Schatzsuche mit radioaktiver Strahlung

Bernd Laquai, 5.10.2019

Wer mit Kindern Schatzsuche spielt, der weiß welchen Eifer und welche Emotionen dieses Spiel freisetzen kann. Viele spielen das Spiel sogar als Erwachsene weiter, zum Beispiel in Form des Geocaching, und mache entfalten dabei schon fast suchthaftes Verhalten indem sie entweder immer neue, raffiniertere Verstecke entwickeln oder solche mit beliebig hohem Aufwand suchen, obwohl es ja immer noch ein Spiel ist. Aber es gibt auch die richtigen Schatzsucher, solche, die echte Schätze aus alten Kulturen suchen. Und glaubt man ihnen, dann löst ein echter Fund einen emotionalen Kick aus, der durch nichts zu toppen ist. Die Aussicht auf einen solchen Kick treibt überall auf der Welt ganze Heerscharen von Sondengängern und Schatztauchern an, die keine Mühe und Aufwand scheuen irgendwann einmal etwas äußerst Kostbares aus der Erde zu befreien. So hat beispielsweise der damals 24-jährige „Sonden-Bennie“ im Mai 2013 in Rülzheim in der Pfalz den sogenannten „Barbarenschatz“ im Wert von rund einer halben Million Euro gefunden. Es waren rund 100 wertvolle Gold- und Silbermünzen vermutlich aus dem 5. Jahrhundert. Für den jungen Hobby-Schatzsucher also quasi der Jackpot.

Beim Schatzsuchen zieht aber vor allem ein Stoff die Menschen von je her in Bann: Gold. Schon die spanischen und portugiesischen Seefahrer, allen voran Christoph Kolumbus zogen vor allem mit einem Ziel los, nämlich um in den neu entdeckten Kontinenten nach Gold zu suchen. Am Ende raubten sie aber den dortigen indigenen Kulturen (z.B. den Inkas und Azteken) das bereits gefundene Gold in großen Mengen. Die Tatsache, dass nicht alle Schiffe wieder in den Heimathäfen ankamen, lässt allerdings noch heute den Schatztauchern keine Ruhe. Erst 2015 fanden die beiden Schatztaucher-Familien Brisben und Schmitt vor Florida in einem alten Wrack eines spanischen Handelsschiffes von 1715 Goldmünzen und eine 12m lange Goldkette im Wert von 4.5Millionen Dollar. Auch die Nazis versteckten zu Kriegsende in großen Mengen Gold, einmal Gold aus der Reichsbank und zum andern Raubgold. Nicht alles davon wurde von den Alliierten nach Kriegsende wiedergefunden. Daher suchen auch heute noch viele mehr oder weniger professionelle Schatzsucher fieberhaft nach dem Nazigold und gelegentlich kommt es auch immer wieder zu sensationellen Funden, was die den Ehrgeiz der Sondler-Community dann wieder aufs Neue befeuert.

Aber selbst ganze Staaten lassen sich noch immer in den Bann des Goldes schlagen. So lagen Ende 2017 in den Tresoren der Bundesbank etwa 3400 Tonnen Gold als Währungsreserve. Nur noch die Amerikaner haben eine noch größere Menge gehortet. Dementsprechend machte man sich auch nach dem 2. Weltkrieg große Sorgen um die Goldförderung, die meisten Minen waren nämlich ausgebeutet und die Nachfrage an Gold war hoch, weil man nach den Kriegswirren eine sichere Geldanlage suchte. Das wiederum trieb etliche Leute enorm an, wieder in der Natur nach Gold zu suchen. Private und staatliche Einrichtungen begannen nun auch die neueren wissenschaftlichen Erkenntnisse und Technologien zu nutzen um die Erfolgsquote bei der so mühsamen Suche nach Gold zu steigern. Die Amerikaner versuchten dazu insbesondere ihre Erkenntnisse aus der militärischen Nuklearforschung einzusetzen.

Der kalte Krieg war 1965 noch voll im Gange, die Russen hatten 1961 die größte jemals gezündete Wasserstoffbombe (die Zar-Bombe AN602) über der Insel Nowaja Semlja abgeworfen und so gezeigt, dass sie nun auch zur Zerstörung der Welt in der Lage waren. Die Amerikaner aber bastelten bereits schon an den kleineren Neutronenbomben, die weniger Detonationswirkung haben, aber dafür viel mehr Strahlung freisetzen sollten um lediglich „biologisches Material“ zu vernichten. Das erachtete man als sinnvoller, denn die Neutronenstrahlung hat ähnlich grausame biologische Wirkung wie die Alphastrahlung, nur ist sie deutlich durchdringender. Während sich Alphastrahlung bereits mit einem Blatt Papier abschirmen lässt, ist die Neutronenstrahlung noch durchdringender als die Röntgenstrahlung und kann so eine Panzerbesatzung auslöschen ohne den Panzer zu zerstören. Aus dieser militärischen Forschung mit Neutronen heraus hatte man auch das Wissen, wie man große

Neutronenquellen baut, und man wusste auch bestens, dass Neutronen Gold radioaktiv machen können, und dass man Gold dann an einer charakteristischen Gammastrahlung eindeutig identifizieren kann.

Interessanterweise kam 1964 auch der James Bond Film Goldfinger in die Kinos, der bereits nach 3 Wochen seine Produktionskosten eingespielt und am Ende 120 Million Dollar erwirtschaftet hatte. In der Handlung des Films ging es um den Bösewicht Auric Goldfinger, der sein Milliardenvermögen in Gold angelegt hatte und die Goldreserven der amerikanischen Notenbank wertlos machen wollte, indem er eine nukleare Bombe zünden wollte. Die radioaktive Strahlung der Bombe sollte nämlich das Gold radioaktiv und daher wertlos machen, damit umgekehrt Goldfingers Goldschatz wertvoller werden würde – was Bond natürlich wie immer im letzten Moment verhinderte. Gleichzeitig aber starteten auch die US Behörden 1965 eine Operation Goldfinger, wo im gesamten Hoheitsgebiet der USA mit allen mitten nach Gold gesucht wurde /1/.

Dabei montierte man wohl auch Neutronenquellen auf Trucks und versuchte mit der erzeugten Neutronenstrahlung tief in den Boden einzudringen um das dort möglicherweise vorhandene Gold zur Emission von Gammastrahlung anzuregen, die sich leicht nachweisen lassen würde. Im Gegensatz zu Auric Goldfinger wussten die amerikanischen Nukleartechniker nämlich genau, dass die im Gold so erzeugte Radioaktivität sehr gering sein würde und mit einer Halbwertszeit von 2.7 Tagen wieder auf die Hälfte abnimmt. So gesehen erschien das Unterfangen das Gold zu bestrahlen ohne große Konsequenzen zu bleiben. Allerdings hatte man mit der Operation Goldfinger wohl nicht allzu viel Gold gefunden, wenn die historischen Berichte korrekt sind. Das könnte aber auch an geringen Goldvorkommen und weniger an der Methode gelegen haben. Daher war das neue Verfahren der Goldprospektion mit der neutroneninduzierten radioaktiven Strahlung des Goldes noch lange nicht vom Tisch.

Um diese Methode zu verstehen, muss man sich etwas mehr mit den geheimnisvollen Neutronen befassen. Wather Bothe und sein Student Herbert Becker hatten 1930 festgestellt, dass wenn man mit einem starken Alphastrahler wie z.B. Polonium Alphateilchen (Heliumkerne) auf eine Berylliumfolie schießt, diese dann eine merkwürdige Strahlung abgibt. Nach heutiger Erkenntnis lautet die kernphysikalische Formel dazu:

$$^{9}_{4}\mathrm{Be} + ^{4}_{2}\alpha \rightarrow ^{12}_{6}\mathrm{C} + ^{1}_{0}\mathrm{n}$$

oder in Kurzform

$$^{9}\mathrm{Be}(\alpha, \mathrm{n})^{12}\mathrm{C}.$$

Sie dachten, dass diese Beryllium-Strahlung eine Art Gammastrahlung ist. Der englische Physiker Chadwick und die Tochter von Marie Curie, Irene Curie und ihr Mann, der Chemiker Frederic Joliot-Curie, bemerkten, dass diese Strahlung noch intensiver wird, wenn man ein Stück Paraffin hinter die Berylliumfolie bringt und dass sie aus Teilchen nicht aus Gammaquanten bestand. Zunächst dachten sie an Protonen. Chadwick fand dann 1932 schließlich heraus, dass es sich um elektrisch ungeladene Teilchen, die Neutronen handelte. Aber erst 1938 konnte Enrico Fermi die Kernumwandlungsprozesse, die durch die Neutronen in beschossenen Atomen stattfanden, aufklären. Seine Mitarbeiterin Hilde Levi beschoss etliche chemische Elemente mit Neutronen und beide stellten fest, dass sich diese Kerne durch Aufnahme von Neutronen in andere chemische Elemente umwandeln ließen, die teilweise radioaktiv waren und dabei eine charakteristische Gamma-Strahlung abgaben. Damit ließ sich auch der beschossene Ausgangsstoff eindeutig identifizieren. Hilde Levi und Enrico Fermi gelten somit als Mitbegründer der Neutronenaktivierungsanalyse. Enrico Fermi war es dann auch, der entscheidende Arbeiten zum Aufbau des ersten funktionsfähigen Kernreaktors lieferte. Die dazu notwendige Kettenreaktion machte nämlich eine Vervielfältigung der Neutronen pro Spaltungsreaktion erforderlich, was nur erreicht werden kann, wenn man die schnellen Neutronen, die bei der Spaltungsreaktion entstehen, verlangsamt (moderiert), damit sie von den noch ungespaltenen Uran-

Kernen aufgenommen werden um dann erneut instabil zu werden und sich zu spalten. Diese Rolle als Moderator spielte das Paraffin in den Versuchen von Chadwick und dem Ehepaar Joliot-Curie. Allerdings dürfen bei einem Kernreaktor auch nicht zu viele Neutronen entstehen, da sonst die Kettenreaktion außer Kontrolle gerät und der Reaktor in die Luft fliegt. Mit diesen Erkenntnissen gelang Fermi 1942 der Bau eines Kernreaktors (Chicago Pile No. 1) in dem die erste kontrollierte Kettenreaktion ablief. Später leistete Enrico Fermi dann entscheidende Beiträge zur Konzeption der amerikanischen Atombomben, bei denen es um eine maximale Vermehrung der Neutronen bei den Spaltungs- bzw. Fusionsreaktionen geht, damit die Kettenreaktion möglichst „sicher und schnell" abläuft.

