

Universität zu Köln

Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät

Bachelorarbeit  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Arts

**Aufbereitung und Messung von Proben mit natürlicher Radioaktivität  
für den Schulunterricht**

Lehramt an Gymnasien und Gesamtschulen  
Unterrichtsfach Chemie

**Erstgutachter\*in:** Dr. Erik Strub

**vorgelegt von:**

Simon Obrusnik (Matrikelnummer: 7382121)

S-Mail: [sobrusni@smail.uni-koeln.de](mailto:sobrusni@smail.uni-koeln.de)

## Versicherung an Eides Statt (Abgabe Abschlussarbeit)

Ich,

Vor- und Nachname:	Simon Obrusnik	
Straße, Hausnr.:	Itterstraße, 11	
PLZ, Stadt:	40721	Hilden
Matrikelnummer:	7382121	

**versichere an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne die Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.  
Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.  
Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden.  
Falls meine Prüfer\*in von mir zu Begutachtungszwecken zusätzlich zur elektronischen Fassung der Arbeit eine Druckfassung erhält, versichere ich, dass letztere vollständig mit der eingereichten elektronischen Fassung übereinstimmt.**

Die Strafbarkeit einer falschen eidesstattlichen Versicherung ist mir bekannt, namentlich die Strafandrohung gemäß § 156 StGB mit bis zu drei Jahren Freiheitsstrafe oder Geldstrafe bei vorsätzlicher Begehung der Tat bzw. gemäß § 163 Abs. 1 StGB mit bis zu einem Jahr Freiheitsstrafe oder Geldstrafe bei fahrlässiger Begehung.

Hilden, 30.07.2023

Ort, Datum



Unterschrift

---

Abbildungsverzeichnis .....	iii
Abkürzungsverzeichnis .....	IV
Tabellenverzeichnis.....	5
1 Einleitung.....	1
2. Kenntnisstand.....	2
2.1 Natürliche Radioaktivität.....	2
2.2 Kalium-40 in Bananen.....	2
2.3 Radium-226 in Paranüssen .....	3
2.4 Polonium-210 in Tabak .....	4
2.5 Didaktisches Potential .....	5
2.6 Bau der Detektoren .....	5
3. Experimenteller Teil .....	7
3.1 Kalium-40 aus Bananen.....	7
3.1.1 Geräte und Chemikalien.....	7
3.1.2 Durchführung .....	7
Radium-226 aus Paranüssen.....	8
3.1.3 Geräte und Chemikalien.....	8
3.1.4 Durchführung: Eindampfen mit Salzsäure .....	8
3.1.5 Durchführung: Fällung mit Schwefelsäure .....	9
3.2 Polonium aus einem Uranmineral .....	10
3.3 Polonium-210 aus Tabak.....	11
3.3.1 Geräte und Chemikalien.....	11
3.3.2 Durchführung .....	11
3.3.3 Beobachtung.....	12
3.4 Detektorbau .....	12
4 Ergebnisse und Diskussion .....	14
4.1 Kalium-40 in Bananen.....	14
4.2 Radium-226 in Paranüssen .....	17

---

4.2.1	[Ra-226] Radiumchlorid aus Paranüssen .....	17
4.2.2	[Ra-226] Radiumsulfat aus Paranüssen.....	17
4.3	Abscheidung von Polonium aus einem Uranmineral .....	18
4.4	Polonium-210 in Tabak .....	19
4.5	Didaktik .....	22
5	Fazit.....	24
Literaturverzeichnis.....		VI
Anhang .....		IX

---

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Veraschung von 6 Paranüssen im Abzug .....	9
Abb. 2 Weißer Niederschlag durch Zugabe von Schwefelsäure zum Filtrat aus Paranüssen .....	10
Abb. 3 Platine des Alpha-Spektrometers .....	13
Abb. 4 Alpha-Spektrometer mit einem [Ra-226] Radium Präparat an einem analogen Oszilloskop.....	13
Abb. 5 Gamma Spektrum des aus Bananen isolierten Feststoffes .....	14
Abb. 6 Spektrum eines Cs-137 Kalibrierpräparates im selbstgebauten Beta-Gamma-Detektor.....	15
Abb. 7 Spektrum eines Am-241 Kalibrierpräparates im selbstgebauten Beta-Gamma-Detektor.....	15
Abb. 8 Spektrum eines Co-60 Kalibrierpräparates im selbstgebauten Beta-Gamma-Detektor.....	15
Abb. 9 Spektrum eines Eu-152 Kalibrierpräparates im selbstgebauten Beta-Gamma-Detektor.....	15
Abb. 10 Screenshot der Applikation während der Vermessung der Probe aus Bananen .....	16
Abb. 11 Alpha-Spektrum des Paranusspräparats über 2 Tage aufgenommen. ....	17
Abb. 12 Gamma-Spektrum von Versuchsansatz 4.2.....	21
Abb. 13 Alphaspektrum des abgeschiedenen Poloniums im professionellen Alpha-Spektrometer .....	18
Abb. 14 Screenshot des Alpha-Spektrums in "Becquerel Monitor" .....	19

---

## Abkürzungsverzeichnis

°C .....	Grad Celsius
a .....	Jahr
cm.....	Centimeter
g .....	Gramm
h .....	Stunde
keV .....	Kiloelektronenvolt
kg.....	Kilogramm
mBq.....	Millibequerel
MeV .....	Megaelektronenvolt
mg .....	Milligramm
ml .....	Milliliter
ROI.....	region of interest
SuS .....	Schülerinnen und Schüler

---

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Für den Versuch relevante Normalpotentiale. ....	4
Tab. 2 Autodepositionsbedingungen .....	11
Tab. 3 Ereignisse verursacht durch den Zerfall auf den Silberblechen in verschiedenen Energiebereichen .....	19
Tab. 4 Mögliche Nuklide im Energiebereich unterhalb 5 MeV.....	20

---

# 1 Einleitung

Radioaktivität ist ein Thema, welches von der allgemeinen Bevölkerung nur gering verstanden wird. Die unzureichende schulische Bildung und damit einhergehend fehlende Grundkenntnisse über dieses Thema erschweren mögliche Kommunikation über dieses hoch politische Thema. Dabei ist Radioaktivität kein Thema, was exklusiv nur in Atomkraftwerken oder im Militär relevant ist, sondern es ist Teil der Natur. Menschen sind konstant einer gewissen Menge an Strahlenbelastung ausgesetzt. Diese setzt sich zusammen aus terrestrischer und kosmischer Strahlung, sowie zusätzlicher künstlichen Strahlung.

Schulische Kernlehrpläne beschreiben zwar im Rahmen des Physikunterrichtes als Thema „Kernphysik“ Ansätze zur Bildung über Radioaktivität, aber Sicherheitsvorschriften für Schulen verbieten zunehmend das experimentelle Arbeiten mit Radionukliden, was dieses Thema zu einer rein theoretischen Unterrichtsreihe macht. Natürlich vorkommende Radionuklide wie  $^{238}\text{U}$  in Form von Mineralien und  $^{232}\text{Th}$  in Form von alten Glühstrümpfen werden aus den meisten Schulen verbannt, was dazu führt, dass ein möglich vorhandener und sehr teurer Geiger-Müller-Zähler nur noch den Untergrund misst.

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es eine Experimentalreihe zum Thema Nuklearchemie zu entwerfen, die durch den Umgang von radioaktiven Mineralien dennoch alle Sicherheitsvorschriften für das Arbeiten mit Radionukliden im schulischen Kontext ermöglicht. Dazu wird von natürlichen, in Pflanzen angereicherten Radionukliden, wie  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  und  $^{210}\text{Po}$  Gebrauch gemacht. Da nicht vorausgesetzt werden kann, dass Schulen die nötigen Geräte zur Vermessung dieser Proben haben, werden zusätzlich Detektoren, die kostengünstig und einfach zu bauen sind, auf Ihre Fähigkeit, die hergestellten Proben zu vermessen, geprüft.

Die Thematik dieser Bachelorarbeit bietet die Möglichkeit des fächerübergreifenden Unterrichtes. Es werden Inhalte für die Fächer: Chemie, Physik, Biologie und Informatik geboten.

---

## 2. Kenntnisstand

### 2.1 Natürliche Radioaktivität

Es gibt zwei Quellen natürlicher Radioaktivität: Die terrestrischen Nuklide und die kosmogenen Nuklide. Terrestrische oder primordiale Radionuklide, sind Radionuklide, die während der Entstehung der Erde bereits existierten und aufgrund deren langer Halbwertszeit bis zum heutigen Tag noch nicht vollständig zerfallen sind. Dazu gehören u.a. das  $^{40}\text{K}$ , sowie  $^{238}\text{U}$  und  $^{232}\text{Th}$  [18]. Die Zerfallsprodukte von Uran und Thorium sind selbst radioaktiv, zerfallen mit einer deutlich kürzeren Halbwertszeit, werden allerdings konstant von vorhandenem Uran in der Erde nachgebildet. Diese Radionuklide werden als radiogene Nuklide bezeichnet. Diese umfassen das  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  und u.a. das  $^{210}\text{Po}$  [18].

Kosmogene Nuklide, wie  $^{14}\text{C}$  und  $^{22}\text{Na}$  zeichnen sich durch eine vergleichsweise kurze Halbwertszeit aus. Sie sind auf der Erde für einen Teil der natürlichen Radioaktivität verantwortlich, weil sie in den oberen Teilen der Atmosphäre durch die kosmische Strahlung konstant gebildet werden und dementsprechend auf der Erde zerfallen können. Teilweise werden die kosmogenen Nuklide durch biologische Prozesse, Teil eines Ökosystems und damit der Teil der Flora und Fauna, was zwar keine biologischen Prozesse stört aber zur weiteren Erhöhung der natürlichen Hintergrundstrahlung beiträgt.

### 2.2 Kalium-40 in Bananen

Bananen, insbesondere die Cavendish Banane sind für viele ein fester Bestandteil des Obstsortiments. Als Quelle von Kohlenhydraten und anderen Mikronährstoffen können sie im Rahmen einer gesunden Ernährung verzehrt werden. Bekannt sind Bananen für den hohen Anteil an Kalium. Eine durchschnittlich große Banane enthält ca. 350 Milligramm Kalium [17]. Dabei kommt Kalium auf der Erde nicht isotonenrein als stabiles  $^{39}\text{K}$  vor, sondern Anteile an radioaktiven  $^{40}\text{K}$  in Höhe von 0,0117% [18] sind auch vorhanden. Da die Frucht nur chemisch selektiert und Isotope nicht durch chemische Verfahren voneinander trennbar sind, reichert die Frucht auch das radioaktive  $^{40}\text{K}$  an. Dieses ist zu 89% ein Beta-Minus-Strahler und zu 11% ein  $\beta^+$ /Elektroneneinfang Nuklid mit einer Halbwertszeit von ca. 100.000 Jahren. Der Konsum von Bananen verursacht durch die natürliche Radioaktivität allerdings keine gesundheitlichen Schäden. Allerdings ist es dennoch für die Hälfte aller im menschlichen Körper stattfindenden radioaktiven Zerfälle verantwortlich. Ein 70 kg

---

Mensch enthält 0,18 Massenprozent an Kalium, von dem wiederum 0,0117%  $^{40}\text{K}$  ist. Umgerechnet sind das 126 g Kalium in einem menschlichen Körper mit einem Gehalt von denen 14,7 mg  $^{40}\text{K}$  sind. Das entspricht einer Aktivität von 4400 Bq und einer jährlichen Strahlenbelastung von 0,165 mSv [18].

