

W. GLÖCKNER/W. JANSEN/  
R. G. WEISSENHORN (HRSG.)

---

HANDBUCH DER  
EXPERIMENTELLEN  
CHEMIE

---

BAND 3/II:  
ANALYTISCHE CHEMIE II:  
QUANTITATIVE ANALYSE

AULIS VERLAG

---

# HANDBUCH DER EXPERIMENTELLEN CHEMIE

---

BAND 3/II  
ANALYTISCHE CHEMIE II,  
QUANTITATIVE ANALYSE

Herausgegeben von:  
*Wolfgang Glöckner*

Verfasst von:  
*Herbert Brandl, Rudolf Engler, Thorsten Gerloff, Günther Harsch,  
Rebekka Heimann, Burkard Lutz, Christian Näther, Sabine Nick, Robert Schwankner,  
Georg Schwedt, Helmut Wenck, Erwin Wiederholt, Holger Wöhrmann*



AULIS VERLAG

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	VIII
<b>Hinweise zum sicheren Arbeiten im Labor</b> .....	IX
<b>1 Einführung (Schwedt)</b> .....	1
1.1 Allgemeine Grundlagen, Historisches .....	1
1.1.1 Gravimetrie .....	1
1.1.2 Maßanalyse .....	1
1.1.3 Optische Methoden .....	2
1.1.4 Elektroanalytische Methoden .....	4
1.1.5 Chromatographie .....	5
1.1.6 Ionenaustauschverfahren .....	6
1.1.7 Extraktionsverfahren .....	6
1.1.8 Thermische Methoden .....	7
1.1.9 Radiometrie .....	7
1.2 Didaktik (Wenck) .....	9
1.2.1 Allgemeine Gesichtspunkte .....	9
1.2.2 Spezielle Aspekte: Gravimetrie und Maßanalyse .....	10
1.2.3 Spezielle Aspekte: Photometrie und Elektroanalytik .....	10
1.2.4 Spezielle Aspekte: Gaschromatografie .....	11
1.2.5 Spezielle Aspekte: Runge-Bilder .....	12
<b>2 Gravimetrische Bestimmungen (Näther)</b> .....	14
2.1 Fachwissenschaftliche Grundlagen .....	14
2.1.1 Allgemeine Einführung .....	14
2.1.2 Theoretische Grundlagen .....	15
2.1.3 Vorgehensweise bei der Durchführung gravimetrischer Bestimmungen .....	16
2.2 Historisches .....	21
2.3 Experimente .....	23
2.3.1 Vorversuche zu gravimetrischen Bestimmungen .....	23
2.3.2 Hauptversuche zu gravimetrischen Bestimmungen .....	33
<b>3 Maßanalytische Bestimmungen (Nick)</b> .....	46
3.1 Fachwissenschaftliche Grundlagen .....	46
3.1.1 Allgemeine Einführung .....	46
3.1.2 Neutralisationstitrations .....	47
3.1.3 Komplextometrische Titrations .....	55
3.1.4 Redoxstitrations .....	58
3.1.5 Fällungstitrations .....	64
3.1.6 Geräte zur Volumenmessung .....	66
3.1.7 Vorgehensweise bei der Durchführung einer maßanalytischen Bestimmung .....	69
3.2 Historisches .....	74
3.3 Experimente .....	76
3.3.1 Neutralisationsverfahren .....	76

3.3.2	Komplexometrische Titrationsen .....	84
3.3.3	Redoxtitrationen .....	94
3.3.4	Fällungstitrationen .....	107
<b>4</b>	<b>Photometrische Methoden (Engler)</b> .....	<b>115</b>
4.1	Einleitung .....	115
4.2	Historisches .....	115
4.3	Fachwissenschaftliche Grundlagen .....	117
4.3.1	Farbe und Lichtabsorption, VIS-Photometrie .....	117
4.3.2	Farbvergleich – Visuelle Colorimetrie .....	120
4.3.3	Modellexperimente zur Einführung des <i>Lambert-Beer-Gesetzes</i> .....	121
4.3.4	<i>Lambert-Beer-Gesetz</i> .....	122
4.3.5	Komponenten von lichtelektrischen Photometern .....	129
4.3.6	Lichtelektrische Photometer .....	137
4.3.7	Spezielle Photometer .....	146
4.3.8	Nephelometrie, Fluorimetrie, Luminometrie und Polarimetrie .....	154
4.4	Virtuelle Messinstrumente .....	160
4.5	Experimenteller Teil – Photometrie und optische Methoden .....	161
4.5.1	Experiment und gute Laborpraxis .....	161
4.5.2	Experimente .....	162
<b>5</b>	<b>Elektroanalytische Methoden (Wöhrmann, Lutz)</b> .....	<b>210</b>
5.1	Fachwissenschaftliche Grundlagen .....	210
5.1.1	Klassifikation elektrochemischer Analyseverfahren .....	210
5.1.2	Allgemeines .....	210
5.1.3	Aktivität .....	211
5.1.4	<i>Nernst-Gleichung</i> .....	212
5.1.5	Elektroden .....	212
5.1.6	Potenziometrie .....	215
5.1.7	Konduktometrie .....	216
5.1.8	Voltammetrie .....	218
5.2	Historisches .....	220
5.3	Experimente .....	221
<b>6</b>	<b>Einführung in die Chromatographie am Beispiel der Papierchromatographie</b> (Harsch, Heimann) .....	<b>251</b>
6.1	Fachwissenschaftliche Grundlagen .....	251
6.1.1	Säulenchromatographie .....	251
6.1.2	Papier- und Dünnschichtchromatographie .....	253
6.1.3	Hochleistungs-Flüssigchromatographie .....	253
6.1.4	Gaschromatographie .....	254
6.2	Historisches .....	255
6.3	Experimente .....	257
<b>7</b>	<b>Gaschromatographie (Wiederholt)</b> .....	<b>270</b>
7.1	Fachwissenschaftliche Grundlagen .....	270
7.1.1	Was versteht man unter Gaschromatographie? .....	270
7.1.2	Der Aufbau einer gaschromatographischen Anlage .....	271

7.1.3	Die Komponenten einer gaschromatographischen Anlage .....	271
7.2	Historisches .....	279
7.3	Experimente .....	282
<b>8</b>	<b>Zur Radiometrie und Radiochemie natürlicher Radioelemente (Schwankner) .....</b>	<b>321</b>
8.1	Wechselwirkung von Kernstrahlung mit Materie .....	321
8.1.1	Radiolyse .....	321
8.1.2	Detektion .....	323
8.2	Uran-, Radium-Zerfallsreihe .....	326
8.3	Thorium-Zerfallsreihe .....	331
8.4	[ <sup>40</sup> K]-Kalium .....	334
8.5	Nuklidgeneratoren .....	337
8.6	Experimente .....	337
<b>9</b>	<b>Zusatzkapitel .....</b>	<b>358</b>
9.1	Runge-Bilder und ihr Beitrag zur Schulung des analytischen Denkens (Harsch/Heimann) .....	358
9.1.1	Fachwissenschaftliche Grundlagen .....	358
9.1.2	Historisches .....	359
9.1.3	Experimente .....	361
9.2	Faszinierende Experimente zur Analytik (Redox- und Säure-Base-Reaktionen) (Brandl) .....	368
9.2.1	Themengebiet Redoxprozesse .....	368
9.2.2	Themengebiet Säure-Base-Reaktionen .....	379
	Register .....	390

## 8 Zur Radiometrie und Radiochemie natürlicher Radioelemente

### 8.1 Wechselwirkung von Kernstrahlung mit Materie

#### 8.1.1 Radiolyse

Spätestens nachdem *Marie Curie* in Paris zu Beginn des 20. Jahrhunderts die Zerfallsgeschwindigkeit von [<sup>226</sup>Ra]Radium mittags und mitternachts aufzeichnete und identisch befand, war klar, dass das Phänomen der Radioaktivität, das *Henri Becquerel* gemeinsam mit dem Ehepaar *Curie* zu beschreiben begonnen hatte, sich in der Regel in anderen energetischen Dimensionen abspielt als in denen, welche äußeren Elektronenhüllen von Atomen entsprechen. An weiteren Versuchen, die Kinetik des radioaktiven Zerfalls von außen zu steuern, hat es danach ebenso nicht gefehlt wie an herausragenden Protagonisten (*Rutherford*, *Piccard*). Erst in neuerer Zeit und auch nur bei Zerfallsprozessen, bei denen die inneren Elektronenschalen des Ausgangsnuklides involviert sind (z. B. K-Einfang), konnte im Promillebereich des Absolutwertes auf den „monomolekularen“ Zerfall reproduzierbar Einfluss genommen werden. Wir kennen heute mehr als 3000 Nuklide (Kernsorten) der bis zu 118 diskutierten Elemente; nur rund 10 % davon erscheinen uns stabil [1–3].

Bei der spontanen Umwandlung der über 2700 Radionuklide wird hochenergetische Teilchen- bzw. Wellenstrahlung freigesetzt (Abb. 8.1.1/1). Der Energiebereich dieser Strahlung liegt dabei pro Elementarereignis bei wenigen keV bis 12 MeV pro emittiertem Teilchen bzw. Quant und bis zu 200 keV pro zurückgelassenem Rückstoßatom („hot chemistry“). Im Fall der Kernspaltung (Fission) werden sogar bis zu 200 MeV pro Spaltakt eines geeigneten Kerns (z. B. [<sup>233,235</sup>U]Uran, [<sup>239,241</sup>Pu]Plutonium) freigesetzt. Ein Elektronenvolt (eV) entspricht  $1,6 \times 10^{-19}$  VAs. Um dies einordnen zu können, sei erwähnt, dass ein roter Laserpointer Lichtquanten mit der Energie von je rund 2 eV freisetzt.

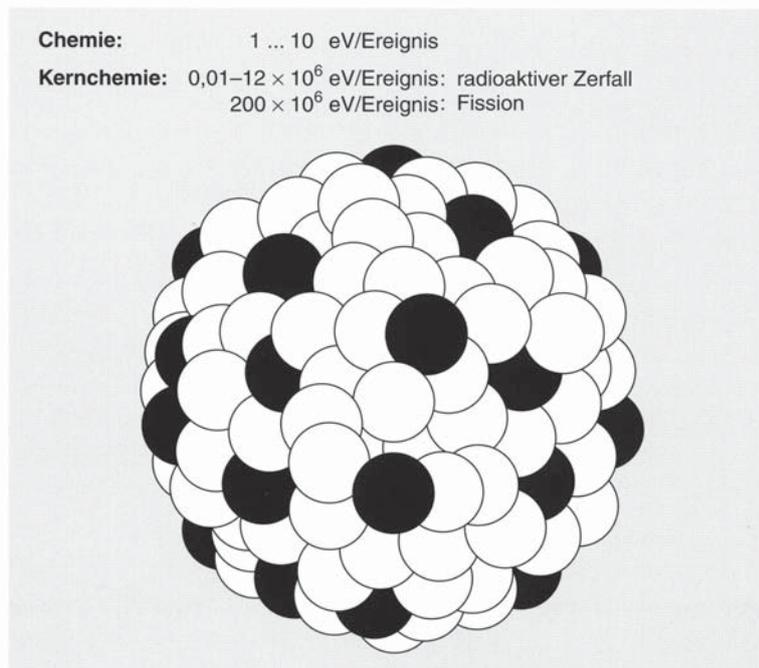


Abb. 8.1.1/1: Energetische Verhältnisse: Chemie/Kernchemie

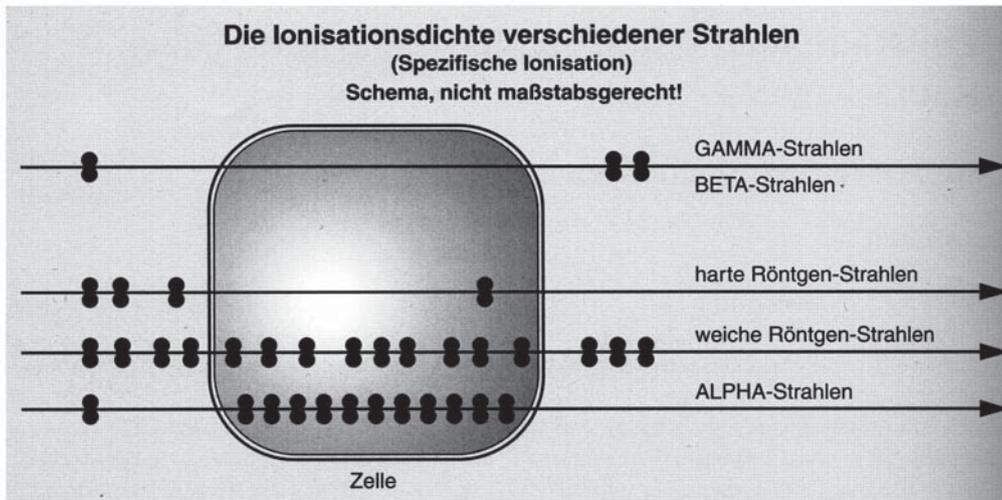


Abb. 8.1.1/2: Eine der ersten Darstellungen der Spurcharakteristik ionisierender Strahlung im Bezug auf Zelldurchmesser (nach Brit. Med. Bull. 4.11.46)

Betrachtet man die stabilisierenden, Kernumwandlungen begleitenden Emissionen in ihrer Wechselwirkung mit einem Target, so ist zu berücksichtigen, dass hier typische chemische Bindungsenergien im Bereich weniger Elektronenvolt vorherrschen.

Diese Wechselwirkungen führen in der Regel zu Lysen (Bindungsspaltungen) im Absorber, entweder unter Radikalbildung (Homolyse) oder Heterolyse, also Ionenbildung. Aus historischen Gründen, weil man Ionen in der Regel viel einfacher nachweisen konnte als Radikale, spricht man von ionisierender Strahlung (der Verordnungsgeber tut dies bis dato aus wenig nachvollziehbaren Gründen erst ab 5 keV).

Zur ionisierenden Strahlung wird auch die Röntgenemission (X-Strahlung) gerechnet. Seit ihrer breiten Anwendung, die unmittelbar auf die Entdeckung zur Jahreswende 1895/96 folgte und der folgenschweren Wiederentdeckung – der schon Jahre zuvor von Fotografen beschriebenen „Beeindruckung“ von lichtempfindlichen Silberemulsionen durch Emissionen von Uranyl-salzen (*Henri Becquerels* Autoradiographie, Februar 1896) – wurde die Ionisation umgebender Luft (Heterolyse) als ein Kriterium für die Quellstärke von Röntgenröhren und radioaktiven Präparaten benutzt. Erst in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts hatte man *alle* Wechselwirkungen mit dem Absorber (Heterolysen, Homolysen, Wärmeübertrag, Kernreaktionen etc.) quantifizierend erfasst. Der Begriff der Energiedosis (J/kg), welche die insgesamt im Absorber wirksam gewordene Energie repräsentiert, ist die dafür gültige Größe. Schon gegen Ende des 2. Weltkrieges (in den Laboratorien des Manhattan Projects und jenen der Alliierten, z. B. Abb. 8.1.1/2, war man sich bewusst, dass die Energiedosis mit einem Strahlengewichtungsfaktor bewertet werden muss, welcher den linearen Energietransfer (keV pro Mikrometer) auf den Absorber entlang der Strahlungspur wiedergibt. Dieser Bewertungsfaktor ist dimensionslos; für gering wechselwirkende Strahlung nimmt er den Wert 1 (Beta-, Gamma-, X-Strahlung) an, für schwere Rückstoßatome und Alphateilchen beträgt er z. B. 20 [4]. Die sich im Zuge der Strahlengewichtung ergebende Äquivalentdosis führt aber immer noch nicht zu befriedigender Zusammenführung strahlenbiologischer Beobachtungen nach Exposition einerseits und epidemiologischen Erkenntnissen (Hiroshima-, Nagasaki-, Uran-Bergarbeiter-Kollektiv, verschiedene medizinische Therapie-Kollektive) andererseits. So wurde in den 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts ein dimensionsloser Organengewichtungsfaktor eingeführt, mit welchem die Organäquivalentdosen gewichtet aufaddiert werden. Daraus resultierte als Risikokenngröße die noch heute angewandte effektive Äquivalentdosis; sie wird wie die Äquivalentdosis in Sievert (1 Sv = 1 J/kg) angegeben. Die natürliche Strahlenexposition des Menschen beträgt – ausgedrückt in effektiver Äquivalentdosis – rund 2 mSv/Jahr (Abb. 8.1.1/3).

Abb. 8.1.1/3: Natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition des Menschen in effektiver Dosis pro Jahr

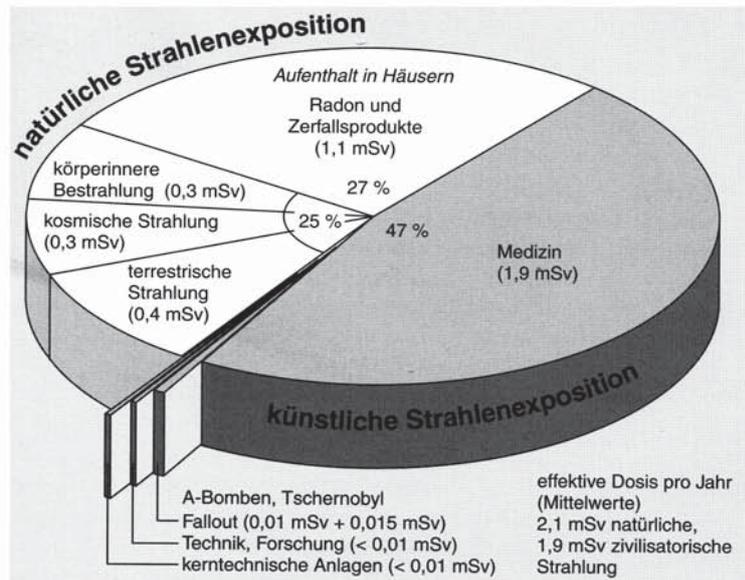
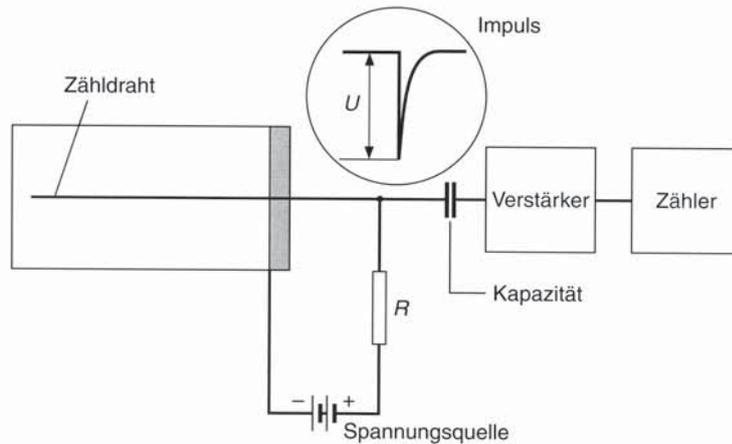


Abb. 8.1.2/1: Schaltung eines Geiger-Müller-Zählrohes; man beachte den Arbeitswiderstand (R) und die kapazitive Abkopp- lung des Hochspannungs- vom Registrierteil



## 8.1.2 Detektion

Neben direkten radiolytischen Wirkungen auf Absorber (fotografische Emulsionen, Erzeugung von Lumineszenzzentren in Mineralien [5], Polymerzerstörung ...) wurden in der Arbeitsgruppe von *E. Rutherford* zu Beginn des 20. Jahrhunderts die ersten gasgefüllten Zählrohre entwickelt; das berühmteste, das *Geiger-Müller-Auslösezählrohr*, stammt aus dem Jahr 1928. Es entstand aus der Zusammenarbeit von *Walter M. Müller* (1905–1979) und dem ehemaligen *Rutherford*-Mitarbeiter *Hans Geiger* (1882–1945), welcher u. a. 1912–1925 Leiter des Laboratoriums für Radioaktivität an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin und danach bis 1929 Hochschullehrer in Kiel war [6].

