MeV	4 cm	1 Blatt Papier	Radon 222 Radium 226 Plutonium-isotope
Beta-(β-)Strahler  <p>Aussenden von Elektronen Ein Neutron wandelt sich in ein Proton und ein Elektron um</p>	1 MeV	3 m	0,5 cm Plexiglas	Kalium 40 Cäsium 137 Strontium 90
Gamma-(γ-)Strahler  <p>Aussenden von elektromagnetischen Wellen (Quanten, Photonen) ähnlich der Röntgenstrahlung</p>	1 MeV	Abnahme mit dem Quadrat der Entfernung	10 cm Blei	nahezu alle Radionuklide

Alpha-(α -)Strahler

- α -Teilchen sind „nackte“ Heliumkerne, die mit Geschwindigkeiten um 15 000 km/s aus dem Atomkern austreten. Das entspricht etwa 5% der Lichtgeschwindigkeit. (Die typischen kinetischen Energien liegen zwischen 4 und 6 MeV).
- Wegen ihrer (im Vergleich zu anderen radioaktiven Teilchen) großen Masse ($m_\alpha = 6,64 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$) weichen sie auf ihrem Weg durch Materie nur wenig von Ihrer Bahn ab (gleich einem LKW, der – einmal in Fahrt – auch nicht so leicht von seiner Fahrspur abzubringen ist). Außerdem ionisieren sie beim Durchgang durch Materie sehr viele Atome/Moleküle. Auf 1 cm Weglänge ionisiert ein α -Teilchen etwa 50000 bis 60000 Atome/Moleküle.
- In Papier ist die Reichweite der α -Teilchen noch viel kleiner. Sie bilden in dichter Materie je Millimeter Laufweg noch viel mehr Ionen als in Luft. Ihre Energie ist somit auf einer viel kürzeren Wegstrecke „aufgezehrt“. Die Abschirmung ist daher sehr einfach: ein Blatt Papier genügt.

Beta-(β -)Strahler

- Ein β -Teilchen ist ein Elektron, das mit Geschwindigkeiten zwischen nahezu Null und fast Lichtgeschwindigkeit aus dem Atomkern austritt. Es gibt auch Nuklide, die das „Antiteilchen“ eines Elektrons, das sogenannte „Positron“ aussenden. Zur

Unterscheidung benutzt man meist die Bezeichnungsweise β^- (für Elektronen-) und β^+ (für Positronenstrahlung).

- β -strahlende Radionuklide emittieren meistens zusätzlich noch γ -Strahlen.
- Das Ionisierungsvermögen von β -Teilchen in Luft ist gering (nur etwa 50 Ionenpaare je cm Weglänge), dementsprechend größer ist die Reichweite in Luft, die bis zu einigen Metern betragen kann.
- Zur Abschirmung sind einige Millimeter Plexiglas ausreichend.
- β -Teilchen weisen, im Unterschied zu α - und γ -Strahlen, ein kontinuierliches Energiespektrum auf. Das heißt, die Atome eines β -strahlenden Elements geben Elektronen/Positronen unterschiedlichster Energien ab, während bei α - oder γ -Strahlung alle Teilchen mit derselben Energie (oder wenigstens nur einzelnen wenigen verschiedenen Energien) abgegeben werden. Zur Charakterisierung eines β -Strahlers wird die häufigste und höchste β -Energie angegeben.

Gamma-(γ -)Strahler

- γ -Strahlung ist hochenergetische, kurzwellige elektromagnetische Strahlung. Diese hat die gleiche Natur wie das sichtbare Licht und ist nur energiereicher als dieses. Auch wenn es sich um einen Wellenvorgang handelt, wird die **Energie** der Gammastrahlung – wie auch die des sichtbaren Lichts – in einzelnen „Portionen“ (**Quanten, Photonen**) abgegeben. Jede Portion (jedes Photon/Quant), das von der Welle auf Materie übertragen wird, fehlt der Welle danach. Man sagt die Strahlung wird dadurch weniger intensiv. γ -Strahlung bewegt sich als elektromagnetische Wellenstrahlung mit Lichtgeschwindigkeit (ca. 300.000 km/s).
- γ -Strahlung tritt stets gekoppelt mit einer anderen Zerfallsart auf.
- Das Ionisierungsvermögen ist sehr gering, d.h. es werden beim Durchgang durch Materie nur wenige Energieportionen aus der Welle abgegeben und es werden dementsprechend verhältnismäßig wenige Schäden verursacht. Dadurch kommt die Strahlung aber auch sehr weit ohne viel Intensität zu verlieren (s. unten, Punkt 5.)
- Jedes γ -strahlende Radionuklid emittiert ein charakteristisches γ -Spektrum, d.h. γ -Quanten mit ganz bestimmten Energien. Auf diese Weise ist jedes Nuklid eindeutig identifizierbar.
- Beim Durchgang durch Materie tritt – im Gegensatz zu α - und β -Teilchen keine Abbremsung sondern nur eine Schwächung der γ -Strahlung auf (sie wird weniger intensiv, s. Punkt 3.). Zur Abschwächung einer 1-MeV- γ -Strahlung auf 1% der ursprünglichen Intensität sind 10 cm Blei oder 1,5 m Wasser erforderlich.