Die Umrechnung der Strahlendosis durch in Bananen enthaltenes  $^{40}\text{K}$  ist dabei allerdings durch die strenge Regulierung des menschlichen Körpers der Homöostase nicht sinnvoll. Kalium hat eine biologische Halbwertszeit von 30 Tagen, allerdings wird überschüssiges Kalium (auch  $^{40}\text{K}$ ), welches durch den Verzehr einer Banane in den Körper gelangt weitaus schneller, als mit einer Halbwertszeit von 30 Tagen ausgeschieden, weshalb die Effektive Dosis durch  $^{40}\text{K}$  unabhängig vom Bananenkonsum ist [1].

Kalium als Element wurde zuerst von Humphry Davy durch Elektrolyse aus einer schwach alkalischen Lösung mit Pflanzenasche, sogenannter Pottasche gewonnen [10]. Dies inspirierte auch den Versuch zur Gewinnung von Kalium aus Bananen, bei dem man sich im Rahmen der Nuklearchemie auf das  $^{40}\text{K}$  fokussiert.

Der Versuch der Allgemeinheit, Größenordnung von Strahlendosen zu veranschaulichen, findet sich als Maßeinheit: Bananenäquivalenzdosis, kurz BED wieder. Dabei wird auf genau die Strahlendosis, die durch den Verzehr einer durchschnittlich großen Banane mit dessen  $^{40}\text{K}$  Gehaltes Bezug genommen [19].

### 2.3 Radium-226 in Paranüssen

Paranüsse sind als Nahrungsmittel eine gute Quelle an Aminosäuren und essentiellen Fettsäuren. Außerdem sind sie für einen recht hohen Selengehalt bekannt [5]. Der wirtschaftlich größte Produzent an Paranüssen ist Brasilien. Einige Böden in Brasilien enthalten erhöhte Mengen an Thorium, der zu einer  $^{228}\text{Ra}$  Aktivität in den Böden von bis zu 70 Bq/g [4] führen kann. Allerdings entspricht die Radiumaktivität in den Böden, wo Paranüsse angebaut werden den typischen 19 bis 74 mBq/g [4]. Pflanzen nehmen generell eher Calcium, statt Barium aus dem Boden auf. Dabei stellt die Paranuss eine Ausnahme da, bei der das Ca/Ba-Verhältnis signifikant stärker auf der Seite des Bariums liegt verglichen mit anderen Pflanzen [4]. Barium und Radium sind für die Pflanze chemisch identisch und dadurch resultiert aus einer erhöhten Bariumaufnahme auch ein erhöhter Radiumgehalt. Die Radiumaktivität von einem Kilogramm Paranüssen beträgt durchschnittlich 102 Bq [4]. Je nach Herkunftsregion können Abweichungen von 27 Bq/kg bis zu 264 Bq/kg auftreten [4].

## 2.4 Polonium-210 in Tabak

Die getrockneten Blätter der Tabakpflanze werden schon lange von Menschen geraucht. Dabei sind die gesundheitlichen Folgen des Rauchens auch schon seit mehreren Jahrzehnten bekannt. Dass Verbrennungsprodukte wie Teer und Kohlenstoffmonoxid nicht in die Lunge gelangen sollten, kann man als Allgemeinwissen voraussetzen. Dabei hat die Tabakpflanze eine weitere Eigenschaft, die das Rauchen der Blätter gesundheitsschädigend macht. Durch Trichome, die sich auf der Oberfläche der Blätter befinden, ist die Tabakpflanze in der Lage die Zerfallsprodukte des natürlich vorkommenden Radons aus der Luft zu absorbieren, wo das Polonium weiter zu Blei und anderen Poloniumisotopen zerfällt [2][3]. Dadurch kommen Poloniumaktivitäten in getrockneten Tabakblättern von bis zu 17 mBq/g zu stande. Wenn diese Zerfälle (nicht nur  $^{210}\text{Po}$ , sondern auch  $^{210}\text{Pb}$  und  $^{214}\text{Bi}$ ) innerhalb der Lunge stattfinden, erhöht das bei einem durchschnittlichen Konsum von 20 Zigaretten pro Tag die natürliche Strahlendosis um das ca. 12-fache [2]. Obwohl die Aktivitätswerte von Tabak so gering sind, trägt rauchen (oder allgemein das einatmen von Radon und dessen Zerfallsprodukten) stark zur durchschnittlichen Strahlenexposition bei. Dies liegt einerseits am hohen linearen Energietransfer der  $\alpha$ -Strahlen und zweitens daran, dass in der Lunge die Deposition direkt in einem strahlenempfindlichen Organ stattfindet.

Gelöste Polonium-Ionen können sich an der Oberfläche des Silbers abscheiden, da sowohl zweiwertige, wie auch vierwertige Polonium-Ionen im sauren, wie auch im alkalischen Milieu ein, wie in Tabelle 1 zu erkennendes, höheres Standardpotential besitzen als das korrespondierende Redoxpaar des Silbers.

Tab. 1: Für den Versuch relevante Normalpotentiale.

Reaktion	Potential [V]	Quelle
$\text{Po} \rightarrow \text{Po}^{2+} \text{ in HCl}$	0,37	[6]
$\text{Po} \rightarrow \text{Po}^{4+} \text{ in HCl}$	0,784	[7]
$\text{Ag} + \text{Cl}^- \rightarrow \text{AgCl} \text{ in HCl}$	0,2223	[6]
$2 \text{Ag} + 2 \text{OH}^- \rightarrow \text{Ag}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	0,345	[8]

---

## 2.5 Didaktisches Potential

Im Folgenden beziehen sich die Aussagen über Inhalte der Kernlehrpläne nur auf die für die Schulformen Gymnasium im Bundesland Nordrhein-Westfalen. Der Kernlehrplan für die gymnasiale Oberstufe im Fach Physik beschreibt im Inhaltsfeld 4 für den Grundkurs die Thematik: Strahlung und Materie [14]. Inhaltliche Schwerpunkte sind hierbei u.a. das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung, Ionisierende Strahlung und die Kernumwandlung. Dabei werden im Punkt „Basiskonzept Wechselwirkung“ Detektoren und biologische Wirkung von ionisierender Strahlung [14] erwähnt. Erweiternd dazu werden im Unterpunkt „Umgang mit Fachwissen“ für den Leistungskurs Zerfallsgesetze und Absorptionsgesetze [14] erwähnt. Der Kernlehrplan schafft hiermit einen idealen Rahmen für die Theorie hinter den geplanten Versuchen. Die Trennverfahren, die in diesen Versuchen Anwendung finden, wurden bereits in der Sekundarstufe I im Chemieunterricht vermittelt [15].

## 2.6 Bau der Detektoren

Da man nicht davon ausgehen kann, dass Schulen die nötigen Geräte haben, um Radioaktivität in jeglicher Form nachzuweisen, werden zusätzlich zur Optimierung der Experimente auch kostengünstige Detektoren nachgebaut und auf ihre Einsatzfähigkeit zu Vermessung der hergestellten Proben überprüft. Die Detektoren wurden nach einer Anleitung, die vom CERN veröffentlicht wurde, gebaut [9]. Es gibt zwei verschiedene Varianten: Ein Alphaspektrometer und ein Beta-Gamma-Detektor. Da Alpha-Messungen normalerweise unter Vakuumbedingungen geschehen, werden die gemessenen Alphaenergien im Vergleich zu einem professionellem Alphaspektrum um 1 bis 2 MeV in den niederenergetischen Bereich verschoben und verbreitert sein. Es soll möglich sein ein Spektrum von den Alpha-Zerfällen aufzuzeichnen, um anhand dessen verschiedene Isotope eines vermessenen Präparates zu identifizieren. Ein Beta-, Gamma-, oder Röntgenspektrum soll wohl nicht möglich sein [9]. Die Zuordnung von Zerfallsenergien ist mit dieser Art von Detektor schwierig zu messen, weil aktive Teil des verwendeten Detektors so klein ist, dass die Zerfallsenergie in den meisten Fällen nicht komplett im Detektor absorbiert wird. Für Photonen mit einer Energie von über 100 keV ist die Effizienz des Detektors mit 0,5% sehr gering [9]. Dieser Energiebereich schließt einen Großteil des Gammaskpektrums, sowie mit 1460 keV das des  $^{40}\text{K}$  aus.

---

Der Beta-Detektor kann mehr als ein Geiger-Müller-Zähler eingesetzt werden, um generell Beta- und Gammastrahlung zu detektieren aber nicht, um anhand von charakteristischen Energiespektren, Isotope zu identifizieren.

Die Kosten für die Teile der Detektoren belaufen sich auf etwa 20 Euro pro Detektor, wobei für den Alphanetektor eine teurere BPX-61 Silizium PIN Foto Diode in den meisten Versuchen genutzt wurde. Die Detektoren verfügen über einen BNC-Anschluss und werden über einen Adapter mit einem 4-pin 3,5 mm Klinkenanschluss entweder an die eingebaute oder eine externe Soundkarte angeschlossen. Die elektrischen Signale werden von Programmen wie „Theremino“ [20] oder „BecquerelMonitor“ [21], sogenannten MCA; Multi-Channel Analyzer zu sichtbaren Spektren verarbeitet. Die Programme werden von Wissenschaftsenthusiasten meist zur  $\gamma$ -Spektrometrie genutzt, können aber auch verwendet werden, um ein  $\alpha$ -Spektrum aufzuzeichnen.

---

## 3. Experimenteller Teil

### 3.1 Kalium-40 aus Bananen

In diesem Versuch wird kein isotopenreines  $^{40}\text{K}$  aus der Cavendish Banane extrahiert, sondern jegliches vorhandene Kalium in Form von festem Kaliumcarbonat.

#### 3.1.1 Geräte und Chemikalien

Die für den Versuch verwendeten Geräte und Chemikalien wurden so ausgesucht, dass sie realistisch in einer gut ausgestatteten Schule zu finden sein könnten und dass Teilschritte des Experimentes von den Schülerinnen und Schülern (im fortlaufenden Text als „SuS“ abgekürzt) durchgeführt werden dürfen.

- Becherglas mit einem Volumen von 50 ml
- Glastrichter
- Filterpapier
- Muffelofen

#### 3.1.2 Durchführung

Um sichtbare Mengen an Kaliumcarbonat zu erhalten wurden für einen Versuchsansatz 490 g an geschälten Bananen verwendet. Diese wurden getrocknet und verascht. Die daraus erhaltene Asche, mit einer Masse von 2,5 g wurde in einem Filter gewaschen. Da Alkalicarbonat im Gegensatz zu Erdalkalicarbonaten gut wasserlöslich sind, enthielt das Filtrat gelöstes Natriumcarbonat, Kaliumcarbonat und Cäsiumcarbonat. Das Filtrat wurde mit Hilfe einer Heizplatte bis zur Trockne eingedampft. Das Becherglas, in dem der Rückstand enthalten ist wurde in einen Germanium-Lithium-Detektor gestellt und für 14 h ein  $\gamma$ -Spektrum aufgezeichnet.

