Leibniz Universität Hannover

Institut für Radioökologie und Strahlenschutz

Bachelorarbeit

Entwicklung und Durchführung eines Unterrichtskonzepts zur Bestimmung der Halbwertszeit von Pa-234m

---

Vorgelegt von: Antonia Neuburg
Matrikelnummer: 10021453
Studiengang: Fächerübergreifender Bachelor in Physik und Sport

Erstprüfer: Prof. Dr. Clemens Walther
Zweitprüfer: Dr. Jan-Willem Vahlbruch
Abgabetermin: 18.04.2022

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1

2. Der Isotopengenerator 2

2.1 Aufbau 2

2.2 Funktion 2

3. Herstellung eines Protactiniumgenerators 4

3.1 Das Behältnis 4

3.2 Das Stoffgemisch 5

3.3 Halterung 6

4. Messung mit dem Protactiniumgenerator 8

4.1 Versuchsaufbau 8

4.2 Durchführung 9

4.3 Auswertung 10

4.3.1 Auswertung mit Logarithmus 11

4.3.2 Auswertung ohne Logarithmus 13

4.4 Messfehler 14

5. Experimente im naturwissenschaftlichen Unterricht 16

5.1 Bildungsstandards 16

5.2 Begründung für Experimente im Unterricht 18

5.3 Realisierung eines Experiments im naturwissenschaftlichen Unterricht 20

5.4 Vorüberlegungen bei der Planung eines Experimentes 20

6. Strahlenschutzaspekte 23

7. Erfahrungen aus der Schule 26

8. Unterrichtskonzept für den Protactiniumgenerator 29

8.1 Kerncurriculare Vorgaben 29

8.2 Ziele und Kompetenzen 30

8.2.1 Kognitive Lernziele 30

8.2.2 Soziale Lernziele 31

8.2.3 Motorische Lernziele 32
8.2.4 Weiterführende Lernziele 32
8.3 Didaktische Analyse 32
8.3.1 Gegenwartsbedeutung 33
8.3.2 Zukunftsbedeutung 33
8.3.3 Zugänglichkeit des Themas 34
8.3.4 Sachstruktur 34
8.3.5 Schülervorstellungen 37
8.4 Sachanalyse 40
8.5 Methoden 41
8.5.1 Methodische Großform: Das Experiment 41
8.5.2 Unterrichtskonzept: Entdeckender Unterricht 43
8.5.3 Sozialform 44
8.6 Unterrichtsmaterialien 45
8.6.1 Arbeitsblatt 45
8.6.2 Präsentation 48
8.6.3 Lernvideos 49
8.6.4 Nuklidkarte 50
8.7 Unterrichtsverlaufsplan 50
Literaturverzeichnis 55
Anhang I
Eigenständigkeitserklärung XXV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Protactiniumgenerator 4
Abbildung 4 - Halterung 7
Abbildung 6 - Versuchsaufbau 8
Abbildung 2 - Weithalsige Laborflasche mit Schraubverschluss I
Abbildung 3 - PE-Zylinder I
Abbildung 5 - Inspector II
Abbildung 7 - Experimentierzyklus Labudde III
Abbildung 8 - Auszug aus der Nuklidkarte IV

1. Einleitung

Die empirische Wissenschaft spielt eine große Rolle in den Naturwissenschaften. Dazu gehören auch empirische Verfahren wie die Durchführung von Experimenten. Dies bedeutet, dass experimentelles Arbeiten ein notwendiges Element naturwissenschaftlichen Unterrichts ist. Das Experiment dient dazu, Interesse und Motivation bei den Schüler:innen zu wecken, das Verständnis naturwissenschaftlicher Denk- und Arbeitsweisen zu verstärken und wissenschaftspraktische Fähigkeiten und Fertigkeiten zur Problemlösung zu fördern. Leider gibt es Themenbereiche an Schulen, zu denen kaum Experimente durchgeführt werden. Dazu zählt der Bereich Atom- und Kernphysik und das dazugehörige Thema Radioaktivität. Dabei bestehen im Zusammenhang mit dem Thema Radioaktivität mehr Berührungspunkte im alltäglichen Leben als wir vermuten. Wir leben in ständiger Berührung mit ihr, durch die natürliche Strahlenbelastung in unserer Nahrung oder durch das radioaktive Edelgas Radon aus der Luft. Zusätzlich setzen wir uns durch Flugreisen einer gewissen Strahlenbelastung aus. Auch bei medizinischen Verfahren, wie einer Computertomografie oder Röntgenaufnahme, ist der Mensch Strahlung ausgesetzt. Auch wenn wir nicht von einer direkten Strahlenbelastung sprechen, so können gleichwohl die Endlagerung von radioaktiven Abfällen wie auch die Nutzung von Kernenergie zu einer Strahlenbelastung für den Menschen führen. Auch mit dieser Thematik müssen sich Schüler:innen nicht nur in der Gegenwart, sondern auch in Zukunft mit auseinandersetzen. Dazu ist es erforderlich, dass sie über ein grundlegendes Wissen zum Thema Atom- und Kernphysik und den betreffenden empirische Verfahren verfügen. Um den Stellenwert von Experimenten zu diesem Themenschwerpunkt im Physikunterricht wieder zu erhöhen, wurde im Rahmen dieser Bachelorarbeit ein Unterrichtskonzept zur experimentellen Bestimmung der Halbwertszeit von Protactinium-234m entwickelt. Dieses ist so konzipiert, dass sich die Schüler:innen in die Rolle eines/-r Wissenschaftlers/-in versetzen sollen, um durch die Bestimmung der Halbwertszeit mithilfe eines Isotopengenerators das gesuchte Isotop zu finden. Die Herstellung eines Isotopengenerators, die dazugehörigen Strahlenschutzaspekte und die Rolle von Experimenten im Unterricht sind weitere Themenschwerpunkte dieser Arbeit. Zusätzlich wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Klassensatz dieser Isotopengeneratoren hergestellt und eine genaue Anleitung für die eigene Herstellung entwickelt.

2. Der Isotopengenerator

Mit Hilfe eines Isotopengenerators lässt sich ein kurzlebiges Radionuklid separieren und dessen Halbwertszeit anhand eines Geiger-Müller-Zählrohrs bestimmen. In diesem Fall handelt es sich um das Isotop Protactinium-234m[1].

2.1 Aufbau

Das Behältnis eines Isotopengenerators besteht aus einem dickwandigen Kunststoffbehälter, welcher hermetisch mit einer dünnwandigen Kunststoffkappe verschlossen ist [vgl. Abb. 1 im Anhang]. Innerhalb dieses Behälters befindet sich ein Gemisch, bestehend aus zwei Phasen, die sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Polarität nicht miteinander vermischen. Die untere Phase ist eine saure, wässrige Lösung mit Uranylnitrat. In dieser Lösung stellt sich ein radioaktives Gleichgewicht zwischen den verschiedenen Nukliden der Uran-238-Zerfallsreihe ein. Zu dieser Zerfallsreihe gehört auch das Isotop Pa-234m. Die andere Phase enthält eine organische Flüssigkeit, bei der es sich um ein Keton handelt. Weil die organische Lösung eine geringere Dichte als die wässrige Lösung besitzt, schwimmt diese oben, und es entstehen zwei voneinander getrennte Phasen [IRS, 2016].

2.2 Funktion

Das durch die Uran-238-Zerfallsreihe entstandene Folgeprodukt Pa-234m befindet sich zunächst in der sauren, wässrigen Lösung mit Uranylnitrat. In einer organischen Lösung, wie dem Keton, löst es sich wesentlich besser, als in einer wässrigen. Um das Pa-234m aus der wässrigen Lösung in die oben schwimmende organische Lösung zu bekommen, wird der Isotopengenerator geschüttelt. Dabei trennt sich das Pa-234m von der unteren Phase und wird fast vollständig in der organischen Flüssigkeit angereichert. Umgangssprachlich wird deshalb von einem „Schüttelpräparat“ gesprochen. Im Labor wird dieses Verfahren als Extraktion bezeichnet.

[1] Das „m“ steht dabei für metastabil, was bedeutet, dass sich der Kern des Pa-234m in einem höheren energetischen Zustand befindet und unter Aussendung von γ-Strahlung den Grundzustand Pa-234 erreichen kann.

Die abklingende Impulsrate[2] des Pa-234m lässt sich nach dem Ausschüttelvorgang mit einem Zählrohr messen. Dieses sollte sich für eine genauere Messung in der Nähe der dünnwandigen Kunststoffkappe befinden. Die entstehende Alphastrahlung des Urans wird aufgrund seiner langen Halbwertszeit und der Abschirmung durch den Kunststoffbehälter nicht detektiert. Auch die ausgesandte Betastrahlung des entstandenen Thoriums besitzt eine zu geringe Energie, um vom Messgerät erkannt zu werden. Aufgrund der Dauer des Experiments im Verhältnis zu den Halbwertszeiten der beiden Nuklide kann die Zerfallsrate von Uran und Thorium als konstant angesehen werden. Sollten sie dennoch in die Messung einfließen, werden sie als Untergrundmessung angesehen. Es werden neben der Nullrate nur die hochenergetischen Beta-Teilchen des Protatctiniums gemessen.

Der Ausschüttelvorgang kann beliebig oft wiederholt werden, wodurch sich das Experiment als effizientes Schülerexperiment eignet. [IRS, 2016]

[2] Die Impulsrate ist abhängig von der Aktivität des Präparats, von der Qualität des Messgerätes und dem Aufbau des Experiments. Die Aktivität eines radioaktiven Stoffes gibt die Anzahl der Kernzerfälle pro Zeiteinheit an. Die Impulsrate hingegen ist definiert als Anzahl der Impulse pro Zeiteinheit.

3. Herstellung eines Protactiniumgenerators

Im Rahmen dieser Arbeit wurden insgesamt zehn Pa-Generatoren hergestellt. Entsprechend dazu wurden geeignete Behältnisse und Halterungen entwickelt und hergestellt, die den Versuchsaufbau komplementieren. Die Herstellung wird im folgenden vorgestellt.

3.1 Das Behältnis

Das Stoffgemisch befindet sich in einer weithalsigen Laborflasche aus Weich-Polyethylen (LDPE) mit Schraubverschluss [vgl. Abb. 2 im Anhang]. Das Volumen der Flasche beträgt 30 ml. Sie bildet die dünnwandige Kunststoffkappe, die in Abbildung 1 zu sehen ist.

Abbildung 1 - Protactiniumgenerator

Der dickwandige Kunststoffbehälter besteht aus harten Polyvinylchlorid (PVC). Er besitzt die Form eines hohlen Zylinders, der auf einer Seite geschlossen und auf der anderen geöffnet ist. Die Maße befinden sich in Abb. 3 im Anhang. Nachdem das Gemisch in die LDPE-Flasche gefüllt wurde, wird diese kopfüber in den hohlen Zylinder gestellt. Anschließend werden die beiden mit einem 2-Komponenten-Kleber verbunden, sodass der Pa-Generator hermetisch verschlossen ist. Der Kleber wird durch eine kleine Öffnung an der Unterseite bis zum oberen Rand des Zylinders zugeführt und härtet anschließend über

Nacht aus. Durch eine Nut[3] innerhalb des PVC Zylinders, die sich auf gleicher Höhe mit der Nut des LDPE-Flasche befindet, ist die Verbindung nach Aushärten des Klebers formschlüssig miteinander verbunden.

3.2 Das Stoffgemisch

Die untere Phase des Pa-Generators bildet die saure, wässrige Lösung. Dafür werden 1,7 g Uranylnitrat-Hexahydrat (Summenformel $UO_2(NO_3)_2 * 6\ H_2O$) mit 7 ml Salzsäure (HCl mit einer Molarität von ~12 mol/l) verdünnt. Die Salzsäure wird benötigt, um nicht geladene Komplexe mit dem Uranyl zu bilden. Die Komplexe sind entscheidend für den Extraktionsprozess des Protactiniums. Das Uranylnitrat sorgt für die gelbliche Farbe der organischen Phase. Das Gesamtvolumen dieser Phase entspricht danach ca. 8 ml. In der Lösung stellt sich ein radioaktives Gleichgewicht zwischen den verschiedenen Nukliden der Uran-238-Zerfallsreihe ein.

Für die leichtere, organische Phase wird für den Muster-Isotopengenerator der Firma ‚PHYWE', welcher für diese Arbeit vom Institut für Radioökologie und Strahlenschutz der Leibniz Universität Hannover zur Verfügung gestellt wurde, Isobutylmethylketon verwendet. Da dieses schwierig in geeigneter Zeit zu beschaffen war, und ein ähnliches Keton im Institut zur Verfügung stand, wird für die neu gebauten Pa-Generatoren Diisopropylketon verwendet. Dieses Keton ist gemäß Sicherheitsdatenblatt (SDB) schlechter wasserlöslich als Isobutylmethylketon, wodurch sich der Vorteil ergibt, dass sich die beiden Phasen schlechter miteinander vermischen [Thermo Fisher Scientific, 2021]. Außerdem ist Isobutylmethylketon ein CMR-Stoff und kann eine schädigende Wirkung für den Menschen darstellen [Roth, 2021]. Dies spricht laut Substitutionsgebot ebenfalls für die Verwendung von Diisopropylketon. Auch die Messergebnisse unter Verwendung von Diisopropylketon haben dafür gesprochen, dieses Keton für den Isotopengenerator zu verwenden.

[3] Eine Nut beschreibt in der Technik eine längliche Vertiefung.

Für die obere Phase des Pa-Generators wurden $29{,}5 \pm 0{,}2\,ml$ Diisopropylketon dazugegeben. Auch wenn das Nennvolumen[4] der Flasche $30\,ml$ beträgt, kann diese Angabe überschritten werden, da das Gesamtvolumen inklusive des Flaschenhalses größer ist.

Das Volumen der Ketonphase wurde experimentell bestimmt. Dazu wurde die LDPE-Flasche nach Zugabe des Uranylnitrats zunächst vollständig mit dem Keton aufgefüllt. Anschließend wurde mit einer Pipette so viel Keton abgeschöpft, dass eine kleine Luftblase entstanden ist. Diese Luftblase sorgt dafür, dass die beiden Phasen sich durch intensives Schütteln miteinander vermischen. Die Füllmenge des Ketons wurde experimentell davon abhängig gemacht, wie groß die Luftblase sein muss, damit beim Entmischen der beiden Phasen nach dem Schütteln möglichst wenig Bläschen entstehen. Dadurch wird sichergestellt, dass sich die beiden Phasen nach dem Schüttelvorgang schnell wieder voneinander trennen. Dabei wurde so lange Keton abgeschöpft oder wieder hinzugegeben und anschließend geschüttelt, bis das Ergebnis zufriedenstellend war. Für die Strahlenschutzaspekte bezüglich der erlaubten Freigrenze der Aktivität beim Bau eines Pa-Generators siehe Kapitel "6 Strahlenschutzaspekte".

3.3 Halterung

Für die Durchführung des Experiments wird eine Halterung benötigt. Diese hat die Aufgabe, den Versuchaufbau möglichst stabil zu halten, damit sich das Messgerät und der Isotopengenerator während der Messung möglichst wenig bewegen.

Die Grundlage der Halterung bildet eine Kunststoffplatte aus PVC. Die Breite der Platte entspricht in etwa der Breite des Messgerätes und beträgt $8{,}3\,cm$. Zur Stabilisierung des Messgerätes und des Isotopengenerators werden insgesamt sechs Löcher in die Platte gebohrt, in welche zylinderförmige Stäbe aus PVC mit einem Durchmesser von ca. $0{,}8\,cm$ verklebt werden [vgl. Abb. 4]. Die Anordnung der Stäbe ist so gewählt, dass jeweils zwei von ihnen das Messgerät und den Isotopengenerator von vorne bzw. hinten stabilisieren. Der Abstand zwischen den Stäben zur Sicherung des Messgeräts beträgt $3{,}1\,cm$. Das Messgerät wird darin aufrecht hineingestellt. Der dadurch erzielte stabile Stand bewirkt

[4] Das Nennvolumen beschreibt das Flaschenvolumen, bei dem das Volumen des Flaschenhalses nicht mit inbegriffen ist.

möglichst wenig Bewegung beim Betätigen des „On/Off-Schalters“. Um den Isotopengenerator zu stabilisieren, werden die weiteren PVC-Stäbe so angebracht, dass sie mit ihrer Innenseite diagonal gemessen dem Durchmesser des Isotopengenerators von $4{,}1\,cm$ entsprechen. Dadurch wird gewährleistet, dass der Isotopengenerator so dicht wie möglich an das Eintrittsfenster des Detektors gestellt werden kann.

Möchte eine Lehrkraft diese Halterung mit einfachen Mitteln nachbauen, dann lässt sich zum Beispiel auch Styropor oder PE-Schaum dafür verwenden. Darin müssten nur die Grundrisse des Messgerätes und des Isotopengenerators mit einem Cutter-Messer ausgeschnitten werden, um einen stabilen Stand zu gewährleistet.

Abbildung 4 - Halterung

4. Messung mit dem Protactiniumgenerator

4.1 Versuchsaufbau

Für den Versuchsaufbau wird der Isotopengenerator, ein Messgerät zur Strahlungsmessung (hier: Inspector[5]), die Halterung für den Inspector und eine Uhr benötigt.

Zunächst wird der Inspector in die für ihn vorgesehene Halterung gestellt [vgl. Kap. 3.3]. Der Isotopengenerator wird für die Messung des Nulleffektes sowie für die Messung der Impulsrate direkt vor den Inspector aufgestellt. Auch dieser sollte dabei in der Halterung gesichert sein, um während des Experimentes möglichst ruhig zu stehen. Wichtig dabei ist, dass die dünnwandige Kunststoffkappe auf gleicher Höhe und möglichst nah am Zählfenster des Inspectors ist, da sich das Protactinium in diesem Bereich anreichert und somit weniger Verluste entstehen.

Abbildung 6 - Versuchsaufbau

[5] Der Inspector benutzt ein Geiger-Müller-Zählrohr zur Detektion von ionisierender Strahlung. Dringt ionisierende Strahlung in das Messgerät ein, kommt es zur Ionisation des unter Druck stehenden Füllgases. Dadurch wird ein Stromimpuls erzeugt, der elektronisch gemessen und als Impuls ausgegeben wird. Die registrierten Impulse werden je nach Betriebseinstellung auf dem Display angezeigt [vgl. Abb. 5 im Anhang].

4.2 Durchführung

Um letztendlich die Halbwertszeit des Pa-234m angeben zu können, muss die Impulsrate bestimmt werden. Dafür ist es wichtig, den Nulleffekt[6] zu erfassen. Dies kann auf zwei verschiedene Arten geschehen:

So lässt sich mit der ersten Methode der Nulleffekt vor der eigentlichen Messung bestimmen. Dafür wird der Versuch nach Kapitel 4.1 aufgebaut. Der Protactiniumgenerator wird für mehrere Minuten nicht bewegt, bis das angereicherte Protactinium zerfallen ist. Im Anschluss werden 3 Messungen á 1 Minute durchführt. Die gemessenen Werte werden halbiert und somit auf $30\,s$ umgerechnet, damit sie später von der Impulsrate, die ebenfalls im 30-Sekunden-Takt gemessen wird, leichter abgezogen werden können. Die längere Messzeit des Nulleffektes soll den Messfehler minimieren. Am Ende gibt der Mittelwert der Messwerte den Nulleffekt z_o an.