H.2. Natürliche radioaktive Strahlung

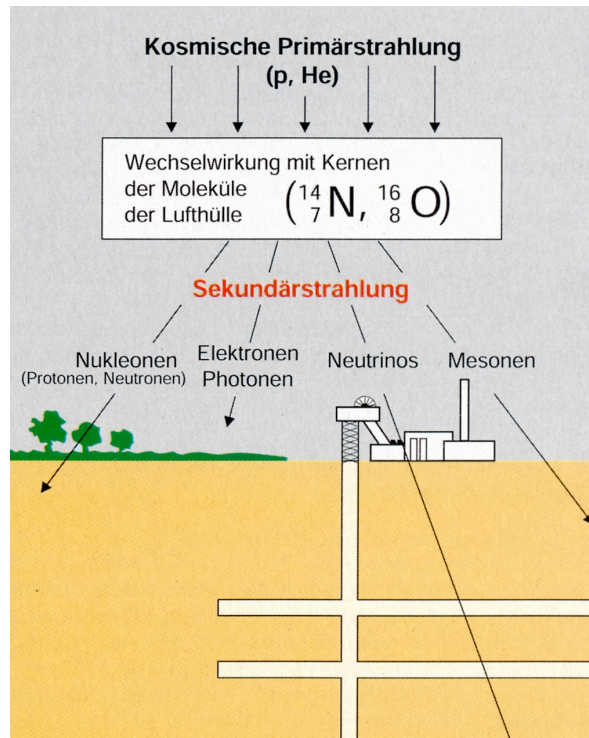
Die natürliche ionisierende Strahlung lässt sich auf verschiedene Quellen zurückführen:

- Aus dem Weltall trifft eine Teilchenstrahlung und energiereiche Gammastrahlung auf die Erde (kosmische Strahlung).
- In der Erdatmosphäre werden durch die kosmische Strahlung ständig Radionuklide mit relativ kurzer Halbwertszeit neu gebildet (kosmogene Radionuklide).
- In der Erdmaterie sind natürliche Radionuklide mit langer Halbwertszeit vorhanden, die sich durch einen oder mehrere radioaktive Zerfallsschritte in inaktive Nuklide umwandeln.

Kosmische Strahlung und die Erzeugung neuer Radionuklide

Von der Sonne und anderen Sternen trifft eine energiereiche Teilchenstrahlung auf die Lufthülle unserer Erde. Diese Strahlung besteht im Wesentlichen aus Protonen, also aus

Wasserstoffkernen. Die Energie dieser kosmischer Protonen kann mehr als 10^{14} MeV betragen. Beim Zusammenprall mit den Molekülen der Luft werden Atomkerne zertrümmert. Dabei entstehen neue Kerne und Teilchen, die weiterfliegen, und z.T. weitere Kerne zertrümmern, bis ihre ursprüngliche Energie aufgebraucht ist. Am Erdboden ist nur die Strahlung zu beobachten, die durch vielfältige Sekundärprozesse entsteht. Sie besteht im Wesentlichen aus Protonen, Neutronen, Elektronen, Positronen, γ -Quanten, Neutrinos und Mesonen



In den oberen Schichten der Atmosphäre werden durch die kosmische Strahlung ständig radioaktive Isotope neu gebildet. Dies sind u.a. der radioaktive Wasserstoff (H-3, „Tritium“) und der radioaktive Kohlenstoff (C-14) sowie die Isotope Be-7 und Na-22.

Terrestrische Strahlung

Die terrestrische Strahlung wird durch die in der Umgebung des Menschen vorhandenen natürlichen Radionuklide hervorgerufen. Dabei handelt es sich vor allem um radioaktive Nuklide, deren Halbwertszeiten größer als 1 Milliarde Jahre sind oder um Folgeprodukte mit kürzeren Halbwertszeiten. Die wichtigsten Radionuklide, die in der Erde vorkommen, sind Thorium-232, Uran-238 und Uran-235. Sie zerfallen in mehreren Stufen zu inaktiven Bleisotopen.

Zerfallsreihe	Beginn	Ende
Thorium –Reihe	${}_{90}^{232}\text{Th}$	${}_{82}^{208}\text{Pb}$
Uran – Actinium – Reihe	${}_{92}^{235}\text{U}$	${}_{82}^{207}\text{Pb}$
Uran – Radium - Reihe	${}_{92}^{238}\text{U}$	${}_{82}^{206}\text{Pb}$

In den drei Zerfallsreihen durchlaufen die Radionuklide die Kernladungszahl 86. Es treten damit verschiedene Radon-Isotope auf. Radon ist ein Edelgas, das teilweise aus dem Erdboden und aus dem Mauerwerk von Gebäuden austritt und dann in der Luft weiter

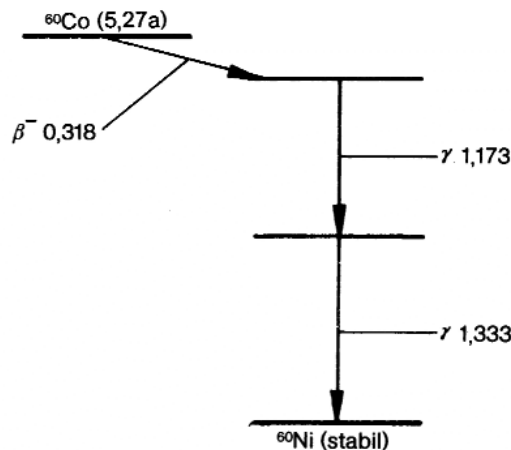
zerfällt. Radon und seine Folgeprodukte führen vor allem zu einer erhöhten Strahlenexposition der Lunge.