Mit den Ergebnissen von Fermi's Forschung lässt sich nun auch der Versuch der Goldprospektion im Rahmen der Operation Goldfinger und den mobilen Neutronenquellen erklären. Es handelt sich also quasi um eine mobile Neutronenaktivierungsanalyse des Bodens unter einem Truck, auf dem eine ausreichend starke Neutronenquelle montiert ist. Tief im Boden liegt das natürliche Gold als stabiles Element mit der Atommasse von 197u vor. Anders als beim natürlichen Kalium, bei dem neben dem stabilen Isotop auch noch ein radioaktives Isotop enthalten ist, handelt es sich bei natürlichem Gold nicht um ein Isotopengemisch. Daher steht schon mal fest: natürliches, unbeeinflusstes Gold ist nicht radioaktiv.

Beschießt man nun aber Gold mit Neutronen, sind laut einschlägiger Literatur folgende neutronenindizierten Kernumwandlungsprozesse möglich:

$^{197}Au(n,\gamma)^{198}Au$
$^{197}Au(n,2n)^{196}Au$
$^{197}Au(n,3n)^{195}Au$

Das heißt, das beschossene Goldatom absorbiert ein Neutron, wird dadurch instabil und gibt dann entweder ein Photon (Gamma-Quantum) ab, oder es emittiert 2 oder auch 3 Neutronen. Dementsprechend entstehen durch den Neutronenbeschuss die radioaktiven Goldisotope Au-198, Au-196 oder Au-195. Der Vollständigkeit halber soll hier auch erwähnt werden, dass man radioaktive Goldatome auch durch hochenergetischen Photonenbeschuss erreichen kann. Hier werden in Fachkreisen u. A. die Umwandlungen:

$^{197}Au(\gamma,\gamma')^{197m}Au$
$^{197}Au(\gamma,n)^{196}Au$

genannt. Bei keiner dieser Kernumwandlungen tritt aber eine Spaltung des Kerns auf, so wie sie vom Uran bekannt ist. Die Instabilität nach dem Neutroneneinfang äußert sich also lediglich in einer Kern-Umwandlung und der Abgabe von Photonen- Strahlung bzw. einer Teilchenstrahlung.

Im Zusammenhang mit der Neutronenaktivierungsanalyse taucht aber vor allem die Umwandlung $^{197}Au(n,\gamma)^{198}Au$ auf. Diese Umwandlung führt nämlich zu einer relativ einfach zu identifizierenden Gamma-Linie bei 411.8keV, was man dem Zerfallsschema des Au-198 entnehmen kann.

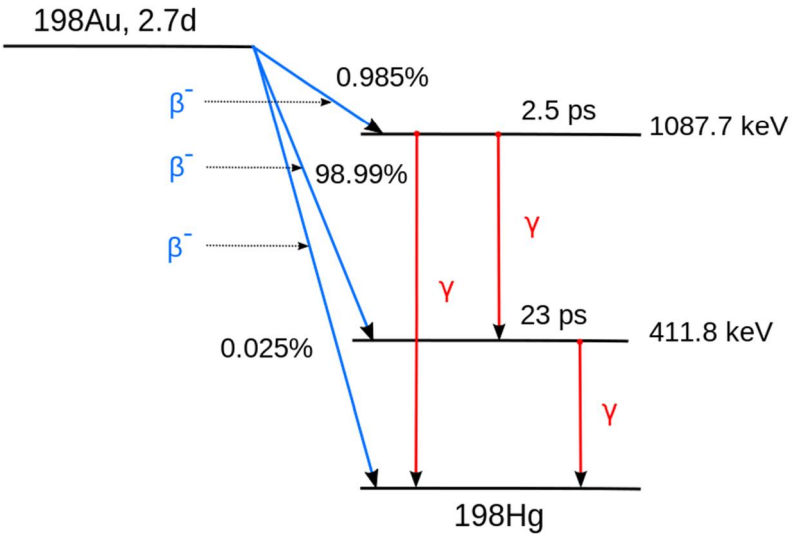

Abb. 1: Zerfallsschema des radioaktiven Goldisotops Au-198, Quelle: Wikipedia

Dieses Schema besagt, dass das durch den Neutronenbeschuss entstandene Au-198 in fast 100% der Fälle unter Emission von Gamma-Strahlung in stabiles Quecksilber mit der Atommasse 198 zerfällt. Lediglich in 0.025% der Fälle wird keine Gamma-Strahlung emittiert. Findet eine Emission von Gamma-Strahlung statt, wird entweder nur ein Gammaquantum mit 1087.7keV Energie emittiert (knapp 1% der Fälle), oder zwei (im Abstand von 23ps) wobei das erste eine Energie von 675.9keV aufweist und das zweite eine Energie von 411.8keV (knapp 99% der Fälle). In einem Stoffgemisch mit einem gewissen Goldgehalt, werden durch eine Neutronenbestrahlung natürlich auch Atome vieler anderer Elemente ebenfalls aktiviert und es tauchen daher viele andere Gammalinien auf. Allerdings hebt sich die 411.8keV Linie des Au-198 relativ eindeutig hervor, an der man nun auch den Isotopengehalt in Atomen Au-198 pro g Gold in etwa bestimmen kann. Ein Gamma-Spektrum nach der Neutronenbestrahlung sieht in etwa so aus:

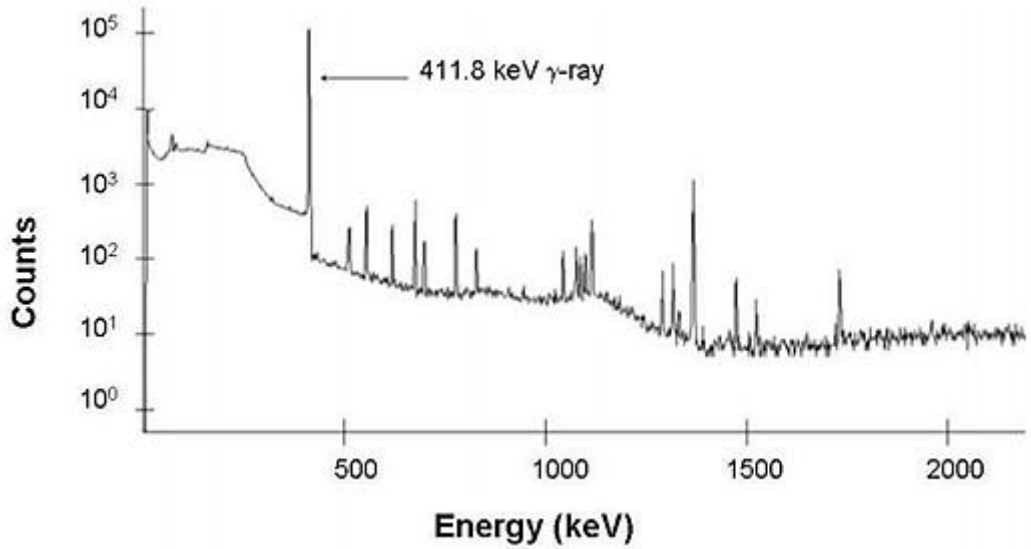

Abb. 2: Typisches Gamma-Spektrum beim Zerfall von neutronenaktiviertem Gold, die Linie des Au198 bei 411.8keV ist deutlich erkennbar, Quelle: NIST /2/

Im Falle der Aktivierung durch Neutronenbestrahlung ist aber noch eine andere Sache wichtig: Die Effizienz der Methode, also die Wahrscheinlichkeit mit der das stabile, natürliche Au-197 Atom tatsächlich ein Neutron einfängt, hängt stark von der Energie (Geschwindigkeit) der Neutronen ab. Man spricht hierbei vom Einfangsquerschnitt, der in der Kernphysik gerne in der Einheit Barn

ausgedrückt wird, die für $10^{-24}cm^2$ steht. Grob gesagt, gibt der Einfangquerschnitt die Kreisfläche um den Atomkern senkrecht zur Einfallsrichtung an, auf der ein Neutron einen Treffer landen muss, damit es vom Kern absorbiert wird. Das Besondere am natürlichen Gold Au-197 ist nun, dass es für sehr langsame, sogenannte thermische Neutronen einen relativ hohen Einfangquerschnitt (nämlich 98.5 barn) aufweist. Das erklärt auch warum Chadwick und das Ehepaar Joliot-Curie noch einen Paraffin-Klotz benutzten. Paraffin-Moleküle enthalten nämlich viele Wasserstoff-Atome, welche als Moderator wirken und so die schnellen Neutronen stark abbremsen. Dadurch steigt dann die Wahrscheinlichkeit für einen Einfang durch die Atome auf die man zielt, in diesem Falle das natürliche Au-197.

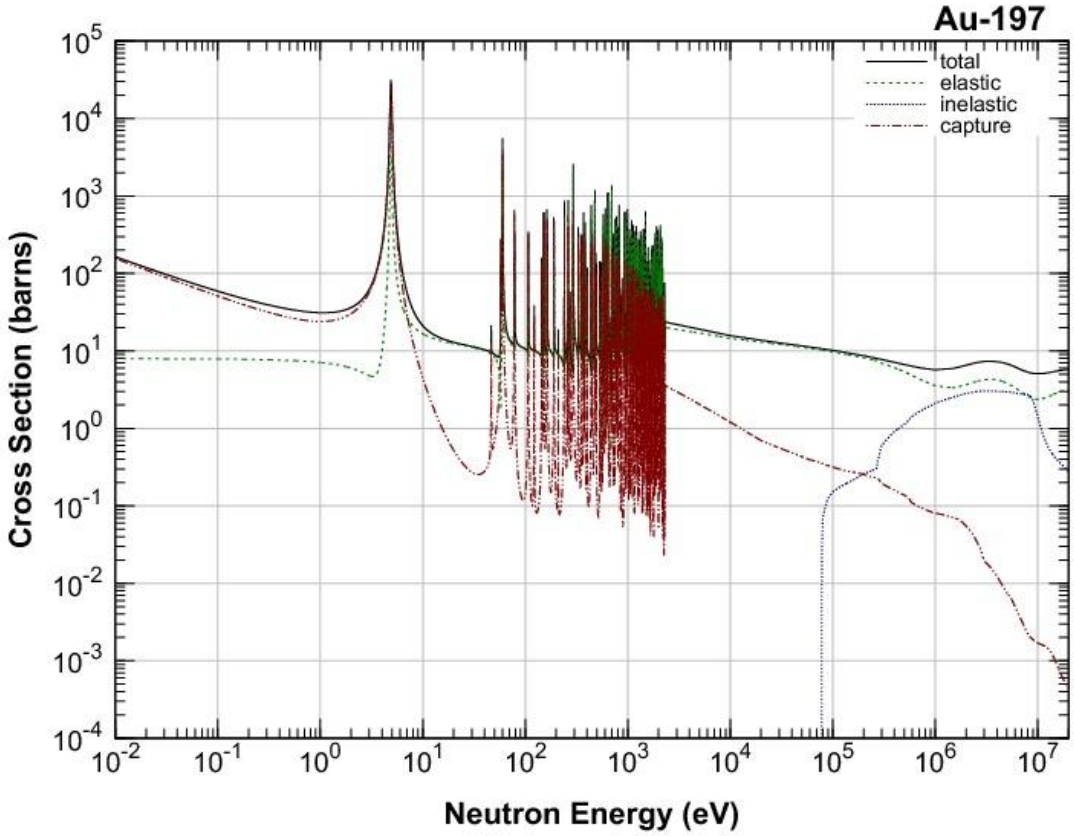

Abb. 3: Einfangquerschnitt von natürlichem Gold für thermische Neutronen, Quelle: Nuclear Data Center, Japan Atomic Energy Agency

