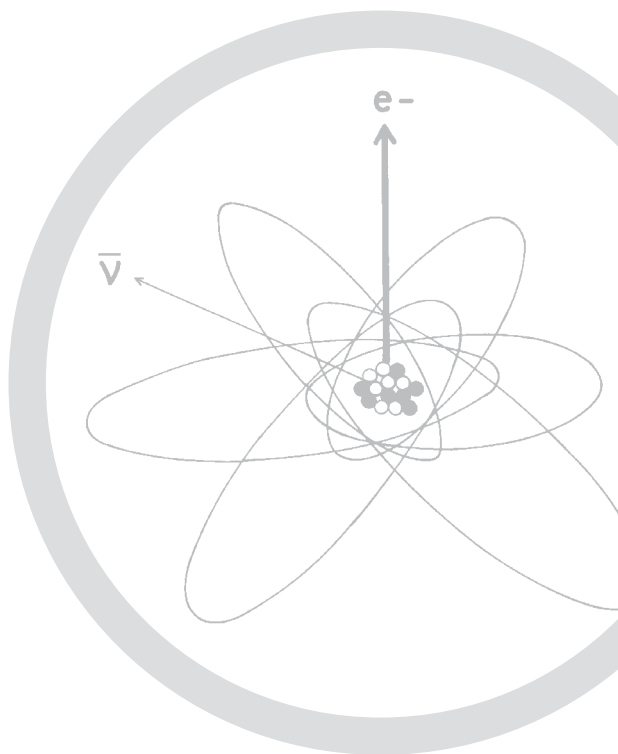




Radioaktivität und Strahlungsmessung



Strahlenschutz



Radioaktivität und Strahlungsmessung

8. überarbeitete Auflage

April 2006

Strahlenschutz

Autoren:
Prof. Dr. Henning von Philipsborn,
Radiometrisches Seminar, Universität Regensburg,
und
Rudolf Geipel, Regenstauf

Vorwort

Im Vorwort einer Schrift erwartet der Leser Auskunft, an wen sich die Schrift wendet, was ihr Ziel ist, was sie enthält und wie sie entstanden ist.

Die Schrift entstand aus Vorlesungen zu Radioaktivität, Strahlungsmessung und Strahlenschutz, die der Ältere von uns von 1982 bis 1999 jährlich für Studenten der Physik, Chemie und Biologie hielt. Seit 1987 hält er zu den genannten Themen Aus- und Fortbildungskurse für die Umweltschutzingenieure der Kreisverwaltungsbehörden, kreisfreien Städte und Regierungen von Bayern. Eine wissenschaftliche Behandlung fanden die Themen auch für einen weiteren Teilnehmerkreis in den bisher 43 ein- und zweitägigen Radiometrischen Seminaren Theuern, im Bergbau- und Industriemuseum Ostbayern.

Die Schrift wendet sich an Umweltschutzingenieure und alle, die beruflich zwar nicht überwiegend, aber doch auch, vor allem in einem Ernstfall, mit Radioaktivität und Strahlungsmessung praktisch oder administrativ zu tun haben. Sie wendet sich zudem an Lehrer und Schüler, sowie an Interessierte ohne Vorkenntnisse zum Selbststudium.

Die langjährige enge Zusammenarbeit des Hochschullehrers mit dem Schulbuchautor wird sichtbar, indem wir gemeinsam als Autoren erscheinen. Gemeinsam hielten wir in der Schweiz und in Bayern Fortbildungskurse für Lehrer unter Verwendung des Philion-Experimentierkoffers zur natürlichen Radioaktivität, insbesondere zum Radon. Auch diese Erfahrungen sind im vorliegenden Text enthalten.

Ziel der Schrift im handlichen Taschenformat ist eine allgemein verständliche, erzählende und gleichzeitig wissenschaftliche Darstellung der Quellen und Messung ionisierender Strahlung auf physikalischer, chemischer und geowissenschaftlicher Grundlage. Für strahlenbiologische und medizinische Aspekte von Radioaktivität und Strahlenschutz wird auf die neue Auflage von "Radioaktivität, Röntgenstrahlen und Gesundheit" verwiesen.

Die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) des Jahres 2001 war willkommener Anlass für eine gründliche Neubearbeitung der bisherigen Kapitel und die Erweiterung mit zwei neuen Kapiteln Körperdosis und Neutronen. Bei diesen danken wir herzlich vier Vortragenden zweier Radiometrischer Seminare Theuern, den Herrn Kollegen G. Dietze, A. Kaul, A. Rimpler und W. Waschkowski für kritische Durchsicht und kongeniale Verbesserungen, sowie Herrn Kollegen H. W. Zeising für viele anregende Gespräche in mehr als 10 Jahren. Die ausführliche Behandlung - schon in der 1. Auflage - der natürlichen Radioaktivität hat durch deren Aufnahme in die neue StrlSchV eine Bestätigung erfahren. Die Zahl der Abbildungen wurde von bisher 24 auf 43 erhöht.

Wenn im Text auch alte radiometrische Größen und Einheiten genannt werden, so ist dies nicht als Missachtung gesetzlicher Vorschriften zu verstehen, sondern als Wunsch, den jüngeren Lesern das Verständnis älterer und internationaler Literatur und der Beschriftung von noch brauchbaren älteren Messgeräten zu ermöglichen. Schön wäre es, die Mittel zu haben, sie alle zu ersetzen, vor allem in Schulen.

Großen Dank sagen wir zahlreichen Fachkollegen des In- und Auslandes für viele Hinweise sowie studentischen Mitarbeitern und Teilnehmern von Vorlesungen, Praktika, Exkursionen, Kursen und Seminaren. Fehler und Irrtümer im Text sind aber nur uns vorzuhalten, am besten schriftlich.

Das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz hat als Herausgeber seit der 1. Auflage 1992 höchst großzügig die kostenlose Abgabe der "Blauen Schrift" an bisher 25 000 Interessenten, vor allem im Schulbereich, ermöglicht. Den die Schrift betreuenden Mitarbeitern des Staatsministeriums sagen wir großen Dank für gute und nachhaltige Zusammenarbeit.

Henning von Philipsborn
Rudolf Geipel

Inhalt

Vorwort	III
Listen der Abbildungen und Tabellen	X
1. Einleitung - Strahlung und Strahlungsmessung	1
Übersicht • Materie und Energie • Ionisierende Strahlung - Nicht-ionisierende Strahlung • Quellen und Ursachen ionisierender Strahlung • Wirkungen, Detektoren, Größen und Einheiten • Wechselwirkung Strahlung - Materie • Einzelne Messverfahren und Messgeräte • Strahlenschutz und Anwendungen	
2. Vorkommen, Ursachen und Erzeugung ionisierender Strahlung	8
Übersicht • Das Zerfallsgesetz • Statistischer Charakter des radioaktiven Zerfalls • Atomkern, Nuklide, Isotope • Zerfallsarten • Nuklidkarte • Natürliche Radionuklide • Die natürliche Strahlenexposition • Vorkommen und Beitrag von Kalium-40 • Vorkommen von Thorium in Natur und Technik • Vorkommen von Uran in der Natur • Zur Kernphysik von Uran • Uran und Radium in Chemie, Kunst, Medizin und Technik • Künstliche Radionuklide bei der Kernspaltung • Kosmische Strahlung und Höhenstrahlung • Kohlenstoff-14 • Röntgenstrahlung • Linearbeschleuniger	
3. Radiometrische Größen, Einheiten und Faktoren	35
Übersicht • Kennzeichnung der Quelle, der Strahlung und der Wirkungen • Aktivität, Aktivitätskonzentrationen • Aktivitätsangaben bei natürlich radioaktiven Stoffen • Halbwertszeit, spezifische Aktivität • Ionendosis • Energiedosis, Kerma • Null effekt • Zählrate • Kalibrierfaktoren • Äquivalentdosis • Dosisleistungskonstante	

4. Wirkungen und Nachweis ionisierender Strahlung.....	53
Übersicht • Physikalische Effekte und Detektoren	
• Optische Effekte • Photofilme • Verfärbungen • Kernspuren • Lumineszenz • Fluoreszenz • Leuchtschirme • Verstärkerfolien • Szintillationszähler • Thermolumineszenz • Photolumineszenz	
• Digitale Lumineszenz-Radiographie • Elektrische Effekte • Direkt und indirekt ionisierend, dicht und locker ionisierend • Nebelkammer • Gasionisationsdetektoren • Strom-Spannungs-Kennlinie • Ionisationskammer • Proportionalzähler • Geiger-Müller-Zähler • Ladungsträger in Halbleitern • Elektronenspinresonanz • Thermische Effekte - Geothermie • Strahlungskalorimeter	
5. Wechselwirkung zwischen ionisierender Strahlung und Materie	76
Übersicht • Qualitative messtechnische Charakterisierung • Schwächungsgesetz für Photonen • Halbwertsschichtdicke • Die Komponenten der Photonenschwächung • Kohärente Streuung • Photoeffekt • Comptoneffekt • Paarbildung • Kernphotoeffekt • Wechselwirkung von Betastrahlung • Schwächung von Betastrahlung • Reichweite von Betastrahlung • Selbstabsorption • Streuung von Betastrahlung • Ionisation und Anregung	
• Bremsstrahlung • Wechselwirkung von Alphastrahlung	
6. Messphilosophie und Messpraxis.....	87
Übersicht • Zur Statistik von Messwerten • Signifikanz bei zählenden Messungen • Optimierung des Mess-Systems • Messziele • Messgeräteparameter • Probensammlung	

- 7. Messung von Strahlungsfeldern:**
Ortsdosisleistung und Ortsdosis 99
 Übersicht • Messung von Ortsdosis und Ortsdosisleistung • Szintillationszähler • Ionisationskammern • Zählrohre
- 8. Messung von Quellen:**
Kontaminationen, Aktivitäten, Autoradiographien 107
 Übersicht • Kontaminationen • Großflächenproportionalzähler • Alpha-, Beta-, Gamma-Empfindlichkeit • Kalibrierung • Experimente mit Kontaminationsmonitoren • Weitere Großflächenmonitore • Schnelle, empfindliche Aktivitätsmessungen • Ein GM-Zähler für Schulexperimente • Ein Becquerel-Monitor für Volumenproben • Flüssigszintillometrie • Messungen von Aerosolen und Gasen • Bildgebende Verfahren: Autoradiographie
- 9. Nuklidspezifische Messungen:**
Gammaspektrometrie, Alphaspektrometrie 123
 Übersicht • Gammaspektrometrie • Energieauflösende Szintillationszähler • Halbleiterdetektoren • Merkmale von Detektoren und Spektren • Kalibrierung von Energie und Aktivität • Probenahme und Probenvorbereitung • Beispiele für Gammaspektren • Aero- und in-situ-Gammaspektrometrie • Low-Level-Gamma-Messungen • Alphamessungen und Alphaspektrometrie
- 10. Messung von Radon und Radonzerfallsprodukten** 141
 Übersicht • Zur Herkunft von Radon • Zerfall von Radon • Spezielle radiometrische Größen für Radon • Working Level und Potentielle-Alpha-Energie-Konzentration • Radioaktives Gleichgewicht und Gleichgewichtsfaktor • Physikalische Effekte zur Radonmessung • Messgeräte und Messziele • Messgeräte für Radonzerfallsprodukte in der Luft • Messgeräte für Radon in der Luft •

Die Philion-Platte • Aktivkohleexposimeter • Kernspurexposimeter • Radon in Wasser • Messung von Radon in Wasser • Exhalation von Radon • Radon im Boden • Radon aus Baustoffen und Mineralen • Radon in Wohnräumen • Bewertung von Radonexpositionen • Radium in Mineralwasser • Radonbäder

11. Neutronen – Eigenschaften, Messungen und Anwendungen..... 174

Übersicht • Einige Eigenschaften und Vorkommen • Neutronenquellen • Neutronenstrahlung bei Castor-Transporten • Klassifizierung nach der Bewegungsenergie • Wechselwirkung mit Materie • Wirkungsquerschnitte • Nachweisprinzipien für Neutronen • Messung langsamer Neutronen • Messung schneller Neutronen • Personendosimeter für Neutronen • Strahlenschutz durch Abschirmung • Anwendungen

12. Ermittlung der Körperdosis 190

Übersicht • Stochastische und deterministische Strahlenwirkungen • Individualdosis und Kollektivdosis • Körperdosis und Dosis-Messgrößen • Organdosis und Strahlungs-Wichtungsfaktoren • Effektive Dosis und Gewebe-Wichtungsfaktoren • Äquivalentdosis und Qualitätsfaktoren • Ortsdosis • Personendosis • Synopse der StrlSchV • Einige Vorschriften bei zielgerichteter Nutzung • Grenzwerte für die Bevölkerung • Grenzwerte bei Arbeiten • Orts- und Personendosimeter für Photonen- und Betastrahlung • Ermittlung der effektiven Dosis bei Radonexposition • Inkorporationsüberwachung • Ermittlung von Dosiskoeffizienten

13. Anwendungen von Röntgenstrahlung und Radionukliden..... 215

Übersicht • Anwendungen von Röntgenstrahlung • Physikalische Wirkungen von Kernstrahlung •

Chemische Wirkungen von Kernstrahlung • Biologisch-medizinische Wirkungen von Kernstrahlung • Anwendung von messtechnisch günstigen Eigenschaften • Prüf- und Kalibrierstrahler • Kenndaten einiger Radionuklide • Methoden der radiometrischen Altersbestimmung

14. Strahlenschutzpraxis und Bewertung der Messergebnisse	225
Übersicht • Das Wichtigste vom praktischen Strahlenschutz • Allgemeine Überlegungen zur Bewertung • Das ALARA-Prinzip - Grundsätze für den Strahlenschutz • Strahlenschutzvorsorge in der Bundesrepublik Deutschland • Bewertung natürlicher und zivilisatorischer Strahlenrisiken	
Literatur	235
Personenregister	236
Sachregister	237
Radionuklidregister	244

Liste der Abbildungen

1. Zerfallskurve, schematisch	10
2. Zerfallsreihe von Thorium-232	19
3. Zerfallsreihe von Uran-238	23
4. Uranglas Annagelb-Becher	27
5. Uranglasur rot Keramik-Vase	27
6. Uranglasur rot Fliese	27
7. Uranglasur gelb Keramik-Dose	27
8. Häufigkeitsverteilung der Spaltprodukte von U-235	29
9. Szintillationszähler, schematisch.....	62
10. Kennlinie von Gasisationsdetektoren	68
11. Ionisationskammer, schematisch	70
12. Kennlinie eines Proportionaldetektors.....	71
13. Standardmessunsicherheit und Signifikanz	92
14. Dosisleistungsmessgerät	101
15. Dosis- und Dosisleistungsmessgerät	103
16. Ionisationskammer	105
17. Zeitdiagramm einer Ortsdosisleistung.....	106
18. Kontaminationsmonitor.....	110
19. Low-Level-Messgerät	114
20. Geiger-Müller-Endfensterzählrohr	116
21. Becquerelmonitor	117
22. Autoradiographie Uranerz-Anschliff	121
23. Autoradiographie Schuhsohle Heißes Teilchen	121
24. Autoradiographie Dekorfliese Uranpigment	122
25. Autoradiographie Pilze mit Radiocäsium	122
26. Gammaskpektren Pechblende und Monazitsand	133
27. Gammaskpektrum Radonzerfallsprodukte.....	134
28. In-situ-Gammaskpektrometrie.....	136
29. Alphaspektrum Zerfallsprodukte Radon Thoron	140
30. Messgerät für Radon-222.....	155
31. Zeitdiagramm Radon-222-Konzentration	155
32. Zeitspektrum Zerfallsprodukte Radon und Thoron....	158
33. Kernspurfilm Kodak LR-115	161
34. Albedo-Thermolumineszenzdosimeter.....	185
35. Forschungsreaktor FRM II.....	187
36. Blick in die Reaktorhalle	188
37. Synopse der Dosisgrößen im Strahlenschutz	191
38. Filmdosimeter.....	204
39. Fingerringdosimeter	205

40. Stabdosisimeter	207
41. Radonexposimeter zum Tragen	209
42. Teilkörperzähler für die Lunge	211
43. Transportwege im Organismus	213

Bildnachweis

- Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg: Abb. 28
- Canberra Eurisys GmbH, Rüsselsheim: Abb. 42
- G. Dietze, Braunschweig: Abb. 37
- A. Kaul, Wolfenbüttel: Abb. 43
- Materialprüfungsamt NRW, Dortmund: Abb. 33, 41
- Technische Universität München, Forschungsneutronenquelle FRM-II, Garching: Abb. 35, 36

Liste der Tabellen

1. Natürliche Strahlenexposition.....	15
2. Physikalische Effekte und Detektoren.....	55
3. Reichweite von Betastrahlung.....	84
4. Anzeigen eines Kontaminationsmonitors	112
5. Zerfallsdaten der Ra-226-Reihe	144
6. Strahlungs-Wichtungsfaktoren	195
7. Gewebe-Wichtungsfaktoren	196
8. Kenndaten einiger Radionuklide	222

1. Einleitung - Strahlung und Strahlungsmessung

Übersicht • Materie und Energie • Ionisierende Strahlung - Nicht-ionisierende Strahlung • Quellen und Ursachen ionisierender Strahlung • Wirkungen, Detektoren, Größen und Einheiten • Wechselwirkung Strahlung-Materie • Einzelne Messverfahren und Messgeräte • Strahlenschutz und Anwendungen

Übersicht

Dem Thema "Radioaktivität und Strahlungsmessung" nähern wir uns von den beiden Grundbegriffen der Naturerkenntnis: Materie und Energie. Radioaktivität, wörtlich "Strahlentätigkeit" ist der Naturvorgang, der den Traum der Alchemisten, die Transmutation der Materie, in zweifacher Weise erfüllt:

1. Eine Umwandlung chemischer Elemente in andere chemische Elemente, z.B. von Uran in Blei und sogar von Quecksilber in Gold, und
2. eine Umwandlung von Materie in Energie, die in Form von Strahlung freigesetzt wird.

Das Wort Messung im Titel der Schrift verpflichtet uns, das Thema physikalisch quantitativ und technisch praktisch zu behandeln. Messung ist die Grundlage physikalischer Erkenntnis und technischer Anwendung. Radionuklide und damit die Strahlung beim radioaktiven Zerfall sind in der Natur allgegenwärtig, wie auch empfindliche Messgeräte in vielen Labors und heute sogar bei Laien weit verbreitet. Messungen umfassen in der Regel drei Schritte: vor der eigentlichen Messung die Sammlung und Aufbereitung der Probe, wenn möglich mit Konzentrierung, danach den eigentlichen Messvorgang und abschließend die Bewertung des Messergebnisses. Jeder dieser drei Schritte ist wichtig und ohne die beiden anderen nicht ausreichend.

Materie und Energie

Das physikalische Universum hat zwei Erscheinungsformen: Materie und Energie. Strahlung ist eine Form von Energie. Sichtbares Licht ist die bekannteste Form von Strahlung und stellt einen winzigen Ausschnitt aus dem großen Spektrum der elektromagnetischen Strahlung dar. Licht wird, wie jede andere Form von Strahlung, charakterisiert durch seine Wellenlänge λ bzw. seine Frequenz ν . Das Produkt

$$\lambda \cdot \nu = c$$

ist die Lichtgeschwindigkeit $c = 2,998 \cdot 10^8$ m/s, eine universelle Naturkonstante. Das Produkt

$$h \cdot \nu = E$$

ist die Strahlungsenergie (Quantenenergie, A. Einstein, 1905), wobei $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js das Planck'sche Wirkungsquantum ist, eine weitere universelle Naturkonstante.

Von Einstein stammt auch die berühmte Formel

$$E = m \cdot c^2,$$

nach der die beiden Erscheinungsformen des Universums, nämlich Materie, charakterisiert durch die Masse m , und Energie E ineinander umwandelbar sind. Diese Erkenntnis ist die Grundlage der Kernenergie.

Für die Strahlungsenergie wird die Einheit Elektronenvolt (eV) verwendet. 1 eV ist die Energie, die ein Elektron erhält, wenn es mit einer Spannung (Potentialdifferenz) von 1 Volt beschleunigt wird. Das Elektronenvolt ist eine sehr kleine Energiemenge. $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J. $1 \text{ Joule} = 1 \text{ Wattsekunde} = 1 \text{ Newtonmeter}$, $1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$. Sichtbares Licht hat eine Strahlungsenergie (Quantenenergie) von circa 1,5 bis 2,5 eV. Ultraviolettes Licht ist energiereicher. Es vermag unsere Haut zu bräunen, in Überdosen zu verbrennen, Sonnenbrand und Hautkrebs zu erzeugen.

Ionisierende Strahlung - Nicht-ionisierende Strahlung

Eine elektromagnetische Strahlung, deren Quanten ("Teilchen") etwa 1000 bis 100.000 mal energiereicher sind als die des sichtbaren Lichtes, ist die Röntgenstrahlung (W. C. Röntgen 1895). Sie hat eine Strahlungsenergie (Quantenenergie) von einigen keV bis einigen 100 keV. Röntgenstrahlung hat wegen ihrer sehr viel höheren Energie andere

Eigenschaften als Licht. So können Röntgenstrahlen Materie durchdringen. Sie werden in ihr aber auch zum Teil oder ganz absorbiert und erzeugen dann physikalische Effekte, die sichtbares Licht nicht verursachen kann. Röntgenstrahlen wirken ionisierend, sie lösen Elektronen aus Atomen und Molekülen in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern. Die ionisierte Materie ist elektrisch leitend.

Eine weitere Form ionisierender Strahlung ist die Strahlung, die beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen entsteht (entdeckt von H. Becquerel 1896). Sie ist in der Regel keine einheitliche Strahlung, sondern eine Mischstrahlung, je nachdem, welche Atomkerne zerfallen. Die Teilstrahlungen sind unterscheidbar nach ihrer Art (Teilchen- oder Wellenstrahlung), nach ihrer Energie, nach ihrer Intensität und nach ihrer Herkunft. Die Alphastrahlung und die Betastrahlung sind Teilchenstrahlungen, die Gammastrahlung ist eine Wellenstrahlung. Die drei Strahlungsarten (α , β , γ) heißen wegen ihrer Herkunft aus dem Atomkern auch Kernstrahlung. M. Curie prägte 1898 den Namen Radioaktivität. Man vermeide den Ausdruck radioaktive (= strahlentätige) Strahlung. Beim Kernzerfall kann auch Röntgenstrahlung entstehen, sie stammt aus der Elektronenhülle.

Man spricht heute auch von "nicht-ionisierender Strahlung" und meint damit den Teil des elektromagnetischen Spektrums, der langwelliger (energieärmer) ist als das Ultraviolett-C. Zur nicht-ionisierenden Strahlung gehören das ultraviolette und sichtbare Licht, die Infrarotstrahlung, Radiowellen, Mikrowellen, nieder- und hochfrequente elektrische und elektromagnetische Felder, z.B. beim Mobilfunk, sowie elektrostatische Felder.

Den biologischen Wirkungen, wohltätige und schädigende, der Röntgen- und der Kernstrahlung hat man seit 100 Jahren große Aufmerksamkeit gewidmet und sie sind gut bekannt. Bei den nicht-ionisierenden Strahlungen ist dies weniger der Fall, die Wirkungen sind wohl auch subtiler.

Quellen und Ursachen ionisierender Strahlung

Ionisierende Strahlung natürlichen Ursprungs ist allgegenwärtig in Raum und Zeit seit der Entstehung des Kosmos.

Die energiereichste, härteste Strahlung, die bezüglich Masse und Energie inhomogene kosmische Strahlung, trifft Tag und Nacht aus dem Weltraum auf die Atmosphäre und wird dort zur Höhenstrahlung (V. F. Heß 1912).

Auf der Erde sind natürlich zerfallende Atome, wie Radionuklide der Zerfallsreihen von Uran und Thorium sowie ein Radioisotop des Kaliums, nicht nur in eigenen Mineralen, sondern auch als Spurenelemente in vielen Stoffen, auch Lebensmitteln, enthalten. Über Atemluft und Wasser nehmen wir strahlendes Radon und Radonzerfallsprodukte in uns auf. Künstliche Radionuklide wie die von Iod, Cäsium, Strontium und andere sind durch Atomwaffenversuche und kerntechnische Unfälle (Tschernobyl) in die Umwelt gelangt.

Röntgenstrahlung entsteht gezielt oder störend bei der Wechselwirkung energiereicher Elektronen mit Materie. Röntgenstrahlung ist unersetzlich: in der Medizin für Diagnostik und Therapie am Menschen, in Forschung und Technik zur Analyse und Synthese von Stoffen.

Wirkungen, Detektoren, Größen und Einheiten

Mit der Messung charakteristischer Größen ermitteln wir physikalische Eigenschaften und Wirkungen. Ionisierende Strahlung lässt sich durch vielfältige Wechselwirkungen besonders empfindlich messen und wird deshalb messtechnisch vielfach angewandt. Beispiele sind in der Forschung Radionuklide zur Markierung von Substanzen für Stoffwechseluntersuchungen, und in der Technik zur Regelung und Steuerung von Prozessen.

Ein wichtiger Grund zur Messung ionisierender Strahlung ist der Strahlenschutz. Da es neben vielen erwünschten auch unerwünschte Wirkungen ionisierender Strahlung gibt, müssen wir uns vor diesen Wirkungen schützen. Strahlungsmessung ist die Grundlage des Strahlenschutzes.

Zur Messung bedienen wir uns physikalischer und chemischer Effekte, die unter den Messbedingungen Wirkungen messbarer Größen (z.B. elektrische Ströme) in messbarer Höhe (Intensität) zeigen.

Zunächst werden im Kapitel 3 die Größen und Einheiten behandelt, die der Charakterisierung ionisierender Strahlung dienen. Hierzu benötigen wir die jeweils geeignete Größe. Die Einheiten radiometrischer Größen tragen die Namen von Curie, Becquerel, Röntgen, Sievert und Gray.

Wechselwirkung Strahlung – Materie

Ionisierende Strahlung ist ein Sammelbegriff für elektromagnetische Wellen- und Teilchenstrahlungen verschiedener Quellen und Ursachen, die eine ionisierende Wirkung auf Materie ausüben. Ihre Energie kann stark variieren von keV (10^3 eV) bis zu GeV (10^9 eV).

Wechselwirkung mit Materie ist ein Sammelbegriff für Schwächung, Absorption, Streuung und Beugung der Strahlung in einem Absorber und für Ionisation, Anregung, Fluoreszenz und die Erzeugung von Schäden in der Materie. Diese Vorgänge sind die physikalischen Grundlagen für die Wirkungsweise des Detektors, also dem „Auge“ des Messinstrumentes.

Wechselwirkung von unbekannter Strahlung mit bekannter Materie kann zur Charakterisierung der Strahlung (Kapitel 5) dienen wie auch umgekehrt bei bekannter Strahlung zur Charakterisierung unbekannter Materie (Kapitel 13).

Die physikalischen und chemischen Wirkungen ionisierender Strahlung werden zunächst mehr phänomenologisch beschrieben (Kapitel 4). Zum Verständnis der verschiedenen Detektoren werden die elementaren Wechselwirkungen im Einzelnen dargelegt (Kapitel 5).

Einzelne Messverfahren und Messgeräte

Die Ereignisse von Tschernobyl haben aufgrund einer großflächigen Ausbreitung von künstlichen Radionukliden zu einer weiten Verbreitung von Strahlungsmessgeräten geführt. Um die Geräte richtig zu verwenden, benötigt man mehr Wissen, als in den Bedienungsanleitungen der Verkaufsfirmen geboten wird. Ein Fieberthermometer macht eben noch keinen Arzt, ein Geiger-Müller-Zählrohr keinen Strahlenexperten. Verschiedenartige Strahlung erfordert

unterschiedliche Detektoren zur Messung. Dies gilt bereits für Wärmestrahlung und Licht, die im Energiespektrum benachbart sind. Belichtungsmesser und Fieberthermometer sind nicht austauschbar.

Noch mehr gilt dies für die verschiedenen Arten ionisierender Strahlung. Messverfahren werden durch Voraussetzungen und Ziele der Messungen bestimmt. Sie unterscheiden sich je nachdem, ob im Labor oder im Gelände, ob mit kleinen oder großen Probenmengen und Strahlungsintensitäten, ob einmalig oder kontinuierlich, ob orts- und zeitaufgelöst oder integrierend gemessen werden soll, insbesondere ob man Aktivität, Dosis oder Dosisleistung messen will.

Der älteste, preiswerteste und universellste Strahlungsdetektor ist der fotografische Film. Die große Gruppe der beruflich strahlenexponierten Personen kennt die Filmdosimeter, die monatlich zur quantitativen Auswertung an eine behördlich bestimmte Messstelle eingeschickt werden. Für Dosimeter werden noch andere physikalische und chemische Effekte benutzt.

Recht verbreitet sind Geräte zur Messung der Ortsdosisleistung und zum Nachweis von flächenhaften Kontaminationen. Zur quantitativen Messung müssen sie kalibriert werden, ein nicht trivialer Vorgang. Aktivitätsmessungen erfordern meist nuklidspezifische Sammelverfahren und Probenpräparationen, geeignete Detektoren sowie Mess- und Auswerteprogramme und somit echte Fachkenntnisse.

Ein wichtiges und reizvolles Gebiet ist die Messung von Radon und seiner Zerfallsprodukte in Luft, Wasser und aus Feststoffen (Kapitel 10). Radon ist allgegenwärtig und verursacht etwa die Hälfte der natürlichen Strahlenexposition der Bevölkerung. Radon und seine Zerfallsprodukte sind Alpha-, Beta- und Gammastrahler und lassen sich in gefahrlosen Schulexperimenten mit einfachsten Mitteln vorführen.

Materie besteht zu mehr als der Hälfte aus Neutronen, allerdings sind diese in Atomkernen festgebunden und als Teilchen nicht wahrnehmbar. Freie Neutronen sind in Vorkommen, Messung und Strahlenschutz eng mit der Radioaktivi-

tät verknüpft und haben in der Schrift ein eigenes Kapitel 11 erhalten.

Strahlenschutz und Anwendungen

Die Einwirkung ionisierender Strahlung auf den menschlichen Körper heißt Strahlenexposition. Strahlenexposition umfasst nicht nur die physikalische Einwirkung, sondern auch die biologischen Wirkungen. Strahlenschutz ist die Kurzbezeichnung für den Schutz von Menschen als Individuen vor schädlichen biologischen Wirkungen ionisierender und nicht-ionisierender Strahlung in allen Dosisbereichen, auch so niedrigen, dass über die biologischen Wirkungen nur statistische Aussagen über Kollektive und für Individuen nur Risikoabschätzungen möglich sind. Der Strahlenschutz für beruflich exponierte Personen ist ein hoch entwickelter Teil des allgemeinen Schutzes am Arbeitsplatz. Strahlenschutz in Forschung, Lehre und Praxis ist eine interdisziplinäre Aufgabe von (in alphabetischer Reihenfolge) Biologen, Chemikern, Geowissenschaftlern, Ingenieuren, Medizinern und Physikern.

In der Strahlenschutzverordnung haben Dosisgrößen zur Messung der radiologisch bewerteten Energiedosis und zur Festlegung von Grenzwerten eine zentrale Bedeutung. Ihnen wie auch wichtigen Vorschriften ist das Kapitel 12 gewidmet.

Vielfältig und segensreich sind die Anwendungen von Röntgenstrahlung und von Radionukliden in Medizin, Forschung und Technik (Kapitel 13). Aus der Strahlenschutzpraxis und der Bewertung der Messergebnisse unter verschiedenen Aspekten wird in Kapitel 14 berichtet.

2. Vorkommen, Ursachen und Erzeugung ionisierender Strahlung

Übersicht • Das Zerfallsgesetz • Statistischer Charakter des radioaktiven Zerfalls • Atomkern, Nuklide, Isotope • Zerfallsarten • Nuklidkarte • Natürliche Radionuklide • Die natürliche Strahlenexposition • Vorkommen und Beitrag von Kalium-40 • Vorkommen von Thorium in Natur und Technik • Vorkommen von Uran in der Natur • Zur Kernphysik von Uran • Uran und Radium in Chemie, Kunst, Medizin und Technik • Künstliche Radionuklide bei der Kernspaltung • Kosmische Strahlung und Höhenstrahlung • Kohlenstoff-14 • Röntgenstrahlung • Linearbeschleuniger

Übersicht

Röntgenstrahlung und Kernstrahlung haben so viel Gemeinsames, dass ihre gemeinsame Behandlung in einer Schrift „Radioaktivität und Strahlungsmessung“ in allen Aspekten sinnvoll ist.

Die Röntgenstrahlung ist eine elektromagnetische Strahlung mit kontinuierlicher und mit diskreter Energieverteilung. Sie wird in Röntgenröhren erzeugt oder tritt technisch als Störstrahlung auf. Auf der Erde kommt Röntgenstrahlung im eigentlichen Sinn nicht natürlich vor, allerdings können beim Kernzerfall auch Röntgenlinien auftreten. Röntgenstrahlung kommt aus der Atomhülle, Gammastrahlung aus dem Atomkern. Messsonden außerhalb der Erdatmosphäre führten zur Entdeckung von Röntgensternen, also Sternen, die Röntgenstrahlung aussenden. R. Giacconi erhielt für die Entdeckung (1962) den Physik-Nobelpreis 2002.

Die Kernstrahlung, die Strahlung beim radioaktiven Zerfall, ist im Allgemeinen eine Mischung mehrerer, sehr energiereicher Strahlungsarten:

- Elektromagnetische Strahlung (Gammastrahlung, Photonen),
- Strahlung elektrisch negativer bzw. positiver, leichter Teilchen (Elektronen, Positronen, Betastrahlung) und
- Strahlung elektrisch positiver, schwerer Teilchen (Alphastrahlung).

Hinzu kommt bei der Kernspaltung eine Strahlung elektrisch neutraler, schwerer Teilchen (Neutronen) sowie exotischer Teilchen.

Die kosmische Strahlung kommt primär aus dem Weltall und wird in der Atmosphäre zur Höhenstrahlung. Sie ist von sehr vielfältiger Zusammensetzung und teilweise von höchster Energie. In ihrer Intensität schwankt sie mit der Sonnenaktivität, mit der Höhe über Normalnull und der geographischen Breite auf der Erde.

Die physikalischen Ursachen der drei Strahlungen, die von Röntgen (1895), Becquerel (1896) und Heß (1912) entdeckt wurden, sind unterschiedlich und somit auch die Verfahren, sie zu erzeugen, oder die Orte, sie in der Natur zu finden. Die physikalischen, chemischen und biologischen Wirkungen der drei Strahlungen aber haben sehr viel Gemeinsames. Deshalb sind Methoden und Instrumente zur Messung ionisierender Strahlung vielfach ähnlich.

Das Zerfallsgesetz

1899 postulierten J. Elster und H. Geitel: Die Ursache der Radioaktivität ist die Instabilität bestimmter Atome. Die natürliche Radioaktivität findet sich hauptsächlich bei den Elementen mit hoher Kernladungszahl (Ordnungszahl). Die Anhäufung von sehr vielen positiven Ladungen macht den Atomkern instabil. 1902 fanden E. Rutherford und E. Soddy: Radioaktive Atome zerfallen spontan, d.h. ohne jeden äußeren Anlass und auch nicht beeinflussbar.

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Atomkern aus einer Anzahl gleicher instabiler Kerne zerfällt, ist für jeden Kern gleich groß. Deshalb ist die Anzahl der Kernzerfälle pro Zeiteinheit, die Aktivität A , proportional der Anzahl N der vorhandenen Atome:

$$A = k \cdot N.$$

Der Proportionalitätsfaktor k heißt Zerfallskonstante (Zerfallswahrscheinlichkeit). Die Anzahl der Zerfälle pro Zeiteinheit entspricht gleichzeitig der Abnahme der Anzahl der instabilen Atome:

$$A = - \frac{dN}{dt}.$$

Die einfache Differentialgleichung

$$\frac{dN}{dt} = - k \cdot N$$

beschreibt somit den radioaktiven Zerfall und heißt Zerfallsgesetz. Die zeitabhängige Lösung lautet:

$$N = N_0 \cdot e^{-k \cdot t}$$

Dabei ist N_0 die Anzahl der Atomkerne, die zum Zeitpunkt $t = 0$ vorhanden sind. Nach der Halbwertszeit $T_{1/2}$ ist die Anfangszahl N_0 , aber auch die Anfangsaktivität A_0 auf die Hälfte gesunken, nach 10 Halbwertszeiten auf circa 1 Promille. Für eine mehr schulmäßige Ableitung des Zerfallsgesetzes siehe Seite 52.

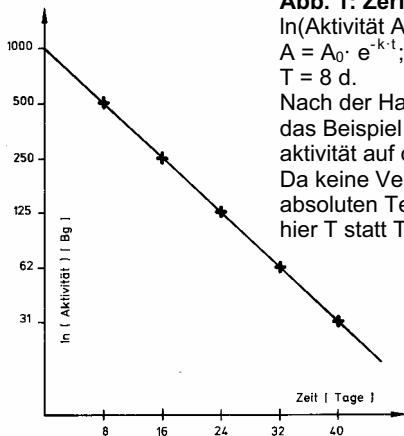


Abb. 1: Zerfallskurve, schematisch.

ln(Aktivität A) vs Zeit t.

$$A = A_0 \cdot e^{-k \cdot t}; \quad A_0 = 1000 \text{ Bq}; \quad k \cdot T = \ln 2; \quad T = 8 \text{ d.}$$

Nach der Halbwertszeit $T = 8$ Tage für das Beispiel Iod-131 ist die Anfangsaktivität auf die Hälfte gesunken.

Da keine Verwechslungsgefahr mit der absoluten Temperatur T besteht, ist hier T statt $T_{1/2}$ geschrieben.

Statistischer Charakter des radioaktiven Zerfalls

An Präparaten geeigneter Aktivität lassen sich einzelne Zerfälle instabiler Atomkerne zeitlich aufgelöst erkennen. Dies wurde zuerst beobachtet durch Szintillationen (sehr kurzzeitige, schwache Lichtblitze vom Leuchtschirm) und später durch Stromimpulse (Elektronenlawinen im Geiger-Müller-Zähler) und durch Ionisationsspuren (in der Wilsonschen Nebelkammer). Die zeitlichen Abstände der Einzelzerfälle sind nicht regelmäßig gleich, sondern streuen *statistisch*. Bei akustischer Wiedergabe der Ereignisse im Detektor eines empfindlichen Zählers, ausgelöst durch die allgegenwärtige Umgebungsstrahlung, wird das Unregelmäßige in den zeitlichen Abständen sofort deutlich.

Der radioaktive Zerfall und die damit verbundene Atomumwandlung ist ein statistisches Phänomen. Die Zerfallskonstante ist nur die Wahrscheinlichkeit dafür, dass innerhalb der Zeiteinheit ein Zerfall stattfindet. Das Zerfallsgesetz gilt numerisch nur, wenn die Zahl der vorhandenen radioaktiven Atome groß ist.

Atomkern, Nuklide, Isotope

Radioaktivität ist eine Eigenschaft des Atomkerns und unabhängig vom chemischen Zustand. Es existieren stabile und instabile Atomkerne. Ein chemisches Element ist durch seine Protonenzahl Z definiert, die deshalb auch Ordnungszahl (Kernladungszahl) heißt. Die Summe der Protonenzahl Z und der Neutronenzahl N ergibt die Nukleonenzahl M .

$$M = Z + N$$

Die Nukleonenzahl ("Massenzahl") fügt man mit Bindestrich zum Elementnamen oder unmittelbar an dessen Kürzel, z.B. C-12. Man schreibt auch die Ordnungszahl, für Kohlenstoff 6, und die Nukleonenzahl beide vor den Buchstaben des Elements ${}^12_6\text{C}$. Nuklide sind Atomarten definiert durch Protonenzahl und Nukleonenzahl. Isotope („am gleichen Ort des periodischen Systems“) sind Atomarten mit gleicher Protonenzahl Z , aber mit verschiedenen Nukleonenzahlen und damit auch Neutronenzahlen. Nuklid ist allgemeiner, Isotop ist stets mit „von ...“ zu verwenden. C-12 ist ein Nuklid, C-14 ist ein Radionuklid und beide sind Kohlenstoffisotope. Die nicht-ganzzahligen Atomgewichte der Elemente entstehen als Summe der Produkte aus prozentualer Häufigkeit mal Nukleonenzahl der Isotope.

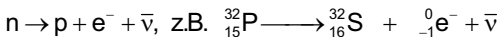
Zerfallsarten

Die 3 Strahlungsarten, Alpha-, Beta- und Gammastrahlung, die beim radioaktiven Zerfall auftreten können, entstehen durch unterschiedliche Zerfallsarten des Atomkerns:

den Alphazerfall, den Beta-minus-Zerfall, den Beta-plus-Zerfall, den K-Einfang, Zerfälle mit Auger-Elektronen und Zerfälle mit Konversionselektronen. Gammastrahlung begleitet die meisten Zerfälle.

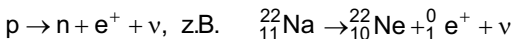
Der Alphazerfall tritt vor allem bei schweren Kernen, wie denen des Urans, des Thoriums oder des Radiums und vielen anderen auf. Das emittierte Alphateilchen ist ein Heliumkern, hat also die Nukleonenzahl 4 und die Kernladungszahl 2 und ist zweifach positiv geladen. Es hat eine diskrete Energie, d.h. Alphaspektren sind Linienspektren.

Der allgemein als Betazerfall bekannte Beta-minus-Zerfall β^- tritt vor allem bei Kernen mit hoher Neutronenzahl auf, bezogen auf das Verhältnis Protonen zu Neutronen im Kern. Der Betazerfall ist die Umwandlung eines Neutrons n im Kern in ein Proton p unter Emission eines Elektrons e^- . Die Betateilchen (Elektronen), die die Kerne verlassen, besitzen eine kontinuierliche Energieverteilung. Der Ausgangskern, der sich unter Betazerfall umwandelt, hat einen definierten Energiezustand. Da auch der Endkern einen definierten Energiezustand besitzt, muss die freiwerdende Energie einen diskreten Betrag haben. Energieerhaltungssatz und Impulserhaltungssatz fordern, dass zusammen mit dem Elektron noch ein weiteres Teilchen vom Kern emittiert wird, das Antineutrino $\bar{\nu}$ genannt wird:



Das Phosphorisotop mit der Ordnungszahl 15 und der Nukleonenzahl 32 geht im Beta-minus-Zerfall über in das Schwefelisotop mit der Ordnungszahl 16 und der Nukleonenzahl 32. Ladung und Nukleonenzahl bleiben erhalten. Die Massen verhalten sich wie $m_{e^-} \approx m_{e^+}$, $m_n \approx m_p$ und $m_e : m_p = 1 : 1836$, deshalb sind m_{e^-} und m_{e^+} näherungsweise Null. Die bei der Kernumwandlung freiwerdende Energie E verteilt sich auf das Elektron und das Antineutrino, so dass das Elektron beliebige Bruchteile von E bis maximal zu E erhalten kann.

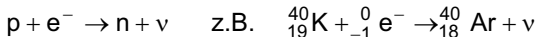
Beim Beta-plus-Zerfall (β^+) wird dagegen ein Proton in ein Neutron umgewandelt unter Emission eines Positrons und eines weiteren Teilchens, des Neutrinos ν :



Das Positron ist sehr kurzlebig (etwa 10^{-10} s). Es vereinigt sich mit einem freien Elektron. Das Positron-Elektron-Paar

zerstrahlt in zwei Gammaquanten mit je 511 keV Energie, äquivalent der Masse der beiden Teilchen. Diese Strahlungsart wird Vernichtungsstrahlung genannt.

Beim K-Einfang (electron capture) wandeln sich Kerne durch Einfang eines Elektrons der K-Schale, der innersten Schale der Elektronenhülle, um. Das eingefangene Elektron vereinigt sich mit einem Proton und es entsteht ein Neutron mit Emission eines Neutrinos gemäß der Formel:



Das in der K-Schale fehlende Elektron wird ersetzt durch ein anderes Elektron der Hülle. Die freiwerdende Energie wird in Form von charakteristischer Röntgenstrahlung emittiert. Die freiwerdende Energie kann auch einem anderen Hüllenelektron (L-Elektron) übertragen werden. Man nennt dieses den Atomverband verlassende Elektron „Auger-Elektron“.

Gammastrahlung tritt auf, wenn bei einem Zerfall ein Atomkern in einem angeregten Zustand entsteht, der unter Emission von Gammastrahlung direkt oder zeitlich verzögert in einen energieärmeren, z.B. den Grundzustand übergeht. Beim Alpha- und Betazerfall tritt häufig Gammastrahlung auf, beim K-Zerfall grundsätzlich – in diesem Fall richtiger als natürliche Röntgenstrahlung bezeichnet.

Ferner existieren Übergänge, bei denen der Überschuss an Energie gegenüber dem Grundzustand nicht nur als Gammastrahlung abgeführt wird, sondern teilweise oder ganz aufgewendet wird zur Abtrennung von Elektronen aus dem Atomverband. Man nennt diesen Vorgang innere Konversion. Das aus einer bestimmten Schale herausgelöste Elektron verlässt den Atomverband als Konversionselektron. Die entstandene Leerstelle in einer Schale wird von einem Elektron der nächsthöheren Schale aufgefüllt. Hierbei wird charakteristische Röntgenstrahlung emittiert.

Nuklidkarte

Die Gesamtheit der etwa 2720 heute bekannten, verschiedenen Nuklide der 112 chemischen Elemente ist in der Karlsruher Nuklidkarte geordnet. 90 % der bekannten Nukli-

de sind instabil, die meisten von diesen sind technisch erzeugt. Nur 258 Nuklide sind stabil und weitere 29 sind zwar instabil, haben aber eine so lange Halbwertszeit, dass sie zu den stabilen gezählt werden.

Für Nuklide, die sich in Protonenzahl Z , Neutronenzahl N oder Nukleonenzahl M gleichen oder unterscheiden, sind spezielle Namen eingeführt. Es sind dies:

- a) Isotope heißen Nuklide mit gleicher Protonenzahl.
 $Z = \text{konstant}$, z.B.: ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$
- b) Isobare sind Nuklide mit gleicher Nukleonenzahl (Massenzahl).
 $M = N + Z = \text{konstant}$, z.B.: ${}^{130}_{53}\text{I}$, ${}^{130}_{54}\text{Xe}$
- c) Isotone sind Nuklide mit gleicher Neutronenzahl.
 $N = \text{konstant}$, z.B.: ${}^{26}_{11}\text{Na}$, ${}^{29}_{14}\text{Si}$,
da $26 - 11 = 29 - 14$
- d) Isomere sind Nuklide, die über ihrem Grundzustand einen metastabilen, mehr oder weniger langlebigen Energiezustand m besitzen, z.B.: ${}^{137m}_{56}\text{Ba}$.

Natürliche Radionuklide

Nur wenige Radionuklide tragen zur natürlichen Strahlenexposition des Menschen bei. Es sind dies die langlebigen natürlichen Radionuklide Uran-238 ($T = 4,47 \text{ Ga}$), Uran-235 ($T = 0,70 \text{ Ga}$) und Thorium-232 ($T = 14,05 \text{ Ga}$) mit ihren Zerfallsprodukten, sowie Kalium-40 ($T = 1,28 \text{ Ga}$). G steht für Giga = 10^9 , 1 Ga = 1 Milliarde Jahre. Diese langlebigen Nuklide stammen von der Entstehung der Erde vor ca. 5 Ga und heißen primordiale Nuklide. Uran und Thorium bilden drei Zerfallsreihen; die von Uran-238 und von Thorium-232 werden ausführlicher besprochen.

Der relativ kurzlebige Kohlenstoff-14 ($T = 5730 \text{ a}$) und das Tritium, H-3, ($T = 12,3 \text{ a}$) werden durch die Höhenstrahlung ständig nachgebildet. Für die Strahlenexposition spielen beide keine besondere Rolle, wohl aber für viele wissenschaftliche und praktisch-technische Erkenntnisse.

Die natürliche Strahlenexposition

Die Einwirkung ionisierender Strahlung auf den menschlichen Körper heißt Strahlenexposition. Die Strahlenexposition wird gemäß internationaler (ICRP) und nationaler (StrlSchV) Regelung in Einheiten der „effektiven Dosis“ angegeben. Einheiten sind das Sievert, $1 \text{ mSv} = 0,001 \text{ Sv}$, z.B. bezogen auf ein Jahr (annus), d. i. 1 mSv/a oder $1 \mu\text{Sv/a} = 0,001 \text{ mSv/a}$, siehe Kapitel 3.

Tabelle 1: Natürliche Strahlenexposition, mittlere jährliche effektive Dosis in μSv in der Bundesrepublik Deutschland (nach Kiefer und Koelzer, 1992). $2400 \mu\text{Sv} = 2,4 \text{ mSv}$, natürlicher Schwankungsbereich 1 – 10 mSv/a.

	von außen	innen	gesamt
Höhenstrahlung	300	–	300
kosmogene Radionuklide	–	15	15
primordiale Radionuklide			
Kalium-40	120	180	300
Rubidium-87	–	5	5
Uran-238-Reihe:			
Uran-238 – Radium-226		30	
Radon-222 – Polonium-214	90	1100	1350
Blei-210 – Polonium-210		130	
Thorium-232-Reihe, Thoron	140	240	380
Gesamtsumme	650	1700	≈2400

Die äußere Strahlenexposition wird mit Messgeräten der Gamma-Ortsdosisleistung und mit Personendosimetern erfasst. Die innere natürliche Strahlenexposition stammt im Wesentlichen von inhalierten Radonzerfallsprodukten und von inkorporiertem Kalium-40 und Radium-226. Sie kann über gemessene Aktivitäten mit den Dosiskoeffizienten berechnet werden, siehe Kapitel 12.

Die gesamte Strahlenexposition aus natürlichen Quellen von durchschnittlich ca. $2,4 \text{ mSv/a}$ effektive Dosis besteht zu circa 70 % aus innerer und zu circa 30 % aus äußerer Exposition. Starke Schwankungen von Mensch zu Mensch ergeben sich aus der Höhenlage des Wohnortes, der geologischen Beschaffenheit des Untergrundes des Wohnortes

sowie den individuellen Wohn-, Lebens- und Ernährungsgewohnheiten. Der größte Teil der internen Strahlenexposition wird durch Radon und seine Radonzerfallsprodukte verursacht, denen daher das ganze Kapitel 10 gewidmet ist. Bei der externen Strahlenexposition liefert die Höhenstrahlung fast die Hälfte.

Vorkommen und Beitrag von Kalium-40

Kalium gehört mit Gehalten von 2,6 Gewichtsprozent zu den zehn häufigsten Elementen der oberen Erdkruste. Gesteinsbildende Minerale mit Kalium sind im Granit der Kalifeldspat (Orthoklas) und der Kaliglimmer (Muskovit), in sedimentären Kalisalzen Sylvin KCl und Carnallit $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Aus letzteren werden große Mengen Mineraldünger für die Landwirtschaft hergestellt.

Kalium hat 3 natürliche Isotope: Kalium-39 (93,2581 Gewichtsprozent), Kalium-41 (6,7302 %) und Kalium-40 (0,0117 %). Kalium-40 zerfällt mit einer Halbwertszeit von 1,28 Ga und einer Übergangswahrscheinlichkeit von 89,3 % unter Emission von Betastrahlung (1,31 MeV) zu stabilem Calcium-40 und mit einer Übergangswahrscheinlichkeit von 10,7 % unter K-Einfang und Emission von Gammastrahlung (1,46 MeV) zu stabilem Argon-40. Kalium-40 bildet somit keine Zerfallsreihe. 1 g K-nat enthält 31 Bq K-40.

Trotz des kleinen Anteils von Kalium-40 im natürlichen Kalium K-nat und trotz der sehr langen Halbwertszeit kommen wegen der häufig hohen Gehalte an Kalium ansehnliche Aktivitäten zusammen. So enthält ein Boden (obere 5 cm) im Schweizer Mittelland im Trockengewicht:

360 Bq/kg Kalium-40, entsprechend 1,2 Gewichts% Kalium-nat.; 24 Bq/kg Blei-214 und 20 Bq/kg Bismut-214, entsprechend 1,9 ppm Uran-nat; 25 Bq/kg Actinium-228, entsprechend 6,3 ppm Thorium-nat. (1 ppm = 1 Gramm pro Tonne).

Ein chemisches Element ohne Zusatz oder mit dem Zusatz "nat" ist als das Element im natürlichen Isotopengemisch zu verstehen.

Zur gesamten natürlichen Strahlenexposition des Menschen trägt Kalium-40 circa 12 % bei. Ein junger Mann enthält circa 150 g Kalium, die Gesamtkörperaktivität beträgt ca. 4600 Bq Kalium-40. Aktive Hochleistungssportler mit mehr Muskelmasse enthalten mehr Kalium und sind auch radioaktiver. Die K-40 Aktivität einer 20 g Packung Pottasche K_2CO_3 , „ein vorzügliches Treibmittel für Lebkuchentaler“, lässt die Anzeige eines Kontaminationsmonitors von 15 auf 38 Impulse pro Sekunde ansteigen und ist somit leicht messbar.

1 L Milch mit 1,4 g Kalium hat eine Aktivität von 43 Bq Kalium-40. Vor mir lagen damals Kartons „Domspitz frische Vollmilch“ der Milchwerke Regensburg vom November und Dezember 1986, also 6 Monate nach dem Ereignis von Tschernobyl, mit dem Aufdruck „kleiner 15 Bq Cs“. Anscheinend beruhigend. Für Kleinkinder sind jedoch wegen ihres anderen Stoffwechsels andere Dosiskoeffizienten als für Erwachsene berechnet worden. Für Kleinkinder gilt: $12 \mu Sv/kBq$ für Cs-137 und $42 \mu Sv/kBq$ für K-40. K-40 bewirkte bei der genannten Milch die höhere Strahlenexposition.

Ein Erlebnis nach Tschernobyl war der Besuch von niederbayerischen Jungbauern, die ihren letzten Sack Zitronenmelisse brachten. Aufgrund der hohen Aktivitäten, die selbst ernannte Strahlenschützer „gemessen“ hatten, hatten sie die Zitronenmelisse untergepflügt. Eine nuklidspezifische Messung ergab aber: Der Hauptanteil der Aktivität stammte von natürlichem Kalium-40 und nur ein harmlos kleiner Teil von künstlichem Cäsium-137.

Vorkommen von Thorium in Natur und Technik

Thorium kommt natürlich als Thorium-232 mit Thorium-228 im radioaktiven Gleichgewicht vor. Beide sind Alphastrahler, die über Alpha- und Beta-Zerfälle in stabiles Blei-208 übergehen, siehe Abbildung 2. Zudem treten die Thoriumisotope Th-234 und Th-230 in der Zerfallsreihe von Uran-238 auf.

Thorium-nat ist in der äußeren Erdkruste mit durchschnittlichen Gehalten von 8,5 ppm (8,5 g/t Gestein) häufiger als Uran-nat. mit 2,7 ppm. Das Verhältnis der Gehalte entspricht dem Verhältnis ihrer Halbwertszeiten. Die Aktivitätskonzentrationen sind daher ungefähr gleich und betragen 33 Bq/kg

über die Erdkruste gemittelt. Thorium spielt aber radioökologisch aus zwei Gründen eine kleinere Rolle als Uran:

Thorium kommt in der Natur nur vierwertig und in schwerlöslichen Verbindungen vor. Es bildet wenige eigene Minerale. Die Hauptmenge ist als Mischkristall in chemisch und mechanisch sehr stabilen Mineralen wie Monazit CePO_4 und Zirkon ZrSiO_4 eingebaut. Es gelangt daher kaum in den Kreislauf von verwitterten Mineralen zum Boden und über die Pflanze zum Menschen. Zirkon und Monazit sind akzessorische Minerale im Granit. Bei dessen Verwitterung werden sie Bestandteil von Schwermineralsanden. Diese werden in großem Stil abgebaut wegen ihres Gehaltes an Rutil TiO_2 und Ilmenit FeTiO_3 zur Produktion von Titanweiß TiO_2 für weiße Malerfarbe. In gewöhnlichem Quarzsand können durch Sieben sehr geringe Mengen von radioaktivem Monazit und Zirkon in der feinsten Siebfraktion deutlich angereichert werden. Monazit wird auch vom Magnetscheider abgetrennt oder auf Grund seiner höheren Dichte. Thorium findet sich ferner in Bauxit und somit im Rückstand der Aluminiumproduktion, dem Rotschlamm. Rotschlamm wurde bei der Ziegelproduktion beigegeben und zur Rotfärbung von Sportplätzen verwendet.

Zur Zerfallsreihe von Thorium gehört das gasförmige Radon-220, Thoron genannt, mit der sehr kurzen Halbwertszeit von 55 s. Diese Zeit reicht nicht aus, um größere Mengen Thoron aus Gesteinen und Böden in die Atmosphäre und in die Lunge des Menschen gelangen zu lassen.

Obwohl Thorium sich spalten lässt – es gibt Thoriumreaktoren – hat es für die Kernenergie nicht die Bedeutung von Uran. Thoriumerze lassen sich nur schwer zu spaltbarem Material aufbereiten. Für die Kernenergienutzung durch Uranspaltung waren zudem wesentliche Entwicklungsarbeiten schon vorher für militärische Zwecke geleistet worden.

Thorium-232 und seine gammastrahlenden Zerfallsprodukte Blei-212, Bismut-212 und Thallium-208 verursachen die Radioaktivität mehrerer technischer Produkte. Frühere Glühstrümpfe für Gasbrenner (Camping-Artikel) enthielten Thoriumnitrat, das durch Abbrennen in Thoriumdioxid umgewandelt wird. Letzteres (Schmelzpunkt 3220°C) ver-

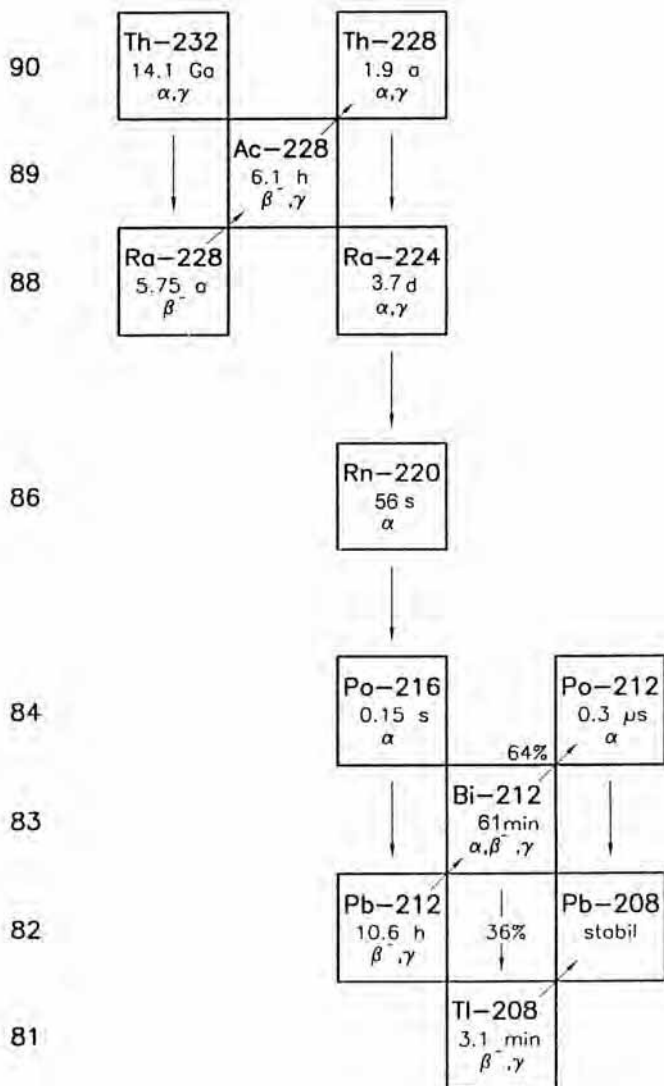


Abb. 2: Zerfallsreihe von Thorium-232.

Links steht die Ordnungszahl, unter dem Nuklid dessen Halbwertszeit und die Art der auftretenden Strahlung.

bessert die Leuchtkraft der Flamme. Heute enthalten Gasglühstrümpfe kein Thorium mehr. Thorium verbessert auch die Zündfähigkeit von Schweißelektroden. Zirkonsand, der Thorium enthalten kann, wird in der Gießereitechnik wegen seiner guten Wärmeleitfähigkeit als Formsand für Schreckguss verwendet. Zirkoniumdioxid und Zirkoniumsilikat sind hochfeuerfeste Keramikwerkstoffe. Bestehen diese ohne chemische Aufbereitung aus den mineralischen Rohstoffen Baddeleyit ZrO_2 oder Zirkon $ZrSiO_4$ gewisser thoriumhaltiger Lagerstätten, so findet man die genannten Radionuklide im technischen Produkt. Chemisches Zirkoniumdioxid dreier Hersteller wurde von uns untersucht, ein Produkt enthielt deutliche Mengen von Uran und Thorium. Aus kompakten Körpern tritt allerdings wegen der hohen Selbstabsorption nur wenig Strahlung nach außen. Thoriumdioxid und -fluorid diente auch zur Vergütung von optischen Linsen und Spiegeln.

Älteres (vor ca. 1950), durch Ceroxid zu einem schönen Gelb gefärbtes Glas kann durch Thorium radioaktiv sein, da die chemische Trennung der beiden verwandten Elemente früher nur unvollständig war.

Vorkommen von Uran in der Natur

Uran kommt in der Natur als Isotopengemisch von drei Radionukliden vor: Uran-238 99,275 %, Uran-235 0,720 % und Uran-234 0,005 %, die sich kernphysikalisch stark unterscheiden. Uran-nat ist in der äußeren Erdkruste mit durchschnittlichen Gehalten von 2,7 ppm (g/t Gestein) enthalten. Es ist ungefähr gleich häufig wie Zinn und viel häufiger als Silber (0,06 ppm) oder gar Gold (0,004 ppm). Es lohnt, die speziellen chemischen und kristallchemischen Eigenschaften von Uran näher zu besprechen, denn sie haben weit reichende Folgen: einerseits eine weite Verbreitung von Uranmineralen und andererseits örtlich hohe Anreicherungen, d.h. viele abbauwürdige Lagerstätten.

Chemisch kommt Uran in zwei beständigen Wertigkeitsstufen vor, die vierwertige wasserunlösliche und die sechswertige wasserlösliche. Die ältesten Uranlagerstätten stammen aus dem Proterozoikum, dem Erdzeitalter, bevor („proteros“) es Sauerstoff in der Atmosphäre und Leben („zoe“) gab, vor 1 – 2 Ga. In geologischen Zeiträumen ist solches Uran mit

sauerstoffhaltigem Wasser in Kontakt gekommen und oxidiert und mobilisiert worden. Kommen solche nun uranhaltigen Wässer in Kontakt mit Reduktionsmitteln, etwa organischem Kohlenstoff, so fällt Uran als vierwertiges in Verbindungen wieder aus. Kohlenflöze, sedimentäre (tierische) Phosphatlager, Schwarzschiefer und Sandstein mit organischen Resten wirken als geochemische Fallen für Uran und können zu abbauwürdigen Lagerstätten führen. Sie sind die Ursache für Radioaktivität in Düngemitteln mit Rohphosphaten und sogar Fossilien. Uran findet sich wie Thorium in deutlich messbaren Gehalten auch in Bauxit, dem Rohstoff für die Aluminiumgewinnung, und dessen Abfallprodukt Rotschlamm.

Kristallchemisch hat Uran einen großen Ionenradius und kann deshalb nur wenige andere große Ionen, wie Zirkonium, Thorium und die Lanthaniden im Kristallgitter von Mineralen ersetzen und sich nur begrenzt als Mischkristall „verstecken“. Vierwertiges Uran bildet eigene primäre Minerale wie Uraninit UO_2 , Pechblende UO_2 bis U_3O_8 (mit U^{4+} und U^{6+}), Coffinit USiO_4 oder Brannerit UTi_2O_6 . Der Name Pechblende stammt von der schwarzen Farbe und den ersten Vorkommen gemeinsam mit Silbererzen. In den alten Bergwerken im böhmisch-sächsischen Erzgebirge nahm mit zunehmender Teufe der Silbergehalt ab, die Bergleute hatten "Pech". Fachleute unterscheiden schlecht kristalline Pechblende und gut kristallisierten Uraninit. Pechblende ist das wichtigste Uranerz. Es findet sich in verschiedenen Typen von Lagerstätten, u. a. auch hydrothermal mit Flussspat, Fluorit, CaF_2 , so in Ostbayern im früher wirtschaftlich bedeutenden Flussspatrevier von Nabburg-Wölsendorf. Pechblende fällt schon durch seine hohe Dichte bis zu 10 g/cm^3 auf. Quarz SiO_2 hat die Dichte $2,6 \text{ g/cm}^3$, Schwespat BaSO_4 $4,5 \text{ g/cm}^3$. Uranmetall hat wie reines Gold die Dichte 19 g/cm^3 .

Vierwertiges Uran kann in das Kristallgitter von Mineralen eingebaut sein, die in geringen Mengen weit verbreitet sind, etwa als akzessorische Minerale im Granit. Zu nennen sind vor allem Zirkon ZrSiO_4 und Monazit CePO_4 . Technisch genutzte Zirkonsande (Zirkon und Baddeleyit ZrO_2) sind deutlich radioaktiv. Auch manche als Edelsteine genutzte klare Zirkoneinkristalle sind radioaktiv und sollten in Ringen

nicht ohne Metallunterlage getragen werden. Die Oberflächendosis der Haut könnte sehr hoch werden.

Sechswertiges Uran, insbesondere als Uranylion (UO_2)²⁺, bildet über 200 sekundäre, meist farbenfrohe Minerale, die zum Teil fluoreszieren (siehe Kapitel 4). Zu nennen sind der gelbe Autunit (Calciumuranylphosphat), der gelbe Uranocircit (Bariumuranylphosphat), der grüne Torbernit (Kupferuranylphosphat) und der gelbe Carnotit (Kaliumuranylvanadat). Diese und andere, oft durch Verwitterung entstandenen Uranminerale können dünne Krusten, "Anflüge", "erdige" Beläge bilden, die bei sorgloser Handhabung zu Kontaminationen führen. Solche Handstücke sollten z.B. in Vorträgen nur geschützt vor direkter Berührung herumgereicht werden.