Dieser über lange Zeit wichtigste Detektor der Kernwissenschaften besteht aus einem isoliert aufgespannten Zähl draht; eine gegenüber dem Atmosphärendruck deutlich reduzierte Zählgasatmosphäre (z. B. Argon mit Spuren von niederen Halogenen bzw. Kohlenwasserstoffen) und ein (zumindest) innen leitfähiger Hohlzylinder umgeben ihn (Abb. 8.1.2/1). Im Falle der Endfenstervariante (Abb. 8.1.2/2) ist dieser Zylinder z. B. mit Glimmerfolie an einer Deckfläche abgeschlossen, welche den Eintritt von Alpha- und

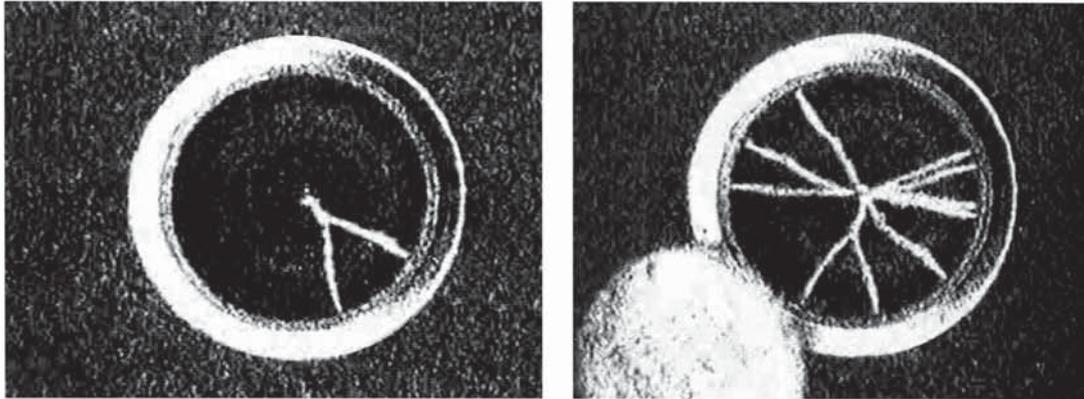


Abb. 8.1.2/2: Blick durch das Glimmerendfenster eines *Geiger-Müller*-Zählrohrs im Betrieb

niederenergetischer Betastrahlung zur Registrierung gestattet. Die primär geschlagenen Ionen (Heterolyseprodukte) werden im anliegenden, starken elektrischen Feld so beschleunigt, dass sie ihrerseits Sekundär-, Tertiär-, ...-Ionisationen, also eine Ionisationslawine, auslösen. Der Gasmultiplikationsfaktor steht dabei dem Verstärkungsfaktor des fotografischen Elementarprozesses ( $10^8$  bis  $10^9$ ) in nichts nach. Nach Auslösung ist das Zählrohr bis zu 100 Mikrosekunden unempfindlich, Tot- und Erholungszeit genannt, was die maximale Zählrate pro Sekunde auf den Reziprokwert beschränkt.

Die Arbeitsgruppe um *E. Rutherford* hatte schon anlässlich der Streuexperimente von Alphateilchen an schweren und leichten Atomkernen (Targetatomkernen), welche 1911 zur Entdeckung des Atomkerns und 1919 zur ersten künstlichen Elementtransmutation führte ( $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O} + {}^1_0\text{p}$ ), ein weiteres Detektionsprinzip angewendet, die Szintillation [7–9]; *W. Crookes* in England bzw. *J. Elster* und *H. Geitel* von der „Großen Schule“ in Wolfenbüttel hatten sie unabhängig voneinander 1903 entdeckt.

Schon *F. Soddy* stellte in seinen 1908 gehaltenen Experimentalvorlesungen („Die Natur des Radiums“ [10]) ein Spinhäriskop zum Zwecke des Unterrichts vor. Im Wesentlichen bestand es aus einer Lupe, die es dem akkomodierten Auge im Dunkeln gestattete, einen Zinksulfidschirm zu betrachten, welcher entweder mit Alphateilchen beschossen wird oder mit einem Alphastrahler (z. B. [ $^{226}\text{Ra}$ ]Radium) im ppm-Bereich dotiert ist [10, 11].

Bei jedem Auftreffen eines Korpuskels werden einige Hunderttausend Lichtquanten erzeugt, welche seinerzeit im Dunkeln mit dem bloßen Auge gezählt wurden. So nimmt es nicht wunder, dass *Hans Geiger*, welcher maßgeblich an den *Rutherford*'schen Untersuchungen in Manchester beteiligt war, buchstäblich jede freie Minute an Tageslicht darauf verwandte, eine elektrische Zählmethode zu finden.

Betrachtet man mit Hilfe einer Lupe ein radiolumineszentes, radiumhaltiges Leuchtzifferblatt einer alten Weckeruhr oder einer heutigen Taucheruhr, so kann man den räumlich wie zeitlich stochastischen Charakter der Radioaktivität unmittelbar beobachten (Abb. 8.1.2/3) [12].

Mit der Nachkriegsverfügbarkeit von Sekundärionenvervielfachern (Photomultipliern) quasi als künstlichem Auge und einem Verstärkungsfaktor von  $10^9$  Elektronen, ausgelöst durch ein entsprechendes Photon aus dem optisch angekoppelten Szintillationskristall (z. B. thallium-dotiertes Caesiumiodid) war nun auch der Weg zur Spektrometrie frei (Abb. 8.1.2/4).

Während beim *Geiger-Müller*-Auslösezählrohr die Information über die Strahlenart und -energie beim Gasmultiplikationsprozess verloren geht und nur mit Hilfe von Differenzbildung von nacheinander mit unterschiedlichen Absorbieren (mechanische Diskriminierung) durchgeführten Messungen desselben Präparates mühsam rekonstruiert werden kann, sind die Signale des Szintillationsdetektors energieproportional dem Primärprozess (Photoeffekt)(Abb. 8.1.2/5) mit Tot- und Erholungszeiten im Sub-Mikrosekundenbereich [13]. Dies eröffnet die Möglichkeit, mit entsprechender Impulshöhenanalyse (Multichannel-Analyzing, MCA), neben der Intensitäts- eine Energieachse aufzuspannen.

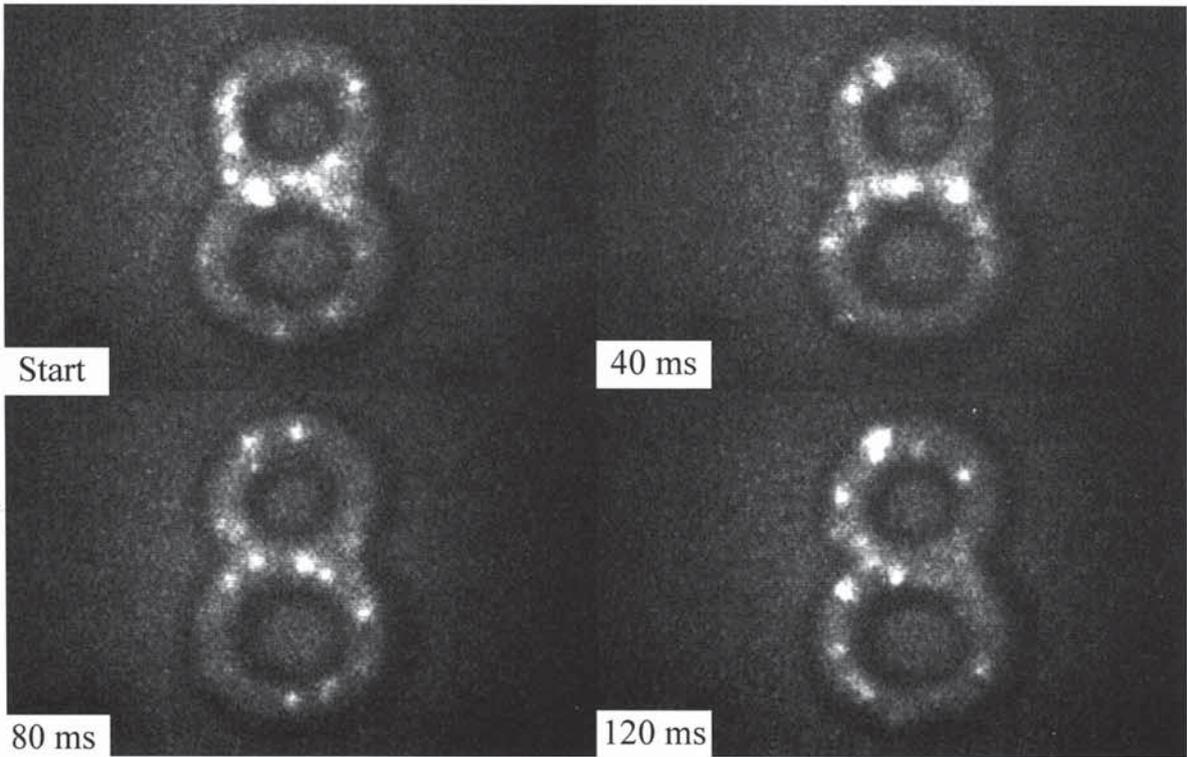
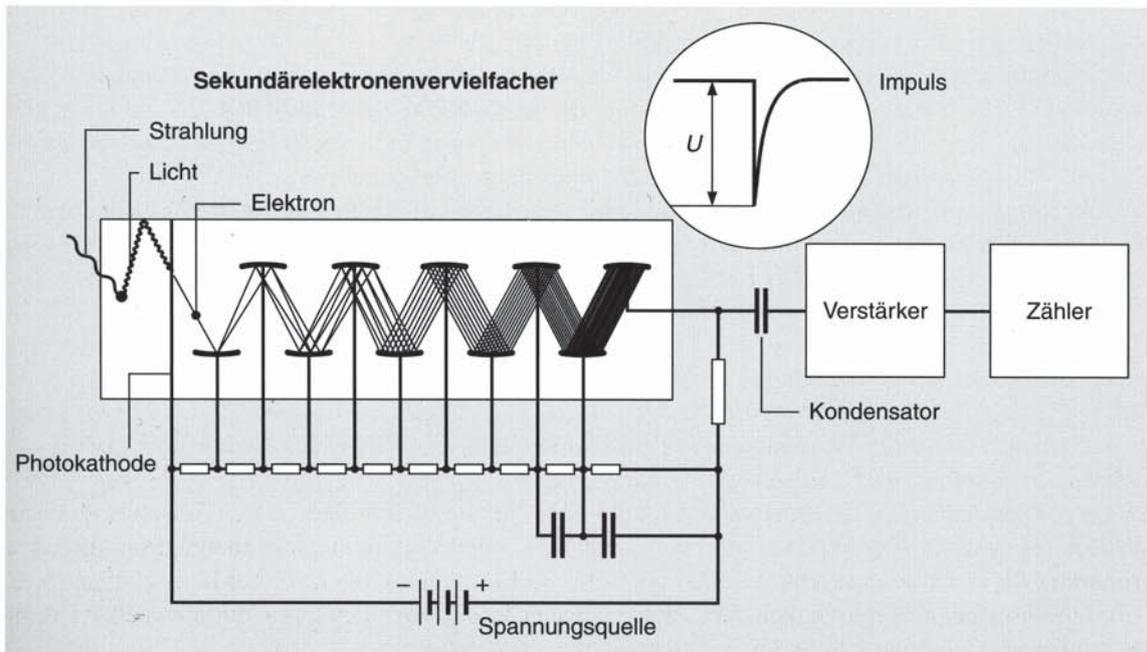


Abb. 8.1.2/3: Desintegration von „Einzelatomen“ im Blick; radiolumineszente, szintillierende Leuchtziffer eines Wekkers ( $^{226}\text{Ra}$ ) Radiumaktivität 170 Bq, mit Restlichtverstärkung in zeitlicher Abfolge ( $\Delta t = 40 \text{ ms}$ ) wiedergegeben [10–12, 61]

Abb. 8.1.2/4: Aufbau eines Szintillationsdetektors (vgl. [13])



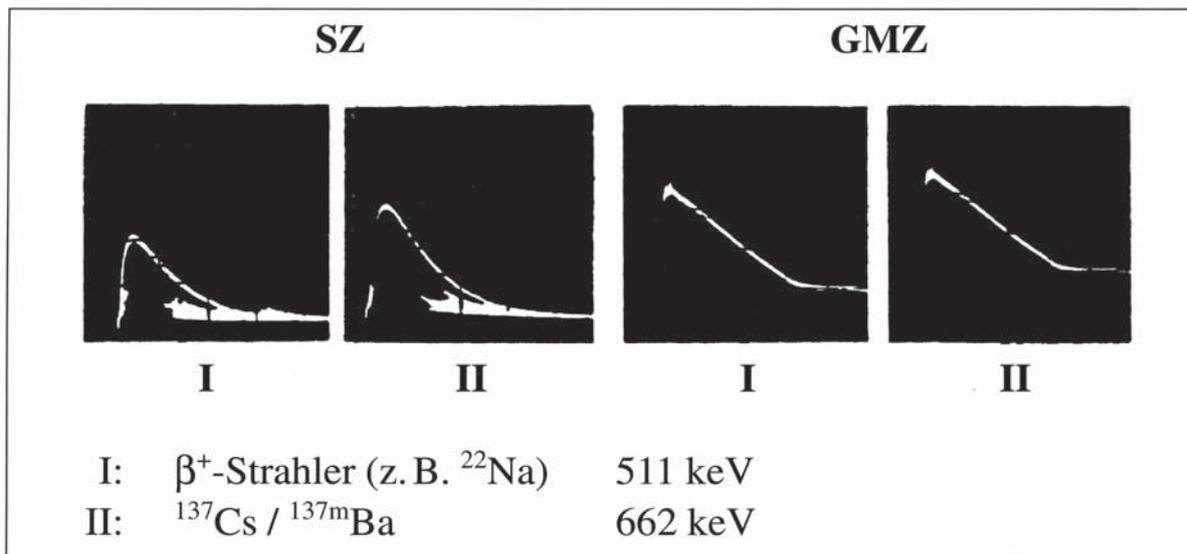


Abb. 8.1.2/5: Gegenüberstellung von Oszilloskopbildern der Ausgangssignale Szintillations- und Geiger-Müller-Endfensterzählrohr bei Einwirkung unterschiedlicher Gammaenergien

## 8.2 Uran-, Radium-Zerfallsreihe

Das 1789 von *M. H. Klaproth* erstmals näher charakterisierte Actinoidenelement Uran ist in seiner natürlichen Isotopenzusammensetzung dominiert von [ $^{238}\text{U}$ ]Uran (Isotopenhäufigkeit 99,2742 %) und [ $^{235}\text{U}$ ]Uran (Isotopenhäufigkeit 0,7204 %) [1]. [ $^{238}\text{U}$ ]Uran ist das primordiale Mutternuklid der (4n+2)-Zerfallsreihe, d. h., die Massenzahlen ihrer Glieder ergeben bei der Division durch 4 den Teilerrest 2. Aus historischen Gründen wird hier von der Uran-Radium-Zerfallsreihe (Abb. 8.2/1) gesprochen. Uran kommt in mineralischen Matrices in der Größenordnung 5–10 ppm (Gramm pro Tonne) vor.

Am auffälligsten in der Zerfallsreihe ist, dass ein gasförmiges Nuklid ([ $^{222}\text{Rn}$ ]Radon,  $T_{1/2} = 3,8$  d) als Tochterprodukt enthalten ist. Dieses vermag, je nach Beschaffenheit der umgebenden Matrix, aus dem Festkörper in umgebendes Wasser bzw. umgebende Luft überzutreten. Das Radon-Atom erleidet eine Alphaumwandlung, das Rückstoßatom kollidiert mit umgebenden Molekülen und wird z. B. zum hochgeladenen Kation ([ $^{218}\text{Po}^{x+}$ ]Polonium) in der Gasphase, was zum einen kathodische Elektrodeposition erlaubt, zum anderen eine Abscheidung auf Aerosole der Umgebungsluft bewirkt.

Die Inhalation dieser nun mit [ $^{222}\text{Rn}$ ]Radon-Folgeprodukten behafteten Aerosole und deren Deposition im tracheobronchialen wie pulmonären Teil der Lunge führen zur höchsten Exposition eines Organsystems aus natürlichen Quellen (Abb. 8.2/2 und Abb. 8.1.1/3). Während die Aufnahme von wenigen Becquerel Uran und seinen radiogenetischen Töchtern noch zu einer moderaten jährlichen Belastung von rund 0,08 mSv effektiver Dosis führt (1 Sv = 1 J/kg), so schlägt die permanente [ $^{222}\text{Rn}$ ]Radon-/Folgeprodukt-Exposition bereits mit rund 1 mSv pro Jahr zu Buche (siehe Abb. 8.1.1/3 und Abb. 8.2/2) (Ausgegangen wird von 80 % Aufenthalt in Innenräumen; dort wird ein gegenüber der Außenluft (5 ... 20 Bq/m<sup>3</sup>) erhöhter Radonpegel von ca. 50 Bq/m<sup>3</sup> angenommen.). Radon und seine aerosolgetragenen Töchter sind damit nach dem Tabakrauch das zweithäufigste Lungenkrebskrebserregende [14].

Als erste dokumentierte Uran-Anwendung gilt die Verwendung der Farbkraft seiner Verbindungen in antiken Glasmosaiken (Villa Cap Posilipo bei Neapel, 79 n. Chr.) mit einem Urangehalt der Glasmasse von über einem Gewichtsprozent [15].

*Klaproth's* Namensgebung orientierte sich am 1781 durch *F. W. Herschel* neu entdeckten Planeten, welcher zunächst „Georgium Sidus“ (zu Ehren George III.), dann nach dem griechischen Himmels-gott

## Natürliche Uran-238 Zerfallsreihe

Halbwertszeit $t_{1/2}$	Isotope Zerfallsart Verzweigung, %	$\alpha$ -Zerfall Energie, MeV (Intensität, %)**	$\beta$ -Zerfall Energie, MeV (Intensität, %)**	$\gamma$ -Emission Energie, keV (Intensität, %)*
<b>4.470*10<sup>9</sup>y</b>	<sup>238</sup> <sub>92</sub> U 100 ↓ $\alpha$	$\alpha$ : 4.198 (79.0) $\alpha$ : 4.151 (20.9)		$\gamma$ : 49.55 ( 0.063) $\gamma$ : 113.5 ( 0.0102)
24.10 d	<sup>234</sup> <sub>90</sub> Th 100 ↓ $\beta$		$\beta$ : 0.199 (70.3) $\beta$ : 0.104 (19.2) $\beta$ : 0.103 ( 7.6)	$\gamma$ : 63.28 ( 4.1) $\gamma$ : 92.37 ( 2.42) $\gamma$ : 92.79 ( 2.39)
1.17 m	<sup>234m</sup> <sub>91</sub> Pa 0.16 99.84 IT ↙ ↘ $\beta$		IT: $\beta$ : 2.290 (98.2) $\beta$ : 1.228 ( 1.007)	$\gamma$ : <b>1001.03 ( 0.837)</b> $\gamma$ : <b>766.38 ( 0.294)</b>
6.70 h <b>2.455*10<sup>5</sup>y</b>	<sup>234</sup> <sub>91</sub> Pa $\beta^-$ <sup>234</sup> <sub>92</sub> U 100 ↙ $\alpha$ 100	$\alpha$ : 4.7746 (71.38) $\alpha$ : 4.7224 (28.42)	$\beta$ : 0.472 (31)	$\gamma$ : 945.91 ( 0.034) $\gamma$ : 53.20 ( 0.123)
<b>7.538*10<sup>4</sup>y</b>	<sup>230</sup> <sub>90</sub> Th 100 ↓ $\alpha$	$\alpha$ : 4.6870 (76.3) $\alpha$ : 4.6205 (23.4)		$\gamma$ : 67.67 ( 0.373)
<b>1600 y</b>	<sup>226</sup> <sub>88</sub> Ra 100 ↓ $\alpha$	$\alpha$ : 4.7843 (94.45) $\alpha$ : 4.6017 ( 5.55)		$\gamma$ : 186.21 ( 3.59)
<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3.8235 d</span>	<sup>222</sup> <sub>86</sub> Rn 100 ↓ $\alpha$	$\alpha$ : 5.4895 (99.92) $\alpha$ : 4.986 ( 0.078)		$\gamma$ : 511 ( 0.076)
3.10 m	<sup>218</sup> <sub>84</sub> Po 0.020 99.980 $\beta$ ↙ ↘ $\alpha$	$\alpha$ : 6.0024 (100)	$\beta$ : keine Daten	keine $\gamma$ -Strahlung
1.6 s 26.8 m	<sup>218</sup> <sub>85</sub> At $\beta^-$ <sup>218</sup> <sub>82</sub> Pb 99.9 100 $\alpha$ ↘ ↙ $\beta$	$\alpha$ : 6.694 (90)	$\beta$ : 0.728 (42.2) $\beta$ : 0.670 (48.9) $\beta$ : 1.030 ( 6.3)	$\gamma$ : 351.93 (35.1/37.6) $\gamma$ : <b>295.22 (18.2/19.3)</b> $\gamma$ : 242.00 ( 7.12/7.43)
19.9 m	<sup>214</sup> <sub>83</sub> Bi 0.021 99.979 $\alpha$ ↙ ↘ $\beta$	$\alpha$ : 5.452 (53.9) $\alpha$ : 5.516 (39.2)	$\beta$ : 3.275 (18.2) $\beta$ : 1.542 (17.8) $\beta$ : 1.508 (17.02) $\beta$ : 1.425 ( 8.18) $\beta$ : 1.894 ( 7.43)	$\gamma$ : 609.31 (44.6/46.1) $\gamma$ : <b>1764.49 (15.1/15.4)</b> $\gamma$ : 1120.29 (14.7/15.1) $\gamma$ : 1238.11 ( 5.78/5.79) $\gamma$ : <b>2204.21 ( 4.98/5.08)</b> $\gamma$ : 799.7 ( 0.0104) $\gamma$ : 799.7 ( 0.021)
1.3 m 164.3 $\mu$ s	<sup>210</sup> <sub>81</sub> Tl $\beta^-$ <sup>210</sup> <sub>82</sub> Pb 100 100 $\beta$ ↘ ↙ $\alpha$	$\alpha$ : 7.6868 (99.99)	$\beta$ : 4.209 (30) $\beta$ : 1.863 (24)	$\gamma$ : 799.7 ( 0.0104) $\gamma$ : 799.7 ( 0.021)
<b>22.3 y</b>	<sup>210</sup> <sub>82</sub> Pb 100 ↓ $\beta$		$\beta$ : 0.017 (80) $\beta$ : 0.063 (20)	$\gamma$ : <b>46.54 ( 4.25)</b>
5.013 d	<sup>210</sup> <sub>83</sub> Bi 100 ↓ $\beta$		$\beta$ : 1.162 (99)	keine $\gamma$ -Strahlung
<b>138.376 d</b>	<sup>210</sup> <sub>84</sub> Po 100 ↓ $\alpha$	$\alpha$ : 5.3043 (99.99)		$\gamma$ : 803.10 (1.22*10 <sup>-3</sup> )
stabil	<sup>206</sup> <sub>82</sub> Pb			

\* $\gamma$ -Emission: absolute Intensität pro 100 Zerfälle/im Gleichgewicht; \*\* $\alpha$ -,  $\beta$ -Zerfall: Intensität pro 100 Zerfälle  
Halbwertzeit langlebiger Isotope: **fett**, Halbwertzeit Isotope im Gleichgewicht: normal

Edelgas: <sup>222</sup><sub>86</sub>Rn,  $\gamma$ -Emission Referenzlinien: **fett**; Stand der Daten: Ende '06, Version: 4.1, Feb 2007

© 2007 ISuS, all rights reserved; Entwurf & Design: ISuS, D-83722 Schliersee, Postfach 102;

Abb. 8.2/1: Uran-Radium-(4n+2)-Zerfallsreihe [2]

### Radionuklide im menschlichen Körper

Nuklid	Gehalt
Kalium 40	4 000 Bq
Kohlenstoff 14	3 000 Bq
Uran + Thorium mit Folgeprodukten	85 Bq

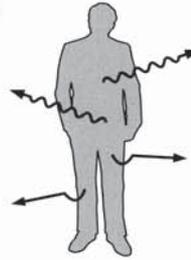


Abb. 8.2/2: Interne Strahlenexposition des Menschen; Quellstärke: Der Durchschnittsmensch ist eine 7-kBq-Strahlenquelle

### Innere jährliche Strahlenbelastung

Nuklid	betroffenes Organ	effektive Dosis in mSv
Kalium 40	Ganzkörper	0,17
Kohlenstoff 14	Ganzkörper	0,015
Uran + Thorium mit Folgeprodukten	Knochen, Nieren, Milz	0,075
		0,26
Radon + Folgeprodukte	Lunge	ca. 1,0
		<b>gesamt ca. 1,3</b>

1 mSv = 100 mrem



Abb. 8.2/3: Uranapothekerglas aus Wien im Kunst- und UV(A)-Licht



Abb. 8.2/4: Bergbaumedaille aus Uran (1956, Zweitprägung): Avers und Revers (Durchmesser = 40 mm,  $m = 58$  g) [21, 27, 62]

„Uranus“ benannt wurde. Der Elementname Uran setzte sich schließlich gegen die Bezeichnungen „Herschel“ und „Klaprothium“ bzw. „Klaprothianum“ durch. Der weiten Verbreitung seiner farbkraftigen Verbindungen taten diese Streitigkeiten keinen Abbruch (Abb. 8.2/3 und Abb. 8.6.3/1).