Das wichtigste Radionuklid ohne Zerfallsreihe ist Kalium-40, das sich zu 0,0117% in jeder Kaliumverbindung befindet. Da K-40 mit dem angegebenen Anteil in jeder Kaliumverbindung vertreten ist, sind auch alle Kaliumverbindungen radioaktiv. Auch der menschliche Körper enthält Kalium. Beim erwachsenen Menschen beträgt der Kaliumanteil etwa 2 g pro Kilogramm Körpergewicht; das entspricht beim Standardmenschen einer Kalium-40-Aktivität im Gesamtkörper von 4200 Zerfällen, die pro Sekunde(!) stattfinden. (Die fachliche Bezeichnung für „Zerfälle/Sekunde“ heißt Becquerel, abgekürzt Bq)

H.3. Die Kobalt-60-Quelle

Der im Experiment verwendete Strahlerstift mit der Kobalt-60-Quelle ist 85 mm lang und hat einen Durchmesser von 12mm. Die Quelle ist in den Aluminiumhalter eingeklebt, mit Epoxidharz vergossen und mit einer 0,1 mm dicken Edelstahlfolie abgedeckt. Sie sitzt 7mm von der Vorderkante des Halters entfernt.

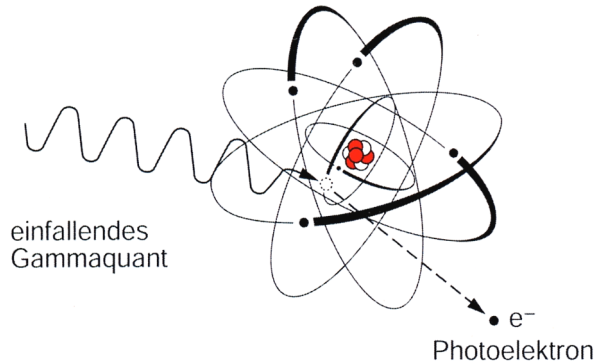
Die Aktivität beträgt 74 kBq, d.h. in der Quelle zerfallen in 1 Sekunde 74 000 Atomkerne des Isotops ^{60}Co . Diese gehen durch β -Zerfall in einen angeregten Zustand des Nuklids ^{60}Ni über, der diese Anregungsenergie durch Emission von γ -Quanten mit den Energien 1,173MeV und 1,333 MeV abgibt. Der Vorgang ist vergleichbar mit einem „angeregten“ Atom, in dem sich ein Elektron in einer höheren „Bahn“ (einem höheren Energieniveau) befindet, als es eigentlich möglich wäre. Das Elektron „fällt“ dann auf eine niedrigere „Bahn“ (niedrigeres Energieniveau) zurück. Dabei wird Strahlung (oft sichtbares Licht oder UV) abgegeben. Im Kern fallen die Nukleonen (Protonen /Neutronen), nachdem durch den vorherigen β - Zerfall die Energieniveaus im Kern „durcheinandergebracht“ wurden, auf ein niedrigeres Energieniveau zurück. Die Strahlung, die dabei frei wird, hat viel höhere Energien als die Strahlung beim Sprung von Elektronen, es ist eben γ -Strahlung. Die meisten (99,9%) der emittierten β -Teilchen haben sehr geringe Energien und werden im Experiment nicht nachgewiesen.



	HWZ	β -Energie	Übergangswahrscheinlichkeit	γ -Energie emittiert		konvertiert
		[MeV]		%	[MeV]	
^{60}Co	5,27a	0,318	99,9	1,173	99,86	0,02
		1,491	0,1	1,333	99,98	0,01

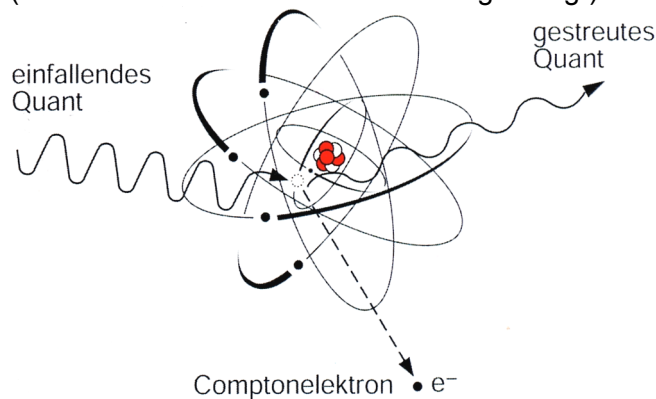
H.4. Die Ionisationswirkung von γ -Strahlung.

