

## Einige Aspekte zur natürlichen Strahlenbelastung der Säugetiere durch die Isotope der Uran-238-Radium-226-Zerfallsreihe und der Thorium-232-Zerfallsreihe

Von Helmut Plattner

Meinen hochverehrten Lehrern, Herrn Prof. Dr. F. SCHEMINZKY, Vorstand des Physiologischen und Balneologischen Institutes der Universität Innsbruck und des Forschungsinstitutes Gastein, ebenso wie seinem Assistenten Herrn Dr. E. POHL möchte ich für die mannigfache und großzügige Förderung in ideeller und materieller Hinsicht bei meinen Dissertationsarbeiten aufrichtig danken.

Die genaue Kenntnis der natürlichen Strahlenbelastung ist die Voraussetzung für die richtige Einschätzung der Gefährdung der Organismen durch die zusätzliche Belastung durch zivilisatorische Einflüsse.

Da alle hochenergetischen Strahlungen, gleichgültig ob es sich um Korpuskularstrahlung ( $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen) oder Quanten-Strahlung ( $\gamma$ -Strahlen) handelt, im atomaren Bereich wirksam werden, haben die verschiedenen Strahlenarten eine qualitativ gleiche Wirkung auf die lebenden Strukturen (7, 11).

Die Menge eines strahlenden Isotopes wird zweckmäßigerweise durch die Zahl der Zerfälle pro Sekunde charakterisiert, aus der man leicht auf die Masse des Isotopes zu einem gegebenen Zeitpunkt umrechnen kann. Als Aktivitätseinheit 1 wurde das „Curie“ (c) angenommen, welches jener Menge eines radioaktiven Stoffes entspricht, in welcher je Sekunde  $3,7 \times 10^{10}$  Zerfälle stattfinden; diese Aktivitätseinheit ist praktisch mit 1 g Radium identisch. (Über Maßeinheiten in der Radiologie und Strahlenbiologie: 9, 11, 25.)

Der älteren Dosisinheit, dem „Röntgen“ (r), liegt die ionisierende Wirkung der von den radioaktiven Substanzen ausgehenden Strahlung zugrunde. Für die Ermittlung der Strahlenbelastung einer Struktur ist die von der Masseneinheit aufgenommene Energie maßgebend. Die Dosisinheit 1 „Röntgen“ (r) entspricht einer Ionisierungsarbeit von 83,7 erg/g Luft.

Da die Ionisierungsarbeit in Wasser und in unserem Gewebe sich zu der in Luft wie 1,13:1 verhält und sich das r auf das wenig brauchbare Phantom Luft als Absorbens bezieht, ist es für strahlenbiologische Untersuchungen besser, statt einer Ionisierungseinheit eine Energieeinheit der Dosisangabe zugrunde zu legen und es wurde das „rad“ (Radiation-absorbed-dose) in Anlehnung an das Röntgen so definiert, daß 1 rad von irgendeiner Strahlung (Korpuskular- oder Quantenstrahlung) gegeben ist, wenn pro g Substanz 100 erg absorbiert werden. Die lebenden Strukturen bzw. physiologischen Vorgänge zeigen jedoch quantitative Unterschiede in ihrer Beeinflussbarkeit durch verschiedene Strahlenarten, auch wenn diese in gleichen Energie-

mengen absorbiert werden (vgl. 1, 4). So hat 1 rad  $\alpha$ -Strahlen, gleichgültig um welchen biologischen Effekt es sich handelt, eine fast durchwegs höhere „relative biologische Wirksamkeit“ (= RBW) als 1 rad  $\beta$ - oder  $\gamma$ -Strahlen. Man multipliziert daher die rad-Einheit mit dem Faktor der RBW und erhält die Einheit 1 „rem“ (Roentgen-equivalent-man). Jedoch auch die RBW für ein und dieselbe Strahlenart ist keine meßbare, genaue Konstante, sondern fällt verschieden aus, je nachdem um welchen biologischen Effekt es sich handelt (vgl. 2). Als Richtwerte werden nach den Empfehlungen des Internationalen Radiologenkongresses 1953 in Kopenhagen für  $\alpha$ -Strahlen eine RBW von 10 und für  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen eine RBW von 1 angenommen.