Mit der zweiten Methode wird die Messung so lange durchgeführt, bis sich die Impulsrate nicht mehr deutlich verändert. Die dabei gemessenen Werte werden der erstellten Tabelle [siehe Tab. 1] entnommen, und daraus der Mittelwert gebildet. Der Mittelwert dieser stagnierenden Messwerte gegen Ende der Messung stellt auch hier den Nulleffekt dar und wird im Anschluss von den gemessenen Impulsraten abgezogen. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass die Schüler:innen den Isotopengenerator nicht vor Beginn des Versuches wenige Minuten ruhen lassen müssen, bevor sie den Nulleffekt messen können. Daher wird diese Variante für den Schulversuch benutzt.

Für die Messung der Impulsrate wird nach Aufbau des Versuches der Isotopengenerator für 15-20 s intensiv geschüttelt. Dabei ist zu beachten, dass der Isotopengenerator während des Schüttelns mit den Fingern am Boden und oberhalb der dünnen Kunststoffkappe fixiert wird. Anschließend wird der Isotopengenerator wie in Kapitel 4.1 beschrieben in die Halterung gestellt. Ab jetzt beginnt die Messung der Impulsrate. Diese wird nun für $30\,s$ gemessen, mit einer anschließenden Messpause von ebenfalls $30\,s$. Danach wiederholt sich der

[6] Der Nulleffekt (auch Nullrate oder Untergrund genannt) beschreibt den gemessenen Wert eines Detektors in Abwesenheit der eigentlich zu messenden Strahlung. Ursachen dafür können z.B. kosmische und terrestrische Strahlung, apparative Störungen, andere radioaktive Substanzen oder der Detektor selbst sein [Vogt & Vahlbruch, 2019].

Messvorgang. Die gemessenen Impulsraten z werden während des Messvorgangs in eine Tabelle eintragen, die folgendermaßen aufgebaut ist:

Zeit t [s]	Impulsrate z	$z - z_0$
30		
90		
150		
210		
…		

Tabelle 1: Mustertabelle zur Messung der Impulsrate

Die gesamte Messdauer kann je nach verwendetem Isotopengenerator ein wenig variieren. Sie sollte allerdings mindestens 6 Werte für die Nullratenmessung enthalten. Somit ergibt sich eine ungefähre Gesamtmessdauer von 690 s das entspricht 11,5 min.

4.3 Auswertung

Für die Auswertung wird zunächst der Nulleffekt z_o berechnet. Dieser wird dann von den gemessenen Impulsraten abgezogen (gemessene Impulsrate z - Nulleffekt z_o) und anschließend werden die tatsächlichen Impulsraten in die rechte Spalte der Tabelle [vgl. Tab. 1] eingetragen. Werden die Werte in dieser Spalte betrachtet, lassen sie sich in drei Bereiche einteilen:

Im ersten Bereich kann die Impulsrate noch steigen, da der Entmischungsprozess der beiden Phasen im Isotopengenerator noch nicht vollständig beendet ist. Da die Messung allerdings erst bei $t = 30\,s$ startet, ist es wahrscheinlich, dass der Entmischungsprozess bereits abgeschlossen ist. Ansonsten sollte die Auswertung erst bei $t = 90\,s$ gestartet werden.

Im zweiten Bereich ist eine Abnahme der Impulsrate zu erkennen. Dahinter steckt der für uns relevante radioaktive Zerfall des Pa-234m.

Der letzte Bereich stellt den in Kapitel 4.2 aufgeführten Nulleffekt dar. In diesen Abschnitt sollten die Messwerte um einen ungefähren Wert stagnieren. Das separierte Pa-234m ist weitestgehend zerfallen.

Für die Auswertung gibt es zwei unterschiedliche Vorgehensweisen. Die eine ist für Schüler:innen vorgesehen, denen der Logarithmus und seine Eigenschaft als Umkehrfunktion der e-Funktion bereits bekannt ist. Die zweite berücksichtigt Schüler:innen ohne jegliche Logarithmuskenntnisse.

4.3.1 Auswertung mit Logarithmus

Die Halbwertszeit $T_{1/2}$ gibt an, nach welcher Zeit sich die Menge eines radioaktiven Nuklids halbiert hat. Sie lässt sich durch das Zerfallsgesetz $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ bestimmen, wobei λ die Zerfallskonstante bezeichnet, die die Zerfallswahrscheinlichkeit eines Kerns pro Zeiteinheit angibt. Ihre Einheit entspricht damit $\left[\frac{1}{s}\right]$ [Povh et al., 2014].

Es wird davon ausgegangen, dass zu Beginn der Messung für die Anzahl der unzerfallenen Kerne $N(0) = N_0$ gilt und wird die Definition der Halbwertszeit beachtet, dann halbiert sich der Anfangsbestand der Atomkerne N_0 nach der Zeit $t = T_{1/2}$ auf $\frac{1}{2}N_0$. Es gilt also:

$$N(T_{1/2}) = \frac{1}{2}N_0 \tag{1}$$

Mit dem Zerfallsgesetz zum Zeitpunkt $t = T_{1/2}$ erhält man:

$$N(T_{1/2}) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}} \tag{2}$$

Aus den Gleichungen (1) und (2) ergibt sich:

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda \cdot T_{1/2}}$$

Mit dem natürlichen Logarithmus als Umkehrfunktion zur e-Funktion wird die Gleichung zu:

$$ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\lambda \cdot T_{1/2}$$

Mit dem Logarithmusgesetz $ln\left(\frac{a}{b}\right) = ln(a) - ln(b)$ und $ln(1) = 0$ erhält man:

$$-ln(2) = -\lambda \cdot T_{\frac{1}{2}}$$

Dadurch fällt das Minus auf beiden Seiten der Gleichung weg und für die Halbwertszeit ergibt sich die Formel:

$$\mathbf{T_{1/2} = \frac{ln(2)}{\lambda}} \tag{3}$$

Da in den Schulen kein einheitliches Medium zum Rechnen verwendet wird, lässt sich die Halbwertszeit sowohl mit einen grafikfähigem Taschenrechner, einem iPad (z.B. mit CAS-easy+) oder auch mit einem Laptop bzw. Computer (z.B. mit QTI-Plot) bestimmen. Dafür werden die Werte aus Tabelle 1 in eine Liste eingetragen. Die Spalte „t“ bilden die x-Werte und Spalte „$z - z_0$“ ergeben die y-Werte. Anschließend lassen sich die Wertepaare als Punkte in einem Koordinatensystem ausgeben.

Um die Halbwertszeit mit Gleichung (3) zu bestimmen, wird zuerst der Wert der Zerfallskonstante λ benötigt. Diese lässt sich durch das Zerfallsgesetz $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ ermitteln. Dazu wird anhand des erstellten Graphen eine exponentielle Regression der Form $f(t) = a \cdot b^t$ durchgeführt. Es ist darauf zu achten, wie dicht die Daten an der Regressionslinie liegen. Ein statistisches Maß zur Überprüfung dafür ist der R^2-Wert. Je näher dieser Wert an 1 (bzw. 100%) liegt, desto besser passt die erstellte Regression zu den Daten. Die exponentielle Funktion $f(t) = a \cdot b^t$ umschreibt das Zerfallsgesetz mit den Variablen $a = N_0$ und $b = e^{-\lambda}$. Die Zerfallskonstante λ lässt sich also durch b ausdrücken und wird folgendermaßen berechnet:

$$b = e^{-\lambda}$$

$$ln(b) = -\lambda$$

$$\boldsymbol{\lambda = -\ln(b)} \tag{4}$$

Der errechnete Wert für λ wird dann in Gleichung (3) eingesetzt, um damit die Halbwertszeit bestimmt. Da die Einheit der Zerfallskonstante $\left[\frac{1}{s}\right]$ entspricht, wird auch die Halbwertszeit in der Einheit *Sekunde* angegeben.

Für den Fall, dass eine Software mit der exponentielle Regression in Form von $f(t) = a \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ arbeitet, kann der Wert der Zerfallskonstanten direkt abgelesen und in Gleichung (3) eingesetzt werden.

Der Literaturwert der Halbwertszeit von Pa234m beträgt $77\,s$ [Karlsruher Nuklidkarte, 2018]. Eine Beispielrechnung für diesen Rechenweg ist im Anhang zu finden [vgl. A. 2.1].

4.3.2 Auswertung ohne Logarithmus

Für die Auswertung ohne die Verwendung des Logarithmus bedarf es einer kurzen Herleitung. Betrachtet man einen radioaktiven Zerfall, dann halbiert sich die Zahl der unzerfallenen Kerne $N(t)$ mit jeder Halbwertszeit. Dies lässt sich mathematisch folgendermaßen ausdrücken:

Zur Zeit $t = 0$ beträgt die Zahl der unzerfallenen Kerne $N(0)$.

Zur Zeit $t = 1 \cdot T_{1/2}$ beträgt die Zahl der unzerfallenen Kerne: $\frac{1}{2}N(0) = \left(\frac{1}{2}\right)^1 \cdot N(0)$

Zur Zeit $t = 2 \cdot T_{1/2}$ beträgt die Zahl der unzerfallenen Kerne: $\frac{1}{4}N(0) = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot N(0)$

.

.

.

Zur Zeit $t = n \cdot T_{1/2}$ beträgt die Zahl der unzerfallenen Kerne: $N(t) = \left(\frac{1}{2}\right)^n \cdot N(0)$

Nun wird n ausgedrückt durch: $t = n \cdot T_{1/2} \Longleftrightarrow n = \frac{t}{T_{1/2}}$

Dadurch ergibt sich das Zerfallsgesetz ohne die e-Funktion und eine Zerfallskonstante:

$$N(t) = (\tfrac{1}{2})^{\frac{t}{T_{1/2}}} \cdot N(0)$$

Mit dem Gesetz $\dfrac{1}{a^n} = a^{-n}$ lässt sich das Zerfallsgesetz verschönern zu:

$$N(t) = 2^{\left(-\frac{t}{T_{1/2}}\right)} \cdot N(0)$$

Für die Fitfunktion wird das Zerfallsgesetz vereinfacht dargestellt:

$$\mathbf{f(t)} = a \cdot 2^{\left(-\frac{t}{T_{1/2}}\right)} = a \cdot 2^{\left(-\frac{1}{T_{1/2}} \cdot t\right)} = \mathbf{a \cdot 2^{-b \cdot t}} \tag{5}$$

Die Funktion $f(t) = a \cdot 2^{-b \cdot t}$ umschreibt das Zerfallsgesetz mit den Variablen $a = N_0$ und $b = \frac{1}{T_{1/2}}$. Jetzt gilt es nur noch den Wert für b aus Gleichung (5) herauszuschreiben und mithilfe der Formel

$$\mathbf{T_{1/2} = \frac{1}{b}} \tag{6}$$

die Halbwertszeit zu bestimmen [Joachim Herz Stiftung, 2022]. Eine Beispielrechnung für diesen Rechenweg ist im Anhang zu finden [vgl. A. 2.2].

4.4 Messfehler

Bei der Durchführung der Messung kann es durchaus zu Messfehlern kommen. Diese können das Endergebnis des Experimentes beeinflussen. Man sollte sich diese Fehler bewusst machen und versuchen, sie möglichst gering zu halten.

Besonders ausschlaggebend für diesen Versuch ist das menschliche Auge. Es wird benötigt, um gleichzeitig die Zeit abzunehmen sowie die Messwerte abzulesen. Da der Inspector nicht alle $30\,s$ einen Wert ausgibt, muss dieser eigenständig abgelesen werden. Die Schwierigkeit dabei ist, dass die Impulsrate dabei weiterhin kontinuierlich steigt. Die Durchführung des Experiments kann erleichtert werden, wenn die Schüler:innen in den Gruppen die Rollen „Zeitansager:in“, „Messwertableser:in“ und „Messwertprotokollant:in“ einnehmen.

Weiterhin kann die Instabilität des Isotopengenerators zu Messfehlern führen. So kann es vorkommen, dass jemand unabsichtlich während der Messung gegen den Versuchsaufbau oder den Tisch stößt, sodass der Isotopengenerator sich bewegt und dadurch erneut Protactinium angereichert wird. Dies lässt sich oft im Anschluss anhand der Messwerte feststellen, da diese dann für kurze Zeit ansteigen. Dieser Messfehler kann außerdem durch das wiederholte Ein- und Ausschalten des Messgerätes verursacht werden. Um dem entgegenzuwirken, sollte der Versuchsaufbau in der dafür vorgesehen Halterung stehen (vgl. Kap.

3.3 „Halterung“). Zudem sollten die Schüler:innen darauf achten, dieses Experiment mit der nötigen Übersicht durchzuführen.

Mithilfe der Standardabweichung lässt sich für den Mittelwert des Nulleffektes oder für den Mittelwert jeder Einzelmessung (damit sind jeweils alle gemessenen Impulsraten bei $t = 30\,s$; $t = 90\,s$ usw. gemeint) der mittlere statistische Fehler dieser Messungen angeben. Damit kann man bestimmen, wie stark die Streuung der einzelnen Messwerte um den Mittelwert ist.

Mögliche Messfehler sollten am Ende des Experimentes zusammen mit den Schüler:innen besprochen werden.

5. Experimente im naturwissenschaftlichen Unterricht

„Theorie ist eine schöne Sache, aber ein gutes Experiment bleibt für die Ewigkeit“

~Pjotr Kapiza (Nobelpreisträger Physik, 1978)

Das Experiment ist ein Werkzeug der physikalischen Forschung und wird definiert als „ein wiederholbares, objektives, d.h. vom Durchführenden unabhängiges Verfahren zur Erkenntnisgewinnung“ [Kircher et al., 2001a]. Es verlangt im Vorfeld eine umfassende Planung, währenddessen eine präzise Datenaufnahme und im Anschluss eine physikalische Interpretation der Ergebnisse vor einem theoretischen Hintergrund [Kircher et al., 2001a].

Im folgenden Abschnitt wird aufgezeigt, warum Experimente für den naturwissenschaftlichen Unterricht wertvoll sind und wie sie geplant und durchgeführt werden können. Außerdem wird veranschaulicht, wie sich Experimente in der Schule auf politischer Ebene durch die Bildungsstandards begründen lassen.

5.1 Bildungsstandards

Bei der Kultusministerkonferenz (KMK) werden gemeinsame Bildungsstandards entwickelt, die für eine Transparenz schulischer Anforderungen sorgen sollen. Des Weiteren zielen sie darauf ab eine Grundlage zu schaffen, anhand der sich die erreichten Ergebnisse der Schüler:innen überprüfen lassen. Um außerdem die Förderung eines kompetenzorientierten Unterrichts zu gewährleisten, legen die Bildungsstandards fest, welche Kompetenzen[7] die Schüler:innen auf ein bestimmtes Fach bezogen bis zu einer bestimmten Klassenstufe ihrer jeweiligen Schulform entwickelt haben sollen. Für den Umgang mit dem Pa-Generator sind für die Schüler:innen vor allem drei Kompetenzen bzgl. des Experimentierens entscheidend.

[7] *„Unter einer Kompetenz wird dabei die Fähigkeit verstanden, Wissen und Können in den jeweiligen Fächern zur Lösung von Problemen anzuwenden“* [Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen, 2020]

Zum einen zeigt sich in der Sachkompetenz der Schüler:innen die Fähigkeit, naturwissenschaftliche Konzepte, Theorien und Verfahren zu beschreiben, zu erklären und geeignet zu nutzen, um mit Sachverhalten aus Anwendungsbereichen zu arbeiten, die fach- oder alltagsbezogen sind. Dabei gibt es eine starke Wechselwirkung zwischen physikalischem Fachwissen sowie dem experimentellen Arbeiten, da sie sich gegenseitig bedingen und zusammen eine Basis wissenschaftlicher und alltäglicher Sachverhalte bilden.

Zum anderen spielt die Kompetenz der Erkenntnisgewinnung eine wichtige Rolle. Sie umfasst die Fähigkeit der Schüler:innen, naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen zu beschreiben, erklären und zu verknüpfen, um die Erkenntnisprozesse nachvollziehen und dessen Möglichkeiten sowie Grenzen reflektieren zu können. Zu den naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen zählen besonders das Experimentieren und der Umgang mit physikalischen Werkzeugen.

Auch die Kommunikationskompetenz spielt beim Experimentieren eine zentrale Rolle. Dabei bedarf es z.B. der Kenntnis von Fachsprache, wie u. a. Fachbegriffe, Symbole und Einheiten, um Inhalte verstehen und verständlich wiedergeben zu können. Darüber hinaus beschreibt sie die Fähigkeit, aus fachtypischen Darstellungen (z.B. Diagramme) Informationen zu erschließen und diese adressaten- und situationsgerecht darzustellen und sich in Diskussionen darüber auszutauschen [vgl. Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen, 2020].

Im Folgendem werden die für das Experiment mit dem Pa-Generator nützlichen Bildungsstandards im Fach Physik für die allgemeine Hochschulreife genannt:

Die Lernenden ...

S 4 …bauen Versuchsanordnungen auch unter Verwendung von digitalen Messwerterfassungssystemen nach Anleitungen auf, führen Experimente durch und protokollieren ihre Beobachtungen.

S 7 …wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an.

E 4 …modellieren Phänomene physikalisch, auch mithilfe mathematischer Darstellungen und digitaler Werkzeuge, wobei sie theoretische Überlegungen und experimentelle Erkenntnisse aufeinander beziehen.

K 3 …entnehmen unter Berücksichtigung ihres Vorwissens aus Beobachtungen, Darstellungen und Texten relevante Informationen und geben diese in passender Struktur und angemessener Fachsprache wieder.

K 4 …formulieren unter Verwendung der Fachsprache chronologisch und kausal korrekt strukturiert.

K 6 …veranschaulichen Informationen und Daten in ziel-, sach- und adressatengerechten Darstellungsformen, auch mithilfe digitaler Werkzeuge.

K 8 …nutzen ihr Wissen über aus physikalischer Sicht gültige Argumentationsketten zur Beurteilung vorgegebener und zu Entwicklung eigener innererfachlicher Argumentationen.

(S = Sachkompetenz; E = Erkenntnisgewinnungskompetenz; K = Kommunikationskompetenz)

[Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen, 2020]

5.2 Begründung für Experimente im Unterricht

Experimente sind aus didaktischer Sicht dahingehend wertvoll, indem sie aufzeigen, wie physikalische Erkenntnisse gewonnen werden. Sie bilden eine Grundlage für das Wissen unserer technischen Welt und sind damit vergleichbar mit primären Lernobjekten des Physikunterrichts (z.B. physikalischen Begriffe, Gesetze und Theorien). Außerdem dienen sie dazu, Fachbegriffe und Gesetzmäßigkeiten besser zu verstehen und physikalische Zusammenhänge zu erkennen. Experimente fungieren also als *Bindeglied zwischen Theorie und Realität*.

Sie dienen ebenso als *Mittel zur Veranschaulichung* physikalischer Phänomene und Vorstellungen und können als Lernhilfen eingesetzt werden, indem sie theoretische Strukturen der Physik leichter verständlich machen können. Denn viele physikalische Phänomene und Effekte lassen sich theoretisch nicht annähernd so eindrucksvoll beschreiben, wie ein anschauliches Experiment [Kircher et al., 2001]. So beschreibt es auch Nobelpreisträger Piotr Kapiza eingangs in seinem Zitat. Denn die Schüler:innen behalten leichter die Bilder und Beobachtungen eines Experimentes im Kopf, als die Theorie von der Tafel, aus dem Buch oder von dem Arbeitsblatt.

