

Rutherfords „Thoriumkuh“, Teil 2

AUTOR

Robert Josef Schwankner

KOAUTOREN

Bernadett Gmeiner
 Rudolf Laubinger
 Gregor Patzer
 Michael Schmidt
 Jochen Schraufstetter
 Stefanie Tafelmeier
 Florian Welz

ZUSAMMENFASSUNG

Im Teil 1 des Beitrags haben die Autoren Bauformen und Nuklidgewinnung mit Rutherfords „Thoriumkuh“ beschrieben. Im 2. Teil geht es um die praktischen Auswirkungen auf die „Chemie des Unwägbaren“, die Radiochemie. Rutherfords unaufwendiger Zugang zu trägerfreien Gliedern der 4n-Zerfallsreihe eröffnete ebenso die Möglichkeit der Verifizierung des Hahn'schen Fällungssatzes wie auch pflanzenphysiologische Studien. Bis heute ist diese Vorgehensweise sehr geeignet für Praktikumsversuche.

SUMMARY

Rutherford's "Thorium Cow", Part 2

In Part 1 of this contribution, the authors described construction, shapes, and nuclide extraction of Rutherford's "Thorium Cow". Part 2 deals with the practical implementations on the "Chemistry of the Imponderable", the Radiochemistry. Rutherford's electrostatic preparation of carrier-free radionuclides of the 4n-series offered a non extensive path to study Hahn's precipitation rule as well as von Hevesy's tracer applications in plant physiology. Up to now this is very suitable for practical courses.

„Chemie des Unwägbaren“

Der erste Teil des Beitrags befasste sich zunächst mit den Bauformen der Rutherford'schen „Thoriumkuh“ und der damit möglichen Nuklidgewinnung. Im vorliegenden zweiten Teil wird nun anhand von Experimenten die „Chemie des Unwägbaren“, die Radiochemie, eingeführt und beschrieben. Wie wir gesehen haben, erlaubt die in Teil 1 beschriebene „Thoriumkuh“ den bequemen und einfachen Zugang zu wichtigen Tracernukliden, ^{212}Pb (Thorium B) sowie z. B. ^{208}Tl (Thorium C''). Mit diesen Radionukliden und beim Studium ihrer Gewinnung sind im Zuge der Aufklärung der natürlichen und hier insbesondere der Thorium-(4n)-Zerfallsreihe innerhalb einer Generation die Grundlagen für eine Chemie des Unwägbaren geschaffen worden.

Chemie des Unwägbaren – Gespensterchemie

Während die klassische Analytik im Bereich von Mikro- und Nanogrammquantitäten (vgl. z. B. Farbkomplexe wie etwa Eisen(III)rhodanid) (H. Römpp, 1941) operiert, ist hier im Bereich der Radiochemie der Umgang in Femto- und Attomolen sowie im Falle von Bahndetektoren (Abb. 1) de facto im

Einzelatommachweis nicht ungewöhnlich. Eine Zusammenfassung dieser Entwicklungen gibt Otto Hahn, ehemals Postdoktorand bei William Ramsay (London) und Ernest Rutherford (Montreal/Kanada) sowie Direktor des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Chemie in Berlin-Dahlem, mit seinen Baker Lectures „Applied Radiochemistry“ an der Cornell University 1936 (Abb. 2, 3

Otto Hahn in den Baker Lectures „Applied Radiochemistry“ 1936

“We owe to the French chemist Lavoisier the recognition of the full significance and the ingenious application of this law. We have him to thank for introducing the well-known balance as a reliable guide in modern work, thereby Lavoisier became the true founder of modern chemistry ... To be sure, Lavoisier's immortal services were poorly rewarded by his contemporaries: In 1794, during the confusion of the French Revolution, the Revolutionary Tribunal sent him to guillotine.

My topic is “from the Ponderable to the Imponderable” in chemistry, in physics and I might also add, in biology.”

