

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung

## Station 3

Messung der Halbwertszeit von Radon  
mit der Ionisationskammer

## Inhalt

Inhalt.....	2
Messung der Halbwertszeit von Radon mit einer Ionisationskammer .....	3
V.1. Der Aufbau des Experimentierplatzes.....	3
V.2. Die elektrische Inbetriebnahme des Experiments .....	5
V.3. Inbetriebnahme des Radonkreislaufs und Durchführung der Messung .....	6
V.4. Auswertung der Messung mit EXCEL .....	8
V.5. Die Anpassung der Exponentialfunktion .....	10
V.6. Weitere Beispiele für die Auswertung mit EXCEL.....	12
Hintergrundwissen: .....	13
H.1. Radioaktivität .....	13
H.2. $\alpha$ - und $\beta$ -Zerfall.....	13
H.3. Zerfallsreihen .....	14
H.4. Halbwertszeit .....	16
H.6. Nachweis von Teilchenstrahlung in einer Ionisationskammer .....	17
H.7. Das Geiger-Müller-Zählrohr (optional) .....	17

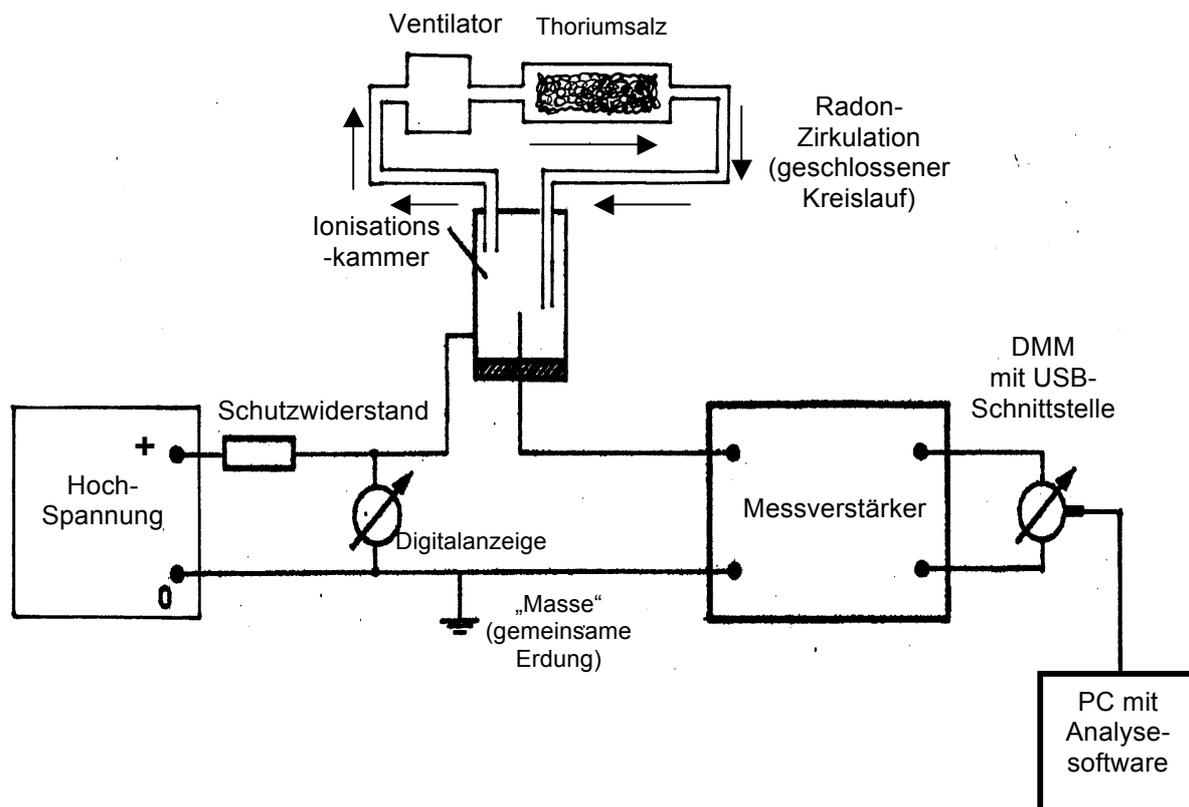
## Messung der Halbwertszeit von Radon mit einer Ionisationskammer

### Worum es geht:

Radon ist ein radioaktives Edelgas, das  $\alpha$ -Teilchen aussendet. In vorliegenden Experiment werden diese  $\alpha$ -Teilchen durch den **sehr schwachen elektrischen Strom** nachgewiesen, den sie in einer sog. „**Ionisationskammer**“ erzeugen. Das Strommessgerät ist an einen Computer angeschlossen und erlaubt die Aufzeichnung des Ionisationsstroms über einen längeren Zeitraum. Die **Datenauswertung mit EXCEL** liefert die **Halbwertszeit** der Strahlung von Radon.

### V.1. Der Aufbau des Experimentierplatzes

Die Abbildung zeigt den schematischen Aufbau des Praktikumsversuchs:

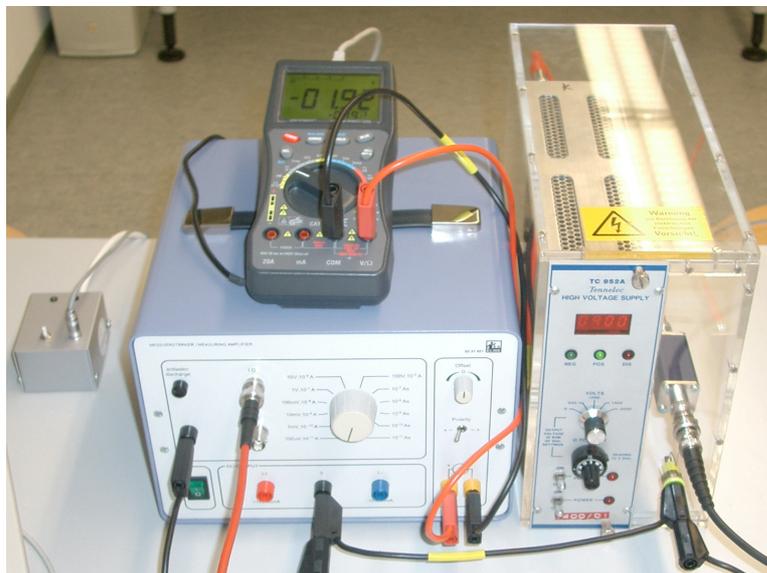


In einem Plexiglaszylinder befindet sich eine kleine Menge radioaktives Thoriumsalz ( $^{232}\text{Th}$ ), in dessen Zerfallsreihe das Edelgas  $^{220}\text{Rn}$  auftritt. Dieses reichert sich in dem Behälter an und kann mit Hilfe eines kleinen Ventilators leicht von dem Thoriumsalz abgetrennt und in die Ionisationskammer geblasen werden. Damit kein radioaktives Radon in die Umluft gelangen kann, ist dieser Kreislauf vollständig geschlossen aufgebaut.

In der Ionisationskammer soll nun der  $\alpha$ -Zerfall von Radon nachgewiesen und die Halbwertszeit bestimmt werden. Die Ionisationskammer ist dabei nichts anderes als ein luftgefüllter Metallzylinder (als Außenelektrode), in dessen Mittelachse ein Metallstift isoliert als Innenelektrode angebracht ist.

Die elektrische Verschaltung ist einfach. Der positive Pol des Hochspannungsnetzgerätes ist über einen Schutzwiderstand mit der Außenelektrode der Ionisationskammer verbunden. Die Innenelektrode ist über ein abgeschirmtes Kabel (rot) mit dem Messverstärker verbunden, der den gegen „Masse“ fließenden Strom verstärkt. An dem Digitalmultimeter (DMM), wird dann eine Spannung angezeigt, die diesem verstärkten Strom entspricht. Das Digitalmultimeter besitzt eine USB-Schnittstelle und ist mit dem Arbeitsplatz-PC verbunden. In dem Programm „DMM – Easy“ wird an diesem PC wiederum der Stromfluss graphisch dar gestellt.

Die folgende Abbildung zeigt noch einmal den gesamten elektronischen Aufbau des Experiments bis auf die Ionisationskammer selbst. Sie befindet sich außerhalb des rechten Bildrandes (Schauen Sie sich den realen Aufbau an und vergleichen Sie mit dem Bild). Das schwarze Kabel links am Messverstärker fehlt in ihrem Aufbau, es wird nicht benötigt.



Die Ionisationskammer befindet sich aus Sicherheitsgründen im Innern des Plexiglas-Kastens, da die Außenelektrode auf einem hohen positiven Potential liegt (typischerweise +900 V).