Diese Erkenntnis leitet über zum nächsten Punkt, der *Motivation,* um darzustellen warum Experimentieren im Physikunterricht sinnvoll ist. In einem sonst sehr theorielastigen Physikunterricht kommt den Schüler:innen das selbstständige Durchführen von Experimenten

ihrem natürlichen Drang Neues ausprobieren zu wollen und dem Wunsch nach eigenständigen Handeln entgegen. Experimente können den Physikunterricht erlebnisreicher und ansprechender gestalten und dadurch gleichzeitig eine aktivierende Wirkung aufweisen [Wiater, 2008]. Es kann eine positive Lernmotivation entstehen, wenn die Schüler:innen das Experiment als Möglichkeit zum aktiven, handlungsorientierten Wissenserwerb verstehen. Dies wird insbesondere dadurch erreicht, indem das Experiment die Schüler:innen kognitiv herausfordert und ihnen bei der Durchführung genügend Freiräume gibt. Das Experiment sollte stets eine klare Zielsetzung vorgeben und es sollte funktionieren. Sowohl positive als auch negative Ergebnisse sollten sich diskutieren und in einen größeren Kontext stellen lassen [Labudde, 2010].

Ein weiterer Grund der für das Experimentieren im Physikunterricht spricht, ist der *Erwerb von experimentellen Fähigkeiten und fachspezifischer Handlungsschemata*. Die Schüler:innen lernen den Umgang mit technischen Geräten und können den Aufbau und die Durchführung eines Experimentes durch direkte Beteiligung besser erfassen [vgl. Bildungsstandards, S 4].

Darüber hinaus bietet das Experiment die Möglichkeit, die Sozialform zu wechseln. Dadurch lässt sich *kooperatives Arbeiten in Gruppen* realisieren und die Schüler:innen haben die Möglichkeit, ihr soziales Verhalten in Form von Hilfsbereitschaft, Toleranz, Kooperations- und Kommunikationsfähigkeit etc. zu entwickeln [vgl. Bildungsstandards, K 4].

In Bezug auf soziale Kompetenzen bietet das Experimentieren die Möglichkeit wichtige *Grunderfahrungen zu sammeln*, u. a. das Überwinden von Schwierigkeiten sowie eine erfolgreiche Datenerfassung. Hinzu kommen eine angemessene Einstellung und Werthaltung gegenüber der Physik, indem beim Experimentieren nicht nur präzises, zielstrebiges Arbeiten und Ausdauer, sondern gleichzeitig auch Freude an Physik vermittelt wird.

Letztendlich sind Experimente von Bedeutung, da sie *mit vielen relevanten Unterrichtszielen verknüpft* sind. Dazu gehören z. B.: Physik in Technik und Alltag aufzuzeigen, physikalische Gesetze quantitativ zu prüfen, physikalische Arbeitsweisen einzuüben, zu motivieren und Interesse zu wecken, nachhaltige Eindrücke zu vermitteln und Meilensteine unserer Kulturgeschichte aufzuzeigen [vgl. dazu Kap. 8.2] [Kircher et al., 2001a].

Damit lässt sich erklären, warum naturwissenschaftlich bedeutsames Wissen nicht nur durch theoretische Vermittlung und passive Aufnahme gelernt wird. Vielmehr schult das eigene Untersuchen, Erforschen und Experimentieren das Wahrnehmungsvermögen und ermöglicht ein besseres Verständnis für wissenschaftliche Zusammenhänge. Dies entspricht auch Kapiza's einleitendem Zitat: *„Theorie ist eine schöne Sache, aber ein gutes Experiment bleibt für die Ewigkeit"* [Pjotr Kapiza, 1978].

5.3 Realisierung eines Experiments im naturwissenschaftlichen Unterricht

Nachdem nun erläutert worden ist, warum das Experimentieren den naturwissenschaftlichen Schulalltag bereichert, muss noch geklärt werden, wie ein Experiment im Unterricht durchgeführt wird. Dies wird anhand des Experimentierzyklus [vgl. Abb. 7 im Anhang] veranschaulicht [Labudde, 2010]. Zuerst sammelt die Lehrkraft die Vorerfahrungen der Schüler:innen und leitet die Aufmerksamkeit und das Interesse auf den neuen Lerninhalt bzw. das zu untersuchende Phänomen. Nach Erläuterung der Vorgehensweise können die Schüler:innen Fragen zum Experiment stellen. Anschließend formulieren sie eine Vermutung bzw. Hypothese über den Verlauf oder den Ausgang des Experimentes (optional). Je nach Klassenstufe lässt sich die Durchführung eines Experimentes variieren. Dies ist abhängig von den benötigten Fähigkeiten und Fertigkeiten der Schüler:innen, von der Beteiligung der die Lehrkraft, von der Organisationsform (Demonstrationsversuch oder Schülerversuch), von der Art der Aufgabenstellung (offen oder geschlossen) sowie vom Einsatz der erforderlichen Werkzeuge. Dementsprechend wird je nach den von der Lehrkraft gewählten Methoden das Experiment geplant und durchgeführt. Dabei werden die nötigen Daten gesammelt, mit denen anschließend die Auswertung und die daraus resultierende Schlussfolgerung stattfindet. Dabei wird meistens die zuvor aufgestellte Hypothese überprüft. Das Experiment gibt nun Anlass zur Kommunikation, Evaluation und Erweiterung des Inhaltes [Labudde, 2010].

5.4 Vorüberlegungen bei der Planung eines Experimentes

Wenn eine Lehrkraft die Durchführung eines Experiments im Unterricht plant, müssen im Vorfeld einige Aspekte berücksichtigt werden. Die Durchführung ist oftmals mit einem ho-

hen Geräteaufwand verbunden. Es wurde daher ein Klassensatz von Pa-Generatoren und Halterungen hergestellt, und es stehen ebenso viele Messgeräte zur Verfügen, sodass die Schüler:innen in mehreren Kleingruppen zusammenarbeiten können. Weiterhin ist zu bedenken, dass das Experimentieren nicht nur einen größeren Vorbereitungsaufwand, sondern auch einen höheren Betreuungsaufand während des Unterrichts beinhaltet, da die gleichzeitige Betreuung von mehreren Schüler:innengruppen auch sicherheitsrelevante Aspekte berücksichtigen muss. Um allerdings dem größeren Vorbereitungsaufwand sowie dem Aufwand an Unterrichtszeit für Vorbereitung, Durchführung und Nachbesprechung vorzubeugen, wurde diese Arbeit entwickelt. Einen Ablaufplan für die Unterrichtsstunde und weitere Unterrichtsvorbereitungen befinden sich in Kapitel 8.7 sowie im Anhang..

Ferner ist zu beachten, dass in einem schülerzentrierten Experiment Disziplinschwierigkeiten auftreten können. Mögliche Vorbeugungsmaßnahmen sind, die Schüler:innen hinreichend auf das Experiment vorzubereiten, sodass alle Inhalte genügend aufgearbeitet sind und Aufgabenstellungen so anzulegen, dass sie eine eigenverantwortliche Anpassung des Schwierigkeits- und Herausforderungsgrades erlauben. Bei dem Pa-Generator wird diese Differenzierung erreicht, indem zwei Möglichkeiten zur Auswertung der Experiments angeboten werden [vgl. Kap. 4.3].

Darüber hinaus ist beim Experimentieren auf die Sicherheitsaspekte hinzuweisen. Diese werden für den Pa-Generator in der Präsentation auf Folie 3 veranschaulicht [vgl. A. 3].

Generell ist eine aktive Teilnahme der Schüler:innen wichtig. Um im Vorfeld den individuellen Bezug zum Experiment zu verstärken, lassen sich z.B. Prognosen über den Ablauf oder das Ergebnis machen. Im Falle des Pa-Generators besteht die Möglichkeit, dass die Schüler:innen im Vorfeld des Experiments die Halbwertszeit von Pa-234m schätzen und den geschätzten Wert nach der Durchführung sowohl mit dem gemessenen als auch mit dem Literaturwert selbstständig vergleichen. Anstelle der Halbwertszeit könnte den Schüler:innen auch die Information, dass es sich bei dem Isotop um Pa-234m handelt, vorenthalten werden. Sie müssten das Isotop anhand ihrer Messergebnisse und einer Nuklidkarte selbst herausfinden.

In einer abschließenden Fehleranalyse evaluieren Lehrkraft und Schüler:innen gemeinsam, ob ihre Messungen gut funktioniert (= nahe dem Literaturwert) haben und wenn nicht, was dafür ausschlaggebend und verbesserungsfähig sein könnte [Kircher et al., 2001b].

6. Strahlenschutzaspekte

Beim Umgang mit radioaktiven Materialien muss sich auch dementsprechend vor der emittierten Strahlung geschützt werden. Bei der Strahlenexposition wird zwischen externer und interner Bestrahlung unterschieden. Bei der externen Bestrahlung wirkt die Strahlungsquelle von außen auf den Körper ein. Bei der internen hingegen geht die Bestrahlung von im Körper befindlichen radioaktiven Stoffen aus. Beim Umgang mit dem Isotopengenerator beschränkt sich die Gefahr auf externe Strahlenexposition, vorausgesetzt dieser wird sachgemäß behandelt.

Als Grundregel des Strahlenschutzes gilt z.B. das „Alara"-Prinzip, was als Abkürzung für „As low as reasonably achievable" steht. Es bedeutet, dass die Strahlenbelastung so gering zu halten ist, wie es die Mittel ermöglichen. Als weiteres Leitprinzip gilt die „3 A"-Regel:

➡ **A**bstand halten

➡ **A**ufenthaltsdauer minimieren

➡ **A**bschirmung maximieren

Die erste Regel wurde aufgestellt, um die durch eine radioaktive Quelle bewirkte Dosis durch möglichst großen Abstand zu verringern. Die zweite Regel besagt, die Aufenthaltsdauer in der Nähe einer radioaktiven Quelle möglichst gering zu halten, da die Dosis linear mit der Zeit ansteigt. Und die dritte Regel sagt aus, dass eine Abschirmung die Dosis verringert. Die sich daraus ergebenen Sicherheitsaspekte sollten im Vorfeld in der Unterrichtseinheit hervorgehoben werden [Vogt & Vahlbruch, 2019].

Um Unsicherheiten zum Thema Strahlenschutz auszuschließen, sollte im Vorfeld entsprechendes Regelwerk eingehend beachtet werden. Dazu zählen z.B. Euratom, das Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) oder die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV). Letztere legt fest, welche „grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung gelten" [Bundesministerium der Justiz, 2018]. Somit gibt sie an, welche Vorgaben bei dem Bau eines Isotopengenerators unter der Verwendung von Uran-238 einzuhalten sind.

Für einen genehmiungs- und anzeigefreien Umgang muss nach § 5 (1) in Verbindung mit Anlage 3, Teil B, Nummer 8 der StrlSchV folgendes eingehalten werden:.

1. Die enthaltenen radioaktive Stoffe müssen umschlossen und berührungssicher abgedeckt sein.

2. Die Ortsdosisleistung im Abstand von 0,1 m von der berührbaren Oberfläche der Vorrichtung darf 1 µSv/h bei normalen Betriebsbedingungen nicht überschreitet.

3. Die Aktivität der in der Vorrichtung enthaltenen radioaktiven Stoffe darf das Zehnfache der Freigrenzen nicht überschreitet.

Der erste Punkt wurde beim Bau der Präparate durch die Kunststoffbehältnisse erfüllt [vgl. Kap. "3.1 Das Behältnis"].

Die unter 2. genannte richtungsunabhängige Umgebungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}^*(10)$ entspricht in 0,1 m Abstand bei einer Aktivität von10 kBq ungefähr ≤ 1 µSv/h und gilt dadurch als genehmigungsfreies Schulpräparat [Vogt & Vahlbruch, 2019].

Zu 3. befinden sich in der StrlSchV in Anlage 4, Tabelle 1, Spalte 2 die Freigrenzen für radioaktive Stoffe. Die Freigrenze beschreibt die Aktivität, welche beim herkömmlichen Umgang mit radioaktiven Präparaten nur eine vernachlässigbar kleine Gefahr darstellt. Laut Anlage 4 der StrlSchV entspricht die Freigrenze von U-238+ einer Aktivität von 10 kBq[8]. Die spezifische Aktivität von U-238 ohne Berücksichtigung der Folgeprodukte beträgt 12,4 kBq/g. Bei 1,7 g verwendeten Uranylnitrat-Hexahydrat ($UO_2(NO_3)_2 * 6\ H_2O$) entspricht das einer Gesamtaktivität des Urans von ca. 10 kBq. Die geringe Aktivität kommt zustande, da das Uranylnitrat-Hexahydrat zwar eine molare Masse von 502,13 g/mol besitzt, aber davon nur 238 g/mol Uran enthält [vgl. Kap. "3.2 Das Stoffgemisch“]. Die Aktivität darf sogar bis zu einem Zehnfachen der Freigrenze entsprechen. Dies wurde somit eingehalten.

Der Umgang mit dem Protactiniumgenerator ist somit genehmigungsfrei, denn er erfüllt alle Anforderungen nach § 5 und Anlage 3, Teil B, Nummer 8 der StrlSchV.

[8] Das „+“ bedeutet, dass alle kurzlebigen Folgeprodukte der U-238 Zerfallsreihe mit berücksichtigt sind.

Daneben sieht die StrlSchV unter Anlage 3 Teil B vor, dass „der Umgang mit abgereichertem Uran in Form von Uranylverbindungen zu chemisch-analytischen oder zu chemisch-präparativen Zwecken mit einer Gesamtmasse des Urans von bis zu 30 Gramm“ genehmigungsfrei ist [Bundesministerium der Justiz, 2018]. Da beim Bau des Isotopengenerators 1,7 g Uranylnitrat verwendet wurden, liegt auch dieser Wert im genehmigungsfreien Bereich.

Es bestehen keine weiteren Tätigkeitsbeschränkungen, weil die erwartbare jährliche Dosis den Grenzwert für die Normalbevölkerung von 1 mSv nicht übersteigt [Bundesministerium der Justiz, 2018].

7. Erfahrungen aus der Schule

Der Versuch mit dem Protactiniumgenerator wurde bereits im Rahmen des mobilen Schülerlabors „RadLab“, welches von Dennis Raulin im Rahmen seiner Masterarbeit am Institut für Radioökologie und Strahlenschutz entwickelt wurde, in der 11. Klasse des Gymnasiums Limmer durchgeführt [vgl. Raulin, 2022]. Vor Beginn dieser Bachelorarbeit habe ich Herrn Raulin an einem Tag in diese Schule begleitet und ihn bei der Umsetzung dieses Experimentes unterstützt. Dabei wurde mir gleichzeitig die Möglichkeit geboten, erste Erfahrung zu sammeln und die Schüler:innen bei der Durchführung des Experiments mit dem Isotopengenerator zu beobachten.

In dieser Unterrichtsstunde (Dauer: 90 min) wurde die Klasse in sechs Gruppen mit je 5-7 Schüler:innen eingeteilt. In den ersten 40 Minuten beschäftigten sich jeweils drei Gruppen mit dem Protactiniumgenerator und die restlichen drei Gruppen mit einem anderen Versuch aus dem „RadLab“. Danach wurde erneut für 40 Minuten getauscht, sodass jede Gruppe beide Versuche durchgeführt hat. In den letzten zehn Minuten wurden die Ergebnisse im Unterrichtsgespräch zusammengefasst. Die Versuchsdurchführung für den Pa-Generator unterschied sich dabei hinsichtlich Kapitel "4.2 Durchführung“ in folgenden Punkten:

Zur Vorbereitung auf den Versuch sollten sich die Schüler:innen Zuhause Lernvideos zum Thema Halbwertszeit und Logarithmus anschauen. Der Nulleffekt wurde wie in Kapitel 4.2 als erste Alternative beschrieben und *vor* dem Schütteln des Isotopengenerators gemessen. Danach wurde innerhalb eines Zeitraums von ca. 7 min abwechselnd $30\,s$ gemessen und danach für $30\,s$ die Messung pausiert. Die Halbwertszeit des Protactiniums sollten von den Schüler:innen nach "4.3.1 Auswertung mit Logarithmus“ mit der exponentielle Regression der Form $f(t) = a \cdot b^t$ bestimmt werden. Anschließend sollte das berechnete Ergebnis mit dem Literaturwert durch selbstständiges Finden der Halbwertszeit von Pa-234m auf einem Ausschnitt der Nuklidkarte verglichen werden.

In dieser Doppelstunde wurden folgende Erfahrungen gemacht und daraus erste Schlüsse gezogen:

Die Unterrichtsstunde betrug für den Versuch mit dem Pa-Generator inklusive der Nachbesprechung ca. 45 Minuten. Die bemessene Zeit hat sich als sehr knapp herausgestellt, wodurch die Nachbesprechung recht kurz ausfiel. Um Zeit einzusparen, kann im Vorfeld des

Experimentes die Versuchsanleitung als Hausaufgabe vorbereitet werden. Außerdem stand den Gruppen nur ein einziger Isotopengenerator zur Verfügung, wodurch viel Zeit verschenkt wurde und manche Gruppen für kurze Zeit keine Aufgabe hatten. Deshalb werden im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit mehrere Pa-Generatoren als Klassensatz hergestellt sowie eine detaillierte Anleitung zur Herstellung veröffentlicht [vgl. Kap. "3 Herstellung"]. Als nachteilig erwies sich auch, wenn die Arbeitsgruppen zu groß waren. Nicht alle Gruppenmitglieder können am Experiment mitwirken und verhalten sich deshalb passiv. Kleinere Gruppen von 3-4 Personen können dem entgegenwirken, um die gleichzeitigen Aufgaben der Zeitmessung, dem Ablesen der Impulsrate sowie der Aufzeichnung der Messwerte zu bewältigen und abschließend zusammen in der Gruppe die Halbwertszeit ermitteln zu können.

Eine weitere Erkenntnis des Unterrichtsversuchs war, dass in manchen Gruppen der erste Wert der Messung eine deutliche Abweichung aufwies, wie es unter "4.3 Auswertung" bereits erklärt wurde. Radioaktive Gleichgewichte sind Schüler:innen des 9.-11. Jahrgangs allerdings nicht bekannt, weshalb für diesen Prozess eine verständliche Erklärung gefunden werden sollte.

Zudem wurde, wie oben genannt, der Nulleffekt vor der eigentlichen Messung bestimmt. Dies hat nicht nur mehr Zeit in Anspruch genommen, sondern sorgte zusätzlich für Verwirrung, da der Nulleffekt für $60\,s$ gemessen werden sollte, die Messung der Impulsrate hingegen nur alle $30\,s$. Dadurch wurde von fast allen Gruppen vergessen, die gemessenen Nullraten zu halbieren. Dieses Problem lässt sich lösen, indem die andere Methode zur Bestimmung des Nulleffektes gewählt wird [vgl. Kap. "4.2 Durchführung"].

Eine weitere Herausforderung stellte die Art des Rechenmediums dar. Diese Schule nutzt iPads mit der App „CASeasy+“. Diese verwendet als exponentielle Regression die Funktion $f(t) = a \cdot e^{-\lambda \cdot t}$, wodurch die Zerfallskonstante direkt angegeben wird und dadurch ein Rechenschritt überflüssig ist. Die Lehrkraft sollte sich daher im Vorfeld informieren, welches Medium zur mathematischen Darstellung in der jeweiligen Schule verwendet wird.