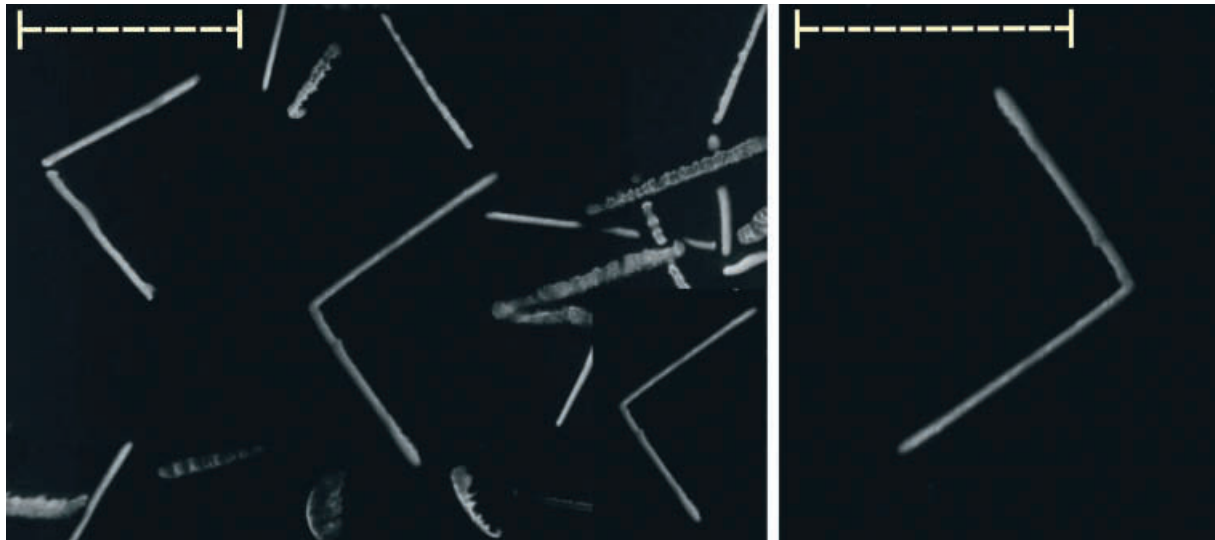


Abb. 1: Eine Thoriumemanation ^{220}Rn hinterlässt unter anderem V-förmige Spuren mit unterschiedlichen Öffnungswinkeln in der kontinuierlichen Nebelkammer nach Langsdorf. Letztere ist eine Fortentwicklung der diskontinuierlichen Wilson'schen Nebelkammer, die Ernest Rutherford wie folgt beschrieb: „The most original and wonderful instrument in scientific history.“ Die Variation der Schenkellänge hängt unter anderem davon ab, ob und ggf. wann die Spur die Beobachtungsebene verlässt. Links: aufgenommen unmittelbar nach der Injektion von Thoron (^{220}Rn) in die kontinuierliche Nebelkammer; rechts: vergrößerter Auszug des V-förmigen Zerfalls (die gepunktete Linie ist in beiden Fällen ein eingelegter Längenmaßstab: 5 cm)

und Kasten auf S. 63 unten) [1]. Alle späteren Befassungen mit Ultraspu- ren, sei es im Bereich der Dotierung (Halbleitertechnologie), der Biochemie



Abb. 2: Drei Chemie-Nobelpreisträger, die die moderne Radiochemie in den Fußstap- fen ihres Lehrers, des Doyens der Radio- aktivitätsforschung Ernest Rutherford (1871–1937), geprägt haben: links Georg von Hevesy (1885–1966), Tracermethodik und Aktivierungsanalyse, rechts Sir Freder- ick Soddy (1877–1956), Verschiebungs- sätze und Isotopiebegriff, und in der Mitte Otto Hahn (1879–1968), Präparative Radio- chemie und Kernspaltung

(Enzymanalytik), der Umwelt- oder Nanotechnik, fußen mit auf den dort zusammengefassten Erkenntnissen, sie begründen zudem auch den Weg zum chemisch-analytischen Nachweis der ersten Urankernspaltung (Hahn/Strassmann, Meit- ner 1938/39).

Im Folgenden wird ver- sucht, das Umfeld von Rutherfords „Thorium- kuh“ sowohl bei der Auf- klärung der ihr zugrunde liegenden Effekte als auch bei der Anwendung der mit ihr pro- blemlos zur Verfügung gestellten Tra- cernuklide zum Studium je eines an- organischen und eines biologischen Systems schlaglichtartig auszuleuch- ten.

Rückstoßatome

Die Entdeckung C. T. R. Wilsons (1869–1959, Nobelpreis für Physik für das Jahr 1927) aus dem Jahr 1896 und stetig verbessert bis 1923, dass ionisierende Wellen- ebenso wie Teil- chenstrahlung sich in kondensierten Bahnspuren einer Nebelkammer mani- festiert, ging über seinen ehemali-

gen Klassenkameraden, den Lehrer Rutherfords, J. J. Thomson (1856– 1940, Nobelpreis für Physik für das Jahr 1906) rasch in das Instrumen- tarium der Radioaktivitätsforschung ein.