*Klaproth's* Reduktionsversuche führten nur zu einer schlecht definierten, nicht-stöchiometrischen Oxidstufe. Erst 50 Jahre später stellte sich mit Hilfe des inzwischen verfügbaren Reduktionsmittels Kalium-Metall (Entdeckung 1807, durch *H. Davy*) unter einer Schutzschmelze von Kaliumchlorid der gewünschte Erfolg ein (*E. M. Péligot* [16]).

Metallisches Uran (vgl. Abb. 8.2/4) fand Aufmerksamkeit als Stahlveredler (Versuchsrohre schwerer Geschütze, 1898 [17]) und spielte eine prominente Rolle beim *Haber'schen* „Griff in die Luft“ („Uranpatent“ DRP 229126 aus dem Jahre 1909) als heterogener Katalysator in der Entwicklung der Ammoniaksynthese (1909) [18]. Die Pyrophorie, welche die Bearbeitung von Uran erschwerte, wurde in Ferro-Uran-Legierungen zunächst als Zündstein und Anzünder von Docht- und Gaslampen verwendet; 1903 wurden wegen zu hohen Abriebs durch Cer-Eisen (Nebenprodukt der Thoriumgewinnung) diese Legierungen abgelöst. Bereits 1893 wurde allerdings die Verwendung von Uran für Zündvorrichtungen mit dem Anspruch patentiert „Verwendung von Kohlenstoffuran für Zündvorrichtungen bei Gasanzündern, Spielzeugen für Kinder und dergl. in der Weise, dass durch Schlagen oder Reiben mittelst eines harten Körpers lebhaftes Funken hervorgerufen werden.“ [19].

Auf dieser Basis arbeiteten nicht nur militärische Leuchtpurgeschosse, Leuchtbomben und Brandsätze, sondern man stößt auf eine bemerkenswerte Anmerkung von *Albert Speer*, die auf eine während des zweiten Weltkrieges bedeutsame nicht-nukleare Verwendung hinweist:

*„Im Sommer drohte infolge der Sperrung unserer Wolfram-Importe aus Portugal eine kritische Lage für die Produktion der Hartkern-Munition. Ich ordnete daraufhin die Verwendung von Urankernen für diese Munitionsart an. Die Freigabe unserer Uranvorräte von etwa 1200 Tonnen zeigt, daß der Gedanke an eine Produktion von Atombomben im Sommer 1943 von meinen Mitarbeitern und mir aufgegeben worden war.“* [22].

Eine numismatisch-radiologische Kuriosität sind die beiden 1956 aus einheimischem Uran geprägten Medaillen der Eisenwerkgesellschaft Maximilianshütte AG, Sulzbach-Rosenberg. *F. Kirchheimer* bemerkt zu den je bis zu 60 Uran-Abschlägen:

*„Als Münzmetall hat das Uran keine Zukunft, da seine Oberfläche einer unschönen Oxydation unterliegt und mehrere Eigenschaften des Elements den Prägevorgang sehr schwierig gestalten“* [21–24].

Die schon von *Klaproth* erkannte Farbkraft von Uran- und Uranylverbindungen führte 1855 zur Gründung der k. k. Uranfabrik in Joachimsthal, wo auf die jahrhundertealte Silberbergbautradition die Uran-, Radium-Produktion und Radon-Anwendung folgt.

Eine Analyse der Isotopenzusammensetzung von 115 Uranglasproben ergab in der Überzahl der untersuchten Chromophore einen Verschnitt von Natururan mit abgereichertem Uran, was sie allesamt als Produkte ausweist, die nach dem zweiten Weltkrieg erschmolzen wurden [25–27].

Ein weiterer Charakterisierungsaspekt ist, dass seit Anwendung der Farbkraft des Urans bzgl. der radio-genetischen Tochter [<sup>226</sup>Ra]Radium mehr oder minder dekontaminierte Farbkörper zum Einsatz kommen. Umdruckvignetten promienieren im Bereich der Gammaoberflächendosisleistung und enthalten entsprechend einen hohen Anteil an Folgeprodukten der (4n+2)-Zerfallsreihe (z. B. Uranswarz, Schlaggenwald – heute Horni Slavkov).

Bei der Untersuchung von rund 30 unterschiedlich dekorierten uranglasierten Fliesen fiel eine Probe (Abb. 8.2/5) dahingehend auf, dass ein visuell vom braunen Uranoxidchromophor kaum zu unterscheidender inaktiver Ersatzstoff zum Einsatz gekommen ist [27]. Wiedergegeben ist auch die digitale Autoradiographie des Belegstücks (MWPC/MICAD), auch eine die Schwermetallabsorption des Uranauftrags dokumentierende Röntgenographie. Mit Röntgenfluoreszenzanalyse (EDX) erweist sich der Ersatzstoff (ähnlich brauner Farbkörper) als Eisenoxidstufe.

Die UV-Fluoreszenz des matrix-eingebetteten Uranylkatons ist weithin bekannt; sie zeichnet verantwortlich dafür, dass sich die Familie *Becquerel* – über mindestens zwei Generationen hinweg – mit Uranyl-

verbindungen befasste (Abb. 8.2/3 und Abb. 8.6.3/1). UV-Fluoreszenz tritt bei Gebrauchs-, insbesondere Lichtschutz- und Zierglas ebenso auf wie in Bijouteriewaren. Weit weniger bekannt ist, dass die Stimulation von Uranyl-Lumineszenz durch X-Strahlung ( $U_A > 100 \text{ kV}$ ) in den frühen Tagen der Röntgenanwendungen für uranhaltige Leuchtschirme und in Form Uran-imprägnierter Fluoreszenzfolien herangezogen wurde (Abb. 8.2/6 links).

Vereinzelt gibt es noch Entladungsröhren, bei welchen neben anderen farbwirksamen Effekten wie Totaldruck, Spannung, Restgas auch die Glaszusammensetzung (Einfügen von Uranglasbestandteilen) variiert. Ihre Verwendung in Experimentalvorträgen führte zur Stimulation der Uranylfluoreszenz durch Gasentladungen bzw. Reibungselektrizität und damit zu völlig neuen Anwendungsbereichen [28]. Bei bestimmungsgemäßem Röhrenbetrieb erfolgt intensive Fluoreszenzstimulation der Uranglasteile durch die Gasentladung (siehe Abb. 8.2/6 rechts).

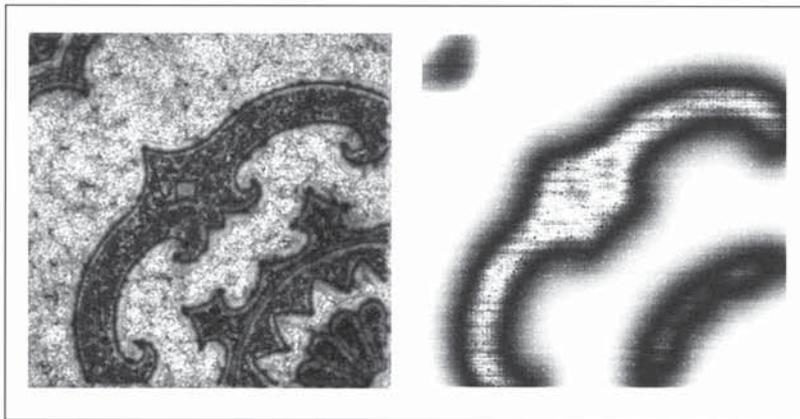
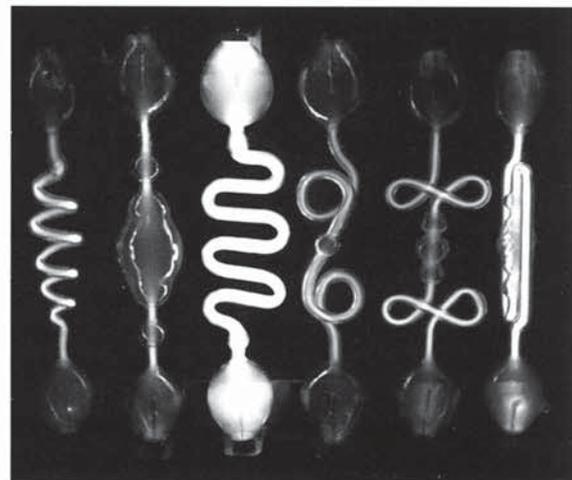
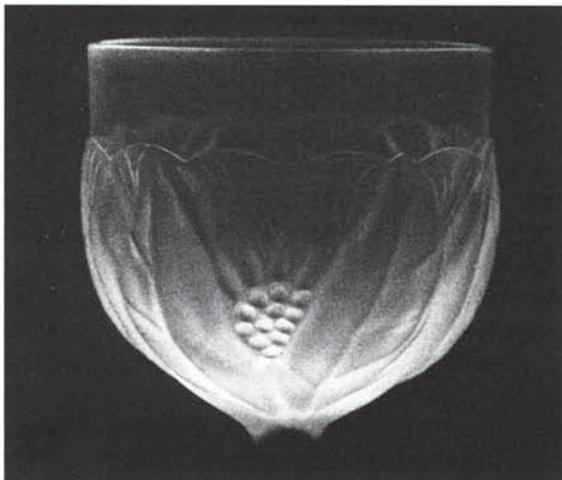


Abb. 8.2/5: Mit  $\text{UO}_{3-x}$  neben dem inaktiven Ersatzstoff  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Chromophor glasierte Fliese ( $20 \times 20 \text{ cm}^2$ ), Gamma-Oberflächendosisleistung =  $500 \text{ nSv/h}$  (links; digitale Autoradiographie (MWPC) rechts [24])

Abb. 8.2/6: Links: X-Stimulierte Uranyl-Lumineszenz eines geätzten Uranglases (Urangehalt ca. 0,2 Gewichtsprozent; Anodenspannung =  $250 \text{ kV}$  (Röntgentherapieröhre mit W-Anode))  
Rechts: Gasentladungsröhren mit Uranglasteilen im Betrieb ( $U = 10 \text{ kV}$ ) [27, 28]



### 8.3 Thorium-Zerfallsreihe

Das mit seinen Folgeprodukten mehr oder minder im radiogenetischen Gleichgewicht befindliche primordiale Mutternuklid [ $^{232}\text{Th}$ ]Thorium ( $T_{1/2} = 1,405 \times 10^{10}$  a, natürliche Isotopenhäufigkeit 100 %) scheint in Objekten mit unterschiedlicher radiotoxikologischer Bewertung auf; in mineralischen Matrices tritt es uns ubiquitär mit rund 20 ppm (Gramm pro Tonne) entgegen. Die Thorium-Zerfallsreihe stützt sich auf Glieder mit Massenzahlen, die durch 4 teilbar sind; man spricht auch von der 4n-Reihe (Abb. 8.3/1). Bei der Reindarstellung von Thoriumverbindungen werden simultan je zwei [ $^{232,228}\text{Th}$ ]Thorium- von zwei Radiumisotopen ([ $^{224,228}\text{Ra}$ ]Radium) chemisch getrennt; dies führt dazu, dass mit Ermittlung des Nuklidvektors der Zeitpunkt der Abtrennung (sofern er weniger als 45 Jahre zurückliegt) mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden kann, was u. U. Herkunftsaussagen erlaubt. Mit [ $^{220}\text{Rn}$ ]Radon enthält die 4n-Zerfallsreihe ein weiteres Glied, das auf Grund seines gasförmigen Charakters je nach Matrixbeschaffenheit exhalierend zu Nichtgleichgewicht Anlass geben kann.

Gerade beim Thorium und seinen Verbindungen kommt es durch ihre ausgeprägten Eigenschaften zu einer breiten nicht-nuklearen Verwendung, die vom *Auer*'schen Glühstrumpf (Gasglühlicht) über lunkerfreie Legierungen im Turbinen- und Flugzeugbau bis zum Tönen von Fotografien usf. reicht. Andererseits spielt die Aufklärung der 4n-Zerfallsreihe eine prominente Rolle in der Frühgeschichte der natürlichen Transmutation; Grund genug, sich mit Herkunft und Verbreitung von Thorium auseinander zu setzen [29].

Die Elementbezeichnung „Thorium“, benannt nach dem skandinavischen Gott Thor, wurde erstmals 1815 von *J. J. Berzelius* für ein neues Metall vorgeschlagen. Es entpuppte sich jedoch zwei Jahre später als Yttriumphosphat. Im Jahre 1828 entdeckte er in einem Mineral (Thorit) der norwegischen Insel Lövön schließlich das Element Thorium. Die Ionisationswirkung von  $Z = 90$  Thorium und seinen Verbindungen wurde gleichzeitig und unabhängig voneinander durch *G. C. Schmidt* (Publikation vom 1.4.1898) und *M. Curie* (Publikation vom 12.4.) entdeckt, wobei Ersterer in der Folgezeit eine Verknüpfung dieser Phänomene mit dem relativ hohen Atomgewicht – in Analogie zum Uran – vermutete. *Ernest Rutherford* konnte während seiner Zeit an der McGill-Universität in Montréal (1898–1907) in einer Reihe genialer Experimente die Radiogenetik der Thoriumtöchter schrittweise aufklären. Der erfolgreiche präparative Schlüssel waren Studien zur Emanation von Thoriumdioxid sowie der mathematische Apparat zur Behandlung der radiogenetischen Gleichgewichtsverhältnisse. Dreißig Jahre später erinnert der zum Baron ernannte *Lord Rutherford of Nelson* in seinem Wappen nicht nur an seine Schulstadt in Neuseeland (Darstellung von Kiwi und Maori), sondern ebenso an *Hermes Trismegistos*, den „Propheten der alten Alchemie“ („coat of arms“, Abb. 8.3/2). Ein Radiochemiker wird bemerken, dass das Wappen auch die stilisierte Version der Aktivitätskurven von Mutter- und Tochternukliden enthält [55, 59].

*Rutherford* klärte auf, dass es sich bei der in der Umgebung von Thoriumverbindungen „erregten“ Radioaktivität um niedergeschlagene Emanationsprodukte handelt (Abb. 8.6.5/2), welche luftverfrachtbar und an Kathoden abscheidbar sind.

„It will be observed that radioactivity is produced on the plates some distance away from the thorium oxide, and is roughly proportional to the emanation-current at the plate. We may conclude from this experiment that the radioactivity is, in some way, due to the „emanation” or something that accompanies it, but not caused by direct action of radiation from thorium oxide.“ [31]

Aus diesen Untersuchungen heraus wurde die „*Rutherford*'sche Thoriumkuh“ entwickelt, welche in unterschiedlichsten Bauformen [ $^{212}\text{Pb}$ ]Blei aus der Gasphase über Thoriumdioxid abscheidet (Abb. 8.6.5/1).

Wird Platin als Kathodenmaterial herangezogen, so ist das überwiegend in Bereichen hoher Feldstärken abgeschiedene trägerfreie [ $^{212}\text{Pb}$ ]Blei ( $T_{1/2} = 10,6$  h) als hochgeladenes Kation über die Gasphase einfach zugänglich (Abb. 8.6.5/2). Daraus zog u. a. *Otto Hahn* Nutzen, als er damit intensiv die ultramikrochemischen Verhältnisse an der Grenzfläche Ionenkristall – Elektrolyt trägerfrei untersuchte [32], was schließlich in der Aufstellung des *Hahn*'schen Fällungssatzes gipfelte:

„Ein in beliebiger Verdünnung vorliegendes Ion wird an einen Niederschlag dann stark adsorbiert, wenn dieser einer dem Ion entgegengesetzte Ladung trägt und die nach der Adsorption entstandene Verbindung in dem gegebenen Lösungsmittel schwer löslich bzw. wenig dissoziierbar ist.“ [33]

## Natürliche Thorium-232 Zerfallsreihe

Halbwertszeit $t_{1/2}$	Isotope Zerfallsart Verzweigung, %	$\alpha$ -Zerfall Energie, MeV (Intensität, %)**	$\beta$ -Zerfall Energie, MeV (Intensität, %)**	$\gamma$ -Emission Energie, keV (Intensität, %)*
1.405*10 <sup>10</sup> y	<sup>232</sup> <sub>90</sub> Th 100 ↓ $\alpha$	$\alpha$ : 4.0123 (78.2) $\alpha$ : 3.9472 (21.7)		$\gamma$ : 63.81 ( 0.263) $\gamma$ : 140.86 ( 0.021)
5.75 y	<sup>228</sup> <sub>88</sub> Ra 100 ↓ $\beta$		$\beta$ : 0.039 (40) $\beta$ : 0.013 (30)	$\gamma$ : 13.42 ( 1.6) $\gamma$ : 16.2 ( 0.72)
6.15 h	<sup>228</sup> <sub>89</sub> Ac 100 ↓ $\beta$		$\beta$ : 1.158 (29.9) $\beta$ : 1.731 (11.66) $\beta$ : 2.069 ( 8.6) $\beta$ : 0.596 ( 8.0) $\beta$ : 1.004 ( 5.92) $\beta$ : 0.974 ( 5.1)	$\gamma$ : 911.20 (25.8) $\gamma$ : <b>968.97 (15.8)</b> $\gamma$ : 338.32 (11.27) $\gamma$ : 964.77 ( 4.99) $\gamma$ : 463.00 ( 4.40) $\gamma$ : 794.95 ( 4.25)
1.9131 y	<sup>228</sup> <sub>90</sub> Th 100 ↓ $\alpha$	$\alpha$ : 5.4232 (72.2) $\alpha$ : 5.3404 (27.2) $\alpha$ : 5.221 (0.420)		$\gamma$ : 84.37 ( 1.22) $\gamma$ : 215.98 ( 0.254) $\gamma$ : 131.63 ( 0.130)
3.66 d	<sup>224</sup> <sub>88</sub> Ra 100 ↓ $\alpha$	$\alpha$ : 5.6854 (94.92) $\alpha$ : 5.4486 ( 5.06)		$\gamma$ : 240.99 ( 4.10) $\gamma$ : 292.70 ( 0.0062)
55.6 s	<sup>220</sup> <sub>86</sub> Rn 100 ↓ $\alpha$	$\alpha$ : 6.2881 (99.89) $\alpha$ : 5.747 ( 0.114)		$\gamma$ : 549.73 ( 0.114)
0.145 s	<sup>216</sup> <sub>84</sub> Po 100 ↓ $\alpha$	$\alpha$ : 6.7783 (100)		$\gamma$ : 804.9 ( 0.0019)
10.64 h	<sup>212</sup> <sub>82</sub> Pb 100 ↓ $\beta$		$\beta$ : 0.335 (82.5) $\beta$ : 0.574 (12.3) $\beta$ : 0.159 ( 5.17)	$\gamma$ : <b>238.63 (43.3)</b> $\gamma$ : 300.09 ( 3.28) $\gamma$ : 115.18 ( 0.592)
60.55 m	<sup>212</sup> <sub>83</sub> Bi 35.94    64.06 $\alpha$ ↙    ↘ $\beta$	$\alpha$ : 6.0508 (69.91) $\alpha$ : 6.0899 (27.12)	$\beta$ : 2.248 (55.46) $\beta$ : 1.521 ( 4.36)	$\gamma$ : 39.86 ( 1.06) $\gamma$ : 288.20 ( 0.337) $\gamma$ : 727.33 ( 6.58) $\gamma$ : <b>1620.50 ( 1.49)</b>
3.053 m 0.298 $\mu$ s	<sup>208</sup> <sub>81</sub> Tl <sup>212</sup> <sub>84</sub> Po 100        100 $\beta$ ↘        ↙ $\alpha$	$\alpha$ : 8.785 (100)	$\beta$ : 1.80 (48.7) $\beta$ : 1.29 (24.5) $\beta$ : 1.52 (21.8) $\beta$ : 1.04 ( 3.9)	keine $\gamma$ -Strahlung $\gamma$ : 2614.53 (35.64) $\gamma$ : 583.19 (30.72) $\gamma$ : 510.77 ( 8.13) $\gamma$ : 860.56 ( 4.465)
stabil	<sup>208</sup> <sub>82</sub> Pb			

