

Regensburger Universitätszeitung

Radioaktivität und Strahlennachweis

Einführungsvortrag von Prof. Dr. Henning von Philipsborn im Rahmen des Radiometrischen Seminars am 10. Juli 1986 im Bergbau- und Industriemuseum Ostbayern, Theuern.

Kaum ein anderes Naturphänomen ist dem Namen nach auch Laien so bekannt wie die Radioaktivität und verbindet sich mit Hoffnungen und mit Ängsten. Keine andere Entdeckung der Physik und Chemie hat auf die fundamentale Naturerkenntnis stärker ausgestrahlt. Sehr vielfältig sind ihre Erscheinungen und Anwendungen.

Ziel des folgenden Beitrages ist es, Radioaktivität und ihren Nachweis phänomenologisch zu behandeln. Das Gesamtphänomen besteht aus einer Summe leuchtender oder leitender Einzelphänomene, wie Lumineszenz, Ionisation und andere. Die Einzelphänomene treten dabei nicht immer oder nur bei der Radioaktivität auf, aber es ist die Summe der Phänomene, welche der Radioaktivität eigen ist.

Eine phänomenologische Behandlung eines Themas ist in den Wissenschaften heute kaum noch üblich. Man stellt Erkenntnisse apodiktisch voran, auch wenn sie meist aus Beobachtungen nur abgeleitet sind, und führt Experimente nur an, um die Theorie zu beweisen. Es gibt zwar Fälle bei denen die theoretische Vorhersage dem experimentellen Beweis vorherging, aber dies sind die Ausnahmen.

Historisch beginnt Wissenschaft in der Regel mit Beobachtungen, wobei es gerade den Naturforscher ausmacht, Erscheinungen als nachdenkenswert und untersuchenswert zu finden, die Nichtforscher gar nicht beachten. Zur Wahrnehmung einer Beobachtung muß man allerdings bereit sein, sie muß innerhalb von unserem „Erwartungshorizont“ liegen. Insofern geht „Theoretisieren“ dem „Experimentieren“ voraus.

Aus dem Inhalt:

| | |
|--|----|
| Radioaktivität – Rückblick und Ausblick | 9 |
| Gastvorträge und Kolloquien | 13 |
| Hannover-Messe-Industrie | 14 |
| Kulturförderpreis | 18 |
| Berufungsbilanz | 19 |
| Rektoren-Konferenz der Donau-Universitäten | 20 |
| Katholische Erwachsenenbildung | 23 |
| Kostbarken aus der Bibliothek | 26 |
| Sinn und Zweck des vorläufigen Studiums | 29 |

Der Forscher ist aber nicht zufrieden mit der Beobachtung von Erscheinungen, sondern versucht sie als Wirkungen einer Ursache zu verstehen und gesetzmäßige Zusammenhänge zu erkennen. Hierzu sammelt er Beobachtungen unter verschiedenartigen Bedingungen, wie er sie im Felde findet oder im Labor herstellt. Glücklicherweise wird der Forscher, wenn es ihm gelingt, verschiedene, scheinbar zusammenhanglose Erscheinungen als die Wirkungen zusammenhängender und letztlich einer einzigen Ursache zu erkennen.

Der ersten Beobachtung und Beschreibung und dem qualitativen Nachweis folgt die quantitative Messung mit Einführung physikalischer Größen und Einheiten. Jede Wirkung-Ursache Beziehung läßt sich zu einer Meßmethode entwickeln. Die Meßergebnisse bedürfen einer Bewertung, welche ihrerseits Kenntnis und Verständnis der Meßparameter und der Naturgesetze voraussetzt.

Es erscheint mir heute besonders sinnvoll, von den unmittelbar sichtbaren Phänomenen, den sichtbar oder sonstwie bemerkbar gemachten Wirkungen auszugehen und von diesen zu den Ursachen, den Naturgesetzen, den Nachweis- und Meßmethoden und den technischen Anwendungen hinzuzuführen. Aus mehreren Gründen. Es ist der historische, lange, mühsame Weg, den wir heute natürlich schneller und leichter nachgehen können. Es ist der Weg der – eher als der von der abstrakten Theorie ausgehende – auch für Laien verständlich ist. Und es ist der für die Radioaktivität besonders geeignete Weg. Man kann die Radioaktivität sehr wohl mit einfachen Proben, Phänomenen und Methoden zumindest sichtbar und hörbar machen. Die qualitativen Nachweismethoden sollten verstanden sein, bevor quantitative Meßergebnisse bewertet werden.

Ganz einfach ist es allerdings nicht. Radioaktivität hat zwar eine letzte, einzige Ursache, den spontanen Zerfall natürlich instabiler oder künstlich instabil gemachter Atomkerne, die früher atomos = unteilbar gedacht waren. Der Zerfall kann aber sehr verschiedenartig erfolgen für die verschiedenen, in ihrem Kern unterscheidbaren Atomsorten, den Nukliden oder Isotopen. Es gibt deren über 2000 für die ca. 100 chemischen Elemente.

Sehr verschiedenartig sind auch die Wirkungen, auch wenn diese ihrerseits letztlich auf der Wirkung der durch die energiereiche Strahlung der Radioaktivität angeregten oder freigesetzten Elektronen beruht. Die Wär-

meerzeugung und andere Wirkungen abgebremster Neutronen und Spaltprodukte wären allerdings gesondert zu behandeln. Radioaktivität ist nicht beschreibbar mit einer einzigen physikalischen Größe und einer Einheit. Vielmehr gilt: Ein Thermometer macht nicht den Heilkundigen, ein Geiger-Müller-Zähler nicht den Strahlenexperten.

Probennahme und Probenteilung, Probenpräparation und Probengeometrie, Meßgeometrie und Meßparameter, Eichproben und Umrechnungen spielen für die richtige Messung radiometrischer Größen eine viel größere Rolle als bei der Messung anderer physikalischer Größen. Und dies gerade, weil die Empfindlichkeit und die Zuverlässigkeit richtig durchgeführter radiometrischer Verfahren größer ist als für irgend eine andere physikalische oder chemische Größe. Die Nachweisgrenzen sind äußerst niedrig, Störeinflüsse vielfältig und schwerwiegend. Methodische Fehler sind rasch gemacht. Schwieriger als bei anderen physikalischen Messungen ist bei radiometrischen vor allem auch die Bewertung. Sie erfordert multidisziplinären Fachverstand und praktische Erfahrung.

Hohe Zählraten eines „Meßinstrumentes“ in der Hand eines Laien „im Felde“ sollten nicht das Ende einer „Untersuchung“ sein, sondern der Beginn einer Untersuchung einer richtig genommenen Probe durch Fachleute in einem gut eingerichteten Labor. Die „genaueste“ Laboruntersuchung durch Fachleute ist aber nichtssagend, wenn diese nicht genügend Informationen über die Probennahme haben und selbst immer nur im Labor gestanden oder gar nur im Büro gesessen haben und nie im Felde gelaufen sind und sich selbst gebückt haben.

Man hört viel von Gleichheit und Ungleichheit natürlicher, ohne Zutun des Menschen vorhandener Radioaktivität und künstlicher, vom Menschen geschaffener Radioaktivität. Gleich sind beide in ihren ersten, den physikalischen Ursachen. Gleich sind beide in ihren letzten, den biologischen Wirkungen. Ungleich sind sie in ihren meteorologischen, geochemischen, biochemischen und anderen Randbedingungen wie Vorkommen, Zusammensetzung, Ausbreitung, Verteilung. Diese sind nämlich nuklid-spezifisch und die Nuklid-Zusammensetzung natürlicher und künstlicher Radioaktivität ist verschieden. Nur die gemeinsame Kenntnis beider gibt den richtigen Blick für das Ganze.

Zwei Erscheinungen, Beobachtungen, Eigenschaften sind es vor allem; die am Anfang,

das war am Ende des 19. Jahrhunderts, im Wechselspiel miteinander die Radioaktivität bemerkbar werden ließen: die Fluoreszenz und der photographische Effekt. Beide sind nicht beschränkt auf die Radioaktivität, und waren vor ihr bekannt, erscheinen bei ihr aber unter charakteristischen Bedingungen.

Die Fluoreszenz ist ein Sonderfall der Lumineszenz, des aktiven Leuchtens gewisser Stoffe unter oder nach äußeren oder inneren Einwirkungen, mit Ausnahme so hoher Temperaturen, die zum Glühen führen. Fluoreszenz hat seinen Namen vom sichtbaren Leuchten gewisser Sorten von Fluorit, Flußspat, bei Bestrahlung mit unsichtbarem, ultraviolett Licht.

Der photographische Effekt ist eine passive Verfärbung, im einfachsten Fall eine Schwärzung gewisser lichtempfindlicher, allgemein strahlenempfindlicher Stoffe, wobei ein latentes Bild erst entwickelt werden muß.