Die Thoriumemanation, eine „Minutenaktivität“ ($T_{1/2}(^{220}\text{Rn}) = 55,6 \text{ s}$) schreibt so ihren sukzessi- ven, doppelten Alphazer- fall in V-förmigen Nebel- kammerspuren mit unter- schiedlichem Öffnungs-

winkel (Abb. 1) [2]. Der Ursprung dieser Signatur ist nur vermeint- lich ein Punkt, da nach dem ersten Alphazerfall der Produktkern (Y) gemäß klassischer Impulserhaltung einen Rückstoß erfährt, der genähert durch folgende Beziehung beschrieben wird:

$$Q = E_{\alpha} + E_Y$$

$$E_Y = Q \frac{m_K(^4\text{He})}{m_K(^4\text{He}) + m_K(^{\text{A}-4}\text{Y})}$$

E_Y : Energie des Rückstoßkerns Y
 Q: Reaktionsenergie
 $m_K(^4\text{He})$: Masse des Heliumkerns
 $m_K(^{\text{A}-4}\text{Y})$: Masse des Rückstoßkerns

Weg zum Nachweis der Urankernspaltung

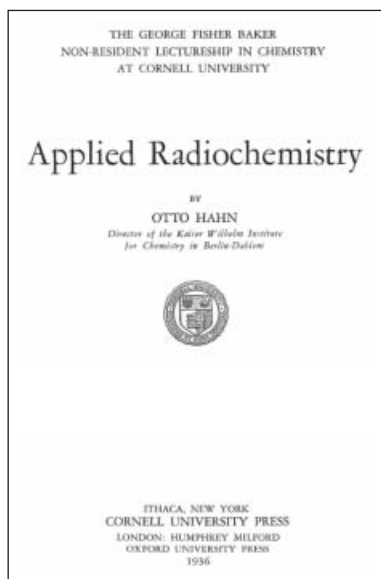


Abb. 3: Eine „Bibel“ für den Umgang mit Ultraspuren [1]

Im vorliegenden Fall ergibt sich dabei eine Rückstoßenergie mit Luftreichweiten im Zehntelmillimeterbereich für das Zerfallsglied ^{216}Po (Th A) von rund 0,12 MeV; es handelt sich hierbei um einen schweren Rückstoßkern, der schon nach kürzester Zeit (Abb. 1) durch weitere Alphaemission in Thorium B (^{212}Pb) übergeht (Abb. 4). Im Zuge dieses zweigeteilten sukzessiven Umwandlungsprozesses erfährt das entstehende Bleiatom in der Gasphase durch den „Strip-off“-Effekt (Kollision mit Molekülen der umgebenden Luft) eine hohe positive Ladung, auf der die effektive elektrostatische Nuklidseparierung der Rutherford'schen „Thoriumkuh“ fußt. Entnimmt man in einem weiteren Experiment der „Thoriumkuh“ eine, wie in Teil 1 beschrieben, exponierte Platinelektrode (typische Maße: $13 \times 40 \times 0,3 \text{ mm}^3$) und wickelt sie dicht in Aluminiumfolie ein, so werden in Letztere durch Rückstoßtrennung innerhalb von 30 Minuten Sub-Attomolquantitäten von ^{208}Tl (Thorium C') injiziert. Selbstverständlich erfolgt beim Pt/Al-Kontakt auch Ab-

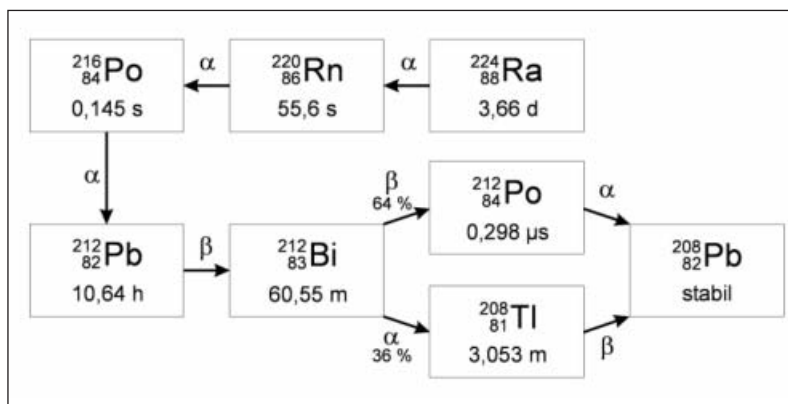


Abb. 4: Auszug der prozentualen Hauptverzweigung in der 4n-Zerfallsreihe mit Angabe der Halbwertszeit

rieb im Sinne einer Wischkontamination, dies ist aber ein untergeordneter Effekt, wie die quantitative Auswertung in Abb. 5 unter anderem belegt.

