

## Radioaktivität in Natur, Wissenschaft und Technik

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 auch ihre Anwendungen. Deshalb ist es falsch und bedauerlich, wenn sich die Vorstellung von Radioaktivität verengt auf Kernenergie und Kernwaffen. Diese beiden Aspekte bleiben, trotz ihrer existentiellen Bedeutung, in meinem Aufsatz unberührt, da über sie reichlich Gedrucktes erhältlich ist.

Die Hauptträger der natürlichen Radioaktivität, primäre und sekundäre Uranminerale, wie die schwarze Pechblende, grüner Torbernit, gelber fluoreszierender Autunit, waren schon im 17., 18., 19. Jahrhundert bekannt. 1799 isolierte M. H. Klaproth das metallische Uran aus Pechblende ( $\text{UO}_2$ — $\text{U}_3\text{O}_8$ ). Vor allem im böhmischen Joachimsthal hergestellte Uranverbindungen dienten das ganze 19. Jahrhundert hindurch zum Färben von Glas (Annagrün des Biedermeier) und bis vor kurzem zum Färben von Keramik (warmes Orange-Braun).

Am 8. November 1895 entdeckte C. W. Röntgen in Würzburg die nach ihm benannte Strahlung, die photographische Schichten durch die lichtdichte Umhüllung hindurch schwärzt, Leuchterscheinungen (Fluoreszenz) erzeugt und Luft ionisiert, das ist elektrisch leitend macht. Hierdurch angeregt, entdeckte H. Becquerel nur 4 Monate später, am 24. Februar 1896 in Paris die Uranstrahlung. Sie wurde sogleich vor allem von Marie Curie (geb. Marya Sklodowska)

untersucht. Sie entdeckte dabei neue chemische Elemente wie Polonium und Radium und prägte 1898 den Namen Radioaktivität („Strahlentätigkeit“).

Die Aufklärung der Radioaktivität verdanken wir zahlreichen Forschern, die dafür später mit dem Nobelpreis — erstmals 1900 an Röntgen verliehen — geehrt wurden. Die seit den griechischen Naturphilosophen gehegte Vorstellung vom Atom als dem letzten, Unteilbaren der chemischen Elemente fand ihr Ende. Es begann die Atom- und Kernphysik und Kernchemie.

Um das Phänomen Radioaktivität zu verstehen, müssen wir einige Begriffe erklären. Jedes chemische Element hat ein Atomgewicht, das ist die Verhältniszahl der Masse einer bestimmten Menge des Elementes zur Masse derselben Menge des Elementes Kohlenstoff. Kohlenstoff wird das Atomgewicht 12 gegeben. Bei Atomgewichtsbestimmungen war schon im 19. Jahrhundert aufgefallen, daß die Atomgewichte natürlicher Elemente meist nicht ganzzahlig sind, z. B. für Chlor 35,4. Heute wissen wir: die chemischen Elemente sind Gemenge von Isotopen, z. B. Chlor-35 zu 75,8 % mit Chlor-37 zu 24,2 %. Isotope sind Atome derselben Ordnungszahl (= Kernladungszahl = Zahl der Protonen = Zahl der Elektronen) jedoch unterschiedlicher Massenzahl (= Nukleonenzahl = Zahl der Protonen plus Zahl der Neutronen). Die Isotope eines chemischen Elementes unterscheiden sich somit durch die Zahl der Neutronen und damit durch ihre Masse. Die Masse eines Atoms liegt fast vollständig im Kern, die Elektronen sind sehr viel leichter als die Nukleonen und tragen ganz

links Radonbecher,  
Radonbecher, blaues Glas in  
Chromstahlrahmen, Höhe 6 cm.  
Im Inneren befand sich ein Ra-  
diumnetz. Beim radioaktiven Zer-  
fall von Radium entsteht das Gas  
Radon. Radon löst sich in Was-  
ser und kann mit diesem getrun-  
ken werden. Der Originalbecher,  
bis 1963 von Bamberg aus ver-  
trieben, gab in 10 Stunden die  
heute zulässige Jahresmenge an  
Strahlung ab.

rechts Uranglas

Uranglas, „Anna-grün“, Höhe  
12 cm, Durchmesser oben 9 cm.  
Fluoresziert wegen Uragehalt  
im UV-Licht angenehm gelb-grün,  
so auch im Tageslicht mit UV-  
Anteil. Sehr in Mode um 1880.



wenig zur Masse des Atoms bei. Isotop heißt sprach-  
lich „am gleichen Ort“, nämlich des Periodensystems.  
Dem Begriff Isotop (Atomart) synonym verwendet  
wird der Begriff Nuklid (Kernart).