Die Erdrinde enthält einen nach den geologischen Gegebenheiten stark schwankenden Anteil an natürlichen Strahlern, unter welchen besonders die zwei bekannten Zerfallsreihen: die Uran-238-Radium-226-Reihe und die Thorium-232-Reihe, besondere Bedeutung für die Strahlenbelastung der Organismen besitzen (8).

Am Anfang jeder Zerfallsreihe steht eine sehr langlebige Muttersubstanz, die stetig ein Tochterisotop nachliefert, welches seinerseits wieder instabil ist usw.

Charakteristisch für diese Zerfallsfamilien ist, daß in jeder Zerfallsfamilie ein radioaktives Edelgas der Ordnungszahl 86 (Isotope des Elementes „Emanation“) auftritt, welches in Wasser gelöst wird oder infolge seiner Diffusionsfähigkeit in die Atmosphäre und in den menschlichen und tierischen Körper gelangt. Die Isotope des Elementes Emanation haben natürlicherweise gleiche chemische, jedoch verschiedene physikalische Eigenschaften:

Das Edelgas, welches in der U-238-Zerfallsreihe auftritt, hat die Massenzahl 222 und wird als Radiumemanation oder Radon bezeichnet; es zerfällt mit einer Halbwertszeit (HWZ) von 3,825 Tagen in Isotope, unter welchen die ersten vier (RaA bis RaC') im Vergleich zur Muttersubstanz Radon kurzlebig sind (kurzlebige „Folgeprodukte“). Auf Grund der physikalischen Gegebenheiten setzt sich unter konstanten Bedingungen das Radon innerhalb der 6- bis 7fachen HWZ des RaB, das ist das kurzlebige Folgeprodukt des Radons mit der längsten HWZ (26,8 Minuten), ins „radioaktive Gleichgewicht“ mit den kurzlebigen Folgeprodukten, d. h. es wird ein Zustand erreicht, in welchem die Zahl der von der jeweiligen Muttersubstanz in der Zeiteinheit nachgelieferten Atome des Tochterisotopes gleich ist der Zahl der zerfallenden Atome des Tochterisotopes. Das Verhältnis der Aktivitäten von Rn : RaA : RaB : RaC : RaC' ist in diesem Falle gleich 1 : 1 : 1 : 1 : 1! (Mathematische Formulierung bei ISRAËL, 9).

Das Edelgas, welches in der Th-232-Reihe auftritt, hat die Massenzahl 220 und trägt den Namen Thoriumemanation oder Thoron. Der Zerfall geht mit einer HWZ von 54,5 sek. viel rascher als bei der Radiumemanation vor sich. Bereits das zweite Folgeprodukt der Thoriumemanation, das ThB, hat mit 10,6 Stunden eine bedeutend längere HWZ als die Thoriumemanation; erst das ThB setzt sich mit den weiteren kurzlebigen Folgeprodukten ins radioaktive Gleichgewicht. Jedoch stellt sich auch bei latenter Thoronbeatmung innerhalb der 6- bis 7fachen HWZ von ThB, also

innerhalb von zirka 3 Tagen, ein konstanter ThB-Wert ein, der für die verschiedenen Organe einen jeweils charakteristischen Wert annimmt (unveröff. Bef.). Löslichkeitskoeffizienten für das Thoron selbst konnten wegen der sehr kurzen HWZ dieses Isotopes noch nicht festgestellt werden.

Es hängt weitgehend von den Eigenschaften des Bodens (6, 21, 23) und von meteorologischen Faktoren, beispielsweise dem Gang des Luftdruckes (18) ab, wieviel Emanation aus der Erdkruste austreten kann. Die Konzentration an Radon und Thoron bzw. deren Folgeprodukten nimmt in der bodennahen Luftschicht bei Sonnenaufgang infolge des einsetzenden Massenaustausches stark ab (BECKER, 3, cit. nach 6).