Trägerung

Die in beschriebener Weise erfolgte Präparation von ^{212}Pb (Thorium B) durch elektrostatische Gasphasendeposition auf Platinelektroden versuchte E. Rutherford vergeblich durch Wägung zu erfassen; bei den so typischerweise gewonnenen 2 kBq entspricht dies $1,1 \times 10^8$ Atomen gleich 39 Femto-gramm.

Durch Ablösen unter milden Bedingungen (HNO_3 ; $c = 1 \text{ mol/l}$, $T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$) können unter dreiminütiger Einwir-

kung im Ultraschallbad bis zu 80 % der Aktivität trägerfrei abgelöst werden. Mit diesen so trägerfrei gewonnenen 1,6 kBq haben Otto Hahn, seine Mitarbeiter und Zeitgenossen Tausende und Abertausende von Untersuchungen in den Systemen heterogener Fällungsgleichgewichte durchgeführt [1]. Hier lässt sich sehr einfach demonstrieren, wie anders der Umgang mit trägerfreien Ultramikroquantitäten erfolgt als in der klassischen analytischen Chemie. Bereitet es so im Laboralltag kein Problem, eine quantitative Fällung von Millimolquantitäten von Blei(II)-Ionen als schwer lösliches Bleisulfat (Löslichkeitsprodukt bei Raumtemperatur $\sim 1,6 \times 10^{-8} \text{ mol}^2/\text{l}^2$) auszuführen, gestaltet es sich, wie nachstehende Abschätzung zeigt, als völlig aussichtslos, dies bei der o. a. mit-

Hohe positive Ladung durch „Strip-off“-Effekt

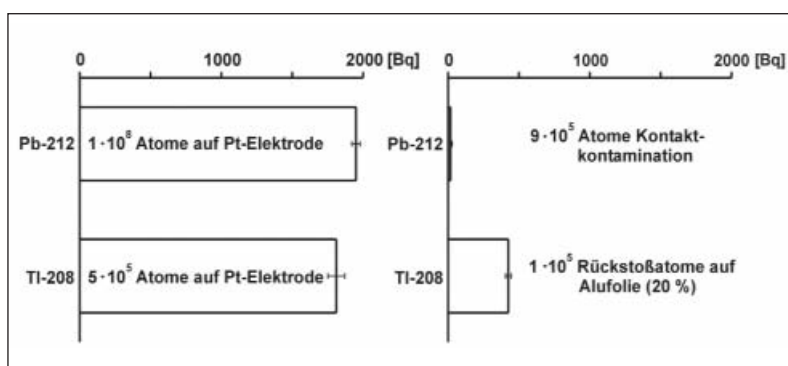


Abb. 5: ^{208}Tl (Th C') kann von einer mit ^{212}Pb (Th B) sättigungsaktivierten Platinelektrode (vgl. Abb. 4) eingewickelt in Metallfolie durch Rückstoßimplantation in Sub-Attomolquantitäten abgetrennt werden (die Kontaktkontamination ist demgegenüber vernachlässigbar; links: Aktivitäten auf unverpackter Platinelektrode, rechts: Aktivitäten auf der Alufolie nach Entnahme der Platinelektrode)

hilfe der „Thoriumkuh“ gewonnenen $^{212}\text{Pb}^{2+}$ -Tracerlösung (1.600 Bq) in klassischer Weise zu erwirken:

$$A = -\frac{dN}{dt} = N_0 \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \Rightarrow$$

$$N = \frac{1.600 \frac{1}{\text{s}} \cdot 10,64 \cdot 3.600 \text{ s}}{\ln 2}$$

$$= 8,8 \cdot 10^7 \text{ Kerne}$$

$$n = \frac{N}{N_A} = \frac{8,8 \cdot 10^7}{6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}}$$

$$= 1,5 \cdot 10^{-16} \text{ mol}$$

$$L_{\text{PbSO}_4} = [\text{Pb}^{2+}] \cdot [\text{SO}_4^{2-}] = 1,6 \cdot 10^{-8} \frac{\text{mol}^2}{\text{l}^2}$$

$$[\text{SO}_4^{2-}] = \frac{1,6 \cdot 10^{-8}}{1,5 \cdot 10^{-16}} = 1,1 \cdot 10^8 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

Selbst mit konzentrierter Schwefelsäure (~10 mol/l) besteht also nicht die geringste Chance, die ungeträgerte $^{212}\text{Pb}^{2+}$ -Quantität klassisch niederzuschlagen.