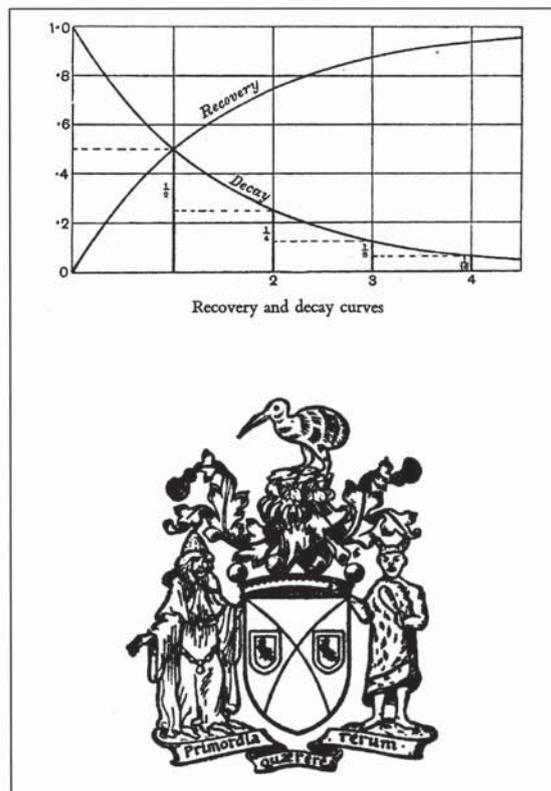
\* $\gamma$ -Emission: absolute Intensität pro 100 Zerfälle/im Gleichgewicht; \*\* $\alpha$ -,  $\beta$ -Zerfall: Intensität pro 100 Zerfälle  
Halbwertszeit langlebiger Isotope: **fett**, Halbwertszeit Isotope im Gleichgewicht: normal

Edelgas: <sup>220</sup><sub>86</sub>Rn,  $\gamma$ -Emission Referenzlinien: **fett**; Stand der Daten: Ende '06, Version: 4.1, Feb 2007

© 2007 ISuS, all rights reserved; Entwurf & Design: ISuS, D-83722 Schliersee, Postfach 102;

Abb. 8.3/1: Thorium-(4n)-Zerfallsreihe [2]

Abb. 8.3/2: Oben: Behandlung eines säkularen radiogenetischen Gleichgewichtes  
 Unten: Lord Rutherford of Nelson (coat of arms, 1931)  
 Motto: „primordia quaerere rerum“ – „Suchen nach dem Ursprung der Dinge“ [30, 52]



So konnte z. B. problemlos durch geeignete nicht-stöchiometrische Ansätze der Silberhalogenidfällung bzw. durch Wahl des Zeitpunktes der Tracerzugabe aufgeklärt werden, ob und in welchem Umfang Halogenid-Anionen für die Oberflächenladung des Fällungsproduktes verantwortlich zeichnen (Abb. 8.6.6/2) oder der Anteil einer Mitfällung von Okklusion geschieden werden [34, 35]. Wohlgemerkt geschah dies erstmals, als noch nicht einmal Klarheit über die Struktur von Ionenkristallen bestand (A. Lottermoser 1905; K. Fajans, K. Beckerath 1921). Die Wegsamkeit [ $^{220}\text{Rn}$ ]Radon Emanation/Exhalation aus pulverförmigem Thoriumdioxid hängt empfindlich von der Wasserhaltigkeit des Präparates ab, ein Effekt, womit die auftretende Sättigungsaktivität von gealterten Thoriumkühen regeneriert werden kann.

Die ersten Versuche, Thoriumdioxid als Glasbestandteil zu verwenden, gehen auf E. Berger von den Jenaer Glaswerken zurück. Den Anstoß jedoch, die Glaskataloge um optisches Thoriumglas zu erweitern, lösten die Patente von L. W. Eberlin und G. W. Morey, Mitarbeiter von Eastman Kodak, New Jersey, in der zweiten Hälfte der 30er Jahre aus [36].

Beide waren auf der Suche nach silicatarmem bzw. -freiem Glas, welches bei einem Brechungsindex ( $n_D$ ) von über 1,65 eine relativ hohe Dispersionszahl (Abbe'sche Zahl  $> 50$ ) aufweisen sollte.

Es wurden optische Glasproben erschmolzen, welchen zwischen 9 und 41 Gew. % Thoriumdioxid zu Grunde lag, um so auch extreme optische Eigenschaften zu erreichen.

Der Thoriumdioxidgehalt lag, wie die Auswertung einer Reihe von Patentschriften jener Zeit durch G. Meinicke ergab, typischerweise zwischen 10 bis 20 Gew. %, entsprechend einem Thoriumanteil von 8,9 bis 17,7%.

So berichtet M. Faulstich u. a. über das Fünfstoffsystem der Oxide von Bor-Lanthan-Tantal-Niob-Thorium ( $\text{B}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3\text{-ThO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5\text{-Nb}_2\text{O}_5$ ), innerhalb welchem es der Autorin in kleinen Glasgebieten unter gleichzeitiger hoher chemischer Stabilität der Produkte gelang, höchste Brechungen (1,91 ... 2,00) bei ho-

hen Dispersionszahlen (40 ... 34) zu erreichen [37]. Über hochwertige Kameraobjektive (Leica; Summicron und Summitar) bis hin zur aktuellen Glasfasertechnologie und Nachtsichtgeräten scheint bis dato neben konservatorischen Objekten Thorium in der angewandten Optik auf.

Eine umfangreichere Verwendung von Thoriumlegierungen ist mit der aufkommenden Flugzeug-, Raumfahrt- und Turbinenindustrie zu verzeichnen, welche auf der Basis von Aluminium-Magnesium-Thoriumlegierungen (< 4 Gew. %) bis heute Sonderbauteile fertigt, die wir in den Objektsammlungen von Technikmuseen finden.

Die spezielle Anwendung der Thorierung von Kathoden-Glühdrahten, also der Intensivierung des *Edison*-Effekts, geht auf *Auer von Welsbach*, den Erfinder des gleichnamigen, im Schiffsbedarf weit verbreiteten thoriumhaltigen Gasglühstrumpfes zurück. Die Oberflächenthorierung von Metallen reduziert die Elektronenaustrittsarbeit des Systems, so z. B. im Falle von Wolfram von 4,5 eV bis auf 2,7 eV; die Austrittsarbeit von Thoriummetall dagegen beträgt 3,4 eV.

Zahlreiche Vorschriften sind bekannt, einen emissionsstimulierend wirkenden Thoriumzusatz in Glühdrähte ein- bzw. aufzubringen, seien es reduktive Verfahren oder Kathodophoresen [38]. Trotz mancher theoretischer Ansätze zur Deutung des Effekts [39] jedoch stehen detaillierte mechanistische Untersuchungen z. B. unter Anwendung des Instrumentariums der modernen Oberflächenanalytik aus, um Aussagen über die Oberflächen-/Bulk-Zusammensetzung dieser binären und ternären Legierungen zu machen.

Als Grund für den Thoriumeinsetz werden u. a. die Steigerung der Elektrodenemission, die bessere Lichtbogen-Zündung und -Stabilität sowie eine längere Lebensdauer gegenüber reinem Wolfram angegeben. Der Thorierungsanteil wird in Gewichtsprozent Thoriumdioxid ausgedrückt und variiert je nach Elektrodentyp zwischen 0,35–4,20 %.

Die [<sup>232</sup>Th]Thorium-Aktivität liegt bei dem am häufigsten eingesetzten Elektrodentyp WT 20 im Bereich von einem Kilobecquerel pro WIG-Elektrode (Wolfram-Inertgas-Schweißelektrode).

Der Einsatz erfolgt beim so genannten Wolfram-Schutzgasschweißen, wobei ein Lichtbogen zwischen der nichtabschmelzenden Wolfram-Elektrode und dem Werkstück brennt. Die strahlenhygienische Betrachtung schließt im Falle der thorierten Schweißelektroden neben der dominierenden Schmauchexposition (Inkorporation von Schweißrauch) die Berücksichtigung der Bestrahlungssituation im Zuge der Lagerung und des weiteren Umganges ein [40].

Bei einer Bewertung der Bestrahlungssituation von thorierten Wolframschweißelektroden sind nicht nur die Gamma- und Röntgenemission von Thoriumisotopen und ihrer ggf. nachgewachsenen Folgeprodukte zu berücksichtigen. Im Energiebereich von 58–70 keV ist zusätzlich mit Emission charakteristischer Röntgenfluoreszenzstrahlung des Wolframs zu rechnen [29, 40].

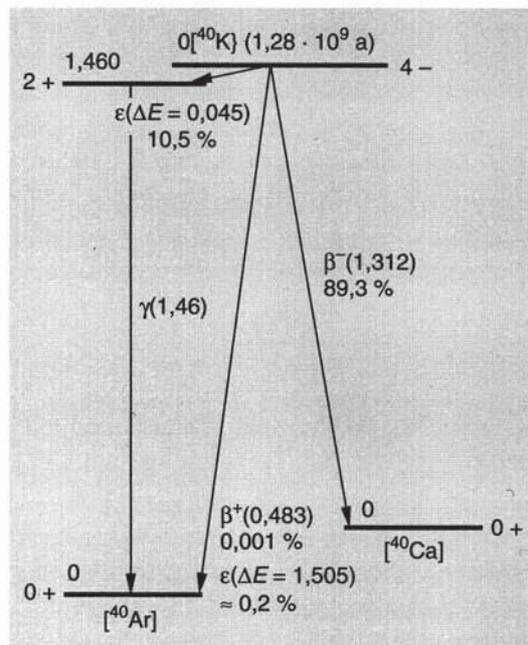
WIG-Schweißelektroden sind als radiometrische Demonstrationsobjekte sehr geeignet und auf Grund ihrer weiten Verbreitung leicht erhältlich.

## 8.4 [<sup>40</sup>K]Kalium

Außer den Gliedern in den Zerfallsfamilien Uran-Radium ( $4n+2$ ) und Thorium ( $4n$ ) wurden an zwei weiteren Elementen „Becquerelstrahlen“ festgestellt: Kalium (Abb. 8.4/1) und Rubidium. Diese beiden schweren Alkalimetalle sind bereits 1895 *J. J. Thomson* bzgl. eines kontinuierlich emittierten Dunkelstroms aufgefallen [41].

Als Entdecker der atomaren Natur der Kalium- und Rubidiumstrahlen im Jahr 1906 gelten *N. R. Campbell* und *A. Wood* [42]. In weiteren Untersuchungen zeigten *Campbell* und Kollegen mit elektrischen und magnetischen Feldern den Beta-Charakter der Strahlen. Für eine Atomeigenschaft sprach auch, dass der Kaliumgehalt verschiedener Salze mit deren Ionisation- und fotografischen Wirkung (Autoradiographie) korrelierbar war. Diese Analogien mit der Strahlung der „eigentlichen“ Radioelemente ließen die Bezeichnung „radioaktiv“ schließlich zulässig erscheinen, obwohl keine gasförmige Emanation nachgewiesen wurde. Zwar waren die Atomgewichte nicht prominent, aber doch die Atomvolumina auffallend, so dass man Letz-

Abb. 8.4/1: Zerfallskanäle von primordialem  $^{40}\text{K}$  Kalium. Isotopenhäufigkeit: 0,0117 %



tere als Voraussetzung für Radioaktivität akzeptierte ... Diese Angaben standen vielen Einwänden offen. *Elster* und *Geitel* zeigten, dass es durch fraktionierte Kristallisation beliebiger Kaliumsalze nicht gelingt, eine Zu- oder Abnahme der Strahlungswirkung der Präparate zu erzielen, dass die Radioaktivität also weder Verunreinigungen noch Umwandlungsprodukten zugeschrieben werden kann:

„Wenn auch bis jetzt nur eine teilweise Analogie in dem Verhalten der Strahlung des Kaliums und Rubidiums zu der typischen Radioaktivität nachweisbar gewesen ist, so dürfte doch schon allein das Vorhandensein einer durchdringenden Strahlung dafür sprechen, daß auch bei den beiden Alkalimetallen Äußerungen der Atomenergie vorliegen.“ [43]

Die Selbstabsorption der  $^{40}\text{K}$  Kaliumstrahlung lässt sich sowohl mit *Geiger-Müller*-Endfenster-, wie Tauch- sowie Proportionaldetektoren bestimmen [44]. Mit Hilfe von digitaler Autoradiographie (RPL) lassen sich in Großflächenproben abgetrennte Salzschüttungen simultan radiometrieren (Abb. 8.4/2).

Es ist zunächst wohl nicht leicht gefallen, Halbwertszeiten von jenseits  $10^9$  Jahren der Kaliumradioaktivität zuzuschreiben, wie *Hevesy* 1935 erinnert:

„Handelt es sich aber um eine Atomart, die eine Halbwertszeit von vielen Millionen von Jahren hat, wie wir das von 40K anzunehmen haben, so versagt auch das Hilfsmittel der langen Einwirkung von Neutronen, denn auch der längste Laboratorienversuch ist verschwindend kurz, mit der genannten ungeheuren Zeitspanne verglichen. Im Laboratorium lässt sich das 40K deshalb nicht darstellen, anders im Kosmos ... Wir haben demnach anzunehmen, dass die Radioaktivität des Kaliums dem in einem präterrestrischen Zeitraum entstandenen radioaktiven Isotop 40K zuzuschreiben ist ... Über die Ursachen der Radioaktivität des Kaliums sind seit ihrer Entdeckung durch *Campbell* im Jahre 1907 viele Ansichten geäußert worden, wovon die von *L. Meitner* (18)[45] geäußerte eine besondere Hervorhebung verlangt. Ihre Überlegung fußt auf Betrachtung über isobare Atomarten ... wie z. B. 40Ar und 40Ca.“ [46]

Es war schon schwieriger, eine Zuordnung zum betreffenden Kalium-Isotop zu finden. Nach dem Prinzip der idealen Destillation von Kalium-Metall gelang es *Georg von Hevesy* gemeinsam mit *Marie Lögstrup*, 1927 bzgl. der Radioaktivität angereicherte Fraktionen zu erhalten, auch wenn sie sie fälschlicherweise zunächst noch „K41“ zuschrieben [47, 48].

Das Radioisotop  $^{40}\text{K}$  Kalium kommt zu 1,17 Atompromille im natürlichen Isotopengemisch vor ( $^{39}\text{K}$  Kalium 93,2581 %,  $^{41}\text{K}$  Kalium 6,7302 %, beide stabil); es zerfällt in die Isobaren  $^{40}\text{Ar}$  Argon und

[<sup>40</sup>Ca]Calcium (Abb. 8.4/1, [1]). Ein erwachsener Mensch enthält rund 4000 Bq [<sup>40</sup>K]Kalium (entsprechend 247 Gramm Kaliumchlorid, vgl. Abb. 8.1.1/3, 8.2/2)

Der Verordnungsgeber hat wohlweislich [<sup>40</sup>K]Kalium weiterhin nur maßvoll im Regelwerk bedacht; die durchdringende Gamma-Emission und die Beta-Gamma-Stimulation der Matrixröntgenfluoreszenz durch [<sup>40</sup>K]Kalium gibt jedoch genug Anhalt zur Objektcharakterisierung (Abb. 8.4/3).

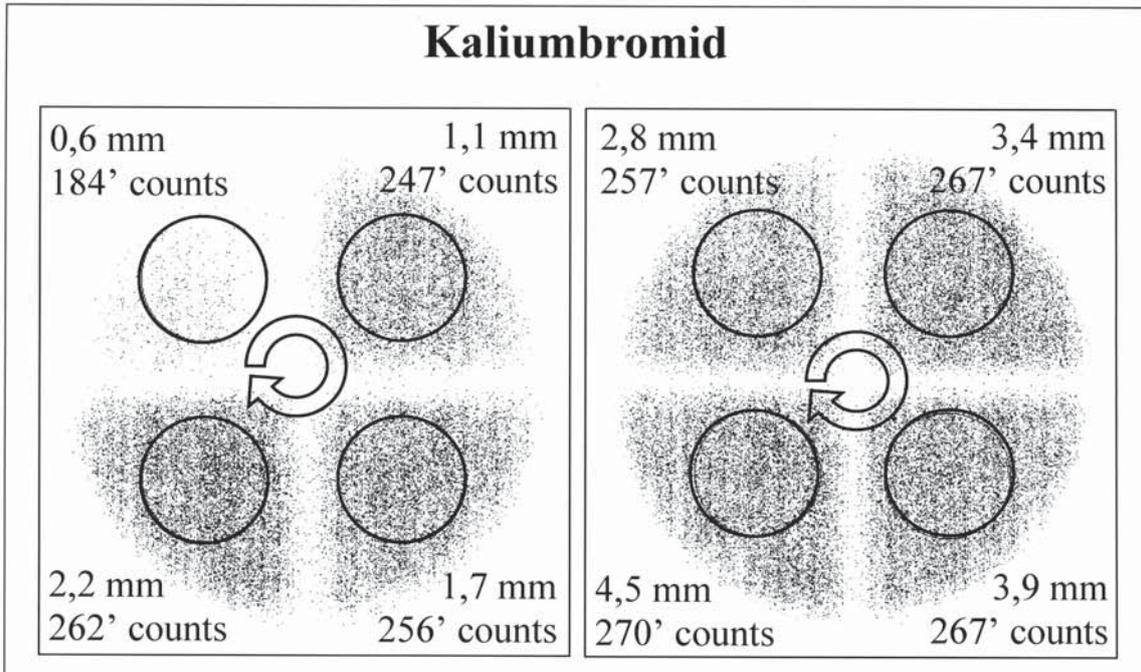
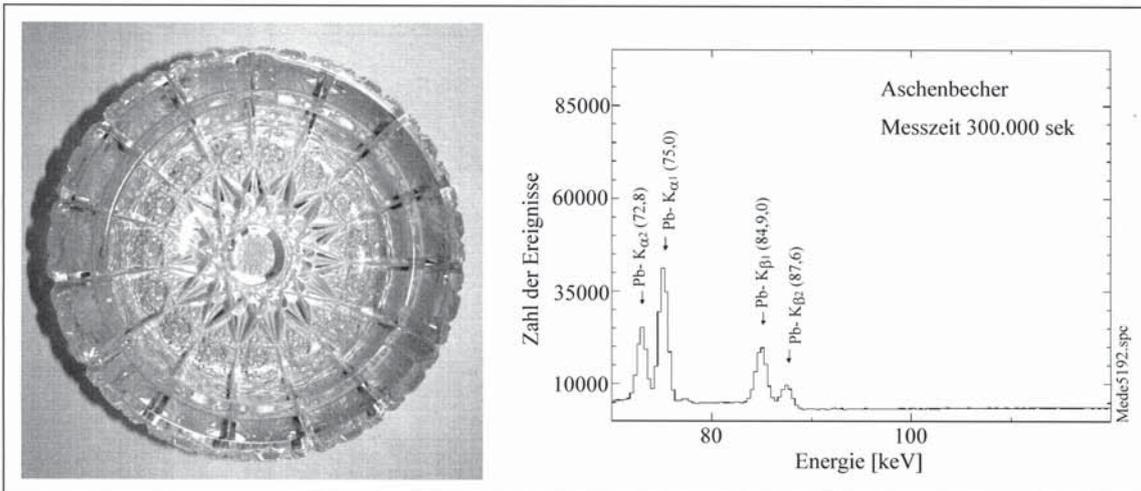


Abb. 8.4/2: Dokumentation der Selbstabsorption von Kaliumbromid-Schüttungen mit Hilfe von digitaler Autoradiographie (MWPC) mit je einer quarternierten Probenschale ( $\varnothing = 201$  mm,  $t_M = 1200$  min,  $\varnothing$  markierter ROIs = 54 mm); angegeben sind jeweils im Uhrzeigersinn ansteigende Schütthöhen und Nettozählraten [1000 counts] [57]

Abb. 8.4/3: Links: Bleikristallaschenbecher (Prag,  $m = 989$  g,  $\varnothing = 12,5$  cm,  $h = 5,5$  cm)  
Rechts: Ausschnitt Emissionsspektrum dieses Objekts



## 8.5 Nuklidgeneratoren

Für den Fall, dass kurzlebige Radionuklide benötigt werden, etwa zum Zweck diagnostischer bzw. therapeutischer Zwecke der Nuklearmedizin oder Traceranwendungen in Technik und Umwelt, werden so genannte Nuklidgeneratoren herangezogen [3, 35, 59].

