

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

# BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

## Wege in der Physikdidaktik

Band 3

Rückblick und Perspektive

ISBN 3 - 7896 - 0513 - 1

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1993

### Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.  
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle  
genutzt werden. Auf der Homepage

[www.solstice.de](http://www.solstice.de)

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

## Die spektroskopische Bestimmung von Radon und seinen Folgenukliden

### 1. Nachweis der Folgenuklide von Radon-222 durch Spektrometrie der Gammastrahlung

#### 1.1. Die Herkunft und Auswirkungen von Radon in der Luft

Die natürlich radioaktiven Elemente entstehen mit Ausnahme von K-40 aus den drei langlebigen Nukliden Th-232, U-235 und U-238. Aus diesen sogenannten Mutternukliden entwickeln sich die bekannten Umwandlungsreihen, in denen aus dem Element Radium das Edelgas Radon entsteht. Die Radonisotope Rn-219, Rn-220, Rn-222 bilden sich im Erdboden, in Gesteinen oder im Wasser. Das Zwischenprodukt Radon ist aber im Gegensatz zu den anderen Nukliden der Umwandlungsreihen ein Edelgas und deshalb besonders mobil, es diffundiert in die Luft und verteilt sich dort gleichmäßig. Aber auch die festen aerosolgebundenen und ungebundenen Folgenuklide von Radon werden über die Luft verbreitet. Welche Bedeutung den Radonisotopen für eine Strahlenbelastung zukommt liegt primär in ihrer physikalischen Halbwertszeit begründet, weil sie eine Begrenzung für die Ausbreitungsmöglichkeit des Edelgases darstellt. Dem Rn-219 aus der U-235 Umwandlungsreihe kommt damit die geringste Bedeutung zu, da es mit ca. 4 s die kürzeste Halbwertszeit aufweist.

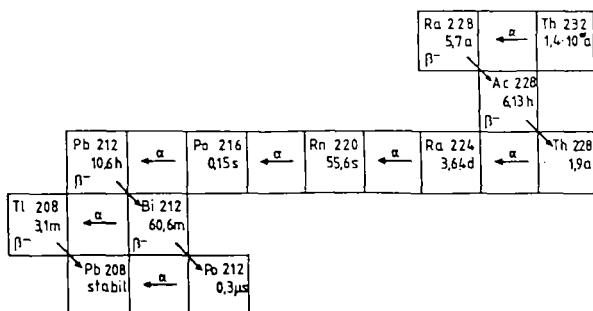


Abb. 1: Umwandlungsreihe von Thorium 232

Beachtet werden muß bereits das Rn-220 aus der Th-232 Umwandlungsreihe mit einer Halbwertszeit von 55,6 s (Abb. 1). Die größte Bedeutung kommt dem Isotop Rn-222 aus der U-238 Umwandlungsreihe zu, das mit 3,8 d die größte Halbwertszeit besitzt und damit auch genügend Zeit für den Ausbreitungsmechanismus hat (Abb. 2).