Die Ionisationswirkung der Strahlungsarten ist unterschiedlich. Die elektrisch geladenen α - und β - Teilchen werden, z.B. in einem Gas oder einem Festkörper, durch viele Stöße mit dortigen Atomen abgebremst, wobei sie sehr viele dieser Atome ionisieren. Sie hinterlassen so eine Spur von Elektron-Ionen-Paaren, die z.B. in der Nebelkammer als eindrucksvolle Bahnspur sichtbar gemacht werden können.



Bei der Wechselwirkung von γ -Strahlen (man spricht auch oft von γ -Quanten) mit der Materie treten verschiedene Prozesse auf, die alle zur Freisetzung von Elektronen führen:

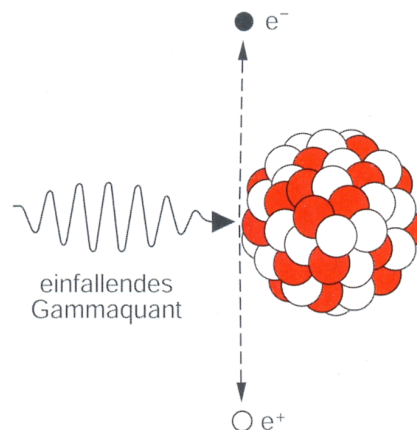
Beim **Photoeffekt** wird die gesamte Energie des einfallenden γ -Quants vom Atom absorbiert und auf ein in der Hülle des Atoms gebundenes Elektron übertragen. Das Elektron erhält dadurch soviel Energie, dass es die Anziehung des positiven Atomkerns überwinden kann und aus der Atomhülle geschleudert wird (Ionisierung). Es entsteht also ein freies Elektron (das sich sehr schnell vom Atom wegbewegt) und ein zurückbleibendes Ion.



Beim **Comptoneffekt** wird, ähnlich wie beim Photoeffekt, ein Elektron aus der Atomhülle freigesetzt. Es wird hierbei jedoch nicht die gesamte Energie des einfallenden γ -Quants an das Elektron übertragen und somit absorbiert, sondern nur ein Teil davon. Der andere Teil verbleibt in einem energieärmeren gestreuten γ -Quant.

Die **Paarbildung** führt zur Erzeugung eines Elektron-Positron-Paares. Das einfallende γ -Quant wird im Feld des Atomkerns in ein Teilchenpaar umgewandelt (gemäß der Einsteinschen Äquivalenz von Energie und Masse). Das Positron wird in einer anschließenden Paarvernichtung (beim Zusammentreffen mit einem Elektron) wieder in Strahlung umgewandelt.

Bei allen beschriebenen Wechselwirkungen entstehen also sekundäre Elektronen, die man nachweisen kann.



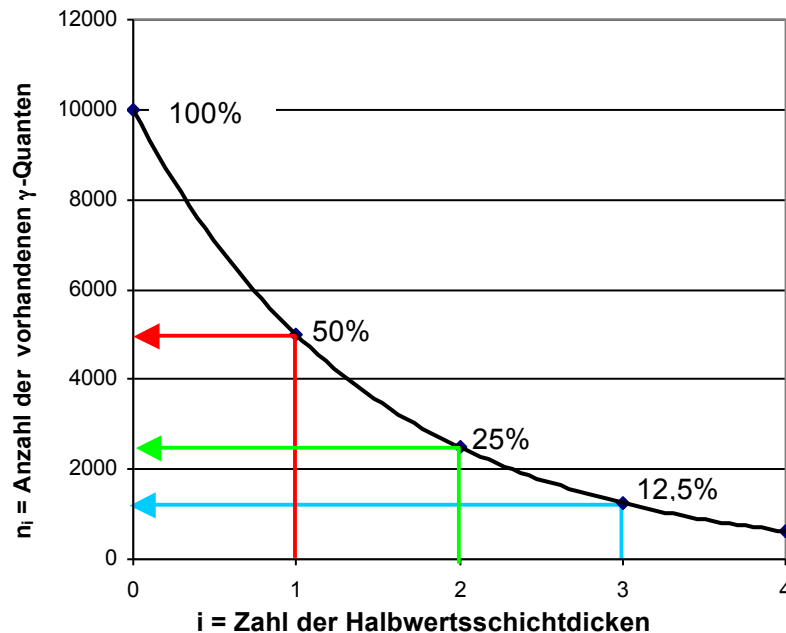
H.5. Schwächung von γ -Strahlen

Die Abschirmung von γ -Strahlen ist wegen ihrer Wechselwirkungsmechanismen mit Materie im Vergleich zu α - und β - Teilchen verhältnismäßig schwierig. Schickt man einen Strahl von n_0 (z.B. $n_0 = 100$) γ -Quanten mit der gleichen Energie („monoenergetisch“) durch Materie (z.B. Aluminium), so wird deren Zahl $n(x)$ in Abhängigkeit von der Eindringtiefe x immer kleiner, da ja diejenigen Quanten, die eine Wechselwirkung erfahren, aus dem Strahl ausscheiden. Wie oben beschrieben, verliert der Strahl dadurch an Intensität. Das heißt jedoch **nicht(!)**, dass die Quanten, die noch im Strahl sind, dadurch weniger Energie haben. Jedes einzelne Quant hat dieselbe Energie wie zu Beginn, nur gibt es insgesamt weniger Quanten als am Anfang im Strahl. Nach einer für das Material charakteristischen Schichtdicke d_h (sog. „Halbwertsdicke“, für Aluminium z.B. 5,2cm) sind dann (im Mittel!) nur noch die Hälfte der ursprünglich eingestrahlenen γ -Quanten vorhanden.