Ihr Grundprinzip geht auf *Ernest Rutherford's* „Isotopenkuh“ (vgl. Abb. 8.3/2) zurück. Ein möglichst langlebiges Mutternuklid produziert eine radiogenetische Tochter, welche von der Mutter mit möglichst hohem Dekontaminationsfaktor getrennt werden kann. Nach dieser Nuklidseparierung wächst das Tochter-nuklid neben der Mutter nach; das separierte Tochter-nuklid kann seinem Bestimmungszweck zugeführt werden und zerfällt dabei entsprechend seiner relativ kurzen Halbwertszeit in einen stabilen oder zumindest doch extrem langlebigen Enkel.

Für die Nuklidtrennung stehen prinzipiell alle physiko-chemischen Trennprozesse offen, wobei sich Festkörper-Gasphasen-Trennungen, Separierungen an Ionenaustauschersäulen und Solventextraktionen besonders bewährt haben.

## 8.6 Experimente

V 8.6.1	Funkenzähler	337
V 8.6.2	Polymerzerstörung als Beispiel für Radiolyse	339
V 8.6.3	Sammlung und Charakterisierung von Uranmineralien, uranhaltigen Gläsern und Glasuren	340
V 8.6.4	Deposition von [ $^{222}\text{Rn}$ ]Radon-Folgeprodukten	342
V 8.6.5	Aufbau einer <i>Rutherford's</i> chen Thoriumkuh zur trägerfreien Gewinnung von [ $^{212}\text{Pb}$ ]Blei	343
V 8.6.6	Traceranwendung: Charakterisierung der Oberflächenladung von AgX (X=Cl, Br)-Niederschlägen	345
V 8.6.7	Rückstoßtrennung von [ $^{208}\text{Tl}$ ]Thallium	348
V 8.6.8	Selbstabsorption und „unendlich dicke Schicht“	350
V 8.6.9	Nuklidgewinnung und Identifikation mit Bahndetektor von [ $^{220}\text{Rn}$ ]Radon (Thoron)	352
V 8.6.10	Nuklidgewinnung und Identifikation über Halbwertszeit von [ $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ]Barium	354

### V 8.6.1 Funkenzähler

#### Sachinformation:

Funkenzähler (Abb. 8.6.1/1) dienen zum optischen und akustischen Nachweis von Strahlenarten mit hoher Spurcharakteristik, d. h. intensiver Wechselwirkung (hohe Energiedeposition) entlang ihres Weges in Materie. In Gasen werden dabei Radikale und Ionen gebildet, wobei der Nachweis Letzterer relativ einfach durch Beobachtung von Funkenüberschlägen zwischen Elektroden im Zählgas Luft bei angelegter Spannung gelingt.

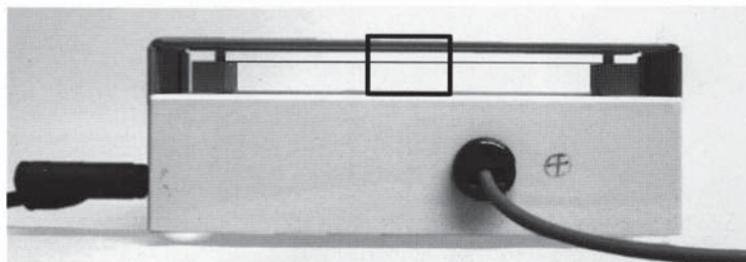


Abb. 8.6.1/1: Funkenzähler; markiert ist der Ausschnitt der fotografischen Aufzeichnung für Abb. 8.6.1/2

## Arbeitsmaterialien:

### Geräte:

Funkenzähler Nr. 09012.00 Fa. Phywe Systeme GmbH, Hochspannungsnetzgerät 0–10 kV

### Chemikalien:

Bauartgeprüftes Alphapräparat z. B. [<sup>241</sup>Am]Americium,

Alpha-Beta-Gamma-Präparat z. B. [<sup>226</sup>Ra]Radium,

Brennspiritus,

Einwegwischtücher,

Iod-Iodkaliumpapier (Ozonreagens)

### Sicherheitsvorschriften:

Zum Schutz bei versehentlicher Berührung muss die Metallnetzelektrode mit dem geerdeten Minuspol der Hochspannungsquelle verbunden werden.

### Versuchsdauer:

5 Minuten

### Durchführung:

Der Funkenzähler wird an das Hochspannungsnetzgerät angeschlossen; dabei wird der geerdete Minuspol mit der Drahtgitterelektrode, der Zähl draht mit dem Pluspol (3–7 kV, =) verbunden.

Bei Annäherung einer geeigneten Alphaquelle an die Netzelektrode entstehen ab einer Spannung von 3–4 kV akustisch wahrnehmbare Funken (Abb. 8.6.1/2). Sollte der Zähl draht durch mechanisches Reinigen (Einwegwischtuch mit Brennspiritus getränkt) nicht mehr „reaktivierbar“ sein, so wird er verworfen und kann aus der im Boden der Apparatur befindlichen Vorratsrolle ersetzt werden.

### Entsorgung:

Keine

### Beobachtung:

Die Variation des Abstandes Alphaquelle – Metallgitterelektrode und die der angelegten Gleichspannung ergibt, dass sich mit Vergrößerung des Abstandes die Anzahl der Funkenüberschläge erheblich verringert, mit Unterschreitung einer Grenzspannung (3–4 kV) überhaupt nicht mehr auftritt. Das Einbringen eines Papierabsorbers zwischen Metallgitterelektrode und Alphaquelle beendet die Funkenbildung schlagartig. Letztere Beobachtung gilt auch für die Anwendung eines Alpha-Beta-Gammapräparates (z. B. [<sup>226</sup>Ra]Radium): mechanische Diskriminierung (vgl. Abb. 8.1.1/2).

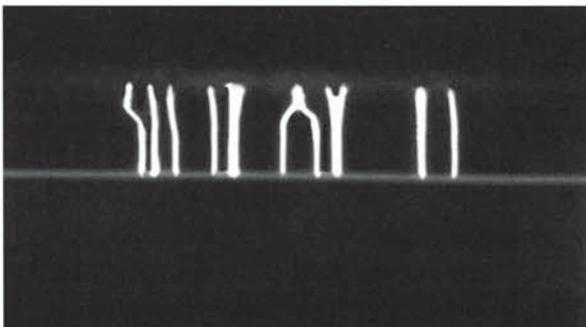


Abb. 8.6.1/2: Durch Annäherung eines Alphastrahlers (Strahlung hoher Spurcharakteristik) im Funkenzähler von Abb. 8.6.1/1 ausgelöste Entladungen (siehe Sachinformation)

**Interpretation:**

Der Funkenzähler spricht nur auf ionisierende Strahlung mit hoher Spurcharakteristik an, d. h., Alphateilchen werden im Gegensatz zu Betateilchen und Gammaquanten nicht registriert (Abb. 8.6.1/2). Die vom Funkenzähler nachgewiesene Strahlung besitzt nur geringe Reichweite und ist bereits durch Papierabsorber zu stoppen. Die Funkenbildung setzt nur lokal ein. In der Praxis vereinigt man viele solche Kammern, um mit optischen oder elektronischen Methoden die Bahn eines Teilchens zu verfolgen.

Aus chemischer Sicht werden in der Funkenkammer primär durch ionisierende Strahlung erzeugte Ionen im starken elektrischen Feld beschleunigt und erzeugen einen Entladungskanal. Als weitere Beobachtung kann Ozonbildung olfaktorisch bzw. durch Verfärbung von feuchtem Iod-Iodkaliumpapier in der Nähe der Entladungszone verzeichnet werden.

**V 8.6.2 Polymerzerstörung als Beispiel für Radiolyse****Sachinformation:**

Die intensive Wechselwirkung von Alphabestrahlung mit Polymerfilmen lässt sich durch kontaminationsfreies Auflegen eines bauartgeprüften Alpha-Unterrichtspräparates belegen. Die mikroskopischen Primärschäden im Sinne erzeugter Ionen und Radikale werden durch einen Ätzprozess in konzentrierter Lauge verstärkt („entwickelt“) und durch Overheadprojektion zugänglich gemacht.

**Arbeitsmaterialien:****Geräte:**

Heizbarer Magnetrührer, Thermometer, Rührfisch, Kunststoff-Becherglas hohe Form 200 mL, 2 Bechergläser weite Form 500 mL, Kunststoffpinzette, Schutzbrille, Schere, Siedesteinchen

**Chemikalien:**

Ein unbelichteter Kleinbildfilm (z. B. Fa. Ilford HP5 Plus 400 Schwarzweißfilm), es eignen sich auch Polycarbonat- (Makrofol und Lexan) Filme, Acetylcellulose [49, 50], (ätzend, C), Kalilauge,  $w(\text{KOH}) \approx 45\%$ , (ätzend, C), bauartgeprüfte [ $^{226}\text{Ra}$ ]Radium- bzw. [ $^{241}\text{Am}$ ]Americium-Unterrichtsquellen mit einer Mindestaktivität von 100 000 Bq (z. B. Fa. Leybold oder Fa. Phywe), Deionat, Einwegwischtuch, Teflonpinzette

**Sicherheitsvorschriften:**

Konzentrierte Laugen neigen beim Erwärmen zu Siedeverzügen; deshalb ist der Einsatz von Schutzbrillen und Siedesteinchen obligatorisch

**Versuchsdauer:**

Exposition: 2 Tage, Entwicklung: 10 Minuten

**Durchführung:**

Als Untersuchungstarget dient z. B. die Polymerunterlage des sw-Kleinbildfilms HP5 Plus 400 (Fa. Ilford). Man gewinnt sie, indem die Filmstreifen in ca. 3 cm breite Streifen geschnitten und für etwa 5 Minuten in kochendes Deionat eingelegt werden. Danach lässt sich die Filmemulsion durch gelindes Rubbeln unter fließendem Wasser mit den Fingern entfernen.

An einem kontrollierten, abgeschlossenen Ort (z. B. eine Geldkassette) werden zwei 3 cm lange Streifen des präparierten Filmträgers durch Schnitte markiert, übereinander gelegt und das Alpha-Präparat wird zwischen zwei Stunden und zwei Tagen (48 h) unverrückt auf die obersten Polymerstreifen aufgestellt.

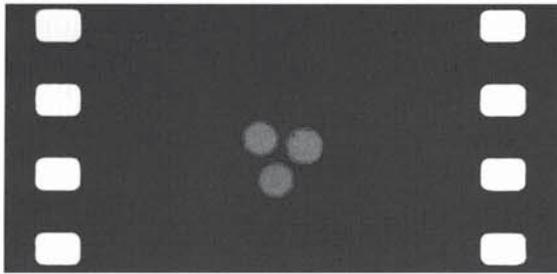


Abb. 8.6.2/1: Resultat einer „entwickelten“ Alpha-Bestrahlungsinduzierten Polymerzerstörung

Im Wasserbad wird das hohe Kunststoffbecherglas zur Hälfte mit Kalilauge,  $w(\text{KOH}) \approx 45\%$ , unter stetem Rühren auf ca.  $60^\circ\text{C}$  erwärmt. Beide exponierten Polymerfolienproben werden jeweils bis zu 10 Minuten in die Lauge getaucht (z. B. mit Hilfe einer Teflonpinzette), danach mit Deionat abgespült und mit Einwegwisch Tuch vorsichtig trockengetupft. Dabei muss nicht im Dunkeln gearbeitet werden. Es können auch andere Alphaquellen (z. B. Auer-Gasglühstrümpfe, Mineralien) bei angepasster Expositionszeit eingesetzt werden [35, 49, 50].

**Entsorgung:**

Raumtemperierte Reste von Kalilauge vorsichtig unter Rühren in eine große Menge kalten Wassers eintragen und nach dieser Verdünnung über die Kanalisation entsorgen.

**Beobachtung:**

Der Ätzprozess verstärkt die mikroskopischen Strahlenschäden (s. Abb. 8.6.2/1) so dass sie durch Overheadprojektion problemlos zugänglich gemacht werden können. Unter dem Mikroskop erkennt man bei etwa 500-facher Vergrößerung zahlreiche kleine Ätzlöcher.

**Interpretation:**

Nur die direkt im Kontakt mit der Alphastrahlung stehende Polymerfolie weist Ätzspuren auf. Die geringe Eindringtiefe von Alphastrahlung verhindert einen Angriff auf das darunter liegende Target. Kommt ein [ $^{226}\text{Ra}$ ]Radium-Präparat zum Einsatz, so erreicht zwar dessen Betakomponente die zweite Folienschicht, aber auf Grund der geringeren Wechselwirkungsdichte (niedrige Spurcharakteristik) zeigt sich kein ausgeprägter, durch Laugenätzung entwickelbarer makroskopischer Strahlenschaden.

**V 8.6.3 Sammlung und Charakterisierung von Uranmineralien, uranhaltigen Gläsern und Glasuren**

**Sachinformation:**

Neben den vier prominenten primären Uranmineralien (z. B. Pechblende  $\text{UO}_2$ ) mit Uran in der Oxidationsstufe IV gibt es rund 6000 sekundäre Uranmineralien, welche sich vom sechswertigen Uran mit der zentralen Spezies, dem linearen Uranyl kation ( $\text{UO}_2^{2+}$ ), ableiten [17]. Mit wenigen Ausnahmen der schwermetallhaltigen und damit fluoreszenzlöschenden Species, sind die sekundären Uranmineralien fluoreszent, sowohl im lang- wie im kurzwelligem UV-Licht. In der Regel enthalten sie maßgebliche Teile der  $(4n+2)$ -Zerfallsreihe und geben dabei kontinuierlich [ $^{222}\text{Rn}$ ]Radon als gasförmige Emanation ab [51].

Streift man mit batteriebetriebenen UV-Leuchtdiodenlampen und tragbaren Geiger-Müller-Zählgeräten über Altwaren- und Flohmärkte, so findet man in „Knopfboxen“ und auf Geschirrtischen viele UV-aktive und darunter wiederum viele schwach radioaktive Objekte (Abb. 8.2/3, 8.6.3/1). Werden beide Effekte gleichzeitig indiziert, liegen so genannte Urangläser vor; hier wurde und wird zur Farbgebung (zitronen- bis honiggelb, apfel- bis smaragdgrün) als Transparent- oder Opak-Chromophor Uran bis zu 3% der Glasmasse zugesetzt [10, 26, 27, 52, 63].

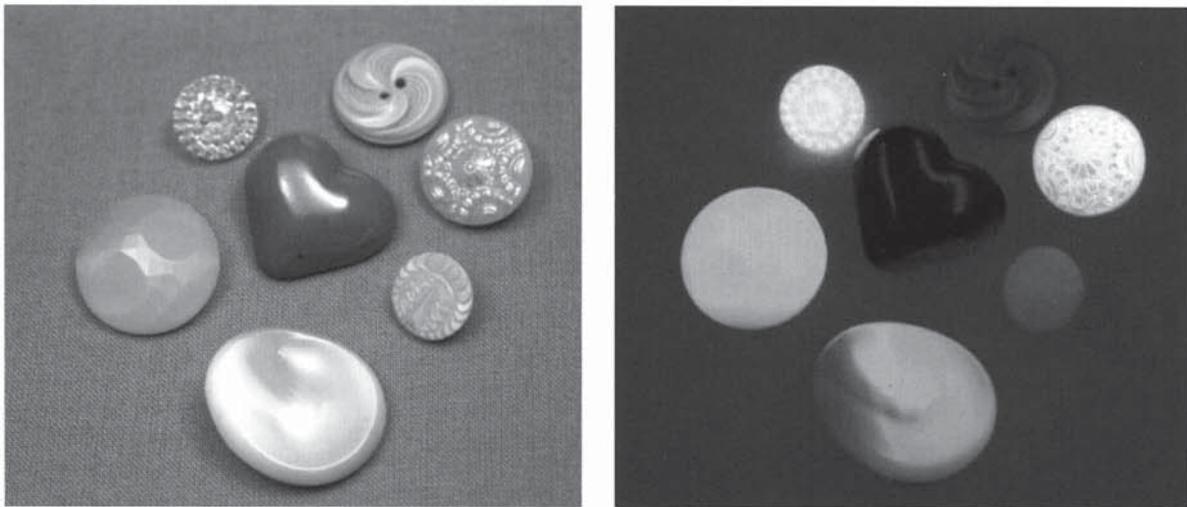


Abb. 8.6.3/1: Der  $^{238}\text{U}$ -Uran-Gehalt dieser Knöpfe steigt im Uhrzeigersinn (rechts: Aufnahme im UV(A)-Licht)

Darüber hinaus gibt es seltener hellbraune Cerchromophor-haltige Gläser, deren Aktivität auf Gehalt an schlecht abgetrenntem Thorium beruhen, sowie thoriumhaltige optische Glaslinsen, welche zur Verbesserung ihrer Farbzerstreuung Thorium als Komponente (bis zu 40 Gew.-%) beinhalten [29, 52].

#### Arbeitsmaterialien:

##### Geräte:

Batteriebetriebener, tragbarer *Geiger-Müller*-Zähler mit akustischem Signal, batteriebetriebene UV-Leuchtdiodenlampe (Elektronikhandel, z. B. Fa. Conrad)

##### Chemikalien:

Keine

##### Sicherheitsvorschriften:

Beim Umgang mit Uranmineralien ist das Tragen von Einweghandschuhen zur Kontaminationsvermeidung notwendig. Es sollten nur kleine Mengen an Belegstücken bevorratet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Mineralien in der Regel  $^{222}\text{Rn}$ Radon emanieren; sie sollten also offen (z. B. in einer Petri-Halbschale) an einem gelüfteten Ort bzw. Abzugsschrank aufbewahrt werden. Kellerräume sind nicht geeignet, da der Kellerboden oft bereits schon die Eintrittspforte für  $^{222}\text{Rn}$ Radon ins Haus ist. – Urangläser zeigen keine Emanation, da sie bei geringen Chromophorgehalten i. d. R. nur von  $^{226}\text{Ra}$ Radium dekontaminiertes Uran enthalten und zudem die Glasmatrix bzgl. Radonexhalation dicht ist.

##### Versuchsdauer:

Je nach Ausdauer und Finderglück.

##### Durchführung:

Siehe Sachinformation.

##### Entsorgung:

Keine

**Beobachtung:**

Siehe Sachinformation.

**Interpretation:**

Es ist auffallend, dass auf die Uranylfluoreszenz im Bereich von Gebrauchsglas- (bei Bleizusatz) und Bijouteriewaren (Modeschmuck, Schwarzlichtschmuck in den Diskotheken) bis dato ebenso wenig verzichtet werden kann wie bei der Tönung von Dentalporzellanmassen [17, 27, 53].

Uran-Chromophore scheinen als nicht-stöchiometrische Oxidglasurmassen in Porzellan- und Keramikmanufaktur-Erzeugnissen auf schwarz über braun bis orange und tiefrot:  $\text{UO}_{2...3}$  [64, 65].

**V 8.6.4 Deposition von [ $^{222}\text{Rn}$ ]Radon-Folgeprodukten****Sachinformation:**

Das primordiale Mutternuklid der  $(4n+2)$ -Zerfallsreihe (Uran-Radium-Reihe) [ $^{238}\text{U}$ ]Uran ist in mineralischen Matrices (Bauuntergrund, Baustoffe, Blumenerde ...) im Bereich einiger ppm (mg/kg bzw. g/t) allgegenwärtig (s. Abb. 8.2/1). Das in der  $(4n+2)$ -Reihe prominierende [ $^{222}\text{Rn}$ ]Radon-Isotop – ein Alphaemittor (5,5 MeV) – hat mit einer Halbwertszeit von ca. 3,8 d die Chance aus der Festkörpermatrix zu exhalieren; seine sukzessiven Zerfälle finden z. B. in der Innenraumluft statt. Durch den beim Alphazerfall erfolgenden Rückstoß ( $E \approx 10^5$  eV) streifen die Rückstoßatome („hot particles“) in Stoßionisationsprozessen mit Molekülen der Luft Elektronen ab und werden zu hochgeladenen „Kationen in der Gasphase“. Letztere suchen zur Neutralität zu gelangen und elektrodeponieren deshalb auf Aerosolen bzw. angebotenen Kathoden. Die aerosolgetragenen [ $^{222}\text{Rn}$ ]Radon-Folgeprodukte tragen als Innenraumbelastung wesentlich zur internen Strahlenexposition des Menschen bei (s. Abb. 8.2/2, 8.1.1/3).

