



Fachverband für Strahlenschutz e.V.

Mitgliedsgesellschaft der
International Radiation
Protection Association
(IRPA)


für die Bundesrepublik
Deutschland
und die Schweiz

Publikationsreihe
FORTSCHRITTE
IM STRAHLENSCHUTZ

Publication Series
PROGRESS IN RADIATION
PROTECTION

STRAHLENSCHUTZ: PHYSIK UND MESSTECHNIK

Band I



**26. Jahrestagung
Karlsruhe, 24. – 26. Mai 1994**

Bandherausgeber:
W. Koelzer, R. Maushart

Z = 88 RADIUM:

AUS DER FRÜHGESCHICHTE DER RADIOCHEMIE UND DES STRAHLENNACHWEISES

PREHISTORY OF Z = 88 RADIUM

R.J. Schwankner, P. Schöffl und G. Lieckfeld
Fachhochschule München

Zusammenfassung

Die Entdeckung von Z = 88 Radium in den Rückständen der Uranfarben-Industrie war der Ausgangspunkt für eine breite Verwendung von Verbindungen dieses Elements in der Forschung, Medizin und Leuchtfarbenproduktion. Diese Entwicklung wird ebenso exemplarisch vorgestellt, wie neuere Resultate konservatorischer Radiometrie.

Summary

Radium discovery in tailings of early uranium industry was the beginning of its widespread use e.g. in research, medicine and luminous paint production. It is this development taking place in various fields as well as recent results of custodian radiometry, that will be subject of the presentation.

1 Entdeckung und frühe Radiometrie

Z = 88 Radium, das schwerste Homologe der Erdalkalielemente wurde 1898 von Marie und Pierre Curie identifiziert und präpariert [1-3].

Ihnen war bei frühen radiometrischen Untersuchungen aufgefallen, daß die Ionisationswirkung eines Uranminerals auf Luft nur bedingt mit seinem Urangehalt korreliert und sie sprachen die Vermutung aus, daß ein neues, bislang nicht beschriebenes Element zusätzlich enthalten sein könnte, das gegenüber Uran eine deutlich höhere spezifische Aktivität aufweisen sollte. Der von Pierre Curie und seinem älteren Bruder Jacques um 1880 entdeckte Effekt, der "*polaren Elektrizität*" (Piezoelektrizität) wurde bei der Konstruktion eines "*électromètre Curie*" herangezogen, frühe Bauform einer Ionisationskammer, mit Ladungserzeugung durch Zugbelastung eines Quarzkristalls sowie einer 'spiegelgalvanometrischen' Registriereinheit.

Abb. 1 zeigt eine von Frau Curie selbst überprüfte Nachbildung, mit der "*dès de le début de nos recherches sur la radioactivité*" gearbeitet wurde, wie sie brieflich dem Gründer des Deutschen Museums in München, Oskar von Miller mitteilte [4].

Die folgende systematische Untersuchung von Mineralien führte die Curies zur Mitentdeckung der Thorium-Radioaktivität, sowie von Z = 84 Polonium (Juni 1898) und im Dezember 1898 zum [^{226}Ra]Radium jenem "*radioaktiven Körper*" hoher spezifischer Aktivität, welcher in wägbaren Quantitäten aus natürlichen Quellen zugänglich ist. In Kenntnis des Radium-Verhaltens im klassischen analytischen Trennungsgang richteten die Curies ihr Augenmerk auf die Rückstände der Uranfarbenfabrik Joachimsthal, welche ihnen in entgegenkommender Weise von der k.k. Regierung zunächst zu den Transportkosten, später zu einem Vorzugspreis überlassen wurden.

Radiometrische Gleichgewichts-Untersuchungen an Uranglas- und uranglasierten

konservatorischen Objekten belegen (Tab.1), daß im Regelfall aufbereitete Uranverbindungen - d.h. solche mit verschwindendem Radiumgehalt - von den Arkanisten der Glas-, Keramik- und Porzellan-Manufakturen eingesetzt wurden [5,6].

Insgesamt 20 t - somit radiumhaltigen - braunen, pulverigen, mit Fichtennadeln durchmischten Haldenmaterials der Uranfarbenproduktion wurde den Curies portionsweise im Zuge ihrer Untersuchungen überlassen. In einem Schuppen, welcher der Pariser Hochschule für Medizin als Sektionssaal gedient hatte und später auch in Zusammenarbeit mit einem industriellen Labor, gelang es am 28.03.1902 120 mg spektralreines Radiumchlorid als Ergebnis ihrer Bemühungen zu präsentieren.

Die Eigenschaften dieses radioaktiven Körpers wurden in zahllosen Schaulabor-Experimenten in der wissenschaftlichen Welt demonstriert, eine herausragende Darstellung gibt der 1908 niedergelegte Vorlesungszyklus von F. Soddy: *"Die Natur des Radiums"* [7].

Insbesondere die intensive Ionisationswirkung wie auch die stetige Abgabe eines gasförmigen Zerfallsproduktes (Emanation) ließen Zweifel aufkommen, ob ein Stoff, welcher spontan in zwei Edelgase transmutiert überhaupt als chemisches Element anzusprechen sei.

Die intensive strahlenchemische Wirkung der "Radium-Strahlung" auf photographische Emulsionen sei durch eine Radiographie von R. Hill Crombie, Esqu. aus dem Jahr 1906 belegt, welcher mittels eines Zentigramms Radiumbromid, das in einem - in schwarzes Papier eingewickelten - Glasröhrchen abgeschmolzen war "dieses Element seinen Namen schreiben ließ".

R.J. Strutt, der spätere Lord Rayleigh, konstruierte sogar eine Radiumuhr, welche über fünf Jahre hinweg mit einer Periodendauer von 3 Minuten zuverlässig arbeitete (Abb.3) und damit die elektrische Aufladung von radioaktiven Präparaten eindrucksvoll belegt.

Eine gelungene Präsentation der druckabhängigen Luftreichweite von Radium-Alphastrahlung und Nachweis letzterer mittels eines Leuchtschirms ist in Abb. 4 wiedergegeben, wengleich über die Exposition des Experimentators in der Literatur keine Aussagen gemacht werden.