Es zeigt sich augenfällig, dass man herkömmliche chemische Methoden nicht unbesehen auf den Umgang mit ungeträgerten Radionukliden übertragen

darf. Es ist deshalb vor der Fällung notwendig, der Mikrokomponente (in unserem Fall ^{212}Pb) eine Makrokomponente (= Träger, Carrier) zuzusetzen, damit das Löslichkeitsprodukt – im vorliegenden Fall

in der Fällungsform Bleisulfat – überschritten werden kann. Der Träger kann gegenüber dem Nuklid isotop oder nicht isotop sein. Es muss sich im letzteren Fall nur ein Kristall bilden, der den zur Fällung notwendigen Isomorphiebedingungen genügt: gleicher Formel- und Gittertyp des formal neu entstehenden Kristalls, ähnliches Radienverhältnis, ähnliche Ionenradien.

Hahn'scher Fällungssatz

Ungeträgerte Radionuklide in Lösung zeigen neben Radiokolloidbildung noch weitere schwer beherrschbare Eigen-

schaften. So haben sie die Tendenz, bei der Benetzung mit neuen Oberflächen in unkontrollierbarer Weise zu adsorbieren. Dem versucht man mit mehr oder weniger Erfolg bei Laborglas z. B. per Inertisierung, das heißt Absättigung seiner Oberflächenhydroxid- und -ethergruppen durch Einwirkung von Hydroniumionen (Kontaktspülung aller eingesetzten Gläser mit Mineralsäuren) entgegenzuwirken.

Man kann sich bei der Untersuchung von Oberflächenadsorption auch ungeträgerter Thorium-B($^{212}\text{Pb}^{2+}$)-Tracerlösungen, des Hauptprodukts der Rutherford'schen „Thoriumkuh“, bedienen. A. Lottermoser hatte bereits 1906 herausgefunden, dass die Oberfläche von Silberhalogenid-Niederschlägen das Ladungsvorzeichen des dem stöchiometrischen Überschuss zuge-

setzten Fällungsions annimmt [3]. Dies bestätigten Versuche von K. Fajans und K. Beckerath 1921, die nachwiesen, dass die mit Halogenidüberschuss gefällten Silberhalogenid-Niederschläge Thorium-B($^{212}\text{Pb}^{2+}$)-Ionen stärker adsorbieren als mit Silberionenüberschuss gefällte [4]. Die theoretische Erklärung lieferte die von H. von Helmholtz (1821–1894) entwickelte Theorie der Diffusionsschichten an geladenen Kristallobertflächen, wie in Abb. 6 dargestellt. Die im Innenteil der Doppelschicht an der Kristallobertfläche angelagerten Ionen sind potenzialbestimmend. Sie werden dort überwiegend durch elektrostatisch gesteuerte Effekte fixiert und gehen mit Partnern im Kristallinneren formal schwer lösliche Oberflächenverbindungen ein, was zu einer weite-