Auch ist der mathematische Zusammenhang zwischen der e-Funktion und dem natürlichen Logarithmus noch nicht bekannt gewesen, sondern wurde als „Blackbox“ gehandhabt. Au-

ßerdem sollten die Lernvideos zusätzlich als Aufklärung dienen. Auch diese Information sollte im Vorfeld mit den zuständigen Lehrkräften der Klasse ausgetauscht werden, um sich dementsprechend für eine Auswertung mit oder ohne Logarithmus zu entscheiden [vgl. Kap. 4.3.1 & 4.3.2].

Des Weiteren wurde bei der Auswertung festgestellt, dass in den Gruppen, in denen die Halbwertszeiten deutlich von Literaturwert abwichen, der Pa-Generator während der Messung wiederholt bewegt wurde oder sogar umgefallen ist. Der Grund dafür war der zu kleine Aufsatz für das Messgerät, sodass der Isotopengenerator dadurch keinen festen Stand hatte. Deshalb wurden neue Halterungen entworfen und gebaut, die einen sicheren Stand sowohl des Messgerätes als auch des Isotopengenerators gewährleisten. Andererseits eignen sich nicht gelungene Versuche auch gut zur Erarbeitung einer Fehleranalyse.

Basierend auf diesen im Vorfeld gemachten Erfahrungen wurde nun ein Unterrichtskonzept zur Bestimmung der Halbwertszeit von Protactinium entwickelt.

8. Unterrichtskonzept für den Protactiniumgenerator

Dieser Unterrichtsentwurf wurde in Anlehnung an Jank & Meyer [1991] konzipiert.

8.1 Kerncurriculare Vorgaben

Jede Unterrichtsstunde basiert auf der Grundlage von Lehrplänen, die sich vom Kerncurriculum ableiten. Dieses greift auf die in Kapitel 5.1 erwähnten Bildungsstandards zurück. Dabei existiert für jede Schulform, jedes Fach und für jedes Bundesland ein eigenes Kerncurriculum. Es umfasst die wesentlichen Lehrinhalte zu vorgeschriebenen Themenbereichen, die in einer bestimmten Klassenstufe behandelt werden sollen. Innerhalb der Themenbereiche wird nochmals in inhalts- und prozessbezogene Kompetenzen unterschieden. Im inhaltsbezogenen Kompetenzbereich wird das zu lernende Fachwissen vorgestellt. Die prozessbezogenen Kompetenzen hingegen gliedern sich in die Punkte Erkenntnisgewinnung, Kommunikation und Bewertung [vgl. Kap. "5.1 Bildungsstandards"]. Sie veranschaulichen weniger den Inhalt sondern mehr die Verfahren, die von den Schüler:innen gelernt werden sollen, um gelerntes Wissen überhaupt anwenden zu können. Diese Arbeit konzentriert sich auf die Inhalte des Kerncurriculums der Sekundarstufe I für das Fach Physik des Landes Niedersachsen [Niedersächsisches Kultusministerium, 2015b].

Das Thema Halbwertszeit lässt sich im niedersächsischen Kerncurriculum dem Themenbereich Atom- und Kernphysik zuordnen. Dieser ist für die Klassenstufe 9/10 und somit für die Sek. I festgelegt. Durch die wieder eingeführte G9 Regelung ist diese Unterrichtseinheit auch für die Qualifikationsphase (11. Klasse) geeignet. Für das Thema ist folgende **inhaltliche Kompetenz** vorgesehen:

Die Schülerinnen und Schüler…

… beschreiben den radioaktiven Zerfall eines Stoffes unter Verwendung des Begriffes Halbwertszeit.

Des Weiteren lassen sich im Kerncurriculum folgende **prozessbezogene Kompetenzen** zuordnen:

Erkenntnisgewinnung

Die Schülerinnen und Schüler…

… stellen die Abklingkurve grafisch dar.

… fertigen auch nichtlineare Graphen an, nutzen die eingeführte Rechner-Technologie zur Ermittlung funktionaler Zusammenhänge und erstellen eine geeignete Dokumentation der Arbeitsschritte.

Kommunikation

Die Schülerinnen und Schüler…

… übernehmen Rollen in Gruppen.

… wählen Informationen aus Formelsammlung und anderen geeigneten Quellen sachgerecht aus.

… wählen die Sprachebene adressatengerecht aus.

[vgl. Niedersächsisches Kultusministerium, 2015b]

Basierend auf diesen inhalts- und prozessbezogenen Kompetenzen aus dem Kerncurriculum werden im folgenden Kapitel die Lernziele formuliert.

8.2 Ziele und Kompetenzen

Bevor eine Unterrichtseinheit geplant wird, muss die Lehrkraft sich Gedanken darüber machen, welche Lerninhalte den Schüler:innen vermittelt werden sollen. Deshalb ist es wichtig, sich die mit dieser Unterrichtseinheit verfolgten Ziele bewusst zu machen. Als sogenannte Grobziele dienen sowohl die eben erwähnten Kompetenzen aus dem Kerncurriculum [vgl. Kap. 8.1] als auch die Bildungsstandards zum Experimentieren [vgl. Kap. 5.1]. Diese lassen sich nun für die Unterrichtseinheit zum Isotopengenerator in Feinziele gliedern und zusätzlich durch motorische Fertigkeiten ergänzen.

8.2.1 Kognitive Lernziele

Die inhaltlichen Grobziele dieser Unterrichtseinheit sind zum einen, dass die Schüler:innen den Begriff Halbwertszeit anhand eines anschaulichen Beispiels erklären können. Zum anderen sollen Schüler:innen die Halbwertszeit experimentell und mithilfe mathematischer

und grafischer Auswertungsmethoden bestimmen können. Werden diese inhaltlichen Grobziele in ihre Feinziele gegliedert, dann lauten diese wie folgt:

Die Schülerinnen und Schüler…

… können den Begriff Halbwertszeit in Zusammenhang mit dem radioaktiven Zerfall erklären.

… können Folgeprodukte der U-238-Zerfallsreihe mithilfe der Nuklidkarte bestimmen.

… können Isotope selbstständig anhand ihrer Halbwertszeit auf der Nuklidkarte ausfindig machen.

… können einen digitalen Graphen anhand selbst gemessener Werte mit entsprechenden Hilfsmitteln erstellen.

… können eine exponentielle Regression durchführen und daraus die Halbwertszeit bestimmen (wenn Logarithmus bekannt).

… können mithilfe einer vorgegebenen Fitfunktion eine Regression durchführen und daraus die Halbwertszeit bestimmen (wenn Logarithmus unbekannt).

… können die Halbwertszeit eines exponentiellen Abklingprozesses nach vorgegebenen Arbeitsschritten berechnen.

8.2.2 Soziale Lernziele

Soziale Kompetenzen sind notwendig, um angemessen mit seinen Mitmenschen und sich selbst umgehen zu können. Dies spielt vor allem im späteren Berufsleben eine sehr wichtige Rolle.

Die Schülerinnen und Schüler…

… lernen im Team zusammenzuarbeiten und entwickeln eine Arbeitsteilung.

… entwickeln Selbstvertrauen und Sicherheit im Umgang mit radioaktiven Stoffen.

… üben sich in Ausdauer und Konzentration, auch bei länger andauernden Messungen.

… können ihre Ergebnisse unter Verwendung von Fachsprache im Plenum vorstellen.

8.2.3 Motorische Lernziele

Die motorischen Ziele beziehen sich auf die motorischen und koordinativen Fertigkeiten wie z.B. dem Krafteinsatz, das Gleichgewicht oder eine konkrete Bewegungsausführung.

Die Schülerinnen und Schüler…

… sind in der Lage den Versuch ohne größere Störung am Versuchsaufbau durchzuführen und üben dabei ihre Feinmotorik.

8.2.4 Weiterführende Lernziele

Als vertiefendes Lernziel zur Überprüfung und Anwendung des neu erworbenen Wissens lässt sich folgendes formulieren:

Die Schülerinnen und Schüler…

… nutzen ihr Wissen, um zur Frage des radioaktiven Abfalls Stellung zu nehmen.

Dieses Lernziel kann je nach Bildungsstand der Klasse für alle oder als differenzierte Lernaufgabe für leistungsstarke Gruppen innerhalb einer Klasse gestellt werden. Es lässt sich unter den prozessbezogenen Kompetenzen im Bereich „Bewertung“ zuordnen. Es ermöglicht gleichzeitig einen fächerübergreifenden Bezug.

8.3 Didaktische Analyse

Die didaktische Analyse nach W. Klafki [1963] dient zur Begründung des Lerngegenstands. Bei der Unterrichtsplanung hat eine Lehrkraft trotz aktueller Bildungspläne viel Freiraum für die Wahl eines Themas. Daher muss die Entscheidung dafür bewusst getroffen werden, und es sollte erklärt und begründet werden können, warum dieser Lerngegenstand bedeutsam und geeignet ist. Die formale Legitimation der Stunde ist durch das Kerncurriculum Physik gegeben. Im Bereich der inhaltsbezogenen Kompetenzen wird gefordert, dass die Schüler:innen den radioaktiven Zerfallsprozess eines Stoffes unter Verwendung des Begriffs Halbwertszeit beschreiben können [vgl. Kap. "8.1 Kerncurriculum“]. Dabei fokussiert sich diese Unterrichtsstunde auf die Halbwertszeit. Die allgemeine Bedeutung des Themas liegt darin, dass ein radioaktiver Zerfallsprozess anhand der Halbwertszeit sehr genau vorhergesagt werden kann.

8.3.1 Gegenwartsbedeutung

Die Gegenwartsbedeutung beschäftigt sich mit der Frage, welche Bedeutung der Lerngegenstand bereits im geistigen Leben der Schüler:innen einer 9.-11. Klasse hat bzw. welche er haben sollte.

Das Thema besitzt dahingehend eine gesellschaftliche Relevanz, dass die Halbwertszeit eine der maßgebenden Größen beim Zerfall radioaktiver Stoffe darstellt. Sie ist vor allem von Bedeutung, wenn es z. B. um das Problem der Endlagerung mancher radioaktiver Stoffe (Atommüll) geht. Von diesem Problem sollte ein Großteil der Schüler:innen bereits gehört haben.

Weiterhin stellt diese Unterrichtsstunde für die Klassen, die sich bereits theoretisch mit exponentieller Abnahme von Funktionen beschäftigt haben, eine gute Gelegenheit dar, die Theorie in die Praxis umzusetzen. Damit ist gemeint, dass die e-Funktion durch die Auswertung des Versuchs eine anwendungsbezogene Bedeutung für die Schüler:innen bekommt. Dies kann dazu führen, dass das Verständnis für exponentielle Prozesse geschärft und ausgebaut wird.

Außerdem wird durch den Gebrauch von technischen Geräten das Selbstbewusstsein im Umgang mit diesen gefördert. Das wirkt sich auch positiv auf andere naturwissenschaftliche Fächer aus, in denen experimentiert wird. Zusätzlich kann auch die Freude am experimentellen Entdecken gesteigert werden.

8.3.2 Zukunftsbedeutung

Mit der Frage nach der Zukunftsbedeutung des Themas für die Schüler:innen lässt sich an das Kapitel der Gegenwartsbedeutung anknüpfen. Die Halbwertszeit von radioaktiven Abfällen ist so hoch, dass auch zukünftige Generationen sich mit dieser Problematik auseinandersetzen müssen. Dazu zählt auch der Umgang mit der Kernenergie im Allgemeinen. Daher ist es die Aufgabe der Schule, diesen Inhalt zur künftigen Lebensbewältigung zu thematisieren.

Weiterhin soll der Physikunterricht den physikalischen Kern moderner Technik und Technologien für die Schüler:innen verständlich machen, um eine Grundlage für deren Nutzung

im späteren Beruf zu schaffen. In der aktuellen Wissenschaft wird z. B. für die sogenannte C-14-Methode von der Halbwertszeit Gebrauch gemacht. Durch sie lässt sich das Alter von kohlenstoffhaltigen Materialien und toten Lebewesen bestimmen. Es ist eine der gängigsten Methoden, um z. B. das Alter längst verstorbener Organismen und somit mehr über unsere Welt herauszufinden.

Ferner lernen die Schüler:innen wissenschaftliche Arbeitsweisen im Bereich des Experimentierens sowie beim Interpretieren und Darstellen von Ergebnissen. Die Frage nach der Bedeutung eines Themas aus Sicht der Schüler:innen führt zu interessanten Einstiegen für die Unterrichtseinheit.

8.3.3 Zugänglichkeit des Themas

Die erste Phase einer Unterrichtsstunde bildet die Phase der Motivation und der Problemstellung. Darin wird versucht, das Interesse der Schüler:innen für ein bestimmtes Thema zu entwickeln. In dieser Unterrichtseinheit beginnt der Einstieg mit der Frage, welches Isotop sich in dem Isotopengenerator befindet. Der Unterrichtseinstieg findet somit über ein technisches Problem statt [Kircher et al., 2010]. Dies soll die Neugier und gleichzeitig den Forscherinstinkt der Schüler:innen wecken. Anschließend wird hinterfragt, mit welcher Methode sich das Isotop feststellen lässt. Die Antwort darauf ist durch die Messung der Halbwertszeit des Isotops und dem anschließenden Vergleichen dieser mit den Isotopen der Uran-238-Zerfallsreihe auf der Nuklidkarte. Sind die Schüler:innen zu dieser Erkenntnis gelangt, ist der Einstieg beendet und es folgt die Einweisung in das Experimentieren.

8.3.4 Sachstruktur

Die Sachstruktur stellt die thematische Strukturierung einer Unterrichtseinheit dar. Im Folgenden wird beschrieben, was der geplanten Unterrichtseinheit bislang inhaltlich vorausgegangen sein sollte und welche Vorkenntnisse die Schüler:innen bereits besitzen sollten. Danach wird dargelegt, wie diese Unterrichtseinheit grob strukturiert ist. Es wird auch darauf eingegangen, was in der Stunde danach folgt, und ob etwas aus diesem Unterricht aufgegriffen wird.

Vor der Unterrichtseinheit

In Anlehnung an das niedersächsische Kerncurriculum für das Fach Physik (Sek. I) sollten die Schüler:innen zum besseren Verständnis der geplanten Unterrichtseinheit folgende Vorkenntnisse besitzen:

Die Schülerinnen und Schüler können…

… das Kern-Hülle-Modell vom Atom beschreiben und den Begriff Isotop erläutern.

… den Aufbau und die Wirkungsweise eines Geiger-Müller-Zählrohrs beschreiben.

… ihre Kenntnisse über natürliche und künstliche Strahlungsquellen wiedergeben.

… α-, β-, γ-Strahlung anhand ihres Durchdringungsvermögens unterscheiden und ihre Entstehung modellhaft beschreiben.

… Strahlenschutzmaßnahmen mithilfe dieser Kenntnisse erläutern.

… eine Definition der Halbwertszeit wiedergeben.

… den Aufbau der Nuklidkarte erläutern.

… das Zerfallsgesetz erläutern.

[Niedersächsisches Kultusministerium, 2015b]

Die letzten beiden Vorkenntnisse beziehen sich dabei überwiegend auf die Qualifikationsphase. Zur Durchführung der Unterrichtseinheit sollte im Vorfeld sichergestellt sein, dass die Schüler:innen bereits mit der Nuklidkarte vertraut sind, auch wenn sie sich noch nicht in der Qualifikationsphase befinden.

Des Weiteren sollten aus dem Mathematikunterricht bereits folgende Kenntnisse im Lernbereich exponentielles Wachstum für die Klassenstufe 9 und 10 vermittelt worden sein:

Die Schülerinnen und Schüler…

… nutzen […] das Logarithmieren als Umkehroperationen zum Potenzieren.

… kennen den Zusammenhang von Funktionsgleichung und -graph für $f(t) = a \cdot b^x$.

[Niedersächsisches Kultusministerium, 2015a]

Sollte der Logarithmus noch nicht bekannt sein, besteht die Möglichkeit, die Auswertung ohne diesen durchzuführen [siehe dazu Kap. 4.3.2].

Im Rahmen des mobilen Schülerlabors „RadLab“ hat D. Raulin zwei Lernvideos zu den Themen „Halbwertszeit“ und „Exkurs Logarithmus“ erstellt [vgl. Raulin, 2022]. Diese stehen dankenswerterweise auch dieser Arbeit zur Verfügung. Dadurch haben alle Klassen, die diese Unterrichtseinheit zum Isotopengenerator durchführen die Möglichkeit, sich die Videos im Vorfeld anzuschauen. Das sollte für alle beteiligten Schüler:innen als Vorbereitung auf die Unterrichtseinheit dienen. Die Verlinkung zu den Videos befindet sich in Kapitel 8.6.3.

Während der Unterrichtseinheit

Die Unterrichtsstunde verfolgt das Ziel, durch selbstständige Messungen in Kleingruppen die Halbwertszeit eines Isotops zu bestimmen. Als thematischer Einstieg bietet es sich an den Schüler:innen nicht zu erzählen, um welches Isotop es sich in den Generatoren handelt. Sie sollen selbst als „Entdecker“ aktiv werden und anhand der gemessenen Halbwertszeit und einer Nuklidkarte das gesuchte Isotop identifizieren. Als Tipp erhalten sie die Information, dass es sich um ein Isotop aus der Uran-238-Zerfallsreihe handelt. Die Vorteile eines entdeckenden Unterrichtskonzeptes sind dem Kapitel 8.5.2 zu entnehmen.

Im weiteren Verlauf werden die Sicherheitsaspekte im Umgang mit radioaktiven Materialien besprochen. Anschließend wird die Klasse in Gruppen von 3-4 Schüler:innen eingeteilt, um dann das Experiment durchzuführen. Ist das Experiment abgeschlossen, werden die Messergebnisse der Halbwertszeiten sowie die vermeintlich gemessenen Isotope im Plenum verglichen, und es erfolgt die Auflösung. Danach wird eine allgemeine Definition der Halbwertszeit festgehalten. Diese Definition gilt als „Mindestwissen“, welches aus der Stunde mitgenommen werden sollte. Abschließend werden noch Fragen zum Experiment und der Auswertung gestellt. Diese könnten beispielsweise folgendermaßen lauten:

- Ist Vermutung/Hypothese bestätigt worden?
- Gab es etwas Überraschendes oder Unerwartetes?
- Was könnte das Resultat beeinflusst haben?

- Wie ließe sich das Experiment verbessern?

Mögliche Antworten von den Schüler:innen auf die erste Frage könnte entweder „*Ja, wir haben das richtige Isotop anhand der gemessenen Halbwertszeit bestimmt.*“ oder „*Nein, wir konnten das richtige Isotop nicht herausfinden.*“ sein. Für letztere Antwort kann es verschiedene Gründe geben, die es in einem Unterrichtsgespräch mit den Schüler:innen herauszufinden gilt. Für abweichende Messungen verantwortlich sein könnten z.B. Messfehler, fehlerhaftes Ablesen der Nuklidkarte, Rechenfehler, Äußere Störungen am Versuchsaufbau während der Messung etc. Diese Frage dient dazu, dass die Schüler:innen ihre Handlungen reflektieren und lernen, eine Fehleranalyse durchzuführen.

Sollten alle Gruppen das richtige Isotop herausgefunden haben, dann bietet sich Frage 3 „Was könnte das Resultat beeinflusst haben?“ an, um den Handlungsablauf zu reflektieren. Die möglichen Antworten sind dann ähnlich zu denen aus Frage 1.

Die zweite und die letzte Frage dienen dazu, eventuelle Verbesserungsvorschläge für das Experiment zu sammeln und diese ggf. zu korrigieren.