Die Eigenschaften von Radiumsalzen durch Generation entsprechender Lumineszenzniveaux, sowie deren Populierung bzw. Deexcitation [3,11] gab Anlaß zu einer Reihe abenteuerlicher Spekulationen, welche bis hin zur radiumstimulierten Blindenheilung diskutiert wurden [8].

Überhaupt spielt die Wechselwirkung von Leuchtphänomenen im Zuge der physikochemischen Aufklärung der Radioaktivität eine bemerkenswerte Nebenrolle, so setzte Marie Curie u.a. weißen Phosphor [!] bei den o.g. Luftionisationsmessungen ein und glaubte zudem einen Zusammenhang zwischen Sonnenstrahlung und Uran-/Radium-Radioaktivität berücksichtigen zu müssen: *"Wir haben die Radioaktivität des Urans zur Mittags- und Mitternachtszeit untersucht, von dem Gedanken ausgehend, daß die hypothetische Primärstrahlung ihre Quelle in der Sonne habe und beim Durchgang durch die Erde teilweise absorbiert werde. Der Versuch ergab keinen Unterschied beider Messungen..."*[9].

2 Atomgewichtsbestimmung

Einerseits galt Radium bezüglich der vielfältigen oft unbedachten Verwendungen im technischen wie medizinischen Bereich als Wirtschaftsgut [2,10], das eine Normierung in Form der Präparation und Hinterlegung von Radiumstandards, sog. étalons notwendig machte, andererseits warf es zahlreiche naturwissenschaftliche Fragen auf, unter welchen seine Stellung im periodischen System der Elemente eine herausragende war.

Schrittweise hatten sich die Erkenntnisse über die "Geisterchemie radioaktiver Körper" als Phänomene der Isotopie bzw. der Radon-Emanation während der ersten

beiden Dekaden des 20. Jahrhunderts entschlüsseln lassen [1,3,4,7,9]. Die Aufklärung der natürlichen Zerfallsreihen, insbesondere der Uran-Radium(4n+2)-Reihe war an eine exakte Atomgewichtsbestimmung von [²²⁶Ra]Radium geknüpft, um die spontane Transmutation von Uran über die sukzessive Emission von drei Alpha-Teilchen zu Radium und von dort über fünf weitere Alphaemissionen zum inaktiven Blei zu belegen. Angesichts von Unstimmigkeiten zwischen o.g. Zerfallsmodell und den vorliegenden Atomgewichtsdaten sah sich O. Hönigschmid gemeinsam mit R. Sachtleben veranlaßt, zur eindeutigen Entscheidung dieses "Desintegrationsrätsels", 1933 das Atomgewicht von Radium neu zu bestimmen [11].

"Nur die belgische Radiumgesellschaft, die Société Minière du Haut Catanga, verfügte über genügende Mengen Radium. Auf meine vorsichtige Anfrage, ob die Gesellschaft bereit wäre mir 3000 mg Radium-Element für die Atomgewichtsbestimmung leihweise zur Verfügung zu stellen, erklärte sich die Gesellschaft sofort bereit, übernahm jegliches Risiko, sowie auch die Versicherung des mit 600 000 M. ... bewerteten Präparates. Das Präparat enthielt noch ca. 15 % Barium und wurde von mir durch wiederholte Kristallisation als Chlorid gereinigt, bis das Atomgewicht konstant blieb..." [12] (Abb.5a).

Es galt dabei wasserfreie Radiumhalogenide chemisch ineinander zu überführen und aus den auftretenden Gewichtsdaten das Atomgewicht(AG_{Ra}) zu ermitteln

$$\frac{AG_{Ra} + 2 AG_{Cl}}{AG_{Ra} + 2 AG_{Br}} = \frac{\text{mg RaCl}_2}{\text{mg RaBr}_2}$$

Beim unmittelbarsten Umgang mit 3 Curie Radium zeigten sich u.a. bemerkenswerte Materialermüdungen, die Quarzapparaturen zeigten feine Risse, Abblätterungen traten auf, auch die Bildung von F-Zentren in den verwendeten Glasgeräten wurde beobachtet (Abb.5b).

So notieren die beiden Atomgewichtsforscher, welche, abgesehen von permanentem Durchzug im Labor zwecks "Senkung des Radonpegels" keine besonderen Vorsichtsmaßnahmen ergriffen:

"...erkannten wir, daß sie eine sehr riskante und die Nerven des ausführenden Chemikers der stets mit der Tücke des Objektes rechnen muß, über Gebühr angreifende Operation darstellt. Der Ältere von uns beiden, der auch die Verantwortung trug, war auch der Meinung, daß alle Operationen bei denen das Radiumpräparat oder die Person des Operators [sic!] gefährdet werden konnte, von ihm persönlich ausgeführt werden müßten. Wenn er auch vor 23 Jahren eine gleiche Untersuchung ohne die Nerven zu verlieren und ohne Materialverlust durchgeführt hatte, so machten sich doch bei ihm Hemmungen geltend, die nicht nur dem höheren Alter, sondern vornehmlich dem Umstand zuzuschreiben waren, daß er damals mit einem Präparat arbeitete, das lediglich für wissenschaftliche Untersuchungen ... bestimmt war" [13].

Als Ergebnis dieser aufwendigen Untersuchungen erhalten Hönigschmid und Sachtleben den Wert 226,05 (IUPAC-Wert aus dem Jahre 1975: 226,0254).

3 Emanation

Störungen des radiogenetischen Gleichgewichtes in der (4n+2)-Zerfallsreihe treten in der Regel nach der Urantochter Radium auf, da dessen Tochter ([²²²Rn]Radon), Emanation genannt, als monoatomares Edelgas, je nach Beschaffenheit der umgebenden Matrix dieselbe durch Exhalation verlassen kann. Aus dem vielgestaltigen Bereich der medizinischen Radiumanwendungen sei so

eine Anwendungsform der Emanation angeführt, welche auf ihrer Eigenschaft beruht, daß im Zuge des Alpha-Zerfalls, das emittierende Atom einen Rückstoß erleidet, sodann durch Zusammenstoß mit Luftmolekülen stoßionisiert und damit zum Kation in der Gasphase [14] wird, ein Verfahren, das bis heute zum Sammeln der Radontöchter Anwendung in der Meßtechnik findet.