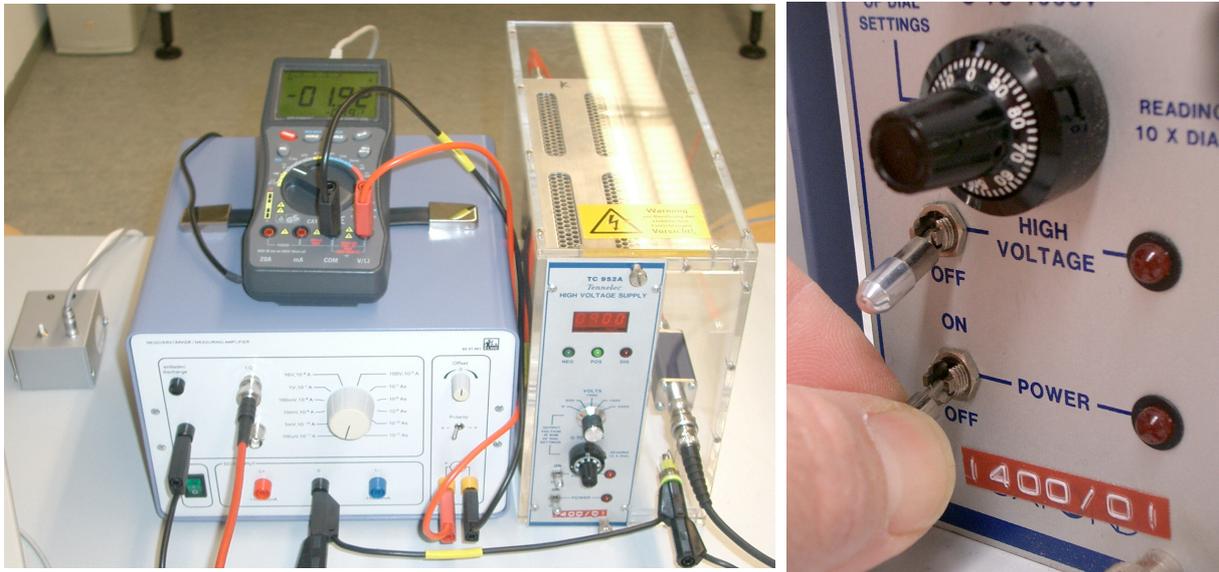
Im linken Bild sieht man (nach Entfernung der beiden oberen Bleiziegel) den Zylinder mit dem Thoriumsals und dem Ventilator im Vordergrund. Die von dem Thoriumsals ausgehende  $\gamma$ -Strahlung wird von den umgebenden 5 cm dicken Bleiziegeln hinreichend abgeschirmt.

Im Vordergrund sieht man den in einem Plexiglaswürfel gekapselten PC-Lüfter als Ventilator, der über eine separate Schaltbox gesteuert wird.

Wie in diesem Bild gezeigt, sind im Normalfall die beiden roten Ventile im Radon-Kreislauf geschlossen zu halten. **Die Hähne stehen im geschlossenen Zustand senkrecht zur Gasleitung.** Sie werden nur während der Messung geöffnet (s.u.).

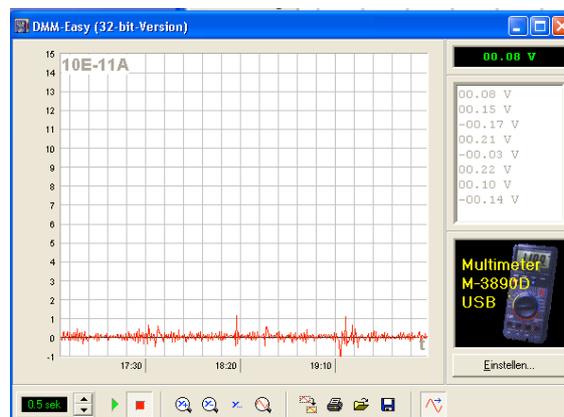
## V.2. Die elektrische Inbetriebnahme des Experiments

Die Abbildung zeigt noch einmal alle Geräte mit ihren im Experiment typischen Einstellungen. Rechts befindet sich das Hochspannungsnetzgerät, daneben steht der Messverstärker. An seinem Signalausgang ist das Handmultimeter angeschlossen (liegt im Bild auf dem Messverstärker), über das die Messwerte über ein USB-Kabel an den PC weitergeleitet werden. Links im Bild sieht man noch das Steuerkästchen für den Ventilator.



-  Vor dem Einschalten ist die Verkabelung nach der oben angegebenen Schaltskizze noch einmal sorgfältig zu prüfen. Prüfen Sie auch, ob die USB-Verbindung zum DMM gesteckt ist. **Auch hier entfällt das schwarze Kabel links am Messverstärker.**
  
-  **Achtung: Die Schalter des Hochspannungsgerätes dürfen nicht mit Gewalt betätigt werden! Sie sind mechanisch gegen versehentliches Verstellen geschützt und müssen zur Betätigung ein Stück nach vorne gezogen werden (siehe Bild oben).** Der HIGH-VOLTAGE-Schalter soll in der Stellung OFF sein, bevor Sie den POWER-Schalter auf ON stellen. Der obere Spannungswahlschalter soll in Stellung „0“-Volt verbleiben. Anschließend bringen Sie den HIGH-VOLTAGE-Schalter in die Position ON und regeln mit dem schwarzen Drehregler die Ausgangsspannung auf 900 V (Anzeige im Display).
  
-  Starten der „DMM-Easy“-Software am PC. Im Programm sollten folgende Einstellungen vorgenommen werden:
  - Zeitintervall: 0,5 sek
  - y... (y-Achsen-Dialog):
    - Bereich Min = -1; Max = +15
  - Beschriftung: „10<sup>-11</sup>A“ (lies: „10 hoch -11 Ampere“). Diese Angabe muss mit dem am Messverstärker gewählten Messbereich übereinstimmen)
  
-  Messverstärker einschalten und den empfindlichsten Strombereich (100 $\mu$ V, 10<sup>-11</sup>A) einstellen. Der Kippschalter „Polarity“ soll nach links („+ -“) zeigen.
  
-  Am noch ausgeschalteten Digitalmultimeter (DMM) den Messbereich V $\approx$  einschalten.

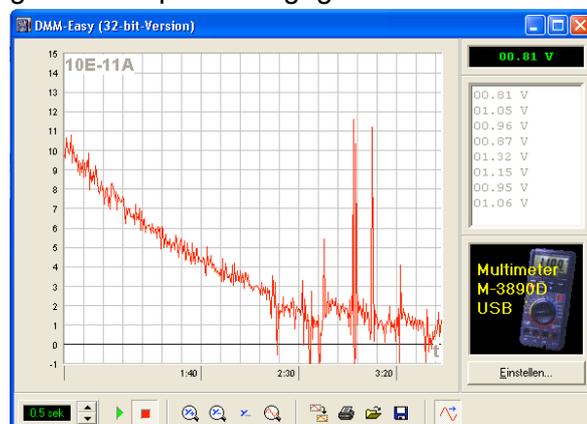
- ☞ Das Digitalmultimeter einschalten (roter Knopf) „Power on“
  - Anschließend die Taste Range mehrmals (normalerweise 3 mal) drücken, so dass das Display zwei Stellen vor dem Komma anzeigt („XX , XX“)
  - Im rechten Teil des DMM-Easy-Fensters sollten nun die mit dem Messverstärker gemessenen Werte kontinuierlich angezeigt werden.
  
- ☞ Die Taste „entladen“ am Messverstärker gedrückt halten und dabei mit dem „Offset“-Drehknopf auf Null abgleichen. Das DMM muss „00,00 V“ anzeigen.
  
- ☞ Nun sollte (nach loslassen des „Entladeknopfes“) das DMM Werte für das elektronische Rauschen kleiner als  $\pm 0,2$  V anzeigen. Mit dem grünen Pfeil im DMM-Easy-Fenster kann nun mit der Aufzeichnung der Messwerte begonnen werden. Wenn kein Einfluss von Influenzladungen vorhanden ist, ergibt sich ein zeitlich nahezu konstantes Rauschen von etwa 0,2 V:



### V.3. Inbetriebnahme des Rn-Kreislaufes und Durchführung der Messung

#### ☞ Wichtige Hinweise!

- Wegen der hohen Verstärkung des Messverstärkers – gewählt wird ja der empfindlichste Messbereich – ist die gesamte Anordnung sehr empfindlich gegenüber elektrischen Influenzladungen. Schon die Bewegung einer Hand in der Nähe der Ionisationskammer kann zu einem ungewünschten Störsignal führen. Während des Ablaufs der Messung sollten sich möglichst keine Personen in der Nähe der Ionisationskammer bewegen! Die Abbildung zeigt eine Messung, in deren erstem Teil sich der Experimentator ruhig verhalten hat. im zweiten Teil der gleichen Messung bewegte sich der Experimentator unruhig, was man sehr gut an den störenden elektrischen Signalen erkennen kann. Der zweite Teil dieser Messung ist daher nicht auswertbar!



- Es ist wichtig zu wissen, dass es stets eine gewisse Zeit braucht, bis sich um das Thoriumsalz herum eine ausreichende Menge Radon bildet. Auch sollte die Halbwertszeitmessung nicht zu oft durchgeführt werden, da mit jedem Einleiten von Radon-Gas auch die radioaktiven Folgeprodukte in die Kammer gelangen und diese verschmutzen. Eine Messung muss daher sorgfältig vorbereitet und durchgeführt werden und sollte nur im Ausnahmefall wiederholt werden.