Die ersten Beobachtungen der Wirkungen radioaktiver Stoffe erfolgten an Mineralen und chemischen Verbindungen des Urans, des Hauptträgers der natürlichen Radioaktivität. Uranminerale waren Bergleuten schon früh durch hohes spezifisches Gewicht, wie die schwarze Pechblende, und als schönfarbige, gelbe, grüne, orangene Verwitterungsminerale aufgefallen.

1799 isolierte M. H. Klaproth das metallische Uran aus Pechblende (UO_2). Vor allem im böhmischen Joachimsthal hergestellte Uranverbindungen dienten das ganze 19. Jahrhundert hindurch zum Färben von wogend fluoreszierendem Glas, dem im Biedermeier beliebten Annagelb und Annagrün. Gelb fluoreszierender Autunit (Ca-Uranylphosphat , Kalkuranglimmer) war schon im 18. Jahrhundert bekannt. Schöne Stufen finden sich bei uns auf Klüften im Granit des Fichtelgebirges.

Massive Pechblende der Ganglagerstätte von Shinkolobwe im früheren belgischen Kongo, von 1920 bis 1950 die Hauptquelle für Radium, hat oberflächlich leuchtend gelb-orange-rote Sekundärminerale. Zwei faustgroße Stufen meiner Sammlung waren vorher als bunte, schwere Steine Kinderspielzeug bei einem Düsseldorfer Antiquitätenhändler, der sie in einem schöngefertigten Kistchen aus massivem Mahagoni vom Dachboden einer Geologinwitwe in Brüssel mitgenommen hatte.

Die warmen gelb-orange-rotten Farben, die sich mit Uranpigmenten in Keramik erzielen lassen, bei reduzierendem Brand auch tief-schwarz, haben seit dem 19. Jahrhundert und bis in unsere Tage viele Freunde gefunden. Ich komme darauf noch einmal zurück.

Über unerklärliche photographische Effekte von Uranmineralen und Uranverbindungen finden sich in der Literatur schon vor der eigentlichen Entdeckung der Radioaktivität eine Reihe von Beschreibungen.

Antoine-Henri Becquerel, Professor der Physik in Paris, hatte seit Jahren intensiv die Fluoreszenz studiert, eine umfangreiche Sammlung fluoreszierender Minerale besaß er schon von seinem Vater. Am 20. Januar 1896 hörte er den Vortrag des großen Mathematikers und Wissenschaftsphilosophen Henri Poincaré. Poincaré zeigte die ersten Bilder, die mit den nur elf Wochen vorher von C. W. Röntgen in Würzburg entdeckten Strahlen hergestellt waren. Er wies auf die Schwärzung lichtdichtverpackter Photoplatten hin und auf die gelbgrüne Fluoreszenz, die an einer Stelle der Röntgenröhre auftrat.

Sofort experimentierte Becquerel mit Photoplatten und seinen fluoreszierenden Kristallen. Er begann nicht mit einem der nicht-uranhaltigen, die keinen photographischen Effekt durch das lichtdichte Papier hindurch gezeigt hätten. Er begann mit dem gelb-grün fluoreszierenden Kaliumuranyl-sulfat. Die geschwärzte Photoplatte zeigte die Kristallform. Nur Uranverbindungen zeigten den Effekt. In

zwei Mitteilungen vom 24. Februar und vom 5. März 1896 gibt Becquerel seine Entdeckung der Uranstrahlen bekannt, mit ähnlichen Eigenschaften wie die X-Strahlen von Röntgen.

Historische Erzählungen, selbst über eine so aufregende Entdeckung wie die Radioaktivität und den Fortgang ihrer Entschleierung, ermüden leicht. Von 1896 schalte ich jetzt um auf 1986 mit der Frage: Solche alten, vormoderne Erscheinungen wie Fluoreszenz und photographischer Effekt, was bringen sie uns heute noch für den Nachweis, die Messung und die Überwachung von Radioaktivität? Sehr viel!

Bei Fluoreszenz wird das Untersuchungsobjekt im Dunkelraum durch ultraviolettes Licht zum Fluoreszieren angeregt und das Fluoreszenzlicht photographiert. Das kann auch unter dem Mikroskop geschehen. Es sei daran erinnert: nicht alle radioaktiven Objekte fluoreszieren und nicht alle fluoreszierenden Objekte sind radioaktiv.

Autoradiographien sind photographische Aufnahmen radioaktiver Objekte durch die lichtdichte Filmverpackung hindurch. Die Empfindlichkeit der Filme hängt von ihrem Absorptionsverhalten ab und dieses von ihrer chemischen Zusammensetzung und von der Strahlenqualität. Darüber später mehr.

Bei der Filmdosimetrie werden Filmplaketten getragen (Personendosimetrie) oder ausgelegt (Ortsdosimetrie), regelmäßig gewechselt und zentral quantitativ ausgewertet, etwa durch die Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung in München-Neuherberg. Filmdosimeter dienen der kontinuierlichen und periodischen Überwachung beruflich strahlenexponierter Personen aller Tätigkeitsbereiche.

Modern meßtechnisch gesprochen sind photographische Verfahren wie die drei Genannten, vorzüglich:

- zeitintegrierend, empfindlich,
- ortsauflösend, übersichtlich,
- dokumentationsfähig, reproduzierbar,
- handlich, kostengünstig.

Zeitintegrierend bedeutet: kleine Intensitäten pro Zeiteinheit sprich kleine Leistungen, können durch lange und monatelange Expositionen aufsummiert werden was hohe Empfindlichkeit bringt. Ortsauflösend bedeutet: örtliche Inhomogenitäten in der Verteilung der Radioaktivität in einem Untersuchungsobjekt werden gleichzeitig flächenhaft sichtbar, bis zur Nachvergrößerung von Mikrophotographien. Photographien sind permanente Speicher und beliebig zu vervielfältigen. Handlich und kostengünstig bedeutet: Einsatz für Serienuntersuchung und Überwachung, auch an unzugänglichen Orten, Auslegung durch angelerntes Personal, wartungsfrei während der Exposition, quantitative Auswertung automatisch möglich, doch für Orientierungsaufnahmen nicht notwendig.

Mit Hilfe von Absorptionsfiltern verschiedener Zusammensetzung und verschiedener Dicke können Filme in beschränktem Maße auch energieauflösend (strahlenartunterscheidend) eingesetzt werden. Dies geschieht bei den Filmdosimetern mit denen beruflich strahlenexponierte Personen überwacht werden. Echt energieauflösend sind Szintillationszähler und weit besser die Halbleiterdetektoren, jeweils mit passender elektronischer Verarbeitung der Signale. Darüber später mehr.

Nun einige Beispiele zur Fluoreszenz und Photographie, weil sie so schön anschaulich sind.

Lebhafte **Fluoreszenz** erhält man von allen Uranmineralen schon in kleiner Konzentration, wenn man die Probe mit Natriumfluorid und Borax in einer Perle schmilzt. Von den Uranmineralen selbst fluoreszieren nicht die primären sondern nur einige der Verwitterungs-Minerale, besonders schön der Autunit

(Calciumuranylphosphat) und der Uranocircit (Bariumuranylphosphat), nicht jedoch der grüne Torbernit (Kupferuranylphosphat). Unter dem Mikroskop sind die glimmerigen Blättchen von Einkristallen zu sehen. Die Fluoreszenz ist somit eine nützliche Uran-Erkennungsmethode für die Prospektion im Gelände.

Von den südafrikanischen Goldvorkommen in quarzitisches-pyritischen Konglomeraten des Witwatersrand habe ich in meiner Sammlung aus der Grube Hartebeestfontein eine Stufe mit Ansiliff, deren Autoradiographie den Urangelhalt zeigt. Die geringen Urangelhalte waren früher nicht vermutet worden, vor Ort wohl auch schwer erkennbar gewesen und wurden in der Aufbereitung der Golderze durch die Fluoreszenz der Lösungen entdeckt.

Besonders schöne Autoradiographien erhält man von warmfärbigen, gelb-orangen, uranhaltigen Keramik-Dekorfliesen, diese nicht in Bayern hergestellt, die bis vor kurzem im Handel waren. Erst jetzt wurde mir endlich eine allseitig geflieste Küche zur Messung angeboten, nachdem ich schon vor vier Jahren am Tag der Offenen Tür der Universität einen Quadratmeter der Fliesen auf Holz befestigt ausgestellt hatte.