Nach einem erfolgreichen Einfang entsteht dann ein Atom Au-198, das mit einer Halbwertszeit von 2.7 Tagen in stabiles Quecksilber Hg-198 zerfällt. Man hat also auch eine durchaus noch brauchbare Zeit um zu messen und bekommt andrerseits ein Radioisotop, das nicht unnötig lange strahlt. Dazu kommt die schöne chemische Eigenschaft des Goldes, dass es chemisch inert ist und nicht groß mit anderen Elementen reagiert. Das führt einerseits dazu, dass Goldfolie oder Goldkörner aus natürlichem Gold sehr gerne auch einfach zur Messung eines bestimmten Neutronenflusses benutzt werden, indem man die Radioaktivität in Form der Gammastrahlung des bei der Aktivierung entstandenen Au-198 vermisst. Anderseits lässt sich Au-197 mit Hilfe der Neutronenaktivierung auch gut als Tracersubstanz für die Verfolgung von Stoffwechselprozessen in der Biologie und anderswo verwenden. So können Gold-Nanopartikel an Polypeptide angelagert werden (sogenannte Affibodies), die dann mit Neutronen aktiviert und danach injiziert werden, bevor sie schließlich vom Organismus verstoffwechselt werden. Mit Gewebsentnahmen kann man dann feststellen, wohin sie bevorzugt transportiert wurden (z.B. in ein Tumorgewebe, siehe /2/).

Insgesamt kann man daher sagen, dass die Neutronenaktivierung von Gold eine ausgesprochen empfindliche Methode ist um kleinste Mengen Gold in einem Stoffgemisch nachzuweisen. Allerdings muss dafür auch eine Neutronenquelle vorhanden sein, die einen nennenswerten Fluss an thermischen Neutronen erzeugt, so dass auch eine ausreichende Aktivierung stattfindet. Genau darin aber besteht das Problem bei der mobilen Anwendung der Methode für eine großflächige Goldsuche. Während die Amerikaner bei der Operation Goldfinger für den Nachweis der 411.8keV Gammalinie noch ein tragbares Gamma-Spektrometer hätten verwenden können, brauchten sie um den Boden großflächig mit Neutronen zu durchdringen, eben einen geländegängigen Truck mit einer gewaltigen Anlage zur Generierung eines anständigen Neutronenflusses.

Die Erfolglosigkeit der Operation Goldfinger, führte aber keineswegs dazu, dass die kerntechnisch angehauchten Ingenieure mit der Idee aufgaben, natürliche Vorkommen von Gold, aber auch andere wertvolle Bodenschätze wie Öl und sogar Diamanten mit Strahlungsmessgeräten für Kernstrahlung zu suchen. Vorausgegangen war nämlich in der Zwischenzeit ein gewisser Erfolg mit Gamma-Strahlung Wasser zu finden. Besonders ein deutscher Ingenieur tat sich hierbei hervor: Dr. Armin Bickel. So sagen es jedenfalls etliche Quellen im Internet. Er stammte aus Sondershausen in Thüringen, war Hochfrequenztechniker und arbeitete während des Kriegs in Peenemünde am Rader für die deutsche V2-Rakete. Nach dem Krieg wanderte er nach Kanada aus und später arbeitete am NASA Western Missile Test Range auf der Vandenberg Air Force Base in Kalifornien, 15km nordwestlich von Lompoc in Kalifornien, wo er später seine eigene Firma gründete. Diese Firma nannte er die „Isotope Geology & Mining Expoloration Inc.“, mit dem Untertitel „Nutron activated sensing – Mineral, Water, Oil and Gas“.

Dr. Bickel entwickelte in seiner Firma im Wesentlichen große, empfindliche Szintillationszähler, die er laut Angaben eines Bloggers im Internet, der ihn persönlich besucht haben will, in folgenden Modellen verkaufte:

1. The subterranean Isotope sensor "Algor Alpha" for prospector and mining Engineers mineral detection (vein and placer). $2000.00 (add $300.00 for chart recorder).
2. The Professional Isotope Sensor "Algor Alpha X" for geologists and engineers at mining exploration and evaluation mineral and water well detection. Extremely sensitive, used by car or plane (including recorder) $3400.00
3. The super-sensitive subterranean Isotope sensor "Algor explorer X" for use in minerals, oil, gas and water detection, mine exploration and evaluation, exploring new oil and gas fields, usable by car and plane. For sale only on a royalty of 2% on mineral, oil or gas detected by the instrument. $5000.00

Von Gold ist an dieser Stelle noch nicht die Rede, aber es werden „Mineralien“ erwähnt /3/. Man findet in dem Blog allerdings auch ein historisches Blockdiagram des Algor Explorer „ X “ – The Super-Sensitive Subterranean Isotope Sensor. Über Dr. Bickel und seine Firma wird darüber hinaus noch in etlichen Artikeln im Internet sehr geheimnisvoll berichtet und er wird als Rutengänger der modernen Art bezeichnet (z.B. in /4/).

Dem im Internet noch verfügbaren historischen Material (inklusive der Baupläne) kann man leicht entnehmen, dass Dr. Bickel bereits wusste, dass er mit einem einfachen Geiger-Müller-Zählrohr nicht weit käme und er deswegen versuchte einen hochempfindlichen tragbaren Szintillationszähler zu bauen. Sein Szintillationszähler konnte zwar noch kein brauchbares Gamma-Spektrum aufzeichnen, aber er hatte immerhin schon 4 Kanäle, die in irgendeiner Form auf einen Level-Konverter geführt waren. Damit war es wohl möglich, dass das Gerät auch die Energieinformation der gezählten Gamma-Impulse auswerten und damit möglicherweise auch verschiedene Elemente, die er suchte, unterscheiden konnte.

Etwas merkwürdig ist allerdings eine im Blockschaltbild eingefügte Erklärung unter dem Szintillationskristall. Man sieht eine wellige Linie, die wohl den Boden symbolisiert und darüber Teilchen, die sich zum Kristall bewegen. Hinter dem Kristall wird der Signalpfeil von Pünktchen umgeben die offensichtlich Photonen darstellen. Der nächste Block stellt den Photomultiplier dar, und es ist mit Hinweisen auf die Teilchen, die Photonen und den Signalausgang des Photomultipliers der Text zu sehen: „Neutron ... to Photon ... to ... Electron“, was offensichtlich eine Signal-Umwandlung andeuten soll. Nun ist die große Frage, auf was war das Gerät ausgelegt, auf einen Neutronen-Nachweis mit der Umwandlung von Neutronen in Gamma-Quanten im Gerät oder auf Gamma-Quanten, die durch eine Neutronen-Aktivierung bereits im Boden entstehen? Das Erstere wäre auf Grund dieses Hinweises zunächst wahrscheinlicher. Dazu müsste aber der Szintillationskristall noch zusätzlich von einem Material umgeben sein, welches diese Umwandlung bewerkstelligt (ein Neutronenkonverter, z.B. eine Bor-Folie), denn auf Neutronen ist ein typischer Szintillationskristall wenig empfindlich. Dann aber wäre das Gerät nicht mehr in der Lage verschiedene Gamma-Energien zu unterscheiden, denn die Konverter-Folie würde dann immer Strahlungs-Quanten mit derselben Energie liefern.

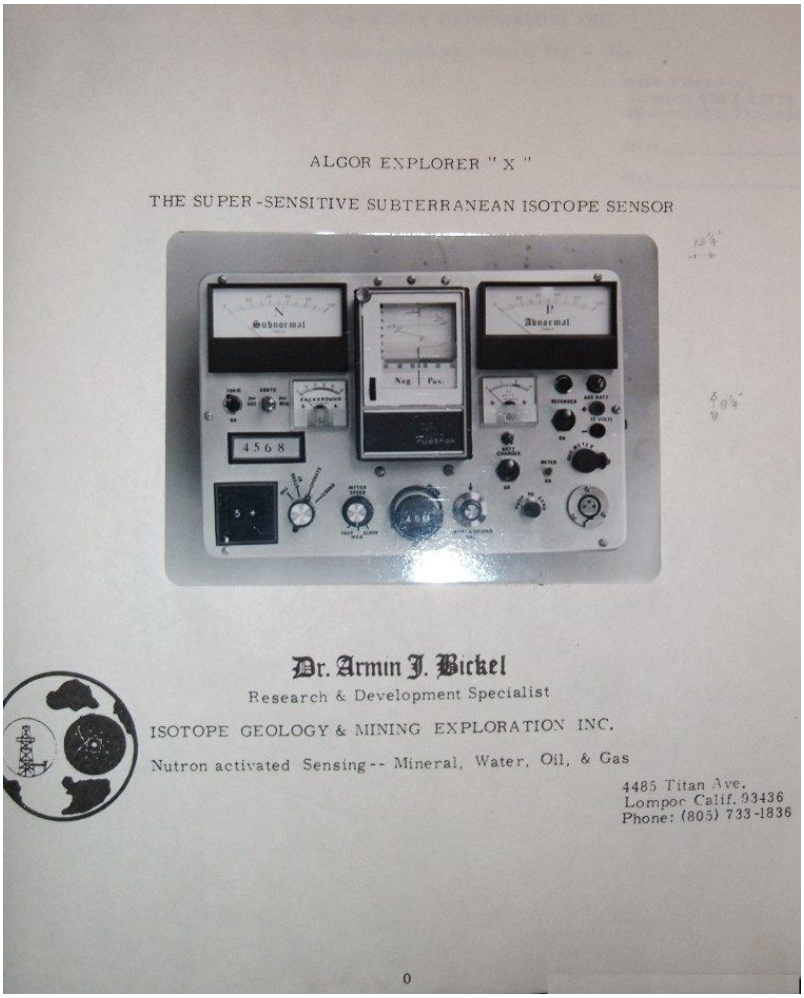

Abb. 4: Beschreibung des Algor Explorer X, dem hochempfindlichen unterirdischen Isotopen-Sensor konstruiert von Dr. Armin Bickel, Quelle /3/