Zunächst seien einige Aspekte zur Inhalation von Folgeproduktfreier Emanation dargelegt. Radium- bzw. Thorium-Emanation gelangen über die Lungen in die Blutbahn (20), nehmen jedoch als chemisch inerte Edelgase an den Stoffwechselfvorgängen nicht direkt teil. Sie lagern sich in den verschiedenen Organen in verschiedener Konzentration, vorzugsweise jedoch in fett- bzw. lipoidreichem Gewebe ab (16). Die Emanationskonzentration, die für die einzelnen Gewebe und Organe jeweils charakteristisch ist, stellt sich als Gleichgewichtswert zweier gegenläufiger Prozesse ein: Die Zufuhr von Emanation an die Organe ist anscheinend besonders durch die Blutversorgung begrenzt; durch den fortlaufenden Zerfall der Emanation wird ein Sättigungsdefizit aufrecht erhalten. Der im Tierversuch für ein Organ ermittelte Löslichkeitskoeffizient als Quotient aus dem Emanationsgehalt des Gewebes zu dem Emanationsgehalt der Atmosphäre, bezogen jeweils auf die Volumseinheit, stellt einen physiologischen und keinen physikalischen Löslichkeitskoeffizienten, der zunächst nur für das betreffende Tier gilt, dar.

Der Gehalt an Emanation steigt aufgrund des physiologischen Geschehens in den verschiedenen Organen verschieden rasch (in der Leber innerhalb von einer, im Gehirn innerhalb von eineinhalb Stunden bei Inhalation von Radiumemanation; Angaben nach NUSSBAUM, 16), zum Sättigungswert der Löslichkeit an. Dieser Anstiegskurve überlagert sich die Zerfallskurve der Emanation. Im Falle der Radiumemanation setzen sich die kurzlebigen Folgeprodukte innerhalb der 6- bis 7fachen HWZ des Radium B ( $HWZ = 26,8'$ ), also in zirka 3 Stunden ins radioaktive Gleichgewicht mit der Muttersubstanz Radon (vgl. S. 266). Zur Berechnung der Strahlenbelastung bei diesen Verhältnissen geht man mit dem Verhältnis der einzelnen Zerfallsglieder von Radon bis  $RaC'$  von 1 : 1 : 1 : 1 : 1 ein. Unter diesen Folgeprodukten tragen die  $\alpha$ -strahlenden mit ihrer hohen RBW ( $RBW = 10!$ ) am stärksten zur gesamten Strahlenbelastung bei. Überdies wird die Energie der  $\alpha$ -Strahlen, die sich mit der nur geringen Reichweite von beispielsweise  $84 \mu$  bei  $RaC$  bzw.  $106 \mu$  bei  $ThC'$  im Gewebe totlaufen, zur Gänze im Gewebe umgesetzt, was für die  $\beta$ -Strahlen, die überdies eine bedeutend geringere RBW besitzen, in einem geringeren Ausmaß der Fall ist; die  $\gamma$ -Strahlen vermögen das Gewebe leicht zu durchdringen, setzen also nur einen geringen Teil ihrer Energie im Organismus um und haben außerdem eine geringe RBW; sie tragen neben den  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen in einem zu

vernachlässigenden Ausmaß zur Strahlenbelastung bei der Inkorporation von Radon und Thoron bzw. von deren Folgeprodukten bei (18, 24; vgl. 11).

Dieser Gleichgewichtszustand stellt zunächst einen theoretischen Endwert der Belastung der verschiedenen Organe bei latenter Inhalation von Radiumemanation unter konstanten Bedingungen dar, bzw. gilt auch für ThB im Gleichgewicht mit seinen Folgeprodukten.

Die bis in die jüngste Zeit von den meisten Autoren den Berechnungen der Strahlenbelastung bei Radoninhalation zugrunde gelegte Annahme eines „radioaktiven Gleichgewichtes“ zwischen dem Radon und seinen Folgeprodukten erwies sich jedoch als zu grobe Vereinfachung, die dem physiologischen Geschehen zu wenig Rechnung trug. So zeigten Befunde von SCHRAUB (24) ebenso wie Untersuchungen von POHL (18, 19) und eigene Befunde (unveröff.) eine selektive Beanspruchung einzelner Organe durch einen mehr oder weniger großen „Folgeproduktüberschuß“ gegenüber den Werten, die dem „radioaktiven Gleichgewicht“ entsprächen. Nach dem auf S. 266 Gesagten muß sich besonders der Überschuß an  $\alpha$ -strahlenden Folgeprodukten stark auf die gesamte Strahlenbelastung, der ein Organ bei Inkorporation von Radium- bzw. Thoriumemanation ausgesetzt ist, auswirken.