"...die Emanation...dient daneben..., daß man die festen Niederschläge, die sie bei ihrem Zerfall liefert in möglichst großen Mengen auf die Haut der unbedeckten Patienten konzentriert. Man macht das so, daß man diese auf isolierten Stühlen in einem emanationshaltigem Raum Platz nehmen läßt und auf eine hohe negative elektrische Spannung bringt. Dann werden von der Haut die elektropositiv wirkenden Bestandteile der zerfallenden Emanation angezogen, und der Erfolg ist der, daß man dort etwa vier mal mehr radioaktive Niederschläge nachweisen kann, als ohne die angelegte elektrische Spannung" [15].

Die gezielte Breitenanwendung der Radonexhalation erfolgte im Zuge der Einführung ambulanter Trinkkuren. Die dafür entwickelten Nuklidgeneratoren, Emanatorien genannt, wurden u.a. mit einer gutachterlichen Stellungnahme der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt beworben, welche feststellt, daß bei 24h-Exposition des Wasserinventars (100-500 ml) ein Emanationsgehalt von rund $4\mu\text{Ci}$ erreichbar ist. *"Die Apparate sind Kaffeemaschinen vergleichbar konstruiert..."*. Abb. 6 zeigt ein derartiges Emanatorium ($h=17,5\text{ cm}$; $\phi=5,5\text{ cm}$; $m=975\text{ g}$) wie es auf Flohmärkten gelegentlich erhältlich ist, in der Röntgenaufnahme (120 kV; 125 mAs) wird die Emanationsquelle sichtbar.

Unterzieht man den intakten, verplombten Apparat zerstörungsfreier Gamma-spektroskopie und vergleicht das erhaltene Spektrum qualitativ mit dem einer abgeschmolzenen Elektronenröhre aus Glas, welche funktionsbedingt [^{226}Ra]Radium enthält, so erkennt man deutlich, daß Glas, nicht jedoch das gealterte Emanatorium eine Radon-Diffusionsbarriere darstellt [5,16]. Dies geht aus den jeweiligen Intensitätsverhältnissen der Radium- und der Linien der Radiumtöchter hervor [2]. Das strahlenhygienisch bedeutsame Potential derartiger konservatorischer Objekte ist seit langem beschrieben [17], dessen ungeachtet scheinen Emanatorien im Altwaren- und Altgerätehandel auf [5].

5 Leuchtmassen

F. Giesel und H. Becquerel wiesen bereits 1899 darauf hin, daß sich unter einer Reihe von anorganischen Festkörpern insbesondere "aktiviertes Zinksulfid" - auch Sidotsche Blende (ZnS mit Spuren von Cu ; 10^{-4} [18]) genannt - mit Radiumsalzen vermischt eignet, die bei radioaktiven Umwandlungen freiwerdenden Energie teilweise in sichtbares Licht zu konvertieren. In Folge des 3,8 eV-Bandabstands des II/VI-Halbleiters Zinksulfid, wird das Emissionsmaximum um 510 nm beobachtet [19]. Dabei zeigte es sich, daß bei guter Dunkeladaptation (10-20 min) unter Verwendung einer Lupe, 15 innerhalb einer zehntel Sekunde auftreffende Lichtquanten der betreffenden Wellenlänge, welche in etwa dem Maximum der spektralen Augenempfindlichkeit entspricht, als Lichtblitz ("*Szintillation*") wahrgenommen werden [20].

Aufbauend auf dieser Entdeckung wurde zum Nachweis von Kernstrahlung visuelle Beobachtung von Szintillationen vielfach erfolgreich angewandt, denke man nur an die Untersuchungen von E. Rutherford, E. Marsden und H. Geiger über die Streuung von Radium-Alphastrahlung, welche 1911 in der Entdeckung des Atomkerns gipfelten. Es ist so H. Geiger nicht zu verdenken, daß er bekanntermaßen in der Folgezeit große Anstrengungen auf die Entwicklung automatisierter elektrischer Zählmethoden verwandte:

"Nicht alle Beobachter eignen sich zu Szintillationszählungen; eine gewisse Subjektivität ist nicht zu vermeiden. Man ermüdet ziemlich rasch, zuweilen treten auch ... Halluzinationen, störend auf. Normale Augen, gute Dunkeladaptation, ausgeruhter Zustand sind erforderlich; Nikotin, Alkohol, „Kater“ und

dgl. sind schädlich. Einwirkungen von Gammastrahlen auf die Augen setzt die Empfindlichkeit herab [sic!] und es muß das Auge jedenfalls gegen solche Einwirkungen geschützt werden (Ablesungen ums Eck mittels totalreflektierenden Prismas, Abschirmung der Gammastrahlen mit Blei). Es sollen zahlreiche Beobachter in kurzen Intervallen (1/2 bis höchstens 1 Minute) abwechseln und nicht länger als 1-2 Stunden pro Woche zählen. Subjektive Schwankungen kann man durch Simultanzählungen zweier Beobachter zu eliminieren trachten..." [3].

Auf W. Crookes und F.H. Glew geht die Konstruktion sog. Spinthariskope und Szintilloskope zurück (Abb.8 u.9), kleine wohlfeile Apparaturen - oft von Optikern vertrieben, welche mit einer radiumhaltigen Leuchtmasse sowie einer Beobachtungsoptik versehen waren. Mit adaptiertem Auge konnten so einzelne Szintillationen aufgelöst werden. Es ist uns durch Verwendung einer hochempfindlichen Restlichtkamera kürzlich gelungen, dieses Phänomen simultan einem größeren Kreis von Beobachtern zu zeigen, wobei sich der räumlich, wie zeitlich stochastische Charakter des radioaktiven Zerfalls demonstrieren läßt. Die Bildsequenz in Abb. 10 wurde so in Sekundenabständen bei geöffnetem Spinthariskop aufgezeichnet [2].

Auch die gleichfalls auf F. Giesel (1906) zurückgehende Einführung der radioaktiven Leuchtmassen zur Herstellung dauerleuchtender Zeiger und Skalen von Uhren, Kompassen etc. führte zu einer weiten und unkontrollierten Verbreitung kleiner Radiumportionen, wobei "die winzigen Mengen, ... niemals an eine Zentrale zurückströmen..." [19].

Dabei sind mitunter recht kuriose Anwendungen zu vermelden, so etwa der Brauch bei den englischen Truppen im I. Weltkrieg, mit radiumhaltigen Massen "selbstleuchtend gemachte Tuchstückchen" in der Nackengegend zu tragen, um im Dunkeln "den Anschluß aufrecht erhalten zu können" [2].