Nach der Unterrichtseinheit

In der nächsten Unterrichtsstunde sollte das neu erworbene Wissen der Schüler:innen vertieft und anschließend darauf aufgebaut werden. Bei der Vertiefung soll das Neugelernte nicht nur wiederholt, sondern in eine Beziehung zu bereits gelernten Themen gebracht werden. Es kann auch auf neue Situationen transferiert werden [Kircher et al., 2001a]. Dafür bietet sich das in Kapitel "8.2.4 Weiterführende Ziele" genannte Lernziel an, in dem die Schüler:innen ihr Wissen über die Halbwertszeit nutzen sollen, um zur Frage des radioaktiven Abfalls Stellung zu nehmen. Ebenfalls könnte in der Qualifikationsphase mit der in Kapitel "8.3.2 Zukunftsbedeutung" erwähnten C-14-Methode thematisch angeschlossen werden. Auch in Medizin, Technik und Forschung finden Strahlenquellen ihre Anwendung, daher ließe sich thematisch auch dahingehend aufbauen.

8.3.5 Schülervorstellungen

Die Ursache vieler Lern- oder Verstehensschwierigkeiten bei Schüler:innen liegt oft darin, dass die meisten Vorstellungen, mit denen sie in den Unterricht kommen, nicht mit den

wissenschaftlichen Vorstellungen übereinstimmen. Um damit umzugehen, müssen Lehrkräfte die geläufigen Schüler- bzw. Alltagsvorstellungen zu bestimmten physikalischen Begriffen und Phänomenen der Schüler:innen zunächst kennen, durch gezielte Unterstützung daran anknüpfen und so einen Konzeptwechsel einleiten (conceptual change). Dieser ist wichtig, denn Schülervorstellungen bestimmen das Lernen, da sie „das Neue nur durch die Brille des bereits Bekannten sehen“. Es muss also erstmal eine solide Basis geschaffen werden, denn Lernen bedeutet, Wissen auf der Grundlage von vorhandenen Vorstellungen aktiv zu konstruieren.

Die Vorstellungen von Schüler:innen zum Themenbereich Atom- und Kernphysik sind in der Regel nur geringfügig vorhanden, da sie kaum eigene Erfahrungen zu dem Thema gesammelt haben, zumindest aber nicht bewusst. Wenn Vorkenntnisse gegeben sind, wurden diese z.B. aus anderen Unterrichtsfächern oder aus den Medien bezogen [Kircher et al., 2020]. Im Folgenden wird auf die gängigsten Schülervorstellungen zum Themenbereich Atom- und Kernphysik eingegangen.

Radioaktivität und Strahlung

Die häufigste Annahme von Schüler:innen ist, dass Radioaktivität grundsätzlich gefährlich oder sogar tödlich ist. Den wenigsten ist bewusst, dass wir durch die natürliche Strahlenexposition, u. a. kosmische und terrestrische Strahlung sowie durch die Nahrung und Atemluft, dauerhaft mit ionisierender Strahlung konfrontiert werden. Gängiger ist die Vorstellung von Strahlungsbelastung durch die Medizin oder von Reaktoren.

Eine häufige Vorstellung vieler Schüler:innen ist die Gleichstellung von Radioaktivität und Strahlung. Dabei wird unter Radioaktivität im allgemeinen der Umwandlungsprozess eines instabilen Atomkerns verstanden, bei dem Energie in Form von ionisierender Strahlung freigesetzt wird. Diese Gleichsetzung führt allerdings zu irritierenden Schülervorstellungen.

So existiert die Auffassung, dass bestrahlte Objekte die Strahlung aufnehmen und diese irgendwann wieder emittieren können. Zum Beispiel wollen Schüler:innen ein Blatt Papier, das zwischen einen α-Strahler und ein Zählrohr gehalten wurde, oft nicht mehr anfassen. Es besteht die Angst, dass bestrahlte Objekte oder Personen dadurch selbst kontaminiert

oder aktiviert werden könnten. Eine mögliche Begründung dafür könnte sein, dass Strahlung als Transport von radioaktivem Material verstanden wird. Verstärkt wird diese Vorstellung durch den weit verbreiteten Begriff „radioaktive Strahlung“. Damit wird assoziiert, dass Strahlung selbst radioaktiv wäre, obwohl das nicht der Fall ist. Schüler:innen nehmen dann an, dass an einem bestrahltem Objekt die radioaktiven Teilchen hängen bleiben und wieder emittiert werden.[9]

Weiterhin führt die Verwechslung von Radioaktivität und Strahlung dazu, dass Radioaktivität nicht als die Eigenschaft eines Stoffes, sondern viel mehr als Substanz selbst gesehen wird. Dabei greift lediglich das Wissen der Schüler:innen, dass Radioaktivität etwas Gefährliches sein muss. Sie können dabei kaum zwischen den verschiedenen Begriffen aus dem Strahlenschutz unterscheiden [Kircher et al., 2020].

Zerfall eines instabilen Kerns und Halbwertszeit

Laut einer Studie von Prather [2005] gibt es viele verschiedene Vorstellungen davon, wie ein radioaktiver Zerfall funktioniert. Schüler:innen beschreiben u. a., dass der Atomkern dabei in seine Einzelteile zerfällt oder Teile von sich verliert oder sich sogar irgendwann ganz auflöst. Daraus wird ersichtlich, dass Schüler:innen auch Probleme mit dem Begriff Halbwertszeit haben müssen. In einer weiteren Studie von Prather [2001] stellt sich heraus, dass Schüler:innen folgende Auffassung vom Begriff Halbwertszeit haben:

Schüler:innen beschreiben die Halbwertszeit als…

… die Zeit, in der die Hälfte der Masse oder des Volumens der radioaktiven Substanz verloren gegangen ist.

… den Zeitpunkt, wenn ein Kern die Hälfte seiner Strahlung verloren hat.

… die Zeit, in der die Hälfte der radioaktiven Atome verschwinden.

… die Zeit, in der die Anzahl der Atome auf die Hälfte sinkt.

Die ersten beiden Annahmen bestätigen die Vorstellung, dass ionisierende Strahlung an Objekten haften bleibt, wohingegen die letzten beiden anscheinend im Zusammenhang mit

[9] Von dieser Schülervorstellung sind physikalische Prozesse, bei denen bestrahlte Materialen wirklich zu radioaktiven Quellen werden, klar zu unterscheiden (z. B. Neutronenaktivierungsanalyse).

der Vorstellung stehen, dass ein Atomkern dabei in seine Einzelteile zerfällt [Duit et al., 2018].

Die Halbwertszeit kann von Schüler:innen außerdem als eine Zeitspanne gesehen werden, in der die Gefahr der Radioaktivität abnimmt. Ist die Zeitspanne abgelaufen, besteht demnach keine Gefahr mehr [Kircher et al., 2020].

Messprozess

Der Messprozess stellt in der Physik ein wichtiges empirisches Medium dar. Umso wichtiger ist es, dass Schüler:innen diesen nachvollziehen und anwenden können, um im Berufsleben z.B. im wissenschaftlichen Bereich tätig zu werden. Doch oft fällt es ihnen schwer, eine Messung wirklich zu verstehen und die daraus resultierenden Daten zu analysieren. Sie können den Prozess zwar routinemäßig ausführen, wissen aber oft nicht, welches Konzept wirklich dahinter steckt. Schülervorstellungen zum Messprozess können dabei z.B. folgende sein:

Die Schüler:innen gehen davon aus, dass eine Messung ausreicht. Sie denken, weitere Messungen würden identisch verlaufen. Sollten die Ergebnisse von mehreren Messungen jedoch unterschiedlich sein, schreiben sie dies eigenen Messfehlern zu. Schüler:innen gehen daher auch nicht davon aus, dass Messgeräte eine begrenzte Genauigkeit besitzen können. Bei wiederholten Messungen kommen sie weniger auf die Idee, das arithmetische Mittel zu bilden, sondern suchen sich identische Werte heraus, welche durch ihr wiederholtes Auftreten wahrscheinlich richtig sein müssen. Andere bilden zwar den Mittelwert, aber verstehen nicht, was dieser genau aussagt. Sie denken, dass nur ein Wert, der auch tatsächlich gemessen wurde, das richtige Ergebnis sein kann [Jansky, 2019].

8.4 Sachanalyse

Eine Zusammenfassung des fachlichen Inhaltes wurde bereits in Kapitel 2 vorgenommen. Im Sinne der didaktischen Rekonstruktion werden nun die fachlichen Zusammenhänge im Hinblick auf den Verstehensprozess der Schüler:innen zum Teil neu konstruiert. Das Fachwissen wird vor dem Hintergrund möglicher Schülerfragen reflektiert und aufgearbeitet.

In Bezug auf die genannten Schülervorstellungen [vgl. Kap. 8.3.5] sollte berücksichtigt werden, dass ionisierende Strahlung im Zusammenhang mit dem Experiment keine kontaminierende Wirkung besitzt. Sie setzt sich also weder am Messgerät, dem Pa- Generator noch an der Haut ab. Denn bei radioaktiver Kontamination handelt es sich um die Strahlungsquelle und nicht um die Strahlung selbst, wie viele Schüler:innen vermuten. Da sich die radioaktive Quelle in einem verschlossenen Behälter befindet, besteht keine Gefahr zur Kontamination.

Um den Schülervorstellungen über die Halbwertszeit vorzubeugen, sollten Schüler:innen vor der Unterrichtseinheit das Konzept des radioaktiven Zerfalls verstanden haben. Dieses Wissen bildet den Grundbaustein zum Verständnis der Halbwertszeit. Außerdem soll das Experiment dazu dienen, den Begriff Halbwertszeit anschaulich darzustellen und dadurch das Verständnis zu stützen.

Für die Schüler:innen stellt sich auch die Frage, weshalb die Impulsrate des Isotopengenerators zunächst ansteigt, bevor sie planmäßig abnimmt. Da Schüler:innen des Jahrgangs 9-11 im Regelfall noch nichts von radioaktiven Gleichgewichten gehört haben, kann ihnen dieser Anstieg durch den noch nicht vollständig beendeten Entmischungsprozess nach dem Schütteln erklärt werden [vgl. dazu Kap. "4.3 Auswertung"].

8.5 Methoden

Die methodischen Entscheidungen zu dieser Unterrichtseinheit werden im Folgenden vorgestellt.

8.5.1 Methodische Großform: Das Experiment

Die methodische Großform dieser Unterrichtseinheit wird durch ein Experiment ausgeübt. Experimente lassen sich unter verschiedenen Aspekten genauer klassifizieren, um sie an die jeweiligen Anforderungen der Unterrichtsstunde anzupassen. Die Klassifizierung nach Kircher et al. [2001a] erfolgt nach folgenden Punkten:

Datenerfassung

Die Datenerfassung eines Experiments kann qualitativ oder quantitativ erfolgen. Während qualitative Experimente auf das Erfassen von Daten etc. durch die eigenen Sinne ausgerichtet sind, erfordern quantitative Experimente eine objektive Aufnahme, Dokumentation und Auswertung von Daten. Deshalb handelt es sich beim Isotopengenerator um ein quantitatives Experiment. Die Messwerte sind bei der Durchführung objektiv zu erheben, und die Schüler:innen erhalten neben einer Beobachtung auch eine zahlenmäßig erfassbare Größe.

Organisationsform

Die Organisationsform eines Experiments bestimmt, ob dieses als Demonstrationsexperiment von der Lehrkraft oder als Schüler:innenexperiment durchgeführt wird. Der Isotopengenerator wird als Schüler:innenexperiment durchgeführt. Die Schüler:innen sind dabei nicht nur Beobachter, sondern aktive Teilhaber:innen an diesem Experiment. Diese Entscheidung begründet sich im wesentlichen anhand der genannten Lernziele [vgl. Kap. "8.2 Ziele und Kompetenzen"]. Darüber hinaus erwerben die Schüler:innen durch das selbstständige Durchführen des Experiments entsprechende experimentelle Fähigkeiten und erlernen fachspezifische Handlungsschemata, wie etwa der Ablauf eines solchen Experiments. Ein Schüler:innenexperiment trägt auch dazu bei, ein kooperatives Arbeiten in Gruppen zu realisieren. Weitere Vorteile sind in Kapitel "5.2 Begründung für Experimente im Unterricht" aufgeführt.

Unterrichtsphase

Eine Unterrichtsstunde lässt sich grundsätzlich in die Phasen Einstieg, Erarbeitung und Vertiefung gliedern. Experimente lassen sich in jeder dieser Phasen miteinbeziehen. Dabei verfolgen sie unterschiedliche Zielsetzungen [Kircher et al., 2001a]. Der Isotopengenerator wird als ein Erarbeitungsversuch durchgeführt und stellt eine Verknüpfung zwischen Theorie und Experiment her. Die bereits erlernte Theorie soll quantitativ eingesetzt werden, um Daten zu erfassen, die Halbwertszeit zu berechnen und damit das gesuchte Isotop herauszufinden.

Der Einstieg dient der Motivation und der Hinführung auf die Erarbeitungsphase. Die Vertiefungsphase wird hier genutzt, um das Gelernte zu analysieren und festzuhalten. Steht genügend Zeit zur Verfügung, kann zusätzlich eine vertiefende Fragestellung zum Thema erfolgen [vgl. Kap. "8.2.4 Weiterführende Lernziele“].

Sachbegegnung

Dieser Aspekt zur Klassifizierung eines Experimentes informiert darüber, ob das zu beobachtende physikalische Phänomen mit bloßem Auge beobachtet werden kann oder ob dafür bestimmte Geräte notwendig sind [Kircher et al., 2001a]. Bei diesem Experiment ist ein physikalisches Messgerät nötig, um die Strahlung des radioaktiven Isotops zu detektieren. Dazu wird ein Geiger-Müller-Zählrohr, z.B. ein Inspector, verwendet. Der Aufbau und die Wirkungsweise eines Geiger-Müller-Zählrohrs sollte den Schüler:innen bereits bekannt sein [vgl. Kap. "8.3.4 Sachstruktur“]. Der Umgang mit einem solchen Messgerät muss noch nicht zwingend stattgefunden haben. Das Experiment eignet sich dazu, erstmals praktischen Kontakt zu diesem Messgerät aufzubauen. Die akustische Untermalung von registrierten Impulsen veranschaulicht den Messvorgang des Inspectors für die Schüler:innen.

8.5.2 Unterrichtskonzept: Entdeckender Unterricht

Unterrichtskonzepte sind im allgemeinen das Fundament für Unterrichtsplanung und -durchführung mit der Zielsetzung, den Schüler:innen bestimmtes Wissen zu vermitteln. Sie gliedern sich nach Wagenschein [1968] in den genetischen, exemplarischen, entdeckenden und darbietenden Unterricht. Komplett trennen lassen sich die verschiedenen Unterrichtskonzepte voneinander nicht. Beim Experimentieren mit dem Pa-Generator soll allerdings der entdeckende Unterricht im Vordergrund stehen.

Das Prinzip des entdeckenden Unterrichtskonzepts beinhaltet, dass die Schüler:innen selbstständig Erfahrungen sammeln und sich eigenständig mit der zu lernenden Materie auseinandersetzen, um physikalische Denk- und Arbeitsweisen zu erlernen. Im Gegensatz zum forschenden Unterricht werden beim entdeckenden Anweisungen und Hilfen für den Entdeckungsprozess von der Lehrkraft an die Schüler:innen gegeben. Laut Kircher et al. [2009] bringt der entdeckende Unterricht einige Vorteile gegenüber den anderen Unterrichtskonzepten mit sich. So werden hier bei den Schüler:innen Motivation und Selbstver-

trauen verstärkt entwickelt, da ihnen der Großteil der Aufgabe bzw. des Experiments selbst überlassen wird. Gleichzeitig wird dadurch das Gelernte langfristiger im Gedächtnis gesichert. Das entdeckende Unterrichtskonzept wird obendrein überwiegend in Gruppenunterricht durchgeführt. Die Vorteile dieser Sozialform sind in Kapitel 8.5.3 aufgeführt.

Darüber hinaus ist im Vergleich zum darbietenden Unterricht, in dem das Wissen größtenteils vorgegeben wird, das Entdecken eine wirksamere Voraussetzung, um vielseitige Problemlöseansätze zu lernen. Daher erweist sich die Methode des entdeckenden Unterrichts als die Hauptmethode zur Vermittlung von Fachwissen und wird als unverzichtbar für den Physikunterricht gehalten [Kircher et al., 2009].

Der Ansatz des entdeckenden Unterrichtskonzeptes wird in dieser Unterrichtseinheit dahingehend umgesetzt, dass die Schüler:innen, wie in Kapitel "8.3.4 Sachstruktur" ausführlich beschrieben, die Rolle eines Forscherteams einnehmen müssen, um herauszufinden, welches Isotop sich im Isotopengenerator befindet. Dabei soll auch der Problemlöseansatz mit kleinen Hilfestellungen seitens der Lehrkraft selbstständig gefunden werden.

Die Schüler:innen sollen durch das entdeckende Unterrichtskonzept eine Orientierung für naturwissenschaftlich-technische Berufsfelder erhalten. Es soll eine Grundlage für berufsbezogenes Lernen geschaffen werden, wodurch sich für die Schüler:innen Perspektiven für die spätere Berufswahl eröffnen [Niedersächsisches Kultusministerium, 2017b].

8.5.3 Sozialform

Das Experiment wird in Gruppenarbeit durchgeführt. Der Unterricht in Gruppen bezieht eine besondere Stellung unter den Sozialformen, da er sowohl fachliche als auch soziale Ziele verfolgt. Er charakterisiert sich durch die Rollenverteilung der einzelnen Gruppenmitglieder. Dadurch entwickelt sich eine Gruppendynamik, und das soziale Lernen wird gefördert [vgl. dazu "8.2.2 Soziale Lernziele"]. Die Schüler:innen bekommen die Gelegenheit, ihre Kommunikations- und Kooperationsfähigkeit zu verbessern und lernen mit Konflikten innerhalb einer Gruppe umzugehen. Sie müssen lernen, ihr eigenes Selbstbewusstsein zu entwickeln und dabei gleichzeitig auf andere Mitglieder ihrer Gruppe Rücksicht zu nehmen. Die Lehrkraft verhält sich dabei zurückhaltend und nimmt lediglich eine beraten-

de Funktion ein. Sie darf allerdings ihre Verantwortung gegenüber dem Unterrichtsverlauf nicht vernachlässigen.

Die Bildung der Gruppen kann nach verschiedenen Gesichtspunkten ablaufen. So können die Gruppen zum Beispiel räumlich, zufällig oder freiwillig aufgeteilt werden. Da die Gastlehrkraft die Klasse in den meisten Fällen nicht kennt, sollte sie sich im Vorfeld mit der zuständigen Lehrkraft darüber absprechen, welche Möglichkeit zur Gruppenbildung die sinnvollste ist [Kircher et al., 2001a].

Die Vor- und Nachbesprechung des Experiments findet wiederum im Unterrichtsgespräch statt. Dabei regt die Lehrkraft zu Beiträgen an und lenkt das Gespräch.

8.6 Unterrichtsmaterialien

Im weiteren Verlauf werden alle für die Unterrichtseinheit benötigten Materialen vorgestellt.

8.6.1 Arbeitsblatt

In der Erarbeitungsphase der Unterrichtseinheit werden Arbeitsblätter an die Schüler:innen ausgeteilt. Diese wurden in zwei verschiedenen Varianten angefertigt. Die erste Variante beinhaltet die Auswertung unter Verwendung des Logarithmus' [vgl. Kap. 4.3.1]. Mit der zweiten dagegen erfolgt die Auswertung nach Kapitel 4.3.2 ohne Logarithmus.