 **Wichtiger Hinweis: Vor dem Start der Halbwertszeitmessung diesen Anweisungsteil erst ganz lesen!**

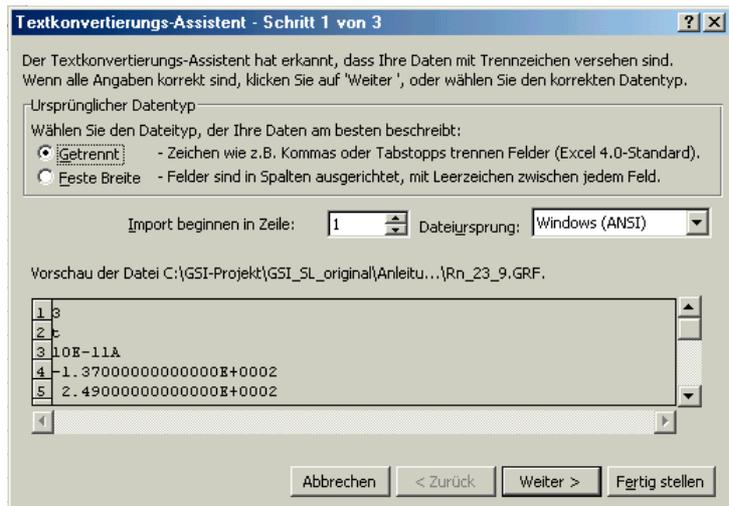
- Die beiden roten Ventile an der Quelle öffnen.
- Ventilator durch einmaliges Drücken der Taste am Steuerkästchen aktivieren (Zuvor prüfen, ob der Netzstecker eingesteckt und eingeschaltet ist – das Steuerkästchen hat keinen Hauptschalter; deshalb wird es an der Steckdose ein und ausschaltet!)
- DMM sorgfältig beobachten! Zunächst geschieht nichts, da ja die Luft in den Schläuchen als erstes bewegt wird, ohne dass sofort Radongas in die Kammer strömt.
- Nach 20-30 Sekunden nimmt der Ionisationsstrom in der Kammer rapide zu.
- **Beim Überschreiten von 8 Volt am DMM muss der Ventilator wieder abgeschaltet werden. Dazu wird die Taste am Steuergerät nochmals gedrückt, worauf die grüne LED erlischt und der Motor ausläuft und nach kurzer Zeit still steht. Durch die systembedingte Trägheit wird der Ionisationsstrom nach dem Abschalten des Ventilators meist noch bis über 10 Volt ansteigen.**
- **Warten Sie nun ab, bis die Spannungswerte am DMM unter 8 - 9 Volt sinken und starten Sie erst dann die DMM-Easy-Aufzeichnung durch Anklicken des grünen Pfeils. Das DMM-Easy-Programm zeigt Ihnen den Verlauf des Ionisationsstroms in der Kammer an.**
- Das Abklingen des Ionisationsstroms sollte über mindestens 7 –10 Minuten aufgezeichnet werden. Um die Messwerte nicht zu verfälschen, müssen während der Messzeit alle Bewegungen im Umkreis der Ionisationskammer vermieden werden!
- Nach Ablauf der Messzeit wird die Messaufzeichnung mit dem roten Button im DMM-Easy-Programm beendet.
- **Die roten Ventile werden geschlossen. Die Elektronik wird ausgeschaltet: zunächst der Messverstärker, dann die Hochspannungsversorgung. Bitte schalten Sie auch den Netzstecker der Ventilatorsteuerung wieder ab.**
- Speichern Sie die Messwerte unter einem aussagekräftigen Namen in Ihren Experiment-Ordner. Damit stehen die Daten auch für die Auswertung mit anderen Programmen (z.B. EXCEL) zur Verfügung (siehe nächster Abschnitt).
- Erzeugen Sie mit dem DMM-Easy-Programm einen Ausdruck und bestimmen Sie daraus grob die Halbwertszeit.

## V.4. Auswertung der Messung mit EXCEL

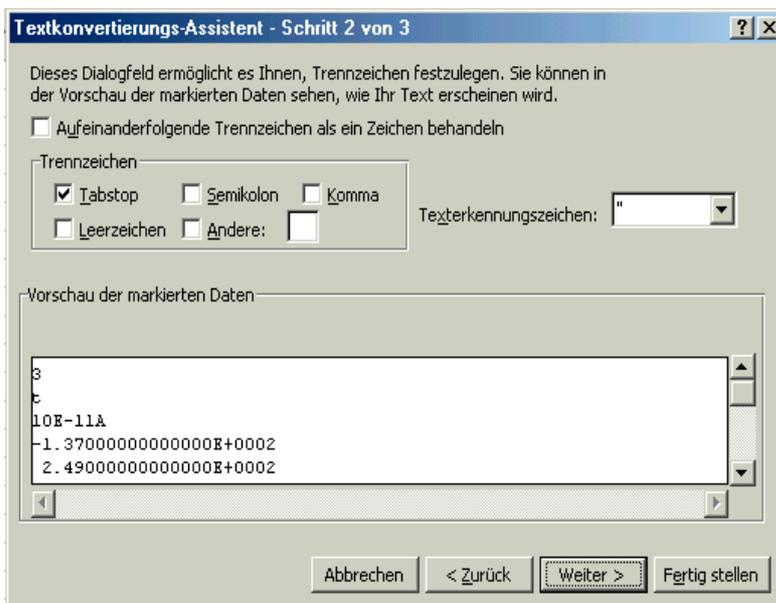
 **Wichtiger Hinweis! Bitte Prüfen Sie vor Dateneingaben in EXCEL immer, ob die Version, mit der Sie aktuell arbeiten, einen Dezimalpunkt oder ein Dezimalkomma erwartet!**

Im vorigen Abschnitt wurden die Messwerte von der DMM-Easy-Software als ASCII-File mit der Endung (Qualifier) „.GRF“ auf das Speichermedium geschrieben. Die genaue Analyse der Messwerte soll im Folgenden in EXCEL durchgeführt werden.

 Starten Sie das Programm EXCEL und öffnen Sie die Datei mit Ihren Messwerten. Damit EXCEL diese Datei findet, müssen Sie in dem „Öffnen“-Dialogfenster unter Dateityp den Eintrag „Alle Dateien“ auswählen. Dann sollten Sie Ihre Datei mit der Endung „.GRF“ finden und öffnen können. Beim Öffnen bemerkt das Programm, dass es sich nicht um eine EXCEL-Datei handelt und startet den nebenstehenden Textkonvertierungs-Assistenten.



 Ändern Sie nichts an den vorgeschlagenen Einstellungen in diesem und den folgenden Fenster („Schritt 2 von 3“, siehe unten). Klicken Sie jeweils auf „Weiter“ bzw. „Fertig stellen“. EXCEL importiert daraufhin die Datei in die Spalte A eines neuen Arbeitsblattes.



	A	B
1	3	
2	t	
3	10E-11A	
4	-1,37E+02	
5	2,49E+02	
6	-2,20E+00	
7	1,16E+01	
8	-1,00E+33	
9	1,00E+33	
10	-1,00E+20	
11	1,00E+20	
12		
13	0	
14	4	
15		
16	Kurve	
17	255	
18	250	
19	0,00E+00	
20	9,29E+00	
21	1,00E+00	
22	8,40E+00	

Header (rows 1-15)  
Daten (rows 16-22)

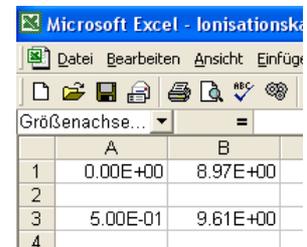
Wie man sieht, enthält die Spalte A des neuen EXCEL Arbeitsblattes zunächst einen sog. „Header“ mit Einstellungsdaten des Digitalmultimeters, die für das Folgende keine Bedeutung haben. Nach dem Schlüsselwort „Kurve“ folgen noch zwei Zahlen (digitale Auflösung, hier 255 und Anzahl der Messwerte, hier 250). Daran unmittelbar anschließend folgen alle aufgenommenen Messwerte hintereinander (man bezeichnet dies auch als „sequentiell“) in der Reihenfolge: Zeit – Stromstärke – Zeit – Stromstärke – Zeit ...

☞ Markieren Sie nun die gesamte Spalte A inklusive des Headers und der Messwerte und kopieren Sie sie mit der rechten Maustaste in die Zwischenablage.

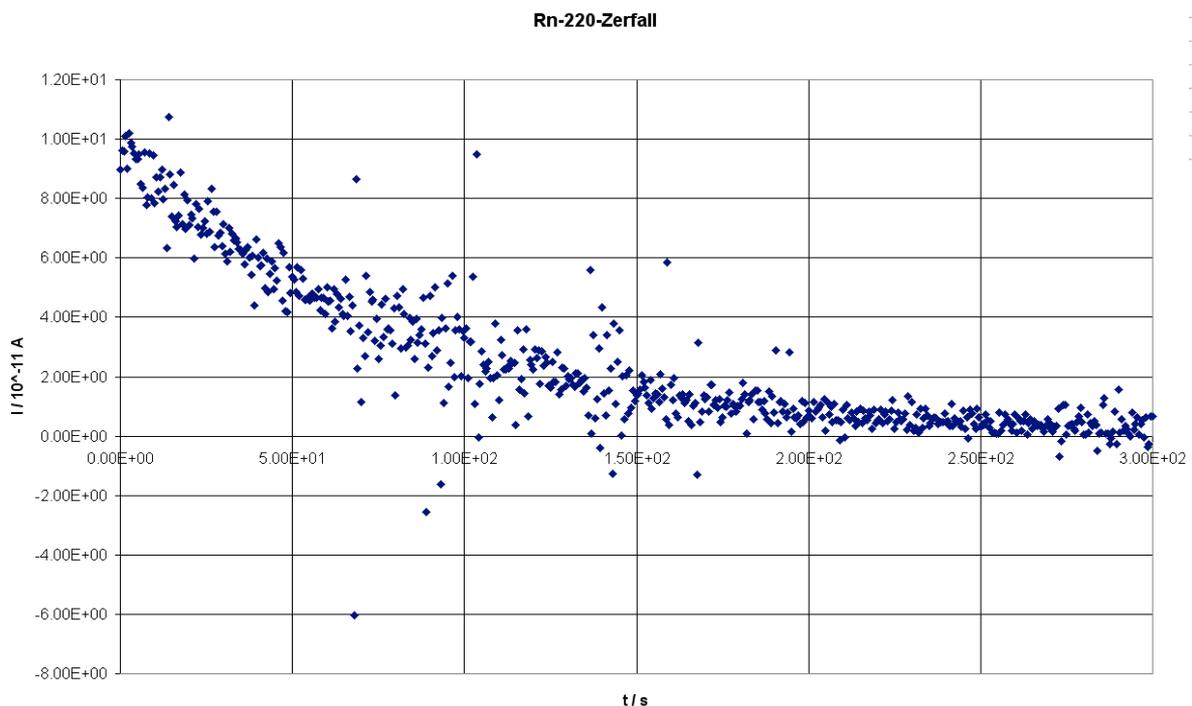
☞ Öffnen Sie nun zusätzlich noch die EXCEL-Arbeitsmappe „Ionisationskammer\_Fit“ (in Ihrem Experiment-Ordner) und wählen Sie dort das Blatt **Tabelle 1**. Es sollte völlig leer sein. Sollte dabei gefragt werden, ob sie Makros aktivieren oder deaktivieren sollen, wählen Sie „Makros aktivieren“.