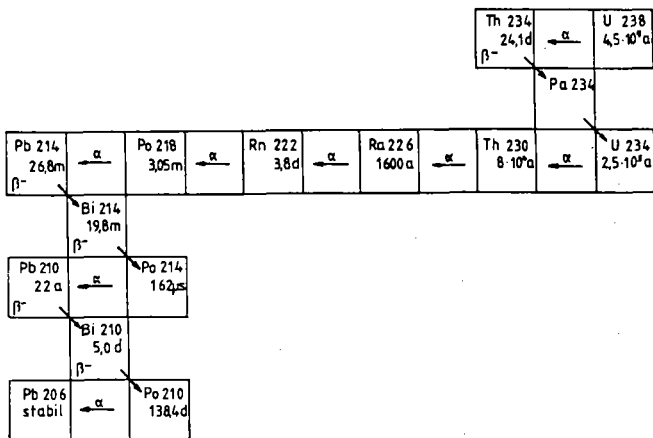


Abb. 2: Umwandlungsreihe von U-238

Das Radon in der Luft wird von Menschen eingeatmet und trägt zur Strahlenbelastung bei. Dabei kommt dem Edelgas selbst eine geringere Bedeutung zu, weil seine Löslichkeit im Körpergewebe niedrig ist. Für die Strahlenbelastung sind vielmehr die Folgenuklide des Radons verantwortlich, die sich im Bronchialbereich der Lunge festsetzen und dort weiter zerfallen. Die Konzentration von Radon ist im Freien geringer als in Wohnungen. Dabei haben die Baumaterialien der Häuser einen gewissen Einfluß, aus denen Radon zusätzlich in die Luft diffundieren kann. Die Hauptzufuhr erfolgt jedoch aus dem Erdboden auf dem die Häuser gebaut sind. Dem Keller eines Wohnhauses kommt damit eine entscheidende Bedeutung als Eintrittspforte für Radon aus dem Erdreich zu. Fachwerkhäuser, vor 1900 erbaut, haben häufig Natursteinkeller manchmal auch Naturboden. In solchen Häusern wird eine höhere Anreicherung

festgestellt als in Häusern mit einer Betonplatte und Feuchtigkeitssperre. Aber auch hier ermöglichen Risse in Mauerwerk und Bodenplatte, Rohrdurchführungen etc. ein Eindringen in das Innere der Häuser. Durch Austausch mit der Außenluft läßt sich die Radonkonzentration im Haus erniedrigen. Deshalb ist gutes Lüften der Räume, insbesondere der Kellerräume, wichtig für einen möglichst geringen Radongehalt der Atemluft.

Die Untersuchungen der Radonaktivität /2/ in 6000 Wohnungen ergab einen Mittelwert von  $50 \text{ Bq/m}^3$ . Die Strahlenschutzkommission hat den 5-fachen Wert dieses mittleren Rn-Regels also  $250 \text{ Bq/m}^3$  als Richtwert für die Obergrenze des Normalbereichs empfohlen /2/. Die mittlere Radonkonzentration führt für den Bronchialbereich der Lunge zu einer jährlichen Äquivalentdosis von  $15 \text{ mSv}$ , dabei geht die Dosisabschätzung von einer Aufenthaltsdauer in Häusern von 7000 h pro Jahr aus, was etwa 80% der Gesamtzeit entspricht /3/. Der Bronchialbereich der Lunge ist damit das am stärksten strahlenexponierte Gewebe des menschlichen Körpers. Verschiedene Studien zum Lungenkrebsrisiko durch ionisierende Strahlen schließen nach vorläufigen Ergebnissen einen Zusammenhang zwischen Lungenkrebshäufigkeit und Radonkonzentration nicht aus, beweisen ihn aber auch nicht, weil die Zahl der erfaßten Fälle zu klein ist oder epidemiologisch wichtige Parameter nicht erhoben wurden /3/. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch das von Jacobi /2/ erwähnte 2-Phasen-Modell der Kanzerogenese, wonach ionisierende Strahlung bösartige Zellen im Bronchialgewebe initiiert. Eine Manifestation von Krebs würde danach durch andere Faktoren bestimmt, u. a. durch altersbedingte Prozesse und durch das Rauchen. Man kann das Lungenkrebsrisiko durch Radon in der Atemluft bisher nur durch Risikoanalysen abschätzen. Jacobi /2/ berichtet über zwei Studien von ICRP und BEIR-IV aus dem Jahr 1987. Wenn man die Ergebnisse dieser Studien auf die deutschen Verhältnisse überträgt, würde folgen, daß bei Männern etwa 35-70 und bei Frauen etwa 8-16 Fälle pro Jahr und pro Million Menschen mit der Inhalation von Rn-Zerfallsprodukten verknüpft sein könnten.