Unterzieht man die radiogenetische Gleichgewichtslage derartiger Gegenstände (vgl. Abb.8,9) näherer Betrachtung, so ist festzustellen, daß es sich bei diesen konservatorischen Objekten um radonexhalierende Quellen handelt. Die quantitative Auswertung (Abb.11) der gammaspektrometrisch ermittelten, radiogenetischen Gleichgewichtsstörungen zwischen [^{226}Ra]Radium und seinen Folgeprodukten korreliert mit der ermittelten Radonexhalation dieser Objekte in ihrer Umgebungsluft, welche rezyklierend z.B. mittels einer Gitterionisationskammer (Atmos 12D) erfaßt wird [16,21].

Bei der konservatorischen Lagerung größerer Bestände (z.B. Flugzeugmeßinstrumente) empfiehlt es sich deshalb dringend - etwa durch die Verwendung entsprechend aktiv entlüfteter Schränke - den geschilderten Expositionspfad zu berücksichtigen. Die o.g. Messungen belegen zudem die experimentell gesicherte Erkenntnis, daß bei gut versiegelten, radiumhaltigen Meßinstrumenten die Gammadosisleistung - gegenüber dem belüfteten Zustand - zunimmt.

Einen bemerkenswerten Fall von Emanationsanwendung referiert G. Berndt (1920): "...die Radium-Heil-Gesellschaft hat die Wände des Kellerraumes, in welchem die Säcke mit der Joachimsthaler Pechblende liegen, mit Zinksulfid austreichen lassen, das unter Wirkung, der von dieser abgegebenen Em [Emanation] und ihrer Zerfallsprodukte... genügend leuchtet, um die Umrisse von Personen und Gegenständen erkennen zu können" [19].

Die Beobachtung der Szintillationen führte nicht nur den hartnäckigen Positivisten E. Mach dazu, der atomistischen Theorie der Materie etwas näherzutreten [2,22], sondern legte darüberhinaus den Grundstein eines der erfolgreichsten Detektionsprinzipien hoher zeitlicher Auflösung für Korpuskular- bzw. Wellenstrahlung. Ab 1947 tritt der von Kalmann und Mitarbeitern entwickelte Szintillationsdetektor auf der Basis von anorganischen, sowie flüssigen organischen bzw. polymeren Szintillatoren in Verbindung mit dem Sekundärelektronenvervielfacher in die Nuklearmeßtechnik ein, wo er bis heute eine tragende Rolle spielt [20].

Epilog

Z = 88 Radium ist als Radioelement der Erdalkalien bis hinein in die Entdeckungsgeschichte der Kernspaltung eines der prominenten Radioelemente geblieben. Bei der strahlenhygienischen Weiterentwicklung des Inkorporationsschutzes hat es ebenso Pate gestanden, wie beim Aufspüren von Low-LET-Strahlern als Radiumersatz in Leuchtmassen ($[^{14}\text{C}]$ Kohlenstoff, $[^{147}\text{Pm}]$ Promethium) und der Entwicklung anwendungsbezogener Radiometrie. Die Tragödie der Ziffernblattmalerinnen, welche in den Ateliers durch die geübte Praxis des Anspitzens der feinen Haarpinsel mit dem Mund einen hohen Gesundheitsrisiko davontrugen [2,23,24], wies den Weg zu den strengen strahlenhygienischen Standards unserer Tage (Abb.12a).

Nachdenklich stimmt uns heute das Motto das M. Heiner, seiner 1941 erschienen Schrift: "Radium das natürliche Strahlenheilmittel" voranstellt (Abb.12b) [25]:

"Aegros RADIUM sanat
Caducos rehabilitat".

5 Literatur

- [1] Weigel, F.: Radium. Chem.-Ztg. 101, p. 487-499, 1977
- [2] Schwankner, R.J., A. Brummeisl, P. Schöffl, A. Schöpf: Die Frühgeschichte des Radiums. Die Geowiss. 10, p. 160-167, 190-198, 1992
- [3] Meyer, S., E. Schweidler: Radioaktivität. 2. Aufl., B.G. Teubner, Leipzig - Berlin, 1927
- [4] Deutsches Museum: Der historische Teil der Abteilung Kernphysik. Abhandlungen und Berichte, 28, Heft 3, p. 21-32, 1960
- [5] Schöffl, P.: Beitrag zur radiometrischen Charakterisierung von radioaktiven Alltagsgegenständen. Diplomarbeit FH München, 1992
- [6] Schwankner R.J., G. Lieckfeld, D. Lienert, P. Schöffl, M. Steiner: Zur Farbkraft von Uranverbindungen. Teil II - Uranglas/Fluoreszenz des Uranyl-kations. MNU 45, p. 88-98, 1992
- [7] Soddy, F.: Die Natur des Radiums - Nach sechs an der Universität zu Glasgow im Jahre 1908 gehaltenen freien populären Experimentalvorlesungen. J.A. Barth, Leipzig, 1909
- [8] Greinacher, H.: Radium - Gemeinverständliche Darstellung. v.Veit & Comp., Leipzig, 1907
- [9] Sklodowska-Curie, M.: Untersuchungen über die radioaktiven Substanzen. F. Vieweg, Braunschweig, 1904
- [10] Henrich, F.: Chemie und chemische Technologie radioaktiver Stoffe. J. Springer, Berlin, 1918
- [11] Schwankner, R.J.: Otto Hönigschmid (1878-1945). ChiuZ 15, p. 163-174, 1981
- [12] Birckenbach, L.: O. Hönigschmid 1878-1945. Chem.Ber. 82, p. XI-LXV, 1949
- [13] Hönigschmid, O., R. Sachtleben: Revision des Atomgewichtes des Radiums. Z.Anorg.Allg.Chem. 221, p. 65, 1934
- [14] Eiswirth, M., R.J. Schwankner, F. Weigel: Electrostatic Radionuclide Separation - A New Version of Rutherford's Thorium Cow. J.Chem.Educ. 59, p. 608-611, 1982
- [15] Block, W.: Das Radium und seine Bedeutung in Wissenschaft und Leben. Th. Thomas, Leipzig, 1914
- [16] Bämayer, R.: Zur Kenntnis des radiogenetischen Gleichgewichtes: $[^{222/220}\text{Rn}]$ Radon-Exhalation. Diplomarbeit FH München, 1993