Träger kann isotop oder nicht isotop sein

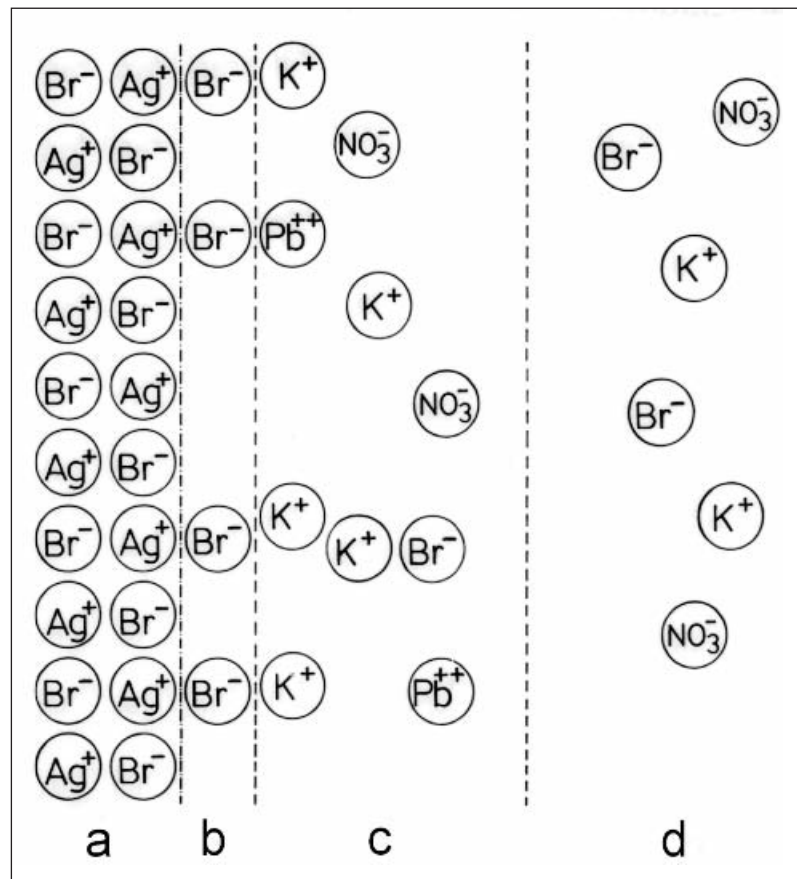


Abb. 6: Aufbau der elektrochemischen Doppelschicht an der Grenze zwischen polarem Kristall und freier Lösung; AgBr-Kristall mit negativ geladener Oberfläche infolge stöchiometrischen Überschusses von Bromidationen bei der Fällung im Ausschnitt; a: AgBr-Kristall, b: immobil adsorbierte, ladungsbestimmende Schicht, c: Gegenionenschicht, d: freie Lösung

ren energetischen Absenkung des Doppelschichtsystems führt. Der äußere Teil der Doppelschicht besteht aus Kompensationsionen gemäß dem Elektroneutralitätsprinzip. Der aus Tausenden derartigen Untersuchungen erwachsene Hahn'sche Fällungssatz fasst die Gesamtsituation wie folgt zusammen [5]:

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

Man unterscheidet zwischen primärer und sekundärer Adsorption. Unter der

Ersteren versteht man eine Anlagerung während oder nach der Fällung an die Kristalloberfläche aufgrund deren Ladung, unter sekundärer Adsorption schließlich die Tatsache, dass

die der Kristalloberfläche anhaftenden Ionen (primäre Adsorption) durch Bildung von isomorphen Einlagerungen in den Kristall eingebaut werden können, was jedoch längerer Zeit bedarf (innere Adsorption, Mischkristallbildung).

Als weiterer Effekt zeigt sich eine Okklusion, insbesondere wenn die Thorium-B($^{212}\text{Pb}^{2+}$)-Tracerlösungen nicht nach der Fällung, sondern als Komponente vor dem zweiten Fällungsreagens zugesetzt werden. Über das Sättigungsverhalten derartiger Systeme informieren die in Abb. 7 zusammengefassten Experimente. Gemäß Tabelle 1 sind entsprechende Untersuchungen im System Silberchlorid angestellt worden, wobei für die insgesamt fünf Experimente à vier Fällungsansätze die präparierte Aktivität von einer Platinkathode der oben beschriebenen „Thoriumkühe“ zur Anwendung kam; in toto also rund 1,6 kBq [6, 2].