Eine dieser Dekorfliesen war übrigens meine nachträgliche Eintrittskarte zum Untertagebesuch der berühmten Lagerstätte von Elliot Lake, Ontario. Im Forschungsfreisemester Sommer 1981 besuchte ich in Canada vor allem Lagerstätten, auch von Uran. In Elliot Lake wurde einer amerikanischen Geologengruppe und mir allerdings nur eine Übertageführung geboten. Zur Überprüfung von Strahlenmeßinstrumenten führte ich als bequemes Prüfpräparat ein Stück einer Dekorfliese in einem Waschlappen mit. Ich hielt das, so verborgen, dem Chefgeologen vor sein Instrument mit der Frage: Abbauwürdig? Begeistert wollte er wissen, wo auf dem Gelände ich es gefunden hätte. Als er gesehen hatte, was es war, nahm er mich beim Abschied zur Seite, ich sei wohl nicht von der Gruppe und könnte ihn morgen besuchen. Ich tat es, er erbat sich eine Fliese, später zugesandt, und ich erhielt mit dem Obersteiger eine halbtägige Untertageführung und zwei Rucksäcke voll herrlicher Erzproben. Von einer sehen Sie die Autoradiographie.

1981 mußte ich allein, auf eigene Kosten, in fernen kanadischen Uranerzergängen herumkriechen um radioaktives Material zu sammeln. 1986 ist uns allen Probematerial mit russischer Luftpost, Empfänger bezahlt, zugegangen.

Autoradiographien Ende April/Anfang Mai 1986 berechneter oder benähter Proben, etwa Betonsteinplatten oder eine seltene Schuhsohle zeigen wenige, sehr stark geschwärzte Punkte, sogenannte **Hot Spots**, „Heiße Flecken“, der Radioaktivität. Eine gammaspektroskopische Untersuchung im Labor der GSF in München am 3. Juli 1986 ergab: die hot spots der Krepsohle haben ein 6–7fach erhöhtes Ruthenium zu Cäsium Verhältnis verglichen mit „normalen“ Proben. Die hot spots sind verhältnismäßig große Ruthenium-Partikel, allerdings sehr viel kleiner als die photographische Schwärzung. Fräulein Katrin Prettl danke ich für die Spende ihrer Sandalen zu Händen meiner Lehrmittelsammlung und Herrn S. Wilberg, Technische Zentrale der Universität, für Heranschleppen interessanter Betonplatten.

Auch in Luftfiltern aus den ersten Maiwochen ist die Radioaktivität sehr ungleichmäßig verteilt, wie Autoradiographien zeigen. Das Filmmaterial ist Röntgenfilm Agfa-Gevaert Osray M3, 18 x 24 cm, Belichtungszeit 5–15 Tage. Aus ganz einfachen Filmaufnahmen aus dem Röntgenlabor der Kristallographie lassen sich somit weitreichende Schlüsse ziehen, die mehrere Seiten füllen würden.

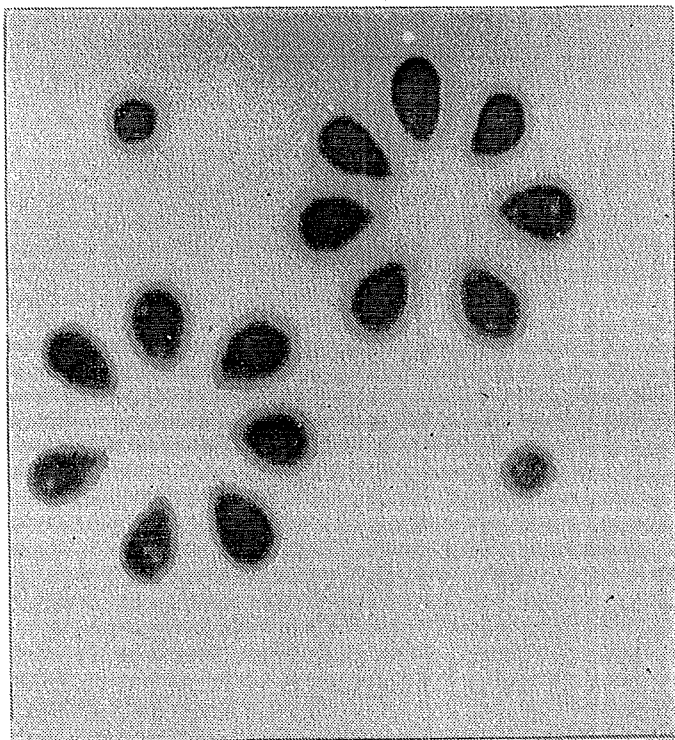


Abb. 1
 Autoradiographie einer Dekorfliese, 20 mal 20 cm, diese nicht in Bayern hergestellt. Ein lichtdicht verpackter Photofilm, Röntgenfilm Agfa Gevaert Osray M3, für 5 Tage auf die Fliesen gelegt, wird durch die Strahlung der radioaktiven Uranfarben belichtet. Diese Fliese hat ca. 15 mg Uran im Farbfleck, andere Fliesen bis zu 1 g Uran im Blütenblatt.

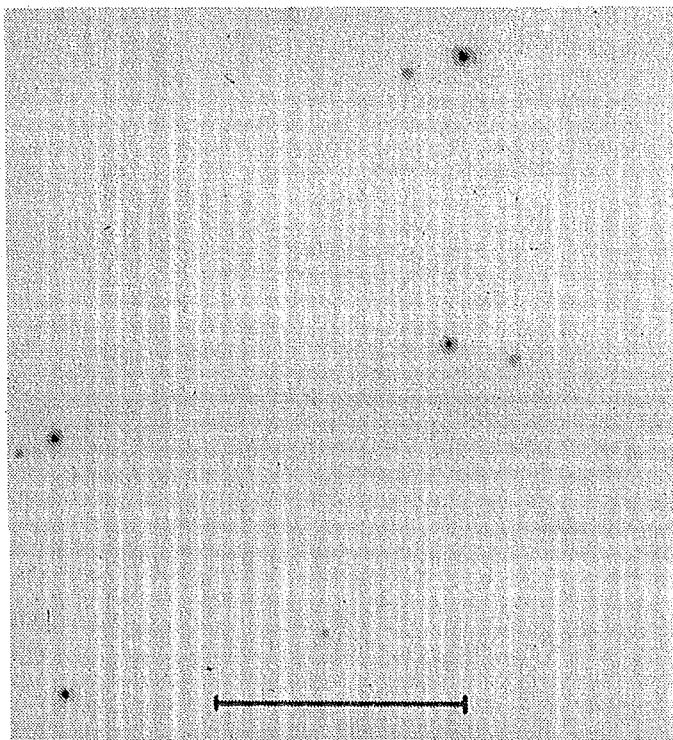


Abb. 3
 Autoradiographie einer Mai 1986 in Regensburg beregneten Betonplatte. Der Balken ist auf dem Original 5 cm. Hot Spots, „Heiße Flecken“, kleine Bereiche stark erhöhter Radioaktivität sind deutlich zu sehen. Der Durchmesser der Schwärzungen ist nicht die Größe der Partikel. Diese sind viel kleiner. Die Reichweite der Strahlung und der photographischen Prozeß wirken stark vergrößernd. Erstaunlich sind die Partikel – aus Tschernobyl stammend.

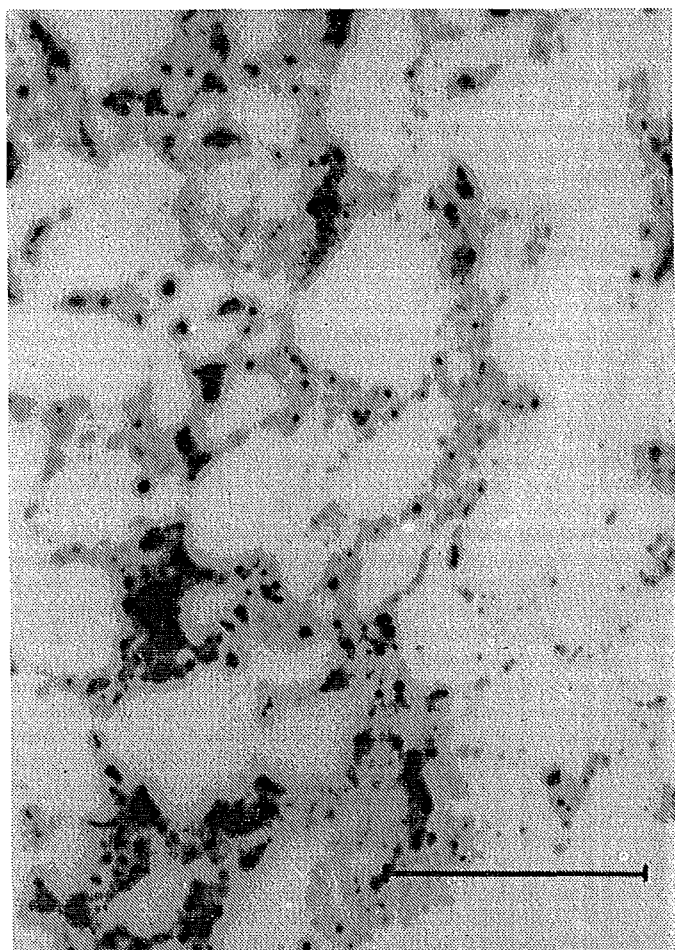


Abb. 2
 Autoradiographie von einem Uranerz-Anschliff, Elliot Lake, Ontario. Der Balken ist auf dem Original 5 cm. Quarzitisch-pyritisches Konglomerat. Die Uranminerale Pechblende UO_2 , Brannerit (U, Ca, Th, Y) $(\text{Fe, Fi})_2\text{O}_6$ und Coffinit USiO_4 sind mit Pyrit FeS_2 vergesellschaftet. Abbauerz mit 1 kg U_3O_8 pro Tonne Fördererz.