Beim Phänomen Radioaktivität handelt es sich um  
den spontanen Zerfall der instabilen Kerne (Radio-  
nuklide) gewisser Atomarten (Radioisotope). Der Zer-  
fall äußert sich durch die Aussendung energiereicher  
Strahlung mit ähnlichen Wirkungen wie die Rönt-  
genstrahlen (siehe oben). Damals unerklärliche pho-  
tographische Effekte von Uranverbindungen waren  
schon 1858 berichtet worden.

Verglichen mit Röntgenstrahlen hat die radioaktive  
Strahlung somit eine andere Ursache und zudem ist  
sie eine zusammengesetzte Strahlung. E. Rutherford  
zerlegte die Strahlung von Radium und prägte die  
Namen Alpha-, Beta- und Gamma-Strahlung. Alpha-  
Strahlen sind positiv geladene, relativ schwere Teil-  
chen, Heliumkerne, und werden schon durch ein  
Blatt Papier absorbiert. Beta-Strahlen sind negativ

geladene, sehr leichte Teilchen, Elektronen, und wer-  
den durch einige Millimeter dickes Aluminiumblech  
absorbiert. Gamma-Strahlen sind elektromagnetische  
Wellen, noch energiereicher und durchdringender als  
Röntgenstrahlen. Geschwächt werden sie erst durch  
dicke Blei- oder Schwerspatabschirmungen.

Der radioaktive Zerfall folgt dem Zerfallsgesetz:  
während einer für jedes Radioisotop charakteristi-  
schen, nicht beeinflussbaren Zeit, der Halbwertszeit,  
zerfällt jeweils die Hälfte der Ausgangsmenge. Da-  
bei nimmt die Aktivität ab, nach 7 Halbwertszeiten  
auf etwa 1 %. Welcher der einzelnen Kerne zerfällt,  
ist nicht vorhersagbar. Der statistische Charakter des  
Zerfalls hatte erkenntnistheoretische Folgen: die ele-  
mentare Vorstellung von Ursache und Wirkung (Kau-  
salitätsprinzip) hat im atomaren Einzelfallsbereich  
keine Geltung.

Es gibt Radionuklide mit sehr langer Halbwertszeit  
(kleiner Aktivität, z. B. Uran-235 mit  $7 \cdot 10^8$  Jahren  
und solche mit kurzer Halbwertszeit (großer Ak-



Dekorkachel, 20 × 20 cm, die Blütenblätter mit uranhaltigen orange-gelben Farben bemalt

tivität) z. B. Radium-226 mit 1,6 Jahren. In 1 g Radium ereignen sich pro Sekunde  $3,7 \cdot 10^{10}$  Zerfälle, die „Aktivität“ beträgt 1 Curie. Ein künstliches Radioisotop mit sehr kurzer Halbwertszeit ist z. B. Jod-123 mit 13 Stunden, verwendet in der Medizin zur Schilddrüsenfunktionsdiagnose.

Der Nachweis der Radioaktivität geschieht durch die ionisierende Wirkung der Strahlung. Dabei werden in Gasen, Flüssigkeiten oder Festkörpern von elektrisch neutralen Atomen Elektronen abgetrennt und Ionen erzeugt. Dies hat vielfältige elektrische und optische Wirkungen, wie elektrische Entladungen in Gasen (Geiger-Müller und andere Zählrohre), Absorptionsänderungen (Schwärzung von Filmschichten), Leuchterscheinungen (Szintillation in Kristallen, Fluoreszenz von Leuchtschirmen) und anderes mehr.

Die Meßmethoden für ionisierende Strahlung sind außerordentlich empfindlich und zuverlässig, was für

Anwendungen wichtig ist. Es können einzelne Zerfälle sichtbar, hörbar, meßbar gemacht werden, das heißt auch, es können unter günstigen Bedingungen kleinste Mengen (Femtogramm,  $10^{-15}$  g, und weniger) von Radionukliden exakt gemessen werden. Jedes Radioisotop ist durch die Art der Strahlung (Alpha-, Beta-, Gamma-Strahlung), deren Energie und Aktivität und Halbwertszeit identifizierbar.

In der Natur vorkommende, natürliche, nicht vom Menschen erzeugte Radioisotope sind vor allem Uran mit der Ordnungszahl 92 und den Massenzahlen 235 und 238, Thorium-232 und die Zerfallsprodukte Radium-226 und Radon-222, sowie Rubidium-87, Kalium-40 und durch kosmische Strahlung ständig erzeugter Kohlenstoff-14 und Wasserstoff-3 (Tritium). 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 erkalten.