Fügen Sie (wieder mit der rechten Maustaste) die Daten aus der Zwischenablage in die Spalte A der Tabelle 1 der Arbeitsmappe „Ionisationskammer\_Fit“

☞ Sehen Sie sich nun die **Tabelle 2** dieser Arbeitsmappe an! Hier wurden die sequentiellen Daten in zwei Spalten aufgeteilt (wie?). In Spalte A steht die Zeit in Sekunden, in Spalte B der entsprechende mit dem DMM gemessene Wert. In dem Blatt „Diagramm“ sind diese Daten graphisch dargestellt:



	A	B
1	0.00E+00	8.97E+00
2		
3	5.00E-01	9.61E+00
4		



☞ Drucken Sie das Diagramm (und nur das Diagramm – nicht die Datenreihen, die sind viel zu lang!) aus und versuchen Sie, „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 welcher Zeit nur noch jeweils die Hälfte der Stromstärke gemessen wurde. Diese Zeit ist die sogenannte Halbwertszeit  $t_{1/2}$ .

### V.5. Die Anpassung der Exponentialfunktion

Aus der Theorie des radioaktiven Zerfalls wissen wir (vgl. Hintergrundwissen), dass die Zahl  $A(t)$  der Rn-Zerfälle pro Aufnahme nach dem Zerfallsgesetz mit der Zeit  $t$  abnimmt:

$$A(t) = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{t_{1/2}}} \quad \text{bzw.} \quad A(t) = A_0 \cdot e^{-t\lambda}$$

$A_0$  ist hierbei die Anzahl der Rn-Zerfälle zum Zeitpunkt  $t = 0$ ,  $t_{1/2}$  ist die Halbwertszeit,  $e$  die Eulersche Zahl ( $e = 2,718281\dots$ ) und  $\lambda$  die mit der Halbwertszeit verknüpfte Zerfallskonstante.

In unserer Messung ist nun die Aktivität  $A(t)$  direkt proportional der Stromstärke in der Ionisationskammer, so dass für den zur Zeit  $t$  fließenden Strom  $I(t)$  die Gesetzmäßigkeit:

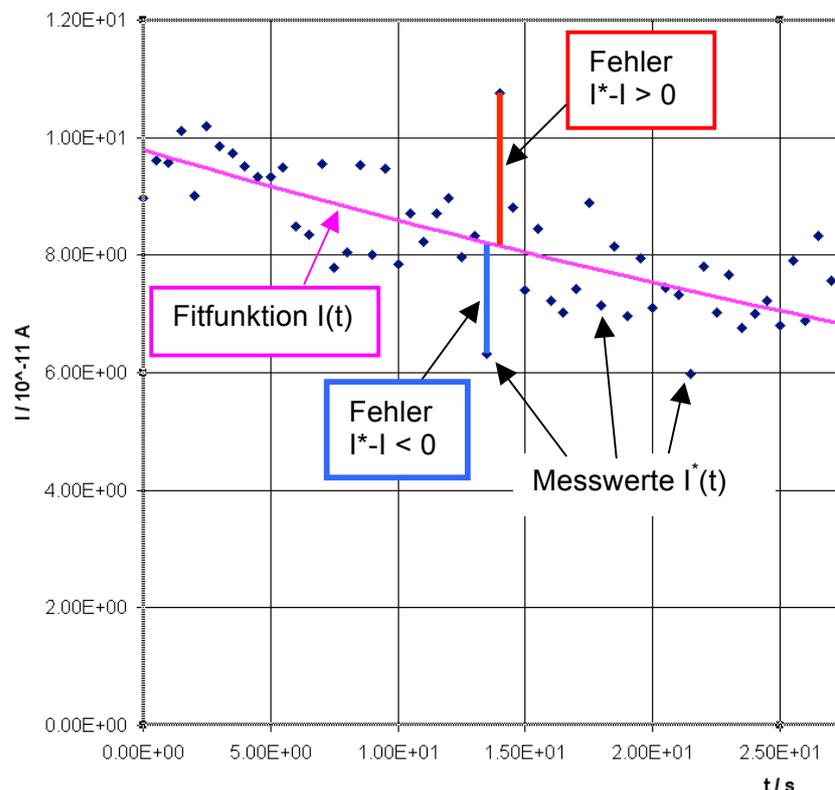
$$I(t) = I_0 \cdot 2^{-\frac{t}{t_{1/2}}} \quad \text{bzw.} \quad I(t) = I_0 \cdot e^{-t\lambda}$$

gilt, wobei  $I_0$  die zum Zeitpunkt  $t=0$  gemessene Stromstärke ist.

In der Physik kommt es oft vor, dass man – wie in unserem Falle - viele fehlerbehaftete (ungenau) Messwerte in einem zweidimensionalen Diagramm eingetragen hat, und eine Kurve so durch die Datenpunkte legen möchte, dass sie möglichst gut zu den Messwerten passt. Man nennt diesen Vorgang „fitten“ (engl.:to fit, anpassen). Die Kurve wird mit einer sog. Fitfunktion erzeugt. Die Fitfunktion ist ein mathematisches Modell, das die Messung erklären soll. Die Fitfunktion wird an die Messdaten angepasst, indem ihre Parameter berechnet werden. Wir machen uns dies im Folgenden an unseren Daten deutlich und schauen uns das  $t$ - $I(t)$ -Diagramm noch einmal in einem Ausschnitt an:

Die Kenntnis des Zerfallsgesetzes liefert uns also die obige Exponentialfunktion als Fitfunktion  $I(t)$  und es ist nun unsere Aufgabe, die beiden Parameter  $I_0$  und  $\lambda$  in dieser Fitfunktion so zu bestimmen, dass die Messwerte  $I^*(t)$  durch die Funktion  $I(t)$  optimal beschrieben („approximiert“) werden.

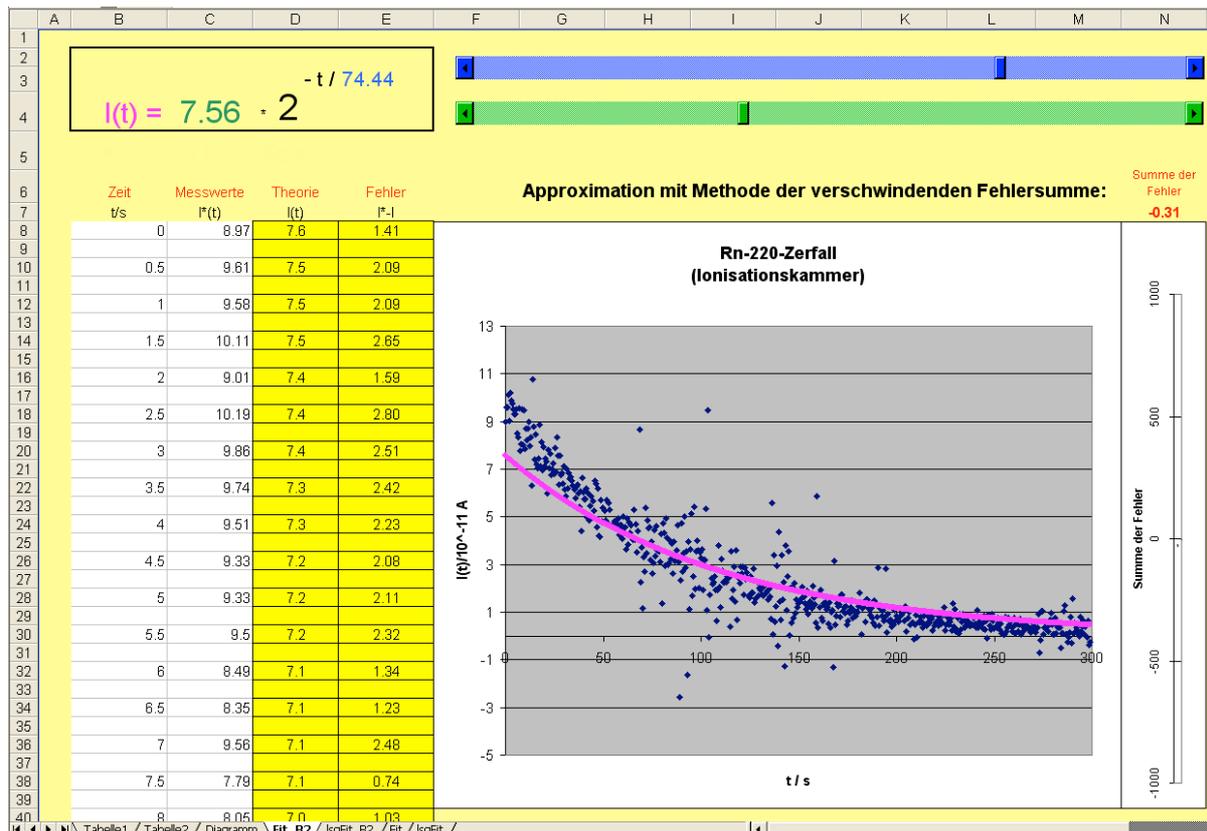
Zu betonen ist hierbei, dass es im allgemeinen wesentlich mehr Datenpunkte gibt als Parameter. Zunächst ist es nicht klar, wie man die Güte verschiedener Approximationen beurteilen soll. Betrachten wir die Messfehler noch



einmal in dem nebenstehenden Ausschnitt unserer Messdaten. Für zwei Messwerte sind die Abweichungen von der Fitkurve als Balken dargestellt: positive Abweichungen rot, negative Abweichungen blau.