**Arbeitsmaterialien:****Geräte:**

Geiger-Müller-Zählrohr mit Impulszählgerät, Netzgerät bis 2 kV (=), Schutzwiderstand  $\geq 10 \text{ M}\Omega$ , Isolatoren

**Chemikalien:**

Brennspiritus (l),  
unisolierter und unlackierter Fe-Draht (Blumendraht, Durchmesser  $\leq 0,5 \text{ mm}$ ),  
Wischpapier (Küchenrolle)

**Sicherheitsvorschriften:**

Der zwischen Minuspol des Netzgerätes und dem Kathodendraht zwingend zu schaltende Schutzwiderstand  $\geq 10 \text{ M}\Omega$  begrenzt den möglichen Stromfluss bei unbeabsichtigtem Kontakt.

**Versuchsdauer:**

30 Minuten

**Durchführung:**

In einem geschlossenen, wenig gelüfteten Raum (vorzugsweise Erd- bzw. Kellergeschoss) wird isoliert über mehrere Meter ein unisolierter und unlackierter Blumendraht gespannt und als Kathode über einen Schutzwiderstand ( $\geq 10 \text{ M}\Omega$ ) mit dem Gleichspannungsnetzgerät verbunden; über mehrere Stunden wird eine Spannung zwischen 1–2 kV angelegt. Alternative: Die vier Ecken eines fahrbaren Versuchstisches mit Isolatoren ausstatten und den Draht in geschlossener Schleife rechteckig spannen.

Die elektrodeponierten, natürlichen Radionuklide, überwiegend aus der  $(4n+2)$ -Provenienz werden mit Hilfe eines kurz zuvor mit Spiritus – zwecks effektiverer Ablösung der Deposition – befeuchteten Papierwischstuches ( $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ) auf eine möglichst geringe Fläche konzentrierend abgenommen (s. Abb. 8.2/1).

#### **Entsorgung:**

Auf Grund der geringen deponierten natürlichen Aktivitäten geringer Halbwertszeit ( $T_{1/2} < 0,5 \text{ h}$ ) kann das luftgewonnene Untersuchungspräparat einen halben Tag nach Gewinnung in den Hausmüll gegeben werden.

#### **Beobachtung:**

Während das mit Spiritus benetzte Küchentuch keinerlei Aktivität aufweist, zeigt sich nach Abwischen des Kathodendrahtes an den nunmehr bestaubten Wischstellen eine mit dem *Geiger-Müller-Zählrohr* deutlich wahrnehmbare, kurzlebige Aktivität. Mit Hilfe eines zwischengeschobenen Papiers kann im Sinne einer mechanischen Diskriminierung belegt werden – in Übereinstimmung mit Abb. 8.2/1 – dass es sich zunächst überwiegend um Alphaaktivität handelt. Wartet man einige Minuten ab, so ist festzustellen, dass nunmehr eine papierdurchdringende Betaaktivität aufscheint. Nach einer Stunde erscheint längerreichweitige Alphaaktivität.

#### **Interpretation:**

Die erste Radontochter [ $^{218}\text{Po}$ ]Polonium ( $T_{1/2} = 3,1 \text{ min}$ ,  $E_{\alpha} = 6 \text{ MeV}$ ) ist unmittelbar nach Gewinnung des aktiven Niederschlages mit einer Luft-Reichweite seiner Alphaemission (5 cm) sofort indizierbar. Das sich anschließend auf dem Wischpapierpräparat aufbauende [ $^{214}\text{Pb}$ ]Blei ( $T_{1/2} = 27 \text{ min}$ ) ist ein hochenergetischer Betastrahler, welcher sich über seine radiogenetische Tochter [ $^{214}\text{Bi}$ ]Wismut u. a. im verzweigten Zerfall in den Alphaemitter [ $^{214}\text{Po}$ ]Polonium ( $T_{1/2} = 164 \mu\text{s}$ ,  $E_{\alpha} = 7,7 \text{ MeV}$ ) mit einer Luftreichweite von 7 cm umwandelt [1, 2].

### **V 8.6.5** *Aufbau einer Rutherford'schen Thoriumkuh zur trägerfreien Gewinnung von [ $^{212}\text{Pb}$ ]Blei*

#### **Sachinformation:**

Die Thorium(4n-)Zerfallsreihe (Abb. 8.3/1) enthält als gasförmig mobile radiogenetische Tochter [ $^{220}\text{Rn}$ ]Radon. Nach Exhalation aus thoriumhaltigen Festkörpern erleidet dieses Radionuklid kurz hintereinander zwei Alphazerfälle, durch den jeweiligen Rückstoß streift es durch Wechselwirkung mit Gasmolekülen der umgebenden Luft Elektronen ab und wird zum hochgeladenen [ $^{212}\text{Pb}^{2+}$ ]Blei-Kation in der Gasphase, welches auf Platinkathoden deponiert werden kann und damit mit seinen dort nachgebildeten Folgeprodukten trägerfrei zur Verfügung steht. Elektrodeponiertes [ $^{212}\text{Pb}$ ]Blei ist über die Ermittlung seiner Halbwertszeit (10,6 h) als Beta-Emitter charakterisiert (Abb. 8.6.5/2, [54]).

#### **Arbeitsmaterialien:**

##### **Geräte:**

Fünf 300-mL-Weithals-Erlenmeyerkolben, fünf passende Gummistopfen, fünf Bananenstecker, fünf an der Steckverbindung isolierte Krokodilklemmen, 5 m Klingeldraht, Abisolierzange, 5–10 *Auer*-Gasglühstrümpfe (Baumwollgewebe; aus Schiffsbedarf), ein Schutzwiderstand  $> 10 \text{ M}\Omega$ , eine Spannungsquelle  $0,5 \leq U (=) \leq 2 \text{ kV}$ , Klebstoff (Uhu Plus), Isolierband aus Kunststoff, Al-Haushaltsfolie, fünf Zuschnitte Platinblech ( $d$  ca. 0,3 mm) der Abmessungen 40 mm x 10 mm, Pinzette, Einweghandschuhe

##### **Sicherheitsvorschriften:**

Zur Kontaminationsprophylaxe werden die Gasglühstrümpfe mit Einweghandschuhen eingesetzt.

**Versuchsdauer:**

120 Minuten Aufbau, Charakterisierung von  $[^{212}\text{Pb}]$ Blei über mindestens drei Halbwertzeiten hinweg (3 x 10,6 h), jeweilige Charakterisierungsmessung 5 Minuten

**Durchführung:**

Zum Aufbau einer *Rutherford'schen* Thoriumkuh werden fünf 300-mL-Erlenmeyerkolben wie folgt gleich behandelt (Abb. 8.6.5/1):

Al-Haushaltsfolie wird in 2–3 cm breite, ausreichend lange Streifen geschnitten; damit werden die Erlenmeyerkolben innen komplett ausgelegt, wobei die Innenglaswand zuvor mit Klebstoff (Uhu Plus) eingestrichen wurde. Die oben am Rand überstehenden Al-Streifen werden bis auf 2 cm gekürzt, eingerollt, mit einer abisolierten Klingeldrahtschlinge umfassen und das Ganze wird mit Isolierband außen fixiert. Nach Antrocknen (60 min) werden je 5–10 unverpackte *Auer*-Glühstrümpfe in die Erlenmeyerkolben verbracht. Während der Trocknungsphase werden passende Gummistopfen so durchbohrt, dass sie Bananenstecker samt Isolierung aufnehmen können.

Ein zum Bananenstecker führender Klingeldraht wird über einen Schutzwiderstand ( $> 10 \text{ M}\Omega$ ) mit dem negativen Pol einer Spannungsquelle ( $0,5 \leq U (=) \leq 2 \text{ kV}$ ) verbunden; entsprechend die Klingeldrahtschlinge mit dem positiven Pol. Vor dem Aufsetzen des so präparierten Gummistopfens wird eine kunststoffisolierte Krokodilklemme auf den Bananenstecker gesteckt, welche ihrerseits die Platinkathode (40 mm x 10 mm x 0,3 mm; typische Maße) trägt.

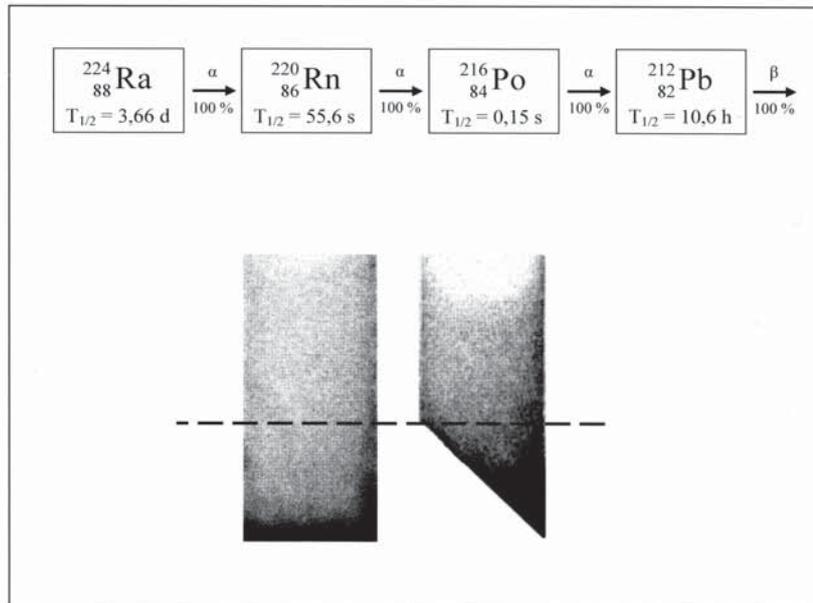
**Entsorgung:**

Nicht notwendig, da  $[^{212}\text{Pb}]$ Blei ein kurzlebiges Radionuklid ist, das in Attomol-Quantitäten (pro Thoriumkuh, vgl. Abb. 8.6.7/1) anfällt, welches nach 1 Woche zerfallen ist.



Abb. 8.6.5/1: Aufbau einer *Rutherford'schen* Thoriumkuh mit eingeklemmter Platinwechselkathode [52, 66]

Abb. 8.6.5/2: Mit Hilfe digitaler Autoradiographie aufgezeichnete zweidimensionale Aktivitätsverteilung



#### Beobachtung:

Verbindet man die Thoriumküh mit der Spannungsquelle, so kann man bereits nach 2 Stunden auf der mit einer Pinzette entnommenen Platinelektrode die Deposition einer  $\beta^-$ -Aktivität nachweisen [31]. Nach Exposition über 70 h kommt die deponierte Aktivität in ihre Plateauphase (Abb. 8.6.5/2), d. h., pro Zeiteinheit werden ebenso viele Atome aus der Gasphase abgeschieden wie zerfallen. Die Charakterisierung erfolgt an der entnommenen Elektrode mit Hilfe eines *Geiger-Müller*-Endfensterzählrohres mit Registrierereinheit über ca. 30 h (nach Entnahme) hinweg (mit mindestens fünf 5-min-Messungen).

#### Interpretation:

Im Erlenmeyerkolben baut sich durch Exhalation der Auerstrümpfe eine  $^{220}\text{Rn}$ Radon-Atmosphäre auf, aus der das – durch Alpharückstoß positiv hoch geladene – in der Gasphase vorliegende  $^{212}\text{Pb}$ Blei auf einer Platinkathode deponiert werden kann. Durch Autoradiographie der Elektrode (Abb. 8.6.5/2 unten) kann belegt werden, dass die Deposition an Orten hoher elektrischer Feldstärke bevorzugt erfolgt (die den Auerstrumpfquellen nächstgelegene Elektrodenkante).

#### V 8.6.6 Traceranwendung: Charakterisierung der Oberflächenladung von $\text{AgX}$ ( $X = \text{Cl}, \text{Br}$ )-Niederschlägen

#### Sachinformation:

Die Tracermethodik besteht darin, radioaktive Species in komplexere Systeme einzuschleusen und Letztere durch den radiometrisch indizierbaren Verbleib Ersterer besser zu beschreiben.  $^{212}\text{Pb}$ Blei, gewonnen aus elektrostatischer Deposition (s. V 8.6.5), kann in dieser trägerfreien Form Aufschlüsse geben über die Oberflächen-Ladung und -Chemie von Silberhalogenid-Niederschlägen. Den untersuchten Niederschlägen wird bei unterschiedlichen unstöchiometrischen Fällungsverhältnissen das Tracernuklid vor bzw. nach Zugabe der zweiten Fällungskomponente zugesetzt. Der nicht-gebundene Tracer wird ausgewaschen. Die Niederschläge werden auf fixierte Beta-Aktivität untersucht [34, 35, 54, 55].

## Arbeitsmaterialien:

### Geräte:

Geiger-Müller-Endfensterzählrohr mit Impulszählgerät, vier Filtertiegel mit Nutsche(n), eine dickwandige Filtrationsflasche, eine Wasserstrahlpumpe, Einweghandschuhe, Schutzbrille, vier frische 20-mL-Bechergläser hohe Form, drei Messpipetten ( $V = 10 \text{ mL}$ ) mit Pipettierhilfe, Kunststoffpinzette, Magnetrührer mit Heizplatte, 200-mL-Becherglas hohe Form, Reagenzglashalter, ungebrauchte Reagenzgläser, permanenter Filzschreiber, Laborlift, Pt-Elektrode, mindestens 70 h exponiert in Rutherford'scher Thoriumkuh

### Chemikalien:

Gemäß V 8.6.5,

Salpetersäure,  $c(\text{HNO}_3) = 1 \text{ mol/L}$ , (reizend, Xi),

Silbernitrat-Lösung (Maßlösung),  $c = 0,1 \text{ mol/L}$ , (reizend, Xi, ätzend, C),

Kaliumchlorid-Lösung,  $c(\text{KCl}) = 0,1 \text{ mol/L}$ ,

Deionat (vollentsalztes Wasser),

Aceton,  $(\text{CH}_3)_2\text{CO(l)}$ , (leicht entzündlich, F)

### Sicherheitsvorschriften:

Die exponierte Pt-Elektrode nur mit Hilfe einer Kunststoffpinzette und Einweghandschuhen manipulieren; beim Hantieren mit heißer Salpetersäure ist unbedingt eine Schutzbrille zu tragen.

Zum Nachwaschen und Abnutschen der Niederschläge wegen der verwendeten brennbaren Lösungsmittel nur eine Wasserstrahlpumpe verwenden!

### Versuchsdauer:

120 Minuten

### Durchführung:

Zwei ungebrauchte Reagenzgläser werden zur Inertisierung ihrer inneren Oberfläche zweimal mit je 10 mL Salpetersäure,  $c = 1 \text{ mol/L}$ , ausgespült; die Spülflüssigkeit wird verworfen. Es werden in eines der Reagenzgläser 5 mL Salpetersäure,  $c = 1 \text{ mol/L}$ , einpipettiert, eine – mindestens 70 h in der Rutherford'schen Thoriumkuh exponierte – Platinelektrode mit Hilfe der Kunststoffpinzette hinzugefügt (s. V 8.6.5 und Abb. 8.6.5/2) und das Ganze im Wasserbad bei  $T \approx 70^\circ\text{C}$  unter gelindem Schwenken über 5 Minuten erwärmt.

Vorsichtig wird die entstandene Lösung in das zweite vorbereitete Reagenzglas unmittelbar umgefüllt. Das Glas enthält jetzt ca. 5 mL Tracerlösung.

Es stehen vier ungebrauchte, wie die Reagenzgläser vorbehandelten 20-mL-Bechergläser, hohe Form bereit. Sie werden mit permanentem Filzschreiber als Versuchsansatz V1 bis V4 markiert.

Die in Tab. 8.6.6/1 beschriebenen vier Fällungen werden der Reihe nach durch schrittweises Zupipettieren realisiert, wobei die Reihenfolge des Zusammengebens der drei Komponenten (römische Bezifferung in der Tabelle) beachtet wird. Die vier Ansätze werden 5 Minuten unter gelegentlichem Schwenken stehen gelassen und dann über je einen der vier entsprechend markierten Filtertiegel abgenutscht. In jedem Fall wird bei weiterhin laufender Wasserstrahlpumpe nachgespült: je zweimal mit 2 mL Deionat (leicht salpetersauer) und je einmal mit 1 mL Aceton.

Mit Hilfe eines Laborliftes werden die vier Filtertiegel auf  $d \leq 2 \text{ mm}$  an das Geiger-Müller-Endfensterzählrohr herangefahren, jeder der vier Niederschläge (V1 – V4) wird 5 Minuten ausgezählt und der zuvor mit drei 5-Minuten-Messungen (unter identischen äußeren Bedingungen) gemittelt bestimmte Untergrund jeweils subtrahiert.

Tab. 8.6.6/1: Fällungsexperimente: Silberchloridbildung unter  $[^{212}\text{Pb}]$ Blei-Tracerzusatz; die römischen Ziffern bezeichnen die Reihenfolge des Vereinigens der Lösungen. Der Verbleib der trägerfreien  $[^{212}\text{Pb}]$ Blei-Lösung ist in Abb. 8.6.6/1 und 2 im Detail wiedergegeben [34, 54–56].

	$\text{AgNO}_3$	$\text{KCl}$	$[^{212}\text{Pb}]$ Blei Tracerlösung
Konzentration	$c = 0,1 \text{ mol/L}$	$c = 0,1 \text{ mol/L}$	
Versuchsansatz 1 (V1)	2 mL (I)	8 mL (III)	1 mL (II)
Versuchsansatz 2 (V2)	2 mL (I)	8 mL (II)	1 mL (III)
Versuchsansatz 3 (V3)	8 mL (I)	2 mL (III)	1 mL (II)
Versuchsansatz 4 (V4)	8 mL (I)	2 mL (II)	1 mL (III)

### Entsorgung:

Auf Grund der geringen eingesetzten  $[^{212}\text{Pb}]$ Blei-Aktivitäten können die Niederschläge eine Woche nach Fällung ohne weitere strahlenschutztechnische Auflagen entsorgt werden; dasselbe gilt für die gesammelten Filtrate, Waschflüssigkeiten und den Rest der Tracerlösung (ca. 1 mL).

### Beobachtung:

Es zeigt sich, dass die Aktivität der Niederschläge in folgender Reihenfolge bzgl. der eingebauten  $[^{212}\text{Pb}]$ Blei-Traceraktivität abnehmen:  $V1 \gg V2 > V3 > V4$ .

In Abb. 8.6.6/1 sind typische Resultate bzgl. der Aktivitätsverteilung als Mittelwert von 20 nach Tab. 8.6.6/1 durchgeführten Fällungsexperimenten (V1 – V4) wiedergegeben [56].

### Interpretation:

Wie Abb. 8.6.6/2 zeigt, spielt die Ladung des inneren Teils der nicht-beweglichen Doppelschicht (Interface Kristall/Elektrolytlösung) die dominierende Rolle bzgl. der Adsorption (= Anreicherung in der Phasengrenzfläche) für die  $[^{212}\text{Pb}^{2+}]$ Blei-Tracer-Fixierung [32]. Wird in stöchiometrischem Halogenidüberschuss gefällt, so ist der Kristall negativ geladen und kann Blei(II)-Kationen adsorptiv fixieren.