---

## Radium-226 aus Paranüssen

In diesem Versuch wird kein isotonreines  $^{226}\text{Ra}$  aus Paranüssen extrahiert, sondern ein Gemisch aus Barium- und Radiumsalzen.

### 3.1.3 Geräte und Chemikalien

Das Experiment wurde mehrmals durchgeführt. Die Radiumextraktion wurde einmal durch das Eindampfen mit Salzsäure, sowie durch die Fällung mit Schwefelsäure durchgeführt.

- 10 g Paranüsse
- Konzentrierte Salzsäure
- Konzentrierte Schwefelsäure
- Becherglas mit einem Volumen von 50 ml
- Objektträger aus Metall
- Zentrifuge
- Zentrifugenröhrchen
- Mikroreaktionsgefäße mit einem Volumen von 1,5 ml
- Apparatur zum Abnutschen
- Kartuschen Brenner
- Dreibein
- Abdampfschale

### 3.1.4 Durchführung: Eindampfen mit Salzsäure

Beim ersten Schritt ist äußerste Vorsicht geboten, siehe Abschnitt 3.1.4.1.! Paranüsse mit einem Gesamtgewicht von 5 g wurden gemörsert und in einer Abdampfschale mit einem Kartuschen Brenner im Abzug verascht. Die übrig gebliebene Asche hatte eine Masse von 0,33 g. Diese Asche wurde in konzentrierter Salzsäure gelöst. Die entstandene Suspension wurde abgenutscht. Das Filtrat wurde eingedampft, mit einigen Tropfen konzentrierter Salzsäure wieder aufgenommen und diese salzsaure, heiße Lösung in ein Mikroreaktionsgefäß gegeben. Dieses wurde in ein Eisbad gestellt, bis sich ein Niederschlag bildete. In der Kälte fallen aufgrund des temperaturabhängigem Löslichkeitsprodukte Barium- und Radiumchlorid, sowie andere Elemente der Chloridgruppe: Blei-, Silber- und Quecksilberchlorid aus. Nach dem Zentrifugieren, konnte der Rückstand in einer kleinen Menge Wasser gelöst werden und auf einem metallischen Objektträger erneut eingedampft werden. Der so

hergestellte Feststoff wurde über 2 Tage im Vakuum im Alphaspktrometer vermessen.

#### 3.1.4.1 Beobachtung

Abbildung 1 verdeutlicht die bei der Veraschung entstehende, starke Rauchbildung. Bei Mengen oberhalb von 1 g, entzündet sich das Material meist von alleine.



Abb. 1 Veraschung von 6 Paranüssen im Abzug

Kurz vor der Trockne des einzudampfenden Filtrats, lässt sich eine grüne Verfärbung der Lösung beobachten, die auf andere in der Paranuss enthaltene Übergangsmetalle schließen lässt.

#### 3.1.5 Durchführung: Fällung mit Schwefelsäure

Der Ablauf zur Gewinnung von Asche aus Paranüssen war hierbei genau der gleiche. Die Asche wurde in 10 ml konzentrierter Salzsäure gelöst und die entstandene Suspension abgenutscht. Das Filtrat wurde solange mit konzentrierter Schwefelsäure versetzt, bis sich kein weiterer Niederschlag gebildet hat. Die Suspension wurde für 3 Minuten bei 3000 Umdrehungen pro Minute zentrifugiert und der Überstand abdekantiert. Der Rückstand wurde auf einen Objektträger gekratzt und nach dem Trocknen an der Luft für 2 Tage im Vakuum mit einem Alphaspktrometer vermessen.

## Beobachtung

Da das Verfahren zur Gewinnung der Paranussasche das gleiche war, konnten die gleichen Beobachtungen gemacht werden. Durch die Zugabe von konzentrierter Schwefelsäure konnte, wie in Abb. 2 gezeigt, die Bildung eines weißen Niederschlags beobachtet werden.

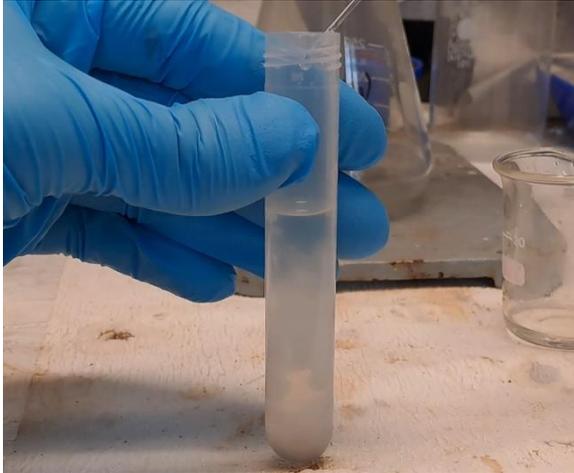


Abb. 2 Weißer Niederschlag durch Zugabe von Schwefelsäure zum Filtrat aus Paranüssen

## 3.2 Polonium aus einem Uranmineral

Dieser Versuch diente dazu, die Einfachheit der Abscheidung von Polonium auf einem Silberblech genauer zu prüfen. Da ein Uranmineral eine wesentlich höhere Konzentration an Polonium aufweist.

Dazu wurden ca. 3 g eines Uranminerals über zwei Tage in konzentrierter Salzsäure gelagert. Auf eine zusätzliche Zerkleinerung der Mineralien wurde absichtlich verzichtet, da die Abscheidung mit einem so geringen Aufwand wie möglich stattfinden sollte. Anschließend wurde ein ungereinigtes Silberblech mit den Maßen von 1 cm<sup>2</sup> für 2 h in die auf 80 °C erhitzte Lösung gegeben. Nach der Autodepositionszeit, wurde das Silberblech mit destilliertem Wasser abgespült und in einem Alpha-Spektrometer für 20 Minuten vermessen.

### 3.3 Polonium-210 aus Tabak

In diesem Versuch wird kein isotopenreines  $^{210}\text{Po}$  abgeschieden. Aufgrund der vergleichsweise kurzen Halbwertszeit der anderen Poloniumisotope, kann allerdings davon ausgegangen werden, dass der Großteil des abgeschiedenen Poloniums, das Isotop mit der Massezahl 210 ist. Vorarbeit zur Abscheidung von Polonium leisteten Sebastian von Döllen [11] und Sabine Heim [12] im Rahmen ihrer Bachelorarbeiten. Allerdings ist das Vorkommen von erhöhten Mengen an  $^{210}\text{Po}$  in Tabak und dessen Auswirkungen als starkes Karzinogen schon länger bekannt [22][23].

#### 3.3.1 Geräte und Chemikalien

Die für den Versuch verwendeten Geräte und Chemikalien wurde so ausgesucht, dass sie realistisch in einer durchschnittlich ausgestatteten Schule zu finden sein können und, dass alle Teilschritte von SuS durchgeführt werden können und dürfen.

- 4 Bechergläser mit einem Volumen variierend zwischen 50 und 100 ml
- Salzsäure der Konzentration 4 M
- L-Ascorbinsäure
- 4 Silberbleche mit einer Fläche von ca.  $1\text{ cm}^2$
- Filterpapier

#### 3.3.2 Durchführung

Das Ziel war es eine Methode zu entwickeln, die ein Kompromiss zwischen Einfachheit der Durchführung und Höhe der Ausbeute im schulischen Rahmen darstellt. Dazu wurde eine Versuchsreihe angesetzt, deren Unterschiede und Gemeinsamkeiten bei der Durchführung in Tab. 2 aufgeführt sind:

Tab. 2 Autodepositionsbedingungen

Ansatz	Tabak [g]	L-Ascorbinsäure [mg]	Autodepositionszeit [h]	Temperatur [°C]	Salzsäure [ml], [M]
1	3	-	2	80	30, 0,5
2	3	250	2	80	30, 0,5
3	3	250	2	80	30, 0,5
4	3	250	2	80	30, 0,5

Für alle Versuche wurde das Silberblech vorher gereinigt, indem es für einige Minuten in warme, 4 molarer Salzsäure gelegt wurde. In Ansatz 1 und 2 wurde das Silberblech in die Salzsäure, in der optional L-Ascorbinsäure gelöst war, gegeben und anschließend der Tabak. Die L-Ascorbinsäure soll als Reduktionsmittel bei der Reduktion des Poloniums helfen und damit die Autodepositionsbedingungen verbessern [12].

Für Versuch 3 und 4 wurde der Tabak zusätzlich in einen Filter gegeben. Im Becherglas wurde das gereinigte Silberblech zusammen mit der L-Ascorbinsäure vorgelegt. Der Tabak wurde in das gefaltete Filterpapier gegeben und anschließend gleichmäßig mit der Salzsäure gewaschen. Der Unterschied hierbei war, dass in Ansatz 3 das Filterpapier mit dem enthaltenen Tabak während der Autodepositionszeit keinen Kontakt zur Waschlösung haben durfte, wohingegen in Versuch 4 der Tabak in der Waschlösung mazerieren konnte. Die Silberbleche wurden nach der Autodepositionszeit jeweils für 1 h mit Vakuum in einem Alpha-Spektrometer vermessen.

### 3.3.3 Beobachtung

Keines der Silberbleche zeigte zunächst optische Veränderungen. Nach 2 Wochen in der Sonne konnte eine braune Verfärbung der Bleche beobachtet werden. Die Waschlösungen in Ansatz 1 und 2 waren tief braun verfärbt. Die Waschlösung aus Ansatz 4 war deutlich dunkler, als die gelbliche Waschlösung aus Ansatz 3.

## 3.4 Detektorbau

Beide Detektoren konnten nach der Anleitung von CERN gebaut werden. Dabei erwies sich der Bau des in Abb. 3 und Abb. 4 gezeigten Beta-Gamma-Detektors als leichter, da der fertige Detektor in 4 von 5 Fällen nach dem Zusammenlöten einwandfrei funktionierte. Die genaue Anleitung dazu befindet sich im Anhang dieser Arbeit.



Abb. 3 Platine des Beta-Gamma-Detektors



Abb. 4 Beta-Gamma-Detektor mit einem [Cs-137] Cäsium Präparat an einem analogen Oszilloskop

Der Zeitaufwand von der Sortierung der benötigten Teile bis zur ersten Messung am Oszilloskop beträgt selbst bei rudimentären Kenntnissen und Erfahrung mit Elektronik und dem Löten, ca. 4 Stunden. Ein häufiger Fehler im Nachhinein war meist von einer leeren 9 V Batterie auf das Versagen des Detektors zu schließen.

Der Bau des Alpha-Spektrometers gestaltete sich anspruchsvoller aufgrund der verwendeten Fotodiode. Ein Bauabschnitt beinhaltet das Glasfenster der Fotodiode herauszubereiten, die ansonsten die Alphastrahlung abschirmen würde. Da das Herausbrechen des Glasfensters nicht vom Hersteller vorgesehen ist, werden manche Dioden zusätzlich von Epoxidharz unter dem Glasfenster geschützt. Um dieses zu lösen, muss die Diode über Nacht in Aceton gelagert werden. Beim Abziehen des Harzes, sowie bei zu kräftigen wegblasen von Glasstaub auf der Fotodiode, kann es sein, dass der dünne Draht, der die Diode verbindet abbricht. Das erneute Anlöten erfordert viel handwerkliches Geschick. Der Bau des in Abb. 5 und 6 gezeigten Alpha-Spektrometers funktionierte in einem von 5 Versuchen.