Sehr eindrucksvoll sind die gegensätzlichen Verhältnisse bei Niere und Nebenniere, wie sich bei Untersuchungen am Physiologischen Institut der Universität Innsbruck unter Leitung von Herrn Prof. SCHEMINZKY herausstellte (vgl. 19): Die Nebennieren zeigten eine dem hohen Lipoidgehalt dieses Organs entsprechende, hohe Radonlöslichkeit und annähernd Gleichgewichtsverhältnisse. (Dies entspricht der von SCHRAUB [24] u. a. geäußerten Vermutung, daß es möglicherweise zur Ausbildung von „hot spots“ innerhalb des Endokriniums kommen könnte.) Die Nieren zeigten bei einer geringen Radonlöslichkeit einen bedeutenden Folgeproduktüberschuß gegenüber den Werten des „radioaktiven Gleichgewichtes“.

Diese starke Belastung der Nieren dürfte bedingt sein:

1. durch die starke Durchblutung der Nieren; da die spezifische Aktivität (= Aktivität pro Gramm) der Nieren an Folgeprodukten jedoch bedeutend höher sein kann als die des Blutes und das quantitative Verhältnis der Folgeprodukte untereinander bei Nieren und Blut (nach eigenen Beobachtungen) verschieden ist, ist die stärkere Belastung der Nieren nur teilweise durch die starke Durchblutung, teilweise jedoch

2. durch eine Filterwirkung und eine spezifische Ausscheidungsfunktion bedingt. ThC (= Bi-212) wird — dieser Befund deckt sich mit Angaben von SCHRAUB (24) — viel mehr an den Harn abgegeben als das Mutterisotop ThB (= Pb-212). Diese selektive Ausscheidung von Bi vermag sich anscheinend wohl bei dem verhältnismäßig langlebigen ThC (HWZ = 60,5'), kaum aber bei dem kurzlebigen RaC (Bi-214; HWZ = 19,7') durchzusetzen.

Infolge ihrer Instabilität treten Radon und Thoron in der Atmosphäre nie allein, sondern immer zusammen mit ihren Folgeprodukten auf. Diese lagern sich an das natürliche Aerosol an und gelangen mit diesem in den Atemtrakt (10).

Je nach ihrer Größe werden diese Aerosolteilchen mit ihren Aktivitäten an den verschiedenen Stellen des Atemtraktes abgelagert und zum Teil durch das Cilienepithel der Trachea aus dem Atemtrakt in die Schlundregion befördert und verschluckt (10) oder aber sie gelangen — soweit sie in der Mundhöhle abgelagert worden waren — direkt in den Verdauungstrakt. Die Frage, zu welchem Anteil die Resorption von Folgeprodukten über die Lungen bzw. über den Verdauungstrakt erfolgt, konnte noch nicht vollkommen aufgeklärt werden, sicher ist jedoch, daß eine Resorption in die Blutbahn über beide Organsysteme erfolgt.

Die Anreicherung der Folgeprodukte in der Lunge (JACOBI: „Staubsaugerwirkung“, 10) bei der Inhalation führt dazu, daß die Lunge nach den bisherigen Untersuchungen das stärkst belastete Organ des Körpers überhaupt darstellt. Die mittlere Belastung der Lunge des Menschen dürfte nach Angaben von SCHRAUB (23) bei zirka 25 bis 250 mrem/a liegen. Sie ist also viel höher als die mittlere Belastung des Gesamtkörpers durch die Inhalation der natürlichen radioaktiven Gase; diese mittlere Belastung liegt bei 0,06—0,6 mrem/a (23) und dürfte in etwa auch der Gonadendosis entsprechen. Unter normalen Bedingungen bleibt die starke Belastung der Lunge wegen der erheblichen Strahlenresistenz dieses Organs ohne spürbare Folgen, wohl aber treten schwerwiegende Krebsbildungen an den oberen Teilen des Atemtraktes bei Bergleuten in Urangruben auf, die andauernd einer stark aktiven Atmosphäre ausgesetzt sind („Schneeberger Lungenkrankheit“; Umfangreiche Literaturangaben bei 24).