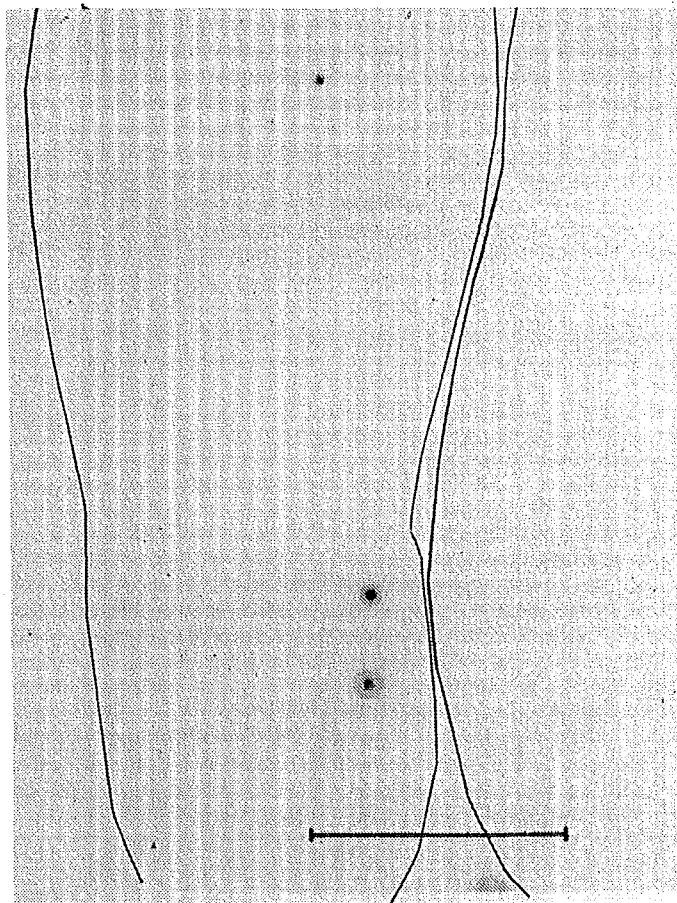


Abb. 4
 Autoradiographie einer Ende April/Anfang Mai 1986 durch Regen benetzten Kriechschuhsohle. Die Umrisse sind mit Tusche nachgezeichnet. Gammaskopie bei der GSF am 3. Juli 1986 ergab für diese Hot Spots aus Tschernobyl immer noch ein 6–7fach erhöhtes Ruthenium zu Cäsium Verhältnis verglichen mit „normalen“ Proben. Fräulein Katrin Prettl sei für die Spende ihrer Sandalen an meine Lehrmittelsammlung herzlich gedankt.

Nach dem radioaktiven Regen Anfang Mai zeigten ebene Oberflächen aus unterschiedlichen Materialien wie Beton, Naturstein, Asphalt, Holz selbst am selben Ort stark unterschiedliche Kontamination. Hinzu kommen noch starke Unterschiede nach örtlich verschiedenen meteorologischen Bedingungen. Die Variationsbreite der Beobachtungen kann sich zudem zeitlich sogar noch erweitern.

Von 1886 schalten wir durch Umstellen der inneren Ziffern wieder zurück in das Jahr 1896 nach Paris in das Labor von Becquerel. Am 5. März hatte er die ionisierende Wirkung der Uranstrahlung gefunden: die Luft wird elektrisch leitend. Nun galt es, die Strahleneigenschaften genauer, quantitativ zu untersuchen als photographisch möglich ist.

Diese Doktorarbeit gab er an Marie Curie, geborene Sklodowska. Ihr Mann Pierre Curie hatte eben die Piezoelektrizität entdeckt. Ihr Schwager Jacques Curie konstruierte nun für sie ein piezoelektrisches Elektrometer. Es arbeitet wie eine Ionisationskammer, ist aber feinfühler zu handhaben. Das Ionisationszählrohr von Geiger wurde erst 1908 entwickelt.

Marie Curie fand durch ihre Messungen mit dem Elektrometer:

1. Nur Uran- und Thoriumhaltige Minerale geben ionisierende Strahlung ab.
2. Der Ionisationsstrom des Elektrometers, d. h. die Intensität der Strahlung, d. h. die Aktivität des Präparates steigt mit dessen Konzentration der chemischen Elemente Uran und Thorium.
3. Uranminerale erzeugen mehrfach höhere Ionisationsströme als die aus ihnen hergestellten Uranverbindungen. Madame Curie folgerte: Uranminerale enthalten ein weiteres, sehr stark strahlendes chemisches Element.

In zweijähriger, mühsamster Arbeit extrahierte Marie Curie aus einer sehr großen Menge uranfreier Rückstände der Uranfarb-fabrik Joachimsthal, eine sehr kleine Menge eines höchst strahlenaktiven, neuen chemischen Elementes. Sie nannte es Radium und prägte in ihrer Mitteilung vom 26. Dezember 1898 den Namen **Radioaktivität** (Strahlenwirksamkeit). Sehr bald wurden Radiumpräparate zur Strahlentherapie verwendet. 1 g Radium hatte damals einen Wert von 500 000 Goldmark. Heute werden Bestrahlungen mit dem Reaktorisotop Cobalt-60 durchgeführt, bei dem eine Aktivität von 1 Curie (entsprechend 1 g Radium) ein paar Mark kostet. Madame Curie erhielt den Nobelpreis 1903 für Physik und 1911 für Chemie.

Was sagt uns der historische Exkurs heute. Radium ist ein Zerfallsprodukt des Urans und bildet sich aus diesem in Uranmineralen in geologischen Zeiträumen von Jahrmilliarden. Chemisch verhält sich Radium wie Barium, unter dem es in der zweiten Spalte des Periodensystems steht. Wie Bariumsulfat (Mineral Baryt, Schwespat) ist Radiumsulfat schwer löslich. Bei der Aufbereitung von Uranerzen wird das unlösliche vierwertige Uran durch Oxydationsmittel und Schwefelsäure als 6-wertiges Uran in Lösung gebracht. Das Radium, der Hauptträger der Radioaktivität bleibt als Radiumsulfat unlöslich und geht mit anderen Filtratrückständen auf Halde, die zum Umweltproblem werden können. Aus der neutralisierten, vom Feststoff getrennten Lösung wird das Uran mit Ionenaustauschern herausgeholt. Vom Ionenaustauscher wird das Uran durch Salpetersäure wieder gelöst, aus der Lösung mit Ammoniak fällt als Ammoniumdiuranat $(\text{NH}_4)_2\text{UO}_4$, dem yellow cake, dem Gelben Kuchen.

Man muß einmal selbst bei einer Uranlagerstätte in der Aufbereitung gestanden haben, an den Filterwalzen, von denen der Gelbe Kuchen abblättert, tonnenweise. Der Werksleiter

hat sein Büro nebenan. Gelber Kuchen ist eine reine Uranverbindung, radiumfrei, deshalb ohne viel harte, durchdringende, weitreichende Strahlung. Uran entwickelt nicht direkt Radon, ein Gas. Radon ist ein Zerfallsprodukt des Radiums, Halbwertszeit 1600 Jahre und dieses ein Zerfallsprodukt des Urans, Halbwertszeit 10^9 Jahre. Das im Uranerz enthaltene Radon, Halbwertszeit 4 Tage, wird beim Erzsprengen und Zerkleinern freigesetzt. Harte Gammastrahlung kommt vom Radium und den Folgeprodukten (Töchtern) des Radon-Zerfalls, z. B. Wismut-214. Das Gammaspektrum von Uran in der Natur ist recht kompliziert, da es oft mit Thorium vergesellschaftet ist, das eine eigene Zerfallsreihe hat.

Welche praktischen Folgerungen ergeben sich daraus? Uranhaltige Farben auf Küchen- und Badezimmerfliesen geben fast nur weiche Strahlung ab. Die Verwendung solcher Fliesen wird gänzlich unbedenklich wenn man sie umdreht, die Dekorseite zur Wand kehrt. Uranhaltige Fliesen geben kein Radon ab. Radon kann sich aber in schlecht belüfteten Räumen sammeln. Es stammt aus mineralischen Baustoffen. Die Gesteine der Erde enthalten im Durchschnitt 4 Gramm Uran pro Tonne, man sagt 4 ppm = parts per million. Deutlich mehr enthalten Granit und gewisse Sandsteine (30 ppm und etwas mehr). Abbauwürdig sind unter günstigen Bedingungen heute Erze ab 1000 ppm das ist 1 kg U_3O_8 pro Tonne.