Zunächst werden die Schüler:innen als Forscherteam begrüßt. Danach folgen allgemeine Informationen zur Funktion des Isotopengenerators und über ihre bevorstehende Aufgabe. Zusätzlich werden die Schüler:innen nochmal auf die Lernvideos als Hilfestellung für die Auswertung hingewiesen.

Anschließend folgt eine Aufzählung über das Material, welches für den Versuch benötigt wird. Danach sollen die Schüler:innen anhand der Abbildung 6 aus Kapitel 4.1 den Versuch aufbauen.

Es folgt die Durchführung des Experiments. Diese wurde in Anlehnung an Kapitel 4.2 in einzelne Schritte aufgeteilt:

1. *Verteilt untereinander folgende Aufgaben: Zeitansager:in, Messwertableser:in und Messwertprotokollant:in. Bei mehr als 3 Personen pro Gruppe kommt die Aufgabe ‚Inspector bedienen' hinzu. Bei 3 Personen übernimmt eine:r von euch zwei Aufgaben. Bereitet euch entsprechend auf eure Aufgabe vor!*

2. *Schüttelt den Isotopengenerator für 15-20 Sekunden. Achtet darauf, dass ihr dabei mindestens einen Finger am oberen und unteren Ende des Isotopengenerators habt.*

3. *Stellt den Isotopengenerator zurück in die vorgesehene Halterung und startet sofort eure Messung:*

    - *Schaltet den Inspector ein und startet gleichzeitig die Stoppuhr. Nach 30s notiert ihr die angezeigte Impulsrate [z].*
    - *Nun legt ihr 30s Messpause ein, in der ihr den Inspector ausschaltet. Nach Ablauf der Pause schaltet ihr den Inspector wieder ein und messt die Impulsrate für die nächsten 30s.*
    - *Führt die Messung so lange durch, bis sich die Impulsrate nicht mehr deutlich verändert. Ihr solltet dann noch ungefähr 6 annähernd gleiche Messwerte der Impulsrate aufnehmen. Die gesamte Messung sollte mind. 690s bzw. 11,5 min dauern.*

4. *Tragt eure Impulsraten in folgende Tabelle ein. Lasst die letzte Spalte zunächst frei* [vgl. *Tab. 1*].

Nun sollen die Schüler:innen den Nulleffekt bestimmen. Dazu wird ihnen nochmal erklärt, was dieser aussagt und anschließend wie er berechnet wird.

Es folgt die Auswertung des Experiments. Ab hier unterschieden sich die beiden Arbeitsblätter voneinander:

Arbeitsblatt zur Auswertung mit Logarithmus

Um die Halbwertszeit zu bestimmen, führt ihr zunächst eine exponentielle Regression der aufgenommenen Messwerte durch. Falls ihr dabei Unterstützung braucht, guckt euch nochmal das Video zur Halbwertzeit an.

Schritt 1: *Erstellt mit eurem Taschenrechner, Laptop oder iPad eine Tabelle der Messwerte. In die erste Spalte werden die Zeiten t in [s] als x-Werte eingetragen. In die zweite Spalte fügt ihr die Impulsraten abzüglich der Nullraten* $(z - z_0)$ *als y-Werte ein.*

Schritt 2: *Führt anschließend exponentielle Regression durch und schreibt die Gleichung der Regressionskurve der Form* $f(t) = a \cdot b^t$ *heraus.*

Schritt 3: *Setzt den errechneten Wert der Regressionskurve für b in den Term* $-ln(b) = \lambda$ *ein und berechnet den Wert für die Zerfallskonstante* λ.

Schritt 4: *Setzt den errechnet Wert für* λ *in den Term* $T_{1/2} = \frac{ln(2)}{\lambda}$ *ein und berechnet die Halbwertszeit.*

Tipp: *Für den Fall, dass eure Software mit der exponentiellen Regression in Form von* $f(t) = a \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ *arbeitet, kann der Wert der Zerfallskonstante direkt abgelesen und in die Gleichung* $T_{1/2} = \frac{ln(2)}{\lambda}$ *eingesetzt werden.*

Arbeitsblatt zur Auswertung ohne Logarithmus

Um die Halbwertszeit zu bestimmen, führt ihr zunächst eine eigene Regression der aufgenommenen Messwerte durch. Die in den Videos gezeigten Formeln wurden so umgestellt, dass ihr für die Rechnung keine e-Funktion und keinen Logarithmus benötigt.

Schritt 1: *Erstellt mit eurem Taschenrechner, Laptop oder iPad eine Tabelle der Messwerte. In die erste Spalte werden die Zeiten t in [s] als x-Werte eingetragen. In die zweite Spalte fügt ihr die Impulsraten abzüglich der Nullraten* $(z - z_0)$ *als y-Werte ein.*

Schritt 2: *Führt anschließend eine eigene Regression der Form* $f(x) = a \cdot 2^{-b \cdot x}$ *durch und schreibt den Wert für b heraus.*

Schritt 3: *Setzt den errechnet Wert für b in den Term* $T_{1/2} = \frac{1}{b}$ *ein und berechnet die Halbwertszeit.*

Zum Abschluss soll noch eine allgemeine Definition der Halbwertszeit gemeinsam formuliert und aufgeschrieben werden. Diese könnte lauten: *„Die Halbwertszeit gibt an, nach*

welcher Zeitspanne sich die Anzahl der radioaktiven Ausgangskerne halbiert hat“ [Joachim Herz Stiftung, 2022]

Die vollständigen Arbeitsblätter befinden sich im Anhang [vgl. A. 1.1 und A. 1.2]. Sie stehen zusätzlich auf der Internetseite des Instituts für Radioökologie und Strahlenschutz zum Download zur Verfügung (Download unter: https://www.irs.uni-hannover.de/de/studium/lehrmaterialien/).

8.6.2 Präsentation

Für die Durchführung der Unterrichtseinheit wurde eine Präsentation angefertigt, welche der Lehrkraft als unterstützendes Material dient Die Präsentation gorientiertsich dabei an denm.Verlaufsplan aus Kapitel 8.7. Sie beginnt mit einem Deckblatt, bei dem die Lehrkraft die Möglichkeit hat, sich und das Thema der Unterrichtseinheit vorzustellen. Darauf folgt eine Folie mit der Abbildung einer Nuklidkarte [vgl. Abb. 8 im Anhang], die den Schüler:innen als Hilfestellung zur Problemlösung dienen soll. Dafür wurde ein Kästchen der Nuklidkarte nochmal besonders hervorgehoben, damit die Schüler:innen erkennen können, dass darin die Halbwertszeit angegeben ist. Es folgen ein paar Sicherheitsaspekte im Umgang mit dem Isotopengenerator in Anlehnung an Kapitel 6. Die darauffolgende Folie stellt die Funktionsweise des Messgerätes dar, sodass die Lehrkraft diese anschaulich erklären kann. Es folgt eine Folie, die während der Durchführung des Experiments zu sehen ist. Diese dient lediglich der Motivation der Schüler:innen. Mit der nächsten Folie lassen sich die Ergebnisse kompakt sammeln und das Experiment damit leichter auswerten. Anschließend folgt eine Folie, die die richtige Lösung des Experiments aufdeckt. Dabei handelt es sich um Pa-234m. Zum Ende hin enthält die Präsentation noch zwei Folien, die aufeinander aufbauen. Die erste zeigt die ersten Worte einer Definition der Halbwertszeit: *„Die Halbwertszeit gibt an,…“*. Die Schüler:innen sollen anhand des Satzanfangs selbst eine Definition für die Halbwertszeit formulieren. Die zweite Folie deckt dann eine mögliche Definition der Halbwertszeit ausformulieren. Diese können die Schüler:innen dann an entsprechender Stelle auf ihrem Arbeitsblatt übernehmen. Auf der nächsten Folie sind die Fragen aus Kapitel "8.3.4 Sachstruktur" zu finden, nach denen die Schüler:innen die Unterrichtseinheit reflektieren sollen. Abschließend folgt eine Folie, bei der sich die Lehrkraft verabschiedet und sich für die Mitarbeit bei den Schüler:innen bedankt.

Die Präsentation dient dazu, den Unterricht anschaulicher zu gestalten. Durch sie wird der Lehrervortrag materialgestützt und dadurch interessanter für die Schüler:innen.

Die gesamte Präsentation ist im Anhang einzusehen [vgl. A. 3]. Auch sie wird auf der Internetseite des Instituts für Radioökologie und Strahlenschutz zum Download zur Verfügung gestellt (Download unter: https://www.irs.uni-hannover.de/de/studium/lehrmaterialien/).

8.6.3 Lernvideos

Als Vorbereitung auf diese Unterrichtseinheit sollen sich die Schüler:innen zwei Lernvideos anschauen. Diese wurden im Rahmen des mobilen Schülerlabors „RadLab“ von D. Raulin erstellt [vgl. Raulin, 2022]. Sie sind unter folgenden QR-Codes bzw. URLs zu finden:

Die Halbwertszeit	Exkurs Logarithmus
https://youtu.be/udX0ilurhXg	https://youtu.be/e_9LVETOZOo

Das erste Video stellt eine kurze Wiederholung zum Thema „Halbwertszeit“ dar. Darin wird erklärt, was die Halbwertszeit ist und wie sie berechnet werden kann. Dabei wird auch auf das Zerfallsgesetz und die daraus resultierende Herleitung der Formel für die Halbwertszeit eingegangen. Des Weiteren wird dargestellt, wie die Halbwertszeit mithilfe einer exponentielle Regression bestimmt werden kann.

Das zweite Video zeigt einen kurzen Exkurs zum Thema Logarithmus und vermittelt grundlegendes Wissen über die Verwendung und den mathematischen Umgang mit dem Logarithmus.

8.6.4 Nuklidkarte

Jede Gruppe erhält für die Auswertung einen Ausschnitt der Karlsruher Nuklidkarte [vgl. Abb. 8 im Anhang]. Darin sind speziell die drei natürlichen radioaktiven Zerfallsreihen abgebildet. Zusätzlich gibt es eine Hilfestellung, wie die Nuklidkarte bei verschiedenen Zerfällen zu lesen ist. Um das gesuchte Isotop zu bestimmen, sollen die Schüler:innen ihre gemessene Halbwertszeit mit denen der U-238-Zerfallsreihe vergleichen.

8.7 Unterrichtsverlaufsplan

Die geplante Unterrichtseinheit ist auf 90 Minuten ausgelegt. Die Strukturierung der Stunde ergibt sich aus den in Kapitel 8 dargelegten didaktischen Vorüberlegungen sowie den gesammelten Erfahrungen aus der Schule [vgl. Kap. 7]. Der Ablauf des Experiments orientiert sich am Experimentierzyklus von Labudde [vgl. Abb. 7 im Anhang].

Zeit	Phase/ Sozialform	Handlungsschritte Lehr-Lern-Aktivität der Lehrkraft und der Schüler:innen	Funktion der Handlungsschritte	Medien & Material
2 min	**Begrüßung** FU	Begrüßung und Vorstellung der LK (falls nötig)	Die SuS sollen die Gastlehrkraft kennenlernen.	PPP (Folie 1)
15 min	**Einstieg** UG	Die LK führt in das neue Unterrichtsthema ein. Dazu stellt sie den Isotopengenerator vor und erklärt kurz dessen Aufbau und Funktion. Dabei wird das Pa234m nicht erwähnt. Anschließend werden SuS gefragt, wie sich das Isotop im Generator bestimmen lässt. Hilfestellung: Es handelt sich um ein Isotop aus der Uran-238-Zerfallsreihe. Der Ausschnitt aus der Nuklidkarte wird gezeigt. Im UG wird gemeinsam die richtige Antwort erarbeitet. Die LK klärt, ob es Fragen bzgl. der Lernvideos gibt, die im Vorfeld geschaut werden sollten und beantwortet diese gegebenenfalls.	Einordnung der Unterrichtsstunde in das gesamte Thema. Motivierung der SuS, da diese nun zu „Forschern“ werden sollen. Die erwartete Antwort der SuS auf die Frage, wie sich das gesuchte Isotop bestimmen lässt, ist durch die Bestimmung der Halbwertszeit.	PPP (Folie 1-2) Isotopengenerator

Zeit	Phase/ Sozialform	Handlungsschritte Lehr-Lern-Aktivität der Lehrkraft und der Schüler:innen	Funktion der Handlungsschritte	Medien & Material
5 min	**Hinführung** FU	Die LK erläutert Sicherheitsaspekte zum Umgang mit radioaktiven Materialien. Die SuS haben die Möglichkeit Fragen zu stellen.	Die SuS lernen, wie man sich beim Umgang mit radioaktiven Materialien vor der emittierten Strahlung schützen kann.	PPP (Folie 3)
10 min	**Erarbeitung** EA, UG	Die LK verteilt die Arbeitsblätter und die SuS informieren sich in Einzelarbeit über den Ablauf des Experiments. Je nach Wissensstand der Klasse wird das Arbeitsblatt mit bzw. ohne Verwendung des Logarithmus ausgeteilt. Anschließend werden im Unterrichtsgespräch Fragen seitens der SuS zum Ablauf des Experiments beantwortet.	Die SuS sollen sich die einzelnen Schritte auf den Arbeitsblättern durchlesen. Verständnisfragen werden geklärt, um einen möglichst reibungslosen Ablauf des Experimentes zu ermöglichen.	Arbeitsblatt mit Logarithmus oder Arbeitsblatt ohne Logarithmus
8 min	**Organisation** GA, FU	Die Klasse wird in Gruppen von 3 bis 4 SuS eingeteilt. Die Einteilung kann räumlich oder zufällig erfolgen. Jede Gruppe erhält einen Versuchsaufbau. Dieser soll von jeder Gruppe in Anlehnung an das Arbeitsblatt aufgebaut werden. Die LK erklärt die Funktionsweise des Inspectors. Die SuS teilen innerhalb ihrer Gruppen die Rollen untereinander auf. Es muss je Gruppe mindestens eine:n „Zeitansager:in“, „Messwertableser:in“ und „Messwertprotokollant:in“ geben. Eine:r pro Gruppe bekommt die zusätzliche Aufgabe den Inspector zu bedienen. Ab einer Gruppengröße von mind. 4 SuS wird daraus eine eigene Aufgabe.	Die SuS lernen die Funktionsweise des Inspectors kennen, damit es nicht zu Komplikationen während des Messvorgangs kommt. Die Verteilung der Aufgaben innerhalb einer Gruppe dienen dazu, dass alle SuS bei der Durchführung involviert sind. Dadurch werden u. a. Teamfähigkeit und Kooperationsfähigkeit gestärkt. Außerdem werden dadurch Schwierigkeiten beim Ablauf des Experiments vorgebeugt.	Versuchsaufbau: - Isotopengenerator - Inspector - Halterung - Uhr Arbeitsblatt PPP (Folie 4)

Zeit	Phase/ Sozialform	Handlungsschritte Lehr-Lern-Aktivität der Lehrkraft und der Schüler:innen	Funktion der Handlungsschritte	Medien & Material
30 min	**Durchführung des Experiments** GA	Das Experiment wird unter Berücksichtigung der Anleitung von den Gruppen durchgeführt. Die LK nimmt eine beratende Haltung ein. Die SuS tragen ihre gemessenen Werte in die Tabelle auf dem Arbeitsblatt ein. Nach Beendigung der Messung werten die SuS die Messwerte in ihrer Tabelle aus. Dabei erstellen sie anhand der Werte einen Graphen und führen eine exponentielle Regression oder eine Regression der Form $f(t) = a \cdot 2^{-b \cdot t}$ durch. Danach berechnen die SuS nach den vorgegeben Rechenschritten die Halbwertszeit des Isotops. Die SuS vergleichen ihre gemessene Halbwertszeit mit den Halbwertszeiten der Isotope aus der Uran-238-Zerfallsreihe. Dafür erhalten alle Gruppen einen Auszug der Nuklidkarte.	Die SuS können eigenständig ein angeleitetes Experiment in GA durchführen. Die SuS sollen Einblicke in naturwissenschaftliche Arbeitsweisen bekommen. Die SuS können einen digitalen Graphen anhand selbst gemessener Werte mit entsprechenden Hilfsmitteln erstellen. Die SuS können die Halbwertszeit eines exponentiellen Abklingprozesses nach vorgegebenen Arbeitsschritten berechnen. Die SuS können Folgeprodukte der U- 238-Zerfallsreihe mithilfe der Nuklidkarte bestimmen. Die SuS können die Halbwertszeit eines Isotops auf der Nuklidkarte ablesen.	Isotopengenerator, Inspector, Halterung, Uhr Arbeitsblatt, Taschenrechner, Tablet oder Laptop, Nuklidkarte PPP (Folie 5)

Zeit	Phase/ Sozialform	Handlungsschritte Lehr-Lern-Aktivität der Lehrkraft und der Schüler:innen	Funktion der Handlungsschritte	Medien & Material
10 min	**Auswertung** SB, UG	Die Gruppen stellen der Reihe nach ihre Ergebnisse vor und nennen dabei ihre gemessene Halbwertszeit und welches Isotop sie im Generator vermuten. Die LK notiert die Ergebnisse auf der vorgefertigten Präsentation [Folie 6]. Anschließend deckt die LK die richtige Lösung auf: Es handelt sich bei dem gesuchten Isotop um Pa234m. Die LK gratuliert den Gruppen, die die richtige Lösung haben. Sie geht erneut auf Folie 6 zurück und fragt die Gruppen mit stark vom Literaturwert (77 s) abweichenden Ergebnissen, ob es Probleme bei der Messung oder Auswertung gab. Die SuS stellen Vermutungen darüber auf, warum bei ihnen das Experiment oder die Auswertung nicht ganz funktioniert hat. Die LK beantwortet ggf. entstandene Fragen oder lässt sie von anderen SuS beantworten.	Die SuS vergleichen ihre Ergebnisse. Die richtige Lösung wird aufgedeckt. Die SuS stellen Vermutungen auf, warum ihr gemessene Halbwertszeit evtl. vom Literaturwert abweicht.	PPP (Folie 6-7)
8 min	**Reflexion** UG	Die LK fragt die SuS nach einer Definition der Halbwertszeit. Die SuS geben eine Antwort. Anschließend wird auf der PPP eine Definition eingeblendet, die sich alle SuS auf ihr Arbeitsblatt notieren sollen. Die LK fordert die SuS auf ein Feedback zu formulieren, dass folgende Fragen beantwortet: • Gab es etwas Überraschendes oder Unerwartetes? • Was könnte das Resultat beeinflusst haben? • Wie ließe sich das Experiment verbessern?	Die SuS können eine Definition der Halbwertszeit formulieren. Die SuS reflektieren, was das Resultat des Experiments beeinflusst haben könnte. Die SuS können Grenzen des Experiments aufzeigen. Die SuS formulieren ein Feedback zum Experiment.	PPP (Folie 8-10)

Zeit	Phase/ Sozialform	Handlungsschritte Lehr-Lern-Aktivität der Lehrkraft und der Schüler:innen	Funktion der Handlungsschritte	Medien & Material
2 min	**Verabschiedung** FU	Die LK bedankt sich für die Mitarbeit und verabschiedet sich.		PPP (Folie 11)

Abkürzungsverzeichnis:

FU = Frontalunterricht

GA = Gruppenarbeit

LK = Lehrkraft (hier Gastlehrkraft)

PPP = PowerPoint-Präsentation

SB = Schüler:innenbeitrag

SuS = Schüler:innen

UG = Unterrichtsgespräch

Literaturverzeichnis

Börlin, J. (2012). Das Experiment als Lerngelegenheit: Vom interkulturellen Vergleich des Physikunterrichts zu Merkmalen seiner Qualität. In Niedderer, H., Fischler, H. & Sumfleth, E. (Hrsg.), Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 132. Berlin: Logos.