## 1.2. Fachdidaktische Überlegungen

Die anhaltende Aktualität des Themas "Radioaktivität in der Umwelt" beinhaltet einen unmittelbaren Bezug zwischen physikalischer Forschung und Lebenswirklichkeit der Menschen. Dieser Zusammenhang wird SchülerInnen besonders motivieren. Wir meinen, daß solche Beziehungen im Physikunterricht sowie in der Ausbildung der PhysiklehrerInnen stärker berücksichtigt werden sollten. SchülerInnen und angehende LehrerInnen müssen sich mit komplizierten physikalischen Zusammenhängen wie Umwandlungsschemata, Strahlungswirkung und spektroskopischen Meßverfahren beschäftigen. Aber diese fachwissenschaftlichen Grundlagen stehen hier nicht nur für die Physik, sondern führen auch zu der Erkenntnis, daß sie unser tägliches Leben mitgestalten und es nützlich ist bzw. vor Schaden bewahrt, wenn Gesetzmäßigkeiten, die unsere Lebenswelt bestimmen, verstanden und bewertet werden. Weder die (fast) blinde Wissenschaftsgläubigkeit früherer Jahrzehnte noch eine heute immer mehr hervortretende, oft von Furcht geprägte Wissenschaftsfeindlichkeit sind geeignet, die Lehr- und Lernziele in Schule und Hochschule mitzubestimmen. Notwendig erscheint vielmehr, die zentrale Funktion des Experimentes als wichtigster Quelle physikalischer Erkenntnis hervorzuheben. Vor allem sollten auch moderne Nachweis- und Meßmethoden **experimentell** erarbeitet und nicht nur anhand von Dias, Transparenten oder per Computersimulation behandelt werden.

Die vorliegenden Ausführungen sollen hierzu einen - wenn auch bescheidenen - Beitrag leisten.

## 1.3. Ergebnisse zum Nachweis von Radon in der Luft

Mit einem ganz einfachen Experiment, der Bestimmung der Gesamtaktivität der Luft mit einem Geiger-Müller-Zählrohr, kann in älteren Häusern bereits eine höhere Aktivität in den Kellerräumen nachgewiesen werden. Natürlich handelt es sich hier um eine Relativmessung der Gesamtaktivität. Wir haben bei unseren Versuchen in Kellerräumen eine bis zu 20%-30% höhere Nullrate gegenüber anderen Räumen festgestellt. Mit dieser Erhöhung der Gesamtaktivität sind noch keine Aussagen über die

radioaktiven Stoffe zu machen, die zu der Aktivität beitragen. Um diese Frage zu beantworten ist mit komplizierten Messapparaturen zu arbeiten, die heute auch für die experimentelle Schulphysik in Form von Gamma- bzw. Alpha-Spektrometern zur Verfügung stehen. Mit spektrometrischen Messungen können dann die radioaktiven Stoffe identifiziert werden, deren Strahlungsaktivität bereits mit dem Geiger-Müller-Zählrohr registriert worden war. Der Meßplatz zur Gamma-Spektroskopie mit dem unsere Gruppe in Siegen arbeitet ist bereits in einer früheren Arbeit /4/ beschrieben worden. Zur Messung der Aktivität der Luft wird ein bis zu 10 m langer Draht im Raum ausgespannt und für mehrere Stunden an die negative Buchse einer Hochspannungsquelle gelegt. Die radioaktiven Stoffe in der Luft sammeln sich auf dem Draht an, den wir nach Beendigung der Exposition aufwickeln und unter geometrisch gleichbleibenden Bedingungen mit dem Szintillationsdetektor ausmessen.