Uran als chemisches Element wurde von M. H. Klaproth 1789, im Jahr der Französischen Revolution, entdeckt, erhielt seinen Namen vom kurz vorher entdeckten Planeten Uranus und revolutionierte 150 Jahre später die Erzeugung von Energie. Im 19. Jahrhundert wurden Uranerze im böhmischen Erzgebirge in den früher in geringerer Teufe mehr silber- und kobalthaltigen Bergwerken für die Farbenproduktion abgebaut, insbesondere in Jachymov (Joachimsthal).

Zur Kernphysik von Uran

Von den in der Natur vorkommenden Uranisotopen ist Uran-235 (Anteil 0,7 %) für die Kernenergie und Uran-238 (Anteil 99,3 %) durch einige Tochternuklide wie Radium-226 und die alphastrahlenden Radonzerfallsprodukten für die Radioökologie von größter Bedeutung. Uran-235 mit 92 Protonen und der ungeraden Zahl von 143 Neutronen lässt sich durch langsame, sogenannte "thermische" Neutronen spalten, siehe Kapitel 11. Uran-238 mit 92 Protonen und der geraden Zahl von 146 Neutronen ist gegen Spaltung stabiler. Für Brennelemente in Kernreaktoren wird der Gehalt von Uran-235 auf etwa 3 % angereichert. Das dabei in 6-8-facher Menge anfallende abgereicherte Uran (depleted uranium DU) mit ca. 0,3% U-235 hat im wesentlichen die gleiche spezifische Aktivität wie U-nat im natürlichen Isotopenverhältnis. Verwendung findet DU für Abschirmungen, Ausgleichsgewichte und panzerbrechende Munition.

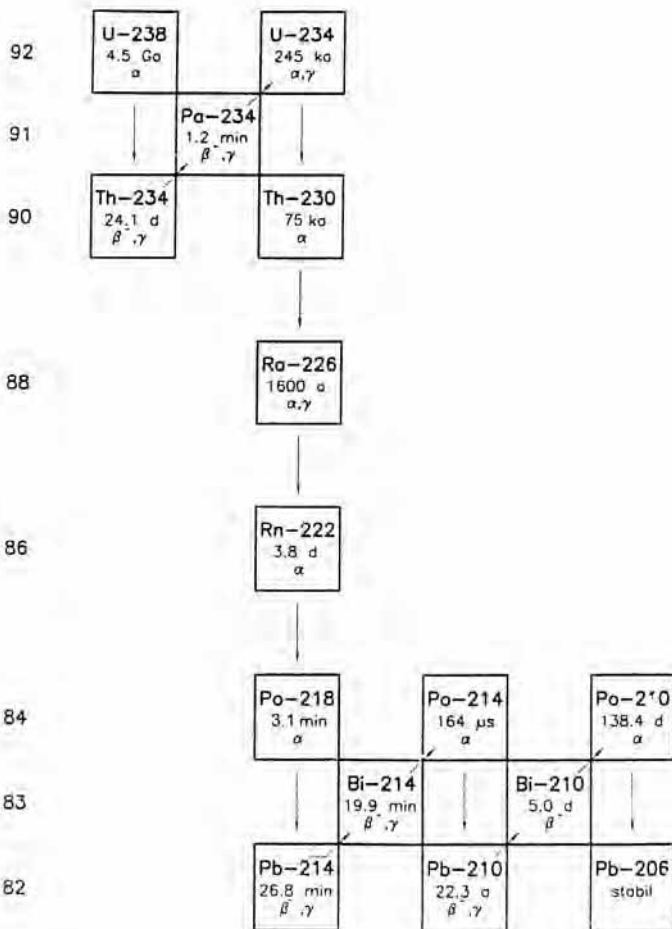


Abb. 3: Zerfallsreihe von Uran-238.

Links steht die Ordnungszahl, unter dem Nuklid dessen Halbwertszeit und die Arten der auftretenden Strahlung.

Mit Uran-238 beginnt eine Zerfallsreihe. Sie führt über 8 Alphazerfälle (Erniedrigung der Nukleonenzahl um jeweils 4 und der Protonenzahl um 2) und 6 Betazerfälle (jeweils konstante Nukleonenzahl) zum stabilen Blei-206. Man rechne $238 - 206 = 32 = 4 \cdot 8$.

Im radioaktiven Gleichgewicht enthält eine natürliche Uranprobe, etwa in einem geologisch alten, nicht verwitterten Mineral, alle Zerfallsprodukte der Reihe in gleicher Aktivitätskonzentration. Radioaktives Gleichgewicht liegt aber meistens nicht vor. Ein Grund dafür sind unterschiedliches chemisches Verhalten von Uran und Radium bei lösender Verwitterung und die Exhalation von Radon.

Radiogen, d.h. beim radioaktiven Zerfall entstanden, ist fast alles irdische Helium, nämlich He-4. Die bei allen Alphazerfällen emittierten Alphateilchen sind zweifach positiv geladene Heliumkerne, die durch Einfangen von Elektronen zum elektrisch neutralen und stabilen Edelgas Helium werden. In der Luft ist Helium zu 0,00046 Volumenprozent, entsprechend 0,000072 Gewichtsprozent enthalten. Es stammt zum größten Teil aus Uranmineralien. Eine Erdgasquelle in Wyoming z.B. enthält 2 % Helium, stammend aus nahen Urananreicherungen. Aus dieser Quelle wird Helium technisch gewonnen.

Uran und Radium in Chemie, Kunst, Medizin und Technik

Radiometrisch unterscheiden sich Uranminerale aus der Natur und Uranchemikalien aus dem Labor sehr stark. Erstere enthalten in der Regel alle Nuklide der Zerfallsreihe, insbesondere auch das stark alpha- und gammastrahlende Radium sowie dessen Zerfallsprodukte, Blei- und Wismutisotope mit hoher Gammaenergie. Bei der chemischen Aufbereitung von Uranmineralen (Erzen) wird vor allem Radium abgetrennt. Bei der Aufbereitung wird das unlösliche vierwertige Uranion durch Oxidationsmittel und Schwefelsäure als sechswertiges Ion in Lösung gebracht. Radium verhält sich chemisch wie Barium, unter dem es im Periodensystem steht. Daher ist Radiumsulfat sehr schwer löslich und geht mit anderen Filterrückständen auf Halde, die zum Umweltproblem werden können. Aus der neutralisierten, vom Feststoff getrennten Lösung wird Uran mit Ionenaustauschern herausgeholt. Vom Ionenaustauscher wird Uran mit Salpetersäure wieder ausgewaschen und aus dieser Lösung mit Ammoniak gefällt als Ammoniumdiuranat $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$, dem so genannten "yellow cake" (gelber Kuchen), der durch

Calcinieren zur Handelsware "U₃O₈" wird. Uranchemikalien sind somit frei von Radium und damit ohne Exhalation von Radon und ohne Emission von weitreichender Gammastrahlung. Uranchemikalien sind Alphastrahler vom Uran-238 und Beta-/Gammastrahler vom Thorium-234 mit 24 d Halbwertszeit und vom Protactinium-234, siehe Abb. 3.

In der 1. Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde gemahlene Pechblende von böhmischen Porzellanmanufakturen in Pirkenhammer und Schlaggenwald für Inglasur-Schwarzumdruck-Zierbilder auf Porzellan verwendet. Pechblende ist im Gammasspektrometer an den Linien von Ra-226, Pb-214 und Bi-214 zu erkennen.

Ab der 1. Hälfte des 19. Jahrhunderts und bis heute wird Uran für Uranglas verwendet. Schon eine geringe Menge von Uran in Glas lässt es im UV-Licht (der Sonne oder einer Lampe), lebhaft warm gelb-grün fluoreszieren. Im Biedermeier waren solche "annagelben" oder "annagrünen" Gläser sehr beliebt. Heute sind Uranglaswaren noch auf Flohmärkten oder bei Antiquitätenhändlern erhältlich, in den USA und UK sind sie als vaseline oder canary glass bekannt.

Urangläser sind unbedenklich. Uran wird weder aus dem Glas gelöst, wie z.B. Blei aus Keramikglasuren, noch ist die Strahlung gefährlich, weder wegen ihrer Intensität noch wegen ihrer Energie. Es fehlt ihr die harte Strahlung der Radiumzerfallsprodukte. Urangläser eignen sich geradezu für einen Empfindlichkeitstest von Strahlungsmessgeräten. Gleichwohl ist aus heutiger Sicht des Strahlenschutzes die Verwendung von Uran zur Färbung von Glas und Glasuren wegen der Exposition der Arbeiter nicht mehr gerechtfertigt.

Glas wird durch Zusätze, früher meist Knochenasche, trüb und weiß und heißt dann Beinglas. Geringe Zusätze von Uran geben Beinglas den Schimmer von Perlmutter - gut für Knöpfe - oder den gelblichen Glanz von Elfenbein - gut für Perlenketten. Knöpfe aus Beinglas lassen sich mit einer UV-Lampe in Großmutter's Knopfschachtel finden und mit Geiger-Müller-Zähler verifizieren. Durch zusätzliches Kupfer erhält Beinglas eine apfelgrüne Färbung, sehr begehrt, da vom gleichen Farbton wie der seltene Halbedelstein Chrysopras, einem feinstkristallinen, nickelhaltigen Quarz.

Uran in Glasurpigmenten auf Keramik liefert je nach oxidierendem oder reduzierendem Brand, der Zusammensetzung der Glasur und der Brenntemperatur rote, gelborangene, zitronengelbe (z.B. UO_3), beige, grüne, braune, violette oder pechschwarze Farben (z.B. UO_2). Eine große Vielfalt von uranglasierter Keramik wurde in vielen Ländern bis 1970 und später hergestellt und findet sich heute auf Flohmärkten. Bis in die frühen 80er Jahre waren auch mit Uran gefärbte Dekorfliesen im Handel, die prächtige Autoradiographien liefern, siehe Abbildung 24. Braunschwarze Uranfarben gibt es sogar auf Porzellan-Tierfiguren.

Der Urangehalt von Glasuren auf solcher Keramik ist deutlich höher als von Gläsern. So bedarf es nur einer dünnen Glasur, um einen starken Alphastrahler vom Uran-238 und einen starken Beta- und Gammastrahler vom Thorium-234 zu erhalten. Selbst Bruchstücke eignen sich für Schulexperimente, und für große Objekte genügen wenige mm Glas oder Plexiglas zur vollständigen Abschirmung der Strahlung.

Für medizinische Anwendungen zur Behandlung maligner Tumore waren Radium und Radon in Goldröhrchen als starke Quellen, etwa in Form von Implantaten in Anwendung, heute jedoch durch andere Strahler ersetzt, die günstigere Strahlungsenergien und Halbwertszeiten haben. Zur Behandlung maligner Tumore dienen zunehmend technische Strahlungsquellen, insbesondere Linearbeschleuniger.

Radiumverbindungen als Zusatz zu dotiertem Zinksulfid oder anderen "Phosphoren" lassen diese zu Leuchtfarben werden (siehe Lumineszenz), wie sie lange Zeit für Uhrenziffernblätter und Instrumentenanzeiger, z.B. beim Kompass, verwendet wurden. Nach schweren Gesundheitsschäden bei den Leuchtfarben-Arbeiterinnen (Ziffernblatt-Malerinnen) durch Inkorporation von Radium wurden radiumhaltige Leuchtfarben verboten.

Bei der Gewinnung von Erdöl und Erdgas können erhöhte natürliche Radiumgehalte in Schlämmen und Rohrverkrustungen auftreten. Diese werden dann nach Anlage XII der Strahlenschutzverordnung zu überwachungsbedürftigen Rückständen.



Abb. 4:
Annagelber Uranglas-Becher
 Höhe 11,5 cm, Durchmesser
 8,5 cm, vermutlich Remake
 CSSR, 1946-1948.



Abb. 5:
**Keramik-Vase mit roter Uran-
 glasur**
 Höhe 22 cm, Öffnung und Fuß
 Durchmesser 11 cm, Villeroy &
 Boch, vermutlich Dresden, mit
 Stempel "Uran".



Abb. 6:
Fliese mit roter Uranglasur
 20x20 cm, Bassano Artisto
 Tiles, Padova, um 1970, Auto-
 radiographie s. Abb. 24, S.122.



Abb. 7:
**Keramik-Dose mit gelber
 Uranglasur**
 Höhe 9 cm, 19x12 cm, Made in
 Czechoslovakia.

Seit 1950 ist Uran mit schwankenden Produktionsziffern der Rohstoff der Kernenergie. Mit den bei der Kernspaltung im Reaktor eines Kernkraftwerkes entstehenden und in den

Brennelementen und den Abluftfiltern bei bestimmungsgemäßem Betrieb weitestgehend zurückgehaltenen, bei Stör- und Unfällen aber auch austretenden künstlichen Radionukliden müssen wir uns als nächstes befassen.

Künstliche Radionuklide bei der Kernspaltung

Man unterscheidet Kernspaltung und Kernzerfall (Kernumwandlung). Kernzerfall ist nur mit geringer oder keiner Änderung der Nukleonenzahl und mit Emission von Alpha-, Beta- und/oder Gammastrahlung verbunden und läuft immer spontan ab, ohne äußere Einwirkung. Kernspaltung benötigt spaltende Neutronen. Es gibt allerdings auch eine spontane Kernspaltung, bei Uran-235 ($Z = 92$) mit sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit. Die sehr seltene Spontanspaltung von Uran-235 führt in umgebenden Mineralen zu Spaltspuren, die über Alter und Temperatur Auskunft geben. Bei den Elementen mit $Z > 92$ (Neptunium, Plutonium, Americium und Curium) nimmt die Eintrittswahrscheinlichkeit für Spontanspaltung zu, siehe Kapitel 11 Neutronen.

Bei der Kernspaltung im Kernreaktor kommt es zur Bildung vieler künstlicher Nuklide, meistens instabiler, also Radionuklide mit sehr kurzer bis sehr langer Halbwertszeit. Außerdem entstehen durch Neutroneneinfang neue, überschwere Elemente, die "Transurane", z.B. Plutonium mit seinen verschiedenen Isotopen und Americium-241. Die Häufigkeitsverteilung der Spaltprodukte bei der Spaltung von Uran-235 hat den Verlauf einer Doppelhöckerkurve (siehe Abbildung 8). Man findet hier die Namen der Radionuklide, wie sie von den Veröffentlichungen über die Nuklidzusammensetzung abgebrannter Brennelemente her bekannt sind und zum Teil auch von der Nuklidanalyse des Tschernobyl-Fallouts: Krypton-85, Strontium-90, Zirkonium-95, Ruthenium-106, Iod-131, Cäsium-137 und Barium-140.

Zu diesen künstlichen Radionukliden ist hier zu sagen, dass sie ein wegen ihrer hohen spezifischen Aktivität höchst unerwünschtes, aber naturgesetzlich unvermeidbares "Nebenprodukt" der Kernenergieerzeugung sind.

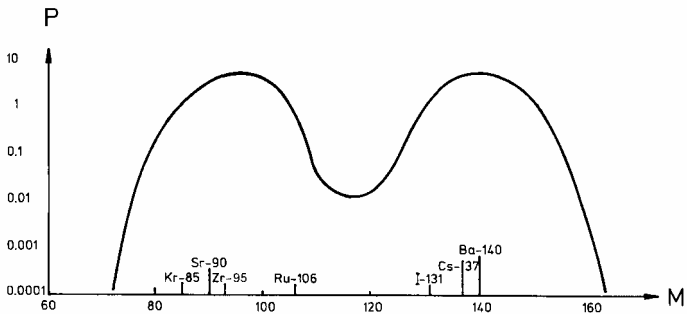


Abb. 8: Häufigkeitsverteilung der Spaltprodukte von Uran-235. In (Ausbeute P) vs Nucleonenzahl M. Sog. Doppelhöckerkurve. Man beachte die bekannten Radionuklide Kr-85, Sr-90, Ru-106, I-131, Cs-137.

Kosmische Strahlung und Höhenstrahlung

Unsere feste Erde mit ihren Mineralen und diese mit ihren natürlichen Radionukliden ist *eine* Quelle ionisierender Strahlung, der terrestrischen Strahlung. Man nehme ein Instrument zur Messung der Gamma-Ortsdosisleistung und stelle sich vor eine nicht zu niedrige Brücke (Punkt 1), auf die Brücke über der Erde (Punkt 2) und auf die Brücke über dem Fluss (Punkt 3, das Messgerät ist über das Gelände zu halten). Vom Messpunkt 1 zu 2 nimmt die terrestrische Strahlung (Ortsdosisleistung) wegen der Entfernung von der Erde ab, und von 2 nach 3 noch zusätzlich wegen der Abschirmung durch das Wasser.

1912 war es eine große Überraschung, als Victor F. Heß (1883 - 1964, Nobelpreis 1936) bei seinem bemannten Ballonflug mit einfachen Messinstrumenten nach anfänglicher Abnahme der Intensität der terrestrischen Strahlung ab circa 2000 m bis zu seiner Endhöhe von 5300 m eine starke Zunahme der Strahlungsintensität beobachtete. Es war die Entdeckung einer neuen Quelle stark ionisierender Strahlung, der Höhenstrahlung.

Die Entschlüsselung dieser zunächst rätselhaften Strahlung lieferte wesentliche Erkenntnisse zur Kosmologie, Hoch-

energie- und Kernphysik. Sehr hilfreich hierfür ist das terrestrische Magnetfeld. Es wirkt wie ein riesiges Spektrometer und zerlegt ("analysiert") die sehr inhomogene Strahlung nach Ladung, Masse und Energie der Teilchen. Messungen in größerer Höhe über die Atmosphäre hinaus, über längere Zeiträume und mit neuartigen Messinstrumenten im Rahmen der Luft- und Raumfahrt ergaben ein immer besseres Verständnis der kosmischen Strahlung.

Heute wissen wir: Die primäre kosmische Strahlung außerhalb der Erdatmosphäre besteht zu 92 % aus Protonen, 6 % aus Heliumkernen sowie Elektronen, schweren Kernen, Ionen und Gammaquanten von hoher und höchster Energie bis zu 50.000 MeV = 50 GeV. Durch Wechselwirkung mit Gasatomen der Atmosphäre entstehen dort als Sekundärteilchen Protonen, Neutronen, Mesonen, Elektronen, Positronen und Gammaquanten. Man nennt sie Höhenstrahlung. Von ihr werden Tritium, Kohlenstoff-14 und Beryllium-7 erzeugt.

Kohlenstoff-14

Durch die Reaktion $N-14(n,p)C-14$ kosmischer Neutronen mit Stickstoff-14 entsteht in der Erdatmosphäre Kohlenstoff-14. Er hat eine Halbwertszeit von 5730 a. Seine Zerfallsrate beträgt gegenwärtig in einer frischen Probe 16 Zerfälle pro Minute und pro g Kohlenstoff. Kosmogener Kohlenstoff reagiert rasch mit atmosphärischem Sauerstoff zu radioaktivem CO_2 . Dieses nimmt wie das normale, nichtradioaktive CO_2 am biologischen Kreislauf teil. Die Zeit für den Austausch beträgt etwa 3 Jahre. Schwankungen der Produktionsrate von C-14 als Folge von Schwankungen der Intensität der kosmischen Strahlung werden mit dieser Verzögerung beobachtbar. Dies wird bei der Altersbestimmung nach der C-14 Methode berücksichtigt.

Der Mensch enthält inkorporiert etwa 4000 Bq Kohlenstoff-14, das ist etwa die gleiche Aktivität wie von Kalium-40. Der Beitrag von C-14 zur inneren Strahlenexposition ist aber sehr viel geringer als der von K-40.

Natürlicher Alkohol aus der Gärung enthält mehr C-14 als Synthesealkohol aus Erdölprodukten. Darauf beruht eine

amtliche Methode zur Unterscheidung von echtem und unechtem Kornschnaps.

Röntgenstrahlung

Von den drei großen Gruppen ionisierender Strahlung ist die Röntgenstrahlung die zuerst entdeckte. Es ist eine technisch erzeugte Strahlung, wenn man von "Röntgensternen" absieht, während die Strahlung von Radionukliden und die kosmische Strahlung "natürlich" sind. Röntgenstrahlung ist eine rein elektromagnetische Strahlung, allerdings in einem weiten Energiebereich von keV bis MeV.

Das wichtigste Verfahren, Röntgenstrahlung zu erzeugen, ist die Beschleunigung von Elektronen und deren rasches Abbremsen in einer metallischen Anode, auch Antikathode oder Target genannt. Die Elektronen kommen aus einer Glühkathode und werden in einer evakuierten Röhre in einem elektrischen Feld beschleunigt. Die elektrische Leistung einer Röntgenröhre ist das Produkt aus Anodenstrom I und Beschleunigungsspannung U . Technische Werte sind z.B. $40 \text{ mA} \cdot 50 \text{ kV} = 2 \text{ kW}$. Von dieser ansehnlichen Leistung wird allerdings über 99 % in Wärme umgesetzt, daher der Name Brennfleck für die Stelle des Targets, wo die Elektronen aufprallen und Röntgenstrahlung entsteht. Das Targetmaterial ist in der Regel ein hoch schmelzendes Metall wie Wolfram (Schmelzpunkt 3410° C) oder ein gut Wärme leitendes wie Kupfer (Schmelzpunkt 1083° C), das von innen mit Wasser gekühlt wird. Für hohe Leistungen im Pulsbetrieb (medizinische Anwendungen) sind Drehanodenröhren ohne Wasserkühlung im Einsatz.

Nur wenige Promille der kinetischen Energie der Elektronen werden in Energie von Röntgenstrahlung umgesetzt, davon der größere Teil in Bremsstrahlung und der kleinere Teil in charakteristische Eigenstrahlung. Die Bremsstrahlung hat ein kontinuierliches Energiespektrum. Die höchste Frequenz ν ergibt sich aus der Quantenbeziehung Energie

$$E = h \cdot \nu$$

h ist das Planck'sche Wirkungsquantum. Der Quantenenergie kann man die elektrische Energie

$$E = e \cdot U$$

gleichsetzen, e die Elementarladung, U die Beschleunigungsspannung. Die Ausbeute an Röntgenstrahlung steigt mit der Ordnungszahl Z des Targets und mit $U^2 \cdot I$, wobei I für den Anodenstrom steht. Die untere Frequenz ergibt sich aus der Absorption im Fenster der Röntgenröhre, das deshalb möglichst dünn ist und aus Beryllium mit der Ordnungszahl 4 besteht. Die Erklärung für die Bremsstrahlung liefert schon die klassische Elektrodynamik: Beschleunigte elektrische Ladungen, im vorliegenden Fall im Kernfeld des Anodenmaterials, strahlen ein elektromagnetisches Feld ab. Das Abbremsen am Target ist eine negative Beschleunigung. Elektromagnetische Strahlung wird auch im Synchrotron erzeugt, infolge einer Kreisbewegung von Elektronen.

Für viele Zwecke am interessantesten ist die charakteristische Eigenstrahlung des Targets. Durch die aufprallenden Elektronen werden Elektronen aus kernnahen Schalen der Elektronenhülle der Targetatome "herausgeschlagen". Die freien Plätze werden von Elektronen äußerer Schalen wieder aufgefüllt. Die Energiedifferenz wird als monochromatische, elektromagnetische Strahlung frei. Man spricht z.B. von Kupfer K-alpha Strahlung, wenn der Elektronenübergang zwischen K und L Schale von Kupfer erfolgt und von K-beta Strahlung beim Übergang zwischen K und M Schale. Die Anregungsenergie beträgt für Kupfer 8,98 keV, die Wellenlängen 154 pm (K-alpha) und 139 pm (K-beta). Für Wolfram beträgt die Anregungsenergie 69,48 keV, die Wellenlängen 21 pm und 18 pm (pm = Pikometer = 10^{-12} m). Die angeführten Zahlenwerte sind elementspezifisch.

Röntgenstrahlung erfährt bei Wechselwirkung mit Materie ferner eine Streuung, d. h. eine Richtungsänderung. Daran ist beim Strahlenschutz zu denken und nicht nur die direkte Strahlung, sondern auch die Streustrahlung abzuschirmen. In einer mit Röntgenstrahlung genügender Energie bestrahlten Probe wird - wie vorher durch die kinetische Energie von Elektronen - Röntgenstrahlung erzeugt: die Fluoreszenzstrahlung. Gefährlich ist die Eigenschaft der Fluoreszenz, weil durch ungeschützte Strahlengänge und Bestrahlung von Proben und sogar Abschirmungen diese sekundäre Röntgenstrahlung entsteht, wo der Nichtfachmann sie nicht erwartet. Bei Wegnahme der primären Röntgenstrahlung

verschwindet selbstverständlich auch die sekundäre Röntgenstrahlung.

Die am meisten genutzte Eigenschaft von Röntgenstrahlung ist ihr hohes Durchdringungsvermögen für Materie. Es wird in Medizin und Technik für Durchleuchtungen benutzt. Aus den Kreisen dieser Anwender stammt der größte Teil der beruflich strahlenexponierten Personen. Dies ist übrigens eine Begründung dafür, dass in dieser Schrift "Radioaktivität und Strahlungsmessung" auch die Röntgenstrahlung enthalten ist. Weitere Eigenschaften, wie die Beugung und Interferenz von Röntgenstrahlen etwa bei der Kristallstrukturanalyse werden im Kapitel 13 besprochen.

Störstrahler sind Geräte, die zu einem anderen Zweck als zur Erzeugung von Röntgenstrahlen betrieben werden, in denen aber Bremsstrahlung entsteht. Dazu gehören alle Geräte mit Elektronenstrahlen (Kathodenstrahlröhren) ab ca. 10 keV, somit Fernsehgeräte, Oszilloskope, Bildschirme (sofern nicht LCD), Gleichrichterröhren, Elektronenschweißgeräte und Radaranlagen. Besonders ältere Geräte sind mit einem empfindlichen Messgerät zu prüfen, ob die vorhandene Abschirmung genügt oder ob Strahlung nach außen dringt und Strahlenschäden verursachen kann. Bei Radargeräten sind in der Vergangenheit Fälle bekannt geworden.

Linearbeschleuniger

Mit Hochfrequenz betriebene Elektronenlinearbeschleuniger (Lineac) zur Erzeugung hochenergetischer Elektronen (bis 18 MeV) und ultraharter Photonen (bis 15 MeV) sind die heute am weitest verbreiteten Teletherapieanlagen. Sie ersetzen Co-60 Quellen in der perkutanen Strahlentherapie von Tumoren. Im Lineac werden Elektronen aus einer Kathode durch ein Loch in der Anode gepulst in ein Rohr emittiert. Durch Anlegen einer hochfrequenten Wechselspannung an zwei Gruppen parallel geschalteter, hintereinander liegender Rohrlinsen wird ein stehendes Wechselfeld erzeugt, in dem geladene Teilchen stufenweise beschleunigt werden. Bremsstrahlung wird durch Fokussierung des Elektronenstrahls auf ein Target erzeugt.

Im vorhergehenden Absatz wurden Photonen genannt. Im Dualismus Welle-Korpuskel betrachtet man elektromagnetische Strahlung als Welle oder als Quanten, Photonen (Lichtteilchen) der Ruhemasse Null. Bei der im Text behandelten Röntgenstrahlung und Gammastrahlung wird dann von Photonen oder Photonenstrahlung gesprochen, wenn es um ihre Energie (Quantenenergie) oder um ihre Wechselwirkung mit Materie (Schwächung, Absorption) geht.

Linearbeschleuniger haben beachtliche Ortsdosisleistungen im Nutzstrahl von 4 Gray/min für Elektronen und 6 Gray/min für Bremsstrahlung jeweils im Abstand von 1 m. Lineacs erfordern Betriebsräume mit mächtigen Abschirmungen und fachkundige Strahlenärzte und Medizinphysiker (nach Strahlenschutzverordnung "Medizinphysik-Experten"). Bei Betrieb mit Photonen- und Elektronenenergien über 10 MeV wird Luft aktiviert. Es entsteht N-13 mit 10 min und O-15 mit 2 min Halbwertszeit. Bei einer in medizinisch genutzten Räumen üblichen Luftwechselrate von 10- bis 12-mal pro Stunde sind die Aktivitätskonzentrationen unerheblich.

Elektronen und Bremsstrahlung (und Co-60 Gammastrahlung) unterscheiden sich in der Tiefendosis Kurve. Dies wird für verschieden gelagerte Tumore genutzt. Der kollimierte Strahl kann aus verschiedenen Richtungen auf den Tumor fokussiert werden. Dann erhält der Tumor die höchste Dosis und das umliegende Gewebe geringere Dosen.

Die für die Strahlentherapie interessierende Dosisverteilung im Patienten kann nicht in-vivo gemessen werden, sondern nur an Phantomen, die ein dem menschlichen Körper gleichendes Absorptions- und Streuverhalten haben. Die Dosisleistung setzt sich aus der Primärstrahlung und Streustrahlungsanteilen am Strahlerkopf, an den Kollimatoren und dem Phantom am Ort der Messsonde zusammen. Die klinische Dosimetrie verwendet Ionisationskammern, Thermolumineszenzdosimeter und auch Halbleitersonden.

3. Radiometrische Größen, Einheiten und Faktoren

Übersicht • Kennzeichnung der Quelle, der Strahlung und der Wirkungen • Aktivität, Aktivitätskonzentrationen • Aktivitätsangaben bei natürlich radioaktiven Stoffen • Halbwertszeit, spezifische Aktivität • Ionendosis • Energiedosis, Kerma • Nulleffekt • Zählrate • Kalibrierfaktoren • Äquivalentdosis • Dosisleistungskonstante

Übersicht

Ohne Kenntnis und Verständnis der Größen und Einheiten eines Teilgebietes der Physik kann man dessen Erscheinungen und Zustände nicht verstehen. Physik ohne Verständnis ihrer Größen und Einheiten (mit Zahlenwerten) ist wie Geschichte ohne Nennung von Jahreszahlen, Orts- und Personennamen. Eine Einführung in die Radioaktivität und die Messung ionisierender Strahlung kommt nun zwar mit wenigen physikalischen Gesetzen aus, benötigt aber eine Reihe von Größen und Faktoren.

Radiometrische Größen und Einheiten dienen zur quantitativen Charakterisierung radioaktiver Quellen, ihrer ionisierenden Strahlung und der physikalischen und biologischen Wirkungen. Die Größen [Einheiten] sind Aktivität [Becquerel, Bq], Halbwertszeit [s, min, d, a], Ionendosis [C/kg], Energiedosis [Gray, Gy], und Äquivalentdosis [Sievert, Sv]. Der Kalibrierfaktor führt von der Messgröße Zählrate [ips] zu den Größen Aktivität oder Ortsdosisleistung und der Qualitätsfaktor Q von der Energiedosis D zur Äquivalentdosis H. Die Dosisbegriffe werden in Kapitel 12 mit Erläuterungen zur Strahlenschutzverordnung vertieft.

Die früheren Einheiten, insbesondere Curie [Ci], Röntgen [R] und rem sind ebenfalls zu erklären, da sie auf älteren Prüfstrahlern, Messgeräten und in Büchern auftreten und auch international und in der Technik noch verwendet werden.

Kennzeichnung der Quelle, der Strahlung und der Wirkungen

Es sind mehrere radiometrische Größen und Faktoren zur Erfassung aller Zustände und Erscheinungen notwendig, weil Unterschiedliches zu kennzeichnen ist:

1. die Quelle der Strahlung,
2. die Strahlung im Raum, das Strahlungsfeld,
3. die physikalischen Wirkungen im Detektor eines Messinstrumentes,
4. die biologischen Wirkungen im Körper eines Menschen,
5. die Faktoren zur Umrechnung von Größen von 1, 2 und 3 in Größen von 2, 3 und 4.

1. Quellen ionisierender Strahlung sind:

Röntgenröhren und Beschleuniger, Radionuklide, der Kosmos.

Röntgenröhren werden charakterisiert durch das Anodenmaterial, den Anodenstrom [mA], die Hochspannung [kV] und die Leistung [W]; Beschleuniger durch die maximale Energie, die Dosisleistung im Nutzstrahl und die Tiefendosisleistungskurve.

Radioaktive Quellen werden charakterisiert durch Art und Menge der Radionuklide und die physikalischen, chemischen, kristallographischen und geometrischen Zustände der Matrix ("Umhüllung") der Radionuklide. Die Menge eines Radionuklids wird durch die Größe Aktivität mit der Einheit *Becquerel* (früher Curie) angegeben. Aktivitäten sind Ereignisraten ohne Qualifikation des Ereignisses. Aktivitätskonzentrationen werden hauptsächlich auf die Masse, das Volumen oder die Fläche der Matrix bezogen oder auf ein einzelnes "Heißes Teilchen". Mit der Angabe des Namens des Radionuklids wird auch die Art (Alpha-, Beta-, Gammastrahlung) und Energie der Strahlung sowie die Halbwertszeit in Tabellen nachlesbar. Von der hier gemeinten physikalischen Halbwertszeit ist die biologische Halbwertszeit (siehe später) zu unterscheiden.

Bei der kosmischen Strahlung unterscheidet man solare, galaktische und extragalaktische Quellen. Sie sind nicht

direkt fassbar, sondern nur durch ihr sekundäres Strahlungsfeld (2).

2. Die Strahlung einer Quelle bildet ein Strahlungsfeld mit einer räumlich und zeitlich variablen Teilchenflussdichte (Teilchen pro Fläche und pro Zeit) und Energieflussdichte (Energie pro Fläche und pro Zeit). Diese Größen nehmen mit dem Abstand von der Quelle je nach Geometrie der Quelle, Art und Energie der Strahlung und Art des absorbierenden Mediums im Feldraum unterschiedlich stark ab. Die Art der Abnahme der Strahlungsintensität kann zur messtechnischen Charakterisierung der Strahlung (siehe Kapitel 5), genutzt werden und ist für den praktischen Strahlenschutz von großer Bedeutung.

Das Strahlungsfeld um eine Quelle interessiert meist nur an einzelnen Orten, dort wo ein Messinstrument aufgestellt wird (Ortsdosis) oder wo sich Menschen aufhalten (Personendosis). Für Punktquellen gibt die spezifische Gammastrahlenkonstante (Dosisleistungskonstante) an, wie aus einer bekannten Aktivität eines bestimmten Radionuklids die Gamma-Ortsdosisleistung im Abstand d berechnet werden kann.

Wichtig ist auch zu wissen, ob es sich um ein im Wesentlichen räumlich homogenes Feld handelt, wie z.B. bei der terrestrischen Umgebungsstrahlung. Scharf gebündelte Strahlung - wie von Röntgenröhren und kollimierten Punktstrahlern - kann durch Streuung, Reflexion und Fluoreszenz (siehe Kapitel 5) zu sekundärer Strahlung an unerwarteten Orten führen. In der medizinischen Röntgendiagnostik kann externe und interne (vom Kontrastmittel) Streustrahlung und Fluoreszenzstrahlung zu hoher Strahlenexposition führen.

Radionuklide als Individuen sind atomar bzw. molekular kleine Strahlenquellen und können von Mensch und Tier über Atemluft, Nahrungsmittel einschließlich Wasser, Medikamente und Implantate inkorporiert werden. Das Strahlungsfeld solcher inneren Quellen kann an gewebeäquivalenten Phantomen in seiner physikalischen Wirkung messtechnisch erfasst werden.

3. Physikalische Wirkungen der Strahlung im Detektor eines Messinstrumentes werden angegeben in der Größe Ionen-

dosis mit der Dimension [Ladung durch Masse Luft] und der Einheit "Coulomb durch Kilogramm" sowie in der Größe Energiedosis mit der Dimension [Energie durch Masse] und der Einheit "Joule durch kg" mit dem eigenen Namen "Gray" (Gy). Dosisleistungen sind Größen der Dimension [Dosis durch Zeit]. Lautet eine Angabe nur in "Dosis", so ist der Einheit zu entnehmen, ob es sich um eine Ionendosis, eine Energiedosis oder eine Äquivalentdosis mit dem eigenen Namen "Sievert" (Sv) handelt, siehe (4). Die Messung der Dosis heißt Dosimetrie. Sie ist Teil der Radiometrie, zu der auch die Messung der Aktivität, der Halbwertszeit, der Energie, der Ortsverteilung und anderer Eigenschaften ionisierender Strahlung und ihrer Quellen gehören.

Die meisten Messinstrumente für ionisierende Strahlung registrieren und zählen primär nur Ereignisse, etwa elektrische Impulse in einem Zeitintervall oder pro Zeiteinheit. Diese echte Messgröße heißt Rate und hat die Einheiten ips (Impulse pro Sekunde) oder ipm (Impulse pro Minute). Die Umrechnung der "Rate" in die "Aktivität" oder die "Dosis" geschieht oft schon geräteintern mittels eines Kalibrierfaktors, über den noch mehrfach zu sprechen ist. Für Relativmessungen genügen "Raten". Für Absolutmessungen muss kalibriert oder geeicht werden.

Schon hier sei gesagt: Messziele, Messproben, Messinstrumente und Messgrößen müssen in Art und Empfindlichkeit zusammenpassen. Vor jeder Messung ist zudem die Größe des Nulleffektes der Umgebung bzw. des Instrumentes und die einer Vergleichsprobe zu bestimmen.

4. Für die biologischen Wirkungen ionisierender Strahlung im Gewebe eines Menschen hat man im Strahlenschutz die "radiologisch bewertete Energiedosis" eingeführt. Sie hat die gleiche SI-Einheit [Joule/kg] wie die physikalische Energiedosis [Gray], jedoch den eigenen Namen Sievert. Im Strahlenschutz unterscheidet man Dosis-Messgrößen und Körperdosis-Größen mit jeweils weiteren Spezialnamen, siehe Kapitel 12.

Für die Höhenstrahlung ist eine Berechnung der Äquivalentdosis in großer Höhe, etwa für Flugpersonal und Astronauten, besonders schwierig, da für die Teilchen höchster

Energie und größerer Masse als Alphateilchen andere Strahlungs-Wichtungsfaktoren gelten müssen.

(5) Faktoren zur Umrechnung von einer Größe in eine andere Größe spielen in der Radiometrie eine große Rolle, z.B. die Dosisleistungskonstante. Von der SI-Dimension [1] sind die Wichtungsfaktoren, die von der physikalischen Energiedosis zu den Dosisgrößen des Strahlenschutzes führen.

Aktivität, Aktivitätskonzentrationen

Die Anzahl der Zerfälle oder Kernumwandlungen pro Zeiteinheit eines radioaktiven Stoffes heißt Aktivität. Aktivitäten sind Zerfallsraten, also Ereignisraten in Atomkernen ohne nähere Qualifikation des Ereignisses. Welche Art von Strahlung mit welcher Energie und Menge abgegeben wird, bleibt bei der Angabe der Aktivität allein ungenannt und unbekannt. Diese wichtigen Informationen ergeben sich erst (in Tabellen nachlesbar) durch die Nennung des Radionuklids, z.B. "Aktivität von Cäsium-137", von "Radon-222".

Ohne die Angabe des Radionuklids ist die Angabe einer Aktivität etwa so aussagekräftig wie die Aussage "Gestern haben sich in der Stadt 50 Zusammenstöße ereignet", ohne Angabe, ob Fußgänger, Hunde, schnelle Autos oder Flugzeuge zusammengestoßen sind.

Ist das betrachtete Radionuklid oder die Zusammensetzung eines Radionuklidgemisches unbekannt, so kann mit einfachen Instrumenten nur eine "Gesamtaktivität" gemessen werden. Bei Kenntnis des Messinstrumentes und der Messbedingungen ist es unter Umständen möglich anzugeben, ob es sich um eine Alpha-, Beta-, Gamma- oder Mischaktivität handelt.

Die Einheit der Aktivität ist im SI (Système International d'Unités) das Becquerel, benannt nach Henri Becquerel (1852-1908), dem Entdecker der Radioaktivität von Uran. 1 Becquerel ist definiert als 1 Zerfall pro Sekunde im zeitlichen Mittel: $1 \text{ [Bq]} = 1 \text{ [s}^{-1}\text{]}$. Der Zusatz "im zeitlichen Mittel" ist wegen des statistischen Charakters des radioaktiven Zerfalls notwendig. Man beachte: Die physikalische Dimension "1 durch Sekunde" ist die gleiche für Becquerel und

Hertz (1 Schwingung durch Sekunde) und für Zähl- oder Impulsrate ips (1 Impuls durch Sekunde).

Die alte, gesetzlich nicht mehr zulässige Einheit der Aktivität ist das Curie, benannt nach Marie Curie (1867 – 1934), der Entdeckerin des Radiums. 1 Curie ist definiert als die Aktivität von 1 g Radium-226 im radioaktiven Gleichgewicht mit seinen Zerfallsprodukten.

Umrechnungsfaktoren sind:

1 Ci = 37 GBq, 1 nCi = 37 Bq, 1 Bq = 27 pCi.

Die Abkürzungen für die verwendeten Vorsilben werden im Falle von Bruchteilen klein und bei Vielfachen, außer Kilo, groß geschrieben. Der Exponent verändert sich jeweils um 3. Die Abkürzungen lauten:

m = Milli = 10^{-3} , μ = Mikro = 10^{-6} , n = Nano = 10^{-9} ,
p = Pico = 10^{-12} , f = Femto = 10^{-15} , a = Atto = 10^{-18} .

k = Kilo = 10^3 , M = Mega = 10^6 , G = Giga = 10^9 ,
T = Tera = 10^{12} , P = Peta = 10^{15} , E = Exa = 10^{18} .

Bei Aktivitätsmessungen ist ferner festzulegen und mit anzugeben, auf welche Größe (Fläche, Volumen, Masse) sich das Ergebnis bezieht:

- auf die Gesamtaktivität einer Probe, [Bq], etwa eines Prüfstrahlers oder eines "heißen Teilchens",
- auf die Oberflächenaktivität, [Bq/m²] oder [Bq/cm²], so bei Kontaminationsmessungen,
- auf die Volumenaktivität, [Bq/L], so etwa für Cäsium-137 oder Strontium-90 in Milch oder Radon in Wasser, aber [Bq/m³] für Radon oder Iod-131 in Luft,
- auf die Massenaktivität, [Bq/kg] oder [Bq/g].

In der Strahlenschutzverordnung hat die Größe "Aktivität durch Masse der Matrix" den Namen spezifische Aktivität und die Größe "Aktivität durch Volumen" den Namen Aktivitätskonzentration. Es ist zu wünschen, dass die wissenschaftliche, ältere und sinnvollere (siehe später) Definition der spezifischen Aktivität als Aktivität bezogen auf die Masse des reinen Nuklids nicht verloren geht. Bei Konzentrationen genügt ja der Blick auf die Einheit, ob sie sich auf

Masse oder Volumen bezieht. Als Matrix ist die Stoffmenge zu verstehen, in der das Radionuklid verteilt und mit der es in den meisten Fällen untrennbar verbunden ist.

Gelingt es, die Aktivität aus einer großen Masse (z. B. Wasser) oder einem großem Volumen (z. B. Luft) zu extrahieren und in einem Präparat, z. B. auf einem Filter, zu konzentrieren, so erreicht man eine enorme Vereinfachung und Empfindlichkeitssteigerung der Messung, siehe Kapitel 10 Radon.

Aktivitätskonzentrationen sind in Einheiten und Ziffern (Stellen) richtig zu schreiben. Also nicht 18563 [Bq/kg], sondern 18,6 [kBq/kg], wenn kg-Proben gemessen wurden, und 18,6 [Bq/g], wenn g-Proben gemessen wurden.

Für ein Radionuklid wird die Aktivität des primären Zerfalls genannt. So bedeutet z.B. bei Cobalt-60 eine Aktivität von 100 Bq eine Emission pro Sekunde von 100 Beta-Teilchen mit einer Maximalenergie von 0,32 MeV und jeweils 100 Gammaquanten mit den Energien 1,17 MeV und 1,33 MeV.

Aktivitätsangaben bei natürlich radioaktiven Stoffen

Besondere Aufmerksamkeit verdienen Angaben zur Aktivität natürlich radioaktiver Stoffe. Bei diesen handelt es sich in der Regel um Stoffe mit Gemischen von Radionukliden der Zerfallsreihen von Uran-238, Uran-235 und Thorium-232 in meist unbekanntem Mengenverhältnissen. Im radioaktiven Gleichgewicht haben zwar alle Radionuklide einer Zerfallsreihe die gleiche Aktivitätskonzentration. Geochemisch oder technisch verursacht ist das radioaktive Gleichgewicht jedoch meistens gestört, indem einzelne Glieder der Reihe angereichert oder auch angereichert sind. Welche Aktivität ist dann für den Stoff anzugeben? Zudem lassen sich in einer Zerfallsreihe nur von einigen Gammastrahlern die Aktivitäten ohne aufwendige Probenaufbereitung und Messapparatur relativ einfach nuklidspezifisch messen. Diese Gammastrahler gelten in Deutschland zum Teil als zählende Leitnuklide. In anderen Ländern - und das ist bei europäischem Waren- und Schriftenaustausch zu beachten - gelten ganz andere Summenbildungen für die Gesamtaktivität. Derselbe Stoff hat dann, unter oft willkürlicher Annahme des

Vorliegens eines radioaktiven Gleichgewichts, je nach Land beispielsweise eine Gesamtaktivität von 100, 60, 680, 440 Bq/kg oder ein anderer Stoff 100, 5, 70, 330 Bq/kg.

Bei Radon liegt in unbewegter Raumluft radioaktives Gleichgewicht vor und somit bei z.B. 100 Bq/m³ Rn-222 auch je 100 Bq/m³ Po-218, Pb-214, Bi-214 und Po-214. Die Aktivitätsangabe lautet auf 100 Bq/m³ Radon-222 und nicht auf 500 Bq/m³ Gesamtaktivität. Für Wohnräume mit normaler Ventilation wird in der Strahlenschutzverordnung ein Gleichgewichtsfaktor von 0,4 angenommen. Näheres siehe Kapitel 10 Radon.

Halbwertszeit, spezifische Aktivität

Die physikalische Halbwertszeit ist eine nuklidspezifische Größe. Im Zerfallsgesetz (siehe Kapitel 2) ist die Halbwertszeit T mit der Aktivität A verknüpft. Das Zerfallsgesetz hat für die Nuklidzahl N und für die Aktivität A die gleiche Form. N ist hier die Anzahl der einzelnen Atomkerne einer Radionuklidsorte, die durch Protonen- und Neutronenzahl charakterisiert ist. Der Index 0 gibt den Zustand zur Zeit $t = 0$ an, der Index t den Zustand zur Zeit $t = t$, und der Index T den Zustand zur Zeit $t = T$. Die Halbwertszeit T ist die Zeit, bei der die Hälfte der Nuklide einer Anfangszahl zerfallen ist und die Anfangsaktivität auf die Hälfte abgesunken ist. Wir schreiben T statt $T_{1/2}$ da eine Verwechslung mit der absoluten Temperatur nicht zu befürchten ist. k heißt Zerfallskonstante.

$$N_t = N_0 \cdot e^{-k \cdot t} \quad \text{und} \quad A_t = A_0 \cdot e^{-k \cdot t}$$
$$\frac{N_T}{N_0} = e^{-k \cdot T} = \frac{1}{2} \quad \text{und} \quad \frac{A_T}{A_0} = e^{-k \cdot T} = \frac{1}{2}$$

Durch Integration folgt $k \cdot T = \ln 2 = 0,69$.

$\tau = 1/k$ heißt mittlere Lebensdauer, d.h. die Zeit, nach der die Anzahl der Atomkerne auf den e -ten Teil abgesunken ist. Bei fester Nuklidanzahl ist für eine Radionuklidsorte die Aktivität umso größer, je kleiner die Halbwertszeit ist. Bei Radionukliden mit kleiner Halbwertszeit, z.B. Iod-131 mit $T = 8$ Tagen oder Cäsium-134 mit $T = 2$ Jahren ist bei Aktivitätsangaben zu einer Probe auch der Zeitpunkt der Messung anzugeben, da die Aktivität rasch abnimmt.

Zwischen der Halbwertszeit eines Radionuklids und seiner Zerfallsenergie für Alphastrahler besteht die Beziehung: Je kleiner die Halbwertszeit, desto größer die Energie. Tabelle 5 (Kapitel 10) zeigt dies für die Glieder der Ra-226-Reihe.

Die biologische Halbwertszeit T_b eines Stoffes ist die Zeit, nach welcher die Anfangskonzentration - die sich als Folge einer einmaligen Zufuhr in einem Organ oder gemittelt im ganzen Körper ergeben hat - durch Stoffwechselprozesse oder Ausscheidungen auf die Hälfte abgenommen hat.

Um eine bestimmte Oberflächenkontamination in Bq/m^2 zu verursachen, benötigt man von einem kurzlebigen Radionuklid (z. B. Iod-131) eine kleinere Stoffmenge als von einem langlebigen. Andererseits erzeugt bei einem langlebigen Radionuklid (z. B. Kalium-40) auch eine große Stoffmenge nur eine kleine Aktivität. Dies wird durch die Größe "spezifische Aktivität" - im Sinne der Wissenschaft, nicht der Strahlenschutzverordnung - ausgedrückt, mit der Einheit Bq pro g des reinen Radionuklids. Die spezifische Aktivität von Ra-226 ist per definitionem 1 Curie.

Die spezifische Aktivität A_s eines Radionuklids mit der Nukleonenzahl M berechnet sich wie folgt: Die Nuklidanzahl N_s für 1 g ist $N_s = L/M$, mit $L = 6,02 \cdot 10^{23}$ die Avogadro-Konstante, die Zahl der Atome in einem Mol, das ist die Stoffmenge, die M g wiegt. Dann ist:

$$A_s = k \cdot N_s = 0,69 \cdot T^{-1} \cdot (L \cdot M^{-1}) \quad [s^{-1} g^{-1}] = [Bq g^{-1}]$$

oder einfacher zu merken:

$$A_s [Bq g^{-1}] \cdot T [s] \cdot M [g] = \ln 2 \cdot L$$

Nun lässt sich folgendes Beispiel berechnen:

Welche Menge (Masse in g) von Iod-131 ($T = 8$ Tage) reicht aus, um bei gleichmäßiger Verteilung eine Fläche von $F = 248\,000 \text{ km}^2$ (Bundesrepublik, zur Zeit von Tschernobyl) mit einer Aktivitätsbelegung von $A_F = 18 \text{ kBq/m}^2$ zu kontaminieren? Antwort: Spezifische Aktivität $A_s = 4,5 \cdot 10^{15} \text{ Bq/g}$ und $A_F \cdot F = A_s \cdot m$ zeigt, es reichen $m = 1 \text{ g}$ Iod-131, entsprechend $120 \text{ kCi} = 4,44 \text{ TBq}$.

Für Uran-238 mit Halbwertszeit $T = 4,5 \text{ Ga} = 142 \cdot 10^{15} \text{ s}$ beträgt die spezifische Aktivität $A_s = 12,3 \text{ kBq/g}$. Für U-nat

beträgt $A_s = 25,2 \text{ kBq/g}$, wovon $0,57 \text{ kBq/g}$ vom U-235 und $12,3 \text{ kBq/g}$ vom U-234 stammen. Ein Erz, Rohstoff oder Boden mit einem nicht seltenen Gehalt von 100 ppm U-nat hat somit eine Aktivitätskonzentration von $1,2 \text{ Bq/g U-238}$ und wäre als "Rückstand" unter Umständen nach Strahlenschutzverordnung überwachungsbedürftig!

Ionendosis

Die Fähigkeit, Ionen (genauer Ladungsträgerpaare) zu erzeugen, ist nicht nur die namensgebende Eigenschaft ionisierender Strahlung, sie ist auch die messtechnisch am einfachsten und unmittelbar nutzbare Eigenschaft. Dies gilt insbesondere für Röntgenstrahlung und deren Messung mit einer luftgefüllten Ionisationskammer, siehe Kapitel 7. Die Ionisationskammer wird mit einer Spannungsquelle durch einen sehr empfindlichen Strommesser verbunden. Der Strommesser misst direkt den Ionisationsstrom (Ampere) oder die Ionendosisleistung, d.i. Ionendosis pro Zeit.

Ionendosis J heißt der Quotient aus der elektrischen Ladung Q der Ionen eines Vorzeichens, die in einem definierten Volumen Luft durch Röntgen- oder Gammastrahlung erzeugt werden, und der Masse m des Volumens.

$$J = \Delta Q / \Delta m$$

Allgemein heißt eine Größe Dosis, wenn sie auf eine Masseneinheit bezogen wird. Die SI-Einheit der Ionendosis ist 1 Coulomb pro Kilogramm, 1 [C/kg] , und hat keinen eigenen Namen. Da $1 \text{ Coulomb} = 1 \text{ Ampere} \cdot 1 \text{ Sekunde}$ ist, hat die Ionendosisleistung die SI-Einheit Ampere pro Kilogramm und ist bei Kenntnis der Masse des Luftvolumens der Ionisationskammer mit dem Ionisationsstrom direkt messbar.

Die alte Einheit der Ionendosis (im Englischen radiation exposure) ist das Röntgen, benannt nach Wilhelm Conrad Röntgen (1845 - 1923), dem Entdecker der nach ihm benannten Strahlung. Die Kenntnis der Einheit Röntgen muss noch erhalten bleiben, da sie in älteren Lehrbüchern und auf älteren Messinstrumenten (Ionisationskammern) zu finden ist, die auch nach 30 Jahren noch gut verwendbar sind.

1 R = 258 $\mu\text{C}/\text{kg}$ ist der Betrag an Röntgen- oder Gammastrahlung, der durch Ionisation in 1 cm^3 trockener Luft (1,293 mg) eine elektrostatische Ladungseinheit (electrostatic unit) erzeugt.

$$1 \text{ esu} = 2,08 \cdot 10^9 \text{ Ionenpaare,}$$

$$1 \text{ C} = 3 \cdot 10^9 \text{ esu} = 6,24 \cdot 10^{18} \text{ Elementarladungen}$$

$$1 \text{ R} = (3 \cdot 10^9)^{-1} \text{ C} (1,293 \cdot 10^{-6} \text{ kg})^{-1} = 258 \cdot 10^{-6} \text{ C/kg}$$

Beispiele für Ionendosisleistungen sind die terrestrische Umgebungsstrahlung mit circa 40 mR/a oder 5 $\mu\text{R}/\text{h}$ und der Primärstrahl am offenen Fenster einer Röntgenröhre mit der Größenordnung kR/s, also das 10^{12} fache.

Energiedosis, Kerma

Das beste Maß für physikalische Wirkungen ionisierender Strahlung in einem Medium ist die im Medium absorbierte Energie. Energiedosis D heißt der Quotient aus der Strahlungsenergie E, die in einem Volumenelement eines zu benennenden Materials, z.B. Luft, Wasser oder Gewebe, absorbiert wird, und der Masse m des Volumenelementes:

$$D = \Delta E / \Delta m$$

Die Energiedosis ist die wesentliche Größe zur Messung der Wirkungen ionisierender Strahlung, so wie die Aktivität die wesentliche Größe zur Messung der Stärke einer radioaktiven Quelle ist.

Die SI-Einheit der Energiedosis ist das Gray (Gy), benannt nach dem Strahlenphysiker Louis H. Gray (1905 - 1965):

$$1 \text{ Gray} = 1 \text{ Joule pro Kilogramm, } 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

1 Gray ist bezüglich der physikalischen und insbesondere der biologischen Wirkungen eine sehr, sehr große Einheit. Dies obwohl der kalorische Effekt von 1 Gray sehr klein ist und in Wasser nur eine Temperaturerhöhung von 0,24 mK bewirkt.

Die Energiedosisleistung ist die in einem bestimmten Zeitintervall erzeugte Energiedosis dividiert durch die Länge des Zeitintervalls. Die Beta- und Gammakomponente der Umgebungsstrahlung hat eine Dosisleistung von circa 50 nGy/h = 0,05 $\mu\text{Gy}/\text{h}$.

Physik und Strahlenmedizin verwenden vorzugsweise die Energiedosis mit der SI-Einheit Joule/kg und dem Namen Gray. Der Strahlenschutz verwendet vorzugsweise die radiologisch bewertete Energiedosis mit der gleichen SI-Einheit Joule/kg, aber dem eigenen Namen Sievert.

Die alte Einheit der (physikalischen) Energiedosis ist das rad (rd), Akronym für radiation absorbed dose. Auch ihre Kenntnis ist zum Verständnis älterer und englischsprachiger Texte notwendig.

$$1 \text{ rd} = 100 \text{ erg/g} = 0,01 \text{ J/kg} = 0,01 \text{ Gy}. \quad 1 \text{ Gy} = 100 \text{ rd}.$$

Einheiten des alten cgs-Systems sind:
 $1 \text{ erg} = 1 \text{ dyn} \cdot \text{cm} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2} = 10^{-7} \text{ J}$.
 Dabei ist $1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$.

Für Luft lässt sich die Ionendosis 1 R in die entsprechende Energiedosis umrechnen. Die Ionisierungsarbeit, das ist die notwendige Energie zur Bildung eines Ionenpaares, beträgt in Luft 34 eV mit $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Eine Ionendosis von 1 R entspricht somit

$$2,08 \cdot 10^9 \cdot 34 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \cdot (1,293 \cdot 10^{-6} \text{ kg})^{-1} = 0,88 \text{ rd}.$$

Für Wasser oder Weichgewebeteile gilt für Photonenenergien zwischen 200 keV und 2 MeV: 1 R entspricht 0,97 rd.

Unter Kerma versteht man den Quotienten aus der durch ionisierende Strahlung in einem bestimmten Volumen im Medium (med) auf geladene Sekundärteilchen übertragenen Bewegungsenergie E_{trans} und der Masse Δm_{med} des Volumens.

$$K_{\text{med}} = \Delta E_{\text{trans}} / \Delta m_{\text{med}}$$

Kerma steht für kinetic energy released per unit mass. Die Kerma wird vor allem aus messtechnischen Gründen und von der Strahlenbiologie bei niederenergetischen Photonen (Gamma- und Röntgenstrahlung), Teilchenstrahlung und Neutronenstrahlungsfeldern der Energiedosis vorgezogen. Die SI-Einheit der Kerma ist das Gray. Sie ist im allgemeinen kein direktes Maß für die absorbierte Energie (Energiedosis), da die Sekundärteilchen ihre Energie teilweise außerhalb des Sondenvolumens und durch Bremsstrahlung an ihre weitere Umgebung abgeben können. Die Kerma verändert sich bei gleicher Strahlungsqualität und Strahlungsart mit dem Material der Sonde.

Nulleffekt

Nach diesen abstrakten Definitionen der Messgrößen Aktivität, Ionendosis und Energiedosis sind jetzt erste Bemerkungen zur praktischen Messtechnik notwendig. Es muss erklärt werden, wie sich die Aktivität einer Quelle zu einer Anzeige eines Messinstrumentes umsetzt bzw. wie von dieser auf die Aktivität der Quelle und auf die Energiedosis am Ort des Instruments zu schließen ist.

Beim Einschalten eines Gerätes kommt es bei empfindlichen Geräten zu einer Messanzeige, auch schon wenn die zu messende Quelle gar nicht in der Nähe ist. Dies ist der Nulleffekt des Gerätes.

Der Nulleffekt hängt ab von:

1. der überall und zu jeder Zeit wirkenden Umgebungsstrahlung, d. i. der terrestrische und kosmische Strahlungsuntergrund;
2. der Abschirmung, deren Eigenstrahlung sowie der Rückstreuung bei ungünstiger Geometrie und Materialwahl;
3. der Eigenstrahlung der Probenmatrix oder des Probenbehälters ohne die zu messende Aktivität;
4. dem apparativen Nulleffekt, z.B. bei Szintillationszählern, dem Dunkelstrom des Lichtverstärkers und dem Detektormaterial, z.B. Verunreinigungen von K-40 in einem Natriumiodid-Kristall-Detektor.

Zeigt ein Messgerät keinen Nulleffekt an, so ist es entweder zu wenig empfindlich für die Umgebungsstrahlung oder es ist schlicht defekt. Auf der empfindlichsten Skala eines Zeigerinstrumentes sollte der Nulleffekt einen deutlichen Ausschlag von mehreren Skalenteilen verursachen.

Zählrate

Die Anzeige auf einigen Strahlungsmessgeräten, insbesondere Geiger-Müller-Zählern und Kontaminationsmonitoren (siehe Kapitel 8) lautet nicht auf eine der Dosis- oder Dosisleistungsgrößen, sondern auf "ips" = Impulse pro Sekunde oder "ipm" = Impulse pro Minute. Man schreibt auch counts per second, cps, oder counts per minute, cpm. Die Impuls-

rate ist die Zahl der "Ereignisse", die im Messinstrument pro Zeiteinheit registriert werden. Unter einem "Ereignis" versteht man dabei die Wechselwirkung der im Detektor des Instruments absorbierten ionisierenden Strahlung mit dem Medium und einen der dadurch ausgelösten, im Kapitel 4 phänomenologisch beschriebenen physikalischen Effekte.

Obwohl die Impulsrate mit der Dimension [eins pro Zeit] die gleiche Einheit besitzt wie die Aktivität, ist sie von dieser streng zu unterscheiden. Die Aktivität ist die Zerfallsrate instabiler Atomkerne in einer radioaktiven Quelle. Die Impulsrate ist die Zählrate von registrierten Ereignissen im Instrument. Es ist einsichtig, dass nicht jedes strahlende Ereignis in einer radioaktiven Quelle zu einem Ereignis im Instrument führen kann.

Auch von der Energiedosis oder der Energiedosis pro Zeiteinheit (= Energiedosisleistung) ist die Impulsrate ganz streng zu unterscheiden. Dies folgt allein schon aus den unterschiedlichen Dimensionen der beiden Größen, hier "eins pro Zeit", dort "Energie pro Masse und pro Zeit". Statt Impulsrate sollte man allgemein von Zählrate sprechen, um den verschiedenen Nachweisverfahren Rechnung zu tragen. Hierzu ein Beispiel: Bei Kernspurdetektoren zur Radonmessung werden primär nicht elektrische Impulse gezählt, sondern Ätzspuren pro Fläche und pro Expositionszeit des Detektors.

Kalibrierfaktoren

Im Wort "kalibrieren" steckt nach Webster's New Collegiate Dictionary das arabische Wort qalib = Schuhmacher-Leiste. Kaliber heißt der Durchmesser einer Kugel, z.B. bei einer Pistole. In der Messtechnik werden Kalibrieren und Eichen oft, doch nicht ganz richtig als synonyme Begriffe verwendet. In Deutschland dürfen nur staatliche Eichlabors "eichen", in den übrigen Fällen spricht man von "kalibrieren".

Was kalibrieren bedeutet, sieht man an der Federwaage. Ein angehängtes Gewicht (Kraft) bewirkt eine Auslenkung (Messgröße). Für die Kraft (Suchgröße) gilt das Hooke'sche Gesetz:

Kraft = Auslenkung mal Federkonstante (Kalibrierfaktor).

Bei Strahlungsmessungen gibt die Effizienz e (Ausbeute) an, welcher Bruchteil der ausgesandten Strahlung im Instrument (Detektor) zur Anzeige kommt. Der Kalibrierfaktor $k = 1/e$ ist gleich dem Kehrwert der Effizienz e des Detektors, genauer der Messanordnung. Dies bedeutet, ein empfindliches Gerät mit einem großen Detektor und großer Zählrate hat einen kleinen Kalibrierfaktor und ein weniger empfindliches Gerät mit einem kleinen Detektor hat einen großen Kalibrierfaktor.

Die Dimension des Kalibrierfaktors hängt von den physikalischen Größen ab, in welchen die Zählrate gemessen und in welche sie umgerechnet wird. So hat der Kalibrierfaktor zur Errechnung der Aktivität einer Probe aus der Nettoimpulsrate eines Proportionalzählers oder Geiger-Müller-Zählers die Dimension Becquerel pro ips, d.h. 1 pro Sekunde durch 1 pro Sekunde gleich 1. In Worten:

**Aktivität (Ereignisrate in der Messprobe) =
Nettozählrate (Ereignisrate im Detektor) · Kalibrierfaktor**

Der Kalibrierfaktor zur Errechnung der Ortsdosisleistung aus der Impulsrate eines Geiger-Müller-Zählers hat die Dimension nGy pro Stunde durch ips.

Der Kalibrierfaktor ist abhängig vom verwendeten Messinstrument. Für das gleiche Instrument hängt er ab von:

1. der Messgröße, d.h. ob die Anzeige Impulsrate, Aktivität, Ionen-, Energie- oder Äquivalentdosis angibt. Dabei müssen Alpha-, Beta-, Gamma- und Mischstrahlung unterschieden werden;
2. dem Radionuklid und seiner Strahlung unterschiedlicher Art und Energie;
3. der Probe, ihrer Art (Matrix), Menge, Form und Anordnung relativ zum Detektor;
4. von der Probenunterlage, z.B. einem Tiegel, wegen der Rückstreuung von Elektronen an Metallen hoher Ordnungszahl. Dieser Effekt kann positiv zur Erhöhung der Ausbeute genutzt werden.

Der Kalibrierfaktor für ein Instrument und für bestimmte Messbedingungen kann mit einem der Messprobe bezüglich Radionuklid, Dichte, geometrischen Abmessungen u.a. möglichst ähnlichen Kalibrierstrahler (Referenzstrahler)

bestimmt werden oder ist Angaben des Geräteherstellers zu entnehmen. Dabei ist aber sorgfältig auf die Übereinstimmung der in der Gebrauchsanleitung genannten mit den im Messfall vorliegenden Bedingungen zu achten.

Äquivalentdosis

Im Strahlenschutz wird die im Gewebe eines Menschen absorbierte Energiedosis radiologisch bewertet und die Einheit der neuen Größen hat den Namen Sievert. Man unterscheidet:

1. Dosis-Messgrößen,
das sind die Äquivalentdosis als Ortsdosis und als Personendosis zur Überwachung von Strahlenschutzbereichen und von Personen,
2. Körperdosisgrößen,
das sind die Organdosis und die effektive Dosis zur Festlegung von Grenzwerten für Strahlenexpositionen.

In diesem Abschnitt werden nur die Dosis-Messgrößen behandelt, jedoch nicht abschließend. Der Körperdosis und ihrer Bedeutung im Strahlenschutz ist das Kapitel 12 gewidmet.

