

Begleitunterlagen:

Großes Radiometrisches Praktikum

HM

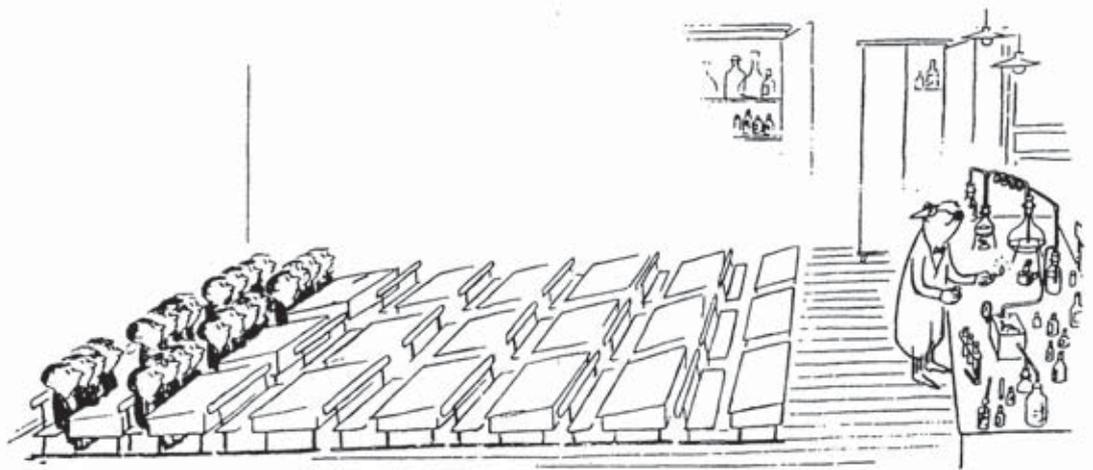
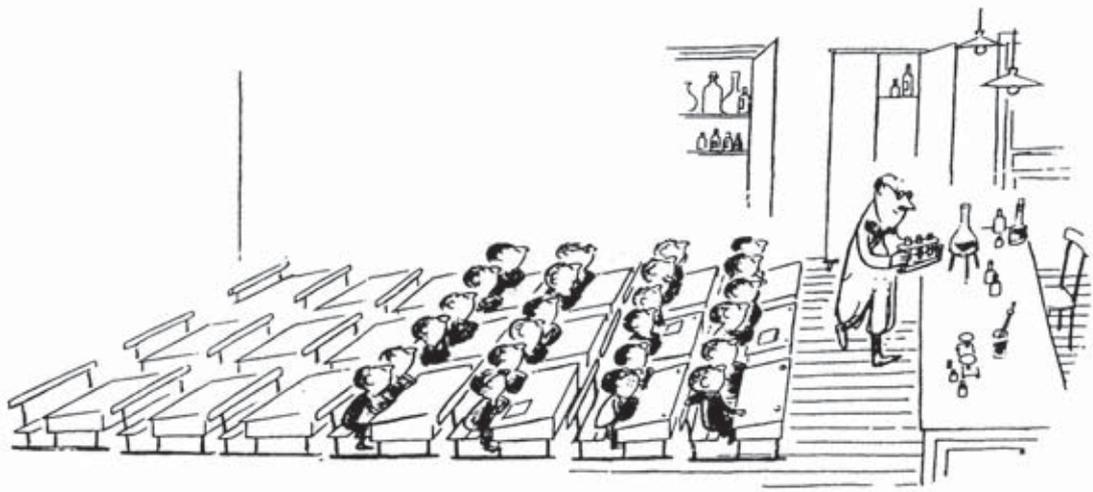
- a: Gliederung
- b: Unterweisung
- c: Kontinuierliche Nebelkammer nach Langsdorf
- d: n-Zählrohre
- e: Kontamination
- f: Radon/Radon Folgeprodukte
- g: γ -Spektrometrie
- h: Radionuklidgenerator
- i: Traceranwendungen
- k: Die Kunst der Autoradiographie

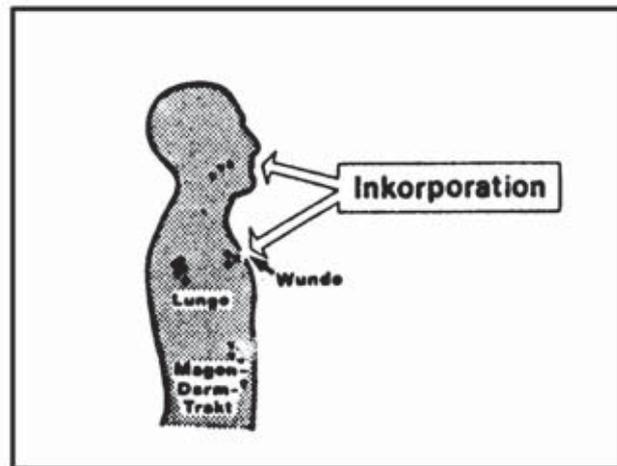
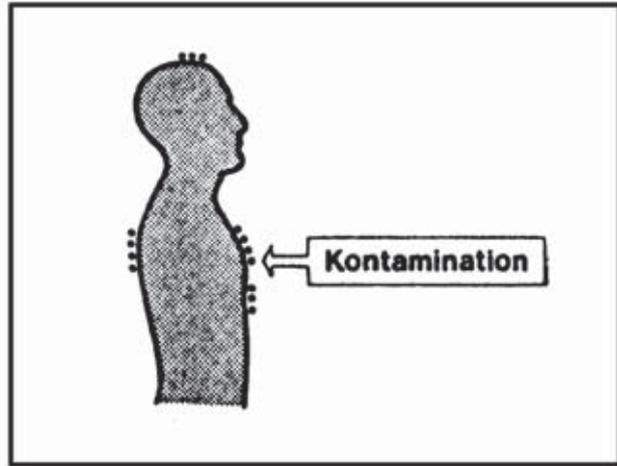
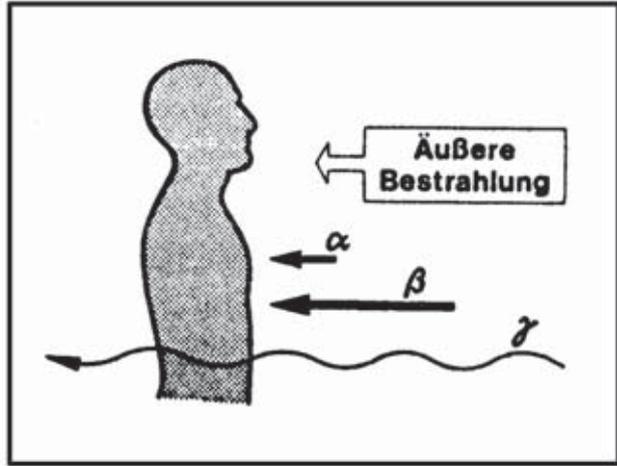
Prof. Dr. Schwankner
Türkenstraße 78
80799 München
Lab.: 089/1265-2608
Büro.: 089/1265-2667
priv.: 089/33019260

Begleitunterlagen: Großes Radiometrisches Praktikum HM

b: Unterweisung

Prof. Dr. Schwankner
Türkenstraße 78
80799 München
Lab.: 089/1265-2608
Büro.: 089/1265-2667
priv.: 089/33019260





Im KONTROLLBEREICH ist

Essen, Rauchen und Trinken nicht gestattet!

Strahlenquellen nicht berühren!

Personendosimeter tragen!

Bezeichnung	Rechts-Grundlage	Aufgaben	Stellung im Betrieb	Verantwortlichkeit
Betriebsarzt	§§ 2–4 ASiG VBG 123	Unterstützungsfunktion durch Beratung, Untersuchung, Empfehlungen, vorgegebene Einsatzzeiten	fachlich unmittelbar unter Betriebsleiter	keine Eigenverantwortung für den Gesundheitsschutz
Fachkraft für Arbeitssicherheit	§§ 5–7 ASiG VBG 122	Beratung, Überprüfung, Überwachung und Empfehlungen, vorgegebene Einsatzzeiten	fachlich unmittelbar unter Betriebsleiter oder „Unternehmermodell,“	keine Eigenverantwortung für den Arbeitsschutz, „verantwortliche Beratung,“
Sicherheitsbeauftragter	§ 22SGB VII VBG 1	Beratung vor Ort, Überwachung in seinem Tätigkeitsbereich	keine besondere betriebliche Stellung, kein Vorgesetzter	keine Eigenverantwortung für den betrieblichen Arbeits- und Gesundheitsschutz
Strahlenschutzbeauftragter	§§ 29–31 StrlSchV §§ 13 ff RöV	Information des Strahlenschutzverantwortlichen, Überwachung, Empfehlung, regelmäßige Belehrung der strahlenexponierten Personen, Vermeidung von unnötigen Strahlenexpositionen	Stellung pragmatisch gemäß innerbetrieblicher Regelung, Entscheidungskompetenz in Fragen des Strahlenschutzes, bei Gefahren unmittelbare Pflicht zum Eingreifen	<u>Eigenverantwortung für die Einhaltung von Schutzvorschriften im Rahmen seiner Bestellung</u>
Störfallbeauftragter	§ 58 a–d BImSchG 5. BImSchV	nur im Falle eines Störfalles Koordinationsaufgaben, Überwachung, Sicherheitsanalyse, Jahresbericht	ausreichende Stellung und Befugnisse für Koordinationsaufgaben, Stellungnahme zu Investitionsentscheidungen, kann Entscheidungsbefugnis erhalten	für die Koordination, soweit die Befugnisse reichen
Beauftragter für biologische Sicherheit	§ 16 VBG 102	Unterstützung und Beratung des Unternehmers	unmittelbar unter Projektleiter	keine Eigenverantwortung
Gefahrstoffbeauftragter	keine (freiwillig)	innerbetriebliche Regelung		
Gefahrgutbeauftragter	§§ 1 ff. GbV	Überwachung, Beratung, Empfehlungen, Jahresbericht	Stellungnahme zu Abweichungen von den Gefahrgutvorschriften, unmittelbares Vortragsrecht	keine Eigenverantwortung
Laserschutzbeauftragter	§ 6 VBG 93 bei Lasereinrichtungen der Klassen 3B oder 4	Überwachung des Betriebes der Lasereinrichtungen, Unterstützung des Unternehmers und Zusammenarbeit mit der Fachkraft für Arbeitssicherheit im Fachbereich Laserstrahlenschutz	Stabsfunktion ohne Weisungsbefugnis, Weisungsbefugnis kann aber erteilt werden, unmittelbares Vortragsrecht	keine Eigenverantwortung für den Betrieb von Lasereinrichtungen, Verantwortung kann aber übertragen werden
Brandschutzbeauftragter	keine, kann jedoch von den Sachversicherern gefordert werden (Ausnahme: im Bergbau gefordert)	ist im Einzelfall zu prüfen, je nach Art und Größe des Betriebes, Aufstellung von Alarm- und Brandschutzplänen, Organisation und Überwachung der Brandschutzkontrollen im Betrieb, Beratung des Betriebes, Ausbildung der Mitarbeiter	er sollte unmittelbar der Betriebsleitung unterstellt sein, keine Weisungsbefugnis, bei Gefahr im Verzug unmittelbare Pflicht zum Eingreifen	keine Eigenverantwortung für den Brandschutz, muß aber aufgrund seiner Fachkunde auf Gefahrenherde hinweisen.

Die obenstehende Tabelle stellt eine Orientierungshilfe im betrieblichen Beauftragtenwesen dar. Dort finden Sie Informationen über die rechtliche

Grundlage der Bestellung, die Aufgaben, die Verantwortlichkeit und die Kompetenzen einiger Betriebsbeauftragte.



Erklärungen:

- ASiG: Arbeitssicherheitsgesetz
- SGB: Sozialgesetzbuch
- BImSchG: Bundesimmissionsschutzgesetz
- StrlSchV: Strahlenschutzverordnung
- BImSchV: Bundesimmissionsschutzverordnung
- VBG: Verband der Berufsgenossenschaften
- GbV: Gefahrgut-Beauftragtenverordnung
- RöV: Röntgenverordnung

**Verordnung
für die Umsetzung von EURATOM-Richtlinien zum Strahlenschutz*)**

Vom 20. Juli 2001

Es verordnen

- die Bundesregierung auf Grund des § 2 Abs. 2 Satz 2, des § 7 Abs. 4 Satz 3, des § 9a Abs. 2 Satz 2, des § 10, des § 11 Abs. 1 Nr. 1 bis 3, Nr. 5 bis 8 und Abs. 2, des § 12 Abs. 1, des § 12b Abs. 6, des § 12c Abs. 4, des § 13 Abs. 2 Nr. 2 und Abs. 3, des § 21 Abs. 3 des Atomgesetzes in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), von denen § 2 Abs. 2, §§ 11 und 12 Abs. 1, § 12b Abs. 2, § 23 und § 54 Abs. 1 zuletzt geändert worden sind durch Artikel 1 des Gesetzes vom 3. Mai 2000 (BGBl. I S. 636, 1350) in Verbindung mit dem 2. Abschnitt des Verwaltungskostengesetzes vom 23. Juni 1970 (BGBl. I S. 821), des § 23 Abs. 3 und des § 54 Abs. 1 Satz 1 und 2 und Abs. 2 Satz 1 des Atomgesetzes in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), von denen § 2 Abs. 2, §§ 11 und 12 Abs. 1, § 12b Abs. 2, § 23 und § 54 Abs. 1 zuletzt geändert worden sind durch Artikel 1 des Gesetzes vom 3. Mai 2000 (BGBl. I S. 636, 1350), und auf Grund des § 2 Abs. 2 und 3, jeweils in Verbindung mit Abs. 5, des Eichgesetzes in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. März 1992 (BGBl. I S. 711) nach Anhörung der betroffenen Kreise,
- das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit auf Grund der §§ 10 und 54 Abs. 1 Satz 3 und Abs. 2 Satz 1 des Atomgesetzes in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), von denen § 10 durch Artikel 1 des Gesetzes vom 6. April 1998 (BGBl. I S. 694) geändert worden ist,
- das Bundesministerium für Gesundheit auf Grund des § 7 Abs. 2 des Arzneimittelgesetzes in der Fassung der Bekanntmachung vom 11. Dezember 1998 (BGBl. I S. 3586) in Verbindung mit Artikel 56 Abs. 1 des Zustän-

keitsanpassungs-Gesetzes vom 18. März 1975 (BGBl. I S. 705) und dem Organisationserlass vom 27. Oktober 1998 (BGBl. I S. 3288) im Einvernehmen mit dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, sowie

- das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen auf Grund des § 36 Abs. 3 des Gesetzes über Ordnungswidrigkeiten vom 19. Februar 1987 (BGBl. I S. 602) und des § 2 Abs. 2 des Gesetzes über das Luftfahrt-Bundesamt vom 30. November 1954 (BGBl. I S. 354), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 26. August 1998 (BGBl. I S. 2470):

Artikel 1

Verordnung
über den Schutz vor Schäden
durch ionisierende Strahlen
(Strahlenschutzverordnung – StrlSchV)

Inhaltsübersicht

Teil 1

Allgemeine Vorschriften

- § 1 Zweckbestimmung
- § 2 Anwendungsbereich
- § 3 Begriffsbestimmungen

Teil 2

Schutz von Mensch und
Umwelt vor radioaktiven Stoffen oder
ionisierender Strahlung aus der
zielgerichteten Nutzung bei Tätigkeiten

Kapitel 1

Strahlenschutzgrundsätze,
Grundpflichten und allgemeine Grenzwerte

- § 4 **4** Rechtfertigung
- § 5 **5** Dosisbegrenzung
- § 6 **6** Vermeidung unnötiger Strahlenexposition und Dosisreduzierung

*) Diese Verordnung dient der Umsetzung der Richtlinie 96/29/EURATOM des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlungen (ABl. EG Nr. L 159 S. 1), der Richtlinie 97/43/EURATOM des Rates vom 30. Juni 1997 über den Gesundheitsschutz von Personen gegen die Gefahren ionisierender Strahlung bei medizinischer Exposition und zur Aufhebung der Richtlinie 84/486/EURATOM (ABl. EG Nr. L 180 S. 22) und der Richtlinie 89/618/EURATOM des Rates vom 27. November 1989 über die Unterrichtung der Bevölkerung über die bei einer radiologischen Notstandssituation geltenden Verhaltensmaßnahmen und zu ergreifenden Gesundheitsschutzmaßnahmen (ABl. EG Nr. L 357 S. 31).

Teil 2

Schutz von Mensch und Umwelt vor radioaktiven Stoffen oder ionisierender Strahlung aus der zielgerichteten Nutzung bei Tätigkeiten

Kapitel 1

Strahlenschutzgrundsätze, Grundpflichten und allgemeine Grenzwerte

§ 4

Rechtfertigung

(1) Neue Arten von Tätigkeiten, die unter § 2 Abs. 1 Nr. 1 fallen würden, mit denen Strahlenexpositionen oder Kontaminationen von Mensch und Umwelt verbunden sein können, müssen unter Abwägung ihres wirtschaftlichen, sozialen oder sonstigen Nutzens gegenüber der möglicherweise von ihnen ausgehenden gesundheitlichen Beeinträchtigung gerechtfertigt sein. Die Rechtfertigung bestehender Arten von Tätigkeiten kann im Rahmen der §§ 17 und 19 des Atomgesetzes überprüft werden, sobald wesentliche neue Erkenntnisse über den Nutzen oder die Auswirkungen der Tätigkeit vorliegen.

(2) Medizinische Strahlenexpositionen im Rahmen der Heilkunde, Zahnheilkunde oder der medizinischen Forschung müssen einen hinreichenden Nutzen erbringen, wobei ihr Gesamtpotenzial an diagnostischem oder therapeutischem Nutzen, einschließlich des unmittelbaren gesundheitlichen Nutzens für den Einzelnen und des Nutzens für die Gesellschaft, abzuwägen ist gegenüber der von der Strahlenexposition möglicherweise verursachten Schädigung des Einzelnen.

(3) Welche Arten von Tätigkeiten nach den Absätzen 1 und 2 nicht gerechtfertigt sind, wird durch gesonderte Rechtsverordnung nach § 12 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 des Atomgesetzes bestimmt.

§ 5

Dosisbegrenzung

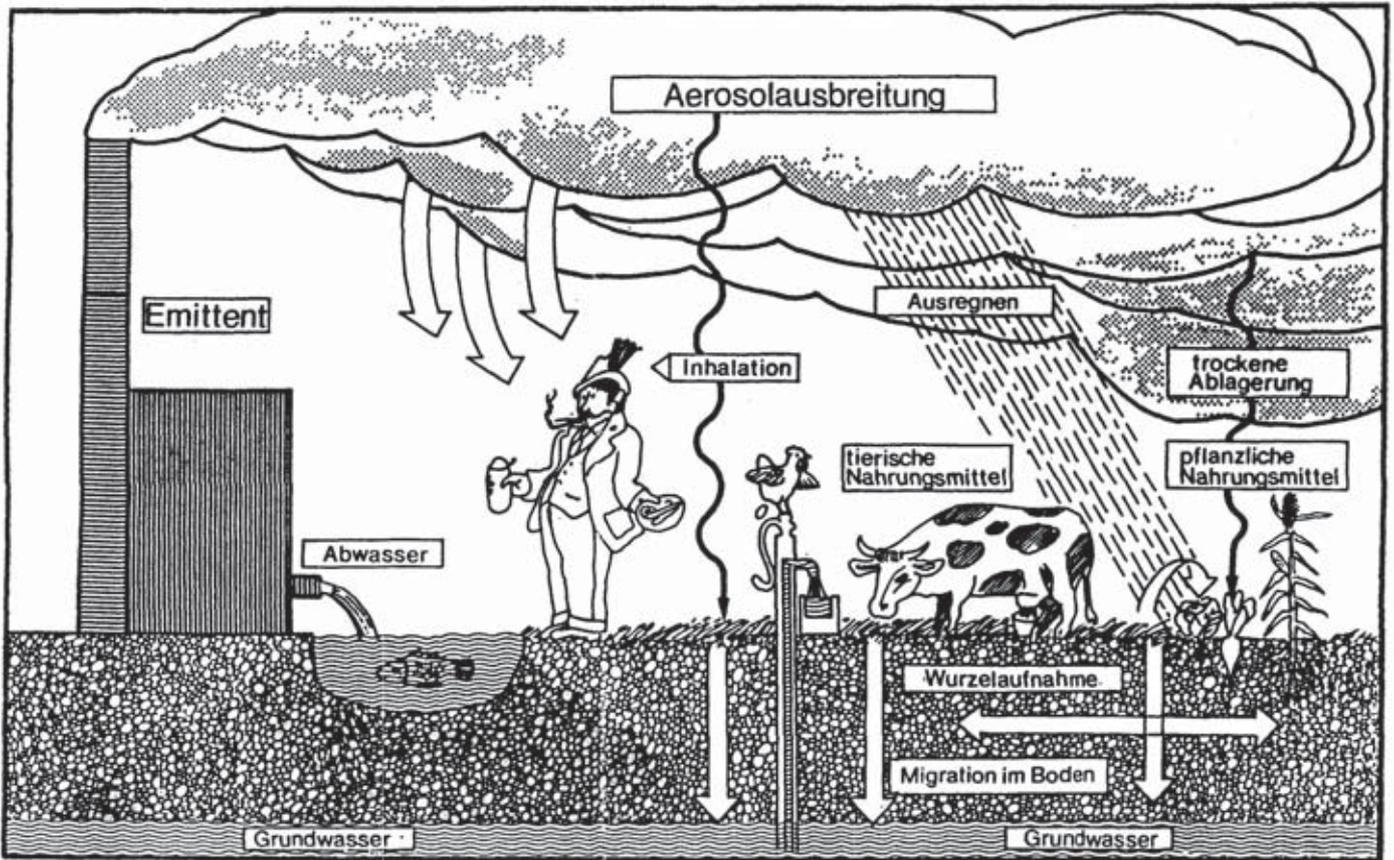
Wer eine Tätigkeit nach § 2 Abs. 1 Nr. 1 Buchstabe a bis d plant, ausübt oder ausüben lässt, ist verpflichtet dafür zu sorgen, dass die Dosisgrenzwerte der §§ 46, 47, 55, 56 und 58 nicht überschritten werden. Die Grenzwerte der effektiven Dosis im Kalenderjahr betragen nach § 46 Abs. 1 für den Schutz von Einzelpersonen der Bevölkerung 1 Millisievert und nach § 55 Abs. 1 Satz 1 für den Schutz beruflich strahlenexponierter Personen bei deren Berufsausübung 20 Millisievert.

§ 6

Vermeidung unnötiger Strahlenexposition und Dosisreduzierung

(1) Wer eine Tätigkeit nach § 2 Abs. 1 Nr. 1 plant oder ausübt, ist verpflichtet, jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt zu vermeiden.

(2) Wer eine Tätigkeit nach § 2 Abs. 1 Nr. 1 plant oder ausübt, ist verpflichtet, jede Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb der Grenzwerte so gering wie möglich zu halten.



Grenzwerte der Körperdosen

Alte Verordnungen

Körperdosis	Grenzwerte im Kalenderjahr	
	Kategorie A	Kategorie B
1. Effektive Dosis	50 mSv	15 mSv
Teilkörperdosis: Keimdrüsen, Gebärmutter, rotes Knochenmark	50 mSv	15 mSv
2. Teilkörperdosis: alle Organe und Gewebe, soweit nicht unter 1., 3. oder 4. genannt	150 mSv	45 mSv
3. Teilkörperdosis: Schilddrüse, Knochenoberfläche, Haut , soweit nicht unter 4. gen.	300 mSv	90 mSv
4. Teilkörperdosis: Hände , Unterarme, Füße, Unterschenkel, Knöchel, einschließlich der dazugehörigen Haut	500 mSv	150 mSv

Personen unter 18 Jahren	1/10 Kategorie A
--------------------------	------------------

In drei aufeinanderfolgenden Monaten eines Kalenderjahres	½ Jahresgrenzwert
---	-------------------

Lebensarbeitszeit (Summe aller Jahresdosen)	400 mSv
---	---------

Frauen im gebärfähigen Alter	5 mSv pro Monat
------------------------------	-----------------

Novellierte Verordnungen

Grenzwerte im Kalenderjahr		Körperdosis
Kategorie A	Kategorie B	
20 mSv	6 mSv	Effektive Dosis
50 mSv		Organdosis: Keimdrüsen, Gebärmutter, rotes Knochenmark
150 mSv	15 mSv	Organdosis: Augenlinse
150 mSv		Organdosis: Dickdarm, Lunge Magen, Blase, Brust, Leber, Speiseröhre andere Organe
500 mSv		Organdosis: Haut, Hände , Unterarme, Füße, Knöchel

1 mSv (6 mSv)	Personen unter 18 Jahren
----------------------	--------------------------

400 mSv	Lebensarbeitszeit (Summe aller Jahresdosen)
---------	---

2 mSv pro Monat	Frauen im gebärfähigen Alter
------------------------	------------------------------

1 mSv	Körperdosis des ungeborenen Kindes für die Zeit der Schwangerschaft
--------------	---

**Begleitunterlagen:
Großes Radiometrisches Praktikum
HM**

c: Kontinuierliche Nebelkammer nach

Langsdorf

Prof. Dr. Schwankner
Türkenstraße 78
80799 München
Lab.: 089/1265-2608
Büro.: 089/1265-2667
priv.: 089/33019260

we wir experimentieren

G 4011E

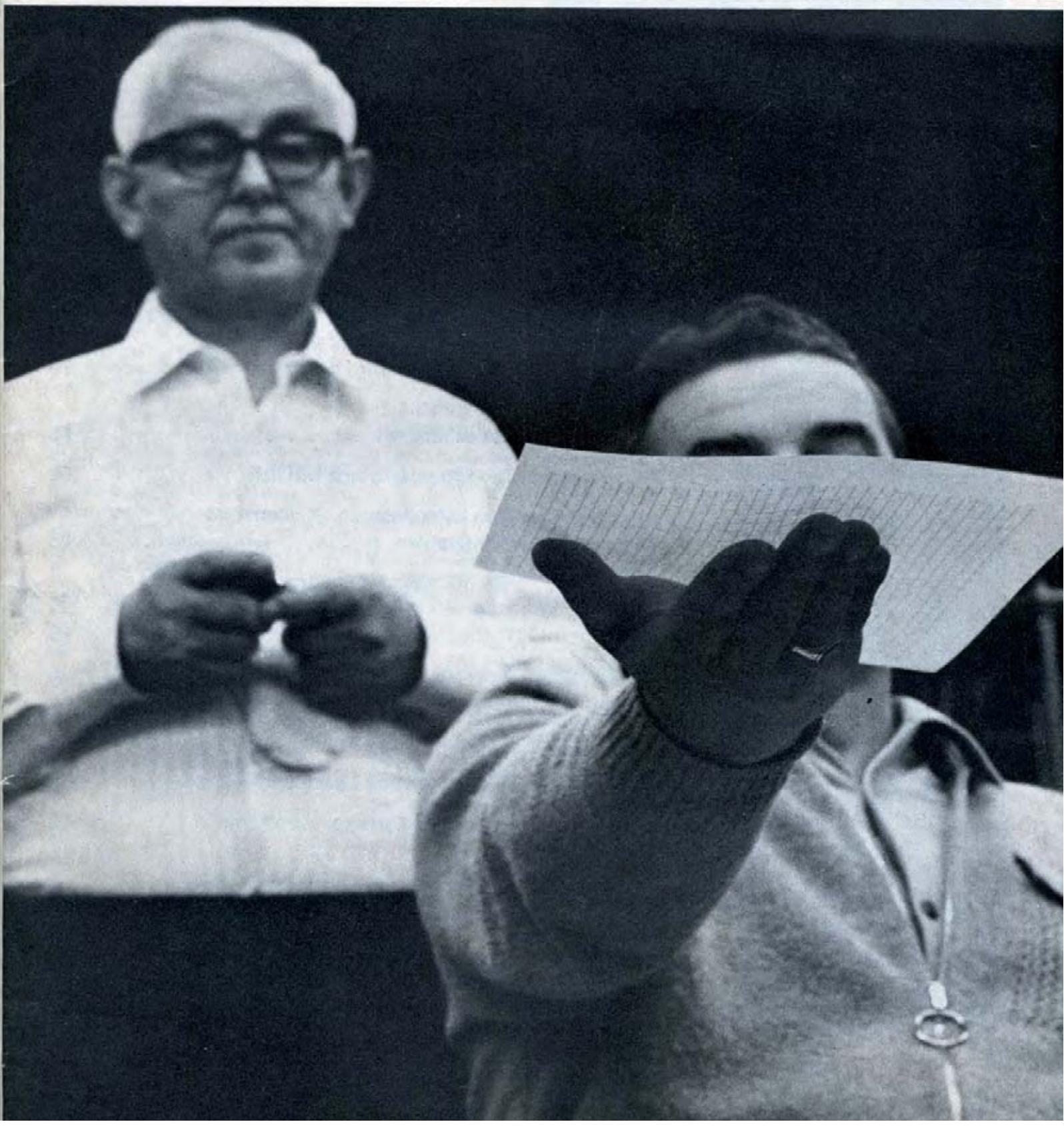
Jugendzeitschrift für Natur und Technik



AULIS-VERLAG
DEUBNER & CO KG KÖLN

3

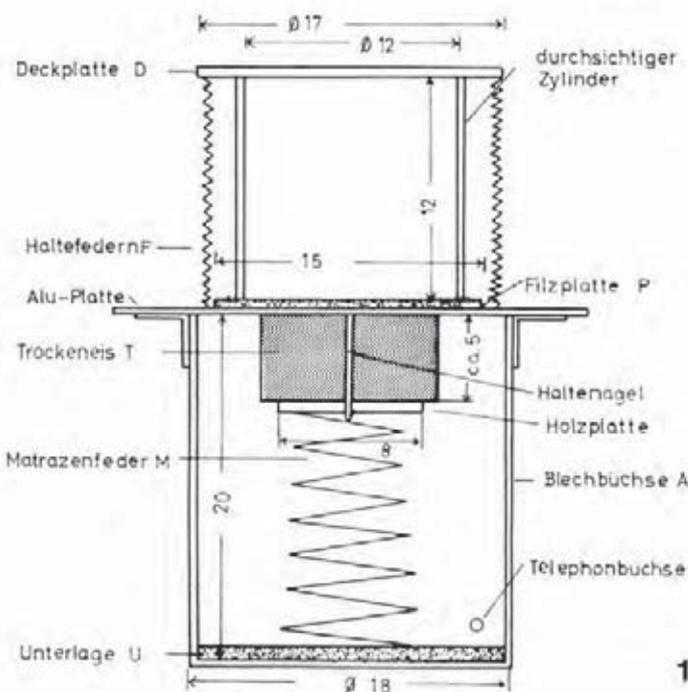
15. Jahrgang
März 1975



Die kontinuierliche Nebelkammer

Eine kontinuierliche Nebelkammer ist ein sehr wichtiges Gerät der Atomphysik zum Nachweis von geladenen Elementarteilchen sowie Röntgenstrahlung und deren Eigenschaften. Ein derartiges Gerät kann man sich selbst zusammenbauen und sehr interessante Experimente damit anstellen.

Die Funktion der kontinuierlichen Nebelkammer beruht darauf, daß Alkoholdampf durch ein Gas aus einer wärmeren in eine sehr kalte Schicht diffundiert. Zwischen diesen beiden Schichten befindet sich ein ständig mit Alkoholdampf übersättigtes Raumgebiet, in dem Teilchenbahnen durch Kondensation des Dampfes an den von



1

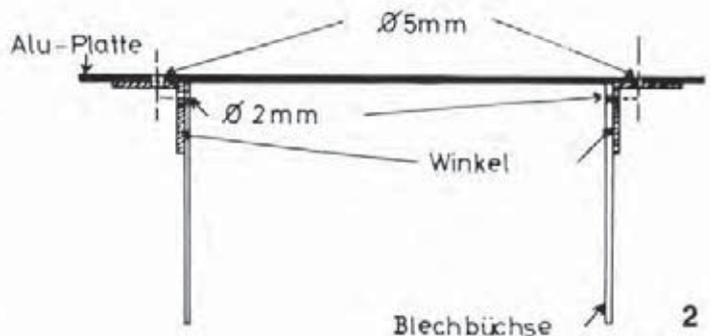


den Teilchen erzeugten Ionen in feinsten Flüssigkeitströpfchen sichtbar werden.

Die gegenüber der Raumtemperatur sehr kalte Schicht wird mit einem Stück Trockeneis hergestellt (die Trockeneistemperatur beträgt etwa -70°C). Störende Fremdionen werden durch eine elektrische Saugspannung beseitigt.

Abb. 1 zeigt die Kammer im Querschnitt. Sie besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen: dem Gefäß für Trockeneis (A) und dem Zylinder für die Beobachtung (Z). Als (A) verwendet man entweder einen Marmeladekübel oder eine Dose für Kindernahrungsmittel mit ca. 17–20 cm \varnothing und einer Höhe von 20 cm.

An ihren Rand bringt man 4 je um 90° versetzte Metallwinkel (Abb. 2) an, die je eine 5-mm- und eine 2-mm-Bohrung besitzen.

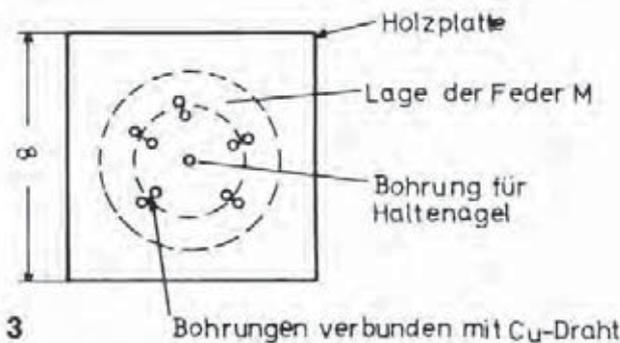


2

Es ist darauf zu achten, daß die 4 Winkel gut befestigt werden. Am besten eignen sich dazu Nieten, da diese kaum hervorstehen und das Trockeneis nicht stören.

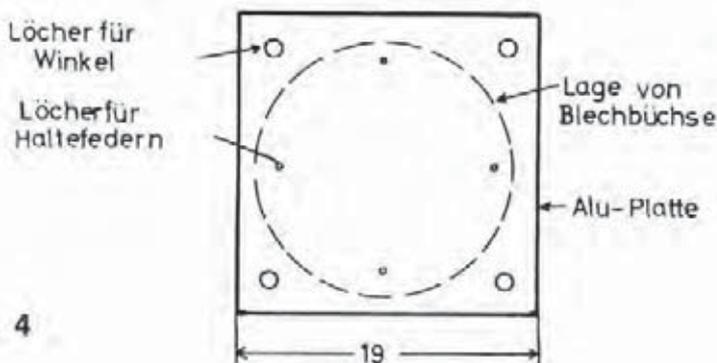
Nun wird am Diagonalschnittpunkt der Aluplatte P auf der Unterseite ein 2–5 mm starker Nagel mit Zweikomponentenkleber angeklebt (Abb. 1). Bei der Inbetriebnahme wird nun durch die Mitte der Eisplatte mit einem erwärmten Nagel gleicher Stärke ein durchgehendes Loch „gebohrt“. Setzt man nun die Aluplatte auf, so wird das Eis ohne umständliches Verrücken festgehalten. Der Nagel durchstößt auch noch die Holzplatte im Diagonalschnittpunkt, da ja das Eis immer weniger wird.

In den unteren Teil der Dose klebt man nun ein Stück Schaumgummi (a) als Wärmeisolation gegenüber der Feder (M), die nachher das Trocken-eis an die Platte (P) drücken soll. Die Feder beschafft man sich am besten in einer Polsterei. Sie wird auf die richtige Länge zugeschnitten, aber man muß darauf achten, daß sie bei aufgesetzter Scheibe einen spürbaren Druck auf diese ausübt. An einem Ende der Feder befestigt man nun ein quadratisches 3–5 mm starkes Sperrholz Brettchen mit der Kantenlänge von ca. 8 cm (Abb. 3).



Man bohrt sich in das Brettchen kleine Löcher und befestigt die Feder mit dünnem Kupferdraht.

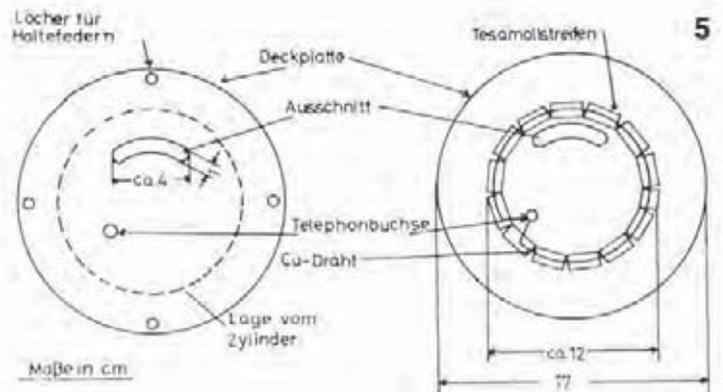
Die Platte (P) besteht aus 3 mm starkem Aluminium und ist quadratisch. Ihre Ecken müssen auf alle Fälle 2–3 cm über den Rand von (A) ragen (Abb. 4).



Im Abstand 1 cm von den Ecken bohrt man nun 4 Löcher mit 5 mm in die Platte, so daß diese mit den Löchern der Winkel zur Deckung kommen. Mit Flügelschrauben von 4 mm \varnothing kann man so den Deckel an A befestigen. Vier weitere kleine Löcher dienen zur Befestigung der Federn von Z. Dann beklebt man die Platte zunächst mit einer Schicht Filz. Wenn diese unter Druck 12 Stunden getrocknet ist, wird eine zweite Filzschicht aufgeklebt. Die Filzschicht kann aus 2 Lagen Dekorationsfilz (1 mm; aufbügelbar) oder 1 Lage Normalfilz (2 mm stark) hergestellt werden. Die Trocknungszeit beträgt jetzt 2 Tage. Beim Trocknen muß die Platte immer stark beschwert sein, um ein festes Abbinden ohne Luftblasen zu gestatten.

Die 8 Löcher werden nun mit einem spitzen Gegenstand vorsichtig durchgestoßen (Dosenöffner). Im unteren Teil von A wird nun ein Loch für eine Telefonbuchse (Radiogeschäft) gebohrt und diese eingeschraubt. Sie hat jetzt leitende Verbindung mit dem Metall der Blechbüchse und über dieses mit P.

Ein Problem stellt der Zylinder Z dar. Er soll 12 cm hoch sein (**von diesem Wert ja nicht abweichen!**) und 12 cm Durchmesser haben. Einen derartigen Zylinder aus Plexiglas bekommt man für ca. DM 4,- von der Firma Sahlberg, München, Blumenstraße. Sollte man ein Plexiglasrohr nicht bekommen können, so läßt man sich von einem Glaser ein geeignetes Einmachglas in 12 cm Höhe absprengen. Man muß beim Zylinder nur darauf achten, daß er **eben** abgeschnitten wird. Die Deckplatte des Zylinders sägt man mit einer Laubsäge aus einer ca. 3 mm starken Plexiglasplatte aus (Bastelgeschäft). Ihr Durchmesser soll größer sein als der vom Zylinder und etwas kleiner als der von A (Abb. 5).



In den Rand des Deckels bohrt man um je 90° versetzte vier kleine Löcher für die Befestigungsfedern (Abb. 1). Zur Mitte hin wird ein etwa bohnenförmiger Ausschnitt von 1,5 cm Breite und 4 cm Länge eingesägt, um in der Kammer zu operieren. Außerdem wird noch ein Loch für eine Telefonbuchse gebohrt. Mit Tesamollstückchen von ca. 1,5 cm Länge, die selbstklebend sind, stellt man einen konzentrischen Ring auf der Deckelunterseite (Abb. 5 b) her. Dieser wird später den Alkohol aufnehmen. Ein Ring aus ca. 0,5–1 mm starkem Kupferdraht wird an der Telefonbuchse mittels einer Mutter so befestigt, daß dieser ständig auf die Tesamollstückchen drückt. Das hat den Vorteil eines großen Blickfeldes und außerdem werden durch den Alkohol sich eventuell lösende Stückchen trotzdem festgehalten. Damit wäre die Kammer als solche fertig.

Man benötigt nun noch einige Dinge zur Inbetriebnahme:

1. 80%igen Methylalkohol. Sollte man ihn auch im Schullabor nicht bekommen, so kann man auch den **weniger geeigneten** 70%igen iso-Propylalkohol verwenden (%-Angaben nicht verändern, sie sind optimal!).

2. Das Trockeneis dürfte wohl am schwierigsten zu beschaffen sein. Man kann es bei Eisvertriebsgesellschaften (Jopa) manchmal umsonst bekommen. Sonst wende man sich an Kühlhäuser, Krankenhauslaboratorien, Lagerversorgungen oder an chemisch-physikalische und biologische Institute der Universitäten und Technischen Hochschulen. Auch Schullaboratorien verfügen manchmal über Trockeneismaschinen. Meistens bekommt man dort bei Vorsprache das Gewünschte kostenlos. Ein größeres Stück hält sich, in Zeitungspapier eingewickelt, bis zu 3 Tagen. Da Trockeneis eine Temperatur von -78°C aufweist, darf es **nie** mit bloßen Händen, sondern **nur kurze Zeit** mit **dicken** Winterhandschuhen (denen das nichts macht) angefaßt werden.

3. Mit 2 Objektträgerhälften wird der bohnenförmige Ausschnitt in der Deckplatte verschlossen.

4. Präparate: Da ein Schüler kaum radioaktive Präparate bekommt, muß er sich mit einem Gasglühstrumpf behelfen, wie er in Sportgeschäften, die Campinglampen führen, oder in Kaufhäusern erhältlich ist. Ein etwa 1 cm^2 großes Stück davon

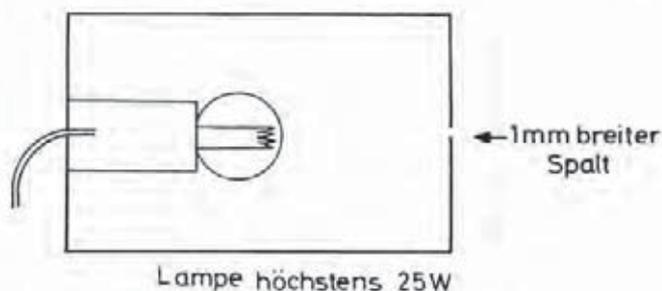
wird an einen ca. 20 cm langen 1 mm starken Kupferdraht geklebt. Das ThO_2 , aus dem der Glühstrumpf besteht, ist leicht radioaktiv. Jedoch sieht man schon damit ein kleines „Feuerwerk“ in der Kammer.

Auch Wolfram-Schweißelektroden, die ca. 2%–3% Th enthalten, eignen sich als Präparate.

Dem fortgeschrittenen Experimentator empfehle ich ein Ra 226-Präparat Aktivität $<0,1\text{ nCu}$, das man vielleicht unter **Aufsicht** eines Lehrers verwenden darf.

5. Ohne richtige Beleuchtung funktioniert die Nebelkammer natürlich nicht, da man nichts sieht. Entweder verwendet man eine Reuterlampe mit Spalt (Schule!) oder baut sich etwas ähnliches weniger geeignetes.

Die Lampe muß direkt über der Platte (P siehe Abb. 1) mit Stativ gehalten und im Zweifelsfalle



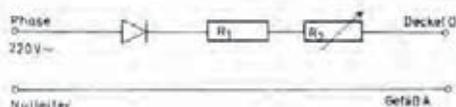
nur wenig verrückt werden. Da die Zylinderwand in dieser Höhe immer beschlagen ist, muß man die Einstrahlungsstelle vor jeder Beobachtung abwischen. Als Beleuchtungsquelle eignet sich **hervorragend** ein Diaprojektor mit einem Dia im Strahlengang, das bis auf einen winzigen lichtdurchlässigen Schlitz mit schwarzem Papier beklebt ist.

6. Einen letzten wichtigen Punkt stellt die Saugspannung dar. Sie soll störende Fremdionen und evtl. Staub innerhalb der Kammer „niederschlagen“.

Arbeitet man in der Schule mit einem **Lehrer** zusammen, so kann man an den Deckel (Telephonbuchse) eine variable **positive** Saugspannung von ca. 1000–3000 V unter Vorschaltung eines 10-M Ω -Widerstandes benützen. Arbeitet man dagegen allein, so geht folgendes:

Man schaltet an 220 V an. Ein Gleichrichter sorgt für Gleichspannung, ein Schutzwiderstand von 1 M Ω und einem in Reihe dazu geschalteten Potentiometer von 10 M Ω (5 M Ω) gewähren

Sicherheit. **Trotzdem sollte man die fertige Schaltung (Abb. 7) zuerst dem Physiklehrer oder Fachmann zeigen! Vorsicht!**



Die Saugspannung ermöglicht vielfach erst das Arbeiten mit der Kammer. Durch Veränderung von R_2 kann man die Spuren „scharf einstellen“.

Wem aber das als zu gefährlich erscheint, der benütze einen Wollappen und reibe den Deckel, so daß dieser elektrostatisch geladen wird. Bei einer Berührung jedoch ist die Ladung **sofort weg**.

Die Inbetriebnahme ist äußerst einfach:

1. Man schneidet ein bis 5 cm dickes Trockeneisstück mit einer Handsäge (nachher abtrocknen) ab. Es muß einem **Quader** ähnlich sein (Handschuhe!) und bohrt mit erhitztem Nagel das Halteloch in das Eis!

2. Man bringt dieses Stück auf das Brettchen der Feder, legt die Platte auf und verschraubt diese mit den Flügelschrauben.

Es ist zweckmäßig, den Trockeneisblock vorher mit ca. 20 ml Spiritus zu übergießen, um eine Kondensation der Luftfeuchtigkeit auf der Trockeneisplatte zu verhindern, die die Wärmeleitfähigkeit beeinträchtigen könnte.

3. Nach ca. 5 Minuten wird sich auf dem Filz die Luftfeuchtigkeit niederschlagen („Reif“). Jetzt 2–5 ml 80%igen Methylalkohol daraufgeben und Zylinder auf seinen Platz stellen. (Wenn er wegen Biegungen der Platte nicht dicht abschließt, prüfen durch Blasen! Schraubenstellung verändern!)

4. Tesamoll im Deckel mit viel Alkohol (Pipette) begießen, so daß er diesen gerade noch hält. Man dreht den Deckel schnell um, setzt ihn auf den Zylinder und befestigt ihn mit den 4 Federn. Diese müssen so stark ziehen, daß der Zylinder in den Filz eingedrückt wird (Blasprobe).

5. Die **positive** Saugspannung wird an den **Deckel** gelegt und die negative an das Gehäuse, aber noch nicht eingeschaltet.

6. Die Lampe wird in Stellung gebracht. Nach 10–15 Minuten kann man vielleicht schon die Wirkungen der atmosphärischen Strahlung sehen. Wenn nicht, dann schaltet man die Saugspannung ein und hält ein Präparat (Glühstrumpf) etwa 2–3 mm über den Boden (Stativ). Bei schwacher Zimmerbeleuchtung kann man senkrecht von oben oder schräg durch den Zylinder die Spuren sehen. Mittels Saugspannung und Lampe stellt man den bestmöglichen Kontrast ein. Die kurzen, dicken Spuren rühren von α -Teilchen (= Heliumkernen) und die dünnen langen von β -Teilchen (Elektronen) oder Sekundärstrahlung der Röntgenstrahlen her. Mittels Pinzetten und Kupferdrähten kann man im Kammerinneren gut arbeiten. Experimente wie etwa Abschirmung von β -Teilchen, Reichweitenverkürzung mittels eingelegten Magneten und Rutherfordhyperbeln, Streuung von α -Teilchen an dünnen Folien (Au, Ag, Al, Malergeschäft!), lassen sich ohne weiteres durchführen.

Funktioniert die Nebelkammer nicht, so muß man Alkohol nachfüllen, die Saugspannung nachstellen und die Lampe nachstellen. Auch muß der Glaszylinder unten lichtdurchlässig sein. Ist der Zylinder undicht, so muß man die Schrauben nachstellen, oder die Federn verstärken. Funktioniert es dann immer noch nicht, so schreibt mir bitte, denn ich habe 2 Jahre an dieser Kammer gearbeitet. Hier meine Adresse:

Robert Schwankner
822 Traunstein, Scheibenstraße 18

Alpha-Zerfall in einer kontinuierlichen Nebelkammer Zusammenhang zwischen Zerfallskonstante und Energie

VON ROBERT J. SCHWANKNER UND MARKUS EISWIRTH

Mit 11 Abbildungen und 1 Tabelle

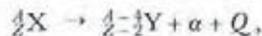
Mit der von Langsdorf entwickelten kontinuierlichen Nebelkammer kann die Energie von Alphaumwandlungsprozessen bestimmt werden. Die Korrelation zwischen Zerfallskonstante und -energie (Geiger-Nuttal- und Gallagher-Rasmussen-Beziehung) läßt sich so einfach demonstrieren und gestattet, Einblicke in die Kernstruktur zu gewinnen.

„Komplex ist die Realität,
doch einfach sind ihre Prinzipien.“ (M. EIGEN)

1 Einleitung

α -Zerfall ist das am längsten bekannte kernphysikalische Phänomen. Es wurde 1896 von H. BECQUEREL entdeckt, der bemerkte, daß Uranverbindungen photographische Platten schwärzen (Abb. 1) [1 bis 3]. Genauere Untersuchungen dieser Erscheinung, die auf Vorschlag von M. CURIE als Radioaktivität bezeichnet wurde, führten zu dem Ergebnis, daß drei Strahlungsarten existieren, nämlich α -, β - und γ -Strahlen.

Die α -Strahlen wurden von RUTHERFORD und Mitarbeitern 1908 als zweifach geladene Heliumatome identifiziert (bzw. als Kerne von ${}^4_2\text{He}$) Helium [4]. Der α -Zerfall läßt sich demnach allgemein formulieren als



wobei A die Anzahl der Nukleonen, Z die Protonenzahl und Q die Zerfallsenergie bedeuten.

2 Zerfallskinetik

Die beobachtete Aktivität ist proportional der vorhandenen Menge an radioaktivem Material und nimmt mit der Zeit ab. Liegen zur Zeit $t_0 = 0$ N_0 Kerne vor, so hat sich zur Zeit t ihre Anzahl auf $N(t)$ vermindert:

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t). \quad (1)$$

Die Zerfallskonstante λ ist für jedes Radionuklid charakteristisch. Nur bei der Emission von Konversionselektronen und bei K-Einfang ändert sich λ geringfügig (<1%) mit der chemischen Umgebung, d. h. λ hängt von der Elektronendichte am Kern ab. Die Halbwertszeit eines Nuklids $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ ist die Zeit, nach der 50% des Materials zerfallen sind. Gleichung (1) ist ein statistisches Gesetz; es besagt für jeden ein-

zelnen Kern, daß er in einem Zeitintervall dt mit einer Wahrscheinlichkeit von λdt zerfallen wird. Dies wird durch Differentiation und Umformung von (1) deutlich:

$$-\frac{dN}{N} = \lambda dt. \quad (2)$$

Die Halbwertszeiten natürlicher α -Strahler liegen zwischen 10^{-7} Sekunden und 10^{10} Jahren, also in einem Bereich, der 25 Größenordnungen umfaßt. Nur wenige Größen in der Physik können in so weiten Grenzen variieren. Ein anderes Beispiel ist die elektrische Leitfähigkeit von Festkörpern mit einer Variationsbreite von 30 Größenordnungen, von 10^{-20} bis $10^{10} \frac{1}{\Omega \text{ cm}}$ [5].

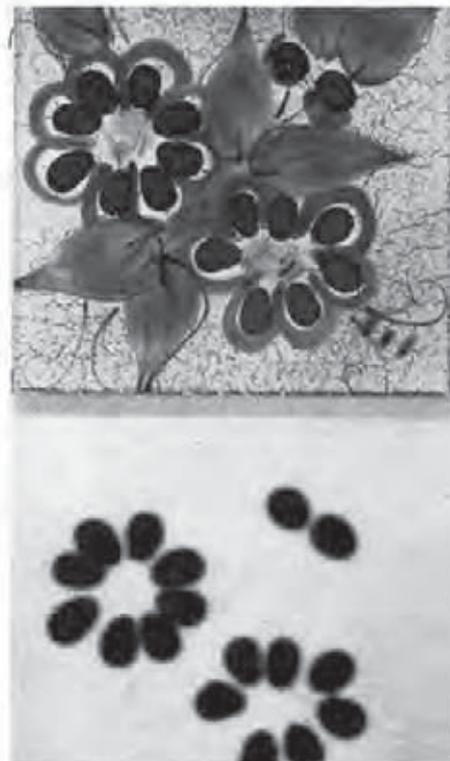


Abb. 1. Autoradiogramm einer Fliese. Die orangefarbenen Blätter enthalten Uran(VI)-oxid.

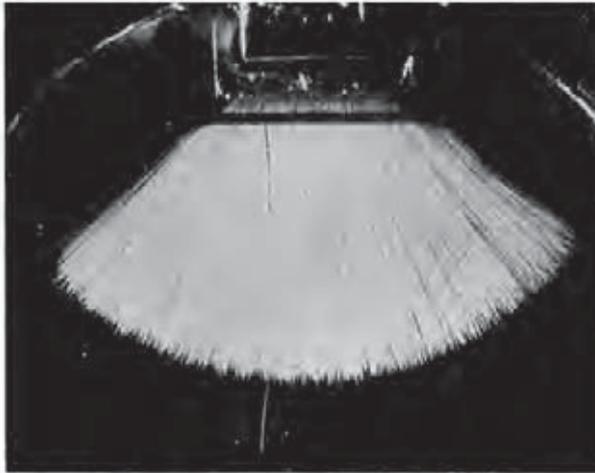


Abb. 2. α -Spuren von ^{214}Po Polonium mit etwa gleicher Länge. Die längere Spur stammt vom Zerfall eines angeregten Zustands von ^{214}Po Polonium, der in einem von 350 000 Fällen durch β -Zerfall aus ^{214}Bi Bismut gebildet wird (aus [17]) wiedergegeben mit Genehmigung des Springer-Verlags, Berlin).

3 Reichweite und Energie von α -Teilchen

Eine bemerkenswerte Eigenschaft von α -Strahlen, die bei einem bestimmten Zerfallsprozess emittiert werden, ist die Tatsache, daß sie alle gleiche Reichweite besitzen. Dies läßt sich am besten in einer Nebelkammer demonstrieren, wie sie 1911 von WILSON entwickelt wurde. Ein α -Teilchen ionisiert entlang seiner Flugbahn Gasmoleküle, die als Kondensationskeime für Wassertröpfchen wirken, so daß die Bahn der α -Strahlen in Form von Nebelspuren etwa gleicher Länge sichtbar wird (Abb. 2). Dabei treten statistische Unterschiede auf, da die Anzahl der Ionisationsvorgänge und die dabei übertragene Energie nicht absolut konstant sind [6]. Die (mehr oder weniger) konstante Reichweite entspricht einer definierten Energie der α -Teilchen, die aus der Zerfallsenergie Q mit Hilfe des klassischen Energie- und Impulserhaltungssatzes berechnet werden kann:

$$Q = E_\alpha + E_Y, \quad (3)$$

(E_Y = Rückstoßenergie des Kernes Y,
 E_α = kinetische Energie des α -Teilchens)

$$E_\alpha = Q \frac{m(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}Y)}{m(\frac{1}{2}\text{He}) + m(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}Y)}$$

Zahlenmäßige Auswertung von Gleichung (4) zeigt, daß fast die gesamte Zerfallsenergie (98–99%) auf das α -Teilchen übertragen wird, da es sehr viel leichter ist als alle bekannten α -Strahler.

Naturgemäß hängt die Reichweite von α -Strahlen nicht nur von ihrer Energie E_α , sondern auch von Temperatur, Druck und Art des Gases ab. Daher kann

man die α -Energien des Zerfalls verschiedener Kerne bestimmen und vergleichen, indem man ihre Reichweiten in einer Nebelkammer unter identischen Bedingungen beobachtet. Aus der gemessenen Reichweite $R(T, p)$ bei einer Temperatur T (in K), einem Druck p (in mbar) und einem Wasserdampfpartialdruck p_w (in mbar) berechnet man üblicherweise die Reichweite R_0 bei 15 °C und 1013 mbar nach der Formel [7]

$$R_0 = R(T, p) \frac{288 \text{ K}}{T} \cdot \frac{p - 0,145 p_w}{1013 \text{ mbar}}. \quad (5)$$

Die Energie E_α (in MeV) kann aus R_0 (in cm) mit einem empirischen Gesetz von GEIGER [7] erhalten werden

$$E_\alpha = 2,18 R_0^{2/3}.$$

Genauere Messungen von E_α können mit Halbleitendetektoren oder über die Krümmung der Flugbahnen im Magnetfeld durchgeführt werden.

Die Energien von α -Teilchen liegen zwischen etwa 4 und 9 MeV. Ihre theoretische Unschärfe $\Delta E \approx \hbar/T_{1/2}$ (nach der Heisenberg-Relation) ist auch für kurzlebige Nuklide ($T_{1/2} \approx 10^{-7}$ s) sehr klein (ungefähr 10^{-7} eV). α -Zerfälle zeichnen sich daher durch eine extrem scharfe Energie aus (deren Unschärfe sehr viel kleiner ist als die Genauigkeit experimenteller Bestimmungen).

Abbildung 3 zeigt ein α -Spektrum verschiedener Plutonium-Isotope, das mit einem modernen α -Spektrometer erhalten wurde.

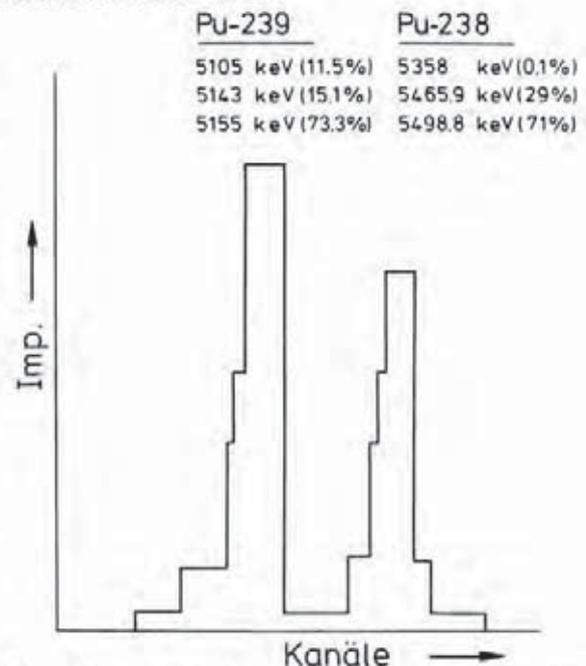


Abb. 3. Geglättetes α -Spektrum einer Plutonium-Probe, die 0,0015% ^{238}Pu Plutonium, 99,9714% ^{239}Pu Plutonium und 0,027% ^{240}Pu Plutonium enthält.

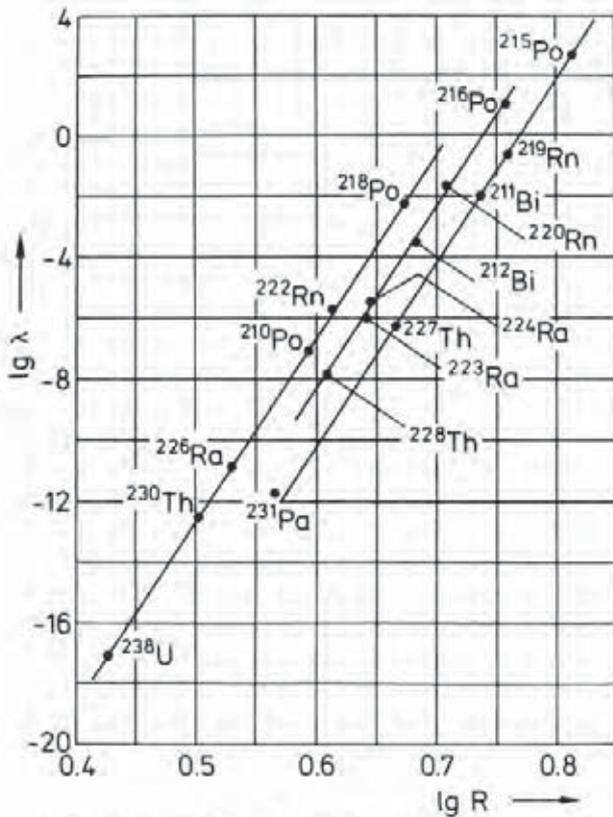


Abb. 4. Graphische Darstellung von $\lg \lambda$ gegen $\lg R$ für die natürlichen Zerfallsreihen (Geiger-Nuttall-Regel).

4 Korrelationen zwischen Lebensdauer und Zerfallsenergie

Bei allen Zerfallsprozessen wird beobachtet, daß Radionuklide mit kurzer Halbwertszeit ziemlich hochenergetische Strahlung aussenden, während langlebige Kerne niedrige Zerfallsenergien aufweisen.

4.1 Die Geiger-Nuttall-Regel

GEIGER und NUTTALL [8 bis 10] waren die ersten, die eine Korrelation zwischen Zerfallskonstante und Reichweite (d. h. Energie) für α -Strahler aufstellten:

$$\ln \lambda = a + b \ln R_0 \quad (7)$$

In dieser Gleichung, die für alle natürlichen Zerfallsreihen gilt, ist b eine allgemeine Konstante, während a innerhalb einer Zerfallsreihe konstant ist, aber für jede einzelne einen anderen Wert aufweist (Abb. 4). Die Geiger-Nuttall-Regel versagt, wenn man sie auf künstliche α -emittierende Radionuklide anwendet.

4.2 Die Gallagher-Rasmussen-Beziehung

1957 schlugen GALLAGHER und RASMUSSEN [11] aufgrund theoretischer Überlegungen (s. Abschn. 5)

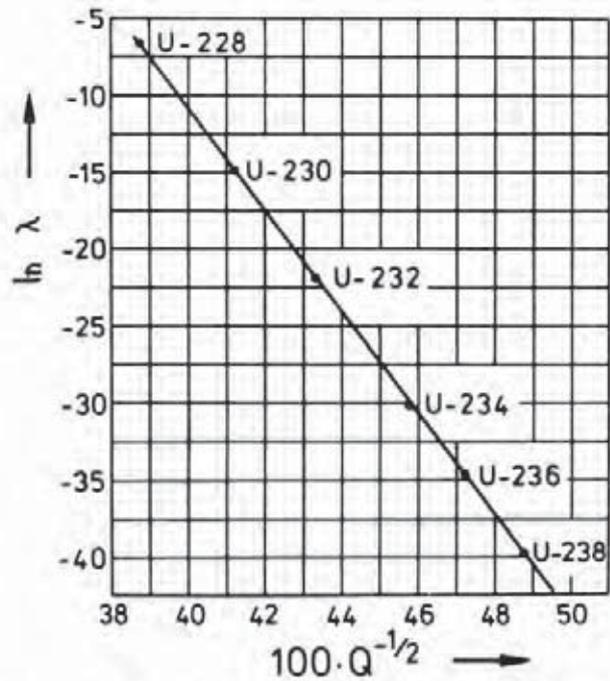


Abb. 5. Graphische Darstellung von $\ln \lambda$ gegen $Q^{-1/2}$ für die Isotope von Uran (Gallagher-Rasmussen-Beziehung).

Masse	λ [s ⁻¹]	E_α [MeV]	Q_α [MeV]	$\ln \lambda$	$Q_\alpha^{-1/2}$
238	$4.917 \cdot 10^{-18}$	4.196	4.27	-39.854	0.4841
236	$9.38 \cdot 10^{-16}$	4.494	4.5715	-34.602	0.4677
234	$9.008 \cdot 10^{-14}$	4.774	4.857	-30.038	0.4538
232	$3.065 \cdot 10^{-10}$	5.32	5.4133	-21.906	0.4298
230	$3.86 \cdot 10^{-7}$	5.889	5.9932	-14.77	0.4085
228	$1.256 \cdot 10^{-3}$	6.68	6.7993	-6.68	0.3835

Tab. 1. Zerfallskonstanten und -energien der g-g-Isotope von Uran (aus [18]).

eine andere allgemeinere Regel vor, die mit Erfolg auf mehr α -Strahler und über 25 Größenordnungen von λ angewandt werden kann:

$$\ln \lambda_\alpha = -\frac{a}{\sqrt{Q}} + b \quad (8)$$

(λ_α ist die partielle α -Zerfallskonstante.)

Die Werte von a und b hängen nur von der Protonenzahl Z ab.

Die Gallagher-Rasmussen-Beziehung stimmt sehr gut für Kerne mit einer geraden Anzahl von Protonen und Neutronen (g-g-Kerne), solange nur Zerfälle in den Grundzustand oder den ersten angeregten Zustand des Tochterkernes betrachtet werden. Abbil-

Abbildung 5 zeigt die graphische Darstellung von $\ln \lambda$ gegen \sqrt{Q} für die geraden Isotope von Uran (Tab. 1). Man erhält hervorragende Korrelation ($r^2 = 0,99993$) mit $a = 331,57$ und $b = 120,55$. Man beachte, daß bei einer Änderung von Q um 1 MeV λ um 4 Größenordnungen variiert.

Bei Kernen mit einer ungeraden Anzahl von Protonen und/oder Neutronen ist die Halbwertszeit wesentlich größer, als sich durch die Gallagher-Rasmussen-Beziehung ergibt. Das Verhältnis zwischen tatsächlicher (λ_e) und vorhergesagter (λ_p) Zerfallskonstante nennt man Hinderungsfaktor F . Er stellt ein Maß für die »Verbotenheit« des α -Zerfalls dar:

$$F = \frac{\lambda_e}{\lambda_p} = \frac{\lambda_e}{\exp\left(-\frac{a}{\sqrt{Q}} + b\right)} \quad (9)$$

5 Theorie des α -Zerfalls - Der Tunnel-Effekt

Ein theoretisches Modell zur Berechnung der α -Zerfallskonstanten wurde von GAMOW [12] und BETHE [13] entwickelt.

Dabei werden folgende Annahmen gemacht:

Das α -Teilchen bewegt sich in einem zentrosymmetrischen Potential $U(r)$, wobei r den Abstand vom Kernmittelpunkt bedeutet. »Außerhalb« ($r > R$) des Kernes ist $U(r)$ gleich dem Coulomb-Potential, »innerhalb« ($r < R$) überwiegen attraktive starke Wechselwirkungen, die durch ein konstantes Potential U_0 angenähert werden (Abb. 6):

$$U = \begin{cases} \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} & \text{für } r > R, \\ -U_0 & \text{für } r < R. \end{cases} \quad (10)$$

Der höchste Punkt der Kurve liegt bei 50 und mehr MeV, d. h. viel höher als die kinetische Energie eines α -Teilchens (4–9 MeV).

In der klassischen Mechanik könnte ein α -Teilchen die Coulomb-Barriere U_c bei R niemals überwinden, da es nicht über genügend kinetische Energie verfügt. In der Quantenmechanik dagegen besitzt das Teilchen eine endliche Aufenthaltswahrscheinlichkeit außerhalb des Coulomb-Walls. Dieses Phänomen bezeichnet man als Tunnel-Effekt.

Abchnittsweise Lösung der Schrödinger-Gleichung für das Potential (10) ergibt nichtverschwindende Werte der Wellenfunktion sowohl in der Tunnelregion als auch außerhalb der Barriere. Die Wahrscheinlichkeit P , daß ein α -Teilchen die Barriere durchdringt, berechnet sich nach [11] näherungsweise zu

$$P \approx \exp\left(-c_1 \left[\frac{c_2}{\sqrt{Q}} - c_3\right]\right), \quad (11)$$

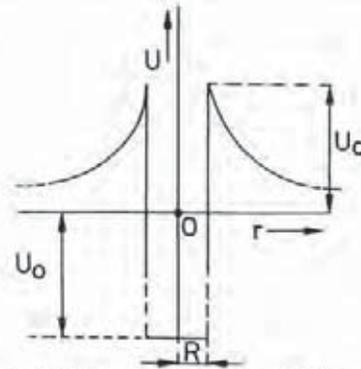


Abb. 6. Potential U eines positiv geladenen Teilchens in Abhängigkeit des Abstands r vom Atomkern.

wobei die c_i Parameter darstellen, die von Radius R und Ladung Z des Kernes abhängen. Man erkennt, daß der Logarithmus dieser sog. Penetrationsfunktion P linear von $Q^{-1/2}$ abhängt, d. h. die Wahrscheinlichkeit der α -Emission nimmt mit zunehmender Energie der α -Teilchen zu. Auf diese Weise erhält man eine Gleichung für Q und λ , die dieselbe Form wie die Gallagher-Rasmussen-Beziehung besitzt und Ähnlichkeit mit der Geiger-Nuttall-Regel aufweist:

$$\ln \lambda \approx \frac{c_1 c_2}{\sqrt{Q}} + c_1 c_3. \quad (12)$$

Eine Schwäche des beschriebenen Modells ist die Annahme, daß das α -Teilchen bereits im Kern vorgeformt ist. Eine vollständige Theorie müßte die Wahrscheinlichkeit der Bildung eines α -Teilchens aus 4 Nucleonen berücksichtigen. Außerdem stellt das Modell die Parität¹ und den Gesamtdrehimpuls² (Kernspin) von Mutter- und Tochterkern nicht in Rechnung. g-g-Kerne haben im Grundzustand immer gerade Parität und verschwindenden Kernspin, so daß keine Schwierigkeiten auftreten und die Beziehung (8) (bzw. (12)) in guter Übereinstimmung mit dem Experiment steht.

Der erste angeregte Zustand eines g-g-Kernes besitzt einen Kernspin von $2\hbar$ und gerade Parität. Die Gallagher-Rasmussen-Beziehung ist auch hier anwendbar.

In allen anderen Fällen versagt diese Regel; die Halbwertszeiten von Kernen mit einer ungeraden Anzahl von Protonen oder Neutronen sind wesentlich größer als vorhergesagt (um bis zu 4 Größenordnungen). Dieser Effekt kommt teilweise durch die Schwierigkeit der gleichzeitigen Paritäts- und Drehimpulserhaltung beim α -Zerfall solcher Kerne zustande (zentrifugale

¹ Die Parität eines Kernes ist gerade (ungerade), wenn sein Bahndrehimpuls gerade (ungerade) ist.

² Der Gesamtdrehimpuls eines Kernes ist die Summe der Gesamtdrehimpulse der einzelnen Nucleonen (j-j-Kopplung).

Hinderung), teilweise wird er durch die geringe Wahrscheinlichkeit der Bildung eines α -Teilchens im Kern hervorgerufen.

Eine zufriedenstellende Theorie, die auf alle Arten von α -Zerfällen anwendbar ist, steht noch aus.

Der Tunnel-Effekt erlaubt nicht nur positiv geladenen Teilchen, aus dem Kern zu entweichen, sondern spielt auch beim Eindringen eines Kerns in einen anderen eine Rolle. Die Energie der Sonne entsteht, wie in den meisten Sternen, durch die Fusion von Wasserstoff zu Helium, entweder durch direkte Proton-Proton-Reaktionen (p-p-Ketten) oder mit schwereren Kernen wie [^{12}C] Kohlenstoff als Katalysator (CNO-Zyklus). Keine dieser Reaktionen ist klassisch möglich, da der Coulomb-Wall die thermische Energie der Teilchen auch bei den Temperaturen im Innern der Sterne von rd. $15 \cdot 10^6$ K übersteigt.

1929 wandten ATKINSON und HOUTERMANS [14] GAMOWS Tunnel-Effekt-Vorstellung [12] auf dieses Problem an und legten so den Grundstein zur Theorie der thermonuklearen Reaktionen. Später berichtete HOUTERMANS R. JUNGK, daß er am Abend, nachdem sie ihren Aufsatz abgeschickt hatten, sich mit einem hübschen Mädchen traf, um mit ihr durch eine sternklare Nacht zu wandern. »Wie schön sie blinken!« rief meine Begleiterin aus. Ich aber warf mich ein wenig in die Brust und sagte: »Ich weiß seit gestern, weshalb sie blinken«. Sie zeigte kein Anzeichen von Bewegung. Ob sie's wohl glaubte? Es war ihr vermutlich in diesem Augenblick ganz gleichgültig.« [15]

6 Experimentelles

Die Geiger-Nuttall-Regel kann durch Bestimmung der Reichweite von α -Teilchen in einer Nebelkammer (Abb. 7) überprüft werden. Wir verwendeten eine kontinuierliche Kammer, keine klassische Expansionskammer, da sie einfacher zu handhaben ist und kontinuierliche Beobachtung gestattet. Man muß allerdings mit niedrigen Aktivitäten arbeiten, um die empfindliche Atmosphäre in der Kammer nicht zu zerstören. Eine genaue Beschreibung der Handhabung findet sich in [16] und [17].

Es ist in der Regel erforderlich, einige Dutzend Aufnahmen der Nebelspuren zu machen, denn die meisten Fotos können zur quantitativen Auswertung nicht herangezogen werden, da die scheinbaren Längen der Spuren infolge unterschiedlicher Beobachtungswinkel oder »Abtauchen« der Teilchen aus der empfindlichen Schicht der Kammer nicht immer der Reichweite der Teilchen entsprechen. Daher sollten nur die längsten erhaltenen Spuren berücksichtigt werden. Die Auswertung erfolgt am besten durch Projektion der Dias auf eine Tafel, wo die Spuren mit Kreide markiert und anschließend ausgemessen werden. Bei allen im folgenden beschriebenen Experimenten be-

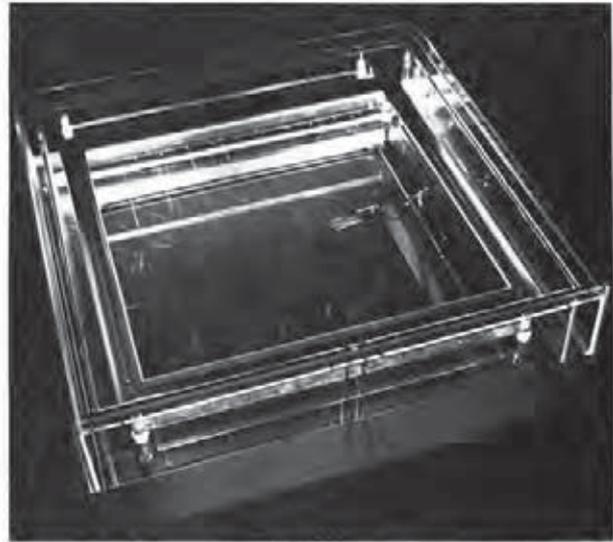


Abb. 7. Kontinuierliche Nebelkammer (Langsdorf-Kammer) (Phywe AG, Göttingen).

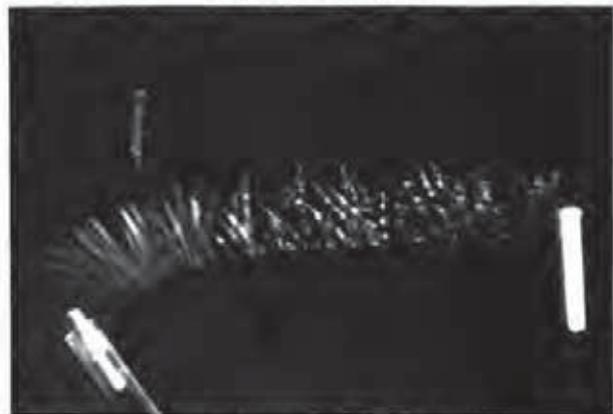


Abb. 8. α -Spuren von [^{210}Po]Polonium.

trug die Temperatur in der Nebelkammer etwa 1°C , der Druck 1010 mbar, der Wasserdampfdruck 7 mbar. Die angegebenen Fehler sind Standardabweichungen.

6.1 [^{210}Po]Polonium (RaF)

Eine Probe von $0,1 \mu\text{Ci}$ [^{210}Po]Polonium wird in die empfindliche Schicht der Nebelkammer gebracht und langsam zur Seite bewegt, so daß die α -Teilchen immer durch unverbrauchte Atmosphäre fliegen. Rasche Bewegungen sollten vermieden werden, um keine Turbulenzen in der Kammer hervorzurufen.

Ein typisches Foto ist in Abbildung 8 dargestellt. Als Längenmaßstab diente ein 50 mm langes Stück Teflon am Boden der Kammer unmittelbar unter der empfindlichen Schicht. Nach Auswertung von 17 verschiedenen Aufnahmen erhielten wir einen Mittelwert von $(35,6 \pm 0,4)$ mm für die Reichweite der α -Teilchen. (In einem ähnlichen Experiment maßen GEIGER und



Abb. 9. V-förmige Spuren des Zerfalls von ^{220}Rn Radon.

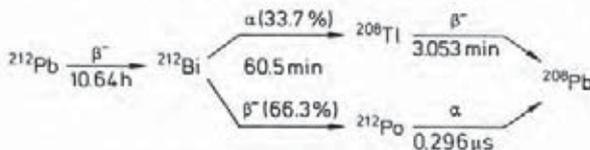


Abb. 10. Zerfallsschema von ^{212}Pb Blei.



Abb. 11. α -Spuren der Tochterprodukte von ^{212}Pb Blei.

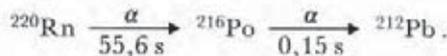
NUTTALL vor über 70 Jahren [10] Werte von 35,8 mm bei 0 °C und 37,7 mm bei 15 °C.) Unter Verwendung der Gleichungen (5) und (6) wurden R_0 und E_α bestimmt:

$$\begin{aligned}
 R_0 &= (37,3 \pm 0,4) \text{ mm} , \\
 E_\alpha &= (5,25 \pm 0,1) \text{ MeV} .
 \end{aligned}$$

Dieses Ergebnis stimmt gut mit dem Literaturwert von 5,3045 MeV überein [18]. Die Geiger-Nuttall-Regel sagt mit $\lambda = 5,8 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ [18], $a = -97,9$ und $b = 60$ [20] eine Reichweite von 39 mm voraus.

6.2 ^{220}Rn Radon und ^{216}Po Polonium (Tn und ThA)

^{220}Rn Radon, das in der 4π -Zerfallsreihe aus ^{232}Th Thorium gebildet wird, erleidet zwei rasch aufeinanderfolgende α -Zerfälle:



Wird ein Trägergas mit ^{220}Rn Radon in die Nebelkammer eingeblasen, so manifestieren sich die beiden α -Zerfälle als zwei Spuren, die ein »V« bilden.

Etwa 500 mg Thoriumdioxid werden in ein Glasrohr (Innendurchmesser 4–5 mm, Länge 5 cm) eingebracht und mit Hilfe von Glaswolle festgehalten. Das eine Ende des Rohres wird mit einem Gummischlauch verbunden, der in die empfindliche Schicht der Kammer führt. Auf das andere Ende wird ein Gummige-

bläse aufgesetzt, das beim Zusammendrücken Luft über das Thoriumdioxid in die Kammer preßt und dabei das ^{220}Rn Radon, welches sich über der Thoriumverbindung angesammelt hat, mitnimmt. Nach anfänglicher Turbulenz um den Gaseinlaß beruhigt sich die Nebelkammeratmosphäre, und ein wahres »Feuerwerk« von α -Spuren breitet sich in der ganzen Kammer aus. Wegen der kurzen Lebensdauer von ^{220}Rn Radon nimmt die Anzahl der α -Spuren in den folgenden 2 bis 3 min rasch ab, so daß einzelne Ereignisse besser untersucht werden können. Von insgesamt 88 Fotos der typischen V-förmigen Spuren waren 23 zur quantitativen Analyse geeignet (Abb. 9). Aufgrund der geringen Wahrscheinlichkeit, daß beide α -Spuren im richtigen Beobachtungswinkel zur Kamera erscheinen, wurden keine absoluten Reichweitenbestimmungen versucht. Es ist jedoch möglich, die Längen der beiden Spuren zu vergleichen. Der Fehler, der infolge etwas unterschiedlicher Beobachtungswinkel entsteht, sollte sich dabei herausmitteln. Das Längenverhältnis wurde zu $1,15 \pm 0,03$ bestimmt, wobei die kürzere Spur vom Zerfall des ^{220}Rn Radons herrührt. GEIGER und NUTTALL erhielten bei 0 °C einen Wert von 1,14 [10].