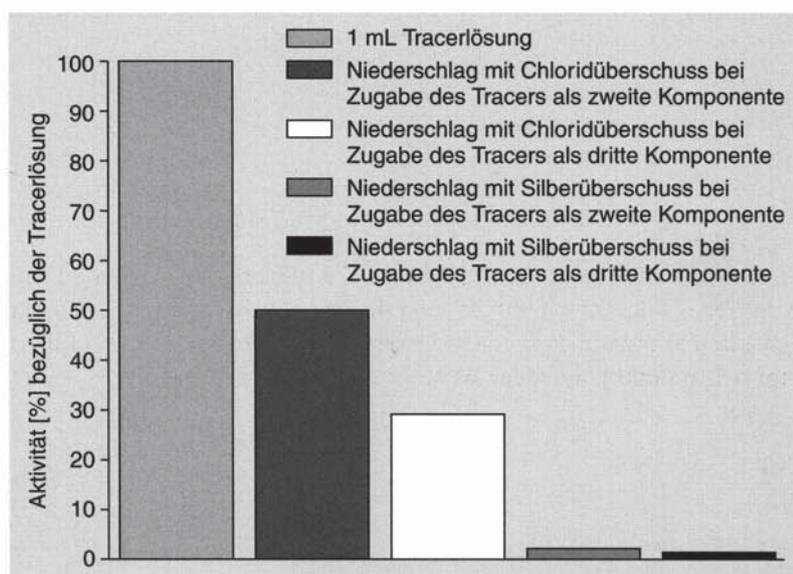


Abb. 8.6.6/1: Verbleib einer durch Ablösen einer Platinkathode trägerfrei gewonnenen  $[^{212}\text{Pb}]$ Blei-Aktivität im Zuge der Durchführung der Silberchloridfällungsexperimente (V1 – V4) gemäß Tab. 8.6.6/1 (Volumen salpetersaurer Tracerlösung = 1 mL) [54–56]

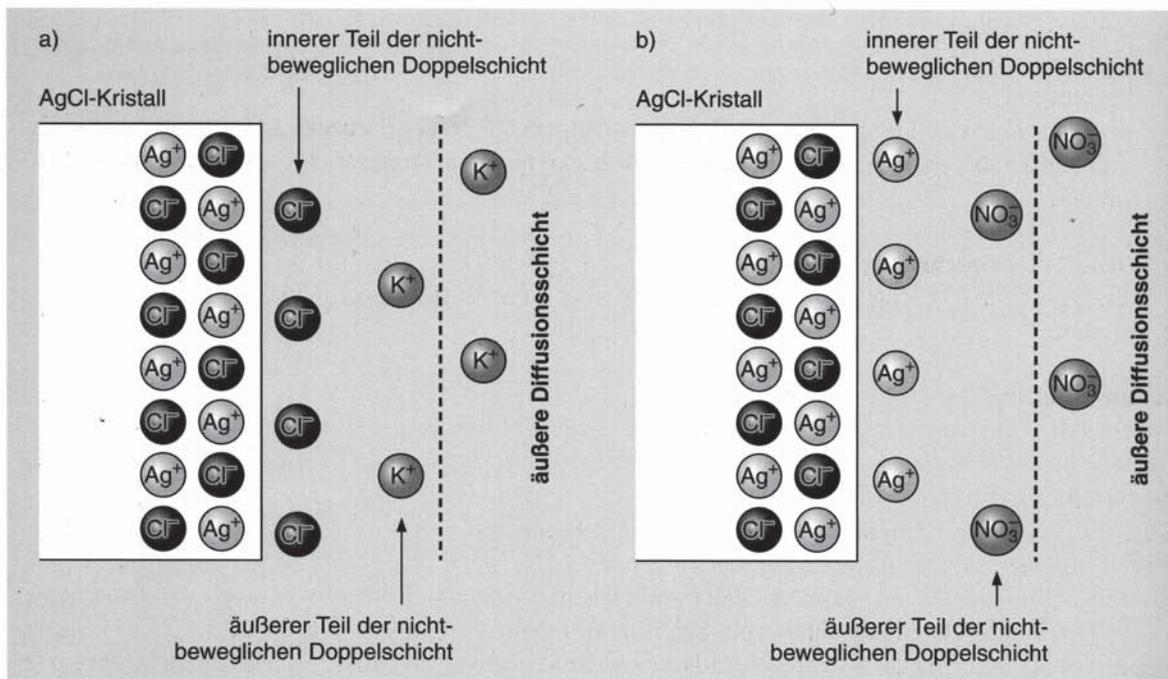


Abb. 8.6.6/2: Oberflächenladung von Silberchlorid-Niederschlägen gesteuert durch die Fällungsbedingungen (gemäß V1–V4; Tab. 8.6.6/1) [55]

Dies geschieht quantifizierend betrachtet wesentlich ausgeprägter, wenn der Tracer vor der Fällungsreaktion bereits zugegen ist, da dann auch Okklusionsphänomene eine Rolle spielen. Im Falle von Silber(I)-Kationen-Überschuss verhält sich die Oberfläche gegenüber dem Tracerkation abweisend. Mit derartigen Untersuchungen (vgl. auch Adsorptionsindikator; Titration nach *Fajans* [60]) wurden in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts die Phänomene der Grenzfläche Elektrolyt/Kristall aufgeklärt und der *Hahn*'sche Fällungssatz aufgestellt (s. 8.3) [33].

Entsprechende Untersuchungen können auch unter Verwendung von Kaliumbromid-Lösung ausgeführt werden.

### V 8.6.7 Rückstoßtrennung von $^{208}\text{Tl}$ Thallium

#### Sachinformation:

Unter den zahlreichen Besonderheiten von Radioisotopen nimmt die Nuklidseparierung durch Rückstoßatome eine bedeutende Stellung ein. Mit ihr können trägerfrei, d. h. nuklidspezifisch, Rückstoßatome im Bereich von Attomol nach einem Alpha-Umwandlungsprozess separiert werden [35, 56].

Es gilt dabei die Beziehung:

$$\frac{E_{\text{Rück}}}{E_{\alpha}} = \frac{m_{\text{Rück}}}{m_{\alpha}}$$

Bei der Präparation von Transuranen (z. B.  $^{252}\text{No}$ Nobelium) spielte dieses Verfahren eine Schlüsselrolle [3].

## Arbeitsmaterialien:

### Geräte:

*Geiger-Müller*-Endfensterzählrohr mit Impulszählgerät, Kunststoffpinzette, Al-Haushaltsfolie, Einweghandschuhe, Pt-Elektrode (mindestens 70 h exponiert in *Rutherford*'scher Thoriumkuh gemäß V 8.6.5)

### Sicherheitsvorschriften:

Die exponierte Pt-Elektrode wird nur mit Hilfe einer Kunststoffpinzette und Einweghandschuhen manipuliert.

### Versuchsdauer:

30 Minuten

### Durchführung:

Eine mit [<sup>212</sup>Pb]Blei-Sättigungsaktivität beladene, d. h. mindestens 70 h in der *Rutherford*'schen Thoriumkuh exponierte Platin-Kathode (Abmessungen: 40 x 10 x 0,3 mm<sup>3</sup>) wird nach Entnahme in ein hälftig gefaltetes Aluminiumfolienstück (4 x 4 cm<sup>2</sup>) so eingelegt, dass die der Exhalationsquelle zuvor zugewandte Kante in dem Al-Folienknick ruht (Abb. 8.6.5/2). Das Ganze wird durch Auflage eines glatten Gegenstandes vorsichtig gepresst und die Pt-Kathode ca. 20 Minuten nach Auffalten der Aluminiumfolie entnommen. Letztere wird sofort mit dem „Knickbereich“ unter einem *Geiger-Müller*-Endfensterzählrohr ( $d \leq 2$  mm) platziert. Mit Hilfe der unmittelbar, sukzessiv aufgenommenen Impulszählung ermittelt man sodann rechnerisch über 6 Minuten hinweg für alle 30 s-Intervalle die zeitabhängige Nutzrate (= Impulsrate – Untergrundrate).

### Entsorgung:

Auf Grund der geringen deponierten natürlichen Aktivitäten geringer Halbwertszeit ( $T_{1/2} = 3,1$  min) kann das Untersuchungspräparat ohne weitere Auflagen in den Hausmüll gegeben werden.

### Beobachtung:

Die Auswertung der abnehmenden Nutzrate der einhüllenden Al-Folie ergibt eine Halbwertszeit von rund  $3 \pm 0,7$  Minuten, womit unter Inspektion der 4n-Zerfallsreihe als radiogenetisches Folgeprodukt von [<sup>220</sup>Rn]Radon, das aus dem Alphazerfall von [<sup>212</sup>Bi]Wismut (verzweigter Zerfall zu 36 % Alpha-Umwandlung  $E_{\alpha} = 6,1$  MeV) als per Rückstoß abgetrennter Kandidat [<sup>208</sup>Tl]Thallium ( $T_{1/2} = 3,1$  min) in Betracht kommt (Abb. 8.3/1).

### Interpretation:

Das elektrodeponierte [<sup>212</sup>Pb]Blei ( $T_{1/2} = 10,6$  h) steht in radiogenetischem Gleichgewicht mit seiner Tochter [<sup>212</sup>Bi]Wismut ( $T_{1/2} = 60,6$  min). Durch Alpha-Umwandlung des Letzteren wird der Folgekern [<sup>208</sup>Tl]Thallium (Betastrahler) mit einer Rückstoßenergie  $E_{\text{Rück}} = 4/208 \times 6 \text{ MeV} = 0,12 \text{ MeV}$  über den Luftspalt hinweg in die Al-Folie implantiert, wo er zu 100 % eine Beta-Umwandlung mit einer Halbwertszeit von 3,1 min in stabiles [<sup>208</sup>Pb]Blei erfährt.

Dieses Experiment wurde im Labor des Verfassers auch mit Hilfe von kalibrierter quantifizierender Halbleiter-Gammaspektrometrie durchgeführt, um die absoluten Atomzahlen zu ermitteln. Das Resultat enthält Abb. 8.6.7/1; es belegt, dass neben der Sättigungsaktivität 100 Millionen [<sup>212</sup>Pb]Blei-Atome auf der Pt-Elektrode simultan 500 000 Atome seiner radiogenetischen Tochter [<sup>208</sup>Tl]Thallium präsent sind. Auf die Al-Folie geht nahezu kein [<sup>212</sup>Pb]Blei im Sinne einer Kontaktkontamination über. Jedoch werden etwa 100 000 rückstoßimplantierte [<sup>208</sup>Tl]Thallium-Atome (Attomol-Quantität) indiziert. Dies entspricht ca. 20 % des Bezugsinventars der Pt-Elektrode der *Rutherford*'schen Thoriumkuh.

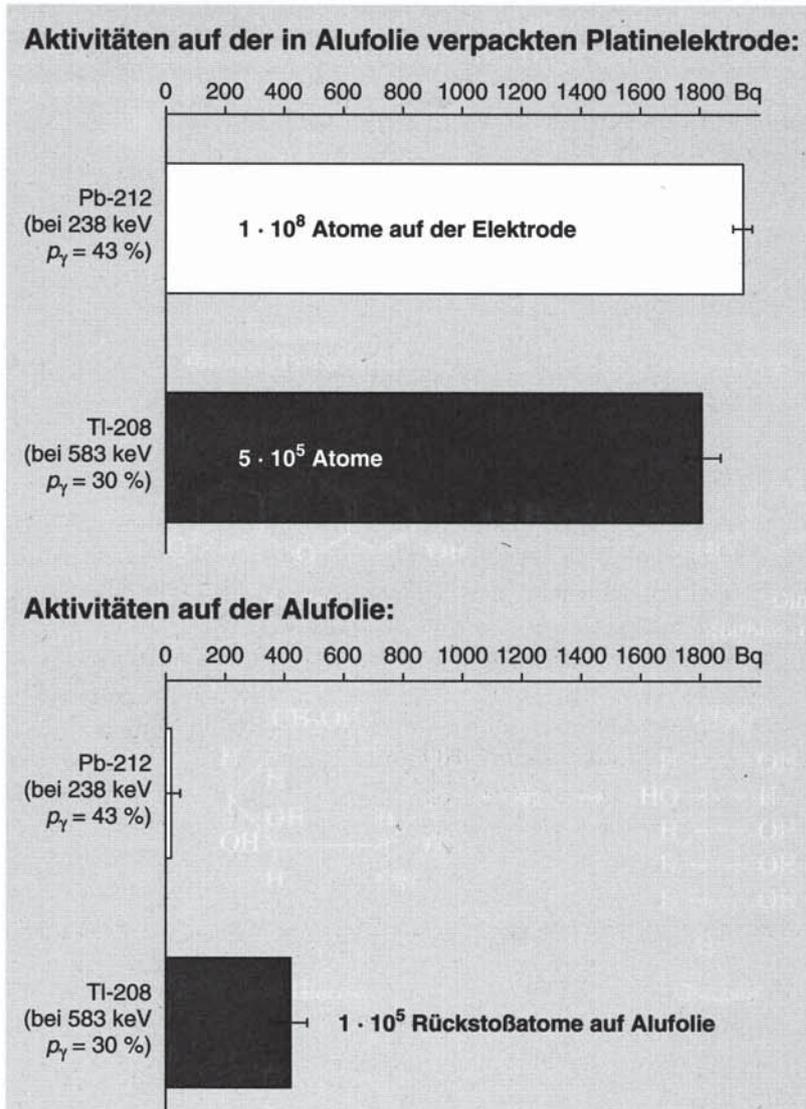


Abb. 8.6.7/1:  $[^{208}\text{Tl}]$ Thallium-Inventar einer mit  $[^{212}\text{Pb}]$ Blei in der Rutherford'schen Thoriumküh sättigungsaktivierten Platinkathode.

**V 8.6.8 Selbstabsorption und „unendlich dicke Schicht“**

**Sachinformation:**

Natürliches Kalium und seine Salze enthalten 0,0117 Atomprozent des primordialen Radionuklids  $[^{40}\text{K}]$ Kalium (Abb. 8.4/1) [1]. Auf Grund der ubiquitären Verteilung von Kaliumverbindungen in Mensch und Umwelt trägt  $[^{40}\text{K}]$ Kalium nicht unwesentlich zur Strahlenexposition des Menschen bei (s. Abb. 8.1.1/3 und Abb. 8.2/2).

Andererseits unterliegen Kaliumsalze natürlicher Isotopenzusammensetzung gemäß gültigem Strahlenschutzrecht keiner sicherheitstechnischen Beschränkung im Umgang, was sie als ideale Praktikumsstrahler ausweist. Untersucht man Schüttungen von Kaliumsalzen, so kann man je nach Stöchiometrie der Verbindung und je nach Anion interessante Zusammenhänge über die Selbstabsorption ableiten [35, 57].

## Arbeitsmaterialien:

### Geräte:

*Geiger-Müller*-Endfensterzählrohr mit Impulszahlgerät, Laborlift, Messzylinder aus Duranglas  $V = 250$  mL hohe Form ( $h = 19,5$  cm, lichte Weite 49,1 mm), Lineal, Waage

### Chemikalien:

Alle verfügbaren Kaliumhalogenide (s) sowie weitere verfügbare Kaliumverbindungen

### Sicherheitsvorschriften:

Kaliumfluorid-Dihydrat ist ätzend.

## Versuchsdauer:

Mehrere Stunden

## Durchführung:

Es werden Messserien mit ansteigenden Kaliumsalzschütthöhen aufgenommen, wobei das Salz in den Messzylinder aus Duranglas schrittweise eingefüllt wird. Dabei wird die jeweilige Gewichts- und Schütthöhenzunahme registriert; bis zu Schütthöhen von 10 mm nur in kleinen Inkrementen (ca. 2 mm) erhöht. Mit Hilfe des Laborliftes wird die Salzschüttung bis auf 2 mm an ein *Geiger-Müller*-Endfensterzählrohr gebracht. Um dies reproduzierbar zu gestalten, kann man mit Hilfe eines Klebstreifens eine Stecknadel (mit dem Metallkopf nach unten) über das Endfensterniveau 2 mm hinausragend so am Zählrohr fixieren, dass ein immer identischer Kontakt-Abstand zur Salzschüttung eingestellt werden kann.

Es wird jeweils 10 Minuten aufgezeichnet und der zuvor unter identischen geometrischen Messbedingungen aufgezeichnete gemittelte Untergrund subtrahiert. Ein typisches Diagramm zeigt Abb. 8.6.8/1.

## Entsorgung:

Wegen der geringen spezifischen Aktivität keine besonderen Entsorgungsaufgaben; in verdünnten wässrigen Lösungen können Kaliumsalze in den geringen anfallenden Mengen dem Abwasser überantwortet werden.

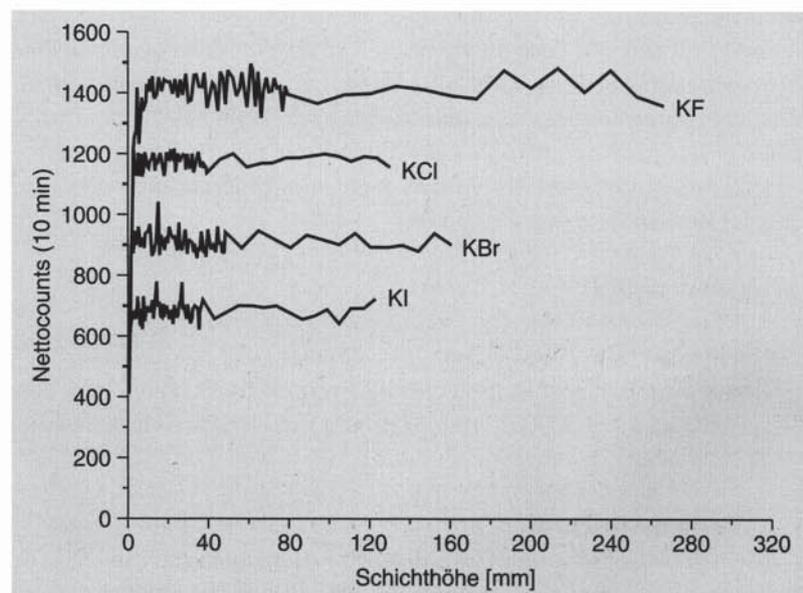


Abb. 8.6.8/1: Selbstabsorptionsexperimente mit *Geiger-Müller*-Endfenster-Zählrohr

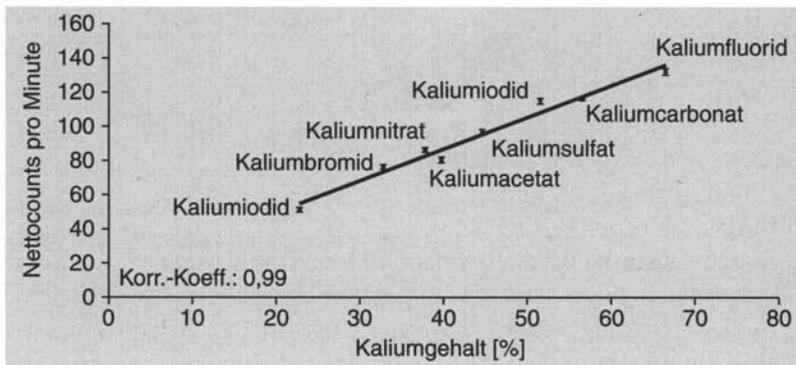


Abb. 8.6.8/2: Die experimentell ermittelte „unendlich dicke Schicht“ von Kaliumsalzen in einem Messzylinder korreliert sehr gut mit dem stöchiometrischen Kaliumgehalt derselben [44, 57]

### Beobachtung:

Wie die Diagramme zeigen, nimmt die an der Oberfläche der zylindrischen Salzschüttungen aufgezeichnete Aktivität mit der Höhe der Schüttung zu, um in jedem Fall einem Plateauwert zuzustreben. Ab diesem Wert, der als „unendlich dicke Selbstabsorptionsschicht“ bezeichnet wird, führt eine weitere Erhöhung der Schichtdicke bei Kaliumsalzen nicht mehr zu einer Erhöhung der Aktivität.

### Interpretation:

Der Verlauf der Kurven liegt in dem Phänomen der Selbstabsorption begründet, wonach die am Fuß der Salzschüttung emittierte Strahlung auf ihrem größerem Salzweg mehr Absorption erfährt als die aus den oberen Schichten stammende. Der Vergleich zeigt mit variierenden Anionen ( $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Br^-$ ,  $I^-$ ) bei identischer stöchiometrischer Zusammensetzung unschwer, dass die Größe des Anions die Selbstabsorptionseigenschaften maßgeblich beeinflusst. Trägt man die gewonnenen Aktivitätswerte der „unendlich dicken Selbstabsorptionsschichten“ gegen den Kaliumgehalt verschiedenster untersuchter Kaliumsalze auf, so bestätigt die gut lineare Korrelation die isotopische Gleichverteilung in unterschiedlichen Verbindungen (s. Abb. 8.6.8/2) [57].

## V 8.6.9 Nuklidgewinnung und Identifikation mit Bahndetektor von $^{220}Rn$ Radon (Thoron)

### Sachinformation:

Nach Abtrennung der Thoriumisotope  $^{232,228}Th$ Thorium bei der Gewinnung des Elements  $Z = 90$  erfolgt eine Separation von den  $^{228,224}Ra$ Radium-Isotopen. Somit wächst die Thorium(4n)-Zerfallsreihe von den beiden vorgenannten Thoriumnukliden aus nach (Abb. 8.3/1) [29, 35, 55, 58].  $^{224}Ra$ Radium ist das Mutternuklid der gasförmigen „Thorium-Emanation“:  $^{220}Rn$ Radon, auch Thoron genannt. Mit einer Halbwertszeit von ca. 56 Sekunden stellt es ein ideales Untersuchungsobjekt im Zuge der schrittweisen Aufklärung der Zerfallsreihe dar.

### Arbeitsmaterialien:

#### Geräte:

Kontinuierliche Nebelkammer nach *Langsdorf* (maschinen- bzw. trockenisgekühlt [58]), Kunststoffspritzflasche (ca. 300 mL, weite Öffnung), 5–10 *Auer*-Gasglühstrümpfe (Baumwollgewebe aus dem Schiffsbedarf), Watte

#### Sicherheitsvorschriften:

Die *Auer*-Gasglühstrümpfe werden beim einmaligen Einbringen in die Kunststoffspritzflasche mittels Einweghandschuhen gehandhabt (Kontaminationsprophylaxe).

**Versuchsdauer:**

30 Minuten

**Durchführung:**

Wird die überstehende Atmosphäre thoriumhaltiger Verbindungen von der Festkörperquelle abgetrennt, so resultiert ein Nuklidgeneratorsystem mit längstlebigen, primordialen Mutternuklid ( $[^{232}\text{Th}]$ Thorium) und gasförmig einfach abtrennbarem  $[^{220}\text{Rn}]$ Radon (Thoron, Abb. 8.3/1) [1, 2]. 5–10 Auer-Gasglühstrümpfe werden mit übergestreiften Einweghandschuhen in die Weithals-Kunststoffspritzflasche verbracht, die zum Kontaminationsschutz mit einem Wattepfropfen gegen Austritt von thoriumhaltigem Staub verschlossen wird. 7 Minuten nach Beschickung ist dieser Nuklidgenerator in diesen Zeitabständen wiederholt bereits einsetzbar. Durch kurzes Zusammenpressen werden ca. 20% der überstehenden Thoron-haltigen Atmosphäre unmittelbar in einen Bahndetektor (Nebelkammer nach Langsdorf) injiziert.