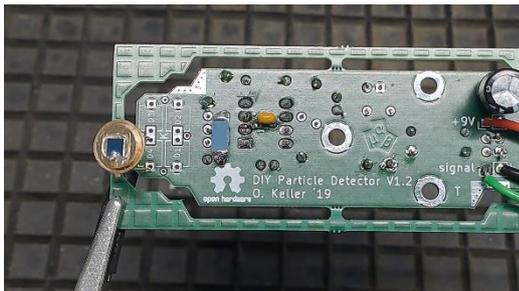


Abb. 5 Platine des Alpha-Spektrometers



Abb. 6 Alpha-Spektrometer mit einem [Ra-226] Radium Präparat an einem analogen Oszilloskop

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Kalium-40 in Bananen

Das Gamma-Spektrum welches von der erhaltenen Probe über einen Zeitraum von 14 Stunden mit einem Germanium-Lithium-Detektor aufgezeichnet wurde zeigt in Abb. 7 deutlich einen Gehalt an  $^{40}\text{K}$ , sowie an  $^{137}\text{Cs}$ .

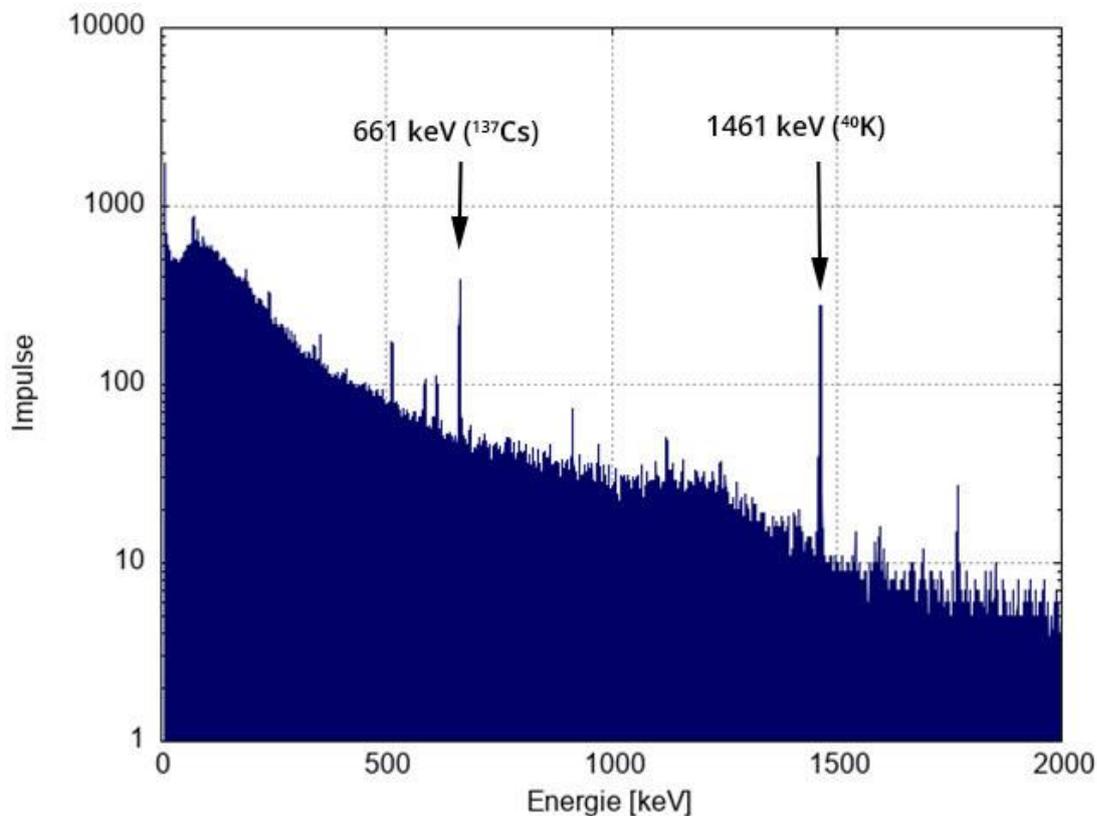


Abb. 7  $\gamma$ -Spektrum des aus Bananen isolierten Feststoffes

Der verwendete Germanium-Lithium-Detektor wurde vor der Vermessung des hergestellten Feststoffs mit einem 85,8 kBq Eu-152 Standard kalibriert. Dabei wurden Messkanälen die richtige Energie zugeschrieben und die Effizienz für die jeweiligen Energien bestimmt. Anhand der Messdaten konnte, nach Subtraktion eines skaliertes Untergrundspektrums, die Aktivität der jeweiligen Nuklide errechnet werden.

$$(1) A_{(theo.)} = \frac{A_{(gemessen)}}{\varepsilon} \times 100$$

$$(2) A_{(absolut)} = \frac{A_{(theo.)}}{I_{\gamma}} \times 100$$

Dabei beschreibt „ $\varepsilon$ “ die energieabhängige Effizienz des verwendeten Germanium-Lithium-Detektor und „ $I_{\gamma}$ “ die Auftretenswahrscheinlichkeit der Emission des jeweiligen  $\gamma$ -Quanten durch einen radioaktiven Zerfall. Die Aktivität [A] betrug laut

den Berechnungen, 26,8 Bq für  $^{40}\text{K}$  und 3,6 Bq für  $^{137}\text{Cs}$  für die gesamte aufbereitete Menge. Da das Material, das aus vier geschälten, 120 g schweren Bananen war, ergeben sich Aktivität in geschälten Bananen von: 7,5 Bq/kg durch  $^{137}\text{Cs}$  und 55,8 Bq/kg durch  $^{40}\text{K}$ .

Eine Analyse der Radionuklide durch ein  $\gamma$ -Spektrum konnte mit dem selbst gebauten Beta-Gamma-Detektor nicht erfolgreich durchgeführt werden. Vergleichsspektren, mit Kalibrierpräparaten, wie in Abb. 8-11 aufgeführt, zeigten lediglich einen Compton-Untergrund, der nur im Verhältnis zu anderen gleich gemessenen Proben und mit dem Wissen der maximalen Gamma-Energie der Probe interpretierbar ist. Die Breite des Signals scheint proportional zur höchsten emittierten Gamma-Energie zu sein.

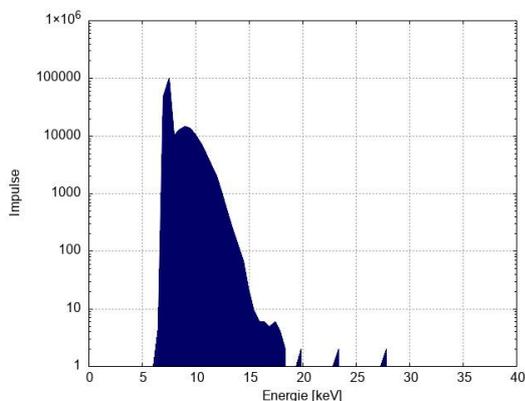


Abb. 8 Spektrum eines Am-241 Kalibrierpräparates im selbstgebauten Beta-Gamma-Detektor

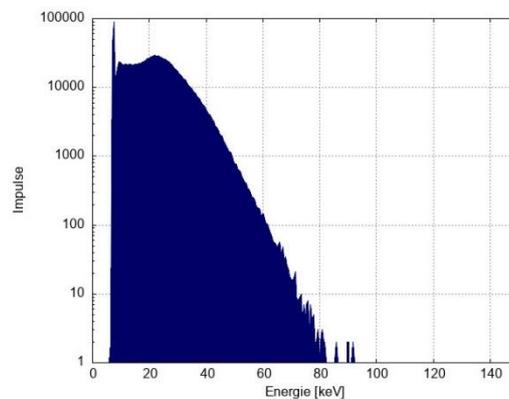


Abb. 9 Spektrum eines Cs-137 Kalibrierpräparates im selbstgebauten Beta-Gamma-Detektor

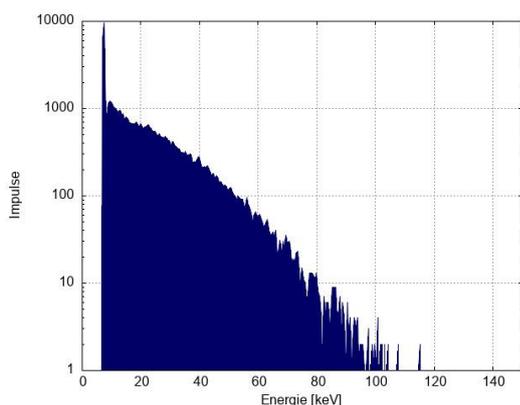


Abb. 10 Spektrum eines Co-60 Kalibrierpräparates im selbstgebauten Beta-Gamma-Detektor

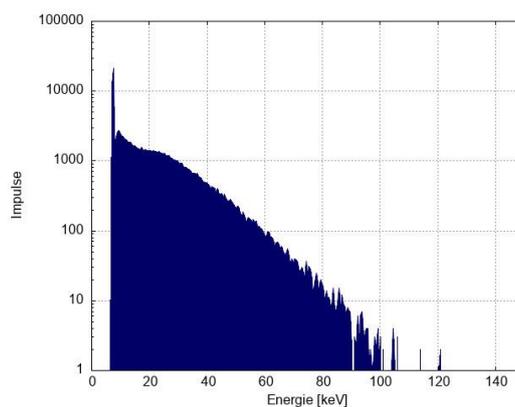


Abb. 11 Spektrum eines Eu-152 Kalibrierpräparates im selbstgebauten Beta-Gamma-Detektor

Genauere Aussagen können mit dem Spektrum nicht gemacht werden. So kann also nicht eindeutig anhand des Spektrums gezeigt werden, dass Kalium-40 und Cäsium-137 für die Zerfälle in dem aus Bananen hergestellten Präparat verantwortlich sind. Mit dem selbst gebauten Beta-Gamma-Detektor kann das genau gleiche Spektrum aufgezeichnet werden aber er ist für die Schule dennoch besser zur Auswertung des Versuches geeignet, da man mit einer Browser-Applikation die