Man liest und hört heute viel über Baumaterialien mit erhöhter Radonabgabe, die viel kleiner ist als die in berühmten oder geplanten Radonbädern als heilwirksam angepriesene. Als höchst bedenklich haben erst die Radonbecher zu gelten, die bis mindestens 1963 von Bamberg aus vertrieben wurden. In einem dekorativen, blauen Schliffglasbecher, Höhe 6 cm, Durchmesser 5 cm, mit elegantem Edelstahlrahmen befand sich ein Radiumnetz. Die Vorschrift lautete: Becher mit Wasser füllen, am nächsten Tag Radon-Trinkkur zu Hause, ein „Allheilmittel“. Das Radiumnetz im Becher, der mir vor vier Jahren nach dem Tag der Offenen Tür der Universität gebracht wurde, gibt in 10 Stunden Strahlung der Aktivität ab, die heute als Jahresfreigrenze gilt. Wer noch einen solchen Becher besitzt, kann ihn mir zur sicheren Entsorgung bringen.

Schon Röntgen hatte seine Strahlen als sehr durchdringend, „hart“, gefunden. Das Absorptionsvermögen eines Stoffes steigt stark mit seiner Ordnungszahl. Aluminium, Eisen, Blei schwächen bzw. schirmen stark zunehmend. Das Gleiche wie für Röntgenstrahlen wurde für die Strahlung des Radiums beobachtet. Versuche mit Filtern (Absorbieren) unterschiedlicher Dicke und Zusammensetzung ergaben: die Radiumstrahlung ist nicht einheitlich zusammengesetzt, sie enthält Anteile, die in Röntgen's Strahlung nicht vorkommen.

Der entscheidende Versuch stammt von E. Rutherford 1902–1903. Ein Radiumpräparat befindet sich in einem Bleiblock. Eine tiefe Bohrung läßt nur ein feines Strahlenbündel austreten. In einem starken Magnetfeld wird es zerlegt. Rutherford schreibt: „Es gibt

alpha) Strahlen, gebildet aus positiv geladenen, rasch fliegenden Partikeln der Größe der Heliumatome, die wenig ablenkbar sind im magnetischen Feld, und zwar im Sinne der Kanalstrahlen.

beta) Strahlen, gebildet aus elektrisch negativen Korpuskeln, die relativ stark ablenkbar sind, je härter desto weniger, in voller Analogie zu den Kathodenstrahlen.

gamma) Strahlen, die sich als unablenkbar erweisen und keine Ladung tragen“.

Kanalstrahlen, so hießen früher Strahlen schneller positiver Ionen. Kathodenstrahlen, so hießen früher Elektronenstrahlen.

Von dieser Arbeit stammen die Bezeichnungen Alpha-, Beta-, und Gamma-Strahlen. Schon Papier absorbiert die Alpha-Strahlen, auch wenn sie hohe Energie besitzen, weil sie auch von großer Masse sind, auch in Luft ist ihre Reichweite nur einige cm. Einige mm Aluminiumblech absorbieren die Beta-Strahlen, auch in Luft ist ihre Reichweite nur einige Meter. Härteste Gamma-Strahlen durchdringen auch dickes Blei, weiche Gammastrahlen werden eher geschwächt. Zu erwähnen sind auch noch die Neutronen. Auf die Bedeutung des Absorptionsverhaltens eines Mediums (charakterisiert durch die Ordnungszahl) und einer Strahlung (charakterisiert durch die Energie bzw. die Wellenlänge) kommen wir später bei den Nachweis- und Meßmethoden noch einmal zurück.

Röntgen hatte seine Strahlen 1895 entdeckt durch helles Aufleuchten eines mit Bariumtracyano-platinat bestrichenen Schirmes, der sich im verdunkelten Zimmer in der Nähe seines Entladungsapparates befand. J. Borgmann entdeckte die analoge Lumineszenzwirkung von Radiumstrahlung auf einem mit Zinkblendepulver bestrichenen Schirm. Unter einer starken Lupe löst sich das Leuchten auf in einzelne, getrennte kurze und schwache Lichtblitze, Szintillationen genannt.

Von 1908 bis 1913 verbesserte H. Geiger die Empfindlichkeit der Ionisationskammer. Ein angelegtes elektrisches Feld saugt die durch die ionisierende Strahlung erzeugten Gasionen nicht nur ab, sondern ein hohes elektrisches Feld von 1000 und mehr Volt beschleunigt die Ionen und durch Stoßionisation und Ionenlawinen entsteht ein enormer Verstärkereffekt mit meßbaren Stromstößen, die von einem einzigen elementaren Ionisationsakt ausgehen, die somit einzeln zählbar und mit Lautsprecher hörbar werden.

C. T. R. Wilson war Meteorologe und studierte 1895–1900 die Bildung von Wolken und Nebel als Folge der Ionisation der Luft durch Sonnenstrahlen und Ausdünstungen der Erde. Für Studien im Labor entwickelte er eine Nebelkammer. Sie eignet sich vorzüglich zur Sichtbarmachung der Bahnen radioaktiver Strahlung. Ionen sind in übersättigtem oder unterkühltem Wasserdampf Kondensationskerne für Wassertropfchen, die Licht anders streuen als Wasserdampf und daher sichtbar werden.

An Präparaten geeigneter Aktivität lassen sich somit die Elementarakte der Radioaktivität, einzelne Zerfälle instabiler Atomkerne zeitlich aufgelöst darstellen durch Lichtblitze (Szintillationen vom Leuchtschirm), durch Strompulse (Stoßlawinen im Geiger-Müller-Zähler) oder durch Ionisationsspurbahnen (in der Wilsonschen Nebelkammer). Die zeitlichen Abstände der Einzelzerfälle sind nicht regelmäßig gleich, sondern streuend, **statistisch**.

Die Erkenntnis des statistischen Charakters des radioaktiven Zerfalls hatte weitreichende erkenntnistheoretische Folgen: Die elementare Vorstellung von Ursache und Wirkung (klassisches Kausalitätsprinzip) mußte für den atomaren Einzelfallbereich aufgegeben werden. Das weitere Studium der Radioaktivität erbrachte mehrere fundamentale universelle Naturerkenntnisse:

1. Atome („Unteilbare“) können spontan zerfallen.
2. Der zeitliche Verlauf der Einzelzerfälle ist nicht klassisch kausal sondern statistisch.
3. Atomkerne enthalten Protonen und Neutronen.
4. Masse und Energie sind äquivalent.
5. Wellenstrahlung und Teilchenstrahlung sind dual.

Wir wenden uns jetzt wieder Fragen der Meßtechnik zu. Wie sieht es aus mit der meßtechnischen Nutzung der bisher geschilderten optischen (Lumineszenz) und elektrischen (Ionisation) Effekte und weiterer noch zu besprechender? Was ist im Grunde ihr gemeinsamer Wirkungsmechanismus, welche Rolle spielen das Detektor-Medium, sein physikalischer Zustand und seine chemische Zusammensetzung? Welche Rolle spielen die Strahlenqualität, ihre Intensität (Menge), ihre Zusammensetzung und ihre Energie? Welche Rolle spielen die Strahlenquelle, ihr physikalischer Zustand, ihre geometrische Form, ihre chemische Zusammensetzung, nicht pauschal sondern nuklidspezifisch? Wie wirkt sich das alles aus auf den Meßbereich, die maximale Belastung der Geräte und die untere Nachweisgrenze? Was ist über Genauigkeit, Zuverlässigkeit, zeitlichen, sächlichen und personellen Aufwand und Kosten-Nutzen-Verhältnis zu sagen? Dieser bei weitem nicht vollständige Fragenkatalog läßt sich nicht in einem einstündigen Vortrag vollständig beantworten, sondern nur andiskutieren.

Im Letzten beruhen alle Nachweismethoden für ionisierende Strahlung (radioaktive, Röntgen- und andere energiereiche Strahlung) auf dem Bruchteil der Strahlenenergie, die aus der Meßprobe herauskommt und in den Detektor hineinkommt, dort absorbiert und auf dort vorhandene Elektronen übertragen wird.

Die Selbstabsorption der Strahlung der Probe in der Probe selbst ist bei der Messung von Alpha- und Betastrahlung zu bedenken, vor allem wenn es sich um reine Alpha- und/oder Betastrahler handelt, ohne Gammastrahlung. Das ist in Kürze das Problem der Bestimmung von Strontium-90, einem reinen Beta-Strahler, etwa in der Milch. In solchen Fällen hat eine mühsame radiochemische Trennung voranzugehen.