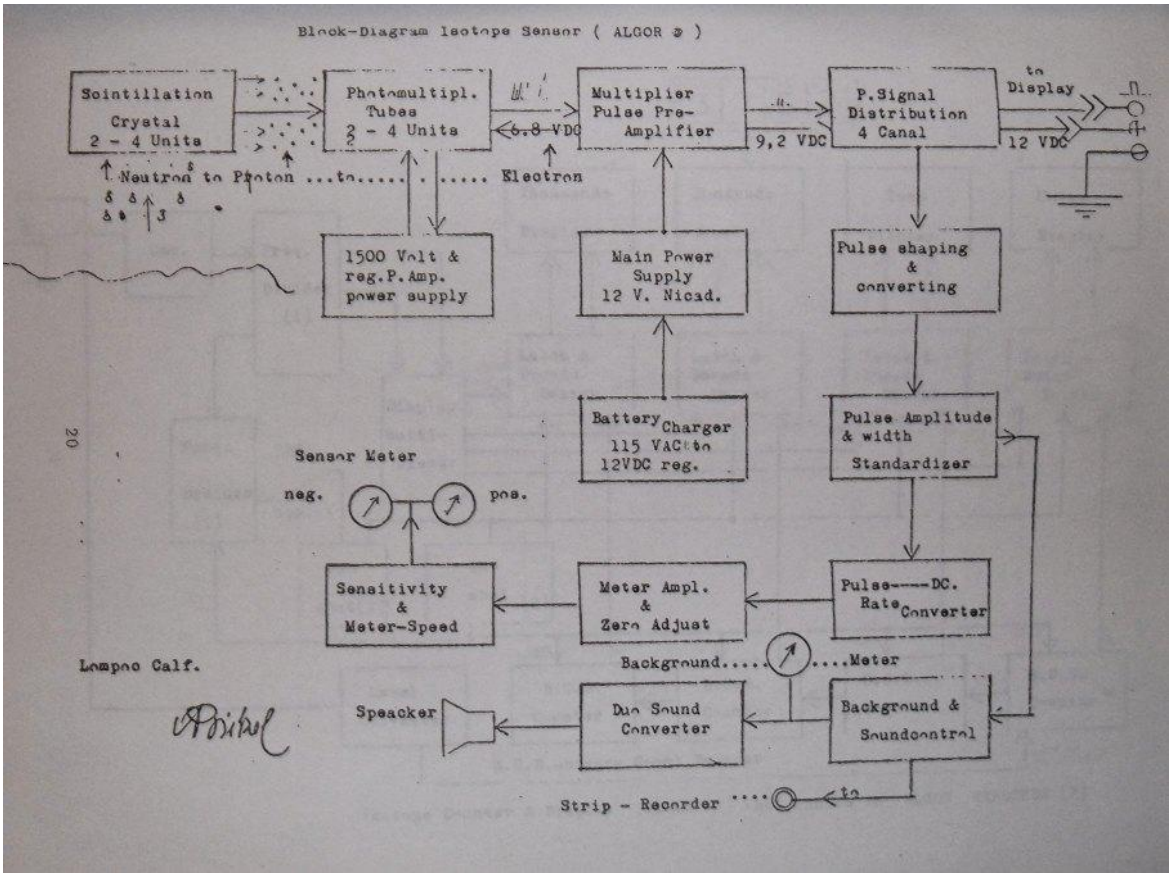

Abb. 5: Blockschaltbild der Sensoreinheit des Algor Explorer X, Quelle /3/

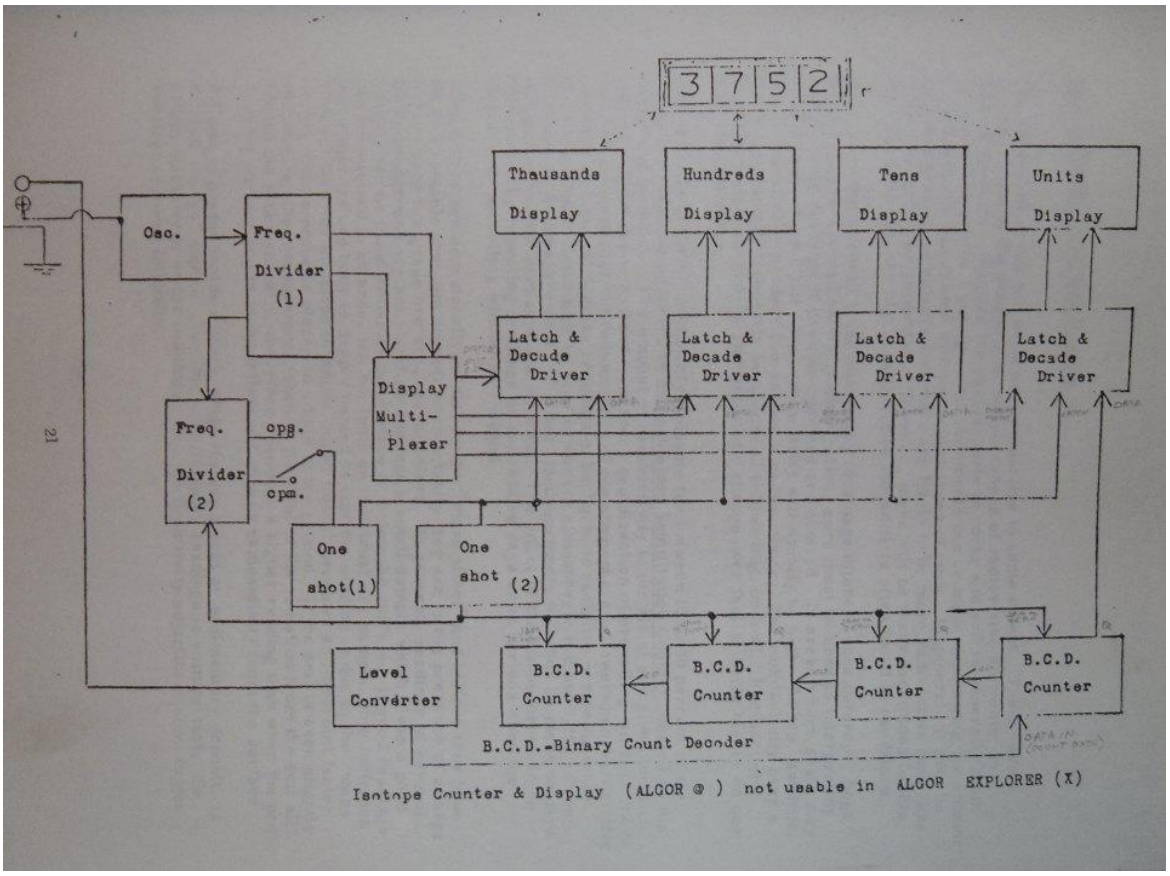

Abb. 6: Bockschaltbild der Anzeigeeinheit des Algor Explorer X, Quelle /3/

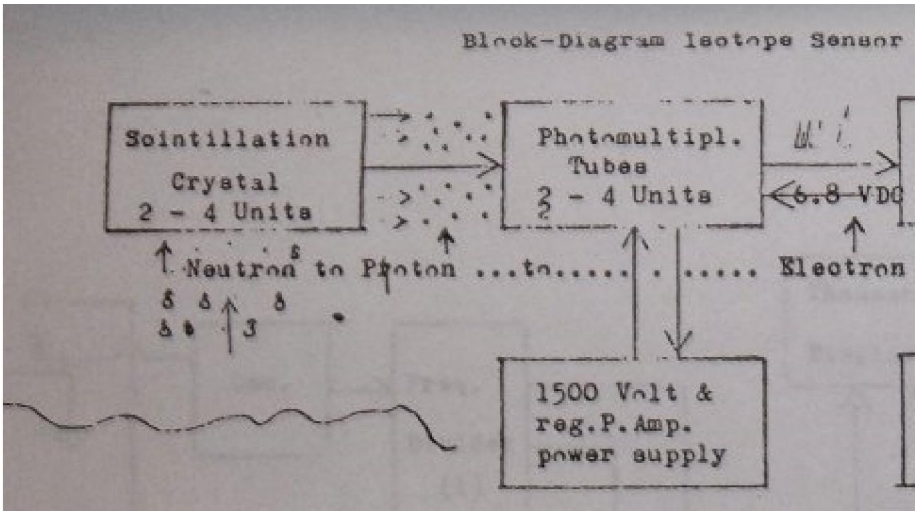

Abb. 7: Ausschnittsvergrößerung aus dem Blockschaltbild, welches einen merkwürdigen Hinweis auf die vorgesehene Funktion der Detektoreinheit gibt: Der Szintillationskristall wandelt Neutronen aus dem Boden in Photonen um, die Photomultiplier Röhre wandelt die Photonen in Elektronen um, Quelle /3/

Abb. 8: Dr. Armin Bickel mit seinem Algor Explorer X, in der Hand hält er die Detektoreinheit, Quelle: /4/

Der Untertitel von Dr. Bickels Firma lässt allerdings deutlich darauf schließen, dass seine Entwicklungen in gewisser Weise mit der Neutronenaktivierung zu tun hatte. Es ist aber nirgendwo erkennbar, dass er mit einer künstlichen Neutronenquelle arbeitete. Aber möglicherweise erkannte er bereits die aktivierende Wirkung der sekundären kosmischen Strahlung, die im Bereich der Erdoberfläche von Gamma- und Neutronenstrahlung dominiert wird. Dann wäre er möglicherweise davon ausgegangen, dass die im Boden vorhandenen Mineralien durch kosmische Neutronen aktiviert werden und er die dabei entstehenden Gamma-Quanten (im Falle von Gold mit einer Energie von 411.8keV) mit seinem hochempfindlichen Gerät zum Nachweis detektieren wollte. Dann wäre allerdings die Erklärung in seinem Blockdiagramm etwas unpassend, weil dann die Gamma-Quanten mit spezifischer Energie den Boden verlassen würden und von seinem Szintillationskristall in Licht (auch Photonen) verwandelt werden, welche die Photomultiplier-Röhre dann wiederum in elektrische Impulse mit elementspezifischer Amplitude umwandeln würde. Es könnte aber auch durchaus sein, dass er es speziell auf die durch Moderierung der schnellen kosmischen Neutronen im Boden entstandenen thermischen Neutronen, die dann wieder zur Oberfläche diffundieren, abgesehen hatte. Diese könnte er dann versucht haben wenige Meter über dem Boden mit seinem Gerät zu detektieren. Das würde perfekt zu seinen Hinweisen im Blockdiagramm passen. Dann hätte er möglicherweise auf Grund einer auffälligen Änderung des Neutronenflusses auf ein mineralisches Vorkommen schließen können.