Es erscheint unmittelbar einleuchtend, dass die im Bild magenta eingezeichnete Fitfunktion die Daten dann besonders gut beschreibt, wenn sich diese Abweichungen gegenseitig aufheben, d.h. wenn die Summe aller Fehler möglichst genau Null ergibt.

☞ Sehen Sie sich nun das Blatt „Fit\_B2“ der Arbeitsmappe an:



Bevor Sie mit dem Fitten beginnen, machen Sie sich zunächst mit dem Rechenblatt vertraut: Über dem Diagramm gibt es zwei Schieberegler. Der obere (blaue) dient zur Auswahl des Wertes von  $t_{1/2}$ , mit dem unteren (grünen) kann der Wert von  $I_0$  verändert werden. Die Fitfunktion  $I(t)$  mit den jeweils eingestellten Parameterwerten wird in dem umrandeten Kasten links neben den Schiebereglern angezeigt.

Mit diesen beiden Werten wird nun der Wert der Fitfunktion  $I(t)$  für alle  $t$ -Werte berechnet und in der Spalte D ausgegeben. Gleichzeitig werden diese Werte als magentafarbene Punkte im Diagramm dargestellt.

In der Nachbarspalte E wird aus den Messwerten  $I^*$  und der Theorie der Fehler  $I^*-I$  berechnet.

☞ Probieren Sie die Funktionsweise des Rechenblattes aus, indem Sie mit den Schieberegler die Parameterwerte verändern! Sie werden sehen, dass es möglich ist, nacheinander durch geeignete Wahl der beiden Parameter die Fitfunktion so an die Messpunkte anzupassen, dass die Fehlersumme praktisch verschwindet. Sie wird in der Zelle N7 berechnet, und im rechten Teil des Diagramms als Balken angezeigt.

☞ Bestimmen Sie mit dieser Methode die Halbwertszeit  $t_{1/2}$ . Liefert die Methode eindeutige Ergebnisse?

### Methode der kleinsten Fehlerquadrate

Die Mathematiker Gauß und Legendre machten noch weitere Annahmen über die Messfehler. Sie sollten, wie wir soeben gesehen haben, im Durchschnitt Null sein. In der Sprache der Stochastik kommen folgende Bedingungen hinzu: Jeder Messfehler soll die gleiche Varianz haben und von jedem anderen Messfehler stochastisch unabhängig sein. Damit verlangt man, dass in den Messfehlern keinerlei systematische Information mehr steckt. Sie sollen also rein zufällig um Null schwanken. Außerdem sollen die Messfehler normalverteilt sein, was zum einen wahrscheinlichkeitstheoretische Vorteile hat und zum anderen garantiert, dass „Ausreißer“ so gut wie ausgeschlossen sind.

Das Kriterium zur Bestimmung der Güte der Approximation soll dieses alles berücksichtigen und so gewählt werden, dass große Abweichungen der Modellfunktion von den Daten viel stärker bestraft werden als kleine. Alle diese Überlegungen führen letztendlich zu folgendem Verfahren:

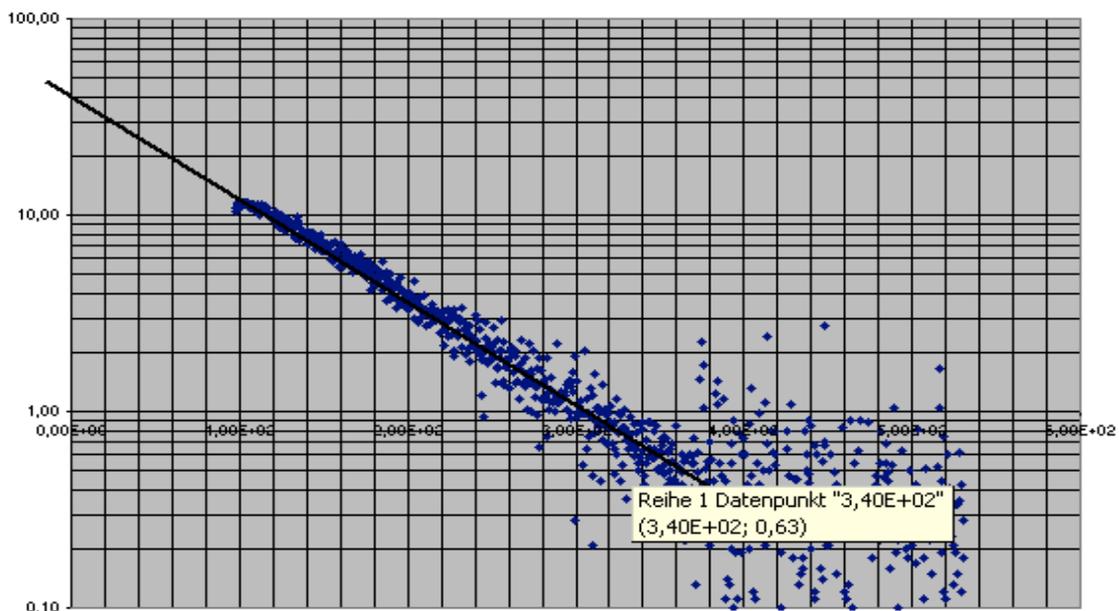
Methode der kleinsten Fehlerquadrate (least square method):

Es sollen diejenigen Parameter ausgewählt werden, bei denen die Summe der Quadrate der Abweichungen zwischen entsprechender Modellkurve und Daten (kurz auch Summe der Fehlerquadrate) minimal wird im Vergleich zu anderen Wahlen der Parameter.

- ☞ Gehen Sie zum Rechenblatt Isq\_Fit, das mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate arbeitet, und wiederholen Sie die Fitprozedur. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit der Methode der verschwindenden Fehlersumme.
- ☞ Ermitteln Sie aus der Isotopentafel den Literaturwert für die Halbwertszeit von Rn-220 und berechnen Sie die Zerfallskonstante  $\lambda$  (vgl. Hintergrundwissen).

### V.6. Weitere Beispiele für die Auswertung mit EXCEL

Da man theoretisch einen exponentiellen Verlauf erwartet, kann man die Interpolation der gemessenen Daten auch in halblogarithmischer Auftragungsart durchführen. In dieser Auftragungsart müssen die Daten auf einer Geraden liegen. Auch in dieser Auftragungsart kann man die Halbwertszeit leicht ablesen oder aus der Steigung der Geraden ermitteln.



## Hintergrundwissen:

### H.1. Radioaktivität

Antoine-Henri Becquerel entdeckte Ende des vorigen Jahrhunderts, dass Verbindungen des Urans spontan, also ohne äußeren Einfluss, unsichtbare Strahlen aussenden.

Auch bei Radium und anderen Elementen kann man diese Strahlung nachweisen. Die Strahlen können unter anderem:

- Materie durchdringen
- Fotoplatten schwärzen
- Fluoreszenz hervorrufen
- Gase ionisieren, d.h. elektrisch leitend machen.

Man spricht deshalb von ionisierender Strahlung. Von besonderer Bedeutung sind  $\alpha$ -,  $\beta$ - oder  $\gamma$ -Strahlung.

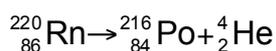
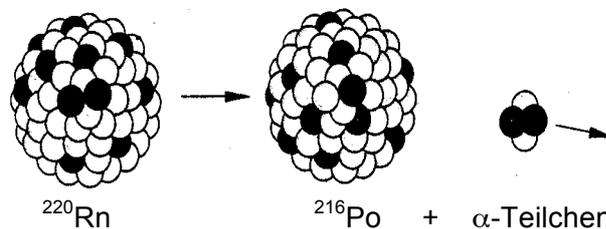
Die Atomkerne dieser Elemente – man nennt sie Radionuklide - sind nicht stabil. Sie zerfallen, um in einen stabileren Zustand überzugehen, d.h. sie wandeln sich ohne äußere Einwirkung in Kerne anderer oft wiederum radioaktiver Nuklide um. Erst am Ende einer solchen Zerfallsreihe steht dann ein stabiles Element.

Dabei wird Energie in Form von Teilchen ( $\alpha$ - oder  $\beta$ -Strahlung) oder elektromagnetischen Wellen ( $\gamma$ -Strahlung) abgegeben. Diese Eigenschaft heißt **Radioaktivität**.

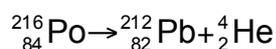
### H.2. $\alpha$ - und $\beta$ -Zerfall

$\alpha$ -Teilchen sind Heliumkerne, bestehen also aus 2 Protonen und 2 Neutronen. Durch Aussenden eines He-Kerns wird die Massenzahl des Restkerns 4 und die Kernladungszahl um 2 erniedrigt. Dies lässt sich in Form einer Reaktionsgleichung feststellen. Da keine Nukleonen verloren gehen können, muss bei einer solchen Gleichung die Bilanz immer stimmen: Die Summe aller Massen- bzw. Kernladungszahlen auf der linken Seite der Reaktionsgleichung muss gleich der Summe aller Massen- bzw. Kernladungszahlen auf der rechten Seite sein.