Berechnet man die Reichweiten aus der Geiger-Nuttall-Regel (Gl. (7); mit $a = 101,83$; $b = 60$; $\lambda_1 = 0,01247 \text{ s}^{-1}$; $\lambda_2 = 4,621 \text{ s}^{-1}$ [20]), so erhält man 50,7 bzw. 57 mm, also ein Verhältnis von 1,124. Unter Heranziehung der Energien von 6,288 bzw. 6,7785 MeV und Gleichung (6) ergibt sich 1,12. Beide Werte stimmen innerhalb der Fehlergrenzen mit dem experimentellen Ergebnis überein.

6.3 [²¹²Po]Polonium und [²¹²Bi]Bismut (ThC' und ThC)

Das [²¹²Pb]Blei, das durch α -Zerfall aus Thoriumemanation (²²⁰Rn) entsteht, kann aus der Gasphase auf einer negativ geladenen Platin- oder Tantal- Elektrode abgeschieden werden. Eine genaue Beschreibung des experimentellen Vorgehens findet sich in [19]. Die Ausbeute beträgt typischerweise etwa 0,5 μ Ci. Zwei Folgeprodukte von [²¹²Pb]Blei sind α -Strahler, nämlich [²¹²Bi]Bismut und [²¹²Po]Polonium mit Halbwertszeiten von 60,6 min bzw. 0,3 μ s (Abb. 10). (Die partielle α -Zerfallskonstante von [²¹²Bi]Bismut berechnet sich zu $9,26 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.)

Hält man eine mit [²¹²Pb]Blei beladene Elektrode in die Nebelkammer, so beobachtet man α -Spuren mit 2 verschiedenen Längen (Abb. 11). Da die Quelle keineswegs punktförmig ist, empfiehlt es sich, die Spuren zu ihrem (mutmaßlichen) Ausgangspunkt auf der Elektrode zu verlängern (um den Fehler jeder Einzelmessung zu minimieren) und etwa 50 Spuren jeder Reichweite auszumessen (um einen guten Mittelwert zu erhalten).

L. MEITNER [6] erhielt ein Verhältnis der beiden Reichweiten von 1,79. Wir fanden $1,8 \pm 0,04$. Der berechnete Wert nach Gleichung (6) mit den α -Energien von 6,09 bzw. 8,787 MeV beträgt 1,74. Die Geiger-Nuttall-Regel sagt einen deutlich niedrigeren Wert von 1,4 voraus. Es ergibt sich also ein Unterschied zwischen den aus den Energien berechneten Reichweiten und denen, die aus den Zerfallskonstanten hergeleitet werden.

Mit anderen Worten, Energie und Zerfallskonstanten korrelieren nicht gut miteinander. Dies überrascht nicht, denn [²¹²Po]Polonium und [²⁰⁸Pb]Blei sind g-g-Kerne im Grundzustand, während [²¹²Bi]Bismut und seine Tochter [²⁰⁸Tl]Thallium u-u-Kerne darstellen und sich im Bahndrehimpuls um $4 \hbar$ unterscheiden [20].

Die zentrifugale Hinderung macht den α -Zerfall von [²¹²Bi]Bismut langsamer, als man aufgrund der Zerfallsenergie erwarten würde, so daß sich ein niedrigerer Wert für das aus den Zerfallskonstanten vorhergesagte Reichweitenverhältnis ergibt.

Unser Dank gilt G. ERTL, G. LIECKFELD und J. KRALLER für ihre Unterstützung sowie M. COX, W. LÖSTER und M. MURR für hilfreiche Diskussionen. Die Arbeit wurde durch Stipendien des Fonds der chemischen Industrie und der Stiftung Maximilianeum erleichtert.

Literatur

[1] H. BECQUEREL: Sur les radiations émises par phosphorescence. - Compt. rend. 122 (1896) 420.

- [2] H. BECQUEREL: Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents. - Compt. rend. 122 (1896) 501.
- [3] H. BECQUEREL: Sur quelques propriétés nouvelles des radiations invisibles émises par divers corps phosphorescents. - Compt. rend. 122 (1896) 559.
- [4] T. FLIESSBACH: Alphaerfall und Kernstruktur. - Physik in unserer Zeit 8 (1977) 10.
- [5] R. SCHWANKNER - M. EISWIRTH: Themen zur Festkörperchemie II. - Köln: Aulis (in Vorbereitung).
- [6] L. MEITNER - K. FREITAG: Über die α -Strahlen des ThC und C' und ihr Verhalten beim Durchgang durch verschiedene Gase. - Z. f. Physik 37 (1926) 481.
- [7] M. GLÄSER: Die Nebelkammer im experimentellen Unterricht. - Köln: Aulis 1976.
- [8] H. GEIGER - J. M. NUTTALL: The Ranges of the α -particles from Various Radioactive Substances and a Relation between Range and Period of Transformation. - Phil. Magazine (6) 22 (1911) 613.
- [9] H. GEIGER - J. M. NUTTALL: The Ranges of the α -Particles from Uranium. - Phil. Magazine (6) 23 (1912) 439.
- [10] H. GEIGER - J. M. NUTTALL: The Ranges of the α -particles from the Thorium and Actinium Products. - Phil. Magazine (6) 24 (1912) 647.
- [11] C. J. GALLAGHER - J. O. RASMUSSEN: Alpha-Decay Hindrance-Factor Calculation. - J. Inorg. Nucl. Chem. 3 (1957) 333.
- [12] G. GAMOW: Zur Quantentheorie der Atomzertrümmerung. - Z. f. Physik 52 (1929) 510.
- [13] H. A. BETHE: Theory of α -Radioactivity according to the One-Body Model. - Rev. Mod. Phys. 9 (1937) 161.
- [14] R. ATKINSON - F. G. HOUTERMANS: Zur Frage der Aufbaumöglichkeit der Elemente in Sternen. - Z. f. Physik 54 (1929) 656.
- [15] R. JUNGK: Heller als tausend Sonnen, Stuttgart: Goverts Verlag 1956.
- [16] R. SCHWANKNER: Radiochemie-Praktikum. - Paderborn: Schöningh 1980.
- [17] W. GENTNER - H. MAIER-LEIBNITZ - W. BOTHE: Atlas typischer Nebelkammerbilder. - Berlin: Springer 1940.
- [18] J. C. POST: Table of α -Emitting Nuclides According to α -Energy. - Actinides Reviews 1 (1967) 55.
- [19] M. EISWIRTH - R. SCHWANKNER - F. WEIGEL - V. WISHNEVSKY: Electrostatic Radionuclide Separation. - J. of Chem. Ed. 59 (1982) 608.
- [20] K. H. LIESER: Einführung in die Kernchemie, 2. Aufl. - Weinheim: Verlag Chemie 1980.

Anschrift der Verfasser: Dipl.-Chem. R. J. Schwankner, Dipl.-Chem. M. Eiswirth, Institut für Physikalische Chemie der Universität, Sophienstraße 11, 8000 München 2



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

NEBELSPUREN

NEBELSPUREN

Was sie uns über
Radioaktivität verraten

Weitere Informationen:

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
in der Helmholtz-Gemeinschaft
Stabsabteilung Öffentlichkeitsarbeit
Postfach 36 40
76021 Karlsruhe

Telefon: 07247 82-2860
Telefax: 07247 82-5080

E-Mail: info@oea.fzk.de
Internet: www.fzk.de

Radioaktivität sichtbar gemacht

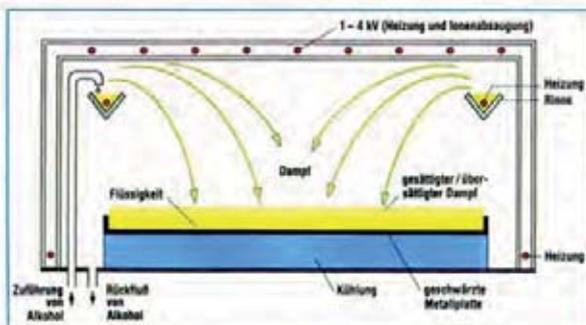
Ionisierende Strahlung - dazu zählt man auch die verschiedenen Partikel (z.B. Alpha-Teilchen, Elektronen, Positronen, Gamma-Quanten), die von radioaktiven Atomkernen ausgesandt werden - läßt sich durch ihre Wechselwirkung mit der Umgebung sichtbar machen. Dies geschieht mit verschiedenen Versuchsanordnungen oder Experimentiereinrichtungen, z.B. durch Fotoplatten, auf Filmen oder in Funkenkammern. Auf besonders eindrucksvolle Weise lassen sich die Flugbahnen aller elektrisch geladenen Teilchen aus radioaktiven Zerfällen als Kondensstreifen in sogenannten Nebelkammern (Wilson, 1912) beobachten.

Die Diffusionsnebelkammer – Aufbau und Funktion

Den Boden des Geräts bildet eine massive, geschwärzte Metallplatte (Fläche 80 x 80 cm), die durch ein in den Sockel eingebautes Kühlaggregat gleichmäßig über die gesamte Fläche gekühlt wird (etwa -26° C).

Deckfläche und Seitenwände der Kammer bestehen aus zwei übereinander gestülpten Glashauben. Zwischen den beiden oberen Glasscheiben befinden sich dünne Heizdrähte, die diesen Bereich der Kammer erwärmen und das Beschlagen der Innenscheiben verhindern.

Im Inneren des oberen Teils der Glashaube befindet sich eine umlaufende, elektrisch beheizte Rinne, in die aus einem Vorratsbehälter tropfenweise Alkohol gepumpt wird.



Der Alkohol verdunstet und diffundiert vom oberen, warmen Bereich zum kalten Kammerboden. Dort kondensiert der Alkoholdampf und fließt in den Vorratsbehälter zurück.

Oberhalb der dünnen, den Boden bedeckenden Flüssigkeitsschicht bildet sich eine Zone aus übersättigtem Alkoholdampf mit starker Tendenz zur Kondensation. Als Kondensationskeime dienen bevorzugt die Ionen, die geladene Materieteilchen (z.B. radioaktive Strahlung) längs ihrer Flugbahn erzeugen. Für den Beobachter wird diese Bahn als Nebelspur sichtbar. Von der Länge und der Beschaffenheit der Teilchenspur kann auf die Art und die Energie des Teilchens zurückgeschlossen werden.

Beobachtungen an der Nebelkammer

In der Diffusionsnebelkammer lassen sich wichtige Komponenten der natürlichen Umgebungsstrahlung beobachten.

Die kosmische Strahlung

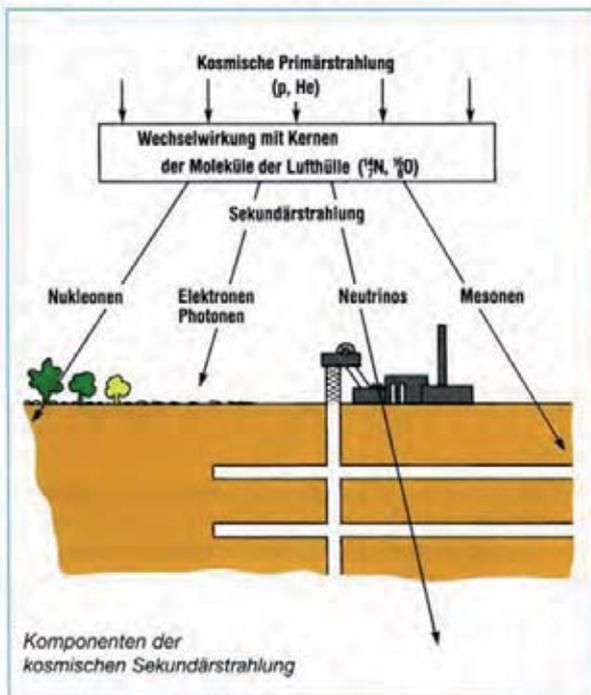
Aus dem Weltraum trifft außer Photonenstrahlung (elektromagnetische Wellen) auch energiereiche Teilchenstrahlung auf die Lufthülle der Erde (kosmische Primärstrahlung). Sie setzt sich zu etwa 90% aus Protonen (Wasserstoffatomkernen), etwa 9% Alpha-Teilchen (Heliumatomkernen) und bis zu 1% aus schweren Atomkernen zusammen.

Die in die Atmosphäre eindringenden energiereichen Teilchen treffen dabei auf Atomkerne der Moleküle der Lufthülle und können dort Kernreaktionen und Kernzertrümmerungen erzeugen. Dabei entstehen neue Atomkerne und Elementarteilchen, die weiterfliegen und zu weiteren Wechselwirkungen führen.

In den erdnahen Schichten der Atmosphäre (unterhalb von 20 km Höhe) ist nur eine Sekundärstrahlung zu beobachten, die aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungsprozesse in den oberen Schichten der Atmosphäre entstanden ist. Man unterscheidet dabei vier Komponenten, die ein unterschiedliches Durchdringungsvermögen haben:

Komponenten der kosmischen Sekundärstrahlung	Bestandteile
Nukleonenkomponente	Protonen Neutronen
Elektronen-Photonen-Komponente	Elektronen Positronen Photonen
Mesonenkomponente	Mesonen unterschiedlicher Ladung
Neutrino-Komponente	Neutrinos und Antineutrinos

In Meereshöhe besteht etwa 90 % der Sekundärkomponente der kosmischen Strahlung aus Myonen.



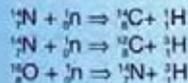
In der Diffusionsnebelkammer können grundsätzlich alle elektrisch geladenen Teilchen nachgewiesen werden, also Elektronen, Positronen, Myonen, Protonen und Alpha-Teilchen. Photonen (z.B. Gamma-Quanten) rufen nur indirekt eine Nebelspur hervor, wenn sie z.B. aus einer Atomhülle ein Elektron ausschlagen, das dann eine Ionisationsspur erzeugt. Neutronen können zu einer Kernreaktion führen, bei der dann das aus dem Kern ausgestoßene geladene Teilchen eine Nebelspur hervorruft.

Die terrestrische Strahlung

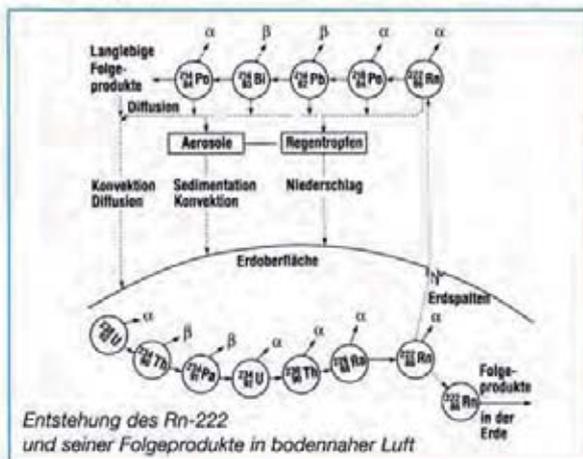
Die gesamte Materie der Erde (Lithosphäre, Wasser, Luft und Lebewesen) enthält von Natur aus radioaktive Substanzen (Radionuklide), die Strahlung aussenden. Diese existieren entweder seit Bestehen unserer Erde, also seit etwa 4,5 Milliarden Jahren, oder sie werden ständig neu gebildet - z.B. durch die Höhenstrahlung. Zu den natürlichen Radionukliden mit sehr langer Halbwertszeit gehören z.B. Uran-238, Thorium-232, Kalium-40 oder Rubidium-87. Ständig neu gebildet werden Radionuklide mit kürzeren Halbwertszeiten innerhalb der drei natürlichen Zerfallsreihen, z.B. Radium-226, Radon-222, Polonium-218 oder Blei-210. Außerdem existieren natürliche Radionuklide mit relativ kurzen Halbwertszeiten, die nicht zu den Zerfallsreihen gehören. Sie werden in den oberen Luftschichten

Teilchen	Symbol	Relative Ruhemasse	Ladung	Halbwertszeit
Elektron	e^-	1	-1	stabil
Positron	e^+	1	+1	stabil
Myon (μ^- - Meson)	μ^-	203,77	-1	$1,5 \cdot 10^{-6}$ s
Myon (μ^+ - Meson)	μ^+	203,77	+1	$1,5 \cdot 10^{-6}$ s
Proton	p^+	1836,10	+1	stabil
Neutron	n	1836,62	0	11,7 min
Alpha-Teilchen	α, He^{2+}	7293,7	+2	stabil

der Erdatmosphäre durch die Höhenstrahlung ständig neu gebildet, so z.B. Kohlenstoff-14 aus Stickstoff-14 oder Tritium (H 3) aus Stickstoff-14 bzw. Sauerstoff-16.



Die etwa 100 natürlichen Radionuklide, die teils seit Bestehen der Erde existieren, teils fortlaufend neu gebildet werden, sind in der gesamten Erdmaterie in unterschiedlichen Konzentrationen enthalten. Dabei findet ein ständiger Austausch zwischen Lithosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und Lebewesen statt.



Deshalb ist auch das gesamte Baumaterial der Diffusionsnebelkammer mit natürlichen Radionukliden durchsetzt, die Strahlen aussenden.

Was ist zu sehen?

In der Diffusionsnebelkammer lassen sich vor allem Nebelspuren beobachten, die von

- Alpha-Teilchen
- Protonen
- Elektronen bzw. Positronen oder
- Myonen

hervorgerufen werden.

Auf den ersten Blick sind in der Kammer sehr zahlreiche lange dünne und - sehr viel seltener - kurze dicke Nebelspuren zu

NEBELSPUREN

erkennen. Ihr Auftreten ist zufallsverteilt, es ist also nicht vorherzusagen, wann und wo die nächste Spur sichtbar wird.

Alpha-Teilchen

Die kurzen, nur wenige Zentimeter langen und dicken Nebelspuren werden von Alpha-Teilchen verursacht, die in Luft (und auch Alkoholdampf) eine Reichweite von nur etwa 5 cm haben. Da Alpha-Teilchen bereits durch ein Blatt Papier absorbiert werden, können sie nicht durch die Glashaube der Kammer von außen kommen, sondern müssen von einem radioaktiven Bestandteil der Luft in der Kammer ausgehen. In der Tat handelt es sich hier um Zerfälle verschiedener Nuklide des radioaktiven Edelgases Radon, das sich in der Luft geschlossener Räume anreichern kann.

Nebelspur, erzeugt von einem Alpha-Teilchen



Protonen

Ähnlich dicke, jedoch zumeist sehr viel längere Nebelspuren werden auch von energiereichen Protonen verursacht, die aufgrund von Sekundärprozessen in der Atmosphäre entstanden sind. Sie können den Glasmantel der Kammer durchdringen. Ist ihre Energie danach niedrig genug, kommt es zu Wechselwirkungen mit den Atomelektronen des Kammergases und zur Erzeugung einer den Alpha-Teilchen sehr ähnlichen Spur. Treffen die Teilchen senkrecht in die übersättigte Alkoholdampfschicht, erkennt man die Ionisationsspur nur als „Nebelfleck“.

Nebelspuren, erzeugt von Protonen



NEBELSPUREN

NEBELSPUREN

Elektronen und Positronen

Die sehr viel zahlreicheren dünnen und auch meist viel längeren Nebelspuren (mit geringerer Tröpfchendichte) - die Vielzahl von Einzelercheinungen verwirrt leicht - werden durch Elektronen und Positronen (β^- und β^+ -Strahler) hervorgerufen. Zwischen Elektronen und Positronen kann hier nicht unterschieden werden. Dies wäre nur möglich, wenn zur Ablenkung der unterschiedlich geladenen Teilchen ein starkes Magnetfeld senkrecht zum Kammerboden angelegt würde.

Die vielen langen, dünnen Bahnen weisen auf schnellfliegende (also energiereiche) Elektronen hin. Elektronen mit geringerer Geschwindigkeit ergeben kürzere Bahnen, die zum Teil durch Streuung gekrümmt oder geknickt erscheinen.

Sehr energiearme Elektronen erzeugen kurze Bahnen, die durch Vielfachstreuung an den Atomhüllen der übersättigten Dampfschicht verschnörkelt und verschlungen aussehen.

Nebelspur von einem energiereichen ...



... und von einem mehrfach gestreuten Elektron (β^- -Teilchen)



Nebelspuren energiearmer Elektronen



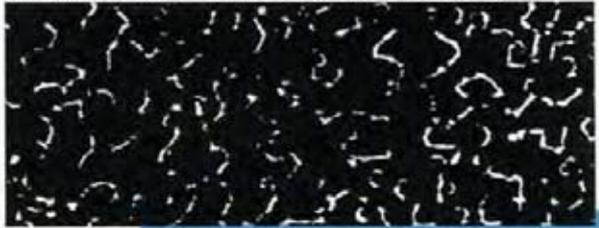
NEBELSPUREN

8

Photo- und Compton-Elektronen

Wird auf die Oberseite der Kammer ein stärkerer Gamma-Strahler gestellt, so durchdringen die (γ -Quanten das Glas und lösen an den Atomen der Luftmoleküle in der Kammer eine Vielzahl von Photo- und Compton-Effekten aus. Die so erzeugten Photo- und Compton-Elektronen zeigen sich dann durch über die ganze Fläche verteilte, kurze, mehrfach gekrümmte, „würmchenförmige“ Bahnen.

Nebelspuren, erzeugt von Photo- und Compton-Elektronen



Myonen

Die kosmische Sekundärstrahlung besteht zu 90 % aus Mesonen, die sich in der Nebelkammer ebenfalls nachweisen lassen. Eine besondere Rolle spielen dabei die Myonen (μ^+ und μ^- -Mesonen), die eine positive oder negative Elementarladung tragen und deren Ruhemasse 207 Elektronenmassen entspricht.

Myonen großer Energie erzeugen Bahnen, die den durch Elektronen erzeugten Spuren sehr ähnlich sind. Stark abgebremste Myonen ionisieren dagegen stark und ergeben Spuren, die fast denjenigen der Alpha-Teilchen gleichen. Im Einzelfall ist es deshalb schwierig, zwischen Spuren von Alpha-Teilchen, Protonen, Myonen und Elektronen zu unterscheiden.

Nebelspur, erzeugt von einem Meson



9

Da die mittlere Lebensdauer der Myonen im Bereich von Mikrosekunden (10^{-6} s) liegt, lässt sich gelegentlich auch der Zerfall eines Myons in ein Elektron und zwei in der Nebelkammer unsichtbare Neutrinos beobachten. Das Elektron bewegt sich dabei nicht in derselben Richtung wie vorher das Myon, so daß ein charakteristischer Knick in der Nebelspur erkennbar wird. Außerdem ist nach dem Knick eine deutlich schwächere Nebelspur zu erkennen, weil das Elektron eine geringere Ionisationsdichte als das Myon besitzt. Die Zahl der erzeugten Ionenpaare pro Weglänge (bei sonst vergleichbaren Bedingungen) verhält sich im übrigen bei Alpha-Teilchen, Protonen, Elektronen und Gamma-Quanten wie etwa 10.000 : 5.000 : 100 : 1 (spezifische Ionisation).

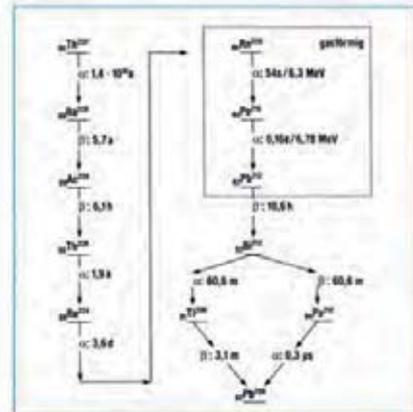
Nebelspur vom Zerfall eines μ -Mesons in ein Elektron und zwei Neutrino.



Beobachtungen an einer Thorium-Quelle

Durch eine spezielle Einlaßvorrichtung an der Unterseite der Diffusionsnebelkammer können verschiedene radioaktive Präparate eingeführt werden, die interessante Beobachtungen ermöglichen. Ein solches Präparat enthält geringe Mengen Thorium-Salz mit dem Nuklid Thorium-232, das nach verschiedenen Zerfällen als Zwischenprodukt Radon-Gas (Rn-220) liefert. Dieses Gas wird gesammelt und kann durch Drücken eines Gummiballs in die dafür vorgesehene Öffnung der Kammer eingeblasen werden. Von der Einlaßöffnung breiten sich dann die Spuren zahlreicher Alpha-Zerfälle allmählich durch Konvektion über die ganze Kammer aus. In manchen Fällen scheinen zwei Alpha-Teilchen V-förmig von derselben Stelle auszugehen. Dabei handelt es sich um zwei unmittelbar aufeinander folgende Ereignisse: aus Radon-220 wird durch Alpha-Zerfall zunächst Polonium-216 und unmittelbar danach (mit einer Halbwertszeit von nur 0,16 Sek.) entsteht durch einen weiteren Alpha-Zerfall Blei-212.

Thorium-Zerfallsreihe



In der Diffusionsnebelkammer sind die Spuren der Alpha-Teilchen zu sehen, die zu allen Zerfallsstufen der Thorium-Zerfallsreihe gehören.

Alle zu Vorführungen verwendeten radioaktiven Präparate sind von so geringer Aktivität, daß sie von der Genehmigung durch die Strahlenschutzverordnung befreit sind.

Begleitunterlagen: Großes Radiometrisches Praktikum HM

d: n-Zählrohre

Prof. Dr. Schwankner
Türkenstraße 78
80799 München
Lab.: 089/1265-2608
Büro.: 089/1265-2667
priv.: 089/33019260

BF3 Proportional Counter

CENTRONIC

NUCLEAR

Series 12EB

The BF3 Proportional counter employs the $^{10}\text{B} (n, \alpha)$ reaction for the detection of thermal neutrons. Excellent characteristics are obtained, combining high detection efficiency and low background with good discrimination against gamma radiation. The materials used in the construction of these detectors have been selected for low activation properties to facilitate handling after exposure to neutron fluxes and to enable the counters to be used a short time after shut-down.

The counters have been designed for use with collimated beams of neutrons incident at one end of the counter or alternatively under total irradiation conditions.

Intermediate Energy Neutrons

BF3 counters can be used not only as thermal neutron counters but also for the measurement of intermediate energy neutrons. In this case, the Centronic BF3 counters are covered with a sleeve of Cadmium 0.036" thick. Where the flux spectrum of the intermediate energy neutrons is inversely proportional to the neutron energy, for example in the neighbourhood of large reactors, the count rate is proportional to dose rate.

Response to Gamma Radiation

The counters are relatively insensitive to Gamma radiation, when the mean interval between Gamma pulses becomes less than the resolving time of the counter and associated circuits, pulse build-up will occur creating pulses due to Gamma radiation which will be registered above the amplifier discriminator level. Counters in this series can operate at levels of 100R/hr, and by adjustment of discriminator levels, operation in Gamma fields up to 250R/hr is possible.

Construction

The counter is of metal construction, thin walled copper being used to minimise neutron capture. The cylindrical body of the counter forms the cathode, the anode connection being brought out at one end via a glass-metal seal. The body of the counter surrounding the glass-metal seal is soldered to ensure the terminations are permanently protected from the environment.

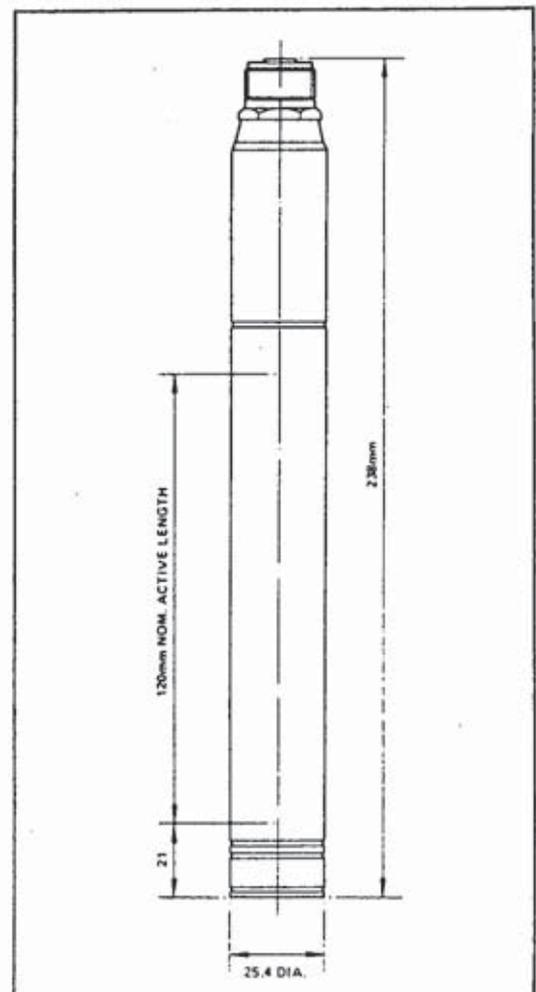
Sensitivity

The sensitivities given below are obtained for a thermal neutron flux of 1 neutron/cm²/sec.

Type	Filling Press	Neutron Sens.	Operating Voltage Range*
12EB20/25	20 cm Hg	1.5 cps/nv	1.1 – 1.35 kv
12EB40/25	40 cm Hg	3.0 cpc/nv	1.6 – 1.75 kv
12EB70/25G	70 cm Hg	5.1 cpc/nv	2.2 – 2.45 kv

* Equivalent to maximum charge per pulse range
1.16 x 10⁻¹³ to 4.64 x 10⁻¹³ coulombs

- 25.4 mm (1") Diameter
- Sensitivity from 1.5 to 5.1 cps/nv
- Portable instruments
- Soil moisture measurements



BF3 Proportional Counter

CENTRONIC

NUCLEAR

Fig. 3 Differential-bias curves.

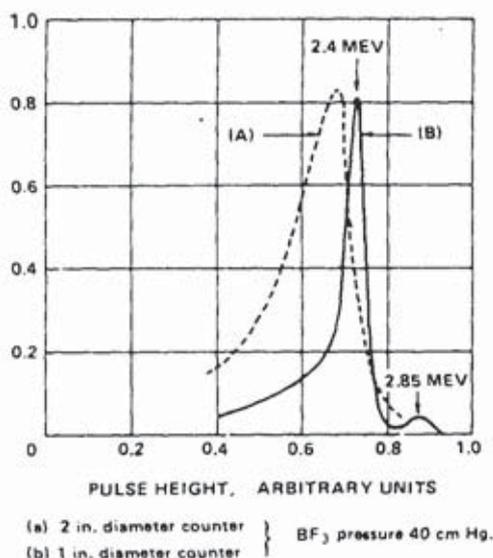
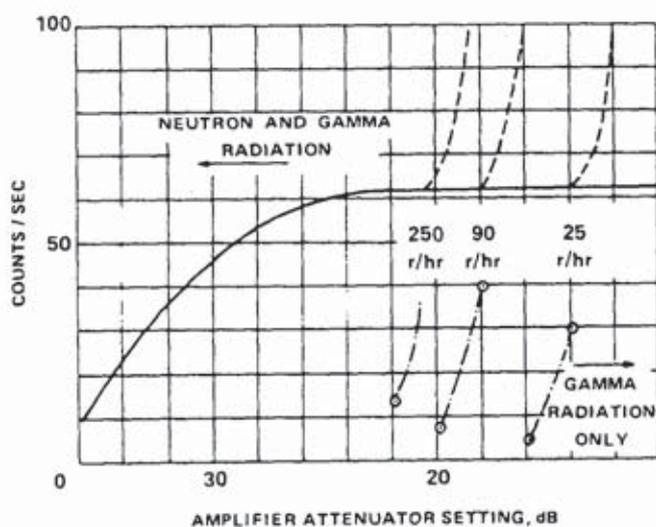


Fig. 4 Effect of high gamma radiation levels.



Type 12EB40 Counter - Co^{60} Source

Counter anode voltage	1800V (M = 40)
Amplifier settings	D.T.C. 0.16 μ s
	I.T.C. 0.16 μ s

For example when types 12B20 and 12EB40 counters were irradiated for ten days in a thermal neutron flux of 3×10^9 neutrons/cm² sec. (i.e. integrated flux of 2.5×10^{15} neutrons/cm²) with zero anode voltage, they showed no deterioration in their characteristics. The 12.8 hour β - γ activity due to copper 64 immediately after removal from a flux of 3×10^9 neutrons/cm² sec. is, however, too high to enable neutron pulses to be distinguished. After a decay period of about 7 half-lives (i.e. a factor 128 reduction in activity), good discrimination can be obtained between neutron pulses and the effect of the copper 64 activity. Counters of this size should therefore be retracted to a position where the thermal-neutron flux is less than about 2×10^7 neutrons/cm² sec. at full-power operation. The saturation activity will then be sufficiently low to avoid difficulty in discriminating between neutron pulses and β - γ 'pile-up'. At this flux level the exposure period for an integrated flux of 2.5×10^{15} neutron/cm² will be approximately three years.

Maximum Ratings

Temperature

The high temperature performance of BF_3 proportional counters is dependent upon the outgassing treatment during manufacture. BF_3 counters are constructed to permit outgassing at 400°C during manufacture. Counters have been operated continuously at 100°C for some months without appreciable change in characteristics and 100°C is a conservative maximum temperature rating for these tubes for continuous operation.

Counters can be operated at higher temperatures up to 200°C but changes in characteristics must be expected with time.

Pressure

For the 1" diameter counters the maximum external pressure before collapse at room temperature lies between 4.8×10^5 - 6.2×10^5 N/M² gauge depending upon the overall length of the counter. Special counters have been developed for applications such as reactor commissioning experiments where high external pressures are experienced.

Measurement of Intermediate Energy Neutrons

Essentially a thermal neutron counter with a useful energy rate from 0.025eV to 1 KeV, recent investigations have established that BF_3 counters with a cadmium coating can be used for the measurement of the dose rate from intermediate energy neutrons. In the neighbourhood of large nuclear reactors, the flux spectrum of intermediate energy neutrons may be inversely proportional to the neutron energy.

In the energy range 0.1eV - 10^5 eV in situations where the neutron spectrum obeys the E^{-1} law measurements of dose-rate can be made using Centronic BF_3 counters covered by a cadmium sleeve 0.91 mm thick.

Helium-3 Neutron Proportional Counters

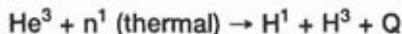
Applications

Helium-3 Neutron Detectors are largely sensitive to thermal neutrons and are typically used with a neutron moderator. For this reason, He-3 Proportional Counters are well suited for measuring substrates high in hydrogen, such as water and oil, where the substrate being measured acts as the moderator. In fact, TGM's He-3 detectors are widely used in combination with a fast neutron source to measure the moisture content in soil and in concrete. They are also used to measure the oil content within the strata of an Oil Well while it is being drilled!

Other applications include Nuclear Material Assay, where multiple He-3 Detectors are used in a coincidence circuit to determine the amount of fissionable material. Such devices are used to monitor the enrichment process of nuclear fuel fabrication or to determine an unknown amount of fissionable material suspended in a substrate. Nuclear Material Assay devices are also used in Safeguard applications – verifying the world's inventory of fissionable material.

Theory of Detection

Helium-3 Proportional Counters utilize the $\text{He}^3(n,p)\text{H}^3$ reaction for the detection of thermal neutrons.



where $Q = 764\text{KeV}$.

The energy of the reaction is carried away as kinetic energy of the daughter products, which move in opposite directions.

He-3 Neutron Detectors provide an output pulse which is proportional to 764KeV for thermal neutrons. The cross section of He-3 for thermal neutrons is 5330 barns. The cross section follows a $1/v$ relationship ($v =$ neutron velocity) up to about 0.2 MeV.

The ionization potential of helium is approximately 25eV; this means that a gas multiplication of about 20 yields a charge per pulse of the order of 0.1 pico coulomb (assuming that all the energy of the He-3 daughter products are deposited within the gas volume). If one increases the voltage on the tube, the gas multiplication will increase, however in an extreme case lifetime will be decreased. A gas gain of 20 is a compromise, it provides a convenient pulse size to work with at the optimum energy resolution without sacrificing lifetime. TGM has developed He-3 Detectors without the use of polyatomic quench gas for exceptional long life.*

* "Design of He-3 Neutron Detectors without the use of polyatomic quench gases" paper presented at IEEE '94 Nuclear Science Symposium.

Energy Peak and Wall Effect

Only a single full energy peak will be observed for neutron energies that are small compared with 764KeV. On the left of the full energy peak there is a region known as the "wall effect" which contains two discontinuous steps (see figure 7).

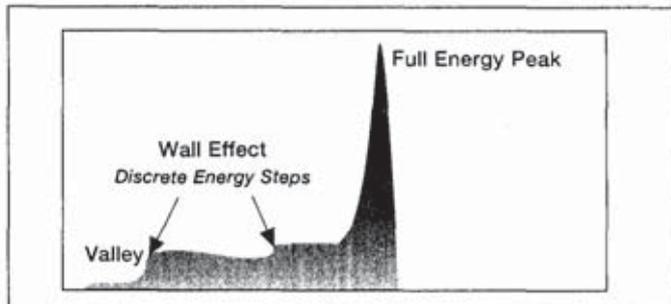


Figure 7 Helium-3 neutron spectrum as viewed on a Multichannel Analyzer.

The wall effect arises because the proton and triton daughter products of the reaction have discrete energies (573KeV and 191KeV respectively) and their ranges in the detector are usually larger than the dimensions of the detector. When one of the daughter products collides with the wall of the detector, its energy is dissipated and does not contribute to the full energy peak, thus creating the discrete steps in the spectrum (see figure 7).

In some cases it is desirable to reduce the wall effect. This can be accomplished in three ways:

- (1) Increase the diameter of the detector such that the ratio of daughter products colliding with the wall as compared to events that have the full energy deposited in the gas volume are reduced.
- (2) Increase the gas pressure to reduce the range of the daughter products in the gas volume.
- (3) Include an amount of a heavier gas in the admixture to increase the stopping power of the gas.

If the size and fill pressure are fixed by other considerations (e.g. sensitivity), the addition of a heavier gas is the common alternative. (Please note, adding a heavier gas will increase the gamma sensitivity of the detector.)

Helium-3 Sensitivity

The sensitivity of a He-3 Detector to thermal neutrons is a function of the amount of He-3 gas and increases with gas pressure for a fixed volume. Figures 8 and 9 are graphs of sensitivity per centimeter (cm) active length for different detector diameters at various pressures. To determine sensitivity, multiply the sensitivity per cm for a particular tube diameter by the active length in cm. Please note that the sensitivities are quoted for a standard gas filling of He-3 and carbon dioxide. If a special gas mixture is used which utilizes a large quantity of another gas (e.g. argon) then the following graph serves as a good approximation if only the amount of He-3 is considered.

Special Applications

For Nuclear Material Assay applications where timing is critical for coincidence measurements, the detector needs to be customized by design and gas filling to give a very fast pulse while maintaining the necessary sensitivity and operating voltage. The time characteristics of the output pulse are governed by the charge collection time within the detector, and are optimized by choosing anode size and gas mixtures to provide the most rapid avalanche propagation and recovery. The important characteristics are defined as follows:

- (1) Rise time refers to the leading edge of the pulse without regard to pulse polarity. It is the time interval between the pulse at 10% and 90% of the full amplitude.
- (2) Jitter time is the maximum time between the ionizing event in the gas and the formation of the voltage pulse.

Variation of Sensitivity with Fill Pressure

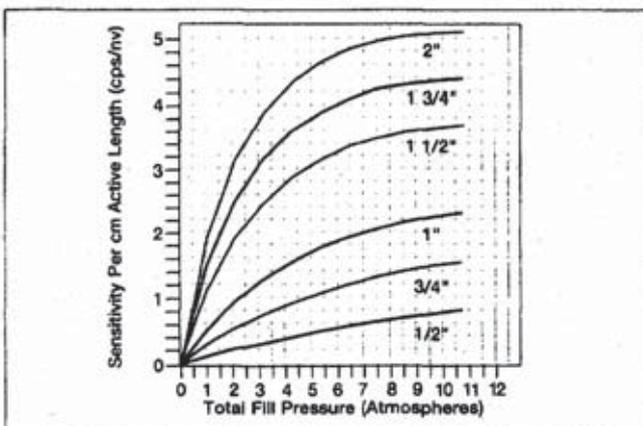


Figure 8 Helium-3 sensitivity per unit length for increasing gas pressure.

For low sensitivity applications figure 9 is a graph of sensitivity per cm active length for fill pressures 1-2 atmospheres.

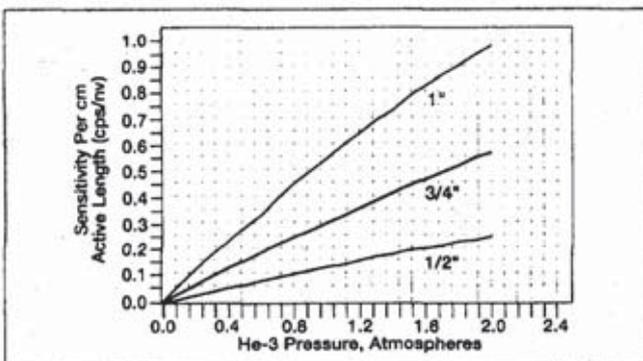


Figure 9 Helium-3 sensitivity per unit length for low gas pressures

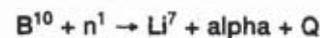
BF₃ Neutron Proportional Counters

Applications

Like Helium-3, Boron Tri-fluoride (BF₃) Proportional Counters are largely sensitive to Thermal Neutrons. Typical applications include: Thermal Neutron Diffraction, Spectroscopy, Industrial Gauging and Neutron Monitoring. Because TGM's BF₃ Proportional Counters can be used in gamma fields up to 100 R/h, they are well suited for measuring neutrons in mixed waste.

Theory of Detection

BF₃ neutron Proportional Counters utilize the B¹⁰(n,alpha) Li⁷ reaction.



In 93% of the reactions Q = 2.31 MeV, leaving the Lithium nuclide in the first excited state. The other 7% of the reactions have Q = 2.79 MeV, with the Lithium nuclide in the ground state.

The energy from the reaction with a thermal neutron is shared as kinetic energy of the daughter products. The reaction products are 0.84 MeV and 1.47 MeV for the Lithium nuclide and alpha particle respectively.

BF₃ compared to He-3 Neutron Detectors

BF₃ neutron detectors contain boron enriched to >90% B¹⁰. The thermal neutron cross section for B¹⁰ is 3840 barns. This is considerably less than the cross section of He-3 for thermal neutrons. The cross section drops off as 1/v up to about 0.1 MeV (v = neutron velocity).

Compared to He³, B¹⁰ has a lower cross section for thermal neutrons, making BF₃ detectors less sensitive. The one advantage is that the Q of the neutron reaction is much larger than for He-3, making it easier to discriminate against gamma pulses with a BF₃ tube. BF₃ detectors can easily be used in gamma fluxes of 100 R/hr and will give a life in excess of 10¹⁷ n/cm² (lifetime defined as a 10% reduction in original sensitivity).

Compared to He-3, BF₃ detectors function at much higher operating voltages. If more than 2-2.5 KV is necessary, it is recommended that a guard ring be used on the anode insulator. Guard rings prevent electrical leakage across the insulator contributing to the noise level of the signal from the detector.

Begleitunterlagen: Großes Radiometrisches Praktikum HM

e: Kontamination

Prof. Dr. Schwankner
Türkenstraße 78
80799 München
Lab.: 089/1265-2608
Büro.: 089/1265-2667
priv.: 089/33019260

Strahlenschutz-Messtechnik

heute und morgen

AUTOREN

Eberhard Frenzel
Heinz Kirsch
Frans Kniest
Ingo Kölln
Günther Wagner
Wolfram Westmeier

REDAKTION

Die Schriftleitung dankt **Eberhard Frenzel** für die Auswahl und Zusammenstellung der Unterthemen und die Gewinnung der fachkundigen Autoren sowie allen beteiligten Autoren für die tätige Bereitschaft zur Mitarbeit.

ZUSAMMENFASSUNG

Es werden aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der Strahlungsmessgeräte beschrieben, wobei die Schwerpunkte auf der Szintillationsmesstechnik und den Geräten zur hochauflösenden Spektrometrie liegen.

SUMMARY

Radiation Protection Measurement Techniques Today and Tomorrow

Topical developments in the field of radiation measuring instruments are described, in particular of scintillation measuring techniques and high-resolution spectrometry.

Die Entwicklung geht weiter

Ohne zuverlässige Messtechnik kein effektiver und nachvollziehbarer Strahlenschutz – diese fast schon triviale Erkenntnis reicht zurück bis zu den Anfängen der Dosiskonzepte und -definitionen in den 20er-Jahren des letzten Jahrhunderts. Die Blütezeit der Strahlenschutz-Messtechnik begann dann in der Nachkriegszeit, ausgelöst durch die Entwicklung der Kerntechnik und die zunehmende Verwendung von Radionukliden in Wissenschaft und Forschung, Medizin und Technik. Auch wenn etwa 30 Jahre später mit dem Einsatz der Digital- und Mikroelektronik ein gewisser Reifezustand erreicht war, geht die Entwicklung dennoch weiter – Anlass genug, um nach dem Schwerpunkt in Heft 2/2003, also nach fast sieben Jahren, wieder einen aktuellen Schwerpunkt zum Thema Strahlenschutz-Messtechnik in der StrahlenschutzPRAXIS zu bringen.

Um der Breite dieses Themas gerecht zu werden, weicht diesmal allerdings die Struktur des Schwerpunkts vom gewohnten Schema etwas ab. Im eigentlichen Schwerpunktteil haben die Messgerätehersteller Gelegenheit, wichtige Neuerungen und deren Vorteile für die Praxis im Detail vorzustellen. Die allgemeine Entwicklung der Messtechnik wird in zwei ausführlichen Übersichtsarbeiten in der Form von Fachbeiträgen dargestellt, und zwar „Entwicklung und Stand der Radioaktivitäts-Messtechnik“ (Christoph Wilhelm) und „Neuigkeiten aus der Personendosimetrie“ (Thomas Otto). Ergänzend werden außerdem in zusätzlichen Fachbeiträgen spezielle messtechnische Themen behandelt, von der Kalibrierung von Kontaminationsmonitoren bis zur Radonmessung in Bergwerken.

Es geht auch ohne Gas! Weiterentwicklung der Kontaminationsmesstechnik vom Zählgas zum Szintillator

Bis weit in die 90er-Jahre war bei der täglichen Überwachung und Messung von Kontaminationen der Griff zur Gasflasche Routine für den Strahlenschützer. Der Großflächendetektor des Kontaminationsmonitors musste als Erstes gespült werden und die Prüfung – ob der Detektor schon ausreichend gespült war – war eine Notwendigkeit, um verlässliche, reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten.

Ab Mitte der 90er-Jahre begann die Firma S.E.A. GmbH (Strahlenschutz-Entwicklungs- und Ausrüstungsgesellschaft) den gasgespülten und gasgefüllten Detektoren ernsthaft die „Gelbe Karte“ zu zeigen. Basierend auf der Detektortechnologie des dünn-schichtigen Plastikszintillators wurden die, z. B. in England eingesetzten, Detektorsysteme von NE (Nuclear Enterprises) weiterentwickelt und an die Forderungen der deutschen StrlSchV angepasst. In der Zeit von 1996 bis zum Anfang des neuen Jahrhunderts war die S.E.A. GmbH der Trendsetter in dieser innovativen Detektortechnologie. Heute haben fast alle führenden Hersteller für Kontaminationsmesstechnik die gasfreie Szintillationsdetektortechnologie im Programm. Auch die Weiterentwicklung im Bereich der Mikroelektronik und die deutliche Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Photomultipliern bei gleichzeitiger Reduzierung der Baugröße waren und sind positive Einflussfaktoren für die neue, praxisorientierte und bewährte Technologie.

Die Detektortechnologie des dünn-schichtigen Plastikszintillators

Bei dieser Detektortechnologie wird ein PVT-Szintillator mit ca. 0,35 mm Materialdicke in einem speziell entwickelten Detektorgehäuse so einge-

setzt, dass der Photomultiplier alle Bereiche des Detektorreflektor-raumes „überblicken“ kann. Der Photomultiplier ist nicht wie bei anderen Szintillationsdetektoren direkt mit dem Detektor-kristall gekoppelt. Beim großflächigen

Plastikszintillationsdetektor erfolgt die Kopplung von Detektor und PMT über Luft. Dazu ist der Innenraum des Detektorgehäuses mit einer Spezialfarbe beschichtet, die auf den Spektralbereich des Photomultipliers abgestimmt ist. Eine außen vor dem Detektormaterial befindliche, auf einen Rahmen gespannte aluminiumbedampfte Mylarfolie ($2 \times 2 \mu\text{m}$) schützt die Detektor-Photomultiplier-Kombination vor Lichteinfall. Die nach außen gerichtete Fläche des Plastikszintillators ist mit einer ZnS-Beschichtung versehen. In dieser dünnen Schicht reagiert die α -Strahlung mit dem Detek-

tormaterial. Über eine Analyse der Impulshöhen erfolgt in der Detektorelektronik die Trennung von α - und β/γ -Strahlung. Der Plastikszintillator erreicht vergleichbare Detektorwirkungsgrade wie die zählgasbasierten Großflächendetektoren (Tabelle 1).

Kontaminationsmesstechnik mit Szintillatortechnologie Einsatzbereiche

Die Kontaminationsmesstechnik mit Szintillatortechnologie wird heute in folgenden Bereichen eingesetzt:

- kerntechnische Industrie,
- Nuklearmedizin, Forschung ...,
- Katastrophenschutz, Feuerwehren, Homeland-Security.

Dabei findet die Detektortechnologie bei folgenden Messsystemen Anwendung:

- mobile Kontaminationsmonitore mit Detektorgrößen von 150–300 cm^2 ,
- stationäre Kontaminationsmonitore (HFK Hand-Fuß-Kleider-Kontaminationsmonitore, Ganzkörperkontaminationsmonitore),
- mobile und stationäre Wischtestmessplätze,

Nuklid	Ca.-Wirkungsgrad
^{14}C	14 %
^{18}F	18 %
^{32}P	25 %
^{33}P	12 %
^{36}Cl	42 %
^{60}Co	23 %
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (auf ^{90}Sr bezogen)	42 %
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	3 %
^{125}I	12 %
^{131}I	21 %
^{137}Cs	35 %
$^{241}\text{Am } \alpha$	18 %
$^{238}\text{Pu } \alpha$	18 %
$^{238}\text{U } \alpha$	22 %

Tabelle 1: Radionuklidempfindlichkeit für den mobilen Kontaminationsmonitor CoMo-170 (Mittelwerte aus Messungen mit 100 cm^2 -Präparaten)

Analyse der Impulshöhen

- Messplätze zur Kontrolle und Freigabe zwischengelagerter radioaktiver Abfälle,
- Wäsche- und Kleinteilekontaminationsmonitore,
- Messeinrichtung zur Kontrolle und Freigabe von großen Flächen, z. B. beim Rückbau,
- kerntechnische Anlagen (Detektoren mit 1.000–2.500 cm²).

Keine Gasversorgung mehr notwendig

Vergleicht man die Szintillatortechnologie mit den auf Zählgas basierenden Detektorsystemen, so ist es ein wesentlicher, grundsätzlicher Vorteil, dass kein Zählgas mehr benötigt wird. Für den regelmäßigen Betrieb eines mobilen Kontaminationsmonitors, z. B. in einem Kernkraftwerk, werden ca. 200–300 EUR pro Jahr für Zählgas benötigt. Bei stationären Monitorsystemen kann heute komplett auf die zentrale Zählgasversorgung verzichtet werden. Damit reduzieren sich die Kosten und ein logistisches Problem entfällt. Je nach Systemgröße der zentralen Gasversorgung spart man einige Tausend Euro Investitionskosten und Betriebskosten pro Jahr. So wird heute, z. B. beim Bau von Transportbereitstellungshallen an den Kraftwerksstandorten, an denen üblicherweise ein Zehnfach-Wischtest-Messplatz und ein stationärer Personenkontaminationsmonitor eingesetzt wurden, komplett auf die zentrale Gasversorgung verzichtet. Neben dem Kostenvorteil ist dies auch ein sicherheitstechnisches Argument durch den Wegfall von brennbaren oder explosiblen Gasgemischen.

Die nicht benötigte regelmäßige Gasversorgung hat Kontaminationsmonitoren mit dünn-schichtigen Plastikszintillatoren gerade auch in den sogenannten „Dritte-Welt“-Ländern zu einem Durchbruch verholfen und zu einer Verbesserung des praktischen Strahlenschutzes beigetragen.

Immer einsatzbereit

Der Kontaminationsmonitor mit Szintillatortechnologie ist immer einsatzbereit. Die zeitaufwendige Gasspülung

vor dem ersten Einsatz entfällt. Messfehler durch nicht ausreichend gespülte Detektoren werden vermieden. Dieses sind immer wieder Argumente für den Einsatz von Kontaminationsdetektoren im Bereich der Feuerwehren und des Katastrophenschutzes. Zusätzlich ist gerade in diesem Umfeld auch die Temperaturbeschränkung der gasgespülten Detektoren ein kritischer Einsatz-

punkt. Aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Zählgases können mit Flüssiggas gespülte Detektoren nur bis etwa +2 °C eingesetzt werden. Kontaminationsmonitore mit Plastikszintillator können ohne Einschränkung bis –20 °C eingesetzt werden. Kriterium für die –20 °C ist nicht der Detektor, sondern Systembauteile

wie z. B. das bei tiefen Temperaturen träger werdende LC-Display.

Simultane α - und β/γ -Messung

Mit dem Zinksulfid-beschichteten Plastikszintillationsdetektor ist eine simultane α - und β/γ -Messung möglich. Dadurch kann speziell im Bereich der Feuerwehren und der Homeland-Security auf das Vorhalten von zwei getrennten Detektorsystemen (Gasdurchfluss- und

Xenondetektor) verzichtet werden. Ein Detektorwechsel ist nicht erforderlich.

Reparaturfreundlich

Gegenüber den permanent gasgefüllten Xenondetektoren reduzieren sich bei notwendigen Detektorreparaturen (mechanische Beschädigung der Detektorfolie (Titanfolie)) deutlich die Kosten. Je nach Detektortyp oder Detek-

Gasspülung vor dem Einsatz entfällt



Abb. 1: Mobiler Kontaminationsmonitor CoMo-170

torgroße betragen die Reparaturkosten ca. 600–1.000 EUR. Die Reparatur des Xenondetektors kann nur beim Hersteller erfolgen, was eine deutliche Einschränkung der Verfügbarkeit mit sich bringt. Wird beim Kontaminationsmonitor mit Plastiksintillationsdetektor die Mylarfolie beschädigt, so kann vom Anwender in kürzester Zeit die Folie selbst

repariert oder komplett ausgetauscht werden. Die Kosten für das Ersatzmaterial betragen 10–100 EUR.

Geringeres Gewicht

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen müssen große Flächen freigesessen werden, d. h. hier muss täglich z. B. über acht Arbeitsstunden mit einem Kontaminationsmonitor Schritt für Schritt die Fläche kontrolliert werden. Dabei werden heute Systeme mit Detektorflächen von 300 bis zu 1.000 cm² eingesetzt (Abb. 1). Auch der praktische und ergonomische Faktor des geringen Gewichtes spielt bei

dieser Messaufgabe eine Rolle. Der Kontaminationsmonitor CoMo-300 mit 300 cm² Detektorfläche wiegt gerade 1.000 g! Gasgespülte Detektoren vergleichbarer Größe wiegen 2.000–3.000 g.

Fortschritte durch die Mikroelektronik

Unabhängig von den detektorspezifischen Vorteilen des Plastiksintillators haben sich durch die vielfältigen Möglichkeiten und die hohe Leistungsfähigkeit der Mikroprozessoren und der modernen Mikroelektronik erweiterte Leistungsfaktoren für die Kontaminationsmessgeräte ergeben. Alle detektorspezifischen Parameter werden standardmäßig in der auf dem Detektor befindlichen Elektronik gespeichert, sodass z. B. bei einem auftretenden Detektordefekt ein kurzfristiger Austausch von Detektoren möglich ist.

Die Elektronik erkennt automatisch den Detektor und übernimmt die spezifischen Detektordaten und -einstellungen.

Fortschritte bei Speicherung und Darstellung der Messergebnisse

Die Messergebnisse des Kontaminationsmonitors können, je nach Notwendigkeit, neutral in Impulsen pro Sekunde (ips, cps) oder nuklidbezogen in Bq oder Bq/cm² angezeigt werden.

Eine Datenbank mit allen nuklidrelevanten Daten ist im System gespeichert.

Da bei Kontaminationsmessungen im kerntechnischen Bereich je nach Reaktortyp oder abhängig von Leistungsfaktoren oder Systemzustand unterschiedliche Leitnuklide bzw. Nuklidzusammensetzung vorliegen können, ist es bei modernen Kontaminationsmonitoren möglich, auch Nuklidvektoren als Messparameter vorzugeben.

Die ermittelten Kontaminationsmesswerte inklusive aller relevanten Messparameter können bei mobilen Messsystemen auch gespeichert und in Verbindung mit einem PC-System und anwendungsspezifischer Software zu Protokollen weiterverarbeitet werden. Für die Qualitätskontrolle bzw. für wiederkehrende Prüfungen sind moderne Kontaminationsmonitore mit Menüfunktionen, wie z. B. der Autokalibrierung, ausgestattet.

Kombinationsmöglichkeiten

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass heute durch praxisorientierte Systemerweiterungen, z. B. beim mobilen Kontaminationsmonitor, aus einem einfachen mobilen Messgerät ein komplettes Messsystem entstehen kann. Beispiele dafür:

- Die Kombination mit einer Wandstation macht den mobilen Kontaminationsmonitor zu einer stationären Messeinrichtung mit integrierter Ladung und automatischer Nulleffektsubtraktion.

Detektorspezifische Parameter gespeichert

Praxisorientierte Systemerweiterungen



Abb. 2: PC-gestützter Zehnfach-Wischttest-Messplatz WIMP 60 x 10

- Die Kombination mit einer Wischtest-Messeinrichtung macht den mobilen Kontaminationsmonitor zu einem einfachen, preiswerten Wischtest-Messplatz.
- Der Anschluss externer Detektoren erweitert und spezialisiert den Ein-

satzbereich. Zum Beispiel runden Rohrdetektoren für Kontaminationsmessungen an Rohrrinnenflächen oder die Kombination von Dosisleistungsmessung und Kontaminationsmessung mit einem kombinierten System die Palette ab.



Abb. 3: Wäschekontaminationsmonitor mit Förderbandsystem

Auch bei größeren Messsystemen wie Mehrfach-Wishtestmessplätzen (Abb. 2) oder Wäschemonitoren (Abb. 3) sind heute bevorzugt Szintillationsdetektoren im Einsatz.

Kalibrierung

In Deutschland unterliegen Kontaminationsmonitore nicht der Eichpflicht, d. h. es gibt keine Bauartzulassung. In anderen europäischen Ländern wie z. B. in Österreich, Tschechien und der Schweiz sind auch Kontaminationsmonitore eichpflichtig.

Fazit

Kontaminationsmonitore mit der Detektortechnologie des dünn-schichtigen Plastiksintillationsdetektors haben sich sowohl in der täglichen Routinepraxis des Strahlenschutzes in der Kerntechnik, in der Nuklearmedizin und Forschung als auch bei den relativ selten vorkommenden Einsätzen der Feuerwehr in Sondereinsätzen mit radioaktiven Kontaminationen sehr gut bewährt. Die innovative Detektortechnologie hat sich als Standard in der Praxis etabliert.

Heinz Kirsch □

Der etwas andere Kommentar,
heute zum Thema:
„Es geht auch ohne Gas“

Dank des Fortschritts gibt's,
muss man betonen,
bei Detektor'n stets Neu-Kreationen.
Statt der Gas-Elektronen
sind's heut' Szinti-Fotonen.
Doch trotz Fortschritts: Was bleibt,
sind die -onen!

Rupprecht Maushart, Straubenhardt

7.6. Die programmierten Kalibrierfaktoren

Liste der Radionuklide mit Kalibrierfaktoren, die im Kontaminations-Monitor LB 122, Programm-Version 2.7, für die Umrechnung von ips in Bq/cm² fest programmiert sind. Es wurden Prüfquellen von der genormten Fläche 10 cm x 10 cm verwendet.

Nuklid	Kalibrierfaktoren für Zählrohre		
	b-g (Xenon)	a-b (Butan)	a-b (P-10)
-A-	*	0.1	0.1
B1	Variabel	Variabel	Variabel
B2	Variabel	Variabel	Variabel
-B-	0.046	0.046	0.046
C-14	0.280	0.059	0.059
NA-22	0.048	*	*
P-32	0.026	0.026	0.026
S-35	0.28	0.06	0.06
CA-45	0.1	0.05	0.05
CR-51	0.86	*	*
FE-55	1.5	*	*
CO-57	0.21	*	*
FE-59	0.07	*	*
CO-60	0.074	0.036	0.036
NI-63	*	0.3	0.3
SE-75	0.32	*	*
SR-85	0.5	*	*
SR-90	0.034	0.030	0.030
TC-99	0.31	*	*
I-123	0.31	*	*
I-125	0.451	*	*
I-131	0.046	0.035	0.035
KB/L I-131	0.425	0.290	0.290
CS-137	0.048	0.035	0.035
KB/L CS-137	0.360	0.260	0.260
AU-198	0.028	*	*
TL-201	0.17	*	*
TL-204	0.052	0.039	0.039
RA-226	0.09	0.08	0.08
U-238	0.31	0.08	0.08
AM-241	0.093	0.071	0.071

* = gesperrt

10.6. Die programmierten Kalibrierfaktoren

Liste der Radionuklide mit Kalibrierfaktoren, die im UMo LB 123 für die Umrechnung von ips in Bq/cm² fest programmiert sind. Es wurden Prüfquellen von der genormten Fläche 10 cm x 10 cm verwendet.

Nuklid	Kalibrierfaktoren für Zählrohre		
	b-g (Xenon)	a-b (Butan)	a-b (P-10)
-A-	*	0.1	0.1
B1	Variabel	Variabel	Variabel
B2	Variabel	Variabel	Variabel
-B-	0.046	0.046	0.046
C-14	0.28	0.059	0.059
NA-22	0.048	*	*
P-32	0.026	0.026	0.026
P-33	0.1	0.05	0.05
S-35	0.28	0.06	0.06
CA-45	0.1	0.05	0.05
CR-51	0.86	*	*
FE-55	1.5	*	*
CO-57	0.21	*	*
FE-59	0.07	*	*
CO-60	0.074	0.036	0.036
NI-63	*	0.3	0.3
SE-75	0.32	*	*
SR-85	0.5	*	*
SR-90	0.034	0.030	0.030
TC-99	0.31	*	*
I-123	0.31	*	*
I-125	0.451	*	*
I-131	0.046	0.035	0.035
KB/L I-131	0.425	0.290	0.290
CS-137	0.048	0.035	0.035
KB/L CS-137	0.360	0.260	0.260
AU-198	0.028	*	*
TL-201	0.17	*	*
TL-204	0.052	0.039	0.039
RA-226	0.09	0.08	0.08
U-238	0.31	0.08	0.08
AM-241	0.093	0.071	0.071

* = gesperrt

$$A \text{ [Bq/ cm}^2\text{]} = \text{Nettocounts [ips]} \cdot F \text{ [Bq/(cm}^2\cdot\text{ips)]}$$

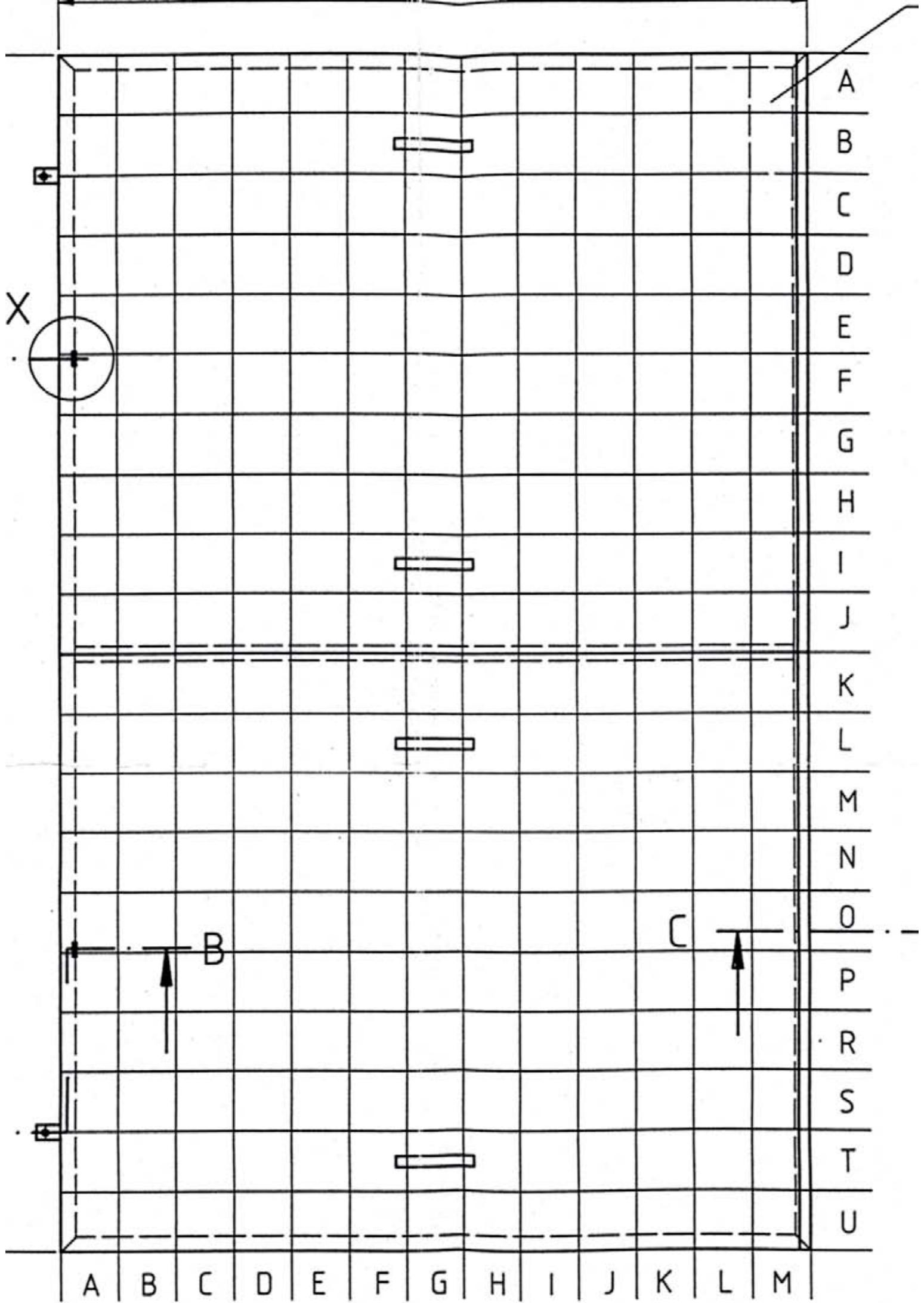
BERTHOLD TECHNOLOGIES (D-75323 Bad Wildbad) LB123 UMO

Butan- Sonde	Co-60	Cs-137	C-14	Am-241
Kalibrierfaktor F aus Gerätehandbuch [Bq/(cm ² ·ips)]	0,036	0,035	0,059	0,071
Flächenaktivität A nach Präparate- Zertifikat (halbwertszeit- korrigiert) [Bq/cm ²]				
Untergrund [ips]				
Nettocounts [ips]				
berechnete Aktivität [Bq/cm ²]				
Masse [pg/cm ²]				

$$A \text{ [Bq/ cm}^2\text{]} = \text{Nettcounts [ips]} \cdot F \text{ [Bq/(cm}^2\text{·ips)]}$$

BERTHOLD TECHNOLOGIES (D-75323 Bad Wildbad) LB122 UMO

Xenon- Sonde	Co-60	Cs-137	C-14	Am-241
Kalibrierfaktor F aus Gerätehandbuch [Bq/(cm ² ·ips)]	0,074	0,048	0,28	0,093
Flächenaktivität A nach Präparate- Zertifikat (halbwertszeit- korrigiert) [Bq/cm ²]				
Untergrund [ips]				
Nettcounts [ips]				
berechnete Aktivität [Bq/cm ²]				
Masse [pg/cm ²]				



Begleitunterlagen: Großes Radiometrisches Praktikum HM

f: Radon/Radon Folgeprodukte

Prof. Dr. Schwankner
Türkenstraße 78
80799 München
Lab.: 089/1265-2608
Büro.: 089/1265-2667
priv.: 089/33019260

Das öffentliche Gesundheitswesen

Präventivmedizin, Rehabilitation, öffentlicher Gesundheitsdienst,
Sozialhygiene, Sozialmedizin und Gesundheits-System-Forschung

Schriftleitung

J. G. Gostomzyk, Augsburg
F. Beske, Kiel
R. Brennecke, Berlin
S. Leidel, Köln
H. Slomon, Osnabrück
W. Steuer, Stuttgart

Beirat

R. Creutz, Bochum
M. Exner, Gelsenkirchen
Ch. Göttching, Freiburg i. Br.
R. Großpietzsch, Aurich
K.-O. Gundermann, Kiel
K. Hartung, Frankfurt
U. Laaser, Bielefeld
H. Meireis, Frankfurt
P. Moritz, München
M. Pfaff, Augsburg
H. Piechowiak, Regensburg
H.-H. Raspe, Lübeck
D. Scholz, Berlin
M. A. Schreiber, München
F. W. Schwartz, Hannover
H. Steinitz, Freiburg

Sonderdruck

© Georg Thieme Verlag Stuttgart · New York
Nachdruck nur mit Genehmigung des Verlags

$^{220,222}\text{Rn}$ Radon-Exposition in Innenräumen

R. J. Schwankner, A. Brummeisl, P. Höpfl, M. Mundenbruch, M. Steiner
 Fachhochschule München

Indoor Exposure to $^{220,222}\text{Rn}$ Radon

The inhalation of short-lived decay products of $^{220,222}\text{Rn}$ Radon accounts on the average for half of the effective dose equivalent from all natural sources of radiation. Sources of emanation/exhalation and subsequent mechanisms of indoor invasion of $^{220,222}\text{Rn}$ Radon are discussed. Both seasonality of $^{220,222}\text{Rn}$ Radon concentration (in- & outdoor) and the indoor ventilation rate are considered.

Key words

Outdoor/indoor radon – Exhalation –
 Emanation – Invasion – Natural radiation doses

Zusammenfassung

Die Inhalation kurzlebiger Folgeprodukte von $^{220,222}\text{Rn}$ Radon zeichnet für die Hälfte der mittleren natürlichen Strahlenexposition – ausgedrückt in effektiver Äquivalentdosis – verantwortlich. Die Emanations/Exhalations-Quellen und die damit verknüpften Mechanismen der Invasion von $^{220,222}\text{Rn}$ Radon in den Innenraum werden diskutiert. Betrachtet werden sowohl die Saisonalität der $^{220,222}\text{Rn}$ Radon-Aktivitätskonzentration (in Innen- und Außenluft) als auch die Lüftungsrate von Innenräumen.

1. Einführung

Die ubiquitär in der Natur vorkommenden Isotope des Edelgases $Z = 86$ Radon und insbesondere ihre kurzlebigen Zerfallsprodukte tragen maßgeblich zur radiogenen Belastung der Lunge – vor allem des Bronchiepithels – bei. Etwa die Hälfte der natürlichen Strahlenexposition der Bevölkerung gehen auf diese selektive, inhalative Organbelastung (Alpha-Exposition) zurück (Abb. 1). Durch entsprechende Lebensgewohnheiten sowie bauliche Maßnahmen läßt sich die kumulierte Exposition dieser *Innenraumbelastung* und das möglicherweise damit verknüpfte Lungenkrebsrisiko senken. Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit den naturwissenschaftlichen Grundlagen dieses Expositionsphänomens (1–4).

2. Radiochemie von $Z = 86$ (Radon)

Auf die Entdecker des Radiums, *M. und P. Curie*, geht die Beobachtung zurück, daß Luft, welche mit offenen Radiumpräparaten in Kontakt kommt, alle Gegenstände der Umgebung „radioaktiv“ macht. *F. E. Dorn* in Halle belegte um 1900, daß die so „induzierte“ Radioaktivität auf ein radioaktives Gas, „Emanation“ genannt, zurückzuführen ist, das seinerseits selbst als Folgeprodukt aus dem Alpha-Zerfall des Mutternuklids Radium hervorgeht. In der Folge fand *E. Rutherford* eine ähnliche Erscheinung beim Thorium („Thoriumemanation“ (5)) sowie *A. Debierne* (1905) und *F. Giesel* (1903) beim Actinium („Actinon“ (6)).

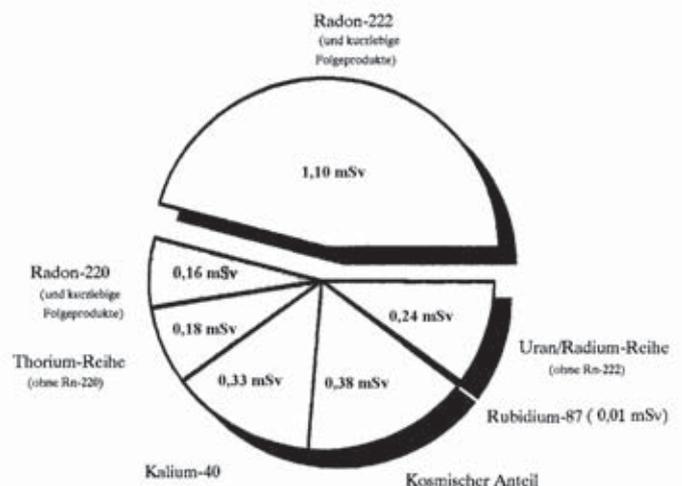


Abb. 1 Strahlenexposition aus natürlichen Quellen, bilanziert als mittlere effektive Äquivalentdosis (nach (1)).

In der weiteren Entwicklung der Radiochemie setzten sich statt der o. g. schwerfälligen Bezeichnungen die Begriffe „Radon“, „Thoron“ und „Actinon“ für die drei Emanationen durch. Bis heute wurden 28 Isotope des Edelgases Radon indiziert, welche alle radioaktiv sind und wobei das ^{222}Rn Radon („Radon“) mit 3,8 d die längste Halbwertszeit aufweist.

Für die natürliche inhalative Bevölkerungsexposition mit dem reaktionsträgen (erste chemische Verbin-

Tab.1a Nukleardaten zur 4n+2(Uran/Radium)-Zerfallsreihe

Radionuclide Decay Chain	T _r	λ _r (h ⁻¹)	Main Energies (in MeV) and Intensities		
			α	β	γ
²²² Rn ↓ α	3.823 d	7.55 · 10 ⁻³	5.49 (100 %)	-	-
²¹⁸ Po ↓ α	3.05 min	13.63	6.00 (~100 %)	-	-
²¹⁴ Pb ↓ β, γ	26.8 min	1.55	-	0.65 (50%) 0.71 (40%) 0.98 (6%)	0.295 (19%) 0.352 (36%)
²¹⁴ Bi (RaC) ↓ β, γ	19.7 min	2.11	-	1.0 (23%) 1.51 (40%) 3.26 (19%)	0.609 (47%) 1.12 (17%) 1.76 (17%)
²¹⁴ Po ↓ α	164 μs	1.52 · 10 ⁷	7.69 (100 %)	-	-

dungen von Radon wurden erst 1960 dargestellt (6) *monoatomaren* Edelgas und seinen Folgeprodukten sind aufgrund ihres unterschiedlichen Vorkommens, ihren Zerfallseigenschaften (Zerfallsenergie und Halbwertszeit) besonders die Isotope [²²²Rn]und [²²⁰Rn]Radon („Thoron“, t_{1/2} = 55,6 s) von Bedeutung. Sie gehen als Glieder der sog. 4n+2(„Uran-Radium“-) und 4n(„Thorium“-)Zerfallsreihe aus primordialem [²³⁸U]Uran (natürliche Isotopenhäufigkeit H = 99,275%) sowie [²³²Th]Thorium (H = 100%) hervor (Abb. 2, Tab. 1a, b).

Das aus der 4n+3(„Uran-Actinium“-)Zerfallsreihe als radiogenetisches Folgeprodukt von [²³⁵U]Uran hervorgehende [²¹⁹Rn]Radon („Actinon“) wird sowohl aufgrund der geringen Isotopenhäufigkeit des Startnuklids der Zerfallsreihe (H = 0,720%) und seiner kurzen Halbwertszeit (t_{1/2} (²¹⁹Rn) = 3,96 s) nicht in die weiteren Betrachtungen einbezogen.

3. Omnipräsenz und Zerfall von Z = 88 (Radium)

Die radiogenetischen Startnuklide der Zerfallsreihen, aus welchen [^{220,222}Rn]Radon hervorgehen, treten als primordiale natürliche Bestandteile in allen Böden – [²³⁸U]Uran zu ca. 5 ppm und [²³²Th]Thorium zu ca. 10 ppm (7, 8) – auf. Aus ihnen gehen die unmittelbaren Mutternuklide der Radon-Isotope [^{224,226}Ra]Radium hervor (Abb. 2).

Je nach den lokalen geochemischen Verhältnissen der Bodenmatrix kann es dabei zur Einstellung eines raumzeitlichen Gleichgewichts zwischen ²³⁸U/ ²²⁶Ra bzw.

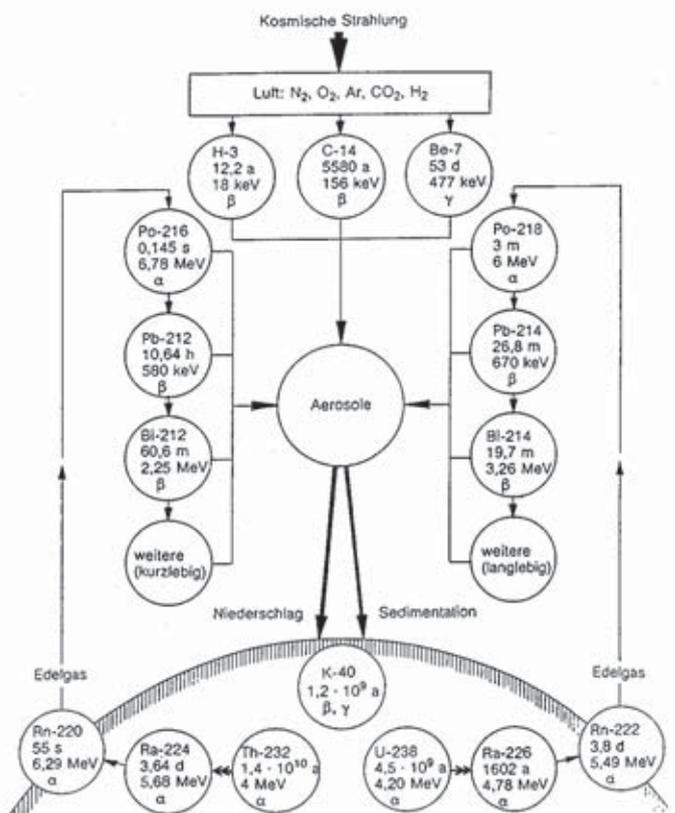


Abb. 2 Generation und Exhalation von [^{220,222}Rn]Radon.