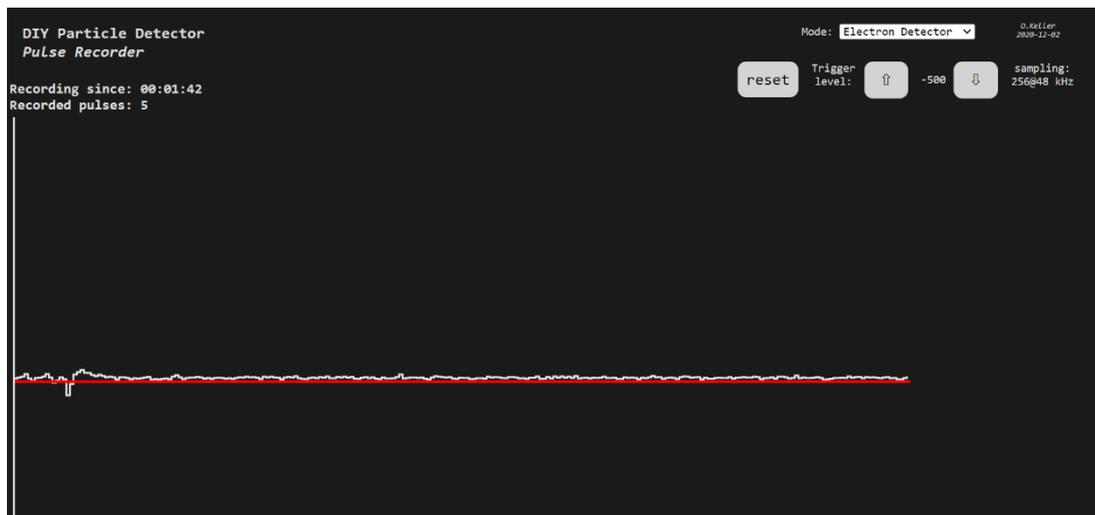


Abb. 12 Screenshot der Applikation während der Vermessung der Probe aus Bananen einzelnen Signale, die durch radioaktive Zerfälle erzeugt werden, gezählt werden können, er einfacher zu bauen ist und keine empfindliche Fotodiode besitzt, die bei falscher Benutzung leicht kaputt gehen könnte. Ein Screenshot von der Applikation in Abb. 12 zeigt, die Beobachtung, die durch einen detektierten Zerfall gemacht werden kann. Der Einsatz des Detektors beschränkt sich somit rein auf den Nachweis von Radioaktivität der Probe. Da weder mit dem Alpha-Spektrometer, noch mit dem Beta-Gamma-Detektor unter Verwendung eines Szintillator Kristalls ein für SuS verständliches Spektrum aufgezeichnet werden konnte, ist abschließend zu sagen, dass der Beta-Gamma-Detektor für die Vermessung des Bananenpräparats besser geeignet ist. Der Detektor ist leichter zu bauen und bietet, was das Zählen von Ereignissen angeht, vergleichbare Resultate zum Alpha-Spektrometer. Ein energie-aufgelöstes Spektrum konnte mit keinem der beiden Detektorarten erzielt werden.

## 4.2 Radium-226 in Paranüssen

Zur Vermessung des in Paranüssen enthaltenen  $^{226}\text{Ra}$  eignet sich die Methoden des Eindampfens mit Salzsäure mehr als die Fällung in Form eines Erdalkalisulfats mit konzentrierter Schwefelsäure.

### 4.2.1 [Ra-226] Radiumchlorid aus Paranüssen

Die Methode, das Radium in Form von Radiumchlorid durch das Eindampfen von Salzsäure zu gewinnen, resultierte im professionellem Alphas-Spektrometer in folgendes Spektrum: Der Peak in Abb. 13 umfasst den Bereich von 19 bis 29. Da 64 Kanäle zusammengefasst wurden, entspricht das den Kanälen 1216 bis 1856 in der Originalmessung, die einen Energiebereich von 4063 bis 5584 keV umfassen.

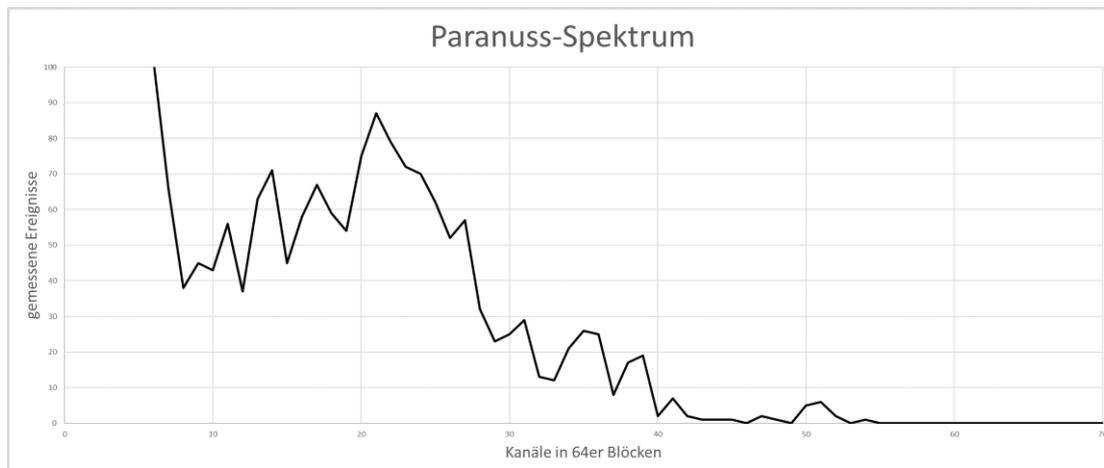


Abb. 13  $\alpha$ -Spektrum des Paranusspräparats über 2 Tage aufgenommen. 64 Kanäle zusammengefasst.

### 4.2.2 [Ra-226] Radiumsulfat aus Paranüssen

Das Fällen von reinem Radiumsulfat ist bei der geringen Konzentration, die in der Lösung mit der Paranuss vorliegen, nicht möglich. Zur Fällung braucht es ein Trägermaterial wie Barium. Dieses muss bei der Versuchsdurchführung nicht zusätzlich hinzugefügt werden, sondern ist bereits in der Lösung aus den Paranüssen enthalten, da die erhöhte Aufnahme von Barium der Grund für die erhöhte Radiumkonzentration in Paranüssen ist. Es konnte kein aussagekräftiges Spektrum aufgenommen werden, da der entstandene Feststoff, durch das Umgehen des Eindampfens und durch die Fällung, weitere Elemente, wie beispielsweise Calcium, sehr kompakt war. Das Präparat ist dadurch so dick, dass die  $\alpha$ -Teilchen durch Selbstabsorption in der Probe zurückgehalten werden und somit untergrundnahe

Mengen an  $\alpha$ -Teilchen überhaupt vom Detektor gemessen werden konnten. Der Großteil der  $\alpha$ -Teilchen wurde bereits im Feststoff absorbiert.

### 4.3 Abscheidung von Polonium aus einem Uranmineral

Ein Alphaspektrum wurde für 20 Minuten im Vakuum am professionellen Alpha-Spektrometer aufgenommen. Dieses Alphaspektrum ist in Abbildung 14 zu erkennen.

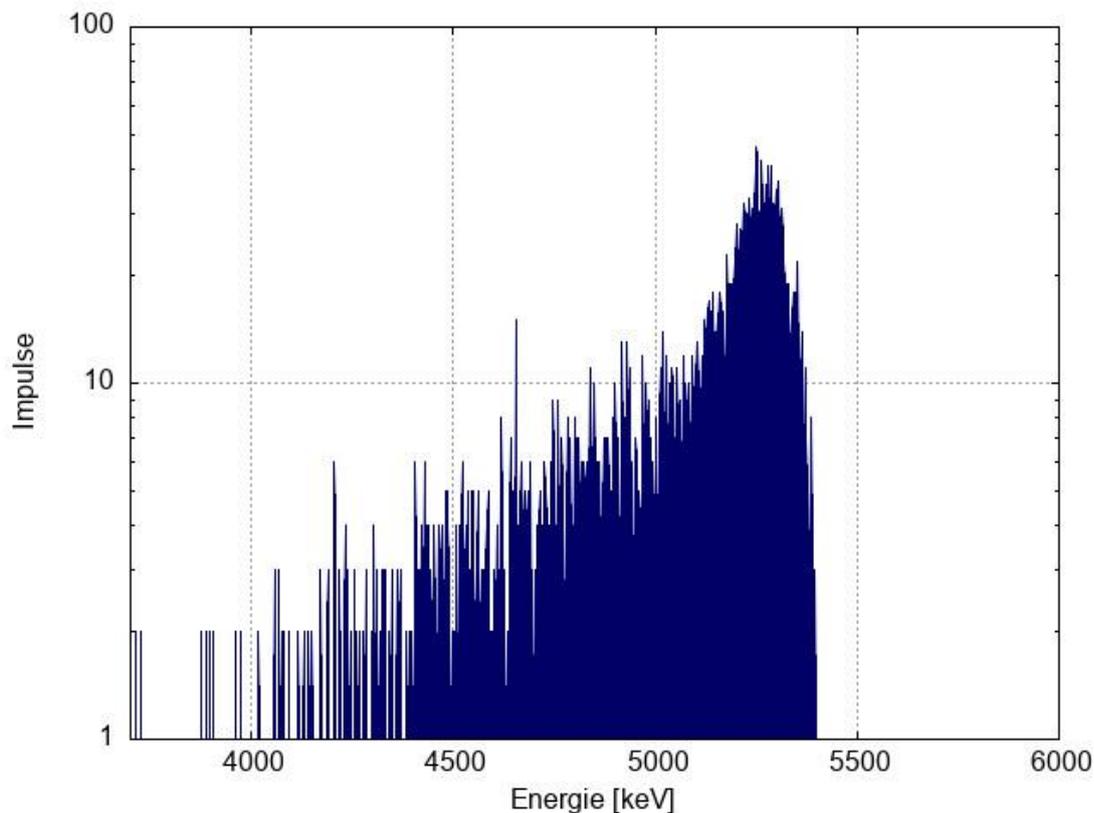


Abb. 14  $\alpha$ -Spektrum des abgeschiedenen Poloniums im professionellen Alpha-Spektrometer

Um zu zeigen, dass die Messung eines Alpha-Spektrums mit dem selbstgebauten Alpha-Spektrometer auch möglich ist, wurde das gleiche selbst hergestellte Präparat für 60 Minuten vermessen. Das mit dem selbstgebauten Alpha-Spektrometer aufgezeichnete Spektrum ist in Abb. 15 zu sehen.

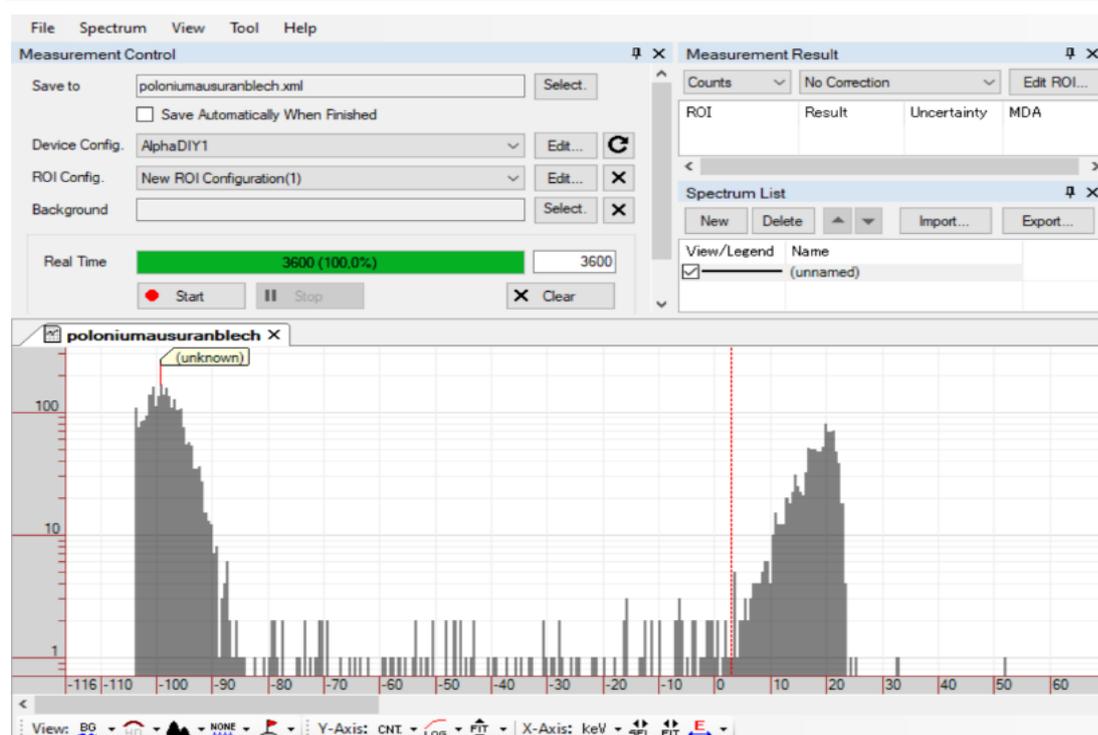


Abb. 15 Screenshot des  $\alpha$ -Spektrums in "Becquerel Monitor"

#### 4.4 Polonium-210 in Tabak

Zur besseren Vergleichbarkeit der vier Versuchsansätze wurde die Versuchsreihe zweimal wiederholt und deren Ergebnisse in Tabelle. 3 zusammengefasst. Für die Messung wurde das professionelle Alpha-Spektrometer verwendet.