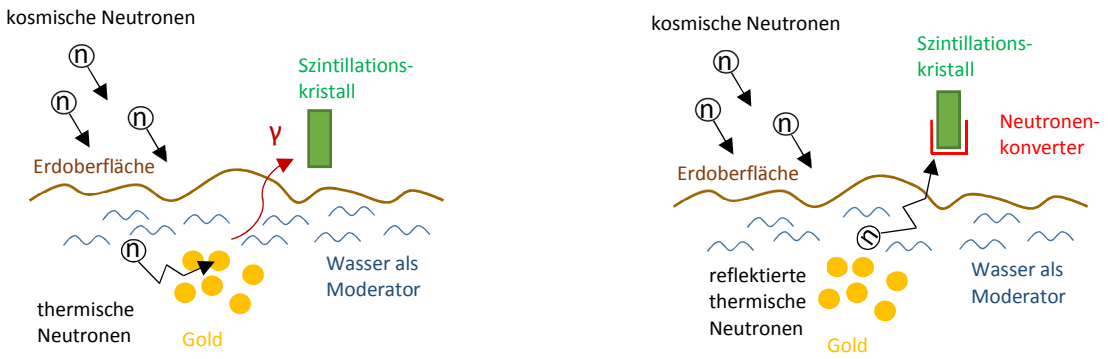

Abb. 9: Zwei vorstellbare Wirkungsprinzipien beim Bickel-Detektor: Nachweis von neutroneninduzierten Gammaquanten (links) oder Nachweis reflektierter thermischer Neutronen mit Hilfe einer Neutronenkonversion im Detektor (rechts)

Im Falle einer Suche nach Wasser oder von Öl kann man durchaus davon ausgehen, dass der hohe Anteil an Wasserstoffatomen in den Molekülen den kosmischen Neutronenfluss enorm beeinflussen, so dass sich die am Boden nachweisbare Rate an Neutronen merklich zu den langsamen Neutronen hin verändert, was er dann vielleicht rein empirisch über seine Feldversuche festgestellt haben könnte. Daher könnte man auch annehmen, dass Dr. Bickel vielleicht von einer doppelten Funktionalität ausging, die er je nach Prospektionsaufgabe an seinem Gerät auswählte. Allerdings müsste er dazu auch mechanisch an seinem Gerät etwas verändert haben, denn der Szintillationskristall ist erstmal nur für Gamma-Strahlung empfindlich und um die reflektierten Neutronen nachzuweisen, müsste er den Kristall mit einem Material umgeben, welches durch die Neutronen aktiviert wird und somit Neutronen- in Gamma- (Photonen-) Strahlung umwandelt.

Auf ähnliche Weise wie bei den Neutronen wird aber auch die terrestrische Gammastrahlung, die vor allem durch die im Boden immer in kleinen Konzentrationen vorhandenen primordialen Radionukliden Uran, Thorium und Kalium, durch darüber liegendes Wasser oder Öl ebenfalls gedämpft, so dass sich auch dadurch die Zählrate seines Szintillationszählers spürbar geändert haben könnte. Dann müsste aber für eine Goldsuche Uran oder Thorium zusammen mit Gold in einer Lagerstätte vorkommen. Das ist gar nicht so selten, wie man auch am größten Australischen Untertage-Bergwerk Olympic Dam sehen kann. Auch diesen Effekt könnte er daher mit seinem Gerät verwertet haben.

Es könnte aber auch sein, er kannte den Zusammenhang zwischen der Wirkung kosmischer Neutronen und den Mineralien im Boden nicht so genau und die Hinweise waren nur ein Versuch der Erklärung aus einer gewissen Unkenntnis heraus.

Bei der Frage, wie erfolgreich Dr. Bickel mit seinen Geräten nun sein konnte, kann man nur so viel sagen: Für die Wasser oder Ölsuche könnte das Ganze wirklich gut funktioniert haben. Denn das ist heute eine wissenschaftlich anerkannte Disziplin, die mit dem Namen Cosmic-Ray Neutron Sensing (CRNS) bezeichnet wird. Dazu gibt es etliche wissenschaftliche Veröffentlichungen, in denen glaubhaft nachgewiesen wird, dass man wasserstoffhaltige Substanzen (z.B. die Bodenfeuchte) mit einem etwa 1m über dem Boden aufgestellten Neutronendetektor über die reflektierten Neutronen aus bis zu 90cm Tiefe und in einem Umkreis von bis zu 100m nachweisen kann und so z.B. die Bodenfeuchte bestimmen kann /5/.

Auf der anderen Seite gibt es im Internet auch mindestens ein Zeugnis eines fatalen Flops den Dr. Bickels bei der Suche nach Gold gelandet hat. Das „Alberta Department of Energy and Natural Resources (ENR), ist eine heute noch existierende kanadische Regierungs-Behörde der Provinz Alberta, die für die dortigen Bodenschätze zuständig ist und daher auch an Untersuchungen zu möglichen Goldvorkommen interessiert war. Von dieser Behörde existiert noch heute ein Arbeitsbericht aus dem Jahre 1986 mit dem Titel „Metallic Minerals Exploration near Fort MacKay (N57° 07‘ W110° 35‘) Permit No. 6886020001 - Kenneth Richardson“ zu einer Bodenbeprobung, die von Halferdahi & Associates Ltd. durchgeführt wurde. Der Beprobung vorausgegangen war 1985 eine luft- und bodengestützte Goldprospektion mit Dr. Armin Bickel und seinem Zitat: „"supersensitive scintillation counter" (Appendix 1) „ , siehe /6/. Zum Ergebnis der Prospektionsarbeit heißt es in dem Bericht, Zitat: „Dr. Armin Bickel, and assistants spotted two holes to be drilled for gold on the east side of Athabasca River south of the Fort MacKay bridge. A metallic minerals exploration permit covering the area was subsequently obtained. Halferdahl & Associates Ltd. was contracted to arrange for the drilling, log and sample the core, and interpret the results.“ Dr. Bickel war also offensichtlich mit seinem Gerät für Gold fündig geworden und man beauftragte ein Unternehmen zwei Probebohrungen durchzuführen.

Zu den Ergebnissen der beiden Probebohrungen aber heißt es dann in dem Bericht von der ausführenden Firma, Zitat: „All but one of the samples selected for analyses from the Devonian strata and the Precambrian contains background concentrations of gold from less than 1 to 60 ppb with some of the higher concentrations in this range probably being due to differences between analyses from different laboratories, not because background concentrations have been exceeded. Most of the concentrations of other metals in these Precambrian rocks are near average levels for other granitic rocks, with lanthanum and cerium somewhat above. One composite sample of mylonitic rocks contains coincident higher concentrations of copper, yttrium, samarium, and ytterbium. None of the samples analyzed appears to contain economic concentrations of the metals determined.“ Man hatte also bei den Bohrungen nur in einer Probe äußerst kleine Spuren von Gold gefunden (in Konzentrationen von weniger als 60:1Milliarde), sowie einige andere Metalle, die ebenfalls nicht abbauwürdig waren. Auf gut Deutsch ein enormer Misserfolg für Herrn Dr. Bickel.

Wie dem auch sei, man könnte nun einfach einmal davon ausgehen, dass Dr. Bickels Gerät zwar vom Prinzip her funktioniert, aber eben noch nicht so leistungsfähig war, wie das, was man heute selbst in Hobbybereichen erreichen kann. Herr Bickels Detektor hatte lediglich 4-Kanäle und war daher von der spektralen Auflösung sehr begrenzt. Heute ist es kein Problem eine Amplituden-Analyse der Detektorimpulse mit mehr als 1000 Kanälen für eine hochauflösende Spektroskopie auf einem Laptop zu implementieren. Somit könnte eine Goldprospektion über eine mobile Gamma-Spektroskopie auch ohne separate, künstliche Neutronenquelle möglich werden, wenn die Quantenausbeute gegenüber dem Neutronenfluss auf Meereshöhe groß genug ist. Das haben sich wohl auch einige kleinere Firmen gedacht, die heute aktiv sind und sowohl Szintillationszähler verkaufen, wie auch Prospektions-

Dienstleistungen mit Hilfe der Gammastrahlung anbieten (Neutronen werden nicht erwähnt) und sich dabei alle auf Herrn Dr. Armin Bickel als geistigen Vater dieser Such-Methodik berufen.

Nun wäre die nächste spannende Frage: Ist es möglich, mit einem selbst gebauten Gamma-Spektrometer unter Verwendung heutiger, moderner Technologie und auf der Basis eines energieauflösenden Szintillationszählers das im Boden vorhandene Gold, ob natürlich verteilt – oder in Form eines Goldschatzes, welches durch kosmische Neutronen aktiviert wurde, nachzuweisen?

Um dieser Frage nachzugehen, muss erst einmal geklärt werden, wie hoch die Aktivität von im Boden liegenden Gold, welche der kosmischen Neutronenstrahlung ausgesetzt ist, durch die Neutronenaktivierung in etwa ist. Zunächst kann man der einschlägigen Literatur entnehmen, dass der Neutronenfluss in der Atmosphäre relativ stark höhenabhängig ist. Zudem ist er auch noch von der geographischen Breite abhängig, weil er vorwiegend durch die Protonenströme, welche von der Sonne ins Weltall emittiert werden und im Falle der Erde hauptsächlich an den magnetischen Polen auf die Erdatmosphäre treffen, erzeugt wird. Während man in Reiseflughöhe (10km) im Flugzeug noch in der Gegend von 2 Neutronen pro cm^2 und Sekunde liegt, ist der Neutronenfluss am Erdboden kleiner als 0.1 Neutronen pro cm^2 und Sekunde. In der Nähe der Pole ist der Neutronenfluss etwa 7-mal stärker als am Äquator.