Primäre und sekundäre Adsorption

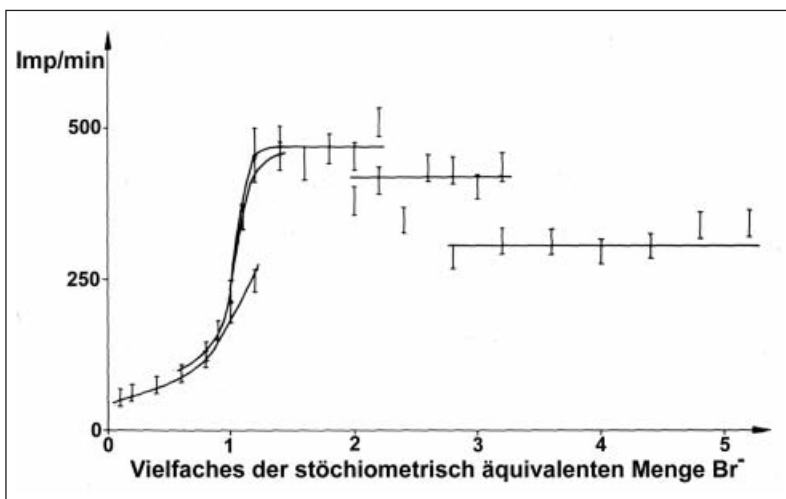


Abb. 7: ^{212}Pb -Traceradsorption zum Studium des Einflusses variierender Oberflächenladung, hier unter steigendem Bromidüberschuss (äquimolare Lösungen der Fällungsreagentien: $c = 0,2 \text{ mol/l}$; $V_{\text{Ag}^+} = 5,0 \text{ ml} = \text{konst.}$). Die Aktivitätsbestimmung bei den 34 Fällungen wurden in vier Gruppen ohne Zeitkorrektur des Zerfalls der Tracerlösung vorgenommen, da schon in den ersten beiden präparierten Chargen Sättigungsverhalten beobachtet wurde [6].

Traceranwendungen in der Pflanzenphysiologie

Georg von Hevesy (1885–1966, Nobelpreis für Chemie für das Jahr 1943) untersuchte als Erster die Wurzelbleiaufnahme von Pflanzen unter Verwendung des leicht zugänglichen Isotop geträgerten Radiotracers Thorium-B

(^{212}Pb) [7]. Wenn auch die Veraschung der untersuchten Pflanzenteile die Flüchtigkeit von Blei in Umweltemedien nur unzureichend berücksichtigte, so gelang es ihm doch, bereits 1923 erste Hinweise auf die Austauschbarkeit gegenüber einem nachgeschobenen Angebot von inaktivem

Aktivitätseinbindung des Tracers in die einzelnen Niederschläge

Versuchsansatz	Reihenfolge (s. Text)	^{212}Pb Blei in/an niedergeschlagenem Silberchlorid	
		[Bq]	[mol]
A	AgNO ₃ (2 ml) + Tracerlösung (1 ml) + KCl (8 ml)	133	1,2E-17
B	AgNO ₃ (2 ml) + KCl (8 ml) + Tracerlösung (1 ml)	77	7,1E-18
C	AgNO ₃ (8 ml) + Tracerlösung (1 ml) + KCl (2 ml)	5	4,6E-19
D	AgNO ₃ (8 ml) + KCl (2 ml) + Tracerlösung (1 ml)	3	2,8E-19

Tabelle 1: Verifizierung des Hahn'schen Fällungssatzes durch Tracereinsatz von ^{212}Pb (Th B) im System Silberchlorid (Fällungsreagentien: $c = 0,1 \text{ mol/l}$; Angaben sind Mittelwerte aus je 20 Fällungsgruppen à vier Präzipitaten).

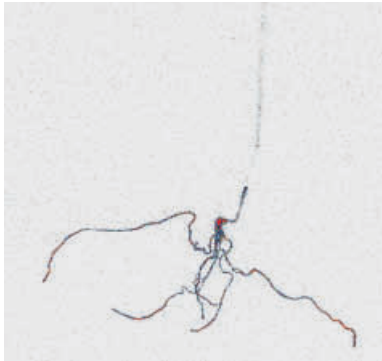


Abb. 8: RPL-Autoradiografie (Bio Rad, Molecular Imager FX, $t_{\text{expo}} = 70 \text{ h}$) von Sommergerste (*hordeum vulgare*; Vor- und Ankeimen 10 d)-Wachstum in Van-de-Crone-Nährlösung (0,11 L) 11 d; danach Trärgabe von Blei(II)nitrat (sodass $c(\text{Pb}^{2+})_{\text{Nährlösung}} = 10^{-4} \text{ mol/L}$) mit Tracerzusatz von ^{212}Pb ($A = 8 \text{ kBq}$; beides in 9 mL salpetersaurem Medium ($c(\text{HNO}_3) = 1 \text{ mol/L}$) über 21 h

Blei zu finden. Es folgte die Erkenntnis, dass nur wenige Hunderttausendstel der im Nährsubstrat angebotenen

Aktivität über die Wurzelbarriere den Weg in oberirdische Pflanzenteile schaffen. Die Wurzelbleiaufnahme alleine beziffert er im Zehntel-Prozent-Bereich innerhalb von 24 Stunden.

Aktuelle Wiederholungen dieser klassischen Experimente ergeben ein Verhältnis der Aktivitäten von fest an der Wurzel haftender zur Aktivität oberirdischer Pflanzenteile von bis zu 20 (vgl. Abb. 8).