- [17] de Wit, R., T. De Roo: Description on an Antique Radium-Goblet; A Dangerous Curiosity. Medical History 18, p. 299-303, 1974
- [18] Hofmann, K.A.: Lehrbuch der Anorganischen Chemie. F. Vieweg, Braunschweig, 1928
- [19] Berndt G.: Radioaktive Leuchtfarben. F. Vieweg, Braunschweig, 1920
- [20] Grupen, C.: Teilchendetektoren. Bibliographisches Institut, Mannheim - Leipzig - Wien, 1993
- [21] Fuhrmann, C., W. Buhrmann: Bericht über Fortgeschrittenen-Praktikum im Studiengang Physikalische Technik. FH München, 1993
- [22] Meyer, S.: Das Spintariskop und Ernst Mach. Z.Naturfoschg. 5a, p. 407-408, 1950
- [23] Cloutier, R.J.: Florence Kelley and the Radium Dial Painters. Health Physics 39, p. 711-716, 1980
- [24] Hardy, H.L.: Beryllium Poisoning - Lessons in Control of man-made Disease. New Engl.J.Med. 273, p. 1188-1199, 1965
- [25] Heiner, M.: Radium - das natürliche Strahlenheilmittel. J.J. Arnd (vormals O. Gmelin), Leipzig, 1941

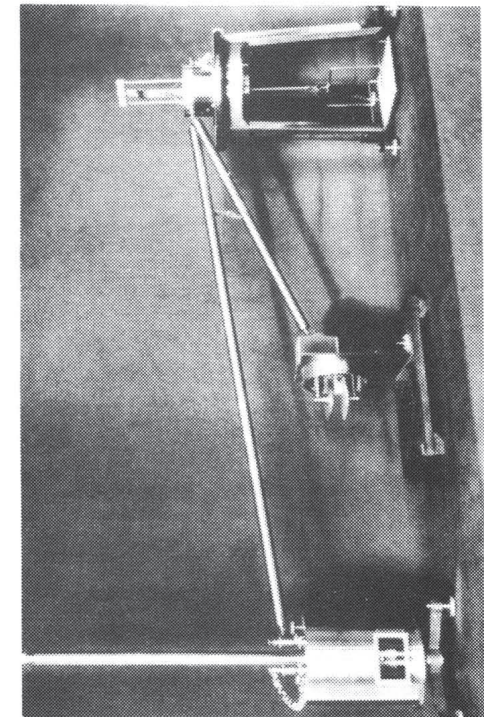


Abb. 1: Curie-Elektrometer [4]



Abb. 2: Radium-Radiographie mit 10 mg RaBr_2 [7]

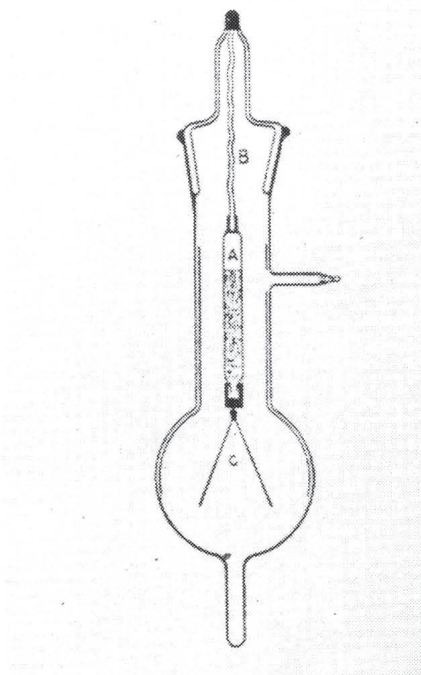
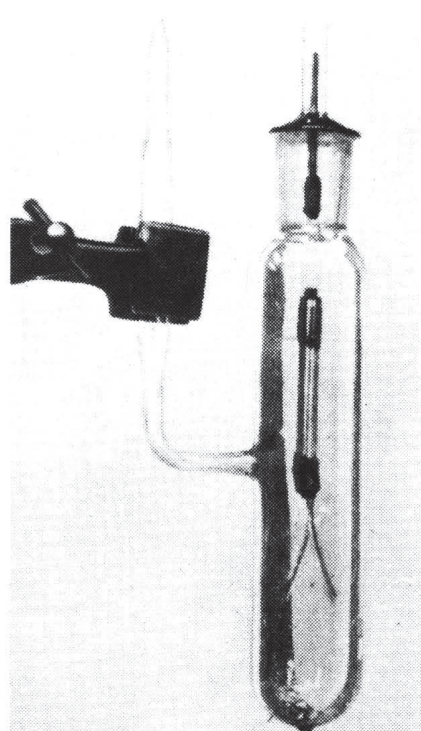


Abb. 3: Radium-Uhr nach R.J. Strutt (dem späteren Lord Rayleigh), Periodendauer 3 min [7]



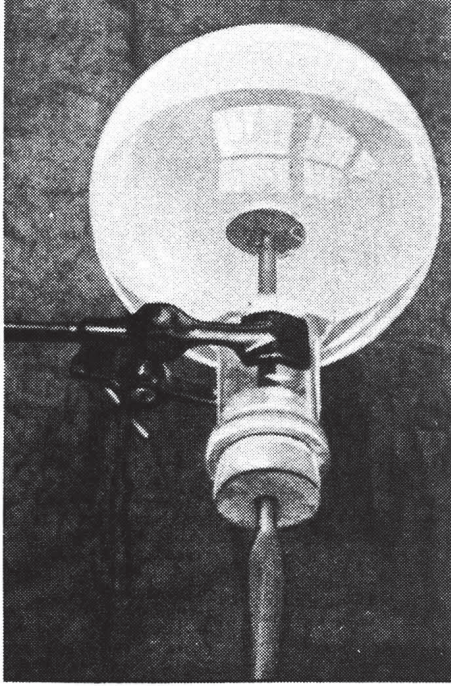
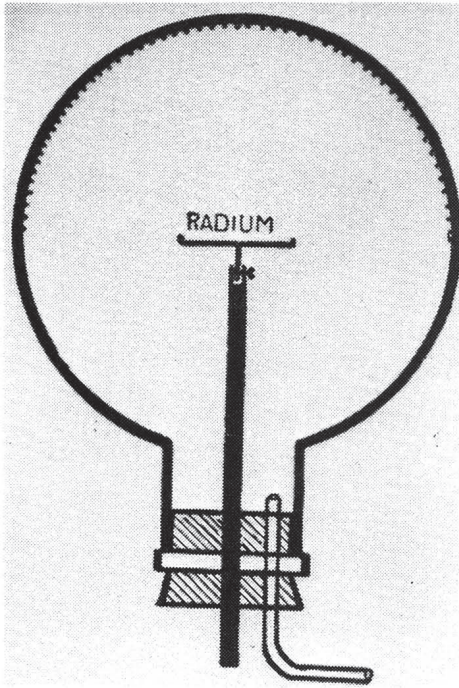