Äquivalentdosis H einer Strahlenexposition von biologischem Gewebe heißt das Produkt aus Energiedosis D und dem Qualitätsfaktor Q .

$$H = D \cdot Q$$

Der Qualitätsfaktor ist ein Strahlungs-Wichtungsfaktor der SI-Dimension [1] und berücksichtigt die unterschiedliche relative biologische Wirksamkeit von Strahlungen verschiedener Art und Energie. Q hat den Wert

- 1 für Photonen (Gammastrahlung, Röntgenstrahlung) aller Energien,
- 1 für Elektronen (Betastrahlung) aller Energien,
- 20 für Alphastrahlung,
- 5, 10 oder 20 für Neutronen je nach Energie.

Die SI-Einheit der Äquivalentdosis ist das Sievert.

$$1 \text{ Sievert} = 1 \text{ Joule pro Kilogramm, } 1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$$

Rolf Sievert (1896 - 1966), dem die SI-Einheit den Namen verdankt, war ein schwedischer Strahlenphysiker. Die alte Einheit der Äquivalentdosis war rem.

$$1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv}$$

$$100 \text{ rem} = 1 \text{ Sv.}$$

1 rem, das Akronym für roentgen equivalent man, war für Röntgenstrahlung die Äquivalentdosis zur Energiedosis 1 rad (radiation absorbed dose), die in Wasser und Weichgewebe ungefähr der Ionendosis 1 Röntgen entspricht.

Sievert ist die Einheit einer biologischen Rechengröße, nicht einer physikalischen Messgröße. Eine Verwirrung der Gemüter wird verursacht durch die Verwendung des Wortes "Strahlenbelastung", wo nur einer der Begriffe Strahlenexposition = Dosis oder Expositionsrate = Dosisleistung stehen sollte oder die biologische Strahlenwirkung gemeint ist. Exposition heißt "ausgesetzt sein" einem Strahlungsfeld. Dosis ist das Maß für die absorbierte Strahlungsenergie. Dosis ist das Produkt von Dosisleistung und Expositionszeit. Dosis und Dosisleistung verhalten sich zueinander und sind so verschieden wie in der Mechanik der Weg und die Geschwindigkeit oder wie Arbeit und Leistung = Arbeit/Zeit.

Für die biologische Wirkung einer Dosis kommt es auch auf die zeitliche Dosisverteilung an, d.h. wie das Produkt Dosis pro Messzeit mal Expositionszeit zustande kommt, ob durch große Dosisleistung während kurzer Zeit oder durch kleine Dosisleistung während langer Zeit. Es kommt auf das Zeitprofil der Dosis (ihrer Fraktionierung) an, so wie es für den körperlichen Zustand von zwei Menschen, die beide den gleichen Weg gegangen sind, doch darauf ankommt, mit welchem Geschwindigkeits-Zeit-Profil sie gegangen oder gerannt, geruht oder gehastet sind. Für nur physikalisch-chemische Wirkungen ionisierender Strahlungen kommt es im Allgemeinen nicht auf das Zeitprofil der Dosis an.

Bei der Umrechnung von gemessenen Ortsdosisleistungen (nSv/h) in eine Personenjahresdosis (mSv) sind zu berücksichtigen: die Aufenthaltsdauer der Person am Ort und die Lebensdauer der Probe (physikalische Halbwertszeit des Radionuklids). Ein Stundenwert der Dosisleistung für Iod-131 ($T = 8$ Tage) sollte nicht durch Multiplikation mit der Jahres-Stundenzahl 8760 in einen Jahreswert der Dosis umgerechnet werden. Streng genommen ist die Personen-

dosis die Äquivalentdosis für Weichteilgewebe, gemessen an einer für die Strahlenexposition repräsentativen Stelle der Körperoberfläche. Weiteres siehe Kapitel 12 Ermittlung der Körperdosis.

1 Sievert ist eine sehr große Einheit. Die jährliche Strahlenexposition durch terrestrische und kosmische, externe und interne Strahlenquellen beträgt in der Bundesrepublik im Durchschnitt $2,4 \text{ mSv} = 0,0024 \text{ Sv}$. Eine Strahlenexposition, wie sie natürlicherweise alle Menschen erhalten, seit es Menschen gibt, ist nicht als "Belastung" zu bezeichnen, zumal sie nur durch eine unnatürliche Lebensweise, etwa in einem Unterseeboot oder einem Steinsalzbergwerk, merklich gesenkt werden könnte. Akute Strahlenschäden treten bei $1\text{-}2 \text{ Sv}$ auf. Bei einmaliger Ganzkörperbestrahlung gelten $6\text{-}10 \text{ Sv}$ als tödlich. Die Umgebungsstrahlung allein führt zu etwa $50 \text{ nSv/h} = 0,05 \text{ }\mu\text{Sv/h}$, das sind circa $0,40 \text{ mSv/a}$.

Dosisleistungskonstante

Die Dosisleistungskonstante (spezifische Gammastrahlen-Konstante) ist streng genommen definiert über die Umgebungs-Äquivalentdosisleistung $H^*(10)$ der Photonen im Abstand r einer Punktquelle der Aktivität A eines bestimmten Radionuklids: $H^* = \Gamma \cdot A/r^2$. Wie an anderer Stelle gesagt, gilt das Abstandsgesetz $1/r^2$ mit bestimmtem r nur für Photonen bestimmter Energie einer Punktquelle, nicht für Flächen- oder Volumenquellen und nicht für Teilchenstrahlung. Dosisleistungskonstanten für verschiedene Radionuklide, insbesondere Gammastrahler sind in umfangreichen Werken tabelliert.

Ergänzung zu den Seiten 9/10:

Zerfallsgesetz in der Form der Schulphysik

In der Schulphysik wird das Zerfallsgesetz oft in der folgenden Form angegeben:

$$N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} \quad \text{bzw.} \quad A(t) = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} .$$

4. Wirkungen und Nachweis ionisierender Strahlung

Übersicht • Physikalische Effekte und Detektoren • Optische Effekte • Photofilme • Verfärbungen • Kernspuren • Lumineszenz • Fluoreszenz • Leuchtschirme • Verstärkerfolien • Szintillationszähler • Thermolumineszenz • Photolumineszenz • Digitale Lumineszenz-Radiographie • Elektrische Effekte • Direkt und indirekt ionisierend, dicht und locker ionisierend • Nebelkammer • Gasionisationsdetektoren • Strom-Spannungs-Kennlinie • Ionisationskammer • Proportionalzähler • Geiger-Müller-Zähler • Ladungsträger in Halbleitern • Elektronenspinresonanz • Thermische Effekte - Geothermie • Strahlungskalorimeter

Übersicht

Vielfältig sind die Wirkungen ionisierender Strahlung. Der Laie denkt zumeist zuerst an unerwünschte biologische Wirkungen. Biologische Wirkungen sind eine Folge von primären physikalischen und chemischen Wirkungen. Es gibt auch erwünschte biologische Wirkungen, so in der Strahlentherapie und bei der Bestrahlung zur Entkeimung etwa von Operationsbestecken, von Gewürzen und in manchen Ländern von Lebensmitteln.

Allgemein wissenschaftlich und technisch sehr erwünscht sind die nur physikalischen und chemischen Eigenschaften und Wirkungen ionisierender Strahlung. Es gibt auch unerwünschte physikalische Wirkungen, so die Strahlenschäden in Halbleiterbauelementen durch Höhenstrahlung oder durch natürliche Alphastrahler. Diese finden sich als Verunreinigungen im Silizium oder auch in Tantal, das in der Mikroelektronik verwendet wird.

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften und Wirkungen ionisierender Strahlung werden in drei Kapiteln behandelt:

- die für Messverfahren und in Messgeräten genutzten, charakteristischen Wirkungen in phänomenologischer Weise in diesem Kapitel 4,

- die zur messtechnischen Charakterisierung der Strahlung geeigneten Eigenschaften auf der Grundlage der elementaren Wechselwirkungen zwischen Strahlung und Materie im nächsten Kapitel 5,
- die in Forschung, Medizin und Technik genutzten Eigenschaften der Strahlung im Kapitel 13.

Physikalische Effekte und Detektoren

Ionisierende Strahlung ist zwar unsichtbar, aber wegen ihrer hohen Quantenenergie führt sie auch in kleinsten Mengen (Dosen) zu optisch leuchtenden oder elektrisch leitenden Erscheinungen. Thermisch fühlbare Erscheinungen dagegen treten nur bei höchst gefährlich hohen Dosen auf.

Letztlich beruhen alle Wirkungen ionisierender Strahlung primär auf der Trennung von Ladungsträgern, d.h. der Bildung freier Elektronen und Ionen oder der Anregung von Elektronen. Die Ursache aller Wirkungen ist die absorbierte Strahlungsenergie. Die zahlreichen beobachtbaren Wirkungen bilden nur drei Gruppen (siehe Tabelle 2):

- optische Effekte, und zwar Absorption und Lumineszenz,
- elektrische Effekte, und zwar vor allem Leitfähigkeitsänderungen in Gasen und Halbleitern,
- thermische Effekte.

Das Medium, in dem die Strahlung den Effekt erzeugt, der zum qualitativen Nachweis oder zur quantitativen Messung der Strahlung verwendet wird, heißt Detektor. Der Detektor kann gasförmig, flüssig oder fest sein, von großem oder kleinem Volumen, auch ein Film oder eine dünne Schicht. Für die Effizienz eines Effektes, d.h. die Ausbeute des Detektors, sind sowohl das Volumen und die Dichte (Masse und chemische Ordnungszahl) des Detektors und seines Gehäuses wesentlich als auch die Art und Energie der ionisierenden Strahlung. Teilchenstrahlung wird stärker absorbiert als Wellenstrahlung und niederenergetische Strahlung stärker als hochenergetische. Dies sei schon jetzt erwähnt, es wird in Kapitel 5 ausführlicher behandelt.

Strahlenschäden, elektronische Anregungen und chemische Effekte äußern sich meist als optische Effekte (Verfärbungen), oder werden zu solchen entwickelt, so die Schwärzung von Photofilmen. Andere chemische Effekte, wie die Radio-lyse, Radikalbildung und Strahlenpolymerisation, spielen strahlenmesstechnisch zum Teil eine Rolle, mehr aber als Vorstufe zu biologischen Effekten oder bei technischen Anwendungen.

Tabelle 2: Physikalische Effekte und Detektoren

OPTISCHE EFFEKTE	ELEKTRISCHE EFFEKTE
Absorption	Ionisation in Gasen
- Photofilme	- Nebelkammer
- Verfärbungen	- Elektrometer
- Kernspuren	- Ionisationskammer
Lumineszenz	- Proportionalzähler
- Fluoreszenz	- Geiger-Müller-Zähler
- Leuchtschirme	Ladungsträger in Halbleitern
- Verstärkerfolien	Elektronenspinresonanz
- Szintillationszähler	
- Thermolumineszenz	THERMISCHE EFFEKTE
- Photolumineszenz	Geothermie
- Lumineszenzradiographie	Strahlungskalorimeter

Optische Effekte

Optische Effekte, wie Filmschwärzung, Schirmleuchten und Szintillationen können nicht nur durch ionisierende Strahlung verursacht werden, sondern auch schon durch sichtbares und ultraviolettes Licht. Wesentlich bei der Messung ist dann, dass andere Strahlung nicht vorhanden ist oder der Detektor mit einer Abschirmung versehen ist, die nur von der energiereichen, ionisierenden Strahlung durchdrungen wird. Bei den optischen Effekten unterscheiden wir Absorptionseffekte (passive) und Lumineszenzerscheinungen (aktive).

Zu den Absorptionseffekten gehören Verfärbungen, Schwärzungen in Photofilmen und Ätzgruben in Kernspurfolien, die in einem chemischen Entwicklungsprozess sichtbar werden.

Zu den Lumineszenzerscheinungen gehören das Leuchten von Lumiphoren (Leuchtschirmen) und Szintillatoren, das bei der Bestrahlung des Detektormaterials unmittelbar auftritt. Bei der Thermolumineszenz und der Photolumineszenz leuchtet das bestrahlte Detektormaterial bei Erwärmen bzw. Belichten.

Photofilme

Eine Eigenschaft ionisierender Strahlung, genauer von Beta- und Gammastrahlung, ist ihre Durchdringungsfähigkeit und somit eine "Belichtung" von Photofilm durch lichtdichtes Papier hindurch. Alphastrahlung dagegen wird schon von Papier absorbiert. Alphastrahler müssen, um einen Nachweis zu erhalten, in direktem Kontakt auf den Photofilm gelegt werden.

Eine wichtige Aufgabe des Strahlenschutzes ist es, für beruflich strahlenexponierte Personen die Personendosis zu bestimmen. Dies geschieht in Deutschland meist durch Filmdosimeter, die in der Regel monatlich gewechselt und zentral ausgewertet werden, siehe Kapitel 12.

Photofilme sind in besonderem Maße zur Bilderzeugung und zur Strahlungsmessung geeignet. Wird das Bild durch eine strahlende Probe selbst erzeugt, spricht man von Autoradiographie. Beispiele sind: Anschliffe von Uranerzen, um zu erkennen, wo im Gefüge uranhaltige Minerale sitzen; Abbilder von Pflanzen, um zu erkennen, in welchen Teilen radioaktiv markierte Stoffe eingelagert wurden, siehe Kapitel 8.

Die wichtigsten mit ionisierender Strahlung, insbesondere Röntgenstrahlen, auf Photofilmen erzeugten Bilder sind medizinische Durchleuchtungen, man denke an Röntgens erste Aufnahme der Hand seiner Frau und materialprüfende Durchleuchtungen, etwa von Schweißnähten. Der Bildkontrast beruht hier auf unterschiedlicher Absorption im durchstrahlten Medium. Der Film gibt unterschiedliche Strahlungsintensitäten als Schwärzungen verschiedener Intensität wieder.

Unsere Kenntnis vom geordneten Aufbau der festen Materie von den einfachsten Kristallstrukturen bis zur Doppelhelix

der DNS verdanken wir der Röntgenstrukturanalyse, d.h. der Auswertung von Röntgenbeugungsdiagrammen, die früher ausschließlich mit Röntgenfilmen aufgenommen wurden.

Bezogen auf die Anforderungen der modernen Messtechnik haben photographische Verfahren folgende Vorzüge: Sie sind zeitintegrierend, empfindlich, ortsauflösend, übersichtlich, dokumentationsfähig, reproduzierbar, handlich und kostengünstig. Zeitintegrierend bedeutet: kleine Intensitäten werden durch lange Expositionszeiten aufsummiert, was hohe Empfindlichkeit bedeutet. Ortsauflösung heißt: örtliche Inhomogenitäten in der Verteilung von Radionukliden in einem Untersuchungsobjekt werden gleichzeitig und flächenhaft sichtbar, z.B. "Heiße Teilchen" auf einer Schuhsohle, siehe Abbildung 23. Photographien sind permanente Speicher und beliebig zu vervielfältigen.

Verfärbungen

Eine schon alte Beobachtung ist die Verfärbung von Mineralen, so die dunkelviolette Färbung von Fluorit (Flussspat). Chemisch reines CaF_2 ist farblos. Im Nabburg-Wölsendorfer Revier, 50 km nördlich von Regensburg, ist Fluorit paragenetisch mit Uraninit UO_2 und Pechblende $\text{UO}_2\text{-U}_3\text{O}_8$. Energiereiche Strahlung von Uran und seinen Zerfallsprodukten erzeugt in benachbarten Fluorit-Kristallen Defekte verschiedener Art. Elektronische Defekte wirken dabei als Absorptionsbande für sichtbares Licht und bewirken eine Verfärbung des Minerals. Sie werden deshalb als Farbzentren bezeichnet. Manche verfärbende Defekte können durch Erwärmen auf ein paar Hundert Grad Celsius wieder "ausgeheilt" werden (siehe Thermolumineszenz): Der Stoff wird dabei entfärbt.

Das Eisensulfatdosimeter nach Fricke ist ein echtes chemisches Dosimeter. In einer luftgesättigten 0,8-normalen H_2SO_4 -Lösung, die 10^{-2} bis 10^{-3} mol/L FeSO_4 enthält, werden durch Bestrahlung Fe^{2+} -Ionen praktisch irreversibel zu Fe^{3+} -Ionen oxidiert. Die Konzentration der dreiwertigen Eisenionen wird photometrisch bei 304 nm bestimmt. Das Verfahren eignet sich zur Bestimmung sehr hoher Dosen von 10 bis 400 Gray.

Kernspuren

Alphateilchen als schwere geladene Teilchen erzeugen entlang ihrer Bahn in einem elektrisch nicht-leitenden Festkörper (Folie) eine feine Spur von beschädigtem Material, eine Kernspur mit einem Durchmesser von 5-10 nm, einen latenten, submikroskopischen Strahlenschaden. Mit bestimmten Ätzmitteln können die primären latenten Kernspuren zu mikroskopischen Ätzspuren vergrößert werden. Wird in einem elektrischen Wechselfeld geätzt, können die Ätzspuren weiter vergrößert werden, bis sie auch ohne Mikroskop sichtbar werden. Ihre Dichte darf dann allerdings nicht so groß sein, dass es zu Überlappungen kommt. Wegen der hohen Absorption von Alphateilchen sind für deren Nachweis so dünne Folien verwendbar, dass sie für die nur locker ionisierende Gamma- und Betastrahlung unempfindlich sind. Kernspurfolien eignen sich besonders für Messungen von Radon in Luft, siehe Kapitel 10, und zur Messung von Neutronen, siehe Kapitel 11.

Lumineszenz

Lumineszenz heißt die Lichtemission gewisser Stoffe unter oder nach äußeren oder inneren Einwirkungen, mit Ausnahme von hohen Temperaturen, die zum Glühen des Stoffes führen. Die Unterscheidung von Fluoreszenz als Leuchten nur während der Einwirkung und von Phosphoreszenz als längerem Nachleuchten auch nach Beendigung der Einwirkung hängt von der zeitlichen Auflösung der Vorgänge ab und wird eigentlich nicht mehr gepflegt. Man spricht besser allgemein von Lumineszenz, mit Ausnahme des Leuchtens unter Einwirkung von UV-Licht, das weiter als Fluoreszenz bekannt ist. Auch nennt man die charakteristische Röntgenstrahlung Röntgenfluoreszenzstrahlung.

Lumineszenz unter Einwirkung ionisierender Strahlung ist nur eine von vielen Formen der Lumineszenz. Die bekannteste ist sicher das Leuchten von Bildschirmen von Fernsehgeräten und Kathodenstrahlzilographen unter Einwirkung eines bewegten Elektronenstrahls, die Kathodolumineszenz.

Die äußeren und inneren Einwirkungen, die in einem Stoff zur Lumineszenz führen, können auch von ganz anderer Art sein, z.B. die Elektrolumineszenz von Halbleiterdioden (LED), die Chemolumineszenz von Luminol, die Tribolumineszenz, das ist das Leuchten beim Zerbrechen von gewissen Kristallen, z.B. von Zuckerwürfeln, sowie die Biolumineszenz von Glühwürmchen.

Von Szintillation, wörtlich "kleine, schnelle Funken oder Blitze abgebend" spricht man im Besonderen, wenn die Lumineszenz eines Stoffes durch Strahlung des radioaktiven Zerfalls verursacht wird. Der Grund für die zeitliche Trennung der Funken liegt im statistischen Charakter des radioaktiven Zerfalls. Unter geeigneten Beobachtungsbedingungen erkennt man: Das Aufleuchten unter Bestrahlung ist nicht ein kontinuierliches, sondern besteht aus einzelnen Lichtblitzchen in unregelmäßigen, statistisch verteilten Zeitabständen. Als Szintillations-Materialien eignen sich gewisse Kristallpulver, enthalten in Leuchtschirmen oder Verstärkerfolien, oder besondere durchsichtige Flüssigkeiten, Kunststoffe oder Einkristalle, siehe Szintillationszähler.

Fluoreszenz

Die Fluoreszenz, das sichtbare Leuchten eines Stoffes bei Bestrahlung mit UV-Licht, hat seinen Namen vom Fluorit (Flussspat, CaF_2 , frühe Verwendung als Schmelzflussmittel), von dem gewisse Varietäten diese Erscheinung zeigen. Bei der Entdeckung der Radioaktivität durch Becquerel spielte die Fluoreszenz eine entscheidende Rolle. Röntgen hatte die Fluoreszenz bei der Entstehung seiner Strahlung am Glas der Entladungsröhre beobachtet. Dies veranlasste Becquerel, eigene fluoreszierende Stoffe weiter zu untersuchen. Aus seiner großen Sammlung fluoreszierender Minerale und chemischer Verbindungen nahm er nicht eine der vielen nicht-radioaktiven, sondern eines der radioaktiven Stücke, nämlich Uranylsulfat.

Fluoreszenz ist eine Eigenschaft vieler Stoffe. Man denke z.B. an optische Weißmacher in Waschmitteln. Fluoreszenz zeigen auch einige Uranminerale und Uranverbindungen bei Bestrahlung mit UV-Licht. Sie ist dann ein sehr empfindlicher Urannachweis, der schon 1852 von G. G. Stokes ein-

geführt wurde. Der Nachweis von Uran durch die Eigenschaft der Fluoreszenz gewisser Uranverbindungen ist von praktischer Bedeutung. Historisch spielt die Fluoreszenz von uranhaltigen Gläsern, wie schon in Kapitel 2 bei Uran gesagt, eine Rolle.

Leuchtschirme

Röntgen entdeckte die nach ihm benannte Strahlung (im Englischen X-rays, im Französischen rayons-X) durch helles Aufleuchten eines mit Bariumtetracyanoplatinat bestrichenen Schirmes, der sich im verdunkelten Zimmer in der Nähe seiner Entladungsröhre befand. Als Flächendetektoren mit Ortsauflösung ohne Notwendigkeit der photographischen Entwicklung sind einfache Leuchtschirme für ein Jahrhundert bis vor kurzem das Arbeitsgerät der medizinischen und der materialprüfenden Durchleuchtung gewesen. Sie wurden jedoch durch ortsauflösende, elektronische Flächendetektoren ersetzt, z.B. Röntgenbildverstärker und digitale Lumineszenzradiographen.

Der Leuchtstoff (Phosphor) von Leuchtschirmen ist heute meist feinkristallines, silberdotiertes Zinksulfid von gelber Farbe, das bei Bestrahlung, auch schon mit UV-Licht, gelbgrün luminesziert. Zum Nachweis ionisierender Strahlung muss diese Anregung für Leuchtschirme entweder sehr intensiv sein - Beispiele sind Röntgenstrahlen und Elektronenstrahlen - oder der Leuchtschirm muss lichtdicht geschützt sein. In anderen Fällen wird das durch Kernstrahlung erzeugte schwache Licht mittels einer Lichtverstärkeröhre (Photomultiplier) verstärkt. In dieser Anordnung arbeitet die Szintillationskammer nach Lucas zur Messung von alphastrahlendem Radon und Radonzerfallsprodukten, siehe Kapitel 10.

Verstärkerfolien

Verstärkerfolien enthalten Leuchtstoffe mit guter Absorption für Röntgenstrahlung und guter Lichtabgabe bei günstiger Wellenlänge für den auf die Folie gelegten Photofilm. Die Röntgenabsorption steigt stark mit der Ordnungszahl Z der chemischen Elemente im Leuchtstoff, siehe Kapitel 5. Calciumwolframat CaWO_4 ($Z = 20, 74, 8$), mit Seltenen Erden

dotiert, oder dotierte Oxide der Seltenen Erden, z.B. Tb-dotiertes Gd_2O_2S , sind deshalb wesentlich günstiger als Zinksulfid ZnS ($Z = 30, 16$). Zudem ist der Photofilm für blaues Licht von $CaWO_4$, angeregt durch Röntgenstrahlung, wesentlich empfindlicher als für Röntgenstrahlung selbst. Bei einer Röntgenaufnahme mit Photofilm plus Verstärkerfolie kommt die Schwärzung des Films zu 95 % durch das blauviolette Fluoreszenzlicht der Verstärkerfolie und nur zu etwa 5 % direkt durch die Röntgenstrahlung zustande. Folien ermöglichen daher eine willkommene Verkürzung der Belichtungszeit und damit im medizinischen Bereich eine Verminderung der Strahlenexposition des Patienten.

Szintillationszähler

Von Szintillation spricht man, wenn die Lumineszenz eines Stoffes durch Strahlung des radioaktiven Zerfalls verursacht wird. Solche lumineszierenden Stoffe leuchten aber auch unter Einwirkung von Röntgenstrahlung und ultraviolettem Licht. Neben dem schon erwähnten Kristallpulver (z.B. ZnS) gibt es szintillierende Flüssigkeiten, Kunststoffe und Einkristalle verschiedener Zusammensetzung und Dotierung. Auf der einen Seite des Detektors, der gegen Fremdlicht abgeschirmt sein muss, tritt die Strahlung ein und erzeugt im ganzen transparenten Detektorvolumen Lumineszenzlicht. Dies trifft im Durchlicht betrachtet auf eine Lichtverstärkeröhre (Photomultiplier, Sekundärelektronenvervielfacher). In diesem werden in der Photokathode durch den äußeren Photoeffekt Elektronen ausgelöst. Durch elektrische Felder werden die Elektronen beschleunigt und auf die nächste empfindliche Schicht (Dynode) geführt und lösen dort noch mehr Elektronen aus. Es sind viele Kaskaden möglich. Der Lichtverstärker ist ein exzellenter Wandler für optische in elektrische Signale, die elektronisch weiter verstärkt und verarbeitet werden können. Erst durch den Lichtverstärker und die Auswerteelektronik wird der Szintillator zum Szintillationszähler.

Die Kombination Szintillator mit Photomultiplier ist aus mehreren Gründen ein außerordentlich empfindlicher und wichtiger Strahlungsdetektor. Zum ersten gibt es für Gammastrahlung Szintillatoren mit großem Volumen, hoher Dichte, hoher Absorption und Lichtausbeute. Zum zweiten können Beta-

und Alphastrahler in Lösung gebracht und direkt mit flüssigen Szintillatoren vermischt werden. Zum dritten gibt es Szintillatoren mit sehr kurzen Anstieg- und Abklingzeiten, die in Kombination mit schnellen Photomultipliern und entsprechender Verstärkerelektronik auch bei hohen Aktivitäten einzelne Gammaquanten zeitaufgelöst registrieren.

Zum vierten gibt es Szintillatoren, bei denen die Zahl der erzeugten Photonen ("Lichtteilchen") der Energie des absorbierten Gammaquants ("Strahlenteilchen") proportional ist. Im Photomultiplier ist wiederum die Höhe des elektrischen Pulses am Ausgang der Photonenzahl am Eingang

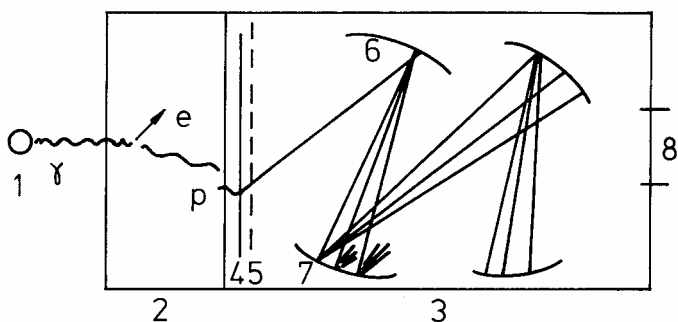


Abb. 9: Szintillationszähler, schematisch:

- 1 Radionuklidquelle.
 γ Gammaquanten (kurzwellig, energiereich).
- 2 Szintillator (Detektor) z.B. NaI.
 e Photoelektronen.
 p Photonen (langwellig, sichtbares Licht).
- 3 Photomultiplier (Sekundärelektronenvervielfacher).
- 4 Photokathode, wandelt Licht in Elektronen um.
- 5 Fokussierungselektrode für diese Elektronen zur Dynode.
- 6 Dynode, in einem elektrischen Feld werden die primären Elektronen beschleunigt und lösen in den folgenden Dynoden **7** jeweils mehr Elektronen aus. Dies führt am Ausgang **8** zu einem Ladungs(Spannungs)impuls.

proportional. Ein dem Photomultiplier folgender Analog-Digitalkonverter (ADC) und Vielkanalanalysator (MCA) liefert somit als Pulshöhenspektrum das Energiespektrum der

Gammastrahlung (siehe Kapitel 9). Dies ist besonders wichtig, da die Gammaenergie von Radionukliden nuklidspezifisch ist und über diese Energieauflösung erkannt werden kann, welche Radionuklide vorliegen. Zu solchen Szintillatoren gehören insbesondere thalliumdotierte Natriumiodid-Einkristalle (R. L. Hofstadter 1948). Vor der Entwicklung der Halbleiterdetektoren waren sie die einzigen energieauflösenden und damit nukliderkennenden Gammadetektoren.

Thermolumineszenz

Thermolumineszent heißen Stoffe, die bei Erwärmung auf circa 200 - 300 °C ohne thermisches Glühen und ohne chemische Änderungen sichtbares Licht abgeben. Die Erscheinung kann an natürlichem Fluorit von gewissen Fundorten mit Uranmineralen beobachtet werden. Beim Erwärmen findet eine lichtabgebende, strahlende Rekombination von Elektron-Loch-Paaren (elektronischen Defekten) statt. Diese werden durch die vorhergehende ionisierende Bestrahlung erzeugt und an bereits vorhandenen strukturellen Kristalldefekten (z.B. durch Dotierung erzeugt) getrappt. Bei genügend hoher und langer Erwärmung geschieht die Lichtabgabe vollständig. Eine zweite Erwärmung liefert kein weiteres Licht. Dafür ist eine neue Bestrahlung und Erwärmung erforderlich.

Thermolumineszenz wird in zahlreichen Stoffen beobachtet, durch Dotierung (Zugabe spezieller Elemente) und spezielle Präparation messtechnisch optimiert und für Dosimeter genutzt. Die Schreibweise ist Stoff:Dotierungselement.

CaF₂:Mn,Dy; LiF:Mg,Cu; CaSO₄:Mn,Dy; Al₂O₃:C.

Photolumineszenz

Bei gewissen Stoffen kann die Aktivierungsenergie zur Rekombination ("Ausheilen") der strahleninduzierten elektronischen Defekte auch in Form von Licht zugeführt werden: Photolumineszenz, z. B. in Phosphatglasdosimetern, und optisch stimulierte Lumineszenz, z. B. in C-dotiertem Aluminiumoxid, sogar empfindlicher als in TL-Auslesung.

Digitale Lumineszenz-Radiographie

Eine neuere Entwicklung mit sehr großer Zukunft ist die digitale Lumineszenz-Radiographie. Bei ihr werden Speicherleuchtstoffe wie polykristallines BaFBr:Eu auf Folien aufgebracht. Röntgenstrahlen erzeugen im Speicherstoff ein latentes Bild von elektronischen Strahlenschäden. Die Aktivierung zur Lichtabgabe erfolgt nun aber nicht wie bei der Thermo- oder Photolumineszenz integral, sondern orts aufgelöst durch einen bewegten Laserstrahl mit 0,1 mm Durchmesser, der die ganze Fläche Punkt für Punkt abtastet. Bei Folien von 20 cm mal 20 cm sind das 2000 Zeilen zu je 2000 Bildpunkten. Der synchron arbeitende Photomultiplier liefert elektrische Signale für ein digitales Bild, das beliebig weiterverarbeitet werden kann. Sehr beeindruckend ist die große Dynamik des linearen Ansprechverhaltens von niedrigsten zu hohen Röntgendosen, von 50 nGy bis 0,5 mGy (5 μ R bis 50 mR), und die sehr feine Differenzierung der eingestrahlten Energie in bis zu 40.000 Graustufen. Die bei Röntgenphotofilmen häufig vorkommenden und den Patienten belastenden Fehlbelichtungen werden vermieden.

Die digitale Lumineszenz-Radiographie hat gegenüber der konventionellen Röntgenaufnahmetechnik folgende Vorteile:

1. Reduktion der Strahlendosis,
2. Anwendung von Techniken der Bildverarbeitung,
3. Speicherung und Archivierung der digitalen Informationen auf elektronischen Medien.

Elektrische Effekte

Elektrische Effekte sind sehr charakteristisch für ionisierende Strahlung, ja die energiereiche Strahlung verdankt ihren "Vornamen" der Eigenschaft der Ionisierung. Ionisation heißt der Vorgang, bei dem ein oder mehrere Elektronen von einem Atom, Molekül oder anderem gebundenen Zustand abgelöst werden. Ionisation ist nicht die einzige Möglichkeit der Energieübertragung von Strahlung auf Materie. Ein weiterer Prozess der Energieübertragung ist z.B. die Anregung (Exzitation), die auch physikalische, chemische und biologische Folgen haben kann.

In anorganischen Lösungen dominiert die ionische Leitfähigkeit, die zur Messung ionisierender Strahlung nicht geeignet ist. In Flüssigkeiten kann ionisierende Strahlung eine chemische Zersetzung bewirken, die Radiolyse, analog zur Elektrolyse durch elektrischen Strom, oder Oxidations-Reduktionsvorgänge (siehe Fricke-Dosimeter) oder die Bildung von Radikalen, siehe Elektronenspinresonanz.

Bei den elektrischen Effekten unterscheidet man die Ionisation in Gasen, die Trennung von Ladungsträgern in Halbleitern, die Bildung neuer Elektronenzustände vor allem bei Radikalen, die zur Elektronenspinresonanzmethode führt, und die Emission von Elektronen aus Festkörpern: Photokathoden, Exoelektronen, Elektorradiographie. Elektrische Effekte lassen sich besonders gut verstärken. Treten sie aufgrund ionisierender Strahlung auf, dann kann diese mit außerordentlich hoher Empfindlichkeit gemessen werden. Dieser Vorteil führt zu zahlreichen Anwendungen in der Mess- und Regeltechnik.

Direkt und indirekt ionisierend, dicht und locker ionisierend.

Kommt es beim Auftreffen von Strahlung auf Materie zur Ionisation, unterscheidet man direkt und indirekt ionisierende Strahlung bzw. Teilchen.

Direkt ionisierend sind geladene Teilchen, wie Alpha- und Betateilchen oder Protonen. Diese führen bei einer Wechselwirkung mit Materie über eine Vielzahl von Stossprozessen neben einer Anregung auch zur direkten Ionisation der Materie.

Indirekt ionisierend dagegen ist die Strahlung ungeladener Teilchen, wie die Photonen der Röntgen- und Gammastrahlung und die Neutronen. Die Energie der einfallenden Strahlung wird zunächst in Bewegungsenergie geladener Teilchen (Elektronen und Protonen) umgewandelt. Diese Sekundärteilchen geben nun ihrerseits Energie an die sie umgebende Materie ab. Die Wechselwirkung dieser Sekundärteilchen mit Materie unterscheidet sich nicht von der der primär geladener Teilchen. Es kommt über eine Vielzahl von Stossprozessen zur Anregung und Ionisation der Materie.

Die Ionisation geschieht hauptsächlich indirekt durch die Sekundärteilchen und nicht direkt durch die Strahlung der ungeladenen Teilchen.

Mit der Ionisation wird Energie von der Strahlung auf Materie übertragen. Bei Strahlung von Teilchen - mit oder ohne Ladung - geschieht dieser Energietransfer auf einer kurzen Strecke. Man spricht von dicht ionisierender Strahlung und von einem hohen LET-Wert (Linearer Energie Transfer), Dimension $\text{keV}/\mu\text{m}$. Anders ist es bei der Photonenstrahlung. Die geringe Wechselwirkung dieser Strahlung mit Materie führt zu einer nur lockeren Ionisierung, einer geringen Zahl von Ionen pro Weglänge, einem niedrigen LET-Wert. Nebelkammerspuren geben dies sehr anschaulich wieder.

Nebelkammer

C.T.R. Wilson war Meteorologe und studierte 1895-1900 die Bildung von Wolken und Nebel als Folge der Ionisation von Luft durch Sonnenstrahlung und "Ausdünstungen" der Erde. Für Studien im Labor entwickelte er 1917 die Nebelkammer. Sie eignet sich vorzüglich zur räumlichen Sichtbarmachung von Bahnen ionisierender Strahlung. Ionen wirken in übersättigtem oder unterkühltem Dampf als Kondensationskerne für Tröpfchen, die Licht anders streuen als Dampf und dadurch sichtbar werden.

Die Nebelkammer enthält Luft, die mit Dampf von Wasser oder einer anderen geeigneten Flüssigkeit (Alkohol) nahezu gesättigt ist. Eine plötzlich, adiabatische Expansion führt zu einer Abkühlung, aber unter den eingestellten Bedingungen noch nicht zur allgemeinen Nebelbildung, sondern nur dort, wo die Teilchenstrahlung Ionen längs von Bahnen erzeugt hat. Alpha- und Betastrahlung eignen sich bestens zur Sichtbarmachung der Bahnen einzelner Teilchen in der Nebelkammer. Art und Energie der Teilchen bestimmen Dichte, Länge, Einheitlichkeit, Geradlinigkeit oder Krümmung der Bahnen im Magnetfeld. Gammastrahlen liefern Nebelspuren durch die im Gas ausgelösten Photoelektronen.

Unsere Erdatmosphäre ist physikalisch gesehen eine riesige Ionisationskammer. Es besteht ein auf die Erde hin gerichtete

tes elektrisches Feld mit einer Feldstärke von etwa 130 V/m in Erdbodennähe mit einer Abnahme nach oben. Die Ionen werden ständig neu gebildet durch radioaktive Emanationen aus der Erdoberfläche (Radon und Thoron), durch Höhenstrahlung und durch Sonnenstrahlung mit Energien größer 34 eV. Die mittlere Ionisierungsarbeit - die notwendige Energie zur Bildung eines Ionenpaares - beträgt in Luft 34 eV.

Gasionisationsdetektoren

Um die Ionisation in Gasen für ein Messinstrument zu nutzen, sind folgende Punkte zu beachten:

1. Alpha-, Beta- und Gammastrahlung verhalten sich bezüglich ihres primären Ionisationsvermögens unterschiedlich: direkt oder indirekt und dicht oder locker ionisierend.
2. Gasionisationsdetektoren bestehen aus einem Gasvolumen und aus Elektroden zum Sammeln der durch die ionisierende Strahlung gebildeten Ladungsträgerpaare. Die Elektroden sind Drähte oder ein zylindrisches Gehäuse mit koaxialem Draht oder ein flaches Gehäuse mit parallelen Drähten.
3. Die Hauptmenge der Ladungsträger wird je nach Gasdruck nicht im Gasvolumen erzeugt, sondern an den Oberflächen der Elektroden wegen deren größeren Massen.
4. Die unterschiedliche Lebensdauer von Elektronen, 10^{-6} s, und Ionen, 10^{-2} s, und die Anlagerung von Elektronen an neutrale Atome und Moleküle führt dazu, dass im Gasraum vor allem positive oder negative Ionen überwiegen.
5. Die Höhe der an den Elektroden liegenden Spannung, genauer die geometrisch bedingte Feldstärke (V/m), bestimmt, was mit den primär gebildeten Ladungsträgern geschieht. Dies wird durch die schematische Strom-Spannungs-Kennlinie dargestellt.

Strom-Spannungs-Kennlinie

Die Strom-Spannungs-Kennlinie gibt den Zusammenhang zwischen Detektorspannung und Messstrom wieder und zeigt schematisch die Unterschiede zwischen drei Typen

von Gasionisationsdetektoren: Ionisationskammer, Proportionalzähler, Geiger-Müller-Zähler.

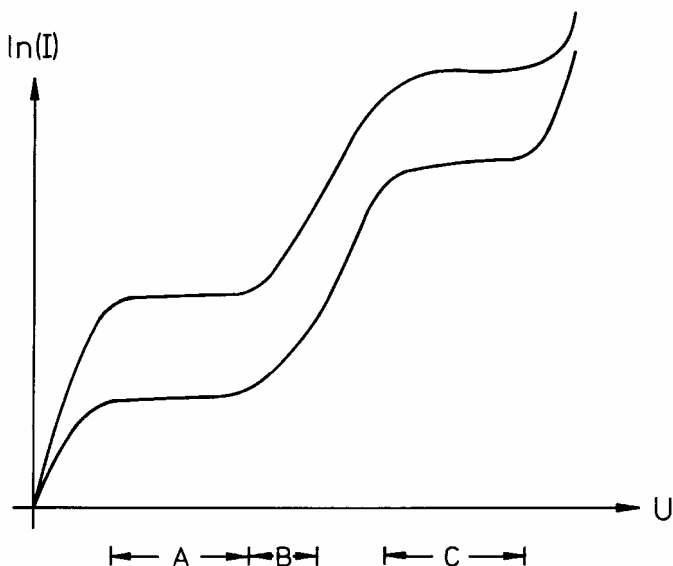


Abb. 10: Kennlinie von Gasionisationsdetektoren.

Messstrom $\ln(I)$ versus Detektorspannung U für zwei Dosisleistungen. Sättigungsbereich A, Proportionalbereich B, Auslösebereich C.

Im elektrischen Feld wandern die gebildeten Ionen zu den Sammelelektroden und erzeugen dort einen Messstrom. Mit steigender Feldstärke (Spannung) steigt der Messstrom, bis alle primär erzeugten Ladungsträger die Sammelelektroden erreichen, ohne vorher durch Rekombination verloren zu gehen. Im folgenden Sättigungsbereich bleibt der Messstrom auch bei steigender Spannung konstant. Dieses Plateau nutzt die Ionisationskammer.

Bei höheren Feldstärken werden die Ladungsträger der primären Ionisierung genügend beschleunigt, um durch Stoß sekundäre Ladungsträger zu erzeugen, deren Zahl proportional der Zahl der primären Ladungsträger ist. Der Mess-

strom wird verstärkt. Dies nutzt man beim Proportionalzähler.

Bei noch höheren Feldstärken kommt es im Gasraum zu lawinenartigen Sekundärionisationen und starken Strompulsen, die durch das primäre Teilchen oder Quant ausgelöst werden. Der Auslösezähler heißt nach seinem(n) Erfinder(n) Geigerzähler oder Geiger-Müller-Zähler.

Die Strom-Spannungscharakteristik ist eine schematische Beschreibung. Ein spezielles Gerät kann im Allgemeinen nicht durch Erhöhung der Spannung von einer Ionisationskammer zum Geigerzähler werden. Konstruktionsunterschiede der Elektroden und der Absorbergase bewirken sogar, dass man bei Geigerzählern höhere Feldstärken mit niedrigeren Spannungen erzeugt als bei Proportionalzählern. Zudem unterscheiden sich Füllgas und Gasdruck.

Ionisationskammer

Ein von zwei isolierten Elektroden mit angelegter Spannung begrenztes Gasvolumen bildet eine Ionisationskammer. Die Elektroden können zwei Platten sein oder ein Draht und ein Gehäuse. Die ionisierende Strahlung verursacht einen Strom, da das elektrische Feld zwischen den Elektroden die Rekombination der durch die Ionisation getrennten Ladungsträgerpaare verhindert. Allen Ionisationskammern ist gemeinsam, dass keine innere Verstärkung auftritt (wie bei Proportionalzähler und Geiger-Müller-Zähler). Die zum "Absaugen" der primären Ladungsträger verwendeten Feldstärken sind so gering, dass keine sekundären Ladungsträger erzeugt werden (Bereich A der Kennlinie).

Eine Ionisationskammer wird in der Regel auf eine der drei folgenden Arten betrieben:

1. Sie wird mit einem Elektrometer verbunden. Das System Ionisationskammer/Elektrometer wird vor der Messung aufgeladen. Während der Messung baut sich die Ladung (welche im Kondensator, den das System bildet, gespeichert ist) wegen des Ionisationsstromes wieder ab. So arbeiten Stabdosisimeter.

2. Sie wird mit einer Spannungsquelle und einem sehr empfindlichen Strommesser verbunden. Dieser misst direkt den Ionisationsstrom oder die Ionendosisleistung. Ionisationskammern nach dieser Betriebsart sind durch diese Eigenschaft die Primärinstrumente zur Bestimmung radiometrischer Größen.
3. Sie ist ähnlich wie ein Zählrohr mit einem Impulsverstärker verbunden. Im Vergleich zum Zählrohr muss dieser aber wesentlich empfindlicher sein. Mit dieser Art von Puls-Ionisationskammer lässt sich sogar Alphaspektrometrie betreiben, etwa zur Messung von Radon und Radonzerfallsprodukten.

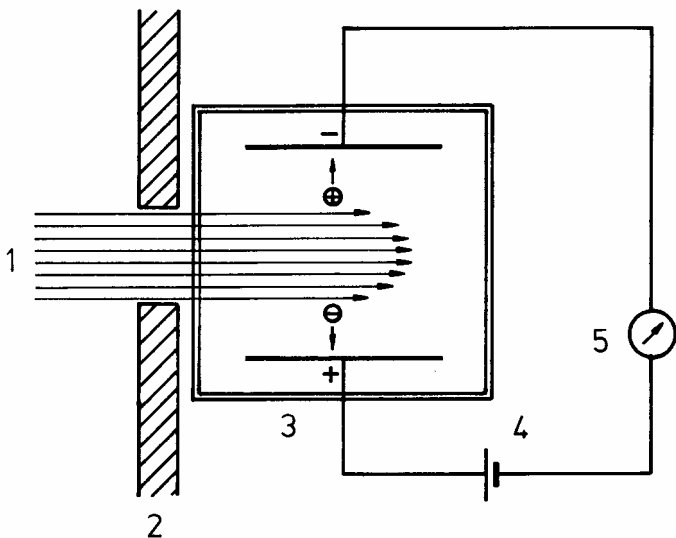


Abb. 11: Ionisationskammer schematisch

Die ionisierende Strahlung 1 gelangt durch die Blendenöffnung 2 (Fenster) in die Kammer 3 und erzeugt dort Ionen, d.h. trennt Ladungen -, +. Diese werden im elektrischen Feld der Spannungsquelle 4 abgesaugt und schließen einen Stromkreis mit Messinstrument 5.

Proportionalzähler

Bei Proportionalzählern ist die Zahl der durch Stoßionisation erzeugten sekundären Ladungsträger proportional zur Zahl der durch die Strahlung erzeugten primären Ladungsträger (Bereich B der Kennlinie). Der im Gasraum verstärkte Messstrom bzw. die Zahl der Stromimpulse pro Zeit ist proportional zur Energie der Strahlung und auch zu deren Ionisierungsvermögen.

Alphateilchen bewirken als dicht-ionisierende Teilchen eine erheblich stärkere Primärlionisation als Betateilchen. In der Impulsraten-Spannungs-Kennlinie eines Proportionalzählers liegt das Alpha-Plateau bei niedrigeren Spannungen als das Beta-Plateau.

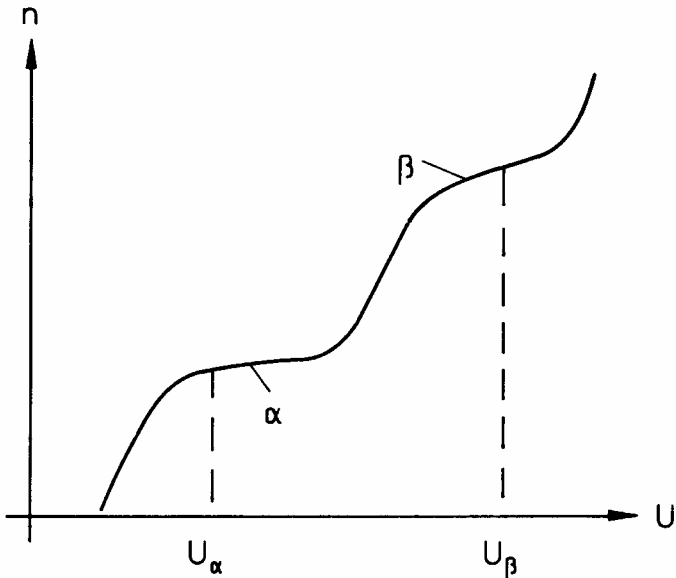


Abb. 12: Kennlinie eines Proportionalzählers.

Impulsrate in Abhängigkeit von der Detektorspannung U .

U_α Arbeitspunkt für Alphastrahlung,

U_β Arbeitspunkt für Betastrahlung,

α = Alpha-Plateau, β = Beta-Plateau.

Proportionalzählrohre lassen sich als großflächige, auch großvolumige und dünnfenstrige Kammern mit verschiedenen Gasfüllungen und damit sehr hoher Ansprechempfindlichkeit bauen. Diese Eigenschaften werden in Kontaminationsmonitoren und Low-Level-Messplätzen (siehe Kapitel 8) genutzt. Es gibt auch ortsauflösende Proportionalzähler, die etwa zur schnellen Registrierung von Röntgenbeugungsdiagrammen verwendet werden.

Geiger-Müller-Zähler

Von 1908 bis 1913 entwickelte J. W. Geiger das nach ihm benannte Zählrohr, 1925-1928 verbesserte er es zusammen mit W. Müller, deshalb auch Geiger-Müller-Zähler genannt. Hohe Feldstärken führen zu Stoßionisation und Ionenlawinen und einem großen Verstärkungsfaktor mit messbaren Stromstößen, die von einem einzigen primären Ionisationsakt ausgehen und somit einzeln zählbar sind. Mit einem Lautsprecher kann an den wechselnden Zeitabständen zwischen den einzelnen Knacktönen der statistische Charakter des radioaktiven Zerfalls hörbar gemacht werden. In der Strom-Spannungs-Kennlinie arbeitet der Geiger-Müller-Zähler im Auslösebereich (Bereich C der Kennlinie).

Bei der Ionisation, für die auch die Innenwände des Zählrohrs eine wesentliche Rolle spielen, entstehen Elektronen und positive Ionen. Letztere wandern im Feld langsamer und bilden eine Ladungswolke, welche die Feldstärke mindert, so dass die Stoßionisation unterbrochen wird. Während dieser Totzeit (beim Geigerzähler circa 10^{-4} s) ist das Zählrohr unempfindlich. Durch Löschzusätze zum Zählgas, z.B. Alkohol oder Halogene, werden Dauerentladungen verhindert.

Geiger-Müller-Zähler sind bekannte, weit verbreitete und preiswerte Strahlungsmessgeräte. Die Anzeige lautet Impulse pro Zeit. Durch entsprechende Kalibrierung kann die Anzeige auch in einer Einheit der Dosisleistung erfolgen. Verschiedene technische Ausführungen und deren Handhabung werden im Kapitel 7 besprochen.

Geiger-Müller-Zähler und Proportionalzähler heißen "Zähler", weil sie die ionisierende Strahlung durch Zählung ein-

zelter Stromimpulse messen, während man mit der Ionisationskammer Ströme misst.

Ladungsträger in Halbleitern

Halbleiterdetektoren beruhen auf dem inneren Photoeffekt und anderen Effekten der Wechselwirkung Strahlung - Materie, die Ladungsträgerpaare erzeugen und zu einer Änderung der elektrischen Leitfähigkeit durch die ionisierende Strahlung führen. Die Wirkungsmechanismen sind ähnlichen denen einer Ionisationskammer. Ionisierende Strahlung erzeugt Ladungsträgerpaare oder freie Elektron-Loch-Paare, die in einem angelegten elektrischen Feld gesammelt werden. Es gibt Halbleiterdetektoren in verschiedenen Ausführungen im Material und in der Form.

Der Hauptvorteil von Halbleiterdetektoren ist ihre sehr gute Energieauflösung. Die Impulshöhe des Ausgangssignals ist der Energie des absorbierten Gammaquants oder Alphateilchens proportional und dies bei der kleinen Ionisierungsarbeit von 3,6 eV für Silicium und 2,8 eV für Germanium, einem kleinen Nulleffekt und guter Zeitauflösung. Halbleiterdetektoren sind deshalb heute die Standard- und Hochleistungsdetektoren der Gamma- und der Alphaspektrometrie. Mit ihnen sind sehr genaue und schnelle nuklidspezifische Aktivitätsbestimmungen möglich geworden, siehe Kapitel 9.

Elektronenspinresonanz

In geeigneten kristallinen Stoffen können durch Bestrahlung Radikale, reaktive Molekülbruchstücke und Elektronen langer Lebensdauer erzeugt werden. In einem elektromagnetischen Hochfrequenzfeld entstehen bei bestimmten Frequenzen und bei Variation eines überlagerten Magnetfeldes Resonanzen des Elektronenspins. Es besteht Proportionalität der Amplitude des Resonanzsignals zur Zahl der gebildeten Radikale und damit zur Strahlendosis. Ein bewährtes ESR-Material ist Alanin, eine Alpha-Amino-Propionsäure, mit der Summenformel $C_3H_7O_2N$ und der Strukturformel $CH_3 \cdot CH \cdot NH_2 \cdot COOH$.

ESR-Dosimeter sind besonders geeignet für sehr hohe Dosen von 1 Gy bis 100 kGy. Solche Dosen werden verwendet

für die Bestrahlung von Saatgut und Lebensmitteln - in Deutschland nicht erlaubt - und zur Entkeimung von Operationsbestecken.

Thermische Effekte - Geothermie

Der radioaktive Zerfall ist stets mit einer Energiefreisetzung verbunden, primär in Form von Strahlungsenergie, letztlich in Form von Wärme im absorbierenden Medium. Die Energiefreisetzung stammt von der Differenz m aller beteiligter Massen vor und nach dem Zerfall, gemäß der Formel von Einstein $E = m \cdot c^2$. Wegen der sehr großen Lichtgeschwindigkeit c entsprechen sehr kleine Massendifferenzen sehr großen Energien.

Der Gehalt von Uran und Thorium in der Erdkruste nimmt wegen des lithophilen Charakters der beiden Elemente mit dem Abstand von der Oberfläche ab. Deshalb nimmt auch die Erwärmung durch den Zerfall von Uran und Thorium ab. Deshalb nimmt die geothermische Tiefenstufe [$m/^\circ C$] von anfänglich $33 m/^\circ C$ mit der Tiefe zu. Vulkanische Wärme ist dabei nicht berücksichtigt. Zum Gesamtwärmehaushalt des Erdmantels trägt der radiogene Wärmefluss von circa $100 mW/m^2$ im Vergleich zur Solarkonstante von $1,1 kW/m^2$ allerdings nur sehr wenig bei. Der radiogene Wärmefluss ist aber die treibende Kraft für geologische, dynamische Prozesse der oberen Erdkruste. Ohne wärmeproduzierende Radionuklide in der Erdkruste gäbe es keine Bewegung und Verformung der Erdkruste, keine Tektonik.

Strahlungs kalorimeter

Da Strahlung eine Form von Energie ist und alle Energieformen sich letztlich in Wärme umwandeln, kann eine Temperaturerhöhung zur Messung der Energiedosis dienen. Der Effekt ist allerdings sehr klein und seine Messung erfordert, wenn nicht sehr hohe Energiedosisleistungen vorliegen, großen experimentellen Aufwand. Voraussetzung ist zudem, dass die absorbierte Strahlungsenergie vollständig in Wärme und nicht in andere Energieformen (chemische oder kristallphysikalische) umgewandelt wird.

Eine Dosis von 1 Gray erhöht die Temperatur von 1 L Wasser um 0,24 mK, die von 1 kg Graphit um 1,4 mK. 1 milliKelvin [mK] = 0,001 °C. Der höhere Wert von Graphit beruht auf seiner kleineren spezifischen Wärme. In vielen nationalen Eichlaboratorien werden Graphitkalorimeter als Standard zur Messung der Einheit der Energiedosis benutzt.

1 Gray entspricht bei Gammastrahlung 1 Sievert (= 100 rem), strahlenbiologisch eine hochgefährliche akute Dosis. Dies zeigt: Bei der Wirkung von Energie zählt deren Qualität zuweilen sehr viel mehr als deren Quantität. Die Quantenenergie ionisierender Strahlung ist eine äußerst wirkungsvolle Form (Qualität) von Energie, deren Wärmeäquivalent zu vernachlässigen ist.

5. Wechselwirkung zwischen ionisierender Strahlung und Materie

Übersicht • Qualitative messtechnische Charakterisierung • Schwächungsgesetz für Photonen • Halbwertsschichtdicke • Die Komponenten der Photonenschwächung • Kohärente Streuung • Photoeffekt • Comptoneffekt • Paarbildung • Kernphotoeffekt • Wechselwirkung von Betastrahlung • Schwächung von Betastrahlung • Reichweite von Betastrahlung • Selbstabsorption • Streuung von Betastrahlung • Ionisation und Anregung • Bremsstrahlung • Wechselwirkung von Alphastrahlung

Übersicht

Strahlung und Materie beeinflussen sich gegenseitig, wenn sie aufeinander treffen. Durch verschiedene Mechanismen wird Energie von der Strahlung auf die Materie übertragen. Dabei werden die Intensität, die Energie und teilweise auch die Richtung der Strahlung verändert. Diese Effekte sind strahlungsartspezifisch und können zu einer einfachen Charakterisierung der Strahlung verwendet werden.

Weil sich Strahlung und Materie beim Aufeinandertreffen gegenseitig verändern, spricht man von Wechselwirkung. Entscheidend für die dabei auftretenden Effekte sind die jeweiligen Mechanismen der Energieübertragung von der Strahlung auf die Materie.

Bei der Wechselwirkung erfährt die Strahlung Schwächung, Streuung, Absorption und Stossprozesse. Die Materie erfährt Anregung und Ionisation.

Welche der genannten Effekte bei der gegenseitigen Wechselwirkung in der Materie und bei der Strahlung vor allem auftreten, hängt ab von:

- der Strahlung: ihrer Art und Energie,
- der Materie: ihrer Dichte und ihren Ordnungszahlen,
- der räumlichen Verteilung von Strahlung und Materie.

In diesem Kapitel werden behandelt:

1. Prozesse der Wechselwirkung von Strahlung mit bekannter Materie,
2. Einfluss der Wechselwirkung auf die Strahlung,
3. Einfluss der Wechselwirkung auf die Materie, soweit für Radiometrie oder Strahlenschutz relevant.

Das Verständnis der physikalischen Vorgänge in der Materie, z. B. eines Detektors, einer Abschirmung oder einer Probe und ihrem Behälter ist eine Voraussetzung für eine sachgerechte Strahlungsmessung, für die Bewertung der Messergebnisse und für den praktischen Strahlenschutz.

Qualitative messtechnische Charakterisierung

Bezüglich der Absorption verhalten sich Photonen- und Teilchenstrahlung sehr unterschiedlich. Bei der Teilchenstrahlung verhalten sich die elektrisch geladenen Beta- und Alphateilchen sowie die Positronen und Protonen bei der Wechselwirkung mit Materie anders als die ungeladenen Neutronen. Erstere sind direkt ionisierend, letztere - wie auch die Photonen - indirekt ionisierend, siehe Kapitel 4.

Für Radiometrie und Strahlenschutz ist die Absorption der Strahlung die erste Voraussetzung zur Messung und zum Schutz. Wir betrachten zunächst Strahlung typischer Energie: Röntgenstrahlung 40 bis 100 keV, Gammastrahlung 30 keV bis 2 MeV, Betastrahlung 18 keV bis 2,5 MeV, Alphastrahlung 3 bis 7 MeV.

Dann gilt:

1. Alphastrahlung wird sehr stark absorbiert, schon in ein paar cm Luft oder in einem Blatt Papier oder in 50 μm Gewebe,
2. Betastrahlung hat in Luft eine Reichweite bis zu einigen Metern und wird in ein paar mm bis cm Aluminium oder Plexiglas vollständig absorbiert.
3. Gamma(Photonen)strahlung wird nur wenig, in Luft kaum geschwächt, es bedarf dicker Abschirmungen aus Materialien hoher Ordnungszahl und hoher Dichte.

Die Absorptionskoeffizienten für Alpha-, Beta-, und Gammastrahlung verhalten sich etwa wie 10.000 zu 100 zu 1.

Für den Strahlenschutz wird aus diesen Tatsachen nicht selten die Aussage gemacht, Alpha- und Betastrahler seien harmloser als Gammastrahler. Dies gilt aber nur bei Bestrahlung von außen und nur in Maßen. Es gilt nicht bei Bestrahlung von innen nach Inkorporation (Inhalation, Ingestion). Bei Inkorporation sind Alpha- und Betastrahler, gerade weil sie ihre gesamte Energie auf kleiner Wegstrecke abgeben, viel gefährlicher als Gammastrahler.

Das Abstandsgesetz in der Form einer Abnahme der Intensität mit dem Quadrat des Abstandes von der Quelle gilt für Punktstrahler (z.B. Radionuklidquellen), nicht aber für kollimierte Strahlenbündel (z.B. Röntgenröhren). Für letztere gilt das lineare Schwächungsgesetz.

Für die Messtechnik muss das stark unterschiedliche Absorptionsverhalten von Alpha-, Beta- und Gammastrahlung beim Material des Detektors und des Fensters des Detektors beachtet werden. Für Alpha- und Betadetektoren sind Gase als Ionisationsmedium trotz ihrer geringen Dichte geeignet, aber dünne Eintrittsfenster oder offene Detektoren notwendig. Für Gammadetektoren guter Empfindlichkeit sind Festkörper (hohe Dichte) notwendig, aber übliche Umhüllung geeignet. Mit zunehmender Energie der Strahlung sinkt jedoch die Absorption im Detektor und damit dessen Ausbeute (Effizienz).

Schwächungsgesetz für Photonen

Schwächung heißt die Abnahme der Primärintensität eines parallelen Photonenstrahls beim Durchlaufen einer materiefüllten Strecke, dem Absorber. Schwächung ist nicht gleich Absorption, sondern Intensitätsabnahme durch zwei Vorgänge: Absorption und Streuung. Streuung ist die Richtungsänderung, z.B. auch Reflexion, ohne oder mit Energieabnahme von einem Teil der Strahlung zur Seite oder rückwärts, die Vorwärtsrichtung wird geschwächt.

Es gilt: Die Schwächung $\Delta I/\Delta d$ der Photonenzahl im Absorber der Schichtdicke d ist der Photonenzahl I proportional.

$$\Delta I/\Delta d = -\mu \cdot I. \quad I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$$

μ heißt Schwächungskoeffizient und hat die Einheit cm^{-1} oder m^{-1} . I_0 ist die Anzahl der Photonen ohne Absorber, I die

Anzahl mit dem Absorber. μ/ρ heißt Massenschwächungskoeffizient [Fläche durch Masse], ρ ist die Dichte [Masse durch Volumen]. $\rho \cdot d$ heißt Flächenmasse [Masse durch Fläche].

In dieser einfachen Form gilt das Schwächungsgesetz nur für Photonen einheitlicher Photonenenergie E und für Absorber einheitlicher bzw. gemittelter Dichte ρ und Ordnungszahl Z , da μ stark von E , Z und ρ abhängt. Der Massenschwächungskoeffizient μ/ρ hängt nur von E und Z ab. μ/ρ nimmt mit Z zu und mit E ab.

Halbwertsschichtdicke

Das Schwächungsgesetz hat dieselbe mathematische Form wie das Zerfallsgesetz. Analog zur Halbwertszeit eines Radionuklids ist die Halbwertsschichtdicke L eines Materials definiert als $L = \ln 2/\mu$, die Schichtdicke, mit der die gemessene Intensität auf die Hälfte sinkt.

Zehn Halbwertsschichtdicken schwächen den Photonenstrahl auf circa 1 Promille. Auch hier sei erinnert, dass ein bestimmtes L nur für monoenergetische Photonen gilt, etwa eines Radionuklids, nicht für Strahlung von Röntgenröhren mit kontinuierlichem Energiespektrum.

Die Abhängigkeit der Schwächung von Gammastrahlung von der Schichtdicke und der Dichte von Absorbern nutzt man in der Mess- und Regeltechnik zur berührungslosen Messung von Schichtdicken, Füllstandshöhen, Schüttgewichten, zur Pack- und Füllkontrolle sowie zur Stückgutzahlung, siehe Kapitel 13.

Die Komponenten der Photonenschwächung

Zur Schwächung tragen 5 verschiedene Effekte bei. Der Schwächungskoeffizient μ hat somit 5 Komponenten:

$$\mu = \sigma_k + \tau + \sigma_c + \kappa + \tau_k$$

mit σ_k für kohärente Streuung, τ für Photoabsorption, σ_c für Comptonstreuung, κ für Paarbildung und τ_k für den Kernphotoeffekt (nur bei sehr hohen Energien).

Die Fünf sind in unterschiedlicher Weise abhängig von der Photonenenergie E und der Ordnungszahl Z des Absorbers. Die Gesamtschwächung verteilt sich bei verschiedenen E und Z unterschiedlich auf die 5 Komponenten. Die Effekte werden nun im Einzelnen besprochen, da sie für Radiometrie und Strahlenschutz von grundlegender Bedeutung sind.

Kohärente Streuung

Die kohärente Streuung ist eine Richtungsänderung der Photonen ohne Energieverlust. Deshalb wird sie auch elastische Streuung genannt. Ohne Energieverlust heißt, die Frequenzen (Wellenlängen) der primären und der gestreuten Photonen-Welle sind gleich, was Interferenz ermöglicht, daher die Bezeichnung kohärent.

Photoeffekt

Der Photoeffekt, die photoelektrische Absorption, ist die Wechselwirkung eines Photons mit einem stark gebundenen Elektron einer inneren Schale (K-, L-Schale) eines Atoms. Dabei wird das Photon absorbiert, es verschwindet und seine gesamte Energie $h \cdot \nu$ wird auf ein Elektron übertragen, das abgetrennt wird: Das Atom wird ionisiert. Das Photoelektron erhält die kinetische Energie

$$E_{\text{kin}} = h \cdot \nu - E_B$$

E_B ist die Bindungsenergie des Elektrons im neutralen Atom. Für den Photoeffekt muss gelten

$$h \cdot \nu > E_B.$$

Bei einheitlicher Photonenenergie ist auch die kinetische Energie der Photoelektronen einheitlich und führt im Absorber zu einer einheitlichen Zahl von Ionisationen. Die durch Stoßionisation erzeugten freien Elektronen sind es, die einen messtechnischen Effekt liefern und die dosimetrisch relevant sind.