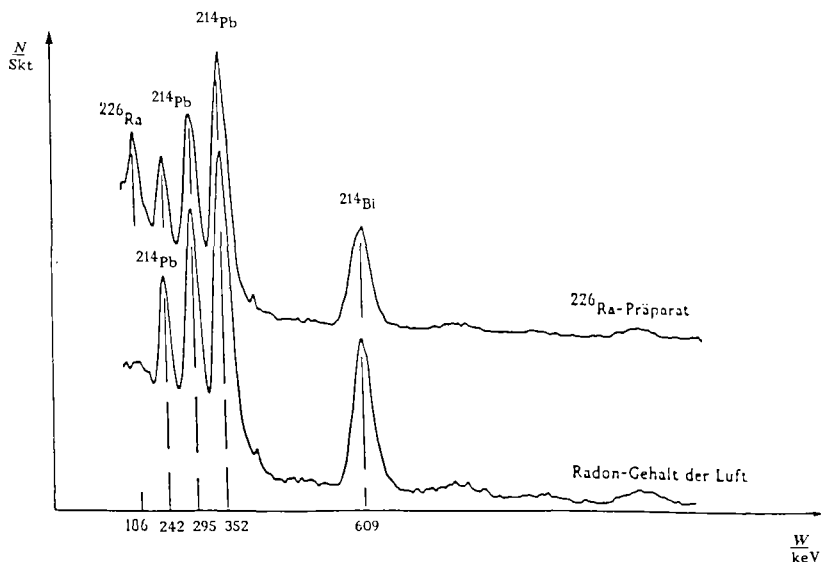


Abb. 3: Identifizierung von Radon in der Luft

In einem ersten Versuchsergebnis zeigt das in Abbildung 3 wiedergegebene Spektrum, daß die aus der Luft gesammelten Radionuklide tatsächlich Folgeprodukte des Radons sind. Die Identifizierung gelingt durch einen Vergleich des in der Messung erhaltenen Spektrums mit dem Spektrum eines Radium-Präparates (oberes Spektrum). Wir sehen, daß in dem aus der Luft erhaltenen Spektrum lediglich die Linie fehlt, die zur Umwandlung von Radium in Radon gehört, also den Entstehungsprozeß darstellt, wie er z.B. im Erdboden erfolgt. Wir finden in Übereinstimmung mit dem Spektrum des Radiumpräparates die Folgeprodukte von Radon, nämlich die Isotope Pb-214 und Bi-214.

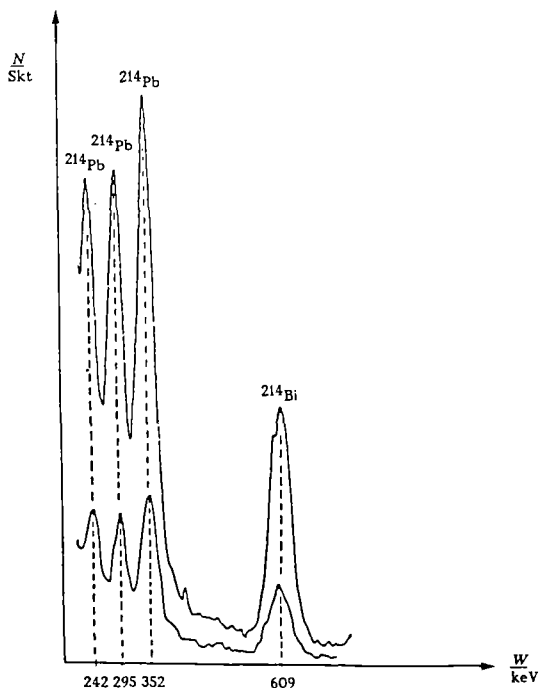


Abb.4: Radongehalt im ungelüfteten Raum (oberes Spektrum) und ungelüfteten Raum (unteres Spektrum)

Bei der Gamma-Spektroskopie wird durch die Lage der Peaks im Koordinatensystem die Energie der Kernstrahlung bestimmt. Die Peakhöhe liefert als Maß für die Strahlungsintensität eine noch weitere Aussage unserer Spektren, wie aus Abb.4 ersichtlich wird. Dort ist das in einem gelüfteten Raum erhaltene Spektrum einem Spektrum gegenübergestellt, das in demselben Raum gemessen wurde, nachdem dieser für fünf Tage ungelüftet verschlossen worden war.

Das Ergebnis ist überaus eindrucksvoll und zeigt mit der stark angestiegenen Peakhöhe des Spektrums im ungelüfteten Fall, daß die Konzentration von Radon und seinen Folgeprodukten in schlecht gelüfteten Räumen deutlich ansteigt. Dieses schöne Demonstrationsexperiment veranschaulicht die eingangs dargestellte Situation, daß Isolationsmaßnahmen im Zusammenhang mit der Einsparung von Heizenergie und Reduzierung der Ventilationsrate der Zimmerluft einen Anstieg des Radongehaltes der Luft zur Folge haben. Das Experiment unterstreicht auch nachhaltig die zur Minimierung des Radongehaltes der Luft erhobene Forderung nach einer sorgfältigen Lüftung unserer Wohnräume.