Abb. 4: Apparatur zur Demonstration der Reichweite von Alpha-Strahlung n. Soddy [7]

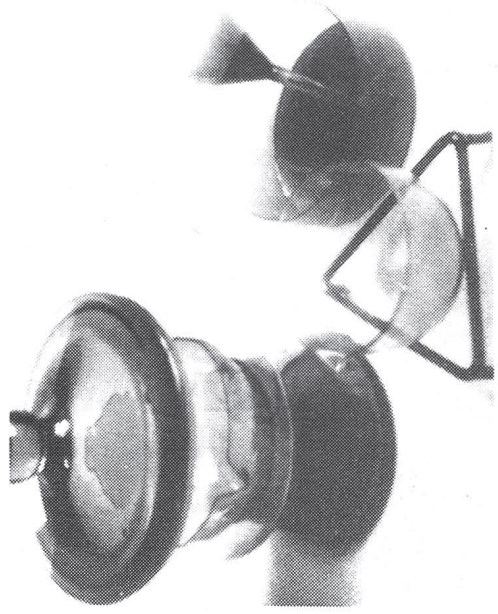
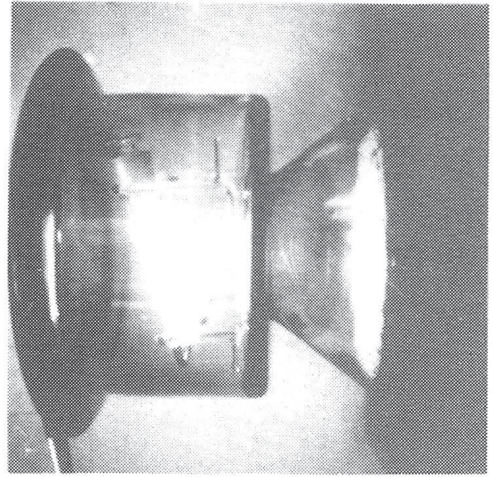


Abb. 5a, b: 3 g "Radiumelement" (5,1 g RaBr_2) im eigenen Licht; F-Zentrenbildung i. d. Quarzgefäßen [11]

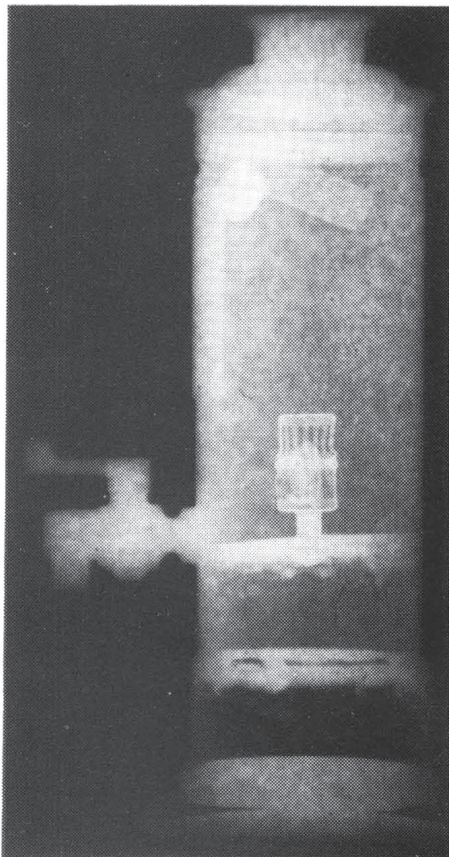


Abb. 6a, b: Patentiertes Radium-Emanatorium für Heimkuren [2]

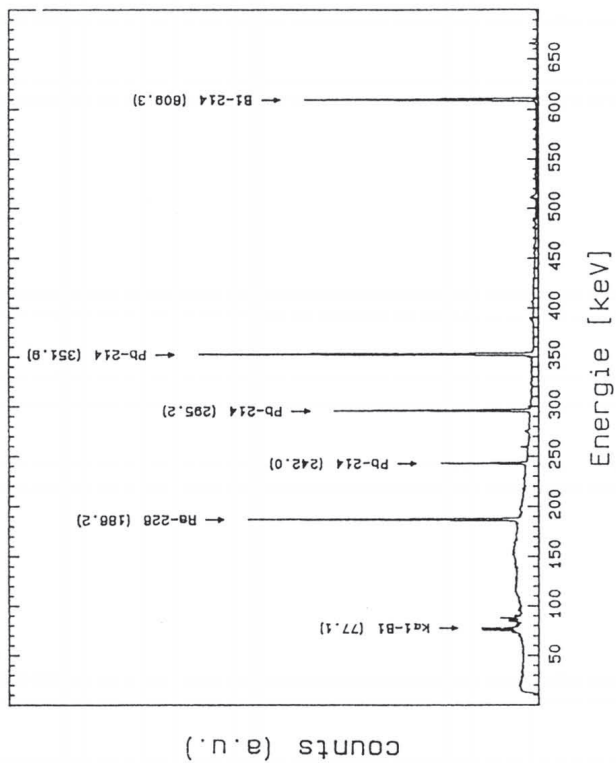
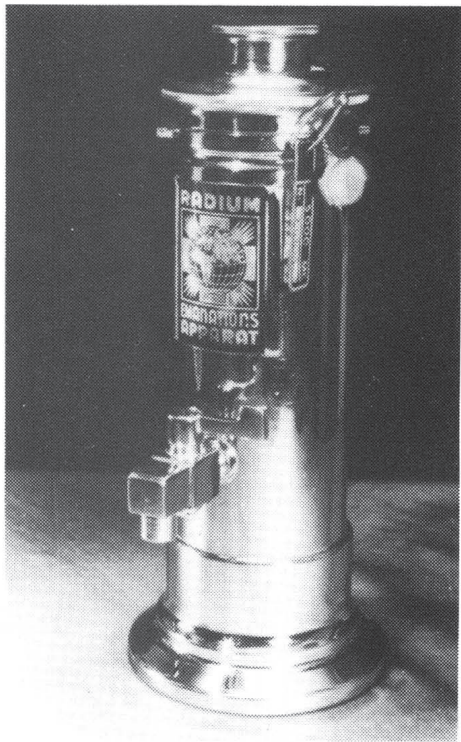