Tab. 3 Ereignisse verursacht durch den Zerfall auf den Silberblechen in verschiedenen Energiebereichen

Versuchsansätze	Net. Counts	Net. Counts	Net. Counts
	2,75 – 5,0 MeV	5,0 – 6,0 MeV	6,0 – 8,8 MeV
1.1	29	18	0
1.2	32	6	- 1
2.1	25	2	1
2.2	29	5	2
3.1	7	8	4
3.2	23	5	2
4.1	36	26	2
4.2	21	13	0

Die Messzeit von einer Stunde wurde gewählt, da das Experiment für den Schulunterricht entworfen wurde und damit den zeitlichen Rahmen einer Schulstunde nicht überschreiten sollte. Der negative Wert im höher energetischen Bereich beim zweiten Versuchsansatz von Abscheidungsmethode 1 ist darauf zurück zu führen, dass ein skaliertes Untergrund subtrahiert wurde. Insgesamt ist die Zahl der detektierten Ereignisse sehr klein. Mit einem professionellen Alpha-Spektrometer können diese wenigen Zählereignisse zwar gemessen werden, mit dem Eigenbau ist ein Nachweis von Radioaktivität auf diesem niedrigen Level schwierig.

Es zeigt sich allerdings ganz klar, dass die Abscheidungsmethode 4 durchschnittlich die besten Resultate liefert, wenn es darum geht, radioaktives Material aus Tabak im Schulunterricht abzuscheiden.

Die ROI zwischen 5,0 und 6,0 MeV umfasst den Energiebereich von  $^{210}\text{Po}$  mit 5,3 MeV und  $^{218}\text{Po}$  mit 6,0 MeV.  $^{224}\text{Ra}$  mit einer Alphaenergie von 5,6 MeV könnte auch vorhanden sein. Der niederenergetische Bereich umfasst die Alphaenergien von  $^{226}\text{Ra}$  mit 4,7 und 4,6 MeV, sowie in Tabelle 4 zusammengetragen, folgenden anderen möglichen Radionukliden, die Teil der natürlichen Zerfallsreihe sind.

Tab. 4 Mögliche Nuklide im Energiebereich unterhalb 5 MeV

<b>Nuklid</b>	<b>Halbwertszeit</b>	<b><math>\alpha</math>-Energie</b>	<b>Zerfallsreihe</b>
$^{234}\text{U}$	245.500 a	4,859 MeV	Uran-Radium-Reihe
$^{230}\text{Th}$	75.380 a	4,77 MeV	Uran-Radium-Reihe
$^{226}\text{Ra}$	1.600 a	4,871 MeV	Uran-Radium-Reihe
$^{235}\text{U}$	703.800.000 a	4,679 MeV	Uran-Actinium-Reihe
$^{244}\text{Pu}$	80.000.000 a	4,666 MeV	Thorium-Reihe
$^{236}\text{U}$	23.000.000 a	4,494 MeV	Thorium-Reihe

Die Radionuklide könnten, über den ggf. gedüngten Boden durch die Wurzeln in die Pflanze aufgenommen worden sein. Außerdem sind alle Radionuklide unedler als

Silber, was die Abscheidung durch eine Redoxreaktion unmöglich macht. Eine physikalische Adsorption dieser Radionuklide ist eine mögliche Erklärung für die gemessenen Ereignisse im niederenergetischen Bereich.

Das Gamma-Spektrum in Abb. 16 bietet keinen eindeutigen Hinweis, ob es sich bei den niederenergetischen Ereignissen, um durch Selbstabsorption abgebremste  $\alpha$ -Teilchen aus dem Poloniumzerfall handelt oder um minimale Mengen an  $^{226}\text{Ra}$

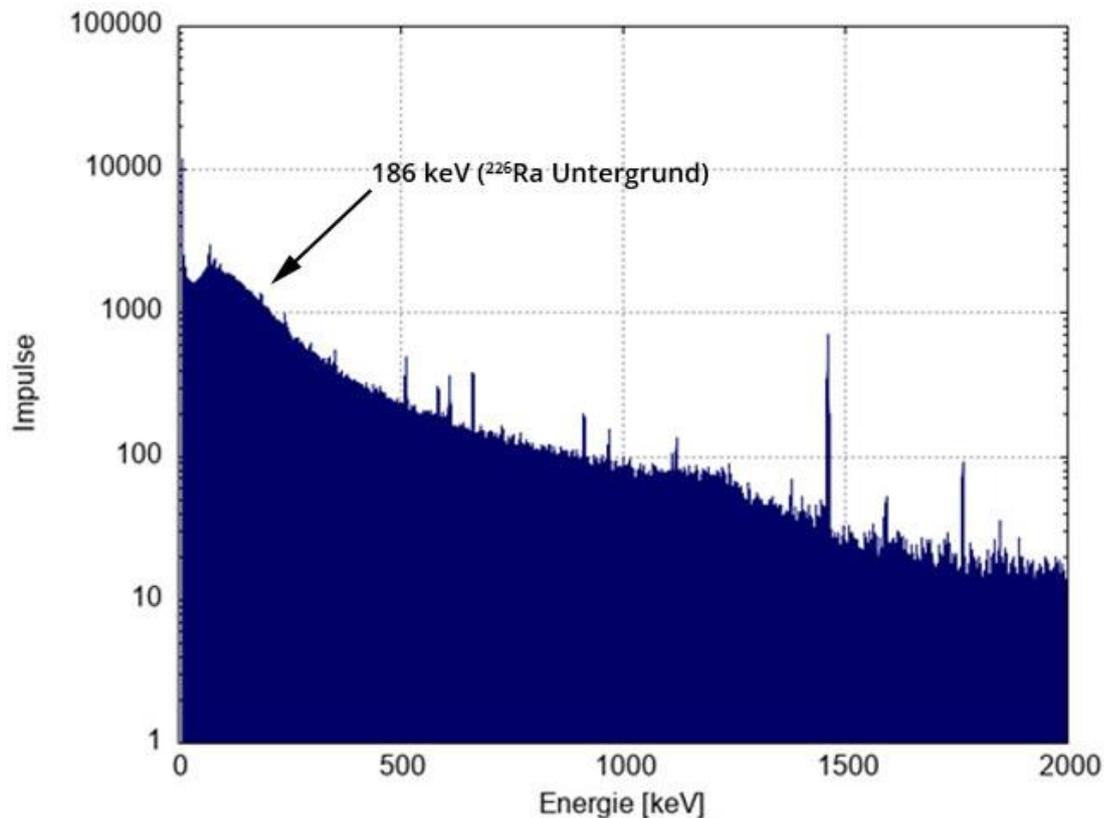


Abb. 16  $\gamma$ -Spektrum von Versuchsansatz 4.2

Eine nach Abschnitt 4.1 errechnete Radiumaktivität beträgt laut der  $\alpha$ -Messung 50 mBq. Diese Aktivität ist so gering, dass sie in der Messgenauigkeit des  $\gamma$ -Spektrometers untergeht.

Eine Aussage über die vorliegende Oxidationsstufe des Poloniums in der Lösung kann nicht gemacht werden. Möglich wären aufgrund des inert Pair-Effekts die Oxidationsstufe +4. Diese ist in Wasser besonders stabil. Allerdings könnte aufgrund möglicher in Lösung vorhandener reduzierender Zucker, das Polonium in der Oxidationsstufe +2 vorliegen. Eine Autooxidation vom +2 zu +4 durch die Alphastrahlung wie in [8] beschrieben, kann ausgeschlossen werden, da dafür die Konzentration der Polonium-Ionen zu niedrig ist.

---

## 4.5 Didaktik

Der Paranuss- und Tabak-Versuch kann dafür genutzt werden die natürliche Zerfallsreihe im Unterricht anhand von experimentellen Beispielen zu behandeln. Dabei eignet sich der Paranussversuch zwar besser, da das Radium als Zerfallsprodukt von der Pflanze direkt aus der Erde aufgenommen wird, allerdings ist die Versuchsdurchführung, aufgrund der hohen Rauchbildung beim Veraschen der Paranüsse nicht ideal geeignet für die Schule. Die Ergebnisse sind reproduzierbar aber nicht unmittelbar beeindruckend. Es braucht extrem lange Messzeiten, um überhaupt Radioaktive Zerfälle nachzuweisen und selbst dann ergibt sich kein eindeutiges Spektrum, aus dem sich das  $^{226}\text{Ra}$  erkennen lässt.

Das Lesen der Nuklidkarte, sowie das daraus folgende Nachvollziehen oder eigenständiges Erschließen der, auf der Erde ablaufenden natürlichen Zerfallsketten ist ein Lernziel, welches für den Physik Grundkurs angemessen ist. Da die chemische Aufbereitung der Paranüsse, das Nutzen und Erhitzen von konzentrierter Salzsäure involviert, sollte der Versuch unter einem Abzug durchgeführt werden. Es ist allerdings bereits ab der Mittelstufe erlaubt mit den benötigten Chemikalien im SuS-Versuch zu arbeiten [16].

Der Tabak-Versuch ist von der Durchführung genauso zeitaufwändig, wie der Paranussversuch, arbeitet aber mit weitaus harmloseren Chemikalien und führt selbst bei kürzeren Messzeiten zu besseren Ergebnissen. Für den Physik Leistungskurs könnte als Ziel formuliert werden ein aufgezeichnetes Alphaspektrum zu analysieren und auszuwerten.

Der Bananenversuch ist leicht durchführbar und durch die Bananenäquivalenzdosis im Schulunterricht leicht einzubinden. Da das  $^{40}\text{K}$  als Betaminus-Strahler kein Teil der natürlichen Zerfallsreihe ist, stellt es im Gegensatz zu den anderen Versuchen einen Exoten dar. Die gebauten Detektoren erlauben in ihrer Bauart nicht, dass von dem aufbereiteten Präparat ein Spektrum aufgezeichnet werden kann, welches ausgewertet werden könnte. Es stellt dennoch ein lebensnahes Beispiel, anhand dessen der Betazerfall und die Gammastrahlung erklärt werden kann.