Tab. 1b Nukleardaten zur 4n(Thorium)-Zerfallsreihe

Radionuclide Decay Chain	T _r	λ _r (h ⁻¹)	Main Energies (in MeV) and Intensities		
			α	β	γ
²²⁰ Rn ↓ α	55 s	45.36	6.29 (100%)	-	0.55 (0.07%)
²¹⁶ Po ↓ α	0.15 s	1.66 · 10 ⁴	6.78 (100%)	-	-
²¹² Pb ↓ β, γ	10.64 h	0.06514	-	0.346 (81%) 0.586 (14%)	0.239 (47%) 0.300 (3.2%)
²¹² Bi 64% β, γ 36% α	60.6 min	0.686	6.05 (25%) 6.09 (10%)	1.55 (5%) 2.26 (55%)	0.040 (2%) 0.727 (7%) 1.620 (1.8%)
²¹² Po (ThC') ↓ α	304 ns	8,21 · 10 ⁹	8.78 (100%)	-	-
²⁰⁸ Tl (ThC'') ↓ β, γ	3.10 min	13.41	-	1.28 (25%) 1.52 (21%) 1.80 (50%)	0.511 (23%) 0.583 (86%) 0.860 (12%) 2.614 (100%)

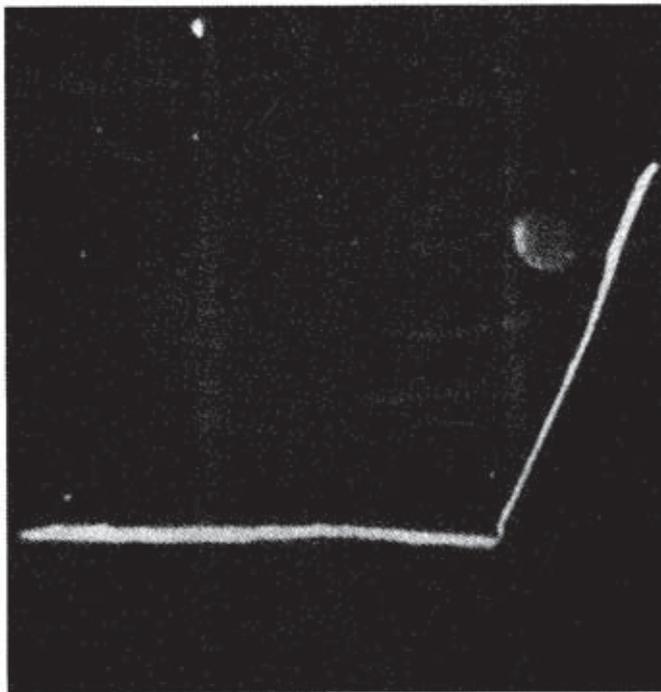
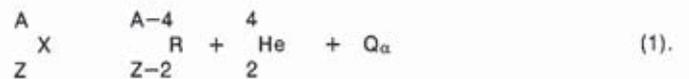


Abb. 3 Sukzessiver Alpha-Zerfall (Δt = 0,15 s) von [²²⁰Rn]Radon und seinem Tochterprodukt [²¹⁶Po]Polonium, aufgenommen in einer kontinuierlichen Nebelkammer (E_α = 6,29 (100%), E_α = 6,78 MeV (100%); aus (9); aufgenommen von R. J. Schwankner, Ch. Wimmer und G. Lieckfeld).

²³²Th/²²⁴Ra kommen oder durch örtliche Verfrachtung der z. B. wassergetragenen Radium-Isotope wird dieser Zustand nicht erreicht. Beim Zerfall der Radium-Isotope beider Zerfallsreihen wird – chemisch gesehen – die natürliche Elementtransmutation von einem schweren Erdalkalimetall (Z = 88, Ra) zu einem in monoatomarer Dispersion auftretenden Edelgas (Z = 86, Rn) vollzogen.

Die bei der Alpha-Umwandlung der Radium-Isotope (1) freiwerdende Energie (Q_α) wird dabei auf das emittierte Alpha-Teilchen (E_α(He-4)) und den entstehenden schweren Radon-Rückstoßkern (E_R) übertragen (A = Nukleonenzahl, Z = Ordnungszahl) (2):



Unter nichtrelativistischer Bilanzierung des Impuls- und Energieerhaltungssatzes der Zerfallsprozesse (1)

$$E_\alpha = Q_\alpha \frac{m\left(\begin{matrix} A-4 \\ R \end{matrix}\right)}{m\left(\begin{matrix} 4 \\ \text{He} \end{matrix}\right) + m\left(\begin{matrix} A-4 \\ Z-2 \end{matrix}\right)} \quad (2)$$

ergibt sich, daß nahezu die gesamte Zerfallsenergie (98–99% Q_α) auf das Alpha-Teilchen übertragen wird. Die Rückstoßenergie, welche in der Größenordnung von 100 keV liegt, kann so für den Übertritt von entstehendem [²²⁰/₂₂₂Rn]Radon

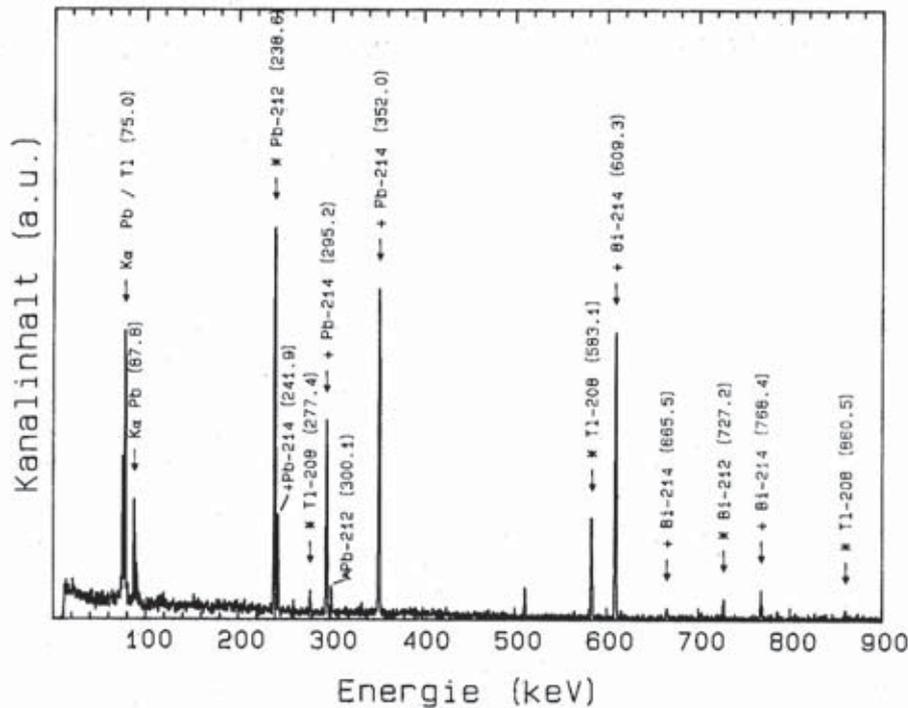


Abb. 4 Gammaspektrum einer Wischprobe von kathodischer elektrostatischer Deposition ($U_{\text{Abscheidedraht}} = -1,5 \text{ kV}(=)$) der kurzlebigen Folgeprodukte von $^{220,222}\text{Rn}$ Radon (primär $^{212,214}\text{Pb}$ Blei) aus Innenraumluft ($t_{\text{Depo}} = 70 \text{ h}$; $t_{\text{Start}} = 60 \text{ s}$ nach Probengewinnung; $t_{\text{Mess}} = 1.200 \text{ s}$; die indizierten Glieder der Uran/Radium (+) und Thorium-Reihe (x) sind entsprechend gekennzeichnet; A. Brummeisl, BRK-Radiometrie, Traunreut: 27.5.–29.5.91).

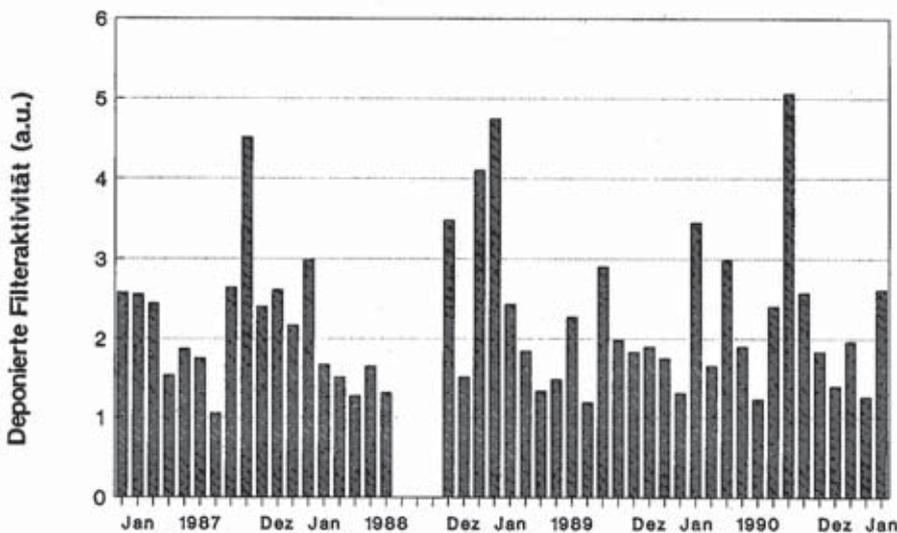


Abb. 5 Monatliche Zufallsstichprobe von luftgetragenen, aerosolgebundenen kurzlebigen $^{220,222}\text{Rn}$ Radon-Folgeprodukten, als Filterdeposition; (Sammler: Staplex TF 1A-2; Filter: Schleicher & Schuell Nr. 100/Ref. Nr.: 311609, $\varnothing = 90 \text{ mm}$; $t_{\text{Sammel}} = 90 \text{ min}$; P. Höpfl, BRK-Radiometrie, Starnberg).

(R!) in die Bodenporen verantwortlich zeichnen (Emanierverhalten) (9).

An den Grenzflächen *Bodenpartikel/Luft/Bodenpartikel* bzw. *Bodenpartikel/Bodenlösung/Bodenpartikel* kann so durch Rückstoßinjektion der direkte bzw. indirekte Übertritt des Folgeprodukts Radon in das jeweilige Bodenmedium eingeleitet werden (Emanierung), es schließt sich Transport und Übertritt in die bodennahe Luft (Exhalation) des noch nicht zerfallenen Radonanteils an, welcher dann, je nach Wegsamkeit bzw. Transportmedium (z. B. CO_2) horizontal bzw. vertikal verfrachtet wird (10). Diese mechanistischen Aussagen gelten im Prinzip auch für dem Boden entnommene mineralische Baurohstoffe und ihre Zubereitungen.

Die Wegstrecken, welche derartige Rückstoßatome in der Matrix von soliden Bodenpartikeln zurückzule-

gen im Stande sind, liegen in der Größenordnung von $1-3 \cdot 10^{-8} \text{ m}$ (11).

Die Aktivitätskonzentration von ^{226}Ra Radium in der Matrix von schwedischen Ackerböden wurde zu $15-360 \text{ Bq/kg}$ und der daraus resultierende Wert der Aktivitätskonzentration in der Bodenluft an ^{222}Rn Radon zu $5-200.000 \text{ Bq/m}^3$ bestimmt, wobei der jeweils obere Wert auf den Bodenbestandteil „uranreicher Granit“ zurückzuführen sein dürfte (12).

4. Exhalation und Zerfall von $Z = 86$ (Radon)

Die überwiegend durch Rückstoßinjektion in die Bodenporen vorgedrungenen Radon-Atome haben nun, je nach Halbwertszeit des entsprechenden Nuklids sowie ihrem/n Diffusionsweg und -bedingungen die prinzipielle Chance, die Bodenoberfläche zu erreichen, um in die freie At-

Tab. 2 Spezifische Aktivitäten/Konzentrationen (nach Dichtekorrektur der Selbstabsorption) von indizierten Gliedern (Abb. 4, 6) der 4n+2(Uran/Radium)- und 4n(Thorium)-Zerfallsreihe ausgewählter Baustoffe/-rohstoffe (BRK-Radiometrie Traunreut, 1990/91)

Probe Nr.	Bezeichnung (Ort)	Rohdichte g/cm ³	Th 234 + Bq/kg	Pb 214 + Bq/kg	Bi 214 + Bq/kg	U 238 (als Th 234) ppm	Ac 228 * Bq/kg	Bi 212 * Bq/kg	Th 232 (als Ac 228) ppm	K 40 Bq/kg	Kalium ppm
01	Kalksand Amberg (Obpf.)	2,27	124	65	57	10	101	63	25	1461	31210
02	Granitgestein Girsnitz (Obpf.)	2,63	52570	56470	53920	4360	<1	<1	<1	691	20530
03	Lehm Rötze (Obpf.)	2,64	115	41	37	10	54	39	13	651	13910
04	Lehm Freising	2,65	160	49	47	13	62	40	15	861	18390
05	Quarz-Sand Hirschau (Obpf.)	2,61	44	21	22	4	30	18	7	576	12300
06	Kies Freising	2,58	59	29	23	5	4	3	1	163	3480
07	Ziegel Freising	2,49	78	66	55	6	49	35	12	611	13050
08	Knorpel-Gips Rohrdorf	2,45	61	21	18	5	6	3	2	255	5450
09	Rea-Gips Zolling	2,06	21	5	5	2	2	1	1	16	342
10	Kalkgemisch Rohrdorf	2,51	76	27	23	6	17	12	4	276	5900
11	Hüttensand Zolling	2,55	197	43	81	16	40	29	10	242	5170
12	Sand Bruck (Obpf.)	2,42	46	17	13	4	18	12	4	1045	22320

mosphäre überzutreten (Exhalation). Für [²²²Rn]Radon ($t_{1/2} = 3,8$ d) ergibt sich so bei ungestörter Diffusion in den Bodenporen für die Exhalation in die bodennahe Luft noch ein namhafter Beitrag aus Bodentiefen bis zu 2 m; die um den Faktor 6.000 kleinere Halbwertszeit von [²²²Rn]Radon ($t_{1/2} = 55,6$ s) bedingt, daß sein entsprechender Beitrag nur bis zu 2 cm Diffusionsweg (Bodentiefe) verzeichnet wird (Tab. 1a, b) (8).

In beiden Zerfallsreihen (Abb. 2) wandelt sich das jeweilige Radon-Isotop sodann unter sukzessiver Emission von zwei Alpha-Teilchen um. Im Falle von [²²⁰Rn]Radon werden so innerhalb von 0,15 s zwei Alpha-Emissionen erfolgen, was in Abb. 3 durch Nebelkammeraufnahmen der entsprechenden Ionisationsspuren im Absorber Luft registriert wird (5). Wendet man auf diese Alpha-Umwandlungen der jeweiligen Radon-Isotope nunmehr Gleichung (2) an, so ergibt sich, daß die kinetische Energie der entstehenden Schwermetall-Rückstoßatome bedingt, daß diese (mittlere freie Weglänge in der Atmosphäre ca. 10^{-4} m) durch Zusammenstoß mit umgebenden Gasmolekülen der Luft Stoßionisation erleiden und somit vorübergehend als *Kationen in der Gasphase* auftreten.

Diese Kationen können z. B. auf einem negativ geladenen, in der freien Atmosphäre gespannten Draht ($\varnothing = 0,2$ mm) infolge der hohen Radialfeldstärke elektrostatisch deponiert werden (5, 13). Abb. 4 zeigt so in Verbindung mit Tab. 1 das Gamma-Spektrum einer Wischprobe eines derartigen Innenraumexperiments elektrostatischer Deposition,

es werden sowohl Glieder der 4n- also auch der 4n+2-Zerfallsreihe, welche auf die jeweiligen luft- bzw. aerosolgetragenen Radon-Isotope folgen, detektiert (Tab. 1a, b).

Die beim Zerfall des Radons in der Raumluft entstehenden kurzlebigen, atomar dispergierten Kationen der Schwermetalle $Z = 84$ (Polonium), $Z = 83$ (Bismut), $Z = 82$ (Blei) lagern sich sehr schnell an luftgetragene Aerosole an (Abb. 2). Diese nehmen – wie das Radon-Gas – an atmosphärischen Transportvorgängen teil. Darüber hinaus verfügen sie mit „wash-out“ und „Trockendeposition“ über zusätzliche Senken.

Durch die unfreiwillige Filterung der Atemluft werden die kurzlebigen Folgeprodukte des Radon-Zerfalls, die Alpha-Strahler [^{212,214,216,218}Po]Polonium, [²¹²Bi]Bismut (Zerfallsverzweigung 36%) und die Beta-Strahler [^{212,214}Bi]Bismut ([²¹²Bi]-Zerfallsverzweigung 64%) [^{212,214}Pb]Blei im Zuge der Inhalation in der Lunge abgeschieden und angereichert (Abb. 2, Tab. 1a, b). Wegen ihrer relativ kurzen Halbwertszeiten zerfallen sie zum großen Teil am Depositionsort und legen damit die Grundlage für die lokal hohe radiogene Organbelastung. Der Radongehalt der Außenluft hängt von einer Vielzahl von Parametern ab; zum einen sind dabei die Emanier- und Exhalationsparameter aufzulisten:

- Aktivitätskonzentrationen von ²³⁸U/ ²²⁶Ra und ²³²Th/ ²²⁴Ra in Bodenpartikeln,
- *mineralogische Bodenzusammensetzung*,

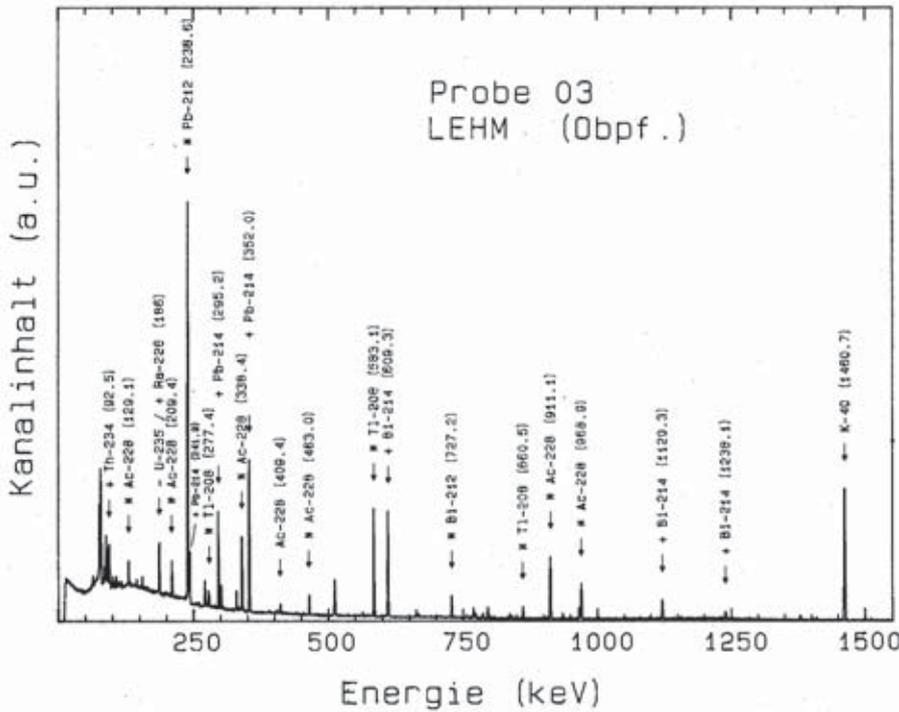


Abb. 6a

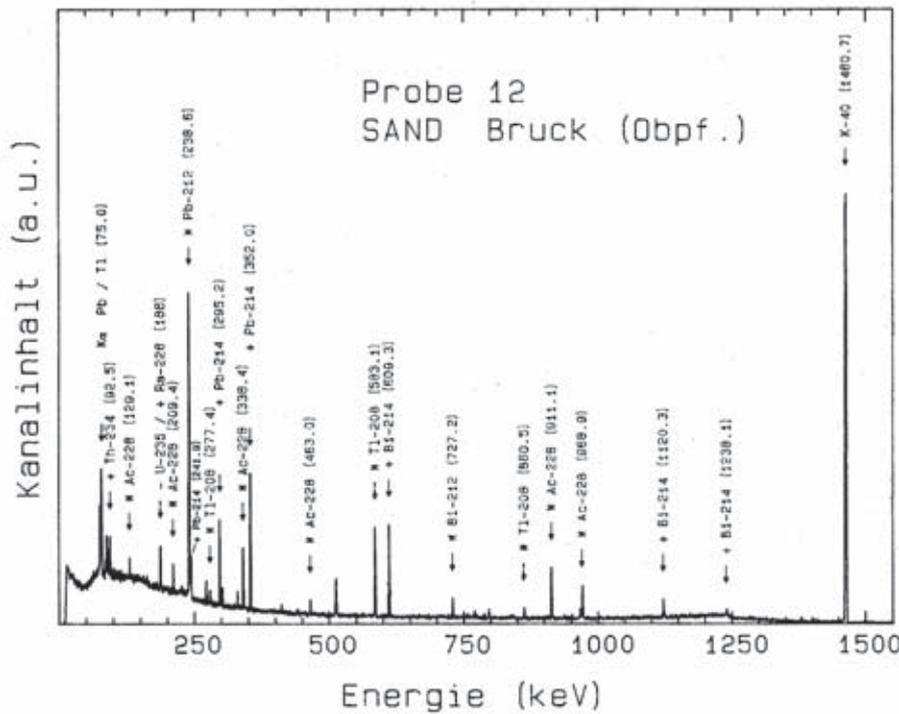


Abb. 6a, b Gammaspektren von Baurohstoffen/-stoffen (bez. spezifischer Aktivitäten s. Tab. 2/Probe 3, $t_{M03} = 50.000$ s bzw. 12, $t_{M03} = 30.000$ s), die Emissionslinien sind analog der Notierung von Abbildungslegende 4 markiert (aufgenommen von M. Steiner, BRK-Radiometrie, Traunreut).

- Bodentemperatur, -feuchte, -porosität,
- Bodenvorbehandlung (z. B. Erschließungsmaßnahmen),
- Bodenauflage (Laub, Schnee, Matsch) und
- äußerer Luftdruck,

- Zustrom aktivitätsarmer Luft (Seeluft; Luft über Binnengewässern),
- Luftfeuchte und
- Aerosolgehalt.

des weiteren die atmosphärischen Ausbreitungsparameter

- Luftströmungen (horizontal, vertikal; lokal und global),
- Lufttemperatur, -druck,

Abb. 5 zeigt die Auswertung von Aerosolfiltern, welche im Zuge von Routineuntersuchungen als monatliche Zufallsstichproben im radiometrischen Labor des BRK (Garatshausen) am Ufer des Starnberger Sees seit 1987 gewonnen wurden. Die Variationsbreite der deponierten aero-

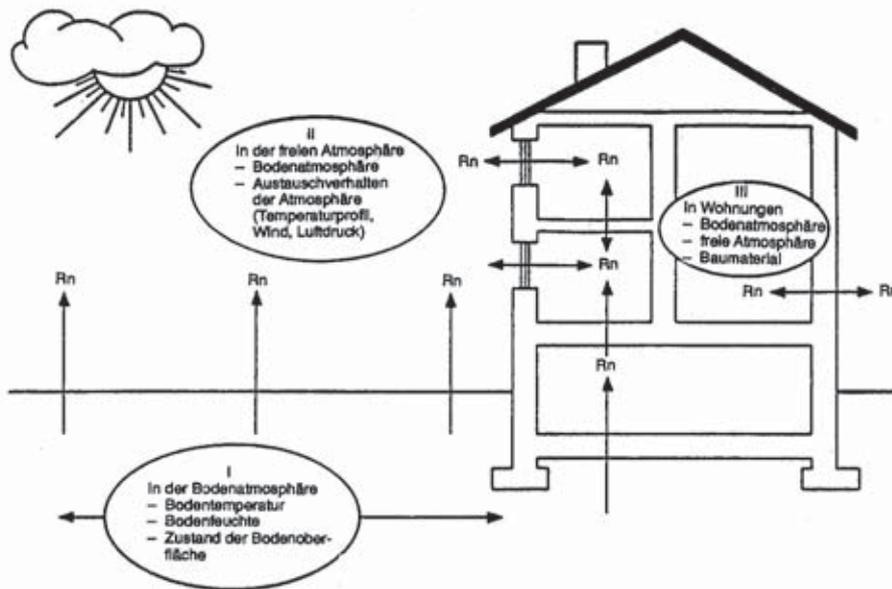


Abb. 7 Einflußgrößen auf und Eintrittspforten für die Radon-Invasion in Innenräumen (aus BfS-Infoblatt Nr. 6 (1990)).

solgebundenen Aktivität der kurzlebigen Radon-Folgeprodukte bis zum Faktor 5 wird so dokumentiert. Eine Zuspiegelung entsprechender Parameter zur vorliegenden Zeitserie, wie z. B. Windrichtung (Eintrag aktivitätsarmer Luft des Starnberger Sees), Luftdruck, -feuchte, -temperatur zeigen weder im Einzelfall noch in Kombination eine einfache Korrelation mit den aufgefundenen Aktivitätswerten.

Allerdings sind bestimmte Phänomene z. B. der Eintrag aktivitätsarmer Luft (Minima der Luftaktivität) oder Tauwetterperioden (Maxima der Luftaktivität) infolge von schlagartiger Freisetzung von in der Bodenaufgabe (Matsch) zurückgehaltener Aktivität evident.

Die Medianwerte der [^{222}Rn]Radon-Aktivitätskonzentration in der Freiluft liegen zwischen 8 (Land Schleswig-Holstein, RB Weser-Ems) und 30 Bqm^{-3} (RB Stuttgart, RB Tübingen); die ermittelten Daten beziehen sich auf Integrationszeiten von mehreren Monaten) (11).

Erwartungsgemäß liegen bez. des kurzlebigen [^{220}Rn]Radon weltweit nur wenige Daten vor, die berichteten Aktivitätskonzentrationen der Außenluft liegen hier zwischen 2–10 Bqm^{-3} (1). Bez. Radon-Meßmethodik sei z. B. auf (15a–c) verwiesen.

5. Quellen und Antransport von $Z = 86$ (Radon)

Nach Erhebungen in ca. 6.000 bundesdeutschen Wohnungen ((16) 1985) ergibt sich ein arithmetischer Mittelwert der Radonkonzentration von annähernd 50 Bqm^{-3} , was einem Mehrfachen der mittleren Aktivitätskonzentration der Außenluft entspricht (17, 18).

Wegen des herabgesetzten Luftumsatzes ist den Quellen von Radon und seinen kurzlebigen Folgeprodukten in Innenräumen erhebliche Aufmerksamkeit zu widmen. Im Bereich der Quellen unterscheidet man im wesentlichen zwischen

- Trinkwasser,
- Baumaterialien,
- Bauuntergrund und
- Sonderquellen.

Nachdem eine hohe Übertrittswahrscheinlichkeit zwischen dem im Trinkwasser physikalisch gelösten Edelgas Radon und der Innenraumluft beobachtet wird, ließen sich Werte des entsprechenden Pegelanstiegs von 1 Bqm^{-3} (Innenraumluft) pro 10.000 Bqm^{-3} im Trinkwasser in den Schweizer Zentralalpen ermitteln (10). Besonders bei der Erwärmung nicht unter Druck stehenden Wassers (Dusch-, Badewasser) können kurzfristig beträchtliche Pegelanstiege dokumentiert werden.

Der Pegelbeitrag von mineralischen Baustoffen geht auf den o. g. Übertritt, die sog. Emanierung mit anschließender Exhalation aus porösen Materialien zurück, wobei der emanierende Anteil materialabhängig zwischen 1–80% variieren kann (1). Der diffusionskontrollierte Transport an die Materialoberfläche aus der – je nach Beschaffenheit des Interfaces – Baustoff/Innenraumluft – erfolgen kann, wird als Exhalation (Übertritt in die umgebende Luft) bezeichnet.

Die Exhalationsrate wird in $\text{Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ notiert und gibt an, wieviel Radonatome pro Zeiteinheit das Interface passieren, ihre Werte können materialabhängig zwischen 0,0002–0,07 $\text{Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ – also bis um den Faktor 350 – schwanken (1, 19).

Der Radiumgehalt der Baustoffe ist jedoch im Regelfall nicht die dominierende Quelle, da er schon rein numerisch allein die hohen Radon-Konzentrationen in Innenräumen nicht erklärt (10, 18, 20, 21).

Allerdings ist zu berücksichtigen, daß in bestimmten Regionen mit hohem geologischen Urananteil dort lokal abgebaute mineralische Rohstoffe (z. B. fränkischer Burgsandstein mit bis zu 900 ppm Urangehalt) diese oder entsprechendes Haldenmaterial früher als Bau- bzw. Füllstoff

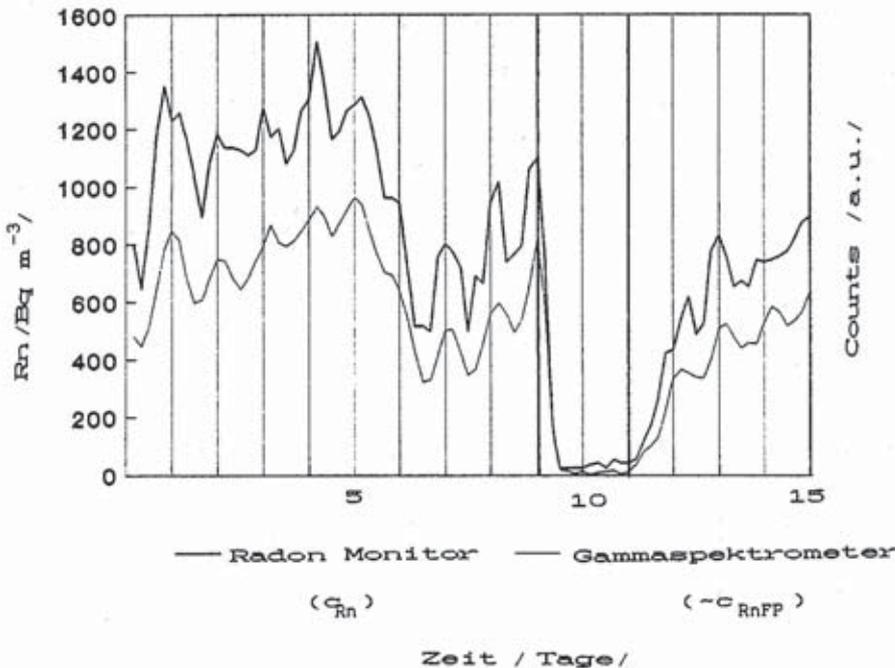


Abb. 8a, b Zeitserien der Aktivitätskonzentration von Radon und seinen Folgeprodukten (17.5.–1.6.91; Radon-Monitor, Honeywell, Modell 05-418; Gammasepektrometer (NaI(Tl)), Nucleus Modell 800 a) in der Innenraumluft eines Hobbyraumes (17,8 m³) im Kellergeschoß eines in München-Untermenzing gelegenen Hauses; markiert ist jeweils der Zeitpunkt 10.00 Uhr vormittags, die Datenpunktfrequenz betrug für C_{Rn}/C_{RnFP} 6/24 h. Das Signal der Alpha-Aktivität vom Mutternuklid Radon läuft erwartungsgemäß dem, der durch ihre Gammaemission erfaßten Folgeprodukte voraus bzw. wegen der 4-h-Meßperiodik parallel. Ebenfalls aufgetragen sind die beiden, mit den Aktivitätskonzentrationen korrelierenden Parameter ΔT und Δp (s.Text). Am 9. Tag wurde ein Kipfenster geöffnet (am 11. verschlossen), deutlich zeichnet sich die Pegelabsenkung und danach der Wiederaufbau ab (aufgenommen von M. Mundenbruch und R. J. Schwankner).

Abb. 8a

(z. B. Pechkohlschlacke zum Auffüllen von Fehlböden oberbayerischer Bauernhäuser) zur Anwendung kam. So zeigt etwa Tab. 2 neben der Aktivitätskonzentration von [⁴⁰K]Kalium die entsprechenden Werte für [²³⁸U]Uran, [²³²Th]Thorium und die jeweiligen Folgeprodukte in Bauroh- und Baustoffen auch aus dem Bereich des ehemaligen Flußpatreviers der Oberpfalz. Zwei typische Gamma-Spektren derartiger Materialien unterschiedlicher Provenienz sind in Abb. 6 wiedergegeben.

Fälle lokaler geologischer Vorkommen, welche direkt (oder über den Umweg von *Halden*) zur Verwendung von hochexhalierenden Baumaterialien geführt haben, sind nicht nur in der Oberpfalz (Spitzenwerte im Einzelfall bis zu 20.000 Bq m⁻³ im Innenraum) erfaßt worden, sondern im Bereich des Uranbergbaus der ehemaligen DDR sind in jüngster Zeit lokal begrenzt Fälle deutlich höherer Aktivitätskonzentrationen bekanntgeworden (35). Hier liegt also der bislang selten beobachtete Fall vor, daß das Baumaterial selbst als nicht zu vernachlässigende Quelle in Erscheinung tritt.

Die früheren bundesdeutschen (4, 16) und schweizerischen Erhebungen (10) belegen insbesondere den Trend, daß die Aktivitätskonzentration vom Kellergeschoß ausgehend, in den oberen Stockwerken monoton abnimmt. Dies stützt die These, daß in der Regel die „Hauptradonquelle“ im Sinne einer Eintrittspforte für passiven wie konvektiven Transport das Fundament bzw. die Bodenplatte von Häusern (abgesehen von o. g. Sondersituation) darstellt. Insbesondere dort werden Radon-Isotope im Zuge der Kaminwirkung des Hauskörpers durch Risse sowie nicht sorgfältig abgedichtete Rohr- und Leitungsdurchführungen (quasi als Eintrittspforten) in den Innenraum transportiert (Abb. 7). Relativ wenig ist derzeit über sog. Sonderquellen bekannt, denke man nur an die weite Verbreitung so unterschiedlich emanierender wie exhalierender radioaktiver Alltagsgegenstände, z. B. radiumhaltige Leuchtmassen und spezielle Uranglasuren (10, 22, 23), dies ist Gegenstand laufender Untersuchungen.

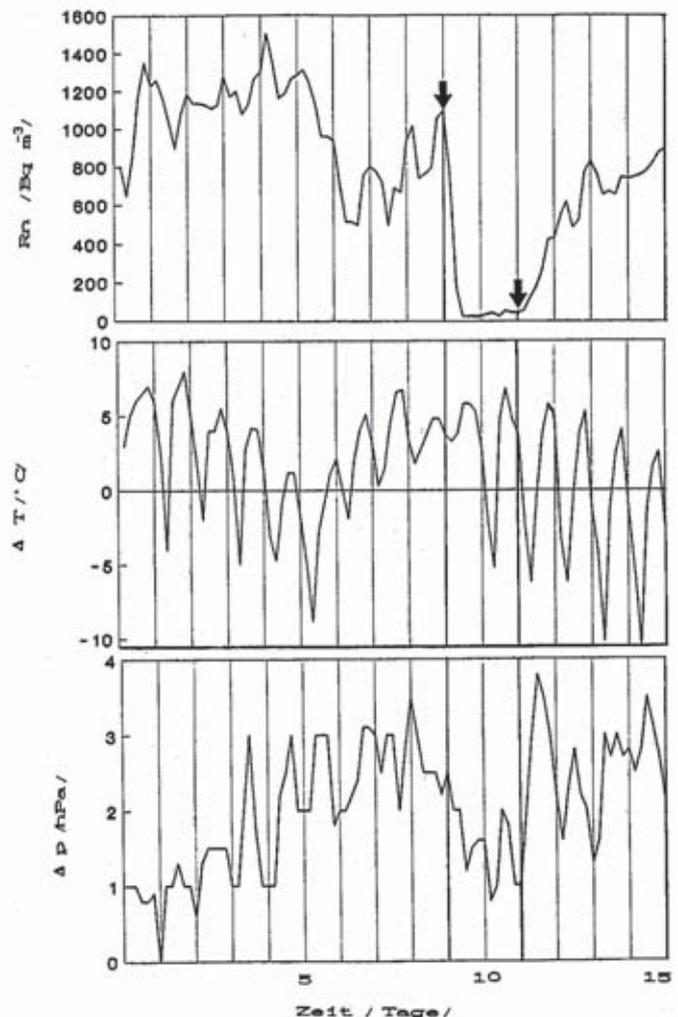


Abb. 8b



Abb. 9 Zusammenfassung der Originalveröffentlichung von F. Hürting und W. Hesse zur „Bergkrankheit in den Schneeberger Gruben“ (nach (31)).

76. Saisonalität der Invasion

Bis 1983 lagen nur wenig Daten über die saisonale Variation des Radonpegels in Innenräumen vor (24). Eine EPA-Studie die 20 Häuser in Montana über 18 Monate einschloß, kam zu dem Ergebnis, daß ein „overall“ Jahreszyklus existiert, mit niederen Werten in den wärmeren Monaten und einem Pegelmaximum in den Wintermonaten, in welchen eine geringere aktive Lüftungsfrequenz vorherrscht. Frostperioden sowie der Einfluß von Klimaanlage, welche den Aerosolgehalt der Innenraumluft zu beeinflussen scheinen, werden dokumentiert (25).

Um variable Parameter, welche aktuelle Punktmessungen in Innenräumen beeinflussen können, in den Griff zu bekommen, sind darüber hinaus detaillierte Kenntnisse über den Tagesgang notwendig. Da diese Zyklen nahezu synchron in allen Stockwerken – zumindest solange keine Lüftungsbedingten Störungen auftreten – beobachtet werden können, muß der vertikalen Ausbreitungsströmung eine dominierende Rolle zuerkannt werden. Hervorstechend ist eine 24-h-Periodik mit Minima am frühen Morgen und Pegelmaxima am späten Nachmittag. Für den konvektiven Antransport durch die Eintrittsporten des Interfaces (Fundament, Kellerbodenplatte) und die vertikale Verfrachtung im Haus sind zeitabhängige Parameter $X(t)$ (X = Luftdruck, -temperatur) im komplexen Zusammenspiel verantwortlich

$$X(t) = X(t)_{\text{Innen/Keller}} - X(t)_{\text{Innen/l. Stock}} \quad (3a)$$

$$X'(t) = X(t)_{\text{Innen}} - X(t)_{\text{außen}} \quad (3b)$$

In Abb. 8 sind entsprechende Zeitserien eines, in einem Kellergeschoß gelegenen, genutzten Hobbyraums eines Hauses in München-Untermenzing wiedergegeben. Ausgeprägt zeigt sich eine 24-h-Periodik der Radon/Radon-Folgeprodukt-Konzentration (c_{Rn}/c_{RnFP}); erfaßt durch zwei unabhängige Verfahren (In-situ-Alpha- und -Gammaskopie). Während Maxima der Temperaturdifferenz (ΔT gemäß (4b)) jeweils gegen 6.00 Uhr beobachtet werden, zeigen sich die Maxima der c_{Rn}/c_{RnFP} etwas zeitverzögert, jedoch noch am Vormittag. Überlagert wird diese Phänomenologie zudem durch zeitliche Variation der Druckdifferenz (Δp gemäß (3b)) hier korreliert ein Δp -Minimum – ohne große Zeitverzögerung – mit dem Maximum des Radon-/Radon-FP-Pegels.

Ein Lüftungsexperiment (Abb. 8) zwischen dem 10. und 12. Tag (Kippen eines der beiden, in einem Lichtschacht (Tiefe: 1 m) gelegenen Fensters) führt zu einer langsamen Pegelabsenkung im ungeheizten Raum bis um den Faktor 50. Nach dem Schließen des Fensters baut sich c_{Rn}/c_{RnFP} langsam wieder auf und erreicht dann den durch die zu diesem Zeitpunkt vorherrschenden mikroklimatischen Bedingungen bestimmten Pegelwert. Bisher ist es jedoch nur unter den Randbedingungen unbewohntes Haus und bei nicht zu großen Windgeschwindigkeiten ($< 1 \text{ ms}^{-1}$) gelungen, qualitative Korrelationen zwischen Radon-Pegel und o. g. Parametern unter Einbeziehung der Luftfeuchtigkeit und des Aerosolgehalts herzustellen. Dabei kann festgestellt werden, daß die Tagesamplituden des Radon-Pegels in Innenräumen das 5- bis 10fache des Minimalwertes annehmen können.

7. Lüftungsverhalten und Innenraumbelastung

In den letzten Jahren wird zunehmend dem Innenraum Beachtung geschenkt, welcher bislang nicht zum Kernbereich klassischer Umweltpolitik zählte, was aus Sicht seines umwelthygienischen Stellenwerts nunmehr zu begrüßen ist. Erhebungen in den USA, Europa und den industrialisierten Ländern zeigen nämlich, daß die Menschen sich zu 70–90% eines 24-h-Tages in Innenräumen aufhalten (26). In klimatisierten Innenräumen sind neben den „Komponenten der thermischen Behaglichkeit“ auch „Hygienekomponenten“ zu berücksichtigen. Schon 1982 berichtete H. Schmier über den Anstieg des Radon-Pegels um den Faktor 8, 15 h nach zuvor geöffneten Fenstern (27). Des weiteren ist darauf hinzuweisen, daß der Versuch unter lufthygienischen Aspekten so ein optimales Raumklima unter gleichzeitiger Vermeidung von Energieverlusten zu schaffen, zu § 1(2) des „Gesetzes zur Einsparung von Energie in Gebäuden“ (zuletzt geändert am 20.6.1980) bei unüberprüfter Anwendung in Widerspruch stehen kann:

„... Bei der Begrenzung von Lüftungswärmeverlusten ist der gesamte Einfluß der Lüftungseinrichtungen, der Dichtheit von Fenstern und Türen sowie der Fugen zwischen den einzelnen Bauteilen zu berücksichtigen...“

Setzt man als quantitatives Merkmal für den Luftaustausch in Innenräumen das stündlich einem Raum zugeführte Luftvolumen (V) bezogen auf das Raumvolumen (L) an, so erhält man als Kenngröße die Luftwechselzahl n , welche in der Praxis zwischen 0,1 und 0,8 variiert.

$$n = V/L[h^{-1}] \quad (4).$$

Schon Mitte der 80er Jahre war so aufgefallen, daß die passive Raumbelüftung im Zuge von Energieeinsparbestrebungen etwa durch die Einführung von doppelten Kunststofflippendichtungen bei Fenstern und entsprechende weitere Maßnahmen bis um den Faktor 5 zurückgehen kann (11, 28). Damit einher geht das Ansteigen der Pegel für eine Reihe atom- bzw. molekulardispers und/oder aerosolgetragener Komponenten in der Innenraumluft, wie z. B. Radon-Isotope, Organohalogene (PCP, PCB, PCDF/D), Lösemittel, Kunststoff-Monomere... (26, 27, 29).

8. Mögliches Lungenkrebsrisiko infolge kumulierter ^{222}Rn]Radon-Exposition

Unter kumulierter Exposition ist das Produkt aus Aktivitätskonzentration in der Raumluft und der mittleren Aufenthaltszeit in Innenräumen zu verstehen. Der o. g. Mittelwert für 6.000 bundesdeutsche Wohnungen beträgt für ^{222}Rn]Radon 50 Bqm^{-3} (16) (der Beitrag des kurzlebigen ^{220}Rn]Radon findet in erster Näherung keine Berücksichtigung). Bedingt durch Deposition auf Oberflächen sowie Luftaustausch zwischen Innen- und Außenraum ist die Aktivitätskonzentration der kurzlebigen Radon-Folgeprodukte in der Raumluft niedriger als die des Mutternuklids, beide stehen über einen sog. „Gleichgewichtsfaktor (F)“ – im betrachteten Fall $F = 0,3$ – zueinander in Beziehung. W. Jacobi (17) legt für entsprechende Abschätzungen sowohl diesen F-Wert, wie im Mittel täglich eine 80%ige Aufenthaltszeit in Innenräumen zugrunde. Für die „gleichgewichtsäquivalente“ kumulierte mittlere jährliche Radon-Exposition (Exp_{Rneq}) erhält man somit

$$\text{Exp}_{\text{Rneq}} = (50 \cdot 0,3 \cdot 0,8) \text{ Bq} \cdot \text{a} \cdot \text{m}^{-3} \quad (5).$$

Für eine Lebensspanne von 70–80 Jahren errechnet sich eine gleichgewichtsäquivalente Lebenszeitexposition von 800 – 1.000 Bqam^{-3} . Hierbei handelte es sich um eine protrahierte Exposition mit folgenden Eigenschaften

- hohe relative Strahlenempfindlichkeit des Zielorgans (bronchialer und pulmonärer Bereich der Lunge) (10, 30–32),
- hoher Qualitätsfaktor der lokal emittierten Alpha-Strahlung ($Q = 20$) der dort deponierten kurzlebigen Radon-Töchter (10, 14) und
- mögliche synergistische Effekte durch raucherbedingte Belastung des Bronchialepithels.

Unter Anwendung der entsprechenden ICRP-Dosisfaktoren (30) ergibt sich für eine Exposition auf der Basis mittlerer Radon-Aktivitätskonzentration von 50 Bqm^{-3} und eine sich gemäß (5) daraus errechnende gleichgewichtsäquivalente Lebenszeitexposition von 1.000 Bqam^{-3} , eine Äquivalentdosis im Bronchialbereich von 1.300 mSv und im pulmonären Bereich der Lunge von 170 mSv (17, 31), was ausweist, daß es sich hier in seiner Gesamtheit um das Organ mit der höchsten natürlichen Strahlenbelastung handelt.

Die These, daß es sich bei den Opfern der schon von Georgius Agricola (1494–1555) 1527–1533 weiland Stadtarzt in Joachimsthal (Silber-, später Uranbergbau) beobachteten Bergkrankheit um radon-induzierten Lungenkrebs handelt, ist erst 35 Jahre alt (2, 17, 31). Zieht man zur Bewertung der oben abgeschätzten Lebenszeit-Innenraumexposi-

tion strahlenepidemiologische Daten, überwiegend von Uran-Bergarbeitern heran, zeigt sich beispielsweise beim sog. „ČSFR-Kollektiv“ eine statistische Erhöhung der Lungenkrebsrate oberhalb einer gleichgewichtsäquivalenten Lebensarbeitszeitexposition von 3.500 Bqam^{-3} (17); man stellt fest, daß diese nurmehr den Faktor 4 über der kumulierten mittleren Lebenszeitexposition unserer Bevölkerung in Wohnhäusern liegt.

Wendet man umgekehrt die, zum großen Teil aus der Untersuchung mehrerer derartiger Kollektive von Uran-Bergarbeitern epidemiologisch gewonnenen Risikofaktoren (ICRP (30) und BEIR IV (33); proportionale Expositions-Risiko-Beziehung für Induktion von Lungenkrebs durch dicht ionisierende Strahlung) auf eine mittlere gleichgewichtsäquivalente Radon-Exposition in Häusern von 12 Bqam^{-3} an, so ergibt sich ein rechnerisches Lebenszeitrisiko für Lungenkrebs von 5–10% (16, 17).

Dies hat die nationale Strahlenschutzkommission (SSK) bewogen, auf der Basis entsprechender ICRP-Empfehlungen, mit einer Radon-Aktivitätskonzentration von 250 Bqm^{-3} einen oberen Richtwert („Obergrenze des Normalbereichs“) für die Planung neuer Häuser auf der Basis des Fünffachen des als unvermeidbar ansehbaren Normalwerts anzusetzen (34).

Bei bestehenden Häusern werden Sanierungsmaßnahmen empfohlen, wenn der langzeitige Mittelwert der Radon-Aktivitätskonzentration im Wohn- und Aufenthaltsbereich des Hauses oberhalb dieses Richtwertes liegt. Diese Forderungen orientieren sich sowohl „am Grundsatz der Verhältnismäßigkeit“ im Umweltschutz sowie an der Tatsache einer in der Praxis unvermeidbaren „Normalexposition“; Sanierungsmaßnahmen sind zeitlich abgestuft, je nach Grad der Überschreitung des Richtwerts, einzuleiten.

Die Erhöhung der individuellen (Abb. 8), wie passiven Raum-Lüftungs-Rate sowie die Verhinderung von Radon-Invasion durch Eintrittspforten z. B. über die nichttakte Keller-Bodenplatte entsprechender Häuser stellen, aus strahlenhygienischer Sicht, einfache aber wirkungsvolle erste Maßnahmen zur Expositionsbegrenzung dar, deren Erfolg jedoch in jedem Einzelfall meßtechnisch abzustützen ist.

In Sonderfällen (35) können jedoch weitergehende Sanierungsmaßnahmen (z. B. Einbau von Entlüftungsventilatoren), wie in den USA und Schweden praktiziert, notwendig werden.

Danksagung

Für die freundliche Überlassung von Klimameßstationen sei Herrn Prof. Dr. B. Hörner und Herrn Prof. Dr. R. Schumacher (beide FHM) gedankt, sowie Herrn Dipl.-Chem. V. Genrich (Genitron Instruments GmbH, FFM) für die großzügige apparative Unterstützung.

Literatur

- ¹ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR): Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly, New York 1988
- ² Jacobi, W.: Naturwissenschaften 73 (1986) 661–668
- ³ Nero, A. V.: Scientif. Am. 258 (1988) 42–48

- ⁴ *Schmier, H.*: Die Strahlenexposition in Wohnungen durch die Folgeprodukte des Radon und Thoron. In: Strahlenschutzforschung, BMI-Tagungsbericht, Bonn (1984) 37–54
- ⁵ *Eiswirth, M., R. J. Schwankner, F. Weigel, V. Wishnevsky*: JCED 59(1982)608–611
- ⁶ *Weigel, F.*: Radon, Chemiker-Ztg. 102(1978)287–299
- ⁷ *Keil, R., Th. Franke, F. Schales*: Vorkommen natürlicher Radionuklide im Boden. In: *Aurand, K.* et al. (Hrsg.): Die natürliche Strahlenexposition des Menschen. Stuttgart 1974
- ⁸ *Münnich, K. O., H.-J. Volpp*: Natürliche Variation der Radon-222-Konzentration in der Außenluft, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMI-Bericht 050 (St. Sch. 728), 1984
- ⁹ *Schwankner, R. J., M. Eiswirth*: MNU 39(1986)139–145
- ¹⁰ *Cramer, R., W. Burkart* (Hrsg.): Radon und Strahlenbiologie der Lunge, PSI-Bericht Nr. 22, Villingen 1989
- ¹¹ *Keller, G., H. Muth*: Natürliche Radioaktivität. In: *Beckert, J., J. Mechel, H. O. Lamprecht* (Hrsg.): Gesundes Wohnen. Düsseldorf 1986
- ¹² *Akerblom, G., P. Andersson, B. Clavensjö*: Radiat. Prot. Dosim. 7 (1984)49–54
- ¹³ *Schwankner, R. J.*: Radiochemie-Praktikum. Universitätsaschenbuch 1068, Paderborn – München – Wien – Zürich 1980
- ¹⁴ *Jacobi, W., H. G. Paretzke, U. H. Ehling*: Strahlenexposition und Strahlenrisiko der Bevölkerung, GSF S-710, Neuherberg 1981
- ^{15a,b} *Philipsborn, H. von*: Geowiss. 8(1990)220–228, 324–338
- ^{15c} *Brandl, M.*: Radon-Meßtechnik und Strahlenexposition durch Radon, Diplomarbeit FHM, München 1990
- ¹⁶ Bundesministerium des Innern (Hrsg.): Radon in Wohnungen und im Freien; Erhebungsmessungen in der Bundesrepublik Deutschland, BMI-Bericht, Bonn 1985
- ¹⁷ *Jacobi, W.*: Phys. Bl. 45 (1989)430–434
- ¹⁸ *Schwankner, R. J.*: Rev. Arch. Sci. 6(1986)285–288
- ¹⁹ *Martin, J.*: Gesundheits-Ingenieur-Haustechnik-Bauphysik-Umwelttechnik 106(1985)141–143
- ²⁰ Strahlenschutzkommission: Strahlenexposition und mögliches Lungenkrebsrisiko durch Inhalation von Radon-Zerfallsprodukten in Häusern, Empfehlung der Strahlenschutzkommission 1985/86, Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission, Bd. 6, Stuttgart · New York 1987
- ²¹ Empfehlung der Kommission zum Schutz der Bevölkerung vor Radonexposition innerhalb von Gebäuden vom 21. Februar 1990, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 80 (1990) 26–28
- ²² *Schwankner, R. J., G. Lieckfeld, D. Lienert*: Geowiss. 7 (1989) 215–224
- ²³ *Schwankner, R. J., G. Lieckfeld, A. J. Schöpf* et al.: (im Druck)
- ²⁴ *Gesell, T. F.*: Health Physics 45 (1983) 289–302
- ²⁵ *Hans, J. M., R. J. Lyon*: Seasonal Variations of Radon and Radon Decay Product Concentrations in Single Family Homes, EPA, Washington D. C. 1986
- ²⁶ Rat von Sachverständigen für Umweltfragen: Luftverunreinigung in Innenräumen, Drucksache des Deutschen Bundestages 11/613 (1987)
- ²⁷ *Schmier, H., I. Pensko, A. Wicke*: Radon in Wohnräumen. In: *Aurand, K.* et al. (Hrsg.): Luftqualität in Innenräumen, Stuttgart 1982
- ²⁸ *Wegener, J.*: Gesundheits-Ingenieur-Haustechnik-Bauphysik-Umwelttechnik 104(1983)1–5
- ²⁹ *Tschirf, E.*: Untersuchungen auf dem Gebiet der natürlichen Strahlenbelastung in Österreich, IVth European Congress of IRPA, Salzburg 1986
- ³⁰ ICRP: Lung Cancer Risk from Indoor Exposures to Radon Daughters, ICRP Pub. 50, Oxford 1986
- ³¹ *Jacobi, W., K. Eisfeld*: Dose to Tissues and Effective Dose Equivalent by Inhalation of Radon-222, Radon-220 and their Short-Lived Daughters, GSF S-626, Neuherberg 1980
- ³² *Jacobi, W.*: Health Physics 55/6 (1988) 845–853
- ³³ National Research Council: Health Risks from Radon and other Internally Deposited Alpha-Emitters. Report of the BEIR-IV Committee, Washington D. C. 1988
- ³⁴ Strahlenschutzkommission: Strahlenschutzgrundsätze zur Begrenzung der Strahlenexposition der Bevölkerung durch Radon und seine Zerfallsprodukte, Bundesanzeiger Nr. 208 vom 30.6.1988, 4759–4760
- ³⁵ *Rönsch, W.*: Territorialer Strahlenschutz in den Südreigionen der ehemaligen DDR (Thüringen und Sachsen). In: Tagungsbericht für den Strahlenschutz, Seminar am 19. und 20. Oktober 1990 in Berlin, Publikationsreihe Fortschritte im Strahlenschutz FS-90-53-T

Prof. Dr. rer. nat. R. J. Schwankner

cd. Dipl.-Ing. M. Mundenbruch

cd. Dipl.-Ing. M. Steiner

Fachhochschule München/FB 06 Physikalische Technik/
Technischer Umweltschutz
8000 München 2

A. Brummeisl, AOM

Radiometrisches Labor des BRK-KV Traunstein
8225 Traunreut

Dr. rer. nat. P. Höpfl

Radiometrisches Labor des BRK-KV Starnberg
8130 Starnberg

Deutsches Ärzteblatt

11

Die Zeitschrift der Ärzteschaft

Gegründet 1872

Ausgabe A

19. März 2010



Radon in Innenräumen

Arzneimittelausgaben in der GKV: Röslers Sparpläne gewinnen an Kontur Seite 467

Biometrie: Auswertung epidemiologischer Studien Seite 187

ÜBERSICHTSARBEIT

Radon in Innenräumen

Ein in der umweltmedizinischen Diskussion unterschätzter Risikofaktor für Lungenkrebs

Klaus Schmid, Torsten Kuwert, Hans Drexler

ZUSAMMENFASSUNG

Hintergrund: In der Arbeitsmedizin ist Radon – insbesondere bei Tätigkeiten unter Tage – als Verursacher von Lungenkrebskrankungen bekannt. Zum Risiko der Allgemeinbevölkerung durch Radon in Innenräumen, gab es bis vor kurzem wenig gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse.

Methoden: Die Autoren analysierten selektiv recherchierte Literatur und berücksichtigten in ihrer Auswertung eine kürzlich publizierte S1-Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin und eine aktuelle Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission.

Ergebnisse: Die Exposition gegenüber Radon und seinen Zerfallsprodukten in Innenräumen trägt wesentlich zur Strahlenbelastung der Allgemeinbevölkerung bei. Für Deutschland kann man in Wohnzimmern und Schlafzimmern im Mittel von einer Belastung in Höhe von 49 Bq/m^3 ausgehen. Es ist in der wissenschaftlichen Literatur gut belegt, dass durch Radon in Innenräumen das Risiko, an Lungenkrebs zu erkranken, relevant erhöht wird, und zwar am ehesten im Sinne einer linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellenwert. Pro 100 Bq/m^3 zusätzlicher Radonexposition kann man einen Anstieg des relativen Risikos in einem Bereich von 8 bis 16 % annehmen. Neben dem Zigarettenrauchen gilt Radon als zweitwichtigste Ursache für Lungenkrebskrankungen in der beruflich nichtexponierten Allgemeinbevölkerung.

Schlussfolgerung: Zur Prävention ist es aus umweltmedizinischer Sicht wichtig, Gebäude mit hoher Radonbelastung zu identifizieren, geeignete Maßnahmen einzuleiten und die Radonbelastung insbesondere in Neubauten zu minimieren.

Zitierweise: Dtsch Arztebl Int 2010; 107(11): 181–6
DOI: 10.3238/arztebl.2010.0181

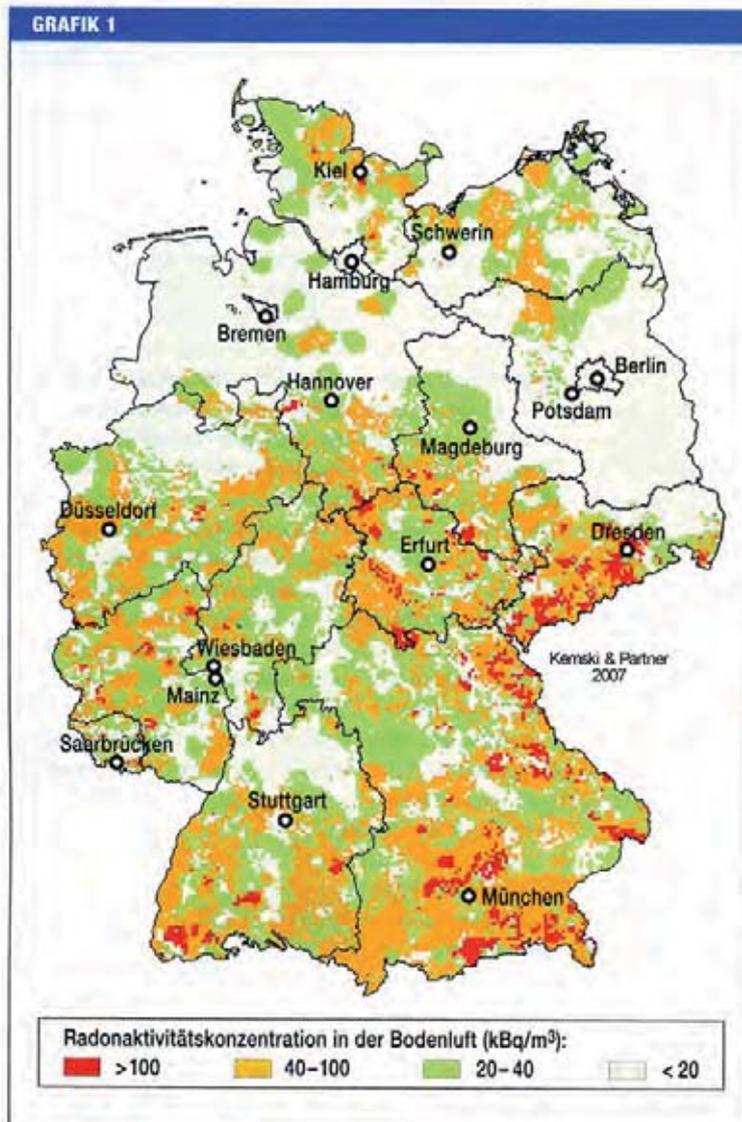
Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin der Universität Erlangen-Nürnberg; PD Dr. med. Schmid, Prof. Dr. med. Drexler

Klinische Nuklearmedizin der Universität Erlangen-Nürnberg;
Prof. Dr. med. Kuwert

Erkrankungen an Lungenkrebs stehen bei den Krebsneuerkrankungen in Deutschland, sowohl bei Männern als auch bei Frauen, an dritter Stelle. Nach den aktuell verfügbaren Zahlen der Deutschen Krebsgesellschaft e.V. erkrankten im Jahre 2004 rund 46 040 Personen in Deutschland neu an Lungenkrebs, davon 32 850 Männer und 13 190 Frauen (1). Obwohl nach wie vor überwiegend Männer betroffen sind, zeigte sich in den letzten Jahren, dass der Anteil an Frauen, die Lungenkrebs bekommen, stetig ansteigt. Dieser Umstand wird allgemein in Zusammenhang mit dem Rauchverhalten gesehen (2). Schätzungen zufolge sind in Deutschland circa 80 bis 90 % aller Neuerkrankungen an Lungenkrebs auf das aktive Zigarettenrauchen zurückzuführen (2).

Dass auch Passivrauch die Gesundheit schädigt, ist wissenschaftlich unstrittig. Das deutsche Krebsforschungszentrum schätzt, dass in Deutschland jedes Jahr mehr als 260 Menschen an durch „Passivrauch“ bedingtem Lungenkrebs sterben (3). Hinzuweisen ist darauf, dass es sich hierbei lediglich um einen Aspekt der negativen gesundheitlichen Wirkungen von Aktiv- und Passivrauchen handelt. Vielfältige weitere Effekte, zum Beispiel auf das Herzkreislauf-System, sind wissenschaftlich dokumentiert (3).

Neben dem Zigarettenrauch ist eine Vielzahl weiterer Noxen identifiziert worden, die Lungenkrebs beim Menschen verursachen können, zum Beispiel Asbest, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Arsen, 6-wertige Chromverbindungen und viele andere Substanzen. Meist spielt bei derartigen Expositionen die berufliche Tätigkeit die entscheidende Rolle (4). Auf die Notwendigkeit, in diesen Fällen eine ärztliche Anzeige über den Verdacht auf eine Berufskrankheit zu erstatten, sei an dieser Stelle hingewiesen (5). In der aktuellen umweltmedizinischen Diskussion in Deutschland werden als Noxen, die das Potenzial haben, in der Allgemeinbevölkerung Lungenkrebs zu verursachen, derzeit – neben den Schadstoffen aus Aktiv- und Passivrauchen – insbesondere Asbest und Emissionen aus Dieselmotoren diskutiert. Ziel des vorliegenden Artikels ist es, einen in der öffentlichen Diskussion bisher weitgehend unbeachtet gebliebenen Risikofaktor für die Entstehung von Lungenkrebskrankungen näher zu betrachten, nämlich Radon in den Innenräumen.



Methodik

Für die vorliegende Arbeit wurden insbesondere Studien ausgewertet, die sich mit dem Lungenkrebsrisiko durch Radon in Innenräumen befassen. Hierzu führten die Autoren selektive Literaturrecherchen in PubMed, der Datenbank von Medline, durch und zogen eine kürzlich publizierte S1-Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin (6) sowie eine aktuelle Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission (7) zu diesem Thema heran.

Was ist Radon?

Radon ist ein natürlich vorkommendes, radioaktives Edelgas mit der Ordnungszahl 86. Es ist geruchlos, geschmacklos, farblos und chemisch nahezu inert. Radon findet sich in den radioaktiven Zerfallsreihen von Uran und Thorium; es wird dort aus seinem Mutternuklid Radium gebildet. Die sehr langlebigen Ausgangskerne sind, einschließlich ihrer Zerfallsprodukte, natürliche

Übersichtskarte des geogenen Radonpotenzials in Deutschland im Maßstab 1 : 2 000 000 als Ergebnis der deutschlandweiten Kartierung der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft in 1 m Tiefe durch die Bonner Arbeitsgruppe „Radon“ (Geologisches Institut der Universität Bonn und Fa. Kemski & Partner). Die Karte kann als Orientierungshilfe dienen, lässt aber keinesfalls eine Prognose im regionalen Maßstab zu. Abdruck mit freundlicher Genehmigung von: Kemski & Partner, Bonn

Bestandteile der Gesteine und Böden. Es sind mehrere Isotope des Radons bekannt, das stabilste Isotop ist Radon-222, das mit einer Halbwertszeit von 3,8 Tagen zu Polonium-218 zerfällt (7). Im Sprachgebrauch und im Rahmen dieser Publikation schließt die Bezeichnung „Radon“ die Radonisotope und deren kurzlebige Zerfallsprodukte ein.

Expositionsquellen

Das Vorkommen von Radon ist begründet durch das im Gestein und im Erdreich vorhandene Uran und Thorium. Die höchsten Radonkonzentrationen sind in Uranbergwerken zu finden (8). Aber auch in anderen Bergwerken können erhebliche Radonexpositionen auftreten. Diese Expositionen sind ebenso wie zum Teil Tätigkeiten in Wasserspeichern dem beruflichen Umfeld zuzuordnen und nicht Gegenstand dieses Artikels.

In der Radonbalneologie wird eine heilende Wirkung gering dosierter Alphastrahlung durch den Radongehalt mancher Heilbäder angenommen. Die Anwendung erfolgt dabei als „Radonbäder“ oder „Radon-Emanationen“, zum Beispiel beim Aufenthalt in „Heilstollen“. Diese nur sehr kurzzeitigen Expositionen im Rahmen therapeutischer Anwendungen bedürfen einer sorgfältigen Nutzen-Risiko-Abschätzung, die jedoch ebenfalls nicht Thema dieses Beitrags ist.

Ein Einflussfaktor auf die Radonaktivitätskonzentration an der Erdoberfläche ist der unterschiedliche Gehalt an Uran und Radium im Gesteins- und Bodennuntergrund. Hohe Werte findet man hier zum Beispiel im Erzgebirge, aber auch in anderen Regionen. Weitere Faktoren sind Prozesse, die innerhalb der Gesteine und Böden den Transport und die Freisetzung von Radon beeinflussen sowie klimatische und meteorologische Bedingungen in der Atmosphäre (6, 7). Eine von Kemski et al. für Deutschland durchgeführte Kartierung des geogenen Radonpotenzials (Grafik 1), basierend auf standardisierten Bodenluftmessungen, bestätigt eine hohe Variabilität, zum Teil auch in kleinräumigen Bereichen (9). In der bodennahen Luft können erhebliche Radonkonzentrationen auftreten, die Aktivitätskonzentration nimmt mit zunehmender Höhe über dem Erdboden ab. Durch Eingriffe des Menschen in die Natur – insbesondere im Bereich des Erzbergbaus – können lokal höhere Radonkonzentrationen vorkommen.

Trinkwasser kann in Abhängigkeit von den lokalen geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide aufweisen, die zu Strahlenexpositionen der Bevölkerung in einer Höhe führen können, die nicht mehr als geringfügig anzusehen ist (10). Der Radongehalt des Trinkwassers in Deutschland stellt für den Verbraucher ebenso wie der Radongehalt des Erdgases im Allgemeinen jedoch kein Problem dar (7).

In Baumaterialien kann Radon gebildet werden, das teilweise in die Häuser freigesetzt wird. In Deutschland spielt die Belastung durch Baumaterialien jedoch eine eher geringe Rolle (7).

Für die Belastung von Innenräumen mit Radon ist der Eintritt radonhaltiger Bodenluft aus dem Gebäudeuntergrund in das Gebäude entscheidend (e1). Über Undichtigkeiten in der Bodenplatte und den erdberührenden Wänden kann Radon in Häuser eindringen und sich dort anreichern (Grafik 2).

Die Höhe der im konkreten Fall in Innenräumen auftretenden Radonkonzentration ist im Wesentlichen abhängig von:

- der Beschaffenheit des Untergrundes, auf dem das Haus steht
- der Beschaffenheit der Bausubstanz
- den Witterungsbedingungen und den Druckverhältnissen (insbesondere dem Druckgradienten zwischen Untergrund und Gebäudeinnenräumen)
- der Jahreszeit (e2) (mit meist höheren Werten im Winterhalbjahr)
- dem Luftaustausch und der Dichtigkeit von Fenstern und Türen (6).

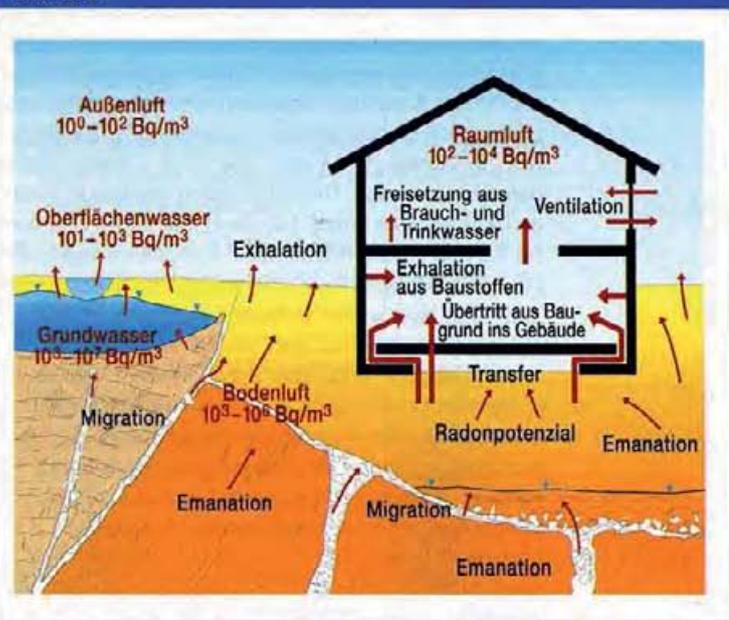
Innerhalb eines Gebäudes sind die Radonkonzentrationen nicht konstant. Im Keller ist die Konzentration meist am höchsten und nimmt zu den oberen Stockwerken hin ab.

Repräsentative Ergebnisse über die Verteilung der Radonkonzentrationen in den Innenräumen für Deutschland wurden aus vorhandenen Daten erstellt (7, 11). Die in Häusern und einzelnen Räumen konkret auftretenden Konzentrationen sind jedoch allenfalls statistisch abschätzbar (e3), für individuelle präventive Zwecke müssen sie in jedem Einzelfall durch Messungen bestimmt werden.

Radiometrische Größen und Einheiten

Als Aktivität eines Radionuklids bezeichnet man die Anzahl der Zerfälle beziehungsweise Kernumwandlungen pro Zeiteinheit. Die Einheit der Aktivität ist Becquerel (Bq). Ein Bq entspricht dabei einem Zerfall pro Sekunde. Die Aktivitätskonzentrationen für Radon und die einzelnen Zerfallsprodukte werden volumenbezogen in Bq/m^3 angegeben. Eine vor allem im Bergbau gebräuchlich Messeinheit ist das „Working Level“ (WL). Für die kumulierte Exposition wird entweder die Einheit $Bq/m^3 \cdot Stunde$ oder die Einheit „Working Level Month“ (WLM) verwendet (10). Dabei entspricht ein WLM der Exposition gegenüber einem WL über einen Zeitraum von 170 Stunden (der monatlichen Arbeitszeit).

GRAFIK 2



Radon in der Umwelt. Die Radonaktivitätskonzentrationen in Gesteinen, Böden und Gewässern sowie in der Raum- und Außenluft überdecken weite Bereiche von wenigen Bq/m^3 bis zu einigen Millionen Bq/m^3 . Modifiziert nach: Kemski J, Klingel R, Siehl A: Das geogene Radon-Potential. In: Siehl A (ed.): Umweltradioaktivität. Berlin: Ernst & Sohn Verlag 1996; 193 (e29). Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Expositionserfassung

Radonmessungen können kostengünstig mit passiven Messgeräten oder mit direkt ablesbaren elektronischen Apparaturen durchgeführt werden. Entscheidend dabei ist, dass die Messung fachgerecht und qualitätsgesichert durchgeführt wird (12, e4, e5). Aufgrund der erheblichen Schwankungen der Werte im zeitlichen Verlauf sind Kurzzeitmessungen nicht aussagekräftig. Das Bundesamt für Strahlenschutz veröffentlicht auf seinen Internetseiten Listen mit Messstellen, die die notwendigen Anforderungen an die Qualitätssicherung erfüllen.

Höhe der Exposition

Die Außenluftkonzentrationen von Radon liegen in Deutschland in einem Bereich zwischen 1 und $15 Bq/m^3$ (im Mittel circa $9 Bq/m^3$ [7]). In Innenräumen kann die Belastung sehr unterschiedlich sein und zwischen 10 und $10\,000 Bq/m^3$ betragen. Auf der Grundlage von Messungen in Wohn- und Schlafzimmern von 27 000 Wohnungen ergaben sich ein arithmetischer Mittelwert von $49 Bq/m^3$ und ein geometrischer Mittelwert von $37 Bq/m^3$ (7). In Deutschland findet man bei Messungen in Gebäuden Werte, die in circa 36 % der Fälle größer als $100 Bq/m^3$ und in etwa 18 % größer als $200 Bq/m^3$ sind (9). Extrem hohe Werte für Innenraumbelastungen durch Radon sind insbesondere in Wohngebäuden im Bereich alter Bergbaureviere anzutreffen (7).

Radonexpositionen in Innenräumen findet man nicht nur in Deutschland sondern weltweit, abhängig insbesondere vom geologischen Untergrund und der Bausubstanz der Gebäude.

Biologische Effekte beim Menschen

Ein gehäuftes Auftreten von Lungenerkrankungen und insbesondere von Lungenkrebs bei Bergarbeitern im Erzgebirge ist seit mehr als 100 Jahren bekannt. Historisch wurde die Krankheit nach dem Ort Schneeberg auch „Schneeberger Lungenkrebs“ genannt (13). Zu Beginn des 20. Jahrhunderts konnte Radon als Ursache hierfür identifiziert werden. Durch Inhalation von Radon kommt es lokal zu einer hohen Belastung mit Alpha-Strahlung im Bereich der Bronchialschleimhaut. Die energiereiche Alpha-Strahlung trifft die Zellen des Bronchialepithels und kann dort DNA-Schäden hervorrufen. Hierdurch können Tumorerkrankungen verursacht werden.

Seit langem wird der durch Radon verursachte Lungenkrebs als Berufskrankheit anerkannt und entschädigt. Bei der beruflichen Exposition im Uranerzbergbau wird zudem die Verursachung von anderen Tumorerkrankungen, insbesondere Leukämien – mit Ausnahme der chronisch-lymphatischen Leukämie –, Knochen- und Leberkrebs diskutiert (14). Hierbei sind jedoch auch die anderen Expositionsbedingungen beim Uranerzbergbau zu berücksichtigen, die bei einer Radon-Exposition in Innenräumen nicht vorliegen.

Es stellt sich die Frage, ob wissenschaftliche Erkenntnisse aus dem Bereich der Arbeitsmedizin auch auf den Bereich der Umweltmedizin übertragbar sind. Das Problem der Risikoabschätzung im Bereich niedriger Dosen besteht für viele Einwirkungen, beispielsweise auch durch Asbest. In der Umweltmedizin werden meist deutlich niedrigere Expositionen als im beruflichen Umfeld beobachtet, jedoch häufig über einen längeren Zeitraum. Dabei sind auch die Belange besonders empfindlicher Personengruppen, wie zum Beispiel Kinder, ältere Personen oder Vorerkrankte zu berücksichtigen (e6, e7).

Es stellt sich die grundsätzliche Frage, ob und gegebenenfalls wie epidemiologische Erkenntnisse, die an Kollektiven mit hoher Exposition gewonnen wurden, für den Bereich niedriger Expositionen extrapoliert werden können. Für die epidemiologische Forschung ist es eine große Herausforderung, auch kleine Risiken, zum Beispiel im Umweltbereich durch gut geplante und durchgeführte Studien mit ausreichender Teilnehmerzahl, statistisch zu sichern und damit unabhängig von der Extrapolation zu einer eigenständigen Risikoabschätzung zu gelangen.

In der Umweltmedizin wurde zunächst die Bedeutung der Innenraumbelastung durch Radon für die Verursachung von Lungenerkrankungen kontrovers diskutiert (15). Eine Übersicht über die bis zum Jahre 2005 publizierten Einzelstudien gibt eine aktuelle Publikation der Strahlenschutzkommission (7), wobei laufend weitere Forschungsergebnisse veröffentlicht werden (e8–e10). So muss bei der Studienplanung und -durchführung, neben einer korrekten Erfassung der individuellen langzeitigen Radonbelastung in Wohnungen (e5, e6), das Rauchverhalten berücksichtigt werden. Einzelne kleinere Studien waren deshalb häufig nicht in der Lage, Risiken im Niedrigdosisbereich valide zu detektieren.

Erst mit größeren Studien und einer verbesserten epidemiologischen Methodik war hier ein Erkenntnisgewinn möglich. Zwischenzeitlich konnte durch die gemeinsame Auswertung mehrerer epidemiologischer Untersuchungen sowohl in Europa als auch in den USA und in China übereinstimmend ein Zusammenhang zwischen der Radon-Exposition in Innenräumen und dem Auftreten von Lungenerkrankungen nachgewiesen werden. In Deutschland wurden in den Studiengebieten Ost und West große Fall-Kontroll-Studien von Wichmann et al. (16), Kreienbrock et al. (17) und Kreuzer et al. (18) durchgeführt, die zusammen einen Datensatz von 2 963 neu diagnostizierten Lungenkrebsfällen und eine Bevölkerungsstichprobe vom 4 232 Kontrollpersonen umfassten und in die europäische gepoolte Auswertung eingingen.

Auf europäischer Ebene gibt es eine gemeinsame Auswertung, die 13 Studien aus 9 Ländern einbezieht, mit insgesamt 7 148 Fällen und 14 208 Kontrollen (19). Wesentliche Ergebnisse dieser Analyse sind:

- Auch nach Berücksichtigung des Rauchverhaltens gibt es einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Radonkonzentration in Innenräumen und dem Auftreten von Lungenerkrankungen.
- Eine Dosis-Wirkungs-Beziehung wurde selbst im Bereich niedriger Dosen ($< 200 \text{ Bq/m}^3$) gefunden ohne Hinweis darauf, dass ein Schwellenwert existiert.
- Radon in Innenräumen ist die Ursache für etwa 9 % aller Todesfälle infolge Lungenkrebs und etwa 2 % aller Todesfälle durch Krebs überhaupt in Europa (19).

Die europäischen Ergebnisse stimmen überein mit den Resultaten einer gemeinsamen Auswertung von 7 amerikanischen Fall-Kontroll-Studien mit 4 081 Fällen und 5 281 Kontrollen (e11, 20, 21) und einer gemeinsamen Auswertung zweier chinesischer Fall-Kontroll-Studien mit 1 050 Fällen und 1 996 Kontrollen (22).

Die durch die gemeinsame Auswertung von Fall-Kontroll-Studien gewonnenen Ergebnisse stehen dabei im Wesentlichen in Einklang sowohl mit Resultaten aus Tierversuchen und In-vitro-Studien als auch mit einer Extrapolation von Daten, die bei Bergarbeitern gewonnen wurden (e121, e13).

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die wissenschaftlichen Studienergebnisse den eindeutigen Nachweis eines radonbedingten Lungenkrebsrisikos erbracht haben. Diese Erkenntnisse gingen ein in die entsprechenden Einstufungen nationaler und internationaler Gremien (e14–e24).

Die derzeit vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse sprechen für ein lineares Dosis-Wirkungs-Modell ohne Schwellenwert (e25). Über die Bedeutung der Radon-Exposition in Innenräumen für die Entstehung von Lungenerkrankungen und über die Notwendigkeit einer Intervention durch geeignete Messprogramme sowie sinnvolle Maßnahmen zur Verminderung der Radonexposition, besteht zwischenzeitlich weltweiter Konsens (23).

Höhe des Risikos

Anhand der Ergebnisse der Europäischen Pooling-Studie zum Lungenkrebsrisiko durch Radon konnte gezeigt werden, dass pro 100 Bq/m³ gemessener langzeitiger Radonexposition von einem Anstieg des relativen Risikos um 8,4 % (95%-Konfidenzintervall: 3,0 %–15,8 %) ohne Korrektur und von 16 % (95%-Konfidenzintervall: 5 %–31 %) nach Korrektur für Unsicherheiten in der Expositionsabschätzung ausgegangen werden kann (19). Zu der Zahl der in Deutschland durch Radon in Innenräumen verursachten Lungenkrebserkrankungen liegt eine Schätzung vor (e26). Geht man von der Annahme aus, dass in Deutschland 5 % aller Todesfälle infolge Lungenkrebs durch Radon in Innenräumen verursacht werden, so kommt man auf 1 896 Fälle jährlich (e26). Diese Zahl übersteigt die geschätzte Zahl der durch „Passivrauch“ bedingten Lungenkrebserkrankungen (circa 260 Fälle) (3) bei weitem und macht deutlich, dass Radon nach dem Zigarettenrauchen die zweitwichtigste Ursache für Lungenkrebserkrankungen in der beruflich nicht exponierten Allgemeinbevölkerung ist. Die gesundheitliche Relevanz anderer umweltbedingter Risiken wie zum Beispiel Asbest oder polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe wird deutlich geringer eingeschätzt (7). Man nimmt an, dass durch eine Absenkung des Höchstwertes für die Radonkonzentration in Wohnungen auf 100 Bq/m³ circa 300 Lungenkrebstodesfälle pro Jahr in Deutschland verhindert werden könnten (7).