Abb. 6c: Gammaskpektrum des Emanatoriums

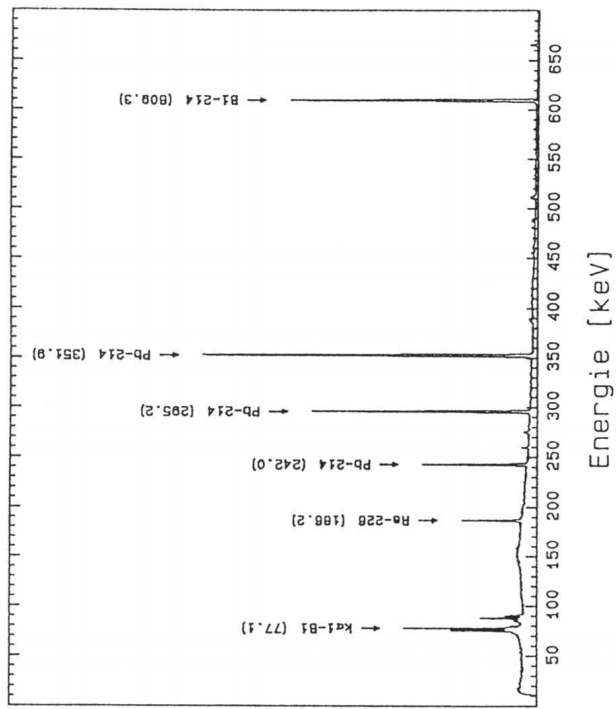


Abb. 7: Gammaskpektrum einer [226Ra]-haltigen Elektronenröhre

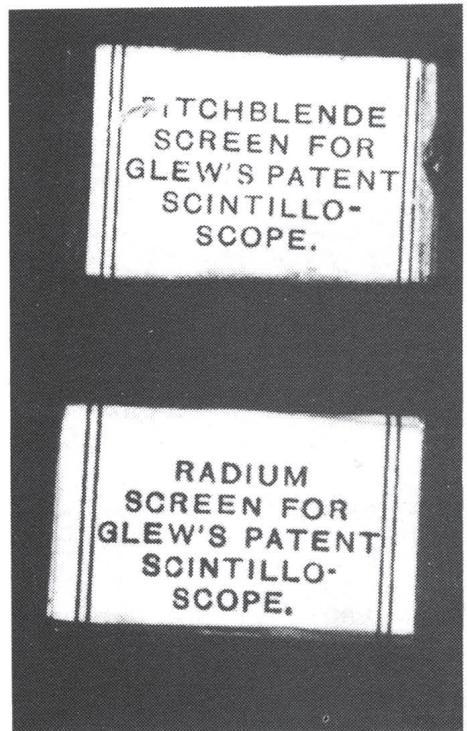
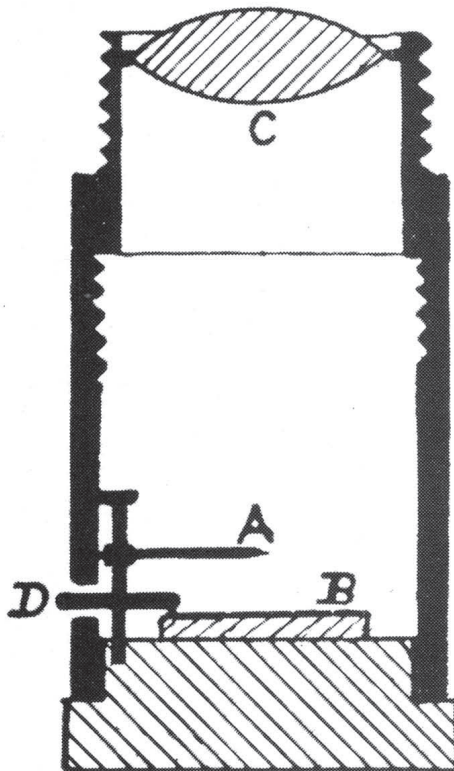
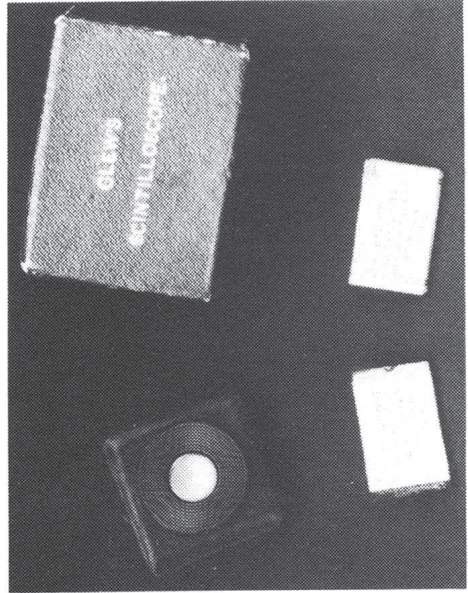


Abb. 9: Szintilloskop nach Glew mit Beobachtungspräparaten [2]