Bei der **Lumineszenz** beruht das Licht auf der Energieabgabe von Elektronen beim Übergang zwischen verschiedenen Energiezuständen, die durch die ionisierende Strahlung angeregt wurden. Nicht nur Kristallpulver (Leuchtschirme, im Aufsicht betrachtet) können zur Lumineszenz angeregt werden. Weit wichtiger sind durch Dotierung speziell aktivierte, transparente Einkristalle, Plastikfestkörper oder Flüssigkeiten, sogenannte **Szintillatoren**. Auf der einen Seite des Detektors, der gegen Fremdlicht abgeschirmt ist, tritt die Strahlung ein und erzeugt im ganzen Detektorvolumen Lumineszenzlicht. Dieses trifft im Durchlicht betrachtet auf einen Sekundärelektronenvervielfacher (Photomultiplier). Durch den äußeren Photoeffekt werden Elektronen ausgelöst. Diese werden in hohen elektrischen Feldern beschleunigt und auf die nächste empfindliche Schicht geführt, lösen dort mehr Elektronen aus, und so weiter in vielen Stufen, Kaskaden.

Zum Nachweis und zur Messung von Alpha- und Beta-Strahlung reicht das Absorptionsvermögen von Gasen in Ionisationskammern aller Arten. Für Gamma-Strahlen hängt das Absorptionsvermögen A eines Mediums (Absorber, Filter, Detektor) von dessen Aggregatzustand (Dichte), seiner Ordnungszahl Z ab sowie von der Wellenlänge λ bzw. der Energie E der Strahlung. Und zwar ist A für den Photoeffekt proportional Z^3 und proportional λ^3 (d. h. umgekehrt proportional zu E^3). Deshalb verwendet man für Gamma-Strahlen Szintillationszähler mit Thallium-aktivierten Einkristallen von Natriumjodid (Z 11 und 53).

Für die sehr anspruchsvolle Röntgencomputertomographie sind Thallium-aktivierte Einkristalle von Cäsiumjodid (Z 55 und 53) als Detektor im Dienst. Die Drift, das ist das vorbestrahlungsabhängige Ansprechverhalten dieser Kristalle, konnte kürzlich von einem meiner Diplomanden im Siemens-Forschungslabor in München durch eine zusätzliche Dotie-

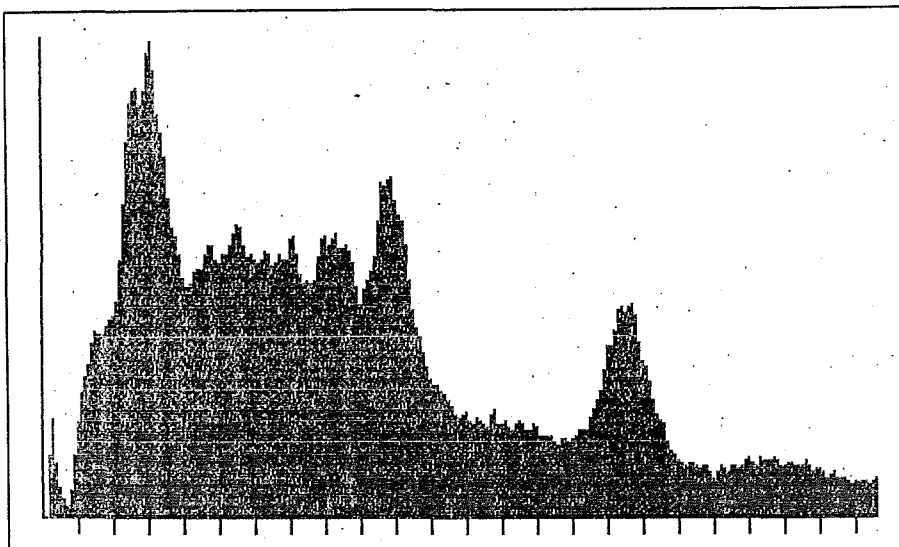


Abb. 5
Impulshöhenspektrum (Gammaspektrum) einer Uran – plus radiumhaltigen Pechblende-Fluorit Paragenese von Wölsendorf, Oberpfalz. Aufnahme H. Hilscher, mit einem kleinen Natriumjodid-Szintillationszähler mit Vielkanalanalysator. Die Intensität, vertikal, ist gegen die Energie, horizontal, aufgetragen.

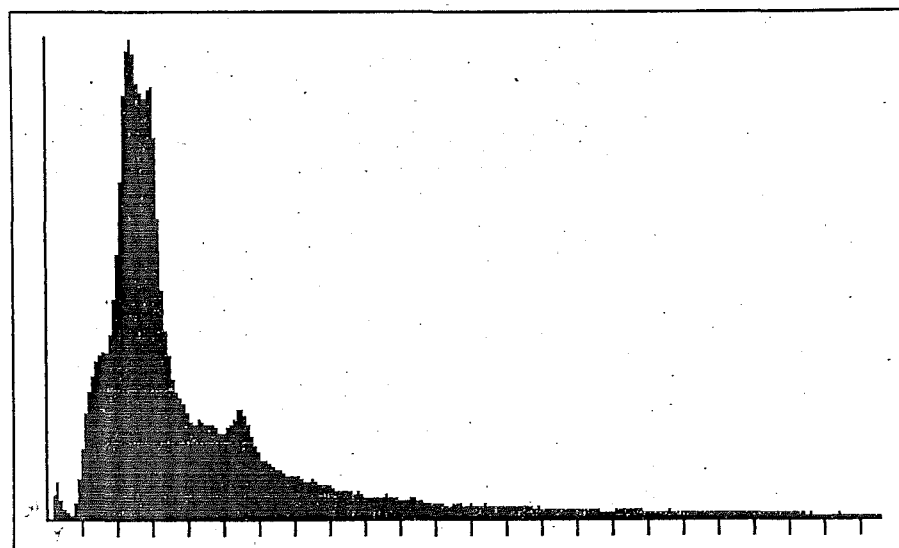


Abb. 6
Impulshöhenspektrum (Gammaspektrum) einer Uranhaltigen-radiumfreien Uranfarbe einer Dekorfliese, diese nicht in Bayern hergestellt. Deutlicher Unterschied zur Abb. 5, da andere Nuklidzusammensetzung. Aufnahme H. Hilscher.

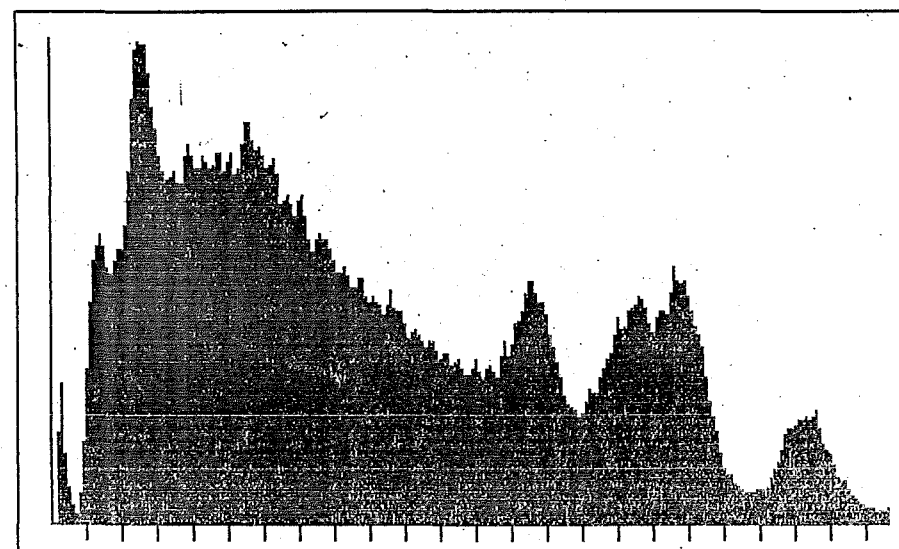


Abb. 7
Impulshöhenspektrum (Gammaspektrum) meiner Grasprobe Nr. 5. Beregnetes Gras, geschnitten am 6./7. Mai 1986, von der Wiese vor meiner Dienstzimmer, Gasschnitt konserviert in Alkohol, nicht faulend, sondern wohlriechend. Gammaspektroskopie am 1. Juli 1986. Aufnahme H. Hilscher.

Strahlung entscheidend günstig verringert werden, die Ansprechkonstanz bei rasch variabler Bestrahlung somit erheblich verbessert werden.

Szintillationszähler können mit Energiediskriminatoren und Vielkanalanalysatoren verknüpft werden und liefern dann Gamma-Spektren, d. h. Strahlintensitäten als Funktion der Energie. Bei der Radioaktivität haben die Gammastrahlen diskrete Energien, beim Licht würde man sagen, es ist ein- oder mehrfarbig, aber nicht weiß. Das Gamma-Spektrum ist nuklidspezifisch.