Erforderliche Maßnahmen

Es ist sinnvoll und geboten, die Radonkonzentration in Räumen, in denen sich Personen nicht nur vorübergehend aufhalten, so niedrig wie möglich zu halten. So wird zum Beispiel im Aktionsprogramm Umwelt und Gesundheit empfohlen, bei neu zu errichtenden Gebäuden einen Planungswert von < 100 Bq/m³ zugrunde zu legen und bei Altbauten anzustreben (e27). Um das Eindringen von Radon zu verhindern, kommen bei der Sanierung bestehender Gebäude insbesondere eine Beseitigung von Undichtigkeiten im erdberührenden Gebäudeteil, Maßnahmen zur natürlichen oder mechanischen Be- und Entlüftung sowie eine Regulierung der Druckverhältnisse bis hin zu einer Absaugung unterhalb der Bodenplatte in Betracht. Der Erfolg dieser Verfahrensweisen ist durch Kontrollmessungen zu überprüfen. Erprobte Maßnahmen wurden vom Bundesamt für Strahlenschutz im Radon-Handbuch Deutschland zusammengestellt (24).

Bei Neubauten ist es entscheidend, von vorne herein „radonsicher“ zu bauen. Neben der ethischen Verpflichtung einen als relevant erkannten Risikofaktor zu minimieren, werden Maßnahmen zu Expositionsminimierung auch unter Kosten-Nutzen-Gesichtspunkten diskutiert (25, e28). Obwohl die Vermeidung und die Verminderung der Radonbelastung in Innenräumen Teil des Aktionsprogramms Umwelt und Gesundheit ist (e27), konnte ein Radonschutzgesetz in Deutschland bisher nicht verabschiedet werden.

KERNAUSSAGEN

- Im arbeitsmedizinischen Kontext sind Lungenkrebserkrankungen durch Radon, insbesondere bei Bergarbeitern im Uranbergbau, seit langem bekannt.
- Für die Allgemeinbevölkerung trägt die Radonkonzentration in Innenräumen wesentlich zur Höhe der natürlichen Strahlenexposition bei.
- Es ist in der wissenschaftlichen Literatur gut belegt, dass durch die Radonexposition in Innenräumen das Lungenkrebsrisiko relevant erhöht wird. Für Deutschland wurde geschätzt, dass durch Radon in Innenräumen jährlich 1 896 Todesfälle infolge Lungenkrebs verursacht werden.
- Zur Risikominimierung müssen Gebäude mit hoher Belastung identifiziert und anschließend gegebenenfalls bauliche Maßnahmen eingeleitet werden. Bei Neubauten ist auf „Radonsicherheit“ zu achten.
- Das Problem der Radonbelastung in Innenräumen muss in der aktuellen umweltpolitischen Diskussion in Deutschland stärker berücksichtigt werden.

Interessenkonflikt

Die Autoren erklären, dass kein Interessenkonflikt im Sinne der Richtlinien des International Committee of Medical Journal Editors besteht.

Manuskriptdaten

eingereicht: 27. 5. 2009, revidierte Fassung angenommen: 14. 8. 2009

LITERATUR

1. DKG Krebsgesellschaft: Krebshäufigkeit – die aktuellen Zahlen 2004. www.krebsgesellschaft.de/krebshaeufigkeit,11267.html
2. Deutsches Krebsforschungszentrum (ed.): Frauen und Rauchen in Deutschland. Heidelberg 2008; www.tabakkontrolle.de/pdf/Frauen_und_Rauchen_Band_9.pdf
3. Deutsches Krebsforschungszentrum (ed.): Passivrauchen – ein unterschätztes Gesundheitsrisiko. Heidelberg 2005. www.tabakkontrolle.de/pdf/Passivrauchen_Band_5_2Auflage.pdf
4. Popp W, Brüning T, Straif K: Krebserkrankungen durch den Beruf. Dtsch Arztebl 2003; 100(1–2): A 35–40.
5. Baur X, Latza U, Butz M: Arbeitsbedingte Erkrankungen der Lunge und der Atemwege sowie Neoplasien. Dtsch Arztebl 2003; 100(41): A 2658–65.
6. Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften: Umweltmedizinische Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM): Radon in Innenräumen. 11/2008; <http://awmf.org/>
7. Strahlenschutzkommission: Radon und Lungenkrebs. In: Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission Band 62: Einfluss der natürlichen Strahlenexposition auf die Krebsentstehung in Deutschland. Berlin: H. H. Hoffmann GmbH Fachverlag 2008; 116–66.
8. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften und Bergbau Berufsgenossenschaft (ed.): Belastung durch ionisierende Strahlung im Uranerzbergbau der ehemaligen DDR. Abschlussbericht zu einem Forschungsvorhaben. Sankt Augustin 1998.
9. Kemski & Partner: Informationsseite zum Thema Radon und Radioaktivität. www.radon-info.de
10. Strahlenschutzkommission: Stellungnahme Strahlenexposition durch Radon-222 im Trinkwasser. Vom 3. August 2004. BAnz. 159 vom 25.08.2004; S. 18957.

11. Menzler S, Schaffath RA, Wichmann HE, Kreienbrock L: Abschätzung des attributablen Lungenkrebsrisikos in Deutschland durch Radon in Wohnungen. Landsberg/Lech: Ecomed Verlag 2006.
12. Strahlenschutzkommission Veröffentlichungen: Band 47 Leitfaden zur Messung von Radon, Thoron und ihren Zerfallsprodukten. Redaktion: Olaf Sarenio, Bonn: H. H. Hoffmann GmbH Fachverlag 2002; 1–180.
13. Härting FH, Hesse W: Der Lungenkrebs, die Bergkrankheit in den Schneeberger Gruben. Vierteljahresschrift für gerichtliche Medizin und öffentliches Sanitätswesen. Neue Folge 1879; 30: 296–309.
14. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (ed.): BK-Report Berufskrankheiten-Forum. Berichtsband über das Fachgespräch Extrapulmonale Krebserkrankungen Wismut am 12. Februar 1998 in Hennef. Essen: Prepress & Media Service GmbH 2000.
15. Field RW, Dupont PJ, Hendee WR: Exposure to residential radon causes lung cancer—point/counterpoint. Med Phys 2003; 30: 485–8.
16. Wichmann HE, Gerken M, Wellmann J, et al.: Lungkrebsrisiko durch Radon in der Bundesrepublik Deutschland (Ost). In: Wichmann HE, Schlipkötter HW, Fülgraff G (eds.): Fortschritte in der Umweltmedizin. Landsberg/Lech: Ecomed Verlag 1999.
17. Kreienbrock L, Kreuzer M, Gerken M, et al.: Case-control study on lung cancer and residential radon in West Germany. Am J Epidemiology 2001; 153: 42–52.
18. Kreuzer M, Heinrich J, Wölke G, et al.: Residential radon and risk of lung cancer in Eastern Germany. Epidemiology 2003; 14: 559–68.
19. Darby S, Hill D, Auvinen A, et al.: Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. BMJ 2005; 330: 223–9.
20. Krewski D, Lubin J H, Zielinski J M, et al.: Residential radon and risk of lung cancer, a combined analysis of 7 North American case-control studies. Epidemiology 2005; 16: 137–45.
21. Krewski D, Lubin J H, Zielinski J M, et al.: A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A 2006; 69: 533–97.
22. Lubin J H, Wang Z Y, Boice J D, et al.: Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. Int J Cancer 2004; 109: 132–7.
23. Zielinsky J M, Carr Z, Krewski D, Repacholi M: World Health Organization's International Radon Project. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A 2006; 69: 759–69.
24. Bundesamt für Strahlenschutz: Radon-Handbuch Deutschland. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW – Verlag für neue Wissenschaft GmbH 2001.
25. Gray A, Read S, McGale P, Darby S: Lung cancer deaths from indoor radon and the cost effectiveness and potential of policies to reduce them. BMJ 2009; 338a3110 doi:10.1136/bmj.a3110.

Anschrift für die Verfasser

PD Dr. med. Klaus Schmid
 Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin
 der Universität Erlangen-Nürnberg
 Schillerstraße 25
 91054 Erlangen
 E-Mail: klaus.schmid@rzmail.uni-erlangen.de

SUMMARY

Radon in Indoor Spaces—An Underestimated Risk Factor for Lung Cancer in Environmental Medicine

Background: Occupational medicine has long recognized radon to be a cause of lung cancer, especially among miners working under ground. Until recently, however, little scientific evidence was available about the risk to the general population caused by indoor radon.

Methods: The authors analyzed literature that they found by a selective search in the light of the recently published S1 guideline of the German Society of Occupational and Environmental Medicine (Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin) and a recent publication of the German Commission on Radiological Protection (Strahlenschutzkommission).

Results: Exposure to indoor radon and its decay products is a major contributor to the radiation exposure of the general population. In Germany, the mean radiation exposure due to radon in living rooms and bedrooms is about 49 Bq/m³. It is well documented in the scientific literature that indoor radon significantly increases the risk of lung cancer, probably in a linear dose-response relationship with no threshold. Every 100 Bq/m³ increase in the radon concentration is estimated to increase the relative risk for lung cancer by 8% to 16%. After cigarette smoking, radon is the second main cause of lung cancer in the general population without occupational exposure.

Conclusions: From the point of view of preventive environmental medicine, it is important to identify buildings with high radon concentrations, initiate appropriate measures, and minimize radon exposure, particularly in new buildings.

**Zitierweise: Dtsch Arztebl Int 2010; 107(11): 181–6
 DOI: 10.3238/arztebl.2010.0181**

 Mit „e“ gekennzeichnete Literatur:
www.aerzteblatt.de/lit1110

The English version of this article is available online:
www.aerzteblatt-international.de

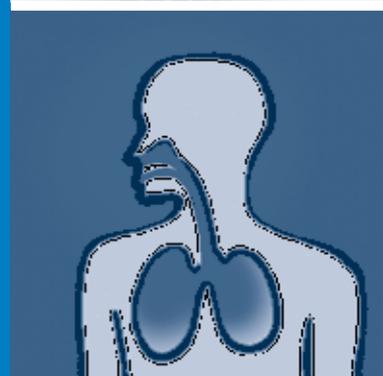
Radon

Informationen zu einem strahlenden Thema



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI
Bundesamt für Gesundheit BAG



Inhalt

Vorwort	5
Wie Radon entsteht	6
Wie Radon sich ausbreitet	7
Wie Radon ins Haus gelangt	8
Radon – eine Gefahr für die Gesundheit	10
Wie Radon gemessen wird	12
Es gibt verbindliche Richt- und Grenzwerte	14
Mögliche Massnahmen	16
Radon – die physikalische Seite	19
Radon – Sie fragen, wir antworten	20

Radon – ein heimtückisch strahlender Hausgenosse



Tagtäglich setzen wir uns natürlicher Radioaktivität und ionisierender Strahlung aus. Wir sehen sie nicht, wir fühlen sie nicht und wir riechen sie nicht:

- Strahlung aus dem Weltraum
- Strahlung aus dem Erdboden
- Strahlung aus der Nahrung

Meistens ist diese Strahlung ungefährlich. Sonst könnten wir gar nicht überleben. Es gibt aber Ausnahmen. Mit dieser Broschüre möchten wir Sie auf eine dieser Ausnahmen aufmerksam machen: Radon, ein natürliches Edelgas, das sich unter bestimmten Voraussetzungen in unseren Häusern in einem solchen Masse anreichern kann, dass gesundheitliche Schäden möglich sind. Denn im schlimmsten Fall kann Radon Lungenkrebs verursachen.

Radioaktivität und Alltag

Radon entsteht hauptsächlich im Erdboden beim Zerfall von Radium. Radon-Atome binden sich nicht, steigen zur Erdoberfläche auf und gelangen in die Aussenluft. Im Freien ist dies nicht weiter schlimm.

Durch undichte Stellen im Fundament können die Atome aber auch in Häuser eindringen. Und in geschlossenen Räumen kann die Radonkonzentration so hoch werden, dass das Gas unsere Gesundheit gefährden kann.

Hilflos sind wir jedoch nicht, denn das Radonproblem ist lösbar! Wir wissen genügend über Radon, um uns erfolgreich und mit vertretbarem Aufwand gegen gefährliche Konzentrationen dieses Gases zu schützen.

Das Bundesamt für Gesundheit (BAG) hat verbindliche Richtwerte und Grenzwerte der Radongas-Konzentration festgelegt und Massnahmen erarbeitet, um die Radongas-Konzentration in betroffenen Häusern herabzusetzen.

Das BAG koordiniert die Radon-Massnahmen auf nationaler Ebene. Es hat zu diesem Zweck eine «Fach- und Informationsstelle Radon» eingerichtet. Diese:

- informiert über die Radon-Problematik in der Schweiz;
- lanciert wissenschaftliche Untersuchungen;
- berät bei Messungen, Sanierungen und bei der Planung von Neubauten.

Wie Radon entsteht

Radon entsteht durch den natürlichen radioaktiven Zerfall von Radium



Radon, ein natürliches, im Boden vorkommendes Edelgas, entsteht beim Zerfall von Radium. Radon-Atome binden sich nicht, deshalb können sie sich im Erdboden frei als Radongas bewegen.

Atome sind die Grundbausteine von Erde, Wasser, Luft und Lebewesen. Die meisten Atome entstanden vor mehreren Milliarden Jahren und sind so stabil, dass es sie wahrscheinlich noch ebenso lange geben wird. Gewisse Atom-Sorten sind jedoch nicht stabil. Sie wandeln sich plötzlich und ohne äußere Einwirkung in andere Atome um. Dabei kann ein Atom seine Identität wechseln; das heisst, es wandelt sich von einem Element in ein anderes um.

Diese Umwandlung heisst in der Fachsprache «radioaktiver Zerfall» oder «Radioaktivität». Die Atomsorten, welche sich umwandeln können, nennt man «radioaktive Elemente» oder einfach «radioaktiv». Eine Kette von Atomen, welche durch fortlaufenden radioaktiven Zerfall entsteht, heisst «Zerfallsreihe».

Radon – ein natürliches Gas

So auch beim Radon: Das Ausgangselement für die Radon-Zerfallsreihe ist Uran. Uran ist in geringsten Mengen überall im Untergrund vorhanden.

Beim natürlichen Zerfall von Uran entstehen über eine Reihe von Folgeprodukten Radium und daraus Radon.

Radongas – ein Edelgas

Die Radon-Atome gehen keine Bindungen mit anderen Atomen ein. Wo immer möglich, lösen sie sich von ihrem Entstehungsort und breiten sich aus. Sie können aus dem Erdboden austreten und in die Atemluft gelangen. Radongas ist so natürlich wie Erdgas. Es ist unsichtbar, geruchlos und geschmacklos. Es ist nicht giftig.

Radon – ein unheimliches Gas

Aber ... Radon-Atome können weiter zerfallen. Es entstehen Polonium, Blei und Wismut. Diese sogenannten Folgeprodukte sind auch radioaktiv und schweben in der Atemluft. In Innenräumen lagern sie sich allmählich an Gegenständen, Staubpartikeln und feinsten Schwebeteilchen, sogenannten Aerosolen, ab. So können sie beim Einatmen in die Lunge geraten, sich auf dem Lungengewebe abgelagern und dieses bestrahlen. Und dies kann zu Lungenkrebs führen.

Wie Radon sich ausbreitet

Radon kommt hauptsächlich aus dem Untergrund an die Erdoberfläche



Wichtigste Quelle für Radongas in Häusern ist der Bauuntergrund. Das Gas wandert aus dem Erdinnern durch Fels und Lockergestein zur Erdoberfläche.

Der Gehalt an Radium und die Art der Anlage- rung im Gestein beeinflussen die Radonkonzentration im Baugrund.

Grosser Einfluss der Bodenbeschaffenheit



Je durchlässiger der Untergrund, desto eher kann Radongas bis zur Erdoberfläche aufsteigen. Eine hohe Durchlässigkeit finden wir bei:

- feinsten Hohlräumen wie Poren, Spalten oder Klüften;
- grösseren Hohlräumen in Schutthalden oder in Bergsturzgebieten;
- Karst- oder Höhlensystemen.

Durch dichte Tonschichten dringt das Radon kaum hindurch.

Starke lokale Unterschiede



Lokale Unterschiede sind deshalb sehr ausgeprägt:

- hohe Radonkonzentrationen bei einer dicken Lehmschicht bieten kaum Probleme für darauf stehende Häuser;
- geringere Konzentrationen und eine gasdurchlässige Bodenschicht können aber bereits zu kritischen Verhältnissen führen.

Gebiete in der Schweiz mit erhöhtem Risiko wurden bisher in der Jurakette sowie in den Kantonen Graubünden und Tessin gefunden.

Wie Radon ins Haus gelangt

Durch Sogwirkung und undichte Gebäudehüllen



Hauptsächlich verantwortlich für den Transport des Radons aus dem Boden ins Hausinnere ist der sogenannte «Kamineffekt»: warme Luft, die im Haus aufsteigt, bewirkt im Keller und den untersten Stockwerken einen kaum spürbaren Unterdruck; dadurch entsteht eine Sogwirkung. Diese Sogwirkung kann durch Ventilatoren oder Cheminées verstärkt werden.

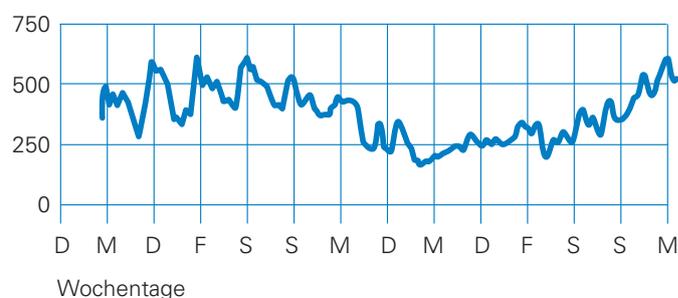
Wenn in der kalten Jahreszeit die Heizungen eingeschaltet sind, wird die Luft im Haus stärker erwärmt. Die Sogwirkung im Keller nimmt dadurch in der kalten Jahreszeit zu.

Kamineffekt

Bedingt durch die täglichen Temperatur- und Luftdruckschwankungen ändert sich die Sogwirkung im Keller ständig.

Tagesschwankungskurve

Radon-Belastung (Bq/m³)



Als Folge der Sogwirkung wird radonreiche Luft aus dem Untergrund durch die undichte Gebäudehülle ins Innere gesaugt – vorwiegend in den Keller und in die unteren Bereiche des Hauses.

Von Stockwerk zu Stockwerk nimmt die Radongas-Konzentration ab; meist ist ab dem zweiten Stockwerk nicht mehr mit hohen Werten zu rechnen.

Jedes Haus steht mit seinem Fundament in Kontakt mit radonreicher Bodenluft.

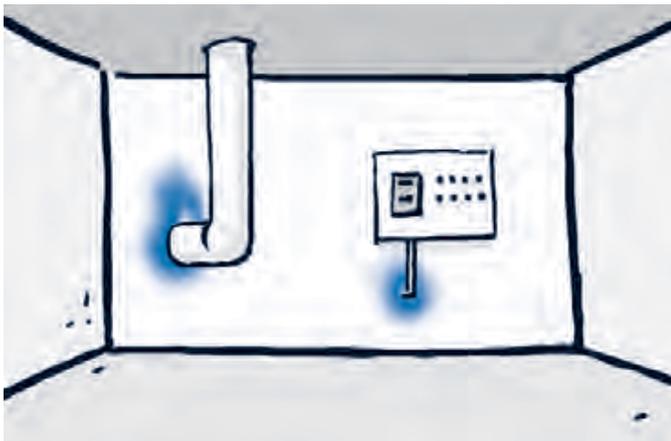
Undichte Gebäudehülle

Ob Radongas ins Haus eindringen kann, hängt in erster Linie davon ab, wie dicht das

Haus im Kontakt zum Untergrund ist. Undichte Stellen in der Gebäudehülle sind:



Risse und Fugen in Wänden und Böden



Öffnungen für die Durchführung von Kabeln und Rohren



Natürliche Kellerböden

Wasser

Radongas kann sich – ähnlich wie Kohlensäuregas – dem Wasser beimischen und mit der Wasserversorgung ins Hausinnere gelangen. Normaler Wasserverbrauch durch Kochen, Waschen oder Baden führt jedoch in der Schweiz zu keiner wesentlichen Erhöhung der Radongas-Konzentration in der Wohnung.

Baumaterialien

Baumaterialien haben sich bei Untersuchungen in der Schweiz bisher nicht als wesentliche Radon-Quellen erwiesen.

Mineraliensammlungen

Radioaktive Mineralien, wie etwa Pechblende, können zu einer höheren Radonkonzentration führen. Mineraliensammler sollten sich informieren und Messungen der Radonkonzentration durchführen.

Radon in der Aussenluft

Im Freien ist die Radonkonzentration wesentlich geringer als in den Häusern. Das Radon tritt nur stark verdünnt auf und ist somit ungefährlich.

Radon – eine Gefahr für die Gesundheit

Radon kann Lungenkrebs verursachen



Zu Beginn des 16. Jahrhunderts bürgerte sich im Erzbergbau für chronische Lungenerkrankungen der Bergleute die Bezeichnung «Bergsucht» ein. Später, in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts, stellte man fest, dass die Bergsucht im Bergbau-Revier «Schneeberg» einen besonders eigentümlichen Krankheitsverlauf hatte. So erhielt sie den Namen «Schneeberger Krankheit». 1879 wurde die «Schneeberger Krankheit» erstmals als Lungenkrebs diagnostiziert. Die Ursache der Erkrankung blieb aber unbekannt.

Radon – eine uralte Geschichte

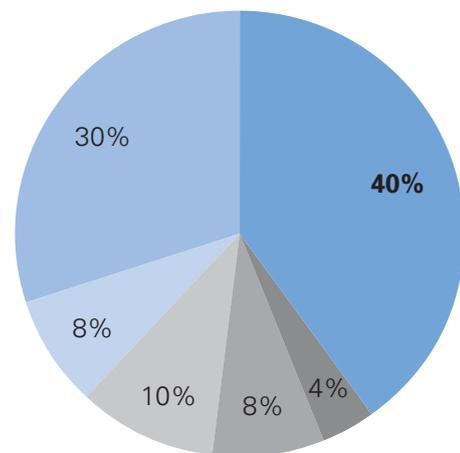
Um 1900 entdeckte man das Element «Radon», das Prinzip der radioaktiven Strahlung sowie die Fähigkeit dieser Strahlung, Krebs auszulösen.

Erst in den fünfziger Jahren fand man die wirkliche Ursache für die «Schneeberger Krankheit»: Man entdeckte, dass die eingeatmeten Radon-Folgeprodukte die Lunge so stark bestrahlen können, dass Lungenkrebs entsteht.

Seit den achtziger Jahren wird der Zusammenhang zwischen Radongas-Konzentration in Wohnräumen und dem Lungenkrebsrisiko sehr ausführlich untersucht. Dabei zeigt sich, dass das Risiko für Lungenkrebs mit zuneh-

mender Radongas-Konzentration steigt. Radon ist verantwortlich für etwa 40% der jährlichen Strahlenbelastung der schweizerischen Bevölkerung.

Verursacher der Strahlenbelastung in der Schweiz



■ Radon und seine Folgeprodukte

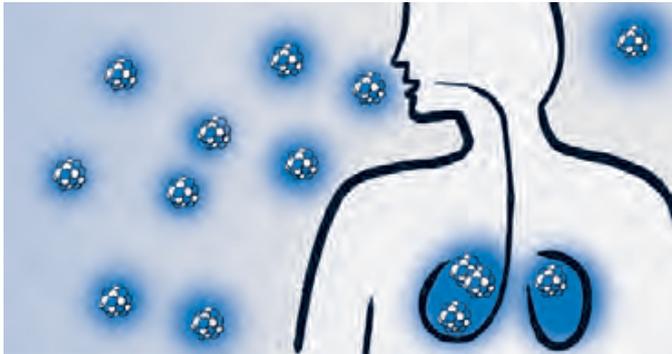
■ Medizinische Anwendung

■ Kosmische Strahlung

■ Terrestrische Strahlung

■ Bestrahlung durch Radionuklide im Körper

■ Übrige (Atombombenfallout, Tschernobyl-Unfall, Kernanlagen etc.)



Ein ernstes Risiko

Radon belastet unsere Gesundheit um einiges mehr als die entstandenen Immissionen aus dem Reaktorunfall von Tschernobyl und aus allen bisher durchgeführten Kernwaffentests; auch belastet es unsere Gesundheit mehr als die Strahlung, die uns aus dem Kosmos erreicht. Es ist in der Schweiz nach dem Rauchen die wichtigste Ursache für Lungenkrebs.

Im Prinzip ist nicht das Radongas selbst, sondern seine Folgeprodukte für die Entstehung von Lungenkrebs verantwortlich:

- je mehr Radon-Atome in einem Raum herumschwirren, desto grösser ist die Anzahl der Radon-Folgeprodukte;
- je mehr Folgeprodukte es gibt, desto mehr atmet man von ihnen ein;
- und: je mehr man einatmet, desto mehr können sich auf dem Lungengewebe ablagern und dieses bestrahlen.

Das Lungenkrebsrisiko ist also umso grösser, je mehr Radon-Atome in der Raumluft herumschwirren und je länger man diese Luft einatmet.

Zwischen der Bestrahlung des Lungengewebes und dem Auftreten von Lungenkrebs können Jahrzehnte vergehen.

Eine tödliche Gefahr

In der Schweiz leben etwa sieben Millionen Menschen. Rund 70 000 sterben pro Jahr, davon 17 000 an den Folgen von Krebs. Lungenkrebs fordert etwa 2700 Opfer pro Jahr. Einige Prozent dieser Lungenkrebsfälle können dem Radon zugeschrieben werden.

Andere gesundheitliche Schädigungen sind dem Radon nicht nachzuweisen. Auch bei hoher Konzentration hat Radongas keine kurzfristige Wirkung auf den Menschen, wie zum Beispiel Übelkeit, Atembeschwerden oder Schweissausbrüche; Radon bewirkt auch keine genetischen Schäden.

Eine vermeidbare Bedrohung

Die Bedrohung durch Radon in Gebäuden kann durch wirkungsvolle und zum Teil recht einfache bauliche Massnahmen vermindert werden. Wir sind dem Radon also nicht hilflos ausgeliefert.

Wie Radon gemessen wird

Radon kann einfach und kostengünstig gemessen werden



Bezüglich Radon-Belastung ist jedes Haus ein Einzelfall. Die Untersuchungen in der Schweiz haben gezeigt, dass selbst eng beieinander stehende Häuser gleicher Bauart völlig verschiedene Radon-Werte aufweisen können.

So ist es heute noch nicht möglich, die Radongas-Konzentration in einem bestehenden Gebäude oder in einem zukünftigen Neubau aufgrund von Bauweise und Baugrunduntersuchungen vorauszusagen. Es ist auch nicht möglich, für das Auffinden von Häusern mit hoher Radongas-Konzentration ein allgemein gültiges Konzept anzugeben. Nur eine Messung kann sichere Angaben liefern.

Kein Haus gleicht dem anderen

Es gibt verschiedene Methoden, um die Konzentration des farb-, geruch- und geschmacklosen Radons zu bestimmen. Nebst komplizierten und teuren Messapparaten gibt es auch einfachere passive Radon-Dosimeter mit Filmen oder Folien.

Einfach und kostengünstig: das Radon-Dosimeter

Radon-Dosimeter sind kleiner als ein Joghurtbecher. Sie sind ungefährlich, da sie weder radioaktiv noch giftige Substanzen enthalten. Die meisten Radon-Dosimeter funktionieren nach einem einfachen Prinzip: Wenn sich Radon-Atome umwandeln, können sie Atomteilchen aussenden.

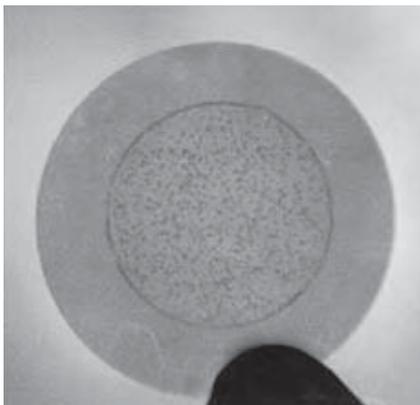


Radon-Dosimeter

Treffen diese Teilchen auf eine spezielle Plastikfolie im Dosimeter auf, hinterlassen sie Spuren. Diese werden mit einem chemischen Verfahren sichtbar gemacht und anschliessend gezählt.



Plastikfolie ohne Spuren



Plastikfolie mit Spuren

Je mehr Spuren man findet, desto mehr Atome haben sich während der Mess-Dauer im Dosimeter umgewandelt. Je mehr Umwandlungen stattgefunden haben, desto grösser ist die Anzahl der Radon-Atome im Raum – und desto grösser ist somit auch die Radongas-Konzentration.

Bestimmen Sie den Radon-Gehalt in Ihrer Wohnung

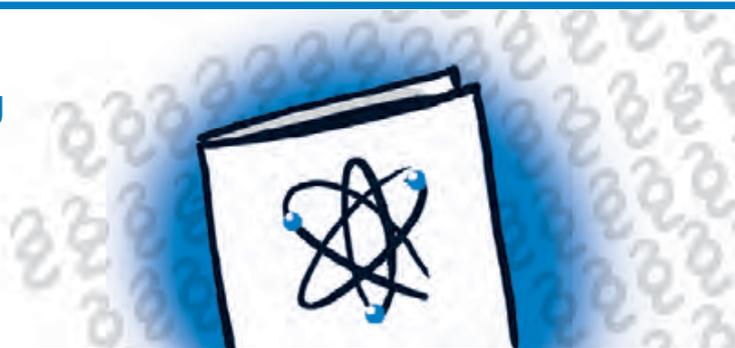
In Gebäuden kann die Konzentration mit Radon-Dosimetern (ca. Fr. 70.– bis 100.– pro Gerät) erfasst werden. Diese werden während ca. 3 Monaten, am besten im Winterhalbjahr, in den untersten bewohnten Räumen des Hauses platziert.

Anschliessend schickt man die Dosimeter zur Auswertung (zur sogenannten «Ermittlung der Radongas-Konzentration») an die Messstelle zurück. Die so gemessene Belastung wird in Becquerel pro m³ Luft (Bq/m³) angegeben.

Die «Fach- und Informationsstelle Radon» führt eine Liste von anerkannten Messstellen. Bei diesen kann man Radon-Messgeräte (Dosimeter) anfordern.

Es gibt verbindliche Richt- und Grenzwerte

Richt- und Grenzwerte finden Sie in der Strahlenschutzverordnung



Radon in Wohnräumen ist kein typisch schweizerisches Problem. Auch in vielen anderen Ländern ist man bestrebt, Gebäude mit hohen Radongas-Konzentrationen zu finden und die Konzentration unter gewisse Werte zu senken.

In der Schweiz sind einige Gebiete bekannt, in welchen hohe Radonkonzentrationen vorkommen können. Man geht davon aus, dass in der Schweiz in einigen tausend Gebäuden der Grenzwert überschritten wird. Ob eine Gefährdung möglich ist, hängt einerseits vom im Untergrund verfügbaren Radon ab, vielmehr jedoch von der (Gas-)Durchlässigkeit des Bodens. Wenig Radon in einem sehr durchlässigen Boden kann unter Umständen zu höheren Radongas-Konzentrationen führen als viel Radon in einem undurchlässigen Untergrund.

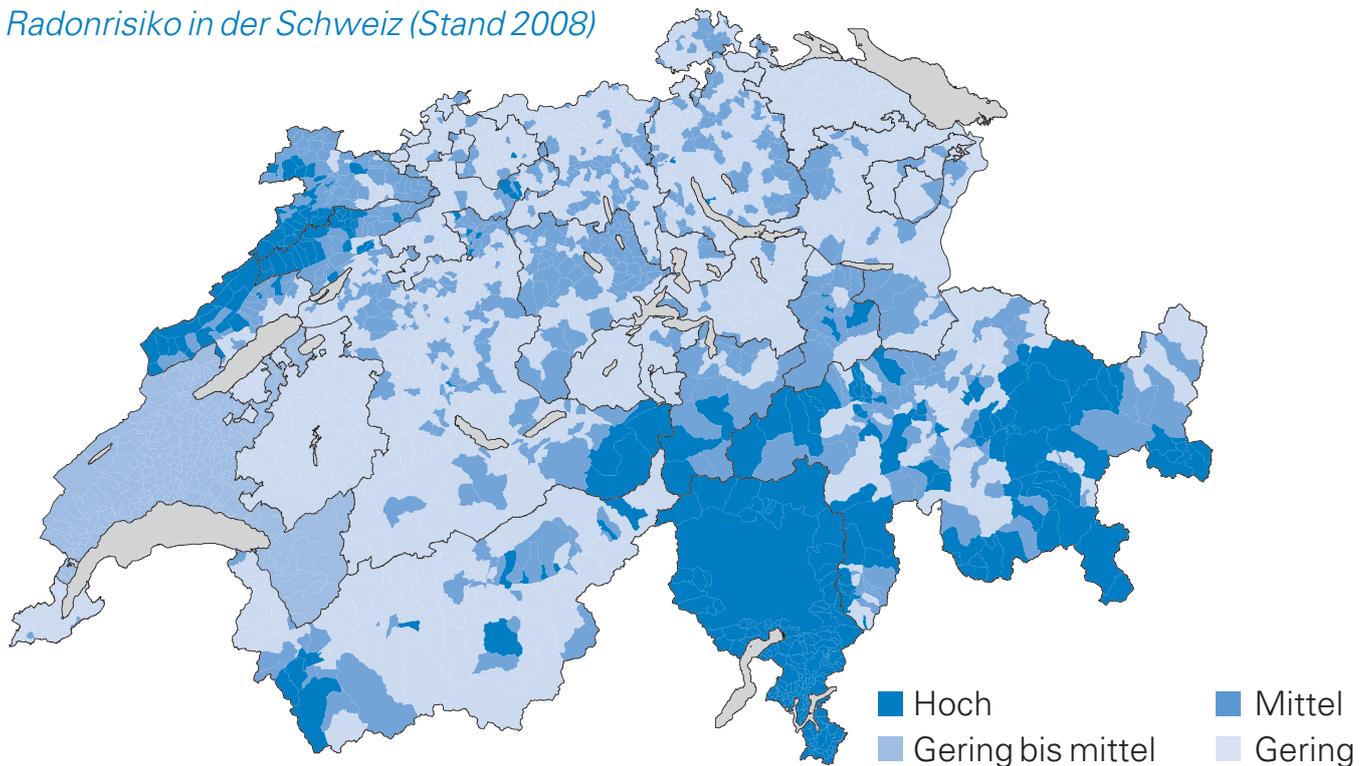
Wo in der Schweiz mit Radon zu rechnen ist

Die Radongas-Konzentration beträgt in der Schweiz:

- in der Bodenluft über 50 000 Bq/m³;
- im Wasser einige 1000 Bq/m³;
- im Freien etwa 10 Bq/m³.

Die durchschnittliche Radongas-Konzentration in Gebäuden liegt in der Schweiz bei etwa 78 Bq/m³. In einzelnen bewohnten Räumen wurden Spitzenwerte von über zehntausend Bq/m³ gemessen.

Radonrisiko in der Schweiz (Stand 2008)



Grenzwert

Liegt die Radongas-Konzentration in Wohn- und Aufenthaltsräumen über dem sogenannten Grenzwert von 1000 Bq/m^3 , so muss der Hauseigentümer das Gebäude sanieren.

Richtwert

Liegt die Radongas-Konzentration in Wohn- und Aufenthaltsräumen über dem sogenannten Richtwert von 400 Bq/m^3 , so empfiehlt das Bundesamt für Gesundheit, einfache bauliche Massnahmen zu ergreifen. Bei Neu- und Umbauten sowie bei Sanierungen gilt ein Richtwert von 400 Bq/m^3 .

Strahlenschutzverordnung

Mit der Einführung der Strahlenschutzverordnung im Jahre 1994 haben die Kantone konkrete Aufgaben erhalten:

- sie sorgen dafür, dass auf ihrem Gebiet genügend Radongas-Messungen durchgeführt werden;
- sie bestimmen aufgrund der Messungen, welche Gebiete als «Radon-Gebiet» zu bezeichnen sind;
- sie erlassen Bauvorschriften, damit Grenzwert und Richtwert eingehalten werden;
- sie ordnen auf Gesuch hin Messungen oder Sanierungen an;
- sie sorgen dafür, dass in Radon-Gebieten auch öffentliche Gebäude gemessen und saniert werden.

Mögliche Massnahmen

Es gibt vorbeugende und nachträgliche Massnahmen



Für die Radon-Belastung spielen die Druckverhältnisse im Haus und die Durchlässigkeit im Kellerbereich eine wichtige Rolle. Die Menge des einströmenden Radons hängt stark von der Durchlässigkeit des Kellerbodens und der Kellerdecke sowie von der Druckdifferenz zwischen Innenbereich und Bauuntergrund ab.

Ein Unterdruck im Haus sollte möglichst vermieden werden! Dieser Unterdruck wird verstärkt durch:

- geöffnete Fenster an der dem Wind abgekehrten Seite;
- Ventilatoren in Nassräumen (WC) und in Küchen (Ablufthauben);
- thermische Auftriebe in Kaminen;
- fehlende Zuluftöffnungen für Heizungs-brenner, Cheminées, Öfen etc.

Nochmals: Kamineffekt

Da Radon im untersten Geschoss (Keller) ins Gebäude eindringt, ist in erster Linie dort auf Undichtigkeiten zu prüfen und das Radon wegzuschaffen.

Sofortmassnahme

Durch Querlüften gelangt radonbelastete Luft schneller ins Freie. Damit erhöht sich aber der Wärmeverlust. Hohe Luftwechselraten zur Senkung der Radongas-Konzentration ohne begleitende wärmetechnische Massnahmen (Wärmedämmung, Luftdichtheit, Wärmepumpe etc.) sind nur als provisorische Massnahme zu empfehlen.

Sanieren

Falls in Wohn- und Aufenthaltsräumen die Radongas-Konzentration über dem Grenzwert von 1000 Bq/m^3 liegt, so muss saniert werden. Die Radongas-Konzentration sollte unter 400 Bq/m^3 gesenkt werden.

Grundsätzlich gilt: Ein gegen den Bauuntergrund abgedichtetes Haus ist ein guter Schutz gegen Radon. Dies erreicht man durch:

- Abdichten von Rissen und Fugen in Böden und Wänden, welche mit dem Untergrund in Kontakt stehen;
- Abdichten von Leitungszuführungen aus dem Erdreich ins Haus;

- Abdichten von Wänden und Böden zwischen bewohnten und unbewohnten Bereichen;
- Unterdrucksystem im Bauuntergrund.

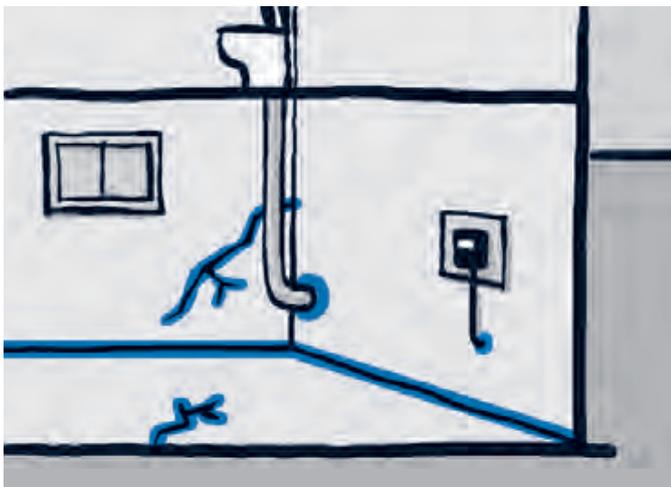
Bei sehr hohen Radongas-Konzentrationen genügen reine Abdichtungsmassnahmen nicht. Radonhaltige Luft muss abgeführt werden. Eine gute Reduktion ergibt sich:

- wenn man die radonhaltige Luft unter der Bodenplatte mit einem Rohrsystem und einem Ventilator absaugt;
- wenn man die radonhaltige Luft im Keller mit einem Ventilator absaugt.

Fenster öffnen und kurz lüften genügt nicht: die Radongas-Konzentration sinkt nur für kurze Zeit.

Was kann ich tun?

Lokale Eindringstellen müssen abgedichtet werden.

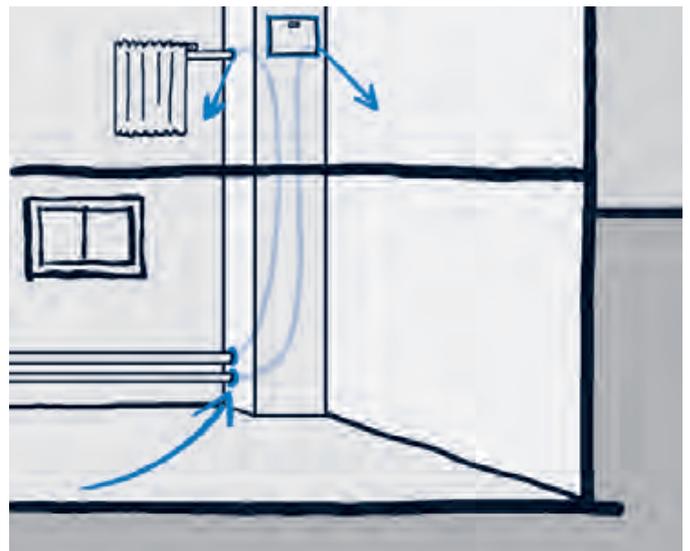


Eindringstellen

Zur Abdichtung müssen Risse und Öffnungen zuerst erweitert werden, damit das gasdichte Material besser haftet. Die Verarbeitungshinweise zu den Dichtungsmaterialien sind genau zu befolgen.

Ausbreitungspfade

Die Ausbreitung von Radon durch Leitungen und Installationsschächte für Heizung, Sanitär, Elektro ect. Kann mit gasdichten Materialien gedämmt werden.



Was können Fachleute tun?

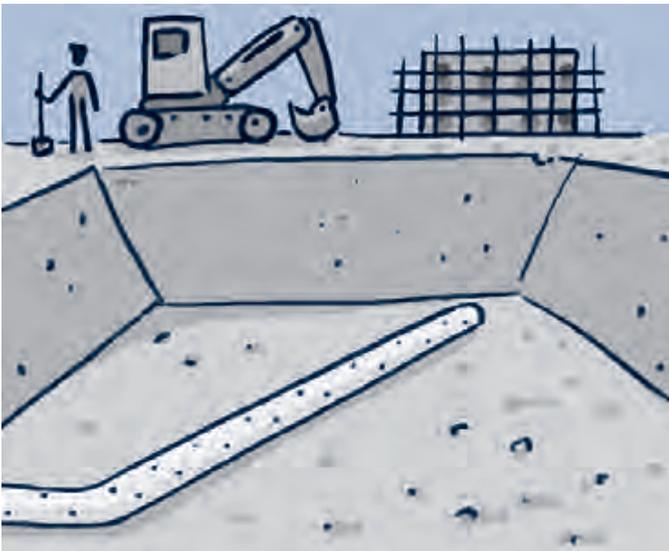
Grössere Eingriffe wie Nachbetonieren eines Kellers, Abdichten des Wohnbereichs gegenüber Keller und Einbau von Ventilationsanlagen sind durch Radonfachpersonen zu realisieren (siehe Liste unter: www.ch-radon.ch).

Vorbeugen bei Neubauten

Heutzutage ist es nicht möglich, die Radongas-Konzentration bei der Planung eines Neubaus vorauszusagen. Schutzmassnahmen bei Neubauten sind aber viel billiger als nachträgliche Sanierungen.

Deshalb:

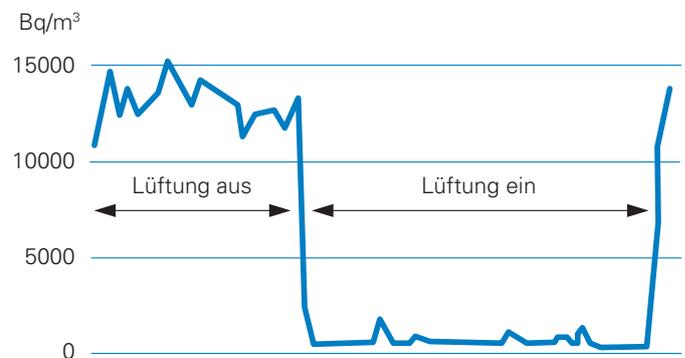
- bei einem Neubau ist abzuklären, ob sich das vorgesehene Bauland in einer Region mit erhöhtem Radon-Risiko befindet;
- wenn ja, sind mechanische Luftabführung im Unterbau (Drainage-Lüftung unter dem Gebäude) zu planen;
- das Thema Radon soll mit dem Architekten besprochen werden.



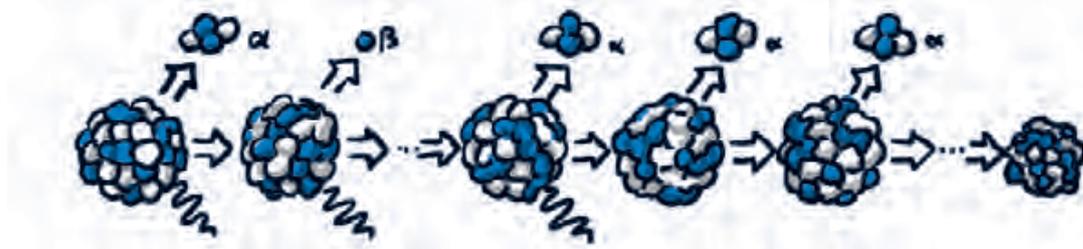
Unterdrucksystem im Bauuntergrund

Und zum Schluss: der Erfolg ist sicher

Bei sorgfältiger Planung und Ausführung der richtigen Massnahmen ist der Erfolg garantiert. Es gibt viele Beispiele für erfolgreiche Massnahmen bei Neubauten und Sanierungen, bei denen mit vertretbarem Aufwand die Radongas-Konzentration drastisch gesenkt wurde.



Grundlagen zum besseren Verständnis



Alle Stoffe sind aus Atomen zusammengebaut.

Jedes Atom besteht aus Hülle und Kern. Der Kern ist dicht gepackt und setzt sich aus positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen zusammen. Die Hülle wird durch negativ geladene Elektronen gebildet. Die Anzahl Protonen und Elektronen eines Atoms ist gleich und bestimmt dessen Eigenschaften. Einige Atome sind nicht stabil. Sie sind radioaktiv, d.h. sie zerfallen von selbst und bilden dabei neue Atome.

Beim radioaktiven Zerfall entsteht Strahlung.

Man unterscheidet 3 wesentliche Arten dieser Strahlung:

- α -Strahlung: ein α -Teilchen besteht aus 2 Protonen und 2 Neutronen;
- β -Strahlung: ein β -Teilchen besteht aus einem Elektron;
- γ -Strahlung: ist elektromagnetische Strahlung.

Diese Strahlung kann den Körper schädigen. Für α - und β -Strahlung bietet schon die Kleidung oder eine Brille genügend Schutz. Zum Schutz vor γ -Strahlung ist dickes und schweres Material erforderlich.

Halbwertszeit: Die Zeit, in der die Hälfte einer grossen Zahl gleicher radioaktiver Kerne zerfällt, nennt man die Halbwertszeit. Sie reicht, je nach Kernsorte, von Sekundenbruchteilen bis zu Jahrmilliarden.

Aktivität: Die Anzahl der in einer Sekunde zerfallenden Atomkerne, d.h. die Aktivität eines radioaktiven Elementes wird in Becquerel (Bq) gemessen: 1 Becquerel = 1 Zerfall pro Sekunde

Zerfallsreihe: Das im Erdboden und in der Luft vorkommende Gas Radon-222 ist ein radioaktives Element natürlichen Ursprungs. Es entsteht beim Zerfall von Radium-226. Beim Zerfall von Radon-222 entstehen neue Atome und Strahlung, bis schliesslich ein stabiles Element erreicht wird.

Antworten auf häufige Fragen zum Thema Radon



Was ist Radon?

Radon ist ein Edelgas, welches beim Zerfall von Uran im Erdreich entsteht. Weil es ein Gas ist, dringt es leicht durch undichte Stellen in Gebäude ein, wo es eingeatmet wird. Beim weiteren Zerfall von Radon zu Blei, Polonium und Wismut wird Strahlung freigesetzt, welche das Lungengewebe bestrahlen kann. Dadurch kann Lungenkrebs verursacht werden. Radon ist in der Schweiz für rund 40 Prozent der jährlichen Strahlenbelastung verantwortlich.

Wie gefährlich ist Radon?

In der Schweiz sind 8,5 Prozent aller Lungenkrebserkrankungen auf Radon zurückzuführen. Radon fordert in der Schweiz jedes Jahr zwischen 200 und 300 Todesopfer und ist somit nach dem Rauchen die häufigste Ursache für Lungenkrebs. Radon ist der gefährlichste Krebserreger im Wohnbereich. Aber man kann sich mit baulichen Massnahmen vor Radon schützen.

Ich schlafe seit einiger Zeit sehr schlecht.

Kann das eine Folge von Radongas sein?

Nein, es gibt da keinen Zusammenhang. Es ist nachgewiesen, dass das Leben in einem radonbelasteten Haus ein erhöhtes Lungenkrebsrisiko mit sich bringt. Es sind jedoch keine weiteren gesundheitlichen Auswirkungen von Radon bekannt.

Gibt es in der Schweiz Häuser, die so stark mit Radon belastet sind, dass man sie nicht bewohnen sollte?

In der Schweiz gilt für Wohn- und Aufenthaltsräume ein Grenzwert von 1000 Bq/m³. Es gibt bei uns rund 5000 Wohngebäude mit Grenzwertüberschreitung. All diese Gebäude müssen saniert werden, um eine starke Gefährdung der Gesundheit auszuschliessen. Ausserdem überschreiten über 30 000 Gebäude den Richtwert von 400 Bq/m³.

Wenn das Gebäude saniert werden muss – dann steigt doch die Miete?

Nein, die Sanierung eines radonbelasteten Hauses ist keine Wertvermehrung und kann somit nicht auf den Mietzins überwältzt werden. Nach Art. 256 OR hat der Vermieter die allgemeine Pflicht, ein vermietetes Objekt in einem tauglichen Zustand zu übergeben. Grenzwertüberschreitungen stellen einen schweren Mangel im Sinne des Obligationenrechts dar und müssen behoben werden.

Meine Verwaltung will keine Radonmessung vornehmen. Was kann ich tun?

Der Eigentümer einer Liegenschaft ist auf Verlangen des Mieters verpflichtet eine Radonmessung vorzunehmen, allerdings nur dann, wenn Anhaltspunkte bestehen, dass der Grenzwert von 1000 Bq/m³ über-

schritten sein könnte. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn sich das Gebäude in einem Radongebiet befindet. Ein Kataster mit den Radongebieten der Schweiz ist unter www.ch-radon.ch publiziert. In diesem Fall ist der Eigentümer verpflichtet eine Messung durchzuführen und die Resultate mitzuteilen. Weigert sich der Eigentümer dies zu tun, muss der zuständige Kanton eine Messung anordnen. Falls der Grenzwert überschritten ist, muss der Eigentümer der Liegenschaft diese innerhalb von drei Jahren sanieren.

Bei meinem Nachbarn wurden keine erhöhten Radongas-Konzentrationen festgestellt. Muss ich in meinem Haus dennoch Messungen durchführen?

Für das Radon gilt generell: Kein Haus gleicht dem andern. Nur eine Messung gibt Aufschluss. Es sind Fälle von benachbarten Häusern mit sehr unterschiedlichen Radon-Pegeln bekannt.

Wie kann ich bei mir zuhause Radon messen?

Bei anerkannten Radon-Messstellen können Dosimeter bestellt werden. Diese werden während drei Monaten im Wohnbereich aufgestellt. Anschliessend werden sie zur Auswertung an die Messstelle zurückgesandt. Eine Messung kostet ca. Fr. 70.– bis Fr. 100.–. Eine Liste der anerkannten Messstellen ist unter www.ch-radon.ch im Internet publiziert. Die Messung sollte wenn immer möglich während der Heizperiode durchgeführt werden.

Woher weiss ich, ob meine Kinder in Schulzimmern unterrichtet werden, die eine hohe Radongas-Konzentration aufweisen?

Der Gebäudeeigentümer kann Ihnen sagen, ob schon gemessen wurde und wie hoch die Werte gegebenenfalls sind. Die Pläne der Gebiete mit erhöhten Radongas-Konzentrationen können bei der kantonalen Radon-Kontaktstelle von jeder Person eingesehen werden. Die Liste der kantonalen Radon-Kontaktstellen ist im Internet unter www.ch-radon.ch publiziert.

Wem werden die Messresultate mitgeteilt?

Die Messresultate sind den jeweiligen kantonalen Radon-Kontaktstellen und dem Bundesamt für Gesundheit bekannt.

Wir lüften unsere Wohnung mehrmals täglich. Das sollte doch reichen, um das Radongas aus der Wohnung zu vertreiben?

Dies wirkt vorübergehend, doch schon kurz nach dem Fensterschliessen ist der ursprüngliche Wert wieder erreicht.

Ich bin Mineraliensammler und habe auch uranhaltige Mineralien. Setzen diese auch Radon frei?

Uran- und thoriumhaltige Mineralien setzen Radon frei. Eine Radongas-Messung ist zu empfehlen.

Wir haben uns entschlossen, ein Einfamilienhaus zu bauen. Wie finden wir einen Bauplatz, wo kein Radongas aus dem Boden kommt?

Aus jedem Boden tritt Radongas aus, jedoch in sehr unterschiedlicher Masse. In einem Radongebiet ist eine radonsichere Bauweise angebracht. Eine vorgängige Messung im Baugrund gibt leider keinen genügenden Aufschluss über die künftige Radonbelastung in den Wohnräumen. Eine Suchmaschine mit Informationen über die Radonsituation in jeder Gemeinde der Schweiz kann unter www.ch-radon.ch eingesehen werden.

Wir haben gerade eine neue Wohnung gekauft und eine Radonmessung durchgeführt. Dabei haben wir festgestellt, dass der Grenzwert überschritten ist. Was sollen wir tun?

Die Überschreitung des Radongrenzwertes stellt einen Mangel an der gekauften Sache dar, weil die Tauglichkeit zum vorausgesetzten Gebrauch («das Bewohnen») durch die Grenzwertüberschreitung erheblich gemindert ist («gesundheitliche Gefährdung»). Der Verkäufer haftet für solche Mängel und zwar auch dann, wenn er diese nicht gekannt hat. Allerdings enthalten die Grundstückkaufverträge oft eine Freizeichnungsklausel zugunsten des Verkäufers. Ist dies der Fall, haftet der Verkäufer unter Umständen nur dann, wenn er den Mangel arglistig verschwiegen hat.

Wie kann ich mich vor Radon schützen?

Eine durchgehende Betonplatte bietet bei Neubauten bereits sehr guten Schutz vor Radon. Ausserdem müssen alle Leitungen und Lüftungssysteme sorgfältig ausgeführt werden. Wenn Sie ein neues Haus bauen,

sollten Sie Ihren Architekten auf jeden Fall auf die Radonproblematik ansprechen. Unsere technische Dokumentation für Baufachpersonen enthält alle wichtigen Punkte in Bezug auf Präventions- und Sanierungsmassnahmen. Für Bauherren und Laien gibt es eine einfache Kurzbroschüre, welche die wichtigsten Präventions- und Sanierungsmassnahmen schildert.

Was kostet eine Radonsanierung?

Einfache Radonsanierungen sind bereits ab wenigen hundert Franken möglich. Aufwändige Sanierungen können mehrere zehntausend Franken kosten.

Ich wohne im obersten Stockwerk eines Hauses. Bin ich gefährdet?

Die Radonbelastung nimmt mit zunehmender Höhe (Stockwerkzahl) ab. In den höher gelegenen Stockwerken eines Gebäudes ist deswegen in der Regel nur noch wenig Radon auszumachen. Normalerweise ist ab dem zweiten Stock nicht mehr mit hohen Radonkonzentrationen zu rechnen.

Bieten Sie auch Kurse an?

Ja, das BAG hat einen Ausbildungskurs für Baufachleute entwickelt. Kurse finden je nach Nachfrage in diversen Regionen der Schweiz statt. Für weitere Informationen wenden Sie sich bitte an radon@bag.admin.ch.

Impressum

© Bundesamt für Gesundheit (BAG)
Herausgeber: Bundesamt für Gesundheit
Publikationszeitpunkt: 2008

Weitere Informationen: BAG, Sektion Radiologische Risiken, CH-3003 Bern
Telefon: +41 (0)31 324 68 80, Telefax: +41 (0)31 322 83 83,
E-Mail: radon@bag.admin.ch, www.ch-radon.ch

Diese Publikation erscheint ebenfalls in französischer und italienischer Sprache.

Bezugsquelle: BBL, Vertrieb Publikationen, CH-3003 Bern
www.bbl.admin.ch/bundespublikationen
Gratisabgabe

BBL-Artikelnummer: 311.341.d
BAG-Publikationsnummer: BAG VS 10.08 15'000 d 10'000 f 5'000 i 40EXT0811

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

Begleitunterlagen: Großes Radiometrisches Praktikum HM

g: γ -Spektrometrie

Prof. Dr. Schwankner
Türkenstraße 78
80799 München
Lab.: 089/1265-2608
Büro.: 089/1265-2667
priv.: 089/33019260

Gammastrahlenspektrometrie

Lehrbeauftragter: Dipl.-Ing. (FH) Chr. Fegtl, Prof. Dr. R. Schwankner

Durch die unterschiedliche strahlenbiologische Wirksamkeit von Radionukliden hat die nuklid-spezifische Meßtechnik z.B. im Rahmen des Vollzugs der Strahlenschutzvorsorgegesetze sowie der Strahlenschutzverordnung eine große Bedeutung im Strahlenschutz erlangt. Bei der Beurteilung von Umweltproben auf Volumenaktivität in Lebensmitteln und Bodenproben ist speziell die Gammastrahlenspektroskopie durch ihren geringen Aufwand bei der Probenvorbereitung zu einem unerlässlichen Hilfsmittel geworden. Im ersten Abschnitt sollen die wichtigsten Grundlagen der nuklid-spezifischen Meßtechnik besprochen werden, im zweiten Abschnitt der Ablauf einer Gammastrahlenspektrometrie und im dritten Abschnitt die Interpretation von Spektren diverser Umweltproben. Für die Erklärung elementarer physikalischer Begriffe sei auf die Literaturangaben im Anhang verwiesen.

1. Grundlagen

1.1 Nuklid-spezifische Meßtechnik

Um die strahlenbiologische Wirksamkeit einer radioaktiven Probe beurteilen zu können, müssen die darin enthaltenen Radionuklide identifiziert werden. Dies kann über die Ermittlung der Strahlungsenergie geschehen. Das diskrete, nuklid-spezifische Energiespektrum der α - und γ -Zerfälle wird zur Nuklididentifizierung genutzt. Für eine Energiebestimmung muß das vom Radionuklid ausgesendete Teilchen oder Quant seine Energie vollständig im Detektor deponieren. Bei α -Zerfällen bedingt die geringe Reichweite der Teilchen, welche bereits zu hoher Selbstabsorption innerhalb der Probenmatrix führen kann, eine diffizile chemisch-präparative Probenvorbereitung, wie das Isolieren und Aufbringen der α -Strahler in dünnen Schichten (Dünnschichtpräparate) und einer Messung im Vakuum, um Energieverluste der α -Teilchen zu vermeiden. Die Erfassung von γ -Quanten ist prinzipiell einfacher, da auf dem Weg von der Entstehung zum Detektor nur ihre Intensität geschwächt wird und nicht ihre Energie. Die meisten nuklid-spezifischen Aktivitätsmessungen erfolgen deshalb γ -spektrometrisch mit Hilfe hochauflösender Reinst-Germanium-Detektoren (HP-Ge's). HP-Ge-Detektoren arbeiten nach dem Funktionsprinzip eines Halbleiterdetektors.

1.2 Funktionsprinzip eines Halbleiterdetektors

Die Germanium-Halbleiterdetektoren besitzen die Struktur einer Diode. Der eigentliche Detektor ist eine pn-Halbleiter-Schicht. Durch Anlegen einer in Sperrrichtung gepolten Spannung verarmt ("Saugfeld") die Raumladungszone an freien Elektronen und wird hochempfindlich gegenüber der Generation von freien Ladungsträgern durch externe Effekte. γ -Quanten sind sekundär ionisierend, d. h. sie können nur über Compton-, Photo- und Paarbildungseffekt Primär-Elektronen anregen, die auf dem Weg durch die Raumladungszone unter Energieabgabe sog. Exzitonen (Elektron-Loch Paare) bilden, welche dann im elektrischen Feld getrennt werden und dabei einen Stromimpuls hervorrufen, der im Fall des Photoeffekts direkt proportional zur Energie des einfallenden γ -Quants ist. Zusätzlich zu den durch γ -Quanten angeregten Elektronen werden Elektronen auch thermisch angeregt und erzeugen so ein statistisches Untergrundrauschen. Um dies zu minimieren, müssen Halbleiterdetektoren bei niedrigen Temperaturen betrieben werden. Die höchste Temperatur, bei der akzeptable Meßergebnisse erzielt werden können, hängt von Reinheit und Anzahl der Defekte des Ge-Kristalls ab. Als praktisch akzeptable Temperatur hat sich z.B. 77 K erwiesen, der Siedepunkt von flüssigem Stickstoff¹. Der FHM-Detektor jedoch wird in einem geschlossenen zyklischen Elektrokühlsystem betrieben und ist damit von einer Logistik für flüssigem Stickstoff unabhängig. Die wichtigsten Bauarten von Ge-Detektoren sind die planare- und koaxiale-Bauform in p- oder n-Typ-Ausführung. Die planare Bauart ist im niederenergetischen Bereich besonders empfindlich, die koaxiale dagegen über den gesamten γ -Bereich (je nach Eintrittsfenster für Energien > 40 keV). Abb. 1 veranschaulicht die Unterschiede der verschiedenen Bauformen.

1.3 Besonderheiten des HP-Ge-Detektor der FH München

Den HP-Ge-Detektor der FH München kennzeichnet seine koaxiale Bauart in n-Typ-Ausführung, die eine hohe Nachweis-Empfindlichkeit über den ganzen γ -Energie-Bereich beinhaltet. Speziell bei den n-Typ-Detektoren ist der außen liegende p-leitende Kontakt mit einer Dicke von 0,3 μm sehr dünn und deshalb besonders empfindlich für niederenergetische Strahlung. Der innenliegende n-Kontakt hat eine Schichtdicke von ca. 600 μm . Die hohe Empfindlichkeit im niederenergetischen Bereich

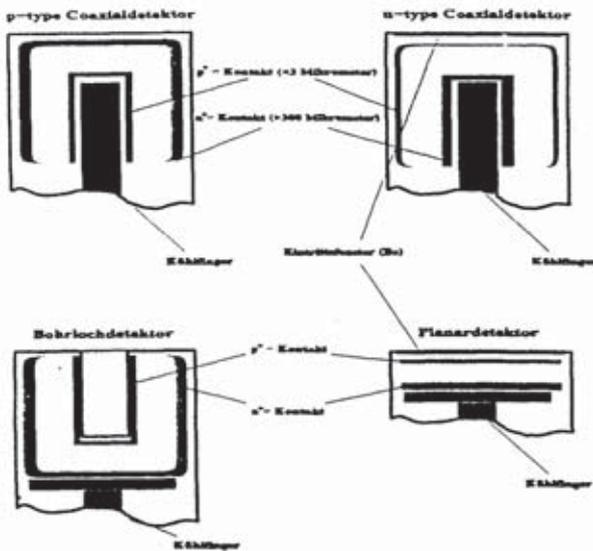


Abb. 1: Verschiedene Bauformen von HP-Ge's; bei den n-Typ Detektoren liegt der p-leitende Kontakt außen und der n-Kontakt innen; bei den p-Typ-Detektoren ist es genau umgekehrt

hat aber auch den Nachteil, daß vermehrt Koinzidenz-Summenbildung auftritt; diese entsteht durch zeitliche Überlagerung zwischen γ -Quanten und niederenergetischen Röntgenquanten, die durch Elektronen-Einfall (EC) bzw. bei der Emission von Konversionselektronen entstehen, oder allgemein auftritt bei Nukliden die in γ -Kaska-

den zerfallen. Bei Konversionselektronen wird die gesamte Energie eines γ -Quants auf ein Elektron übertragen. Beim Auffüllen des zurückbleibenden Lochs mit einem Elektron aus einer höheren Schale kann die freiwerdende Röntgenstrahlung auf ein weiteres Elektron übertragen werden, welches als Auger-Elektron bezeichnet wird. Das verbleibende Loch wird von einem Elektron der nächsten Schale aufgefüllt, wobei für das jeweilige Element charakteristische Röntgenstrahlung ausgesendet wird. Der verwendete n-Typ Koaxialdetektor (vgl. Abb. 1) hat als Eintrittsfenster eine dünne Magnesium-Schicht (1,5 mm dick, spezielles Low Background Material), die für niederenergetische γ -Quanten bis etwa 20 keV durchlässig ist. Der Ge-Detektor ist von einer ca. 10 cm dicken aktivitätsarmen Bleiummantelung (Bolidenblei) umgeben, die zur Abschirmung der Umgebungstrahlung dient. Da durch Abbremsung von Elektronen und anderen Effekten (Röntgenfluoreszenz etc.) in der Bleiummantelung hochenergetische Röntgenstrahlung entstehen (z.B. die charakteristischen Pb-Röntgenlinien $K_{\alpha 2}$; $E = 72,8$ keV; $K_{\alpha 1}$; $E = 74,97$; $K_{\beta 1}$; $E = 84,94$ keV; $K_{\beta 2}$; $E = 87,36$ keV), ist die Bleiummantelung nach innen noch zusätzlich mit Kupfer ausgekleidet, da die Röntgenlinien von Kupfer im für Aktivitätsmessungen uninteressanten Bereich liegen ($K_{\alpha 2}$; $E = 8,03$ keV; $K_{\alpha 1}$; $E = 8,05$; $K_{\beta 1}$; $E = 8,90$ keV). Ein zusätzlicher, 4 mm dicker Plexiglasmantel vervollständigt die Abschirmung. Als Abschirprinzip gilt dabei das Prinzip der abnehmenden Ordnungszahlen der Absorber von außen nach innen ($Z(\text{Pb}) = 82$, $Z(\text{Cu}) = 29$, $Z(\text{Plexiglas}) = 6 - 8$). Der Detektor kann außerdem noch wahlweise mit einem "Kupferhut", eine zusätzliche hohlylindrische hochreine Kupferummantelung von 0,8 mm Wandstärke, betrieben werden. Diese wird direkt über den Detektor gestülpt, wodurch der untere Meßbereich bzgl. des Eintrittsfensters auf ungefähr 40 keV begrenzt wird. Der Ge-Einkristall hat einen Durchmesser von 59,8 mm und eine Länge von 62,2 mm². Zur Verringerung der natürlichen Aktivität bzgl. luft- bzw. aerosolgetragener Radionuklide (z.B. Radonisotope und ihre Folgeprodukte) kann die Meßkammer mit Stickstoff gespült werden (Spülrate 1l/min.), welcher die in der Meßkammer befindliche Luft verdrängt und damit auch deren natürlich radioaktive Inhaltsstoffe. Durch diese Meßplatzkonzeption (geringe Untergrundzählrate, hohe Auflösung) eignet sich der Detektor vorzüglich zur direkten γ -spektrometrischen Bestimmung der verschiedenen Radionuklide in Umweltproben.

Die Auswertelektronik des Hp-Ge-Detektors besteht aus einem Hochspannungsteil (2500 V DC; negativ), einem ADC (Analog-Digital-Converter) und einem Verstärker, sowie einem MCA (Vielkanalanalysator) und einem PC 486-Prozessor. Die im Detektor entstehenden Spannungsimpulse werden verstärkt und über einen ADC digitalisiert. Der MCA ordnet die digitalisierten Signale nach ihrer Impulshöhe (Energie) verschiedenen Kanälen zu und addiert sie. Der MCA kann mit 8k (1k entspricht 1024 Kanälen am MCA), 4k, 2k, 1k oder 512 Kanälen betrieben werden. Die Anzahl der benötigten Kanäle, welche am MCA eingestellt werden müssen, hängt von der Größe des Spektrums ab und der Auflösung, die man für einen Photopeak erzielen will. Als Beispiel soll eine Halbwertsbreite der γ -Linie von 2 keV und ein Spektrum, das von 100 keV bis 1500 keV reicht, angenommen werden. Um einen Peak noch auswerten zu können, müssen mindestens 4 Kanäle dafür gespeichert werden, dies ergibt dann 1 Kanal pro 0,5 keV. Insgesamt würden 2800 Kanäle benötigt. Der MCA müßte mit 4k betrieben werden *. Die Auswertung und Speicherung der erhaltenen Spektren erfolgt an dem angeschlossenen Rechner. Die Hardware und Software "Gammavision" für das Meßsystem stammt von der Firma "Ortec".

2. Ablauf einer nuklidspezifischen gammaskopimetrischen Analyse

Der Ablauf einer γ -spektrometrischen Aktivitätsbestimmung läßt sich grob in vier Bereiche einteilen. Diese sind Probenvorbereitung, Kalibrierung des Spektrometers, die Messung der Probe und die Auswertung des Meßspektrums. Zur Probenvorbereitung gehört z.B. das Wiegen der Probe, Homogenisierung der Probe etc. Die Kalibrierung des Spektrometers geschieht mit Hilfe einer Energiekalibrierung und dem Erstellen einer Ausbeutekurve (Efficiency). Der Ablauf ist schematisch in Abb. 2 dargestellt.

Die quantitative Auswertung eines γ -Spektrums, d. h. die Ermittlung der Aktivität eines Nuklids N bei einer bestimmten γ -Energie E kann durch die folgende Beziehung ermittelt werden (auf die genauere Darstellung der Grundlagen und Fachbegriffe der Atomphysik muß hier leider verzichtet werden):

$$A_{spe}(N, E) = \frac{I_{brutto} - I_{bg} - I_D}{\epsilon \rho(N) \Delta(E) m \theta^{-1} t}$$

- $A_{spe}(N, E) =$ **Spezifische Aktivität** für Nuklid N bei einer Photonenenergie E in Bq/kg
- $I_{brutto} =$ **Impulse (Zählrate) des Photopeaks** I_{brutto} ; errechnen sich aus der Summe der Kanalhalte (detektierte Ereignisse) eines Peaks (für einen Photopeak wird angenommen, daß die Photonenenergienormalverteilt sind)
- $I_D =$ **Untergrundimpulse des Photopeaks** I_D ; entstehen durch die Compton-Wechselwirkung der γ -Strahlung, bei der nur ein Teil der γ -Energie an ein Elektron abgegeben wird.
- $I_{bg} =$ **Impulse der Nulldaten** (auf Meßzeit normiert); die Ursache sind radioaktive Nuklide in der Umgebung z.B. Radon und seine Zerfallsprodukte, K-40, kosmische Strahlung etc. und den Materialien des Detektorsystems selbst. Die Nulldaten (Untergrund) müssen mit einer eigenen Langzeitsmessung (typisch $t_m > 200000$ s) ermittelt werden. Die Messung erfolgt bei leerer und geschlossener Bleiburg und gibt auch Aufschluß auf eine mögliche Detektorcontamination.
- $t =$ **Meßzeit** in s
- $\rho(N) =$ **Emissionswahrscheinlichkeit** für eine bestimmte Photonenenergie eines Nuklids. Sie gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein γ -Quant bestimmter Energie bei einem radioaktiven Zerfall emittiert wird. Sie ist für das jeweilige Nuklid eine charakteristische, tabellierte Konstante [siehe Schötzig U.: Halbwertszeiten und Photonen Emissionswahrscheinlichkeiten von häufig verwendeten Radionukliden, PTB-Bericht, Braunschweig 1993].
- $\epsilon(E) =$ **Ausbeute** in Abhängigkeit von der Energie (Efficiency); sie ist abhängig von der detektierten Photonenenergie und insbesondere von der Probengeometrie. Vom Detektor können aus rein geometrischen Gründen nicht alle Zerfälle registriert werden. Für die jeweilige Probengeometrie ergibt sich ein charakteristischer Verlauf, die sog. Nachweiswahrscheinlichkeitskurve oder auch Ausbeutekurve (vgl. Abb 3). Bei niedrigen Energien überwiegen die Absorptionseffekte, hervorgerufen durch Probenbehälter, Kontaminationsschutz etc. Bei einer Energie von ungefähr 100 keV erreicht die Ausbeute ihr Maximum und fällt dann wegen der begrenzten räumlichen Ausdehnung des Detektors stetig ab. Aber auch aus rein physikalischen Gründen, durch die Abnahme des linearen Schwächungskoeffizienten von Ge mit zunehmender Energie der γ -Quanten, wird die Ausbeute des Detektors geringer. Zu den Standardprobengeometrien zählt man die Marinelli-Becher (1 l Ringschale), Kauteinflasche 50 ml, 70 ml Petridose und die Filter-Döschen. Zur Ermittlung einer Effektivitätskurve werden üblicherweise Nuklidgemische mit bekannter Aktivitätskurve verwendet, die von der obersten Eichbehörde (Physikalisch Technische Bundesanstalt) zertifiziert wurden.
- $m =$ **Probenmasse** in kg
- $\theta^{-1} =$ **Zerfallskorrektur** auf Meßbeginn für Nuklide deren Aktivität während der Meßzeit merklich abnehmen könnte

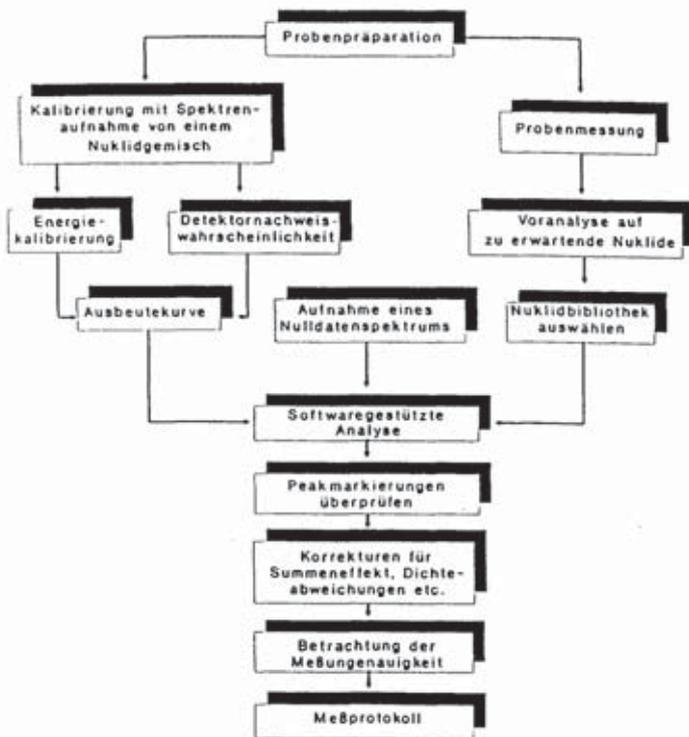


Abb. 2: Ablauf einer γ -spektrometrischen Messung

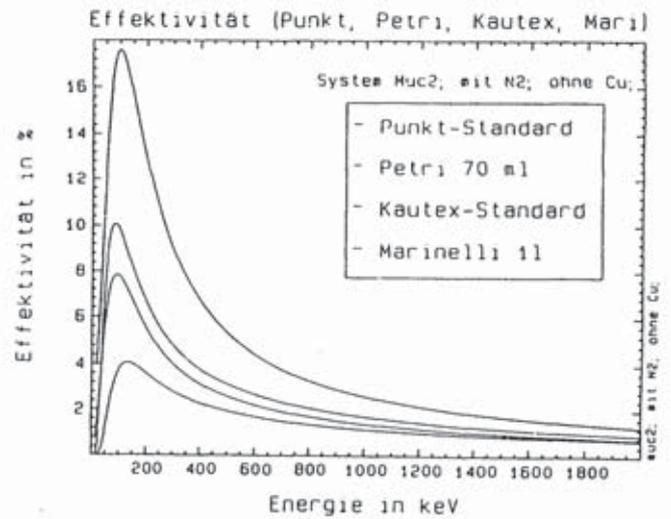


Abb. 3: Ausbeutekurve (Efficiency) des FHM Detektors; die Kurven sind in der Reihenfolge entsprechend der Beschriftung ausgeplottet. Die maximale Effektivität hat der Punktstandard mit fast 18 % Effektivität bei 100 keV; die Effektivität wurde ermittelt mit Radionukliden bekannter Aktivität (von der PTB zertifiziert); der Detektor wurde während der Messung mit Stickstoff gespült; aus ².