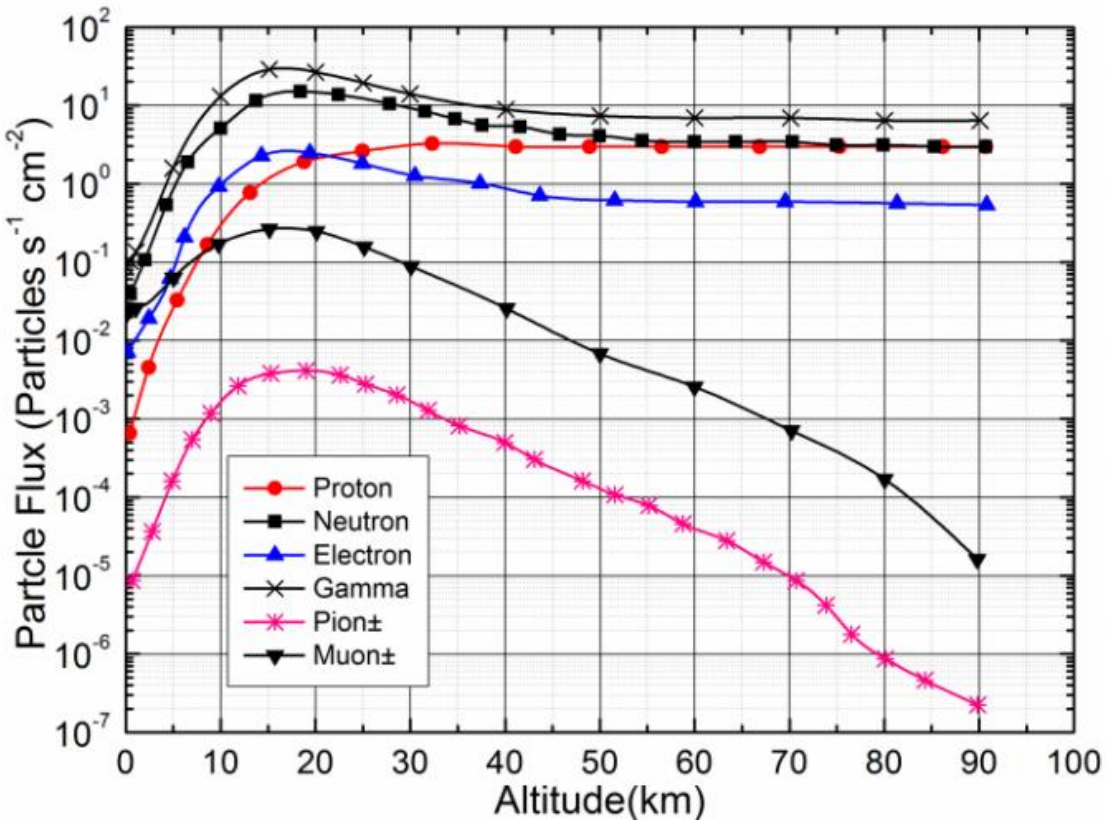

Abb. 10: Die Zusammensetzung der sekundären kosmischen Strahlung abhängig von der Höhe über Grund, Quelle: /7/

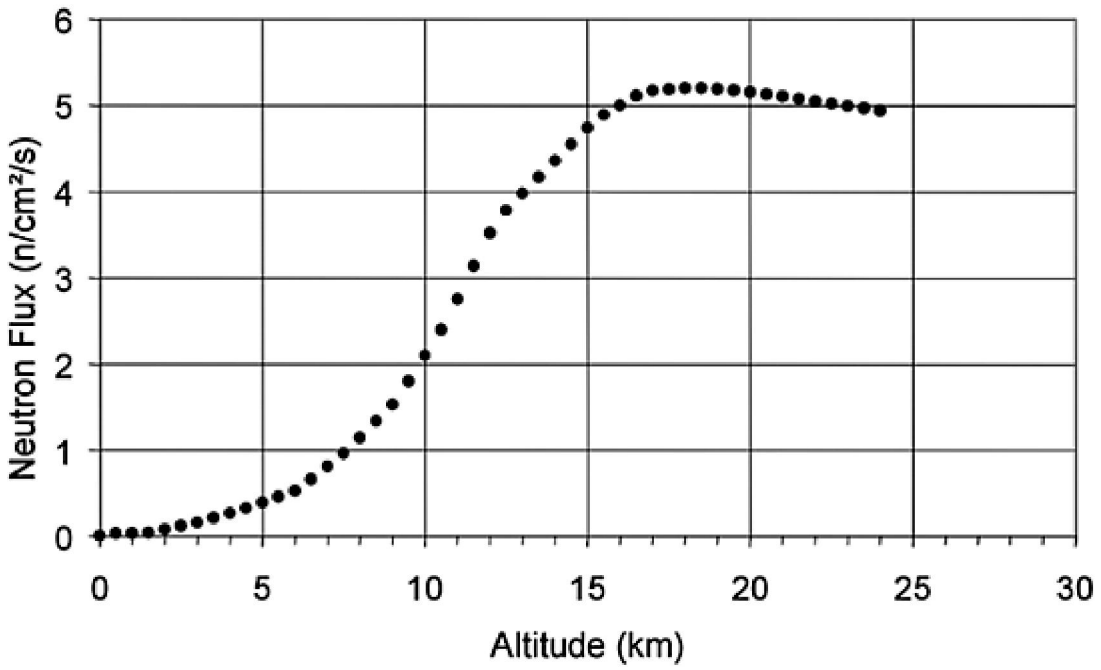

Abb. 11: Neutronenfluss in der Atmosphäre als Funktion der Höhe bei einer geographischen Breite von 45° nach dem NASA-Langley Modell, Quelle: IEC/TS 62396-1: 2006

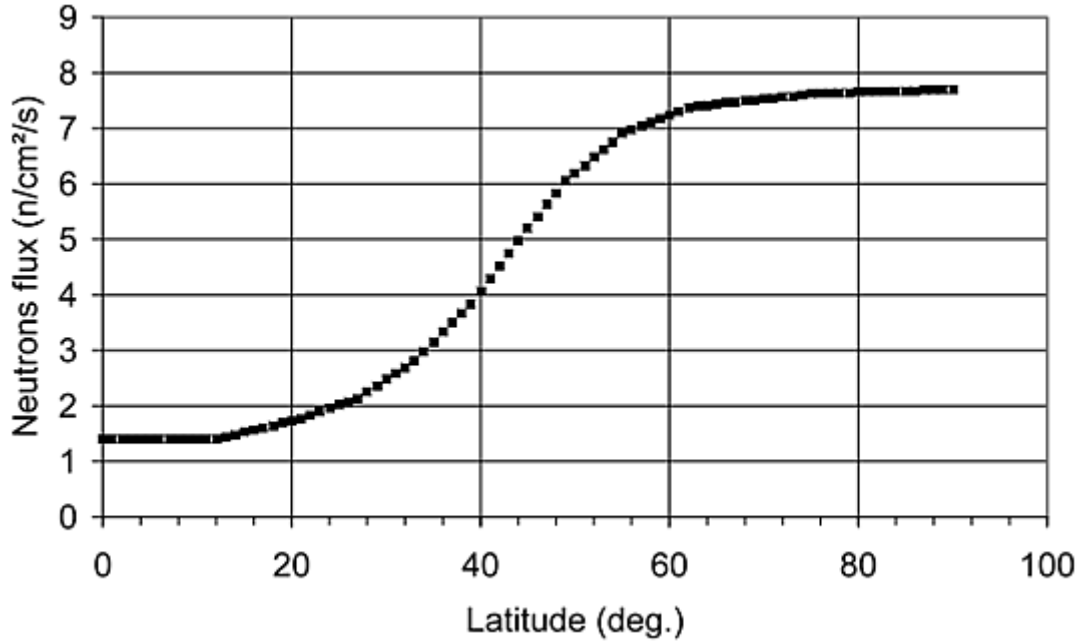

Abb. 12: Neutronenfluss in der Atmosphäre als Funktion der geographischen Breite in einer Höhe von 19km nach dem NASA-Langley Modell, Quelle: IEC/TS 62396-1: 2006

Die Physikalisch technische Bundesanstalt, PTB gibt für ihre Messstation in 85m Höhe einen Neutronenfluss von 48n/cm^2/h an, für die Messstation auf dem Schauinsland in 1195m Höhe 91.5n/cm^2/h und für die Messstation im Schneefernhaus auf der Zugspitze in 2650m Höhe einen Wert von 339n/cm^2/h (siehe /10/). Diese Messungen enthalten das komplette Neutronenspektrum, also auch die schnellen Neutronen, die mit Hilfe von Moderatoren (Bonner-Kugeln) so auf thermisches Niveau abgebremst werden, dass man sie mit einem ^{3}He-Zählrohr als Neutronendetektor direkt nachweisen kann. Im Vergleich zum Flugzeug auf Reiseflughöhe hat man in Meereshöhe also einen etwa um den Faktor 150 kleineren Neutronenfluss.

Dass das Wasser bzw. die Feuchte im Boden einen begünstigenden Einfluss auf die Neutronenaktivierung in Meereshöhe haben kann, zeigt eine Veröffentlichung aus Japan /8/.

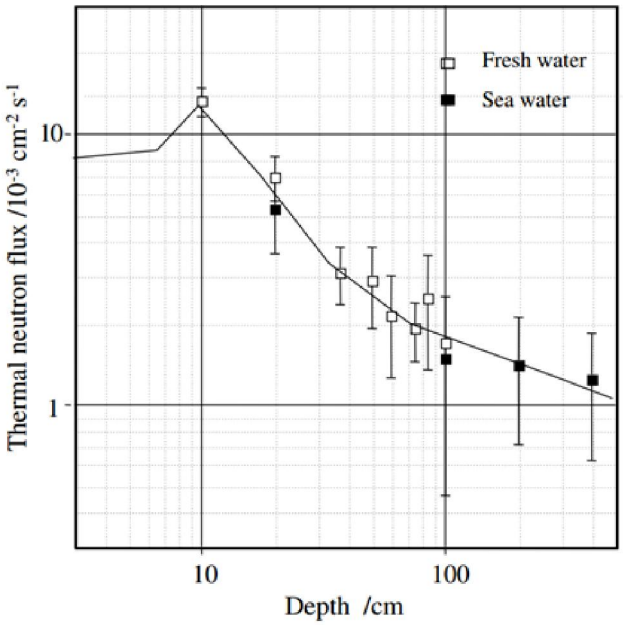

Abb. 13: Tiefenprofil des natürlichen thermischen Neutronenflusses in Süß- und Salzwasser, Quelle: /8/