Alle Versuche erfüllen mehrere Kriterien, die sie zu einem geeigneten Versuch in der Schule machen: Sie können im SuS-Versuch durchgeführt werden, sie knüpfen an den Alltag an und sind reproduzierbar.

---

Allerdings sprechen einige Argumente gegen die drei Versuche als geeignete Experimente für den regulären Schulunterricht: Alle Versuche brauchen von der Vorbereitung der Durchführung bis zur Auswertung der Ergebnisse mehrere Unterrichtsstunden, keiner der Versuche ist optisch interessant. Meist werden kleine Mengen eines weißen Feststoffes nach 90 Minuten Arbeit gewonnen. Im Fall des Tabak-Versuchs ist gar keine optische Veränderung erkennbar. Die Koordination zwischen dem Chemieunterricht und dem Physik Unterricht muss perfekt stimmen, damit die im Chemieunterricht gewonnenen Präparate überhaupt ausgewertet werden können. Sicherheitstechnisch ist der Umgang mit dem Muffelofen und dem Erhitzen der konzentrierten Salzsäure im Rahmen eines Schülerexperimentes mit Risiken verbunden.

---

## 5 Fazit

Im Rahmen der Bachelorarbeit ist es gelungen drei Experimente so zu entwerfen und zu optimieren, dass sie realistisch in der Schule durchgeführt werden können. Die Thematik der Radioaktivität kann durch diese drei Versuche den SuS eindrucksvoll nähergebracht werden. Wenn auch keine quantitativen Ergebnisse dadurch geschaffen werden konnten, ist es möglich mit einem interessierten und engagierten Kurs dieses Thema durch eine Experimentierreihe zu ergänzen. Bei allen Experimenten wird zwar Reinheit des Produktes und Qualität der Daten gegen Einfachheit der Durchführung eingetauscht aber es muss bedacht werden, dass Schulen meist die nötige Zeit und teilweise auch die nötigen Geräte fehlen um saubere Chemie zu machen. Die Einarbeitung der Auswertung ist mit den Rahmenvorgaben des Kernlehrplans für den Physikunterricht vereinbar, allerdings nicht direkt mit den Rahmenvorgaben für den Chemieunterricht. Das heißt, dass selbst wenn Zeit für die Experimente übrig ist, muss entschieden werden, ob man einen chemisch unspektakulären Versuch, wie den Tabak-Versuch, der allerdings gute Messergebnisse erzeugt, durchführt oder ob man den Bananen- oder Paranuss Versuch mit dem Kurs durchführt, die zwar chemisch anspruchsvoller und aktivierender für die SuS sind, die allerdings nicht so gute Messergebnisse produzieren.

Die Vermessung der im Unterricht hergestellten Präparate funktioniert nur bedingt. Es ist gelungen, das im Bananenversuch hergestellte Präparat mit dem selbstgebauten Beta-Gamma-Detektor auf radioaktive Zerfälle zu prüfen und eine Aktivität der Probe zu bestimmen. Aussagen, über die Gamma Energien, oder die Energie der Betateilchen, können nicht gemacht werden. Natürlich kann auch ein bereits vorhandener Zähler für die Messungen oder zur Bestimmung der Effizienz der selbstgebauten Detektoren genutzt werden. Als Ausblick kann formuliert werden, ob man den handlichen Detektor nicht komplett transportierbar machen kann, indem äquivalente Programme zu „Becquerel-Monitor“ auf dem Smartphone nutzt.

Dementsprechend ist zu empfehlen, die Experimente im Rahmen einer Projektwoche durchzuführen, da die einzelnen Experimente den zeitlichen Rahmen einer normalen Unterrichtswoche überschreiten. Sowohl Physik, wie auch Chemie, Informatik und Biologie können in dieses umfangreiche Projekt integriert werden. Beispielsweise ist der Detektorbau ansprechender für die Technik begeisterten. Die Aufbereitung der Proben für die Chemie interessierten, die Grundlagentheorie für die Kernphysik

---

Enthusiasten und die Thematik warum Radionukliden in Pflanzen sind, welche biologische Auswirkungen ionisierende Strahlung auf den Organismus hat und wie der  $^{40}\text{K}$  Stoffwechsel mit der Homöostase zusammenhängt, für die Biologen interessant.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] *Federal Guidance Report No. 13.* (o. J.).
- [2] Savidou, A., Kehagia, K., & Eleftheriadis, K. (2006). Concentration levels of 210-Pb and 210-Po in dry tobacco leaves in Greece. *Journal of Environmental Radioactivity*, 85(1), 94–102.
- [3] Tso, T. C., & Fisenne, I. (1968). Translocation and distribution of Lead-210 and Polonium-210 supplied to tobacco plants. *Radiation Botany*, 8(6), 457–462.
- [4] Penna-Franca, E., Fiszman, M., Lobao, N., Costa-Ribeiro, C., Trindade, H., & Sant, P. L. (1968). Radioactivity of Brazil Nuts: *Health Physics*, 14(2), 95–99.
- [5] Parekh, P. P., Khan, A. R., Torres, M. A., & Kitto, M. E. (2008). Concentrations of selenium, barium, and radium in Brazil nuts. *Journal of Food Composition and Analysis*, 21(4), 332–335.
- [6] A. J. Bard, R. Parsons, J. Jordan, *Standard Potentials in Aqueous Solution.* Marcel Dekker, Inc. New York and Basel 1985, 121-122, 305
- [7] F. Weigel, *Chemie des Poloniums.* *Angewandte Chemie* 1959, 9, 2, 89-316.
- [8] A. F. Hollemann, N. Wiberg, *Lehrbuch der anorganischen Chemie*, 100. Auflage. Walter de Gruyter 1985
- [9] Keller et al. (2019). Smartphone and Tablet-Based Sensing of Environmental Radioactivity: Mobile Low-Cost Measurements for Monitoring, Citizen Science, and Educational Purposes. *Sensors*
- [10] H. Davy, *Philos. Trans. R. Soc. London* 1807, 97, 1–56. (The 1806 Bakerian Lecture).

- 
- [11] von Döllen, S. (2017). Nachweis von Po-210 in Zigarettenrauch (Bachelorarbeit, Universität zu Köln).
- [12] Heim, S. E. (2011) Nachweis von Polonium in verschiedenen Tabakwaren zur Ermittlung der Strahlenbelastung beim Rauchen (Bachelorarbeit, Universität zu Köln).
- [13] Deutsche Gesetzliche & Unfallversicherung e.V. (DGUV). (o. J.). DGUV Information 213-098 Stoffliste zur DGUV Regel 113-018 „Unterricht in Schulen mit gefährlichen Stoffen“. Dezember 2018.
- [14] Schulentwicklung NRW - Lehrplannavigator S II - Gymnasiale Oberstufe - Physik - Physik KLP - 2 Kompetenzbereiche, Inhaltsfelder und Kompetenzerwartungen, o. J.
- [15] Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). (2019) Kernlehrplan für die Sekundarstufe I Gymnasium in Nordrhein-Westfalen Chemie. Düsseldorf.
- [16] Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). (2022) Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium in Nordrhein-Westfalen Chemie. Düsseldorf.
- [17] Ranjha, M. M. A. N., Irfan, S., Nadeem, M., & Mahmood, S. (2022). A Comprehensive Review on Nutritional Value, Medicinal Uses, and Processing of Banana. *Food Reviews International*, 38(2), 199–225.
- [18] *European atlas of natural radiation* (1st edition). (2019). Publications Office of the European Union.
- [19] *Banana Equivalent Dose*. (o. J.). Abgerufen 30. Juli 2023, von [http://health.phys.iit.edu/extended\\_archive/9503/msg00074.html](http://health.phys.iit.edu/extended_archive/9503/msg00074.html)

- 
- [20] *Radioactivity / theremino*. (o. J.). Abgerufen 30. Juli 2023, von <https://www.theremino.com/en/downloads/radioactivity>
- [21] *Software: BecquerelMonitor BecqMoni*. (2021, August 7). [geigerzaehlerforum.de](https://www.geigerzaehlerforum.de).  
<https://www.geigerzaehlerforum.de/index.php/topic,807.0.html>
- [22] Zagà, V., Lygidakis, C., Chaouachi, K., & Gattavecchia, E. (2011). Polonium and Lung Cancer. *Journal of Oncology*, 2011, 1–11.
- [23] Radford, E. P., & Hunt, V. R. (1964). Polonium-210: A Volatile Radioelement in Cigarettes. *Science*, 143(3603), 247–249.

## Anhang

Arbeitsblatt zur Versuchsdurchführung „Radium aus Paranüssen“ für den Schulunterricht



### Radioaktive Paranüsse



Thema: natürliche Radioaktivität

Geräte:

Becherglas (25 ml), Pipette, Nutschapparatur, Heizplatte, Muffelofen, Zentrifuge, Eppendorf-Vial, Objektträger

Chemikalien:

Salzsäure 30%ig, 2 Paranüsse, Eis, dest. Wasser

Gefahrstoffhinweise:

Salzsäure:



H290	Kann gegenüber Metallen korrosiv sein
H315	Verursacht Hautreizungen
H319	Verursacht schwere Augenreizung
H335	Kann die Atemwege reizen

Durchführung:

- 1) Verasche die Paranüsse vollständig (60min bei 800°C)  
! ACHTUNG HEISS!
- 2) Löse die Asche in 1ml Salzsäure und warte 5 min.
- 3) Nutsche die Suspension ab.
- 4) Dampfe das Filtrat ein.
- 5) Der heiße Rückstand wird in einigen Tropfen HCl gelöst und in ein Eppendorf-Vial gegeben.
- 6) Das Eppi wird für 10 min gekühlt und anschließend zentrifugiert.
- 7) Der Überstand wird abpipettiert und der Niederschlag in Wasser gelöst und auf dem Objektträger tropfenweise eingedampft.

Aufgaben:

- a) Die Paranuss nimmt Calcium und Barium aus dem Boden auf. Warum nimmt sie Radium-Ionen mit auf?
- b) Warum ist Radium überhaupt im Boden?



## Arbeitsblatt zur Versuchsdurchführung „Polonium aus Tabak“ für den Schulunterricht.



# Radioaktiver Tabak



### Thema: natürliche Radioaktivität

#### Geräte:

Filterpapier, Becherglas (100ml), Silberblech (1cm<sup>2</sup>), Pinzette

#### Chemikalien:

0,5 Molare Salzsäure, Tabak, L-Ascorbinsäure

#### Gefahrstoffhinweise:

##### Salzsäure:



H290 Kann gegenüber Metallen korrosiv sein  
 H315 Verursacht Hautreizungen  
 H319 Verursacht schwere Augenreizung  
 H335 Kann die Atemwege reizen

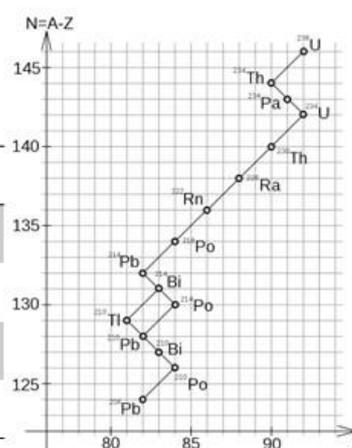
#### Durchführung:

- 1) Reinige das Silberblech, in dem du es in warme Salzsäure tauchst und anschließend mit dest. Wasser abspülst.
- 2) Wiege 3g Tabak ab und lege es in trichterförmiges Filterpapier.
- 3) Das Silberblech wird zusammen mit 250mg L-Ascorbinsäure in das Becherglas gegeben.
- 4) Wasche den Tabak, mit 30ml Salzsäure, über dem Silberblech und löse durch Schütteln die Ascorbinsäure.
- 5) Lass das Ganze bei 80°C bis zur nächsten Stunde ziehen.
- 6) Mit dest. Wasser das Blech abspülen und unter den Detektor legen.