Betrachten wir zum Beispiel den Zerfall von Radon-Gas in unserem Experiment. Durch Aussenden von  $\alpha$ -Strahlung wird aus einem Radon-Kern ein Kern des Elementes mit dem Namen „Polonium“:



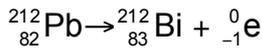
Dieses neue Nuklid ist nun seinerseits wieder radioaktiv und wird nach kurzer Zeit erneut ein  $\alpha$ -Teilchen emittieren und sich so in das Nuklid  $^{212}_{82}\text{Pb}$  (Blei) umwandeln:



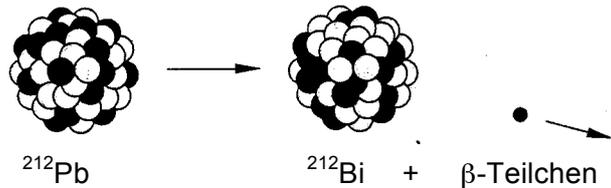
Man ahnt es schon: Auch dieses Bleiisotop ist radioaktiv. Im Gegensatz zu seinem Mutternuklid ist es aber ein sog.  $\beta$ -Strahler.

$\beta$ -Teilchen sind Elektronen, die mit großer Geschwindigkeit aus dem Kern emittiert werden. Wie ist das möglich, wo doch ein Atomkern nur aus Protonen und Neutronen besteht? Ein Neutron kann sich unter bestimmten Umständen in ein Proton und ein Elektron umwandeln. Das Elektron kann nicht im Kern verbleiben, sondern wird aus ihm herausgeschleudert. Zurück bleibt ein Kern mit gleicher Massenzahl, aber einer um 1 größeren Ordnungszahl, da ja ein Proton dazugekommen ist.

In unserem Beispiel:



Bi steht für das chemische Element „Wismut“. In diesem Fall wird aus einem Kern des Bleinuklids  ${}^{212}\text{Pb}$  ein  $\beta$ -Teilchen emittiert. Es muss also ein Element entstehen mit einem Proton mehr, aber einem Neutron weniger, also mit  $Z=83$ . Es ist das Element Wismut. In der Reaktionsgleichung wird dem Elektron die Massenzahl 0 und die Kernladungszahl  $-1$  zugeordnet, da es ja eine negative Ladung trägt.



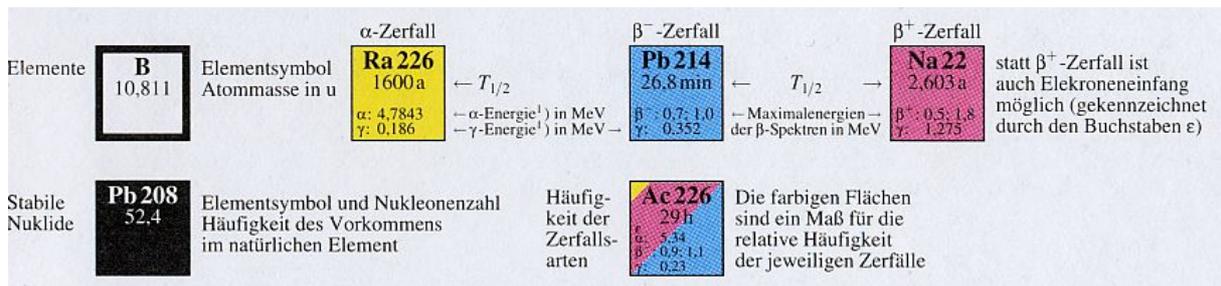
### H.3. Zerfallsreihen

$\alpha$ - und  $\beta$ -Zerfall kann man sich gut an einer Nuklidkarte klarmachen, von der hier nur ein Ausschnitt gezeigt werden kann (eine vollständige Nuklidkarte hängt im Praktikum). In einer solchen Karte werden alle Nuklide mit ihren Ordnungszahlen, Massenzahlen, Zerfallsarten, Halbwertszeiten, Zerfallsenergien u.ä. dargestellt. Dabei ist die Ordnungszahl  $Z$  in der Senkrechten und die Neutronenzahl in der Waagerechten aufgetragen. Nuklide bzw. Isotope eines Elements liegen dabei jeweils in einer Waagerechten, Isotone jeweils auf einer Senkrechten und Isobare auf einer Geraden von links oben nach rechts unten.