Absorbermaterial	Halbwertsdicke in cm
Blei	1,2
Eisen	1,7
Aluminium	5,2
Beton	ca. 5
Wasser	12

Die Tabelle und der zugehörige Graph verdeutlichen diesen einfachen Zusammenhang:

Ursprüngliche Anzahl	nach d_h noch vorhanden	nach $2d_h$ noch vorhanden	nach $3d_h$ noch vorhanden	nach $4d_h$...	usw.
n_0	n_1	n_2	n_3	n_4	usw.
10000	5000	2500	1250	625	usw.
100%	50%	25%	12,5%	6,25%	usw.



Mathematisch lässt sich dies mit einer einfachen Exponentialfunktion beschreiben:

$$n_i = n_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^i \quad \text{oder, was das gleiche ist:} \quad n_i = n_0 \cdot 2^{-i}$$

Wenn man die Halbwertsschichtdicke d_h (z.B. 5,2 cm für Aluminium) kennt, dann kann man für i auch schreiben: $i=x/d_h$ und kann dann für jede beliebige Schichtdicke x (ebenfalls in cm) die Zahl der noch vorhandenen γ -Quanten berechnen:

$$n(x) = n_0 \cdot 2^{-\frac{x}{d_h}}$$

Man kann diese Exponentialfunktion – wie überhaupt jede Exponentialfunktion – auch mit jeder anderen positiven Zahl (außer 1) als Basis darstellen. In den Naturwissenschaften ist es weitgehend üblich, als Basis die Eulersche Zahl $e = 2,71828\dots$ zu wählen, mit der sich schließlich folgendes Absorptionsgesetz für γ -Strahlen ergibt:

$$n(x) = n_0 \cdot e^{-kx}$$

Statt der Halbwertsschichtdicke d_h tritt hier der sog. **Schwächungskoeffizient k** auf. Der Zusammenhang zwischen k und d_h ergibt sich durch Logarithmieren des Absorptionsgesetzes bei der Schichtdicke $x = d_h$ und ein paar elementare Umformungen:

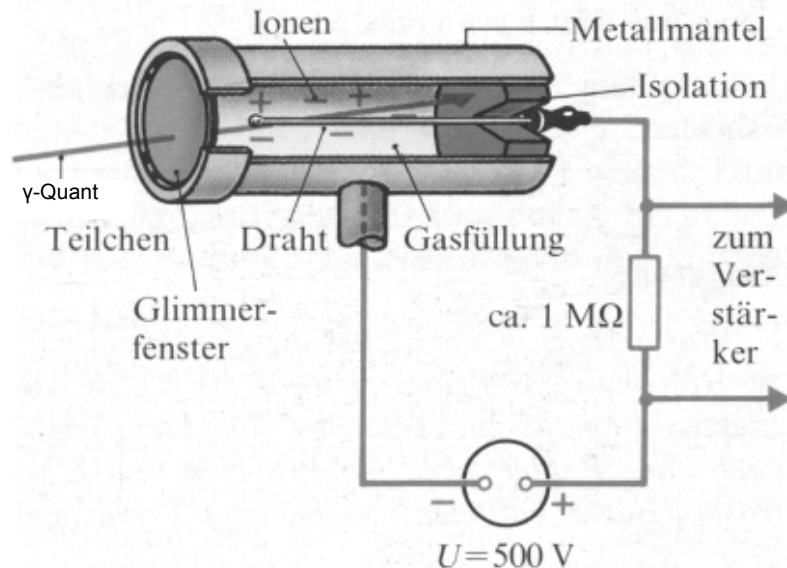
$$\frac{n_0}{2} = n_0 \cdot e^{-k \cdot d_h} \quad | \ln()$$

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -k \cdot d_h \Rightarrow \ln(2) = k \cdot d_h \approx 0,693$$

H.6. Das Geiger- Müller-Zählrohr

Ein häufig verwendetes Nachweisgerät für radioaktive Strahlung ist das Geiger-Müller-Zählrohr. Es wurde im Jahr 1928 vom deutschen Physiker Hans Geiger und seinem damaligen Doktoranden Walter Müller entwickelt und registriert einfallende einzelne schnelle α - und β -Teilchen sowie γ -Quanten.

Im Zählrohr ist ein Draht gegen das Gehäuse isoliert gehalten. Er wird über einen Widerstand mit dem positiven Pol einer Spannungsquelle (300 bis 500 V) verbunden. Der negative Pol der Quelle liegt am Metallgehäuse. Im Rohr befindet sich ein Edelgas (meist Argon) unter einem Druck von etwa 40 mbar.