Mit recht großen Natriumjodid-Szintillationskristallen, Volumen 100 und mehr Liter, wurde schon vor Jahren, etwa im Norden Kanadas, vom Flugzeug aus einer Höhe von 100 m auf Uran prospektiert. Die Gamma-Spektroskopie unterscheidet zwischen Uran, Thorium und Kalium-40 durch Messung elementspezifischer Energiebereiche. Die Meßanordnung ist dank des sehr großen Detektorvolumens außerordentlich empfindlich und kann Boden- und Höhenstrahlung durch Antikoinzidenzschaltung trennen. Bereits 1 m Sumpf oder Glazialschutt der Tundra genügen aber, um die Strahlung abzuschirmen. Eine große Lagerstätte wurde entdeckt, weil Frostbeulen uranführendes Gestein durch den Glazialschutt hindurch nach oben gebracht hatten.

Mit einem recht kleinen Natriumjodid-Szintillationskristall, Volumen einige cm³, in einer selbstgebauten Anordnung, hat Herr Dr. Hilscher, Fachdidaktik der Physik an unserer Universität, die Impulshöhenspektren (Gamma-Spektren) der Abb. 5 bis 7 aufgenommen. Die Spektren zeigen die ungefähre Gammastrahlintensität (vertikal) gegen die Energie (horizontal) aufgetragen. Die allgemeine Umgebungsstrahlung, das begrenzte Energieauflösungsvermögen des Kristalls und der Elektronik und auch die Mischung von Nukliden ergeben einen breiten Untergrund. Aus diesem ragen die eigentlich diskreten, nuklidspezifischen Gammalinien heraus.

Deutlich sichtbar ist der Unterschied der Spektren einer uran- und radiumhaltigen Pechblende-Fluorit-Paragenese von Wölsendorf, Oberpfalz (Abb. 5) und einer uranhaltigen und radiumfreien Dekorfliese, diese nicht in Bayern hergestellt (Abb. 6). Deutlich sichtbar ist auch der Unterschied zum Spektrum meiner Grasprobe Nr. 5, geschnitten am 6./7. Mai, konserviert in Alkohol, spektroskopiert am 1. Juli (Abb. 7). Herrn Dr. H. Hilscher sei für die Untersuchung an seinem Gerät gedankt.

Halbleiter-Detektoren haben ein besonders gutes Energie-Auflösungsvermögen. Sie beruhen auf dem inneren Photoeffekt und anderen Effekten, die zu einer Änderung der elektrischen Leitfähigkeit durch die ionisierende Röntgen- oder Gamma-Strahlung führen. Es gibt Silicium-Lithium-gedriftet- (Si:Li), Germanium-Lithium-gedriftet- (Ge:Li) und Germanium-reinst- (Ge) Detektoren. Sie unterscheiden sich stark in ihren Betriebsbedingungen, Energie-Empfindlichkeit und im Preis. Alle müssen bei tiefen Temperaturen betrieben werden, bei 77 Kelvin, der Temperatur von flüssigem Stickstoff. Für Si:Li und Ge:Li ist dies zudem die Lagertemperatur. Nur der teuerste Ge-reinst-Detektor verträgt Raumtemperatur wenn er nicht in Betrieb ist.

Die mittlere Energie zur Bildung eines Elektron-Loch-Paares beträgt bei Silicium nur ca. 3,6 eV, bei Germanium sogar nur ca. 2,8 eV. Das ist sehr günstig, verglichen mit der Ionisierungsenergie von ca. 30 eV in einem Gasdetektor und ca. 300 eV in einem Szintillator bis zur Bildung eines Photoelektrons aus der Photokathode des Photomultipliers. Bei Halbleiterdetektoren ist die Energieauflösung zehnmal besser als bei Szintillatorkristallen. Mit Si:Li-Detektoren können auch Röntgenspektren aufgenommen werden. Viele Radionuklide haben neben den hochenergetischen (harten) Gammalinien auch nuklidspezifische niedrigenergetische (weiche) Röntgenlinien.

Halbleiterdetektoren haben zudem wegen des kleinen Volumens einen kleinen Nulleffekt und eine gute Zeitauflösung zur Registrierung kurzlebiger Teilchen in der Hochenergiephysik.

Zum Ausklang möchte ich noch einmal phänomenologisch werden. Eine schon alte Beobachtung ist die **Strahlenverfärbung** von Mineralen, etwa die dunkelviolette Färbung von Fluorit (chemisch reines Calciumfluorid ist farblos), etwa im Wölsendorfer Revier. Flußspat (CaF₂) ist hier paragenetisch mit Uraninit (UO₂, Pechblende). Beide Minerale haben die gleiche Kristallstruktur und bilden sogar begrenzt Mischkristalle. Energiereiche, radioaktive Strahlung erzeugt in Kristallen Strukturdefekte verschiedener Art. Elektronische Defekte wirken als Absorptionsbanden und bewirken eine Verfärbung. Manche Defekte können durch Erwärmung ausgeheilt werden. Es gibt thermolumineszenten Flußspat. Bei Erwärmung auf 200 bis 300 Grad beginnt er zu lumineszieren, die in den Strukturdefekten enthaltene Energie wird durch Aushheilung der Defekte in Form von Licht frei. Thermolumineszenzdosimeter nutzen diesen Effekt. Er ist reversibel, was der photographische bei Filmdosimetern nicht ist.

Eine andere Form von Strahlenschäden sind die Spaltspuren, die Geschößbahnen von Alpha-Strahlen etwa von Uran in den Mineralen Zirkon und Apatit. Zirkon kann bis 1 Prozent Uran enthalten. Zirkonsande, in Gießereien als Formsand verwendet, können radioaktiv sein. Spaltspuren sind Uhr und Thermometer für Gesteine. Wie Sie sicher wissen, liefert uns das Zerfallsgesetz der Radioaktivität Methoden der Altersbestimmung, die uns an den Anfang unserer Erde, vor 5 Milliarden Jahre führen. Der radioaktive Zerfall von Uran und Thorium liefert zum Wärmehaushalt unseres Planeten seit Jahrmilliarden einen wesentlichen Beitrag. Er deckt das Defizit zwischen Wärmeabstrahlung ins Weltall und Sonneneinstrahlung. Ohne diese natürliche Kernenergie wäre unsere Erde schon ungemütlich erkalte.

P. S.: Für eilige Leser und für Systematiker sind die wichtigsten Punkte meiner Darlegung stichwortartig in sieben Tafeln zusammengefaßt:

1. Physikalische Effekte für Nachweismethoden und Detektoren.
2. Strahlungsmeßgrößen, ihre Dimensionen und Einheiten.
3. Meßziele, Methoden, Ergebnisse.
4. Proben- und Meßprobenparameter.

Tafel 2:
Strahlungsmeßgrößen, ihre Dimensionen und Einheiten

| Strahlungsquelle | Strahlungsfeld | Detektor (Meßgerät) | Mensch |
|--|---|--|---|
| Probenmenge *Zerfälle pro Zeit = Aktivität [n pro Sekunde] Curie, Bequerel | Intensität *Teilchenfluß pro Fläche und Zeit = Teilchenflußdichte [n pro m ² und s] | physikal. Wirkung *Ionisationsladung pro Masse = Ionendosis [Coulomb pro kg] Röntgen | biologische Wirkung *Äquivalentdosis = vergleichbare Röntgendosis bei anderen Strahlenarten = Energiedosis mal dimensionslosen Bewertungsfaktor [Joule pro kg] Sievert, rem |
| *Zerfallsrate | *Energieflußdichte | *Absorbierte Energie pro Masse = Energiedosis [Joule pro kg] Gray, Rad | |
| *Halbwertszeit | *Abstand, Raumwinkel | *Absorptionsquerschnitt *Wirkungsquerschnitt | |
| *Quellstärke | | | |

Allgemein: Dosis heißt eine Größe pro Masseneinheit, Leistung heißt eine Größe pro Zeiteinheit.

5. Technische Daten zu Nachweis- und Meßmethoden.
6. Einsatzgebiete für Nachweis, Messung und Überwachung der Radioaktivität in ihren Anwendungen.
7. Fundamentale, universelle Erkenntnisse aus der Radioaktivität.