Die Bedeutung der Reizdüngung von Bleikationenangebot in Bodenlösungsmodellen eröffnet sich ihm noch als erstaunlich geringe toxische Schwermetallwirkung. In den 70er- und 80er-Jahren des letzten Jahrhunderts hat die Speziationsschemie von Blei und seinen Verbindungen im Aufarbeiten des straßennahen Eintrags infolge von flächendeckender Anwendung von Organobleiverbindungen als Antiklopfmittel an Bedeutung gewonnen. Konkurrierende und aufnahmeunterdrückende Einflüsse wurden ebenso in vitro wie im Feld intensiv mit klas-

sischem wie radioanalytischem Instrumentarium studiert [8].

Schlussbemerkung

Wir hoffen erneut gezeigt zu haben, dass das Befassen mit der Frühgeschichte der Radiochemie ein lehrreiches und lohnendes Unterfangen ist. ■

STICHWORTE

Radiochemie, Thorium, Thoriumemanation, Thoriumzerfallsreihe

LITERATUR

- [1] Hahn, O.: Applied Radiochemistry. The G. F. Baker Non-Resident Lectureship in Chemistry at Cornell University. New York/London 1936.
- [2] Schwankner, R.: Radiochemie-Praktikum. Schöningh, Paderborn/München/Wien/Zürich 1980.
- [3] Lottermoser, A.: Über colloidale Salze I. II. Journal für prakt. Chemie, 72, 1905, S. 39–56; 73, 1906, S. 374–382.
- [4] Fajans, K./Beckerath, K. v.: Oberflächenkräfte bei heteropolaren Kristallgittern, Adsorption von Bleisotopen an kolloidalen Silberhalogeniden. Zeitschrift für physikalische Chemie, 97, 1921, S. 478–502.
- [5] Starik, I. J.: Grundlagen der Radiochemie. Berlin 1963.
- [6] Wimmer Ch./Schwankner, R.: Traceruntersuchungen zum Adsorptionsverhalten von (^{212}Pb)Blei an Silberhalogeniden. Praxis der Naturwissenschaften (Chemie), 34, 1985, S. 39–41.
- [7] Hevesy, G. v.: The Absorption and Translocation of Lead by Plants. Biochem. J., 17, 1923, S. 439–446.
- [8] Schwankner, R.: Die Wurzelbleiaufnahme von Weizen, deren Herabsetzung durch besondere Düngemaßnahmen und Einfluß auf den Ertrag. Praxis der Naturwissenschaften (Chemie), 25, 1976, S. 40–47.

AUTOR



Robert Josef Schwankner

Prof. Dr. Robert Josef Schwankner, Dipl.-Chem., war nach der Diplomarbeit in Neutronenaktivierungsanalytik (FRM) und Dissertation in Katalyse- und Oberflächenchemie bei Gerhard Ertl (Chemienobelpreis 2007) zunächst als Konservator Leiter der Abteilung Chemie des Deutschen Museums und Referent für Strahlenschutz im Bayerischen Umweltministerium. Seit 1977 beschäftigt er sich mit fachwissenschaftlichen und auch didaktischen Arbeiten auf dem Grenzgebiet von angewandter Chemie, Radioaktivität und Geschichte der Naturwissenschaften; er hat hierzu eine Reihe von Veröffentlichungen vorgelegt.

KOAUTOREN

- Bernadett Gmeiner**, Studium der Physikalischen Technik an der HM, 2005 Diplom, Mitarbeiterin am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP), Garching.
- Rudolf Laubinger**, Studium der Umwelttechnik an der HM, 1995 Diplom, heute Laborbetriebsleiter Radiometrische Laboratorien an der HM.
- Michael Schmidt**, Studium der Medizintechnik an der HM, 2003 Diplom, derzeit im Masterstudiengang Mikro- und Nanotechnik, Mitarbeiter des Forschungsreaktors München II (FRM II) der TU München (TUM).
- Stefanie Tafelmeier, Gregor Patzer, Jochen Schraufstetter, Florian Welz**, Studierende der Physikalischen Technik, HM.

ANSCHRIFT DER AUTOREN

Prof. Dr. R. J. Schwankner
Hochschule München – Radiometrisches Seminar
Karlstraße 6, D-80333 München
Tel./Fax: ++49/89/12 65 26 08
E-Mail: robertjosefswankner@web.de,
laubinger@hm.edu

Geringe toxische Schwermetallwirkung