Das vom Photoelektron hinterlassene Loch in der K- oder L-Schale wird durch ein äußeres Elektron gefüllt. Die Energiedifferenz erscheint als charakteristische Röntgenstrahlung, sogenannte Fluoreszenzstrahlung. Den Vorgang haben wir schon bei der Erzeugung von Röntgenstrahlung im Kapitel 2 kennen gelernt. Dort interessierte die emittierte Röntgen-

strahlung, hier das absorbierte Photon und das emittierte Photoelektron.

Der Quotient des Schwächungskoeffizienten τ für Photoabsorption und der Dichte ρ des Absorbers heißt Massenphotoabsorptionskoeffizient τ/ρ . Für $h \cdot \nu = E > E_B$ (die Bindungsenergie der K-Elektronen) gilt in 1. Näherung:

$$\tau/\rho \sim Z^3 / E^3$$

τ/ρ nimmt also mit der Ordnungszahl Z sehr stark zu und mit der Energie sehr stark ab. Auf dem Photoeffekt beruhen die Wirkungsweisen von Szintillations- und Halbleiterdetektoren für Gammastrahlung. Die Ausbeute der Detektoren sinkt daher stark mit zunehmender Photonenenergie und nimmt mit der Ordnungszahl des Detektormaterials zu.

Comptoneffekt

Der Comptoneffekt (A. H. Compton, 1923) ist die Wechselwirkung eines Photons mit einem freien oder lose gebundenen Elektron der äußeren Schale eines Atoms, dessen Bindungsenergie E_B gegenüber der primären Photonenenergie $h \cdot \nu$ vernachlässigbar klein ist. In einem "Stoß" wird nur ein Teil von $h \cdot \nu$ dem so genannten Comptonelektron als kinetische Energie E_{kin} übertragen, der Rest $h \cdot \nu'$ bleibt dem Photon, das eine Richtungsänderung erfährt, also gestreut wird. Wegen des Energieverlusts des gestreuten Photons ist die Comptonstreuung als unelastische, nichtkohärente Streuung zu bezeichnen. Der Comptoneffekt führt zu einer Erniedrigung der Quantenenergie der Primärstrahlung. Die Compton-Elektronen verlieren ihre variable kinetische Energie im Absorbermaterial durch Stöße an so genannte sekundäre Elektronen.

Paarbildung

Ab einer Photonenenergie

$$h \cdot \nu > 2 m_o \cdot c^2 = 1,022 \text{ MeV}$$

kann sich im Coulombfeld des Atomkerns ein Elektron-Positron-Paar bilden. 0,511 MeV ist die Ruheenergie eines Elektrons bzw. Positrons mit der Ruhemasse m_o . Überschüssige Photonenenergie wird dem Paar als kinetische Energie mitgegeben. Das Positron hat nur eine sehr kurze

Lebensdauer, wird abgebremst und rekombiniert mit einem Elektron wieder zu Vernichtungsstrahlung. Das erstgebildete Elektron gibt seine Energie durch Stöße oder Bremsstrahlung weiter.

Kernphotoeffekt

Bei sehr hohen Gammaenergien > 1 MeV werden in steigendem Maße Kernreaktionen vom Typ (γ, n) oder (γ, p) ausgelöst, siehe Kapitel 11 Neutronen.

Wechselwirkung von Betastrahlung

Von den Teilchenstrahlungen wollen wir die Beta- bzw. die Elektronenstrahlung und die Alphastrahlung behandeln sowie im Kapitel 11 die Neutronenstrahlung, da letztere in bestimmten kerntechnischen Anlagen und in großer Höhe als Anteil der kosmischen Strahlung auftritt.

Unter Betastrahlung versteht man die Elektronen und Positronen, die bei der Kernumwandlung von Radionukliden emittiert werden. Elektronenstrahlung nennt man dagegen Elektronen aus technischen Quellen, etwa in Röntgenröhren oder allgemein Elektronenstrahlröhren. Man spricht auch von Kathodenstrahlröhren, weil die Elektronen von der negativen Elektrode, der Kathode, kommen.

Bei der Wechselwirkung von Elektronen mit Materie ist auch an die Sekundärelektronen wie Photo- und Compton-Elektronen zu denken, die von Photonen bei ihrer Wechselwirkung mit Materie freigesetzt werden.

Die Wechselwirkung von Elektronen mit Materie ist direkter (direkt ionisierend) und stärker (stärker absorbierend) als die von Photonen. Wie bei diesen kommt es zu Schwächung und Streuung, sowie Absorption mit Anregung, Ionisation und Bremsstrahlung.

Bei der Wechselwirkung von Elektronen mit Materie lassen sich 4 Arten von Stoßereignissen unterscheiden: elastische und unelastische Stöße mit Elektronen der Atomhülle sowie elastische und unelastische Stöße mit Atomkernen. Unelastische Stöße Elektron - Elektron sind der wichtigste Prozess

für Ionisation und Anregung. Elastische Stöße Elektron - Elektron und Elektron - Atomkern führen zu Streuung. Unelastische Stöße hochenergetischer Elektronen mit Atomkernen führen zu Bremsstrahlung.

Schwächung von Betastrahlung

Mit einem Betastrahler, etwa Strontium-90, einem betaeempfindlichen Zähler und einer Reihe von Absorberschichten lässt sich das Schwächungsgesetz für Elektronen experimentell finden. Der natürliche Logarithmus der Impulsrate I gegen die Absorberdicke d (lineare Abszisse) aufgetragen, ergibt eine Gerade und belegt das Schwächungsgesetz

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$$

wobei I die Zählrate bei Absorberdicke d , I_0 die Zählrate bei Absorberdicke $d = 0$, μ den Schwächungskoeffizienten für ein Absorbermaterial bezeichnen. Dies gilt für Parallelstrahlbündel und nicht zu große Absorberdicke d .

Untersucht man die Schwächung für verschiedene Absorbermaterialien und trägt die Zählrate I logarithmisch gegen die Flächenmasse $b = \rho \cdot d$ auf, also das Produkt von Dichte ρ und Absorberdicke d , so ergeben sich für verschiedene Materialien nahezu gleiche Steigungen der Gerade:

$$I = I_0 \cdot e^{-(\mu/\rho) \cdot (\rho \cdot d)} = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$$

Dies bedeutet: der Massenschwächungskoeffizient μ/ρ ist von der Ordnungszahl Z unabhängig.

Reichweite von Betastrahlung

Elektronen haben in Materie eine endliche Reichweite. Experimentell wird die Reichweite a aus der Auftragung der Zählrate I gegen die Absorberdicke d , d.h. aus der Transmissionskurve ermittelt. Ein Absorbermaterial wird durch seine Flächenmasse $b = \rho \cdot d$ (Einheit g/cm^2) spezifiziert. Die maximale Reichweite von Betateilchen als Funktion ihrer Maximalenergie und des Absorbers ist den Zahlenwerten der Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Reichweite von Betastrahlung

Energie MeV	Flächen- masse mg/cm ²	Al (mm)	Wasser (mm)	Luft (mm)
0,01	0,16	0,0006	0,002	1,3
0,05	3,9	0,014	0,05	29
0,1	14	0,05	0,16	100
0,5	160	0,6	1,9	1190
1,0	410	1,5	4,8	3060

Eine bestimmte Flächenmasse wird mit verschiedenen Absorbieren durch absorberspezifische Dicken erreicht. Luft ist die Standardsubstanz für Ionisationsmessungen, Wasser ist die Standardsubstanz für strahlenbiologische Messungen.

Selbstabsorption

Die starke Wechselwirkung von Betastrahlung mit Materie führt zu starker Absorption schon in der Matrix, der Materie, in der Radionuklide eingebettet sind, d.h. zur Selbstabsorption. Diese muss bei Messungen von Aktivität und Energiedosis bei der Probenform und bei der Messmethode beachtet werden. Zur Demonstration der Selbstabsorption eignet sich KCl. Die doppelte Menge auf der gleichen Fläche oder die gleiche Menge auf der halben Fläche verteilt, liefert mit einem Kontaminationsmonitor weniger als die doppelte Impulsrate. Darauf ist zu achten bei der Verwendung von KCl für Prüf- und Kalibrierstrahler.

Reine Betastrahler, wie Strontium-90, wenn Milch damit kontaminiert ist, sind wegen der Selbstabsorption ohne chemische Abtrennung und Ausbringung auf dünne Schichten schwer messbar und erfordern Spezialverfahren.

Streuung von Betastrahlung

Bei Photonen lässt sich die kohärente Streuung und die inkohärente Comptonstreuung mit einem einfachen Experiment nicht leicht nachweisen, die Wechselwirkung ist klein. Anders ist es mit Elektronen. Die leichten, geladenen Teilchen werden von Materie mit der Ordnungszahl Z in gut

messbarer Weise proportional zu Z rückgestreut. Gut geeignet ist Wolframblech. Maximale Streuung tritt auf, wenn Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel ist. Die Rückstreuung von Betastrahlung kann zur Effizienzerhöhung bei Betamesungen, siehe Kapitel 8, oder zur berührungslosen Füllstandsmessung verwendet werden.

Ionisation und Anregung

Elektronen verlieren in Materie ihre kinetische Energie im wesentlichen durch zwei Wechselwirkungen:

1. Unelastische Stöße mit den Hüllenelektronen, die zu Ionisation und Anregung führen,
2. Bremsstrahlung.

Als delta-Elektronen bezeichnet man die von primären Elektronen oder von Sekundärelektronen einer Photonenstrahlung aus ihrer Bindung befreiten Elektronen mit so hoher kinetischer Energie, dass sie ihrerseits ionisieren.

Bei der Stoßionisation verringert ein Elektron seine kinetische Energie in sehr kurzer zeitlicher Folge um jeweils den gleichen Betrag. Die Höhe des Ionisationspulses ist deshalb proportional zur Zahl der Einzelionisationen durch ein Elektron. Das Impulshöhenspektrum der Ionisation ist somit ein Energiespektrum der Strahlung.

Bremsstrahlung

Eine elektromagnetische Wechselwirkung von Elektronen mit dem Coulombfeld des Atomkerns oder der Hüllenelektronen führt zu einer Abbremsung der Elektronen. Energie wird elektromagnetisch abgestrahlt und als Bremsstrahlung bezeichnet, siehe Röntgenstrahlung. An die Bremsstrahlung ist bei allen Störstrahlern zu denken.

Im Strahlenschutz ist die Bremsstrahlung von Betastrahlern immer zu beachten. Hierzu ein einfaches Experiment. Zwei Absorberplatten, Plexiglas und Aluminium mit gleicher Flächenmasse $d \cdot \rho$ werden in zwei Anordnungen gebracht. Im Gegensatz zur klassischen Optik ist der Strahlenweg nicht in beiden Richtungen gleichwertig.

Anordnung 1: Betastrahler, Aluminium, Plexiglas,
Messinstrument

Anordnung 2: Betastrahler, Plexiglas, Aluminium,
Messinstrument

Die Zählrate ist in der Anordnung 1 größer als in der Anordnung 2. Bezüglich der Betaabsorption sind beide Anordnungen wegen der gleichen Flächenmasse beider Absorberanordnungen gleich wirksam. Bremsstrahlung wird aber vom Betastrahl in Anordnung 1 in Aluminium in größerem Maß erzeugt und von Plexiglas eher durchgelassen, als in Anordnung 2 in Plexiglas erzeugt und von Aluminium durchgelassen.

Fazit: Betastrahler sind mit Absorbern niedriger Ordnungszahl abzuschirmen. Eine hohe Ordnungszahl für Abschirmungen ist nur für Photonenstrahlung sinnvoll.

Wechselwirkung von Alphastrahlung

Alphastrahlung hat als Strahlung schwerer, geladener Teilchen die stärkste Wechselwirkung mit Materie und deshalb die höchste Selbstabsorption und die geringste Reichweite. Bei äußerer Bestrahlung ist Alphastrahlung harmloser, bei Kontamination oder gar Inkorporation aber gefährlicher als die anderen Strahlungsarten.

Bei umschlossenen Alpha-Referenzstrahlern darf die Umhüllung nur sehr dünn sein. Alphamessungen erfordern offene Messkammern, z.B. bei Radon oder sehr dünne Eintrittsfenster des Detektors, um die Strahlung überhaupt messen zu können.

Alphastrahlende Radionuklide haben ein diskretes Energiespektrum. Die Alphaspektrometrie ist aber wegen der Selbstabsorption messtechnisch nicht so einfach wie die Gammaskpektrometrie.

Alphateilchen haben eine hohe spezifische Ionisation, sie sind direkt und dicht ionisierend. Die Elektronen aus primären Ionisationsprozessen können so viel Energie erhalten, dass sie weiter ionisieren.

6. Messphilosophie und Messpraxis

Übersicht • Zur Statistik von Messwerten • Signifikanz bei zählenden Messungen • Optimierung des Mess-Systems • Messziele • Messgeräteparameter • Probensammlung

Übersicht

Fast alle Messungen ionisierender Strahlung sind zählende Messungen. Ausnahmen sind Ionisationskammern und Film- und Thermolumineszenz-Dosimeter. Wir beginnen mit kurzen Ausführungen und Beispielen zur Statistik von Impulszahlen, wie sie bei der Messung der Umgebungsstrahlung erhalten werden. Bei der Messung von Proben sind Überlegungen zur Statistik anzuwenden auf zwei verschiedene Messungen, nämlich von Untergrund = U und Untergrund plus Probe = Brutto = B , aus deren Differenz $N = B - U$ erst die Aktivität der Probe errechnet werden kann. Zur Qualitätssicherung solcher Messungen ist die Nettoimpulszahl N auf Signifikanz zu prüfen. Messprobe, Messgerät, Messanordnung und Messablauf bilden ein System, dessen Parameter bezüglich Aufwand und Ergebnis zu optimieren sind.

Es folgt eine Zusammenstellung von Messzielen, geordnet nach radiometrischen Größen, sowie nach „Auflösungen“, Verwendungen und Probenparametern. Zur richtigen Messung bedarf es Kenntnis und Verständnis der Parameter des Messgerätes und der Probe und für verschiedene Aufgaben einer Palette von Messgeräten und einer Probensammlung.

Zur Statistik von Messwerten

Der statistische Charakter des radioaktiven Zerfalls, siehe Kapitel 2, äußert sich bei Wiederholungsmessungen in der Statistik der einzelnen Messwerte. Die Zahlenwerte einer Messgröße wie die Impulsrate im Detektor schwanken von einer Messung zur nächsten und zwar relativ um so stärker, je kleiner die Messgröße ist. Bei Kernzerfällen und Detektorimpulsen können die Ereigniszahlen nur ganzzahlig und nichtnegativ sein. Die Verteilung der Ereigniszahlen bei wiederholten Messungen wird mathematisch korrekt durch die Poisson-Verteilung beschrieben. Bei hinreichend großer

Anzahl von Einzelmessungen unter gleichen Bedingungen und hinreichend großer Anzahl von Impulsen in jeder Einzelmessung kann man mit der mathematisch einfacheren Normalverteilung arbeiten, graphisch mit der Gauß'schen Glockenkurve.

„Unter gleichen Bedingungen“ beinhaltet auch, dass die Messzeit jeder Einzelmessung kurz ist gegenüber der Halbwertszeit des gemessenen Radionuklids, sofern dieses nicht im radioaktiven Gleichgewicht mit seinem langlebigen Mutternuklid steht. Darauf ist bei den kurzlebigen Radonzerfallsprodukten zu achten. Umgekehrt lässt sich aus einer nicht-statistischen Änderung der Zahl der Impulse in einer Abfolge von Einzelmessungen - der Abkling- oder Aufbaukurve - auf die Halbwertszeit der Probe schließen.

Zur Statistik können nur einige Hinweise gegeben werden. Der Mittelwert von n Messwerten x_1, x_2, \dots, x_n von n Wiederholungsmessungen ist x_m . Die Breite oder Streuung der Verteilung wird durch die empirische Standardabweichung σ charakterisiert, die über die empirische Varianz σ^2 definiert ist. σ heißt für Mathematiker Standardabweichung und für Physiker Standardmessunsicherheit, früher kurz "Fehler".

$$x_m = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n-1}$$

Der „richtige“ Messwert liegt dann mit der Wahrscheinlichkeit $p = 68,3 \%$ innerhalb von $\pm 1\sigma$ um x_m , mit $p = 95,6 \%$ innerhalb von $\pm 2\sigma$ und mit $p = 99,7 \%$ innerhalb von $\pm 3\sigma$ um x_m . Man spricht für $\pm 3\sigma$ auch vom 99%-Vertrauensbereich um den Mittelwert x_m . Als prozentuale oder relative Messunsicherheit ist definiert

$$\delta = \frac{\sigma}{x_m} \cdot 100 [\%].$$

Liegt nur eine Messung vor ($n = 1$), dann ist σ nicht definiert. Beruht die einzelne Messung auf einer genügend großen Zahl ($X > 100$) von Einzelereignissen im Detektor (z.B. Impulsen eines Zählers), so kann für die Standardabweichung σ ihr Schätzwert s verwendet werden: $s = \sqrt{X}$ bzw. für die relative Standardmessunsicherheit der Schätzwert

$f = \frac{\sqrt{X}}{X} \cdot 100\%$. Mit der Impulszahl $X = x \cdot t$ (x Impulsrate = Impulse pro Sekunde, t Messzeit in Sekunden) ergibt sich

$$s \sim \sqrt{t} \quad \text{und} \quad f \sim \frac{1}{\sqrt{t}} .$$

Drei Reihen von konkreten Impulszahlen von je 10 Messungen mit einem Geiger-Müller-Zähler (siehe Kapitel 8) sollen das Vorhergehende veranschaulichen, und zwar mit den Messzeiten 1 und 10 min für eine niedrige Umgebungsstrahlung U ohne Probe und mit 1 min für die erhöhte Strahlung einer Probe.

1. Reihe:

Niedriges U , $t = 1$ min:

x_i : 32, 35, 42, 42, 37, 44, 36, 47, 42, 32. $x_m = 39$,

Formel $\sigma^2 = 243/9$; $\sigma = 5,2$; $\delta = 13\%$,

Näherung eigentlich unzulässig, da $x_i < 100$

Schätzwerte $s = \sqrt{39} \approx 6,2$; $f \approx 16\%$;

im Intervall 33 - 45 liegen 8 der 10 Werte.

2. Reihe:

Niedriges U , $t = 10$ min:

x_i : 401, 382, 389, 399, 391, 425, 400, 412, 435, 412.

$x_m = 405$,

Formel $\sigma^2 = 2456/9$; $\sigma = 16,5$; $\delta = 4,1\%$,

Schätzwerte $s = \sqrt{405} \approx 20$; $f \approx 5,0\%$;

im Intervall 385 - 425 liegen 8 der 10 Werte.

3. Reihe:

Erhöhtes U , $t = 1$ min:

x_i : 1233, 1279, 1277, 1225, 1236, 1250, 1224, 1254, 1166, 1278, $x_m = 1242$,

Formel $\sigma^2 = 10604/9$; $\sigma = 34,3$; $\delta = 2,7\%$;

Schätzwerte $s = \sqrt{1242} = 35,2$; $f \approx 2,8\%$,

im Intervall 1207-1277 liegen 7 der 10 Werte.

Noch eindrucksvoller als die vorher stehenden kurzen Zahlenreihen werden die statistischen Schwankungen sichtbar in der Abbildung 17 (Kapitel 7), einer Folge von 200 Messungen zu je 1 h der Umgebungsstrahlung mit einem großen GM-Zählrohr, ca. 8800 iph entsprechen 100 nGy/h.

Zur Messung einer radioaktiven Probe sind wegen der Umgebungsstrahlung zwei Messungen erforderlich:

- Messung I der Umgebungsstrahlung allein mit der Impulszahl U in der Zeit t und
- Messung II der Probe mit der Impulszahl B in der Zeit t .

Der Beitrag der Probe allein ist $N = B - U$.

Die Schätzwerte der Standardabweichung (Standardmessunsicherheit, Fehler) sind:

$$s_U = \sqrt{U}; \quad s_B = \sqrt{B}$$
$$f_U = \frac{s_U}{U} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{U}}{U} \cdot 100\%; \quad f_B = \frac{\sqrt{B}}{B} \cdot 100\%.$$

Für s_N und f_N ergibt sich nach dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz $s_N^2 = s_U^2 + s_B^2$ und somit $s_N = \sqrt{U+B}$ und

$$f_N = \frac{\sqrt{U+B}}{N} \cdot 100\%. \text{ Erst konkrete Zahlenwerte machen die}$$

Unterschiede deutlich: für $U = 400$, $B = 580$; $N = 180$

wird $s_U = 20$, $s_B = 24$; $s_N = 31$ und

$f_U = 5\%$; $f_B = 4\%$, jedoch $f_N = 17\%$.

Signifikanz bei zählenden Messungen

In der Statistik heißt der Unterschied zwischen zwei Maßzahlen signifikant, wenn er so groß ist, dass er nicht mehr als zufällig zustande gekommen gelten kann. In der wissenschaftlichen Literatur gilt ein Ergebnis als signifikant, wenn die Wahrscheinlichkeit dafür, dass es zufällig ist, höchstens 5 % beträgt. Wie vorher gezeigt wurde liegt der richtige Messwert dann mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % innerhalb der zweifachen Standardabweichung um x_m .

Das Problem, dass die Messung einer Probe, z.B. ihrer Aktivität, zwei Messungen U und B erfordert, wird nun unter Verwendung des in der Mikroskopie üblichen Begriffs der numerischen Auflösung betrachtet.

Die beiden gemessenen Impulszahlen U und B besitzen Schätzwerte s_U und s_B der Standardmessunsicherheit und es gibt die Wahrscheinlichkeit p dafür, dass der richtige Wert innerhalb von Vertrauensbereichen liegt.

Wird die genannte Wahrscheinlichkeit $p > 95 \%$ gefordert dafür, dass $N = B - U$ signifikant (bedeutsam, nicht zufällig) ist, muss für U und B "numerische Auflösung" (Trennung) bestehen, und zwar im äußersten Fall mit der zweifachen Summe ihrer Standardmessunsicherheiten. Dies bedeutet:

$$N > 2(\sqrt{U} + \sqrt{B}) = 2(s_U + s_B)$$

Nach dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz genügt die weniger strenge Bedingung:

$$N > 2 s_N = 2 \sqrt{(U + B)} \quad \text{oder} \quad N/s_N > 2.$$

Falls die Rechnung $N/s_N > 3$ ergibt, besteht sogar $p > 99 \%$, Wahrscheinlichkeit für Signifikanz von N .

Der abstrakte Sachverhalt wird durch Abb. 13 graphisch veranschaulicht. Mit einer $2 \cdot 2$ Zoll Gesamt-Gamma-NaI-Szintillationssonde wurden bei einer Umgebungs-Ortsdosisleistung (ODL) von ca. 80 nSv/h zwei Messreihen mit je 100 Messwerten aufgenommen. Die Effizienz oder Pulsrate (jeweils bezogen auf eine ODL von 100 nSv/h) der Spezialsonde ist mit 200 ips deutlich höher als die 10 ips für übliche ODL Messgeräte mit kleinem Plastiksztillator oder nur 2,4 ips für gute und sogar nur 0,2 ips für weit verbreitete Geiger Müller-Zählrohre. Deshalb ist mit der Spezialsonde bei nur 10 s Messzeit eine Differenz von nur 10 % hoch signifikant messbar.

Die kleinsten, mittleren und größten Impulszahlen sind :
 $1541 < U_m = 1627 \pm 36 (\sigma_U) < 1717$ für 10 s Messzeit.
 $1705 < B_m = 1791 \pm 42 (\sigma_B) < 1906$ für 11 s Messzeit.
 $N = 1791 - 1627 = 164$; $\sigma_N^2 = \sigma_U^2 + \sigma_B^2$; $\sigma_N = 55$.
 $N/\sigma_N = 164/55 = 3,0$; somit $p > 99 \%$, doch $\sigma_N/N \approx 33\%$.

Auf der Abszisse von Abb. 13 sind die beobachteten Impulszahlen der beiden Messreihen in Klassen mit Inkrementen von 10 aufgetragen. Die Ordinate gibt die Anzahl der Einzelmessungen mit beobachteten Impulszahlen innerhalb der jeweiligen Klasse der Abszisse. Da die Gesamtzahl der Messungen jeder Messreihe 100 betrug, sind die Zahlen der Ordinate identisch mit den Prozentzahlen der Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich ein Messwert in der jeweiligen Klas-

se befindet. In der Klasse um den Mittelwert $x_m = 1627$ befinden sich allerdings nur 5 % der Messwerte. In den Klassen zwischen 1590 und 1660, d.h. $x_m \pm \sigma$, befinden sich $10 + 7 + 11 + 5 + 13 + 15 + 6 = 67\%$ der Messwerte, sehr nahe dem theoretischen Wert von 68,3 %.

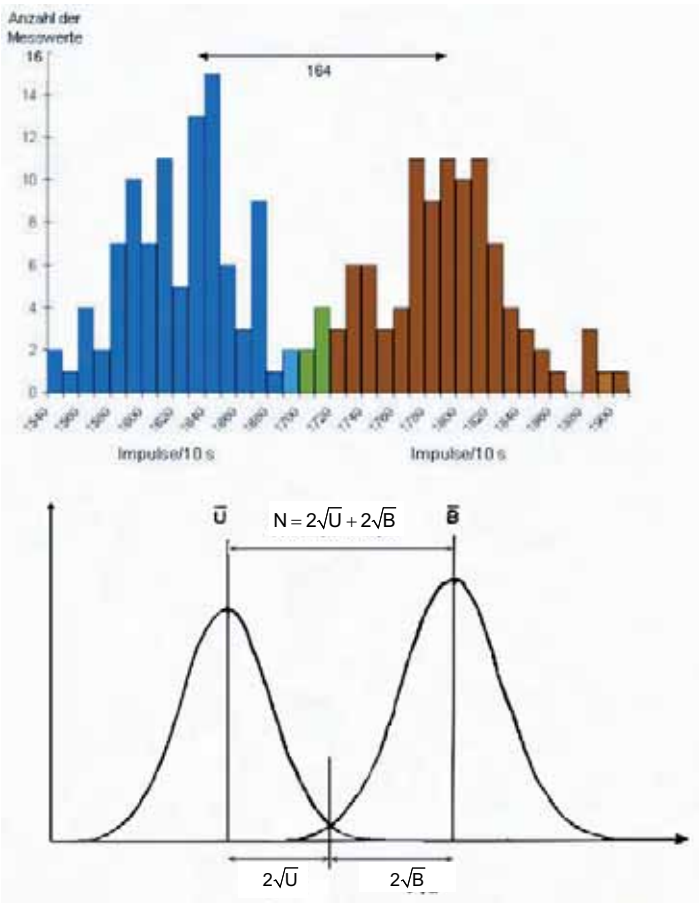


Abb. 13: Standardmessunsicherheit und Signifikanz
a. Das Balkendiagramm zeigt die gute numerische Auflösung der 2 Messreihen. Es zeigt aber auch die Streuung, dass selbst 100 Messwerte keine Glockenkurve ergeben.
b. Derselbe Sachverhalt bei idealen Glockenkurven.

Die Optimierung des Mess-Systems

Messprobe, Messgerät, Messanordnung und Messablauf bilden ein interaktives System, im Wesentlichen mit folgenden Parametern:

1. die Aktivität A der Probe, bzw. das Produkt von Konzentration und Probenmenge,
2. die Effizienz e der Messanordnung bzw. der Kalibrierfaktor $k = 1/e$ bestimmt durch
 - a) Volumen und Dichte des Detektors,
 - b) Fläche Detektor zu Probe,
 - c) Abstand Detektor zu Probe,
 - d) Selbstabsorption in der Probe,
 - e) Rückstreuung und Röntgenfluoreszenz der Unterlage,
3. Messzeit t ,
4. Ort der Messung, z.B. in einer Abschirmung.

Es lohnt sich, das System durch geeignete Veränderungen der Parameter, soweit dies möglich ist, bezüglich erlaubtem Aufwand und gewünschtem Ergebnis zu optimieren. Offensichtlich sind dafür einige der Parameter, soweit möglich und vertretbar, zu vergrößern, andere zu verkleinern.

Sehr wirksam ist z.B. die Erhöhung der Effizienz des Detektors durch Optimierung der Geometrie (Fläche und Abstand) Probe-Detektor.

Man beachte: der Kalibrierfaktor k [Bq/ips] oder die Effizienz e , wie sie hier definiert wurde, wird aus $n = N/t$ [ips] und $k = A/n$ einer bekannten Aktivität A [Bq] eines bestimmten Nuklides extrahiert und ist deshalb nuklidspezifisch. Für die Umgebungsstrahlung U hat die Messanordnung eine andere Effizienz. Optimal ist ein Detektor mit kleiner Effizienz für U und großer Effizienz für die Probenstrahlung.

Messziele

Bei den Messzielen sind folgende Wünsche und Anforderungen zu nennen:

Radiometrische Größen: Zählrate, Aktivität, Dosis, Dosisleistung, Nuklidart, Halbwertszeit, Kalibrierung.

"Auflösungen": nach Strahlungsart, Radionuklid, Intensität, Zeit, Ort, Energie, mit Statistik und Messunsicherheit.

Verwendungen: Strahlenschutz, Forschung, Medizin, Technik, im Gelände, im Labor, im Speziallabor.

Probenparameter: feste, flüssige und gasförmige Medien, Aerosole, Heiße Teilchen, einschließlich Probenmatrix, Probenahme und -präparation.

Die Angabe der Strahlungsart ist so wichtig wie die Einheit zum Zahlenwert jeder Messgröße. Es kann ein Dilemma sein, zur Bestimmung unbekannter Strahlung eigentlich schon wissen zu müssen, welche Strahlungsart man messen will, um das geeignete Gerät für eine korrekte Messung einzusetzen. Geschieht dies nicht, so wird falsch alarmiert oder falsch entwarnt. Die Verwendung einfacher Absorptionsfilter vor dem Messgerät erlaubt die qualitative Aussage, ob eine Ortsdosisleistung einen hohen Betaanteil hat und Messungen an mehreren Tagen, ob sie zudem rasch abklingt. Dies war 1986 in den ersten Tagen nach dem Unfall von Tschernobyl der Fall. Daraus war auf ein kurzlebige Radionuklid wie Iod-131 zu schließen. Messgeräte, die auf der Erde gute Dienste leisten, sind zur Messung der Strahlenexposition bei einem Transatlantikflug nur begrenzt aussagekräftig. Messgeräte und Filme aus einem Röntgenlabor jedoch ließen sich nach Tschernobyl gut verwenden zur Entdeckung Heißer Teilchen.

"Auflösung" heißt, zwei nach Zeit, Intensität (Zählwert), Ort oder Energie benachbarte Messwerte, d.h. Zahlenwerte einer physikalischen Größe, eindeutig zu trennen und als verschieden zu erkennen. Es sind dies differenzierende, im Gegensatz zu integrierenden Messungen. Man spricht z.B. von der Auflösung einer Waage, ob sie Unterschiede von mg oder von g erkennt. Die Auflösung nach Intensität (numerische Auflösung) sagt etwas über die Qualität einer Messung aus, d.h. wie zuverlässig eine wie kleine Differenz zwischen zwei Messungen signifikant ist und nicht zufällig entstanden ist.

Die Messung der Dosisleistung ist eine nach der Zeit aufgelöste, die Messung der Dosis eine zeitintegrierende Mes-

sung. Eine sehr hohe Zeitauflösung besitzen Koinzidenz- und Antikoinzidenzmessungen, etwa um Untergrundstrahlung von Probenstrahlung zu trennen.

Ortsauflösung wird durch die Autoradiographie veranschaulicht. Sie zeigt unmittelbar, wie und wo auf einer Fläche Radionuklide verteilt sind, im Gegensatz zu Kontaminationsmonitoren, die nur eine Aussage über die ganze Fläche machen. Heute gibt es allerdings spezielle Gasionisationsdetektoren mit ein- oder zweidimensionaler Ortsauflösung.

Energieauflösend sind Detektoren mit einer Auswertelektronik, die zusätzlich zur Zählrate auch die Energie oder den Energiebereich (Fenster) der Strahlung angeben. Da bei Gamma- und bei Alphastrahlern die Energie nuklidspezifisch ist, nennt man energieaufgelöste Messungen auch nuklidspezifisch. Solche Messungen sind bei Lebensmitteln notwendig, z.B. um natürliches Kalium-40 von anthropogenem Cäsium-137 zu unterscheiden. Bei Röntgenstrahlung liefern Absorptionsfilter eine Unterscheidung zwischen energiereicher (weicher) und energiereicher (harter) Strahlung.

Strahlenschutz, Forschung, Medizin und Technik, Gelände und Labor stellen ganz unterschiedliche Anforderungen an den Messbereich, die Messgenauigkeit, die einfache oder anspruchsvolle Handhabung und Wartung der Geräte, den Preis der Geräte und der Einzelmessung, die Art der Messbedingungen. Für Serienuntersuchungen im Gelände sind kostengünstig und passiv (ohne Stromverbrauch) arbeitende Methoden wie Filme, Thermolumineszenz- oder Kernspurdosimeter geeignet, für Screening mit angelerntem Personal andere Geräte als für Ringanalysen, für einmalige Messungen andere als zur kontinuierlichen Überwachung (Monitoring) kerntechnischer Anlagen.

Sehr groß ist das Spektrum der zu messenden Proben: feste, flüssige, gasförmige, Aerosole, "Heiße Teilchen" in verschiedenartiger Matrix. Keine Messung ist besser als die Probennahme. Ist diese nicht repräsentativ, das Muster nicht so gültig wie die Serie, misst man "Hausnummern". Zur Probe gehört auch ihre Matrix, die Einbettung in nichtstrahlende Stoffe und die Homogenität der Verteilung. Bei Sanden ist die Verteilung der Minerale, die die Radionuklide

enthalten, häufig mit der Korngröße korreliert. Durch einfaches Sieben selbst von gewöhnlichem Quarzsand werden geringste Mengen von thorium- und uranhaltigen Schwermineralen wie Monazit und Zirkon in der feinsten Fraktion angereichert.

Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen können zueinander in radioaktivem Nicht-Gleichgewicht stehen. Dies wird für Radon und seine Zerfallsprodukte in Kapitel 10 behandelt. Gammastrahler können meist in der Matrix gemessen werden. Die Ortsdosis in einem Steinbruch, Bergwerk oder einer Fabrik kann aber nur die äußere Strahlenexposition, nicht die innere angeben, falls z.B. Stäube inhaliert werden. Dies gilt noch mehr für Betastrahler und am meisten für Alphastrahler. Letztere sind für Aktivitätsmessungen chemisch und/oder physikalisch aufzubereiten, d.h. aus der umgebenden Matrix zu lösen und für die Messung in sehr dünner Schicht aufzubringen. Die Aktivität und Strahlenexposition durch kurzlebige Radionuklide klingt nur dann rasch ab, wenn sie ohne langlebiges Mutternuklid in der Probe vorliegen.

Messgeräteparameter

Zur Spezifikation eines Messgerätes gehören die Messgröße, die Messbereiche, die Empfindlichkeit für die Messgröße und ihre Energieabhängigkeit. Der im Gerät meist fest eingegebene Kalibrierfaktor ist energieabhängig, da er auf den energieabhängigen Wechselwirkungseffekten Strahlung – Detektor beruht, siehe Kapitel 5. Ein bestimmter Kalibrierfaktor ist nur unter streng definierten Randbedingungen gültig. Zu denken ist auch an die Störemfindlichkeit für Temperatur, Luftfeuchtigkeit, elektrische und magnetische Felder etc. Geräte altern mit und ohne Benutzung; besonders Gasionisationsdetektoren mit Löschgas erschöpfen sich und Kontaminationsmonitore mit Gaspülung sind ohne Wartung nicht sofort einsatzbereit.

Der wichtigste Teil des Gerätes ist der empfangende Detektor. Detektoren "leben" von absorbierter Strahlungsenergie. Die Absorption wird bestimmt durch das Medium des Detektors und den Charakter der Strahlung. Medium des Detektors soll heißen seine Dichte, Volumen und Ordnungszahlen

der enthaltenen chemischen Elemente. Charakter der Strahlung soll heißen ihre Ruhemasse und Energie. Deshalb gilt: für Alpha- und Betastrahlung sind Gasdetektoren und Filme günstig, für Gammastrahlung sind Szintillationszähler und Halbleiterdetektoren mit möglichst großem Volumen eines Festkörpers hoher Ordnungszahl besser geeignet.

Probensammlung

Zum Lernen und Üben der richtigen Handhabung der Messgeräte braucht man eine Sammlung strahlender Stoffe. Mit Messgeräten ist zwar oft ein kleiner Prüfstrahler lieferbar, dieser ist aber meist nur geeignet, um zu prüfen, ob das Gerät funktioniert, nicht aber um festzustellen, ob das Gerät auch das Strahlenfeld anderer Proben als nur das des Prüfstrahlers richtig erfasst. Prüfstrahler sind meist mononuklide Gammapunktstrahler. Deshalb können Strahlenfelder von Proben anderer Zusammensetzung und anderer Form als der des Prüfstrahlers mit dem Gerät, zu dem der Prüfstrahler gehört, nicht korrekt gemessen werden.

Falls man in der Radiometrie immer nur ein Aufgabenspektrum betreut, also sich z.B. im Felde auf der Suche nach Urananomalien bewegt oder im Isotopenlabor auf der Suche nach Betakontaminationen steht, dann misst man nur die relativen Unterschiede innerhalb eines Bereiches, man vergleicht Vergleichbares. Anders ist es, wenn man das Gebiet und/oder das Gerät wechselt. Dann hilft nur, neue Erfahrungen zu sammeln an einer großen, möglichst mannigfaltigen Probensammlung, bestehend aus Prüfstrahlern aller Sorten, Kalibrierpräparaten für alle Zwecke und natürlichen Proben verschiedener Herkunft.

Für eine Sammlung umgangsgenehmigungsfreier Strahler eignen sich vor allem vier Gruppen von Proben: Radon und Radonzerfallsprodukte, mineralische Stoffe, technische Stoffe und Tschernobyl-Proben.

Radon und Radonzerfallsprodukte:

- Rn-222, Po-218, Po-214, Pb-214 und Bi-214, die jederzeit und überall aus Luft, Wasser und Feststoffen mühelos frisch gesammelt, gespeichert und gemessen werden können, siehe Kapitel 10.

Mineralische Stoffe:

- Uranminerale und Uranerze, etwa mit Pechblende, sekundäre Uranminerale wie Torbernit, Autunit u. a. auf Granitklüften und in Pegmatiten des Fichtelgebirges, der Oberpfalz, des Erzgebirges. Bei solchen blättrigen Mineralen besteht allerdings Kontaminationsgefahr.
- Torbernit-Kristalle, ca. 2-4 mm² sind als Punktstrahler gut geeignet zur Prüfung, ob die Effizienz von Kontaminationsmonitoren an allen Punkten ihrer Fläche die gleiche ist,
- Granit mit uranhaltigem Zirkon ZrSiO₄,
- Fluorit CaF₂ mit Pechblende, von Wölsendorf, Oberpfalz.
- Schwermineralsande vom Goldwaschen, mit thoriumhaltigem Monazit CePO₄ und Zirkon, gute Alpha-Prüfstrahler,
- Kalisalze enthalten je g Kalium 0,12 mg K-40 entsprechend 31 Bq, gute Beta-/Gamma-Prüfstrahler.

Technische Stoffe:

- Dekorfliesen mit uranhaltigen Pigmenten (ohne Radium und Radiumfolgeprodukte) und andere uranglasierte Keramik in roten, orangen, gelben, schwarzen und braunen Farben.
- Uranglas, annagelbes oder annagrünes Glas des Biedermeier, des Jugendstils und des Art Déco, U-haltig,
- Gasglühstrümpfe alter Art für Camping, Th-haltig,
- Leuchtziffern auf alten Uhren und Leuchtpunkte auf Drehknöpfen von Nachtinstrumenten, Ra-226-haltig,
- Produkte direkt aus U-/Th-haltigem Zirkon ZrSiO₄: Gießereisand, geschätzt wegen guter Wärmeleitung als Formsand für Schreckguß; hochfeuerfeste Zirkon- oder Zirkoniumkeramik, diese auch auf der Basis des Th-haltigen Baddeleyit ZrO₂,
- Rotschlamm von der Aluminiumproduktion aus Th-, U-haltigem Bauxit,
- Ionisationsrauchmelder mit Americium-241,
- Wolframelektroden, mit 1-4 % Th zum besseren Zünden.

Tschernobylproben mit Cs-137:

- Grasschnitt als trockene Pellets,
- Milchpulver, Molkepulver,
- östlicher Tee, hiesige Pilze.

7. Messung von Strahlungsfeldern: Ortsdosisleistung und Ortsdosis

Übersicht • Messung von Ortsdosis und Ortsdosisleistung • Szintillationszähler • Ionisationskammern • Zählrohre

Übersicht

Wir beginnen die Kapitel der Messmethoden und Messgeräte mit Messungen der physikalischen Wirkungen des Strahlungsfeldes einer Quelle ionisierender Strahlung am Ort eines Detektors, das ist die Messung der Größen Ortsdosis und Ortsdosisleistung. Die Angabe erfolgt in Einheiten der Ionendosis, der Energiedosis oder der Äquivalentdosis. Physikalisch korrekt ist die Angabe als Ionendosis [Röntgen] oder Energiedosis [Gray]; üblich, insbesondere in der Strahlenschutzverordnung, ist die Angabe als Äquivalentdosis [Sievert].

Die Ortsdosisleistung ist die in einem bestimmten Zeitintervall erzeugte Ortsdosis dividiert durch die Länge des Zeitintervalls. Das tatsächliche Messintervall der üblichen Geräte ist nur s bis min, und es wird hoch gerechnet auf die übliche Einheit pro h.

Zur Messung der Ortsdosisleistung ODL und der Ortsdosis OD werden Szintillationszähler, Ionisationskammern, Geiger-Müller-Zählrohre und gelegentlich auch Film-, Thermolumineszenz- oder Glasdosimeter verwendet. Für letztere siehe Kapitel 12. Kontaminationsmonitore sind nicht geeignet zur Messung von ODL oder OD.

Im Strahlenschutz sind regelmäßige Messungen der Ortsdosis bzw. der Ortsdosisleistung vorgeschrieben für Überwachungs-, Kontroll- und Sperrbereiche von Anlagen und für Arbeitsplätze mit ionisierender Strahlung.

Nach der Strahlenschutzverordnung von 2001 wird bei der Ortsdosis (siehe diesen Abschnitt im Kapitel 12) unterschieden zwischen der Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ bei durchdringungsfähiger Strahlung und der Richtungs-Äquivalentdosis $H^*(0,07 \text{ \Omega})$ bei Strahlung mit geringer Ein-

dringtiefe. Für die im folgenden besprochenen und abgebildeten Messgeräte aus der Zeit vor 2001 entspricht dies in der Praxis den früheren Größen "Knochendosis" (gewebeäquivalente Kappe über dem Detektor) und "Hautdosis" (Detektor ohne Kappe). Deshalb, aus Kostengründen und weil neue Geräte sich erst langsam durchsetzen, wird man noch einige Jahre mit den bisherigen Messgeräten leben müssen und können.

Messung von Ortsdosis und Ortsdosisleistung

Die Energiedosis (siehe Kapitel 3) ist die physikalische Größe zur Erfassung der Wirkung ionisierender Strahlung in Materie, denn sie enthält keine radiologische (nicht-physikalische) Bewertung. Die Einheit ist Gray, $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$, eine sehr große Einheit. Die Umgebungsstrahlung ("Null-effekt") hat etwa eine Dosisleistung von circa $50 \text{ nGy/h} = 50 \cdot 10^{-9} \text{ Gy/h} = 0,05 \text{ } \mu\text{Gy/h}$ und verursacht im Jahr (8760 h) eine externe Dosis von circa $0,4 \text{ mGy}$. Die Umrechnung einer Dosisleistung in eine Dosis durch Multiplikation mit der Expositionsdauer ist aber nur bei zeitlich konstanter Dosisleistung zulässig. Dies ist für die Umgebungsstrahlung im Allgemeinen der Fall.

Die Messwertanzeige von älteren Geräten lautet noch auf Röntgen (R), rad (rd) oder rem, die von überwiegend eingesetzten neuen auf Gray (Gy) oder Sievert (Sv) bzw. Bruchteile davon, wie milli (m), mikro (μ) oder nano (n). Diese Größen, Einheiten und Abkürzungen wurden in Kapitel 3 erklärt. Analoggeräte zur Messung der Umgebungsstrahlung müssen im untersten Messbereich in der Lage sein, bei Vollausschlag $1 \mu\text{Sv/h}$ oder $100 \mu\text{R/h}$ zu messen. Nur dann ist die Umgebungsstrahlung (Nulleffekt) von typischerweise 50 nSv/h (entspricht für Gammastrahlung 50 nGy/h) oder $5 \mu\text{R/h}$ deutlich und eindeutig nachweisbar.

Geräte mit direkter Messwertanzeige geben im Normalfall die Dosisleistung an, um in kurzer Messzeit ein Ergebnis zu erhalten. Das ist sinnvoll, weil örtliche Unterschiede größer sind als zeitliche. Die Dosis wird mit Dosimetern gemessen, die wegen der zeitlichen Integration auch kleinster Dosisleistungen unempfindlicher sein können, und damit kleiner, preiswerter und für den betrieblichen Strahlenschutz (Per-

sonendosimetrie) geeignet sind. Die höhere Klasse von Dosisleistungsmessgeräten kann zeitlich integrieren und zudem die Ergebnisse der Dosismessung speichern oder kontinuierlich auf einem Drucker ausgeben. Zudem sind Schwellen mit akustischem und optischem Alarm einstellbar.

Szintillationszähler

Als eine Konsequenz der Auswirkungen des Reaktorunfalls von Tschernobyl erhielten in Bayern 96 Landkreise und kreisfreie Städte 1987 ein bauartgeprüftes und eichfähiges Dosisleistungs-Messgerät Szintomat 6134 zur Verfügung gestellt.



Abb. 14:
Dosisleistungs-
Messgerät.

Beim Szintomat 6134 ist der Strahlungsempfänger ein mit silberdotiertem Zinksulfid beschichteter Kunststoffszintillator, der auf einen Photomultiplier montiert ist. Mit der Kombination der beiden Leuchtstoffe zu einem "Phoswich" wird erreicht, dass die Dosisleistung für Photonenstrahlung zwischen 20 keV und 1,3 MeV ohne Schutzkappe innerhalb von $\pm 30\%$ energieunabhängig gemessen wird. Weiche Strahlung wird in der ZnS-Schicht absorbiert und in Licht umgewandelt, welches durch den durchsichtigen Szintillator zum Photomultiplier gelangt. Harte Strahlung durchdringt die ZnS-Schicht und wird im Szintillator (teilweise) absorbiert und in Licht umgewandelt, welches ebenfalls im Photomultiplier in elektrische Signale umgewandelt und verstärkt wird. Der Detektor ist mit schwarzem Lack lichtdicht abgedeckt und befindet sich an exponierter Stelle auf der Vorderseite

des Gerätes. Beim Szintomat 6134 ist die Detektorschutzhülle aus PVC "gewebeäquivalent" ausgelegt und hat eine Flächenmasse von 280 mg/cm^2 .

Die Nachweisgrenze wird durch die Größe des Detektors und die Eigenschaften des Photomultipliers bestimmt. Dieser hat eine hohe Kathodenempfindlichkeit und Verstärkung bei gleichzeitig niedrigem Dunkelstrom, der ja den apparativen Nulleffekt verursacht. Ein hochempfindlicher Gleichstromverstärker und ein umschaltbarer Regelverstärker für die Betriebsspannung des Photomultipliers ermöglichen einen Messbereich von $0,02 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ bis 30 mSv/h in 10 linearen Anzeigebereichen. Eine normale Umgebungsstrahlung von $0,05 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ ist mit $2\frac{1}{2}$ Teilstrichen auf der untersten Skala ablesbar. Das Zeigerinstrument hat eine Dämpfung mit 3 umschaltbaren Zeitkonstanten von 1, 4 und 16 s. Der Detektor hat auch ein gutes Ansprechverhalten für die sekundäre kosmische Strahlung. Als kompensierter Temperaturbereich wird $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $+50 \text{ }^\circ\text{C}$ angegeben.

Als Handgerät hat der Szintomat 6134 Abmessungen von $29 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$, ein Gewicht von 3,6 kg und wird mit Monozellen oder Akkus betrieben. Zum Gerät gibt es einen anzeigepflichtigen Prüfstrahler mit 333 kBq ($9 \text{ } \mu\text{Ci}$) Cäsium-137.

Der Szintomat wird als Dosisleistungs-Messgerät für Gamma- und für Röntgenstrahlung bezeichnet und ist dafür gut geeignet. Das Gerät ist aber auch empfindlich für Betastrahlung, sofern vorhanden. Dies ist in der freien Umgebung normalerweise nicht der Fall, da Betastrahlung schon im Boden selbst absorbiert wird. Die Betastrahlung von Iod-131 - nach Störfällen in Kernkraftwerken in der Umwelt vorkommend - hat aber in Luft eine maximale Reichweite von 1,6 m. Im Zweifelsfall empfiehlt es sich, drei Messungen zu machen: ohne PVC-Kappe, mit PVC-Kappe und mit zusätzlicher (selbsthergestellter) 5 mm Aluminiumkappe. Nimmt die Dosisleistung mit Kappe stark ab, dann liegt auch Betastrahlung und/oder weiche Photonenstrahlung vor; bleibt sie gleich, ist es echte Gammadosisleistung.

Das Dosis- und Dosisleistungsmessgerät mab 500 dient zur schnellen, empfindlichen und präzisen Messung der Umge-

bungs-Äquivalentdosis und -Äquivalentdosisleistung im Gamma- und Röntgenbereich. Das Messgerät erfasst die Bereiche mit 50 nSv/h bis 100 mSv/h Dosisleistung und 20 nSv bis 10 Sv Dosis, bei 33 keV bis 7,5 MeV energiereicher Photonenstrahlung im Temperaturbereich von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Das Gerät besteht aus einer Plastik-Szintillationssonde und einer Auswerteelektronik. Die Sonde enthält jedoch keine Szintillatorkombination, sondern nur einen einzigen besonderen gewebeäquivalenten Plastikszintillator, der im genannten Energiebereich ein gutes Ansprechvermögen aufweist und bei Überlast eine sehr geringe Nachleuchtdauer zeigt. Der Szintillator ist mit der Photokathode eines Photomultipliers optisch gekoppelt. Ein präziser Thermofühler dient der Temperaturkompensation. Der von der Sonde gelieferte Messstrom wird in der Auswerteelektronik von einem Strom-Frequenzwandler in eine Impulsfolge umgesetzt. Diese wird von einem Prozessor ausgewertet und sowohl als Dosisleistung als auch als Dosis gleichzeitig auf dem LC-Display angezeigt.



Abb. 15:
Dosis- und
Dosisleistungs-
Messgerät.

Ionisationskammern

Ionisationskammern mit empfindlichen Strommessinstrumenten zur direkten Messung des Ionisationsstromes (Ionen-dosisleistung) sind die Primär-Messgeräte zur Bestimmung radiometrischer Größen.

Ein in Röntgenlabors viel verwendetes Gerät ist das Babyline für Röntgen- und Gammastrahlung mit Photonenener-

gien von 8 keV bis 2 MeV. Es ist eine dünnwandige, nicht luftdichte Ionisationskammer mit 515 cm^3 Volumen. Die Empfindlichkeit ist $4,8 \text{ pA pro } \mu\text{Gy/h}$. Die Flächenmasse der Wandstärke wird mit 7 mg/cm^2 angegeben. Die Kammer ist umgeben von einer abnehmbaren Wandverstärkungskappe mit 300 mg/cm^2 Flächenmasse.

Durch Messung ohne und mit Kappe wird "weiche" Strahlung geringer Eindringtiefe (z.B. von Uranglasur) und "harte" durchdringungsfähige Strahlung (z.B. von Pechblende) unterschieden, d.h. das, was früher Hautdosis und Knochen-dosis hieß. Heute wird nach StrlSchV sowohl bei der Personendosis wie auch bei der Ortsdosis nach diesen beiden Strahlungsarten unterschieden, siehe Kapitel 12.

Auch für Ionisationskammern gilt das bei Szintillationszählern Gesagte: die Spezifikation "für Photonen" oder "für Röntgen- und Gammastrahlung", bedeutet nicht, dass sie nur auf diese ansprechen; sie sprechen auch für Betastrahlung an, ohne Kappe sogar sehr stark.

Das ältere Gerät Babyline 31 hat 6 lineare Dosisleistungsmess- und Anzeigebereiche von $0\text{-}1\text{mR/h}$ bis $0\text{-}100 \text{ R/h}$ und einen Dosismess- und Anzeigebereich bis 1 mR , jeweils in 50 gut ablesbaren Teilstrichen, sowie eine Batteriefunktionskontrolle. Der oberste Messbereich kann für die Messung der Primärstrahlung von Röntgenröhren durchaus benötigt werden. Der unterste Messbereich ist für Umgebungsstrahlung nicht empfindlich genug, denn die Anzeige $1000 \mu\text{R/h}$ mit 50 Teilstrichen erlaubt keine Ablesung von $5 \mu\text{R/h}$ ($0,05 \mu\text{Gy/h}$). Die wechselnden Größen und Einheiten werden mit Absicht gebracht, um dem Leser die für die Praxis notwendige Mehrsprachigkeit zu vermitteln.

Die relativ großvolumige Ionisationskammer (in Eichlabors gibt es solche mit mehreren Litern Volumen) ist gut geeignet, um auch anisotrope (richtungsabhängige) und kollimierte (gebündelte) Strahlungsfelder schnell zu finden, wie sie in Röntgenlabors auftreten können. Bei niedrigen Dosisleistungen ist allerdings eine Ionisationskammer mit Zeigerinstrument naturgemäß besonders träge, nicht schnell ansprechend und zudem durch äußere elektrische Felder, auch Reibungs- und Lufterlektrizität störanfällig. Zur Kontrolle

des Gerätes und der eigenen Handhabung empfiehlt es sich, vor jeder Messung an einer Stelle oder mit einem Präparat, z.B. einem Stück uranglasierter Keramik, zu messen, von dem man das Ergebnis kennt.



Abb. 16:
Ionisationskammer

Ionisationskammern sind Standardgeräte in der Röntgendiagnostik zur Messung der Patientendosis und des Dosisflächenprodukts für Röntgenbelichtungsautomaten. Da die Röntgendiagnostik den Großteil der zivilisatorischen Strahlenexposition der Bevölkerung verursacht, ist hier beste Messtechnik sinnvoll. Sie ist jedoch noch nicht überall im Einsatz.

Zählrohre

Zur Umgebungsüberwachung der Ortsdosisleistung im Freien unter erschwerten Bedingungen (Feuchte, Temperatur, elektromagnetische Felder) sind Geiger-Müller-Zählrohre besser geeignet als die in Handgeräten verwendeten Szintillationszähler. Zählrohre sind robust, preiswert und empfindlich, wenn von genügendem Volumen. Die Abbildung 17 zeigt den Zeitverlauf der Umgebungs-dosisleistung in $\mu\text{Sv/h}$ und kalibriert in nGy/h eines energiekompensierten GM-Zählrohrs von 35 cm Länge und 3 cm Durchmesser. Die Empfindlichkeit ist 8800 $\mu\text{Sv/h}$ pro 100 nGy/h . Ein Gerät LLM 500 (siehe Kapitel 8) dient als elektronischer Zähler und Messwertspeicher zur Übertragung auf den PC und Weiterverarbeitung der Daten. Der kleine Durchmesser, die wasserdichte Ausführung und ein Anschlusskabel von 20 m

Länge erlauben, die Sonde auch im Gelände zum Vermessen ("Logging") von Bohrlöchern einzusetzen.

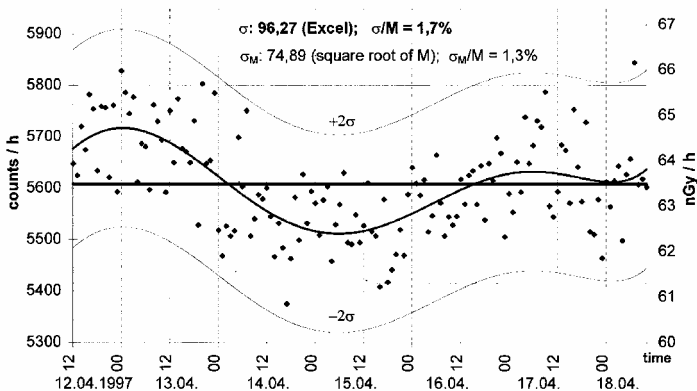


Abb. 17: Zeitdiagramm einer Ortsdosisleistung,
aufgenommen mit der Gammasonde zum LLM 500.

Geiger-Müller-Zählrohre sind erfolgreich zu autonomen Sonden zur Online-Langzeitüberwachung der Gammaortsdosisleistung im Freien entwickelt worden. Im System „Sky-link“ erfolgt eine mehrfach gesicherte Übertragung der Daten mit einem nur 10-mW-Sender auf Entfernungen bis zu 100 km. Ohne Wartung und Batteriewechsel ist ein 5-jähriger Non-Stop-Betrieb möglich. Das Grundmodell besteht aus 2 GM-Zählrohren mit einer Empfindlichkeit von $2 \times 0,2$ ips (900 iph) bei 100 nGy/h. Ein Sondermodell bietet eine bis 10 mal höhere Empfindlichkeit. Der Messbereich ist 20 nSv/h bis 10 Sv/h, die Einsatztemperatur -40 bis $+70$ °C. Die Messtaktlänge ist wählbar von 1-120 min. Bei Überschreitung von einstellbaren Messwertschwellen erfolgt Alarmmeldung und Umstellung auf kürzere Messzeiten.

Solche Systeme sind weltweit im Einsatz zur kontinuierlichen Umgebungsüberwachung von kerntechnischen Anlagen, zur temporären Überwachung von Transportwegen und beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, zum Studium der zeitlichen Variation des natürlichen Strahlungshintergrunds, etwa durch Ausregnen von Radonzerfallsprodukten etc.

8. Messung von Quellen: Kontaminationen, Aktivitäten, Autoradiographien

Übersicht • Kontaminationen • Großflächenproportionalzähler • Alpha-, Beta-, Gamma-Empfindlichkeit • Kalibrierung • Experimente mit Kontaminationsmonitoren • Weitere Großflächenmonitore • Schnelle, empfindliche Aktivitätsmessungen • Ein GM-Zähler für Schulexperimente • Ein Becquerelmonitor für Volumenproben • Flüssigszintillometrie • Messung von Aerosolen und Gasen • Bildgebende Verfahren: Autoradiographie

Übersicht

Zum Aufspüren und Messen von flächenhaften radioaktiven Quellen dienen Kontaminationsmonitore, meist Handgeräte mit Proportionaldetektoren, heute auch mit Kunststoffszintillatoren. Mit den genannten Detektoren ist Alphastrahlung von Beta-/Gammastrahlung unterscheidbar, jedoch sind einzelne Radionuklide nicht unterscheidbar. Die Messwertangabe hat somit als Impulsrate zu erfolgen oder als Gesamtaktivität, wenn im Einzelfall eine Art Misch- oder Circa-Kalibrierung vorgenommen wurde. Für Screening (klassierende Messungen) ist dies meist völlig ausreichend. Falls einzelne, bekannte Radionuklide vorliegen, kann auf deren Aktivität kalibriert werden.

Für schnelle Aktivitätsmessungen von Aerosolen, Feststoffen und Flüssigkeiten wurde ein Low-Level-Messgerät entwickelt. Für Schulexperimente mit natürlichen schwachaktiven flächigen Proben eignet sich ein moderner GM-Zähler mit Endfenster von 5 cm Durchmesser besser als ältere mit nur 1 oder 2 cm Durchmesser. Für Betastrahler in radiochemischen und nuklearmedizinischen Labors ist die Flüssigszintillometrie (Liquid Scintillation Counting) das Verfahren der Wahl. Heute gibt es dafür auch Tischgeräte, die zudem Alpha- und Betastrahlung unterscheiden können. Auch bei den bildgebenden Verfahren sind zu den klassischen Film-Autoradiographien neuere digitale elektronische Verfahren hinzu gekommen.

Kontaminationen

Unter radioaktiver Kontamination versteht man eine unerwünschte Verunreinigung von festen Körpern, Flüssigkeiten oder Gasen mit Radionukliden, kurz Kontamination genannt. Beim Strahlenschutz nehmen Kontaminationsmessungen neben der Orts- und Personendosimetrie einen wichtigen Platz ein. Insbesondere wo mit offenen radioaktiven Stoffen gearbeitet wird, wie in radiochemischen, radiobiochemischen und nuklearmedizinischen Labors, können Kontaminationen von Arbeitsflächen und Arbeitskleidung auftreten. Durch die Entdeckung solcher Kontaminationen, z. B. durch Wischtests, und sauberes Arbeiten können Inkorporationen vermieden werden. Für Flächenkontaminationen sind Grenzwerte durch die Strahlenschutzverordnung geregelt.

Großflächenproportionalzähler

Kontaminationsmonitore für Flächenkontaminationen sind Großflächenproportionalzähler in zwei Ausführungen: Handgeräte mit Detektorflächen von circa 10 cm mal 20 cm für Labor und Betrieb und Standgeräte mit Detektorflächen bis zu mehreren m² in Eingangs- und Ausgangsschleusen von Radionuklidlabors (Isotopenlabors) und kerntechnischen Anlagen.

Bei Gasionisationsdetektoren vom Typ Proportionalzähler ist die Zahl der durch Stoßionisation erzeugten sekundären Ladungsträgerpaare proportional zur Zahl der durch die Strahlung erzeugten primären Ladungsträgerpaare. Der im Gasraum linear verstärkte Messstrom bzw. die Zahl der Stromimpulse pro Zeit ist proportional zur Intensität der Strahlung und deren Ionisationsvermögen.

Proportionalzähler sind naturgemäß sehr empfindlich, wenn auch für die drei Strahlungsarten stark abhängig von der Flächenmasse des Strahleneintrittsfensters und von der Gasfüllung. Eine große Detektorfläche macht das Gerät für Flächenkontaminationen noch empfindlicher und erlaubt große Flächen schnell abzusuchen.

Alpha-, Beta-, Gamma-Empfindlichkeit

Kontaminationsmonitore (Handgeräte mit Gasfüllung) gibt es in verschiedenen Ausführungen, je nachdem, für welche Strahlenart ihr Ansprechverhalten (Effizienz, Ausbeute, Empfindlichkeit) optimiert ist. Geräte für Alphastrahlung haben ein sehr dünnes, nicht gasdichtes Fenster mit einer Flächenmasse von nur $0,5 - 0,9 \text{ mg/cm}^2$. Die Füllung von Butangas oder auch ein Gemisch von Propan/Butan muss vor erneutem Gebrauch des Gerätes aus einer Vorratspatrone erneuert werden. Butan und Propan sind Kohlenwasserstoffe, deren Absorptionsvermögen trotz kleiner Ordnungszahl zum Nachweis von Alphastrahlung ausreicht. Stationäre, großflächige, alphaempfindliche Durchfluss-Proportionaldetektoren verwenden als Zählgas die P10-Mischung von 10% Methan in 90% Argon aus großen Druckflaschen.

Da Alphastrahlung dichter ionisierend wirkt als Beta- oder Gammastrahlung, ist es möglich, die Impulsrate von Alphateilchen unabhängig von den anderen Strahlungen zu bestimmen. Alphateilchen erzeugen auf ihrer kurzen Wegstrecke sehr viel mehr Ladungsträger als Betateilchen vergleichbarer Energie auf derselben Wegstrecke. Deshalb sind die durch Alphateilchen verursachten Stromimpulse im Proportionalzählrohr deutlich höher. Wählt man die Zählrohrspannung so, dass nur diese Impulse eine Diskriminatorschwelle überschreiten und somit registriert werden, so erhält man eine Zählrate für nur die Alphastrahlung.

Eine Gruppe von Handgeräten hat einen Umschalter. Bei einer Spannung (z. B. 2,3 kV) wird nur die Alphastrahlung registriert, bei einer höheren Spannung (z.B. 3,2 kV) die Alpha- und Betastrahlung zusammen, die Alphastrahlung allerdings mit einer höheren Ausbeute als im Alpha-Plateau. Deshalb ist die Differenzbildung zwischen Alpha- und Beta-zählraten im Beta-Plateau durch Messung ohne und mit Papierfilter vorzunehmen. Proportionalzähler, die für Alpha- und Betastrahlung optimiert sind, sprechen auch auf Gammastrahlung an, nur mit viel geringerer Ausbeute.

Kontaminationsmonitore für Beta- und Gammastrahlung haben ein gasdichtes Fenster mit einer Flächenmasse von

4,5 mg/cm². Die stärker (als etwa Butan) absorbierende Xenongasfüllung (Z = 54) muss auch nicht nachgefüllt werden, außer wenn die Fenstermembran mechanisch beschädigt wurde. Diese ist deshalb durch ein Drahtnetz geschützt. Bei Beta- und Gammastrahlung kommt es nicht so streng auf den geringst möglichen Abstand zur Probe an. Die Geräte mancher Hersteller haben einfach auswechselbare Großflächenproportionalzählrohre für die beiden beschriebenen Fälle der Alpha + Beta- und der Beta + Gamma-Messung.



Abb. 18:
Kontaminations-
monitor

Es ist üblich, unter Endfensterzählrohren Geiger-Müller-Zählrohre zu verstehen, deren Fenster sehr dünn und alphasdurchlässig und auch gasdicht sind. Die Fenster waren früher dünne Glimmerplättchen von nur 1 - 2 cm Durchmesser. Heute gibt es Endfensterzählrohre mit metallisierter Folie bis 5 cm Durchmesser.

Mit Zinksulfid als Alphaszintillator hinter dünner lichtdichter, doch alphasdurchlässiger Folie sind großflächige und empfindliche Alphadetektoren möglich. Sie sind ohne Gasfüllung, deshalb wartungsfrei, haben jedoch einen höheren Preis wegen des Photomultipliers.