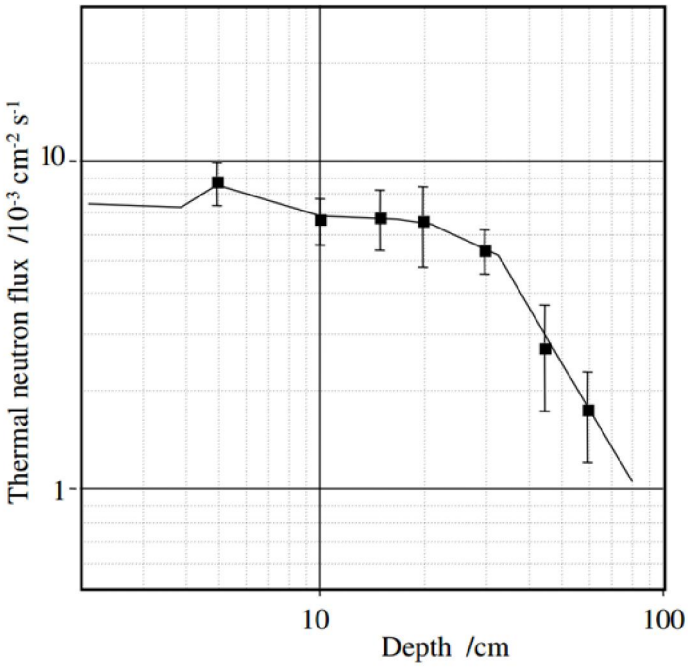

Abb. 14: Tiefenprofil des natürlichen thermischen Neutronenflusses in feuchtem Erdboden, Quelle /8/

Hier wurde mit Hilfe von Goldkörnern, in unterschiedlichen Wasser- bzw. Bodentiefen die Anzahl an Atomen, die durch kosmische Neutronen aktiviert wurden, bestimmt und daraus den Neutronenfluss berechnet. Die Messung lief allerdings so, dass die Goldkörner zunächst der kosmischen Strahlung gegenüber exponiert wurden, dann aber zur eigentlichen messtechnischen Auswertung in das Ogoya Underground Laboratory (OUL) gebracht wurden. Das OUL befindet sich in einem 135m unter der Erdoberfläche liegenden Stollen einer alten Kupfermine, in der die Kanazawa University eine Anlage zur ultra-low-level Gammaspektroskopie betreibt. Die Nachweisempfindlichkeit für die Gammastrahlung von Cs137 beträgt dort 0.18mBq bei einer Messzeit von 10000 Minuten. Dort wurde

das Gold mehr als 4000 Minuten vermessen (die 411.8keV Linie wurde ausgewertet) und es wurde dabei festgestellt, dass in 10cm Wassertiefe bzw. in 5cm Bodentiefe bei 22-34% Bodenfeuchte ein relatives Maximum des Neutronenflusses auftritt. Danach fällt der Neutronenfluss mit der Tiefe schnell ab. Unterwasser betrug der maximale Neutronenfluss 47.5/cm^2/h und im Boden 30.9 n/cm^2/h. Dabei wurde auch ermittelt, dass die Konzentration der aktivierten Atome bei 71.4 Atomen Au-198 pro Gramm für das Unterwasser-Maximum bzw. bei 57.7 Atomen Au-198 pro Gramm für das Bodenmaximum lag, das entspricht also einer unwahrscheinlich kleinen spezifischen Aktivität von nur 0.21mBq/g bzw. 0.17mBq/g. Durch eine entsprechende große Menge Gold könnte man die Gesamtaktivität sicher verbessern. Aber selbst bei 1kg Gold liegt man noch bei 0.21Bq bzw. 0.17Bq an Aktivität des Goldes, welche aus dem radioaktiven Goldisotop Au-198 stammt. Das wäre also immer noch eine große Herausforderung, wenn man das mit einem selbstgebauten Szintillationszähler vor dem Strahlungs-Background, wie an der Erdoberfläche vorhanden ist, noch nachweisen wollte.

Nichts desto trotz lohnt es sich aber herauszufinden, mit welcher Nachweisempfindlichkeit man bei einem mit Hobbymitteln gebauten Szintillationszähler in etwa rechnen kann. Eine präzise Kalibrierprobe erhält man bei Händlern für seltene Erden in Form von Lutetiumoxid (Lu_2O_3), welches in einer Reinheit von 99.99% z.B. mit einem Gewicht von 10g lieferbar ist. Im natürlichen Lutetium-Metall ist zu 2.59% das radioaktive Isotop Lu-176 (Halbwertszeit $3.76*10^{10}$a) enthalten, der Rest besteht aus dem stabilen Isotop Lu-175. Mit Hilfe einer Aktivitätsberechnung kommt man für das Lu_2O_3 auf eine spezifische Aktivität von etwa 46Bq/g und für eine Menge von 10g Lutetiumoxid auf eine Aktivität von 460Bq (reines, natürliches Lutetium-Metall weist eine spez. Aktivität von 51.8Bq/g auf). Gut nachweisbar sind die Linien des radioaktiven Lu-176 bei 202keV(84%) und bei 307keV (93%).

Bezogen auf diese beiden Linien lässt sich nun die Nachweisempfindlichkeit bestimmen, indem man die Zählrate für die Probe bestimmt und davon den Background (Hintergrund-Strahlung) ohne die Lutetium-Probe abzieht. Bildet man das Verhältnis zwischen theoretisch berechneter Aktivität und gemessener Zählrate, dann ergibt sich die Effizienz der Messung, sie liegt bei etwa 10-15% für einen selbstgebauten Szintillationszähler mit einem 3“-NaJ-Kristall. Bildet man die Differenz zweier Background-Messungen um deterministische Störungen zu entfernen, dann liegt das Rauschen in einem Kanal bei etwa 0.02cps, was bei einer Effizienz von 10% einer tatsächlichen Aktivität von 0.2Bq entsprechen würde. Damit könnte man die Nachweisempfindlichkeit mit etwa 0.2Bq pro Kanal abschätzen. In anderen Worten, die Aktivität von 1kg Gold, das durch kosmische Neutronen aktiviert wurde, liegt noch im Bereich der Nachweisgrenze eines selbstgebauten Gamma-Spektrometers. Bei einem Goldpreis von derzeit etwa 40Euro pro Gramm sind solche Experimente zur tatsächliche Verifikation dieser theoretischen Rechnung leider etwas arg kostspielig.

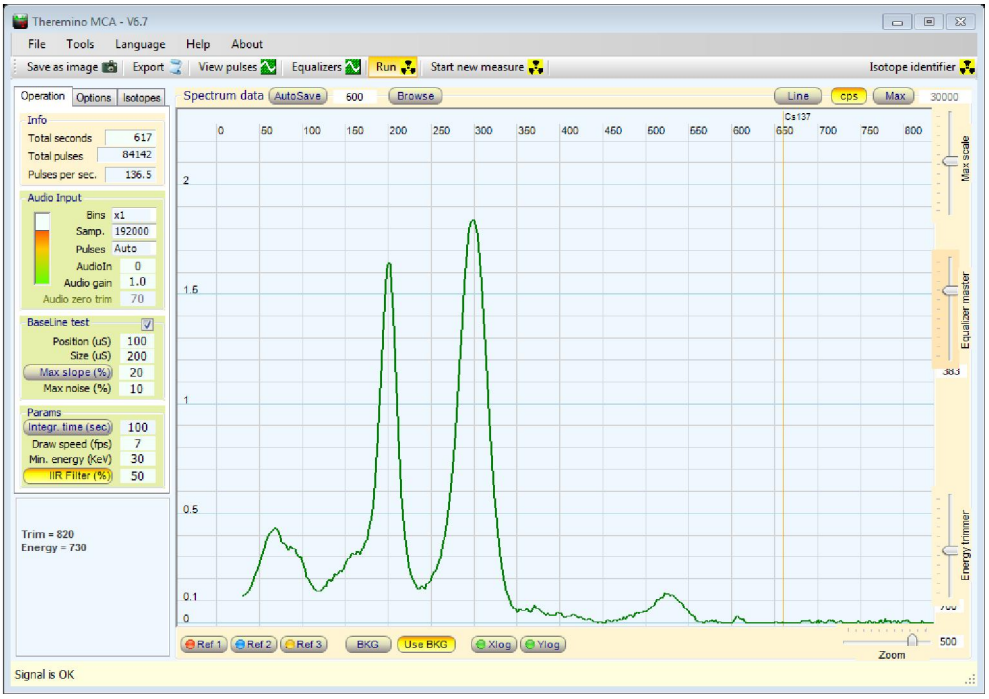

Abb. 15: Gamma-Spektrum einer Lu_2O_3 Kalibrierprobe mit einem selbstgebauten Gamma-Spektrometer

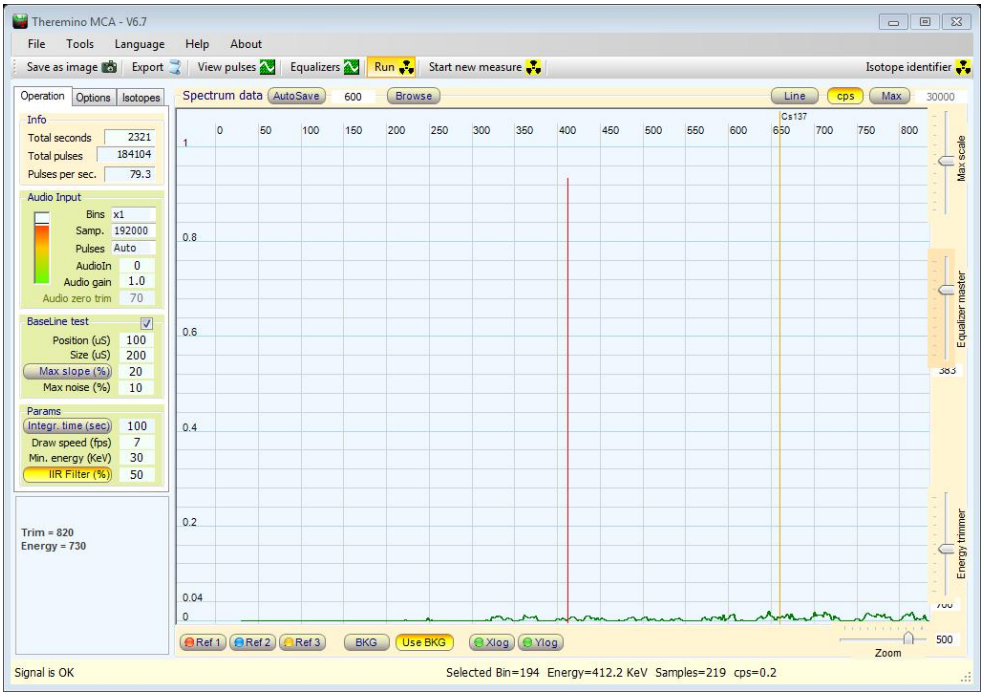

Abb. 16: Gamma-Spektrum ohne Probe eines selbstgebauten Gamma-Spektrometers

Nimmt man jedoch ein Stück Gold auf einen Langstreckenflug mit, dann lässt sich die Aktivierung anschließend leichter nachprüfen. Genau dieser Versuch wird am Institute for Structure and Nuclear Astrophysics (ISNAP) an der Katholischen Privat-Universität Notre Dame in Indiana den Studenten im Rahmen einer Vorlesung über Radioaktivität in der Atmosphäre gezeigt.