Bundesministerium der Justiz (2018). *Strahlenschutzverordnung - StrlSchV*. Zugriff am 24. Februar 2022 unter https://www.gesetze-im-internet.de/strlschv_2018/

Duit, R., Hopf, M., Schecker, H. & Wilhelm, T. (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariaten Unterrichtspraxis.* Heidelberg: Springer Spektrum.

Institut für Radioökologie und Strahlenschutz (2016). *Radioaktivität und Dosimetrie. FP I Praktikum.* Leibniz Universität Hannover.

Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen (2020). *Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife.* Hürth: Carl Link Verlag.

Jank, W. & Meyer, H. (1991). *Didaktische Modelle*. Frankfurt am Main: Cornelsen Verlag.

Janski, A. (2019). *Die Rolle von Schülervorstellungen zu Wahrscheinlichkeit und Zufall im naturwissenschaftlichen Kontext. Konzeption und Evaluation einer Lehr-Lern-Einheit zur Wahrscheinlichkeitstheorie in der Radioaktivität.* Dissertation Physik. Universität Wien. Wien 2019.

Joachim Herz Stiftung (2022). *LEIFIphysik*. Zugriff am 24. März 2022 unter https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/radioaktivitaet-einfuehrung/grundwissen/halbwertszeit

Kircher, E., Girwids, R. & Häußler, P. (2001a). *Physikdidaktik: Eine Einführung* (2. Aufl.). Heidelberg: Springer.

Kircher, E., Girwids, R. & Häußler, P. (2001b). *Physikdidaktik: Theorie und Praxis* (2. Aufl.). Heidelberg: Springer.

Kircher, E., Girwids, R. & Häußler, P. (2020). *Physikdidaktik: Grundlagen* (4. Aufl.). Heidelberg: Springer.

Kircher, E. & Schneider, W. E. (2002). *Physikdidaktik in der Praxis*. Heidelberg: Springer.

Labudde, P. (2010). *Fachdidaktik Naturwissenschaft: 1.- 9. Schuljahr*. Bern: UTB GmbH.

Magill, J., Dreher, R., Sóti, Z. (2018) *Karlsruher Nuklidkarte*. 10. Auflage. Nucleonica GmbH, Karlsruhe.

Molz, A. (2016). *Verbindung von Schülerlabor und Schulunterricht - Auswirkungen auf Motivation und Kognition im Fach Physik*. München: Verlag Dr. Hut.

Niedersächsisches Kultusministerium (2015a). *Kerncurriculum für das Gymnasium Schuljahrgänge 5 – 10. Mathematik.* Hannover. Zugriff am 10. März 2022 unter https://cuvo.nibis.decuvo.phpp=search&k0_0=Dokumentenart&v0_0=Kerncurriculum&k0_1=Schulform&v0_1=Gymnasium-Sek.I&k0_2=Fach&v0_2=Mathematik&

Niedersächsisches Kultusministerium (2015b). *Kerncurriculum für das Gymnasium Schuljahrgänge 5 – 10. Naturwissenschaften.* Hannover. Zugriff am 27. Januar 2022 unter https://www.cuvo.nibis.de/cuvo.-php?p=search&k0_0=Dokumentenart&v0_0=Kerncurriculum&k0_1=Schulbereich&v0_1= Sek+I&k0_2=Fach&v0_2=Physik&

Povh, B. & Rith, K. & Scholz, C. (2014). *Teilchen und Kerne: Eine Einführung in die physikalischen Konzepte.* Heidelberg: Springer Spektrum.

Prather, E. E. und Harrington, R. R. (2001). *Student understanding of ionizing radiation and radioactivity.* Journal of College Science Teaching 31(2).

Prather, E. (2005). *Students' beliefs about the role of atoms in radioactive decay and half-life.* Journal of Geoscience Education 53(4).

Raulin, D. (2022). *RadLab: Ein mobiles Schülerlabor zum Thema Radioaktivität*. Masterarbeit Physik. Leibniz Universität Hannover. Hannover 2022.

Roth, C. (2021). *Sicherheitsdatenblatt. Isobutylmethylketon*. Zugriff am 07. Februar 2022 unter https://www.carlroth.com/de/de/von-a-bis-z/isobutylmethylketon/p/4371.1

Thermo Fisher Scientific (2021). *Sicherheitsdatenblatt. Diisopopylketon.* Zugriff am 07. Februar 2022 unter https://www.alfa.com/en/msds/?language=DE&subformat =CLP1&sk u=A12875

Vogt, H.-G. & Vahlbruch, J.-W. (2019). *Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes.* 7. Auflage. München: Carl Hanser Verlag.

Wagenschein, M. (1968). *Verstehen lehren.* Weinheim: Beltz.

Wiater, W. (2008). *Unterrichtsprinzipien: Prüfungswissen - Basiswissen Schulpädagogik* (3. Aufl.). Donauwörth: Auer Verlag GmbH.

Wilhelm, T. Schicker, H. & Hopf, M. (2021). *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht - Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis.* Berlin: Springer Spektrum.

Anhang

Abbildung 2 - Weithalsige Laborflasche mit Schraubverschluss

Quelle: https://www.glas-shop.com/kunststoffprodukte/laborflaschen-enghals-weithals-aus-ldpe/weithals-laborflaschen-mit-verschluessen/weithals-laborflasche-100ml-mit-verschluss.php (Zugriff am 04.02.2022)

Abbildung 3 - PE-Zylinder

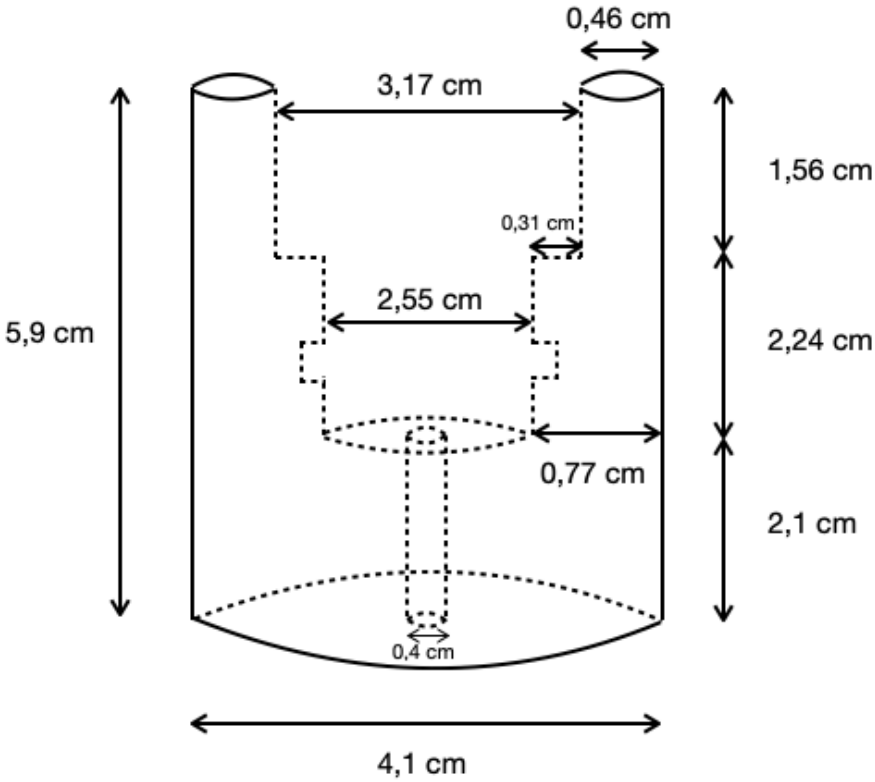
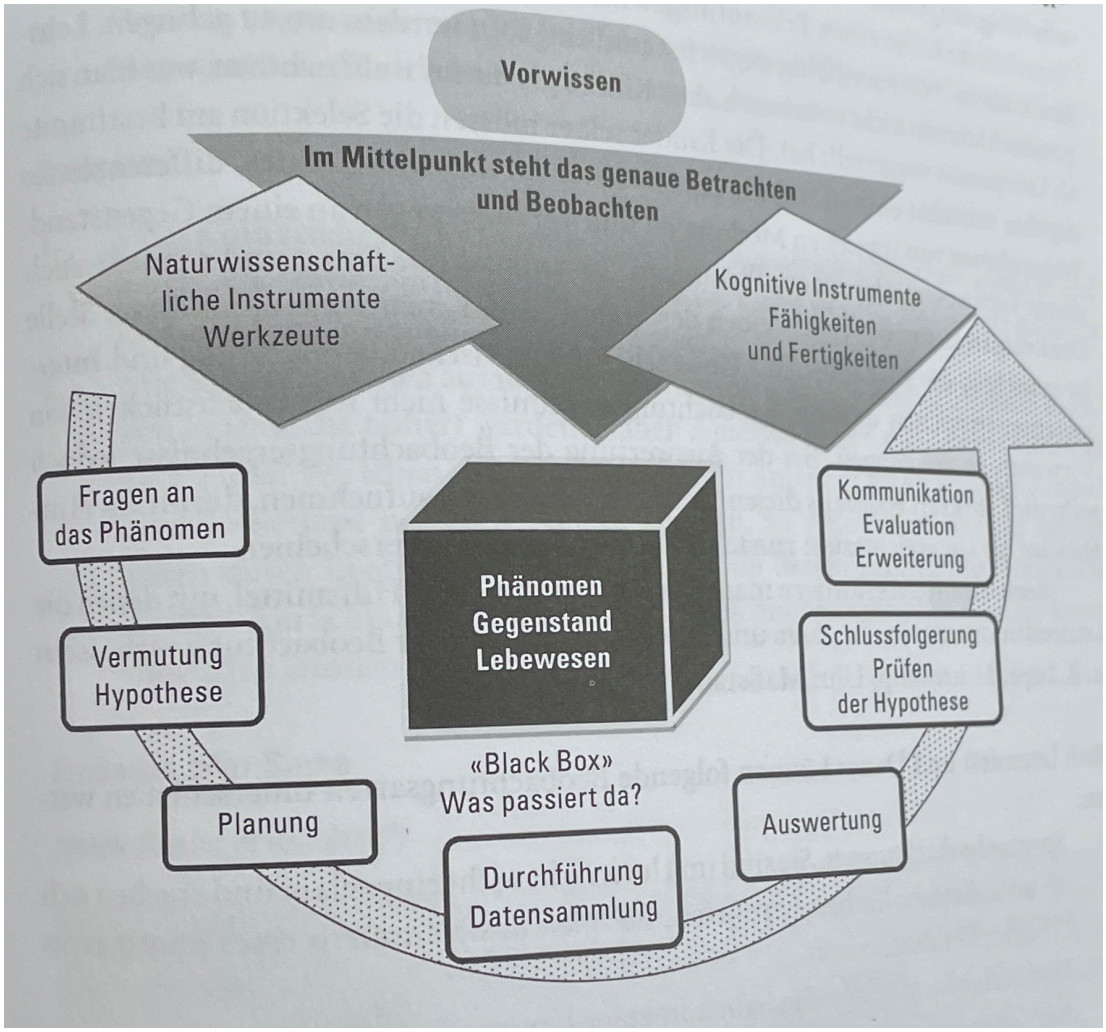


Abbildung 5 - Inspector

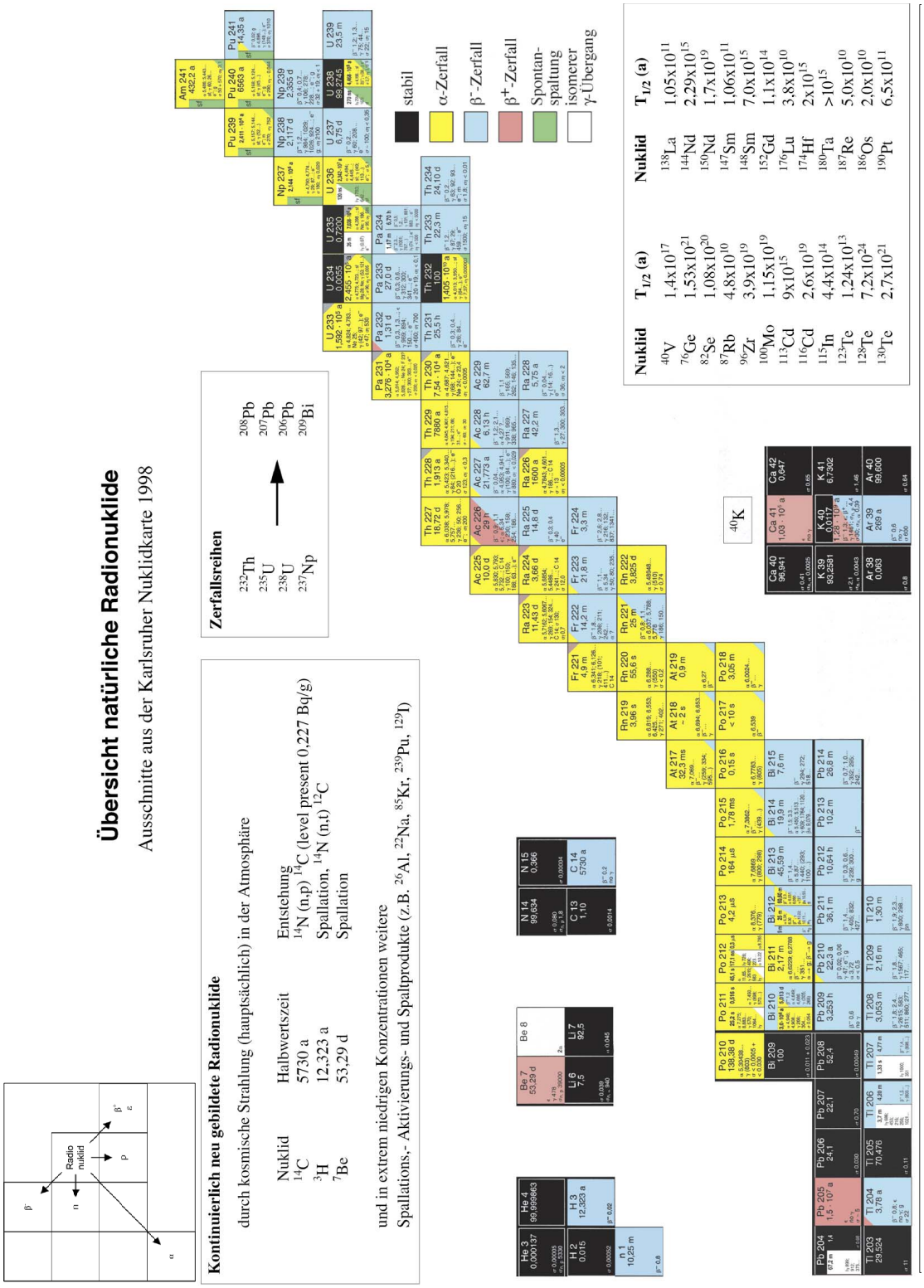
Quelle: https://www.ratec.de/inspector-usb/
(Zugriff am 12.03.2022)

Abbildung 7 - Experimentierzyklus Labudde



Labudde, 2010, S. 198

Abbildung 8 - Auszug aus der Nuklidkarte



A. 1.1: Arbeitsblatt - Auswertung mit Logarithmus

Willkommen im Forscherteam!

Vor euch steht ein Isotopengenerator. Darin befindet sich das primordiale, radioaktive Isotop Uran-238. Dieses zerfällt in eine der drei natürlichen Zerfallsreihen. Durch die Messung der Halbwertszeit sollt ihr eines der Folgeprodukte aus dieser Zerfallsreihe bestimmen.
In dem Isotopengenerator befinden sich zwei Flüssigkeiten, die sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Polarität nicht miteinander vermischen. Die untere Lösung ist eine wässrige Lösung, in der sich das Uran befindet. Die obere hingegen ist eine organische. In dieser reichert sich nach dem Schütteln das gesuchte Isotop an, da es sich im organischen besser löst. Eure Aufgabe besteht nun darin herauszufinden, um welches Isotop es sich handelt!

Zur Vorbereitung auf das Experiment solltet ihr euch zwei Videos angeschaut haben. Falls ihr bei der Auswertung Fragen habt, nutzt noch einmal die beiden Videos:

Die Halbwertszeit

Exkurs Logarithmus

Material:

- Isotopengenerator
- Inspector
- Halterung
- Uhr

Versuchsaufbau:

Baut den Versuch so auf, wie er in der Abbildung gezeigt ist. Achtet darauf, dass der Isotopengenerator möglichst nah am Messfenster des Inspectors steht.

Durchführung des Experiments:

1. Verteilt untereinander folgende Aufgaben: Zeitansager:in, Messwertableser:in und Messwertprotokollant:in. Bei mehr als 3 Personen pro Gruppe kommt die Aufgabe ‚Inspector bedienen' hinzu. Bei 3 Personen übernimmt eine:r von euch zwei Aufgaben. Bereitet euch entsprechend auf eure Aufgabe vor!

2. Schüttelt den Isotopengenerator für 15-20 Sekunden. Achtet darauf, dass ihr dabei mindestens einen Finger am oberen und unteren Ende des Isotopengenerators habt.

3. Stellt den Isotopengenerator zurück in die vorgesehene Halterung und startet sofort eure Messung:

- Schaltet den Inspector ein und startet gleichzeitig die Stoppuhr. Nach **30s** notiert ihr die angezeigte Impulsrate [z].

- Nun legt ihr **30s** Messpause ein, in der ihr den Inspector ausschaltet. Nach Ablauf der Pause schaltet ihr den Inspector wieder ein und messt die Impulsrate für die nächsten **30s**.

- Führt die Messung so lange durch, bis sich die Impulsrate nicht mehr deutlich verändert. Ihr solltet dann noch ungefähr 6 annähernd gleiche Messwerte der Impulsrate aufnehmen. Die gesamte Messung sollte mind. 690s bzw. 11,5 min dauern.

4. Tragt eure Impulsraten in folgende Tabelle ein. Lasst die letzte Spalte zunächst frei.

Zeit t [s]	Impulsrate z	$z - z_0$
30		
90		
150		
210		
270		
330		
390		
450		
510		
570		
630		
690		
750		
810		

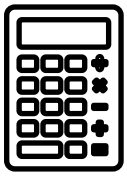
Die Nullrate z_o bestimmen:

Die Nullrate (auch Nulleffekt oder Untergrundmessung genannt) gibt die gemessene Rate der Umgebungsstrahlung an. Verursacht wird diese z. B. durch natürliche Strahlung, die aus der Erde (terrestrisch) oder dem Weltraum (kosmisch) kommen kann. Beim Experimentieren muss die gemessene Impulsrate z um die Nullrate z_0 korrigiert werden, um auch die tatsächliche Impulsrate der Strahlungsquelle zu erhalten.

Ihr erhaltet die Nullrate, indem ihr den Mittelwert aus den Impulsraten bildet, bei denen sich der gemessene Wert nur noch geringfügig ändert. Deshalb solltet ihr am Ende der Messung noch ungefähr 6 annähernd gleiche Messwerte der Impulsrate aufnehmen.