Kalibrierung

Die Messwertanzeige von Kontaminationsmonitoren lautet auf Zählrate in Einheiten Impulse/Sekunde (ips) oder Impulse/Minute (ipm). Man schreibt auch counts per second (cps)

oder counts per minute (cpm). Dabei ist s^{-1} als ips zu lesen und nicht als Bq. Die Zählrate erlaubt aber noch keine unmittelbare Aussage über die Oberflächenkontamination in Bq/cm^2 . Erst nach Abzug der Nullrate und mit Hilfe von nuklidspezifischen und geometrieabhängigen Kalibrierfaktoren kann die Oberflächenkontamination berechnet werden. Die Kalibrierung geschieht mit Kalibrierstrahlern, die in den eben genannten Parametern den Messaufgaben möglichst ähnlich sind.

Kalibrierfaktoren sind abhängig von

1. der Art des Radionuklids bzw. der Nuklide bei Gemischen, d.h. der Art und der Energie der Strahlung,
2. dem Gerät: Detektorfläche, Detektorart, Betriebsspannung, Flächenmasse der Fensterfolie, Gasfüllung,
3. der Geometrie: Abstand und Beschaffenheit der Oberfläche,
4. der Nuklidverteilung auf der Oberfläche, ob gleichmäßig dünn oder konzentriert mit Selbstabsorption,
5. der Selbstabsorption nicht nur bei Alpha-Strahlern, sondern auch bei Beta-Strahlern. Zudem ist die Empfindlichkeit nicht konstant über der ganzen Fläche, sondern am Rand zum Teil deutlich geringer als in der Mitte. Auch ist auf die Abschattung des Strahleneintrittsfensters durch das Schutzgitter zu achten.

Experimente mit Kontaminationsmonitoren

Kontaminationsmonitore sind die handlichsten und empfindlichsten Geräte zum Nachweis ionisierender Strahlung. Es sind aber nur Messgeräte für Oberflächenkontaminationen und nicht für Dosisleistungen oder Aktivitätskonzentrationen. Sie eignen sich jedoch vortrefflich für Demonstrationsexperimente, zumal sie meist mit akustischen und optischen Alarmanzeigen ausgerüstet sind.

Ein überzeugendes Experiment zur Selbstabsorption liefern 2 Granitplatten, je 10 mm dick. Die radioaktiven Stoffe in jeder einzelnen Platte erzeugen in dem verwendeten Kontaminationsmonitor 30 ips, bei einem Nullwert von 10 ips. Beide Platten übereinander bringen es auch nur auf 30 ips. Auch eine Packung von 20 g Pottasche K_2CO_3 bringt es auf

35 ips. Eine Platte uranhaltiger fränkischer Burgsandstein lässt die Zählrate auf 200 ips springen. Der Uranerz-Anschliff, dessen Autoradiographie später abgebildet ist, bringt es auf nur 400 ips, obwohl das Erz natürlich viel mehr Uran enthält als der Sandstein. Es sind auf diese Weise eben keine Aktivitätskonzentrationen zu messen.

In radiochemischen Labors wird häufig lange Zeit mit den gleichen Radionukliden gearbeitet, etwa mit den in Tabelle 4 genannten. Mit modernen Mikroprozessoren ist es möglich, Kalibrierfaktoren für mehrere Radionuklide im Gerät zu speichern und eine Flüssigkristall-Digitalanzeige mit Drucktaste wechselnd auf spezielle Nuklide mit der Anzeige in Bq/cm² einzustellen. Das Gerät kann aber nicht erkennen, welches Radionuklid oder welches Gemisch tatsächlich vorliegt. Jedes Radionuklid liefert bei jeder Digitalanzeige-Einstellung eine Anzeige, auch wenn das eingestellte Radionuklid gar nicht vorliegt. Das kann - und nach Tschernobyl hat es auch - in Hand von Laien zum größten Unfug führen. So führt derselbe Prüfstrahler Strontium-90 auf einem Gerät mit Umstellungstaster zu den Anzeigen der Tabelle 4.

Tabelle 4: Nuklidspezifische Anzeigen eines Kontaminationsmonitors, jeweils für den gleichen Prüfstrahler Strontium-90, aber beim Einstellen auf die genannten Nuklide. Es werden ganz verschiedene "Aktivitäten" angezeigt, die gar nicht vorliegen.

Nuklid:	C-14	P-32	Cr-51	Co-57	Co-60
Bq/cm ² :	20,8	1,9	63,3	15,6	5,5
Nuklid:	Se-75	Sr-90	Tc-99	I-123	I-125
Bq/cm ² :	23,8	2,5	23,8	23,7	34,4
Nuklid:	I-131	Cs-137	Tl-201	Tl-204	Am-241
Bq/cm ² :	3,5	3,6	12,7	6,9	6,9

Weitere Großflächenmonitore

Die Detektorfläche von 100 - 200 cm² von Handgeräten zum Aufspüren und Messen von Kontaminationen auf Oberflä-

chen, z. B. Arbeitstischen, gilt als groß (deshalb „Großflächen-Proportionalzähler“) im Vergleich zur Detektorfläche von 3 - 20 cm² von Endfensterzählrohren. Doch sind die Detektorflächen von Handgeräten klein gegenüber denen von ortsfesten Anlagen. Solche stehen an Ausgangsschleusen zur Ganzkörperüberwachung von Kontaminationen. Das betrifft beruflich strahlenexponierte Personen an nuklearmedizinischen, radiochemischen und kerntechnischen Arbeitsplätzen. Im Idealfall wird die Person allseitig ganzflächig von Detektoren umgeben. Beta-Gamma-Detektoren sind heute nicht mehr wartungsbedürftige Proportionaldetektoren, sondern preiswertere Kunststoffszintillatoren in dünnen Platten hinter lichtdichter Folie. Das strahleninduzierte Licht wird durch den Kunststoff selbst als Lichtleiter an den Kanten zu Photomultipliern geführt. Durch diese elegante optische Technik sind die Signale von großen Flächen kostengünstig auslesbar.

Dieser Aspekt ist umso wichtiger wegen der stark gestiegenen Nachfrage nach großflächiger Überwachung auf mögliche Kontaminationen und versteckte radioaktive Stoffe. Messgeräte stehen heute an Werkstoren zur Messung von Schrott auf Lastwagen, an Grenzbahnhöfen zur Messung ganzer Güterzüge. Auch Massengüter natürlich radioaktiver Stoffe und Materialien mit Kontaminationen durch künstliche Radionuklide vom Rückbau von Kernkraftwerken sind freizumessen. Um energiereiche Gammastrahler wie Co-60 empfindlich zu detektieren, genügen nicht dünne Kunststoffszintillatoren, sondern 5 cm dicke sind notwendig.

Schnelle empfindliche Aktivitätsmessungen

Wie in Kapitel 6 erwähnt, können Aktivitätsmessungen in Bezug auf einfache und schnelle Probenpräparation und Messung sowie Zuverlässigkeit und Empfindlichkeit der Messung optimiert werden, wenn alle die Signifikanz bestimmenden Parameter sorgfältig bedacht und miteinander abgestimmt werden. Die Parameter kommen von Probe, Geometrie Probe - Detektor, Detektor, Messzeit und Umgebung. Eine solche Optimierung soll am Beispiel des im Radiometrischen Seminar der Universität Regensburg entwickelten Low-Level-Messgerät LLM 500 erläutert werden,

um beispielhaft zu zeigen, wie mit einer Kombination kleiner Änderungen große Verbesserungen erzielt wurden.

Bei der Probenform begann die Arbeit mit Disketten von $13,0 \times 19,5 \text{ cm}^2$ Fläche aus 2 mm dicker Pappe mit einer gestanzten Öffnung von 10 cm Durchmesser für Glasfaserfilter. Das anfängliche Ziel waren schnelle, zeitaufgelöste Messungen der an Aerosolpartikel angelagerten Radonzerfallsprodukte in Luft, siehe Kapitel 10. Wie sich bald ergab, eignet sich die Diskette mit Öffnung auch zur standardisierten Messung von Sanden und zerkleinerten Festkörpern sowie von Wischtests. Die Probe befindet sich auf und zwischen großflächiger Klebfolie, die in Rollenform im Büromaterialhandel erhältlich ist. Die Diskette mit Probe wird zur Messung in einen Schlitz in der Frontplatte des Gerätegehäuses geschoben. So kommt sie unter den Detektor zu liegen und über ein Wolframblech, das als Betareflektor die Effizienz erhöht. Die Probe ist bezüglich Masse, Fläche und Abstand zum Detektor definiert und die Messungen von Nettoimpulsraten sind mit Standards kalibrierfähig zu Aktivitäten und Aktivitätskonzentrationen.



Abb. 19:
Low-Level-
Messgerät

Als Standarddetektor wurde ein gasgefüllter, abgeschmolzener und damit wartungsfreier Proportionaldetektor gewählt, von $11 \times 11 \text{ cm}^2$ Fläche, wie er für Kontaminationsmonitore üblich ist. Die Gasfüllung ist jedoch nicht Xenon,

sondern P10 (10 % Methan, 90 % Argon). Damit ist der Detektor mehr beta- und weniger gammaempfindlich. Deshalb ist der Untergrund (Nulleffekt) bei 80 nGy/h nur ca. 200 ipm statt 600 - 900 ipm bei anderen Detektoren gleicher Fläche mit Xenongasfüllung. Alle im Strahlenschutz wichtigen Gammastrahler sind auch Betastrahler und der Detektor kann auf diese optimiert werden.

Durch die günstige Geometrie von Detektor zur Probe beträgt für einzelne Radionuklide wie K-40, Cs-137, Pb-214, Bi-214 der Kalibrierfaktor $k = 6$ [Bq/ips] und die Zählausbeute (Effizienz) $e = 1/k \cdot 100 = 17$ %. Wegen der großen Fläche von Probe und Detektor besteht eine hohe Empfindlichkeit (niedrige Nachweisgrenze).

Die Messzeit des Gerätes ist in Einerschritten von 1 bis 100 min wählbar wie auch die Anzahl der automatischen Messwiederholungen. Beides ist neu im Vergleich zu üblichen Kontaminationsmonitoren mit Anzeige in ips und war bisher nur bei großen Labormessplätzen möglich. Das neue Gerät vereint gute Eigenschaften beider. Automatische Wiederholungsmessungen erlauben eine bequeme und sichere zeitspektrometrische Unterscheidung von kurzlebigen Radonzerfallsprodukten (s. Abb. 32) und langlebigen Radionukliden bei gemeinsamem Vorkommen in der Luft.

Zum Gerät wurde eine extern anschließbare Alphasonde entwickelt. Denn Alphastrahler sind in allen natürlichen radioaktiven Stoffen enthalten. Für Nur-Alpha-detektoren ist der Untergrund fast Null. Kleine Probenmengen, wie Stäube, feine Sande und Pulver, dünn auf Klebfolie aufgebracht, haben kaum Selbstabsorption. Alphamessungen sind dann einfach, höchst empfindlich und zuverlässig. Der Nur-Alpha-detektor besteht aus Zinksulfidzintillator von 3 Zoll Durchmesser (44 cm^2), hinter lichtdichter, doch alphadurchlässiger Folie, konischem Lichtleiter zum 2 Zoll Photomultiplier und Elektronik. Der Kalibrierfaktor beträgt $k = 3$ Bq/ips. Durch Optimierung wurde die Nullrate von 50 iph auf 4 ± 2 iph gesenkt. In 30 min können auf einer Glasoberfläche (Bild, Spiegel) 5 Bq/m^2 Po-210 erkannt werden, entsprechend einer 20-jährigen Exposition von ca. 200 Bq/m^2 Rn-222. Solche retrospektive Radondosimetrie ist für epidemiologische Studien wichtig.

Ein GM-Zähler für Schulexperimente

Zahlreiche äußerlich verschiedene Strahlungsmessgeräte sind vom Typ Geiger-Müller-Zählrohr (GM). GM-Endfensterzählrohre mit 1,4 - 2,0 mg Flächenmasse sind gerade noch alpha-empfindlich. Wichtig ist ein großer Fensterdurchmesser, z.B. beim vorliegenden Gerät 45 mm, die Fläche ist dann 16 cm^2 , daher die hohe Empfindlichkeit. Bisher übliche Endfensterzählrohre haben nur eine Fläche von ca. 3 cm^2 . Ein Gerät hat die Abmessungen $15 \times 8 \times 3 \text{ cm}^3$ und mit der schützenden Tasche und der 9 Volt Blockbatterie ein Gewicht von 420 g und passt in eine Jackentasche.



Abb. 20:
GM-Endfensterzählrohr

Vorteilhaft ist eine Messzeitvorgabe in Schritten von 1-10 min, 10-50 min, 1-24 h, eine vierstellige Flüssigkristallanzeige mit den physikalischen Einheiten Impulse, ips, ipm, mR/h, $\mu\text{Sv/h}$ und Messwertaktualisierung sowie eine rot blinkende und eine akustische Impulsanzeige. Der Nulleffekt beträgt ca. 40 ipm bei einer Umgebungsdosisleistung von 80 nGy/h . In Verbindung mit der in Kapitel 10 beschriebenen Philion-Platte ist das Gerät hervorragend zur qualitativen Vorführung von Radon in jeder Raum- und Außenluft geeignet.

Ein Becquerelmonitor für Volumenproben

Zu Beginn des Kapitels wurde gesagt, dass Aktivitäten nuklidspezifisch gemessen werden sollten, wie es etwa gamma-spektrometrisch möglich ist. Nach Tschernobyl entstand bei Laien das Verlangen, die Aktivität in Lebensmitteln selbst zu messen. Das Szintillations-Messgerät "Becquerelmonitor" zur Bestimmung der Gamma-Aktivität von Nahrungsmitteln, Flüssigkeiten, Schüttgütern in Bq/L" mit eingebautem Kalibrierfaktor für Cäsium-137 hat aber keinen Energiediskriminator. Es spricht für alle Radionuklide so an, als wären es Cäsium-Aktivitäten. Davon abgesehen ist die Bedienung irrtumsfrei.



Abb. 21: Becquerelmonitor

Ein eingebauter Mikroprozessor ist so programmiert, dass sich bei einer Änderung der Impulsrate [ips] die Anzeige immer von selbst dem neuen Wert anpasst. Mit Zunahme der Messzeit wird der Schätzwert der Standardmessunsicherheit immer kleiner, wird zusammen mit dem jeweiligen Messwert kontinuierlich aktualisiert und auf einem Flüssigkristalldisplay numerisch angezeigt. Ein ungefähres Ergeb-

nis sieht man bereits einige Sekunden nach Beginn der Messung. Die Präzision der Messung verbessert sich mit Verlängerung der Messzeit.

Mit einem 1 Zoll x 1 Zoll Natriumiodid-Detektor und einer 500 mL Marinelli-Messschale (um den Detektor herum) in einer kleinen Bleiburg mit 15 mm Wandstärke ist das Gerät trotz des hohen Kalibrierfaktors von circa 90 Bq/ips (kleine Effizienz 1%) wegen der integrierenden Auswerteelektronik recht empfindlich: Nachweisgrenze 20 Bq Cäsium-137/L.

Flüssigszintillometrie

Radionuklide haben in Forschung und Technik eine wichtige Funktion als Tracer, etwa in der Biochemie zum Studium von Stoffwechselvorgängen. Die verwendeten Radionuklide H-3, C-14, P-32, S-35 und andere sind weiche Betastrahler und die Messproben sind oft Flüssigkeiten oder können in solche extrahiert werden. Dann ist zur Messung die Flüssigszintillometrie oder Liquid Scintillation Counting (LSC) die Methode der Wahl. Der flüssigen Messprobe wird ein Cocktail aus einem organischen Lösungsmittel mit einem Szintillator zugesetzt. Die Messung erfolgt in kleinen Flaschen, deren Wandmaterial für das kurzweilige Szintillatorlicht durchlässig ist. Die Ausbeute ist sehr hoch, da die Strahlungsquelle in der Lösung allseitig von Detektormaterial umgeben ist. Flasche und Photomultiplier sind in lichtdichtem Gehäuse. Es gibt Geräte mit automatischem Probenwechsler für große Probenzahlen.

Der Flüssigszintillator spricht auf Beta- und auf Alphastrahlung an. Bei Wasser mit Radon und Radonzerfallsprodukten, d.h. 3 Alphastrahlern und 2 Betastrahlern, ist die Empfindlichkeit so hoch, dass ein Probenvolumen von einigen mL genügt. Es gibt Geräte mit Unterscheidung von Alpha- und Betastrahlung auf Grund der elektronischen Auswertung der Lichtpulse nach Größe und Pulsform im Anstieg und im Abfall.

Messungen von Aerosolen und Gasen

Aerosole sind Suspensionen von Partikeln oder Tröpfchen, z.B. Luft mit festen oder flüssigen luftgetragenen Partikeln

mit Durchmessern von 2 nm - 10 μm . Luft enthält eine stark schwankende und nicht leicht messbare Konzentration von elektrisch geladenen und ungeladenen Aerosolpartikeln. Daran lagern sich einzelne Radionuklide an. Es sind dies als natürliche Radionuklide die Radonzerfallsprodukte, siehe Kapitel 10, und verschiedene künstliche Radionuklide in der Abluft von kerntechnischen Einrichtungen bei bestimmungsgemäßem und bei nichtbestimmungsgemäßem Betrieb (Unfällen). Zur Ermittlung der radiologischen Umweltbelastung werden die Emissionen kontinuierlich und nuklidspezifisch gemessen.

Die verschiedenen Detektoranordnungen und Messverfahren sind der Probe angepasst. Zur Edelgasmessung (Krypton-85, Xenon-133, Argon-41) wird Luft auf circa 200 bar in einer Flasche komprimiert und die Flasche auf einem Halbleiterdetektor vermessen. Elementares und organisch gebundenes Iod muss zur Messung an speziell präparierter Aktivkohle adsorbiert und angereichert werden, aerosolgebundenes hingegen an einem Schwebstoff-Filter. Tritium schließlich wird in der Luft als tritierter Wasserdampf auskondensiert und ausgefroren und im Flüssigszintillationszähler gemessen. Die Betastrahlung von Tritium und Edelgasen wird auch in Durchfluss-Ionisationskammern und Proportionaldetektoren gemessen.

Bildgebende Verfahren: Autoradiographie

Wenn es gilt festzustellen, wo und wie Radionuklide auf einer Fläche verteilt sind, mit anderen Worten, die Auflösung nach dem Ort zu bestimmen, sind direkte bildgebende Verfahren der Radiometrie, die Autoradiographie und die Szintigraphie, die geeignete Messverfahren. Bildgebende Verfahren im weiteren Sinne sind die technische und medizinische Durchleuchtung mit Röntgen- und Gammastrahlung: Grobstrukturuntersuchungen und Röntgendiagnostik. Bei der medizinischen Szintigraphie werden die in einem Organ räumlich verteilten Radionuklide durch ihre Strahlung erfasst und in Projektionsbildern wiedergegeben. Die Abbildungsgeräte sind die Gammakamera und der Szintiscanner.

Unter Autoradiographie versteht man die Selbstabbildung der an oder nahe der Oberfläche eines Objektes befindli-

chen Radionuklide durch ihre Strahlung. Detektoren hierfür sind der fotografische Film und Kernspurfolien. Die Autoradiographie hat nicht nur historische Bedeutung - sie führte zur Entdeckung der Radioaktivität - sondern auch eine aktuelle wissenschaftliche - sie führte zum einfachen Nachweis "Heißer Teilchen". Als ortsauflösende Detektoren sind fotografische Filme und Kernspurfolien zudem durch zeitliche Integration sehr empfindlich, preiswert, einfach zu handhaben und eine bleibende Dokumentation.

Für Autoradiographien eignen sich Alpha- und Betastrahler am besten. Bei Alphastrahlern ist die Probe direkt auf den Film ohne Verpackung zu legen, doch in lichtdichter Außenhülle. Eine punktförmige Quelle erzeugt auf einem Film einen Schwärzungskreis dadurch, dass Strahlung in alle Raumrichtungen ausgesandt wird. Der Schwärzungskreis wird um so kleiner, und damit die lineare Auflösung um so besser, je enger Film und Quelle in Kontakt sind. Beim Kontaktverfahren wird die Probe mit einer möglichst ebenen, glatten Fläche einfach auf den Film gelegt. Bei Autoradiographien muss man sich gegen fotografische Artefakte vorsehen. Schwärzungen auf Filmen entstehen nicht nur durch Licht und ionisierende Strahlung, sondern auch als Folge von chemischen Reaktionen zwischen Probe und Film, Reinigungsrückständen, ätherischen Ölen aus Pflanzen, Fingerabdrücken, Druck von scharfkantigen Proben, Kratzern und anderem mehr. Für Autoradiographien von Alpha- oder Betastrahlern bringen die in Kapitel 4 besprochenen Verstärkerfolien (für Röntgenfilme) keinen Vorteil.

Aus der Fülle der Anwendungen der Autoradiographie seien nur einige genannt und mit eigenen Aufnahmen belegt:

1. Uranerz, enthält die Radionuklide der Uranzerfallsreihen und damit Alpha-, Beta- und Gammastrahler,
2. "Heiße Teilchen" von Tschernobyl mit Ruthenium, Ende April/Anfang Mai 1986 in Regensburg auf einer Schuhsohle haften geblieben,
3. Dekorfliesen mit weichstrahlendem Uran ohne Radium,
4. Waldpilze mit Cäsium.

Die digitale Lumineszenz-Radiographie (Kapitel 4) wird nicht nur in der Röntgendiagnostik eingesetzt, sie findet sich auch

in Tischgeräten zur digitalen Autoradiographie von Flächen mit radioaktiv markierten Stoffen, z.B. Proteinen. Mit Elektrophorese werden diese für die biotechnologische Sequenzanalyse getrennt. Auch Vieldraht-Proportionalzähler haben für den gleichen Zweck eine hohe Ortsauflösung erreicht. Die digitale oder elektronische Autoradiographie ist dem Film weit überlegen, außer im Anschaffungspreis des Gerätes, doch Zeitersparnis ist auch eine Kostenersparnis.

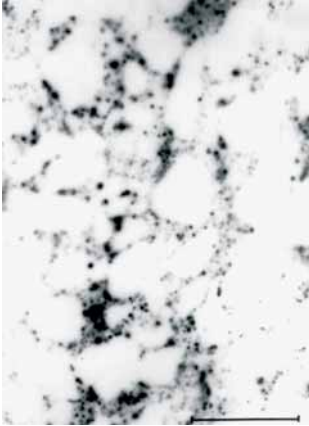
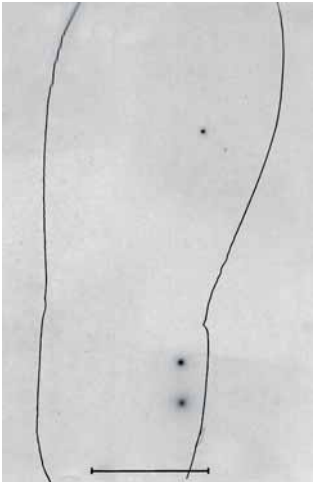


Abb. 22: Autoradiographie von einem Uranerz-Anschliff, Elliot Lake, Ontario. Der Balken ist auf dem Original 5 cm. Quarzitisch-pyritisches Konglomerat. Die Uranminerale Pechblende UO_2 , Brannerit (U, Ca, Th, Y) $(Fe, Ti)_2O_6$ und Coffinit $USiO_4$ sind mit Pyrit FeS_2 vergesellschaftet. Abbauerz mit 1 kg U_3O_8 pro Tonne Fördererz. Röntgenfilm Gevaert-Osray M3.

Abb. 23: Autoradiographie einer Schuhsohle mit „Heißen Teilchen“, Ende April/ Anfang Mai 1986 durch Regen benässte Krepsschuhsohle, Umrisse der Sohle mit Tusche nachgezeichnet. Röntgenfilm. Gamma-spektrometrie am 3. Juli 1986 ergab ein 6-7fach erhöhtes Ruthenium-103- zu Cäsium-137-Verhältnis verglichen mit normalen Proben. Ru-103 Halbwertszeit 39 d, Ru-106 HWZ 373 d.



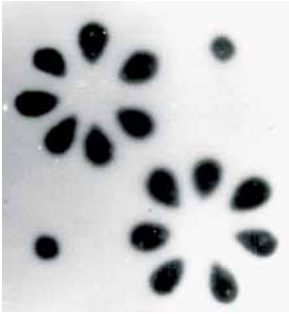
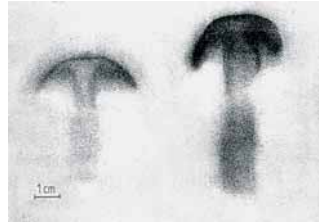


Abb. 24: Autoradiographie, Dekorfliese, 20 x 20 cm², Röntgenfilm Agfa Gevaert-Osray M3, 5 Tage belichtet. Fliese hat ca. 15 mg Uran im Farbfleck, andere Fliesen bis zu 1 g Uran. Photo der Fliese selbst s. Abb. 6.

Abb. 25: Autoradiographie von Pilzen mit Radiocäsium, links: *Cortinarius collinitus* (Blaustiel-schleimfuß), rechts: *Cortinarius anomalus* (graubräunlicher Dickfuß), A. Reisinger, Oktober 1988, bei Regensburg. Exposition 84 Tage, Kodak X-Omat AR.



9. Nuklidspezifische Messungen: Gammaskpektrometrie, Alphaskpektrometrie

Übersicht • Gammaskpektrometrie • Energieauflösende Szintillationszähler • Halbleiterdetektoren • Merkmale von Detektoren und Spektren • Kalibrierung von Energie und Aktivität • Probennahme und Probenvorbereitung • Beispiele für Gammaskpektren • Aero- und in-situ-Gammaskpektrometrie • Low-Level-Gamma-Messungen • Alphamessungen und Alphaskpektrometrie

Übersicht

Bei den bisher behandelten Verfahren und Geräten für die Messgrößen Dosis, Dosisleistung, Kontamination und Aktivität konnte oder musste nicht nach Nukliden unterschieden werden. Die Detektoren der Geräte sind nicht energieauflösend und damit nicht nukliderkennend.

Im Folgenden kommen wir zu der Messgröße, die oft, aber doch nicht immer mit Nukliderkennung gemessen werden muss und auch gemessen werden kann. Es ist dies die Aktivität, genauer die Aktivitätskonzentration. Aktivitäten sind vorzugsweise nuklidspezifisch zu messen. Im Kapitel 3 wurde gesagt, weshalb und wie aussagearm eine Aktivitätsangabe ist ohne Mitangabe, von welchem Nuklid die Aktivität stammt. Denn die Aktivität für sich allein nennt nur die Zahl der Zerfälle pro Sekunde (im zeitlichen Mittel) ohne Aussage, welche Strahlenart mit welcher Energie ausgesandt wird und von welchem Radionuklid (chemisches Element). Diese Aussage ist aber für die physikalischen, chemischen und biologischen Wirkungen entscheidend.

Einzelne Radionuklide werden am einfachsten an der diskreten und für sie charakteristischen Energie der von ihnen ausgesandten Gamma- oder Alphastrahlung erkannt, sofern es nicht reine Betastrahler sind. Energieaufgelöste Messungen sind somit nukliderkennend und für Aktivitätsmessungen besonders geeignet und notwendig. Man spricht von Gammaskpektrometrie und von Alphaskpektrometrie, die beide Anwendungen in vielen Bereichen haben. Eine Beta-

spektrometrie im selben Sinne gibt es nicht, da Betateilchen kein diskretes Energiespektrum haben.

Spektrometrie im bisherigen Sinne bedeutet "Energiespektrometrie". Da für alle Radionuklide die Halbwertszeit nuklidspezifisch ist, ist auch die Zeitspektrometrie nuklidunterscheidend. Sie ist messtechnisch sinnvoll zur Unterscheidung von Beta-/Gammastrahlern mit Halbwertszeiten von min, h und Tagen. Dies nutzt ein geeignetes Gerät (siehe Kapitel 8) zur Unterscheidung von luftgetragenen, natürlich vorkommenden Radionukliden (Radonzerfallsprodukten) und künstlich erzeugten, z.B. I-131, Cs-137. Die Zeitspektrometrie ist für Radionuklide sogar älter als die Energiespektrometrie, da für diese früher die Detektoren fehlten.

Gammaskpektrometrie

Das wichtigste Spektrum der Physik ist das elektromagnetische Spektrum. Im Bereich der Radiowellen gibt die Abszisse die Frequenz $\nu = c/\lambda$ an, im Bereich des Lichtes die Wellenlänge $\lambda = c/\nu$ und im Bereich der Röntgen- und Gammastrahlung die Photonenenergie $E = h \cdot \nu$ in eV. Die Ordinate gibt jeweils die Anzahl der Photonen (Strahlungsintensität) an.

Messtechnisch erhält man vom Strahlungsdetektor und der nachfolgenden Elektronik sogenannte Impulshöhenspektren. Diese geben die Anzahl der elektrischen Impulse (Höhe des Peaks) als Funktion ihrer Energie wieder. Sie werden erst durch Kalibrierung der Energie und der Aktivität zu Gammaskpektren mit Aktivität der Probe in Abhängigkeit von der Energie der Strahlung.

Man unterscheidet kontinuierliche Spektren, so die Spektren von Röntgenbremsstrahlung und von Betastrahlung, und diskrete oder Linienspektren, so von charakteristischer Röntgenstrahlung, Gamma- und Alphastrahlung.

Gammaskpektren sind in der Strahlungsmessung außerordentlich wichtig, aus mehreren Gründen:

1. Gammastrahler sind weit verbreitet und von vielseitigem Interesse.

2. Für Gammastrahlung ist die Selbstabsorption in der Probe gering, Gammastrahler erfordern somit keine oder nur geringe Aufbereitung der Probe und im ersten Fall oft auch keine Zerstörung der Probe.
3. Gammaskpektren sind nuklidspezifisch und damit aussagekräftig.
4. Es gibt kompakte, energieauflösende Gammadetektoren guter Ausbeute und guter Energieauflösung, d.h. hoher Empfindlichkeit.
5. Es gibt kompakte Elektronik zur Aufnahme und Verarbeitung der anfallenden Impulshöhenspektren.
6. Es gibt Referenzstrahler zur Kalibrierung der Energie und der Aktivität.

Das Ziel der Gammaskpektrometrie ist die nuklidspezifische Bestimmung der Aktivitätskonzentration in Bq/kg oder Bq/L von Proben verschiedener Art, und zwar zuverlässig, schnell und kostengünstig für Grundlagenforschung und für den praktischen Strahlenschutz. Gemessene Aktivitätskonzentrationen von z.B. Lebensmitteln können mit Hilfe von Dosiskoeffizienten in effektive Dosen der inneren Strahlenexposition umgerechnet werden, die bei Verzehr der Lebensmittel zu erwarten ist.

Gammaskpektrometrie ist apparativ, im Personal und in der Zeit recht aufwändig. Sie sollte nur eingesetzt werden, wenn das Radionuklid unbekannt ist und die Nuklidkenntnis erforderlich ist und einfachere Messungen nicht genügen.

Bei den Detektoren für die Gammaskpektrometrie haben die älteren Natriumiodid-Szintillationszähler zwar eine weniger gute Energieauflösung als die neueren Halbleiterdetektoren. Sie sind aber wesentlich preiswerter und problemloser in Wartung und Betrieb. Deshalb sind sie weit verbreitet und werden zuerst besprochen. Bei Halbleiterdetektoren ist höchstreines Germanium das beste Material.

Zur richtigen Interpretation oder gar der quantitativen Auswertung von Gammaskpektren ist an die verschiedenen

Wechselwirkungen (siehe Kapitel 5) von Gammastrahlung im Detektor und seiner Umgebung anzuknüpfen. Die Wechselwirkungszeit von Strahlung mit Materie ist sehr kurz, in Gasen ns, in Festkörpern ps. Die Sammelzeit für die resultierende Ladung ist zwar wesentlich länger, ms in Gasen, in Festkörpern aber nur ns. Deshalb dürfen wir im folgenden annehmen: Die Zahl der registrierten Impulse (abhängig von der Aktivität der Probe und von der Ausbeute des Detektors) ist meist deutlich kleiner als $10^6/s$, so dass die Impulse als einzelne Impulse registriert werden können.

Im System Detektor plus Elektronik gibt es eine Mindestzeit, mit welcher zwei Ereignisse getrennt sein müssen, um als getrennte Impulse registriert zu werden. Diese Zeit heißt Totzeit. Bei manchen Systemen kann während der Registrierung eines Impulses von der Physik des Detektors her oder von der Elektronik der Impulsverarbeitung her gleichzeitig kein zweiter Impuls registriert werden. Bei hohen Zählraten kommt es zu langen Gesamttozeiten, zu denen das System gerade misst und nicht messbereit ist. Die Messzeit ist dann um die Totzeit zu verlängern. Um die Messstatistik nicht zu verfälschen, sollte die Totzeit aber nicht mehr als 10 % der Messzeit betragen. Man kann die Totzeit durch Teilung oder Verdünnung der Probe oder Vergrößerung des Abstandes Probe-Detektor verkleinern.

Damit ein Detektor für ein Gammaskpektrometer geeignet ist, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein: Erstens muss das Detektormaterial für die Gammaquanten im zu untersuchenden Energiebereich einen guten Massenphotoabsorptionskoeffizienten haben. Zweitens muss der Detektor für die hochenergetischen Photoelektronen genügend absorbierend, also genügend groß sein. Nur dann verlieren möglichst viele Photoelektronen ihre gesamte Energie im Detektor an sekundäre Elektronen. Auch diese werden alle im Detektor absorbiert und nur dann ergeben sich Impulse möglichst einheitlicher Höhe pro Gammaquant bestimmter Energie.

Energieauflösende Szintillationszähler

Für die Gammaskpektrometrie eignen sich nur wenige der im Kapitel 4 besprochenen Szintillationsmaterialien. Für Energieauflösung muss Proportionalität bestehen zwischen der

Photonenenergie eines Gammaquants, der absorbierten Energie und der Zahl der vom Szintillator emittierten Photonen sowie zur Impulshöhe vom folgenden Photomultiplier. Die Abklingzeit der induzierten Lumineszenz muss sehr kurz sein, um schnelle Impulse zu erzeugen und hohe Zählraten zu ermöglichen. Für hohe Ausbeuten müssen bei Gammastrahlung die chemischen Elemente des Detektormaterials von hoher Ordnungszahl Z sein (siehe Massenschwächungskoeffizient im Kapitel 5). Um das Lumineszenzlicht aus allen Teilen des Detektors zum Photomultiplier gelangen zu lassen, muss der Szintillator das erzeugte Licht wenig absorbieren oder streuen, d.h. als großer, transparenter Einkristall herstellbar sein. Die verschiedenen Bedingungen werden sehr gut von Einkristallen des Alkalihalogenids Natriumiodid erfüllt, dotiert mit 0,1 Molprozent Thallium als Aktivator.

Im Szintillator erfährt die Gammastrahlung mit der Materie verschiedene Wechselwirkungen: Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung. Diese äußern sich in unterschiedlicher Weise im aufgenommenen Gammaspektrum, wie später bei dessen Besprechung ersichtlich wird. Erwünscht ist ein starker Photoeffekt und nur kleine Beiträge aller anderen Effekte, da nur für den Photoeffekt Linearität zwischen einfallender und absorbierter Energie besteht und von dieser zur Höhe des Ausgangssignals.

Szintillatoren verdanken ihre Verwendung als Szintillationszähler dem Photomultiplier oder Lichtverstärker. Erst dieser verwandelt das sehr schwache, so kaum messbare Lumineszenzlicht oder die Szintillationspulse in nutzbare elektrische Impulse. Photomultiplier haben zwei Teile, die Photokathode und die Dynoden. Die Photokathode verwandelt Licht (Photonen) in niederenergetische Elektronen. Die Dynoden liegen auf unterschiedlichem Potential und vervielfachen die Elektronen. Photomultiplier, auch Sekundärelektronenvervielfacher genannt, sind spezielle Elektronenröhren aus Glas und mechanisch, thermisch und gegen äußere magnetische Felder empfindlich.

Halbleiterdetektoren

Gammaquanten erzeugen im Halbleiter bei Absorption zunächst hochenergetische Photoelektronen. Diese verlieren ihre kinetische Energie, indem sie viele Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband heben. Löcher im Valenzband und Elektronen im Leitungsband bilden Elektron-Loch-Paare. Die Ladungsträger (Elektronen und Löcher) werden im elektrischen Feld eines in Sperrrichtung gepolten p-n-Übergangs gesammelt. Die elektrische Feldstärke wird so hoch gewählt, dass sich zwischen den "Blocking Kontakten" eine ausgedehnte, an Ladungsträgern verarmte "intrinsische" Zone bildet. Die intrinsische oder Verarmungszone ist das strahlenempfindliche Volumen. Durch hohe Feldstärke (unterhalb der Durchbruchsspannung) kann es auch zu innerer Verstärkung primär gebildeter Ladungsträger kommen, wie bei der Stoßionisation im Gas einer Proportionalzählers.

Ein Halbleiterdetektor für ionisierende Strahlung ist mit einer Ionisationskammer vergleichbar. Sammelvolumen des Halbleiterdetektors ist die Feldzone eines p-n-Übergangs. Anstelle eines Füllgases der Ionisationskammer wird ein Festkörper ionisiert. Dies hat zwei große Vorteile. Erstens ist die Dichte eines Festkörpers etwa tausendmal höher als die eines Gases, die Wechselwirkung Strahlung - Materie entsprechend stärker bzw. notwendige Volumina entsprechend kleiner. Zweitens ist im Halbleiter die Ionisierungsenergie ε zur Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares nur circa 3 eV, verglichen mit circa 30 eV zur Erzeugung eines Ladungsträgerpaares in Gasen und circa 120 eV zur Erzeugung eines Photoelektrons aus der Photokathode des Photomultipliers, der einem Natriumiodidszintillator angeschlossen ist.

Die Ionisierungsenergie ε von 3,7 eV in Si und von 3 eV in Ge ist experimentell gefunden und weitgehend unabhängig von der Energie und der Art der Strahlung. Ein Gammaquant bzw. ein primäres Photoelektron der Energie E führt somit zu $N = E/\varepsilon$ messtechnisch wirksamen Elektronen. ε ergibt sich aus E/N . Dabei ist ε wegen verschiedener Verlustmechanismen, z.B. Gitterschwingungen, größer als der Bandabstand. Je größer N , um so kleiner sind relativ die statistische Schwankungen von N , die zu einer Verbreite-

rung des Ausgangssignals führen. Kleines ε bedeutet also großes N und gute Energieauflösung. Der Massenphotoabsorptionskoeffizient (siehe Kapitel 5) τ/ρ , proportional Z^3/E^3 , ist zudem für Silizium ($Z = 14$) und Germanium ($Z = 32$) günstig, so dass ein großer Anteil a der Gammaquanten zu Photoelektronen führt. Die beiden Vorteile, großes a und großes N , multiplizieren sich zur Höhe des Ausgangssignals. Halbleiterdetektoren gehören zu den schnellsten Strahlungsdetektoren. Um den Strom durch thermisch erzeugte Ladungsträger niedrig zu halten, muss aber der Detektor auf die Temperatur von flüssigem Stickstoff ($77\text{ K} = -196\text{ }^\circ\text{C}$) gekühlt werden.

Alphastrahlung und weiche Röntgenstrahlung (bis 30 keV) werden schon in dünnen Schichten von Silicium vollständig absorbiert. Für die Spektrometrie dieser Strahlungen sind Silizium-Detektoren gut geeignet.

Für Gammastrahlung, insbesondere oberhalb 50 keV , sind zur Absorption aber große Volumina erforderlich, wie sie mit Germanium hochohmig herstellbar sind, nicht aber mit Silicium. Die höhere Ordnungszahl von Germanium mit besserem Verhältnis von Photoeffekt zu Comptoneffekt ist ein weiterer Vorteil. Hochreines (High Purity) Germanium, Ge HP, ist deshalb das bestgeeignete Detektormaterial für hochauflösende Gammaspektrometrie. Es muss zwar bei Betrieb gekühlt werden, aber nicht mehr bei Lagerung wie die älteren Li-dotierten Ge-Detektoren.

Merkmale von Detektoren und Spektren

Das Impulshöhenspektrum ist definiert als die Kurve, welche die Werte von dN/dH als Funktion von H darstellt. dN ist die Anzahl der Impulse im Impulshöhenintervall dH , H die Impulshöhe, dH heißt auch Fenster- oder Kanalbreite. Durch Kalibrierung werden Impulshöhenspektren zu Spektren von Aktivität in Abhängigkeit von Energie. Spektren von Gammastrahlern, kurz Gammaspektren, zeigen je nach Energiebereich einige bis sehr viele, mehr oder weniger scharfe Maxima (Linien, Peaks) über einem mehr oder weniger starken Untergrund, z.B. von Comptonstreuung.

Wesentliche Kenngrößen eines Detektors bzw. eines mit ihm aufgenommenen Spektrums sind die Energieauflösung, die Ausbeute, die Nachweisgrenze und das Verhältnis eines Maximums zum Untergrund (Peak/Compton Verhältnis).

Die Energieauflösung R eines Spektrums ist definiert als die Breite B eines Peaks in seiner halben Höhe (Halbwertsbreite), dividiert durch den Abszissenwert H_0 der Mittelsenkrechten. $R = B/H_0$. Die Energieauflösung ist somit eine reine Zahl und wird in Prozent angegeben. Für sie gilt: je kleiner, desto besser.

Bei der Ausbeute (Effizienz) eines Detektors unterscheidet man absolute und intrinsische. Die absolute Ausbeute ist der Quotient Anzahl der registrierten Impulse zur Anzahl von Strahlungsquanten, die von der Probe emittiert werden. Die intrinsische Ausbeute ist der Quotient Anzahl der registrierten Impulse zur Anzahl von Strahlungsquanten, die den Detektor treffen. Die Peakausbeute ist der Quotient der Impulse, die zum Peak beitragen, zur Anzahl der Strahlungsquanten. Für die Ausbeute gilt: je größer, desto besser.

Mit Peak ist der Photopeak gemeint. Er wird gebildet von den Impulsen, die auf den erwünschten Photoeffekt zurückgehen, bei denen also das Gammaquant seine gesamte Energie E als kinetische Energie auf $N = E/\varepsilon$ messtechnisch wirksame Elektronen übertragen hat, mit ε als Ionisierungsenergie. Der Photopeak heißt deshalb auch Gesamtenergiepeak. Für die erwünschte vollständige, photoelektrische Absorption von Quanten muss der Detektor daher eine Mindestgröße haben, nur steigt der Preis rasch mit der Größe.

Um die natürliche Umgebungsstrahlung (Untergrund) abzuschirmen, befinden sich Detektor und Probe in einer "Bleiburg" von mindestens 5 cm, besser 10 cm Wandstärke, aus besonderem, strahlungsarmen Blei. Blei ist aber ein guter Rückstreuer für die primäre Gammastrahlung der Probe selbst, deren Comptonstreuung und von hochenergetischen Elektronen. Deshalb verwendet man eine gestufte Abschirmung: außen Blei, dann Kupferblech und der Probe am nächsten Kunststoff. Das Elektronenstreuvermögen sinkt mit abnehmender Ordnungszahl.

Die Nachweisgrenze hängt ab: von der Energieauflösung, der Ausbeute, dem Peak-Compton-Verhältnis, dem Untergrund, der Messzeit, der Probengeometrie, der Selbstabsorption und vom Radionuklid. Verschiedene Gammastrahler haben ganz unterschiedliche Emissionswahrscheinlichkeiten ihrer Gammalinien, die zudem in verschiedenen Bereichen der Energie liegen, für welche der Detektor unterschiedlich effizient ist.

Kalibrierung von Energie und Aktivität

Im Spektrum ist Impulshöhe und Impulszahl zu unterscheiden. Die Impulshöhe ist das Maß für die Gammaenergie. Impulse unterschiedlicher Höhe werden im Vielkanalanalysator nach zunehmender Höhe geordnet und auf Kanäle steigender Ordnungsnummer verteilt. In der graphischen Darstellung sind die Kanalnummern auf der Abszisse aufgetragen. Die Zahl der Impulse einer bestimmten Höhe bestimmt den Kanalinhalt und wird im Spektrum auf der Ordinate aufgetragen. Die Fläche eines Photopeaks - immer für einen bestimmten Detektor - ist daher das Maß für die Aktivität des Nuklids, zu dem die Gammalinie gehört. Die Höhe eines Photopeaks wird deshalb einerseits vom Auflösungsvermögen, andererseits von der Ausbeute des Detektors bestimmt, die zu kalibrieren ist.

Die Kalibrierung von Energie und Ausbeute geschieht bei der Gammaskpektrometrie mit Kalibrier- oder Referenzstrahlern. Diese enthalten ein Gemisch von Radionukliden bekannter Aktivität und mit Linien bekannter Energie und bekannten Emissionswahrscheinlichkeiten. So lässt sich feststellen, welche Kanalnummer welcher Energie und welche Fläche von welchem Photopeak welcher Aktivität entspricht.

Man verwendet den Kalibrierstrahler für die Energiekalibrierung und für die Aktivitätskalibrierung. Die Ausbeute von Detektoren ist energieabhängig. Dies ist bei der Aktivitätskalibrierung der Impulszahl zu berücksichtigen, indem der Kalibrierstrahler mehrere Radionuklide mit bekannten Aktivitäten und bekannten Gammaenergien im zu kalibrierenden Energiebereich enthält. Kalibrierstrahler müssen dieselbe Geometrie, Dichte und räumliche Nuklidverteilung wie die Messprobe haben, um auch Selbstabsorption und andere

Effekte zu erfassen. Verwendet man verschiedene Probengeometrien, etwa kleine 100 mL Dosen, 500 mL Kautexflaschen und 1000 mL Marinellibecher, so ist es notwendig, Kalibrierstrahler in denselben Behälterformen zu haben.

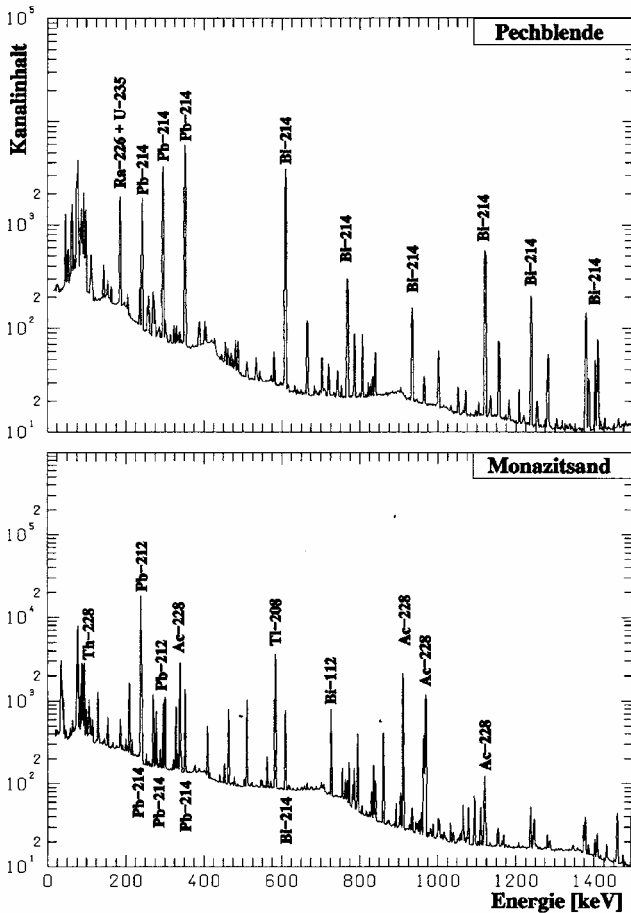
Probennahme und Probenvorbereitung

Die Gammaskpektrometrie ermöglicht die quantitative Bestimmung von Aktivitätskonzentrationen z.B. in Bq/kg oder Bq/L von Einzelnucliden auch in Nuclidgemischen. Wie bei jeder chemischen oder physikalischen Analyse ist das Ergebnis einer oder mehrerer Proben nur so repräsentativ und zuverlässig wie die Probennahme und die Probenvorbereitung.

Die Form des zu wählenden Detektors und des Probenbehälters hängen davon ab, welche Radionuklide in welchen Probenmengen mit welcher Genauigkeit zu messen sind. Für kleine Probenmengen bringt die Geometrie des Bohrlochdetektors die höchste Ausbeute. Die Probe, z.B. einige mL in einem Reagenzglas, ist im Bohrloch fast allseits vom Detektor umgeben, nur wenig Strahlung geht am Detektor vorbei. Für größere Probenmengen bringt die Geometrie der Marinelli-Messschale (500 - 1000 mL) eine gute Ausbeute. Der Detektor ist fast allseits von der Probenschale umgeben. Bei einer großen Anzahl von Proben sind Dosen (100 mL) oder Kautexflaschen (500 - 1000 mL) am bequemsten, einfach auf die Stirnseite des Detektors (Durchmesser 3 Zoll oder mehr) zu stellen. Die Ausbeute ist wegen des ungünstigen Abstands zwar deutlich geringer, aber die Handhabung der Proben einfacher. Kleine Aktivitäten erfordern für gute Messstatistik lange Messzeiten.

Beispiele für Gammaskpektren

Als Beispiele für Gammaskpektren seien Spektren von Proben mit natürlichen Radionukliden erläutert. Natürliche uran- und thoriumhaltige Proben liefern ein linienreiches kompliziertes Spektrum, zu dessen Auflösung Halbleiterdetektoren unerlässlich sind. Proben mit künstlichen Radionukliden, etwa nur mit Cäsium kontaminierte Pilze liefern ein linienarmes Spektrum, für das Szintillationsdetektoren genügen.



Vergleich einer Uran- und Thoriumprobe

Abb. 26: Gammaskpektren von Pechblende (U) und Monazitsand (Th). Aufgenommen mit einem HP-Ge-Detektor in 5 cm Bleiburg. Im Spektrum von Pechblende sind die Zerfallsprodukte von U-238 zu erkennen, insbesondere Ra-226 und mehrere Linien von Pb-214 und Bi-214. Im Spektrum von Monazitsand erscheinen insbesondere Th-228, Ac-228, Pb-212, Bi-212 und Tl-208 der Th-232-Zerfallsreihe.

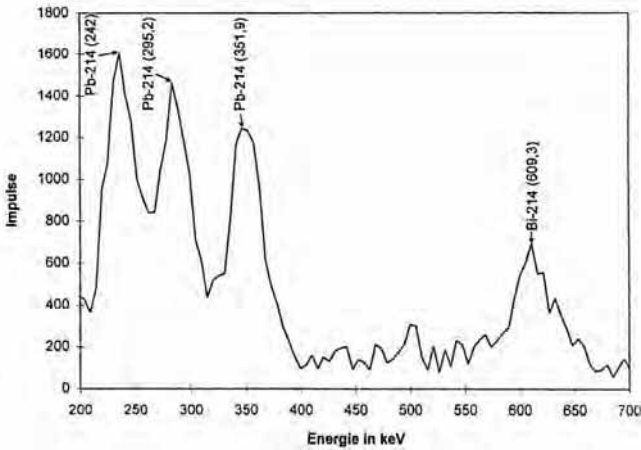


Abb. 27: Gammasktrum von Radonzerfallsprodukten.

Aufgenommen mit einem NaI-Bohrloch-Detektor. Man beachte die viel breiteren Linien, d.h. geringere Energieauflösung im Vergleich zum Ge-Detektor (Abb. 26). Die Probe wurde auf einer Polyäthylenfolie auf einer Philion-Platte gesammelt, siehe Kapitel 10.

Wie die beiden Spektren von Pechblende, einem Uranerz, und Monazitsand, einem Thoriumerz, zeigen, enthalten natürliche Proben die Mütter und ihre zugehörigen Zerfallsprodukte (Töchter) und liefern somit recht linienreiche Spektren, die aber eindeutig unterschieden und auch quantitativ ausgewertet werden können. Dabei werden auch radiochemische Ungleichgewichte erkennbar: einzelne Zerfallsprodukte sind gegenüber der Gleichgewichtsaktivität abgereichert, was auf geochemische Vorgänge und Exhalation von Radon schließen lässt.

Aero- und in-situ-Gammaskpektrometrie

Gammaskpektrometrie wird nicht nur wie bisher beschrieben im Labor eingesetzt, sondern auch im Gelände, und zwar vom Flugzeug oder Fahrzeug aus. In den 70er und 80er Jahren geschah dies zur Prospektion auf Uran. Mit NaI-Detektoren bis zu mehreren hundert Litern Volumen wurde besonders in den flachen, baumlosen Weiten des nördlichen Kanadas mit Hubschraubern aus ca. 100 m Höhe und mit ca. 100 km/h Fluggeschwindigkeit erfolgreich nach Gamma-

Anomalien gesucht, die dann nach Uran, Thorium und Kalium unterschieden wurden. Wegen der geringeren Absorption bei hohen Energien verwendete man die Linien 1,461 MeV (K-40), 1,764 MeV (Bi-214) und 2,615 MeV (Tl-208).

Bei Unfällen von Satelliten im Weltraum wurden mehrfach Trümmer der nuklearen Energiequellen (Kernreaktoren oder Radionuklidbatterien) auf der Erde verstreut und radiometrisch gesucht. Nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl wurde die Bodenkontamination durch künstliche Radionuklide großflächig mit mobilen Gammaskpektrometern gemessen. Diese haben weitere Anwendungen in der geologischen Kartierung, der Überwachung von Kernanlagen (Beweissicherung), dem Aufspüren von radioaktiven Altlasten und von geothermischen Hotspots, die auf Uran/Thorium Anreicherungen beruhen. Bei der Aerogammaskpektrometrie muss zusätzlich zur terrestrischen Strahlung die kosmische Strahlung, die geographische Position und die Flughöhe jeweils über jeder Geländeunebenheit sehr genau registriert werden.

Reinstgermanium-Detektoren werden heute auch für mobile Gammaskpektrometer zur Umweltstrahlenschutzvorsorge verwendet. Gemessen wird vom fahrenden oder stehenden Messwagen aus oder im engeren Sinne in-situ mit dem Detektor auf einem Dreibein in 1 m Höhe über dem Boden.

Die Auswertung und Bewertung der Rohdaten erfordert nach H. W. Zeising verschiedene Modelle, je nach den Gegebenheiten und den Messzielen:

1. Homogene Verteilung im oberen Halbraum: Kontamination der Luft, ohne Deposition auf dem Boden, z.B. radioaktive Edelgase, Angabe in Bq/m^3 .
2. Inhomogene Verteilung im oberen Halbraum. Kontamination der Luft in der Abluftfahne einer kerntechnischen Anlage. Wetterkategorie, Ausbreitungsrichtung, Emissionshöhe, Windgeschwindigkeit, Abstand Quelle-Messort, usw.
3. Homogene Verteilung auf der Bodenoberfläche: Kontamination einer versiegelten Oberfläche, z.B. Beton oder Asphalt, Angabe in Bq/m^2 .
4. Homogene Verteilung im unteren Halbraum: Gehalte des Bodens an natürlichen Radionukliden. Angabe in Bq/kg .

5. Inhomogene (exponentielle) Verteilung im Boden: Kontamination des Bodens nach Fallout bzw. Washout. Beschreibung durch die Relaxationslänge, d. i. die vertikale Länge in cm, in der die Kontamination auf $1/e = 37\%$ abnimmt.
6. Inhomogene Verteilung auf Oberflächen, z.B. Kontamination von Anlageteilen in Kernkraftanlagen, Freimessen von radioaktiven Abfällen.

Die Ergebnisse können unter Umständen als Rohdaten zur Berechnung der nuklidspezifischen Beiträge zur Ortsdosisleistung und zur Berechnung von Inkorporationsdosen dienen. Die Kalibrierung des Gammaskpektrometers auf Energie und auf Aktivitätskonzentration ist allerdings im Gelände noch aufwändiger als im Labor.

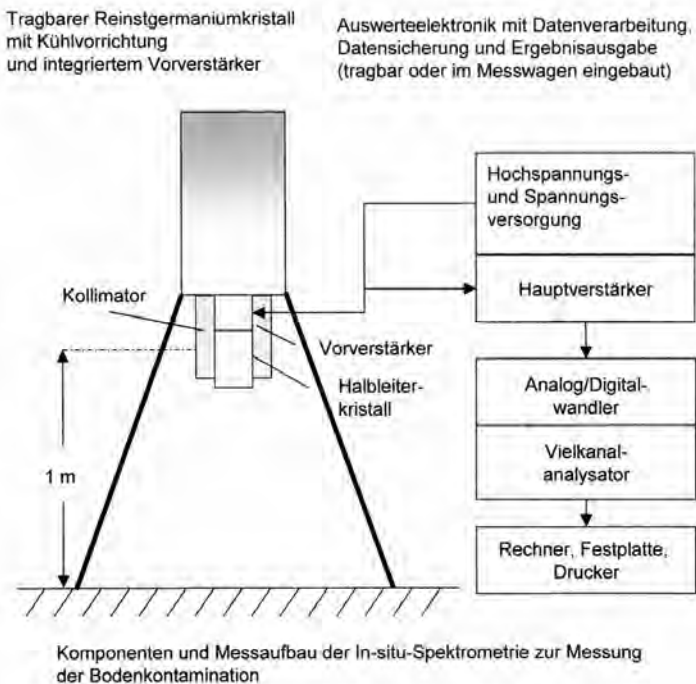


Abb. 28: Schema zur in-situ Gammaskpektrometrie

Im Rahmen eines Untersuchungsvorhabens des Bayerischen Landesamtes für Umwelt wurde eine speziell präparierte Betonwand angefertigt, die die Simulation von unterschiedlichen Kontaminationsszenarien und damit die optimale Anpassung der Kalibrierung an diese Messaufgabe erlaubt.

Low-Level-Gamma-Messungen

Wenige andere physikalische oder chemische Messverfahren, z.B. die Massenspektrometrie und die Spektralanalyse, sind so empfindlich wie die Messverfahren für Radionuklide. Wie mehrfach betont, können einzelne radioaktive Zerfälle registriert werden. Für niedrigste Nachweisgrenzen sind mehrere Punkte, einzeln oder kombiniert, zu beachten.

Low-Level oder niedrig heißen zu messende Aktivitäten einer Probe, deren Strahlungsintensität klein bis sehr klein ist im Vergleich zum natürlichen Untergrund und dem apparativen Nulleffekt ohne Abschirmung.

Die bestgeeignete Methode ist die Gammaskpektrometrie, sofern Gammastrahler vorliegen. Ist die Probe reichlich vorhanden, wird sie in einer 1 L Marinelli-Schale um den Detektor angeordnet. Ist die Probe knapp, wird mit einem Bohrlochdetektor gemessen. Wenn möglich sollte die Probe aufkonzentriert werden.

Am wichtigsten für die Messung kleiner Aktivitäten ist, das Messsignal der Umgebungsstrahlung im Detektor zu verkleinern. Dafür gibt es zwei Wege:

1. Abschirmung der Umgebungsstrahlung,
2. Verkleinerung des Detektors auf die Größe, wie sie für das Probenmaterial optimal ist.

Für die Bleiabschirmung gibt es besonders aktivitätsarmes Blei, etwa sehr altes aus der Zeit vor oberirdischen Kontaminationen und aus speziellen Lagerstätten (Boliden, Schweden). Es ist für gute Lüftung zu sorgen, um Kontamination durch Radonzerfallsprodukte zu vermeiden. Im Messsystem sind radionuklidfreie Materialien zu verwenden.

Sehr wirksam sind Antikoinzidenzschaltungen. Bei solchen wird das Messsystem für die Messprobe von einem zweiten Messsystem für die Umgebungsstrahlung umgeben. Beide Messsysteme müssen hohe zeitliche Auflösung haben. Impulse, die in beiden Systemen gleichzeitig registriert werden, werden zur Messung nicht verwendet (Antikoinzidenz).

Gegen die sehr durchdringende kosmische Strahlung hilft diese Antikoinzidenzschaltung. Ansonsten sind meterdicke Wasser-, Erd- oder Betonabschirmungen notwendig oder ein Labor im Felstunnel oder Bergwerkstollen. Im Salzstock Asse beträgt in 900 m Teufe die Gammaortsdosisleistung nur 0,6 nGy/h gegenüber dem Mittelwert von 50 nGy/h an der Oberfläche.

Alphamessungen und Alphaspektrometrie

Hauptvorteil von Alphamessungen ist der sehr kleine Untergrund von reinen Alphadetektoren. Hauptnachteil ist die geringe Reichweite auch hochenergetischer Alphateilchen, die in Luft nur einige cm und in Festkörpern einige 10 μm beträgt. Um Selbstabsorption in seiner Matrix zu vermeiden, muss der Alphastrahler chemisch abgetrennt werden oder auf dem Probenteller bzw. Präparatträger sehr dünn aufgetragen werden. Das Eintrittsfenster eines Alpha-Detektors darf nur die geringe Flächenmasse von 0,5 - 0,9 mg/cm^2 haben. Wenn möglich, etwa bei Radon, wird der Strahler direkt in den Detektor selbst gebracht, so etwa bei der Lucas-Kammer, der Ionisationskammer oder im Flüssigszintillator.

Einen Probenteller von 20 cm Durchmesser hat der weit verbreitete Alpha-Beta-Low-Level-Messplatz, Typ SML 311 zur Gesamtaktivitätsbestimmung. Darauf können Luftfilter mit Aerosolen oder Flüssigkeitsfilter mit Fällungen und Eindampfrückständen sehr nahe an das Großflächen-Proportionalzählrohr herangebracht werden. Wegen der Eindampffläche von 300 cm^2 ist die Nachweisgrenze in Bq/L für Alphastrahler, z.B. Ra-226, in rückstandsarmen Flüssigkeiten sehr niedrig. Zählgas ist 10 % Methan mit 90 % Argon (P10-Gas) im Durchfluss. Zwei Arbeitsspannungen von 2,4 kV und 3,2 kV liefern das Alpha-Plateau und das Alpha+Beta-Plateau. Zusätzlich zum Messzähler gibt es, von

diesem durch eine Stahlplatte getrennt, den Schirmzähler in Antikoinzidenzschaltung. Nur Impulse, die den Messzähler allein treffen, werden gezählt. Harte Umgebungsstrahlung, die trotz der Bleiburg in beiden Zählern Impulse erzeugt, wird ausgeblendet.

Alphaspektrometrie ist im Prinzip mit gasgefüllten Proportionalzählkammern möglich, die so großvolumig sind, dass alle Alphateilchen ihre gesamte Energie in der Kammer verlieren.

Halbleiterdetektoren für Alphaspektrometrie unterscheiden sich in mehreren Punkten von Halbleiterdetektoren für Gamaspektrometrie. Das strahlenempfindliche Volumen ist in jedem Fall die Verarmungszone eines in Sperrrichtung gepolten p-n-Überganges. Zur Absorption von Alphastrahlung genügt eine dünne strahlenempfindliche Schicht. Diese lässt sich in Silicium auch ohne Lithium herstellen. Alphadetektoren müssen nicht gekühlt werden.

Alphaspektrometrie im Labor verwendet spezielle Probenpräparation, um Selbstabsorption in der Probe zu vermeiden. Es wird im Vakuum gemessen, um die Schwächung der Alphaenergie auf dem Weg Probe-Detektor zu minimieren. Da die Sperrschichtdetektoren lichtempfindlich sind, sind sie vor Licht durch eine Schutzschicht zu schützen.

Ein schönes Alphaspektrum ist in Abbildung 29 zu sehen. Die Herstellung der Probe auf der Phillion-Platte wird in Kapitel 10 beschrieben. Es besteht keine Selbstabsorption. Die Linien sind scharf und eignen sich zur Energiekalibrierung. Die Probe ist außerdem mühelos überall herstellbar.

Für eine handliche Alpha-Szintillationssonde mit sehr niedriger Nullrate, siehe Kapitel 8 Abschnitt „Schnell empfindliche Aktivitätsmessungen“. Alphamessungen ohne oder mit Spektrometrie werden vor allem für Messungen von Rn-222 und seiner Zerfallsprodukte Po-218, Po-214 und Po-210 verwendet, siehe Kapitel 10.

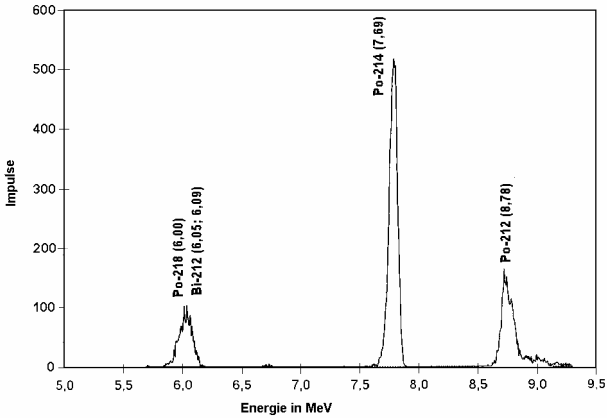


Abb. 29: Alphaspektrum der Zerfallsprodukte von Radon und Thoron, gesammelt auf einer Phillon-Platte, 30 min exponiert in einem Labor mit ca. 10 Bq/m^3 Radongas. Gemessen mit einem 30 cm^2 Silicium-Halbleiterdetektor in einer Vakuumkammer, Messzeit 20 h. Po-218 erscheint sofort, Po-214 nach wenigen min, Po-212 erst nach Stunden, da für Pb-212 $T = 10,6 \text{ h}$ und für Bi-212 $T = 1 \text{ h}$ ist, siehe Abb. 2 Zerfallsreihe von Thorium-232

10. Messung von Radon und Radonzerfallsprodukten

Übersicht • Zur Herkunft von Radon • Zerfall von Radon • Spezielle radiometrische Größen für Radon • Working Level und Potentielle Alpha-Energie-Konzentration • Radioaktives Gleichgewicht und Gleichgewichtsfaktor • Physikalische Effekte zur Radonmessung • Messgeräte und Messziele • Messgeräte für Radonzerfallsprodukte in der Luft • Messgeräte für Radon in der Luft • Die Philion-Platte • Aktivkohleexposimeter • Kernspurexposimeter • Radon in Wasser • Messung von Radon in Wasser • Exhalation von Radon • Radon im Boden • Radon aus Baustoffen und Mineralen • Radon in Wohnräumen • Bewertung von Radonexpositionen • Radium in Mineralwasser • Radonbäder

Übersicht

Zur Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide tragen Radon und seine radioaktiven Zerfallsprodukte (auch Töchter oder Folgeprodukte genannt) mehr als die Hälfte bei (Tabelle 1). Biologische Wirkungen sehr hoher Radonkonzentrationen bei langen Expositionszeiten wurden schon im 17. Jahrhundert als Schneeberger Bergkrankheit beschrieben und 1879 von F. H. Härting und W. Hesse als Lungenkrebs diagnostiziert. Dies geschah vor der Entdeckung der Radioaktivität (1896) und der "Emanationen" Thoron (1899) und Radon (1900). Der Name Radon ist erst seit 1923 üblich, vorher hieß es Emanation oder Niton.