3. Interpretation von Gammastrahlenspektren

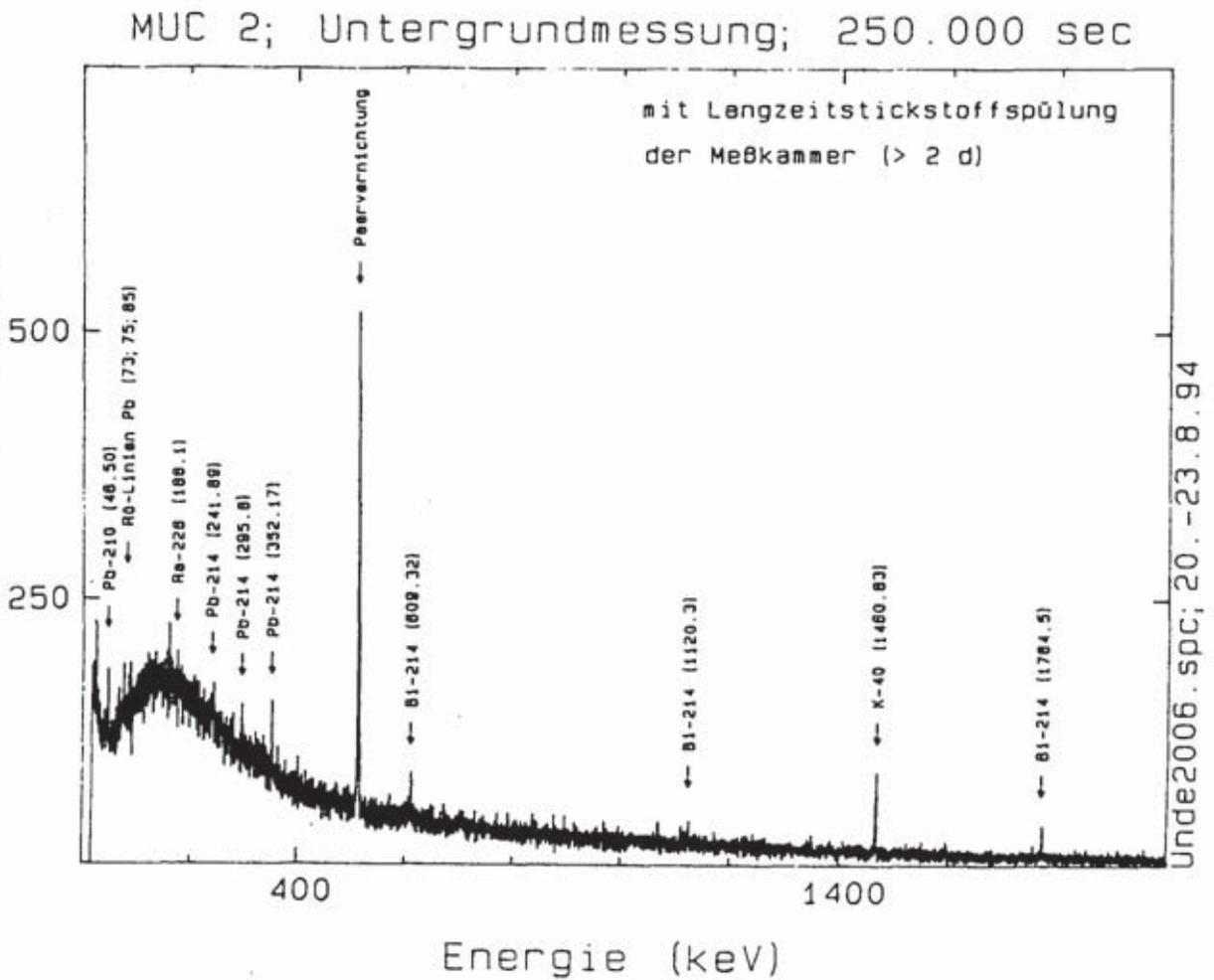
Spektren:

- a: Untergrundspektrum (Nulldaten); Meßzeit 250.000 s
 Meßdatum: 20 - 23.08.94
- b: Kaliumcarbonat in 70 ml Petrigeometrie; Meßzeit 15000 s, m = 80 g
 Natürlicherweise enthält Kalium auch das radioaktive Isotop K-40;
 spez. Aktivität für K-40: 15.000 Bq/kg
 Meßdatum: 21.05.1995
- c: Tee-Probe (Türkei) in 70 ml Petrigeometrie; Meßzeit 15000 s, m = 29,7 g
 Probe von 1989 (Cs-137/Cs-134 Kontaminationen von Tschernobyl-Havare)
 spez. Aktivität für Cs-137: 6000 Bq/kg
 spez. Aktivität für Cs-134: 150 Bq/kg
 Meßdatum: 12.04.95
- d: Cobalt-60, Meßzeit 200 s
 Punktquelle, Beta-Strahler
 Meßdatum: 08.11.95
- e: Europium-152, Meßzeit 200 s
 Punktquelle, Viellinienstrahler
 Meßdatum: 08.11.95
- f: Natrium-22, Meßzeit 200 s
 Punktquelle, Positronenstrahler
 Meßdatum: 08.11.95
- g: Uranmineral, Meßzeit: 200000 s, m = 0,345 g
 Flächquelle, Nuklide aus der Uranreihe
 Meßdatum: 14 - 17.07.95

Literatur

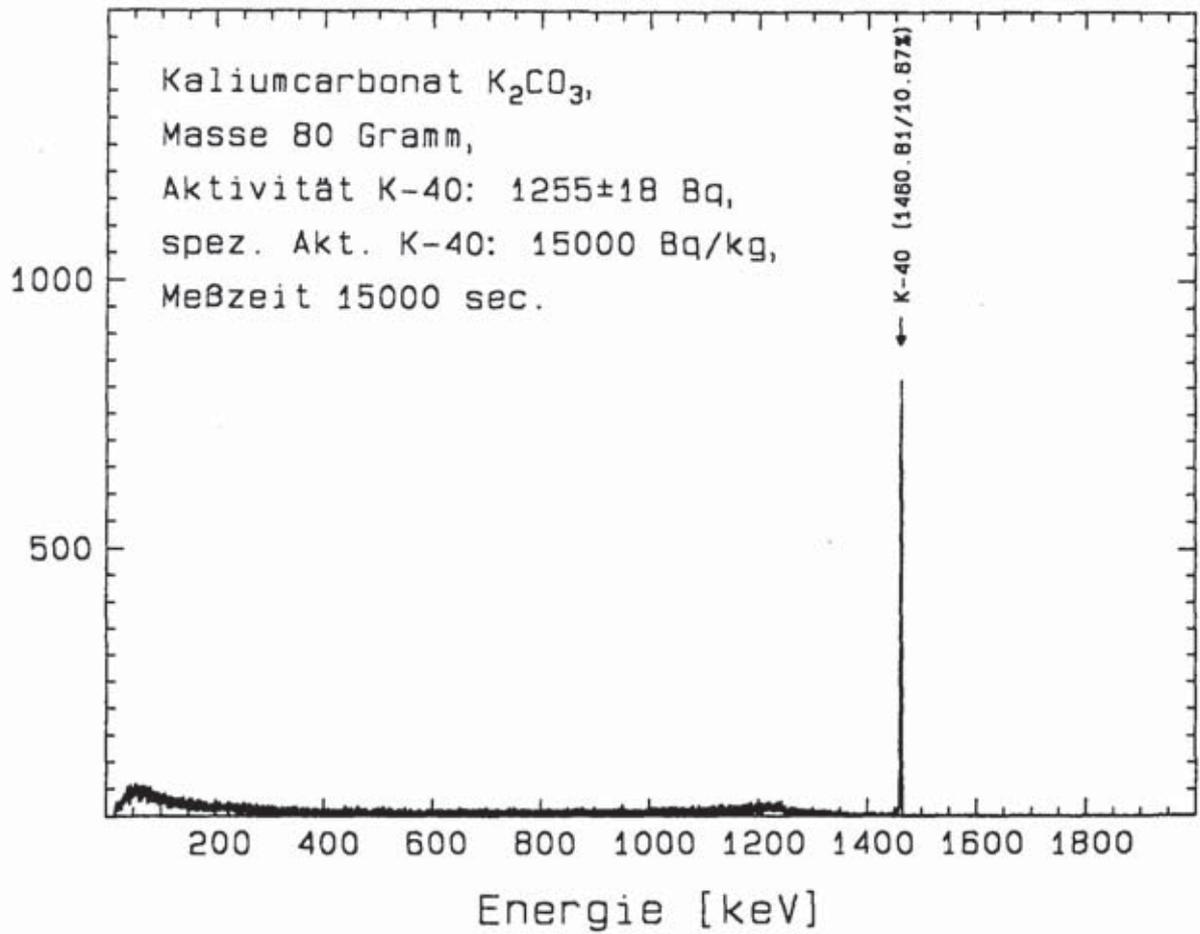
- Derbetin K., R. G. Helmer et al.: Gamma- and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors, Elsevier Sciences Publishers North-Holland, 1988
- Hoßl G.: Beitrag zur Radiometrie der [Rn-222]Radon-Exhalation aus Festkörpern, Diplomarbeit der FH München, Radiometrisches Labor, München 1994
- Knoll G. F.: Radiation Detection and Measurement, John Wiley and Sons, New York 1989
- Maushart, R.: Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt Strahlenschutz-Meßtechnik für Praktiker Teil 3 der Reihe "Man nehme einen Geigerzähler", GFT Verlag Darmstadt, 1989, 235

Zahl der Ereignisse



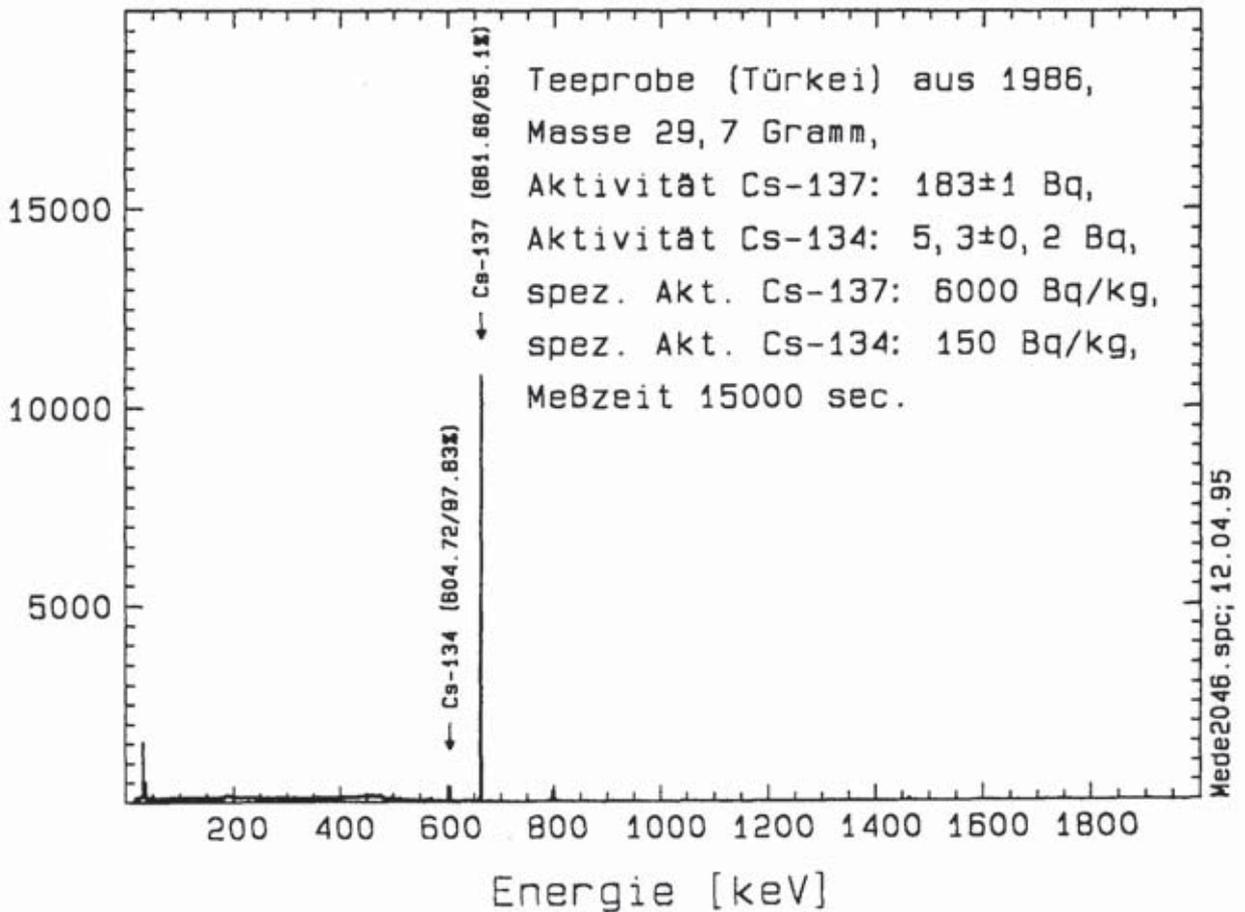
Kaliumcarbonat

Zahl der Ereignisse

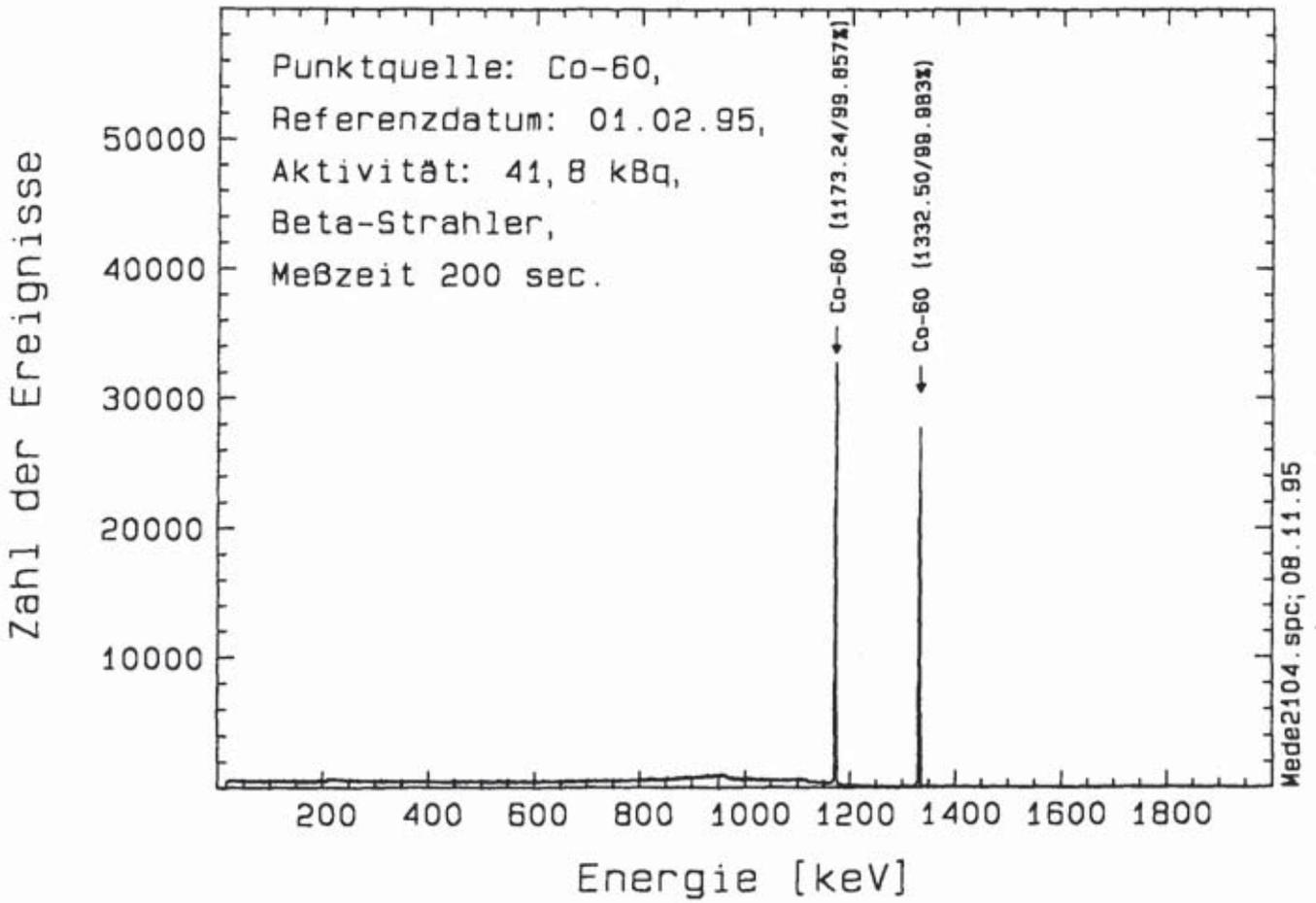


Teeprobe (Türkei)

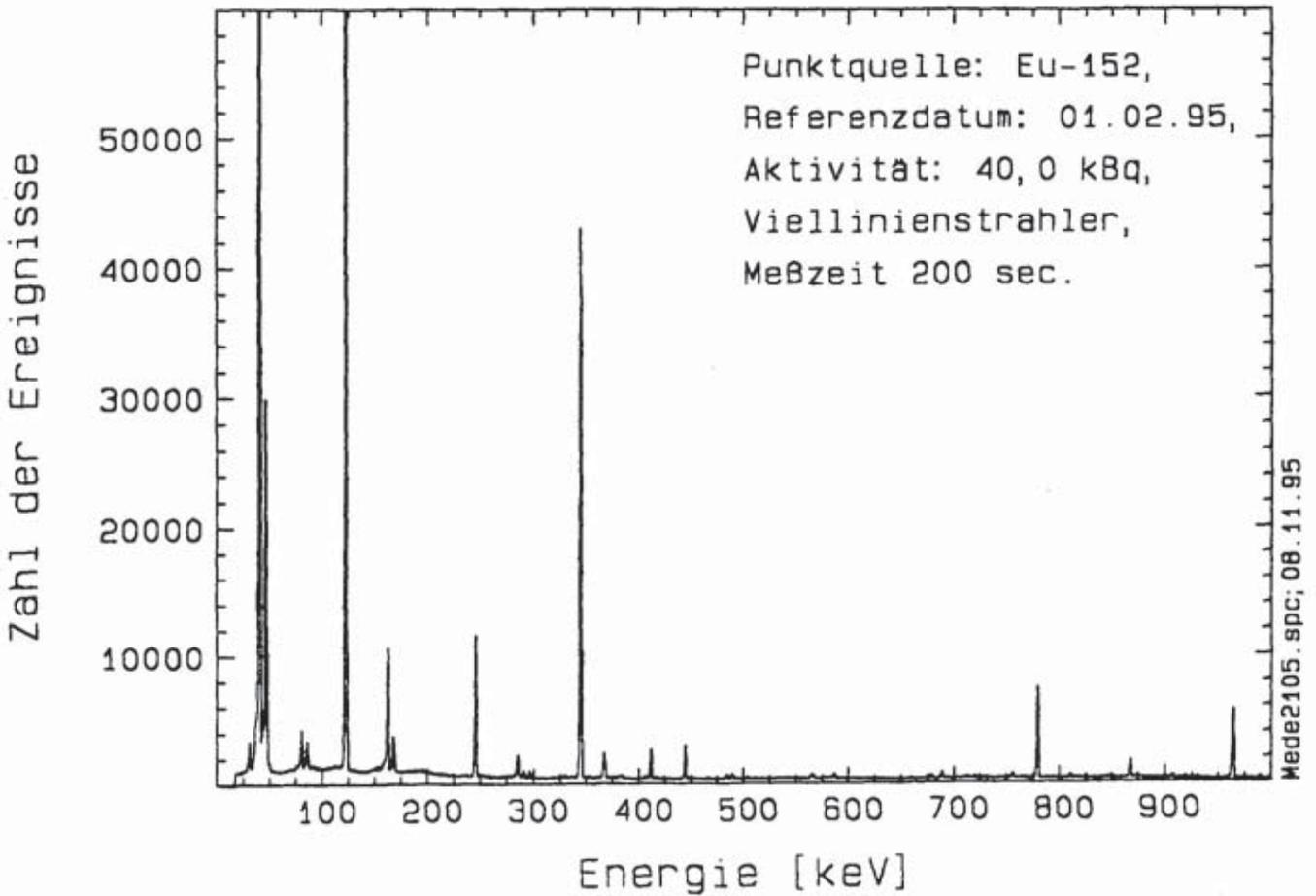
Zahl der Ereignisse



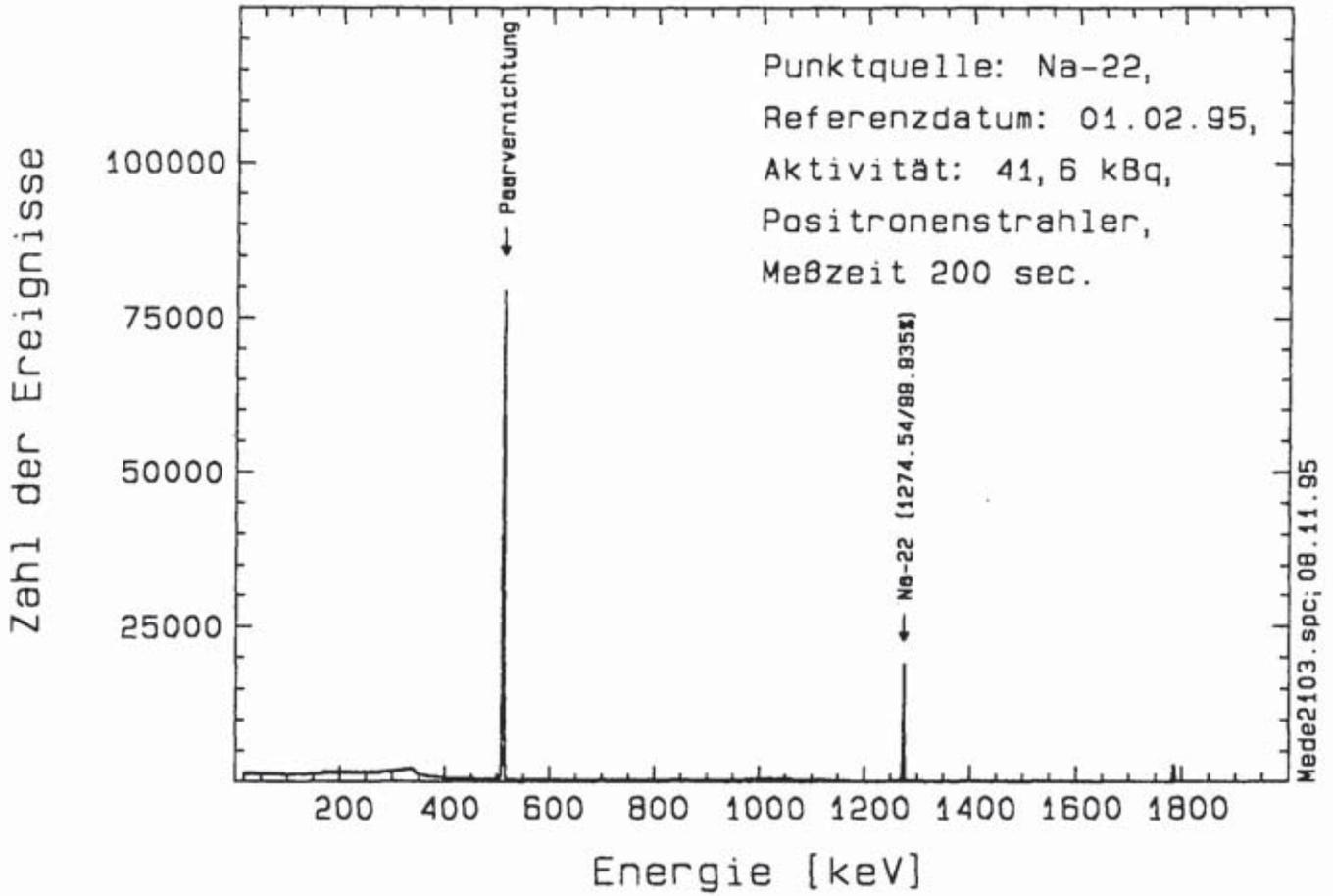
Punktquelle Co-60



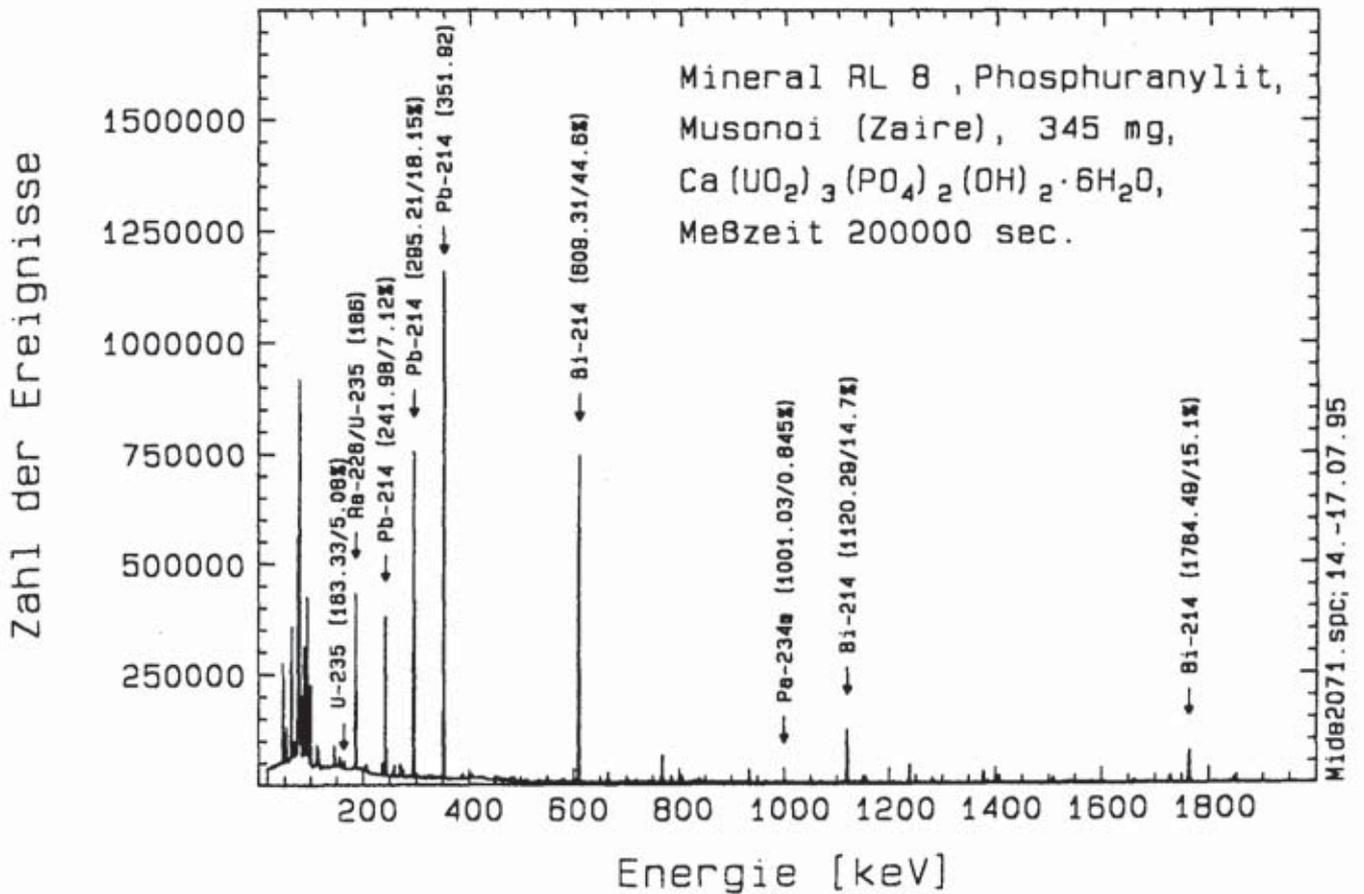
Punktquelle Eu-152



Punktquelle Na-22



Phosphuranylit (Musonoi, Zaire)



Was man heute über Gammaskpektrometrie wissen muss

Gerätetechnische Verbesserungen und rechtliche Veränderungen beeinflussen die Messtechnik

In den letzten Jahren sind auf dem Gebiet der Physik des Nachweises gammastrahlender Nuklide im Bereich der Messung und Auswertung von Spektren deutliche Verbesserungen und auch rechtliche Veränderungen erfolgt. Diese Veränderungen betreffen Nachweis- und Erkennungsgrenzen [1], den Ge-Detektorbau, die Elektronik und den gesamten Softwarebereich [2, 3]. Die neueste Diskussion über Nachweis- und Erkennungsgrenzen beinhaltet zwei wesentliche Aspekte. Wie werden Nachweis- und Erkennungsgrenzen bestimmt oder auch berechnet (DIN 25 482) und wie sind die zu erreichenden Grenzwerte für verschiedene Anwendungen zu erreichen? Nur bei genauer Kenntnis dieser beiden Aspekte ist die Auswahl eines geeigneten Messsystems möglich – Grund genug, sich zwecks messtechnischer Weiterbildung mit dieser Materie zu beschäftigen. Die Schriftleitung dankt dem Autor für seine prägnante und umfassende Darstellung all dessen, was man heute über Gammaskpektrometrie wissen muss.

Detektorauswahl

Genaue Analysen der Messaufgaben erforderlich

Die gesetzliche Herabsetzung der Freigrenzen für Radionuklide stellt eine zunehmende Herausforderung an die Lieferanten nuklearer Messtechnik dar. Prinzipiell geht in jede Formel zur Berechnung der Nachweisgrenze der Kalibrierfaktor (1/Nachweiswahrscheinlichkeit) direkt, der Wert des Untergrunds über die Wurzel und die Auflösung über den Energiebereich, der zur Berechnung des Untergrunds gewählt wird, ein.

Leider ist keine generelle Aussage über einen besten Detektortyp möglich. Für jede Anwendung und jeden Ort kann eine andere Bauart Vorteile bieten. Da-

her sind bei der Planung eines Gammaskpektrometriemessplatzes genaue Analysen der Messaufgaben und der äußeren Bedingungen erforderlich.

n-Type oder p-Type?

In der Vergangenheit kannte man in erster Linie die Unterscheidung zwischen P- und N-type-Detektoren. Bei Messungen oberhalb von 100 keV wählte man den p-type aufgrund des Preises, der besseren Peakform und Auflösung. Für Messungen auch unterhalb von 100 keV oder für Messungen in Neutronenfeldern (Anfälligkeit gegenüber Strahlungsschäden) wählte man den n-type, dessen Eintrittsfenster aus einer dünneren inaktiven Schicht bestand, die aus der Dotierung resultiert.

Neuentwicklungen bei der Dotierung von P-type-Detektoren führten zur Reduzierung der inaktiven Schichtdicken im Eintrittsfensterbereich bei P-type-Detektoren und erlauben nun die Abdeckung des gleichen Energiebereichs. Nur für einige wenige Anwendungen, wie gleichzeitige ^{210}Pb -Messungen mit anderen Nukliden in Marinellibechern oder Messungen in Neutronenfeldern, bietet der N-type-Detektor nach wie vor Vorteile. Ein detaillierter Vergleich zwischen n-type, p-type mit dünnem Eintrittsfenster (extended range) und einem dünnen Großflächendetektor aus P-type-Material mit bis zu 5.000 mm^2 Fläche und einer Dicke von 2, 2,5 oder 3 cm (broad energy detector) erscheint jedoch für jede Anwendung sinnvoll [3].

Reduzierung des Detektor-Untergrunds

Neben der Auswahl eines Kristalls steht die Reduzierung der ungewünschten Zählereignisse, des Untergrunds, im Mittelpunkt. Natürliche Radioaktivität befindet sich überall und führt somit zu Beiträgen im Spektrum. Durch geeignete Auswahl der verwendeten Materialien beim Detektorbau und der Bauform ist eine deutliche Reduzierung möglich. Bei der Abkühlung sammeln sich in den Molekularsieben die Radionuklide des Detektorvolumens. Daher sollten diese sich möglichst weit entfernt vom Kristall befinden und gegebenenfalls noch abgeschirmt werden. Auch der Vorverstärker enthält natürliche Radionuklide und Elemente mit hohem Neutroneneinfangwirkungsquerschnitt. Bei dieser Reaktion werden diskrete Energien erzeugt, die dann auch durch den Detektor gemessen werden können. Der Einsatz von austauschbaren Endkappen mit Vorverstärker und Molekularsieb, die an

verschiedene Kryostaten angekoppelt werden können, ist daher für Anwendungen mit geringen Nachweisgrenzen zu verwerfen. Im Gegensatz hierzu ist eine Vergrößerung des Abstands Kristall zu Vorverstärker und Molekularsieben mit einer Abschirmmöglichkeit wirklich zu empfehlen (abgesetzter Vorverstärker oder remote detector chamber RDC).

Speziell bei Messungen im niedrigen Energiebereich ist eine Diskussion des Endkappenmaterials erforderlich. Verwendbare Al-Legierungen haben einen Anteil von Th- und U-Zerfallsreihen und eine untere Energiegrenze von etwa 30 keV, Elektrolyth-Cu hat keine Eigenaktivität, durch die kosmische Strahlung werden jedoch oberirdisch vor allem Co-Nuklide erzeugt. Die untere Energiegrenze für Cu ist jedoch deutlich höher. Als Eintrittsfenstermaterial steht bei niedrigen Energien Be mit Anteilen von Th- und U-Zerfallsreihen oder Carbon-Epoxy zur Verfügung. Sollte man nicht hauptsächlich bei 5,9 keV messen, ist hier Carbon-Epoxy sowohl von der mechanischen Stabilität als auch von der Eigenaktivität her deutlich vorzuziehen. Bei 5,9 keV (^{55}Fe) ist jedoch die Transmission von Carbon-Epoxy geringer als von Be.

Untergrundreduzierung des Messsystems

Neben dem Detektor selbst ist auch in der Umgebung eines Messplatzes natürliche Radioaktivität in Form von primordialen Nukliden und Spallationsprodukten aus der Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit terrestrischen Atomkernen vorhanden. Zusätzlich kommen hochenergetische Teilchen als Sekundärteilchen bei der Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit der oberen Erdatmosphäre als so genannte Schauer in den Detektor und erzeugen dort Ladungsträger, also Impulse.

In den Wänden eines Messraumes befinden sich üblicherweise ^{40}K und die Uranzerfallsreihen, teilweise jedoch auch ^7Be , ^{60}Co und weitere

Spallationsprodukte. Auch reine Beta-Emitter tragen durch die resultierende Brems- und Röntgenstrahlung zum Untergrund bei.

Bei der Reduzierung des Untergrunds ist eine Unterscheidung zwischen externer Bestrahlung des Messplatzes und aerosolgebundener oder gasförmiger Radioaktivität hilfreich, da eine externe Bestrahlung aufgrund des Zerfalls natürlicher oder künstlicher Radionuklide aus der Umgebung durch eine passive Abschirmung aus aktivitätsärmem Blei mit einer Dicke von 10–15 cm für viele Anwendungen ausreichend gut abgeschirmt werden kann, da die Energien generell unterhalb von 3 MeV liegen.

Einfluss von Radon

Dagegen können Radonfolgeprodukte oder aerosolgebundene Radioaktivität in die Messkammer gelangen. Zur Vermeidung dieser Komponenten wählen viele Anwender eine Spülvorrichtung mit Stickstoff, damit sich aufgrund des Gasstroms keine Aerosole und kein Radon in der Messkammer ablagern können.

Zudem kann bei der Planung eines Messlabors das Eindringen von Radon aus dem Erdreich durch Ableitungen verhindert und die Luftzirkulation so gestaltet werden, dass Radonkonzentrationen minimiert werden.

Hochenergetische Teilchenstrahlung

Als weiteres Problem erweist sich die hochenergetische Teilchenstrahlung, die beim Einfall der kosmischen Strahlung auf die Erde als Sekundärkomponente erzeugt wird. Eine primäre Wechselwirkung findet in der Atmosphäre statt und erzeugt in Kernreaktionen eine Vielzahl geladener und ungeladener Teilchen mit hohen Energien. Diese werden als Schauer bezeichnet und einige der Teilchen können bis zu dem Detektor gelangen und die Energie im Detektor deponieren. Der resultierende Impuls ist ausgesprochen hoch und ist im Spektrum nicht sichtbar. Die Störungen an der Elektronik sind jedoch so hoch, dass Impulse als Folge

dieser Wechselwirkung im Spektrum auflaufen. Diese Effekte lassen sich sowohl durch eine aktive Abschirmung als auch durch eine Modifikation am Verstärker reduzieren. Bei der Auswahl einer aktiven Abschirmung (Plastik- oder Flüssigszintillatoren) ist eine geringe Eigenaktivität zu fordern, damit keine Beiträge im Spektrum auflaufen (Installation um eine passive Abschirmung) und die Totzeit bei der Antikoinzidenzschaltung nicht zu hoch wird. Die Reduktion im Verstärker resultiert aus der Analyse eines sehr hohen Impulses, der nur von einem hochenergetischen geladenen Teilchen stammen kann und der zur kurzzeitigen Abschaltung der Elektronik führt.

Für verschiedene Anwendungen erscheint jedoch auch der Aufbau eines Gammaspektrometriemessplatzes in unterirdischen Anlagen sinnvoll. Hier gibt es beispielsweise Stollen aus dem Salzbergbau, wo reine NaCl-Stollen zur Verfügung stehen [4], wo keine Einträge von Radonfolgeprodukten oder ^{40}K erfolgen und die kosmische Strahlung durch die massive Gesteinschicht abgeschirmt wird.

Elektronikauswahl

Rechner und Software

Zur Anfangszeit der Spektrometrie war die Rechnertechnik gar nicht vorhanden oder nur für Berechnungen geeignet. Ein Spektrum wurde aufgenommen und per Hand wurden die Nettopeakflächen berechnet, teilweise wurden die Spektren auch geplottet, die Peaks ausgeschnitten und die Nettopeakflächen durch Wiegen bestimmt.

Heute ist für viele Anwender Spektrometrie ohne Rechner nicht mehr denkbar. Der PC wird zur Steuerung der Messung, zur Eingabe aller relevanten Daten, zur Auswertung mit einem komplexen Programm zur Peakentfaltung und zur Verarbeitung der Ergebnisse in Laborinformationssystemen eingesetzt. Verschiedene Messaufgaben sind automatisiert und lau-

fen nach Kriterien der Qualitätssicherung ab.

Schnittstellen

Für die erforderliche Ankopplung der Rechner an die Spektrometriehardware werden die üblichen Schnittstellen genutzt. So werden für verschiedene Anwendungen Karten auf ISA- oder PCI-Basis eingesetzt. Diese Karten verwenden die Stromversorgung des PCs und unterliegen so auch den Schwankungen, die von Lüftern oder den hohen Belastungen durch hohe Taktfrequenzen der Prozessoren erzeugt werden. In diesem Fall ist auch Vorsorge gegen elektromagnetische Einstrahlungen innerhalb der Rechner zu treffen. Bei der Verwendung von ISA-Bus-Karten ist auch die störende Plug&Pray-Eigenschaft von neuen Rechnern und Betriebssystemen zu bedenken, die entweder die Karten verkennen oder bei denen gar keine ISA-Steckplätze mehr vorhanden sind.

Eine zukunftssichere Lösung ist die Kopplung über Ethernet, USB, serielle Schnittstelle oder IEEE, für die jeweils eine lange Unterstützung existieren wird. Zudem sind die Spektrometriekomponenten nicht mehr abhängig von der Funktion des PCs. Die Auswahl der Schnittstelle hängt dann von der Anwendung, dem Preis und dem Komfort bei der Bedienung des Rechners ab. Keine der Schnittstellen erreicht die Geschwindigkeit des Datentransfers von Einsteckkarten, jedoch sind alle für die meisten Spektrometrie-Anwendungen ausreichend.

Impulsverarbeitung

Das wesentliche Auswahlkriterium für die Elektronik sollten jedoch die Spezifikationen sein. Hierzu zählen die zu erreichenden Auflösungen bei verschiedenen Impulsverarbeitungszeiten und Durchsatzraten, die Langzeit- und die Temperaturstabilität. Zusätzlich kann ein modularer Aufbau oder auch ein Kompaktgerät für die jeweilige Anwendung Vorteile bieten. Der hauptsächlichste Unterschied bei

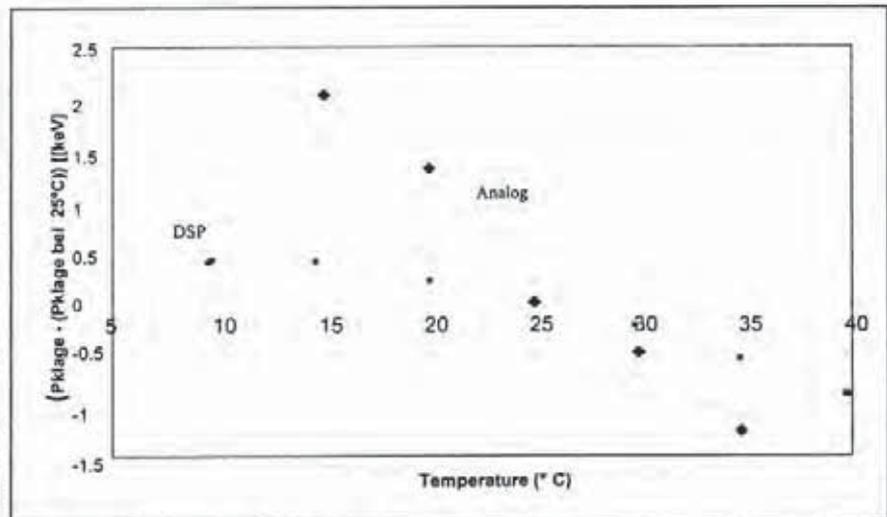


Abb. 1: Differentielle Peaklage [keV] als Funktion der Temperatur

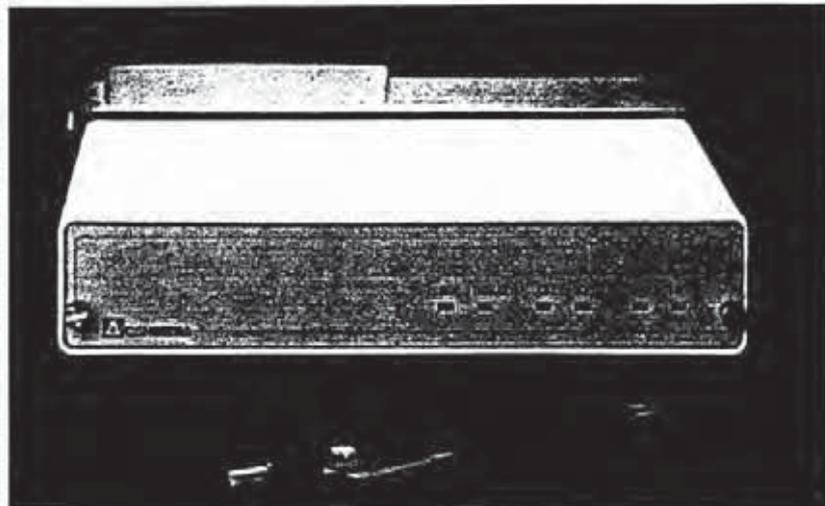


Abb. 2: Inspector 2000 im Größenvergleich mit einem Bleistift

der derzeit erhältlichen Technik besteht in der Impulsverarbeitung. Während bei Analogtechnik die auflaufenden Impulse vom Hauptverstärker durch eine Anzahl analoger Differentiations- und Integrationsstufen verarbeitet wird und dann an den ADC übergeben werden, werden beim digitalen Signalprozessor die Impulse digitalisiert und dann durch digitale Filter analysiert. Die analogen Filter sind Schaltkreise, die temperaturabhängige Komponenten enthalten. Diese Komponenten erklären die Verschlechterung der Auflösung oder die Verschiebung der Energielage bei Temperaturänderungen. Solche Komponenten sind in Elektronikketten mit Digita-

len Signal Prozessoren (DSP) minimiert, wodurch die exzellente Temperaturstabilität zu erklären ist, die auch in Abb. 1 zu sehen ist.

Ein weiterer Vorteil der digitalen Technik findet sich speziell bei einem kompakten Elektronikmodul von Canberra-Eurisys, dem Inspector2000, wo aufgrund der Temperaturstabilität und des geringen Stromverbrauchs ein sehr kompaktes Elektronikmodul entstanden ist, das sowohl für den portablen Einsatz als auch für den Laborbedarf geeignet ist. Hier kann man mit nur einem Standard Camcorder Accumulator einen Zeitraum von 10 bis 12 Stunden messen. Das Gerät hat zudem eine so geringe Größe, dass es

direkt am Detektor montiert werden kann. Abb. 2 zeigt ein solches Elektronikmodul im Größenvergleich mit einem Bleistift.

Durch die Flexibilität der Einstellung eines DSP kann die Einstellung für jeden Detektor und jede Anwendung deutlich besser optimiert werden. Dies führt zu verbesserten Werten für die Auflösung und deutlich höheren Durchsatzraten. Während bei einer Einstellung von 4 μs die Impulsverarbeitungszeit etwa 25 μs beträgt, erreicht man eine entsprechende Auflösung bei 5,6 μs rise time und fall time und einem flat top von 0,8 μs , also einer Impulsverarbeitungszeit von 12 μs , so dass die Totzeit auf weniger als 50% reduziert ist. Der Impuls wird hierbei als Trapezoid dargestellt, wobei rise time und fall time identisch sind.

Überrahmen

Auf einen weitergehenden Vergleich von Hochspannungen und MCAs möchte ich hier verzichten, da dieser einen direkten Vergleich bestimmter Module bedeuten würde. Ein Wort über NIM-Überrahmen scheint jedoch erforderlich, da viele im Einsatz befindliche Überrahmen ein gewisses Alter erreicht haben und dadurch zu deutlichen Problemen bei den Messketten führen können. Kurzzeitige Schwankungen in den Spannungen können die Auflösung deutlich verschlechtern, und im Fall von Aussetzern bei der Vorverstärkerspannungsversorgung ist sogar ein schwerer Schaden für den Detektor möglich. Daher empfiehlt sich eine regelmäßige Überprüfung mit geeigneten Mitteln, die vielleicht auch in Form einer regelmäßigen Überprüfung der gesamten Messkette erfolgen könnte.

Spektrometrie-Software

Moderne Software wird nach Kriterien der Qualitätssicherung hergestellt. Sie ermöglicht aber auch die Abspeicherung aller Parameter, die für die Messung, die Auswertung und die Analyse relevant sind, und kann diese Para-

meter an Qualitätssicherungssysteme und Datenbanken übergeben. Hierzu gehören beispielsweise auch die Einstellungen der ansteuerbaren Hardwarekomponenten, wobei die eingestellten Werte regelmäßig mit den aktuellen Werten verglichen werden und Diskrepanzen sofort gemeldet und dokumentiert werden.

Für die Steuerung der Messung ist im günstigsten Fall eine Batch- oder Macrostruktur sinnvoll, wenn die zu messenden Proben einheitlich sind und nicht für jeden Fall eine neue Energie- oder Effizienzkalibrierung erforderlich wird. Der Vorteil liegt dann in der Minimierung der Eingabeparameter, so dass die Möglichkeit einer Fehleingabe oder einer fehlenden Eingabe minimiert wird. Einige erforderliche Parameter können jedoch auch über PC-auslesbare Waagen oder Datenbankssysteme mit Barcodeleser übergeben werden.

Bei einer solchen Vorgehensweise werden generell die gleichen Auswertelgorithmen verwendet, was aus der Sicht der Statistik anzuraten ist. Eine Voraussetzung für die korrekte Auswertung liegt dann in der richtigen Anpassung der einstellbaren Parameter der Algorithmen, aber auch in den Algorithmen selbst. Hinderlich sind jedoch einige physikalische Effekte, wie Dichte-, Matrix- und Koinzidenzeffekte, die jeweils berücksichtigt werden müssen, wenn eine Abweichung vom verwendeten Standardpräparat auftritt. Zudem kann eine Auswahl der falschen Nuklide für eine Nuklidbibliothek zu deutlich falschen Ergebnissen führen.

Obwohl Gammaspektrometrie mit Hilfe von kommerziell verfügbaren Spektrometriepaketen auf den ersten Blick einfach erscheint, hängt die Qualität der Ergebnisse in erster Linie von der Ausbildung und den Kenntnissen des Bedieners oder des Verantwortlichen ab. Die modernen Spektrometrieprogramme sind hierbei als Hilfsmittel zu betrachten, die aufgrund der

Batchmöglichkeiten eine enorme Zeiterparnis gegenüber einer manuellen Auswertung bedeuten. Zusätzlich beinhalten sie aber auch Unterprogramme zur Berücksichtigung der oben angesprochenen Effekte.

Programmsystem zur Berechnung von Effizienzfunktionen

Canberra-Eurisys entwickelte auf der Basis der genauen Kenntnis des Detektoraufbaus, der aktiven und inaktiven Schichten des Kristalls ein Programmsystem zur Berechnung von Effizienzfunktionen auf der Basis von Monte-Carlo-Methoden. Dieses Programm mit Namen ISOCS/LABSOCS hat eine Anzahl von Schablonen zur Beschreibung der Geometrie, deren Dimensionen an die jeweilige Messgeometrie angepasst werden können. Weitere Eingabeparameter sind die Dichte und die chemische Zusammensetzung der Materialien, die nach dem heutigen Kenntnisstand berücksichtigt werden. Demnach sind bei einer solchen mathematischen Bestimmung der Effizienzfunktion auch Dichte- und Matrixeffekte berücksichtigt.

Korrektur von wahren Koinzidenzeffekten

Auf der Basis dieser Berechnungen ist auch eine Korrektur von wahren Koinzidenzeffekten möglich [2].

Hierzu ist zunächst eine Kalibrierung des energieabhängigen Verhältnisses der Einträge im Peak bei der spezifischen Energie eines monoenergetisch emittierenden Nuklids zu den Einträgen in Spektren, die durch das Vorhandensein des Radionuklids hervorgerufen werden (Peak zu Totaler Effizienz-Kalibrierung). In der zweiten Stufe findet dann eine Berechnung auf der Basis von LABSOCS statt. Hierbei wird bei ausgedehnten Proben die Berechnung für jedes Volumenelement durchgeführt und die Ergebnisse der Einzelberechnungen werden integriert. Eine Berücksichtigung der Streuung in der Probe erfolgt semiempirisch.

Von Bedeutung ist diese Koinzidenz-korrektur sowohl für die Angabe der



Erkennungs- und Nachweisgrenzen als auch bei einer Nuklididentifikation mit Interferenzkorrektur, bei der für alle Linien nach Radionukliden innerhalb der Nuklidbibliothek geschaut wird, die Beiträge liefern. Auf dieser Basis wird für alle betroffenen Radionuklide ein Gleichungssystem aufgebaut, das eine genaue Analyse der Linienaktivitäten durchführt. Ist eine Linie durch Koinzidenzeffekte gestört, werden Freiheitsgrade erzeugt, die zu einer fehlerhaften Interpretation der Nuklide und Aktivitäten des Spektrums führen können.

Fazit

In den letzten Jahren sind entscheidende Entwicklungen sowohl von der Wissenschaft als auch von der Industrie unternommen wurden, gamma-spektrometrische Untersuchungen

sensitiver und genauer zu machen. Leider sind diese Verbesserungen mit der Einführung freier Parameter verbunden, die bei der Auswertung eines Spektrums eingestellt werden müssen. Für die Einstellung der erforderlichen Parameter ist eine Kenntnis der Auswirkung der Parameter und der Physik erforderlich, wie sie auch für die Interpretation der Ergebnisse notwendig ist. Daher sind die Ausbildung und Schulung der betroffenen Mitarbeiter wesentliche Aspekte für die Sicherstellung der Qualität der Ergebnisse. Ohne die erworbenen Kenntnisse sind Fehlinterpretationen oder Fehlanalysen zu erwarten, die über die anschließende Diskussion hohe Kosten erzeugen können.

Hans-Jürgen Lange, Mainz

E-Mail:

jlange@canberraerisys.com □

LITERATUR

- [1] Weise, K.: Bayesian-statistical decision threshold, detection limit and confidence interval in nuclear radiation measurement. *Kerntechnik* 63, 1998, 214–224.
- [2] Kolotov, V. P./Koskela, M. J.: Testing of Different True Coincidence Correction Approaches for Gamma-Ray Spectrometry of Voluminous Sources. Log. No. 97-62, Proceedings of MARC IV, Kailua-Kona, Hawaii, April, 6–11, 1997.
- [3] Lange, H.-J.: Optimierung des Nachweises natürlicher Radionuklide mittels Gammaskpektrometrie. 11. Fachgespräch Überwachung der Umweltradioaktivität vom Bundesamt für Strahlenschutz und dem Institut für angewandten Strahlenschutz Berlin, Schlemka 28.–29. März 2000.
- [4] Neumaier, S./Arnold, D./Böhm, J./Funck, E.: The PTB underground laboratory for dosimetry and spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes* 53, 2000, 173–178.

Durchbruch bei der elektrischen Kühlung von Germaniumdetektoren

Germaniumdetektoren für die hochauflösende Gammaskopie müssen bei sehr niedrigen Temperaturen von ca. -180 °C betrieben werden. Zur Kühlung wird üblicherweise flüssiger Stickstoff verwendet. Damit sind jedoch für den Anwender nicht nur Kosten für Anlieferung, Lagerung und eventuelle Schäden, sondern auch Gefahren und Verletzungspotenzial verbunden.

Bemühungen zur elektrischen Kühlung eines Germaniumdetektors reichen schon bis ins Jahr 1985 zurück. Aber alle bisher verwendeten konventionellen Kühlaggregate erwiesen sich für diesen Zweck als nicht ideal. Ein hoher Geräuschpegel und Vibrationen können bei Germaniumdetektoren wegen ihrer Mikrofonieempfindlichkeit eine Auflösungsver schlechterung bewirken.

Die ölgeschmierten und mechanisch bewegten Teile im Kompressor führen trotz aller Bemühungen, wie dem Einbau von Filtern, immer wieder zu Verunreinigungen des Kühlgases durch Abriebpartikel und Öldunst. Sie frieren im Bereich des Kaltkopfes fest und führen zum sogenannten „Clogging“, also zu einer Verstopfung der feinen Expansionsdüsen. Auch die langen Flexlines zwischen Kompressor und Kaltkopf können eine Fehlerquelle und der Grund für Undichtigkeiten sein.

Der Betrieb der bisherigen elektrischen Kühlung von Germaniumdetektoren gestaltet sich nach unseren Erfahrungen deshalb recht wartungsintensiv.

Erst die neueste Generation von wartungsfrei arbeitenden Kühlaggregaten verspricht einen problemlosen Langzeiteinsatz.

Phasen der Entwicklung

Die Geschichte der Pulse Tube begann 1963. Prof. Gifford und sein Student Longworth an der Syracuse University entdeckten, dass ein geschlossenes Rohr an einem Kompressor am anderen Ende erwärmt wurde. Optimierte man dieses einfache Konzept mit einem sogenannten Regenerator (einem Wärmetauscher, der die Effektivität von Wärmemaschinen erhöht) an einer Seite und einem Reservoir an der anderen und baut darin eine stehende Gaswelle auf, erhält man ein kaltes und ein heißes Ende; man betreibt also eine Wärmepumpe. Zunächst war die Effektivität dieser Kühlung nicht sehr groß und die Pulse Tube galt bis Ende der 60er-Jahre noch als physikalisches Kuriosum. Erst mit der Entwicklung der „Orifice“-Pulse Tube (Mikulin, 1983) wurde sie zu einer effektiven Kühlmaschine. Geeignete Hohlräume, die „Capacitance“ und die „Inertance“, optimierten die Schwingung in der Pulse Tube, analog der Kapazität und Induktivität eines elektrischen Schwingkreises (Abb. 1).

Die wichtigste Komponente: Der Kompressor

Für einen problemlosen Betrieb mit einem Germaniumdetektor ist zusätzlich der Kompressor von großer Wichtigkeit. Beim Cryo Pulse besteht er

**Bewegungs-
momente
kompensieren
sich**

Das Kühlkonzept der Pulse Tube (Cryo Pulse)

Das interessanteste Kühlkonzept ist die Pulse Tube (Cryo Pulse). Sie arbeitet ähnlich wie ein Sterlingkühler, nur dass im Kaltbereich kein beweglicher mechanischer Kolben zur Expansion genutzt wird, sondern lediglich eine stehende Druckwelle aufgebaut ist. Statt eines festen Kolbens schwingt quasi ein Kolben aus Gas, d. h. der Kaltkopf funktioniert völlig ohne mechanische Teile und damit vibrationsfrei (Abb. 1).

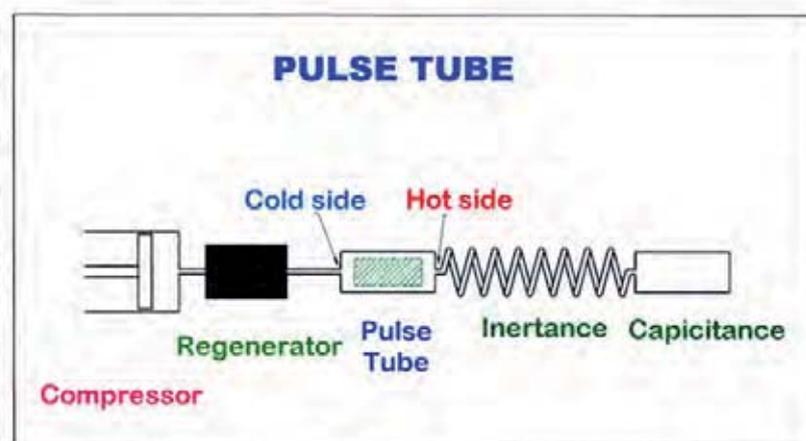


Abb. 1: Prinzip eines Pulse-Tube-Kühlers

aus zwei gegeneinander schwingenden Kolben, die an Federscheiben verankert sind und ohne Berührung der Zylinderwände über magnetische Felder angetrieben werden. Eine dünne Gasschicht trennt die beweglichen Teile voneinander, sodass ein ölfreier Betrieb ermöglicht wird. Der Kompressor arbeitet verschleißfrei und fast ohne Vibrationen, denn alle Bewegungsmomente kompensieren sich gegenseitig. Im Innenraum befinden sich keine Dichtungen, Plastikteile oder andere Materialien, die zum Ausdampfen und damit zum Verschmutzen des Arbeitsgases führen könnten. Ebenso gibt es keinerlei mechanische Durchführungen. Die Kolben werden über Magnete berührungsfrei in Schwingung versetzt. Der Innenraum vom Kompressor bis zum Kaltkopf ist komplett metallisch von der

Außenwelt versiegelt. Als Arbeitsgas dient reines Helium, das unproblematischste Material für diesen Zweck.

Leistungsmerkmale des CP-5

Diese CP-5 genannte Kühlmaschine ist einsetzbar für fast alle üblichen Germaniumdetektoren. Ihre reine Kühlleistung von 5 Watt entspricht etwa dem Verdampfen von 2 l flüssigem Stickstoff. Die benötigte elektrische Leistung ist sehr gering mit ca. 100 W im Dauerbetrieb und maximal 250 W während des Herunterkühlens. Der Lauf ist nahezu vibrationsfrei und geräuschlos. In der Tat stellt der Lüfter den Hauptanteil am Laufgeräusch. Mit dieser neuen Kühltechnik lassen sich die gleichen guten Spezifikationen erfüllen wie mit stickstoffgekühlten Detektoren. Die Bauweise des CP-5 erlaubt den Betrieb uneingeschränkt

in allen Raumrichtungen, während andere Kühlmaschinen oft nur in einer Orientierung funktionieren und lange ruhen müssen, wenn sie bewegt worden sind. Auch verlängerte Kryostate und Ausführungen mit abgesetzten Vorverstärkern können hergestellt werden. Damit sind sie für Low-Level-Detektoren und viele anderen Spezial-einsätze geeignet. Eine große Anzahl dieser Kühlaggregate läuft bereits seit Jahren ohne Beanstandungen und verspricht eine sehr hohe Zuverlässigkeit und Langlebigkeit bei völliger Wartungsfreiheit. Schließlich stammen viele Komponenten aus erprobten Militäranwendungen.

Das Kühlkonzept bei mobilen Detektoren

Eine weitere Verbesserung der Technologie beim Bau von elektrisch gekühl-



Abb. 2: Falcon 5000

ten Detektoren fand bei der Entwicklung des CP-1 beim Falcon 5000 statt (Abb. 2).

Um das neue Kühlkonzept für einen mobilen batteriebetriebenen Detektor zu nutzen, wurde eine Pulse Tube mit verringerter Kühlleistung entwickelt. Sie wird vorerst nur für eine einzige Kristallgeometrie genutzt, die ideal für In-Situ-Anwendungen ist. Ein planares Detektorelement mit einem Durchmesser von 60 mm und einer Dicke von 30 mm besitzt eine relative Effizienz von 20% bei 1,3 MeV und ist optimiert für die Messung von In-Situ-Geometrien im niedrigeren und mittleren Energiebereich. Bei der Energieauflösung müssen keine Kompromisse gemacht werden: Die Peakbreite bei 1,3 MeV bleibt unter 2,0 keV und im

niederenergetischen Bereich erreicht man eine Auflösung von besser als 1 keV bei 122 keV.

Beim CP-1 ist der Kristall im Ultrahochvakuum eingebaut ohne die sonst übliche Nut-

zung von Molekularsieben. Das hat den großen Vorteil, dass man keine kompletten Aufwärmzyklen einhalten muss. Ein Detektor kann jederzeit während des Aufwärmens wieder heruntergekühlt werden, ohne dass vorher eine komplette Erwärmung auf Raumtemperatur abgewartet werden

muss, eine große Zeitersparnis bei unerwarteten Messeinsätzen. Auch die Abkühlzeiten sind konkurrenzlos. Bereits zweieinhalb bis drei Stunden nach dem Einschalten bei Umgebungstemperatur ist der Detektor kalt und betriebsbereit. Dieser Abkühlvorgang kann sogar mit eigener Batterieleistung erfolgen, d. h. der Detektor kann schon mobil auf dem Weg zu seinem Einsatzort heruntergekühlt werden.

Ein ganz anderes neues Detektorkühlkonzept wird beim Cryo-Cycle verwirklicht, einer hybriden Bauform aus stickstoffgekühltem Detektor und elektrischer Kühlung.

Ein Dipstick Kryostat in einem 22-l-Dewar mit flüssigem Stickstoff hat oberhalb des Dewars einen Stirlingkühler eingebaut, der das verdampfende Gas wieder verflüssigt. Auch hier kommt ein langlebiger, tausendfach erprobter Kühlmechanismus mit geringem Wartungsaufwand zum Einsatz.

Praktischer Einsatz der Kühlkonzepte

Beide Kühlkonzepte sind erfolgreich auf dem Markt eingeführt. Speziell in Deutschland gibt es bei vielen Betreibern von Gammalabors den Trend, auf die Verwendung von flüssigem Stickstoff ganz zu verzichten. Dort hat sich der CP-5 sehr erfolgreich durchgesetzt. Als mobiles System mit Batteriebetrieb erfüllt der Falcon 5000 mit dem CP-1 alle Erwartungen.

Der Cryo-Cycle hingegen findet seine idealen Einsatzbedingungen dort, wo man auch bei längerem Ausfall der Elektrizität den Detektor kalt halten möchte. Der dabei verbrauchte Stickstoff kann wie bei einem anderen Detektor als Flüssigkeit nachgefüllt oder sogar durch zusätzliches Einspeisen von gasförmigem Stickstoff aufgefüllt werden. Die Steuerung der Stickstoffverflüssigung wird dabei nicht durch den Pegelstand, sondern mit dem Innendruck geregelt. Einige Nachteile des Umgangs mit flüssigem Stickstoff reduzieren sich damit, da manuelle Nachfüllvorgänge die Ausnahme sind. Der Cryo-Cycle wird z. B. in Frankreich von der EDF als Referenzsystem angesehen.

Der Trend, ganz vom flüssigen Stickstoff wegzukommen, bekommt Nahrung durch weitere Verschärfungen der Sicherheitsvorkehrungen, wie sie schon in vielen Ländern praktiziert werden, wie Verdoppelung des Bedienpersonals beim Handling oder kostenintensive bauliche Maßnahmen an Orten, wo flüssiger Stickstoff gelagert werden muss.

Mit den neuen zuverlässigen Kühltechniken könnte der elektrisch gekühlte Germaniumdetektor in den nächsten Jahren zum Standarddetektor in Gammalabors werden.

Günther Wagner □

Trend weg vom flüssigen Stickstoff

Konkurrenzlose Abkühlzeiten

18th to 23rd of April 2010 in Marianske Lazne, Czech Republic

RadChem 2010 – The 16th Radiochemical Conference

Similarly to the previous conferences, the scope of RadChem 2010 will cover most aspects of nuclear- and radiochemistry. Please check the conference web site (www.radchem.cz) for the details, preliminary registration and abstract submission.

Schriftleitung nach einer Mitteilung des RadChem-Organisationsteams

Begleitunterlagen: Großes Radiometrisches Praktikum HM

h: Radionuklidgenerator

Prof. Dr. Schwankner
Türkenstraße 78
80799 München
Lab.: 089/1265-2608
Büro.: 089/1265-2667
priv.: 089/33019260

Electrostatic Radionuclide Separation

A New Version of Rutherford's "Thorium Cow"

Marcus Eiswirth, Robert Schwankner, Fritz Weigel,¹ and Victor Wishevsky

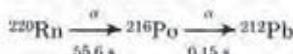
Radiochemistry Laboratory, Institute of Inorganic Chemistry, University of Munich, Meiserstrasse 1, D-8000 Munich 2

As early as 1900, E. Rutherford (1) reported on the discovery of a gaseous α -radioactive substance emanating from thorium compounds. In a second paper in the same journal (2) he described a simple device to concentrate the daughter products by precipitation on a charged electrode [Fig. 1].

This device, which was later called "thorium cow," may be used in a number of instructive experiments in the undergraduate laboratory. These experiments, which will be described hereafter, produce results which are of practical and theoretical value in undergraduate instruction. They may also be used in lecture demonstrations.

Experiment 1

Successive α -decay of the partial chain



Part of the Th ($4n$) decay series relevant to this work is given in Figure 2.

${}^{220}\text{Rn}$ decays with a half-life of 55.6 s to ${}^{216}\text{Po}$. This in turn decays with a half-life of 0.15 s to ${}^{212}\text{Pb}$. If therefore a carrier-gas containing ${}^{220}\text{Rn}$ is introduced into a cloud chamber these two decay events show up as two α -tracks, forming a "V."

Procedure

Approximately 500 mg ThO_2 (see below) is placed into a small glass tube (ID 4–5 mm, 5 cm long) and kept in place by means of two cotton or glass wool wads. One end of the glass tube is connected to a rubber hose which leads into the sensitive region of a continuous cloud chamber. The other end of the tube is connected to a small rubber ball. When the rubber ball is squeezed, the air in its interior is expelled and passes over the thorium compound into the cloud chamber, carrying the ${}^{220}\text{Rn}$ which has accumulated over the thorium salt. After initial turbulence around the gas entry, the cloud chamber atmosphere calms down, and a large number of α -tracks are observed (Fig. 3), which spread across the whole interior of the chamber. Because of the short half-life of ${}^{220}\text{Rn}$, the number of α -tracks diminishes rapidly within the next 2–3 min, so that individual events may be studied more leisurely (Figs. 4 and 5). The V-shaped tracks observed are explained easily below.

The α -decay observed occurs according to the following general scheme



where A = number of nucleons, and Z = atomic number. The reaction energy Q may be calculated as follows:

$$Q = (m_n [{}^A_Z\text{X}] - m_n [{}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}] - m_n [{}^4_2\text{He}]) \cdot c_0^2 \quad (2)$$

where also

$$Q = E_\alpha + E_Y \quad (3)$$

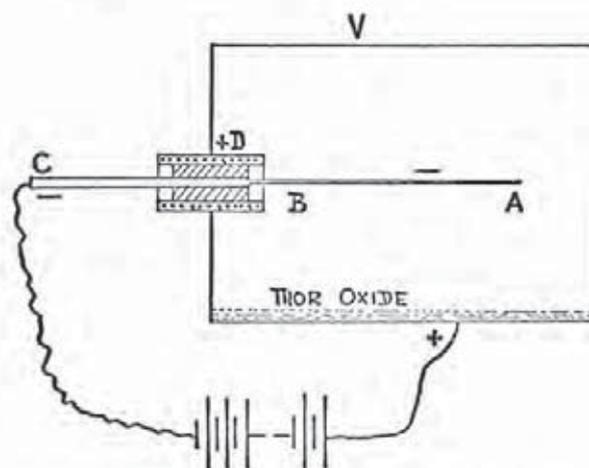


Figure 1. Rutherford's first depositing apparatus (thorium cow) from reference (2).

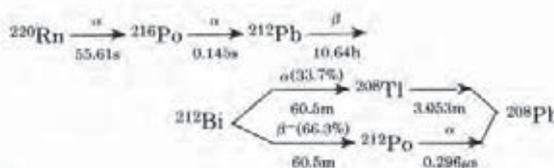


Figure 2. Part of the ${}^{232}\text{Th}$ decay series of interest in this work.

In accordance with the classic laws of preservation of momentum and energy, E_α and E_Y may be defined as follows:

$$E_\alpha = Q \cdot \frac{m_n [{}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}]}{m_n [{}^4_2\text{He}] + m_n [{}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}]} \quad (4)$$

and

$$E_Y = Q \cdot \frac{m_n [{}^4_2\text{He}]}{m_n [{}^4_2\text{He}] + m_n [{}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}]} \quad (5)$$

Numerical evaluation of eqns. (4) and (5) shows that approximately 98% of the energy Q is dissipated to the α particle, but only approximately 2% to the resulting daughter nucleus. This daughter nucleus undergoes a recoil; however, its track is so short that it is barely visible in the cloud chamber before the second α -decay takes place. Even though the α -decay energies of ${}^{220}\text{Rn}$ (6.288 MeV) and ${}^{216}\text{Po}$ (6.7783 MeV) differ by only 0.5 MeV, the tracks of the two successive α 's usually appear to have a different length, probably due to the different

¹ To whom all correspondence should be directed.



Figure 3. Cloud chamber photograph with many α -tracks.

observation angle, or because the particle causing the shorter track escapes from the sensitive region of the cloud chamber.

Experiment 2. Carrier-free Isolation of ^{220}Rn Daughters

Since the recoil nuclei formed in the ^{220}Rn α -decay are electrically charged,² they may be collected on a suitable surface, having the appropriate charge. The yield is different, depending on whether the wire or the body of the chamber (Fig. 1) is chosen as the cathode. A carrier-free isolation of the ^{220}Rn granddaughter ^{212}Pb , and its great-granddaughter ^{212}Bi may be carried out using the apparatus developed by B. Heinrich (3) or that by R. Schwankner (4, 5). Since the ^{220}Rn granddaughter may be continuously "milked" from the setup, the latter is sometimes referred to as a "thorium cow."

An Erlenmeyer flask with narrow neck is coated on its inside surface with strips of aluminum foil. The individual strips have to be in electrical contact with each other, and should project for ~ 2 cm beyond the rim of the flask's neck. The "collar" formed in this manner is turned down on the outside and is fixed to the wall of the flask with a clean wire loop. An anode wire is soldered to this loop, and then the whole aluminum collar is insulated with plastic tape. The exchangeable, well-insulated cathode assembly consists of a rubber stopper equipped with a well-centered hole, into which a banana plug is inserted and connected to the cathode wire. A crocodile clamp connected to a piece of Pt foil is clamped to this plug (see Fig. 6). For safety reasons, the required high voltage [0.1 to 1 kV] is connected to the apparatus by means of a 100 k Ω resistor which is connected in line with the apparatus. Finely divided (ground) ThO_2 is recommended as the emanating material; coarse ThO_2 or other Th compounds have a considerably lower emanating power, so that they have to be converted to a highly emanating source (5).

Since the emanating power of the ThO_2 may differ within a wide range depending on its previous history and on several other parameters (deposition voltage, geometry of the assembly, size of Pt-electrode), we have constructed an apparatus which allows a continuous measurement of the ^{212}Pb deposit and its daughter. This apparatus may be considered as a modified "thorium cow," which is equipped with a side arm through which a continuous measurement and reading of the cathode deposit activity is possible throughout the whole deposition period. This technique also allows us to measure the equilibrium value (saturation value), which is attained by competition between deposition value and decay value for the predetermined parameters.



Figure 4. Cloud chamber photograph taken 2 min later than Figure 3—few α -tracks, one of them V-shaped.

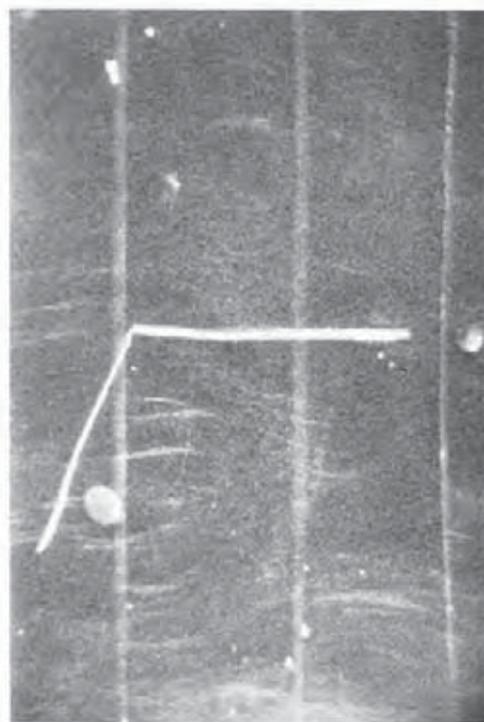


Figure 5. Cloud chamber photograph with another typical V-shaped α -track.

Using a 200-ml wide-necked Erlenmeyer flask, we obtained the following optimum values for the individual parameters: DC high voltage: 500–600 V; emanating substance: ~ 10 g of ThO_2 ; area of cathode: ~ 3 cm²; saturation time ~ 70 hr; recommended minimum deposition time 24 hr. If more than one experiment is planned with the ^{220}Rn daughter products de-

² Due to strip-off effect by collision with air molecules.



Figure 6. Exploded view of depositing apparatus.

posited, several of the "thorium cows" may be connected in parallel to a high voltage line (Fig. 7). Using the "thorium cow" we obtained carrier-free ^{212}Pb —an ideal nuclide for many laboratory experiments on the undergraduate level. One has to take into account, however, that after ~ 8 hr this nuclide is in equilibrium with its daughters. For this reason, a Pt electrode which has been exposed for sufficient time, and is then left off the "thorium cow" for approx. 8 hr may be used for identification of the ^{212}Pb . After this time, the β activity of the deposit, which may be measured in a Geiger counter, is proportional to the ^{212}Pb amount present. The half-life obtained from the β measurement is 10.6 ± 0.5 hr (recommended measuring time: 5 days, 2–3 measurements per day). Residual activity observed after 5 days is due to contamination with ThO_2 dust and is to be subtracted from the individual measurements.

An electrode exposed in this manner and "cooled" for a few hours may also be used to demonstrate the ^{208}Tl recoil. Approximately one-third of the ^{212}Bi formed on the electrode surface undergoes α -decay [6.05, 6.09 MeV], in which the daughter nucleus undergoes a relatively large recoil, which may be calculated from the law of conservation of momentum:

$$E_R = \frac{m_\alpha}{m_R} \cdot E_\alpha \quad (6)$$

where E_R = energy of recoil daughter nucleus, m_R = mass of recoiling nucleus, E_α = energy of emitted α -particle, and m_α = mass of emitted α -particle. In the particular case discussed here

$$E_R = \frac{4}{208} \cdot 6 \text{ MeV} = 0.115 \text{ MeV} \quad (7)$$

According to B. Heinrich (3, p. 160) this energy is sufficient to propel the daughter nucleus over a distance of up to 0.2 mm in the air.

The loaded electrode is wrapped tightly in thin aluminum foil. After 30 min the foil is removed and is placed under the counter. The inside, which was exposed to the ^{208}Tl recoil nuclei, is placed facing the sensitive area of the counter. The ^{208}Tl is identified from its decay curve with the half-life of 3.1 ± 0.7 min. Since the recoil activity collected is small (a few

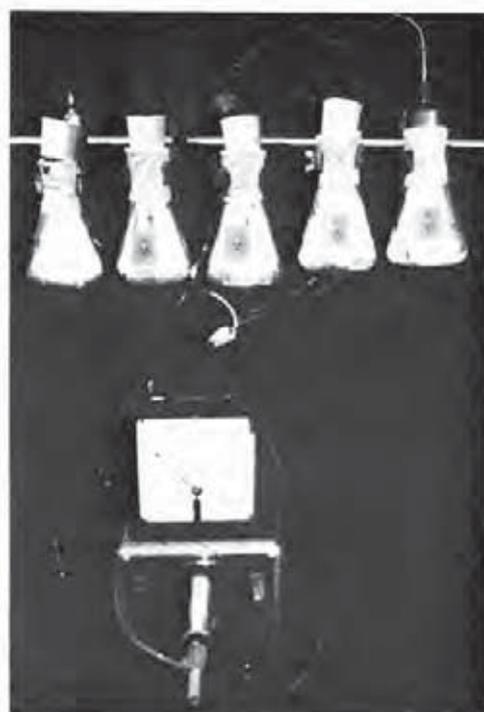


Figure 7. Five depositing units in operation.

thousand ^{208}Tl nuclei at the most are collected), it is recommended to use a low background counter, if such is available. Using the ^{212}Pb isolated from the "thorium cow," a number of classical microchemical experiments are possible, in which the nuclide is used both with and without carrier (5). The experiment described here is the confirmation of Hahn's adsorption rules. One has to keep in mind that a precipitation reaction with a very small amount of a radioactive nuclide cannot be carried out, unless a large amount of a suitable carrier is present, or co-precipitation, adsorption or similar phenomena are utilized in scavenging a carrier free radioisotope. This is easily explained by the following rough estimation.

An electrode exposed for a longer period of time in the "thorium cow" may collect up to $0.5 \mu\text{Ci}$ ^{212}Pb , if 10 g ThO_2 is used as the charge.

With a specific activity given by the following formula (6)

$$S = \left(\frac{dN}{dt} \right)_{1g} = \frac{\ln 2 \cdot N}{A \cdot T_{1/2} \cdot 3.7 \cdot 10^{10}} \left[\frac{\text{Curie}}{\text{g}} \right] \quad (8)$$

$$= \frac{0.693 \cdot (6.02 \cdot 10^{23})}{211.992 \cdot 10.64 \cdot 3600} \left[\frac{\text{Curie}}{\text{g}} \right] = 1.39 \cdot 10^6 \text{ Curie/g} \quad (9)$$

leads to the quantity of ^{212}Pb contained in $0.5 \mu\text{Ci}$

$$\frac{5 \cdot 10^{-7}}{1.39 \cdot 10^6} = 3.59 \cdot 10^{-13} \text{ g} = \frac{3.59}{211.992} \cdot 10^{-13} [\text{Mol}] = 1.69 \cdot 10^{-16} \text{ Mol} \quad (10)$$

$$\sim 1.7 \cdot 10^{-16} \text{ Mol.} \quad (11)$$

If this amount is carefully dissolved from the Pt electrode and concentrated to approximately 1 ml solution, the ^{212}Pb concentration is calculated to be $1.7 \cdot 10^{-12}$ Mol/l.

Since the solubility product of PbSO_4 is

$$K_{sp} \text{PbSO}_4 = [\text{Pb}^{2+}] \cdot [\text{SO}_4^{2-}] = 1.8 \cdot 10^{-8} [\text{Mol}^2/\text{l}^2] \quad (12)$$

the amount of $[\text{SO}_4^{2-}]$, which theoretically would be required to reach this value of K_{sp} at the Pb^{2+} -concentration given, would be

$$[\text{SO}_4^{2-}] = \frac{1.8 \cdot 10^{-8}}{1.7 \cdot 10^{-12}} = 1.1 \cdot 10^4 \text{ Mol/l (!)} \quad (13)$$

It is immediately clear, that this value [more than 1 ton of SO_4^{2-} per liter!] cannot be realized.

One of the possible ways to scavenge minute amounts of a radionuclide present in the solution is by the adsorption on the surface of some suitable inactive carrier precipitate. However, this phenomenon may also lead to erroneous results in a precipitation. For instance, in 1930 O. Erbacher and B. Nikitin (7) found a value of $1.40 \cdot 10^{-4} \text{g}/100 \text{ ml H}_2\text{O}$ at 20°C for the solubility of RaSO_4 . Two years later B. Nikitin and P. Tolmatscheff (8) found this value to be too low and, by correction for adsorption on glass surfaces, arrived at $2.1 \cdot 10^{-4} \text{g}/100 \text{ ml H}_2\text{O}$ at 20°C —a much higher value.

Otto Hahn (9–11) studied the co-precipitation, co-crystallization, and surface adsorption phenomena in great detail and formulated his well-known precipitation rules, which were discussed in detail in his book "Applied Radiochemistry" (12). In this book Hahn formulated his precipitation law as follows:

An ion, at any desired dilution, will be adsorbed by a precipitate if that precipitate has acquired a surface charge opposite in sign to the charge of the ion to be adsorbed, and if the adsorbed compound is slightly soluble in the solvent involved.

The ^{212}Pb isolated in Experiment 2 may be used to demonstrate this rule as described below.

Experiment 3

If ^{212}Pb is to be co-precipitated on the surface of AgCl by addition of AgNO_3 and KCl to the ^{212}Pb solution, two different surface conditions of the precipitating AgCl may be achieved (Fig. 8), depending on whether Ag^+ or Cl^- is added in excess. The $^{212}\text{Pb}^{2+}$ -adsorption should be much better on the surface of the AgCl -precipitate if its surface would carry negative charge. To test this assumption, the following experiments may be performed.

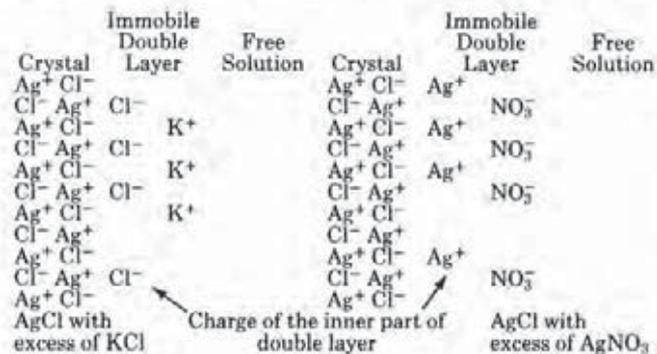


Figure 8. Surface charge conditions in adsorption precipitation of ^{212}Pb (carrier precipitate AgCl).

Procedure

A platinum electrode exposed in the "thorium cow" for at least 24 hr is leached with 12 ml warm HNO_3 (4 M). For each experiment, 2 ml of this well-mixed solution are used. The solution is combined with 0.2 M AgNO_3 solution and 0.2 M KCl solution in the sequence given by the Roman numerals I, II, and III in the table, and by adding the amount in milliliters given in this table.

After thorough mixing, the solutions are filtered through a radiochemical filter assembly with removable chimney (13),³ washed with

10 ml dist. H_2O , dried by washing with acetone-ether, and counted with an end window GM counter. (If the filter assembly is not available, a larger filter crucible may be used instead; for counting, the GM end window counter is inserted into the crucible).

The following observation will be made in the experiments type A through E:

Type A. Equivalent amounts of Ag^+ and Cl^- are employed. The surface of the precipitate (resp. precipitated crystals) stays neutral, only little ^{212}Pb adsorption is observed: Low counting rate.

Type B. Excess of Ag^+ causes positive charge on surface of precipitate; no ^{212}Pb -ions will be adsorbed. Only small counting rate due to inclusions is observed.

Type C. Excess of Cl^- causes negative charge on surface of precipitate; ^{212}Pb ion adsorption is strongly favored. Counting rate is strongly increased.

Type D and Type E. In these experiments, the ^{212}Pb solution is added after the AgCl precipitation has been made. The ^{212}Pb solution is kept in contact with the precipitate for ~5 min, preferably with stirring. Then, the solution is filtered, the precipitate washed and counted as described before.