Gelangt nun ein γ -Quant in den Innenraum des Zählrohrs, so wird es aus der Oberfläche des Metallmantels mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit (durch Photo- oder

Comptoneffekt bzw. Paarerzeugung) ein energiereiches Elektron freisetzen, das nun weitere Gasatome ionisieren kann. Die Anzahl der aus den Hüllen der durchflogenen Gasatome freigesetzten Elektronen ist dabei noch nicht ausreichend, um sie als Stromstoß einfach registrieren zu können.

Man wählt deshalb die Spannung U so hoch, dass die freigesetzten Elektronen zum positiv geladenen Draht (Anode) stark beschleunigt werden. Bevor sie dort ankommen, erhalten sie

so viel Energie, dass sie durch Stoß weitere Ionen und Elektronen freisetzen, die ihrerseits wieder ionisieren können. So steigert sich unterwegs die Zahl der ionisierten Teilchen und der Elektronen wie in einer Kettenreaktion lawinenartig. Das Gas im Zählrohr wird wie bei einer Glimmlampe leitend. Da die Elektronen wegen ihrer geringeren Masse wesentlich beweglicher sind als die Ionen, wandern sie schneller zum Draht (der als „Anode“ fungiert) als die Ionen zum Metallmantel (Kathode).

Am Ende fließt eine Elektronenlawine aus etwa einer Milliarde Elektronen auf den Anodendraht und über den Widerstand R.

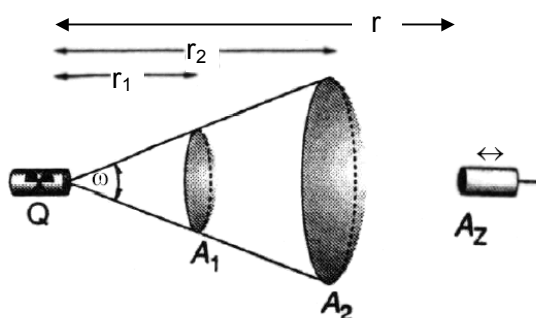
Dabei tritt an R kurzzeitig die Teilspannung $I \cdot R$ auf; die Teilspannung $U_z = U - I \cdot R$ am Zählrohr sinkt deshalb so weit ab, dass dort die Kettenreaktion abbricht und das Gas wieder ein Isolator wird. Das Zählrohr ist dann für das nächste Teilchen bereit. So erzeugt jedes einzelne im Zählrohr ankommende Teilchen einen **Stromstoß** durch den Widerstand R.

Die an R kurzzeitig auftretende Spannung (**Spannungsimpuls**) wird über einen Verstärker einem elektronischen Zählwerk und einem Lautsprecher zugeführt. Im Lautsprecher macht sich der Zählvorgang als knackendes Geräusch bemerkbar. Natürlich „hört“ man nicht die einzelnen Teilchen, sondern die von ihnen im Zählrohr hervorgerufenen und dann verstärkten Spannungsimpulse. Die Zahl dieser Impulse in einer bestimmten Zeit, z. B. einer Sekunde, nennt man **Zählrate Z**.

Nach jeder Entladung bleibt das Zählrohr gegen neu eintretende Strahlung für eine gewisse Zeit unempfindlich. Dafür verantwortlich sind die positiven Argon-Ionen, die sich wegen ihrer größeren Masse viel langsamer im elektrischen Feld bewegen als die Elektronen. Somit bildet sich nach einer Entladung eine positive Raumladungszone rund um den Draht. Dadurch wird die Feldstärke verringert. Erst wenn die positiven Ionen zur Kathode abgewandert sind, können weitere Teilchen registriert werden. Diese Abwanderungszeit nennt man **Totzeit**. Sie liegt in der Größenordnung von 10^{-4} Sekunden. Wegen der Totzeit kann insbesondere bei hohen Zählraten nur ein Bruchteil der Zerfälle registriert werden. Bei den im Praktikum verwendeten Zählrohr bleiben die Totzeitverluste unter 1%, sofern die Zählraten etwa 6000 Entladungen pro Minute nicht übersteigen.

H.7. Das Abstandsgesetz

Die Strahlenbelastung verringert sich bei zunehmender Entfernung. Wenn z.B. von einer punktförmigen Strahlungsquelle Q eine bestimmte Anzahl von γ -Quanten durch die Fläche A_1 im Abstand R_1 hindurchtreten, dann verteilen sich diese beim doppelten Abstand $R_2=2R_1$ auf die vierfache Fläche A_2 . Ein Zählrohr mit der Nachweisfläche A_z würde daher in R_2 nur noch $\frac{1}{4}$ der Zählrate von R_1 registrieren. Bezeichnet man die Anzahl aller von der Quelle emittierten Teilchen pro Sekunde als deren **Aktivität Q**, dann kann man die **Zählrate $Z(A_z, r)$** in einem Detektor mit der Nachweisfläche A_z im Abstand r von der Quelle berechnen:



$$Z(A_z, r) = Q \cdot \frac{A_z}{4\pi} \cdot \frac{1}{r^2}$$

Wegen der 2er-Potenz von r im Nenner spricht man auch von einem quadratischen Abstandsgesetz, wie es z.B. auch für das Licht gilt.