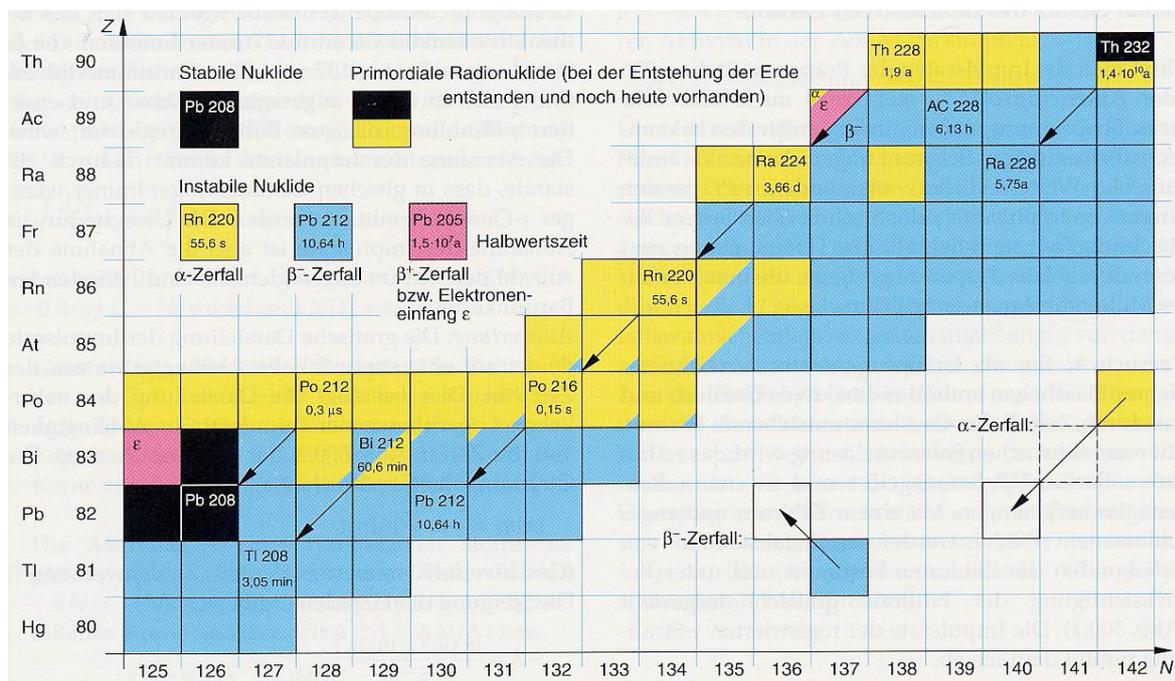
Neutronenzahl  $\rightarrow$

		133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144			
Protonenzahl $\rightarrow$	01	U 238,0289	U 226 0,2s $\alpha: 7,57$	U 227 1,1min $\alpha: 6,86$ $\gamma: 0,247$	U 228 9,1min $\alpha: 6,68$	U 229 58min $\alpha: 6,362$	U 230 20,8d $\alpha: 5,888$	U 231 4,2d $\alpha: 3,456$ $\gamma: 0,026$	U 232 68,9a $\alpha: 5,320$	U 233 $1,592 \cdot 10^5$ a $\alpha: 4,824$	U 234 0,0055 $\alpha: 4,775$ $\gamma: 0,186$	U 235 0,7200 $\alpha: 4,398$ $\gamma: 0,186$	U 236 $2,342 \cdot 10^7$ a $\alpha: 4,494$	U 238 99,2745 $\alpha: 4,198$ $\gamma: 0,060$		
	00	Pa 224 0,95s $\alpha: 7,555$	Pa 225 1,8s $\alpha: 7,25$	Pa 226 1,8min $\alpha: 6,86$ $\gamma: 0,065$	Pa 227 38,3min $\alpha: 6,466$ $\gamma: 0,065$	Pa 228 22h $\alpha: 6,078$ $\gamma: 0,911$	Pa 229 1,50d $\alpha: 5,580$	Pa 230 17,4d $\alpha: 5,345$ $\gamma: 0,952$	Pa 231 $3,276 \cdot 10^4$ a $\alpha: 5,014$ $\gamma: 0,027$	Pa 232 1,31d $\beta: 0,3$ $\gamma: 0,969$	Pa 233 27,0d $\beta: 0,3$ $\gamma: 0,312$	Pa 234 1,17min $\beta: 2,3$	Pa 235 24,2min $\beta: 1,4$ $\gamma: 0,128$	Pa 236 9,1min $\beta: 2,0$ $\gamma: 0,642$	Pa 237 8,7min $\beta: 1,4$ $\gamma: 0,854$	
	90	Th 223 0,66s $\alpha: 7,29$ $\gamma: 0,140$	Th 224 1,04s $\alpha: 7,17$ $\gamma: 0,177$	Th 225 8,72min $\alpha: 6,482$ $\gamma: 0,321$	Th 226 31min $\alpha: 6,336$ $\gamma: 0,111$	Th 227 18,72d $\alpha: 6,038$ $\gamma: 0,236$	Th 228 1,913a $\alpha: 5,423$ $\gamma: 0,084$	Th 229 7880a $\alpha: 4,845$ $\gamma: 0,194$	Th 230 $7,54 \cdot 10^4$ a $\alpha: 4,687$	Th 231 25,3h $\beta: 0,3$ $\gamma: 0,026$	Th 232 100 $\alpha: 4,405$	Th 233 22,3min $\beta: 1,2$ $\gamma: 0,087$	Th 234 24,10d $\beta: 0,2$ $\gamma: 0,063$	Th 235 7,1min $\beta: 1,4$ $\gamma: 0,417$	Th 236 37,5min $\beta: 1,0$ $\gamma: 0,111$	
	89	Ac 222 5,0s $\alpha: 7,009$	Ac 223 2,10min $\alpha: 6,647$	Ac 224 2,9h $\alpha: 6,142$ $\gamma: 0,216$	Ac 225 10,0d $\alpha: 5,830$ $\gamma: 0,100$	Ac 226 29h $\alpha: 5,34$ $\beta: 0,9; 1,1$ $\gamma: 0,23$	Ac 227 21,773a $\alpha: 4,953$ $\beta: 0,04$	Ac 228 6,13h $\beta: 1,2; 2,1$ $\gamma: 0,911$	Ac 229 62,7min $\beta: 1,1$ $\gamma: 0,165$	Ac 230 122s $\beta: 2,7$ $\gamma: 0,455$	Ac 231 7,5min $\beta: 0,282$	Ac 232 119s $\beta: 0,665$	144	145	146	
	88	Ra 221 28s $\alpha: 6,613$ $\gamma: 0,149$	Ra 222 38s $\alpha: 6,559$ $\gamma: 0,324$	Ra 223 11,43d $\alpha: 5,7162$ $\gamma: 0,269$	Ra 224 3,66d $\alpha: 5,6854$ $\gamma: 0,241$	Ra 225 14,8d $\beta: 0,3$ $\gamma: 0,04$	Ra 226 1600a $\alpha: 4,7843$ $\gamma: 0,186$	Ra 227 42,2min $\beta: 1,3$ $\gamma: 0,027$	Ra 228 5,75a $\beta: 0,04$	Ra 229 4,0min $\beta: 1,8$	Ra 230 93min $\beta: 0,8$ $\gamma: 0,072$	143				
	87	Fr 220 27,4s $\alpha: 6,68$ $\beta: 0,045$	Fr 221 4,9min $\alpha: 6,341$ $\gamma: 0,218$	Fr 222 14,2min $\beta: 1,8$	Fr 223 21,8min $\alpha: 5,34$ $\beta: 1,2$ $\gamma: 0,05$	Fr 224 3,3min $\beta: 2,6$ $\gamma: 0,216$	Fr 225 4,0min $\beta: 1,6$ $\gamma: 0,182$	Fr 226 48s $\beta: 3,2$ $\gamma: 0,254$	Fr 227 2,47min $\beta: 1,8$ $\gamma: 0,090$	Fr 228 39s $\beta: 0,474$	Fr 229 50,2s $\beta: 0,310$					
	86	Rn 219 3,96s $\alpha: 6,819$ $\gamma: 0,271$	Rn 220 55,6s $\alpha: 6,288$	Rn 221 25min $\alpha: 6,037$ $\beta: 0,8$ $\gamma: 0,186$	Rn 222 3,825d $\alpha: 5,48948$	Rn 223 23,2min $\beta: 0,593$	Rn 224 1,78h $\beta: 0,261$	Rn 225 4,5min $\beta: 0,261$	Rn 226 7,4min $\beta: 0,261$	141	142					
		At 218	At 219													

Die Farben und Kurzbezeichnungen in der Nuklidkarte haben folgende Bedeutung:



Allgemein bedeutet in der Nuklidkarte ein α-Zerfall einen Übergang zu einem anderen Kern um jeweils zwei Einheiten nach links unten, ein β-Zerfall zu einem Kern um jeweils eine Einheit nach links oben:



In dieser Nuklidkarte ist die Zerfallsreihe von Thorium 232 aufgemalt, die mit dem stabilen Element Blei 208 endet. Es gibt noch zwei weitere Zerfallsreihen, die in der Natur vorkommen. Sie beginnen bei dem Mutternuklid Uran 238 (sog. Uran-Radium-Reihe) bzw. bei Uran 235 (sog. Uran-Actinium-Reihe). Die Nuklide der Neptunium-Reihe kommen in der Natur nicht mehr vor, da das Mutternuklid Neptunium 237 mit seiner Halbwertszeit von 214 000 Jahren durch seinen Zerfall bereits im Laufe der Erdgeschichte verschwunden ist. Die Nuklide dieser Reihe können jedoch künstlich erzeugt werden.

**Aufgabe:** Bestimmen Sie anhand der Nuklidkarte alle Nuklide

- der Zerfallsreihe für Americium 241
- der Zerfallsreihe für Radium 226.

### H.4. Halbwertszeit

In einer radioaktiven Quelle befinden sich sehr viele Atome des gleichen Isotops. Der Zerfall eines einzelnen Atomkerns darin ist ein zufälliges Ereignis, die Zahl der Zerfälle  $N$  pro

Zeiteinheit  $t$  nennt man die **Aktivität  $A$**  der Quelle:  $A = \frac{N}{t}$

Die Einheit ist **1 Becquerel = 1 Zerfall / 1 Sekunde**.

Nun können wir nicht vorhersagen, welcher Kern im nächsten Moment zerfallen wird. Wir können noch nicht einmal die genaue Anzahl der Kerne angeben, die in der nächsten Sekunde zerfallen wird. Dennoch gibt es für jedes Nuklid eine charakteristische Zeit, nach der **bei einer sehr großen Anzahl von Atomkernen** genau die Hälfte zerfallen sein wird. Diese Zeit heißt **Halbwertszeit  $t_{1/2}$** . Da nach  $t_{1/2}$  nur noch die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Atomkerne des Mutternuklids vorhanden sind, ist natürlich auch die von diesem Nuklid ausgehende Aktivität auf die Hälfte abgesunken.

Wartet man anschließend noch einmal die Zeit  $t_{1/2}$  ab, so halbiert sich die Aktivität noch einmal auf  $\frac{1}{4}$  der Anfangsaktivität und so weiter.

Dieses Verhalten wird mathematisch durch eine Exponentialfunktion beschrieben:

$$A(n) = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n = A_0 \cdot 2^{-n}$$

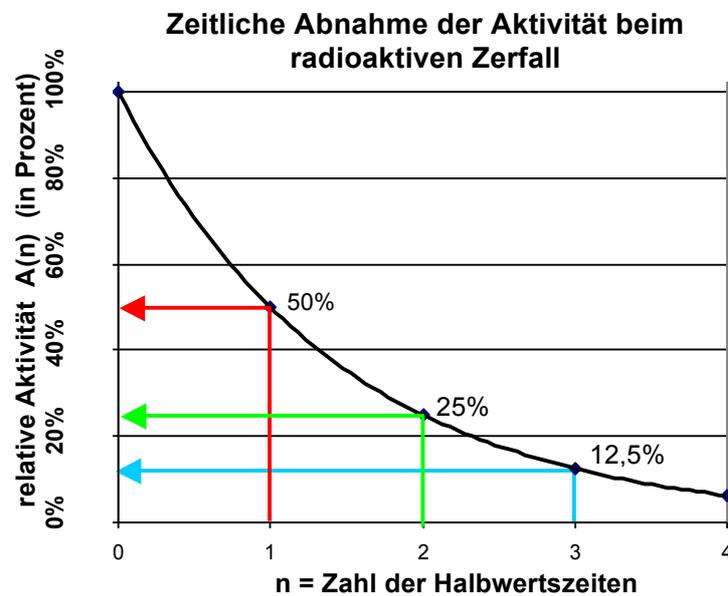
bzw.:

$$(*) \quad N(n) = N_0 \cdot 2^{-n}$$

Dabei ist  $A_0$  die ursprüngliche Aktivität bzw.  $N_0$  die Zahl der ursprünglich vorhandenen Kerne und  $n$  die **Zahl der vergangenen Halbwertszeiten**.

Eine beliebige Zeitspanne  $t$  kann man natürlich als Vielfaches der Halbwertszeit ausdrücken:

$$t = n \cdot t_{1/2}$$



Aus Gleichung (\*) erhält man damit das **Zerfallsgesetz**:

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

In der Physik ist es üblich, statt der Zahl 2 in dieser Exponentialfunktion als Basis die **Eulersche Zahl  $e=2,718281...$**  zu verwenden:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Die dabei auftretende **Zerfallskonstanten  $\lambda$**  ist ebenfalls mit der Halbwertszeit  $t_{1/2}$  verknüpft:

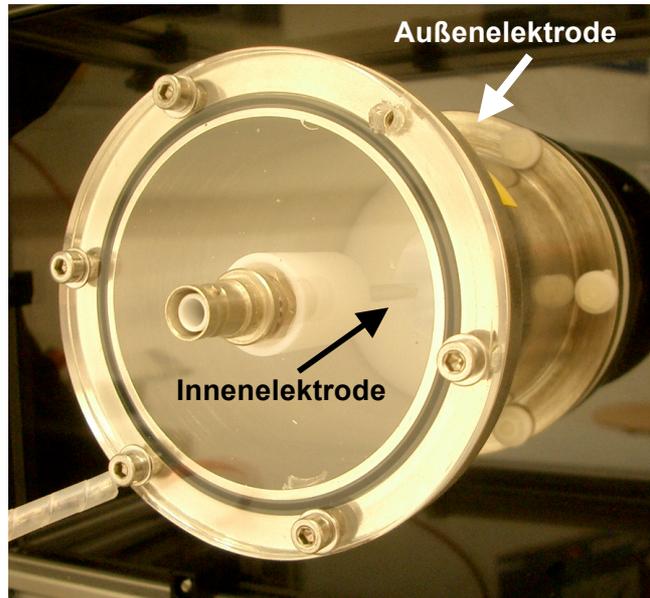
$$\lambda \cdot t_{1/2} = \ln(2).$$

Das neu entstandene Tochternuklid ist meist wieder radioaktiv, nun mit seiner neuen spezifischen Aktivität und Halbwertszeit. In einer solchen Quelle existieren also oft neben dem Mutternuklid auch Tochternuklide mehrerer aufeinanderfolgender Generationen.