In experiment D (Ag^+ in excess) similar results are observed as in experiment B; experiment E (Cl^- ion in excess) shows results similar to those obtained in experiment C. However, the effects observed in B and C are larger than those in D and E since in experiments D and E only the surface of the precipitate is involved in the adsorption, and no inclusion takes place, as in B and C. The same experiments may also be carried out with KBr instead of KCl . The results are even better than in the chloride precipitation. However, if KI is used instead of KBr or KCl , a strong excess of KI causes a decrease of activity, probably due to the formation of the complex $[\text{PbI}_4]^{2-}$ (3, p. 162).

It has been demonstrated that even some of the oldest radiochemistry experiments may be updated with modern equipment and are found to be useful in the laboratory courses or in the student demonstrations. Because of the short half-lives of the isotopes involved and very low activities needed for these experiments, no additional precautionary measures are necessary.

Acknowledgment

We wish to express our thanks to Mr. Reinhard Marquart of our laboratory for preparation of the photographs and Mr. H. Kress (Leybold Heraeus GmbH & Co. KG) for his constant support and advice in the apparatus section.

Literature Cited

- (1) Rutherford, E., *Phil. Mag.*, 49 [5], 1–14 (1900).
- (2) Rutherford, E., *Phil. Mag.*, 49 [5], 161–192 (1900).
- (3) Heinrich, B., "Radiochemische Demonstrationsversuche," Aulis Verlag Deubner & Co. KG Köln, W. Germany, 1968, p. 142ff.
- (4) Schwankner, R., *Praxis der Naturwissenschaften (Chemie)*, 26, 85–98 (1977).
- (5) Schwankner, R., "Radiochemiepraktikum—Einführung in das Kern- und radiochemische Grundpraktikum [Universitäts Taschenbuch]," Schönningh-Verlag Paderborn, 1980.
- (6) Duncan, J. P., and Cook, G. B., "Isotope in der Chemie," (German translator: von Weigel F.) Goldmann Verlag München, W. Germany, 1971 (data not in the English edition).
- (7) Erbacher, O., and Nikitin, B., *Z. Phys. Chem.*, A 158, 216–230 (1932).
- (8) Nikitin, B., and Tolmatscheff, P., *Z. Phys. Chem.*, A 167, 260–272 (1933).
- (9) Hahn, O., *Naturw.*, 14, 1196 (1926).
- (10) Hahn, O., *Ber. Dtsch. Chem. Ges.*, 59, 2014 (1926).
- (11) Hahn, O., and Imre, L., *Z. Phys. Chem. (alte Ausgabe)* 144, 161 (1929).
- (12) Hahn, O., "Applied Radiochemistry," Vol. 14, George Fischer Baker Nonresident Lectureship in Chemistry at Cornell University, Cornell University Press, Ithaca, N.Y., 1936.
- (13) Choppin, G. R., "Experimental Nuclear Chemistry," Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.Y., 1961, Fig. 8, p. 71.

³ In German: *Hahn'sche Nutsche*.

Experiments to Study the Absorption Behavior of ^{212}Pb on AgCl Precipitates

Experiment	AgNO_3 (0.2 M)		KCl (0.2 M)		^{212}Pb (in 4M HNO_3)		Surface charge of precipitate
	ml	[sequence]	ml	[sequence]	ml	[sequence]	
A	6	[I]	6	[III]	2	[0]	± 0
B	10	[I]	2	[III]	2	[II]	+
C	2	[I]	10	[III]	2	[0]	—
D	10	[I]	2	[II]	2	[III]	+
E	2	[I]	10	[II]	2	[III]	—

Strahlenschutz

ORGAN DES FACHVERBANDES FÜR STRAHLENSCHUTZ E.V.

PRAXIS

Zeitschrift für den sicheren Umgang mit ionisierender und nichtionisierender Strahlung



**Gefahrenabwehr im
nuklearen Notfall?
Die Einsatztruppe steht
bereit!**

Preparedness, 1968
Roy Lichtenstein
Oil and Magna on three
joined canvases
304,8 x 548,6 cm
Solomon R. Guggenheim
Museum, New York, 69.1885
© VG Bild-Kunst, Bonn 2009
(mehr dazu auf S. 52)

S. 3 Nuklearterrorismus –
Bedrohung und Schutz

S. 21 Einsatzkonzepte in CH

S. 28 Atomic Detectives –
All about Nuclear Forensics

S. 37 Dosismessungen um
schweizerische Kernanlagen

S. 44 Rutherfords
„Thoriumkuh“, Teil I

S. 55 Dirty Tables and
Dirty Bombs

S. 57 Ärzteausbildung in CH

S. 65 IRPA 12 – Bericht vom
Kongress

S. 83 Berufsbilder im
Strahlenschutz VI

S. 89 FS-Wahlen 2008

S. 93 AKE: Stellungnahme
zu ASSE II

Rutherfords „Thoriumkuh“, Teil 1

AUTOR

Robert Josef Schwankner

KOAUTOREN

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

ZUSAMMENFASSUNG

Rutherfords Nuklidgenerator („Thoriumkuh“) war in vielfacher Hinsicht ein Stimulans für die Entwicklung der Transmutationslehre. Die Autoren beschreiben in Teil 1 des Beitrags Bauformen und Nuklidgewinnung, in Teil 2 die praktischen Auswirkungen auf die „Chemie des Unwägbaren“, die Radiochemie. Dem erfahrenen Experimentator werden Anleitungen für eigene Praktikumsexperimente gegeben.

SUMMARY

Rutherford's "Thorium Cow"

Rutherford's Nuclide Generator ("Thorium Cow") in many ways was a stimulant for the development of transmutation theory. In Part 1 of this contribution, the authors describe construction shapes and nuclide extraction, in Part 2 the practical implementations on the "Chemistry of the Imponderable", the Radiochemistry. The experienced experimenter will find guidance for his own practical work.

Bauformen und Nuklidgewinnung

Rutherfords Nuklidgenerator war in vielfacher Hinsicht ein Stimulans für die Entwicklung der Transmutationslehre. In seiner intensiven Verwendung als trägerfreier Tracerzugang für ausgewählte Glieder der 4n-Reihe – insbesondere für ^{212}Pb (Thorium B) – erwies er sich als Voraussetzung und Motor für die erfolgreiche Entwicklung in der Ultra-spurenchemie der Hahn'schen Schule.

Die Autoren wählten bei der Abfassung dieses Beitrags den Zugang zum Leser über die Historie (immerhin sind mehr als drei Nobelpreisträger dabei involviert) und haben den Beitrag so angelegt, dass er gleichzeitig auch Fortbildungscharakter hat. Der Text kann somit auch eine Anleitung für den erfahrenen Experimentator sein, der hier schöne Details darüber finden wird, was man – heute noch – in Praktika mit angenehmen Praktikumsnukliden (Betastrahler und geringe HWZ) und modernen Methoden alles machen kann.

Der erste Teil des Gesamtbildes befasst sich zunächst mit den Bauformen und der Nuklidgewinnung, während im zweiten Teil anhand von Experimenten die „Chemie des Unwägbaren“, die Radiochemie, eingeführt und beschrieben wird.

Z = 90 Thorium

J. J. Berzelius benannte Thorium nach dem skandinavischen Gott Thor. Er sah in ihm fälschlicherweise ein einer Falun-Erde zugrunde liegendes neues Metall; 1828 entdeckte er schließlich im Thorit der norwegischen Insel Lövön tatsächlich das erste Thoriummineral.

1898, im „annus mirabilis“ der Frühgeschichte der Radioaktivität, in welchem die Entdeckung von Z = 84 Polonium und Z = 88 Radium erfolgte, wurde unabhängig voneinander durch

G. C. Schmidt, Erlangen (Publikation vom 1.4.), und M. Curie, Paris (Publikation vom 12.4.), die Ionisationswirkung von Thorium und seinen Verbindungen auf umgebende Luft beschrieben. Für Marie Curie waren diese Phänomene mit den relativ hohen Atomgewichten – in Analogie zu Z = 92 Uran – verknüpft und sie schlug die Bezeichnung „radioaktive Elemente“ dafür vor.

**Marie Curie:
„Radioaktive
Elemente“**



Abb. 1: Ernest Rutherford (1871–1937). Als er 1908 als 37-jähriger den Nobelpreis für Chemie zugesprochen bekam, stellte er belustigt fest: „Ich dachte eigentlich ich sei Physiker“.

Die zunächst unter Anleitung von Sir W. Ramsay (1852–1916, Nobelpreis für Chemie für das Jahr 1904) ausgeführte Analyse ceylonesischen Thorianits durch den Postdoktoranden und organischen Chemiker O. Hahn (1879–1968; Nobelpreis für Chemie für das Jahr 1944) führte 1905 und 1907 zur Entdeckung von zwei neuen Alphastrahlern hoher spezifischer Aktivität in der Thorium-(4n-)Zerfallsreihe, welche sich von der Gewinnung her

betrachtet als wohlfeile Radiumersatzstoffe erweisen sollten: ^{228}Ra : Mesothor (1) und ^{228}Th : Radiothor.

Thoriumemanation

1898 wandte sich der 27-jährige Ernest Rutherford (*1871 in Brightwater bei Nelson/Neuseeland, †1937 in Cambridge), eben erfolgreich in der Beschreibung der Alpha- und Betaemission von Uranoxidpräparaten („Becquerel-Strahlung“), im Sommer als Benjamin zu einem der beiden Macdonald-Professoren für Physik an der McGill University in Montreal berufen, dem radiometrischen Studium von Thoriumverbindungen zu. Er arbeitete dort bis 1907; den Nobelpreis für Chemie erhielt er 1908 für diese Arbeiten (Abb. 1).

Gemeinsam mit einem weiteren Newcomer an dieser Hochschule, dem Elektroingenieur R. B. Owens (1870–1940), schlug er sich mit Thoriumoxidpräparaten herum [1], welche die Eigenschaft zeigten, dass so scheinbar irrelevante Einflussfaktoren wie das Öffnen einer Tür drastische Änderungen in der Ionisationswirkung umgebender Luft hervorriefen.

“A slow current of air, which quickly removes the emanation as it appears,

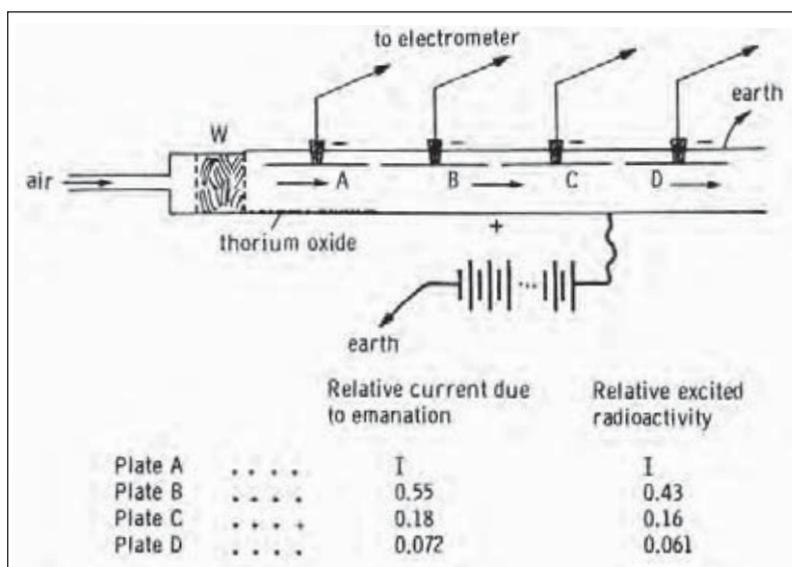


Abb. 2: Versuch zur Aufklärung „erregter Aktivität“ (elektrostatische Gasphasendeposition) in der Umgebung von Thoriumverbindungen [2]



Abb. 3: Wappen von Lord Rutherford of Nelson (Coat of Arms, 1931). Ein frühes Beispiel radiochemischer Heraldik: Die enthaltenen Exponentialkurven des Zerfalls und der Rückbildung im Zuge der Abtrennung eines Tochternuklids erscheinen als degenähnliche Strukturelemente. Motto: „primordia quaerere rerum“ – „Suchen nach dem Ursprung der Dinge“. Der Kiwi und der Maori-Krieger beziehen sich auf die neuseeländische Heimat wie auch seinen Geburtsort Nelson. Hermes Trismegistos vertritt die klassische Alchemie, die durch Rutherford's „Newer Alchemy“ erneuert wurde.

also diminishes the power of producing radioactivity. The amount of induced radiation is greater in closed than in open vessels, on account of the disturbance of air-currents in the latter case.” [2]

In einer Reihe trickreicher Experimente, die Rutherford als den Experimentalphysiker des kommenden Jahrhunderts auswies, gelang es, den gasförmigen Charakter derselben aufzuklären (Abb. 2) und als „Minuten-Tochteraktivität“ ($T_{1/2}(^{220}\text{Rn}) = 55,6 \text{ s}$) nach Exhalationsabtrennung aus Festkörperpräparaten aufzudecken.

Ein Thema, das Rutherford Zeit seines Lebens in vielen Varianten verfolgte und das er schließlich bei seiner Ernennung zum Baron in sein Wappen integrieren ließ: das säkulare radiogenetische Mutter-Tochter-Gleichgewicht als ein frühes Beispiel radiochemischer Heraldik (Abb. 3). Nach der Ernennung

Exhalationsabtrennung aus Festkörperpräparaten

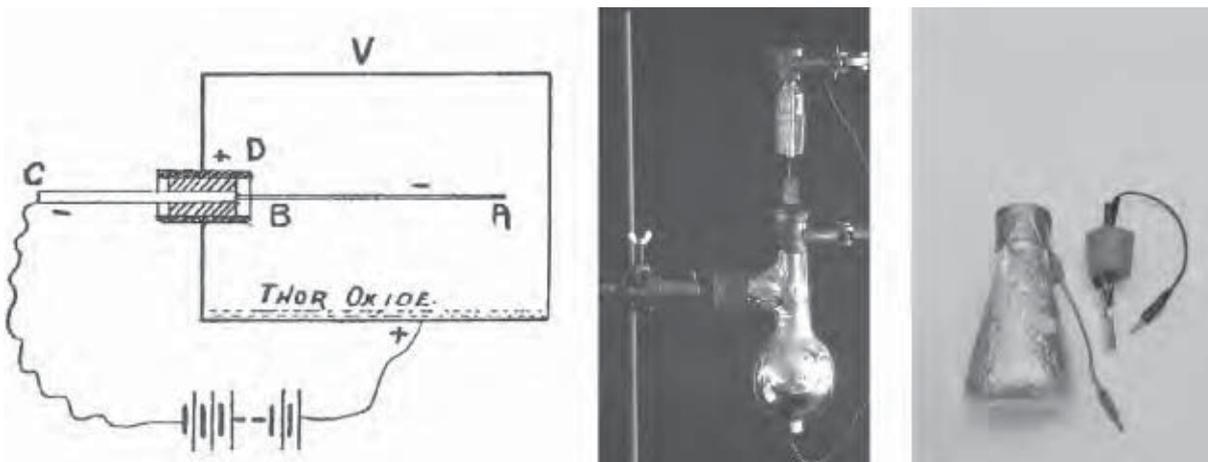


Abb. 4: Erste Bauform [1, 2] (links) sowie Sonderbauform (Mitte), geöffnet (mit direkter GMZ-Überwachung der deponierten Aktivität), und rechts aktuelle Praktikumsversion einer Rutherford'schen „Thoriumkuh“ [4–6]

kabelte er als erstes an seine Mutter: "Now Lord Rutherford. More your honour than mine. Ernest" [3, 4].

Bauformen der „Thoriumkuh“

Es zeigte sich besonders, dass die Gasphasendeposition aus Thoriumemanation insbesondere auf Kathoden erfolgte und dort nur zu oberflächlicher – durchweg nicht gewichtsauffälliger – Deposition führte.

"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

Rutherford's "Thorium Cow"

"All the compounds of thorium examined have the power of causing radioactivity in substances. The oxide, however, gives far the largest effects, and has consequently been used in most of the experiments."

Ernest Rutherford, 1900

may conclude from this experiment that the radioactivity is, in some way, due to the 'emanation', or to something that accompanies it, but is not caused by the direct action of a radiation from thorium oxide ... The amount of radiation from an active

surface is always lessened by mechanical actions, such as rubbing the surface with a cloth or fine sand-paper. In order to completely remove the radioactivity, it is necessary to remove the surface-layer by long scouring with sand- or emery-paper." [2]

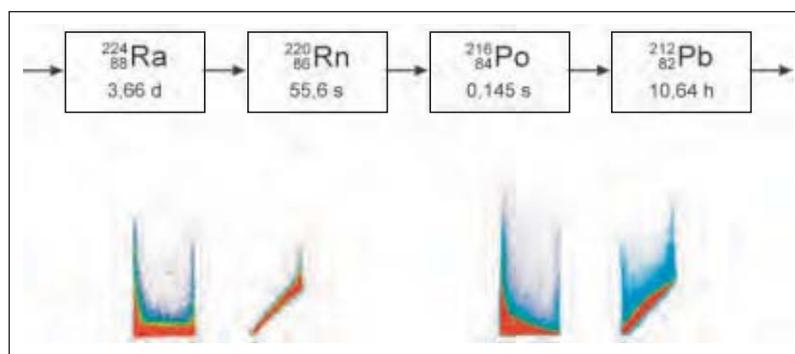


Abb. 5: Oben: relevanter Ausschnitt der 4n-Zerfallsreihe mit Angabe der Halbwertszeiten; die in kurzer Folge durch Alphaemission entstehenden Rückstoßkerne übernehmen je rd. 2% der Umwandlungsenergie mit der Folge der Bildung eines hochgeladenen Kations in der Gasphase. Unten: MWPC- (links) und RPL-Autoradiographien (rechts) von durch Einhängen in eine „Thoriumkuh“ sättigungsexponierten Platinkathoden; eine davon abgeschrägt (U = -900 V; b = 13, l = 40, d = 0,3 [mm]). Die quantitative Auswertung ergibt, dass in dem der Emanationsquelle Thoriumdioxid zugewandten, unteren Drittel der Platinelektroden im Bereich hoher Feldstärken jeweils bis zu 80% der ²¹²Pb-Sättigungsaktivität (typischerweise rund 2 kBq) elektrodeponiert sind.

In der Folge kristallisierten sich verschiedene Bauformen der „Thoriumkuh“ heraus, die es gestatten, eine bequeme Nuklidtrennung durch Gasphasendeposition zu ermöglichen, wobei herausnehmbare Platinkathoden noch heute Verwendung finden (Abb. 4).

Befüllt man bei Rekonstruktion einen Erlenmeyerkolben (250 ml, Weithals) mit 35 Gramm Thoriumdioxid, so kann man innerhalb von 72 Stunden (U_{Kath} = -900 V) eine ²¹²Pb-Deposition von typischerweise 2 kBq erhalten. 65–80% der Gesamtaktivität befindet sich dabei auf dem unteren Drittel der Platinkathode (A_{Pt} = 500 mm²), also vorzugsweise in Bereichen hoher Feldstärken (Kanten, Spitzen) deponiert,

wie MWPC- und RPL-Autoradiografien belegen (Abb. 5).

Je nach Trocknungszustand des eingesetzten Thoriumdioxids variiert die Abscheidungsaktivität zwischen 1,3 und 6,5 kBq; Resultate eines typischen Experimentes unter schrittweiser Wasserzugabe (Deionat in „Thoriumkuh“ gemäß Abb. 4, rechts) sind in Abb. 6 wiedergegeben.

Mit derartigen Studien lassen sich auch Nanowägsamkeiten in emanierenden Festkörpern untersuchen: Emanierverfahren.

Die sich in den 110 Jahren ihres Einsatzes parallel zur schrittweisen Aufklärung der natürlichen Thorium-(4n-) Zerfallsreihe (Abb. 7) entwickelnde prinzipielle Bauform der Rutherford'schen „Thoriumkuh“ zur bequemen Präparation des Radiotracers

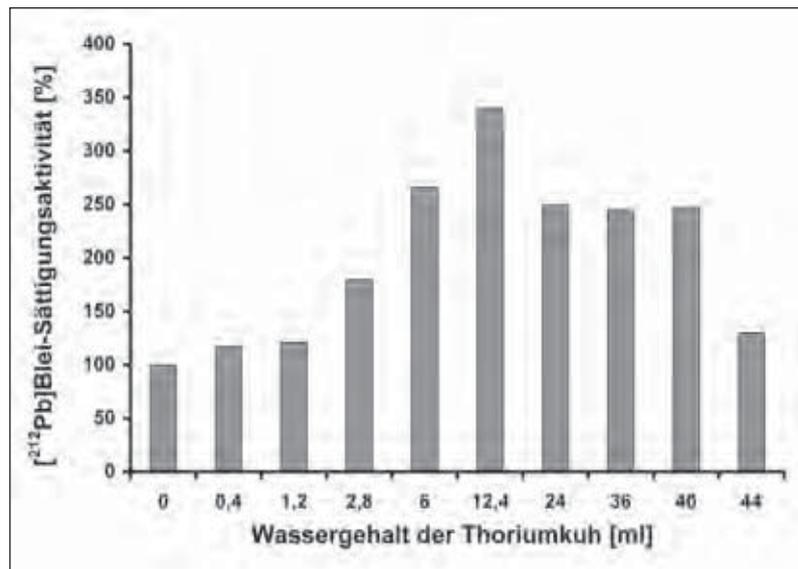


Abb. 6: Sättigungsaktivitäten in % des in dieser Anordnung erreichbaren Maximalwertes einer „Thoriumkuh“ ($m(\text{ThO}_2) = 34,6 \text{ g}$; vgl. Abb. 4 (rechts)) nach Zugabe entsprechender Wassermengen, bezogen auf die Absolutaktivität der Platinelektrode ohne Wasserzugabe; zwischen den einzelnen Messreihen vergingen zur Einstellung des radio-genetischen Gleichgewichts jeweils rund 80 Stunden [6].



²¹²Pb (T_{1/2} = 10,64 h) erscheint schon in der zweiten Veröffentlichung zum Thema [1]:

“If thorium oxide is placed in a closed vessel connected to earth, the sides of the vessel and any solid bodies near,

whether conductors or insulators, become radio-active. If, in addition, the surface of the thorium oxide is

Halbwertszeit t _{1/2}	Isotope Zerfall Verzweigung, %	α-Zerfall Energie, MeV (Intensität, %)**	β-Zerfall Energie, MeV (Intensität, %)**	γ-Emission Energie, keV (Intensität, %)*
1.405*10 ¹⁰ y	²³² ₉₀ Th 100 ↓ α	α: 4.0123 (78.2) α: 3.9472 (21.7)		γ: 63.813 (0.263) γ: 140.86 (0.021)
5.75 y	²²⁸ ₈₈ Ra 100 ↓ β		β: 0.0396 (40) β: 0.01328 (30)	γ: 13.52 (1.6) γ: 16.24 (0.72)
6.15 h	²²⁸ ₈₉ Ac 100 ↓ β		β: 1.158 (29.9) β: 1.731 (11.66) β: 2.069 (8.) β: 0.596 (8.0) β: 1.004 (5.92) β: 0.974 (5.1)	γ: 911.20 (25.8) γ: 968.97 (15.8) γ: 338.32 (11.27) γ: 964.77 (4.99) γ: 463.00 (4.40) γ: 794.95 (4.25)
1.9131 y	²²⁸ ₉₀ Th 100 ↓ α	α: 5.4232 (72.2) α: 5.3404 (27.2) α: 5.221 (0.420)		γ: 84.37 (1.22) γ: 215.98 (0.254) γ: 131.61 (0.131)
3.66 d	²²⁴ ₈₈ Ra 100 ↓ α	α: 5.6854 (94.92) α: 5.4486 (5.06)		γ: 240.99 (4.10) γ: 292.70 (0.0062)
55.6 s	²²⁰ ₈₆ Rn 100 ↓ α	α: 6.2881 (99.89) α: 5.747 (0.114)		γ: 549.76 (0.114)
0.145 s	²¹⁶ ₈₄ Po 100 ↓ α	α: 6.7783 (100)		γ: 804.9 (0.0019)
10.64 h	²¹² ₈₂ Pb 100 ↓ β		β: 0.335 (82.5) β: 0.574 (12.3) β: 0.159 (5.17)	γ: 238.63 (43.3) γ: 300.09 (3.28) γ: 115.18 (0.592)
60.55 m	²¹² ₈₃ Bi 35.94 ↓ α 64.06 ↓ β	α: 6.0508 (69.91) α: 6.0899 (27.12)	β: 2.248 (86.57) β: 1.521 (6.81)	γ: 39.86 (1.06) γ: 288.07 (0.337) γ: 727.33 (6.58) γ: 1620.50 (1.49)
3.053 m 0.298 μs	²⁰⁸ ₈₁ Tl ²¹² ₈₄ Po 100 ↓ β 100 ↓ α	α: 8.785 (100)	β: 1.80 (48.7) β: 1.29 (24.5) β: 1.52 (21.8) β: 1.04 (3.9)	keine γ-Emission beob. γ: 2614.53 (35.64/99.16) γ: 583.19 (30.4/84.5) γ: 510.77 (8.13/22.6) γ: 860.56 (4.465/12.42)
stable	²⁰⁸ ₈₂ Pb		Ref.: Ende '06	Version: 4.2, Februar 2007

*γ-Emission: absolute Intensität pro 100 Zerfälle im Gleichgewicht; **α-, β-Zerfall: Intensität pro 100 Zerfälle

blau: Edelgas, zyan: γ-Referenzlinien, rot: langlebige Isotope, grün: Isotope im Gleichgewicht, Achtung

Abb. 7: 4n-Zerfallsreihe nach W. Wahl [7]

covered with paper or thin aluminium-foil, the side of the paper away from the oxide becomes radio-active. When no electromotive forces are acting, the amount of radioactivity in a given time

Aufklärung der Thorium- (4n-)Zerfalls- reihe

per unit area is greater the nearer the body to the thorium oxide.

With electromotive forces acting, the substance to which the radioactivity is due appears to travel along the lines of force from the + to the –

charged body. It is thus possible to concentrate the radioactivity on small plates or fine wires by placing them in a closed metal vessel connected to earth and charging them –.” [1]

Die u. a. von der Curie’schen Schule zu diesem Zeitpunkt noch vertretenen Anschauung, dass die Bereiche natürliche und induzierte Radioaktivität ihre Ursache in einer Art Phosphoreszenz hätten, wird schon 1900 von Ernest Rutherford mit gebührender Vorsicht behandelt: “The hypothesis that the radiation is a kind of phosphorescence will not explain the results observed, since substances are made radioactive outside the incidence of the radiation, and the radioactivity can be concentrated on the – electrode” [1]. ■

STICHWORTE

Radiochemie, Thorium, Thoriumemanation, Thoriumzerfallsreihe

LITERATUR

- [1] Rutherford, E.: Radioactivity Produced in Substances by the Action of Thorium Compounds. *Phil. Mag.*, 5, 49, 1900, S. 161–192.
 [2] Rutherford, E.: A Radio-active Substance Emitted from Thorium Compounds. *Phil. Mag.*, 5, 49, 1900, S. 1–14.
 [3] Eve, A. S.: Rutherford. University Press, Cambridge 1939.
 [4] Schwankner, R. J./Laubinger, R./Dorner, J./Gmeiner, B./Patzner, G./Schmidt, M.: Aus der Frühgeschichte der Radiochemie – Ausgewählte Objekte konservatorischer Radiometrie. Fachverband für

Strahlenschutz. Publikationsreihe Fortschritte im Strahlenschutz, FS-06-141-T, 2006, S. 52–83.

[5] Schwankner, R. J./Eiswirth, M./Weigel, F./Wishnevsky, V.: Electrostatic Radionuclide Separation. *Journal of Chemical Education*, 59, 1982, S. 608–611.

[6] Schwankner, R. J.: Nuklidgeneratoren I: Die Thoriumkuh. *MNU*, 35, 1982, S. 385–390.

[7] Wahl, W.: $\alpha\beta\gamma$ -Table. *Radionuclide-Handbook*. Version 4.1, Februar 2007, D-83722 Schliersee.

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: robertjosefchwankner@web.de
 laubinger@hm.edu

Begleitunterlagen: Großes Radiometrisches Praktikum HM

i: Traceranwendungen

Prof. Dr. Schwankner
Türkenstraße 78
80799 München
Lab.: 089/1265-2608
Büro.: 089/1265-2667
priv.: 089/33019260

Einsatz von Radionukliden in der Tracermethode

Die hohe Nachweisempfindlichkeit für radioaktive Nuklide und ihre einfache Detektierbarkeit – auch in kleinen Konzentrationen – wird in der Tracermethode genutzt. Hierbei ersetzt man in einer Verbindung ein inaktives Atom durch ein radioaktives Atom des gleichen Elements, z.B. in organischen Verbindungen ein ^{12}C -Atom durch ein ^{14}C -Atom.

Wichtig dabei ist, dass die markierte Verbindung (der **Tracer**) und die zu untersuchende Substanz chemisch identisch sind. Dies ist im allgemeinen der Fall, wenn der Massenunterschied der ausgetauschten Isotopen nicht zu groß. Merkbare Isotopieeffekte findet man nur bei großen Massenunterschieden, wie z.B. beim Austausch von Wasserstoff gegen Tritium.

Mithilfe dieses Radionuklids als Sonde ist es möglich den Weg eines Atoms oder einer Verbindung bei chemischen oder biologischen Prozessen oder bei einem Transportvorgang zu verfolgen.

Die Tracermethode findet breite Anwendung im Bereich der

- Kinetik: Aufklärung von Reaktionsmechanismen, Bestimmung von Geschwindigkeitskonstanten, Untersuchungen von Phasenumwandlungen
- Kolloidchemie
- Untersuchungen von biologischen Stoffwechselfvorgänge
- Untersuchungen von Abbau und Transport von Chemikalien in der Umwelt
- Materialforschung und Werkstoffprüfung
- Chemisorption

Wegen der hohen Nachweisempfindlichkeit genügt es einen Teil der nachzuweisenden Atome bzw. Verbindung durch die entsprechenden markierten Atome/Verbindung zu ersetzen.

Als ein weiterer Vorteil der Methode ist die zumeist wesentlicher unkompliziertere Probenvorbereitung zu nennen.

Zur Markierung können selbstverständlich auch stabile Isotope verwendet werden, insbesondere in den Fällen, in denen keine geeigneten radioaktiven Isotope vorhanden sind wie z.B. bei den Elementen Stickstoff oder Sauerstoff. Man muss allerdings auf die hohe Nachweisempfindlichkeit der radioaktiven Strahlung verzichten und anstelle eines Detektors für Radionuklide ein Massenspektrometer einsetzen.

Tracer-Versuch: Fällung von Silberchlorid (AgCl) in Anwesenheit eines ^{212}Pb -Tracers

Beim Mischen einer Silbernitrat (AgNO_3)-Lösung und einer Kaliumchlorid (KCl)-Lösung bildet sich ein weißer Niederschlag, der sich mit folgender Reaktionsgleichung beschreiben lässt:



In folgendem Versuch wird Silberchlorid in wechselndem Konzentrationsverhältnis gefällt: im Silber- und im Chlorid-Überschuss. Der Einsatz eines ^{212}Pb -Tracers vor und nach der Fällung soll Aufschluss über die Oberflächenladung des AgCl -Niederschlags bei Ag^+ - und Cl^- -Überschuss geben sowie Aussagen über das Phänomen der Adsorption und Mitfällung von ^{212}Pb an und im AgCl -Niederschlag erlauben.

Es werden folgende Versuchsansätze durchgeführt:

Probe	Zugabe von			
	AgNO_3 -Lösung	Tracer	KCl -Lösung	Tracer
Ag^+ (adsorbiert)	8 ml		2 ml	1 ml
Ag^+ (Fällung)	8 ml	1 ml	2 ml	
Cl^- (adsorbiert)	2 ml		8 ml	1 ml
Cl^- (Fällung)	2 ml	1 ml	8 ml	

Wo würden Sie die meiste Aktivität (^{212}Pb), wo die geringste Aktivität erwarten?

Durchführung:

1. Inertisieren der Reagenzgläser mit je 5 ml heißer Salpetersäure.
2. Herstellen der Tracer-Lösung: Lösen des ^{212}Pb von der Platin-Elektrode in 5 ml heißer Salpetersäure im Ultraschallbad, ca. 3 min lang. Lösung überführen.
3. Fällungen wie oben beschrieben durchführen, Niederschlag waschen.
4. Die Aktivität des Niederschlags wird gammaspektrometrisch bestimmt.

Rutherford's „Thorium Cow“, 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 Rutherford's „Thoriumkuh“ beschrieben. Im 2. Teil geht es um die praktischen Auswirkungen auf die „Chemie des Unwägbaren“, die Radiochemie. Rutherford's 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. Römpf, 1941) operiert, ist hier im Bereich der Radiochemie der Umgang in Femto- und Attomolen sowie im Falle von Bahndetektoren (Abb. 1) de facto im

Einzelatomnachweis 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 Ultraspueren, sei es im Bereich der Dotierung (Halbleitertechnologie), der Biochemie



Abb. 2: Drei Chemie-Nobelpreisträger, die die moderne Radiochemie in den Fußstapfen ihres Lehrers, des Doyens der Radioaktivitätsforschung Ernest Rutherford (1871–1937), geprägt haben: links Georg von Hevesy (1885–1966), Tracermethodik und Aktivierungsanalyse, rechts Sir Frederick Soddy (1877–1956), Verschiebungssätze und Isotopiebegriff, und in der Mitte Otto Hahn (1879–1968), Präparative Radiochemie 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, Meitner 1938/39).

Im Folgenden wird versucht, das Umfeld von Rutherfords „Thoriumkuh“ sowohl bei der Aufklärung der ihr zugrunde liegenden Effekte als auch bei der Anwendung der mit ihr problemlos zur Verfügung gestellten Tracernuklide zum Studium je eines anorganischen und eines biologischen Systems schlaglichtartig auszuleuchten.

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 Teilchenstrahlung sich in kondensierten Bahns Spuren einer Nebelkammer manifestiert, ging über seinen ehemali-

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

Weg zum Nachweis der Urankernspaltung

Die Thoriumemanation, eine „Minutenaktivität“ ($T_{1/2}(^{220}\text{Rn}) = 55,6 \text{ s}$) schreibt so ihren sukzessiven, doppelten Alphazerfall in V-förmigen Nebelkammerspuren mit unterschiedlichem Öffnungswinkel (Abb. 1) [2]. Der Ursprung dieser Signatur ist nur vermeintlich ein Punkt, da nach dem ersten Alphazerfall der Produktkern (Y) gemäß klassischer Impulserhaltung einen Rückstoß erfährt, der genähert durch folgende Beziehung beschrieben wird:

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

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

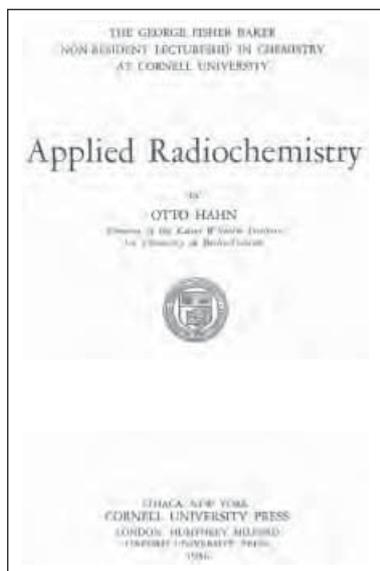


Abb. 3: Eine „Bibel“ für den Umgang mit Ultraspueren [1]

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-

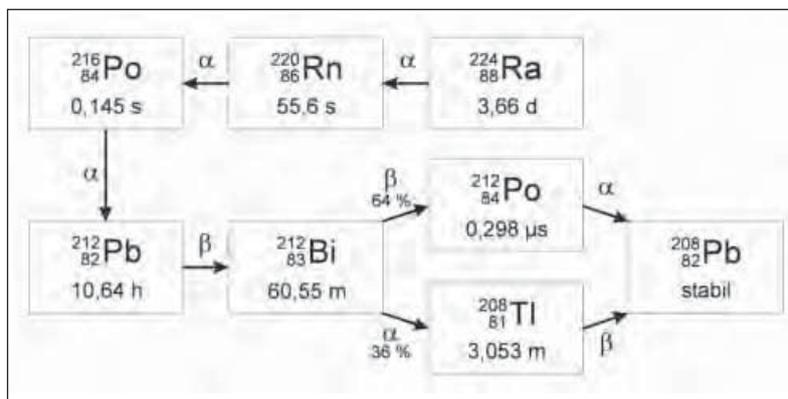


Abb. 4: Auszug der prozentualen Hauptverzweigung in der 4n-Zerfallsreihe mit Angabe der Halbwertszeit

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 Femtogramm.

Durch Ablösen unter milden Bedingungen (HNO_3 ; $c = 1 \text{ mol/l}$, $T = 70 \text{ °C}$) 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

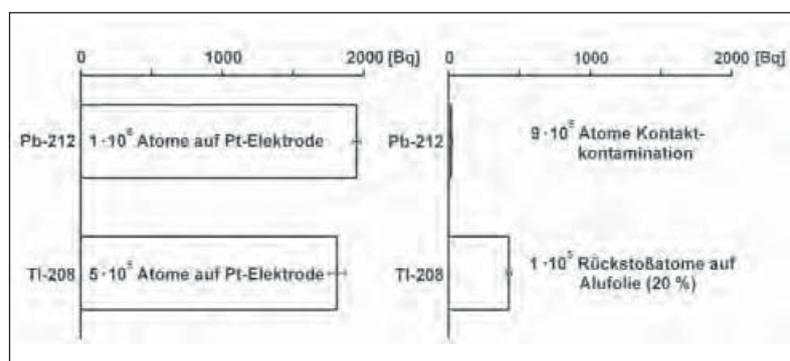


Abb. 5: ^{208}Tl (Th C') kann von einer mit ^{212}Pb (Th B) sättigungsaktivierten Platinelektrode (vgl. Abb. 4) eingewickelt in Metallfolie durch Rückstoßimplantation in Sub-Attomolquantitäten abgetrennt werden (die Kontaktkontamination ist demgegenüber vernachlässigbar; links: Aktivitäten auf unverpackter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

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

$$N = \frac{1.600 \frac{1}{s} \cdot 10,64 \cdot 3.600 \text{ s}}{\ln 2} = 8,8 \cdot 10^7 \text{ Kerne}$$

$$n = \frac{N}{N_A} = \frac{8,8 \cdot 10^7}{6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}} = 1,5 \cdot 10^{-16} \text{ mol}$$

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

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

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

Es zeigt sich augenfällig, dass man herkömmliche chemische Methoden nicht unbedenken 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

Ungeträgerete 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 Kristalloberflächen, wie in Abb. 6 dargestellt. Die im Innenteil der Doppelschicht an der Kristalloberfläche 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

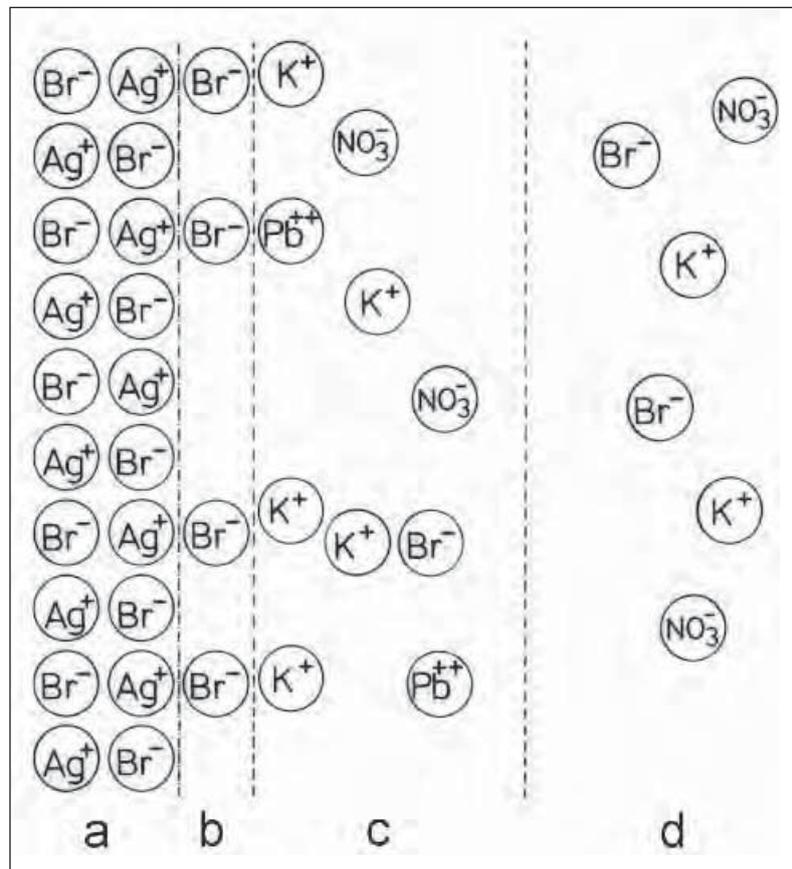


Abb. 6: Aufbau der elektrochemischen Doppelschicht an der Grenze zwischen polarem Kristall und freier Lösung; AgBr-Kristall mit negativ geladener Oberfläche infolge stöchiometrischen Überschusses von Bromidanionen bei der Fällung im Ausschnitt; a: AgBr-Kristall, b: immobil adsorbierte, ladungsbestimmende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

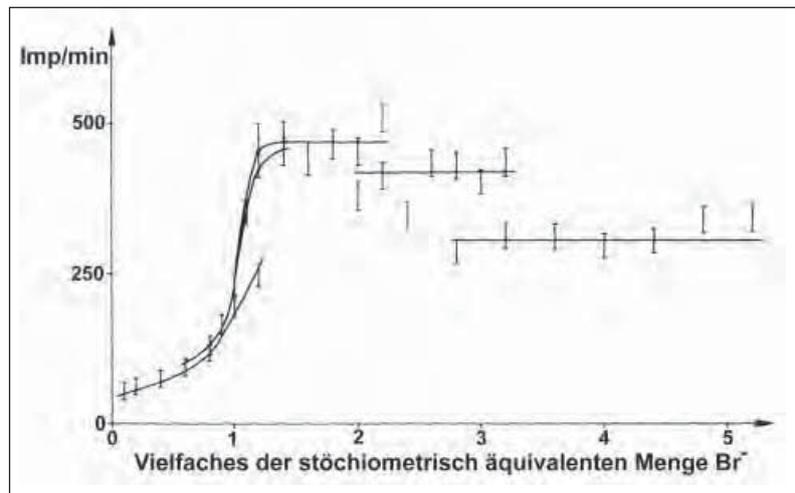


Abb. 7: ^{212}Pb -Traceradsorption zum Studium des Einflusses variierender Oberflächenladung, hier unter steigendem Bromidüberschuss (äquimolare Lösungen der Fällungsreagentien: $c = 0,2 \text{ mol/l}$; $V_{\text{Ag}^+} = 5,0 \text{ ml} = \text{konst.}$). Die Aktivitätsbestimmung bei den 34 Fällungen 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 getragerten Radiotracers Thorium-B

(^{212}Pb) [7]. Wenn auch die Veraschung der untersuchten Pflanzenteile die Flüchtigkeit von Blei in Umweltmedien 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).

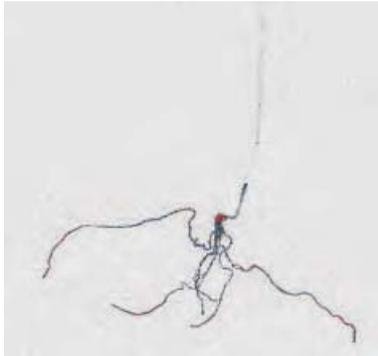


Abb. 8: RPL-Autoradiografie (Bio Rad, Molecular Imager FX, $t_{\text{expo}} = 70 \text{ h}$) von Sommergerste (*hordeum vulgare*; Vor- und Ankeimen 10 d)-Wachstum in Van-de-Crone-Nährlösung (0,11 L) 11 d; danach Trärgabe von Blei(II)nitrat (sodass $c(\text{Pb}^{2+})_{\text{Nährlösung}} = 10^{-4} \text{ mol/L}$) 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 Wiederholun-

gen 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 Speziationchemie 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

THORIUM-232 DECAY CHAIN

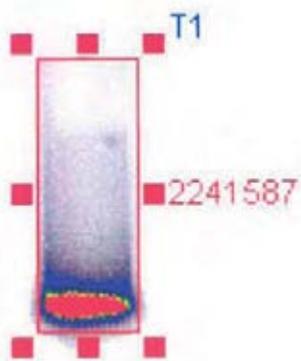
half-life $t_{1/2}$	isotope decay branch, %	α -decay energy, MeV (intensity, %)**	β -decay energy, MeV (intensity, %)**	γ -emission energy, keV (intensity, %)*
1.405*10 ¹⁰ y	²³² ₉₀ Th 100 ↓ α	α : 4.0123 (78.2) α : 3.9472 (21.7)		γ : 63.81 (0.263) γ : 140.88 (0.021)
5.75 y	²²⁸ ₈₈ Ra 100 ↓ β		β : 0.039 (40) β : 0.013 (30)	γ : 13.42 (1.6) γ : 16.2 (0.72)
6.15 h	²²⁸ ₈₉ Ac 100 ↓ β		β : 1.158 (29.9) β : 1.731 (11.66) β : 2.069 (8.6) β : 0.596 (8.0) β : 1.004 (5.92) β : 0.974 (5.1)	γ : 911.20 (25.8) γ : 968.97 (15.8) γ : 338.32 (11.27) γ : 964.77 (4.99) γ : 463.00 (4.40) γ : 794.95 (4.25)
1.9131 y	²²⁸ ₉₀ Th 100 ↓ α	α : 5.4232 (72.2) α : 5.3404 (27.2) α : 5.221 (0.420)		γ : 84.37 (1.22) γ : 215.98 (0.254) γ : 131.63 (0.130)
3.66 d	²²⁴ ₈₈ Ra 100 ↓ α	α : 5.6854 (94.92) α : 5.4486 (5.06)		γ : 240.99 (4.10) γ : 292.70 (0.0062)
55.6 s	²²⁰ ₈₆ Rn 100 ↓ α	α : 6.2881 (99.89) α : 5.747 (0.114)		γ : 549.73 (0.114)
0.145 s	²¹⁶ ₈₄ Po 100 ↓ α	α : 6.7783 (100)		γ : 804.9 (0.0019)
10.64 h	²¹² ₈₂ Pb 100 ↓ β		β : 0.335 (82.5) β : 0.574 (12.3) β : 0.159 (5.17)	γ : 238.63 (43.3) γ : 300.09 (3.28) γ : 115.18 (0.592)
60.55 m	²¹² ₈₃ Bi 35.94 64.06 α ✓ β	α : 6.0508 (70.2) α : 6.0899 (26.8)	β : 2.248 (55.46) β : 1.521 (4.36)	γ : 39.86 (27.7) γ : 288.07 (0.45) γ : 727.33 (6.67) γ : 1620.50 (1.50)
3.053 m 0.298 μ s	²⁰⁸ ₈₁ Tl ²¹² ₈₄ Po 100 100 β ↘ ✓ α	α : 8.785 (100)	β : 1.80 (48.7) β : 1.29 (24.5) β : 1.52 (21.8) β : 1.04 (3.9)	no γ -rays observed γ : 2614.53 (35.64) γ : 583.19 (30.72) γ : 510.77 (8.13) γ : 860.56 (4.465)
stable	²⁰⁸ ₈₂ Pb			

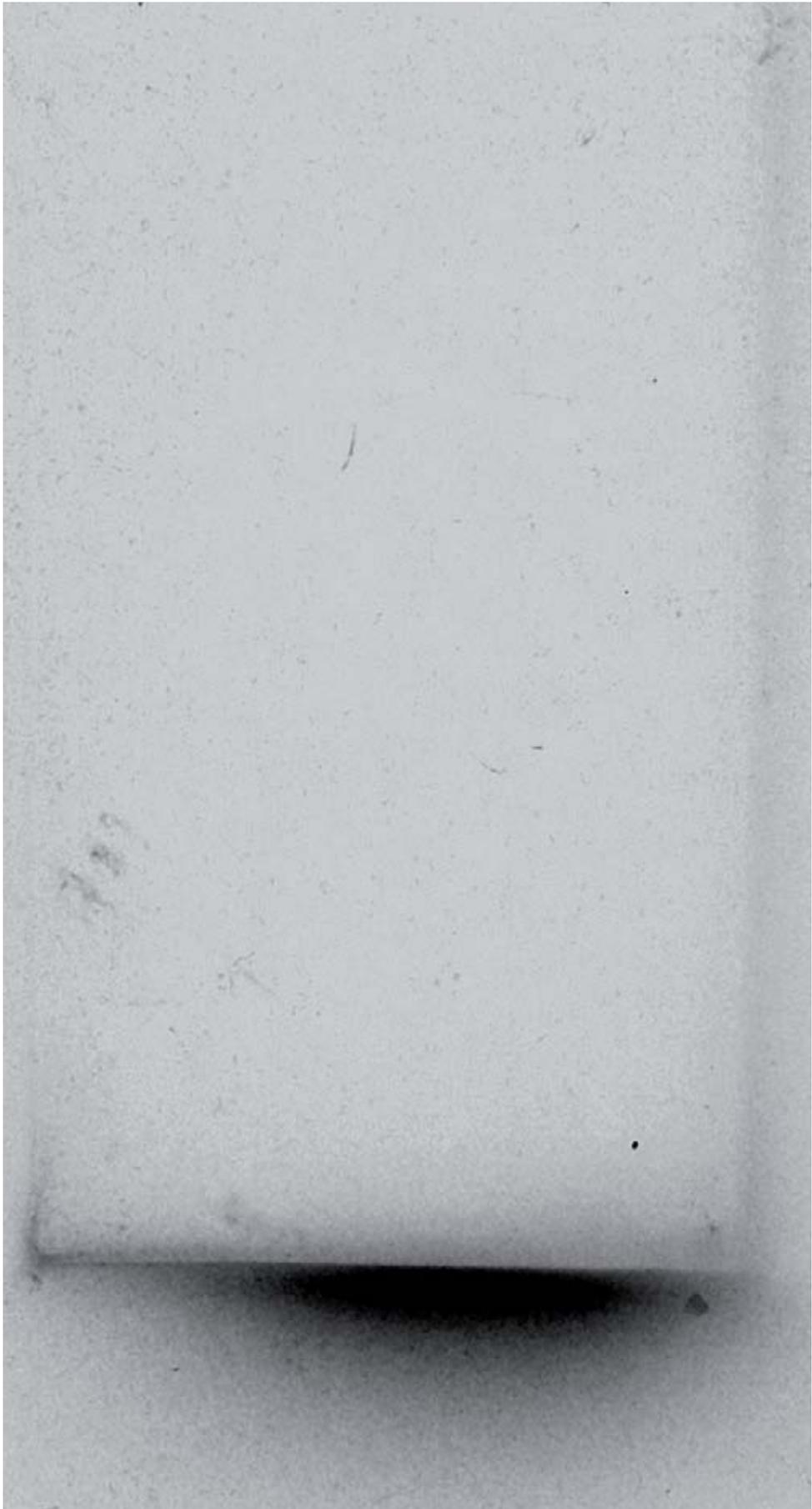
Ref.: End of '00; Version: 3.7, August 2001

* γ -emission: intensity per 100 decays: in equilibrium; ** α -, β -decay: intensity per 100 decays, Σ 100%

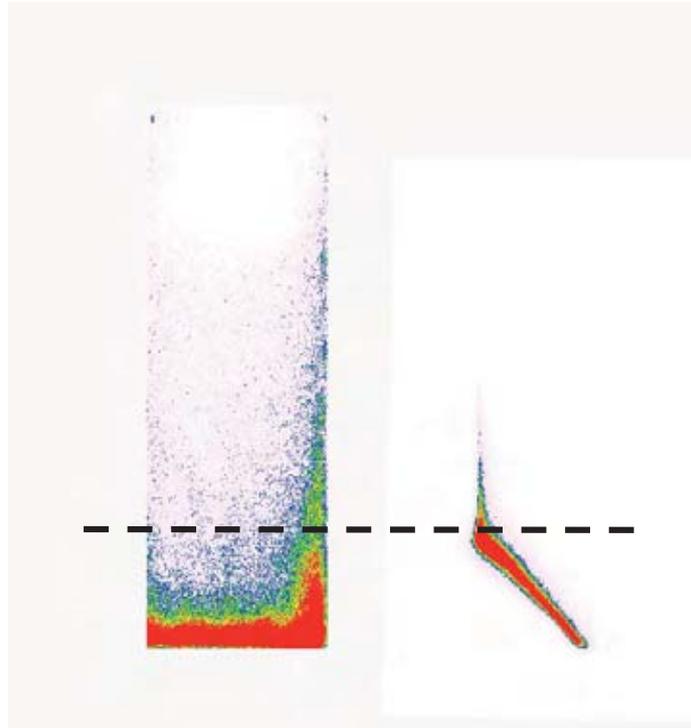
blue: noble gas, cyan: γ -reference line, red: long-lived isotope, green: isotope in equilibrium, attention

Tel.: +49 (0)8026 94465; Fax: +49 (0)8026 94464; Mobil: +49 (0)175 400 7424; Email: wahl@isus.de
Development & Design: © 2001 ISuS all rights reserved, D-83722 Schliersee, P.O. Box 102; Germany





$\xrightarrow[100\%]{\alpha}$	$^{224}_{88}\text{Ra}$ $T_{1/2}=3,66\text{d}$	$\xrightarrow[100\%]{\alpha}$	$^{220}_{86}\text{Rn}$ $T_{1/2}=55,6\text{sd}$	$\xrightarrow[100\%]{\alpha}$ $6,3\text{MeV}$	$^{216}_{84}\text{Po}$ $T_{1/2}=0,15\text{s}$	$\xrightarrow[100\%]{\alpha}$ $6,8\text{MeV}$	$^{212}_{82}\text{Pb}$ $T_{1/2}=10,6\text{h}$	$\xrightarrow[100\%]{\beta}$
-------------------------------	--	-------------------------------	---	--	--	--	--	------------------------------



Verifizierung des Hahnschen Fällungs- satzes

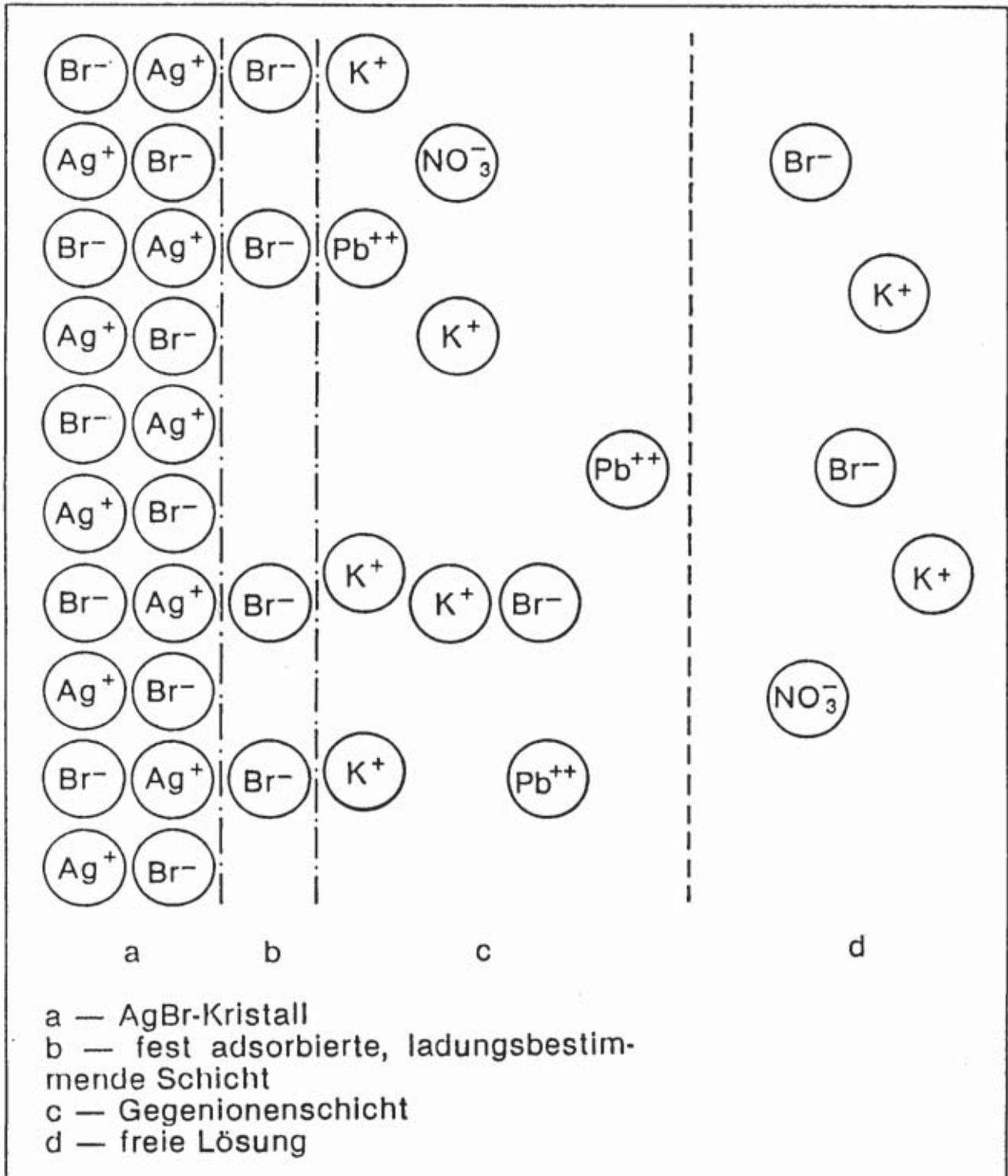
Die systematische Untersuchung der verschiedensten Fällungssysteme führte OTTO HAHN zur Aufstellung seiner berühmten Fällungsregel:

»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.«

Im folgenden Experiment soll trägerfreies $[^{212}\text{Pb}]$ Blei als Indikator zur Untersuchung der Oberflächenladung von Silberchlorid-Niederschlägen, die unter nicht stöchiometrischen Bedingungen gefällt wurden, angewendet werden. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Versuchsansätze.

Kristall	nicht bewegliche Doppelschicht	freie Lösung	Kristall	nicht bewegliche Doppelschicht	freie Lösung
Ag ⁺ Cl ⁻			Ag ⁺ Cl ⁻	Ag ⁺	
Cl ⁻ Ag ⁺	Cl ⁻		Cl ⁻ Ag ⁺	NO ₃ ⁻	
Ag ⁺ Cl ⁻	K ⁺		Ag ⁺ Cl ⁻	Ag ⁺	
Cl ⁻ Ag ⁺	Cl ⁻		Cl ⁻ Ag ⁺	NO ₃ ⁻	
Ag ⁺ Cl ⁻	K ⁺		Ag ⁺ Cl ⁻	Ag ⁺	
Cl ⁻ Ag ⁺	Cl ⁻		Cl ⁻ Ag ⁺	NO ₃ ⁻	
Ag ⁺ Cl ⁻	K ⁺		Ag ⁺ Cl ⁻		
Cl ⁻ Ag ⁺			Cl ⁻ Ag ⁺		
Ag ⁺ Cl ⁻			Ag ⁺ Cl ⁻	Ag ⁺	
Cl ⁻ Ag ⁺	Cl ⁻		Cl ⁻ Ag ⁺	NO ₃ ⁻	
Ag ⁺ Cl ⁻			Ag ⁺ Cl ⁻	Ag ⁺	
	↑			↑	
Potentialbestimmender innerer Teil der Doppelschicht					
AgCl ↓ bei KCl im Überschuß			AgCl ↓ bei AgNO ₃ im Überschuß		
<i>Oberflächenladung von Silberchlorid-Kristallen, die aus Überschußfällung hervorgehen (aus [8]).</i>					

Ausschnitt eines Silberbromidkristalls mit negativ geladener Oberfläche



Begleitunterlagen:

Großes Radiometrisches Praktikum

HM

k: Die Kunst der Autoradiographie

I. Photoemulsion

Prof. Dr. Schwankner

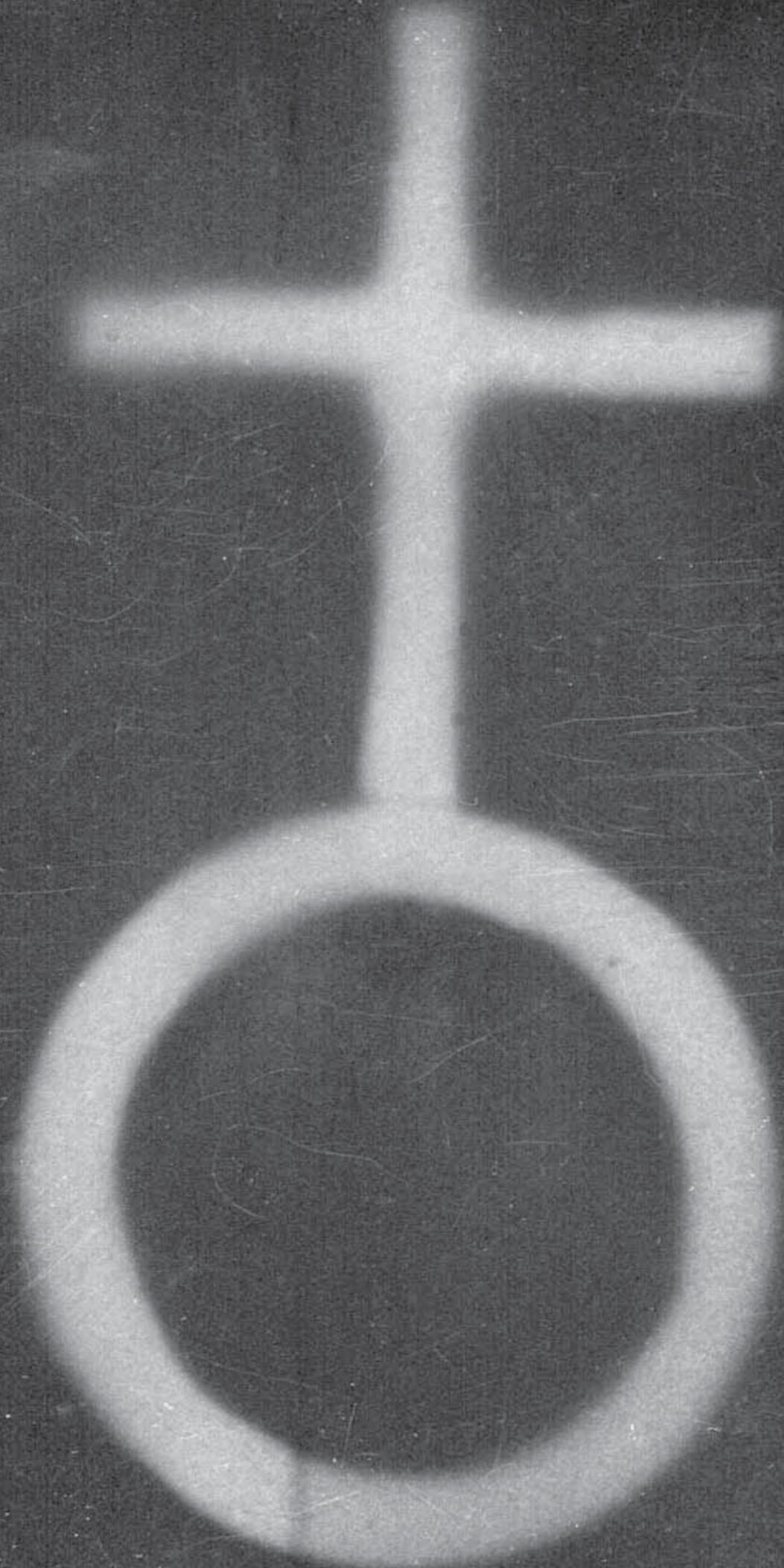
Türkenstraße 78

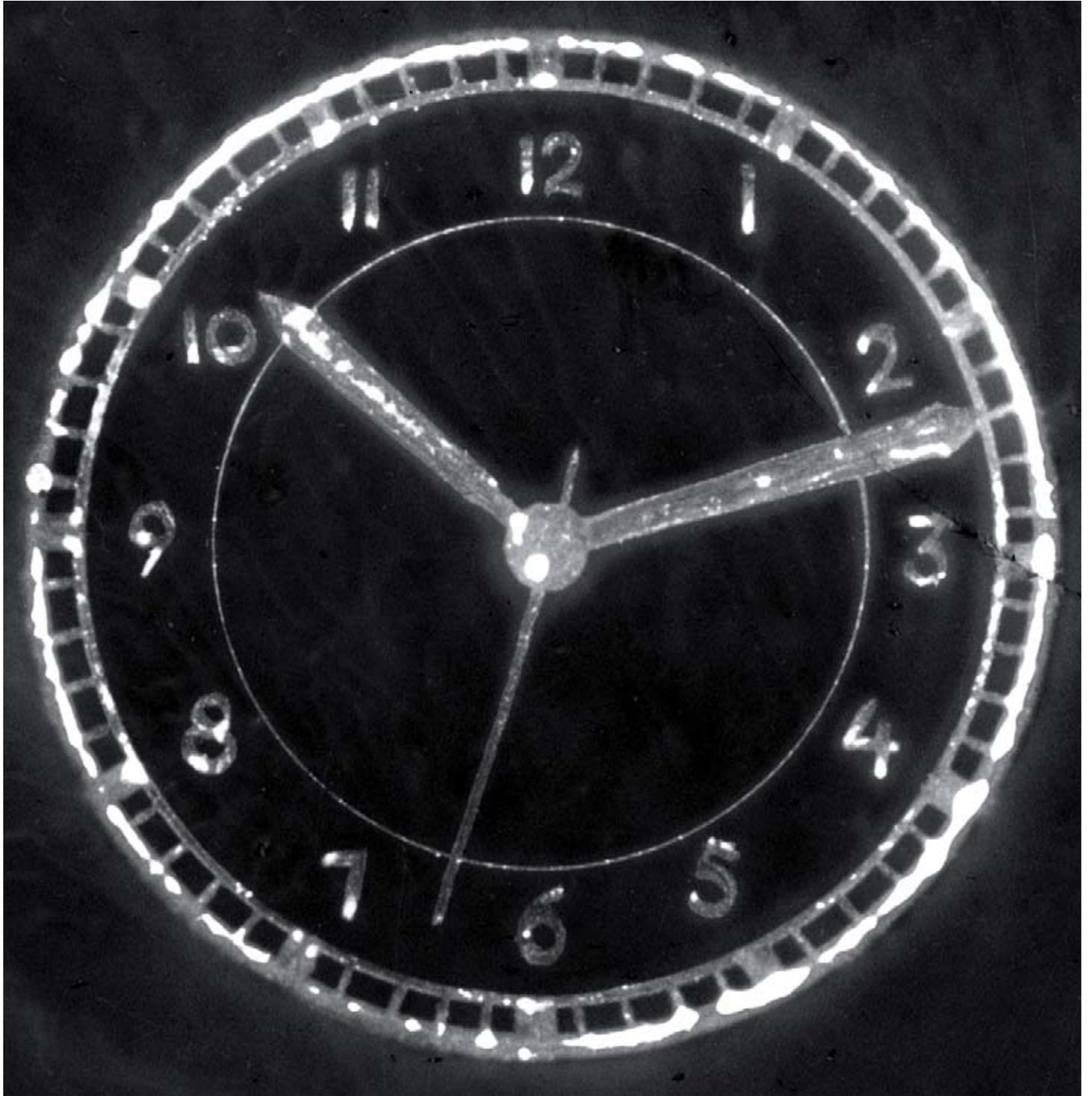
80799 München

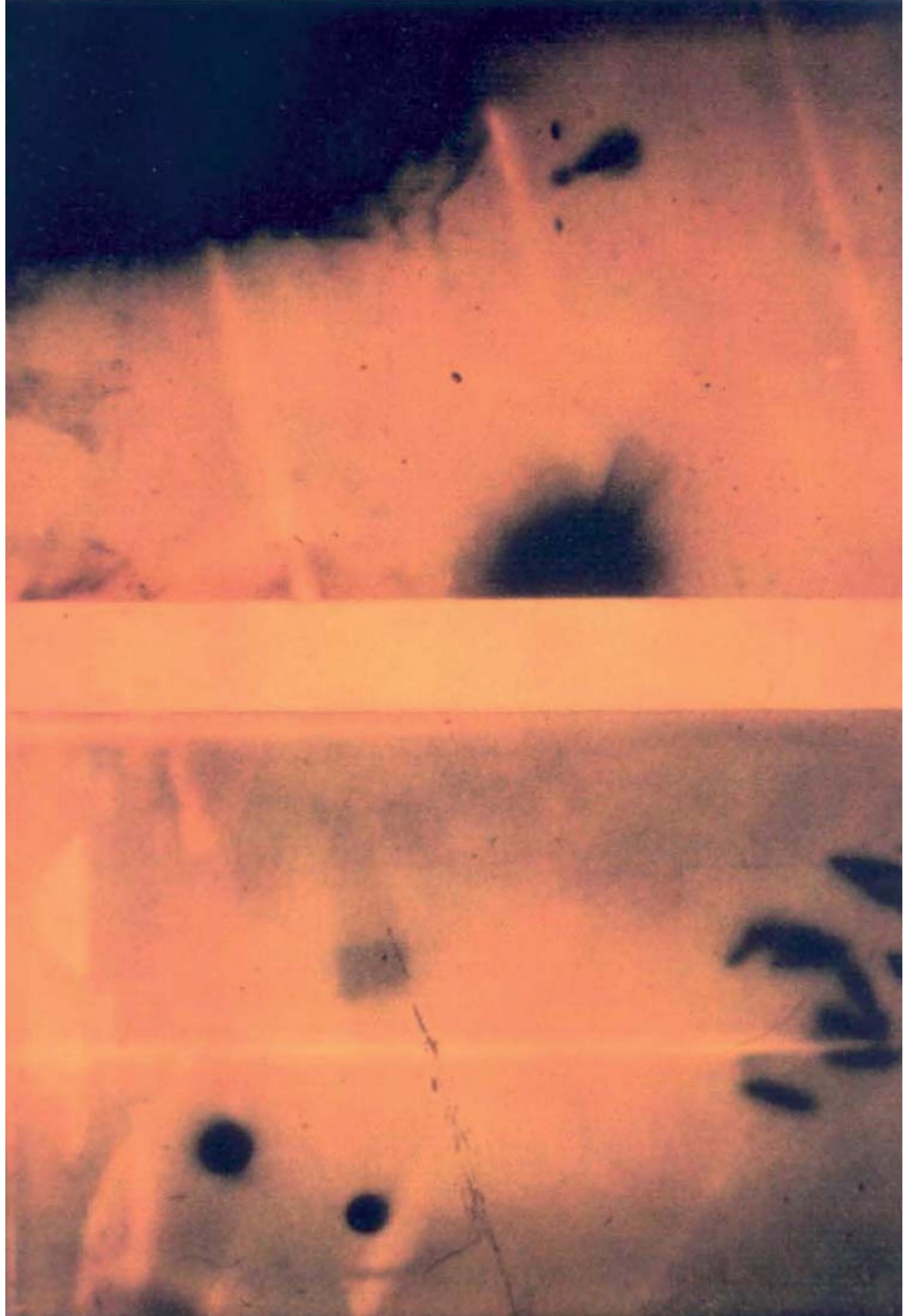
Lab.: 089/1265-2608

Büro.: 089/1265-2667

priv.: 089/33019260

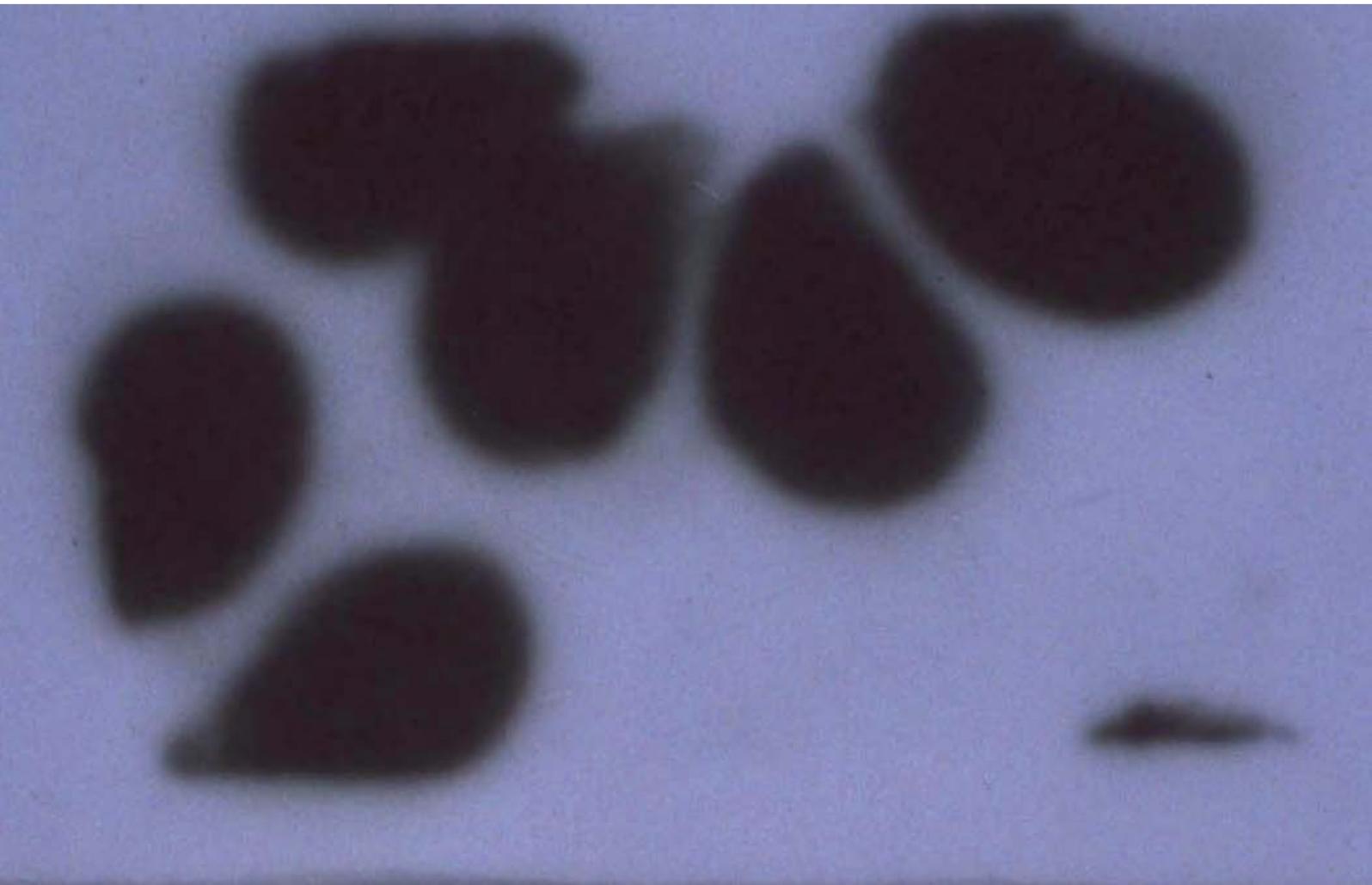












GDCh

Nachrichten

aus der Chemie

01 | 2008

Zeitschrift der
Gesellschaft
Deutscher
Chemiker

ISSN 1439-6598
56 (01) 1 - 108
D 4158
Januar 2008

Zukunft der Chemie

George Whitesides: „Mo

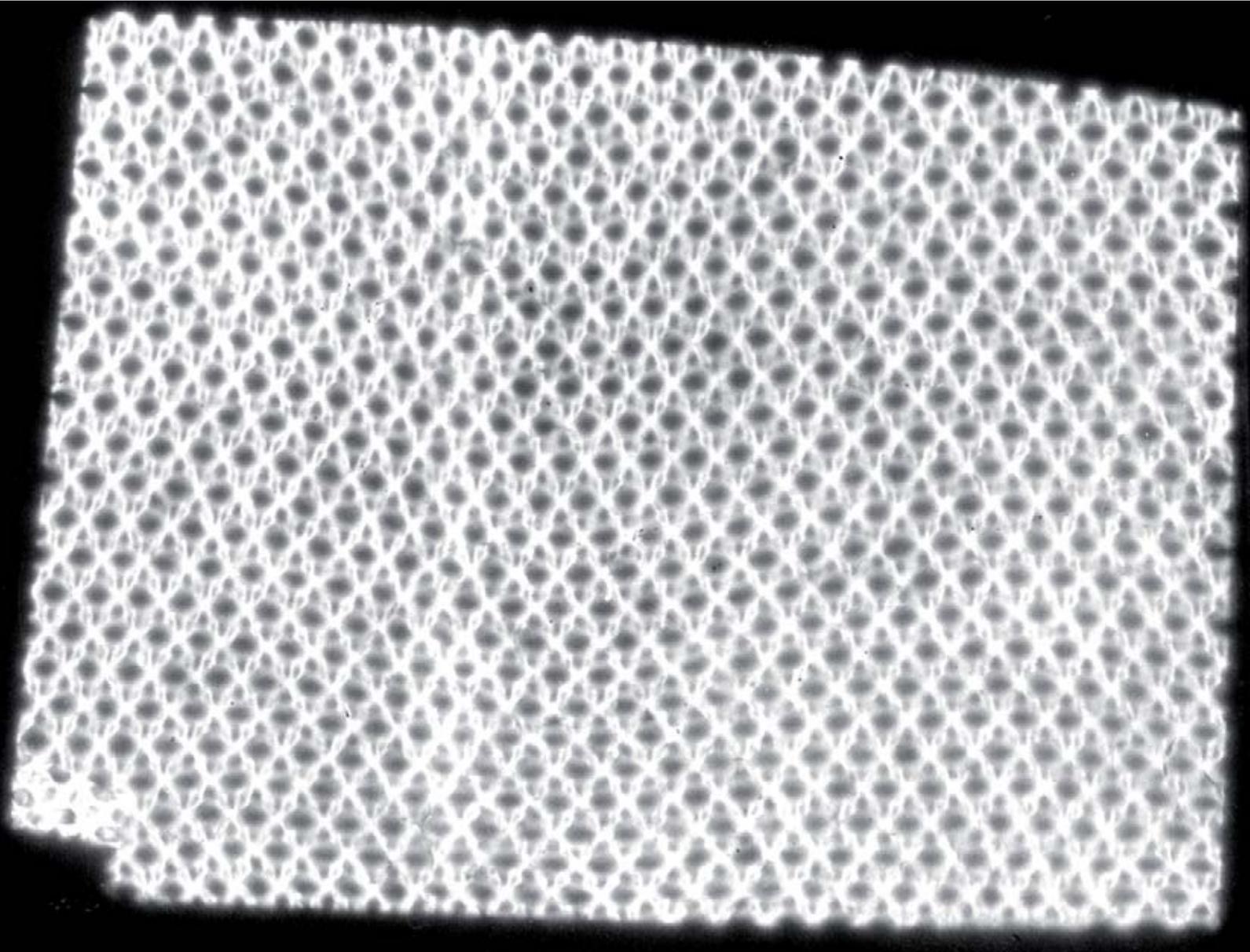
Materialien

Biomineralisation verste

Chemiekalender 2008

PVSt, Deutsche Post AG, Entgelt bezahlt, #1430
04158#29491#0108

Herrn
Prof. Dr. Robert Josef Schwankner
Turkenstr 78
80799 München



Autoradiografie – Sensor für Radioaktivität

Von E. W. Haas und U. Wimmer
Radiochemisches Laboratorium der Siemens AG, Erlangen
Unternehmensbereich Kraftwerk Union

Die Schwärzung von fotografischem Filmmaterial durch die Strahlung radioaktiver Materialien stellt eine Möglichkeit dar, ohne aufwendige Meßgeräte Radioaktivität in Umweltproben zu orten. Prinzipiell ist jedes fotografische Material geeignet, wenn auch Röntgenfilm erheblich kürzere Belichtungszeiten erlaubt. Da Belichtungszeiten bis zu einigen Monaten möglich sind, können in Materialien mit homogener Radioaktivitätsverteilung noch rund 0,1 emittierte α - oder β -Teilchen/cm² · s nachgewiesen werden. Durch Verwendung von α -Strahlung absorbierenden Folien läßt sich eine Unterscheidung von α - und β -Strahlung erreichen. Die Belichtungszeiten auf Röntgenfilm für einige typische Umweltproben wie Leuchtziffern von Uhren, Glühstrümpfe für Gasleuchten, uranhaltigen Sandstein und Molkepulver liegen zwischen 5 Minuten und 5000 Stunden.