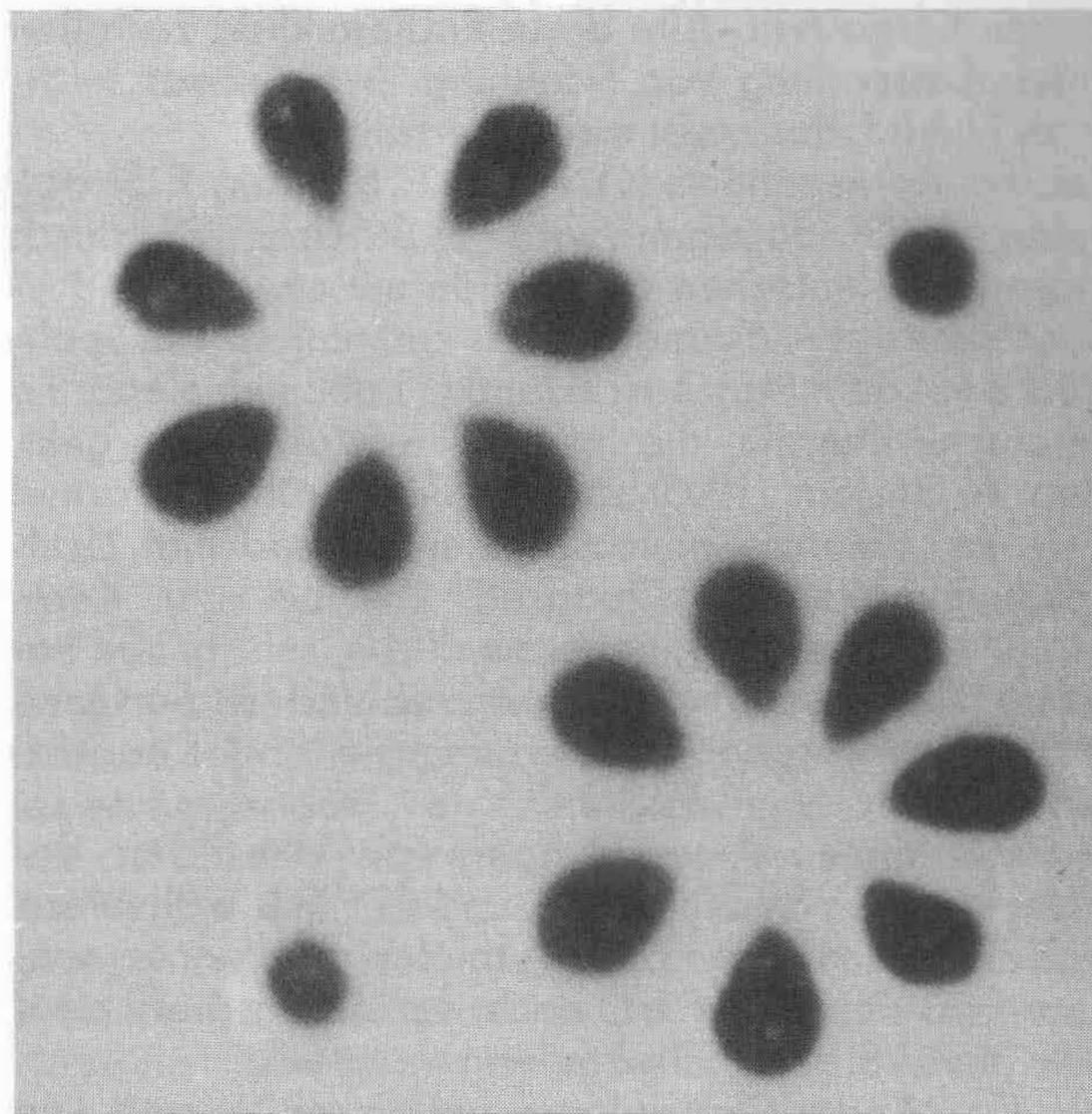
Uran, in der Natur ein Gemenge der Isotope 238 und 235 im Verhältnis 99,3 zu 0,7 %, ist kein so häufiges Element. Der Durchschnittsgehalt der Erdkruste beträgt 3—4 g/t Gestein. Die geochemischen Eigenschaften von Uran, wie der große Ionenradius und die zwei Valenzstufen mit stark unterschiedlichem chemischen Verhalten, sind aber der Bildung und Anreicherung von Uranmineralen sehr günstig. Sie haben in der Erdgeschichte weltweit zu Lagerstätten aller Typen geführt. Wegen der günstigen Explorations- und Aufbereitungseigenschaften von Uranerzen sind heute Urangelhalte von 100—1000 g/t Erz abbauwürdig, sofern der Lagerstätteninhalt groß genug ist und geographische Voraussetzungen erfüllt sind. Deshalb läßt sich eines sagen: Die Versorgung mit Uran als Rohstoff der Kernenergie wird niemals deren limitierende Ressource sein. In Nordbayern kommen an zahlreichen Stellen Uranminerale und auch örtliche Anreicherungen vor. Zu nennen sind Zinngranite des Fichtelgebirges im Raum Rudolfstein-Großschlopppen und präkambrische Schiefer und Gneise des Oberpfälzer Waldes im Raum Mähring-Poppenreuth. Die Abbauwürdigkeit dieser Vorkommen wurde