Tafel 1:
Physikalische Effekte für Nachweismethoden und Detektoren

Optische

Absorptionsänderungen

- Photofilmschwärzung:
Autoradiographie, Filmdosimeter
- Verfärbung: Glas, Plastik, Kristalle, Flüssigkeiten
- Kernspuremulsionen, Spaltspuren nach Ätzung

Lumineszenz

- Fluoreszenz
 - Leuchtschirm: Phosphore, ZnS
 - Verstärkerfolien: CaWO₄, SE-Oxide
- Szintillationszähler:
 - TI-dotierte:
 - Nal oder Csl Einkristalle
 - ZnS:Ag-versehene Plastikstoffe
 - Flüssigkeiten, z. B. Aromate
- Phosphoreszenz
 - Radiothermolumineszenz: CaF₂, LiF
 - Radiophotolumineszenz: Phosphatgläser

Elektrische

Leitfähigkeitsänderungen

- Gase: Ar, Kr, Xe
 - Sättigungsbereich: Ionisationskammer
 - Stoßverstärkung: Proportionalzähler
 - Lawinen-Auflösung: Geiger-Müller-Zähler
 - Entladung: Stabdosimeter
- Festkörper: Halbleiter
 - Li-gedriftetes Ge oder Si
 - höchstreines Ge
- Exoelektronen
- Spannungserzeugung
- Elektroradiographie

Chemische

Das Gerüst der Tabelle geht zurück auf B. Hess und I. Köck: Meßmethoden für den Strahlenschutz, Acta Albertina Ratisbonensis Band 28, 1–73, 1967.

Tafel 3:
Meßziele, Methoden, Ergebnisse

| Meßziel | Methoden | Ergebnis |
|------------------|---|--|
| Intensitäten | alle, der Unterschied zwischen qualitativem Nachweis und quantitativer Messung ist eine Frage der Auflösung der Intensität mit zunehmender Empfindlichkeit und Meßbereich und abnehmenden Störungen | Aktivitäten, Dosen, Orts- und Personenexposition, Messen, Regeln, Überwachen |
| Zeitauflösung | alle, wenn niedrige Zählrate, oder gute Elektronik, Koinzidenz- und Antikoinzidenzschaltung | zeitliche Verteilung |
| Ortsauflösung | Photofilme, Autoradiographien, ortsempfindliche Zählrohre, Szintillationszähler mit Blendensystem, positionsempfindliche Halbleiterdetektoren in Planartechnik | räumliche Verteilung, „Hot Spots“ |
| Energieauflösung | qualitativ mit Filmen und Ionisationszählern mit vorgelegten Filtern (Absorbern) oder Messung der Reichweite, halb-quantitativ mit Szintillationszählern und quantitativ mit Halbleiterdetektoren und nachgeschalteten Energiediskriminatoren und Vielkanalanalysatoren | strahlenartspezifisch, nuklid-spezifisch |

Auflösung heißt: zwei benachbarte Meßwerte (Zahlen) einer physikalischen Größe werden eindeutig getrennt als verschieden erkennbar.

Tafel 4:
Proben- und Meßprobenparameter

Aggregatzustand

- gasförmig: Luft, Abluft, Emanation (Radon), Aerosole und Stäube durch Filter abtrennen
- flüssig: Abwässer, Regen, Milch, Trinkwasser, chemische Fällungen oder Ionenaustausch vornehmen
- fest: Gesteine, Minerale, Erze, Technische Produkte, Meßsonden, Eichpräparate, Lebensmittel
- gemischt gasförmig/flüssig/fest: Lebensmittel
- Korngrößenverteilung kann nuklidsspezifisch sein
- anorganisch, organisch, gemischt: Böden

Geometrie

- umschlossen, offen
- äußere, innere, inkorporierte
- dispers, konzentriert
- homogen, inhomogen, hot spots
- punktförmig, flächig, volumig
- Matrix- und Selbstabsorptionseffekte
- transport- und lagerfähig

Aktivität

- schwach-, mittel-, hochaktiv
- stabil, instabil, zeitlich veränderlich
- Einzelnuklid, Nuklidgemisch
- genetisch abhängige Nuklide im Gleichgewicht oder nicht

Probengewinnung und -behandlung

- Probennahme, repräsentative vor Ort
- Stichproben, Einzel-, Serienproben
- Probenteilung im Felde und im Labor
- Probenpräparation
- Probenkonservierung
- Probenarchivierung

Zusammensetzung

- Einzelnuklid, Nuklidgemisch, separierfähig, konzentrierfähig
- Teilchenart, Teilchenenergie

Tafel 5:
Technische Daten zu Nachweis- und Meßanordnungen

Meßgeometrie

- Probenparameter siehe Tafel 4
- Relation Probe-Detektor: Abstand, Zwischenmedium, Umhüllung
- Bohrlochgeometrie, in Lösung mit Flüssig-Szintillatoren, als Gas in der Ionisationskammer

Detektortyp

- Ionisationszähler: Gas, Zählrohrcharakteristik
- Szintillator: Einkristall, Plastik, Flüssigkeit
- Halbleiter: Si:Li, Ge:Li, Ge reinst
- Röntgenfilm: mit AgBr besser als mit AgCl
- Detektorgröße: Flächen, Volumen
- Fenstergröße, Fenstermaterial, Instrumentengehäuse
- Sonde berührungsinert, eintauchfähig

Ansprechfaktoren

- Teilchenart abhängig
- Energieabhängig
- Intensitätsabhängig
- Zeitabhängig
- Ortsabhängig
- Temperatur-, Druck-, Feuchteabhängig
- Strahlgeometrie: diffus, konvergent, divergent

Eichproben

- kompatibel
- eichfähig wofür

Betriebsbedingungen

- Nachfüllgas
- Betriebsspannung, Batteriebetrieb, Netzbetrieb
- Betriebstemperatur: Kühlen notwendig
- Stoß- und Lageempfindlich
- Alterungsverhalten

Meßwertanzeige

- Anzeige Größen: Pulse/s, Dosis, Dosisleistung
- Anzeigebereich, Nullbereich, Nachweisgrenzen
- Anzeigetyp: analog, linear, logarithmisch, digital
- Ansprechgeschwindigkeit, Dämpfung, Kompensation,
- Sättigung, Übersteuerung

Elektronik

- Verstärkungsfaktor, Rauschfaktor
- Energiediskriminator, Vielkanalanalysator

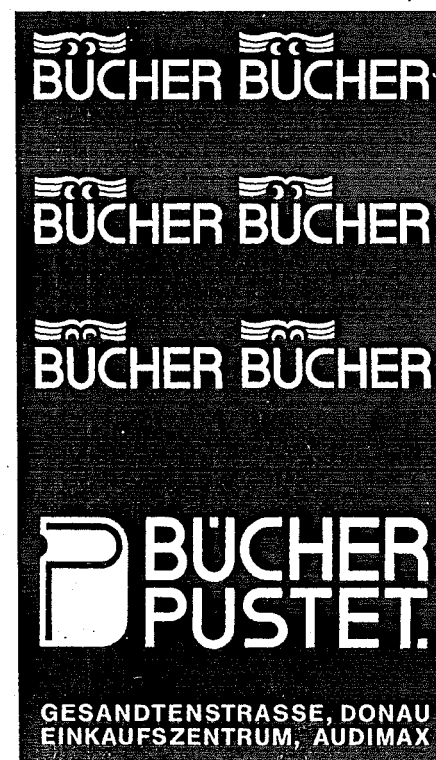
Kosten-Nutzen-Verhältnis Narrensicher?

Tafel 6:
Einsatzgebiete für Nachweis, Messung, Überwachung der Radioaktivität in ihren Anwendungen

- Uranprospektion und Exploration
- Altersbestimmung, geologische, archäometrische
- medizinische Diagnostik, z. B. Szintigraphie
- medizinische Therapie
- Materialprüfung mit Durchleuchtung
- industrielle Steuer- und Regeltechnik, z. B. berührungslose, kontinuierliche Dickenmessung
- Indikatorverfahren, Tracer
- Markierungs- und Spurenanalysen
- Strahlenschutz
- Kontaminationsüberwachung
- Kernkraftwerksüberwachung
- Kernwaffenüberwachung
- naturwissenschaftlicher Unterricht

Tafel 7:
Fundamentale, universelle Erkenntnisse aus der Radioaktivität

1. Atome („Unteilbare“) können spontan zerfallen.
2. Der zeitliche Verlauf der Einzelzerfälle ist nicht klassisch kausal sondern statistisch.
3. Atomkerne enthalten Protonen und Neutronen.
4. Masse und Energie sind äquivalent.
5. Wellenstrahlung und Teilchenstrahlung sind dual.



REGENSBURGER UNIVERSITÄTSZEITUNG

Herausgeber: Der Präsident der Universität Regensburg, Prof. Dr. Hans Bungert. Redaktion: Ralf Haberhausen, Universitätsstraße 31, 8400 Regensburg, Telefon 9 43-23 02, Telex: 0 65 658 unire d. Erscheinungsweise: monatlich während der Vorlesungszeit. Auflage: 5000, kostenlos. Mit Namen oder Initialen gekennzeichnete Artikel geben nicht unbedingt die Meinung des Herausgebers oder der Redaktion wieder. Die Redaktion behält sich Kürzungen vor. Druck: Mittelbayerische Druckerei- und Verlags-GmbH Regensburg. Anzeigenverwaltung: Anzeigengesellschaft Raum Regensburg mbH, Regensburg. Alle Beiträge sind bei Quellenangabe frei zur Veröffentlichung.