In hohen Konzentrationen kommt Radon nicht im Freien vor, sondern nur in geschlossenen Räumen unter bestimmten Bedingungen und bei ungenügender Ventilation. Man kann etwas gegen Radon tun. Durch Messungen können Wohnräume mit hohen Konzentrationen gefunden werden und diese durch verschiedene Maßnahmen, am einfachsten durch Lüftung gesenkt werden.

Verschiedene Messgerätehersteller bieten heute Geräte zur Radonmessung an. Besorgte Bürger haben die Möglichkeit, die Konzentration von Radon in ihrem Wohnbereich und in

ihrem Trinkwasser von amtlichen oder privaten Messstellen gegen eine geringe Gebühr messen zu lassen.

Zur Sammlung und Messung von Radon und Radonzerfallsprodukten in Luft, Wasser und aus Feststoffen wurden neue, einfache Verfahren entwickelt, die sich auch für Schulexperimente eignen und deshalb ausführlicher beschrieben werden.

Zur Herkunft von Radon

Das Element Radon ($Z = 86$) steht im Periodensystem in der Spalte der Edelgase unter Xenon ($Z = 54$). Es besitzt die Eigenschaften der Edelgase: gasförmig, inert, farblos, geruchlos. Radon-222 ist zwar kurzlebig, es hat eine Halbwertszeit von nur $T = 3,8$ Tagen, es entsteht aber immer wieder neu aus dem langlebigen Radium-226 mit $T = 1600$ Jahren und dieses entsteht aus dem fast "ewigen" Uran-238 mit $T = 4,5$ Milliarden Jahren.

Die 3 natürlichen Isotope von Radon mit ihren Massenzahlen sind:

Radon-222, es stammt vom Zerfall des Radium-226 in der Uran-238-Zerfallsreihe (siehe Abbildung 3), es hat die Halbwertszeit $T = 3,8$ Tage.

Radon-220, auch Thoron genannt, es stammt vom Zerfall des Radium-224 in der Thorium-232-Zerfallsreihe (siehe Abbildung 2), $T = 56$ s.

Radon-219, auch Actinon genannt, es stammt vom Zerfall des Radium-223 in der Uran-235-Zerfallsreihe, $T = 4$ s.

Entscheidend für das Vorkommen und die Verbreitung der drei Radonisotope in Boden, Wasser und Luft ist ihre Halbwertszeit. Ist T kurz, so reicht die Zeit nicht aus, dass das Gas durch Diffusion oder Konvektion aus dem Muttergestein gelangt, bevor es zerfallen ist. So gelangen Thoron und Actinon sehr viel weniger in die Atmosphäre als Radon-222. Dieses und seine Zerfallsprodukte sind daher die Hauptquellen der Strahlenexposition durch Radon. In der Uranexploration, beim Abbau und der Aufbereitung von Thoriumerzen

und unter seltenen geologischen Bedingungen auch in Wohnräumen ist allerdings die getrennte Bestimmung von Radon und Thoron notwendig. Im folgenden ist unter Radon immer Radon-222 zu verstehen.

Bei festen, natürlichen Proben, wie Gesteinen, Mineralen, Böden, aber auch bei Baustoffen kann man aus der Radiumkonzentration der Probe nicht auf die Radonabgabe in die umgebende Luft schließen oder umgekehrt. Der Freisetzungskoeffizient für Radon ist stark abhängig von der kristallchemischen und physikalischen Beschaffenheit des Materials. Anders ist es bei Lösungen von Radiumverbindungen. Sie werden als Kalibrier- und Referenzstrahler für Radon verwendet, sind allerdings nicht problemlos zu handhaben.

Zu beobachtbaren Zahlenwerten von Radonkonzentrationen ist schon jetzt dies zu sagen: Es liegen Faktoren von 10 bis 100.000 zwischen den Werten, die an verschiedenen Orten gemessen wurden. Typische Konzentrationen - stets in der Einheit Bq/m^3 - sind für Radon-222:

Luft über dem Ozean 1, Außenluft über Kontinenten 5 – 50, Innenräume normal 20 – 200, Innenräume hoch 500 – 5000, in Ausnahmefällen bis 100.000, Bodenkapillaren in 1 m Tiefe 1000 - 200.000, nichtventillierte Stollen in uranhaltigem Gestein und unbelüftete Räume, in denen stark radonhaltiges Wasser strömt und entgast, 10.000 bis maximal 1.000.000.

Zerfall von Radon

Die Zerfallsreihe von Uran-238 (siehe Abb. 3) enthält die Zerfallsreihe von Radium-226 über Radon-222 zum stabilen Blei-206. In diesem Teil finden 5 Alphazerfälle und 4 Betazerfälle statt. Tabelle 6 enthält die Halbwertszeiten und die wichtigsten Energien der Strahlung. Die Prozentzahlen in Klammern geben die Emissions- oder Übergangswahrscheinlichkeiten an, die bei ein und demselben Radionuklid ein Maß für die relativen Intensitäten der Strahlung sind. Die Halbwertszeiten der Zerfallsprodukte reichen von Sekunden und Tagen bis zu Jahren. Die Aktivitäten der einzelnen Zerfallsprodukte verändern sich somit zeitlich.

Tabelle 5: Zerfallsdaten der Radium-226 Reihe

Die Prozentzahlen geben die relativen Emissionswahrscheinlichkeiten an.

Nuklid	Halbwertszeit	Energien der Strahlung in MeV		
		Alpha	Beta	Gamma
Ra-226	1600 a	4,78 (94,5%) 4,59 (5,5%)		0,186 (3,6%)
Rn-222	3,82 d	5,49		
Po-218	3,05 min	6,00		
Pb-214	26,8 min		0,67 (50%) 0,73 (40%) 1,02 (6%)	0,352 (35%) 0,295 (18%) 0,241 (7%)
Bi-214	19,9 min		1,00 (23%) 1,51 (40%) 3,26 (19%)	0,609 (45%) 1,120 (15%) 1,764 (15%)
Po-214	164 μ s	7,69		
Pb-210	22,3 a		0,015 0,061	0,047 (4%)
Bi-210	5,0 d		1,161	
Po-210	138,4 d	5,30		
Pb-206	stabil			

Für Rn-222 mit der Halbwertszeit $T = 3,82 \text{ d} = 3,31 \cdot 10^5 \text{ s}$ beträgt die spezifische Aktivität (siehe Kapitel 3) $A_s = 5,6 \cdot 10^{15} \text{ Bq/g}$ und die nuklidspezifische Masse $m_s = 177 \text{ ag/Bq}$ ($a = \text{atto} = 10^{-18}$). Für Po-218 beträgt $m_s = 0,1 \text{ ag/Bq}$. Dies bedeutet: Das Massenverhältnis von 10 Bq Po-218 in 1 m^3 Luft beträgt $10^{-21} : 1$. Mit der Phillon-Platte sind 10 Bq Po-218 mühelos nachweisbar.

Das gasförmige Radon verteilt sich trotz seiner höheren Dichte (9,73 g/L) in Luft (1,29 g/L) schnell und gleichmäßig, weil es auch bei höchsten Aktivitätskonzentrationen nur in infinitesimal kleinen Volumen- und Massenanteilen vorliegt.

Die festen Zerfallsprodukte, primär elektrisch positiv geladene Radioisotope von Polonium, Blei und Wismut dagegen verteilen sich nicht so gleichmäßig, denn sie sind zum Teil an Aerosolpartikel angelagert. Die Zerfallsprodukte werden im Atemtrakt teilweise deponiert, während das inerte Edelgas Radon nahezu vollständig wieder ausgeatmet wird.

Aerosole sind Suspensionen von geladenen und ungeladenen Staubpartikeln oder Tröpfchen der Größe nm - μm , die im Gas nicht sedimentieren. Luft enthält eine stark schwankende und nicht leicht messbare Konzentration von Aerosolpartikeln. Mit der Konzentration, der Zusammensetzung und der Größenverteilung der Aerosolpartikel schwankt auch der Anteil der Zerfallsprodukte, der an Aerosolpartikel angelagert ist, und der Anteil, der nicht angelagert (frei) ist. Je nach Methode der Probensammlung und Strahlungsmessung wird mehr der eine oder andere Anteil gemessen.

Spezielle radiometrische Größen für Radon

Die Radiometrie für Radon ist deutlich anders als die primär für Röntgen- und Gammastrahlung entwickelte allgemeine Radiometrie. Es sind radonspezifische Messgrößen mit historischen und mit SI-Einheiten zu erklären.

Radon ist gasförmig. Aber auch die festen, an Aerosolpartikel angelagerten und nicht angelagerten (freien) Zerfallsprodukte sind wie Gase zu behandeln, da sie über die Luft verbreitet und volumenbezogen gemessen werden. Aktivitätskonzentrationen für Radon und seine Zerfallsprodukte werden deshalb in Bq/m^3 angegeben oder früher in pCi/L , wenn es sich um Luftproben handelt, und in Bq/L , wenn es sich um Wasserproben handelt. Umrechnungsfaktoren sind:

$$1 \text{ pCi/L} = 1 \text{ nCi/m}^3 = 37 \text{ Bq/m}^3, \quad 1 \text{ Bq/m}^3 = 0,027 \text{ pCi/L}$$

Zum Verständnis älterer Literatur über Radon ist es nützlich, die Bedeutung und die Umrechnung historischer Einheiten zu kennen. Die ehemals gebräuchliche Mache-Einheit (ME) ist eine Einheit der Ionendosisleistung pro Volumen, definiert als die Menge Radon in 1 Liter Luft, die einen Sättigungsstrom von 0,001 Elektrostatischen Ladungseinheiten (esu) erzeugt. $1 \text{ ME} = 10^{-3} \text{ esu s}^{-1} \text{ L}^{-1}$. Da $3 \cdot 10^9 \text{ esu} = 1 \text{ C} = 1 \text{ As}$ beträgt der Sättigungsstrom $0,33 \mu\text{A L}^{-1}$.

$$1 \text{ ME entspricht } 364 \text{ pCi/L} = 13,5 \text{ kBq/m}^3 \text{ Radon-222}$$

Die zugehörige Aktivität war das millistat.

$$1 \text{ millistat} = 10^{-3} \text{ esu entspricht } 364 \text{ pCi} = 13,5 \text{ Bq}$$

Eine weitere historische Einheit war das eman.

1 Eman entspricht 100 pCi/L = 3700 Bq/m³ Rn-222.

Bei Messungen von Radon und seinen Zerfallsprodukten hat man es stets mit einem Gemisch verschiedener Radionuklide zu tun, das im Allgemeinen nicht im radioaktiven Gleichgewicht steht. Die Zerfallsprodukte werden durch verschiedene physikalische Prozesse, z.B. Deposition an Oberflächen, aus der Luft entfernt.

Die Aktivitätskonzentrationen (kurz Konzentrationen) der Zerfallsprodukte werden deshalb oft auf das radioaktive Gleichgewicht normiert und als "Gleichgewichtsäquivalente Radonkonzentration Rn-äquiv.", im Englischen Equilibrium Equivalent Radon Concentration EEC bezeichnet, die noch näher erläutert wird.

Biologisch am wichtigsten sind die kurzlebigen Alphastrahler Polonium-218 und Polonium-214. Weil auch die Betastrahler Blei-214 und Wismut-214 durch Zerfall zu Polonium-214 und damit zu Alphastrahlern werden, sind es potentielle Alphastrahler. Diese werden in der "Potentiellen-Alpha-Energie-Konzentration" PAEC berücksichtigt. Die PAEC ist eine rein physikalische Größe ohne radiologische Bewertung und ist unabhängig von irgendwelchen Annahmen messbar. Working Level und Bq/m³ Rn-äquiv. sind unterschiedliche Messeinheiten für PAEC. Dies wird später ausführlich erläutert.

Die neue Strahlenschutzverordnung nennt für Radon als Messgröße die "Exposition" in Einheiten Aktivitätskonzentration [Bq/m³] von Rn-222 mal Expositionsdauer [h]. Messgeräte, die diese Größe messen, hießen früher Dosimeter, heute Exposimeter.

Langzeitmessungen der Aktivitätskonzentrationen von Radon-222 (Gas) sind leichter zu handhaben als die der Zerfallsprodukte, weil für erstere auch passive Messgeräte ohne Elektronik verwendet werden können. Einzelne Kurzzeitmessungen lassen sich dagegen leichter mit den Zerfallsprodukten realisieren, da Aerosolpartikel sich mit Saugpumpen auf Filtern mühelos konzentrieren lassen. Filtermessungen sind deshalb schneller, empfindlicher und bei Filterwechsel zudem ohne Memory-Effekt.

Die gleichgewichtsäquivalente Radonkonzentration C (Rn-äquiv.) setzt sich aus Anteilen der Konzentrationen der einzelnen Zerfallsprodukte zusammen, die nach deren Beiträgen zur potentiellen Alpha-Energie-Konzentration gewichtet sind. Wegen der sehr kurzen Halbwertszeit (μs) von Po-214 ist dessen Beitrag zu vernachlässigen.

$$C(\text{Rn-äquiv.})=0,10 C(\text{Po-218})+0,52 C(\text{Pb-214})+0,38C(\text{Bi-214}).$$

Working Level und Potentielle-Alpha-Energie-Konzentration

Zum echten Verständnis der physikalischen und biologischen Bedeutung radiometrischer Größen für Radon kommt dem Working Level WL die zentrale Bedeutung zu.

Das WL wurde 1955 vorgeschlagen und 1957 offiziell in den USA eingeführt und wird auch heute noch dort und zum Teil international verwendet. Vertreter mehrerer US-Staaten mit Uranbergbau befassten sich damals mit der Frage, welche Konzentrationen von Radon und Zerfallsprodukten vom Arbeitsschutz her noch als annehmbar gelten dürften. Es war erkannt worden, dass es die Inhalation der kurzlebigen Zerfallsprodukte ist, die Lungenkrebs verursacht und nicht die Inhalation des Radongases.

Damals meinte man, ein "sicherer" Working Level seien Aktivitätskonzentrationen von 100 pCi/L für jedes der kurzlebigen Zerfallsprodukte Polonium-218, Blei-214 und Wismut-214. Denn dies wäre nicht mehr als 1/10 der Konzentration in ostdeutschen und tschechoslowakischen Uranbergwerken. Bei einem solchen Working Level würde den Bergleuten über die Lebensarbeitszeit hinweg kein zu erwartender Schaden erwachsen. Später erkannte man, dass das "Working Level" zu hoch angesetzt wurde und die Arbeitsschutznormen wurden auf 0,1 - 0,3 WL gesenkt. WL entspricht einer Dosisleistung, und Working Level Month (WLM), der Monat zu 170 Arbeitsstunden, einer Dosis.

Für das Working Level gilt heute die Definition über die Zerfallsenergie. 1 Working Level ist jede Kombination von Aktivitätskonzentrationen der kurzlebigen Zerfallsprodukte Polonium-218, Blei-214, Wismut-214 in 1 Liter Luft, welche zur Emission von $1,3 \cdot 10^5$ MeV Potentieller Alpha-Energie beim

radioaktiven Zerfall führt. Dies ist der Zahlenwert der Alpha-Energie, die emittiert wird beim vollständigen Zerfall jeder der kurzlebigen Töchter im radioaktiven Gleichgewicht mit 100 pCi Radon-222 pro Liter Luft (= 1 Eman).

1 WL entspricht 3700 Bq/m³ Rn-äquiv.

Das ist Rn-222 im radioaktiven Gleichgewicht mit seinen Zerfallsprodukten, wie nachstehend erläutert wird. Dimension des WL ist jedoch Energie/Volumen, also MeV/L oder J/m³ d.h. die Energie pro m³, die von den Zerfällen von 3700 Bq Rn-äquiv. pro m³ freigesetzt wird.

1 WL = 2,08 10⁻⁵ J m⁻³ = 1,3 10⁵ MeV L⁻¹

Radioaktives Gleichgewicht und Gleichgewichtsfaktor

Radioaktives Gleichgewicht wird für ein Gemisch aus einem langlebigen Mutternuklid und im Verhältnis dazu kurzlebigen Zerfallsprodukten definiert. Während einer genügend langen Wartezeit, praktisch 5 Halbwertszeiten der langlebigsten Tochter (Zerfallsprodukt), bauen sich die Konzentrationen der Töchter soweit auf, dass für jede Tochter ebenso viele Atome zerfallen wie aus der Mutter oder dem vorhergehenden Glied der Zerfallsreihe neu gebildet werden. Alle Radionuklide haben dann die gleiche Konzentration.

Dies gilt auch für Radon und seine Zerfallsprodukte, allerdings nur dann, wenn nicht frische Luft oder Ablagerung von Aerosolpartikeln die Konzentrationen der Zerfallsprodukte verringert. Diese Bedingungen sind praktisch nie erfüllt. Die Töchter liegen immer in geringeren Konzentrationen vor als die Mutter Radon. Die Abweichung vom Gleichgewicht wird durch den Gleichgewichtsfaktor F angegeben. F hat die Dimension 1 und einen Zahlenwert kleiner 1. Bezeichnet R die Konzentration von Radon-222 und Z die gleichgewichtsäquivalente Konzentration der Zerfallsprodukte, so gilt:

$$Z = F \cdot R$$

Der Gleichgewichtsfaktor F hängt stark von der Aerosolcharakteristik, der Luftzirkulation (Ventilation oder gar Filterung) und der Zufuhr von frischem Radongas ab. Im Freien (Außenraum) sind Werte zwischen 0,9 und 0,7 gemessen worden, in Innenräumen Werte zwischen 0,6 und 0,3, in sehr stark belüfteten Räumen F = 0,1 und weniger. Oft wird ein

Wert von 0,4 angenommen, um gemessene Zahlenwerte von R umzurechnen in Zahlenwerte von Z. Bei Zahlenwerten der Konzentrationen ist also genau darauf zu achten, um welche Spezies es sich handelt.

Ein Faktor F von circa 0,4 besagt: Es sind weniger Radontöchter in der Luft als dem radioaktiven Gleichgewicht entspricht. Hauptgrund dafür ist die Bildung der Radontöchter in einem ventilierten System. Im Bergwerk oder im Haus führt ein Luftstrom aktivitätsfreie (oder -arme) Luft zu, welche sich mit dem Radon aus einer Quelle vermischt. Radon aus einer Quelle ist Radon-222 ohne Töchter. In diesem Gemisch entstehen die Töchter erst allmählich. Bevor aber das radioaktive Gleichgewicht erreicht ist, gelangen die Töchter mit dem Luftstrom teilweise ins Freie.

Mechanismen für eine zusätzliche Verringerung sind die Diffusion und die Abscheidung der Radontöchter auf Oberflächen. Bei Diffusion und Abscheidung verhalten sich an Aerosolpartikel angelagerte und nicht angelagerte Radontöchter unterschiedlich. Bei Aerosolen ("luftgelöster Staub") schwanken Konzentrationen, chemische Zusammensetzung und Größenverteilung der Partikel stark. Werte von 0,01 mg pro m³ oder 10² – 10⁴ Partikel pro cm³ mit mittleren Durchmesser von 0,5 µm gelten als repräsentativ. Freie Zerfallsprodukte haben eine höhere Depositionsrate in tieferen Teilen des Atemtraktes als die an Aerosolpartikel angelagerten und gelten deshalb als gefährlicher.

Physikalische Effekte zur Radonmessung

Zur Messung der Konzentration von Radon und seinen Zerfallsprodukten werden stets die Wirkungen der ionisierenden Strahlung verwendet. Es sind dies (siehe Tabelle 5):

1. die Alphastrahlung von Rn-222 (5,49 MeV), Po-218 (6,00 MeV), Po-214 (7,69 MeV) und Po-210 (5,30 MeV),
2. die Betastrahlung von Pb-214, Bi-214 und Pb-210,
3. die Gammastrahlung von Pb-214 (295 keV, 352 keV), von Bi-214 (609 keV, 1,12 MeV, 1,76 MeV) und von Pb-210 (47 keV).

Alpha- und Gammastrahlung können relativ leicht nuklid-spezifisch spektrometriert werden. Für Aktivitätsmessungen

sind zudem die Halbwertszeiten zu beachten. Da diese relativ kurz sind, können die Radontöchter auch zeitspektrometrisch unterschieden werden.

Zur Messung (Detektion) von Radon und Radonzerfallsprodukten werden folgende physikalische Wirkungen der ionisierenden Strahlung benutzt:

1. Ionisation in Gasen, so in Ionisationskammern,
2. Ionisation in Festkörpern, so durch Alphastrahlung in Oberflächenschichtdetektoren aus Silicium oder durch Gammastrahlung in Halbleiterdetektoren aus hochreinem Germanium,
3. Szintillation durch Alphastrahlung in polykristallinem silberdotiertem Zinksulfid in Lucas-Kammern,
4. Szintillation durch Betastrahlung in Plastik- oder in Flüssigszintillatoren,
5. Szintillation durch Gammastrahlung in NaI-Einkristallen,
6. Strahlenschäden (Kernspuren) durch Alphastrahlung in Kunststofffolien, Ätzen macht sie sichtbar,
7. Strahlenschäden in Materialien wie Lithiumfluorid, die bei Erwärmung auf 200-300 °C unter Abgabe von Licht ausgeheilt werden: Thermolumineszenz.

Die genannten physikalischen Effekte ionisierender Strahlung sind nicht beschränkt auf die Strahlung, die von Radon und seinen Töchtern abgegeben wird, sondern gelten für die Strahlung beliebiger Radionuklide, wie sie natürlich und künstlich weit verbreitet vorkommen.

Um nur Radon (und/oder seine Töchter) zu messen, müssen eine oder mehrere Barrieren errichtet werden. Bei der Probensammlung dürfen nur Radon und/oder Töchter erfasst werden. Der Detektor darf nur auf diese ansprechen oder muss in einem Spektrum diese an ihrer charakteristischen Alpha- oder Gammaenergie erkennen. Oder das Mess- und Auswerteprogramm muss durch mehrere Messungen in zeitlichem Abstand diese Radionuklide an ihrer charakteristischen Halbwertszeit erkennen. Bei der Messung luftgetragener, künstlicher Radionuklide ist gegenüber Radon zu unterscheiden. Die Ablagerung von Radonfolgeprodukten auf der Kleidung (Wollpullover) nach Aufenthalt in

erhöht radonhaltiger Luft kann schon mit einfachen Kontaminationsmonitoren beobachtet werden.

Messgeräte und Messziele

Die genannten physikalischen Effekte sind die Grundlage für ganz verschiedene Detektoren und Messgeräte. Die Messgeräte sind nicht durch den Detektor allein charakterisiert, sondern durch eine spezifische Kombination von Messgröße, Detektor und Messparametern. Die Messgröße ist die Aktivitätskonzentration entweder von Radongas R (Rn-222) oder von Radonzerfallsprodukten Z als gleichgewichtsäquivalente Radonkonzentration Rn-äquiv. Die Messzeiten unterscheiden sich bei zeitgetakteten Messungen (min, h), bei Einzelmessungen (grab sampling, min) und bei zeitintegrierten Messungen (Exposimeter, Tage, Monate). Ferner gibt es „aktive“ Geräte mit Strombedarf für den Detektor mit oder ohne Pumpe und „passive“ Geräte ohne Strombedarf für den Detektor oder Sammler und mit Eindiffusion der Luft, so die Exposimeter.

Beide Konzentrationen R und Z sind starken örtlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen, zudem auch der Gleichgewichtsfaktor $F = Z/R$. Die für den Strahlenschutz relevante Strahlenexposition ist das Produkt von Konzentration R und Expositionsdauer bei einem als normal angenommenen $F = 0,4$, der aber in gut belüfteten Radonbädern auch 0,1 oder in Bergstollen 0,9 sein kann. Für eine richtige Beurteilung der Exposition sind deshalb beide Größen Z und R zu erfassen, letzteres um gemessene Konzentrationen mit tatsächlichen Aufenthalten am Messort zu korrelieren. Und dies alles sollte an allen Aufenthaltsorten der Personen erfolgen, wenn korrekte Daten etwa für eine epidemiologische Untersuchung zur Lungenkrebsinzidenz gewünscht werden. Meistens begnügt man sich mit ein oder zwei Langzeit-Exposimetern für R und einer zeitgetakteten Mehrtagesmessung von R.

Im praktischen Strahlenschutz mit einem Bedarf von mehreren tausend Messungen lassen sich aus Kostengründen nur passive Exposimeter verwenden, siehe später. Diese haben ungefähr die Größe einer Streichholzschachtel und können von der Messstelle an den Benutzer und zurück per Post

verschickt werden. Eine derartige Messung kostet 10 - 50 €. Eine Messung über mindestens drei Monate kann zur Bestimmung eines repräsentativen Langzeitmittelwertes genommen werden, da Radonkonzentrationen starken tages- und jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen.

Andere Anwendungen von Radonmessungen sind die Exploration auf Uran (gewesen), Erdbebenvorhersagen durch Messung von Bodenluft oder Brunnenwasser, Grundwasserbeprobungen, Erkennung geologischer Störungszonen, Überprüfung der Wirksamkeit baulicher Maßnahmen zum Radonschutz aus Boden und Baumaterialien bei Alt- und bei Neubauten. Jede Anwendung hat ihre spezifische Messmethode für Radon.

Zunehmende Bedeutung hat die Messung von Radon im Trinkwasser und in der Luft, z.B. von Wasserwerken. Nach neueren Erkenntnissen gehören Gruppen der dort tätigen Personen zu den am höchsten beruflich Strahlenexponierten. Sie sind deshalb in die Schutzvorschriften der neuen Strahlenschutzverordnung einbezogen worden.

Messgeräte für Radonzerfallsprodukte in der Luft

Die Messung der Radonzerfallsprodukte Z als Rn-äquiv. geschah auch im ersten, ältesten Messfeld für Radon, dem Uranbergbau und anderem Bergbau, wo durch Uran im Gestein und Erz hohe Radon-Konzentrationen auftreten. Ältere Messungen benutzten eine Lucaskammer und berechneten EEC aus drei zeitlich gestaffelten Messungen der Gesamtalpha-Aktivität. Die Lucaskammer ist ein lichtdichter Zylinder, dessen Innenwände mit Zinksulfid-Szintillator belegt sind. Alphastrahler in der Zylinderluft erzeugen Lichtblitze (Szintillationen) und ein Photomultiplier wandelt sie in zählbare elektrische Impulse um. Für hohe Konzentrationen, wie in Bergwerken, ist dies ein schnelles, einfaches Verfahren für grab sampling. Die Zylinder sind kostengünstig und können nach Abklingen nach einem Tag neu verwendet werden. Für Serienmessungen der Bodenluft, die ja hohe Konzentrationen aufweist, werden sie noch heute verwendet. Heute gibt es Messgeräte mit Lucaskammer, Pumpe und Elektronik, die zeitgetaktet R oder Rn-äquiv. messen.

Z als Rn-äquiv. wird heute wiederholend (zeitaufgelöst) gemessen durch Alphaspektrometrie eines Membranfilters mit einem Si-Detektor. Auf dem Membranfilter werden die Radonfolgeprodukte mit einer kleinen Pumpe gesammelt. Si-Detektoren sind kleinflächig. Membranfilter haben einen großen Strömungswiderstand und erlauben nur geringe Saugraten. Deshalb erhält man kleine Zählraten und geringe Zeitauflösung. Membranfilter werden genommen, damit die Alphastrahler der an Aerosolpartikeln angelagerten Zerfallsprodukte nicht ins Filter eindringen und Selbstabsorption die Energieauflösung stört. Die Filter werden entweder bewegt, oder der zunehmende Untergrund wird rechnerisch berücksichtigt. Alphaspektrometrie hat die Vorteile, dass die Zerfallsprodukte aufgrund ihrer Emissionsenergie identifiziert werden können und dass die Untergrundzählrate sehr niedrig ist.

Zur Messung rasch wechselnder und kleiner Konzentrationen von Radonzerfallsprodukten, wie sie in Wohn- und gut belüfteten Arbeitsräumen (z.B. im Radonbad Sibyllenbad 140 km nordöstlich von Regensburg) auftreten, musste ein anderer Weg beschritten werden, um eine Zeitauflösung von Minuten zu erhalten. Wie im früheren Abschnitt "spezielle radiometrische Größen" dargelegt, wird der Zahlenwert der Potentiellen Alpha-Energie-Konzentration nur zu 10 % durch die Konzentrationen der Alphastrahler Po-218 und Po-214 bestimmt und vielmehr zu 90 % durch die Konzentrationen der Beta-/Gammastrahler Pb-214 und Bi-214. Für Messungen ist der Name Potentielle Alpha-Energie-Konzentration für Z irreführend und hat Geräteentwickler irreführt.

Die Gesamtmessung der Beta- und Gammastrahler ist mehrfach günstiger als die der Alphasstrahler. Großflächige Proportionaldetektoren mit guter Betaausbeute und geringem Gammauntergrund sind günstiger als kleine Alpha-detektoren. Selbstabsorption entfällt und großflächige Glasfaserfilter haben geringen Strömungswiderstand. Mit einem einfachen Sauger und einem Filter von 10 cm Durchmesser werden Saugraten von 800 L/min erreicht. Mit den zur Alphasmessung notwendigen Membranfiltern und üblichen Kleinpumpen werden nur 1-2 L/min erreicht. Die Neuerungen zusammen erreichen eine Auflösung von 5 Bq/m^3 bei je 1 Minute Sammelzeit und Messzeit (manuelle Wiederho-

lung), statt wie andere Geräte eine Auflösung von 50 Bq/m^3 bei 30 min gleichzeitig Sammeln und Messen, jedoch automatische Wiederholung, s. Low-Level-Messgerät Abb. 19.

Messgeräte für Radon in der Luft

Messgeräte mit zeitgetaktetem Betrieb oder Langzeitexposimeter sind für $R = \text{Radon-222}$ in Luft gerätetechnisch leichter zu realisieren als gleichartige Geräte für die Zerfallsprodukte Z . Deshalb sind sie in den beiden genannten Betriebsarten heute die Standardgeräte, zumal die Strahlenschutzverordnung Grenzwerte für R angibt und die lungen-dosisrelevante Konzentration Z nur über den Gleichgewichtsfaktor $F = Z/R$ in der Verordnung erscheint.

Messgeräte für Radon in Luft nutzen die früher genannten physikalischen Effekte in Form von Ionisationskammern, Lucas-Kammern und Silizium-Halbleiter-Detektoren. Die zu messende Luft gelangt durch Diffusion oder eine Pumpe in das Messvolumen von ca. 0,5 L und zwar über ein Filter, das nur Rn-222 durchlässt. Gemessen werden die im Messvolumen durch Zerfall von Rn-222 neu entstandenen Alphastrahler Po-218 und Po-214 . Lucas-Kammern messen nur Gesamtalpha, oder zeitspektrometrisch. Ionisationskammern messen meist Gesamtalpha, spezielle auch alphaspektrometrisch. Halbleiterdetektoren messen meist alphaspektrometrisch oder auch Gesamtalpha.

Gute Geräte für Radon-222 in Luft für getaktete Langzeitmessungen arbeiten heute alphaspektrometrisch mit Halbleiterdetektoren. Durch elektrostatische Fokussierung der Alphateilchen aus einem Halbkugel-Messvolumen auf den kleinen Silizium-Detektor wird eine Ausbeute von circa 1 iph pro Bq/m^3 erreicht. Die besten Geräte lassen den Benutzer die Messzeit frei wählen und geben ihm nicht nur errechnete Aktivitätskonzentrationen, sondern auch die primären Messwerte, nämlich die Impulszahlen in der gewählten Messzeit. Nur so kann der Messgerätbenutzer selbst aus der Impulsstatistik die Qualität der Messung beurteilen. Die Geräte haben heute alle Messwertspeicher zur Übertragung der Daten auf einen PC und graphischen Darstellung der Konzentration als Funktion der Zeit. Es ist von großem Vorteil, wenn das Gerät auch ohne PC voll funktionsfähig ist,

d.h. mit wenigen Tasten über Menü und Display manuell gesteuert, abgelesen und der Speicher ausgelesen werden kann. Das Diagramm zeigt eine Messung mit einem solchen Gerät.



Abb. 30:
Messgerät
für Rn-222

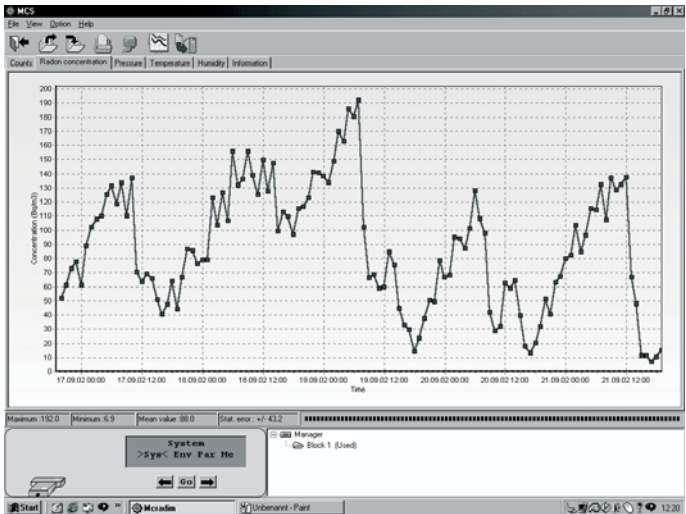


Abb. 31: Zeitdiagramm der Radon-222 Konzentration in einem Arbeitsraum. Man sieht den typischen Anstieg über Nacht und Abfall morgens nach Lüftung. Kleine Schwankungen sind Statistik der Impulszahlen. 120 Bq/m^3 beruhen auf 100 iph.

Die Philion-Platte

Das einfachste Verfahren, Radonzerfallsprodukte aus der Luft zu sammeln, ist ein elektrostatisches mit der Philion-Platte. Schon im Jahr 1900 beobachtete Rutherford, dass eine auf negative Hochspannung gelegte Platte in der Umgebungsluft "radioaktiv" wird, was er "induzierte Radioaktivität" nannte und durch Entladung eines Elektrometers nachwies. Durch die Rückstoßenergie beim Alphazerfall von Rn-222 verliert Po-218 Elektronen. Das entstehende elektrisch positive Po-218-Ion wird von der elektrisch negativ geladenen Platte gesammelt. Als Schulversuch wurde bisher empfohlen, einen Draht und eine Spannungsquelle von -5000 Volt zu verwenden, was nicht ungefährlich ist. Der Draht wäre nach mehreren Stunden mit einem Lämpchen abzuwischen und die auf das Lämpchen übertragenen Radionuklide wären mit einem GM-Zähler zu messen. Die Ergebnisse sind allerdings sehr dürftig und oft nicht reproduzierbar.

Viel einfacher und empfindlicher ist folgendes Verfahren. Ein $130 \times 70 \times 2 \text{ mm}^3$ bemessenes Stück Polystyrol, weiß durch Titandioxid, wird durch Reiben mit einem Stück Holz mühelos auf gefahrlose -20.000 Volt gebracht, die altbekannte Reibungselektrizität. Die Polystyrol-Platte wird auf vier isolierende Stäbchen von 13 cm Länge gelegt, die senkrecht in einer Grundplatte stecken. Die Polystyrol-Platte ist wegen der größeren Fläche und der höheren Spannung für Ionen ein viel effizienterer Sammler als der Draht. Die Platte wird daher Philion-Platte genannt (Freund wandernder Teilchen). Im alten Griechenland waren ja die Ionier der Stamm, der zu den Inseln gewandert war. Daher erhielten bei der Entdeckung der Elektrolyse die wandernden Teilchen ihren Namen.

Die Messung der gesammelten Radonzerfallsprodukte geschieht auf der Platte selbst mit einem aufgelegten GM-Zählrohr mit einem Endfenster von $4,5 \text{ cm}$ Durchmesser, das auch alphasdurchlässig ist, siehe Kapitel 8. Auch diese Messung ist viel effizienter als beim „Lämpchen vom Draht“.

Die Ergebnisse mit der Philion-Platte sind erstaunlich. Die geriebene Platte, auf den Stäbchen am offenen Fenster 5 min der Außenluft ausgesetzt, liefert mit dem im Kapitel 8

beschriebenen GM-Zähler 660 ipm (Untergrund 40 ipm). In einem Raum mit ca. 150 Bq/m^3 Rn-222 erhält man nach 3 min Exposition in der Luft ca. 3000 ipm. Bei einem Kalibrierfaktor von $k = 3 \text{ Bq/ips}$ sind das ca. 150 Bq.

Die Ergebnisse sind - ist das Reiben einmal gelernt - gut reproduzierbar und in Sammelzeit und Impulsrate qualitativ proportional der Radonkonzentration und damit zum Screening radonhöfziger Räume geeignet. Eine Einschränkung der Methode besteht in der Abhängigkeit von der Aerosolkonzentration und Luftfeuchte, da die Platte hauptsächlich die freien Zerfallsprodukte sammelt.

Die Philion-Platte sammelt von den luftgetragenen Radonzerfallsprodukten insbesondere das „freie“ Po-218, das nicht an Aerosolpartikel angelagert ist, aber auch nicht angelagertes Pb-214 und Bi-214. Das Po-218 ist als erstes und kurzlebiges Zerfallsprodukt am ehesten frei, d. h. von kleiner Masse und hat deshalb die höchste elektrische Beweglichkeit (Geschwindigkeit im elektrischen Feld). Die Entladung der geriebenen Platte wurde mit einem Messgerät „Feldmühle“ bei verschiedenen Konzentrationen von Radon und Aerosolpartikeln (durch Verbrennen von Weihrauch erzeugt) studiert. Die Entladung geschieht im wesentlichen durch die Sammlung von Ionen, radioaktiven und nicht-radioaktiven. Bei jedem Alphazerfall mit 6 MeV werden in Luft mit der Ionisierungsarbeit von ca. 34 eV ca. 180.000 Ladungsträgerpaare erzeugt. Die Platte entlädt sich eben nicht durch parasitäre Ströme an den Stäben oder durch feuchte Luft (viele Aerosolpartikel, wenig freie, hochbewegliche Ionen). Das oft als launisch beschriebene elektrostatische Verhalten geriebener Oberflächen bei Schulversuchen ist eher auf unerkannte Radonkonzentrationen zurückzuführen. Wie älteren Meteorologen wohl bekannt, ist die Lufterlektrizität bei Schönwetter durch Radon bestimmt.

Mit der Philion-Platte erhält man einen Alphastrahler ohne jede Selbstabsorption, somit hervorragend zur Energiekalibrierung von Alphaspektrometern geeignet. Und dies sogar mit drei Linien, je eine von Po-218 und Po-214 aus der Zerfallsreihe von Rn-222 (Radon) und eine von Po-212 aus der Zerfallsreihe von Rn-220 (Thoron), und dies in freier Luft gesammelt, siehe Abb. 29 in Kapitel 9. Die Unterschiede der

beiden Zerfallsreihen von Rn-222 und Rn-220 offenbaren sich auf einer Philion-Platte auch durch ihre Beta-Gammastrahler Pb-214, Bi-214, Pb-212 und Bi-212 und zwar im Zeitspektrum (s. Abb. 32), das mit dem Messgerät LLM 500 (siehe Kapitel 8) aufgenommen wurde.

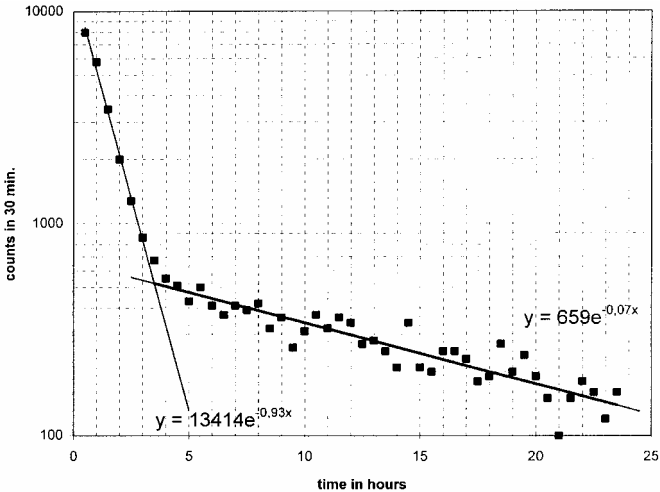


Abb. 32: Zeitspektrum der beta-/gammastrahlenden Zerfallsprodukte von Radon und Thoron, gesammelt auf einer Philion-Platte wie für Abb. 29. Gemessen mit dem LLM 500 (in Abschirmung). Einzelmesszeiten 30 min. Untergrund $U = 2178$ Impulse, Anfangsnettoimpulszahl ($B - U$) = 7790 Impulse. Das Zeitspektrum zeigt die gemittelte Halbwertszeit 0,75 h der Radonzerfallsprodukte und 10,5 h der Thoronzerfallsprodukte.

Aktivkohleexposimeter

E. Rutherford zeigte schon 1906, dass Aktivkohle sehr geeignet ist, Radon zu adsorbieren. Im klassischen Fall wird radonhaltige Luft durch Aktivkohle gesaugt, die mit Trockeneis gekühlt ist. Die gekühlte Aktivkohle adsorbiert das in der Luft enthaltene Radon praktisch quantitativ und gibt es beim Erhitzen auf circa $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ebenso wieder ab. Früher wurde das desorbierte Radon mit Ionisations- oder Lucas-Kammern gemessen.

Mit qualitativer Adsorption lassen sich sogenannte Aktivkohleexposimeter (früher Dosimeter genannt) auch bei Zimmertemperatur verwenden. Heute ist Aktivkohle zum Absorbieren von Radon das Sammel- und Messmedium für Gammaskpektrometrie oder Flüssigszintillometrie. Exposimeter für Gammadetektoren enthalten 50 - 200 g Aktivkohle in einer verschlossenen Dose. Diese wird vom Labor versandt. Vor Ort wird sie eine vorgeschriebene Zeit, gewöhnlich 72 h, geöffnet und in der radonhaltigen Luft exponiert, wieder verschlossen und ins Labor zur Auswertung eingesandt. Eine Exposition der Aktivkohle für mehr als 8 Tage ist wegen der Halbwertszeit von Radon von 3,8 Tagen nicht sinnvoll.

Es baut sich in der Aktivkohle ein radioaktives Gleichgewicht des adsorbierten Radon mit den gammastrahlenden Töchtern Blei-214 und Bismuth-214 auf, deren Gammalinien bei 295 keV und 352 keV bzw. bei 609 keV gemessen werden. Der Detektor ist entweder ein thalliumdotierter Natriumiodid-Einkristall-Szintillationsdetektor oder ein Reinst-Germanium-Halbleiterdetektor. Die geringere Energieauflösung des NaI-Detektors ist zur Trennung von Pb-214 und Bi-214 für Radonmessungen ausreichend, siehe Abbildung 27 in Kapitel 9. Im einfachen Fall legt man die Dose oder Patrone mit der exponierten Aktivkohle auf den Detektor, etwa einen 3 x 3 Zoll Natriumiodid-Kristall in einer Bleiburg.

Ein Labor nennt einen speziellen Kalibrierfaktor $CF = \text{Aktivität adsorbiert von 1 kg Aktivkohle in 1 Stunde} / \text{Radonkonzentration in Luft}$: $CF = 0,018 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Dies bedeutet: 50 Bq/m³ Radon führen bei 100 g Aktivkohle in 72 Stunden zu einem Aktivitätsgehalt der Kohle von circa 6 Bq. Dies sei gesagt, um eine Vorstellung zu geben, welche geringen Aktivitäten gemessen werden müssen. Die Messzeiten belaufen sich im allgemeinen zwischen 0,5 und 4 Stunden.

Aktivkohleexposimeter zur Auswertung mit der hochempfindlichen, jedoch apparativ aufwendigen Flüssigszintillometrie sind wesentlich kleiner als die für Gammaskpektrometrie. Sie enthalten nur circa 3 g Aktivkohle in einer Kunststoffdose von 25 mL und haben ein Gesamtgewicht von circa 7 g, was den Postversand erleichtert. Auch lässt sich

die Auswertung besser automatisieren, so dass neuere Erhebungsmessungen für Radon in Wohnräumen mit Expositionszeiten von 1-8 Tagen und großen Probenzahlen nach diesem Verfahren ablaufen. Bei stark zeitlicher Schwankung der Radonkonzentration ist über 3 Monate zu mitteln, was mit Kernspurexposimetern geschieht.

Kernspurexposimeter

Alphateilchen als schwere, geladene Teilchen erzeugen entlang ihrer Bahn in einem elektrisch nicht leitenden Festkörper (Folie) eine feine Spur von beschädigtem Material, eine Kernspur mit einem Durchmesser von 5-10 nm, also einen latenten, submikroskopischen Strahlenschaden. Mit bestimmten Ätzmitteln können die primären latenten Kernspuren zu mikroskopischen Ätzspuren vergrößert werden. Wird in einem elektrischen Wechselfeld geätzt, können die Kernspuren weiter vergrößert werden, bis sie auch ohne Mikroskop sichtbar werden. Ihre Dichte darf dann allerdings nicht so groß sein, dass es zu Überlappungen kommt.

Wegen der hohen Absorption von Alphateilchen genügen dünne Folien, die für Gamma- und Betastrahlen völlig unempfindlich sind. Folienmaterialien sind Zellulosenitrat (Kodak Pathé LR 115), Polyallyldiglykolcarbonat (CR-39) oder Polycarbonat (Makrofol). Die Folie wird in einem Gehäuse mit definiertem Volumen exponiert. Die Öffnung enthält ein Filter, durch das Radon diffundiert, das aber die an Aerosolpartikel angelagerten Zerfallsprodukte zurückhält.

Grübchen oder Löcher werden mikroskopisch oder mittels Hochspannung, wobei es bei den Löchern zu Überschlägen kommt, ausgezählt. Die Anzahl der Spuren bzw. Löcher ist ein Maß für die Radonexposition [$\text{Bq m}^{-3} \text{ h}$]. Lange Expositionszeiten bis zu einem Jahr erlauben die Messung auch von niedrigen Konzentrationen bis hinab zu 10 Bq/m^3 . Das Verfahren erfordert eine sorgfältige Standardisierung aller Parameter wie Folienmaterial, Konzentration, Temperatur und Dauer des Ätzens, Größe und Lage der ausgezählten Fläche etc. Als Kalibrierfaktor gilt je nach Detektortyp:

Eine Aktivitätskonzentration von $500-1000 \text{ Bq/m}^3$ liefert bei einer Expositionszeit von 1 h auf 1 cm^2 Kernspurfolie 1 Ätzspur. Dies bedeutet:
 10 Bq/m^3 führen in 6 Monaten zu 40 - 80 Ätzspuren pro cm^2 .

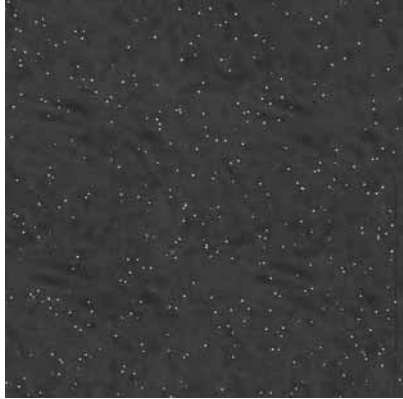


Abb. 33: Kernspurfilm Kodak LR-115, radonexponiert, geätzt, Bildkante 3,3 mm. Siehe auch Abb. 41.

Kernspurdetektoren sind unempfindlich gegenüber Gammastrahlung, Feuchte, Temperaturwechsel und Verzögerungen zwischen Exposition und Auswertung. Kernspurdetektoren liefern eine permanente Dokumentation ohne Änderung durch die Auswertung, ein wichtiger Aspekt für die Strahlenschutzdosimetrie, ähnlich wie die Filme bei der Röntgen- und Gammadosimetrie. Bei Kernspurdetektoren besteht für Alphastrahlen ein ähnlicher Linearer Energie Transfer (LET), d.h. eine ähnlich dichte Ionisation im Detektor wie in biologischem Material.

Radon in Wasser

Radongas ist in Wasser gut löslich. Wasser ist deshalb für Radon ein gutes Speicher-, Transport- und Emanationsmedium. Nur ganz selten ist aber gelöstes Radium die Mutter für Radon. Fast immer wird das Gas im Boden aus dem umgebenden Gestein in das Wasser aufgenommen. Ohne weitere Zufuhr von neuem Radongas zerfällt dieses im Wasser oder es entgast in die Luft. Erhöhte Konzentrationen von Radon in Wässern verschiedener Gegenden sind seit langem bekannt. Heute werden Trinkwasseraufbereitungs-

und Versorgungsanlagen auf Radon im Wasser und in der Luft überprüft.

Für Gase wird die Löslichkeit in Flüssigkeiten durch den Verteilungskoeffizienten $k = c_1/c_2$ beschrieben, bezogen auf die Konzentration c_1 des Gases in der Flüssigkeit und die Konzentration c_2 des Gases in der Luft über die Flüssigkeit. k nimmt mit zunehmender Temperatur ab. Als Konzentration gilt bei Radon die Aktivitätskonzentration. Einige k -Werte für Radon sind: Wasser 0,51 bei 0 °C, 0,34 bei 10 °C; 0,25 bei 20 °C; 0,19 bei 30 °C. Einen hohen Verteilungskoeffizienten haben die "Cocktails" aus organischen Lösungsmitteln, die in der Flüssigszintillometrie für Radon verwendet werden. In Ethanol mit $k = 6$ lässt sich Radon gut speichern.

Ein Verteilungskoeffizient (bezogen auf Volumina heißt er Ostwald-Koeffizient) von 0,25 bei 20 °C bedeutet konkret: In einem geschlossenen Gefäß mit radonhaltigem Wasser von 25 Bq/L im Gleichgewicht mit Luft beträgt die Konzentration in der Luft 100 Bq/L. Radon diffundiert aus dem Wasser, bis dieses Gleichgewicht nach längerer Zeit erreicht ist oder das Wasser vollständig entgast ist, dies bei offenem Gefäß.

Oberflächenwässer enthalten deshalb nur wenig Radon: 4 – 40 mBq/L, Meerwasser nur bis 30 μ Bq/L. Grund- und Quellwässer in Kontakt mit radonexhalierenden Gesteinen oder Böden enthalten jedoch leicht 4 - 40 Bq/L Radon. Konzentrationen von einigen 100 Bq/L finden sich örtlich in kleineren Trinkwasserversorgungen, gelten aber noch als unbedenklich. Konzentrationen von einigen 1000 Bq/L werden in Radonbädern bei spezieller Indikation therapeutisch verwendet.

Messung von Radon in Wasser

Bei der älteren Standardmethode zur Messung von Radon in Wasser wird Radon durch strömende Luft oder Stickstoff aus dem Wasser ausgetrieben (Emanometrie) und in einer Lucas-Kammer gemessen. Wird das ausgetriebene Radon-Luftgemisch in eine Ionisationskammer geführt, so ist der gemessene Ionisationsstrom ein direktes Maß für die Konzentration. In einer 1 L Kammer entspricht 0,5 pA circa 50 Bq/L.

Zur Messung der radonhaltigen Luft, die beim Austreiben von Radon aus radonhaltigem Wasser erhalten wird, werden auch die Messgeräte mit Si-Detektor verwendet, die für Radon in Luft beschrieben wurden. Sie werden dann aber im geschlossenen Luftkreislauf betrieben.

Nicht weniger umständlich erhält man Resultate beim Mischen und Schütteln des radonhaltigen Wassers mit einem Flüssigszintillator und der Auswertung mit einem Photomultiplier. Die Nachweisgrenze beträgt ohne Anreicherung 0,4 – 0,8 Bq/L.

Ein weiteres Verfahren verwendet eine Elektret-Ionisationskammer (Typ E-Perm) im Gasraum über dem Wasser in einem geschlossenen Gefäß und wartet bis zum Gleichgewicht. Die Entladung des Elektrets (Spannungsabfall) ist ein Maß für die Radonkonzentration im Wasser. Für solche Messungen muss der Verteilungskoeffizient sehr genau bekannt sein.

Konzentrationen ab 40 Bq/L, bei längerer Messzeit und größerer Bleiburg auch viel niedrigere, können direkt mit Gammaskopmetrie oder mit einer Gesamtbeta-/Gesamtgamma-Aktivitätsmessung der Radonzerfallsprodukte im Wasser selbst bestimmt werden. Einmal verwendete Marinelli-Schalen sind durch Alpha-Rückstoßkerne fest haftend kontaminiert und ihr Nullwert muss bei rascher Wiederverwendung neu bestimmt werden.

Zur Online-Messung von Radon in Wasser, etwa für hydrogeologische Untersuchungen eignet sich ein neues Verfahren, das in der Schweiz entwickelt wurde. Es arbeitet mit Luft in semipermeablen Schläuchen, in die aus dem Wasser Radon eindiffundiert, das kontinuierlich mit Lucas-Kammer oder Halbleiterdetektor gemessen wird.

Ein verblüffend einfaches und recht empfindliches Verfahren zur Messung von Radon in Wasser wurde Sommer 1995 gefunden und in Health Physics 72 (1997) p. 277-281 publiziert. Ganz überraschend, und wohl deshalb vorher von niemandem untersucht, haben die zum Sammeln von Aerosolpartikeln verwendeten Glasfaserfilter (Macherey-Nagel MN 85/90) ein vollständiges Rückhaltevermögen für die in

Wasser enthaltenen Radonzerfallsprodukte Po-218, Pb-214 und Bi-214. Rn-222 im Wasser ist in einem geschlossenen Gefäß ohne freiem Luftraum nach 3 h im radioaktiven Gleichgewicht mit seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten.

Die Filtration von 1 L Wasser benötigt in einem Büchnertrichter mit einem Glasfaserfilter von 10 cm Durchmesser nur 5 min, keine Wasserstrahlpumpe verwenden. Die Adsorption der kurzlebigen Zerfallsprodukte am Glasfaserfilter ist bei pH 7 (neutral) bis 9 (leicht alkalisch) konstant über 95 %. Nach dem Filtrieren und vor der Messung wird das Filter auf einer Heizplatte bei 300 °C in 2-3 min gut getrocknet. Mit dem LLM 500 (Untergrund 150 ipm, $k = 3$ Bq/ips) ist die Nachweisgrenze 5 Bq/L schon bei 1 min Messzeit und nur 1 L Wasser. (Nettosignal = 5 Standardabweichungen)

Mehrere internationale Vergleichsmessungen dieses neuen Schnellverfahrens für Radon in Wasser mit anderen etablierten Verfahren (Emanometrie, Gammaskpektrometrie, Flüssigszintillometrie) zeigen sehr gute Übereinstimmung. Zum Transport und Lagerung von radonhaltigem Wasser haben sich die handelsüblichen Mehrweg-Getränkeflaschen aus PET (Polyethylenterephthalat) als radongasdicht erwiesen.

Mit jedem GM-Zähler mit großer Messfläche (Fenster) können 2 Bq/L aus fast jeder Wasserleitung auf 5 cm Glasfaserfilter mit hoher Signifikanz gemessen werden. Erstes Regenwasser oder Schnee nach Tagen der Trockenheit enthält bis zu 200 Bq/L Radonzerfallsprodukte.

Die in der Trinkwasserverordnung von 2001 festgesetzte jährliche Ingestionsdosis bzw. Gesamtrichtdosis von 0,1 mSv für Trinkwasser kann prinzipiell nicht direkt gemessen werden. Die Dosisbestimmung erfordert zunächst eine nuklid-spezifische Aktivitätsbestimmung der in der Wasserprobe enthaltenen einzelnen Radionuklide. Mit Hilfe der nuklid-spezifischen Dosiskoeffizienten (siehe Kapitel 12) und geschätzter Verbrauchsmengen von Trinkwasser kann eine Gesamtdosis ermittelt werden. Als Richtwerte werden 100 Bq/L Radon-222 genannt, bzw. 1 Bq/L Gesamtbetaaktivität und 0,1 Bq/L Gesamtalphaaktivität.

Exhalation von Radon

Bestimmend für die Exhalation von Radon aus dem Boden und aus Baustoffen und damit für die Konzentration von Radon im Freien und in Wohnräumen ist zunächst die Konzentration von Radium, dessen Atome im Kristallgitter oder der Bodenmatrix so eingebaut sind, dass das Radon den Festkörper verlassen kann.

Wesentlich für die Freisetzung von Radon beim Zerfall von Radium im Kristallgitter oder adsorptiv an Oberflächen ist die Alpha-Rückstoßenergie, die das rückgestoßene Radon 20 bis 70 nm weit trägt - unter Aufbrechung chemischer Bindungen und Erzeugung von Strahlenschäden. Strahlenschäden und Isotropisierung sind dem Mineralogen von uranhaltigem Gesteinen wohl bekannt. Sie sind etwa in Glimmern, durch benachbarte uranhaltige Zirkonkörner verursacht, gut zu beobachten.

Damit Radon in die Zwischenräume des Festkörpers entweichen kann, muss es innerhalb von 20 – 70 nm zur Mineraloberfläche gebildet werden. Wasser in den Kapillaren oder als Film um jedes Teilchen erhöht die primäre Freisetzungsrates aus dem Mineral. Die Rückstoßenergie des Radonatoms in "statu nascendi" wird dann im Wasser der Kapillaren oder des Films aufgebraucht und das Radon dringt nicht in den benachbarten Festkörper ein, aus dem es nur schwieriger herausdiffundiert als aus Wasser.

Durch den Rückstoß beim Alphazerfall des Radiums wird das Radon in Nanoporen (Poren im nm-Bereich) transportiert, in denen es leichter diffundiert als im Kristallgitter. Bestimmend ist somit die Diffusionsgeschwindigkeit nicht im Kristallgitter, sondern in den Nanoporen. Uranhaltige Apatit- und Monazitkristalle haben höhere Freisetzungsrates als Zirkone, erstere sind von Nanoporen durchsetzt.

Die primäre Freisetzungsrates von Radon aus dem Kristallgitter, in dem das Radium eingebaut ist, in die Nanoporen im Mineral wird durch Wasser in den Nanoporen oder als Film auf den Körnern erhöht (höhere Diffusion im Wasser als im Festkörper). Dagegen ist die sekundäre Freisetzungsrates von Radon aus den Zwischenräumen zwischen den Mine-

ralkörnern und der Bodenkrume allerdings in trockenen Gesteinen und Böden höher als in feuchten (höhere Diffusion und Konvektion in Bodenluft als in Porenwasser). In Bodenluft schon in 1 m Tiefe kann somit die Radonkonzentration Werte von 30 bis 500 kBq/m³ erreichen, also um mehrere Größenordnungen höher liegen als die Werte von 10 Bq/m³ in normaler Außenluft.

Hohe Radon-Konzentrationen erhält man in geschlossenen Ausstellungsvitrinen, Sammlungsschränken oder Gefäßen mit uranhaltigen Mineralen.

Die Gesamtexhalation von Radon auf der Erde wird auf 2 TBq/s (55 Ci/s) geschätzt. Zur Ionisation der Atmosphäre tragen Radon, Thoron und ihre Töchter etwa zur Hälfte bei. Die Tochternuklide sind zunächst positiv geladen und werden rasch elektrisch neutralisiert. Für die Radonflussdichte (Exhalationsrate) werden Werte von 2 - 50 mBq/m² pro Sekunde über den Kontinenten und von 0,1 mBq/m² pro Sekunde über den Ozeanen angegeben. In der Luft über der Erde wird das exhalierter Radon durch Wind, Konvektion und Diffusion verteilt. Insbesondere die Konvektion wird durch tages- und jahreszeitliche Temperatur-Druck-Gradienten verstärkt. Tagesmaxima der Radon-Konzentration treten bei Nacht und am frühen Morgen auf, wenn die Atmosphäre in bodennahen Schichten sehr stabil ist. Tagesminima am Nachmittag sind eine Folge der vertikalen Durchmischung durch turbulente Diffusion.

Radon im Boden

In einem Bohrloch zur Entnahme von Bodenluft mittels einer kleinen Pumpe befinden sich wegen der Filterwirkung des Bodens keine Radonzerfallsprodukte, sondern nur Radongas. Dies kann mit Lucas-Kammern oder Halbleiterdetektoren gemessen werden. Nur sind wegen der sehr hohen, in der Bodenluft üblichen Konzentrationen von 1-100 kBq/m³ Memory-Effekte zu beachten: Nach Messung hoher Konzentrationen sind die Geräte mit den kurzlebigen Zerfallsprodukten kontaminiert und ihr Abklingen ist vor einer neuen Messung abzuwarten. Bei Verwendung von Lucaskammern sind diese zu wechseln.

Radon aus Baustoffen und Mineralen

Um die Exhalation von Radon aus Baustoffen und Mineralen einfach, empfindlich und schnell zu messen, muss man nur das abgeschlossene Volumen, in welches das Radongas exhaliert, möglichst klein machen. Denn die Adsorption von Radon an Aktivkohle ist proportional der Radonkonzentration (Aktivität/Volumen) und der Zeit. Bisher wurde Aktivkohle nur lose in Aktivkohleexposimetern zur Radonmessung in Räumen ($1 \text{ m}^3 = 10^6 \text{ cm}^3$) verwendet. Eine neue Art ist Aktivkohle in Flächenform und in Luftvolumina von nur cm^3 zu verwenden. Die Flächenform wird wie folgt hergestellt: Aktivkohle Merck, Artikel Nr. 2514, mittlere Körnung 1,5 mm wird gesiebt, nur die Fraktion 0,9 - 1,4 mm genommen, 4 h bei $150 \text{ }^\circ\text{C}$ im Trockenschrank getrocknet, verschlossen aufbewahrt. Die Buchschutzklebfolie Marke "Büro aktuell Art. Nr. 382001300", $9 \text{ }\mu\text{m}$, einseitig klebend, auf abziehbarem Wachspapier, in Rollen von $10 \text{ m} \cdot 45 \text{ cm}$, ist radongasdicht. Ein Stück Folie wird auf eine Metallmaske mit Fenster geklebt und mit Aktivkohle bestreut.

Mit dem Fenster von Aktivkohle auf Klebfolie werden nun Radonquellen verschlossen. Eine Radonquelle ist z.B. eine kleine Granitplatte, die allseitig mit Klebfolie verschlossen ist, in die wieder ein Fenster geschnitten wurde. Uranhaltige Minerale oder sogar trockene Maulwurferde sind gute Radonquellen in einem Einmachglas mit breitem Schlifftrand für die Klebfolie. Schon nach wenigen Tagen hat sich genug Radon gesammelt, um die Zerfallsprodukte in der Aktivkohle durch die Folie hindurch mit dem GM-Zähler Inspector zu messen.

Radon in Wohnräumen

Ursachen für erhöhte Radonkonzentrationen in Wohnräumen sind:

1. geologischer Untergrund mit erhöhten Uran-/Radium-Gehalten, geologische Verwerfungen, poröse Gesteine und Minerale mit hoher Radonfreisetzungsrates,
2. Konstruktion des Hauses ohne abdichtende Bodenplatte,
3. Luftdruckgefälle zwischen Boden und Haus,
4. Energiesparfenster, mangelhafte Lüftung,
5. Baumaterialien, die Radon abgeben, und eher selten,

6. Radongehalt im Wasser, wenn in Duschräumen erhöhte Konzentration gemessen wird.

Mehrere große Messprogramme in Schweden, den USA, Deutschland und anderen Ländern haben gezeigt: Die Radonkonzentrationen schwanken von Haus zu Haus außerordentlich. Extremwerte sind 10 und 100.000 Bq/m³. Bei Exhalation aus dem Boden sammelt sich Radon bei ungenügender Belüftung vor allem in Kellern, Höhlen und Stollen an, kann sich aber im ganzen Gebäude verteilen.

Im Rahmen der Untersuchung "Radon in Wohnungen und im Freien, Erhebungsmessungen in der BRD, Bonn 1985" des Bundesministeriums des Innern wurde in circa 6000 Wohnungen die Radonkonzentration gemessen. Der Mittelwert liegt bei etwa 50 Bq/m³ Radon; das ist das Mehrfache der Werte in der Außenluft. Circa 10 % der Wohnungen hatten Konzentrationen höher als 100 Bq/m³, 1 % höher als 200 Bq/m³ und 0,1 % höher als 600 Bq/m³. Die beobachteten Werte für den Gleichgewichtsfaktor F reichen von 0,1 bis 0,9, schwerpunktmäßig liegen sie zwischen 0,3 und 0,4. Nach 1991 folgten Messungen des Bundesamtes für Strahlenschutz in ausgewählten Häusern im Osten der Bundesrepublik. Die Häufigkeitsverteilungen und der Mittelwert sind ähnlich wie im Westen.

In der Schweiz wurde in der Strahlenschutzverordnung vom Juni 1994 ein Grenzwert von 1000 Bq/m³ Radon-222 für Wohn- und Aufenthaltsräume und 3000 Bq/m³ für Arbeitsräume eingeführt. Für Neu- und Umbauten gilt ein Richtwert von 400 Bq/m³.

In Deutschland gibt es keine gesetzliche Regelung zur Beschränkung der Exposition durch Radon und seine Zerfallsprodukte in Wohn- und Aufenthaltsräumen. Anderes gilt nach Strahlenschutzverordnung für Arbeitsplätze. Für Wohnräume wurde eine Baurichtlinie in Erwägung gezogen. Nach dieser dürften die Jahresdurchschnittswerte der Radonkonzentration den Wert von 1000 Bq/m³ nicht überschreiten.

Es ist zu bedenken, dass Rauchen unstrittig eine mindestens zehnmal häufigere Ursache für Lungenkrebs ist als

Radon. Vor allem ist aber Radon als eventuell mögliche Ursache für Lungenkrebs leicht zu vermeiden, ohne dass dabei große Kosten oder Energieverluste entstehen. Bei einem vollständigen Luftaustausch durch „Stoßlüften“ eines normalen Wohnraums, selbst im Winter, wird die Radonkonzentration drastisch abgesenkt und keine größere Energiemenge abgeführt als bei 1 min warm Duschen.