Der Gehalt der Atmosphäre an Folgeprodukten von Radon und Thoron wirkt mittels seiner  $\gamma$ - und  $\beta$ -Strahlen von außen auf die Organismen ein und belastet den Menschen mit zirka 1 mrem/a (8). Spuren von Radium gelangen mit der Nahrung und dem Trinkwasser (15, 17 u. a.) in den menschlichen und tierischen Körper und lagern sich im Menschen zu  $4 \times 10^{-10}$  g ab; sie führen, zusammen mit den auftretenden Zerfallsisotopen des Radiums zu einer Strahlenbelastung von zirka 50 mrem/a (Angaben nach SCHRAUB, 23), die in ihrer vollen Stärke auf die Osteozyten einwirkt, da Radium als Element der Erdalkalireihe bevorzugt in den Knochen abgelagert wird.

Die Erdkruste enthält im Mittel zirka  $1 \times 10^{-12}$  g Radium/g Boden und 1 bis  $30 \times 10^{-6}$  g Thorium/g Boden (8). Die von beiden ausgehende  $\gamma$ -Strahlung belastet infolge ihrer starken Durchdringungsfähigkeit den Menschen mit durchschnittlich 50 bis 80 mrem/a (23). Über eine außerordentlich starke Erhöhung der Strahlenbelastung durch den Thoriumgehalt von Monazit führenden Sanden im Staate Espirito Santo (Brasilien) berichten ROSER und CULLEN (22) und in Ostindien GAPAL-AYENGAR (5). Auf ostindischen Monazitsandstreifen beläuft sich die zusätzliche Gonadendosis auf 1000 mrem/a. Diese vom Boden ausgehende  $\gamma$ -Strahlung stellt auch unter normalen Bedingungen des Untergrundes den bedeutsamsten Anteil an der Strahlenbelastung der Organismen durch die Isotope der U-238- und Th-232-Reihe dar und ist überdies auch meßtechnisch leichter erfaßbar.

Es zeigt sich also, daß die Grundstrahlung (background-Strahlung der angelsächsischen Literatur) einer starken zeitlichen und räumlichen Schwankung unterworfen

ist und eine sehr verschiedene Strahlenbelastung der einzelnen Organe und Organsysteme hervorruft.

Wegen der mutagenen Wirkung der hochenergetischen Strahlungen ist die Ermittlung der Dosis, welcher die Generationsorgane ausgesetzt sind, von besonderer Wichtigkeit. Daß es sich bei einer Strahlenbelastung über das natürliche Ausmaß hinaus um eine Belastung im wahren Sinne des Wortes handelt, haben besonders die Befunde der Mutationsforschung und der Populationsgenetik zur Genüge bewiesen (MULLER 14; MARQUARDT 12, 13; u. a.).

#### Literaturverzeichnis

- 1 BACQ, Z. M. und ALEXANDER, P. (1955): Principes de radiobiologie, Paris.
- 2 BECK H. - DRESEL, H. - MELCHING, H. (1959): Leitfaden des wissenschaftlichen Strahlenschutzes, Stuttgart.
- 3 BECKER, F. (1934): Gerl. B. 42, 365—384.
- 4 FRITZ-NIGGLI, H. (1959): Strahlenbiologie — Grundlagen und Ergebnisse, Stuttgart.
- 5 GAPAL-AYENGAR: Cit. nach 24.
- 6 GEIGER, R. (1961): Das Klima der bodennahen Luftschicht, Braunschweig.
- 7 HOLLAENDER, A. (1954): Radiation Biology, Volume 1, Part 1, New York-Toronto-London.
- 8 HULTQVIST, B. (1956): Kungl. Svenska vetensk. akad. handl. VI.
- 9 ISRAËL, H. (1940): „Radioaktivität“-I-Grundlagen und Meßmethoden, Leipzig.
- 10 JACOBI, W.: Biophysikalische Gesichtspunkte zum Problem der radioaktiven Aerosole, Beitrag in (21).
- 11 LEA, D. E. (1946): Actions of radiations on living cells, Cambridge.
- 12 MARQUARDT, H.: Die Toleranzdosis vom genetischen Standpunkt aus gesehen. Beitrag in (21).
- 13 — Strahlengenetik, Beitrag in (21).
- 14 MULLER, H.: The nature of genetic effects produced by radiations. Beitrag in (7).
- 15 MUTH, H. et al.: Health Phys., vol. 2, no. 3.
- 16 NUSSBAUM, E. (1957): The radon-solubility in fatty acids and body tissues, (Diss.). University of Rochester, USA.
- 17 PENNA-FRANCA, E. Analysis of radioactive contaminants in biological materials, Institute of biophysics, University of Brazil, Rio de Janeiro.
- 18 POHL, E. (1962): Die Strahlenbelastung bei der Inhalation von Radium-Emanation, Strahlentherapie, Bd. 119, Heft 1.
- 19 — Strahlentherapie, im Erscheinen.
- 20 POHL-RÜLING, J. und SCHEMINZKY, F. (1954): Strahlentherapie 95.
- 21 RAJEWSKY, B. (1956): Wissenschaftliche Grundlagen des Strahlenschutzes (Ein Bericht über das „Symposium über die wissenschaftlichen Grundlagen des Strahlenschutzes“ 1956 in Frankfurt a. M.), Karlsruhe.
- 22 ROSER, F. X. und CULLEN, T. L. (1962): Anais de Academia Brasileira de Ciências, Vol. 34—No. 1, Rio de Janeiro.
- 23 SCHRAUB, A.: Die natürliche Strahlenbelastung. Beitrag in (21).
- 24 — Biophysikalische Untersuchungen zum Problem der Radon-Inkorporation, Habilitationsschrift. Noch nicht veröffentlicht.
- 25 SCHREIBER, H. (1957): Biophysikalische Strahlenkunde, Berlin.