Bei nicht punktförmigen Quellen (z.B. flächenförmig) gelten etwas kompliziertere Zusammenhänge. Befindet man sich jedoch weit genug weg von der Quelle („Faustregel“:

mindestens zehnmal weiter weg als der Durchmesser der Quelle), so lässt sich das quadratische Abnahmegesetz wieder näherungsweise anwenden.

Befindet sich die Quelle nicht im leeren Raum, sondern z.B. in Luft oder in sonstiger Materie, muss man die durch die Materie bewirkte Absorption berücksichtigen. In Luft als häufigster Umgebung wirkt sich das in einer kleinen Erhöhung des quadratischen Exponenten von r aus.

H.8. Strahlenschutz

Folgende drei Grundregeln des Strahlenschutzes sollen die Strahlenbelastung so gering wie möglich halten:

- **Abstand halten!** Gemäß dem quadratischen Abstandsgesetz nimmt die Strahlung mit dem Quadrat des Abstandes ab.
- **Strahlung abschirmen!** Je dicker und dichter die Abschirmung desto geringer die Belastung.
- **Möglichst schnell arbeiten!** Sich so kurz wie möglich der Strahlung aussetzen.

Neben diesen Grundregeln, die sich aus den vorgestellten physikalischen Gesetzen und selbstverständlichen Überlegungen ergeben, existiert eine Strahlenschutzverordnung (StrlSchV), die die gesetzlichen Grundlagen für den Umgang mit radioaktiven Stoffen regelt. Diese Verordnung ist im Internet unter <http://www.bfs.de/recht/index.htm> einsehbar.

H.9. Statistik

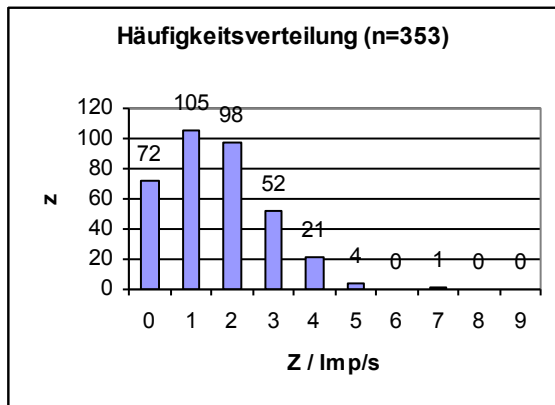
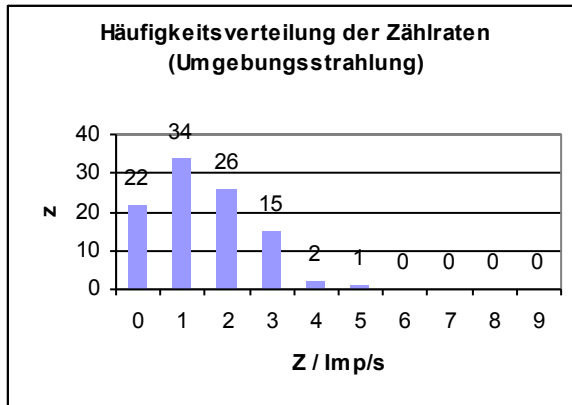
In diesem Experiment steht man vor der Aufgabe, die schwache radioaktive Strahlung z.B. aus Lebensmitteln mit einem Geiger-Müller-Zählrohr nachweisen, und sie gegen die natürliche Untergrundstrahlung (Nulleffekt) abzugrenzen.

Die Messreihe A wurde mit einem Zählrohr ohne Quelle aufgenommen und stellt die normale Umgebungsstrahlung im Labor dar. Bei der Messreihe B stand vor dem Zählrohr ein Becher mit Kakao-Pulver, von dem man annimmt, dass es auf Grund seines Anteils an K-40 schwach radioaktiv ist. Jeweils für $\Delta t = 1s$ wurden die Ereignisse im Zählrohr gezählt und aufgeschrieben.

Intervall Nr.:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	...
Messung A	0	3	0	1	1	1	3	2	3	2	0	2	2	1	1	0	4	3	2	2	0	1	3	...
Messung B	5	4	0	1	1	2	3	1	1	1	1	3	1	1	2	2	1	0	0	2	1	2	2	...

In den ersten 5 Sekunden sieht es tatsächlich so aus, als wäre das Kakaopulver radioaktiv, denn nur 5 Ereignissen bei Messung A stehen 11 Ereignisse in der Messung B gegenüber. Betrachtet man dagegen die Summe der Ereignisse in den ersten 20 Sekunden, so kommt man zunächst zu einem anderen Schluss: 33 Ereignisse in Messreihe A und nur 32 in Messreihe B.

Die Unregelmäßigkeit, mit der die Einzelereignisse auftreten, deutet auf die Unabhängigkeit der Elementarvorgänge hin, in denen die beobachtete Strahlung erzeugt wird. Zur genaueren Erfassung der Strahlung muss man daher eine große Zahl von Impulsraten betrachten und deren Mittelwert bestimmen.