## 2. Der Nachweis der Nuklide Radon-222 und Radon-220 durch Spektrometrie der Alpha-Strahlung

### 2.1 Die Spektrometrie der Alpha-Strahlung

Die Spektrometrie der Alpha-Strahlung unterscheidet sich von der Spektrometrie der Gamma-Strahlung im wesentlichen in drei Punkten:

- a) als Detektor wird ein Silizium-Halbleiterdetektor verwendet, dessen Wirkungsweise in sehr vereinfachter Darstellung einer Ionisationskammer entspricht.
- b) Die radioaktive Substanz sollte in möglichst dünner Schicht vorliegen, um die Energieabsorption durch die Substanz selbst so gering wie möglich zu halten.



c) Um eine Absorption der Energie der Alpha-Teilchen durch die Luft zu vermeiden, müssen der Detektor und die radioaktive Quelle in einer Vakuumkammer (siehe 2.4) positioniert werden.

Die Ansammlung der radioaktiven Partikel erfolgt wie bei der Gamma-Spektrometrie durch einen etwa 10 m langen, im Raum aus-  
gespannten Draht, an den eine negative Hochspannung von etwa 6 bis 10 kV (gegen Erde) gelegt wird.

## 2.2 Das Alpha-Spektrum der angesammelten Partikel

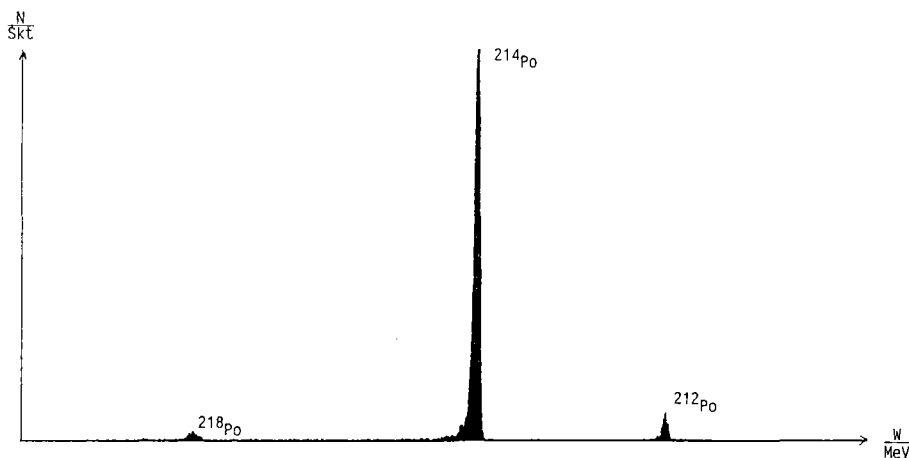


Abb. 5: Alpha-Spektrum der am Draht angesammelten Partikel  
Meßzeit: 1800 s, Gesamtzahl der registr. Alpha-Teilchen: 79  
Energiewerte: Po-218: 6,00 MeV; Po-214: 7,69 MeV;  
Po-212: 8,78 MeV

Das Impulshöhenspektrum zeigt einen auffallend hohen Peak, der vom Po-214 herrührt, sowie zwei wesentlich kleinere Peaks, die (links) dem Po-218 und (rechts) Po-212 zuzuordnen sind.

Die Zuordnung erfolgt aufgrund einer vorhergehenden Energiekalibrierung, siehe dazu Abschnitt 2.4. Die Nuklide Po-214 und Po-218 sind Tochternuklide des Rn-222 (siehe Abb. 2), während Po-212 (siehe Abb.1) Folgenuklid von Rn-220 ist, das also ebenfalls in der Raumluft auftritt.

Aufgrund der Abb.5 ergibt sich somit folgendes Bild:

a) Rn-222 (bzw. Rn-220) selbst wird am Draht nicht gesammelt, sondern zunächst das Po-218. In weit stärkerem Maße werden aber die Folgenuklide Pb-214 bzw. Bi-214 (Abb.2), die vermutlich an Aerosole gebunden sind, aufgefangen. Über die Beta-Umwandlungen dieser Nuklide bildet sich dann Po-214, das wegen seiner sehr kurzen Halbwertszeit von 164  $\mu$ s praktisch sofort in das Pb-210 mit der relativ großen Halbwertszeit von 22,3 a übergeht. Die Alphateilchen des Po-214 ergeben dann den entsprechenden Peak der Abb.5. Als weiterer Alpha-Strahler sollte noch Po-210 auftreten, was aber nicht der Fall ist. Offenbar dauert es wegen der großen Halbwertszeit von Pb-210 sehr lange, bis sich Po-210 bildet, wobei man auch die äußerst geringe Menge von Pb-210 berücksichtigen muß.