Bestimmt die tatsächliche Impulsrate, indem ihr die Nullrate von der gemessenen Impulsrate abzieht ($z - z_0$) und tragt die Werte in die letzte Spalte der Tabelle ein.

Auswertung:



Um die Halbwertszeit zu bestimmen, führt ihr zunächst eine exponentielle Regression der aufgenommenen Messwerte durch. Falls ihr dabei Unterstützung braucht, seht euch nochmal das Video zur Halbwertzeit an.

Schritt 1: Erstellt mit eurem Taschenrechner, Laptop oder iPad eine Tabelle der Messwerte. In die erste Spalte werden die Zeiten t in [s] als x-Werte eingetragen. In die zweite Spalte fügt ihr die Impulsraten abzüglich der Nullraten ($z - z_0$) als y-Werte ein.

Schritt 2: Führt anschließend exponentielle Regression durch und schreibt die Gleichung der Regressionskurve der Form $f(t) = a \cdot b^t$ heraus.

Schritt 3: Setzt den errechneten Wert der Regressionskurve für b in den Term $-ln(b) = \lambda$ ein und berechnet den Wert für die Zerfallskonstante λ in $\left[\frac{1}{s}\right]$.

Schritt 4: Setzt den errechnet Wert für λ in den Term $T_{1/2} = \dfrac{ln(2)}{\lambda}$ ein und berechnet die Halbwertszeit.

Tipp: Für den Fall, dass eure Software mit der exponentiellen Regression in Form von $f(t) = a \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ arbeitet, kann der Wert der Zerfallskonstante direkt abgelesen und in die Gleichung $T_{1/2} = \dfrac{ln(2)}{\lambda}$ eingesetzt werden.

Zusammenfassung:

Überlegt euch innerhalb der Gruppe eine Definition des Begriffs „Halbwertszeit“:

Die Halbwertszeit gibt an, _____

_____

_____

_____.

A. 1.2: Arbeitsblatt - Auswertung ohne Logarithmus

Willkommen im Forscherteam!

Vor euch steht ein Isotopengenerator. Darin befindet sich das primordiale, radioaktive Isotop Uran-238. Dieses zerfällt in eine der drei natürlichen Zerfallsreihen. Durch die Messung der Halbwertszeit sollt ihr eines der Folgeprodukte aus dieser Zerfallsreihe bestimmen.
In dem Isotopengenerator befinden sich zwei Flüssigkeiten, die sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Polarität nicht miteinander vermischen. Die untere Lösung ist eine wässrige Lösung, in der sich das Uran befindet. Die obere hingegen ist eine organische. In dieser reichert sich nach dem Schütteln das gesuchte Isotop an, da es sich im organischen besser löst. Eure Aufgabe besteht nun darin herauszufinden, um welches Isotop es sich handelt!

Zur Vorbereitung auf das Experiment solltet ihr euch zwei Videos angeschaut haben. Falls ihr bei der Auswertung Fragen habt, nutzt noch einmal die beiden Videos:

Die Halbwertszeit

Exkurs Logarithmus

Material:

- Isotopengenerator
- Inspector
- Halterung
- Uhr

Versuchsaufbau:

Baut den Versuch so auf, wie er in der Abbildung gezeigt ist. Achtet darauf, dass der Isotopengenerator möglichst nah am Messfenster des Inspectors steht.

Durchführung des Experiments:

1. Verteilt untereinander folgende Aufgaben: Zeitansager:in, Messwertableser:in und Messwertprotokollant:in. Bei mehr als 3 Personen pro Gruppe kommt die Aufgabe ‚Inspector bedienen' hinzu. Bei 3 Personen übernimmt eine:r von euch zwei Aufgaben. Bereitet euch entsprechend auf eure Aufgabe vor!

2. Schüttelt den Isotopengenerator für 15-20 Sekunden. Achtet darauf, dass ihr dabei mindestens einen Finger am oberen und unteren Ende des Isotopengenerators habt.

3. Stellt den Isotopengenerator zurück in die vorgesehene Halterung und startet sofort eure Messung:

- Schaltet den Inspector ein und startet gleichzeitig die Stoppuhr. Nach **30s** notiert ihr die angezeigte Impulsrate [z].

- Nun legt ihr **30s** Messpause ein, in der ihr den Inspector ausschaltet. Nach Ablauf der Pause schaltet ihr den Inspector wieder ein und messt die Impulsrate für die nächsten **30s**.

- Führt die Messung so lange durch, bis sich die Impulsrate nicht mehr deutlich verändert. Ihr solltet dann noch ungefähr 6 annähernd gleiche Messwerte der Impulsrate aufnehmen. Die gesamte Messung sollte mind. 690s bzw. 11,5 min dauern.

4. Tragt eure Impulsraten in folgende Tabelle ein. Lasst die letzte Spalte zunächst frei.

Zeit t [s]	Impulsrate z	$z - z_0$
30		
90		
150		
210		
270		
330		
390		
450		
510		
570		
630		
690		
750		
810		

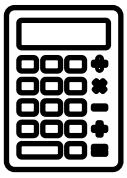
Die Nullrate z_o bestimmen:

Die Nullrate (auch Nulleffekt oder Untergrundmessung genannt) gibt die gemessene Rate der Umgebungsstrahlung an. Verursacht wird diese z. B. durch natürliche Strahlung, die aus der Erde (terrestrisch) oder dem Weltraum (kosmisch) kommen kann. Beim Experimentieren muss die gemessene Impulsrate z um die Nullrate z_0 korrigiert werden, um auch die tatsächliche Impulsrate der Strahlungsquelle zu erhalten.

Ihr erhaltet die Nullrate, indem ihr den Mittelwert aus den Impulsraten bildet, bei denen sich der gemessene Wert nur noch geringfügig ändert. Deshalb solltet ihr am Ende der Messung noch ungefähr 6 annähernd gleiche Messwerte der Impulsrate aufnehmen.

Bestimmt die tatsächliche Impulsrate, indem ihr die Nullrate von der gemessenen Impulsrate abzieht ($z - z_0$) und tragt die Werte in die letzte Spalte der Tabelle ein.

Auswertung:



Um die Halbwertszeit zu bestimmen, führt ihr zunächst eine eigene Regression der aufgenommenen Messwerte durch. Die in den Videos gezeigten Formeln wurden so umgestellt, dass ihr für die Rechnung keine e-Funktion und keinen Logarithmus benötigt.

Schritt 1: Erstellt mit eurem Taschenrechner, Laptop oder iPad eine Tabelle der Messwerte. In die erste Spalte werden die Zeiten t in [s] als x-Werte eingetragen. In die zweite Spalte fügt ihr die Impulsraten abzüglich der Nullraten ($z - z_0$) als y-Werte ein.

Schritt 2: Führt anschließend eine eigene Regression der Form $f(x) = a \cdot 2^{-b \cdot x}$ durch und schreibt den Wert für b heraus:

Schritt 3: Setzt den errechnet Wert für b in den Term $\mathbf{T_{1/2} = \frac{1}{b}}$ ein und berechnet die Halbwertszeit.

Zusammenfassung:

Überlegt euch innerhalb der Gruppe eine Definition des Begriffs „Halbwertszeit“:

Die Halbwertszeit gibt an, _____

_____

_____

_____.

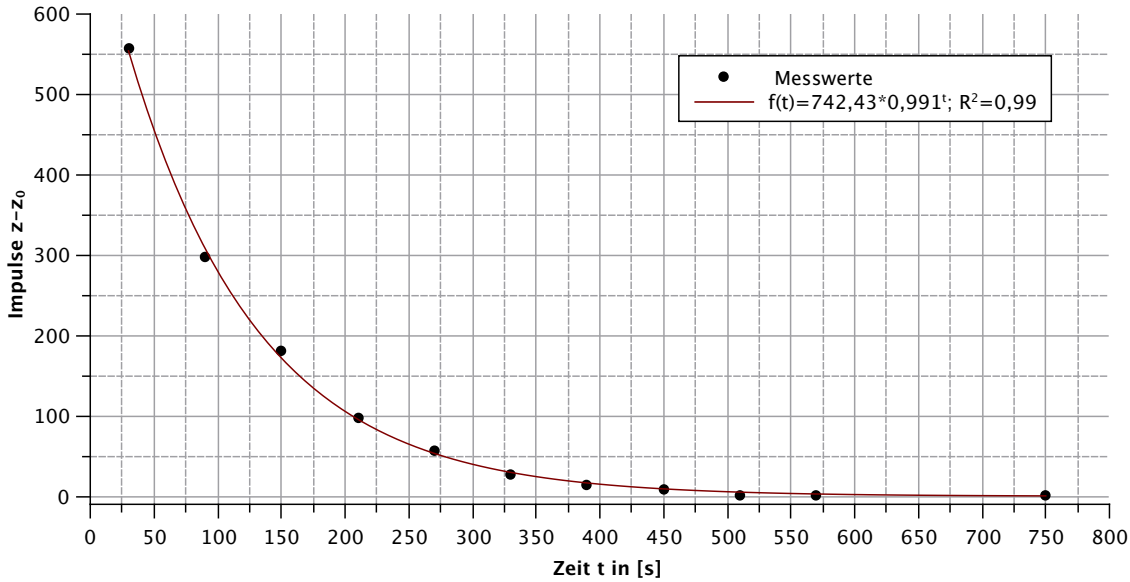
A. 2.1: Musterlösung - Auswertung mit Logarithmus

Zeit t [s]	Impulsrate z	$z - z_0$
30	602	557
90	343	298
150	226	181
210	143	98
270	99	56
330	72	27
390	60	15
450	54	9
510	46	1
570	46	1
630	41	-4
690	38	-7
750	47	2

Nullrate bestimmen:

$$z_0 = \frac{54 + 46 + 46 + 41 + 38 + 47}{6} = 45$$

Die Nullrate wird von den gemessenen Impulsraten z abgezogen und in die dritte Spalte eingetragen. Anschließend wird die tatsächliche Impulsrate gegen die Zeit in einem Diagramm aufgetragen und eine exponentielle Regression der Form $f(t) = a \cdot b^t$ durchgeführt:



Mit dem Wert für b aus der Regressionsfunktion wird die Zerfallskonstante λ bestimmt:

$$\lambda = -\,ln(b)$$

$$\lambda = -\,ln(0{,}991)$$

$$\boldsymbol{\lambda = 0{,}00904\,\frac{1}{s}}$$

Mit der Zerfallskonstante λ und der Gleichung $T_{1/2} = \frac{ln(2)}{\lambda}$ wird nun die Halbwertszeit bestimmt:

$$T_{1/2} = \frac{ln(2)}{0{,}00904\,\frac{1}{s}}$$

$$\mathbf{T_{1/2} = 77\,s}$$

Das Ergebnis entspricht dem Literaturwert der Halbwertszeit von Pa-234m.

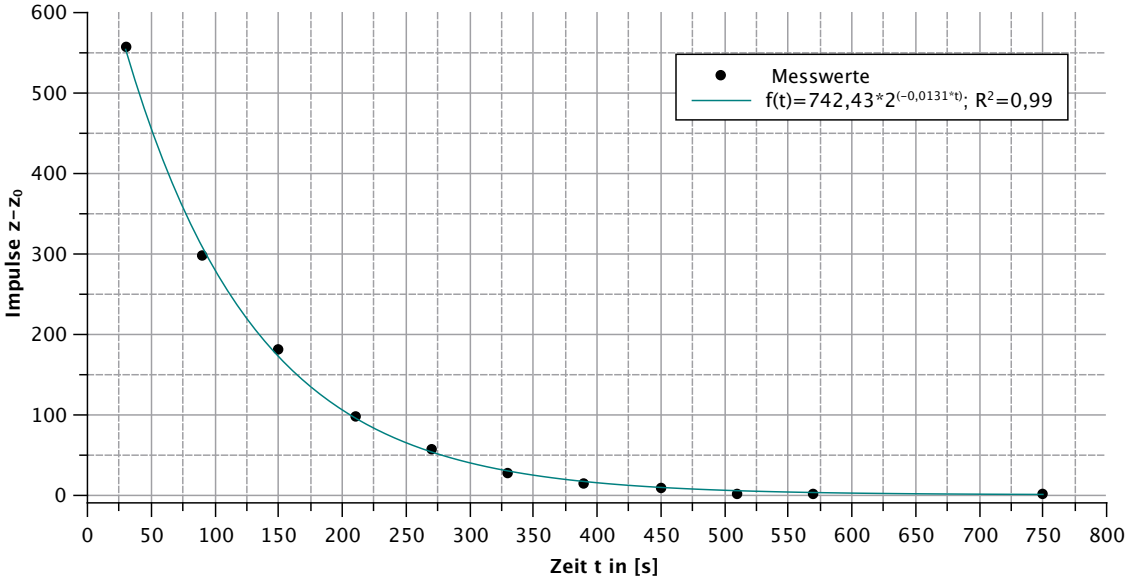
A. 2.2: Musterlösung - Auswertung ohne Logarithmus

Zeit t [s]	Impulsrate z	$z - z_0$
30	602	557
90	343	298
150	226	181
210	143	98
270	99	56
330	72	27
390	60	15
450	54	9
510	46	1
570	46	1
630	41	-4
690	38	-7
750	47	2

Nullrate bestimmen:

$$z_0 = \frac{54 + 46 + 46 + 41 + 38 + 47}{6} = 45$$

Die Nullrate wird von den gemessenen Impulsraten z abgezogen und in die dritte Spalte eingetragen. Anschließend wird die tatsächliche Impulsrate gegen die Zeit in einem Diagramm aufgetragen und eine exponentielle Regression der Form $f(x) = a \cdot 2^{-b \cdot x}$ durchgeführt:



Der Wert für b wird in die Gleichung $T_{1/2} = \frac{1}{b}$ eingesetzt und die Halbwertszeit wird berechnet:

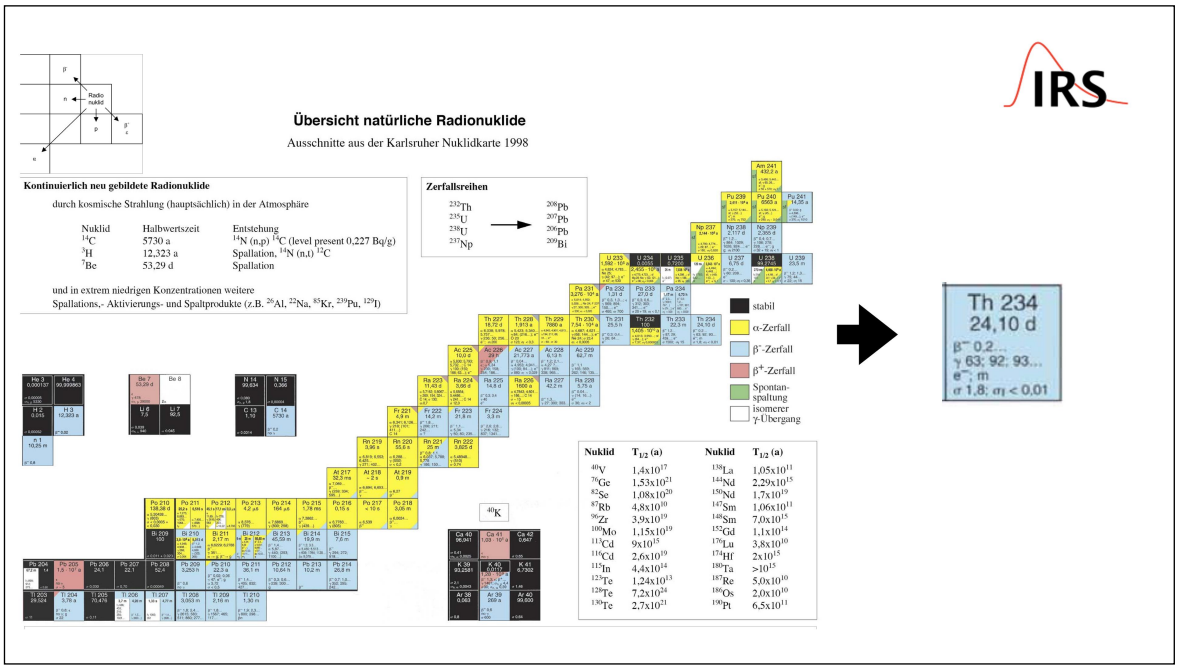
$$T_{1/2} = \frac{1}{0{,}0131}\ s$$

$$\mathbf{T_{1/2} = 77\ s}$$

Das Ergebnis entspricht dem Literaturwert der Halbwertszeit von Pa-234m.

A. 3: Präsentation

Folie 1



Folie 2

Sicherheitsaspekte

- Wenn ihr schwanger seid, dann solltet ihr an diesem Experiment nicht teilnehmen!
- Die beim Experiment verwendeten Stoffe sind (schwach) radioaktiv!
- Haltet Abstand zur radioaktiven Quelle!
- Seid vorsichtig und geht behutsam mit den Isotopengeneratoren und Messgeräten um!
- Lasst den Isotopengenerator nicht fallen!

Institut für Radioökologie und Strahlenschutz

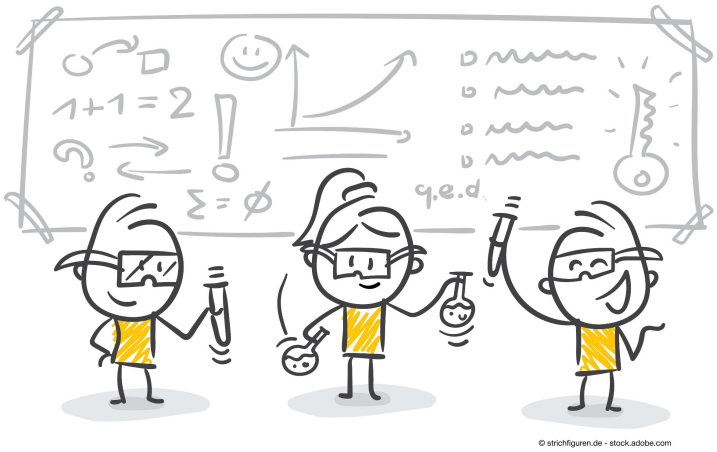
Folie 3

Messgerät - Funktionsweise

Institut für Radioökologie und Strahlenschutz

Folie 4

Durchführung



Institut für Radioökologie und Strahlenschutz

Folie 5

Vergleichen der Ergebnisse

Gemessene Halbwertszeit in [s]	Vermutetes Isotop

Institut für Radioökologie und Strahlenschutz

Folie 6

Protactinium-234m

Institut für Radioökologie und Strahlenschutz

Folie 7

Definition

Die Halbwertszeit gibt an, …

© strichfiguren.de - stock.adobe.com

Institut für Radioökologie und Strahlenschutz

Folie 8

Definition

Die Halbwertszeit gibt an, nach welcher Zeitspanne sich die Anzahl der radioaktiven Ausgangskerne halbiert hat.

© strichfiguren.de - stock.adobe.com

Institut für Radioökologie und Strahlenschutz

Folie 9

Reflexion

- Gab es etwas Überraschendes oder Unerwartetes?
- Was könnte das Resultat beeinflusst haben?
- Wie ließe sich das Experiment verbessern?

© strichfiguren.de - stock.adobe.com

Institut für Radioökologie und Strahlenschutz

Folie 10

IRS
Vielen Dank für eure Mitarbeit!
Institut für Radioökologie und Strahlenschutz

Folie 11

Eigenständigkeitserklärung

„Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, dass alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht wurden und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt worden ist.“

Neustadt, den 18. April 2022 Antonia Neuburg