Einleitung

Fotografische Schichten können außer durch Photonen, wie sie das Sonnenlicht oder die Röntgenstrahlung darstellen, auch durch Wechselwirkung mit α - und β -Strahlungsteilchen belichtet werden. Diese Tatsache führte 1896 zur Entdeckung der radioaktiven Strahlung durch *Henry Becquerel*: Er hatte ein uranhaltiges Mineral auf einen verpackten unbelichteten Film gelegt und stellte später mit Erstaunen die partielle Belichtung des Filmes fest. Nach Erkennen des Zusammenhangs war die Schwärzung fotografischer Schichten lange Zeit die ausschließliche Methode zum Nachweis von Strahlung aus atomaren Zerfallsprozessen, bis physikalische Meßmethoden dieses übernahmen. Sie findet auch heute noch Anwendung in Form der Filmplaketten bei der Personendosisüberwachung in Strahlungsbereichen.

Diese als Autoradiografie bezeichnete Technik [1] wird zur Erkennung insbesondere der Verteilung absichtlich eingebauter Radioaktivität recht umfangreich in der medizinischen und biologischen Forschung, aber auch in der Geologie, Festkörperanalytik, Kriminalistik u. a., eingesetzt.

Die breite öffentliche Diskussion um die künstlich erzeugte Radioaktivität durch z. B. Kernkraftwerke und Atomwaffen hat auch dazu geführt, daß die schon immer vorhandenen natürlichen radioaktiven Stoffe auf der Erde intensiver betrachtet wurden. Sie aufzuspüren ist neben dem Geigerzähler auch mit Hilfe der Au-

toradiografie für den Nichtfachmann relativ einfach möglich, soweit er über eine Dunkelkammer oder zumindest eine Sofortbildkamera verfügt. Hierbei kommt man recht schnell zu der für viele überraschenden Erkenntnis, daß Radioaktivität aus natürlichen Quellen in unserer Umwelt außerordentlich weit verbreitet ist und die Strahlenexposition daraus ein Vielfaches dessen ist, was aus künstlich erzeugter Radioaktivität hinzugekommen ist.

Wie entsteht eine Autoradiografie?

Setzt man eine fotografische Schicht der Strahlung eines radioaktiven Präparates aus, dann erhält man nach dem fotografischen Ent-

wickeln einen Film, auf dem unterschiedliche Konzentrationen der Radioaktivität durch entsprechende Schwärzungsgrade angezeigt sind. Die für die Überführung des Halogenidkristalls (AgCl, AgBr, AgI) in einen fotografisch entwickelbaren Zustand notwendige Energie wird im wesentlichen von den α - oder β -Teilchen des radioaktiven Präparates geliefert. γ -Quanten wirken nur indirekt, d. h. über sekundär erzeugte Elektronen auf die fotografische Schicht. Die Schwärzungsausbeute für γ -Strahlung gegenüber β -Strahlung gleicher Energie (0,3 MeV) ist um rund einen Faktor 100 kleiner.

Weitere Einflußfaktoren auf die Schwärzungsausbeute sind:

- Güte des Kontaktes von Film und Probenmaterial
- Art und Energie der Strahlungsteilchen
- Dichte und Dicke des Probenmaterials
- Tiefenverteilung der Radioaktivität im Probenmaterial
- Art des Filmmaterials

Wenn alle Bedingungen konstant gehalten werden, können Autoradiografien auch quantitativ ausgewertet werden. Ansonsten haben autoradiografische Aufnahmen qualitative Aussagekraft.

Tabelle 1: Mögliche Fotomaterialien für die Autoradiografie

Fotomaterial	erforderliche Belichtungszeit für S = 0,5*	Bemerkungen
Kodak, Röntgenfilm DEF	1 Std.	
Agfa, Röntgenfilm D7	3 Std.	
Agfa, 23D56 für Elektronenmikroskopie	70 Std.	
Agfa, Planfilm 100 ASA	32 Std.	
25 ASA	36 Std.	
Tetenal, Photopapier TT Speed 310	-	gute Belichtung bei 100 Std.
Polaroid, Typ 52 für Flachkassette	17 Std.	durch Verpackung hindurch belichtet; Schärfeverlust
Polaroid, Typ 57 für Flachkassette	16 Std.	

* S = Schwärzung; zur Belichtung wurde der Torbernit-Kristall aus Abb. 1a eingesetzt [Uran-Mineral der Zusammensetzung (UO₂)₂CuP₂O₆ · H₂O].

Vorgetäuschte Belichtungen können entstehen, wenn chemische Reaktionen (z. B. durch Feuchtigkeit oder Reinigungsrückstände im Probenmaterial) zwischen Probe und Film auftreten, wenn bei scharfkantigen Proben zu hohe Drücke auf den Film ausgeübt werden oder wenn bei durchsichtigen Probenmaterialien Lumineszenzeffekte auftreten. Für den wissenschaftlich-technischen Einsatz der Autoradiografie sind noch eine Reihe weiterer Einflußgrößen zu beachten, was hier jedoch außer acht gelassen werden soll.

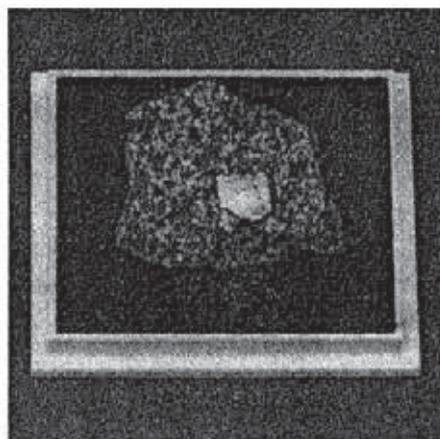


Abb. 1a: Torbernitkristall auf Muttergestein Pegmatit

Geeignetes fotografisches Material

Für die wissenschaftlich-technische Anwendung wird hauptsächlich Röntgenfilm eingesetzt. Aufgrund der beidseitigen Belegung mit fotografischer Schicht weisen unsensibilisierte Röntgenfilme eine hohe Empfindlichkeit auf. Weiter werden alle Filme mit hoher Elektronenempfindlichkeit (Elektronenmikroskopie) genutzt, insbesondere zur Erzielung einer hohen Ortsauflösung, wenn genügend Strahlung zur Verfügung steht. Wie Tab. 1 erkennen läßt, sind auch andere Fotomaterialien einsetzbar, allerdings erfordern sie erheblich längere Belichtungszeiten.

Durchführung von autoradiografischen Aufnahmen an Proben aus der Umwelt

Das Probenmaterial sollte eine ebene Oberfläche aufweisen. Diese kann notfalls durch trockenes Schleifen erzielt werden. Um chemische Reaktionen mit der Filmschicht zu verhindern, ist es empfehlenswert, ein Stück dünne Haushaltsfolie zwischen Objekt und Film vorzulegen.

Derart vorbereitet wird die Untersuchungsprobe auf den gewählten Film aufgelegt. Der Auflage sollte etwa bei 10 g/cm^2 liegen. Während der Belichtungsdauer ist natürlich der Einfall von Licht zu unterbinden und auch einem Verrücken der Probe auf dem Film vorzubeugen. Die Entwicklung und Fixierung wird nach den Herstellerangaben für das verwendete Fotomaterial vorgenommen.

gen natürlich radioaktive Bestandteile enthält. Beispiele für radioaktivitätshaltige Materialien, bei denen dies der Nichtfachmann nicht erwartet, zeigt Tab. 2.

Materialien, in denen höhere Gehalte an natürlich radioaktiven Elementen vorkommen, gibt es genügend. Eine wertvolle Hilfe zum Auffinden kann eine Zusammenstellung von Vorkommen und Fundorten von J. Martin [2] sein.

Beispiele für autoradiografische Aufnahmen an Proben aus der Umwelt

Die in den Abbildungen 1 bis 10 gezeigten Vergleiche von Fotografie der untersuchten Objekte (links) und resultierender Autoradiografie (rechts) lassen die Eignung von fotografischen Filmschichten als Sensor für die Radioaktivität und für deren örtliche Verteilung recht eindrucksvoll erkennen. Verursacht wurde die Filmschwärzung von den in Tab. 3 zusammengestellten Gehalten an radioaktiven Elementen in diesen Materialien.

Dabei überraschen sicherlich einige Objekte sowohl hinsichtlich der Tatsache, daß sie Radioaktivität enthalten, als auch bezüglich der Strahlungsintensität (die in etwa aus der

Die Belichtungsdauer kann für ähnliche Objekte, wie sie hier aufgezeigt werden, aus den angegebenen Zeiten unter Berücksichtigung der Empfindlichkeit des eingesetzten Films (Tab. 1) grob abgeschätzt werden. An einer mehrmaligen Exposition wird man jedoch oft nicht vorbeikommen, da der Radioaktivitätsgehalt selbst in ähnlichen Objekten recht unterschiedlich sein kann. Zur Unterscheidung des Belichtungsanteils aus α - bzw. β -Strahlungsanteilen kann eine 2. Belichtung mit einem zwischengelegten Blatt Schreibpapier dienen. Es sei an dieser Stelle auch darauf hingewiesen, daß es auf der Erde kein Material gibt, das nicht wenigstens in geringsten Men-

Tabelle 2: Beispiele für U- und Th-Gehalte in technischen Materialien

Produkt	beobachtete Gehalte in %	Verwendungsbeispiele
ZrO ₂ -Pulver	U 0,15 Th 0,02	Schlichte beim Metallgießen
SiO ₂ -Pulver	U 10 ⁻⁴ -10 ⁻⁷ Th 10 ⁻³ -10 ⁻⁷	Füllstoff in Kunststoffen
SiC- u. Al ₂ O ₃ -Keramiken	U 10 ⁻¹ -10 ⁻³ Th 10 ⁻² -10 ⁻⁴	Wicklungsträger
Quarzrohre	U 10 ⁻⁴ -10 ⁻⁷ Th 10 ⁻⁵ -10 ⁻⁸	Chemie
Aluminium, techn.	U $\approx 10^{-4}$ Th $\approx 10^{-1}$	allgemeine Technik
Aluminium, rein	U $\approx 10^{-9}$ Th $\approx 10^{-7}$	Reinstoff-Technik
Silicium, techn.	U 10 ⁻⁴ -10 ⁻³ Th 10 ⁻³ -10 ⁻³	Metallindustrie, Ausgangsmaterial für Solarzellen
Graphit, hochrein	U $\approx 10^{-9}$ Th $\approx 10^{-6}$	Elektrotechnik
PVDF-Kunststoff	U 10 ⁻⁷ -10 ⁻⁸	Leitungen und Behältnisse für reine Gase und Flüssigkeiten
PVI-Kunststoff	U 10 ⁻⁷ -10 ⁻⁸ Th 10 ⁻⁷ -10 ⁻⁹	Elektrotechnik

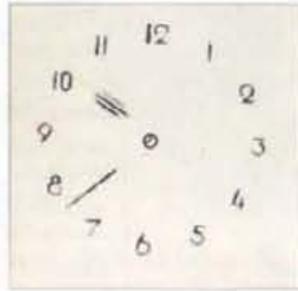
Vergleich von Fotografie und Autoradiografie an Materialien aus Umwelt und Technik

Fotografie

Autoradiografie

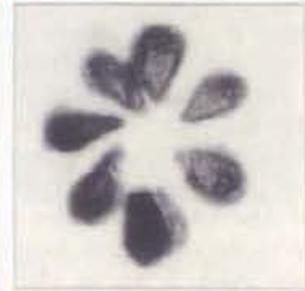
Fotografie

Autoradiografie



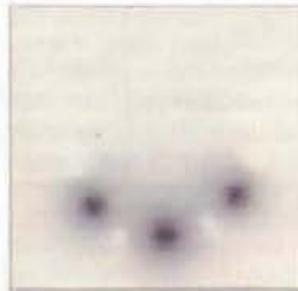
Wecker

Abb. 1



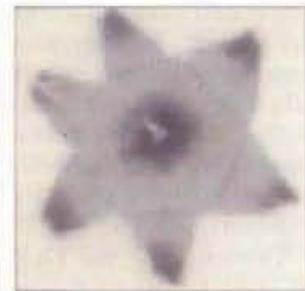
Fliese

Abb. 2



Halskette

Abb. 3



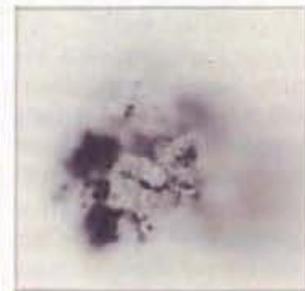
Glühstrumpf

Abb. 4



Burgsandstein

Abb. 5



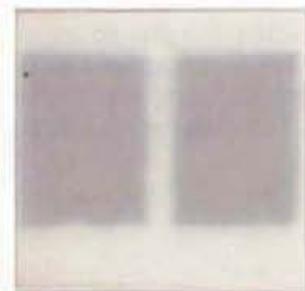
Steinkohle

Abb. 6



Mineraldünger

Abb. 7



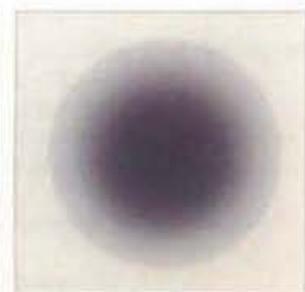
Pottasche

Abb. 8



Molke

Abb. 9



Fotoobjektiv

Abb. 10

Belichtungsdauer abgelesen werden kann).

Bei Anzeigeelementen, z. B. Uhren, wurde bis in die 50er Jahre den Leuchtschichten Radium beigegeben, um ein dauerhaftes Nachleuchten zu erzielen, Abb. 1. Moderne Uhren enthalten in der Leuchtschicht radioaktives Tritium oder Promethium-147, die eine niederenergetische β -Strahlung aussenden, die im Gegensatz zur Radiumstrahlung die Abdeckscheiben der Uhren nicht mehr durchdringen kann. Die Aufnahme Abb. 1 wurde ohne Abdeckscheibe auf der Uhr erzielt.

Grüne, gelbe, orange und schwarze Farben erzielt man in Gläsern und Glasuren durch Beimengung von Uran und Einhalten bestimmter Schmelzbedingungen. Dies ist die Ursache für die Radioaktivität mancher Fliesen-Glasuren, Abb. 2, aber auch der drei gelben Kugeln einer älteren Halskette, Abb. 3.

Beim Glühstrumpf für Gasleuchten, Abb. 4, rührt die Strahlung vom Thoriumoxid her, das zur Erzielung einer hohen Lichtausbeute das Baumwollgewebe umgibt.

Natürliche Gesteine und Mineralstoffe, Abb. 5 und 6, enthalten in unterschiedlichen Konzentrationen immer die natürlich radioaktiven Elemente Uran und Thorium im Gleichgewicht mit all ihren radioaktiven Zerfallsgliedern (z. B. Radium und Radon sind zwei davon). Auch Minerale Dünger natürlicher Herkunft sind immer U- und Th-haltig, Abb. 7. Der Grund dafür ist hauptsächlich in geologischen Vorgängen zu suchen, wobei durch Ionenaustausch- und Fällungsreaktionen von gelösten U- und Th-Verbindungen ein Einbau erfolgte.

Tabelle 3: Radioaktivitäten in den Objekten Abb. 1 bis 10

Objekt	Radioaktivität	Art	Belichtungszeit in Stunden*)
1 Wecker	Radium	natürlich; absichtlich eingebaut	0,1
2 Fliese	Uran	natürlich; absichtlich eingebaut	10
3 Halskette	Uran	natürlich; absichtlich eingebaut	250
4 Glühstrumpf	Thorium	natürlich; absichtlich eingebaut	60
5 Burgsandstein	Uran	natürlich	600
6 Steinkohle (aus Franken)	Uran	natürlich	200
7 Minerale Dünger	Uran, Kalium, Thorium	natürlich	1000
8 Pottasche	Kalium	natürlich	1000
9 Molke	Caesium, Kalium	künstlich, natürlich	5000
10 Fotoobjektiv	Thorium	natürlich; absichtlich eingebaut	10

*) auf Röntgenfilm DEF für eine Schwärzung von $S = 0,5$

Das lebenswichtige Element Kalium, das ebenfalls natürlich radioaktiv ist, tritt im menschlichen Körper mit rund 4000 Becquerel auf. Es ist auch in allen Pflanzen und Mineralstoffen zu finden. Hohen Konzentrationen an Kalium begegnen wir z. B. bei im Haushalt gebrauchten Salzen, Abb. 8, im Kalidünger und in vielen Glaswaren, insbesondere im Bleiglas.

Auch die viel diskutierte Molke enthält grundsätzlich rund 2000 Bq Kalium pro kg, Abb. 9, wenn sie auch derzeit zusätzlich mit radioaktivem Caesium aus den oberirdischen Kernwaffenversuchen und dem Tschernobylunglück verunreinigt ist.

Beim Fotoobjektiv, Abb. 10, rührt der Radioaktivitätsgehalt von ab-

sichtlich zugemischtem Thorium her. Dies dient der Erzielung einer speziellen Farbvergiftung.

Literatur

- [1] H. A. Fischer, G. Werner: Autoradiografie, Verlag de Gruyter & Co, Berlin 1971.
- [2] J. Martin: Aufbau und Vorführung von Sammlungen radioaktiver Materialien aus Umwelt und Technik; Kraftwerk Union AG, Bestell-Nr. A 96000-V 1728.

Dieser Artikel kann als Druckschrift sowie mit einem Foliensatz für Unterrichtszwecke bei Siemens AG, UB KWU, U PK 14, erworben werden.

Begleitunterlagen:
Großes Radiometrisches Praktikum
HM

k: Die Kunst der Autoradiographie

II. MWPC

Prof. Dr. Schwankner
Türkenstraße 78
80799 München
Lab.: 089/1265-2608
Büro.: 089/1265-2667
priv.: 089/33019260

Zwei Anwendungen von Thorium

Die weite Verbreitung von $Z = 90$, Thorium, in Legierungen sowie in Oxidform führt über verschiedene Expositionspfade zu einer messbaren strahlenhygienischen Belastung bei Produktion und Umgang. Wegen der ausgeprägten Radiotoxizität von Alphastrahlern kommt deshalb einer näheren Betrachtung dieser anthropogen erhöhten natürlichen Strahlenexposition Bedeutung zu.

1 $[^{232}\text{Th}]$ Thorium und seine Folgeprodukte

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 (vom 12. 4. 1898) entdeckt [1]. Da die dokumentierten Eigenschaften der Thorium- und Uranstrahlen vorerst ähnlich erschienen, schlug M. CURIE die Bezeichnung »radioaktive Elemente« für Uran, Thorium ... vor.

Die zunächst unter Anleitung von Sir W. RAMSAY ausgeführte qualitative und quantitative Analyse ceylonesischen Thorianits durch den Postdoktoranden O. HAHN führte 1905 bzw. 1907 zur Entdeckung von zwei neuen Alphastrahlern hoher spezifischer Aktivität, welche sich als wohlfeile, leichter zu gewinnende Radiumersatzstoffe aus der $(4n)$ -Zerfallsreihe erwiesen: Mesothor (^{228}Ra)Radium, $T_{1/2} = 5,8$ a) und Radiothor (^{228}Th)Thorium, $T_{1/2} = 1,9$ a) [2].

Bei radiometrischen Untersuchungen von thoriumhaltigen Proben ist deren Abtrennzeit und -vorgeschichte von Bedeutung, da es dabei aus der Sicht des klassischen Trennungsgangs um die simultane Abtrennung aller Thoriumisotope geht. Danach wächst die Thoriumzerfallsreihe folglich von zwei (!) Stellen aus nach, woraus ein transientes, ein Übergangsverhalten resultiert, d. h. erst nach rd. 60 Jahren stellt sich ein radiogenetisches Gleichgewicht in dem betreffenden Präparat ein. Bis zu diesem Zeitpunkt ermöglicht nuklidspezifische Analyse (z. B. hochauflösende Gamma-spektrometrie) prinzipiell durch Auswertung der unterschiedlichen Nuklidvektoren die Ermittlung des sog. Abtrennalters [3].

Eine weitere Störung des radiogenetischen Gleichgewichts einer Probe kann sich zudem durch innere (Festkörperstruktur) und äußere physikochemische Bedingungen (Druck, Temperatur, Luftfeuchte usw.) einstellen: Das Zerfallsglied $Z = 86$, ^{220}Rn Radon, welches als atomar disperses Edelgas relativ hohe Mobilität aufweist, kann deshalb zumindest teilweise aus der Quelle austreten (Exhalation).

2 Umgang mit thoriumhaltigen Produkten

Produktion und Verwendung von thoriumhaltigen Produkten z. B. in der Optik, in der Lampen- und Rundfunkröhrentechnologie, in Metallurgie und der petrochemischen Katalyse bringen die Problematik des Umgangs mit offenen radioaktiven Stoffen, insbesondere langlebigen Alphastrahlern, ebenso mit sich wie entsprechende Entsorgungsfragen bei den Produkten [4].

Da es sich bei der Alphastrahlung und bei den zugleich gebildeten Rückstoßkernen im Fall der Inkorporation um eine Belastung mit hoher Wechselwirkungs-dichte (Erzeugung vieler Radikal- und Ionenpaare entlang des Weges im Gewebe) handelt, ist eine Analyse der Expositionssituationen und -pfade angezeigt [5]. Der Inhalationspfad mit lungengängigen thoriumhaltigen Aerosolen führt so insbesondere bei schwerlöslichen Verbindungen (z. B. Thoriumdioxid) zu einer ausgeprägten Organbelastung. In Form von mobilen Alphastrahlern wie etwa dem radiogenetischen Thoriumfolgeprodukt ^{220}Rn Radon (»Thoron«) sind es dessen aerosolgetragene Folgeprodukte, die an den inneren Oberflächen des Organsystems ihre Radiolysewirkung entfalten können. Die Hauptexpositionspfade bei typischem Umgang sind also Inhalation, gefolgt von Bestrahlung mit Beta-, Gamma- und Röntgenemission [4] thoriumhaltiger Industrieprodukte. Im Zuge der Vorlage von Grundnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlung auf der Ebenen der Europäischen Gemeinschaft wird hier besonders die erheblich erhöhte Exposition durch natürliche Strahlenquellen »gewürdigt« [6]. Dies ist auch in nationales Recht umzusetzen, so dass im Zuge der entsprechend anstehenden Novellierung der Strahlenschutzverordnung z. B. der Umgang mit thoriumhaltigen Produkten am Arbeitsplatz künftig noch restriktiver geregelt werden wird.

3 Zur Radiometrie in der Thoriumzerfallsreihe

Unterzieht man die Nukleardaten der $(4n)$ -Zerfallsreihe (Abb. 1) einer näheren Untersuchung, so erkennt man, dass sich ^{228}Ac Actinium mit intensiven Gammaemissionen (338 bis 911 keV) im säkularen Gleichgewicht mit dem primordialen Mutternuklid ^{232}Th Thorium befindet und somit als radiogenetischer Thoriumrepräsentant ohne Selbstabsorptionseffekte (also weitgehend matrixunabhängig) radiometrisch

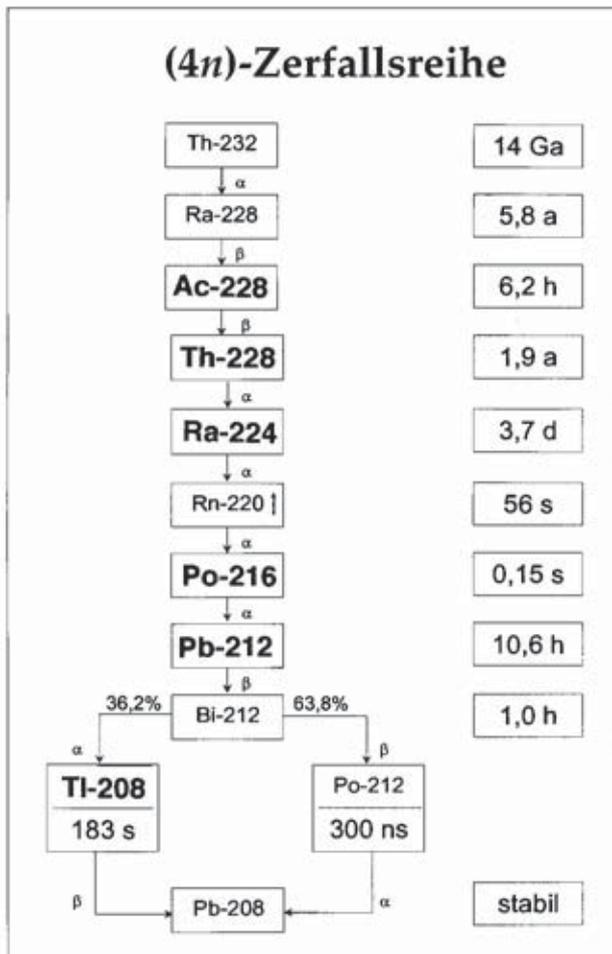


Abb. 1. Thoriumzerfallsreihe ($A = 4n; n \in \mathbb{N}$); Nukleardaten aus [2]. Durch die gemeinsame Abtrennung der Thoriumnuklide bei der Erzaufbereitung wächst die Zerfallsreihe dann unabhängig von zwei Stellen aus nach, von ^{232}Th -Thorium und von ^{228}Th -Thorium. (Fett gedruckte Nuklide sind gut durch HPGe-Gammaspektroskopie erfassbar.)

einfach zugänglich ist. Die Alphaemissionsenergien innerhalb der Glieder der Thoriumzerfallsreihe variieren zwischen 3,9 und 8,8 MeV, die Maximalenergien der freigesetzten Betastrahlung liegen zwischen 15 keV und 2,2 MeV [2].

Mit Hilfe von Filmemulsionen können von thoriumhaltigen Mineralien (z. B. Thorianit) und Sanden (z. B. australischer Monazitsand) bzw. von Industrieprodukten klare Alpha- und, nach mechanischer Diskriminierung mit Flächenabsorbieren, etwas unschärfere Betaautoradiogramme aufgezeichnet werden. Um derartige Aufzeichnungen direkt und nicht erst auf dem Umweg über Photometrie entwickelter photographischer Filme zu erhalten, wird heute das in biochemischen, medizintechnischen und forensischen Laboratorien eingesetzte bildgebende Verfahren der digitalen Autoradiographie angewendet. Im vorliegenden Fall ist es ein Instant-Imaging-System von Packard Instruments, das laterale Auflösung unter Vermeidung von Rasterabtastung der Probe zulässt und mit einer empfindlichen Detektorfläche von 20 cm · 24 cm zum Einsatz kommt. Hierbei handelt es

sich um einen laminierten, gasgespülten ($\phi(\text{Isobutan}) = 1,0\%$, $\phi(\text{Kohlenstoffdioxid}) = 2,5\%$, $\phi(\text{Argon}) = 96,5\%$) Zählkanaldetektor mit vielen tausend Zählkanälen, die gleichmäßig über die Detektionsfläche verteilt sind. Bei der Detektion erfolgt Primärionisation des Zählgases und nachfolgende Gasverstärkung in den Zählkanälen. Eine Zählkanalanordnung wird somit mehr oder weniger häufig von der Emission der flächenhaften Probe angesprochen und damit ein lateral aufgelöstes Bild der Aktivitätsverteilung erhalten (vgl. Abb. 3b–3d). Die laterale Positionierung von Signalen des Microchannel-Array Detectors (MICAD) basiert auf einem integrierten Multi-Wire-Proportional Counter (MWPC), für dessen Entwicklung GEORGES CHARPAK 1992 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde.

Diese neuartige Instrument der bildgebenden Radioanalytik wird derzeit von uns bzgl. seiner Einsatzfähigkeit bei der qualitativen Analyse von lateralen Verteilungen natürlicher Radionuklide, insbesondere von Alphastrahlern, im Hinblick auf quantitative Bestimmung von Oberflächenaktivitäten (Abb. 5) weiterentwickelt.

Mit Hilfe einfacher Beta- und Gammastrahlennachweisgeräte (z. B. Minimonitor der Fa. Genitron, FFM) lassen sich so im Freigrenzenbereich der Strahlenschutzverordnung sowohl bei Proben geologischer Provenienz als auch bei Industrieprodukten interessante »radiometrische Entdeckungen« (z. B. thorierte optische Linsen in der Photographie [4]) machen. Für weitergehende Ansprüche einer hochauflösenden energiedispersiven Gammaanalyse können neben den angebotenen Produkten der Lehrmittelindustrie auch gasmaspektrometrische Messplätze genutzt werden. In der vorliegenden Untersuchung wurde so u. a. ein HPGe-Gammaspektrometer eingesetzt (> 35% Effektivität bezogen auf 3 · 3 Zoll NaI-Detektor; Energieauflösung (FWHM) bei 1,332 MeV \leq 1,9 keV; Peak/Compton-Verhältnis: > 60; Abschirmung: Blei (100 mm), Kupfer (2 mm), Plexiglas (4 mm)).

4 Thoriumhaltige Auerstrümpfe

Eine der ersten industriellen Anwendungen von Thoriumverbindungen geht auf den österreichischen Chemiker CARL AUER VON WELSBACH (1858–1929) zurück, dessen wissenschaftliches Interesse der Trennung, Charakterisierung und Verwendung der Seltenen Erden galt. AUER war im Zuge seiner Studien aufgefallen, dass Baumwollgewebe, welche mit Lanthansalzlösung getränkt waren, nach dem Abfackeln hell leuchteten. Hierbei bewirkt die Form des später als »Auerstrumpf« bezeichneten Mantels ein gleichmäßiges Temperaturfeld (vgl. Abb. 2, 3).

Am 18. 9. 1885 ließ sich AUER seinen ersten Glühkörper unter der Bezeichnung »Aktinophor« mit der Zusammensetzung Magnesia usta ($w = 60\%$), Lanthanoxid ($w = 20\%$), Yttriumoxid ($w = 20\%$) patentieren und legte damit den Grundstein für eine weltweite Gasglühlichtindustrie [7–9].

Der entscheidende Durchbruch kam aber durch die Verwendung von Thoriumsalzen, wobei es sich zeigte,

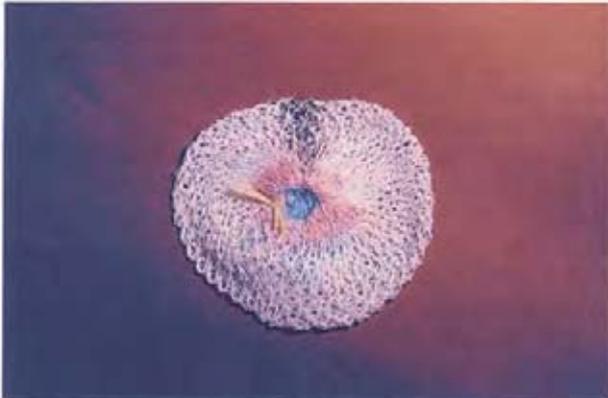


Abb. 2. Handelsübliche ^{232}Th Thorium enthaltende Auerstrümpfe. (Foto: P. Schöffl)

dass mit zunehmender Reinheit der Präparate die Lichtausbeute des nach dem Abflammen des Baumwollgewebes verbleibenden Thoriumdioxidskeletts abnahm. Unter Mitwirkung von L. HAITINGER konnte die bereits erreichte hohe Lichtausbeute durch Zusatz von Cersalzen noch weiter gesteigert werden. Seinen Siegeszug trat AUERS neues Licht, das zeitweilig in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts dem aufkommenden elektrischen Licht den Rang abzulaufen drohte, mit dem 1891 patentierten Oxidgemisch (Thoriumdioxid, $w = 99\%$, und Cerdioxid, $w = 1\%$) an. Über die Homogenität der Thoriumverteilung informieren die Autoradiogramme eines abgeflamten (Abb. 3a) und eines unabgeflamten Glühstrumpfs (Abb. 2, 3b).

Die Oxide der Seltenen Erden unterscheiden sich bezüglich ihres Emissionsverhaltens deutlich von dem des schwarzen Körpers: Sie zeigen eine erhöhte Abstrahlung vorzugsweise im visuellen Bereich des Spektrums. Ein solcher »Selektivstrahler« wird in seiner Eigenschaft durch den im visuellen Bereich absorbierenden Cersatz verstärkt, der nach dem Kirchhoffschen Gesetz dort auch die Abstrahlungsintensität erhöht. Nach N. RIEHL gehen neben diesen mikroskopischen Eigenschaften die gewählte Form des Glühkörpers sowie möglicherweise besondere heterogenkatalytische Eigenschaften hinsichtlich der Verbrennungsvorgänge an der Oberfläche des Oxidgerüsts in die Gesamteigenschaften ein [9].

Das zwischen begeisterten Lobreden und skeptischen Betrachtungen in allgemeinen Gebrauch drängende Licht hat aber auch mit Problemen zu kämpfen: Die geringe mechanische Stabilität des Oxidgerüsts nach dem Abflammen des Baumwollgewebes führt zu Schwierigkeiten. So kam es nicht von ungefähr, dass die bis heute beliebte Straßenbeleuchtung mit Glühstrümpfen nicht in Europa, sondern zuerst in Mumbai (Bombay) eingerichtet wurde.

»Die Berliner Auergesellschaft, die bald auch die Wiener Gesellschaft weit überflügelte, hat sich daraus zu einem Weltunternehmen entwickelt. Die Frage war jetzt nur noch, ob die Strümpfe lang genug halten würden. Als sie zum ersten Male in der Wiener Hofburg ihr Licht ausstrahlten, war das auch die Sorge des alten österreichischen Kaisers Franz Josef. Er fürchtete, daß sie dem Einmarsch der Regimentsmusik nicht gewachsen seien, und behielt recht. Denn einige Glühkörper zerfielen in Staub, als der Tritt der Soldaten und die Schallwellen der Trompeten und Pauken rhythmisch die Luft erschütterten« [7].

Für das Jahr 1913 wird ein jährlicher Weltkonsum an Glühkörpern von 300 Millionen Stück berichtet, von welchen jeder rd. 500 mg Thoriumdioxid enthielt (entsprechend rd. 1000 mg Thoriumnitrat im unabgeflamtem Baumwollgewebe). Um diese Oxidmenge zu garantieren, war eine jährliche Thoriumnitratproduktion von über 300 t bzw. die Aufarbeitung von



Abb. 3a. Autoradiographie eines Ausschnitts eines aufgespannten, nicht abgeflamten Glühstrumpfs (aufgepresst auf die Filmschicht)

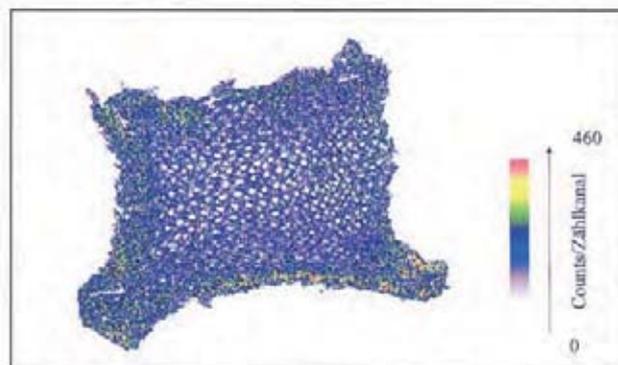


Abb. 3b. Digitales Alphaautoradiogramm eines aufgespannten, nicht abgeflamten Auerstrumpfs (Baumwollgewebe, Messzeit: 66 h). Abgesehen von den Randwülsten zeigt sich eine weitgehend homogene Aktivitätsverteilung im Gewebe.

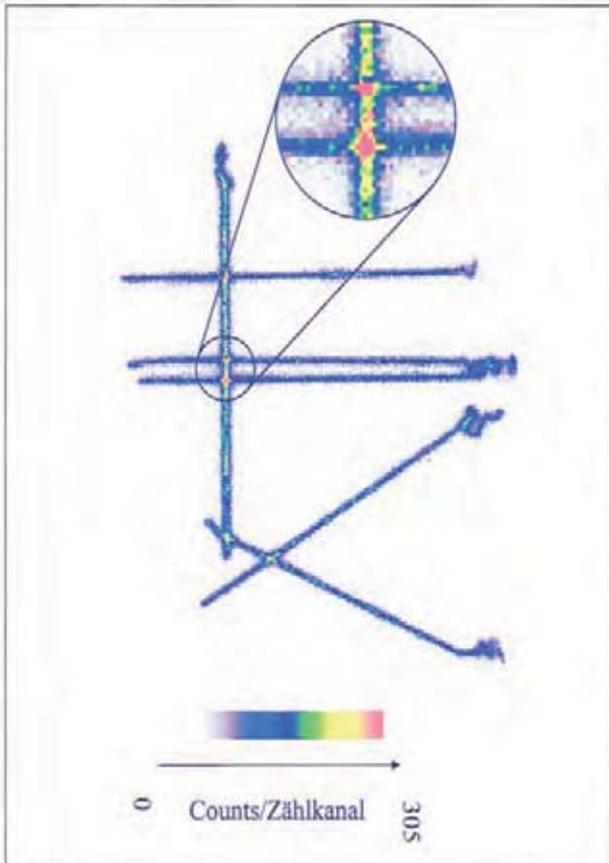


Abb. 3c. Digitales Beta-Autoradiogramm einzelner Fäden eines nicht abgeflamten Auerstrumpfs (Baumwollgewebe, Messzeit: 72 h). Die Empfindlichkeit des Verfahrens zeigt sich durch die Wiedergabe der erhöhten Aktivität an Stellen, an denen sich Fäden kreuzen. Zwei parallel zur x-Achse liegende sich berührende Fäden wirken als Linienstrahler erhöhter Aktivität und dokumentieren die Auflösungsgrenze des Systems.

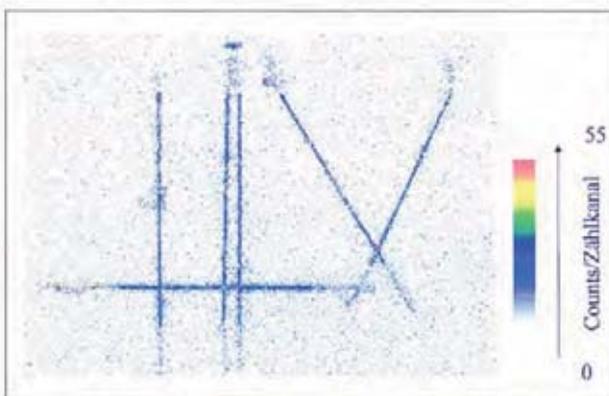


Abb. 3d. Digitales Alpha-Autoradiogramm einzelner Fäden eines nicht abgeflamten Auerstrumpfs (Baumwollgewebe, Messzeit: 72 h). Die Selbstabsorption der Alphastrahlung im Glühstrumpfgewebe macht sich deutlich bemerkbar. Gut erkennbar ist auch im Gegensatz zu Abb. 3c die jeweilige Endpunktfixierung der Fäden, die mit Alphastrahlen absorbierendem Tesafilm auf der Probenunterlage befestigt sind. (Aufn.: A. Bettermann, R. Laubinger, F. Vilser)

3000 t Monazitsand notwendig. Neuere Verbrauchszahlen sind für die USA bekannt, hier wird z. B. 1981 ein Jahresbedarf von 25 Millionen Stück mitgeteilt. Nach eigenen Recherchen lag der über den bayerischen Einzelhandel jährlich abgewickelte Bedarf noch Anfang der 90er Jahre in der Größenordnung von einer viertel Million Glühkörpern und Glühstrümpfen, wobei der Bedarf von Großkunden, also gewerblichen Nutzern wie Stadtwerken, Bahn usw. noch nicht eingeschlossen ist [11].

Die ^{232}Th Thoriumaktivität bewegt sich bei handelsüblichen Glühstrümpfen im Bereich von 1 kBq (Abb. 4a). Die radiogenetische Gleichgewichtssituation ist im Hinblick auf Radonexhalation sowohl im intakten, nicht abgeflamten Glühstrumpf wie auch bei einer Probe, die nach einer Stunde Brenndauer untersucht wurde, weitgehend gegeben.

Aus strahlenhygienischer Sicht ist zum Umgang mit Auerstrümpfen anzumerken, dass dem Expositionspfad Bestrahlung eine untergeordnete, der Inkorporation luftgetragener Alphastrahler (besonders auch beim Abflammen und in der ersten Brennphase) dagegen eine besondere Bedeutung zukommt [11].

Als relativ immobil erwiesen sich dabei von den elf Radionukliden der Zerfallsreihe die Thoriumisotope ^{232}Th Thorium und ^{228}Th Thorium sowie ^{228}Ac Actinium, wohingegen ^{212}Pb Blei und ^{212}Bi Bismut schon während einer Stunde bestimmungsgemäßen Gebrauchs in der Gasflamme in beträchtlichem Umfang (> 30%) in die Verbrennungsgase übergehen, wie durch Vergleich der Nuklidvektoren vor und nach dem Abbrand festgestellt werden kann. Eine Korrelation mit thermodynamischen Daten stützt die experimentellen Beobachtungen. Abbildung 4 zeigt entsprechende Resultate eines Abbrandversuchs.

Da es sich bei mechanisch zerstörten Glühkörpern um alphaaktivitätshaltige Produkte handelt, ist auf die mögliche Kontaminations- und Inkorporationsgefahr beim Umgang ebenso hinzuweisen wie auf die Problematik einer geordneten Entsorgung.

Mitunter können durch die weite Verbreitung solcher radioaktiver Materialien und dem dadurch gegebenen

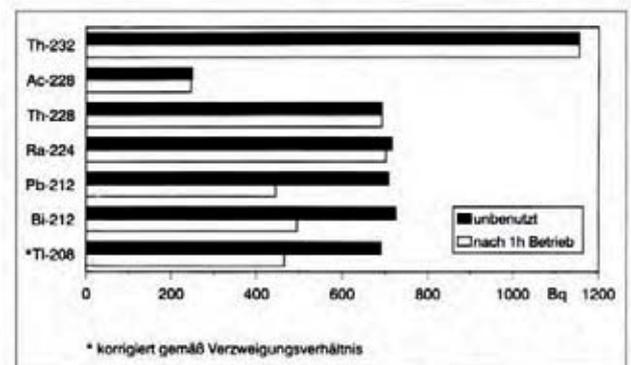


Abb. 4a. Gammastrahlenspektrometrisch ermittelter Nuklidvektor eines nicht abgeflamten Auerstrumpfs (Anchor Mantle Typ 4 D 500/600 C.P.; $m_0 = 3,4 \text{ g}$; $t_M = 3600 \text{ s}$; radiogenetisch ermitteltes Abtrennalter der Thoriumfraktion: $2 \pm 0,1 \text{ a}$) und des gleichen Glühstrumpfs nach einer Stunde Betrieb in der Gasbeleuchtung ($m_1 = 0,9 \text{ g}$).

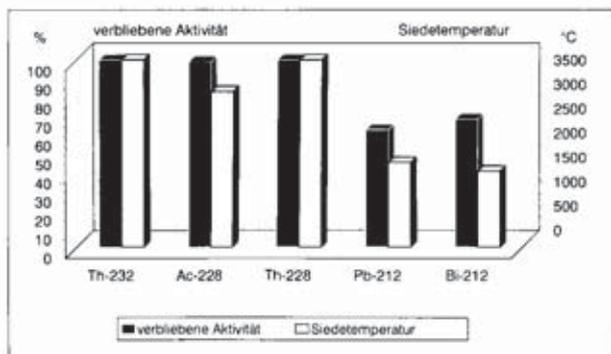


Abb. 4b. Korrelation zwischen Nuklidaustrag und dem Siedepunkt der Elementmetalle bei einem Auerstrumpf im Zuge des Abflammens und eines einstündigen bestimmungsgemäßen Gebrauchs. (Aufn.: C. Feigl, R. J. Schwankner [4, 11])

einfachen Zugang bemerkenswerte Situationen entstehen. Hier kann das nachstehende kurze (einem fünfseitigen Beitrag entnommene) Zitat aus dem Magazin der Süddeutschen Zeitung vom 9. 7. 99 zur Vorsicht mahnen. Der Schüler DAVID HAHN, Träger des Eagle Scout-Abzeichens in Atomenergie, damals wohnhaft in Golf Manor, einem Vorort von Detroit – es drängen sich Erinnerungen an die Biographie des jungen EDISON auf – versuchte sich 1994/95 auf dem Weg über Thoriumglühstrümpfe und zwei Selbstbauneutronenquellen in der Herstellung von thermisch spaltbarem [²³³U]Uran:

»David wußte noch aus einem Aufsatz zum Verdienstabzeichen, daß der ›Glühstrumpf‹ in handelsüblichen Gaslaternen mit einer Mischung überzogen [sic!] ist, die Thorium-232 enthält. Er kaufte Tausende von Glühstrümpfen aus Restbeständen auf und machte sie mit seiner Lötlampe zu Asche.

Aus der Asche mußte David nun noch das Thorium-232 isolieren. Glücklicherweise fiel ihm ein, in einem der Chemiebücher seines Vaters gelesen zu haben, daß Lithium Sauerstoff bindet – was in diesem Zusammenhang bedeutet, daß es dem Thoriumdioxid den Sauerstoff entzieht und es in reinerer Form zurück läßt. David kaufte für tausend Dollar Lithiumbatterien und extrahierte das Element, indem er die Batterien mit einer Drahtschere zerkleinerte. Dann gab er das Lithium und das Thoriumdioxid zusammen in einen Ball aus Aluminiumfolie und erhitzte ihn über einem Bunsenbrenner. Heureka! ... An dieser Stelle hätte David seine Americium-Neutronenkanone [erzeugt aus einhundert erworbenen Rauchmeldern für einen US-Dollar pro Stück] einsetzen können, um das Thorium-232 in kernbrennfähiges Uran-233 umzuwandeln. Doch das Americium gab nicht genügend Neutronen ab, also begann David Radium [Radiumleuchtfarbe] für eine verbesserte Strahlenkanone zu beschaffen ...« [12].

Es überrascht nicht zu hören, dass die Garage, in der David seine Untersuchungen machte und in welcher er gegen Ende seiner Experimente beim Verlassen immer die Kleidung wechselte, von einem professionellen Nuklearentsorgungsunternehmen zersägt, in 39 Stahlfässer verpackt und als radioaktiver Abfall in einer Deponie mitten in der großen Salzwüste gelagert wurde. Die Kosten dieser Entsorgungsmaßnahme

der US-Bundesregierung unter Federführung der Environmental Protection Agency (EPA) betragen rd. 60 000 \$.

In letzter Zeit greifen Bestrebungen, den Thoriumzusatz im Glühkörper durch nicht radioaktive Oxidgemische (insbesondere der Seltenen Erden, z. B. Yttriumoxid und Cerdioxid, in Verbindung mit stabilisierenden Zusätzen von Magnesium-, Aluminium- und Manganverbindungen) zu ersetzen. Dadurch werden die Produktionsbedingungen erleichtert, weil die bei der Verarbeitung der Thoriumverbindungen notwendigen Strahlenschutzmaßnahmen entfallen. Entsprechende Produkte – welche (noch) eine vergleichsweise geringe Leuchtdichte aufweisen – finden sich zunehmend im Handel, mit der Kennzeichnung »non-radioactive« wird für sie geworben [13].

5 Thoriierte Wolframschweißelektroden

Thoriumdioxid fand in der Emaille- und Keramikindustrie (Unterglasur bzw. Schmelztiegel für Metalle aus hochreinem Thoriumdioxid) bereitwillig Aufnahme, das als Nebenprodukt der Thoriumfabrikation anfallende Cer erfreute sich in Form einer Legierung mit Eisen (Zündsteine aus pyrophorem Ceresen, $w(\text{Cer}) = 65\%$, $w(\text{Eisen}) = 35\%$) eines großen Absatzes.

Eine umfangreichere Verwendung von Thoriumlegierungen war erst mit der aufkommenden Flugzeug-, Raumfahrt- und Turbinenindustrie zu verzeichnen, welche auf der Basis von Aluminium- und Magnesium-Thoriumlegierungen ($w < 4\%$) bis heute noch entsprechende Sonderbauteile fertigt. Die spezielle Anwendung der Thorierung von Kathodenglühdrahten, also die Intensivierung des Edison-Effekts, geht gleichfalls auf AUER zurück. Die Oberflächenthorierung von Metallen reduziert die Elektronenaustrittsarbeit des Systems, so z. B. im Falle von Wolfram von 4,5 eV auf 2,7 eV (die Austrittsarbeit des reinen Thoriums beträgt dagegen 3,4 eV).

In den USA wurden 1980 mehr als fünf Millionen thorierte Wolframschweißelektroden verbraucht [14], allein in Bayern wurden 1990 rd. zwei Millionen Stück hergestellt [11].

Als Gründe für den Thorium Einsatz beim Wolfram-Schutzgasschweißen und dem Plasma-Schmelzschweißen werden die Steigerung der Elektronenemission, die bessere Lichtbogenzündung und -stabilität sowie längere Lebensdauer gegenüber reinen Wolframelektroden angeführt. Der Thorierungsanteil wird als Massenanteil $w(\text{Thoriumdioxid})$ angegeben, er variiert je nach Elektrodentyp zwischen 0,35 und 4,2% (Tab. 1) [15].

Zur zerstörungsfreien radiometrischen Qualitätskontrolle kann nach Kalibrierung (Abb. 5b) auch die digitale Autoradiographie sowohl im alpha- wie im betasensitiven (Abb. 5a) Modus eingesetzt werden. Besonders hervorzuheben ist, dass hier mehrere Elektroden gleichzeitig untersucht werden können. Weiterhin eignet sich auch die durch den Thoriumzusatz

Schweißelektrode	Kennfarbe	w(Thoriumdioxid) (%)	mittlere Masse (g)	mittlere Dichte (g/cm ³)	mittlere Aktivität (Bq)
WT 4	blau	0,35–0,55	15,18	19,18	244
WT 10	gelb	0,80–1,20	15,11	19,08	539
WT 20	rot	1,70–2,20	14,97	18,91	1042
WT 30	violett	2,80–3,20	14,82	18,72	1587
WT 40	orange	3,80–4,20	14,67	18,54	2094

Tab. 1. Mittlere ²³²ThThoriumaktivitäten für thorierte Wolframschweißelektroden, berechnet für typische Elektrodenabmessungen, d = 2,4 mm, l = 175 mm. Nach [4, 15].

stimulierte Röntgenfluoreszenzemission und die Gammaemission der intakten Elektroden zu deren Gehaltsbestimmung [15].

Die ²³²ThThoriumaktivität liegt bei dem am häufigsten und nach wie vor mit bedeutendem Marktanteil eingesetzten Elektrodentyp WT 20 im Bereich von 1 kBq pro Elektrode (vgl. Tab. 1).

Beim Einsatz brennt ein Lichtbogen zwischen der nicht abschmelzenden Wolframelektrode und dem Werkstück. Die strahlenhygienische Betrachtung aus der Sicht des Verwenders schließt im Falle der thorierten Schweißelektroden die Berücksichtigung der Bestrahlungssituation im Zuge der Lagerung, in der Produktion und beim weiteren Umgang ein [3, 14].

Beim Herstellungsprozess wird, wie bereits betont, zur Erhöhung der erwünschten gesteigerten thermionischen Emissionsfähigkeit metallisches Wolframpulver mit Thoriumdioxid vermischt, anschließend gepresst und dann bei 2800 °C unter Wasserstoffatmosphäre gesintert. In Abbildung 6a sind deshalb die Gamma-/X-Spektren des Rohstoffs Thoriumdioxid und der unmittelbar daraus hergestellten Mischung mit Wolframpulver vor der oben geschilderten Weiterverarbeitung wiedergegeben und einander gegenübergestellt. Deutlich treten dabei die durch radioaktive Zerfallsprozesse in der umgebenden Wolframmatrix induzierten charakteristischen Röntgenemissionslinien hervor.

Bei einer Bewertung der Bestrahlungssituation bei Produktion und Lagerung von thorierten Wolframschweißelektroden sind somit nicht nur die Gamma- und Röntgenemission von Thoriumisotopen und ihren ggf. nachgewachsenen Folgeprodukte zu berücksich-

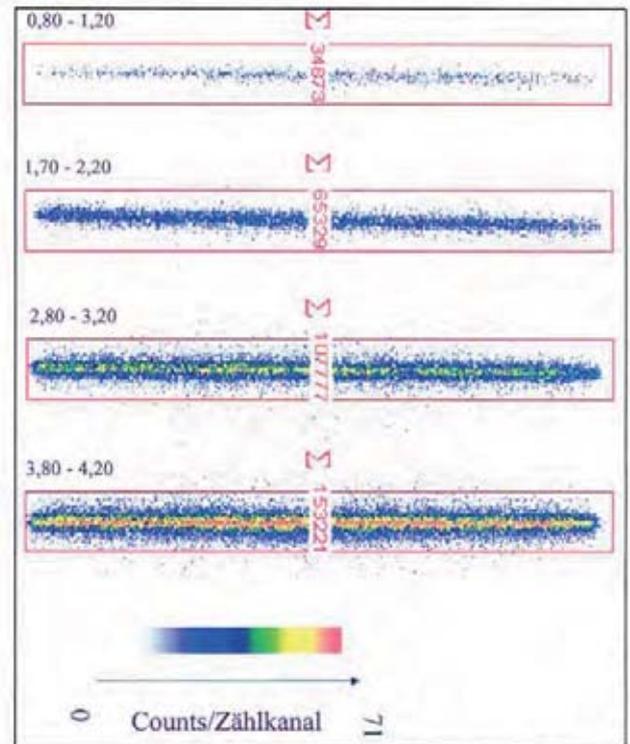


Abb. 5a. Simultane zerstörungsfreie quantitative Thoriumgehaltsbestimmung von Elektroden der Typen WT 10, WT 20, WT 30 und WT 40 (vgl. Tab. 1) durch digitale Autoradiographie im Betamodus (Messzeit: 3 h). Mit angegeben sind die (bzgl. des Messuntergrunds bereinigten) Nettoimpulse der jeweiligen Elektrode innerhalb des gesamten Autoradiogramms.

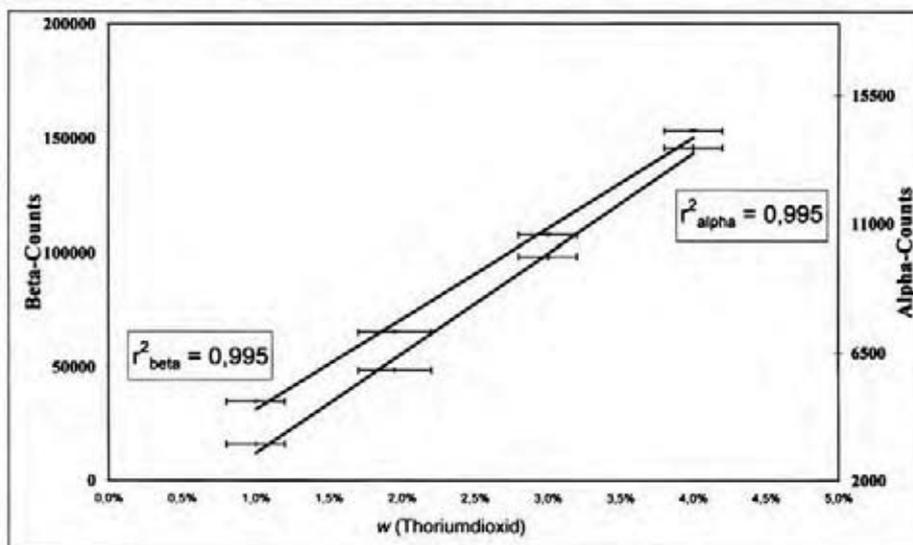


Abb. 5b. Korrelation zwischen Resultaten der digitalen Autoradiographie (Counts pro Probe, Messzeit im Betamodus: 3 h, im Alphamodus: 12 h) und Thoriumdioxidgehalten (mit den angegebenen Toleranzwerten) für Elektroden der Typen WT 10 bis WT 40. Untersucht wurden vier Zufallsstichproben (vgl. Abb. 5a) aus dem Handel. Man erhält die Kalibriergeraden für die beiden Untersuchungsmodi. (Aufn.: A. Bettermann, R. Laubinger, F. Vilser)

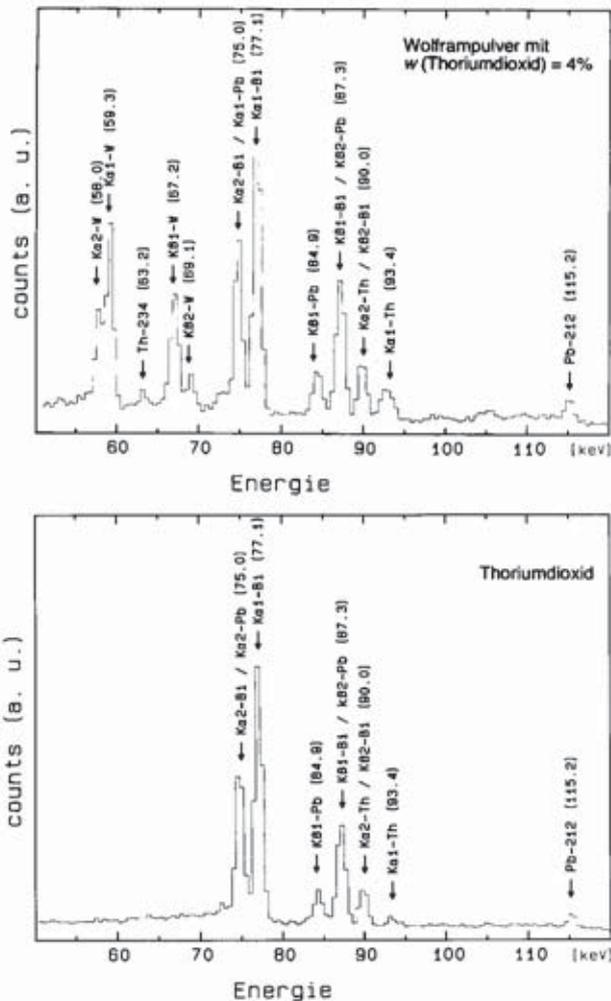


Abb. 6a. Gammaspektren (Ausschnitt 50–120 keV).
 Oben: Innige Mischung von Wolframpulver mit Thoriumdioxid ($w = 4\%$). ($m_{\text{Gemisch}} = 0,302 \text{ g}$; $t_M = 100000 \text{ s}$; Abtrennalter: $0,7 \pm 0,2 \text{ a}$, aus Ausgangsmaterialien für die Produktion von Elektroden des Typs WT 40). Zusätzlich erscheint die radiogen stimulierte charakteristische Wolfram-Röntgenfluoreszenz im Energiebereich von 58–70 keV.
 Unten: Thoriumdioxid ($m = 42 \text{ mg}$, $t_M = 6000 \text{ s}$, ermitteltes Abtrennalter $0,7 \pm 0,2 \text{ a}$). Es zeigt sich die im Zuge des radioaktiven Zerfalls stimulierte charakteristische Röntgenfluoreszenzstrahlung der einzelnen Glieder der Zerfallsreihe.

tigen. Zusätzlich ist im Energiebereich von 58–70 keV mit der Emission charakteristischer Röntgenfluoreszenzstrahlung des Wolframs zu rechnen ($W_{K\alpha 1} = 59,3 \text{ keV}$, $W_{K\alpha 2} = 58,0 \text{ keV}$, $W_{K\beta 1} = 67,2 \text{ keV}$, $W_{K\beta 2} = 69,1 \text{ keV}$) [3, 4]. Weitere radiometrische Erhebungen zeigten, dass die Matrixvariation im Zuge der Weiterverarbeitung der oben untersuchten Mischung zu konfektionierten WT-40-Elektroden nur noch geringfügige Änderungen gegenüber dem in Abbildung 6a wiedergegebenen Gamma-/X-Spektrum bewirkt. Bei den weiteren Untersuchungen wurde Thoriumdioxid einer Charge (d. h. identisches Abtrennalter des verwendeten Thoriumdioxids) eingesetzt und daraus WT-10- und WT-40-Elektroden ($w(\text{Thoriumdioxid}) = 1\%$

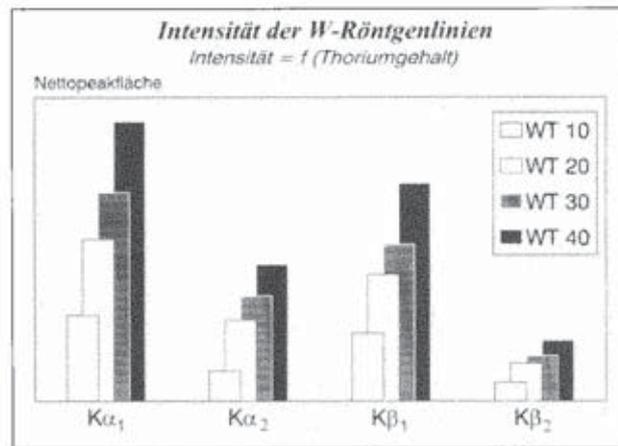


Abb. 6b. Gammaspektrometrisch ermittelte Intensität der Wolfram-Röntgenfluoreszenz von vier thoriierten Wolframschweißelectroden (WT 10, WT 20, WT 30 und WT 40 (vgl. Tab. 1) $t_M = 6000 \text{ s}$, Abtrennalter jeweils zwei Jahre). Es zeigt sich, dass mit steigendem Thoriumgehalt die Signalintensität der Röntgenfluoreszenz linear zunimmt. (Aufn. P. Schöffl, R. J. Schwankner)

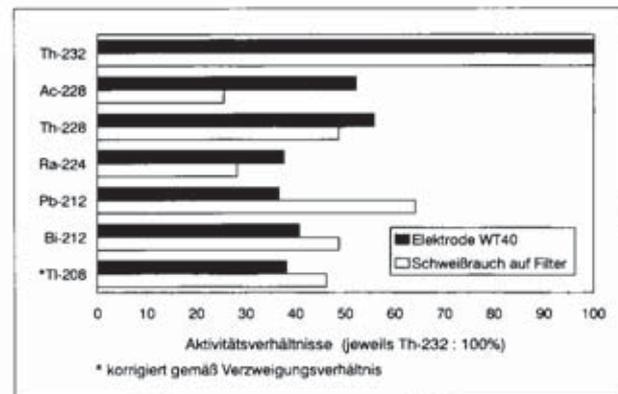


Abb. 6c. Gammaspektrometrisch ermittelte Nuklidvektoren einer unbenutzten Elektrode des Typs WT 40 ($m = 18,5 \text{ g}$, $t_M = 25795 \text{ s}$, Abtrennalter: $6,5 \pm 0,8 \text{ a}$) und Schweißrauchemission beim Wolfram-Inertgasschweißen (WIG-Bedingungen: 150 A, Ansaugzeit 30 min, $t_M = 9000 \text{ s}$ sowie nach 36 Tagen $t_M = 302400 \text{ s}$; Aufn. C. Feigl [11]).

und 4%) gleicher Abmessungen, also Strahlenquellen mit identischer Selbstabsorption in der Matrix gefertigt. Wie die in Abbildung 6b dargestellte Intensitätsauswertung der charakteristischen Röntgenlinien des Wolframs zeigt, kann radiogen induzierte Röntgenfluoreszenzintensität als ein Maß für den $[^{232}\text{Th}]$ Thoriumgehalt der Schweißelektroden angenommen werden [4]. Unter typischen Einsatzbedingungen wurde sodann die geringfügige, aber nicht vernachlässigbare Freisetzung von Radionukliden – insbesondere der dosisrelevanten alphaemittierenden Thoriumisotope – während des Abbrandes ermittelt [4, 11]. Um die geringen Freisetzungen radiometrisch im in Glasfaserfiltern gesammelten Schweißrauch mit größerer Sicherheit ermitteln zu können, wurden WT-40-

Elektroden, welche den höchsten Thoriumgehalt aufweisen, zum Wechselstromschweißen herangezogen. Die an die Umgebungsluft abgegebene Aktivität erwies sich dabei überwiegend an die Teilchengrößenfraktion $< 0,1 \mu\text{m}$ gebunden und beträgt für ^{232}Th Thorium 8, für ^{228}Th Thorium 4 Bq/h [11]. Vergleicht man die radiometrisch ermittelte qualitative Zusammensetzung der abgeschiedenen Filteraktivität mit dem Nuklidvektor der intakten WT-40-Elektrode (Abb. 6c), so zeigt sich, dass bei den hohen Temperaturen des Lichtbogens (von über 3000°C) alle Nuklide aller Elemente (im Gegensatz zu den im Abschnitt 4 dargestellten Daten bei Auerstrümpfen (Abb. 4)) mobilisiert werden, vorzugsweise jene mit relativ niedrigem Siedepunkt.

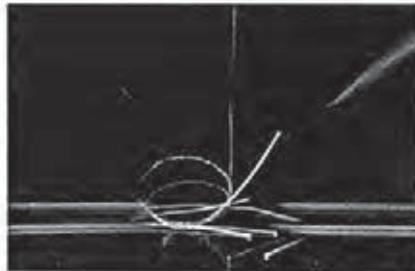
Damit ist aufgezeigt, dass bei Produktion, Lagerung und Umgang mit thorierten Wolframschweißelektroden und deren Rückständen aus strahlenhygienischer Sicht Anlass besteht, die Expositionspfade Bestrahlung und inhalative Inkorporation sowie mögliche Kontamination mit Schweißrauch näher zu untersuchen und die laufenden Bemühungen zur Entwicklung inaktiver Ersatzstoffe weiter zu betreiben.

Wir hoffen, mit der vorliegenden Darstellung erneut aufzeigen zu können, dass die radiometrische Auseinandersetzung mit der frühen Verwendungsgeschichte schwerer Radioelemente ein fächerübergreifendes und – aus der Sicht des Strahlenschutzes – aktuelles Gebiet ist. Mit fortschreitender Strahlenhygiene werden so weitere, bislang nicht genügend beachtete Expositionspfade erkannt und bilanziert.

Literatur

- [1] S. MEYER – E. SCHWEIDLER: Radioaktivität. – Leipzig, Berlin: B.G. Teubner 1927.
- [2] W. WAHL: α , β , γ -Table of Commonly Used Radionuclides. – Schliersee: Selbstverlag 1998.
- [3] P. SCHÖFFL: Beitrag zur radiometrischen Charakterisierung von radioaktiven Alltagsgegenständen. – Diplomarbeit, FH München/Physikalische Technik, München: 1992.
- [4] R. J. SCHWANKNER – A. BRUMMEISL – C. FEIGL – P. SCHÖFFL: Frühe Verwendungsgeschichte von Thorium. – Die Geowissenschaften **12** (1994) 66–73.
- [5] C. W. MAYS: Alpha-Particle-Induced Cancer in Humans. – Health Physics **55** (1988) 637–652.
- [6] Richtlinie 96/29/Euratom des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlungen. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft L 159 39 (1996) 1–114.
- [7] E. SCHMAHL: Carl Auer von Welsbach. – In: Abhandlungen und Berichte des Deutschen Museums, 20. Jahrgang, Heft 1. – München: Oldenbourg 1952.
- [8] C. R. BÖHM: Das Gasglühlicht, seine Geschichte, Herstellung und Anwendung. – Leipzig: v. Veit & Comp. 1905.
- [9] N. RIEHL: Auer von Welsbachs Werk und seine neuzeitlichen Auswirkungen in Atomkerntechnik und Lichttechnik. – Österr. Chem.-Ztg. **60** (1959) 5–11.
- [10] J. d'ANS: Karl Freiherr Auer von Welsbach zum 70. Geburtstag. – Z. Angew. Ch. **41** (1928) 969–971.
- [11] C. FEIGL: Strahlenexposition beim Umgang mit thorierten Wolframschweißelektroden. – Diplomarbeit, FH München/Physikalische Technik, München 1992.
- [12] K. SILVERSTEIN: Die atomare Katastrophe – ein Kinderspiel. – Magazin der Süddeutschen Zeitung Nr. 27 vom 9. 7. 99, S. 30–35.
- [13] G. J. ADDISON: Yttrium Oxide Mantles for Fuel-Burning Lamps. United States-Patent Nr. 4, 533,317 vom 6. 8. 85.
- [14] R. KÖNIG: Das Wolfram-Inertgas-Schweißen entwickelt sich weiter. – Humane Produktion **5** (1989) 11–16.
- [15] CEN: Wolframelektroden für Wolfram-Schutzgasschweißen und für Plasmaschneiden. Europäische Norm Nr. EN26848, 1991.
- [16] R. J. SCHWANKNER – G. LIECKFELD – D. LIENERT: Zur Farbkraft von Uranverbindungen, Teil I. – MNU **44** (1991) 25–32; Teil II: MNU **45** (1992) 88–98. 

Radiometrisches Praktikum



FH München SS 1998

Doris Lienert

Instant Imager - Elektronisches Autoradiographie System

Anwendungen

- Detektion von radioaktiven Markierungen auf Gelen, Blots, Dünnschichtplatten und Gewebeschnitten
- Untersuchung von radioaktiven Elementen und Verbindungen in flachen Proben (Gesteinsschliffe, abgeschliffene Mineralien, Kacheln etc.)



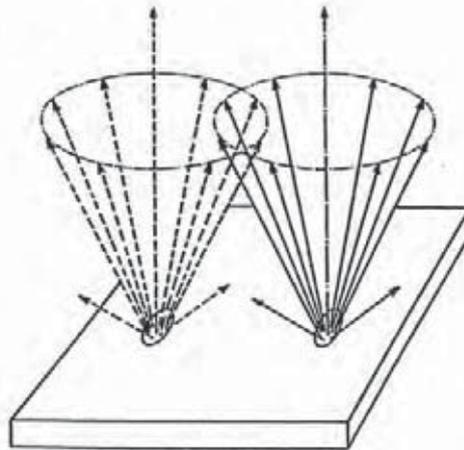
Aufbau

- Detektorsystem mit Microchannel Array Detector (MICAD)
- Probe wird zugeführt via Schublade
- Digitale Signalverarbeitung und Ausgabestation (faseropt. gekoppelt)

Streuung radioaktiver Strahlung

Ein Vorteil radioaktiver Strahlung (v.a. von α - und β -Strahlung) ist die Möglichkeit einer Lokalisierung der betreffenden Radionuklide.

Da die α - und β -Teilchen die Probenoberfläche nicht senkrecht verlassen, sondern eine Streuung der Teilchen erfolgt, ist der Abstand zwischen der Probe und der photographischen Schicht oder dem Detektor wesentlich für die räumliche Auflösung.



β -Emission von zwei verschiedenen Punkten auf einer Oberfläche

Detektorsystem des Instant Imager

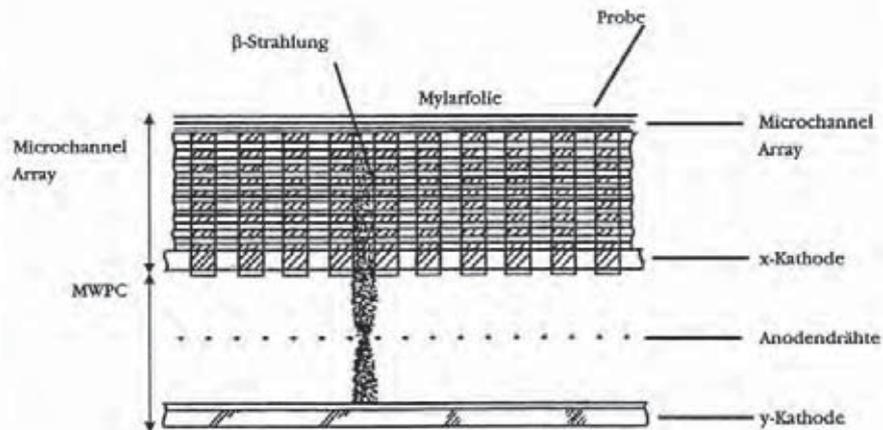


Georges Charpak (*1924)

Der Microchannel Array Detector (MICAD) ist die Weiterführung des Multi-Wire Proportional Counter (MWPC, Vieldraht-Proportional-kammer), erfunden von G. Charpak zur Detektion von Hochgeschwindigkeitspartikeln, durch Kombination mit einem Microchannel Array Converter durch A. Jeavons.

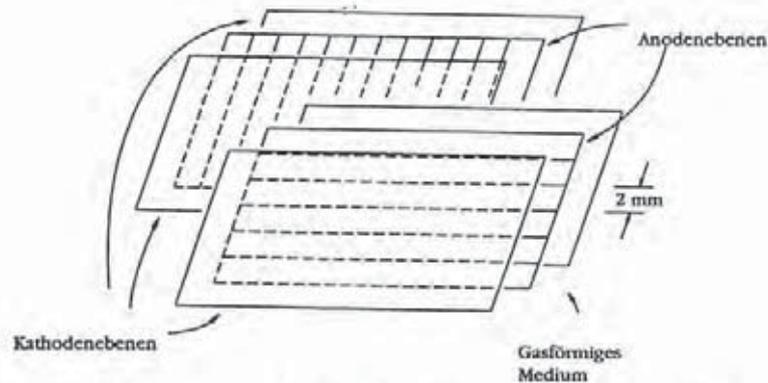
Nobelpreis für Physik 1992; der von ihm entwickelte MWPC ermöglichte den Nachweis von intermediären Bosonen und Quarks

Aufbau des MICAD



Der MICAD kann ein Bild einer Größe von $20 \times 24 \text{ cm}^2$ aufnehmen ohne über die Probenfläche zu rastern. In den einzelnen Mikrokanälen werden die Elektronen aus Ionisierungsvorgängen fokussiert und verstärkt, bevor sie im MWPC detektiert werden.

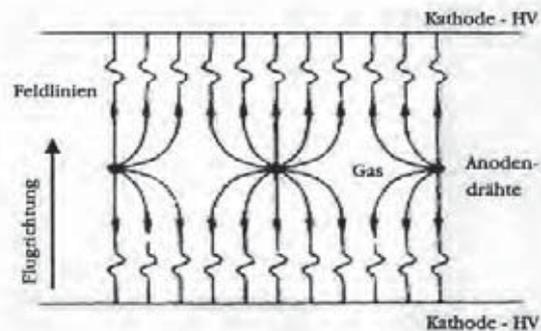
Der Multiwire Proportional Counter (MWPC)



Die Geometrie des MWPC basiert auf einer Ebene präzise positionierter Anodendrähte (Abstand typischerweise 2 mm), die zwischen zwei Kathodenebenen angeordnet (Sandwich) wird. Meist werden mehrere Ebenen mit unterschiedlicher Orientierung der Anodenebenen übereinandergelegt. Der gesamte Elektrodenraum wird mit dem Arbeitsgas (z.B. Ne/CO_2) gefüllt.

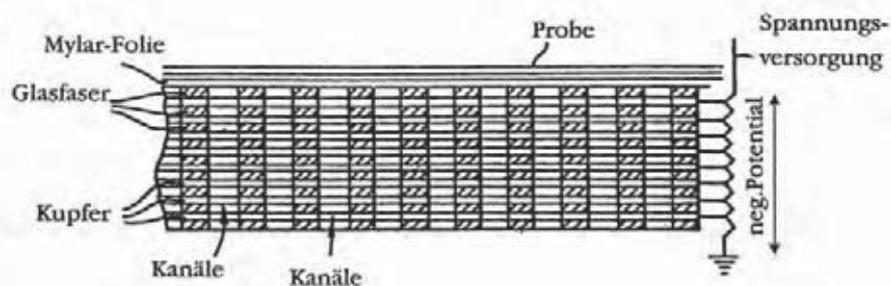
Der Multiwire Proportional Counter (MWPC)

Bewegen sich geladene Teilchen durch das Medium, erzeugen sie Ionen entlang ihres Weges, die wiederum Impulse an den entsprechenden Drähten, die der Bahn des Teilchens am nächsten sind, produzieren.



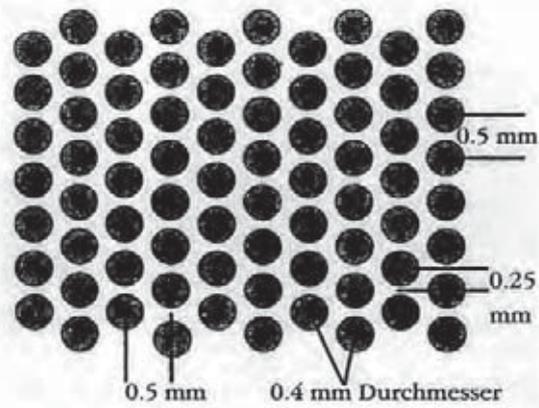
Die Anodendrähte besitzen jede ihren eigenen Verstärker, funktionieren somit als unabhängige Proportionalzähler und können damit die Position eines geladenen Teilchens mit der Genauigkeit des Abstandes zwischen den Drähten bestimmen.

Microchannel Array (Querschnitt)



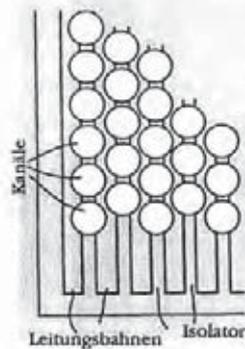
Microchannel Array besteht aus Schichten von Kupfer und einem Nichtleiter, z.B. Glasfaser. An die Kupferschichten wird ein Potential angelegt. In den gestapelten Schichten befinden sich die Kanäle.

Microchannel Array (Draufsicht)



Die Bohrungen haben einen Durchmesser von 0,4 mm und sind in einem Abstand von 0,5 mm (Mittelpunkt-Mittelpunkt) angebracht. Auf einer Fläche von $20 \times 24 \text{ cm}^2$ befinden sich somit ca. 200000 Kanäle.

Aufsicht auf eine Kathodenebene



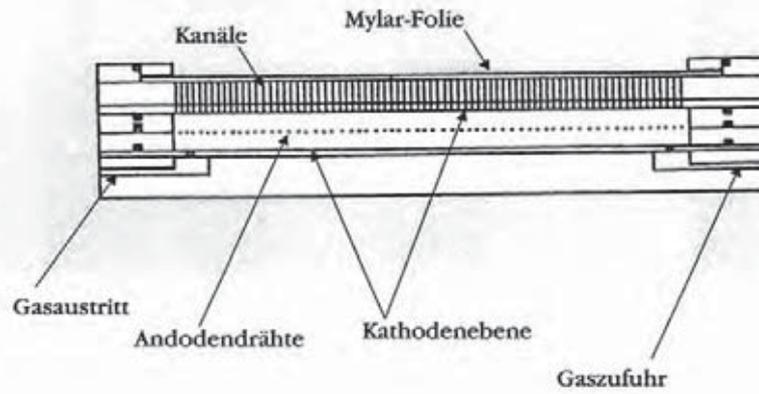
Eine Kathodenebene wird direkt mit dem Microchannel Array verbunden. Kupferleitungsbahnen sind auf einer Isolatorschicht angebracht und verlaufen, gegeneinander isoliert, in die x-Richtung.

Um den Elektronen den Durchtritt zu ermöglichen, sind die Bohrungen in dieser Schicht fortgeführt.

Nach den Anodendrähte folgt eine zweite Kathodenebene, in der die Leitungsbahnen (y -Richtung) um 90° gedreht sind. Diese Ebene muß für die Elektronen nicht mehr durchgängig sein.

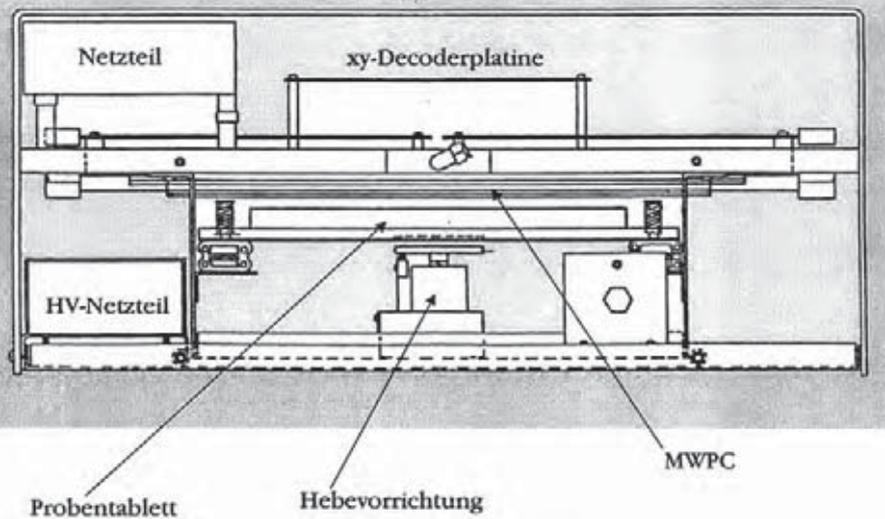


Querschnitt des Detektors



Abgeschlossener Detektor mit MWPC, MICAD, Gaszufuhr und Gasaustritt

Aufbau des gesamten Geräts



Alternative Detektionsmethoden

❖ Autoradiographie

Klassische Methode, um eine Abbildung der Verteilung von Radionukliden auf Oberflächen zu erhalten

Nachteile: Lange Expositionszeiten, Quantifizierung schwierig



❖ Flüssigszintillationszähler

Für radioaktive Proben, die von der Oberfläche einer Dünnschichtplatte, von Gelen oder Membranen entfernt werden und in der Szintillationsflüssigkeit gelöst werden können.