b) Der Peak des Po-212 in Abb.5 ergibt sich entsprechend erst aus der Ansammlung von Pb-212 bzw. Bi-212 während die vorangehenden Nuklide Po-216 und Rn-220 (siehe Abb. 1) nicht am Draht gesammelt werden.

c) Der zeitliche Verlauf der Bildung bzw. der Umwandlung läßt sich aus den hier beschriebenen Experimenten nicht näher ermitteln. Gesichert erscheint, daß Po-214 nicht bzw. nur in geringem Maße angesammelt, sondern erst aus Pb-214 bzw. Bi-214 gebildet wird. Die Ergebnisse der Alpha-Spektrometrie bestätigen jedenfalls die durch die Gamma-Spektrometrie gewonnenen Erkenntnisse und lassen darüber hinaus auch auf die Anwesenheit von Rn-220 in der Raumluft schließen.

### 2.3 Die alpha-emittierenden Folgenuklide des Thorium-232

Die für sog. Camping-Leuchten benutzten Gas-Glühluchtstrümpfe

(auch AUER-Strümpfe genannt) sind wegen ihres Gehaltes an Th-232 seit Jahrzehnten im Unterricht benutzte radioaktive Strahler, die leicht zu beschaffen und ohne besondere Vorsichtsmaßnahmen zu handhaben sind. Um das Alpha-Impulshöhenspektrum aufzunehmen, muß eine möglichst dünne Schicht der strahlenden Substanz gewonnen werden. Dies gelingt aber sehr leicht, wenn man über einer Camping-Leuchte in einigen cm Abstand eine Metallplatte anbringt, auf der sich während der Brenndauer von etwa 1 Stunde die freigesetzten Nuklide niederschlagen. Das von dieser Platte erhaltene Impulshöhenspektrum zeigt Abb.6 :

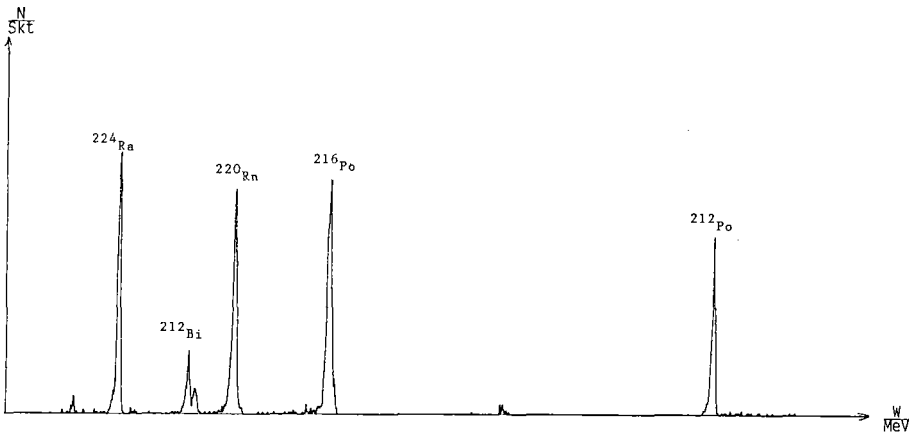


Abb.6 : Alpha-Spektrum der Folgenuklide  
des Thoriums  
Meßzeit: 7200 s, Gesamtzahl der registr. Alpha-Teilchen: 2

Mit Hilfe der Energiekalibrierung können folgende Nuklide identifiziert werden (von links nach rechts):

Ra-224, Bi-212, Rn-220, Po-216, Po-212 .

Die Energiewerte sind: 5,69 MeV; 6,01 MeV; 6,29 MeV;  
6,78 MeV; 8,78 MeV .

Die Nuklide Th-232 und Th-228 zeigen sich dagegen nicht. Offenbar werden diese Nuklide wegen des hohen Schmelzpunktes des Thoriumdioxids von 3300°C nicht flüchtig. Radium hat dagegen den wesentlich niedrigeren Schmelzpunkt von 700°C, sodaß das Nuklid Ra-224 flüchtig wird und sich auf der Metallplatte niederschlägt. Die Umwandlung des Ra-224 in das (stabile) Pb-208 ist aus Abb.1 ersichtlich.