Bewertung von Radonexpositionen

Die strahlenbiologische Wirkung von Radon ist zwar sehr komplex, dennoch kann der Strahlenschutz meistens sehr einfach sein:

1. In Wohnräumen mehr lüften und nicht rauchen (Aerosole), evtl. Schlafräume verlegen,
2. In Bergwerken besser bewettern,
3. Bei hoch radonhaltigem Wasser die Aufbereitungsanlagen belüften, Zwischenwände einbauen.

Bei Radon ist es anders als bei der Freisetzung von Cäsium-137 durch die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl. Eine erhöhte Gammaortsdosisleistung wirkt auf die Bevölkerung beim Aufenthalt im Freien und sie wirkt auf den Körper von außen. Eine erhöhte Radonkonzentration findet sich für die Bevölkerung praktisch nur in Häusern und sie wirkt nach Inhalation von innen. Wie gelangt man nun von der physikalischen Messgröße der Aktivitätskonzentration in Bq/m^3 zu der biologischen Rechengröße effektive Dosis in mSv?

Für die Bundesrepublik wird in der Strahlenschutzverordnung mit einem Gleichgewichtsfaktor $F = 0,4$ gerechnet. Eine Radonkonzentration in Wohnräumen von 50 Bq/m^3 (Mittelwert der Erhebungsmessungen) entspricht dann einer gleichgewichtsäquivalenten Radonkonzentration von $20 \text{ Bq/m}^3 \text{ Rn-äquiv.}$

Als Exposition bezeichnet man das Produkt von Konzentration [Bq/m^3] und Aufenthaltsdauer [h]. Dabei ist darauf zu achten ob die Konzentration von Rn-222 oder die von Rn-äquiv. gemeint ist. Als Aufenthaltsdauer in Wohnräumen wird ein Anteil von 0,8 der Jahresstundenzahl von 8760, somit 7000 [h/a] angesetzt.

Zur Umrechnung einer Exposition in eine effektive Dosis gibt es aus epidemiologischen Studien ermittelte Dosiskoeffizienten mit dem Zentralwert von $9 \text{ nSv (Bq m}^{-3} \text{ h)}^{-1}$ für die Rn-äquiv. Konzentration. Mit diesen Zahlenwerten erhält man für die mittlere effektive Jahresdosis der Radonexposition den Wert, den wir von Kapitel 2 Tabelle 1 kennen.

$$20 \text{ Bq m}^{-3} \cdot 7000 \text{ h} \cdot 9 \text{ nSv (Bq m}^{-3} \text{ h)}^{-1} = 1,3 \text{ mSv}$$

Die Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 schreibt in § 95 Absatz (2): Bei Radonexpositionen kann davon ausgegangen werden, dass die effektive Dosis von 6 Millisievert im Kalenderjahr durch diese Exposition nicht überschritten ist, wenn das Produkt aus Aktivitätskonzentration von Radon-222 am Arbeitsplatz und Aufenthaltszeit im Kalenderjahr den Wert von $2 \cdot 10^6$ Becquerel pro Kubikmeter mal Stunden nicht überschreitet (Anzeigewert). Bei deutlichen Abweichungen des Gleichgewichtsfaktors zwischen Radon und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten von dem zugrunde gelegten Wert von 0,4 kann die Behörde abweichende Werte für das Produkt aus Radon-222 Aktivitätskonzentration und Aufenthaltszeit im Kalenderjahr festlegen. Der Grenzwert ist $6 \cdot 10^6$ [Bq m⁻³·h].

Diese Regelung gilt für die in Anlage XI Teil A der StrlSchV genannten Arbeitsfelder:

- untertägige Bergwerke, Schächte und Höhlen, einschließlich Besucherbergwerke,
- Radon-Heilbäder und -Heilstollen,
- Anlagen der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung.

Man beachte: Das Produkt von $2 \cdot 10^6$ [Bq/m³] · [h] lässt sich z.B. für Arbeitsplätze zerlegen in 1000 [Bq/m³] · 2000 Arbeitsstunden und für Wohnräume in 250 [Bq/m³] · 8000 Wohnstunden (Jahresstundenzahl 8760). Die Konzentrationsangaben beziehen sich auf Rn-222.

Radium in Mineralwasser

In Deutschland fand vor wenigen Jahren erst ein Fernsehbericht über Radium in mehreren viel getrunkenen Mineralwässern die gebührende Aufmerksamkeit der Bevölkerung, Behörden und Produzenten. Darauf sahen sich die Abfüller

veranlasst, Radium mit einem geeigneten Filterbett zu entfernen. Seit 3. März 2003 ist durch die 2. Verordnung zur Änderung der Mineral- und Tafelwasserverordnung die Aktivitätskonzentration von Radium-226 auf 125 mBq/L und von Radium-228 auf 20 mBq/L zu begrenzen.

Bei Radium-226 sind schon kleine Konzentrationen von 1 Bq/L und weniger im Trink- oder Mineralwasser zu vermeiden. Radium ist langlebig (1600 a) und steht im Periodensystem der chemischen Elemente in der Spalte von Calcium, wird also im Knochen eingebaut. Dies ist anders als bei Radon-222 im Trinkwasser, bei dem erst 100 Bq/L, in manchen Ländern mehr, in anderen weniger, als bedenklich gelten. Wie schon früher gesagt, ist Radon im Wasser fast ausnahmslos nicht aus im Wasser befindlichen Radium entstanden, sondern wurde im Aquifer als Gas gelöst.

Beim Zerfall von Radon im Wasser entsteht zwar langlebiges Blei-210 (auch ein Knochensucher), aber die Aktivitäten stehen im umgekehrten Verhältnis der Halbwertszeiten. Aus 3,8 Tage zu 22,3 Jahre oder 92 h zu 195.348 h oder 1 zu 21.293 ergibt sich, dass 100 Bq Rn-222 nur 5 mBq Pb-210 ergeben. In Finnland ist Trinkwasser aus Brunnen im Granit mit sehr bedenklichen Konzentrationen von Uran-238, Radium-226 und Blei-210 gefunden worden und bei den Konsumenten im Knochen gemessen worden. Blei-210 hat als Tochter den Alphastrahler Polonium-210 mit $T = 138$ d, so dass es wie Radium strahlenbiologisch gefährlich ist.

Die Messung von Radium im Wasser ist wegen der kleinen Konzentrationen viel aufwändiger als die Messung von Radon im Wasser. Bei der klassischen Emanations-Methode wird das zu untersuchende Wasser, dessen gelöstes Radon zerfallen sein muss, mindestens 3 Wochen in voll gefülltem verschlossenem Gefäß gelagert. Dann wird das in situ aus Radium gebildete Radon durch radonfreie Luft (oder Stickstoff) ausgetrieben und in dieser etwa in einer Ionisationskammer gemessen. Es sind kürzlich tiefe Brunnen bekannt geworden, die nicht für Trinkwasser genutzt werden, mit Konzentrationen bis über 30 Bq/L Radium-226 bei hohem Solegehalt. Solche Konzentrationen können im Wasser direkt in 1 L Marinelli-Schalen mit Gammaskopmetrie gemessen werden. Wegen der großen Eindampffläche von

300 cm² hat der Alpha-Beta-Messplatz SML 311 (siehe Kapitel 9) für rückstandsarme Flüssigkeiten eine niedrige Nachweisgrenze (< 0,5 Bq/L).

In einem neueren Verfahren gelingt es, Radium im Wasser auf speziell beschichteten Plättchen oder imprägnierten Filtern abzuscheiden und auf diesen mit der hochempfindlichen Alphaspektrometrie zu messen. Leider wird Radium nicht an Glasfaserfiltern adsorbiert, wie es so einfach mit den kurzlebigen Radonzerfallsprodukten möglich ist.

Radonbäder

Bald nach der Entdeckung der Radioaktivität fand man an mehreren Orten, die schon lange für heilkräftiges Wasser bekannt waren, dass dieses ungewöhnlich hohe Konzentrationen von Radon enthält und man setzte die beiden Eigenschaften in Verbindung. Überhaupt galten am Anfang des 20. Jahrhunderts die Radioaktivität und Radium im Besonderen als Wunderheilmittel. Ein Umdenken fand erst nach Beobachtung schwerer gesundheitlicher Schäden bei einer Gruppe von Frauen in der Uhrenindustrie statt. Diese brachten radiumhaltige Leuchtfarbe auf Zifferblätter und spitzten dafür den feinen Pinsel mit der Zunge.

Besteht nun bei Radon ein Widerspruch, wenn ihm einerseits ca. 7 % der Lungenkrebsfälle (dem Rauchen 80 %) zugeschrieben werden und andererseits gewisse Kurbäder es als Heilmittel verwenden? Es handelt sich um ganz Verschiedenes. Dem Lungenkrebs durch Radon geht eine Langzeit-Inhalation hoher Aktivitätskonzentrationen der Radonzerfallsprodukte voraus. Diese wirken auf eine sehr dünne und empfindliche Zellschicht im Bronchialepithel. Wegen der kleinen Masse der Zellschicht ist die Energiedosis dort sehr groß. Radonbäder an den bekannten Orten pflegen jedoch beim Patienten ganz andere und unterschiedliche Anwendungsformen, einzeln oder kombiniert:

Radonwannenbäder: Der Patient liegt im Wasser mit Gehalten bis 2000 Bq/L. In gut belüfteten Räumen (Luftwechselrate 6-8-mal pro Stunde) kommt es in der Luft nicht zu Konzentrationen über 1000 Bq/m³, und wenn, dann nur kurzzeitig und nur bei Radongas, nicht bei den Zerfallsprodukten. Der gemessene Gleichgewichtsfaktor F hat Werte von 0,1

und weniger. Im Oberpfälzer Radonbad Sibyllenbad bleibt die regelmäßig gemessene Radonexposition für Personal und Patienten weit unter den Grenzwerten der StrlSchV. Vom Patienten wird Radon aus dem Wasser über die Haut in den Blutkreislauf aufgenommen und wieder ausgeatmet und verursacht nur eine kleine lokale Dosis. Eigene Messungen ergaben ca. 5 Bq/L Radon im Blut und circa 3000 Bq/m³ in der ausgeatmeten Luft nach 20 min. im Wasser mit ca. 1500 Bq/L. Als für das Immunsystem positiv wirksam gilt zudem die Alphastrahlung von auf der Haut deponiertem Po-218 und Po-214.

Radonstollen ohne Frischluft: Hier kommt es bei sehr hohen Konzentrationen in der Luft von 10-40 kBq/m³ Radonzerfallsprodukten und einem F von 0,4 – 0,5 bei Patienten und noch mehr beim Personal zu einer berechenbaren Exposition und Dosis. Für das Personal wurden belüftete Räume eingerichtet und die Arbeitszeit vor Ort begrenzt.

Radontrinkkuren: Vom Brunnen im öffentlichen Kurpark kann Wasser mit bis 20 kBq/L getrunken werden. Über die Magenwand geht Rn-222 rasch in den Blutkreislauf und wurde in der ausgeatmeten Luft gemessen.

Inhalation: Hier wird frisches, gefiltertes Radonquellgas (F < 0,1) über eine Haube eingeatmet.

Dunstbad: Hier wird gealtertes, ungefiltertes Radonquellgas oder hoch radonhaltige Bodenluft der Körperhaut in einer dicht schließenden Haube zur Aufnahme angeboten, während radonfreie Luft eingeatmet wird.

Radon wird ärztlich verordnet bei verschiedenen chronischen schmerzhaften Beschwerden des rheumatischen Formenkreises, insbesondere bei Morbus Bechterew. Zahlreiche Patienten, auch Selbstzahler, in allen Radonbädern bezeugen Schmerzlinderung und verminderten Gebrauch von Schmerzmitteln, obwohl die Wirkungsmechanismen noch nicht ganz verstanden sind. Ein Wirkungsmechanismus könnte die Anregung der Produktion von schmerzlindernden und entzündungshemmenden Enzymen sein. Unerwünschte Nebenwirkungen von regelmäßig eingenommenen Schmerzmitteln sind unstrittig und sicher problematischer als denkbare Nebenwirkungen von Radon in Heilbädern.

11. Neutronen - Eigenschaften, Messungen und Anwendungen

Übersicht • Einige Eigenschaften und Vorkommen • Neutronenquellen • Neutronenstrahlung bei Castor-Transporten • Klassifizierung nach der Bewegungsenergie • Wechselwirkungen mit Materie • Wirkungsquerschnitte • Nachweisprinzipien für Neutronen • Messung langsamer Neutronen • Messung schneller Neutronen • Personendosimeter für Neutronen • Strahlenschutz durch Abschirmung • Anwendungen

Übersicht

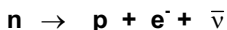
Materie besteht zu mehr als der Hälfte aus Neutronen, allerdings sind diese in Atomkernen fest gebunden und als Teilchen nicht wahrnehmbar. Freie Neutronen sind in Vorkommen, Messung und Strahlenschutz eng mit der Radioaktivität verknüpft, sowie mit der technischen Nutzung der Kernenergie. In der Natur finden sich freie Neutronen in der Höhenstrahlung und bei der sehr seltenen Spontanspaltung von Uran-238. Auch können Neutronen durch "harte" Gammastrahlung aus dem Verband eines Atomkerns freigesetzt werden.

Die Wechselwirkung von Neutronen mit Materie erfolgt durch elastische und unelastische Streuung an Atomkernen sowie durch Einfang (Absorption). Die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung ist stark abhängig von der Art der Atomkerne und von der Energie der Neutronen. Wegen ihrer elektrischen Neutralität sind Neutronen nicht direkt ionisierend. Für den Nachweis werden Prozesse genutzt, bei denen die Neutronenstrahlung in ionisierende Strahlung konvertiert wird. Neutronen haben vielfältige Anwendungen in Forschung, Technik und Medizin.

Einige Eigenschaften und Vorkommen

Neutronen sind die ungeladenen, elektrisch neutralen Bausteine aller Atomkerne, mit Ausnahme von Wasserstoff H-1. Die Summe der Protonenzahl Z und der Neutronenzahl N ergibt die Nukleonenzahl (Massenzahl M), siehe Kapitel 2.

Das Neutron hat eine Ruhemasse von $1,675 \cdot 10^{-27}$ kg und ist etwa 1,4 Promille schwerer als das elektrisch positiv geladene Proton. Der Radius des Neutrons beträgt etwa 10^{-15} m, sehr wenig im Vergleich zu Radien von Atomen um die 10^{-10} m. Freie Neutronen sind nicht stabil, sondern zerfallen durch Betazerfall in ein Proton, ein Elektron und ein schwer nachweisbares Antineutrino.



Die mittlere Lebensdauer des Neutrons beträgt 887 ± 2 s, eine Multiplikation mit $\ln 2 = 0,69$ ergibt die Halbwertszeit $T = 615$ s. Das Neutron hat ein negatives magnetisches Moment und einen Spin von $1/2$.

Das Neutron wurde 1921 von E. Rutherford (1871-1937) postuliert, jedoch erst 1932 experimentell entdeckt. Beim Beschuss von Beryllium mit Alphateilchen einer Radium-226 oder einer Polonium-210 Quelle beobachtete das Ehepaar J. F. und I. Joliot-Curie in Paraffinschichten eine Sekundärstrahlung elektrisch neutraler Teilchen, die von J. Chadwick als Neutronen identifiziert wurden. Sogleich erkannte W. Heisenberg, dass der Atomkern aus Protonen und Neutronen besteht und nicht wie vorher angenommen aus Protonen und Elektronen.

O. Hahn, F. W. Straßmann und L. Meitner entdeckten 1938 die Kernspaltung. Bei Beschuss mit langsamen Neutronen spaltet der Kern von U-235 meist in zwei Teile mit Freisetzung einer Energie von insgesamt ca. 200 MeV und im Mittel von zwei bis drei energiereichen Neutronen.

Bei Flügen in großer Höhe und noch mehr für Astronauten verursachen freie Neutronen in der Höhenstrahlung den größeren Teil der Strahlenexposition. Betroffen von Neutronen in der Höhenstrahlung sind auch Halbleiterbauelemente. Neutronen mit 10-100 MeV erzeugen im Silicium zerstörende Plasmawolken und Spannungsdurchbrüche.

Neutronen sind nicht direkt ionisierend. Über Reaktionen mit Materie treten jedoch dicht ionisierende Produkte mit hohem Linearen Energie Transfer auf. Im Strahlenschutz erhalten Neutronen deshalb, abhängig von ihrer Energie, einen Qua-

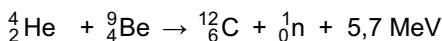
litätsfaktor Q bzw. Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R von 5, 10 oder 20, siehe Kapitel 12.

Neutronenquellen

Wegen der hohen, mittleren Bindungsenergie der Neutronen im Atomkern von etwa 6 - 8 MeV ist es nicht leicht, Neutronen aus Atomkernen freizusetzen. Jedoch gibt es einige Nuklide mit deutlich schwächerer Bindung der Neutronen und es gibt exotherme Kernreaktionen. Man unterscheidet:

(α , n) - Quellen:

In Beryllium-9, in Be-nat zu 100 % enthalten, ist die Bindungsenergie pro Neutron nur etwa 1,6 MeV, eine Energie die schon beim natürlichen Alpha-Zerfall von Ra-226 (T = 1600 a) oder Po-210 (T = 138 d) geliefert wird.



oder kürzer $\alpha + \text{Be-9} \rightarrow \text{C-12} + \text{n} + E$

noch kürzer **Be-9 (α ,n) C-12**

Nach den Stoßgesetzen verteilt sich die Energie gemäß

$$\Sigma (mc^2 + E) = \text{konstant.}$$

Die Bewegungsenergie der gebildeten Neutronen hängt somit auch von der Energie der Alphateilchen ab, sowie der Rückstoßenergie der C-12 Kerne.

Bringt man Ra-226 in engen Kontakt mit Beryllium, erhält man eine einfache Neutronenquelle. Gefährlich bei dieser Konstruktion sind weniger die wenigen Neutronen, als vielmehr das strahlende und hochtoxische Radium und das ebenfalls hochtoxische Beryllium.

Auch Bor-10, in B-nat zu 20 % enthalten, ist ein geeignetes Target (Zielscheibe).

B-10 (α ,n) N-13

Die Ausbeute ist mit Ra-226 als Alphaquelle allerdings sehr gering, zudem ist die Abschirmung der harten Gammastrahlung der Ra-Zerfallsprodukte problematisch. Künstliche Alphastrahler wie Americium-241 (T = 432 a) sind effizienter und ihre niederenergetische Gammastrahlung von 59,5 keV ist leichter abzuschirmen.

(γ ,n)-Quellen:

Hier handelt es sich um einen Kernphotoeffekt, z.B. mit Antimon-124 ($T = 60$ d) als 1,69 MeV Gammastrahler.

Be-9 (γ ,n) Be-8

dt - Quellen:

Durch Beschuss eines Tritium(H-3)-Targets t mit Deuterium(H-2) d, beschleunigt auf einige 100 keV, erfolgt Fusion mit Abgabe von Neutronen

H-3 (d,n) He-4 + 17,6 MeV

Energieangaben beziehen sich entweder auf die Gesamtenergie oder auf die Energie, die das Neutron erhält, hier 14 MeV, plus der Rückstoßenergie des anderen Teilchens.

sf - Quellen:

So nennt man Quellen, die auf der Spontanspaltung (spontaneous fission) von Transuranen wie Californium-252 ($T = 2,6$ a) beruhen. Bei den Transuranen, alle künstlich herzustellen, nimmt die Wahrscheinlichkeit für Spontanspaltung gegenüber Uran sehr stark zu.

Spontanspaltung tritt auch bei den natürlichen Uranisotopen auf, allerdings mit sehr kleiner Eintrittswahrscheinlichkeit T_F . Für U-238 ist $T_F \approx 10^{14}$ a und für U-235 ist $T_F \approx 2 \cdot 10^{17}$ a. Die Spuren der Spaltfragmente können in Mineralen, z. B. Glimmer durch Ätzen sichtbar gemacht werden.

Reaktoren:

Intensive Neutronenquellen für Forschung und technische und medizinische Anwendungen beruhen auf der Kernspaltung von Uran-235 mittels Neutronen. Uran-nat enthält 99,3 % U-238 und 0,7 % U-235. Für Kernkraftwerke wird Uran auf ca. 3 % U-235 angereichert, für Forschungsreaktoren auf 20 % (LEU = lowly enriched uranium) bis auf 93 % (HEU = highly enriched uranium). Als Anfahrquelle dient Cf-252. Pro Spaltung eines U-235 Kerns entstehen 2-3 Neutronen und 200 MeV Energie. Die Spaltprodukte haben gemäß ihrer Nukleonenzahl die Häufigkeitsverteilung der Abbildung 8 in Kapitel 2.

Ein Maß für die Intensität einer Neutronenquelle ist die Flussdichte und die Fluenz. Die Flussdichte ist die Gesamtzahl von Neutronen pro Querschnittsfläche und pro Zeitintervall. Die Fluenz ist bei zeitlich konstanter Flussdichte das Produkt aus Flussdichte und Zeitintervall.

Neutronenstrahlung bei Castor-Transporten

Castor ist ein Akronym für "cask for storage and transport of radioactive material" und auch die Bezeichnung einer Behälterbaureihe eines deutschen Herstellers. Castor wurde allgemein bekannt durch den politisch umstrittenen Transport abgebrannter Brennelemente von Leistungsreaktoren. Das Strahlungsfeld der Brennelemente umfasst die Gammastrahlung von Spaltprodukten wie Cs-137, Cs-134, Ru-106, Ce-144 sowie von Aktivierungsprodukten wie Co-60, und vor allem die Neutronenstrahlung aus der Spontanspaltung von Transuranen wie Curium-244, ($T = 18 \text{ a}$) sowie geringe Anteile aus (α, n) Reaktionen.

Da Neutronen die für andere Strahlungen üblichen Abschirmungen durchdringen, von üblichen Strahlungsmessgeräten nicht wahrgenommen werden, ihre radiologische Bewertung umstritten ist und Neutronen eng mit Atomwaffen, Kernenergie und Plutonium verknüpft sind, besitzen Neutronen in der Bevölkerung eine Angstaura und sind sogar Physikern und Strahlenschützern wenig vertraut.

Nach Angaben des Bundesamtes für Strahlenschutz ergaben Messungen der Oberflächendosisleistung an Castor-Behältern typische Mittelwerte von ca. $45 \mu\text{Sv/h}$ Gammastrahlung und ca. $90 \mu\text{Sv/h}$ Neutronenstrahlung. Die Ortsdosisleistung nimmt mit der Entfernung rasch ab. Dosisleistungsgrenzwerte nach Transportvorschriften sind an der Fahrzeugoberfläche kleiner als 2 mSv/h und in 2 m Abstand kleiner als $0,1 \text{ mSv/h}$. Der Dosisgrenzwert für Bevölkerung (und Polizei) beträgt 1 mSv pro Jahr.

Klassifizierung nach der Bewegungsenergie

Die bei der Kernspaltung freigesetzten Neutronen haben Energien im Bereich von etwa $0,1 \text{ MeV}$ bis ca. 10 MeV . Durch Abbremsung in Moderatoren (siehe unten) wie Was-

ser und Graphit erhält man niederenergetische Neutronen. Neutronen haben nach Bereichen ihrer Bewegungsenergie klassifizierende "Vornamen" erhalten. Bei Energien unter 0,02 eV spricht man von subthermischen oder kalten Neutronen. Neutronen im Energiebereich von etwa 0,02 eV bis etwa 0,5 eV nennt man thermische oder langsame Neutronen. Sie stehen im Gleichgewicht mit der Brownschen Molekularbewegung bei Raumtemperatur.

Eine Grenze von 0,5 eV ist durch die Absorptionskante von Cadmium-113 gegeben (siehe unten). Oberhalb von 0,5 eV spricht man von heißen, dann epithermischen und mittelschnellen oder intermediären Neutronen und oberhalb von 100 keV von schnellen Neutronen. Bei Energien > 5 MeV, entsprechend $v > 0,1 c = 30.000$ km/s ist relativistisch zu rechnen.

Eine DIN-Klassifizierung von Neutronen nach ihrer Bewegungsenergie nennt thermische ($< 0,5$ eV), intermediäre (0,5 bis 10 keV), schnelle (10 keV bis 20 MeV) und hochenergetische (> 20 MeV) Neutronen.

Rechenbeispiel: Einer Gleichgewichtstemperatur von $T=293\text{K}$ (oder 20°C) entspricht mit der Boltzmann-Konstante $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K die mittlere Energie $E_{\text{th}}=k \cdot T=4 \cdot 10^{-21}$ J = 0,025 eV, da $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J ist. Thermische Neutronen haben bei 20°C die Geschwindigkeit $v_{\text{th}} = 2200$ m/s, errechnet aus der kinetischen Energie $E = 0,5 m \cdot v^2$, der Neutronenmasse $m = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg und der Umrechnung der Einheiten $1 \text{ J} = 1 \text{ N m} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$. Mit dem Planck'schen Wirkungsquantum $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Js ergibt sich die de Broglie Wellenlänge $\lambda_{\text{th}} = h/mv = 1,8 \cdot 10^{-10}$ m = 180 pm = 1,8 Angström. Einer Bewegungsenergie schneller Neutronen von 100 keV entspricht die Geschwindigkeit $v = 14000$ km/s.

Wechselwirkungen mit Materie

Weil Neutronen elektrisch neutrale, ungeladene Teilchen sind, ist ihre Wechselwirkung mit Materie anders als für die elektrisch geladenen Alpha- oder Betateilchen und die massenlose elektromagnetische Gammastrahlung. Diese drei Strahlungsarten treten in Wechselwirkung mit der Elektronenhülle der Atome, Neutronen dagegen mit den Atomkern-

nen. Als ungeladene Teilchen werden sie von den Coulomb-Kräften der Elektronenhülle nicht abgehalten, sich dem Kern zu nähern.

Es sind drei Arten der Wechselwirkung von Neutronen mit Atomkernen zu unterscheiden: elastische Streuung, unelastische Streuung mit Kernanregung, und Neutroneneinfang (Absorption) mit Kernreaktionen bis zur Kernspaltung. Art und Stärke der einzelnen Wechselwirkungen sind stark abhängig von der Art der Atomkerne und der Energie der Neutronen.

Bei der elastischen Streuung erhält der angestoßene, streuende Kern eine Rückstoßenergie und diese verliert er durch Ionisation. Nach den Stoßgesetzen der Mechanik ist der Energieverlust des Neutrons an leichten Kernen am größten, so am Wasserstoffkern, dem Proton.

Bei der unelastischen Streuung erhält der streuende Kern eine Anregungsenergie, die er durch Emission von Gammastrahlung oder Teilchen wieder abgibt.

Neutroneneinfang (Absorption im Kern) führt zu Kernreaktionen der Art (n, α) , (n, p) , (n, γ) oder (n, f) , d.h. zur Emission von Alphateilchen, Protonen, Gammastrahlung oder Spaltprodukten ($f = \text{fission}$).

Der Einfang **H** (n, γ) **D** langsamer Neutronen an Wasserstoffkernen ist für die Strahlentherapie und die Kerntechnik sehr wichtig. H steht für das einfangende Proton H-1, n für das eingefangene Neutron, γ für die emittierte 2,2 MeV Gammastrahlung und D für das entstandene Deuterium H-2.

Der Einfang (n, α) thermischer Neutronen durch Li-6 und B-10 wird messtechnisch genutzt (siehe später). Das bezüglich der Ordnungszahl Z dazwischen stehende Be-9, das wir als (α, n) Quelle kennen lernten, hat sinnigerweise einen kleinen Einfangquerschnitt. Dies zeigt: Neutronen verhalten sich als Funktion von Z (hier 3, 5, 4 und 6) ganz anders als Photonen. Für Photonen ist der Massenabsorptionskoeffizient proportional Z^3/E^3 , (siehe Kapitel 5), für Neutronen gibt es keinen Zusammenhang.

Schwere Kerne können durch Neutroneneinfang auch gespalten werden. Dies ist mit U-235 die Grundlage der Kernenergie. Die sehr hohe Bewegungsenergie der Spaltprodukte von 200 MeV wird im Kernreaktor in thermische und diese anschließend in elektrische Energie umgesetzt.

Als Moderation bezeichnet man die Abbremsung schneller Neutronen bis zu ihrer Thermalisierung. In Wasser benötigt ein schnelles Neutron ($E = 1 \text{ MeV}$) ca. 18 Stöße, um thermischen Zustand ($E = 0,025 \text{ eV}$) anzunehmen. Zwar würde ein zentraler Stoß ausreichen, um die gesamte Energie des Neutrons abzugeben, jedoch sind die Stöße meistens nicht zentral, so dass der Energieübertrag in kleinen Portionen erfolgt.

Die Moderation geschieht je nach Energiebereich und Moderatorkern durch elastische oder unelastische Streuung. Paraffin, Polyethylen oder Wasser und hitzebeständiger Graphit sind effiziente Moderatoren. Allerdings erfolgt immer auch ein Verlust von Neutronen durch Absorption (Einfang). Die verschiedenen Wechselwirkungen finden ja alle gleichzeitig statt, nur in verschiedenem Maß gemäß ihrem Wirkungsquerschnitt.

Wirkungsquerschnitte

Die Anzahl n der Ereignisse eines monoenergetischen Neutronenstrahls der Intensität J [Neutronen/cm² · s], der senkrecht auf ein Material der Dichte N gleicher Atome fällt, ist gegeben durch:

$$n [\text{s}^{-1} \text{ cm}^{-3}] = \sigma [\text{cm}^2] \cdot J [\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}] \cdot N [\text{cm}^{-3}].$$

Der Proportionalitätsfaktor σ [cm²] wird Wirkungsquerschnitt des Nuklids für die Wechselwirkung bei der Energie genannt. Die Einheit des Wirkungsquerschnitts σ ist 1 barn = 10^{-28} m^2 . Der humorvolle Name stammt vom Englischen für Scheune und aus dem Bestreben nach militärischer Geheimhaltung zur Zeit des Manhattan Projekts. Wie die Art und Stärke der Wechselwirkung sind auch die zugehörigen Wirkungsquerschnitte stark von der Neutronenenergie und vom Nuklid abhängig.

Der Gesamtwirkungsquerschnitt ist die Summe der partiellen für die möglichen Wechselwirkungen und ist für viele

Nuklide von der Größenordnung barn. Aus Streuexperimenten bestimmte Kernradien sind von der Größe $5 \cdot 10^{-15}$ m, was ebenfalls eine Kernquerschnittsfläche $\pi \cdot r^2$ von ca. 10^{-28} m² ergibt. Partielle Wirkungsquerschnitte einzelner Nuklide, ja einzelner Isotope unterscheiden sich um Zehnerpotenzen.

Für den Wirkungsquerschnitt σ zum Einfang langsamer Neutronen durch Cadmium findet man in Lehrbüchern sowohl den Wert 20.000 barn wie auch den Wert 2500 barn. Richtig ist der hohe Wert für das reine Isotop Cd-113. Der niedrige Wert gilt für Cd-nat, von dessen 8 Isotopen Cd-113 gerade 12 % stellt. Cadmium ist somit in jeder Form günstig zur Abschirmung thermischer Neutronen. Beim Neutroneneinfang entsteht jedoch Gammastrahlung, die wiederum mit weiterem Material abgeschirmt werden muss.

Durch Multiplikation des atomaren Wirkungsquerschnitts σ [cm²] mit der Atomdichte N Atomkerne [cm⁻³] erhält man den makroskopischen Wirkungsquerschnitt $\Sigma = N \cdot \sigma$ von der Dimension [cm⁻¹]. Dies entspricht der Definition des linearen Absorptionskoeffizienten für Gammastrahlung und ist zum Verständnis von Messungen und für Berechnungen von Abschirmungen von Nutzen.

Nachweisprinzipien für Neutronen

Neutronen werden durch Kernreaktionen nachgewiesen, die zu geladenen Teilchen, insbesondere Alphateilchen und Protonen führen. Diese werden ihrerseits mit den für diese Teilchen üblichen Detektoren gemessen, z. B. Zählrohr, Ätzspurdetektor. Bei der Konversion der Neutronen in die Sekundärteilchen geht die Information über die Energie der Neutronen im allgemeinen verloren. Spektroskopie von Neutronenstrahlung ist daher ungleich schwieriger als für Alpha- und Gammastrahlung.

Wie bei allen Messmethoden sollte der genutzte Effekt unter den gegebenen Bedingungen möglichst groß sein, um mit kleinen Detektoren möglichst empfindlich zu messen. Als Detektormaterialien werden Materialien bevorzugt, in denen Isotope mit hohem Einfangquerschnitt angereichert sind, wie B-10 und Li-6. Auch sollte der Detektor möglichst wenig auf

andere Strahlungsarten ansprechen, insbesondere nicht auf Gammastrahlungsfelder, die immer gemeinsam mit Neutronenstrahlung auftreten.

Wegen der starken Energieabhängigkeit der Wechselwirkung von Neutronen mit Atomkernen unterscheidet man die Messung langsamer Neutronen von der Messung schneller Neutronen. Wie bei den anderen Strahlungsarten unterscheidet man auch aktive Detektoren (Messgeräte), in denen während der Messung Impulse erzeugt werden, und passive Detektoren, die nach einer Exposition ausgewertet werden. Aktive Detektoren, z.B. Proportionalzähler, dienen in der Regel der Ortsdosimetrie, passive, z.B. Kernspurätzdosimeter und Thermolumineszenz-Dosimeter, der Personendosimetrie.

Messung langsamer Neutronen

Man bedient sich wahlweise einzelner Kernreaktionen (Einfangprozesse), die zu geladenen Sekundärteilchen führen, insbesondere Alphateilchen, Protonen oder Spaltprodukte.

Die Reaktion **B-10 (n, α) Li-7** hat mit thermischen Neutronen einen Wirkungsquerschnitt $\sigma = 3840$ barn. Vorteilhaft ist die natürliche Isotopenhäufigkeit in B-nat mit 20 % B-10 und 80 % B-11. Von der Gesamtenergie von 2,31 MeV erhält das Alphateilchen 1,47 MeV und der Li-7-Kern 0,84 MeV, im umgekehrten Verhältnis ihrer Nukleonenzahlen gemäß dem Impulserhaltungssatz. Obige Reaktion ist zu unterscheiden von B-10 (α , n) N-13, die wir als Neutronenquelle kennen.

Die (n, α) Reaktion wird in kommerziellen BF₃-Gas-Proportionalzählern mit hoch angereichertem B-10 genutzt. Das Gas dient sowohl der Konversion der Neutronen zu Alphateilchen wie auch zum Nachweis der Alphateilchen durch Gasionisation im Proportionalbereich, siehe Kapitel 4 und 8. Durch Impulshöhendiskrimination können die kleineren Impulse der Gammastrahlung unterdrückt und somit Neutronen auch in Gammastrahlungsfeldern gemessen werden.

Die Reaktion **He-3 (n,p) H-3**

mit He-3-Gas als Target und als Zählgas für die direkt ionisierenden Protonen wird sehr effektiv in Proportionalzählern genutzt. Der Wirkungsquerschnitt für thermische Neutronen ist 5330 barn. Von der Gesamtenergie von 764 keV erhält das Proton 573 keV und das Tritium 191 keV.

Messung schneller Neutronen

Zur Messung schneller Neutronen werden diese zunächst thermalisiert. In der Praxis wird ein Detektor für langsame Neutronen mit einem Moderator umgeben. Feste Materialien, wie Paraffin und Polyethylen sind gut geeignete und übliche Moderatoren. Für Neutronen mit keV-Energie reichen Wanddicken von einigen cm, für MeV-Neutronen sind einige dm erforderlich.

Auf dem Prinzip unterschiedlich dicker Moderatorschichten um einen Detektor beruht ein Spektrometer aus 5 - 12 Polyethylenkugeln mit unterschiedlichen Durchmessern. Der Detektor für langsame Neutronen in jeder Kugel misst vorzugsweise Neutronen eines Energiebereichs. Ein besonderer Typ der Spektroskopie ist die Neutronen-Flugzeit-Spektroskopie. Da jeder Bewegungsenergie einer bestimmten Geschwindigkeit entspricht, können aus Flugzeitmessungen von Neutronen deren Energien errechnet werden.

Personendosimeter für Neutronen

Die Reaktion **Li-6 (n, α) H-3**

hat mit thermischen Neutronen einen Wirkungsquerschnitt $\sigma = 940$ barn. Von der Gesamtenergie von 4,78 MeV erhält das Alphateilchen 2,05 MeV und der Tritiumkern 2,73 MeV. Die natürliche Isotopenhäufigkeit ist 7,5 % Li-6 und 92,5 % Li-7.

Diese und die schon genannte (n, α) Reaktion mit B-10 nutzt man in passiven Personendosimetern mit thermolumineszentem, polykristallinem LiF oder $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$. Auch Kernspurätzdetektoren, z.B. Polycarbonatfolien CR39, die auf Alphastrahlung ansprechen und zur Messung der Radonexposition dienen, registrieren Neutronen, wenn sie mit Li-6-haltigen Konverterschichten versehen werden.

Die Personendosimetrie für Neutronen ist komplexer als für Alpha-, Beta- und Gammastrahlung, wegen

1. der notwendigen Konversion der Neutronen in direkt nachweisbare Teilchen,
2. der weiten Energiebereiche von Neutronen,
3. der ausgeprägten Energieabhängigkeit des Wirkungsquerschnittes der Nachweisreaktionen,
4. der anders verlaufende Energieabhängigkeit der Dosisbewertungsfaktoren,
5. des Albedo.

Als Albedo bezeichnet man in der Kernphysik den Reflektions- oder Rückstreuoeffizienten für Neutronen. Treffen Neutronen auf einen Körper, so erfahren sie in diesem wegen der Vielzahl der Stoßprozesse eine Diffusion über große Bereiche. Abgebremste, langsame Neutronen können von der Oberfläche des Körpers wieder austreten. Dies ist bei der Personendosis durch Differenzmessungen von einfallenden und rückgestreuten Neutronen zu berücksichtigen.

Ein Albedodosimeter enthält zwei Detektorpaare, das erste misst die auf den Körper einfallenden Feldneutronen, das zweite die vom Körper rückgestreuten Albedoneutronen. Jedes Detektorpaar besteht aus einem photonen- + neutronenempfindlichen und einem nur photonenempfindlichen TLD, aus deren Differenz die Neutronendosis bestimmt wird.



Abb. 34: Thermolumineszentes Albedo-Dosimeter.
Außenmaße 31 mal 43 mm², TLD 4 mal 4 mm².

Neben der amtlichen Überwachung der Personendosis mit passiven Dosimetern gibt es jederzeit ablesbare elektronische Dosimeter für die betriebliche Überwachung. Diese gab es bisher nur für Photonenstrahlung, neuerdings auch für Neutronen. Sie beruhen auf Silizium-Dioden oder Silizium-Speicherzellen (direct ion storage), von denen geladene Teilchen registriert werden. Diese erhält man durch Neutroneneinfang in Konverterschichten. Für langsame Neutronen enthalten die Dosimeter B-10 oder Li-6, für schnelle Neutronen He-3 oder H-1. Allerdings ist auch bei elektronischen Dosimetern das Ansprechvermögen für die Neutronenfluenz stark energieabhängig und zudem sind die Äquivalentdosis-Fluenz-Konversionsfaktoren ebenfalls energieabhängig.

Strahlenschutz durch Abschirmung

Wegen der relativ geringen Wechselwirkung mit Materie sind insbesondere schnelle Neutronen sehr durchdringend. Es bedarf einer Kombination mehrerer Schichten verschiedener Materialien mit verschiedenen Aufgaben:

1. Ein Moderator, technisch meist Wasser, Beton oder Graphit zur Thermalisierung schneller Neutronen durch elastische und unelastische Streuung. Es kommt aber auch zur $p(n, \gamma)d$ Reaktion. Deshalb wird Schwerbeton (Beton mit Baryt $BaSO_4$ – hohe Ordnungszahl) zur Schwächung der sekundären Gammastrahlung verwendet. Ba erhöht auch den Anteil der unelastischen Streuung.
2. Bor mit hohem Einfangquerschnitt σ für thermische Neutronen in einer (n, α) Reaktion, und kleinem σ in einer (n, γ) Reaktion.
3. Blei zur Abschirmung der bei den Prozessen der Ziffern 1 und 2 emittierten Gammastrahlung.
4. Eisen zur Absorption epithermischer Neutronen und zugleich zur Schwächung sekundärer Gammastrahlung.

In der Praxis wird, wenn es räumlich möglich ist, bei stationären Anlagen einfach mit meterdickem Schwerbeton (enthält Baryt) abgeschirmt.

Anwendungen

Neutronen haben vielfältige Anwendungen in Forschung, Technik und Medizin. Genannt werden können nur einige: die Erzeugung von künstlichen Radionukliden, die Aktivierungsanalyse, die Strahlentherapie mit schnellen Neutronen, Radiographie und Tomographie an technischen Objekten sowie die Neutronenbeugung.

Für einige Anwendungen, wie Aktivierungsanalyse, Radiographie und Feuchtemessungen reichen starke Californium-252-Quellen oder tragbare $H^3(d,n)-He^4$ -Generatoren.

Die Erzeugung der Mehrzahl der künstlichen Radionuklide, die ihrerseits für viele medizinisch und technisch wichtigen Anwendungen benötigt werden, geschieht am einfachsten und oft nur durch Bestrahlung im thermischen Neutronenfeld oder aus Aufarbeitung von Spaltprodukten.



Abb. 35: Forschungsneutronenquelle FRM-II der Technischen Universität München in Garching. Rechts das alte Atomei (1957-2000), links das neue Reaktorgebäude.

Die für viele Anwendungen notwendigen Strahlintensitäten und Strahlqualitäten erhält man allerdings nur in Forschungsreaktoren und mit spezieller Instrumentierung. Ge-

gen deren Verbreitung sprechen die Kosten. Umso wichtiger ist es, wenigstens einen modernen, hochleistungsfähigen Neutronenforschungsreaktor in Betrieb zu haben.

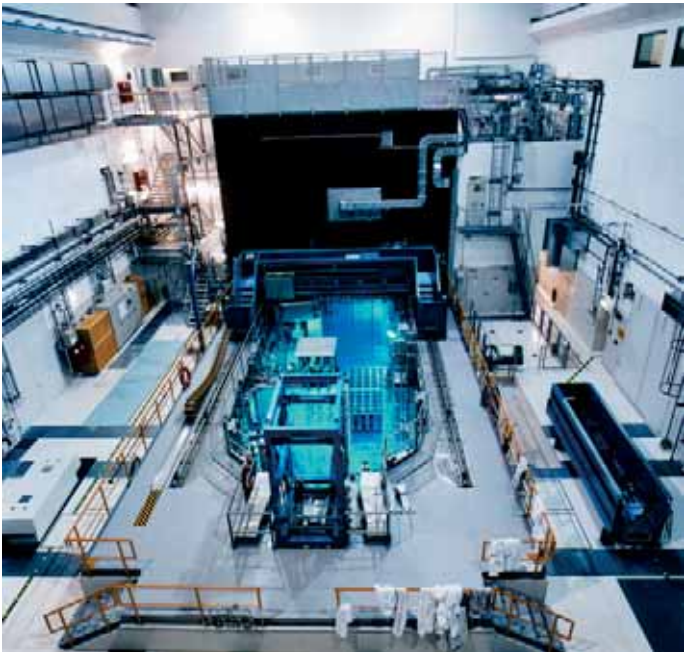


Abb. 36: Blick in die Reaktorhalle des FRM-II. Die blaue Farbe im Reaktorbecken stammt von Unterwasserscheinwerfern.

Die Neutronenaktivierungsanalyse ist ein sehr empfindliches Verfahren zur simultanen Bestimmung vieler Spurenelemente in einer Probe. Bei der Bestrahlung mit thermischen Neutronen werden viele chemischen Elemente radioaktiv markiert und können somit leicht quantitativ gemessen werden.

Die Strahlentherapie mit schnellen Neutronen hat gegenüber der mit Röntgen- oder Gammastrahlung, insbesondere bei oberflächennahen Tumoren, deutliche Vorteile und geringere Nebenwirkungen. Eine besondere Therapieform, die Bor-Neutroneneinfangtherapie BNCT ($C = \text{capture}$) nutzt die schon besprochene Kernreaktion $B-10(n, \alpha) Li-7$. Borhalti-

ge Verbindungen, in die Blutbahn gespritzt, wandern bevorzugt in schnell wachsende Tumorzellen. Neutronenbestrahlung erzeugt in situ biologisch hochwirksame Alphastrahlung und Li-Kerne. Die beiden energiereichen Teilchen kurzer Reichweite (ca. 8 μm , Durchmesser einer Säugerzelle) bewirken das Absterben der Tumorzellen.

Für die Radiographie, die Durchleuchtung technischer Objekte, sind Neutronen durchdringender und für größere Objekte geeignet. Speziell lässt sich Wasserstoff, z. B. in Schmiermitteln oder Korrosionsprodukten, sehr empfindlich nachweisen, und dies bei Anwesenheit von Metallen mit hohem Z, was mit Röntgen- oder Gammadiographie unmöglich ist. Das Verfahren dient z. B. der Weiterentwicklung von Motoren.

Die Neutronenbeugung ist zur Aufklärung von Kristallstrukturen eine vorzügliche Ergänzung zur üblichen Röntgenbeugung. Denn gerade die Positionen der leichten Elemente H, C, N, O in der Kristallstruktur, die der Röntgenbeugung verborgen bleiben, werden mit Neutronenbeugung erkennbar. Diese ist somit besonders wertvoll zur Strukturaufklärung makromolekularer biologischer Stoffe, wie Proteine und Enzyme, und dies auch zeitaufgelöst zur Reaktionskinetik. Wie schon gezeigt wurde ist die de Broglie Wellenlänge von thermischen Neutronen (0,025 eV) mit 180 pm von der gleichen Größenordnung wie die interatomaren Abstände in Kristallen. Dies ist eine Voraussetzung für Beugung und Interferenz zur Strukturaufklärung. Wegen des magnetischen Moments des Neutrons ist die Untersuchung magnetischer Strukturen möglich. Mittels unelastischer Neutronenstreuung erforscht man die Gitterdynamik in Kristallen.

12. Ermittlung der Körperdosis

Übersicht • Stochastische und deterministische Strahlenwirkungen • Individualdosis und Kollektivdosis • Körperdosis und Dosis-Messgrößen • Organdosis und Strahlungswichtungsfaktoren • Effektive Dosis und Gewebewichtungsfaktoren • Äquivalentdosis und Qualitätsfaktoren • Ortsdosis • Personendosis • Synopse der StrlSchV • Einige Vorschriften bei zielgerichteter Nutzung • Grenzwerte für die Bevölkerung • Grenzwerte bei Arbeiten • Orts- und Personendosimeter für Photonen- und für Betastrahlung • Ermittlung der effektiven Dosis bei Radonexposition • Inkorporationsüberwachung • Ermittlung von Dosiskoeffizienten

Übersicht

Die Körperdosis, d.h. die im menschlichen Körper durch ionisierende Strahlung erzeugte Dosis, ist ein zentraler Begriff im Strahlenschutz. Die Grenzwerte, die in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) definiert sind, um den Menschen vor Gefahren durch ionisierende Strahlung zu schützen, beziehen sich auf die Körperdosis. Die Ermittlung der Körperdosis ist deshalb eine wichtige Aufgabe im Strahlenschutz.

Die Körperdosis ist als eine Dosis im menschlichen Körper nicht messbar. Deshalb bedient man sich im Strahlenschutz anderer, messbarer Größen (Dosis-Messgrößen genannt), die einen Schätzwert für die Körperdosis (Organdosis und effektive Dosis) liefern. Die Dosis-Messgrößen sind Äquivalentdosis-Größen, die bei äußerer Strahlenexposition einen Schätzwert für die effektive Dosis geben können.

Für die Äquivalentdosis-Größen (Ortsdosis und Personendosis bei äußerer Strahlenexposition) werden die Dosimeter vorgestellt, die diese Größen für Photonen- und für Betastrahlung messen. Die effektive Dosis bei Radonexposition kann nicht direkt gemessen, sondern nur rechnerisch ermittelt werden. Neutronenspezifische Personendosimeter wurden schon in Kapitel 11 behandelt. Die Inkorporationsüberwachung für beruflich strahlenexponierte Personen umfasst Raumluftmessungen, Körper- und Teilkörpermessungen und Ausscheidungsanalysen.

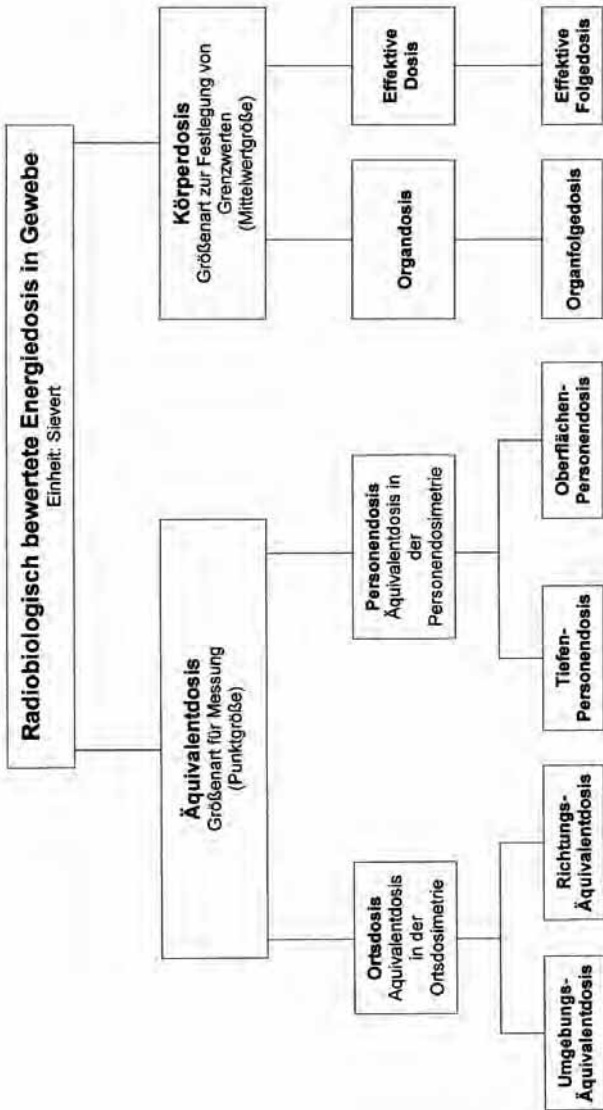


Abb. 37: Synopse der Dosisgrößen im Strahlenschutz.
Nach G. Dietze.

Für die Körperdosis-Größen (Organdosis und effektive Dosis bei äußerer und innerer Strahlenexposition) können die komplizierten Überlegungen und Berechnungen der Dosiskoeffizienten, die die Relation zwischen gemessener Energiedosis in Gy, bzw. Aktivität in Bq und berechneter Dosis in mSv angeben, nur skizziert werden.

Dieses Kapitel übernimmt zum Teil wörtlich Definitionen und Textteile der StrlSchV, daher der zu anderen Kapiteln unterschiedliche sprachliche Duktus. Die Größen-Definitionen in der StrlSchV basieren dabei auf den deutschen Normen (DIN 6814). Aus den vielen Vorschriften der StrlSchV wird jedoch nur eine Auswahl getroffen, das Wichtigste für den Nicht-Fachmann.

Stochastische und deterministische Strahlenwirkungen

Für die strahlenbiologische und medizinische Darstellung der Wirkungen ionisierender Strahlung auf den Menschen wird auf die Schrift "Radioaktivität, Röntgenstrahlen und Gesundheit" verwiesen.

Als Strahlenrisiko bezeichnet man das Produkt von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadenshöhe für eine nachteilige Strahlenwirkung bei einem Individuum, in der Regel bezogen auf einen bestimmten Zeitraum.

Allgemein wird zwischen stochastischen und deterministischen Strahlenwirkungen unterschieden. Die International Commission on Radiological Protection (ICRP) definiert:

1. Bei stochastischen (zufallsbedingten) Strahlenwirkungen ist die Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Strahleneffekt dosisabhängig ohne Schwellenwert (Linear-No-Threshold-Modell oder LNT-Modell). Von dieser Art sind die Induktion von Tumoren und genetische Schäden. Man spricht auch von latenten oder Spätschäden.

2. Bei deterministischen Strahlenwirkungen ist der Schweregrad des Strahlenschadens dosisabhängig. Es gibt einen Schwellenwert, unterhalb dessen keine klinischen Symptome auftreten bzw. beobachtet werden. Von dieser Art sind z.B. strahlenbedingte Trübungen der Augenlinse (Katarakt). Man spricht auch von akuten oder Frühschäden.

Bei niedrigen Dosen (< 100 mSv) sind nur stochastische Strahlenwirkungen relevant. Zum Vergleich: Aus natürlichen Strahlungsquellen erhalten Einzelpersonen der Bevölkerung in Mitteleuropa eine jährliche mittlere effektive Dosis von ca. 2,4 mSv mit Schwankungsbereich von 1-10 mSv/a.

Für eine Zunahme der Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmter Erkrankungen mit zunehmender Strahlendosis sind Beobachtungen an strahlenexponierten Populationen erst im Bereich oberhalb ca. 100 mSv - und dies bei einmaliger, nicht bei chronischer Exposition - statistisch signifikant.

Für den Strahlenschutz ist der Dosisbereich kleiner 100 mSv am wichtigsten. Da es hier keine gesicherten epidemiologischen Untersuchungen mit signifikanten Ergebnissen gibt, extrapoliert man die Daten aus dem Bereich hoher Dosen hin zu niedrigen Dosen. Nach dem Vorsorgeprinzip macht man im Strahlenschutz die Annahme, dass zwischen dem biologischen Effekt "Schaden" und der Dosis eine lineare Beziehung ohne Schwellenwert besteht (LNT-Modell).

Die Zahl der Ereignisse im Niedrigdosisbereich ist außer in sehr großen, dann aber nicht mehr homogenen Populationen so klein, dass sie - nicht-beobachtbar - im Rauschen der viel größeren Zahl der gleichen Erkrankungen, die auf anderen Ursachen beruhen, untergeht.

Individualdosis und Kollektivdosis

Die Vorstellung von stochastischen Strahlenwirkungen mit einer gewissen Eintrittswahrscheinlichkeit hat zum Begriff der Kollektivdosis geführt, bei dem kleine Werte der Individualdosis einer großen Zahl von Personen (d.h. eines Kollektivs) addiert werden.

Aus der Krebsinzidenz in Hiroshima und Nagasaki gibt ICRP 60 bei chronischer Exposition ein Risiko für Krebs Tod von $5 \cdot 10^{-2}$ pro Sv, d.h. bei Exposition von 20.000 Personen mit je 1 Sv zusätzlich 1000 Krebstote. Nach den Vorstellungen zur Kollektivdosis errechnen sich bei Extrapolation auf eine zusätzliche Individualdosis von 1 mSv bei dieser für 20.000 Personen 1 (ein) zusätzlicher Krebstoter.

Da für 20.000 Personen aus allen anderen Ursachen insgesamt ca. 4.000 Krebstote auftreten, ist eine Erhöhung der Krebshäufigkeit um einen Fall praktisch nicht nachweisbar. Die Berechnung von Schadensfällen als Konsequenz einer großen Zahl von niedrigen Individualdosen, die zu einer hohen Kollektivdosis aufsummiert werden, ist deshalb nicht sinnvoll. Das solchen Berechnungen zugrunde liegende LNT-Modell verneint die Existenz von Reparaturmechanismen, wie sie in der Biologie bekannt sind.

Zur Kollektivdosis hat die Strahlenschutzkommission mehrfach festgestellt: Zur Risikoabschätzung bei großen Kollektiven mit sehr kleinen individuellen Dosisbeiträgen ist die Kollektivdosis wegen der unbekanntenen Dosis-Wirkungs-Beziehung bei kleinen Dosen nicht geeignet.

Körperdosis und Dosis-Messgrößen

Körperdosis ist Sammelbegriff für Organdosis und effektive Dosis, jeweils für äußere und für innere Strahlenexposition, wobei letztere als Folgedosis über einen Zeitraum von 50 Jahren berechnet wird. Diese Dosen können nur rechnerisch ermittelt werden, anders als die Dosis-Messgrößen, die gemessen werden können, so die Äquivalentdosis als Ortsdosis und als Personendosis.

Organdosis und Strahlungs-Wichtungsfaktoren

Ausgehend von der allgemeinen Definition der Energiedosis $D = \Delta E / \Delta m$ mit der Einheit Gray wird die strahlungsartbezogene Energie-Organosis $D_{T,R}$ definiert. $D_{T,R}$ ist die über ein einzelnes Organ oder Gewebe T (steht für tissue) gemittelte Energiedosis, die durch eine bestimmte Strahlungsart R (steht für radiation) erzeugt wird. Ausgehend von $D_{T,R}$ erhält man durch Multiplikation mit dem Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R für eine Strahlungsart die strahlungsartbezogene Organosis.

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R}$$

Besteht die Strahlung aus Arten und Energien mit unterschiedlichen Werten von w_R , so werden die Beiträge der einzelnen Strahlungsarten und Energien addiert:

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

$D_{T,R}$ hat die Einheit mit dem Namen Gray [Gy], $H_{T,R}$ und H_T haben die Einheit mit dem Namen Sievert [Sv]. Im System Internationale haben beide die Dimension $[J\ kg^{-1}]$. w_R hat die Dimension $[Sv\ Gy^{-1}]$, bzw. die SI-Dimension [1].

Tabelle 6: Strahlungs-Wichtungsfaktoren w_R

Teilchen	Energie	w_R
Photonen	alle Energien	1
Elektronen, Myonen	alle Energien	1
Neutronen	je nach Energie	5 - 20
Protonen	> 2 MeV	5
Alphateilchen, Spaltfragmente, schwere Kerne	alle Energien	20

Der Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R berücksichtigt für den Strahlenschutz die unterschiedliche biologische Wirksamkeit verschiedener Strahlungsarten. w_R orientiert sich an der in der Strahlenbiologie verwendeten Relativen Biologischen Wirksamkeit $RBW = D_r/D_u$. Dabei sind D_r und D_u die Energiedosen der Referenzstrahlung (r) und der jeweils untersuchten Strahlung (u), die in dem untersuchten biologischen System eine gleiche betrachtete biologische Wirkung hervorrufen, z.B. der zellulären Überlebensrate oder der zellulären Ausbeute an Chromosomenaberrationen. Die RBW kann dosisabhängig sein.

Effektive Dosis und Gewebe-Wichtungsfaktoren

Die effektive Dosis E ist die Summe der mit dem zugehörigen Gewebe-Wichtungsfaktor w_T multiplizierten Organdosen H_T . Die Einheit von E und H_T ist das Sievert.

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \cdot \sum_D w_R \cdot D_{T,R}$$

Der Buchstabe E steht im Strahlenschutz für die effektive Dosis, in der Physik jedoch für Energie.

Der Gewebe-Wichtungsfaktor w_T charakterisiert die Strahlenempfindlichkeit der verschiedenen Organe und Gewebe relativ zueinander. Dabei ist

$$\sum_T w_T = 1.$$

Tabelle 7: Gewebe-Wichtungsfaktoren w_T

für jedes aufgeführte Gewebe oder Organ	w_T
Keimdrüsen	0,20
rotes Knochenmark, Dickdarm, Lunge, Magen je	0,12
Blase, Brust, Leber, Speiseröhre, Schilddrüse je	0,05
Haut, Knochenoberfläche je	0,01
andere, nicht explizit genannte Organe oder Gewebe	0,05

Die Strahlenschutzkommission schreibt: Die Gewebe-Wichtungsfaktoren w_R sind über die Bevölkerung (alle Altersstufen, alle Länder) und beide Geschlechter gemittelte Werte. Die effektive Dosis spiegelt nicht die Altersabhängigkeit des Strahlenrisikos wieder - auch nicht genetische, geschlechtsspezifische und andere personenbezogene Faktoren, die das individuelle Strahlenrisiko beeinflussen. Die effektive Dosis ist deshalb zur Abschätzung des Strahlenrisikos einzelner Personen kaum geeignet.

Bei Berechnung der Strahlenexposition infolge einer Inkorporation von Radionukliden sind die Dosiskoeffizienten aus der Zusammenstellung im Bundesanzeiger Nr. 160a und b vom 28. August 2001 Teil II oder III heranzuziehen, soweit die zuständige Behörde nichts anderes festlegt. Die Themen inkorporierte Radionuklide und Dosiskoeffizienten werden später behandelt.

Äquivalentdosis und Qualitätsfaktoren

Die Äquivalentdosis H ist das Produkt der Gewebe-Energiedosis D im ICRU-Weichteilgewebe und dem Qualitätsfaktor Q nach ICRU (International Commission for Radiation Units). Die Einheit von H ist das Sievert, von D das Gray, Q hat die Dimension $[\text{Sv Gy}^{-1}]$, im Système Internationale jedoch die Dimension $[1]$, da Gy und Sv beide die SI-Dimension $[\text{J kg}^{-1}]$ haben.

$$H = Q \cdot D$$

ICRU-Kugel (Durchmesser 30 cm) und ICRU-Weichteilgewebe (gewebeäquivalentes Material) haben die Dichte 1 g/cm^3 und die relativen Massenanteile 76,2 % Sauerstoff, 11,1 % Kohlenstoff, 10,1 % Wasserstoff und 2,6 % Stickstoff.

Der Qualitätsfaktor Q berücksichtigt die unterschiedliche biologische Wirksamkeit der verschiedenen Strahlungsarten und Strahlungsenergien. Dabei geht man davon aus, dass die Ionisierungsdichte ein entscheidender Parameter für die biologische Wirkung ist. Q ist deshalb als Funktion des linearen Energieübertragungsvermögens LET der Dimension $[\text{keV}/\mu\text{m}]$ in Wasser definiert.

Damit ist für Beta- und Gammastrahlung der Qualitätsfaktor $Q = 1$ und zahlengleich dem Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R bei den Körperdosisgrößen.

Ortsdosis

Die Ortsdosis gibt die Äquivalentdosis an einem betrachteten Punkt des Strahlungsfeldes innerhalb eines bestimmten Zeitraumes an. Die Ortsdosisleistung charakterisiert die Stärke eines Strahlungsfeldes.

Messgrößen der Ortsdosis sind die Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ bei durchdringungsfähiger Strahlung und die Richtungs-Äquivalentdosis $H'(0,07, \Omega)$ bei Strahlung geringer Eindringtiefe. Die Einheit ist in beiden Fällen das Sievert.

Die Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ am interessierenden Punkt im tatsächlichen Strahlungsfeld ist die Äquivalentdosis, die im zugehörigen ausgerichteten und aufgeweiteten Strahlungsfeld in 10 mm Tiefe auf dem der Einfallsrichtung der Strahlung entgegengesetzt orientierten Radius der ICRU-Kugel erzeugt würde.

Die Richtungs-Äquivalentdosis $H'(0,07, \Omega)$ am interessierenden Punkt im tatsächlichen Strahlungsfeld ist die Äquivalentdosis, die im zugehörigen aufgeweiteten Strahlungsfeld in 0,07 mm Tiefe auf einem in festgelegter Richtung Ω orientierten Radius der ICRU-Kugel erzeugt würde.

Dabei ist

- ein aufgeweitetes Strahlungsfeld ein idealisiertes Strahlungsfeld, in dem die Teilchenflussdichte und die Energie- und Richtungsverteilung der Strahlung an allen Punkten eines ausreichend großen Volumens die gleichen Werte auf-

weisen wie das tatsächliche Strahlungsfeld am interessierenden Punkt,

- ein aufgeweitetes und ausgerichtetes Strahlungsfeld (idealisiertes Strahlungsfeld, das aufgeweitet und in dem die Strahlung zusätzlich in eine Richtung ausgerichtet ist),
- die ICRU-Kugel ein kugelförmiges Phantom von 30 cm Durchmesser aus ICRU-Weichteilgewebe.

Personendosis

Die Personendosis, gemessen mit einem Personendosimeter, das am Körper getragen wird, wird als Schätzwert für die Körperdosis durch äußere Exposition genommen, sofern das Dosimeter an einer für das Strahlungsfeld repräsentativen Stelle am Körper getragen wird. Dies ist bei einer Ganzkörperexposition in der Regel der vordere Brustbereich.

Messgrößen der Personendosis sind bei äußerer Strahlenexposition die Tiefen-Personendosis $H_P(10)$ und die Oberflächen-Personendosis $H_P(0,07)$. Die Einheit ist in beiden Fällen das Sievert.

Die Tiefen-Personendosis $H_P(10)$, kurz H_P , ist die Äquivalentdosis in 10 mm Tiefe im Körper an der Tragstelle des Personendosimeters. Sie ist die Personendosis bei durchdringender Strahlung (Gamma- und Neutronenstrahlung) und wurde früher Knochendosis genannt. Ihr Wert gilt als Schätzwert für die effektive Dosis.

Die Oberflächen-Personendosis $H_P(0,07)$, kurz H_S , (s steht für skin = Haut) ist die Äquivalentdosis in 0,07 mm Tiefe im Körper an der Tragstelle des Personendosimeters. Sie ist die Personendosis bei Strahlung geringer Eindringtiefe (Alpha- und Betastrahlung) und wurde früher Hautdosis genannt. Ihr Wert gilt als Schätzwert für die lokale Hautdosis bzw. die Extremitätendosis.

Im Gegensatz zu den Ortsdosis-Messgrößen ist für die Personendosis-Messgrößen kein Phantom definiert. Sie werden direkt an der Person gemessen. Wesentlich ist aber die für das Strahlungsfeld repräsentative Stelle der Körperoberfläche. Bei kollimierter Strahlung, welche zwar die Körperober-

fläche, nicht aber das Dosimeter trifft, kann H_p nicht mehr als Schätzwert einer Körperdosis angesehen werden.

Synopse der StrlSchV

Die Strahlenschutzverordnung trifft Vorsorge zum Schutz vor Gefährdungen durch ionisierende Strahlung und radioaktive Stoffe, bei Tätigkeiten und Arbeiten, sowohl für beruflich strahlenexponierte Personen und die Bevölkerung wie auch für die Umwelt.