Die Kenntnis des Zerfallsgesetzes eröffnet eine elegante Möglichkeit der Altersbestimmung von Mineralien, Fossilien oder anderen archäologischen Funden. Wenn für ein bestimmtes Nuklid die Anfangskonzentration ( $N_0$ /Volumen) bekannt ist, so kann nach Bestimmung der momentanen Konzentration ( $N(t)$ /Volumen) die verstrichene Zeit  $t$  berechnet werden.

### H.6. Nachweis von Teilchenstrahlung in einer Ionisationskammer

Eine Ionisationskammer besteht im Prinzip aus einem Platten- oder Zylinderkondensator, zwischen dessen Elektroden sich ein Detektorgas befindet. In unserem Fall handelt es sich um Luft unter Atmosphärendruck. An die Elektroden wird eine hohe Gleichspannung gelegt und ein hochempfindlicher Strommesser in den Kreis geschaltet. Treten nun  $\alpha$ -Strahlen in diese Kammer ein, so ionisieren Sie durch Stoß die Gasmoleküle in der Kammer. Infolge der angelegten Spannung wandern die entstandenen Ladungen (negative Ionen und positive Ionen) je nach Polarität zur entsprechenden Elektrode. Der von den beweglichen Ladungen erzeugte Strom

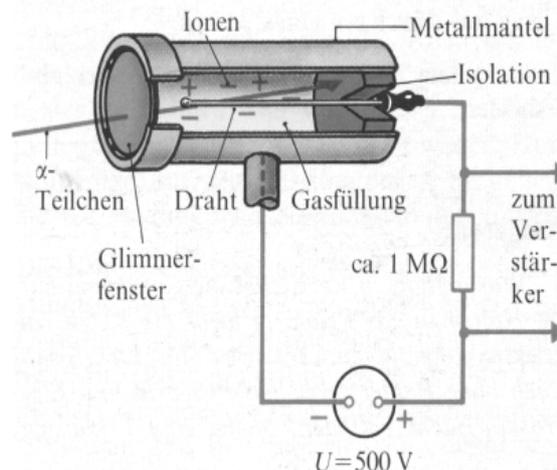


kann mit Hilfe eines Verstärkers gemessen werden. Jedes  $\alpha$ -Teilchen erzeugt auf Grund seiner hohen kinetischen Energie von einigen MeV etwa  $10^5$  Ion/Elektron-Paare durch Ionisation. Dies genügt allerdings noch nicht, um mit der einfachen Ionisationskammer des Praktikums ohne aufwändige elektronische Verstärkung ein einzelnes Teilchen nachzuweisen.

### H.7. Das Geiger-Müller-Zählrohr (optional)

Eine Weiterentwicklung der Ionisationskammer ist das sog. GEIGER-MÜLLER-Zählrohr. Dieses häufig verwendete Nachweisgerät für radioaktive Strahlung registriert einfallende einzelne schnelle  $\alpha$ - und  $\beta$ -Teilchen sowie  $\gamma$ -Quanten, die durch einen Compton- bzw. Photoeffekt mit ihrer Umgebung in Wechselwirkung treten.

Sein Aufbau ähnelt sehr einer zylindrischen Ionisationskammer, wobei als Innenelektrode ein sehr dünner Draht gespannt ist. Dieser Draht ist 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 unter einem Druck von etwa 40 mbar.

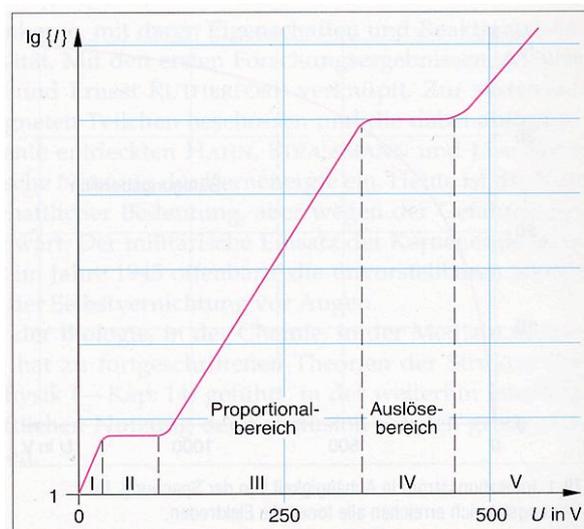


Durch das extrem dünne Abschlussfenster aus Glimmer (etwa 1/100 mm dick) können die nachzuweisenden Teilchen ins Innere fliegen und die Gasatome ionisieren. Die Anzahl der dabei aus den Hüllen der durchflogenen Gasatome freigesetzten Elektronen ist wie bei der oben beschriebenen Ionisationskammer dabei 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 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 in einer Kettenreaktion schlagartig: Das Gas im Zählrohr wird wie in einer Glimmlampe leitend. Dies führt zu einem sehr kurzen Stromstoß durch 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  $a$** .

Die Vorgänge in einem Geiger-Müller-Zählrohr hängen wesentlich von der Spannung am Zählrohr ab. Dies zeigt die in der Abbildung dargestellte Zählrohrcharakteristik, in der die Abhängigkeit der Stromstärke, die von einem ionisierenden Teilchen erzeugt wird, von der Spannung dargestellt ist:



Im Bereich I gelangen aufgrund der **Rekombination** nicht alle erzeugten Ionen zu den Elektroden.

Im Bereich II wird der **Sättigungsstrom** erreicht.

Das Anwachsen der Stromstärke im Bereich III beruht auf der Erzeugung weiterer Ladungen durch **Stoßionisation**. Hierfür sind im Wesentlichen die bei der Primäronisation erzeugten Elektronen verantwortlich, die im Raum hoher Feldstärke in der Nähe des Anodendrahtes so stark beschleunigt werden, dass ihre Energie zur Ionisation weiterer Gasmoleküle führt. Um

zu verhindern, dass sich die für die sekundäre Stoßionisation bedeutsamen Elektronen an neutrale Teilchen anlagern, verwendet man Edelgase als Füllung, da sie keine negativen Ionen bilden. Die durch Sekundärionisation erzeugte Ladung ist proportional zur primär erzeugten Ladung, die von der Energie der Strahlung abhängt. Mit einem in diesem Bereich betriebenen Zählrohr kann die Energie der Teilchen gemessen werden.

Im so genannten **Auslösebereich IV** ist die Stromstärke von der Primärionisation unabhängig und bleibt bei zunehmender Spannung nahezu konstant. Die primär erzeugten Elektronen erzeugen weitere Ladungen durch Stoßionisation und regen Atome zur Emission von Photonen an, die wiederum über den lichtelektrischen Effekt Elektronen auslösen können. So breitet sich eine in irgendeinem Punkt des Zählrohrs begonnene Entladung schnell am gesamten Draht entlang aus. Im Auslösebereich sind alle von einem Strahlungsteilchen oder Lichtquant ausgelösten Entladungen gleich: Die Spannungsimpulse haben stets gleiche Größe. Ein im Auslösebereich betriebenes Zählrohr registriert die Anzahl der einfallenden Strahlungsteilchen oder Quanten — unabhängig von ihrer Energie — und wirkt (somit) im eigentlichen Sinne als Zählrohr. Ein so betriebenes Zählrohr registriert auch Teilchen mit geringer Primärionisation, während ein im Proportionalbereich III arbeitendes Zählrohr nur stark ionisierende Teilchen nachweist.

Eine weitere Spannungserhöhung im Bereich V führt zu einem lawinenartigen Anwachsen der Ladungsträger, zur Dauerentladung und damit zur Zerstörung des Zählrohres.

Das Zählvermögen eines Zählrohres wird durch die Zeitspanne begrenzt, in der das Zählrohr wegen des Entladungsvorganges nicht aufnahmebereit ist. Die bei der Ionisation erzeugten Elektronen wandern zur Anode, während die positiven Ionen mit ihrer wesentlich geringeren Beweglichkeit eine positive Raumladung um den Draht bilden. Dadurch wird die Feldstärke so weit herabgesetzt, dass keine weitere Stoßionisation mehr möglich ist. In der Zeit, die die positiven Ionen für ihre Wanderung zur Kathode brauchen, können weitere ionisierende Teilchen nicht registriert werden. Diese Zeitspanne wird als Totzeit bezeichnet; sie liegt bei normalen Zählrohren in der Größenordnung von  $10^{-4}$  s.

Das Erlöschen der Gasentladung erreicht man durch Zusatz eines Löschgases, z. B. Alkoholdampf, das den positiven Ionen die Energie zur Sekundärelektronenbildung an der Kathode entzieht, und durch Verwendung eines hochohmigen Widerstandes, an dem bei Einsetzen der Entladung ein Teil der Zählrohrspannung abfällt.

\\Familyspeich\share\Für Axel\GSI-SL-Anleitungen ab 1.1.2006\Station3\Anleitung\_3.doc

Erstelldatum 04.06.2006 21:53:00

Zuletzt gespeichert von Gruppe

Zuletzt gedruckt 03.07.12 13:44

Schüler Labor

Zuletzt gespeichert 2/6/2007 12:33

gedruckt 03.07.2012 13:44:00