Vergleicht man die strengen Strahlenschutzvorschriften wie sie bekanntlich für jedes Hochschulinstitut gelten, mit der Handels- und Gebrauchspraxis für Glühstrümpfe, so stimmt es doch recht nachdenklich, daß hier ein Produkt, aus dem Alphastrahlung -wenn auch in sehr geringer Aktivität- freigesetzt wird, ohne jede Kennzeichnung (!) gehandelt und benutzt werden darf. Denn man muß doch wohl zwischen der Verwendung in einem Hochschulinstitut und der Benutzung beim Camping (Haushalt!) beachtliche Unterschiede sehen. Immerhin können Glühstrümpfe bzw. die feinpulverigen Überreste auch in die Hände kleiner Kinder gelangen. Die derzeitige Praxis erscheint aber, soweit von zuständigen Stellen bislang zu erfahren war, nicht zu beanstanden.

#### 2.4 Bemerkungen über die Durchführung der Experimente zur Alpha-Impulshöhenspektrometrie

Die o.g. Ergebnisse wurden mit einem Vielkanalanalysator bei einer Kanalzahl von 2048 erhalten, ausreichend ist jedoch auch eine Kanalzahl von 1024. Die Energiekalibrierung erfolgte mit einer (Pu-239 + Am-241 + Cm-244)-Referenzquelle, wobei die 5,157 MeV-Linie des Pu-239 und die 5,805 MeV-Linie des Cm-244 benutzt wurden.

Der verwendete Silizium-Halbleiterdetektor hat eine empfindliche Fläche von 450 mm<sup>2</sup> und ein Energieauflösungsvermögen von 21 keV. Mit einem Detektor dieser Größe erhält man auf dem Bildschirm des Vielkanalanalysators bereits nach etwa 30 Minuten deutliche Peaks. Das Energieauflösungsvermögen ist für die Trennung der wichtigsten Linien ausreichend.

Die zylinderförmige Vakuumkammer hat einen Durchmesser von 10 cm und eine Höhe von 14 cm, sie ist durch eine Öffnung von

8 cm Durchmesser auf der Vorderseite bequem zugänglich. Provisorisch läßt sich eine Vakuumkammer aber auch aus handelsüblichen Vakuum-Bauelementen aufbauen, ohne daß dadurch die Ergebnisse beeinträchtigt würden. Das von einer zweistufigen Drehschieberpumpe erreichte Vakuum ist für alle Experimente völlig ausreichend.

Eine ausführliche Behandlung der Spektrometrie von Kernstrahlung findet sich in /5/, für einen informatorischen Überblick siehe /6/ sowie insbesondere auch die Firmenkataloge der Nuklearelektronik-Industrie.

Die Beschaffung des Vielkanalanalysators und der Meßelektronik wurde ermöglicht dank finanzieller Förderung durch die KSB-Stiftung, Stuttgart und die MÜLLER-REITZ-Stiftung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft, Essen.

#### Literatur:

- /1/ Seelmann-Eggebert, W., Pfennig, G., Münzel, H., Klewe-Nebenius, H., Nuklidkarte, 5.Auflage, München 1981
- /2/ Jacobi, W., Radon-Strahlenwirkung und Strahlenschutz, Phys. Bl. 45 (1989), 430 - 434
- /3/ SSK: Veröffentlichungen der Strahlenschutz-Kommission, Band 6, 62. Sitzung am 6./8.11.1985
- /4/ Bodemann, M., Storch, P., Schneider, H.-P., Beispiele zur Bestimmung von Elementen der natürlichen und künstlichen Umweltradioaktivität.  
In: Werner B. Schneider (Hrsg.)  
Wege in der Physikdidaktik, Bd. 2,  
Verlag Palm und Enke, Erlangen, 1991
- /5/ Knoll, G.F., Radiation Detection and Measurement, Second Edition, New York 1989
- /6/ Schmidt, H.U., Meßelektronik in der Kernphysik, Stuttgart 1986