wiederholt untersucht. Es fehlt nicht an der Erzkonzentration, aber am Lagerstätteninhalt und anderen Voraussetzungen. Sollten Sie auf einem Oberpfälzer Acker oder am Straßenrand einmal pechschwarze Steine mit ganz auffallend hoher Dichte ( $8\text{--}10\text{ g/cm}^3$ ) finden, so ist es wahrscheinlich Pechblende. Ähnliche Dichte haben in der Natur nur meteoritisches Eisen (8), gediegenes Kupfer (9) oder gediegenes Gold ( $15\text{--}19$ ), in der Farbe unterscheidbar.

Nur mineralogisches Interesse haben die Uranparagenesen in den Fluoritgängen von Nabburg-Wölsendorf, etwa der dunkelviolette bis schwarz gefärbte Stinkspat (Uranhaltiges  $\text{CaF}_2$ ). Eine geringe Radioaktivität durch Urangehalte können auch mineralische Baustoffe besitzen. Schlechtbelüftete Räume zeigen dann erhöhte Radongehalte.

In den ersten Jahrzehnten nach der Entdeckung der Radioaktivität wurden Uranerze allein wegen des Radiumgehaltes abgebaut und dieser Strahler medizinisch-therapeutisch zur Bestrahlung von Tumoren eingesetzt. 1 g Radium hatte damals einen Wert von 500 000 Goldmark. Heute werden solche Bestrahlungen mit dem Reaktor-Radioisotop Cobalt-60 durchgeführt, bei dem eine Aktivität von 1 Curie ein paar Mark kostet. Seit 1944 wird Uran weltweit für militärische und für friedliche Zwecke abgebaut, und das Radium geht bei der Aufbereitung der Erze auf Halde, wie im 19. Jahrhundert in Joachimsthal bei der Uranfarbenproduktion.

Eine andere Anwendung der Radioaktivität aus der Frühzeit bis ca. 1950, waren selbstleuchtende Ziffernblätter von Uhren und Instrumenten, bis deren Gefährlichkeit, insbesondere für die Arbeiterinnen, die die Leuchtfarbe aufbrachten, erkannt wurde. Als höchst bedenklich haben 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-Trinktur zu Hause, ein „Allheilmittel“. Ein Becher, der mir nach einem Tag der Öffnen Tür der Universität Regensburg gebracht wurde, gibt in 10 Stunden die Aktivität ab, die heute



Autoradiographie der Dekorkachel. Ein lichtdichtverpackter Photofilm (Röntgenfilm) auf die Kachel gelegt, wird durch die Strahlung der radioaktiven Uranfarben belichtet

als Jahresfreigrenze gilt. Wer noch einen solchen Becher besitzt, kann ihn mir zur sicheren Entsorgung bringen.

Uranhaltige Keramik-Dekorfliesen, nicht aus Bayern stammend, waren bis vor kurzem im Handel erhältlich und eignen sich vor allem zur Herstellung besonders schöner Autoradiographien. Die Verwendung solcher Fliesen in Wohnräumen wird ganz unbedenklich, wenn man die Dekorseite zur Wand kehrt.

Seit 1931 (Irène und Frédéric Joliot-Curie) versteht man künstliche Radionuklide zu erzeugen und zwar aus stabilen Nukliden durch Bestrahlung mit Alpha-, Beta-, Gamma- oder Neutronenstrahlung. Künstliche Radionuklide werden heute in großer Vielfalt und Menge in speziellen Reaktoren und Zyklo-

tronen hergestellt. Alle diese Radionuklide zerfallen unter Aussendung von Strahlung in ein etwas leichteres Nuklid, das meist weiter zerfällt.