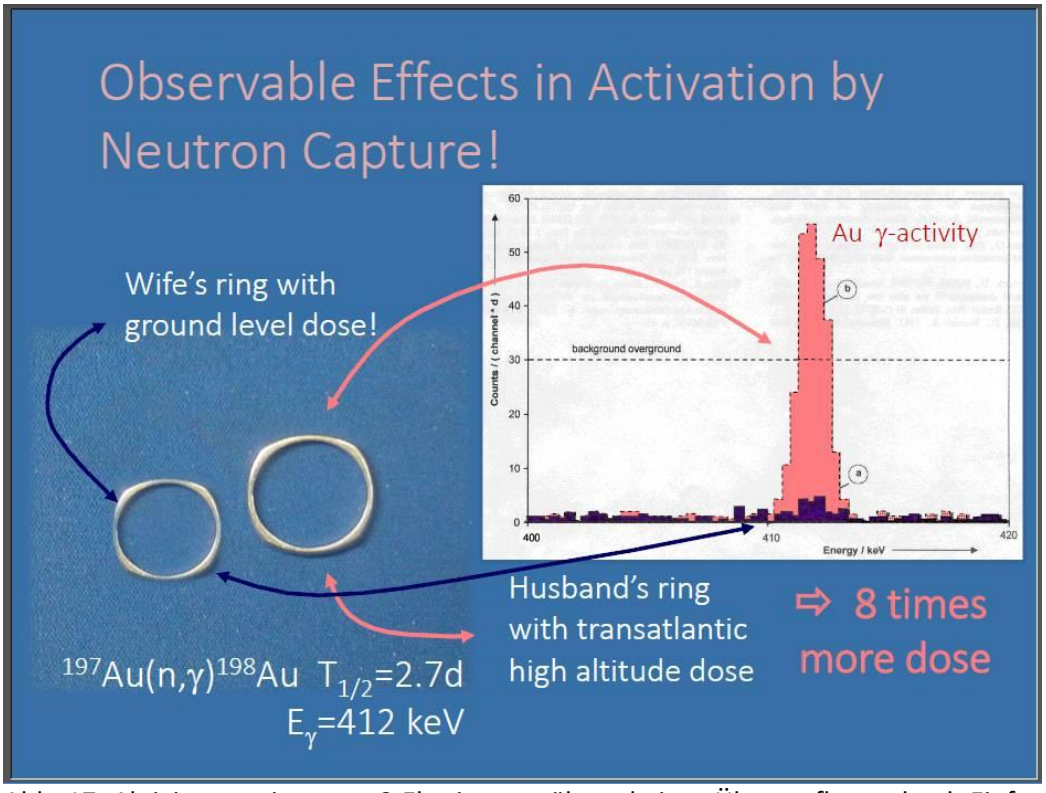

Abb. 17: Aktivierung eines von 2 Eheringen während eines Überseefluges durch Einfang kosmogener Neutronen Quelle: /9/

Die Vortragsfolie aus der Vorlesung zeigt den Vergleich zweier Eheringe eines Ehepaars, bei welcher der Ehemann einen transatlantischen Flug absolviert hat, die Ehefrau dagegen nicht. Die beiden Ringe wurden offensichtlich auch in einem unterirdischen Labor mit extrem niedrigem Background vermessen. Man kann auch bei dem etwas kleineren Ehering der Ehefrau noch eine leichte Aktivität bei 411.8keV erkennen. Die Aktivität des Rings des Ehemanns ist infolge der Exposition in Reiseflughöhe dagegen 8-mal höher. Eine gestrichelte Linie markiert den „background overground", also den überirdischen Background an der Erdoberfläche, über der Stelle, wo die Messung stattgefunden hat.

Geht man davon aus, dass ein Ehering grob 5g wiegt, dann wäre hier eine Aktivität von etwa 84mBq mit einem professionellen Equipment nachgewiesen worden, wenn man den Faktor 8 für den Flug berücksichtigt und 0.21mBq/g für aktiviertes Gold an der Erdoberfläche annimmt. So gesehen liegt dieser Wert noch etwa 2.5-mal tiefer als die Nachweisgrenze eines Selbstbau-Gamma-Spektrometer. Vergleicht man die Lage der Linie für den überirdischen Background, dann kann man nun daraus schließen, dass es auch für den Aktivierungsnachweis mit „Fluggold" in einem vergleichbaren Experiment sehr eng wird.

Daher wird es mit Hobby-Mitteln wohl auch kaum möglich sein, einen Schatz von 1kg Gold, der unter einer dünnen Schicht feuchter Erde liegt, mit Hilfe der 411.8keV Strahlung des durch kosmische Neutronen-Aktivierung entstandenen radioaktiven Au-198 nachzuweisen. Da der Neutronenfluss in größerer Tiefe rapide abnimmt, wird es in größeren Tiefen dann noch viel schwieriger. Der Nachweis von natürlichen Goldvorkommen wäre dagegen einfacher, wenn hochprozentiges Erz kilo- oder gar tonnenweise unter der Bodenoberfläche läge. Allerdings betragen die Goldkonzentrationen produzierender Minen eher im Bereich von etwa 1Gramm pro Tonne Erz, also bei 1 Promille.

Also wird es auch da sehr schwierig werden, das Gold mit einem selbstgebauten Gamma-Spektrometer nachzuweisen. Ob es nun eine große Hilfe ist, wenn man den Szintillationskristall mit einem Neutronenkonverter umhüllt, um damit die durch das Goldvorkommen oder durch einen Goldschatz

beeinflusste Reflexion der von feuchtem Erdreich thermalisierten kosmischen Neutronen nachzuweisen, darf bezweifelt werden, weil ja auch die Diffusion thermischer Neutronen an die Erdoberfläche wieder mit einem zusätzlichen Verlust behaftet ist. Vermutlich wäre auch für eine derartige Anwendung unter Verwendung heutiger Technologie der direkte Nachweis von reflektierten Neutronen mit einem modernen ^{3}He oder ^{6}LiF-Detektor dann doch etwas aussichtsreicher als mit einem Gamma-Spektrometer auf der Basis eines Szintillationszählers.

Für die Schatzsuche bzw. die Gold-Prospektion zu Fuß oder per Fahrzeug muss aber noch ein weiterer ganz wichtiger Parameter beachtet werden. Man kann davon ausgehen, dass die Neutronenaktivierung durch kosmische Neutronen nur zu einer äußerst geringen Radioaktivität durch das entstehende Au-198 führt. Nun ist die Messung mit einem Szintillationszähler eine zählende Messung. Wenn also die Änderung der Radioaktivität entlang des Messweges über eine Zählrate bestimmt wird, dann kostet es Zeit, bis genügend Gamma-Quanten detektiert sind, so dass die „Stichprobe“ an Pulsen auch groß genug ist um die Rate pro Messpunkt einigermaßen sicher zu bestimmen. Wenn nun in einem unterirdischen Labor an einer Probe 4000min (= 2.8Tage) gemessen werden muss, um die Aktivität von ungefähr 50 Atomen Au-198 pro Gramm Gold sicher nachzuweisen, dann kann man davon ausgehen, dass es so gut wie ausgeschlossen ist, mit demselben Verfahren eine mobile Messung zu erreichen, die in einem ausgedehnten Untersuchungsgebiet über eine entsprechende Anzahl an Messungen pro zurückgelegter Strecke auch eine brauchbare Ortsauflösung liefert. Das heißt, selbst wenn es im Labor noch möglich ist, an einer Probe die Exposition gegenüber kosmischen Neutronen nachzuweisen, ist es eigentlich so gut wie unmöglich, mit diesem Verfahren durch Abgehen oder gar Abfahren eines Untersuchungsgebiets mit einem Szintillationszähler eine Anhäufung Gold im Boden sicher zu lokalisieren, auch wenn es sich um mehrere Kilogramm handelt.

Vielleicht ist es auch ganz gut so, dass trotz des großen Technologiefortschritts seit dem zweiten Weltkrieg es auch weiterhin recht schwierig bleibt, Gold zu finden, sei es als Schatz oder sei es als mineralisches Vorkommen. Das garantiert nämlich, dass der Wert des Goldes erhalten bleibt und den Hobbyschatzsuchern gegenüber großen Firmen immer noch eine Chance und ein gewisser Spaß bleibt.

Literatur

/1/ James Ledbetter; The Strange Secret History of Operation Goldfinger; The New Yorker, June 10 2017; https://www.newyorker.com/business/currency/the-strange-secret-history-of-operation-goldfinger

/2/ Boualem Hammouda; Practical Neutron Applications; National Institute of Standards and Technology (NIST)

/3/ LongRangeLocators Forums > Main Forums > Long Range Locators
http://www.longrangelocators.com/forums/showthread.php?t=11342

/4/ Christopher Bird; Earth Radiation – the Science of Dowsing; Zeitschrift Nexus Ausgabe June-July 1986

/5/ Martin Schrön; Cosmic-Ray Neutron Sensing and its Applications to Soil and Land Surface Hydrology; Dissertation 2016 Universitäts Potsdam

/6/ Bericht MAR_19860001 Fort MacKay; „Metallic Minerals Exploration near Fort MacKay (N57° 07‘ W110° 35‘) Permit No. 6886020001 - Kenneth Richardson; Alberta Energy
http://content.energy.alberta.ca/xdata/MARS/MAR_19860001.pdf

/7/ F. Lei, S. Clucas; “An atmospheric radiation model based on response matrices generated by detailed monte carlo simulations of cosmic ray interactions,”; IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 51, no. 6, pp. 3442-3451, Dec. 2004.

/8/ K. Komura et al.; Variation of Environmental Neutron Flux with the Depth of Water and Soil; Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences, Vol. 9, No. 2, pp. 44-47, 2008

/9/ Radioactivity Lecture 13 - Radioactivity in the Atmosphere; Institute for Structure and Nuclear Astrophysics (ISNAP) https://isnap.nd.edu/assets/213123/radioactivity_lecture_13.pdf

/10/ Messungen von Neutronenspektren induziert durch kosmische Strahlung in Höhen von 85m, 1195m und 2650m; Aktuelle Forschungsnachrichten aus der Abteilung 6 „Ionisierende Strahlung“ ; Physikalisch Technische Bundesanstalt