Die Abbildungen zeigen die Häufigkeitsverteilung für die ersten 100 Messungen (links) und alle 353 Messungen der Messreihe A.

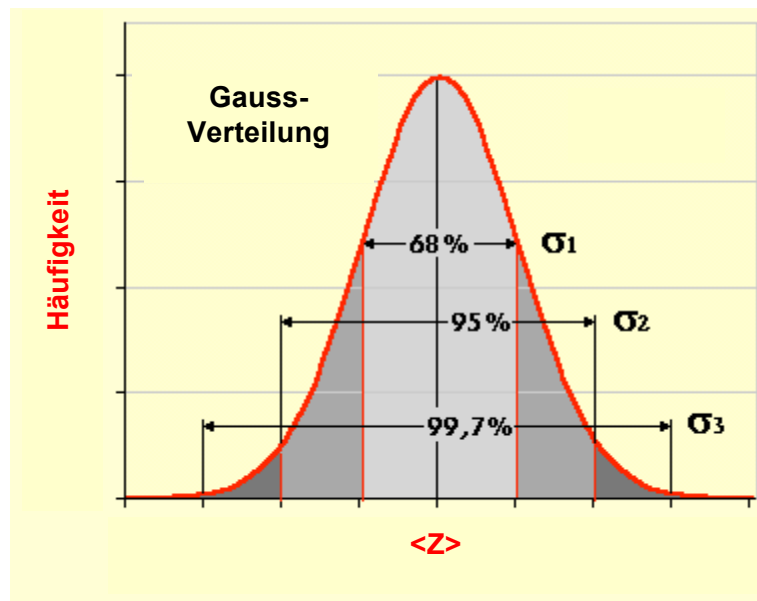
Man sieht, dass die Zählrate $Z = „1 \text{ Imp/s}“$ am häufigsten vorkommt, und man kann auch einen Mittelwert $\langle Z \rangle$ für Z angeben (arithmetisches Mittel) :

$$\langle Z \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i$$

$0 \leq i \leq n$ bezeichnet die Nummer des Intervalls, in dem die Zählrate Z_i festgestellt wurde, n ist die Gesamtzahl der berücksichtigten Messungen.

Aus der Messreihe A erhält man für $n=100$ den Mittelwert $\langle Z \rangle = 1,44$, für $N=353$ ergibt sich $\langle Z \rangle = 1,79$. Natürlich möchte man nun wissen, wie sehr diese gemessenen Mittelwerte noch von dem „wirklichen“ Wert der Zählrate abweichen. Dazu müssen die statistischen Untersuchungen ausgeweitet werden.

Im Beispiel ist die Wahrscheinlichkeit für das Messen eines Impulses im Messintervall nicht sehr groß. Die gemessene Häufigkeitsverteilung ist daher unsymmetrisch um ihren Mittelwert $\langle Z \rangle$. Man kann eine solche Häufigkeitsverteilung (bis etwa $\langle Z \rangle \leq 10$) mit einer sog. **Poisson-Verteilung** beschreiben. Mit wachsendem $\langle Z \rangle$ geht diese in die symmetrische **Normal- oder Gauss-Verteilung** über, deren Theorie einige Schlussfolgerungen bereithält, die für die Interpretation der Messwerte sehr hilfreich sind:



Der **Mittelwert $\langle Z \rangle$** ist wieder das arithmetische Mittel:

$$\langle Z \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i.$$

Die **Standardabweichung σ** (griech.: „Sigma“) berechnet man aus dem Mittelwert und den Einzelmessungen. Man nennt sie auch den **mittleren statistischen Fehler**:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Z_i - \langle Z \rangle)^2}$$

als grobe Näherungsformel kann gelten $\sigma = \frac{[Z_{\max} - Z_{\min}]}{3}$,

Das **Maximum** der Verteilung liegt dann bei $\langle Z \rangle$, die **Wendepunkte** liegen bei $\langle Z \rangle \pm \sigma$.

Im Intervall	$[\langle Z \rangle - \sigma, \langle Z \rangle + \sigma]$	liegen 68% aller Messwerte,
im Intervall	$[\langle Z \rangle - 2\sigma, \langle Z \rangle + 2\sigma]$	liegen 95% aller Messwerte
Im Intervall	$[\langle Z \rangle - 3\sigma, \langle Z \rangle + 3\sigma]$	liegen 99,7% aller Messwerte

Bei der Auswertung von Experimenten sind folgende Fehlerangaben üblich:

- Man berechnet den **Mittelwert $\langle Z \rangle$** und die **Standardabweichung σ** .
- Der **Mittelwert und sein Fehler** wird dann als $\langle Z \rangle \pm \sigma$ angegeben. Dies bedeutet, dass der gemessene Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% innerhalb der angegebenen Fehlergrenzen liegt (usw., s.o.)
- Man gibt $\frac{\sigma}{\langle Z \rangle}$ als **relativen Fehler** und $\frac{\sigma}{\langle Z \rangle} * 100\%$ als **prozentualen Fehler** an.
- Zur korrekten Angabe in Diagrammen ist dieser Fehler durch Fehlerbalken zu markieren.