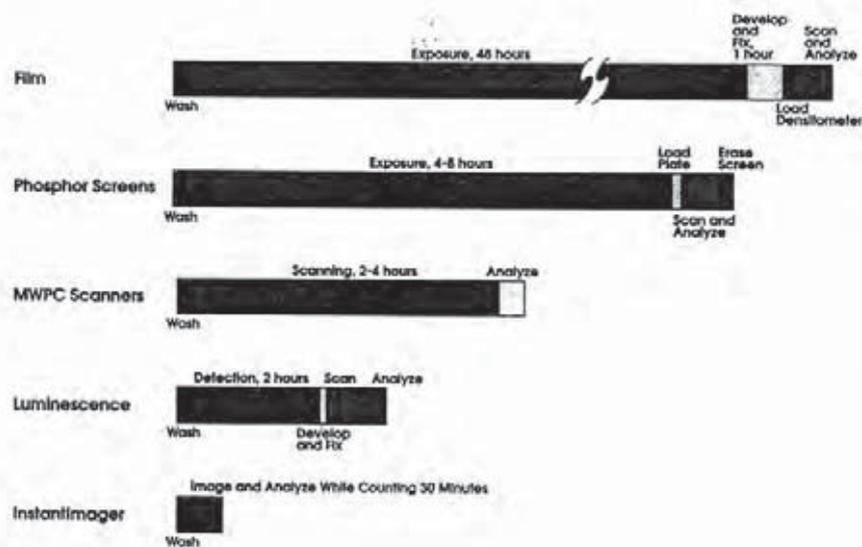
Nachteile: Arbeits- und zeitintensiv, erhöhter Chemikalienbedarf, erhöhtes Volumen an organischen radioaktiven Abfällen

❖ TLC Scanner

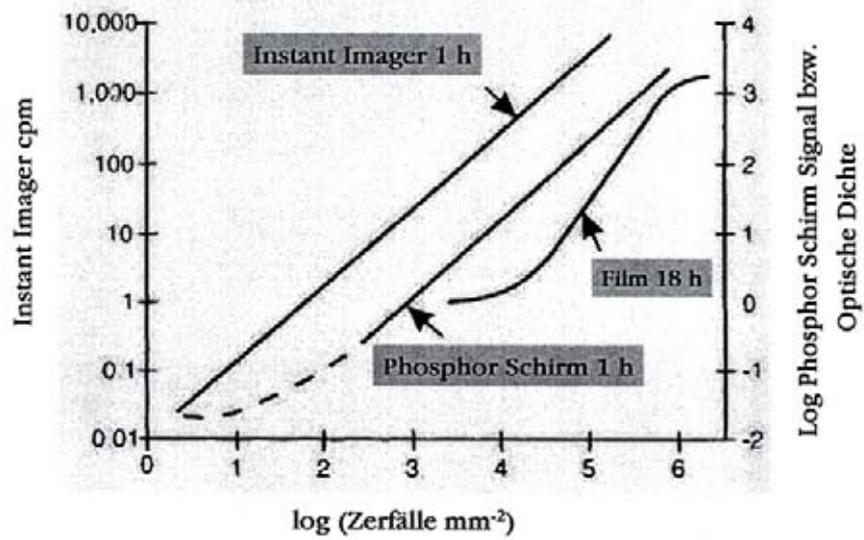
Quantitative Detektion von β -Strahlern durch einen Zähler (z.B. Proportionalzähler), der sich über eine Dünnschichtplatte bewegt.

Nachteile: Auflösung im mm-Bereich, aufgrund des kleinen Eintrittsfensters des Zählrohrs ist die Analysendauer relativ lang

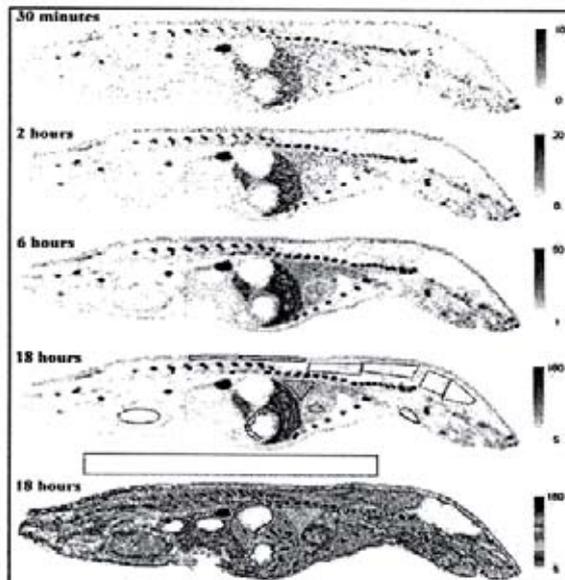
Typische Meßzeiten



Linearer Bereich der unterschiedlichen Detektors



Quantifizierung von ^{14}C in einem Ganzkörperschnitt



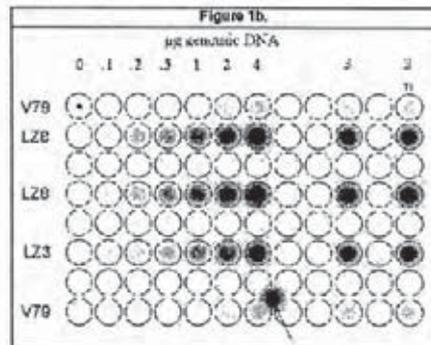
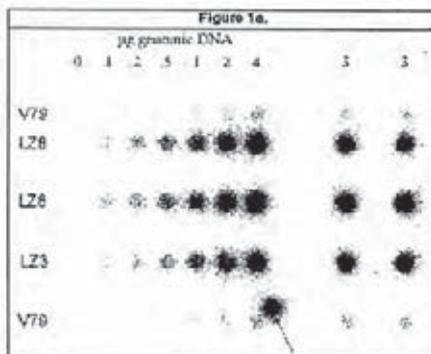
Ganzkörper-Autoradiographie der Verteilung einer ^{14}C -markierten Verbindung in einem Gewebeschnitt, in Abhängigkeit von der Messzeit.

Quantifizierung von ^{14}C in einem Ganzkörperschnitt

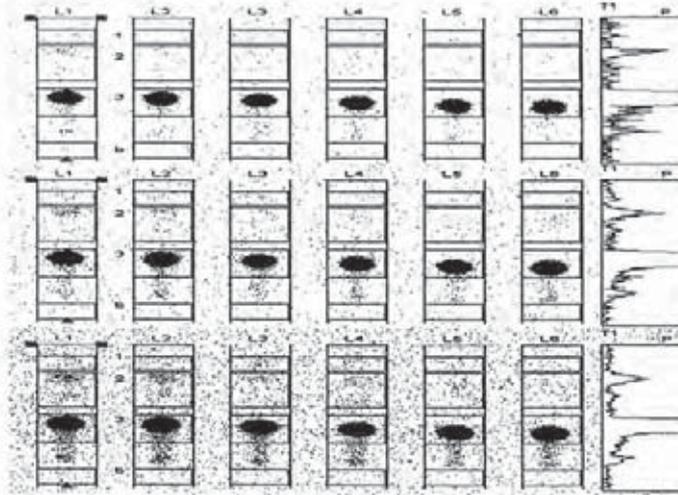
Tissue	0.5 hour		2 hours		6 hours		16 hours	
	Activity (DPM/mg)	Error (%)						
Cartilage	1007 ± 570	54.9	2029 ± 510	25.5	2115 ± 566	14.5	2152 ± 526	8.3
Renal Cortex	1424	35.2	1471	16.9	1427	9.9	1417	5.7
Liver	622	17.0	623	8.3	628	4.8	626	2.8
Lung	275	25.9	279	12.7	280	7.3	274	4.2
Skin	253	17.8	256	8.6	255	5.0	257	2.9
Cardiac Blood	259	53.0	226	28.1	217	16.6	226	9.3
Gland. Gastric Mucosa	243	25.8	216	13.6	224	7.7	224	4.4
Salivary Gland	116	31.2	130	14.4	127	8.4	131	4.7
Skeletal Muscle	76	21.0	74	10.5	77	5.9	77	3.4
Testes	58	28.2	51	15.2	53	8.5	57	4.6
Brain	9	326.1	11	108.5	11	62.7	10	38.7

^{14}C -Aktivität in verschiedenen Organen und Geweben und 2σ -Fehler für verschiedene Meßzeiten

Quantitative Analyse von Dot Blots

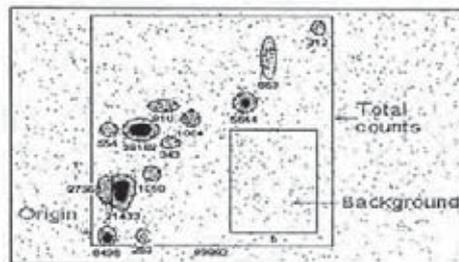
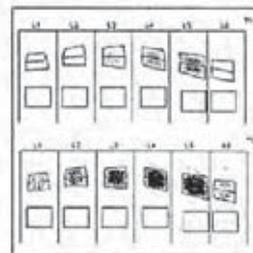
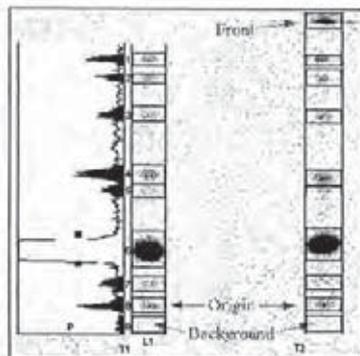


Assay von Chloramphenicol Acetyl Transferase (CAT) Aktivität



Graustufenbild eines CAT-Assays, in dem wenig Transkription des CAT Gens stattgefunden hat

Analyse von Dünnschicht-Chromatogrammen

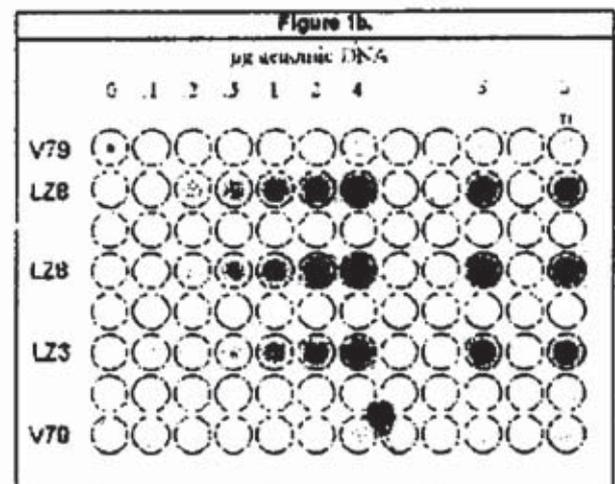
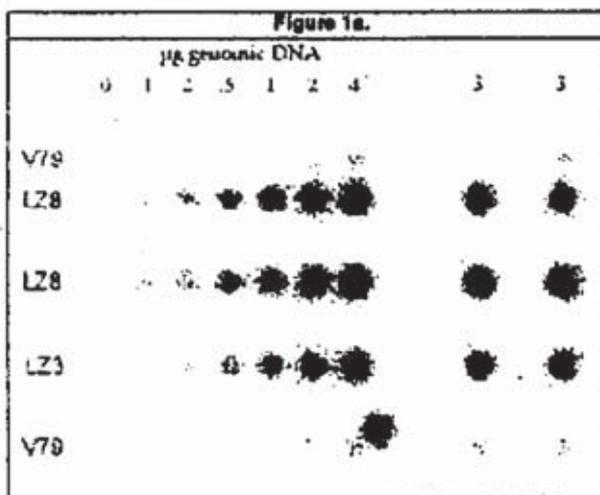


Quantifizierung von ^{14}C in einem Ganzkörperschnitt

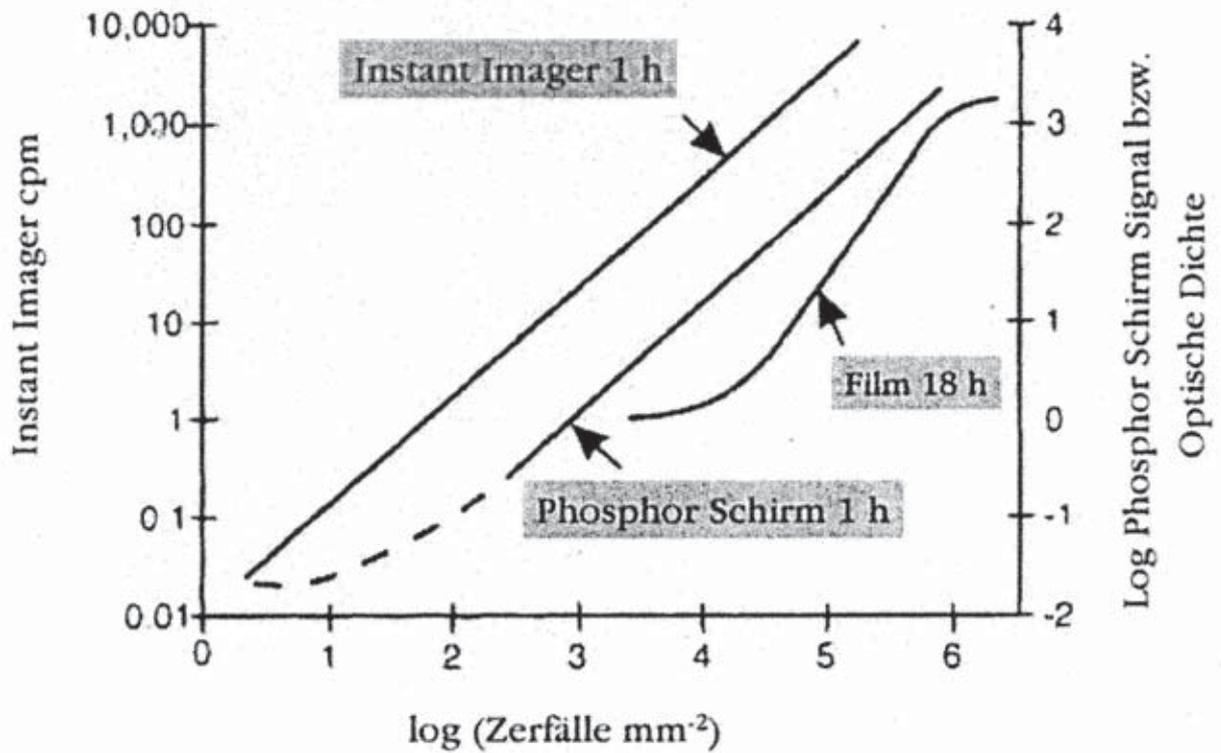
Tissue	0.5 hour		2 hours		6 hours		16 hours	
	Activity (DPM/mg)	Error (%)						
Cartilage	1887 ± 578	54.9	2029 ± 510	25.5	2115 ± 566	14.5	2152 ± 526	8.3
Renal Cortex	1424	35.2	1471	16.9	1427	9.9	1417	5.7
Liver	622	17.0	623	8.3	628	4.8	626	2.8
Lung	275	25.9	279	12.7	280	7.3	274	4.2
Skin	253	17.8	256	8.6	255	5.0	257	2.9
Cardiac Blood	259	53.0	226	28.1	217	16.6	226	9.3
Gland. Gastric Mucosa	243	25.8	216	13.6	224	7.7	224	4.4
Salivary Gland	116	31.2	130	14.4	127	8.4	131	4.7
Skeletal Muscle	76	21.0	74	10.5	77	5.9	77	3.4
Testes	58	28.3	51	15.2	53	8.5	57	4.6
Brain	9	326.1	11	108.5	11	62.7	10	38.7

^{14}C -Aktivität in verschiedenen Organen und Geweben und 2σ -Fehler für verschiedene Meßzeiten

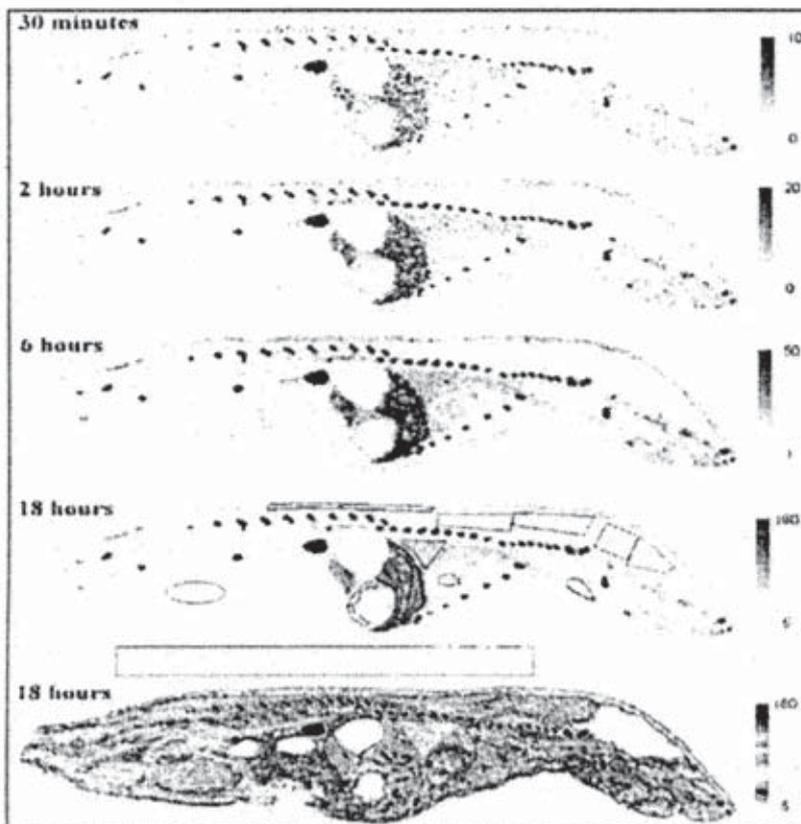
Quantitative Analyse von Dot Blots



Linearer Bereich der unterschiedlichen Detektors

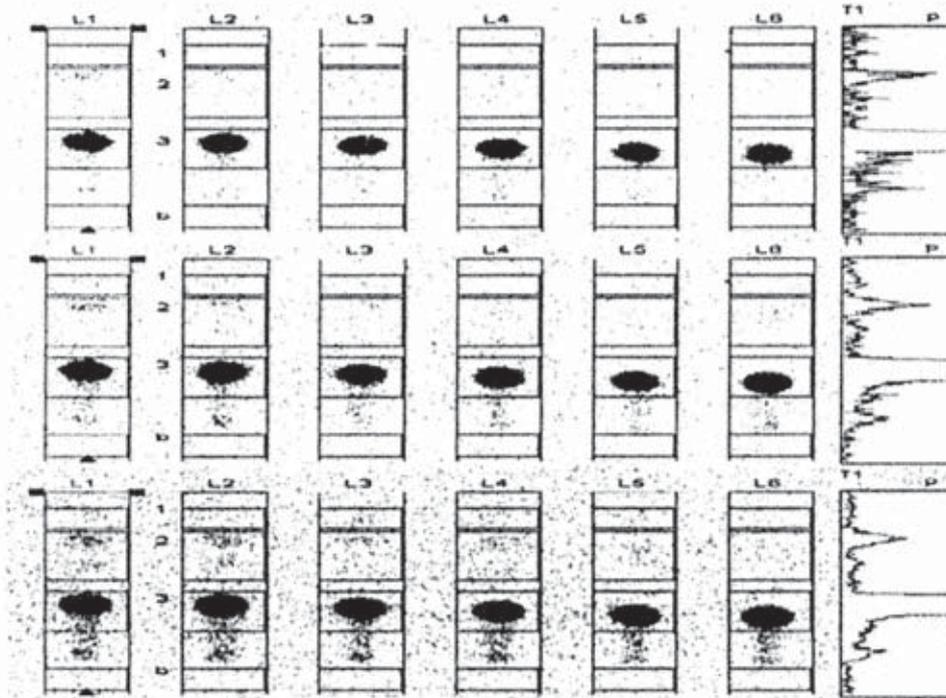


Quantifizierung von ^{14}C in einem Ganzkörperschnitt



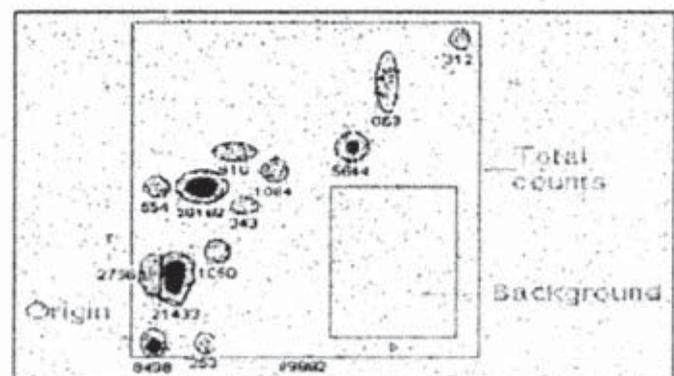
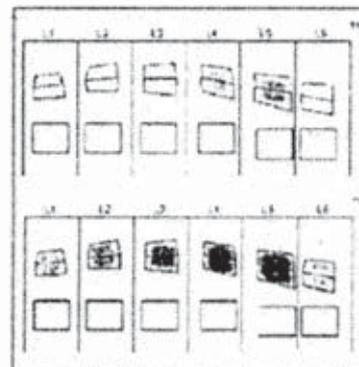
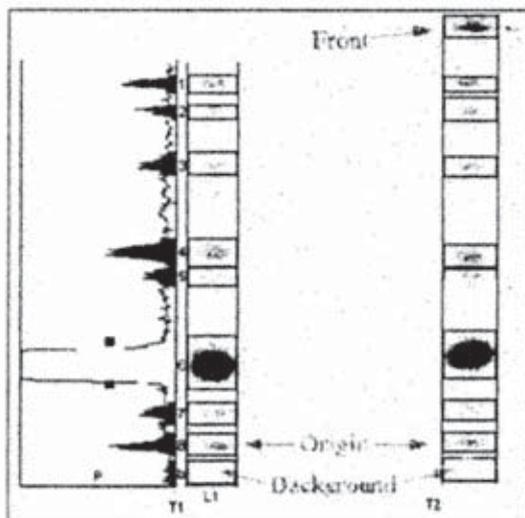
Ganzkörper-Autoradiographie der Verteilung einer ^{14}C -markierten Verbindung in einem Gewebeschnitt, in Abhängigkeit von der Meßzeit.

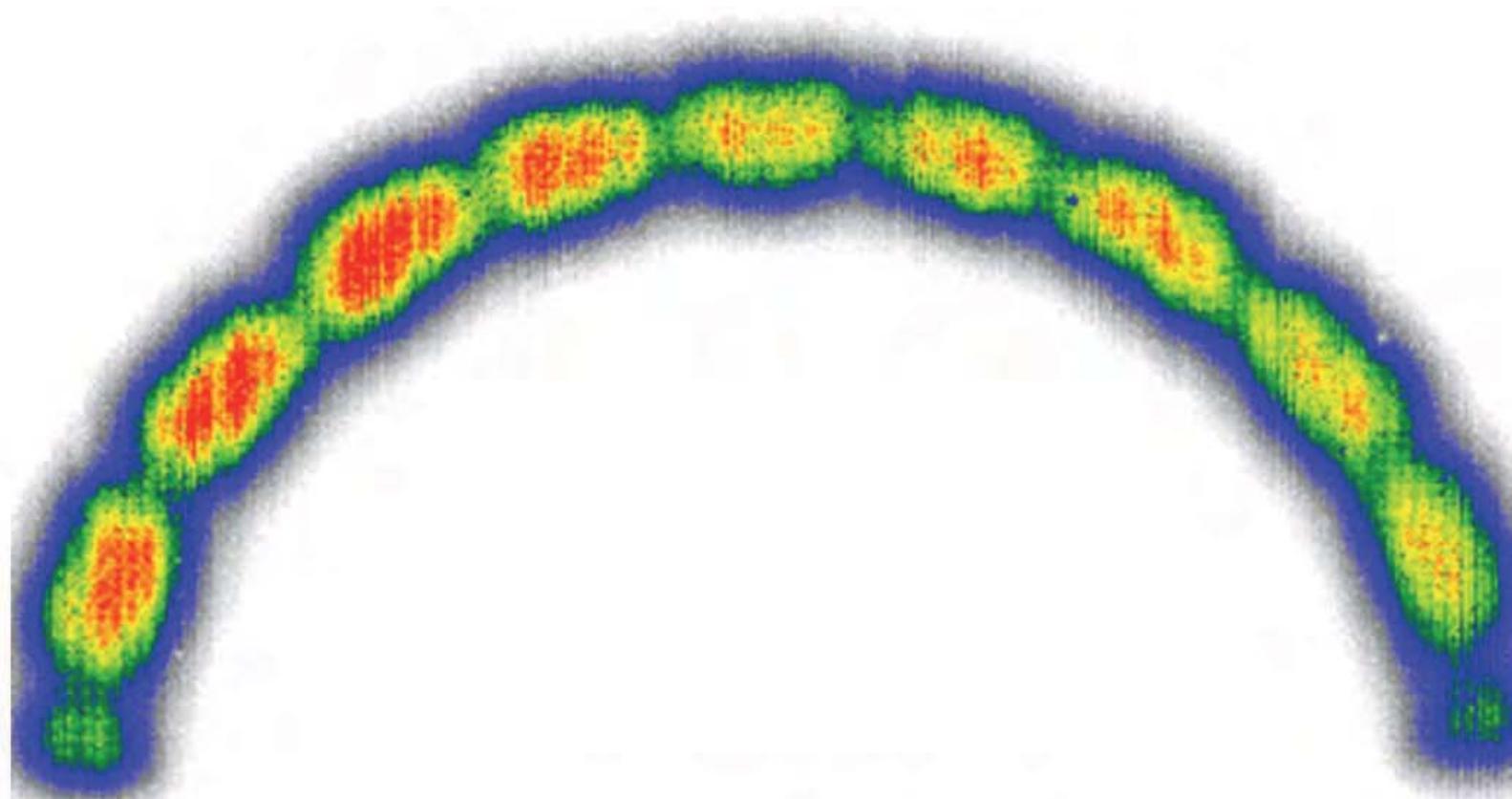
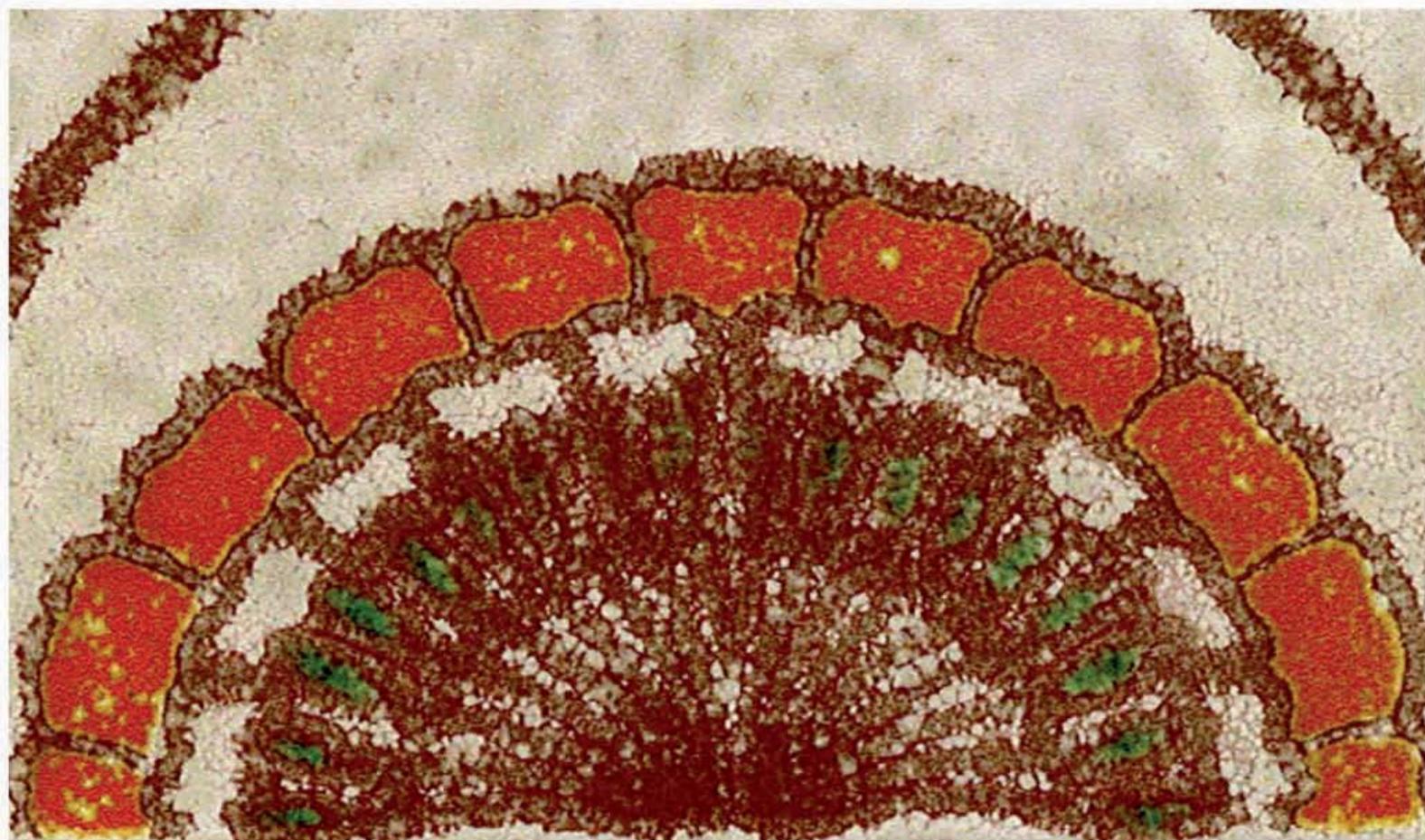
Assay von Chloramphenicol Acetyl Transferase (CAT) Aktivität



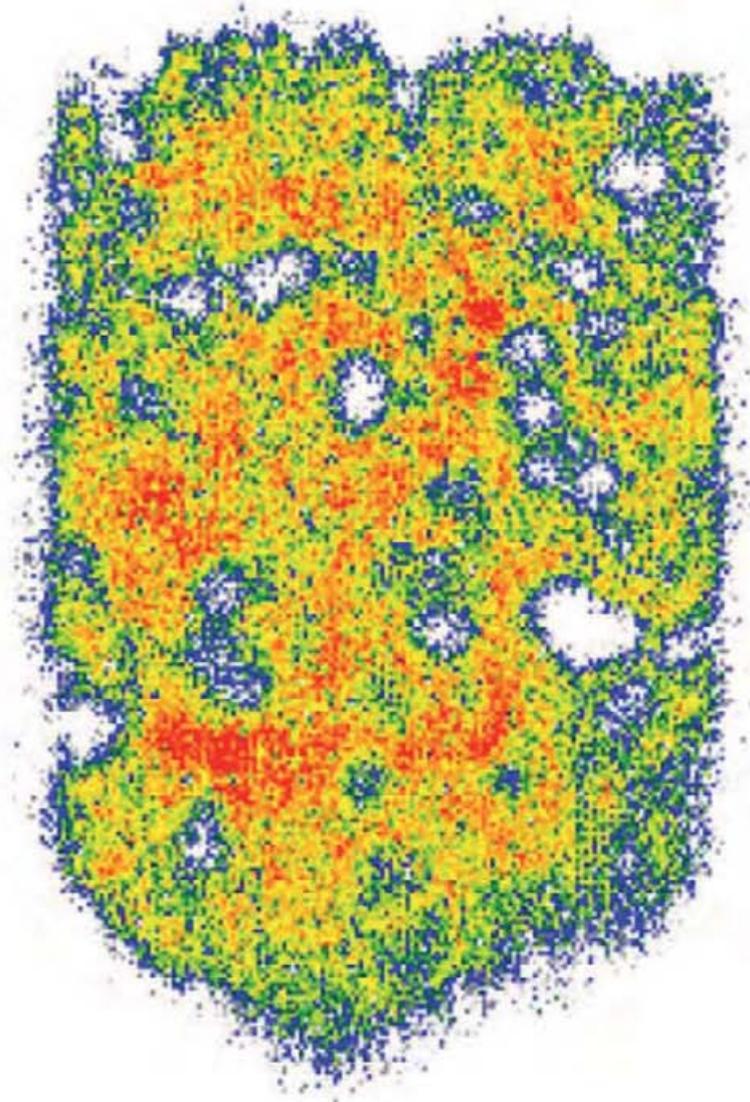
Graustufenbild eines CAT-Assays, in dem wenig Transkription des CAT Gens stattgefunden hat

Analyse von Dünnschicht-Chromatogrammen

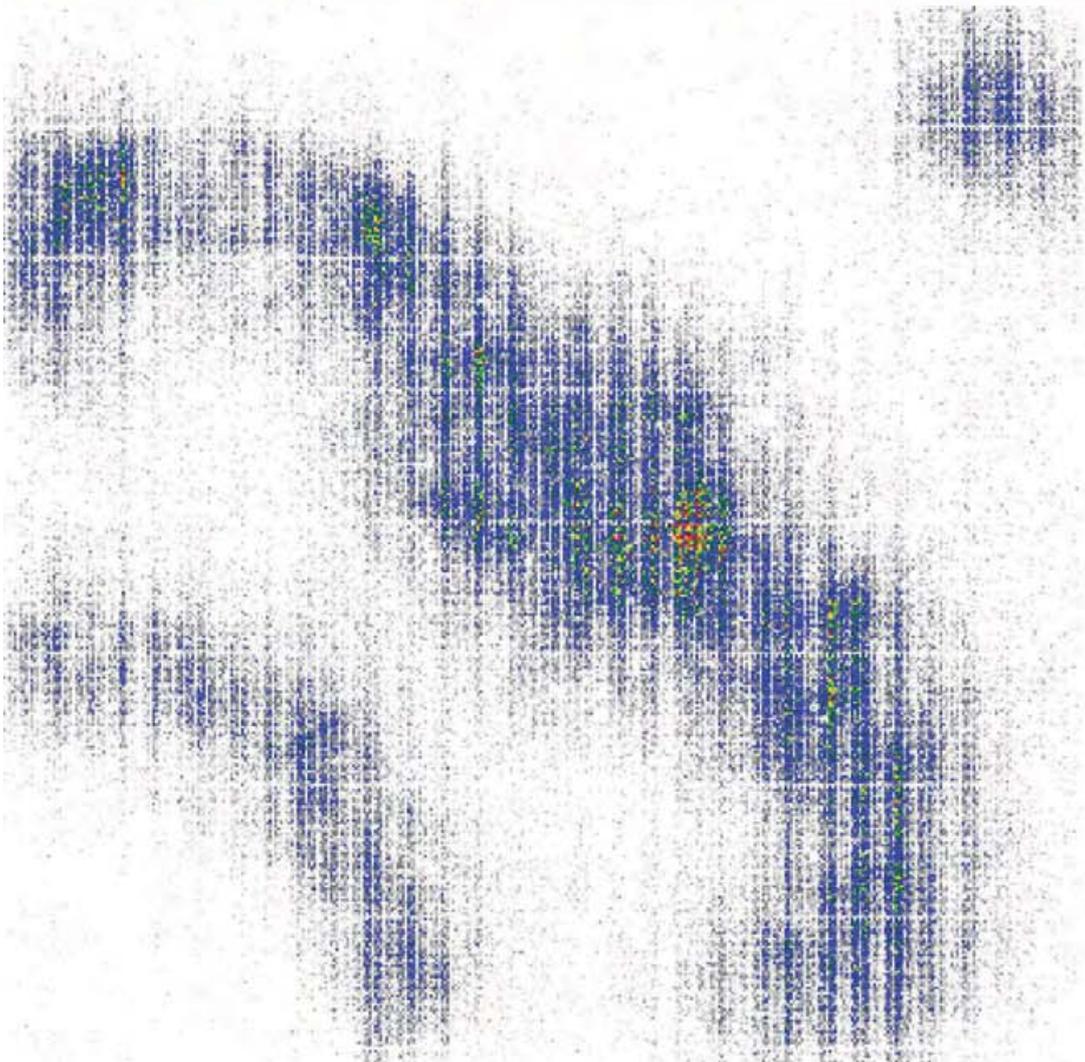
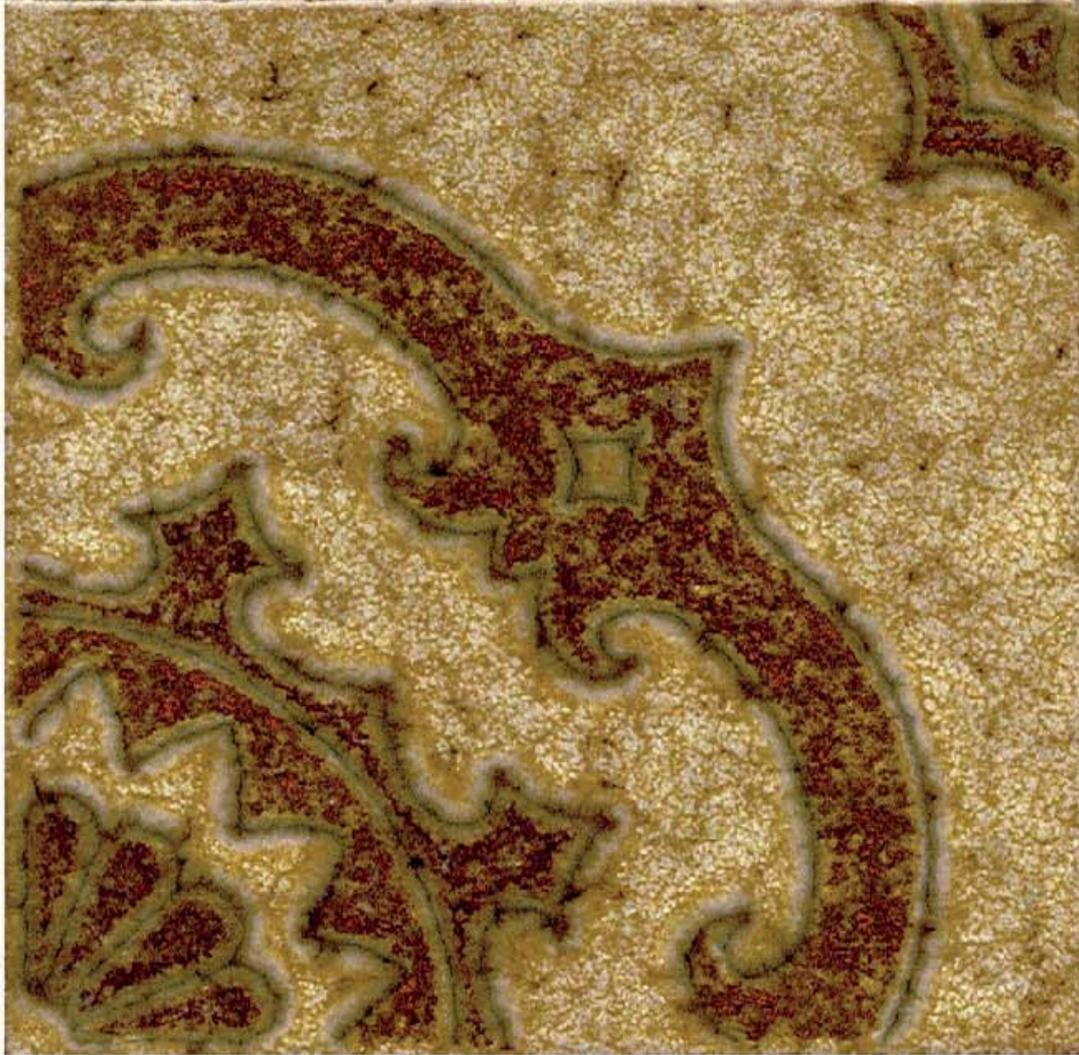




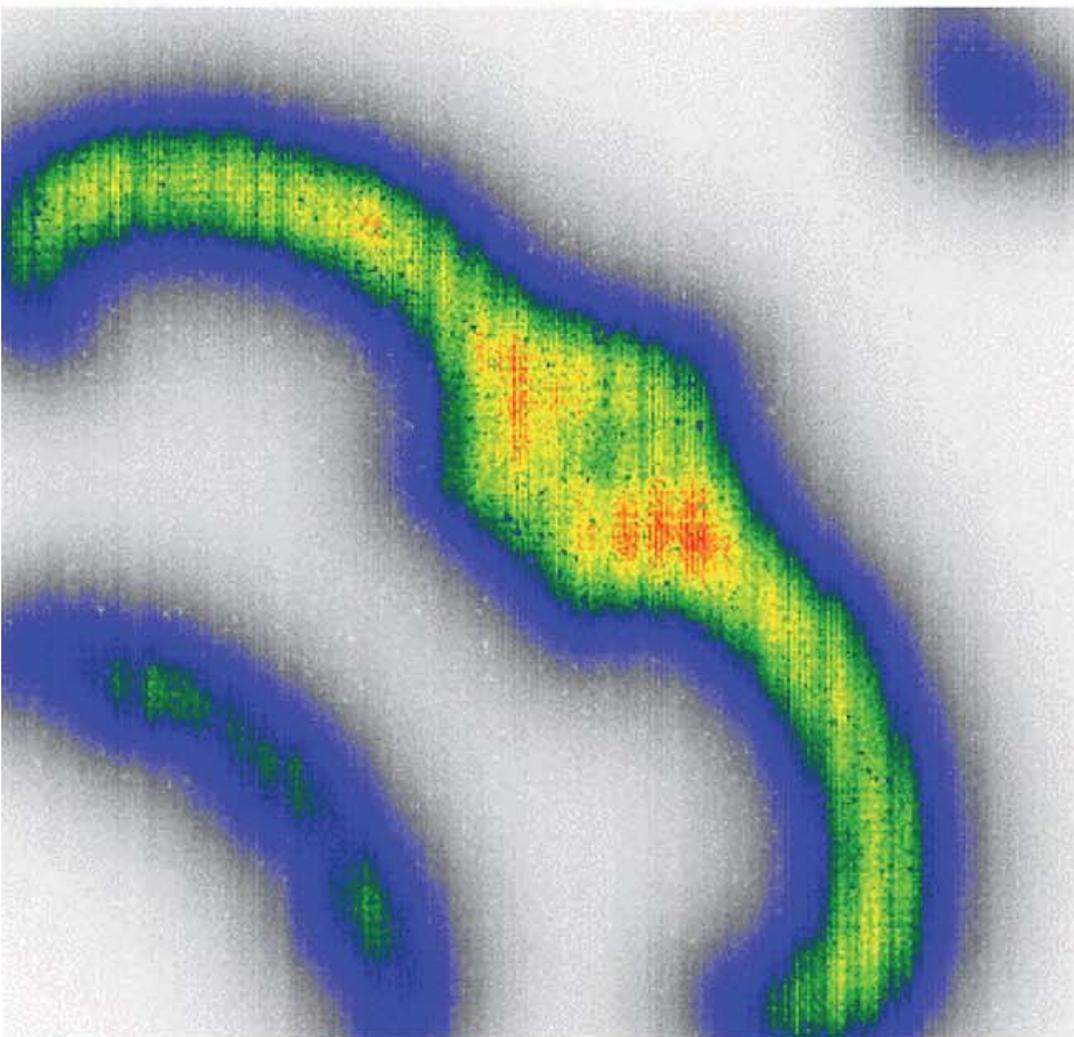
β -Messung einer Fliese



Burgsandstein aus Oberfranken
 β -Messung



α - Messung einer Fliese



β - Messung einer Fliese

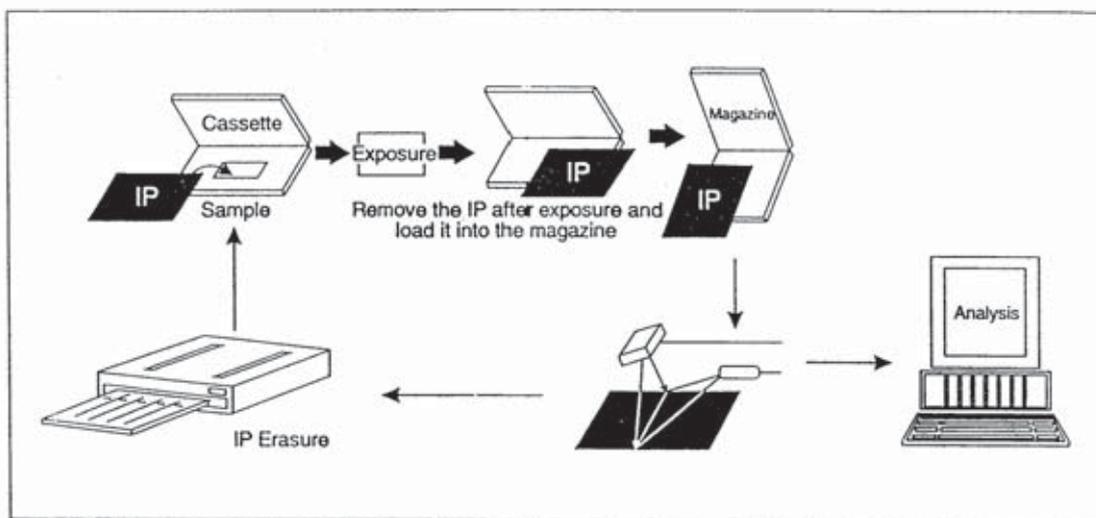
Begleitunterlagen:
Großes Radiometrisches Praktikum
HM

k: Die Kunst der Autoradiographie

III. RPL

Prof. Dr. Schwankner
Türkenstraße 78
80799 München
Lab.: 089/1265-2608
Büro.: 089/1265-2667
priv.: 089/33019260

Phosphor Imaging Plate (IP) scanning system

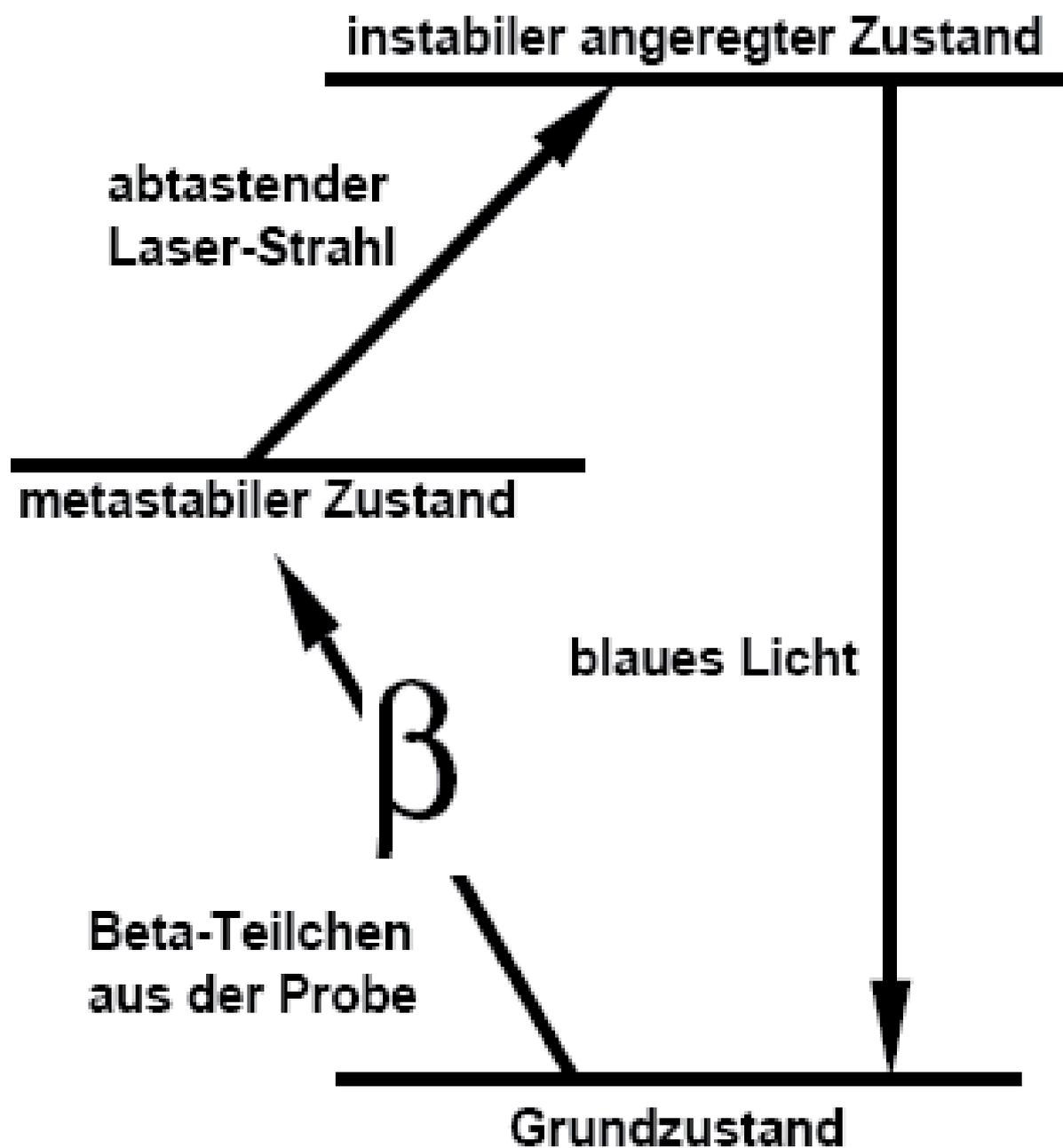


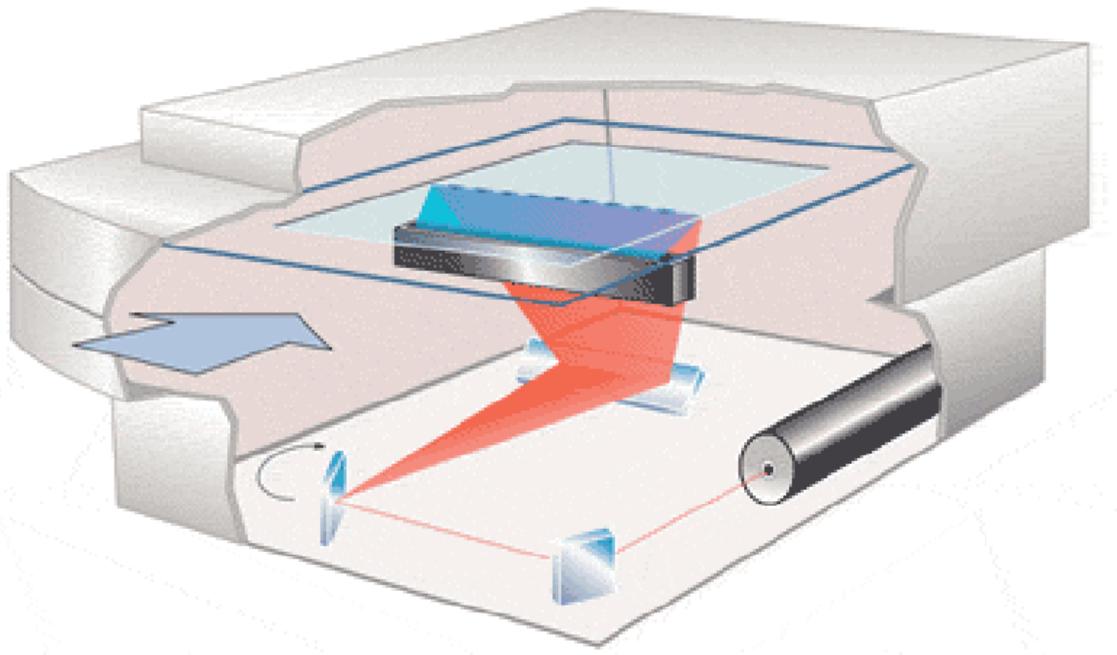
Phosphor Imaging

Abbildung der Verteilung von Radionukliden auf der Oberfläche einer Phosphor beschichteten Platte; die gespeicherte Energie kann mit Hilfe eines Lasers als Photonen abgerufen und mittels Photomultiplier detektiert werden.

Nachteil: relativ lange Expositionszeiten, Platte muß abgetastet werden, keine unmittelbare Beobachtung des Bildaufbaus möglich







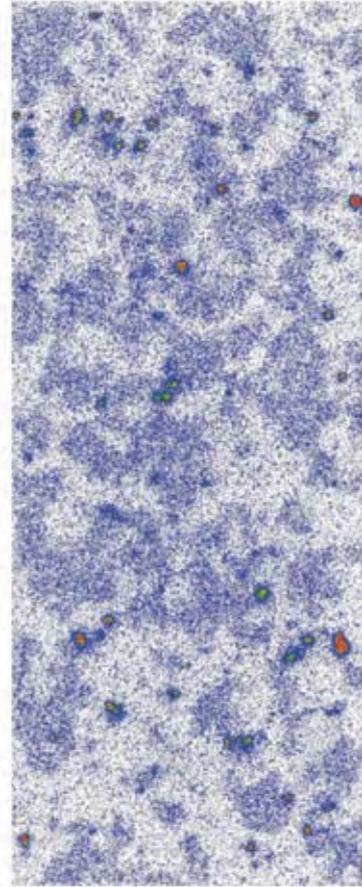
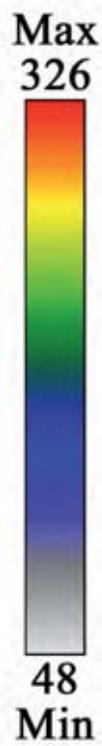
Funktionsweise der Ausleseeinheit (=Scanner) des Phosphor-Imagers (PMI)



Geöffnete Expositionskassette mit Screen und Untersuchungsprobe (UO_x – glasierte Fliese)



Phosphor-Image Rosa Porrino



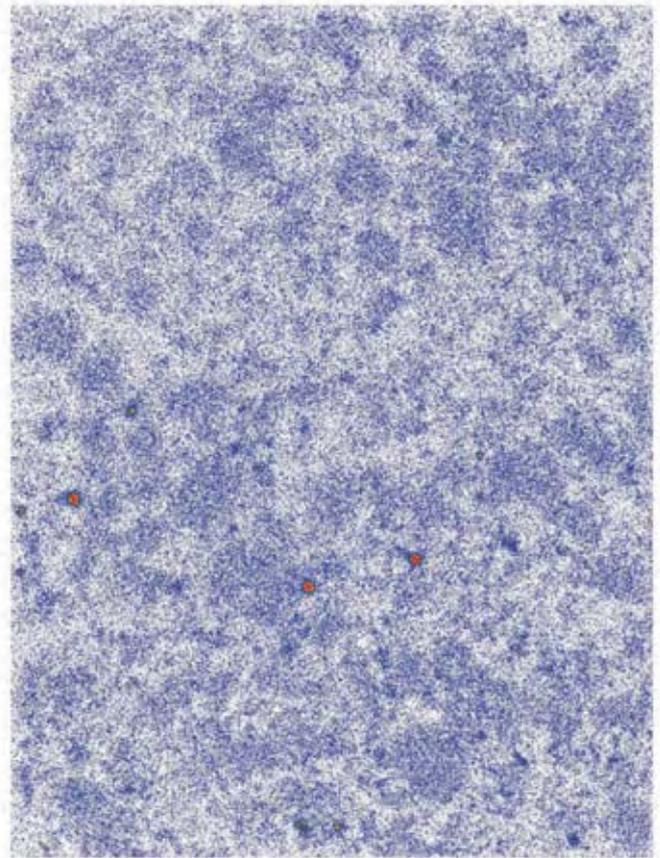
Photographie Granit Rosa Porrino
Herkunft Spanien

Falschfarbenbild Granit Rosa Porrino

Phosphor-Image Kösseine



Photographie Granit Kösseine
Herkunft Fichtelgebirge

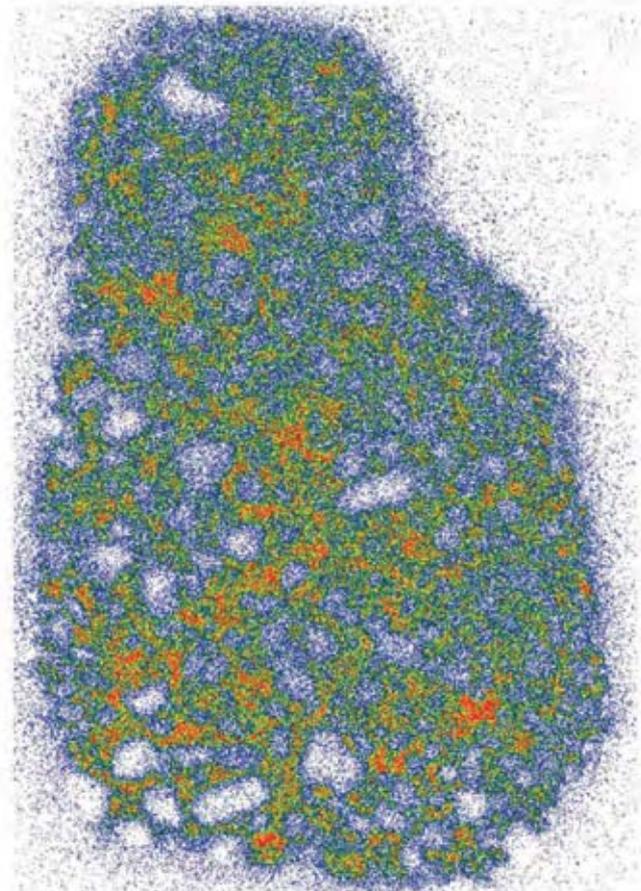
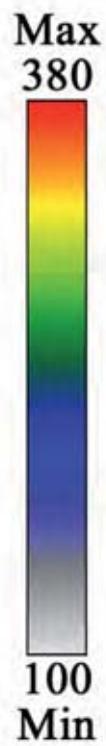


Falschfarbenbild Granit Kösseine

Phosphor-Image Burgsandstein

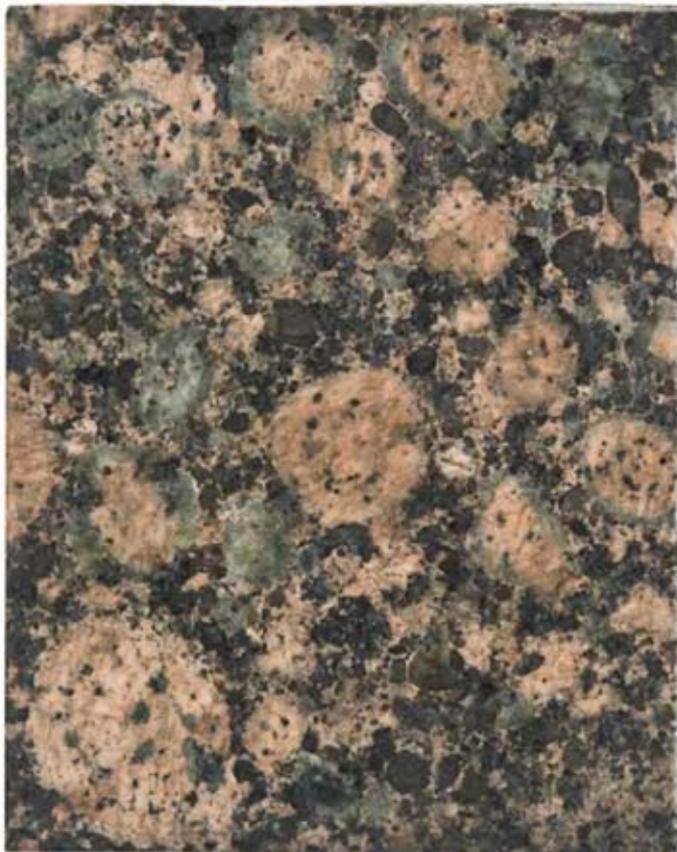


Photographie Burgsandstein



Falschfarbenbild Burgsandstein

Phosphor-Image Baltic Brown

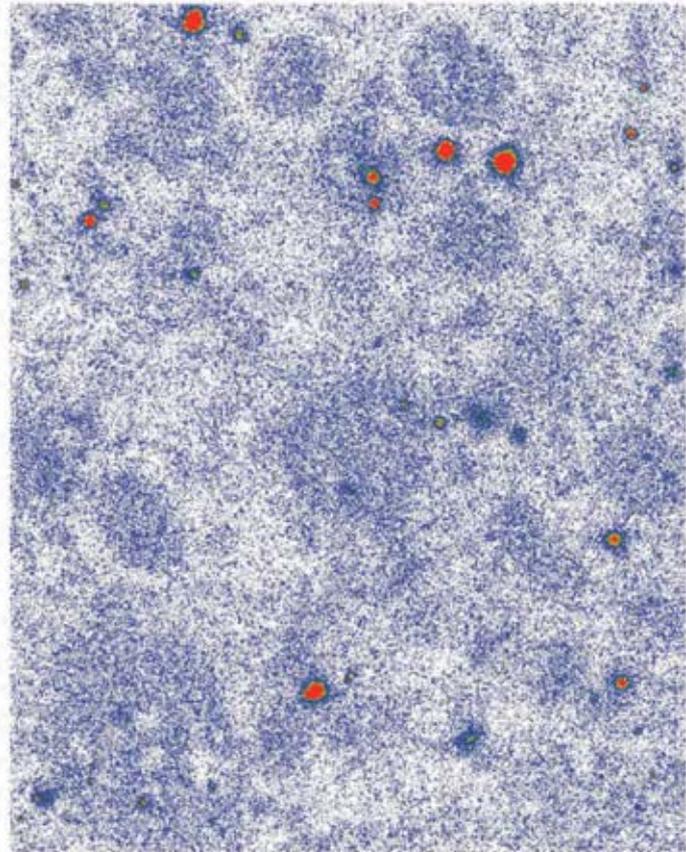


Photographie Granit Baltic Brown
Herkunft Finnland

Max
272



43
Min



Falschfarbenbild Granit Baltic Brown

11. Autoradiographievergleich des PMI / MWPC – Imagers anhand einer UO_{3-x} und inaktiven Ersatzstoff Fe_2O_k - Chromophor glasierten Fliese

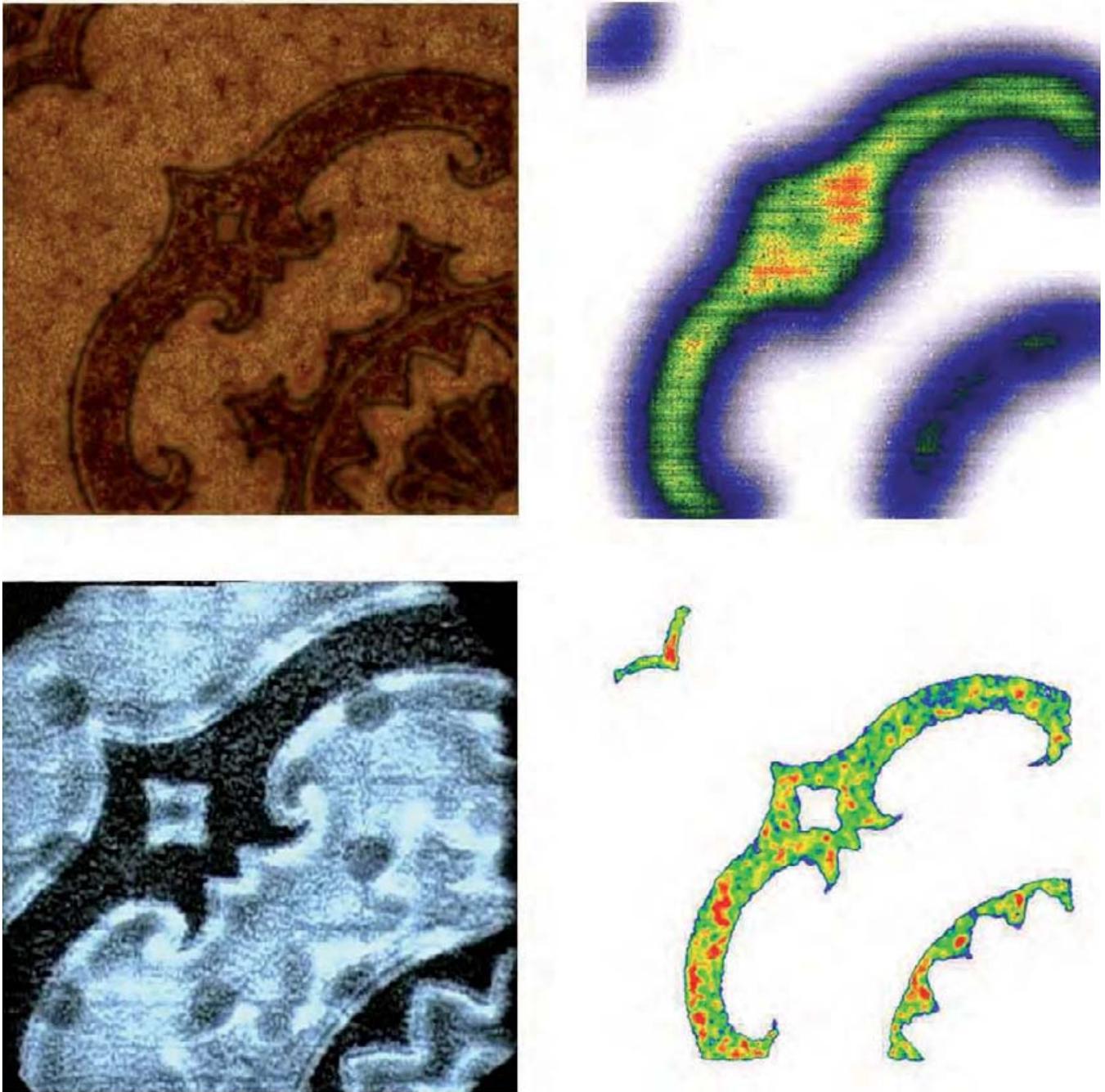
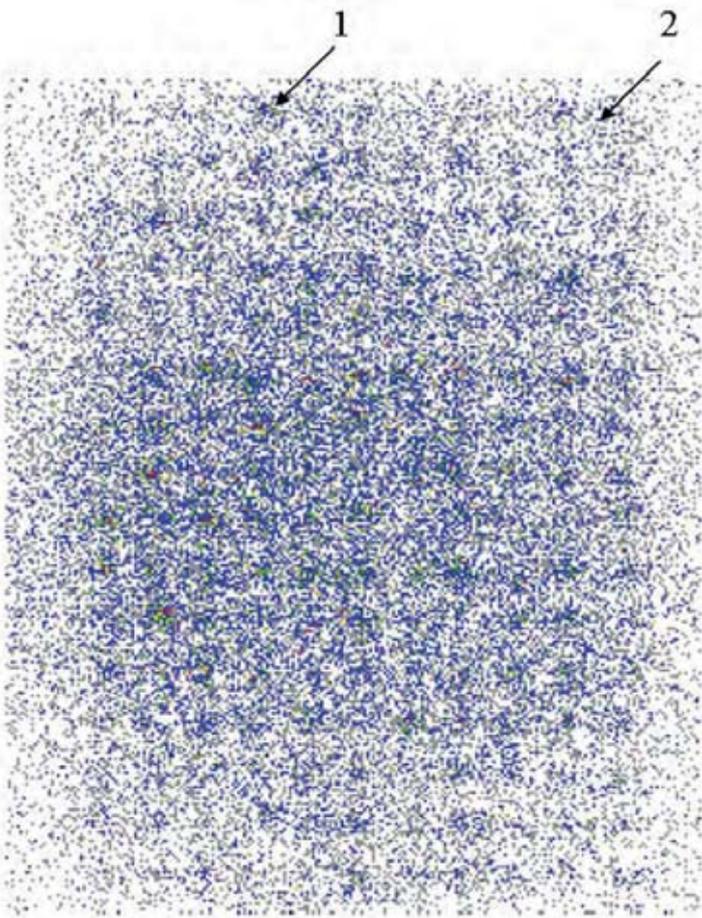


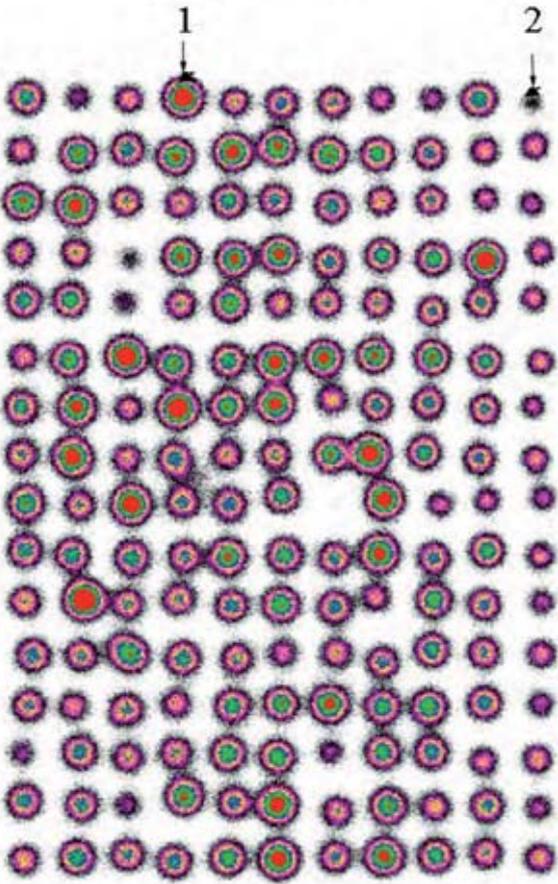
Abb. 23 (beginnend links oben im Uhrzeigersinn) Mit UO_{3-x} neben dem inaktiven Ersatzstoff Fe_2O_k - Chromophor glasierte Fliese ($20 \times 20 \text{cm}^2$), Gamma-Oberflächendosisleistung = 500 nSv/h . Digitale Autoradiographie des Objektes aufgezeichnet mit MWPC- und PMI-Imaging (die inaktiven Glasur-Aufträge scheinen nicht auf). Röntgenographie ($U = 52 \text{ kV}$): Die mit Uranoxidstufen glasierten Bereiche konturieren gegenüber dem inaktiven Ersatzstoff durch Schwermetallabsorption.

Vergleich zwischen MWPC und RPL
anhand eines [^{241}Am] Americium Flächenstandards

MWPC



RPL



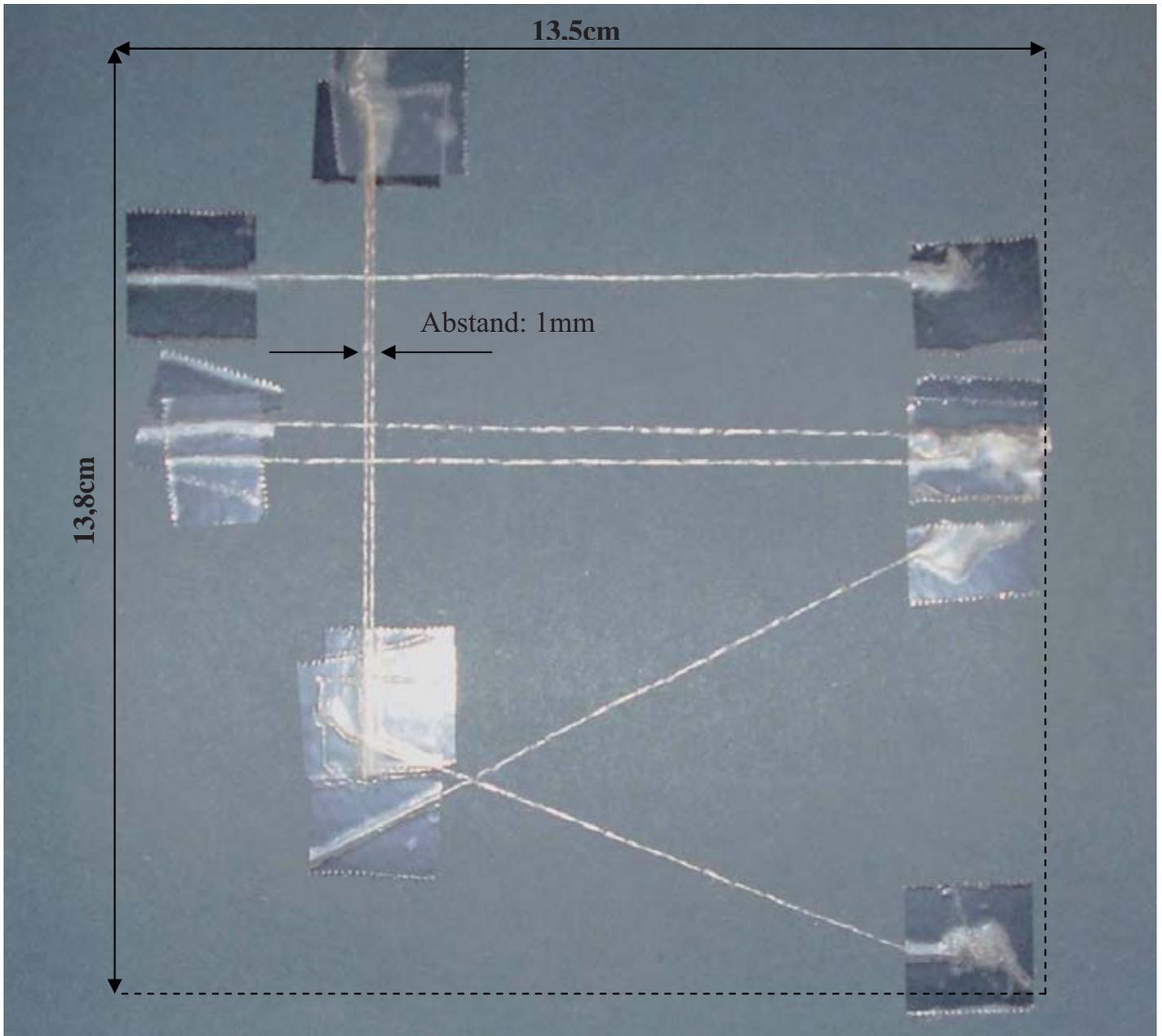


Abb. 17 Anordnung von thoriumhaltigen Baumwollfäden auf Karton. Zum Auflösungsvergleich des *PMI* und *MWPC* – Imager – Systeme wurden zwei Fäden im Abstand von 1mm angeordnet.

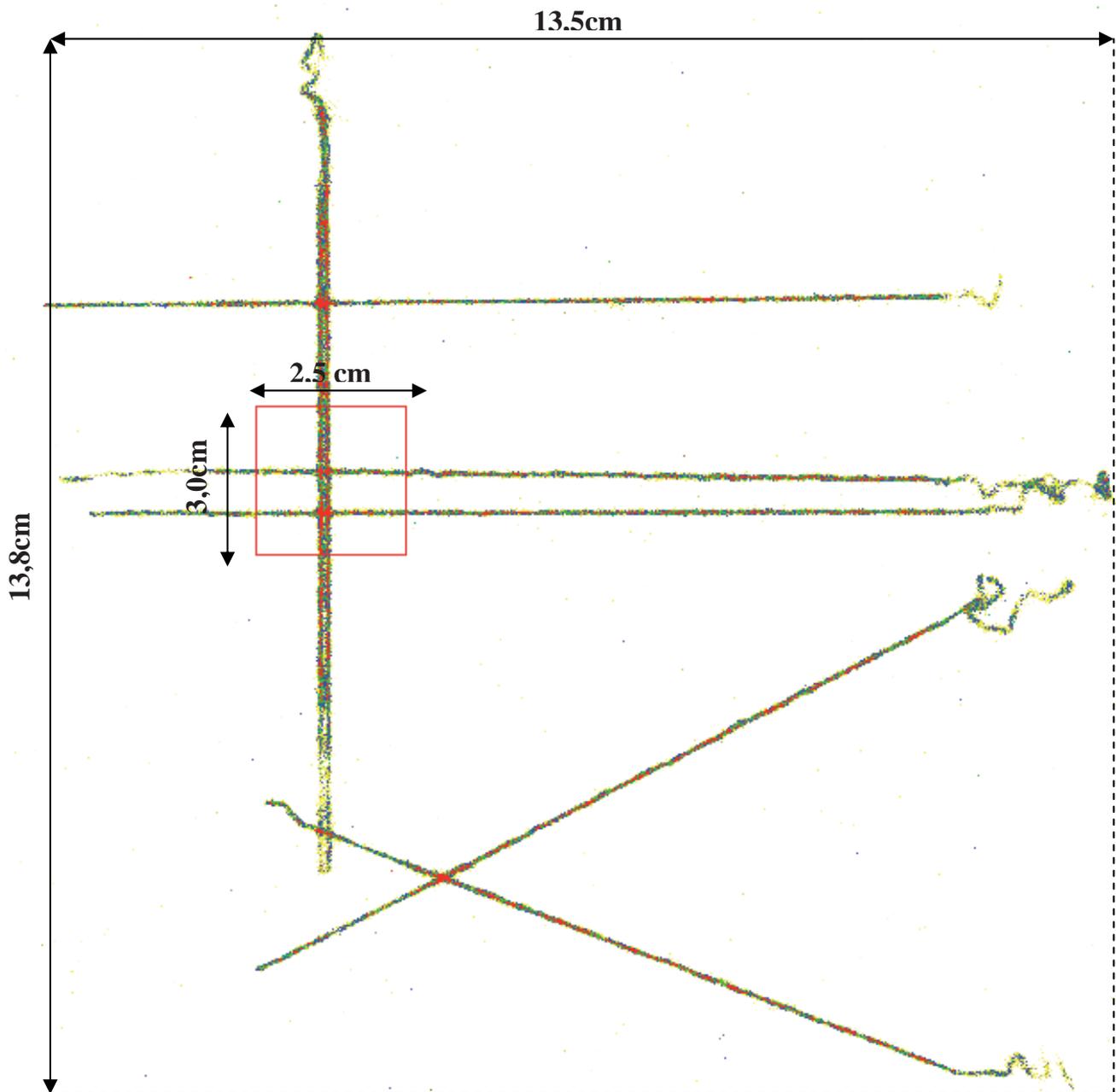


Abb. 18 Autoradiogramm der Thoriumfäden mit dem *PMI*. Eine erhöhte Aktivität an den Kreuzungspunkten der Fäden ist zu erkennen. Die dicht nebeneinander angeordneten Fäden können voneinander getrennt werden. Die markierte Fläche wurde zu Verdeutlichung des Auflösungsvermögens vergrößert.(siehe Abbildung 15).

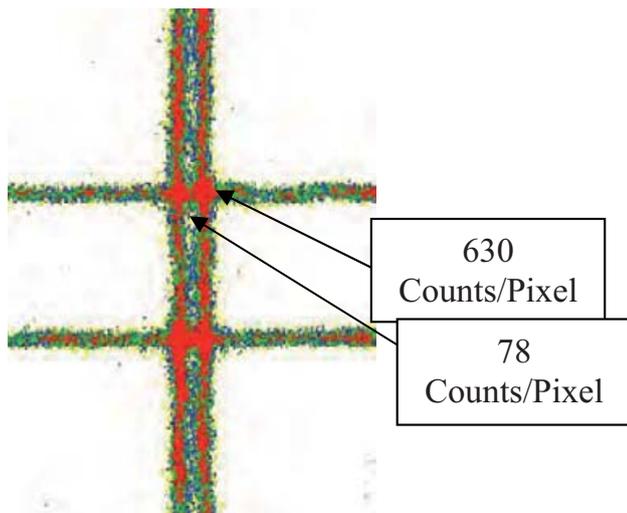


Abb.19 Vergrößerung der rot markierten Fläche aus Abbildung 18.

Die beiden Fäden lassen sich eindeutig voneinander trennen.

Dabei wurden zwei sich deutlich unterscheidende Pixel mit *Quantity-One* ausgezählt.