**Entsorgung:**

Keine

**Beobachtung:**

Es werden kurze kräftige Spuren, die aus den beiden kurz hintereinander (0,15 s) erfolgenden Alpha-Umwandlungen des sukzessiven  $[^{220}\text{Rn}]$ Radon (Thoron)-Zerfalls stammen, beobachtet (vgl. Abb. 8.6.9/1 und 8.6.5/2).

**Interpretation:**

Das Nebelkammerbild zeigt hochionisierende Strahlung (hohe Spurcharakteristik) an. Es handelt sich um die beiden sukzessive emittierten Alphateilchen ( $E_{\alpha 1} = 6,3$ ,  $E_{\alpha 2} = 6,8$  MeV); der nach der ersten Alpha-emission zurückbleibende Rückstoßkern ( $[^{216}\text{Po}]$ Polonium) hat nur eine Reichweite im Zehntel-Millimeter-Bereich, so dass die beiden Alpha-Bahnspuren von einem Punkt auszugehen scheinen (siehe Abb. 8.6.9/1). Beobachtet wird eine V-förmige Figur mit unterschiedlichem Öffnungswinkel und unterschiedlicher bis gleicher Schenkellänge. Letzteres ist darin begründet, dass Alphateilchen, welche nicht parallel zum Kammerboden emittiert werden, aus der empfindlichen Schicht des Bahndetektors austreten können. Die Anzahl der Ereignisse scheint zunächst zu steigen, da sich die Thoron-Emanation gasähnlich verteilt, um sich dann etwa im Minutentakt in der Zahl zu halbieren (vgl. Abb. 8.6.9/1).

Nach etwa 10 Minuten ist der natürliche Alpha-Untergrund wieder erreicht, der sich aus Kammerkontamination mit längerlebigen Alpha-Aktivitäten und dem  $[^{222}\text{Rn}]$ Radon-Gehalt der Kammerinnenluft zusammensetzt.

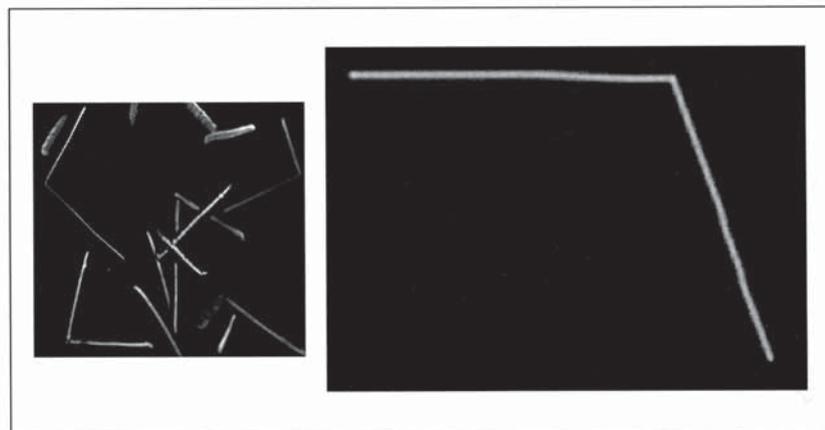


Abb. 8.6.9/1: Thoroninjektion: Beobachtung des  $[^{220}\text{Rn}]$ Radon-Zerfalls in der kontinuierlichen Nebelkammer ( $E_{\alpha 1} = 6,3$  MeV,  $E_{\alpha 2} = 6,8$  MeV)

### V 8.6.10 Nuklidgewinnung und Identifikation über Halbwertszeit von [ $^{137m}\text{Ba}$ ]Barium

#### Sachinformation:

Das Radionuklid [ $^{137}\text{Cs}$ ]Caesium ( $T_{1/2} = 30,25$  a, [2]) ist einer breiten Öffentlichkeit durch die Ereignisse um die Havarie von Tschernobyl 1986 bekannt geworden (siehe Abb. 8.1.1/3). Über Deutschland gingen damals rund 300 g dieses Radioisotops nieder.

Weniger bekannt ist, dass es sich dabei um einen Beta-Emitter handelt und erst dessen Tochterprodukt, das metastabile [ $^{137m}\text{Ba}$ ]Barium ( $T_{1/2} = 2,55$  min), eine Gammaemission mit 662 keV in seinen stabilen Grundzustand [ $^{137}\text{Ba}$ ]Barium erfährt (Abb. 8.6.10/1) [1, 2]. Vergleicht man etwa die Röntgenaufnahme Erwachsener beim Zahnarzt (ca. 70 keV) und typische orthopädische Aufnahmen (100–150 keV) mit dieser Emissionsenergie, so erkennt man, wie durchdringend die Gammastrahlung des Erdalkaliproduktes des Nuklidgenerators [ $^{137}\text{Cs}$ ]Caesium/[ $^{137m}\text{Ba}$ ]Barium ist. Ionenaustausch-Trennung wird hier zur Nuklidseparation herangezogen, wobei die Eluierbedingungen so gewählt werden, dass das langlebige Mutternuklid als Alkalimetallion fixiert und die radiogenetische Tochter, ein Erdalkalimetallion mit hohem Dekontaminationsfaktor abgelöst (eluiert) wird. Es liegt das Modell eines typischen nuklearmedizinischen Nuklidgenerators vor.

#### Arbeitsmaterialien:

##### Geräte:

[ $^{137}\text{Cs}$ ]Caesium/[ $^{137m}\text{Ba}$ ]Barium-Isotopengenerator, 370 kBq, Nuclitec GmbH, Braunschweig, bauartgeprüft Nr.: Nds 151/90 mit Fortschreibungen, mitgelieferte Eluierspritze, ein Reagenzglas, eine Reagenzglasklammer, Stativmaterial, Einweghandschuhe, Geiger-Müller-Endfenster-Zählrohr mit Impulszählgerät

##### Chemikalien:

Mitgelieferte Eluierlösung (zur Elution von Erdalkali-Ionen), Fa. QSA Global, Braunschweig

##### Sicherheitsvorschriften:

Beim Hantieren mit dem Nuklidgenerator und dem Eluat sind zur Kontaminationsprophylaxe Einweghandschuhe zu tragen.

#### Versuchsdauer:

45 Minuten

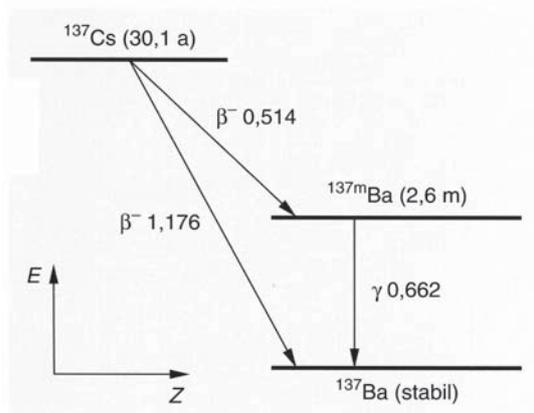


Abb. 8.6.10/1: Zerfallsschema des Alkalimetallmutter-nuklids [ $^{137}\text{Cs}$ ]Caesium

**Durchführung:**

In die Dosierspritze des Nuklidgenerators werden 4–5 mL der Eluierlösung aufgezogen. Vom Nuklidgenerator werden die beiden Verschlussstopfen entfernt, die gefüllte Spritze wird aufgeschraubt und die Eluierlösung in wenigen Sekunden vorsichtig durchgepresst, wobei das Eluat in einem Reagenzglas aufgefangen wird. Im Abstand  $d \leq 2$  mm wird an das in einem Reagenzglashalter fixierte Reagenzglas unten seitlich ein *Geiger-Müller*-Endfenster-Zählrohr herangeführt (Stativ). Der Nuklidgenerator darf niemals „trocken laufen“, d. h., die beiden Verschlussstopfen sind unmittelbar nach jeder Elution wieder aufzusetzen.

**Entsorgung:**

Es fällt nichts zur Entsorgung an.

**Beobachtung:**

Zeichnet man die Aktivität über 15 Minuten in 30 Sekunden-Intervallen auf und subtrahiert die zuvor durch Mittelwertbildung aus drei Leermessungen identischer Anordnung gewonnene Nullrate, so erhält man eine Halbwertszeit von ca. 2,5 Minuten.

**Interpretation:**

Durch die Bestimmung der nuklidspezifischen Halbwertszeit ist die Identität des metastabilen Erdalkaliisotops [ $^{137m}\text{Ba}$ ]Barium belegt. Untersucht man das (recyclebare) Eluat über 30 Minuten hinaus, so stellt man lediglich die Nullrate fest, d. h., es hat eine nahezu quantitative Mutter-Tochter-Trennung (hoher Dekontaminationsfaktor) stattgefunden. Nach einer halben Stunde ist der Generator mit gleicher Ausbeute wieder voll einsetzbar, da am Ionenaustauscher das Tochternuklid (Erdalkali-Kation) in vollem Umfang nachgewachsen ist.

Es ist auch möglich, die nächste Elution unter kürzeren Zeitspannen durchzuführen; erhält man dann jedoch eine je nach Länge der verstrichenen Zeitspanne kleinere als die maximale Ausbeute.

**Literatur:**

- [1] *J. Magill, G. Pfennig und J. Galy*, Karlsruher Nuklidkarte. Karlsruhe 2006
- [2] *G. Wahl*,  $\alpha\beta\gamma$ -Table, Radionuclide-Handbook. Schliessee 2006
- [3] *C. Keller*, Grundlagen der Radiochemie. Salle+Sauerländer Verlag, Aarau-Frankfurt-Salzburg 1993
- [4] *H.-G. Vogt und H. Schulz*, Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes. Hanser Verlag, München-Wien 1992
- [5] *H. Brandl und R. J. Schwankner*, Zur Thermolumineszenz von Flußspat. *Praxis (Chemie)* **49**, S. 24 (2000)
- [6] *C. Grupen*, Teilchendetektoren. Spektrum Verlag, Mannheim-Leipzig-Wien-Zürich 1993
- [7] *W. Crookes*, The Emanations of Radium. *Proc. Roy. Soc.* **71**, S. 405 (1903)
- [8] *J. Elster und H. Geitel*, Über die durch radioaktive Emanation erregte szintillierende Phosphoreszenz der Sidot-Blende. *Phys. Z.* **4**, S. 439 (1903)
- [9] *W. Crookes*, Certain Properties of the Emanations of Radium. *Chemical News* **87**, S. 241 (1903)
- [10] *F. Soddy*, Die Natur des Radiums. [Ostwalds Klassiker der Wissenschaften Bd. 289, Hrsg.: *R. J. Schwankner*], Harri Deutsch Verlag, Frankfurt/M. 2002
- [11] *R. J. Schwankner, R. Laubinger, M. Eigenstätter, A. Rohmann und F. Vilser*, Zur Kenntnis und radiometrischen Charakterisierung von Spinthariskopen. *MNU* **56**, S. 16 (1/2003)
- [12] *R. J. Schwankner*, Desintegration von Einzelatomen im Blick. *Strahlenschutz. Praxis* **9/3**, S. 43 (2003)
- [13] *M. Eiswirth und R. J. Schwankner*, Themen zur Festkörperchemie II, Präparation und Spektroskopie. *Praxis Schriftenreihe Chemie* Bd. 47. Aulis Verlag, Köln 1989
- [14] *SSK*, Auswertung der vorliegenden Gesundheitsstudien zum Radon, Stellungnahme der Strahlenschutzkommission zur Wirkung des Radons. *Bundesanzeiger* **141**, S. 16881 (2004)
- [15] *E. R. Caley*, The Earliest Known Use of a Material Containing Uranium. *Isis* **38**, S. 190 (1948)
- [16] *E. Péligot*, Untersuchungen über das Uranium. *Ann. Chem. und Pharm.* **43**, S. 255 (1842)
- [17] *F. Kirchheimer*, Das Uran und seine Geschichte. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1963
- [18] *A. Mittasch*, Geschichte der Ammoniaksynthese. Verlag Chemie, Weinheim 1951

- [19] *C. M. A. Bignon* und *L. M. Bullier*, Verwendung von Kohlenstoffuran für Zündvorrichtungen. Deutsches Reichspatent Nr. 77 166 vom 16. Dezember 1893
- [20] Stadtverwaltung Haigerloch: Atommuseum Haigerloch. Geschichte deutscher Atomforschung, der erste Atommeiler. Haigerloch 1982
- [21] *R. J. Schwankner*, *P. Schöffl*, *M. Gaßner*, *R. Laubinger* und *J. von Czarnecki*, Vom „ersten“ deutschen Uran – zwei Belegstücke. *MNU* **50**, S. 418 (1997)
- [22] *A. Speer*, Erinnerungen. Ullstein Verlag, Berlin 1969
- [23] *J. Pfeufer*, Torbernit-Mineralisation und Prägung der Uran-Medaillen von Weißenstadt (Fichtelgebirge). *Die Geowissenschaften* **14**, S. 552 (1996)
- [24] *F. Kirchheimer*, Über eine Bergbau-Medaille aus einheimischem Uran. *Bergfreiheit* **24**, S. 23 (1959)
- [25] *F. Jochmann*, Uran im Glas, als färbendes Metalloxyd und radioaktives Element. *Glas-Email-Keramo-Technik*, S. 166 (1958)
- [26] *H. Wolf* (Hrsg.), Uran im Glas. In: *Uranglas, Uranglasuren*. Bergbau- und Industriemuseum Ostbayern. Kümmerbruck 2000
- [27] *R. J. Schwankner*, *M. Eigenstetter*, *R. Laubinger* und *M. Schmidt*, Uran als Farbkörper in Gläsern und Glasuren, Strahlende Kostbarkeiten. *PhiuZ* **36**, S. 160 (2005)
- [28] *R. J. Schwankner*, *R. Laubinger*, *M. Hafner* und *F. Vilser*, Radiogene Stimulation von Festkörperlumineszenz. *Praxis (Chemie)* **53**, Heft 3, S. 4 (2004)
- [29] *A. Brummeisl*, *Ch. Feigl*, *R. J. Schwankner* und *P. Schöffl*, Frühe Verwendungsgeschichte von Thorium. *Die Geowissenschaften* **12**, S. 66 (1994)
- [30] *A. S. Eve*, Rutherford. Univ. Press, Cambridge 1939
- [31] *E. Rutherford*, A Radio-active Substance Emitted from Thorium Compounds. *Phil. Mag.* **5**, S. 1 (1900)
- [32] *O. Hahn*, Applied Radiochemistry. The G. F. Baker Non-Resident Lectureship in Chemistry at Cornell University, New York 1936
- [33] *I. J. Starik*, Grundlagen der Radiochemie. Akademie Verlag, Berlin 1963
- [34] *Ch. Wimmer* und *R. Schwankner*, Traceruntersuchungen zum Adsorptionsverhalten von  $^{212}\text{Pb}$ Blei an Silberhalogeniden. *Praxis (Chemie)* **34**, S. 39 (1985)
- [35] *R. Schwankner*, Radiochemie-Praktikum. Schöningh Verlag, Paderborn-München-Wien-Zürich 1980
- [36] *G. W. Morey*, Optical Glass. United States Patent Nr. 2,150,694 vom 14. März 1939
- [37] *M. Faulstich*, Mehrstoffsysteme zum Aufbau optischer Gläser, Teil II. *Glastechn. Ber.* **34**, S. 102 (1961)
- [38] *J. G. von Dijk*, Einführung in die Elektronenphysik. Eindhoven: Philips Technische Bibliothek 1966
- [39] *Ch. Buxbaum*, Eine neue thermoionische Drahtkathode mit hoher Emissionsstromdichte auf der Basis: Molybdän-Lanthan-Kohlenstoff-Platin. Dissertation ETH, Zürich 1978
- [40] *R. J. Schwankner*, *A. Bettermann*, *J. Dörner*, *Ch. Feigl*, *R. Laubinger* und *F. Vilser*, Zwei Anwendungen von Thorium. *MNU* **53**, S. 295 (2000)
- [41] *J. J. Thomson*, On the Emission of Negative Corpuscles by the Alkali Metals. *Phil. Mag.* **10**, S. 584 (1905)
- [42] *N. R. Campbell* und *A. Wood*, The Radioactivity of the Alkali Metals. *Proc. Cambr. Soc.* **14**, S. 15 (1906)
- [43] *J. Elster* und *H. Geitel*, Die Radioaktivität des Kaliums und Rubidiums, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* **10**, S. 323 (1913)
- [44] *V. Wishnevsky*, *R. J. Schwankner*, *H.-J. Müller*, *B. Rieger* und *M. Eiswirth*, Zur Radiochemie von  $^{40}\text{K}$ Kalium. *Praxis (Chemie)* **34**, S. 32 (1985)
- [45] *L. Meitner*, Einige Bemerkungen zur Isotopie der Elemente. *Naturw.* **14**, S. 719 (1926)
- [46] *G. von Hevesy*, Die Radioaktivität des Kaliums. *Naturw.* **23**, S. 583 (1935)
- [47] *G. von Hevesy* und *M. Lögstrup*, Die Trennung der Isotope des Kaliums. *Z. anorg. Ch.* **171**, S. 1 (1928)
- [48] *R. J. Schwankner*, Otto Höning Schmid (1878–1945). *ChiuZ* **15**, S. 163 (1981)
- [49] *H. Brockmeyer*, Kunststoffe als  $\alpha$ -Strahlendetektoren. *Praxis (Physik)* **25**, S. 42 (1976)
- [50] *H. Brockmeyer*, Autoradiographien mit Kunststoff-Folien. *Praxis (Physik)* **25**, S. 200 (1976)
- [51] *R. J. Schwankner*, *A. Brummeisl*, *P. Höpfl*, *M. Mundenbruch* und *M. Steiner*,  $^{220,222}\text{Rn}$ Radon-Exposition in Innenräumen. Das öffentliche Gesundheitswesen **53**, S. 398 (1991)
- [52] *R. J. Schwankner*, *R. Laubinger*, *J. Dörner*, *B. Gmeiner*, *G. Patzer* und *M. Schmidt*, Aus der Frühgeschichte der Radiochemie – Ausgewählte Objekte konservatorischer Radiometrie. *Fachverband für Strahlenschutz, Publikationsreihe Fortschritte im Strahlenschutz FS-06-141-T*, S. 52 (2006)
- [53] *R. J. Schwankner*, *D. Lienert* und *G. Lieckfeld*, Die Frühgeschichte des Urans. *Die Geowissenschaften* **7**, S. 215 (1989)
- [54] *R. J. Schwankner*, Ausgewählte Geräte, Versuche und Methoden zur Demonstration radiochemischer Experimente (I) und (II). *Praxis (Chemie)* **26**, S. 57 und S. 85 (1977)
- [55] *R. J. Schwankner*, *M. Eiswirth*, *F. Weigel* und *V. Wishnevsky*, Electrostatic Radionuclide Separation. *Chem. Educ.* **59**, S. 608 (1982)
- [56] *B. Gmeiner*, Beitrag zur Tracerradiometrie und natürlichen Radioaktivität. Diplomarbeit Fachgebiet Radiochemie. Fachhochschule München 2004

- [57] *M. Baier*, Praktikumsbericht zur Radiometrie von [<sup>40</sup>K]Kalium. Fachhochschule München 2005
- [58] *M. Gläser*, Die Nebelkammer im experimentellen Unterricht. Praxis Schriftenreihe Physik, Bd. 33. Aulis Verlag, Köln 1976
- [59] *R. J. Schwankner*, *V. Wishnevsky* und *M. Eiswirth*, The <sup>234m</sup>Pa-Generator. J. Chem. Educ. **62**, S. 623 (1985)
- [60] *F. Seel*, Grundlagen der analytischen Chemie. Verlag Chemie, Weinheim/Bergstrasse 1973
- [61] *R. J. Schwankner*, *A. Rohmann*, *G. Feis*, *R. Laubinger*, *J. Dorner*, *M. Eigenstetter*, *M. Hafner* und *F. Vilser*, Radiumhaltige Leuchtfarben. Praxis (Biologie) **51**, S. 20 (5/2002)
- [62] <http://www.wiley-vch.de/berlin/journals/phiuz/05-04/Phy1073-Web.pdf>
- [63] *R. J. Schwankner*, *G. Lieckfeld*, *A. Schöpf*, *P. Schöffl* und *M. Steiner*, Zur Farbkraft von Uranverbindungen. Teil II Uranglas/Fluoreszenz des Uranyl(VI)-Ions. MNU **45**, S. 88 (1992)
- [64] *R. J. Schwankner*, *G. Lieckfeld* und *D. Lienert*, Zur Farbkraft von Uranverbindungen. Teil I Urankeramik/Uranoxidstufen (UO<sub>x</sub>; x = 2 ... 3). MNU **44**, S. 25 (1991)
- [65] *R. J. Schwankner*, *A. Rohmann*, *R. Laubinger*, *A. Bettermann*, *S. Müller*, *M. Eigenstetter* und *F. Vilser*, Uranglasierete Fliesen. Praxis (Biologie) **51**, S. 22 (5/2002)
- [66] *R. J. Schwankner* und *Ch. Wimmer*, Die Rutherfordsche Thoriumkuh – Gammaskopische Produktidentifizierung und alternative Bauformen. Praxis (Chemie) **32**, S. 154 (1983)
- [67] *R. J. Schwankner* und *M. Eiswirth*, Alpha-Zerfall in einer kontinuierlichen Nebelkammer, Zusammenhang zwischen Zerfallskonstante und Energie. MNU **39**, S. 139 (1986)