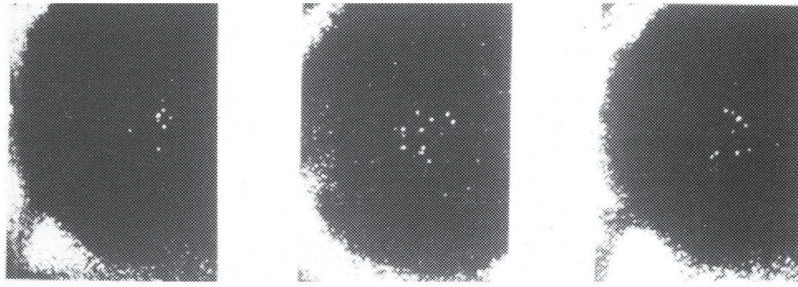


Abb.10: Blick in ein Spinthariskop bei abgenommenem Tubus [2] Bildsequenz aufgezeichnet mit einer Restlichtkamera zur Demonstration des räumlich wie zeitlich stochastischen Charakters d. registrierten Zerfallsereignisse

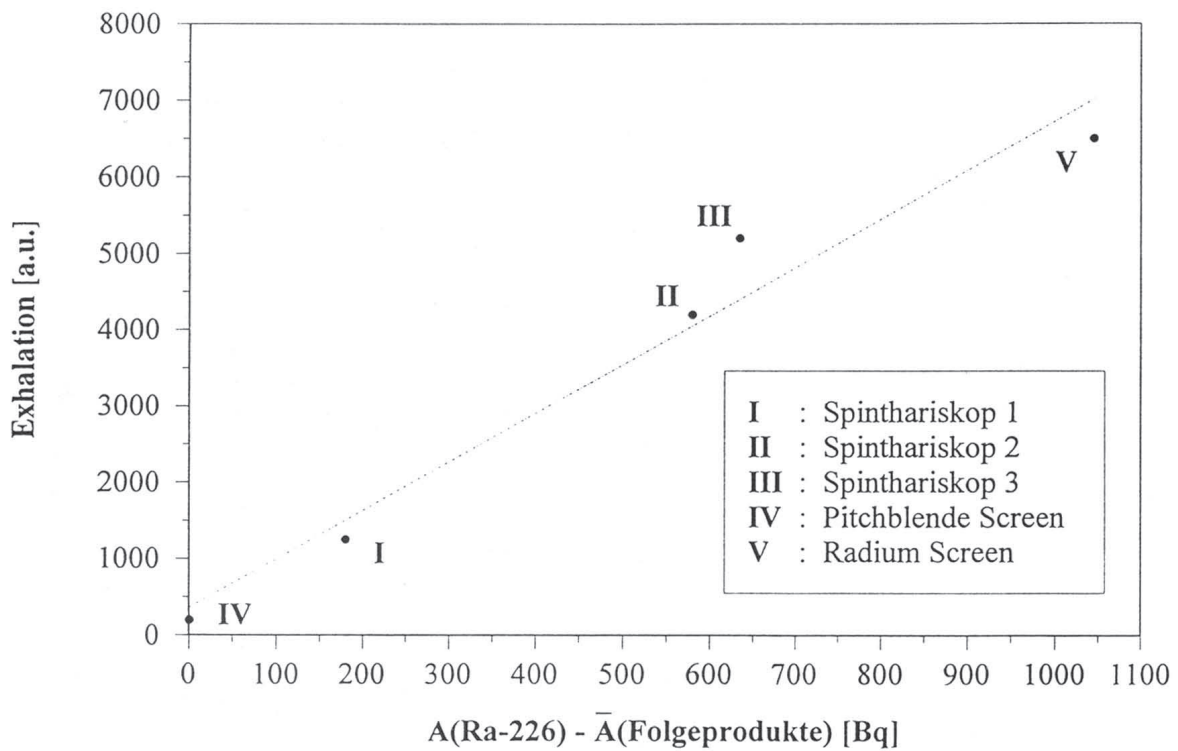


Abb. 11: Radonexhalation ausgewählter konservatorischer Objekte



Abb.12a: Cartoon einer New Yorker Tageszeitung der 20er Jahre zur Tragödie der Zifferblattmalerinnen [24]

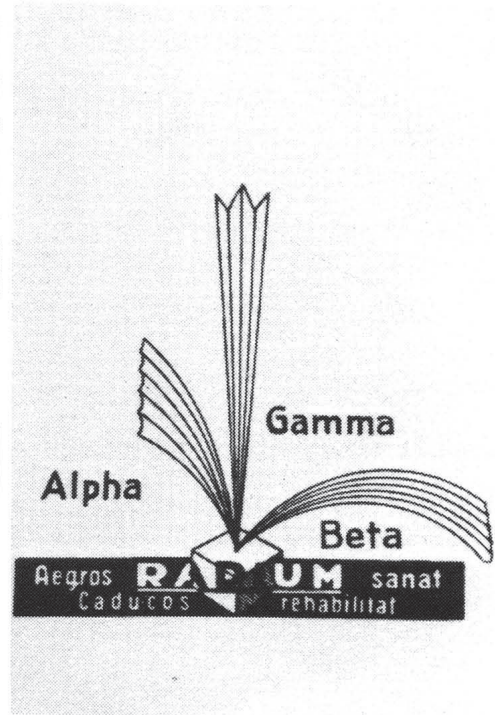


Abb.12b: Aus M. Heiner, 1941: Radium das natürliche Strahlenheilmittel [25]

Tab. 1: Radiometrische Daten ausgewählter konservatorischer Objekte

Objekt	U-238 [Bq]	Ra-226 [Bq]	Pb-214 [Bq]	Bi-214 [Bq]	Gleichgewicht U-238/FP [%]	Gleichgewicht Ra-226/FP [%]
Pechblende (Joachimsthal)	3060	3000	2820	2900	95	95
Weinglas (Annagelb)	7700	< 10	< 10	< 10	-----	-----
Schubladenkнопf (Seladonglas)	6970	1050	950	990	14	90
Spinthariskop 1 (variabler Tubus)	< 40	370	200	180	-----	50
Spinthariskop 2 (fixierter Tubus)	< 40	2200	1840	1400	-----	75
Spinthariskop 3 (variabler Tubus)	< 40	1280	660	630	-----	50
Pitchblende-Screen (Glew's Scintilloscope)	80	80	90	80	100	100
Radium-Screen (Glew's Scintilloscope)	< 40	3950	3200	2610	-----	75

Der ausgewiesene (prozentuale) Gleichgewichtswert entspricht der gemittelten Aktivität von Pb-214 und Bi-214, bezogen auf die Aktivität von U-238 bzw. Ra-226. Aufgenommen von P.Schöffl, R.J.Schwankner, C.Fuhrmann, W.Buhrmann