#### Aufgaben:

- a) Stelle eine Reaktionsgleichung für die Autodeposition des Poloniums auf.
- b) Einen Teil des Poloniums, reichert die Pflanze indirekt aus der Luft an. Wie ist das mit Hilfe der natürlichen Zerfallskette zu erklären?

Element	Redoxpaar	Standardpotentiale
Polonium	$\text{Po}^{2+} \rightarrow \text{Po}_{\text{m HCl}}$	0,37 V
Polonium	$\text{Po}^{4+} \rightarrow \text{Po}_{\text{m HCl}}$	0,784 V
Polonium	$\text{Po}^{4+} \rightarrow \text{Po}^{2+}_{\text{m HCl}}$	1,1 V
Silber	$\text{Ag}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{Ag} + \text{Cl}^-_{\text{m HCl}}$	0,22 V



Arbeitsblatt zur Versuchsdurchführung „Kalium-40 aus Bananen“ für den Schulunterricht.



## Radioaktive Bananen



### Thema: natürliche Radioaktivität

**Geräte:**

Filterpapier, Becherglas (100ml), Trichter, Muffelofen, Gabel, Abdampfschale aus Porzellan

**Chemikalien:**

Dest. Wasser

**Gefahrstoffhinweise:**

/

**Durchführung:**

- 1) Zermatsche die geschälte Banane
- 2) Verasche die Banane bei 800°C für 45 min.
- 3) Spüle die abgekühlte Asche in einem Filterpapier mit max. 50ml dest. Wasser.
- 4) Dampfe das Filtrat bis zur Trockne ein.
- 5) Vermesse den Feststoff im Beta-Detektor

**Aufgaben:**

- a) Stelle eine Reaktionsgleichung für die den Zerfall von Kalium-40 auf.
- b) Warum nimmt die Pflanze Kalium-40 auf?
- c) Kalium-40 stellt gerade einmal 0,0117% des vorkommenden Kaliums. Eine Banane enthält durchschnittlich 458mg Kalium. Bei einer Aktivität von 260.000 Bq/g : Welche Aktivität hat eine Banane durch das enthaltene Kalium-40?
- d) Beurteile anhand der Ergebnisse aus c) begründet die gesundheitlichen Folgen vom Verzehr einer Banane.



---

## Anleitung zum Bau der Detektoren

Bevor Sie mit dem Löten beginnen, entscheiden Sie sich bitte dafür, wie und wo Sie den Detektor innerhalb des Metallgehäuses montieren möchten (beachten Sie bitte alle Hinweise auf dieser Seite!).

Wenn das Gehäuse recht klein ist, möchten Sie möglicherweise den großen Kondensator C8 und/oder die Dioden D1-D4 auf der gegenüberliegenden Seite platzieren, wie sie auf der Leiterplatte markiert sind.

Wenn das Gehäuse eher groß ist und radioaktive Gegenstände problemlos hineinpassen, kann die Standardposition aller Komponenten auf der Platine beibehalten werden, wie markiert.

Verwenden Sie immer eine der beiden Übersichtstabellen, als Montageanleitung. Löten Sie die Komponenten in der Reihenfolge, wie sie in diesen Dokumenten aufgeführt sind, von oben nach unten, linke Spalte gefolgt von der rechten Spalte.

Allgemeine Anmerkung: Die kleinen Kondensatoren und Widerstände können in beide Richtungen montiert werden. Nur C8, die Dioden D1-D4 und U1 müssen genau in der richtigen Ausrichtung montiert werden, da es sich um Bauteile mit spezifischer Polarität handelt.

1. Löten Sie die Widerstände an den markierten Stellen auf der Platine und überprüfen Sie sorgfältig ihre Farbringe.
2. Schneiden Sie alle überschüssigen und herausragenden Widerstandsenden so nah wie möglich an der Platine ab.
3. Löten Sie die kleinen (gelben) Kondensatoren an den markierten Stellen auf der Platine.
  - C5 sollte so flach wie möglich montiert werden, wenn das ausgewählte Gehäuse sehr klein ist und die Batterie direkt oben darauf liegt.
4. Schneiden Sie die überschüssigen und herausragenden Kondensatorenden so nah wie möglich an der Platine ab.
  - Die Anschlüsse von C5 müssen so kurz wie möglich abgeschnitten werden, sodass U1 eng darüber passt.

5. Löten Sie den großen Kondensator C8 auf der Seite der Platine, die besser zum verfügbaren Platz in Ihrem Gehäuse passt.
  - Wenn Sie sich unsicher über die beste Position sind, halten Sie 2-3 mm freien Raum zwischen C8 und der Platine - diese zusätzliche Anschlusslänge bietet die Möglichkeit, C8 später horizontal/flach zu biegen, falls erforderlich.
6. Löten Sie die Dioden, 4 x BPW34F oder 1 x modifizierte BPX61, unter Beachtung ihrer Polarität (Anode vs. Kathode).
  - Die Kathodenpins müssen auf das Platinenzentrum zeigen, das mit dem Buchstaben 'K' markiert ist (siehe Bilder unten).
  - Elektronendetektor: Die Kathoden-Pin des BPW34F ist mit einer Kerbe markiert.
  - Alpha-Spektrometer: Der Anoden-Pin des BPX61 ist mit einer Kerbe markiert und muss von der Platine wegzeigen.
7. Löten Sie den schwarzen Verstärkerchip U1 unter Beachtung seiner Polarität: Pin 1 ist auf der Platine und dem Chip mit einem Kreis markiert.
  - Überprüfen Sie nochmals, ob die Anschlüsse von C5 kurz genug abgeschnitten sind und sich nicht berühren.
8. Überprüfen Sie alle Lötstellen auf der Platine auf mögliche Kurzschlüsse und schneiden Sie sie ab, wenn erforderlich.
  - Optional messen Sie den Widerstand an den Löchern des +/- 9 V-Batterieanschlusses; er muss viel höher als Null sein: 9 bis 10 Kiloohm.
9. Stellen Sie sicher, dass das ausgewählte Gehäuse alle erforderlichen Löcher in der richtigen Größe hat (siehe erforderliche Werkzeuge).
  - Signal-Ausgangsstecker (BNC oder Audio) überprüfen, ob er passt und montieren Sie ihn.
  - Ein-/Ausschalter überprüfen, ob er passt und montieren Sie ihn.

10. Löten Sie das schwarze Erdungskabel des 9 V-Batterieklemmensteckers in das mit '-' beschriftete Loch neben '+9V' und C8.
11. Löten Sie das rote Kabel des 9 V-Batterieklemmensteckers an den mittleren Pin des Ein-/Ausschalters.
12. Entfernen Sie die Isolierung von 3 kurzen Stücken elektrischen Drahts an den Enden.
13. Löten Sie ein kurzes Stück elektrischen Drahts zwischen dem Ein-/Ausschalter und dem mit '+9V' beschrifteten Loch auf der Platine.
14. Löten Sie ein Paar kurzer Stücke elektrischen Drahts zwischen der Platine und dem Signal-Ausgangs-BNC-Stecker.
  - Löten Sie zwei Drähte in die mit 'Signal' und '-' markierten Löcher auf der Platine.
  - Löten Sie das andere Ende des 'Signal'-Drahtes an den inneren Stift des BNC-Steckers.
  - Löten Sie das andere Ende des '-'-Drahtes an den äußeren Teil des BNC-Steckers, normalerweise von einem zusätzlichen Verbindungsring umgeben. Alternativ kann der '-'-Draht direkt an den Wänden der Zinnbox neben dem Stecker gelötet werden (funktioniert nicht bei Aluminiumgehäusen).
  - Wenn anstelle des BNC-Steckers ein Audio-Stecker verwendet wird, sollten die Spitze und der Schaft entsprechend verbunden werden.
15. Überprüfen Sie alle Drahtverbindungen auf mögliche Kurzschlüsse und korrigieren Sie diese bei Bedarf.
  - Optional messen Sie den Widerstand am +/- 9 V-Batterieklemmenanschluss; er muss sich beim Ein-/Ausschalten ändern.

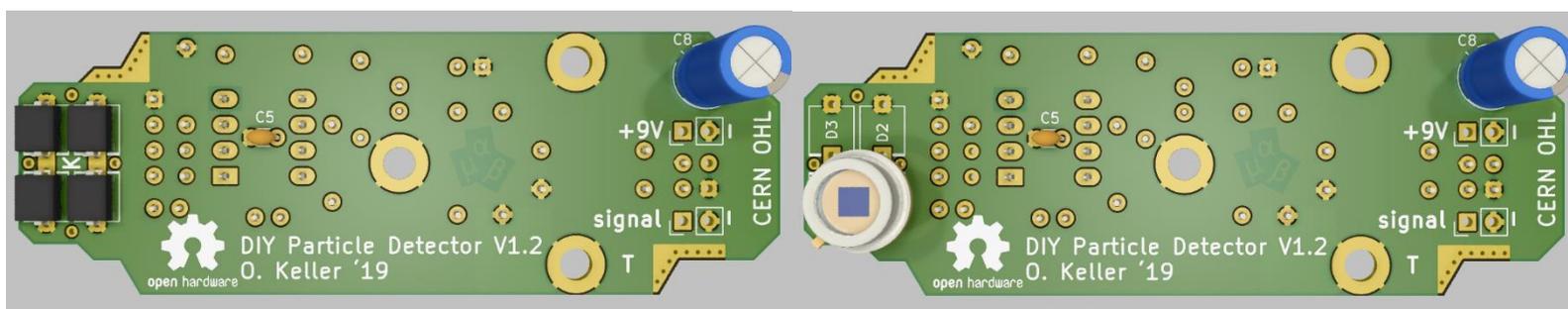
16. Befestigen Sie die Leiterplatte mit Schrauben, entweder über die beiden metallisierten Platinenkanten oder über ein bis zwei der 3 metallisierten Löcher.

17. Schließen Sie eine volle 9 V-Batterie an und platzieren Sie sie im Metallgehäuse.

18. Schließen Sie den Deckel des Gehäuses.

- Es darf kein Licht ins Innere gelangen, selbst die kleinsten Löcher und Schlitze müssen von innen mit Klebeband überdeckt werden.

links: Oberseite der Elektronen-Detektor, rechts: Oberseite Alpha-Spektrometer



'K' zwischen den Dioden D1-D4 beschreibt die Position der Kathoden Pins.

links: Unterseite der Elektronen-Detektor, rechts: Unterseite Alpha-Spektrometer