Bei der Kernspaltung (O. Hahn, L. Meitner, F. Strassmann, 1938) dagegen wird z. B. Uran-235 durch langsame Neutronen in Nuklide mit etwa  $\frac{2}{3}$  und  $\frac{1}{3}$  der Masse des Ausgangsnuklids zerspalten. Die Spaltstücke mit dem Massenschwund  $m$  haben eine enorme kinetische Energie, die letztlich in Wärme übergeht. Von A. Einstein (1905) stammt die berühmte Formel  $E = mc^2$  (Energie gleich Massenschwund mal Lichtgeschwindigkeit im Quadrat). Die bei der Kernspaltung auftretende, unvermeidliche, sehr große Radioaktivität erschwert die Nutzung und ist die Quelle größter Sorgen bei Kernenergie und Kernwaffen.

Die vielfältigen Anwendungen von künstlicher Radioaktivität in Wissenschaft und Technik wollen wir hier nicht nach deren Einzelgebieten gruppieren, sondern was reizvoller ist, nach der Eigenschaft oder dem physikalischen Effekt, der genutzt wird.

Die Geo-Radio-Chronologie hat unser Wissen von den Zeitaltern der Erdgeschichte auf eine zuverlässige Grundlage gestellt. Eine absolute Altersbestimmung von Mineralen und Gesteinen wurde möglich durch Messung der Mengenverhältnisse von Isotopen, z. B. der von Uran zu Blei. Die Berechnung beruht dann auf den bekannten, konstanten Halbwertszeiten und dem Zerfallsgesetz. Das Alter von Stoffen organischen Ursprungs kann aus dem Isotopenverhältnis Kohlenstoff-14 zu 12 bestimmt werden.

Auf der Energiefreisetzung bei radioaktivem Zerfall beruhen kleine Anwendungen wie Radionuklidbatterien und Tritiumlampen.

Biologisch-physiologische und chemische Wirkungen energiereicher, ionisierender Strahlung begründen Anwendung wie die medizinisch-therapeutische Bestrahlung von Tumoren, die Sterilisierung von Geräten, Lebensmitteln und Klärschlamm und auch die Strahlenpolymerisation (Vernetzung) von Kunststoffen.

Ein besonders elegantes Verfahren zur Herstellung

von sehr homogen dotiertem Silicium für Höchstleistungstransistoren ist die Atomumwandlung von Silicium zu Phosphor unter Neutronenbestrahlung.

Die Durchdringungsfähigkeit der Gamma-Strahlung von Radionukliden und die sehr empfindliche Messung von Schwächungskoeffizienten ermöglichen technische Verfahren zur kontinuierlichen, berührungslosen Dickenmessung laufender Bänder, kontinuierliche Füllstandsmessungen und Konzentrationsüberwachung bei Rohstoffen und anderes mehr. Gamma-strahlende Radionuklidquellen sind eine kleine, kompakte Alternative zu voluminösen Röntgenröhren in der Grobstrukturuntersuchung auf Fehler im Inneren von Maschinenteilen, Schweißnähten und anderen Werkstücken. Bei chemischen Reaktionen verhalten sich Radioisotope genau gleich wie die nichtstrahlenden Isotope desselben chemischen Elementes. Örtliche und zeitliche Änderungen der Konzentration des Radioisotops lassen sich höchst empfindlich sichtbar machen und messen. Darauf beruhen Indikator- (Tracer-), Markierungs- und Spurenanalyse-Methoden zum selektiven Studium von Stoffwechselfvorgängen und chemischen Reaktionen, sowie nuklearmedizinische Diagnose-Verfahren wie der Radioimmuno-Assay und die Szintigraphie.

Überhaupt ist für alle Anwendungen der Radioaktivität, auch für Schutzmaßnahmen vor deren schädlichen Wirkungen, von größtem Nutzen, daß die Empfindlichkeit und Zuverlässigkeit der Meßverfahren für ionisierende Strahlung größer ist als für irgend eine andere physikalische oder chemische Größe, wie aus den schon genannten Nachweisgrenzen für chemische Analysen ersichtlich.

Eine einprägsame Zusammenfassung aller Strahlenschutzregeln für den Umgang mit Strahlern und Strahlung ist die Regel der 4 **A**: **A**ktivität verkleinern, **A**bstand vergrößern, **A**bschirmung verstärken, **A**ufenthalt verkürzen. Dem Leser sei für seine lange Aufmerksamkeit gedankt.

Noch ein Literaturhinweis: W. Minder — Geschichte der Radioaktivität. Reihe Verständliche Wissenschaft. Springer Verlag, 1981, 228 Seiten, 37 Abbildungen.