## Die URAN-238-ZERFALLSREIHE (Vereinfachte Darstellung):

Historische Bezeichnung	Isotopen- bezeichnung	Art der emittierten Korpuskularstrahlung	Halbwertszeit
Uran I	U-238	$\alpha$	$4,49 \times 10^9 \text{a}$
Uran X <sub>1</sub>	Th-234	$\beta$	24,10 d
Uran X <sub>2</sub>	Pa-234	$\beta$	1,18 m
Uran II	U-234	$\alpha$	$2,48 \times 10^5 \text{a}$
Ionium	Th-230	$\alpha$	$8,0 \times 10^4 \text{a}$
Radium	Ra-226	$\alpha$	1622 a
Radon	Em-222	$\alpha$	3,825 d
Radium A	Po-218	$\alpha$	3,05 m
Radium B	Pb-214	$\beta$	26,8 m
Radium C	Bi-214	$\beta$	19,7 m
Radium C'	Po-214	$\alpha$	$1,64 \times 10^{-4} \text{s}$
Radium D	Pb-210	$\beta$	22 a
Radium E	Bi-210	$\beta$	5 d
Radium F	Po-210	$\alpha$	138,4 d
Radium G (Uranblei)	Pb-206	—	$\infty$

## Die THORIUM-232-ZERFALLSREIHE (Vereinfachte Darstellung):

Historische Bezeichnung	Isotopen- bezeichnung	Art der emittierten Korpuskularstrahlung	Halbwertszeit
Thorium	Th-232	$\alpha$	$1,39 \times 10^{10} \text{a}$
Mesothorium I	Ra-228	$\beta$	6,7 a
Mesothorium II	Ac-228	$\beta$	6,13 h
Radiothorium	Th-228	$\alpha$	1,9 a
Thorium X	Ra-224	$\alpha$	3,64 d
Thoron	Em-220	$\alpha$	54,5 s
Thorium A	Po-216	$\alpha$	0,158 s
Thorium B	Pb-212	$\beta$	10,6 h
Thorium C	Bi-212	$\beta$	60,5 m
Thorium C'	Po-212	$\alpha$	$3,0 \times 10^{-7} \text{s}$
Thorium D (Th-Blei)	Pb-208	—	$\infty$

Anschrift des Verfassers: Helmut Plattner, Axams 25, Tirol.

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte des naturwissenschaftlichen-medizinischen Verein Innsbruck](#)

Jahr/Year: 1963

Band/Volume: [53](#)

Autor(en)/Author(s): Plattner Helmut

Artikel/Article: [Einige Aspekte zur natürlichen Strahlenbelastung der Säugetiere durch die Isotope der Uran-238-Radium-226-Zerfallsreihe und der Thorium-232-Zerfallsreihe. 265-271](#)