Bei "Tätigkeiten" wird die Radioaktivität oder die ionisierende Strahlung zielgerichtet genutzt, so bei künstlich erzeugten radioaktiven Stoffen und bei natürlichen, wenn deren kernphysikalische Eigenschaften genutzt werden. Bei "Arbeiten" ist dies nicht der Fall, es handelt sich hier um den Schutz vor Exposition durch natürliche terrestrische und kosmische Strahlungsquellen.

Die StrlSchV hat fünf Teile und 14 Anlagen. Teil 3 und die Anlagen XI Arbeitsfelder und XII Rückstände wurde erst 2001 aufgenommen:

1. Allgemeine Vorschriften
2. Schutz von Mensch und Umwelt vor radioaktiven Stoffen oder ionisierender Strahlung aus der zielgerichteten Nutzung bei Tätigkeiten
3. Schutz von Mensch und Umwelt vor natürlichen Strahlungsquellen bei Arbeiten
4. Schutz des Verbrauchers beim Zusatz radioaktiver Stoffe zu Produkten
5. Gemeinsame Vorschriften.

Einige Vorschriften bei zielgerichteter Nutzung

Im Rahmen des Umganges mit radioaktiven Stoffen und Quellen ionisierender Strahlung unterscheidet man drei Strahlenschutzbereiche: den Überwachungsbereich, den Kontrollbereich und den Sperrbereich.

Überwachungsbereiche sind nicht zum Kontrollbereich gehörende betriebliche Bereiche, in denen Personen im Kalenderjahr eine effektive Dosis von mehr als 1 mSv oder

höhere Organdosen als 15 mSv für die Augenlinse oder 50 mSv für die Haut, die Hände, die Unterarme, die Füße und Knöchel erhalten können. Hier Tätige gehören zur Kategorie B beruflich strahlenexponierter Personen.

Kontrollbereiche sind Bereiche, in denen Personen im Kalenderjahr eine effektive Dosis von mehr als 6 mSv oder höhere Organdosen als 45 mSv für die Augenlinse oder 150 mSv für die Haut, die Hände, die Unterarme, die Füße und Knöchel erhalten können. Hier Tätige gehören zur Kategorie A beruflich strahlenexponierter Personen.

Sperrbereiche sind Bereiche des Kontrollbereichs, in denen die Ortsdosisleistung höher als 3 mSv/h sein kann.

In Strahlenschutzbereichen ist in dem für die Ermittlung der Strahlenexposition erforderlichen Umfang jeweils einzeln oder in Kombination zu messen:

1. die Ortsdosis oder die Ortsdosisleistung,
2. die Konzentration radioaktiver Stoffe in der Luft,
3. die Kontamination des Arbeitsplatzes.

Von Personen, die sich im Kontrollbereich aufhalten, ist die Körperdosis zu ermitteln. Zur Ermittlung der Körperdosis bei äußerer Strahlenexposition wird die Personendosis gemessen. Die zuständige Behörde kann bestimmen, dass zur Ermittlung der Körperdosis zusätzlich oder allein

1. die Ortsdosis, die Ortsdosisleistung, die Konzentration radioaktiver Stoffe in der Luft oder die Kontamination des Arbeitsplatzes gemessen wird,
2. die Körperaktivität oder die Aktivität der Ausscheidungen gemessen wird oder
3. weitere Eigenschaften der Strahlungsquelle oder des Strahlungsfeldes festgestellt werden.

Die Personendosis ist bei äußerer Strahlenexposition mit Dosimetern zu messen, die bei einer von der zuständigen Behörde bestimmten Messstelle anzufordern sind. Die Dosimeter sind an einer für die Strahlenexposition als repräsentativ geltenden Stelle der Körperoberfläche, in der Regel an der Vorderseite des Rumpfes, zu tragen. Die Anzeige dieses Dosimeters ist als Maß für die effektive Dosis zu

werten, sofern die Körperdosis für einzelne Körperteile, Organe oder Gewebe nicht genauer ermittelt worden ist.

Anmerkung: Der aufmerksame Leser der StrlSchV wird bemerken, dass in gewissen Fällen eine operative Vereinfachung zugelassen ist. So heißt es an verschiedenen Stellen:

1. Es ist die Körperdosis zu ermitteln.
2. Zur Ermittlung der Körperdosis ist die Personendosis zu messen.
3. Die Personendosis ist mit Dosimetern einer Messstelle zu messen, die an einer bestimmten Stelle der Körperoberfläche zu tragen sind.
4. Die Anzeige dieses Dosimeters ist als Maß der effektiven Dosis zu werten.

Der Schutz beruflich strahlenexponierter Personen vor äußerer und innerer Strahlenexposition ist vorrangig durch bauliche und technische Vorrichtungen oder durch geeignete Arbeitsverfahren sicherzustellen.

Beim Vorhandensein offener radioaktiver Stoffe ist in Strahlenschutzbereichen, soweit es zum Schutz der sich darin aufhaltenden Personen oder der dort befindlichen Sachgüter erforderlich ist, festzustellen, ob Kontaminationen durch diese Stoffe vorliegen.

Strahlungsmessgeräte: Zur Messung der Personendosis, der Ortsdosis, der Ortsdosisleistung, der Oberflächenkontamination, der Aktivität von Luft und Wasser und bei einer Freimessung sind, sofern geeichte Strahlungsmessgeräte nicht vorgeschrieben sind, andere geeignete Strahlungsmessgeräte zu verwenden. Es ist dafür zu sorgen, dass die Strahlungsmessgeräte

1. den Anforderungen des Messzweckes genügen,
2. in ausreichender Zahl vorhanden sind und
3. regelmäßig auf ihre Funktionstüchtigkeit geprüft und gewartet werden.

Grenzwerte für die Bevölkerung

Für Einzelpersonen der Bevölkerung beträgt der Grenzwert der effektiven Dosis durch Strahlenexpositionen aus Tätigkeiten 1 mSv im Kalenderjahr. Der Grenzwert der Orgando-

sis für die Augenlinse beträgt 15 mSv pro Jahr und für die Haut 50 mSv pro Jahr.

Grenzwerte bei Arbeiten

Für Personen in Arbeitsfeldern (StrlSchV Anlage XI), bei denen erheblich erhöhte Expositionen durch natürliche terrestrische Strahlungsquellen auftreten können, gelten 6 mSv/a effektive Dosis als Anzeigewert und 20 mSv/a als Grenzwert. Für Organdosen gelten höhere Werte.

Für Arbeitsfelder mit Radon (Anlage XI Teil A) siehe Kapitel 10 Bewertung von Radonexpositionen. Arbeitsfelder mit erhöhten Expositionen durch Uran und Thorium (XI B) sind die Handhabung, Verwendung, Verarbeitung etc. von

- thorierten Schweißelektroden, Gasglühstrümpfen und Legierungen,
- Uran und Thorium zu chemischen Zwecken,
- Pyrochlorerzen (eine Gruppe von Nb- und Ta-Erzen),
- Schlacken von Kupferschiefererzen.

Auch das fliegende Personal ist einer erhöhten Strahlenexposition durch die kosmische bzw. die Höhenstrahlung ausgesetzt. Die StrlSchV sieht vor, dass die jährlichen effektiven Dosiswerte zu ermitteln sind, sofern sie 1 mSv im Jahr überschreiten können. Für das fliegende Personal beträgt der Grenzwert der effektiven Dosis durch kosmische Strahlung ebenfalls 20 mSv im Jahr.

Orts- und Personendosimeter für Photonen- und für Betastrahlung

Die Darlegungen zur Strahlenschutzverordnung, zu ihren Definitionen und Vorschriften mit ihren Grenzwerten zeigen den erheblichen Bedarf an Strahlungsmessungen und Strahlungsmessgeräten. Diese wurden zum größten Teil schon in den Kapiteln 7 bis 10 behandelt, allerdings nicht mit Bezug zur StrlSchV. Messgeräte und Messungen dienen ja nicht nur dem Strahlenschutz, sondern in viel größerem Umfang der Forschung, Medizin und Technik. Für den Strahlenschutz besonders relevant sind Messungen der Dosis an bestimmten Orten im Raum (Ortsdosimetrie) und der Körperoberfläche (Personendosimetrie).

Die Messgrößen für die Orts- und Personendosis, jeweils für durchdringungsfähige Strahlung und für Strahlung geringer Eindringtiefe, sind im Gegensatz zu früher in der StrlSchV von 2001 unterschiedlich definiert, siehe oben. Deshalb ist es wichtig, dass zwischen Orts- und Personendosimetern eindeutig unterschieden wird, zumal auch ihre Kalibrierung unterschiedlich ist. Leider wird dies nicht immer gebührend beachtet.

Es gibt aktive und passive Personendosimeter. Letztere speichern ein der Dosis proportionales Signal in dem Trägermaterial, und die Auslesung erfolgt erst später in einer zentralen Messstelle. Filmdosimeter, Thermolumineszenzdosimeter und Glasdosimeter sind drei Typen passiver Dosimeter.

Die aktiven Dosimeter sind direkt und vom Träger selbst ablesbar, so das klassische Stabdosimeter und neuere elektronische Dosimeter. Letztere zeigen auch die momentane Dosisleistung an und erlauben zudem, Warnschwellen mit akustischer/optischer Anzeige einzustellen.

Eine Einschränkung aller Personendosimeter ist die Kleinheit ihrer Fläche bzw. ihres Volumens. Kollimierte Strahlung, insbesondere von Röntengeräten, aber auch von starken Radionuklidquellen in einer Abschirmung mit einer nur kleinen Öffnung, können den Körper sehr inhomogen bestrahlen, so dass das Personenddosimeter - nur an einer Stelle des Körpers getragen - keiner Strahlung ausgesetzt ist.

Filmdosimeter:

Filmdosimeter sind weit verbreitete Personendosimeter und für Beta-, Gamma- und Röntgenstrahlung in Deutschland amtliche Dosimeter für beruflich Strahlenexponierte. Allein in Süddeutschland werden von der Auswertungsstelle der GSF in München monatlich 130.000 Stück ausgewertet, davon 3/4 aus der Medizin und 1/4 aus der Industrie. Grundlage der Überwachung ist bei 80.000 die Röntgenverordnung, bei 30.000 die StrlSchV und bei 20.000 beide.

Das Filmdosimeter enthält in einem ansteckbaren Kunststoffgehäuse zwei in Folie lichtdicht eingeschlossene Filme. Vorder- und Rückseite der Kasette sind im Inneren mit je

vier Absorptionsfiltern aus Blei, Kupfer und Wolfram verschiedener Flächenmasse versehen. Dadurch wird eine qualitativ/quantitative Auswertung der Schwärzung des Films nach Art, Energie und Intensität der verursachenden Strahlung möglich. Das Filmdosimeter ist geeignet für die Messung von Photonen im Energiebereich 5 keV bis 9 MeV und von Betastrahlung im Bereich > 300 keV.

Eine eventuell absichtliche einmalige hohe Exposition ist auf dem Film durch einen scharfen Schatten der Absorptionsfilter erkennbar, denn im Normalfall ergibt sich durch Bewegung des Dosimeters mit der tragenden Person eine diffuse Streustrahlung mit unscharfen Rändern der Filter.

Vorteile der Filmdosimeter sind: bleibende Dokumentation, da die densitometrische Auswertung keine Veränderung verursacht, zudem langjährige und zentrale Auswertungserfahrung. Nachteile sind: begrenzter Nenngebrauchsbereich gemäß PTB-Anforderungen von 0,1 mSv - 1 Sv, große Messunsicherheit bei niedrigen Dosen und niedriger Strahlungsenergie, Verzugszeit der Auswertung.

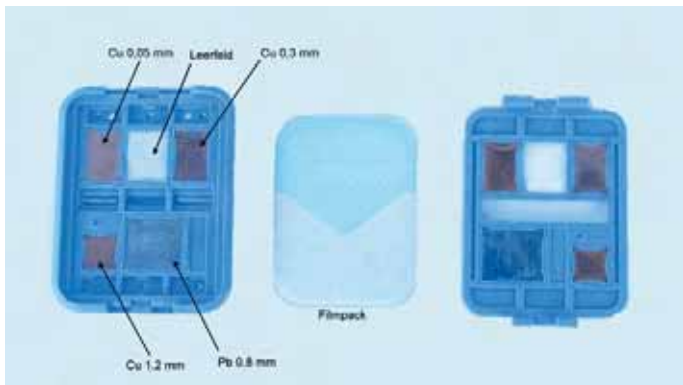


Abb. 38: Filmdosimeter. Größe 42 mal 53 mm² .

Thermolumineszenzdosimeter (TLD):

TLD (siehe Kap. 4 für Thermolumineszenz) finden zunehmend Verwendung, auch in Deutschland. In anderen Län-

dern werden sie zum Teil statt Filmdosimeter bei der amtlichen Dosisüberwachung eingesetzt. Ein modernes TLD enthält 3 - 30 mm³ polykristallines LiF, dotiert mit Mg, Cu und P, mit hoher Dosisempfindlichkeit. LiF ist nahezu gewebeäquivalent, denn wegen der Nähe seiner Ordnungszahlen Z zu denen von O, C, H und N hat LiF für Röntgen- und für Gammastrahlung eine ähnliche Absorption wie Gewebe.

Vorteile der TLD sind: leichtere Auswertung, auch in kleineren Stückzahlen eines Betriebes, stärkere Automatisierung der Auswertung selbst und großer, linearer Messbereich von 0,01 mSv - 4 Sv. Auch können TLD nach kräftigem Ausheizen wieder verwendet werden. Wegen der Kleinheit sind TLD für Fingerringdosimeter geeignet.



Abb. 39:
Fingerringdosimeter

Nachteile sind: die Auswertung löscht den Effekt, es fehlt die bleibende Dokumentation, es besteht "fading", d. h. bei längerer Lagerung des exponierten TLD geht ein Teil der Information verloren.

TL-Dosimeter sind die Ortsdosimeter der Wahl, um an einem Phantom die räumliche Dosisverteilung bei medizinischen Bestrahlungsanlagen auszumessen. Dafür ist eine sehr hohe Zuverlässigkeit und Genauigkeit erforderlich. Die

Dosisdifferenz zwischen erwünschter Wirkung und zu starken, unerwünschten Nebenwirkungen einer Strahlentherapie bei Krebs ist unter Umständen geringer als 5 %.

Glasdosimeter:

Sie bestehen meist aus Yokataglas mit 45 % AlPO_4 , 45 % LiPO_4 , 7,3 % AgPO_4 und 2,7 % B_2O_3 . Gegenüber sichtbarem und UV-Licht ist es unempfindlich. Wird Phosphatglas aber ionisierender Strahlung ausgesetzt, so zeigt es den Effekt der Radiophotolumineszenz (siehe Kapitel 4). Exponiertes Glas gibt bei Bestrahlung mit UV-Licht orangefarbenes Fluoreszenzlicht ab, dessen Intensität der Dosis proportional ist und mit speziellen Auswertegeräten gemessen wird. Durch Wärmebehandlung wird das Glas regeneriert.

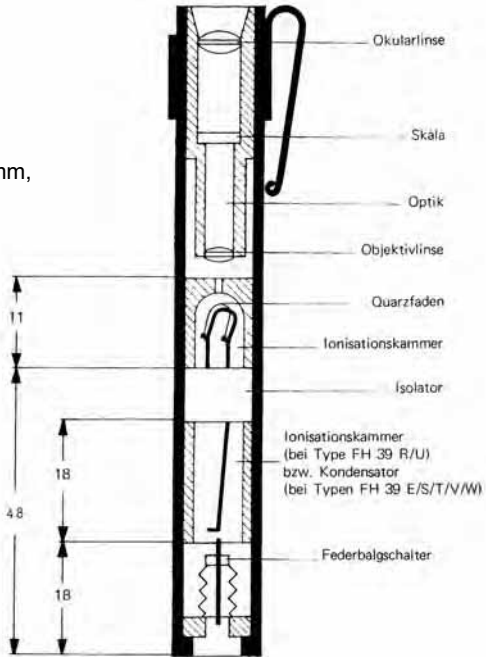
Einige Vorteile der Glasdosimeter sind: mancherorts amtlich anerkannt, Kleinheit, großer Messbereich, unbegrenzt haltbar vor und nach einer Exposition, mechanisch und chemisch resistent. Einige Nachteile sind: teures Auswertegerät, die Energie der Strahlung ist nicht feststellbar.

Stabdosimeter:

Sie enthalten eine kleine Ionisationskammer in einem zylindrischen Hohlstab von 15 mm Durchmesser und 11 cm Länge. Mit einem Ladegerät wird vor einer Exposition das im Stab befindliche Fadenelektrometer aufgeladen. Hält man den Stab gegen eine Lichtquelle, so sieht man durch ein kleines eingebautes Okular den Faden in der Stellung Null einer kleinen Skala mit 20 Teilstrichen, z.B. von 0 bis 2 mSv. Eine Bestrahlung entlädt über die Ionisationskammer das Elektrometer und verschiebt den Faden. Stabdosimeter für die Energiebereiche 14 keV bis 3 MeV oder 50 keV bis 3 MeV unterscheiden sich in der Kapselung.

Vorteile des Stabdosimeters sind: der Träger des Dosimeters - der unmittelbar von der Exposition Betroffene und am Messergebnis Interessierte - kann es sofort ablesen, es kann an Röntgenanlagen mit offenem Strahlengang auch als Behelfs-Ortsdosimeter verwendet werden. Nachteile sind: Mit der Zeit tritt eine gewisse Selbstentladung auf und kann eine Dosis vortäuschen. Außerdem sind Stabdosimeter stoßempfindlich, durch Stoß oder Herunterfallen tritt Entladung auf, d.h. es wird eine Dosis angezeigt.

Abb. 40:
Stabdosisimeter,
 Durchmesser 15 mm,
 Länge 110 mm.



Elektronische Dosimeter:

Das Direct-Ion-Storage-Dosimeter (DIS) z.B. kombiniert eine kleine Gasionisationskammer mit gewebeäquivalenter Wand mit einer nichtflüchtigen Silizium-Halbleiterspeicherzelle. MOSFETs (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistoren) werden so modifiziert, dass ein "floating gate" in Kontakt mit einem Gas ist. Vor Exposition wird das floating gate aufgeladen. Eine Exposition mit Erzeugung von Ionen im Gas entlädt das floating gate teilweise und verändert die Einsatz-Spannung. Diese kann durch Messung des Source-Drain-Stroms zerstörungsfrei ausgelesen werden. Im Prinzip besteht eine große Ähnlichkeit zum Stabdosisimeter.

Ermittlung der effektiven Dosis bei Radonexposition

Radon verursacht etwa die Hälfte der natürlichen Strahlenexposition der Bevölkerung, siehe Kapitel 2 Tabelle 1.

Radon ist in Luft und Wasser allgegenwärtig. Radon ist selbst in niedrigen Konzentrationen mit einfachsten Mitteln überall nachweisbar, siehe Kapitel 10. Und dennoch ist für Radon, im Gegensatz zur äußeren terrestrischen, kosmischen oder künstlichen Gammastrahlenexposition die Personendosis als Äquivalentdosis nicht messbar, da es sich um eine innere Strahlenexposition handelt.

Für Radon hat das Wort Exposition nicht nur die allgemeine Bedeutung von "Strahlung ausgesetzt sein", sondern ist zudem eine Messgröße der Dimension Aktivitätskonzentration von Radon-222 in der Raumluft in $[Bq \cdot m^{-3}]$ multipliziert mit der Aufenthaltsdauer in [h] der Person in dem Raum. Richt- und Grenzwerte für Radon sind in der StrlSchV zwar als Zahlenwert einer effektiven Dosis in Einheiten mSv im Kalenderjahr angegeben, aber mit dem singulären Zusatz, dass diesem Zahlenwert ein bestimmter Zahlenwert der Exposition in $[Bq \cdot m^{-3} \cdot h]$ bei einem angenommenen Gleichgewichtsfaktor $F = 0,4$ entspricht, siehe Kapitel 10.

Gründe hierfür sind erstens, dass nicht Radon, sondern die Radonzerfallsprodukte, und diese nicht von außen, sondern nach Inhalation in der Lunge wirken, und zweitens nur die Exposition und nicht die Dosis messbar ist, wobei die Dosiskoeffizienten aus biokinetischen und epidemiologischen Daten berechnet werden.

Die effektive Dosis bei Radonexposition ergibt sich in den meisten Fällen nicht aus personenbezogenen, sondern aus ortsbezogenen Messungen mit den in Kapitel 10 beschriebenen über Tage und Monate integrierenden Exposimetern, heute meist Kernspurexposimetern. Die Ergebnisse sind mit Unsicherheiten behaftet, weil erstens die Radonkonzentration in der Raumluft wie auch der Gleichgewichtsfaktor Schwankungen um Faktoren 5 bzw. 2 unterliegen und zweitens nur grobe Schätzungen für die zeitliche Korrelation von Konzentration und tatsächlichem Aufenthalt möglich sind. Zudem bestehen große individuelle Unterschiede in der Atemrate und im Atmen durch Nase oder Mund.

Für Arbeitsplätze, bei denen nach umfangreichen ortsbezogenen Erhebungsmessungen mit erhöhten Radonkonzentrationen zu rechnen ist, insbesondere in Wasserwerken in

bestimmten Regionen, werden seit einigen Jahren personenbezogene Exposimeter eingesetzt. Es sind dies die wegen ihrer Kleinheit und Robustheit gut am Körper tragbaren kostengünstigen Kernspurexposimeter, die schon in Kapitel 10 beschrieben wurden. Sie sind während der Arbeitszeit zu tragen und sonst in einem radonarmen Raum oder Gefäß zu lagern. Die Auswertung erfolgt wie bei Filmdosimetern in regelmäßigen Abständen von behördlich bestimmten Auswertestellen.



Abb. 41:
Radonexposimeter
zum Tragen.

Äußerer Durchmesser 42 mm,
Höhe 22 mm, Gewicht 20 g.
Enthält Kernspurfilm LR 115,
siehe Abb. 33.

Es gibt auch schon ein elektronisches Radonexposimeter auf der Basis von nukliderkennenden Halbleiterdetektoren, naturgemäß zu einem höheren Preis, dafür aber direkt ablesbar. Von physikalischem und messtechnischem Interesse ist ein Vergleich der Kalibrierfaktoren das Maß für die Effizienz der Geräte. Eine Konzentration von 1000 Bq/m^3 erzeugt in einem guten, ortsgewunden Radongasmessgerät ca. 1000 Impulse pro Stunde, in dem kleinen tragbaren Exposimeter ca. 20 iph, und in einem Kernspurexposimeter ca. 1,8 Kernspuren pro Detektorfläche (1 cm^2) und h.

Inkorporationsüberwachung

Durch Inhalation und Ingestion oder über Kontamination von Wunden können Radionuklide in den menschlichen Körper

gelangen und durch innere Strahlenexposition eine Körperdosis verursachen. Dies geschieht ständig und überall beim Atmen, da jede Luft, außer in Reinräumen der Halbleiterindustrie, Radon und Radonzerfallsprodukte enthält, die zu einer Strahlenexposition vor allem der Lunge führen. Mit jedem Schluck Milch und den meisten Lebensmitteln nehmen wir Kalium-40 in uns auf. Auch Strahler der Uran- und Thoriumzerfallsreihe sind in Lebensmitteln und Rauchwaren in messbaren Aktivitätskonzentrationen enthalten. Zur mittleren jährlichen effektiven Dosis durch natürliche Strahlenexposition trägt die innere Strahlenexposition zwei Drittel bei (siehe Tabelle 1, Kapitel 2).

Die physikalische Strahlenschutzkontrolle bei innerer Exposition nennt man Inkorporationsüberwachung. Sie ist erforderlich bei Personen, die Tätigkeiten mit offenen radioaktiven Stoffen ausüben oder ausgeübt haben und bei denen Inhalation oder Ingestion oder Kontamination mit radioaktiven Stoffen auftreten können. Zu nennen sind insbesondere Anwendungen von Radionukliden in der Medizin, aber auch in Industrie und Forschung.

Es kommen allein oder in Kombination folgende Verfahren in Betracht:

- Messung der Raumluftaktivität am Arbeitsplatz,
- Messung der Aktivität der Radionuklide im Körper der überwachten Person,
- Messungen der Aktivität der Ausscheidungen.

Bei der Raumluftüberwachung werden stationäre oder personengetragene Sammler verwendet. Glasfaserfilter mit geringem Strömungswiderstand (hohe Saugrate) sind geeignet für Radionuklide, die an Aerosolpartikel angelagert sind und die mit Beta-/Gammadetektoren vermessen werden. Zur Alphaspektrometrie dagegen sind Oberflächenmembranfilter erforderlich. Es werden auch Aktivkohlefilter und -patronen und Kühlfallen als Probensammler eingesetzt.

In-vivo-Messungen sind nur möglich, wenn die inkorporierten Radionuklide Gamma- oder Röntgenstrahlung, Positronen vom Beta-plus-Zerfall mit Vernichtungsstrahlung oder energiereiche Betastrahlung mit Bremsstrahlung aussenden. Zahlreiche Spalt- und Aktivierungsprodukte wie I-131,

Cs-137 und Co-60 sind Gammastrahler. Ganzkörperzähler enthalten mehrere große und bewegliche Gammadetektoren. Aus Kostengründen nimmt man meist Natriumiodid-Detektoren, bis 30 cm Durchmesser und 15 cm Dicke, oder kleinere Reinst-Germaniumdetektoren. Wird nur ein Organ, z.B. die Schilddrüse auf I-131 untersucht oder die Lunge auf Uran, genügen im Teilkörperzähler ein oder zwei Detektoren.



Abb. 42: Teilkörperzähler für die Lunge

Zur Inkorporationsüberwachung des Personals bei der nuklearmedizinischen Schilddrüsentherapie mit I-131 gibt es seit kurzem einen hochempfindlichen Schilddrüsenmonitor zur schnellen Eigenüberwachung. Ein Gerät hat einen durch 4 cm Blei abgeschirmten 4 Zoll mal 4 Zoll NaI:TI-Detektor mit einer Nachweisgrenze von 100 Bq in nur 20 s Messzeit. I-131 hat eine günstige Gammalinie bei 364 keV mit einer relativen Emissionswahrscheinlichkeit von 82 %.

Ausscheidungsanalysen von Urin und Stuhl sind angezeigt bei gewissen Tätigkeiten mit offenen Radionukliden. Alphastrahler wie Pu-239 und Am-241 können nur so nachgewiesen werden. Im Notfall kann die Ausscheidung durch Einnahme von Medikamenten, nicht-radioaktiven Isotopen oder Chelatbildnern erhöht werden. Chelate sind Stoffe, die Ionen abgeben und andere Ionen in eine stabile Ringverbindung aufnehmen, die ausgeschieden wird. Zum Typ Ausschei-

dungsanalyse gehören auch Messungen der ausgeatmeten Luft, z. B. Rn-222 oder CO₂ mit C-14.

Ermittlung von Dosiskoeffizienten

Um von bekannten Aktivitäten in Stoffen, z. B. Lebensmitteln, Atemluft am Arbeitsplatz, die dem Menschen zugeführt werden, zur effektiven Dosis zu gelangen, wird die Relation in Form von Dosiskoeffizienten angegeben. Sie haben die Dimension $[\text{Sv Bq}^{-1}]$ häufig auch $[\text{Sv (Bq/kg)}^{-1}]$ oder $[\text{Sv (Bq/m}^3\text{)}^{-1}]$. Für die Zahlenwerte wird auf die Veröffentlichung im Bundesanzeiger Nr. 160 a und b vom 28. August 2001 verwiesen.

Wie werden Dosiskoeffizienten ermittelt? Sie sind das jahrzehntelange Werk vieler Forscher und verschiedener Arbeitsgruppen und werden vor allem von der International Commission on Radiological Protection ICRP berechnet und publiziert. Die komplizierten Überlegungen und noch mehr die Ermittlungen aus gemessenen, berechneten oder angenommenen Zahlenwerten der Einflussgrößen können im Folgenden nur skizziert werden.

Zunächst sind die Inkorporationswege für Radionuklide in den menschlichen Körper zu betrachten. Inhalation und Ingestion können auftreten bei beruflich Exponierten, bei Einzelpersonen der Bevölkerung bzw. treten auf als Folge der Injektion von Radionukliden bei Patienten der klinischen Diagnostik und Therapie sowie Probanden der klinischen Forschung. Weitere Inkorporationswege sind Wundkontamination bei beruflich Exponierten sowie Diffusion durch die Haut bei großflächiger Kontamination.

Biokinetische Modelle beschreiben den zeitabhängigen Transport und die zeitabhängige Verteilung eines zugeführten radioaktiven Stoffes im Organismus und die Ausscheidung aus dem Organismus mit Hilfe eines mathematischen Formalismus.

Die Konzentration eines Stoffes (Radionuklids) verändert sich nach Aufnahme im biologischen System durch Zerfall, Absorption, Verdünnung, Transport, Diffusion, Akkumulation, Metabolisierung und Ausscheidung.

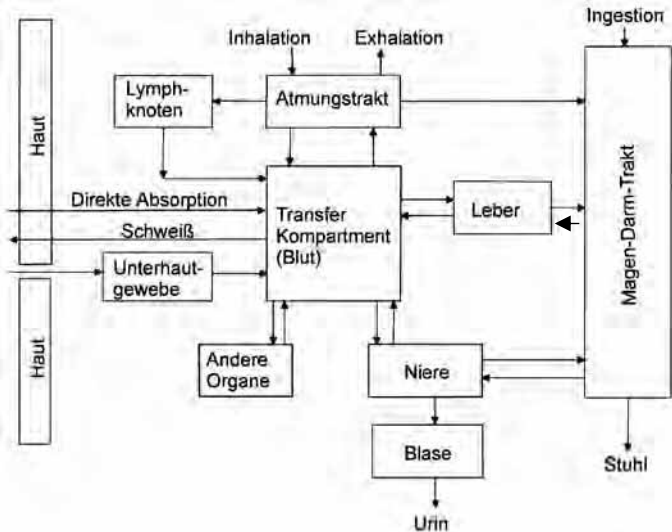


Abb. 43: Transportwege für radioaktive Substanzen im Organismus. Nach A. Kaul.

Kompartimentmodelle sind mathematische Konstruktionen zur formalen Beschreibung der Kinetik eines Stoffes, mit welcher er von einem Kompartiment in ein anderes wechselt, z.B. vom Blut in die Niere und in Ausscheidungen. Es gelten verschiedene Modelle für den Atem-Trakt, den Magen-Darm-Trakt und den Blutkreislauf.

Dosimetrische Modelle berechnen die mittlere in Organen/Geweben absorbierte Energie aus der Gesamtzahl der in Organen/Geweben stattfindenden Zerfälle unter Berücksichtigung der Energie und der absorbierten Bruchteile der emittierten Strahlung. Dies geschieht für Quellenorgane (Selbstabsorption) und für benachbarte Zielorgane. Dabei wird angegeben, welche Dosis innerhalb eines vorgegebenen Zeitraumes (oft 50 Jahre) erzeugt wird (Folgedosis). Dabei ist bei beruflicher Strahlenexposition neben dem physikalischen Zerfall eines Radionuklids auch die biologische Halbwertszeit zu berücksichtigen, d. h. die natürliche Ausscheidung eines Stoffes aus dem Körper.

Im Atemtrakt-Modell als Beispiel sind für Aerosole und Gase/Dämpfe zu berücksichtigen: die Regionen, Größe und Formen der Lunge und der Atemwege, die Atemparameter als Funktion von Alter und körperlicher Tätigkeit, die Quantifizierung der regionalen Deposition inhalierter Aerosole, die Quantifizierung der regionalen Retention und Ausscheidung deponierter Aerosole sowie Translokation in andere Körperregionen.

Von Interesse dürften auch für den Nichtfachmann die großen Unterschiede in den Atemparametern Atemfrequenz [1/min] und Atemvolumenrate [m^3/h] während verschiedener Tätigkeiten für verschiedene Altersgruppen sein. Nach dem Atemtrakt-Modell schläft ein Kleinkind (1 a) 14 h pro Tag mit Atemfrequenz 34 pro min und Atemrate $0,15 \text{ m}^3/\text{h}$. Ein Erwachsener schläft 8 h pro Tag mit Atemfrequenz 12 pro min und Atemrate $0,45 \text{ m}^3/\text{h}$. Bei leichter Beschäftigung und Arbeit 9,75 h pro Tag ist die Atemfrequenz 20 pro min und die Atemrate $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$, bei starker Arbeit steigt die Atemfrequenz auf 26 pro min und die Atemrate auf $3,0 \text{ m}^3/\text{h}$.

Ein Beispiel für Dosiskoeffizienten für die Bevölkerung sind die effektiven Ingestions-Dosiskoeffizienten für Cs-137 für Säuglinge ($< 1 \text{ a}$) $2,1 \cdot 10^{-5} \text{ mSv/Bq}$, für Kinder (7 – 12 a) $1 \cdot 10^{-5} \text{ mSv/Bq}$ und für Erwachsene $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ mSv/Bq}$. So führt ein Verspeisen von 128 kg Pilzen oder Wildschweinfleisch mit 600 Bq/kg bei Erwachsenen zu einer zusätzlichen Dosis von 1 mSv.

Für die Dosiskoeffizienten zur Umrechnung einer Radonexposition von $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ in die effektive Dosis von mSv siehe Kapitel 10 Radon, Abschnitt Bewertung von Radonexpositionen.

13. Anwendungen von Röntgenstrahlung und Radionukliden

Übersicht • Anwendungen von Röntgenstrahlung • Physikalische Wirkungen von Kernstrahlung • Chemische Wirkungen von Kernstrahlung • Biologisch-medizinische Wirkungen von Kernstrahlung • Anwendung von messtechnisch günstigen Eigenschaften • Prüf- und Kalibrierstrahler • Kenndaten einiger Radionuklide • Methoden der radiometrischen Altersbestimmung

Übersicht

Röntgenstrahlung und Radionuklide bewirken seit 1896 auf vielen Gebieten der naturwissenschaftlichen Forschung, der Medizin und der Technik einen einzigartigen Fortschritt in Naturerkenntnis und menschlichen Lebensbedingungen. Ohne sie wären viele Anwendungen in Forschung und Technik nicht möglich. In der Medizin wären Diagnostik und Therapie um viele Möglichkeiten ärmer.

Röntgenstrahlen werden wegen vier spezifischer Eigenschaften genutzt: Schwächung, Fluoreszenz, Beugung und Absorption. Der größte Teil der beruflich strahlenexponierten Personen arbeitet im medizinischen Röntgenbereich.

Einzelne Radionuklide treten auf bei Kernzerfall, Kernumwandlung und Kernspaltung. Von der Kernstrahlung werden physikalische, chemische und biologisch-medizinische Wirkungen sowie messtechnisch günstige Eigenschaften genutzt. Von besonderer Bedeutung und allgemeinem Interesse ist die radiometrische Altersbestimmung. Diese nur beispielhafte Aufzählung der Anwendungen zeigt bereits die weit verbreitete Nutzung von Radionukliden und den Bedarf an Strahlenschutz und Strahlungsmessung.

Anwendungen von Röntgenstrahlung

Bei den meisten Anwendungen von Röntgenstrahlung spielt ihre geringe Absorption in Materie und einfache Messbarkeit die entscheidende Rolle.

Die Anwendungen ordnen sich zwanglos nach den vier spezifischen Eigenschaften energiereicher (kurzwelliger) elektromagnetischer Strahlung bei ihrer Wechselwirkung mit der Materie des Untersuchungs- oder Behandlungsobjektes:

1. Die elementspezifische Schwächung von Röntgenstrahlung bei der Durchleuchtung eines Objektes: diagnostische Radiologie und Radiographie in Medizin und Technik (Materialprüfung).
2. Die elementspezifische Fluoreszenz von Röntgenstrahlung bei Absorption: Röntgenfluoreszenzanalyse in der Chemie.
3. Die strukturspezifische Beugung und Interferenz kohärenter Röntgenstrahlung in Kristallen: Röntgenstrukturanalyse in der Kristallographie.
4. Physikalisch-chemische und biologische Wirkungen durch die absorbierte Strahlungsenergie: Röntgentherapie, Röntgenlithographie (ein Verfahren der Mikroelektronik).

Diese Eigenschaften gelten auch für gammastrahlende Radionuklide wie Cobalt-60, Iridium-192 oder Cäsium-137. Vorteile dieser Strahlenquellen sind Kleinheit und Unabhängigkeit der Quelle vom Stromnetz, Nachteile sind ständig notwendiger Strahlenschutz und Aufsicht sowie Kosten der Entsorgung und Schutz vor Missbrauch.

Physikalische Wirkungen von Kernstrahlung

Zum Messen, Regeln und für weitere Zwecke werden industriell physikalische Wirkungen der Kernstrahlung genutzt. Zu nennen sind Ionisation, Szintillation, Wärmeentwicklung, Fluoreszenzanregung, Schwächung und Rückstreuung sowie Verfärbung.

Technik und Praxis, insbesondere im internationalen Bereich, verwenden noch die alte Einheit Curie (s. Kapitel 3).

Die Ionisation wird in Rauch- und Feuermeldern sowie zum Verhindern von statischen Aufladungen (Antistatika) verwendet. In einen Melder eindringende Brandgase verändern den Gleichgewichtszustand eines Spannungsteilers, bestehend aus 2 Ionisationskammern (Mess- und Vergleichs-

kammer). Die Luft in den Kammern wird durch eine radioaktive Quelle ionisiert. Früher waren in den Rauch- und Brandmeldern $72 \mu\text{Ci}$ ($2,66 \text{ MBq}$) Americium-241 ($T = 433 \text{ a}$) eingefügt. Diese können bei nicht ordnungsgemäßer Entsorgung im Bauschutt ein Problem darstellen. Später genügten $0,8 \mu\text{Ci}$ (30 kBq) und heute $0,075 \mu\text{Ci}$ ($2,8 \text{ kBq}$) Am-241.

Auf Szintillation beruhen die früher radiumhaltigen Leuchtfarben auf Zifferblättern von Uhren und anderen Anzeigegeräten und heute meist tritiumhaltige Notleuchten, die Beta-Lights. Bei Radium-226 ($T = 1600 \text{ a}$) ist es nur die Alphastrahlung, die Zinksulfid anregt. Wegen der Inkorporationsgefahr ist die Verwendung von Radiumleuchtfarben verboten. Problemloser ist Tritium (Wasserstoff-3, $T = 12 \text{ a}$), ein Betastrahler mit maximaler Energie 19 keV . Es zerfällt zu Helium-3 und wird in tritiumhaltigen Verbindungen in Glashohlkörpern eingeschlossen.

Die Wärmeentwicklung wird in wartungsfreien thermoelektrischen Radionuklidbatterien für die Raumfahrt und für Wetterstationen in abgelegenen Gegenden genutzt. Absorbierte Strahlungsenergie erzeugt Wärme, die durch thermoelektrische Elemente in Strom umgewandelt wird. Es eignen sich reine Alphastrahler wie Curium-242 ($T = 162 \text{ d}$), Polonium-210 ($T = 138 \text{ d}$), Curium-244 ($T = 18 \text{ a}$), Plutonium-238 ($T = 87,7 \text{ a}$). Strontium-90/Yttrium-90 ($T = 28,5 \text{ a}$), ein reiner Betastrahler, lässt sich in SrTiO_3 einbauen, einem guten Wärmeleiter mit hohem Schmelzpunkt, was bei Aktivitäten von $40\text{-}200 \text{ kCi}$ notwendig ist. Bei Satellitenabstürzen ist auf diese Radionuklide sowie auf mögliche Aktivierungs- und Spaltprodukte aus vorhandenen Kernreaktoren zu achten.

Zur Röntgenfluoreszenz können chemische Analysenproben auch durch die Strahlung von Radionukliden angeregt werden. Dadurch sind kompakte, netzunabhängige Analysegeräte möglich, z.B. im Bergbau oder in Spürfahrzeugen. Zum Problem wird allerdings bei Stilllegung die ordnungsgemäße Entsorgung der Radionuklide gemäß gesetzlicher Vorschriften. Sie kostet mehr als der Kauf. Die Rücknahme von Strahlern sollte beim Kauf vertraglich vereinbart werden, um hohe Entsorgungskosten zu vermeiden.

Die große Durchdringungsfähigkeit von Gammastrahlung und ihre element- und dichtespezifische Schwächung wird für eine Reihe industrieller Mess- und Regelaufgaben genutzt. Beispiele sind

1. die kontinuierliche, berührungslose Messung der Dicke laufender, heißer Bänder (Glas, Metall, Kunststoff) zur Prozesssteuerung,
2. die Messung der Füllstandshöhe von Behältern von außen und der Feuchte von Rohstoffen bei ihrer Aufbereitung,
3. die Grobstrukturanalyse von Schweißnähten,
4. die Überprüfung der Restwandstärke von sich abnutzenden Hochofenauskleidungen durch eingebaute Strahler.

Übliche Strahler sind Cobalt-60, Iridium-192 und Cäsium-137, bei der Materialprüfung z.B. 50 Ci ($1,85 \cdot 10^{12}$ Bq) oder 100 Ci ($3,7 \cdot 10^{12}$ Bq) Ir-192.

Chemische Wirkungen von Kernstrahlung

Die Auslösung oder Beschleunigung nicht-spontaner, chemischer Reaktionen geschieht üblicherweise durch thermische Energie. Nimmt man hochenergetische Strahlung als Energiequelle, so spricht man von Strahlenchemie.

Vorteile der "kalten", nicht thermischen Energiezufuhr sind die räumlich homogene und örtlich und zeitlich gezielte Zufuhr, große Geschwindigkeit, einfache Kontrolle sowie Rohstoffersparnis. Die Strahlenchemie ist vor allem auf 3 Gebieten tätig: Polymerisation, Synthese und Radiolyse.

Bestrahlungsanlagen sind entweder mit Cobalt-60- oder Cäsium-137 Quellen mit Aktivitäten von MCi bestückt, oder es sind Elektronenbeschleuniger mit Strahlungsleistungen bis 200 kW und Energien bis 5 MeV.

Bei der Polymerisation durch Bestrahlung werden chemische Bindungen aufgebrochen und neue geknüpft. Technische Produkte sind Kabelisolierungen, Elastomere, Polyäthylen- und Urethanschaum, Schrumpfmateriale.

Strahlenchemische Synthesen können bei niedrigen Temperaturen durchgeführt werden, es entstehen reinere Produkte.

Die Radiolyse (Zersetzung durch Bestrahlung) von Wasser ist sehr genau untersucht worden und zwar aus 2 Gründen:

1. Bedeutung für biochemische Vorgänge in bestrahlten Lebewesen, die bis zu 90 % aus Wasser bestehen,
2. für die Sicherheit von Kernkraftwerken wegen der korrozierenden Wirkung der Zersetzungsprodukte und der Entstehung von Knallgas.

Biologisch-medizinische Wirkungen von Kernstrahlung

Obwohl biologische Wirkungen ionisierender Strahlung in vielen Fällen unerwünscht sind, gibt es auch erwünschte Wirkungen. Bei der Strahlentherapie ist neben den medizinisch erwünschten Wirkungen (Abtötung eines Tumors) vor allem auch auf die unerwünschten Nebenwirkungen (Schädigung des Nebengewebes) zu achten. Das stellt hohe Anforderungen an Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Dosimetrie. In der Strahlentherapie werden sehr starke Quellen verwendet, z.B. 1350 Ci ($50 \cdot 10^{12}$ Bq) Cs-137.

Radium wurde schon 1901 zur Krebstherapie verwendet und führte in vielen Ländern zur Einrichtung von Radium-Instituten. Nach der ersten Erzeugung künstlicher Radionuklide im Jahre 1934 begann 1942 die Radioiodbehandlung der Hyperthyreose (Schilddrüsenüberfunktion). In der Therapie werden Radionuklide in umschlossener und in offener Form eingesetzt. Sie ermöglichen, hohe Strahlendosen auf kleinem Raum zu applizieren, um den Tumor "auszubrennen", bei gleichzeitig nur niedrigen Dosen in der Umgebung, um gesunde Zellen nicht bleibend zu schädigen.

Die Sterilisation von medizinischen Gebrauchsartikeln durch Gammastrahlung ist in der Bundesrepublik erlaubt und wird praktiziert, nicht jedoch die von Lebensmitteln. Wichtig ist aber: Bestrahlte Lebensmittel strahlen nicht. Bei exotischen Früchten wird nur die Fäulnis verzögert, Toxine bleiben aber erhalten. Die klassische Hygiene durch Sauberkeit ist nicht ersetzbar. Bestrahlungsanlagen sind meist mit mehreren MCi (10^{17} Bq) Cobalt-60 Stäben bestückt.

Für Radonbäder und Radoninhalationen gibt es stark unterschiedliche Applikationsformen, siehe Kapitel 10.

Anwendung von messtechnisch günstigen Eigenschaften

Die sehr gute Nachweisbarkeit von Radionukliden durch ihre ionisierende Strahlung ist die Grundlage von Szintigraphie und Tracermethoden in Medizin, Forschung und Technik.

Die Szintigraphie gehört zur nuklearmedizinischen Diagnostik. Dazu werden spezielle Radionuklide in bestimmte Trägerverbindungen in den Körper eingebracht. Sie sammeln sich in einzelnen Organen wie Niere, Lunge, Knochen und lassen durch ihre ionisierende Strahlung Organfunktionen und Tumore von außen erkennen.

Die Tracer- oder Indikatormethode ist die Methode der markierten Atome von G. K. von Hevesy ab 1913. Die Isotope eines Elementes unterscheiden sich nicht in den chemischen, wohl aber in ihren physikalischen Eigenschaften. Massenspektrometrie sowie Isotopentrennung durch Diffusion und Zentrifugieren sind damit möglich. Mit Radionukliden lassen sich leicht nachweisbare Sonden in chemische Austausch- und Transportreaktionen und biologische Stoffwechselfvorgänge einführen. Schon 1923 untersuchte G. K. von Hevesy die Aufnahme und den Austausch von Blei in Pflanzen. Die Menschheit verdankt dieser Methode neben vielen anderen das Verständnis des Kreislaufes von Kohlenstoff, Sauerstoff und Kohlendioxid, der Biosynthese des Cholesterins sowie die Entdeckung der essentiellen Fettsäuren.

Auch in der Materialforschung und Werkstoffprüfung werden Radionuklide eingesetzt. Der Verschleiß von Maschinenbauteilen, etwa punktuell durch Neutronen aktiviert, kann während verschiedener Betriebsbedingungen durch Messung der Aktivität im Schmieröl überwacht werden.

Prüf- und Kalibrierstrahler

Prüfstrahler sind umschlossene Strahler mit bekannten Radionukliden, die in einer definierten Messanordnung im zugehörigen Messgerät eine bestimmte Anzeige (Ortsdosisleistung oder Impulse pro Zeiteinheit) erzeugen. Sie müssen mit einem Zertifikat des Herstellers versehen sein, mit Angabe der Aktivität und des Datums der Aktivitätsmessung,

um die Abnahme der Aktivität gemäß der Halbwertszeit berücksichtigen zu können.

Prüfstrahler für Geräte zur Messung der Ortsdosisleistung (Kapitel 7) enthalten zum Beispiel 333 kBq (9 μ Ci) Cs-137. Solche Prüfstrahler sind genehmigungspflichtig bzw. waren früher anzeigepflichtig (bei der zuständigen Landesbehörde). Wegen der leichteren Abschirmbarkeit werden auch Betastrahler wie Sr-90/Y-90-Quellen benutzt.

Kalibrier- oder Referenzstrahler, auch Standardpräparate oder Normale genannt, sind umschlossene oder offene Strahler mit bekannten Radionukliden oder Radionuklidgemischen und bekannter Aktivität in definierter Geometrie (Scheibe, Dose, Marinelli-Schale, Flasche), um Geräte zur Messung von Aktivitäten zu kalibrieren, wozu auch die Kalibrierung der Energie gehört. Solche Geräte sind Alpha-Beta-Low-Level-Messplätze, Alphaspektrometer, Gamaspektrometer. In ihren geometrischen Abmessungen und ihrer Selbstabsorption müssen Referenzstrahler der zu messenden Probe entsprechen.

Für viele Prüf- und Kalibrierzwecke sind auch Prüf- und Referenzstrahler mit Aktivitäten unterhalb der Freigrenze erhältlich, die somit genehmigungsfrei sind. Umschlossene Strahler sind offenen radioaktiven Stoffen, z.B. Lösungen vorzuziehen, aber wesentlich teurer. Für die Funktionskontrolle von Strahlungsmessgeräten sind einfache natürliche oder technische, anzeigefreie Strahlungsquellen ausreichend, wie ein Stück Keramik mit uranhaltiger Glasur oder eine Filterdiskette mit Kaliumchlorid, siehe Kapitel 6, Abschnitt Probensammlung.

Kenndaten einiger Radionuklide

Z	EI	M	HWZ	Strahler	Anw Vork
1	H	3	12,3 a	β	N, W, K
4	Be	7	53,2 d	β^+ , γ	N, W
6	C	14	5730 a	β	N, W
11	Na	22	2,60 a	β^+ , γ	M
15	P	32	14,26 d	β	M
16	S	35	87,5 d	β	M
24	Cr	51	27,7 d	K	M
27	Co	60	5,27 a	β , γ	M, T
36	Kr	85	10,87 a	β , γ	M, K
38	Sr	90	28,8 a	β	M, T, K
39	Y	90	64,1 h	β , γ	M, T, K
40	Zr	95	64,0 d	β , γ	K
42	Mo	99	65,9 h	β , γ	M
43	Tc	99m	6,01 h	IK	M
44	Ru	103	39,3 d	β , γ	K
53	I	123	13,3 h	K	M
53	I	125	59,4 d	K	M
53	I	131	8,02 d	β , γ	M, K
54	Xe	133	5,24 d	β , γ	M, K
55	Cs	134	2,06 a	β , γ	K
55	Cs	137	30,13 a	β , γ	M, T, K
56	Ba	140	12,75 d	β , γ	K
58	Ce	144	284,9 d	β , γ	K
77	Ir	192	73,8 d	β , γ	T
79	Au	198	2,7 d	β , γ	M, T
94	Pu	238	87,7 a	α	K
94	Pu	239	24110 a	α	K
95	Am	241	432,2 a	α	K, T
96	Cm	242	162,9 d	α	K, T
96	Cm	244	18,1 a	α	K, T

Tabelle 8: Kenndaten einiger Radionuklide. Für die der U-238 und Th-232 Reihe und K-40 siehe Kapitel 2.

Z Ordnungszahl. EI Elementsymbol. M Nukleonenzahl. HWZ Halbwertszeit. Zerfall K-Einfang, IK innere Konversion. Typische Anwendungen und Vorkommen: N Natur, M Medizin, T Technik, W Wissenschaft, K Kernkraftwerk.

Methoden der radiometrischen Altersbestimmung

Eine weitere charakteristische Eigenschaft von Radionukliden ist ihre nuklidspezifische und konstante Halbwertszeit. Das Zerfallsgesetz liefert eine von allen Einflüssen (Temperatur, Druck, Chemie) unabhängige Uhr. Schon E. Rutherford erkannte die Möglichkeit, das Alter von Uranmineralen aus der Menge des beim Alphazerfall gebildeten Heliums zu berechnen.

Bei einigen der Methoden der Altersbestimmung werden somit nicht Wirkungen der Kernstrahlung gemessen, sondern Wirkungen des Kernzerfalls, wie Bildung von Helium oder Veränderung des Isotopenverhältnisses. Erst mit dem Massenspektrometer (seit 1919) konnten Isotopenverhältnisse für stabile Isotope genau gemessen werden. Gemessen wird das Mengenverhältnis (Anzahl der Atome) radioaktives Mutternuklid zu stabilem Tochternuklid. Handelt es sich bei Mutter und Tochter um das gleiche Element spricht man von Isotopenverhältnis, sonst von Nuklidverhältnis.

Mit bekannter Halbwertszeit des Mutternuklids kann das Alter der Probe berechnet werden. Zum Zeitpunkt der Bildung des Minerals oder Gesteins müssen Mutter- und Tochternuklid vollständig getrennt worden sein. Nach Bildung muss die Probe aber bis heute ein geschlossenes System geblieben sein, ohne Stofftransport von innen nach außen oder von außen nach innen. Bei Zerfallsreihen muss das radioaktive Gleichgewicht erhalten sein. Gilt dies alles nicht, muss korrigiert werden. Der Zeitbereich, für den sich ein Radionuklid zur Altersbestimmung eignet, hängt von der Halbwertszeit ab.

Bei der Uran-Blei-Methode wird das Verhältnis Uran-238 zu Blei-206 bestimmt. Im Massenspektrometer wird gleichzeitig das Verhältnis der Bleiisotope gemessen. Fehlt Blei-204, so darf angenommen werden, dass Blei-206 ausschließlich durch Zerfall von Uran-238 entstanden ist.

Zur Datierung organischer Proben eignet sich Radiokohlenstoff C-14 ($T = 5730$ a). Er entsteht ständig in der Erdatmosphäre durch Einwirkung von Neutronen der kosmischen Strahlung: $N-14$ (n, p) C-14. Zur Zeit beträgt die Zerfallsrate

16 Zerfälle pro Minute und Gramm Kohlenstoff. C-14 reagiert zu radioaktivem CO_2 , das in gleicher Weise wie nicht-radioaktives CO_2 am Kreislauf teilnimmt. Es wird in Pflanzen eingebaut, solange diese an der Photosynthese teilnehmen, jedoch nicht mehr nach dem Absterben. Die C-14-Produktionsrate schwankt zyklisch mit der Sonnenaktivität. Der Wert des C-14-Gehaltes ist durch Emission aus Kernkraftwerken, militärischen und zivilen Wiederaufarbeitungsanlagen und Kernwaffentests, sowie durch die Verbrennung fossiler Kohlenstoffreserven beeinflusst.

Ein weiteres Verfahren zur radiometrischen Altersbestimmung nutzt die Thermolumineszenz (TL), die zahlreiche Minerale durch geringe Mengen von Uran und Thorium zeigen. Man bestimmt zunächst die natürliche Radioaktivität am Entnahmeort der Probe. Durch Ausheizen der Probe wird die Intensität und Verteilung der natürlichen TL-Strahlung gemessen. Dann wird der Probe mit einer künstlichen Quelle eine bekannte Strahlendosis verabreicht und die dadurch erzeugte TL-Intensität ermittelt. Aus diesen Messungen kann das Alter der Probe, z.B. auch eines Bodens errechnet werden. Bei keramischen Scherben ergibt sich der Zeitpunkt des letzten Ausheizens, des Brandes. Die TL-Altersbestimmung ist eine wichtige Methode der Archäometrie.

Auch Spaltspuren, das sind Kernspuren, die bei der seltenen, spontanen Spaltung von Uran-238 etwa in den Mineralen Glimmer und Apatit entstehen, liefern Aussagen zum Alter und sogar zur Temperatur. Bei Temperaturen zwischen 80 und 120°C heilen die Spaltspuren in Apatit in charakteristischer Weise aus. Sind sie noch vorhanden, so hat z. B. das Sediment diese Temperatur nie überschritten, was bei der Erdölsuche ein wertvoller Hinweis ist. Das Spaltspurenalter des Minerals Zirkon ist bedeutungsvoll für die Geochronologie, z. B. bei der Bildung von Erzen und Hebungen von Gebirgen.

14. Strahlenschutzpraxis und Bewertung der Messergebnisse

Übersicht • Das Wichtigste vom praktischen Strahlenschutz • Allgemeine Überlegungen zur Bewertung • Das ALARA Prinzip - Grundsätze für den Strahlenschutz • Strahlenschutzvorsorge in der Bundesrepublik Deutschland • Bewertung natürlicher und zivilisatorischer Strahlenrisiken

Übersicht

Strahlenschutz ist die Kurzbezeichnung für den Schutz von Menschen als Individuen vor schädlichen biologischen Wirkungen ionisierender Strahlung in allen Dosisbereichen, auch so niedrigen, dass über die biologischen Wirkungen nur statistische Aussagen über Kollektive und für Individuen nur Risikoabschätzungen möglich sind. Wahrlich ein kurzes Wort für einen langen, komplizierten Sachverhalt. Strahlenexposition heißt Einwirkung ionisierender Strahlung auf den menschlichen Körper (genauer: ionisierender Strahlung "ausgesetzt zu sein"). Mit der Einwirkung meint man die mögliche Belastung durch die Einwirkung, obwohl es sich dabei um verschiedene Dinge handelt.

Schon die Messung ionisierender Strahlung erfordert physikalische, chemische, geowissenschaftliche und messtechnische Fachkenntnisse. Die Bewertung der Messergebnisse erfordert zudem biologische, medizinische, juristische und gar psychologische Fachkenntnisse und vor allem ein integrierendes, abwägendes Urteilsvermögen. Das Wichtigste vom praktischen Strahlenschutz wird mit der Regel der "Fünf A's" kurz erläutert.

Biologische Wirkungen sind die Folge von physikalischen und chemischen Wirkungen. Die Materie, in der die Wechselwirkungen stattfinden, ist nun der Mensch und nicht ein Detektor. Das Prädikat "schädlich" vor den Wirkungen, vor denen zu schützen ist, ist notwendig, da es in der Medizin auch erwünschte biologische Wirkungen ionisierender Strahlung gibt, z.B. die Abtötung eines Tumors. Beide sind aber nicht zu trennen, was die Risiko- oder Nutzen-Schaden-Bewertung besonders erschwert.

Dies ist kein Text zur Strahlenbiologie oder Kommentar der Strahlenschutzverordnung. Es folgen daher nur allgemeine Überlegungen zur Bewertung sowie physikalische, physiologische, politische und psychologische Aspekte - die vier P's. Die Bewertung von Strahlenrisiken darf nicht isoliert von anderen zivilisatorischen und natürlichen Risiken gesehen werden. Risikominderung ist meist mit Kosten verbunden. Die Mittel sind aber begrenzt, sodass ihr Einsatz optimiert werden muss. Das internationale ALARA (as low as reasonably achievable) Prinzip gibt Grundsätze für den Strahlenschutz, zusätzlich zu den Grenzwerten.

Für die Bewertung zivilisatorischer Strahlenexpositionen liefert die natürliche Strahlenexposition einen sinnvollen Maßstab. Der Strahlenschutz für beruflich exponierte Personen ist ein besonders hoch entwickelter Teil des allgemeinen Schutzes am Arbeitsplatz.

Das Wichtigste vom praktischen Strahlenschutz

Alle Regeln des praktischen Strahlenschutzes für den Umgang mit technischen Strahlenquellen lassen sich in der Regel der fünf A's zusammenfassen:

- 1. Abstand vergrößern,**
- 2. Abschirmung verstärken,**
- 3. Aufenthaltsdauer verkürzen,**
- 4. Aktivität verkleinern,**
- 5. Aufnahme (Inkorporation) vermeiden.**

A1 bis A4 gelten für die Strahlenexposition von außen. A3 bis A5 für Strahlenexposition von innen. Offene Strahler, wie sie für radiochemische Arbeiten und Tätigkeiten benötigt werden, müssen weit sorgsamer behandelt werden als umschlossene Prüf- und Kalibrierstrahler.

Den Abstand von der Strahlenquelle zu vergrößern, ist, soweit technisch möglich, immer die erste Schutzmaßnahme. Bei Alpha- und Betastrahlern ist sie auch in Luft sehr wirksam, bei Gammastrahlern auch von Bedeutung. Einige Beispiele: Der Prüfstrahler zum Szintomat-Gerät von nominell (d.h. ohne Berücksichtigung des Alters) 333 kBq Cäsium-137 erzeugt unmittelbar vor den Detektor gehalten eine Anzeige von 45 $\mu\text{Sv/h}$, in 30 cm Abstand jedoch nur noch 0,45 $\mu\text{Sv/h}$, ein Faktor 100. Bei einem Stück Pechblende

sinkt die Ortsdosisleistung bei der gleichen Vergrößerung des Abstandes von 85 auf 3 $\mu\text{Sv/h}$, hier nur ein Faktor 28 statt 100. Vor einer 1 m^2 großen Uranfliesenwand zeigt ein Beta/Gamma-Kontaminationsmonitor in 10 cm Abstand 1530 ips, in 100 cm Abstand 330 ips, ein Faktor 5. Bei der Abnahme der Dosisleistung mit dem Abstand sind Punkt- und Flächenstrahler und "harte" und "weiche" Strahler zu unterscheiden.

Die Abschirmung ist für Alpha- und Betastrahler kein Problem, da genügt Papier bzw. 1 cm Plexiglas oder 3 mm Aluminium, je nach Energie der Betastrahlung. Dies gilt allerdings nur, wenn es sich um reine Alpha- oder Betastrahler handelt. Americium-241 wird als Alphastrahler bezeichnet, emittiert aber auch Gammaquanten sowie durch Konversion entstandene Betastrahlung. Eine alte Quelle mit 1 Ci ($3,7 \cdot 10^{10}$ Bq) Americium-241 - Hantierung mit einer langen Pinzette! - liefert 1 cm vor dem Gerät Szintomat Vollausschlag im höchsten Anzeigebereich 30 mSv/h, in einer Bleiabschirmung von 1 cm Wandstärke jedoch nur noch 6 $\mu\text{Sv/h}$, ein Quotient 5000 : 1. Bei der oben genannten Pechblende (harte Gammastrahlung von Bi-214) senkt eine Abschirmung von 5 cm Blei die Ortsdosisleistung auf 1/20. Die bei Abstand und Abschirmung genannten Quotienten sind, wie ersichtlich, von der Art des Strahlers und der Art des Messgerätes abhängig. Gasgefüllte Detektoren mit dünnem Fenster erfassen mehr die Betastrahlung und niederenergetische Gammastrahlung, Szintillationsdetektoren in Metallgehäuse die hochenergetische Gammastrahlung.

Die Aufenthaltsdauer im Bereich erhöhter Dosisleistung geht in die Personendosis ein, da diese als Produkt der Ortsdosisleistung mit der Aufenthaltsdauer der Person errechnet wird. Dabei wird angenommen, dass es nur auf das Produkt ankommt und nicht auf die einzelnen Faktoren. In kerntechnischen Anlagen mit sogenannten "Heißen Zellen" wird mit Fernbedienung gearbeitet, und die Aufenthaltsdauer am Ort der hohen Dosisleistung wird Null.

Die Aktivität zu verkleinern, gilt es vor allem beim Arbeiten mit offenen Strahlern, also in der biochemischen Forschung und in der Nuklearmedizin. Durch die sehr hohe Empfindlichkeit der Nachweis- und Messverfahren ist es möglich, die

Aktivität zu verkleinern. Eine besonders starke Reduktion der Strahlenexposition erhält man in der Nuklearmedizin durch Verwendung von Radionukliden, deren Aktivität zeitlich rasch abnimmt, die also eine kurze Halbwertszeit haben. Für die Diagnostik mit Iodisotopen stehen heute Isotope mit wesentlich kürzerer Halbwertszeit und günstigeren Strahlungseigenschaften zur Verfügung als früher: heute Iod-123, $T = 13 \text{ h}$, ohne schädigende Betastrahlung, statt früher Iod-131, $T = 8 \text{ d}$ mit schädigender Betastrahlung.

Die Aufnahme (Inkorporation = Ingestion plus Inhalation) von Radionukliden zu vermeiden, war bis zum Frühjahr 1986 eine Sorge nur für beruflich mit offenen radioaktiven Stoffen Tätige. Auch die Inhalation von Alphastrahlern im Uranerzbergbau und bei der Aufbereitung bis zur Brennelementfertigung war stets ein Problem. Berechnungen der Strahlenexposition für die Bevölkerung in Mitteleuropa durch die Auswirkungen des Reaktorunfalls von Tschernobyl ergaben - für manche eine Überraschung - einen größeren Anteil der äußeren als der inneren Exposition. Ein Grund dafür ist, dass für die äußere Exposition die physikalische Halbwertszeit von Cäsium-137 von 30 Jahren, für die innere Exposition jedoch die biologische Halbwertszeit von nur wenigen Monaten maßgeblich ist. Die Grundnahrungsmittel enthielten sehr bald praktisch kaum mehr Radiocäsium.

Allgemeine Überlegungen zur Bewertung

Bewertung beinhaltet den Vergleich des zu Bewertenden mit anerkannten Vergleichs- oder Grundwerten und Maßstäben nach dem Stand von wissenschaftlicher Erkenntnis, technischer Verwirklichung, Gesetzgebung und Rechtsprechung und gesellschaftlicher Akzeptanz.

Demnach hat die Bewertung von Strahlungsmesswerten einen physikalischen, einen physiologisch-biologisch-medizinischen, einen politisch-juristisch-wirtschaftlichen und darüber hinaus einen psychologischen Aspekt.

Zudem sind Messwerte zum Teil mit großen Unsicherheiten der Probennahme und der Messung behaftet und Maßstäbe des Vergleiches als solche in der Öffentlichkeit zum Teil umstritten. Zudem muss ein differenzierendes Gesamturteil

mit vielen Tönen von weiß und grau bis schwarz auf eine schwarzweiße Ja-Nein-Entscheidung reduziert werden. Schließlich muss dies oft von Wenigen in kurzer Zeit geschehen und trotzdem für Viele für lange Zeit begründbar und einsichtig gemacht werden. Letztendlich geschieht dies nicht in einem akademischen, einem wissenschaftlichen Freiraum, sondern mit wirtschaftlichen und politischen Konsequenzen.

Diese Problematik ist aber der Bewertung von Strahlungsmesswerten nicht allein oder auch nur in besonderem Maße zu Eigen, sondern ist ein Merkmal vieler Entscheidungen in unserer heutigen komplex-vernetzten und gleichzeitig kritisch-transparenten Welt.

Zur physikalischen Bewertung von Messwerten gehört zunächst einmal die kritische Prüfung der Angaben auf die Beachtung der Regeln zur Erlangung richtiger Messwerte. Messwerte haben schon rein formal zu enthalten: Zahlenwert mit Angabe der Standardmessunsicherheit (früher "Fehler" genannt). Bei zählenden Messungen ist die Signifikanz der Nettomesswerte zu prüfen, siehe Kapitel 6. Hinzu gehören vollständige Einheit, Angaben über die Probe oder den Messort, die Strahlung und das Messgerät. Die Kontamination von Sandkästen - nach Tschernobyl ein publikumswirksames Thema - ergab ganz unterschiedliche Werte, je nachdem, ob mit einem Kontaminationsmonitor oder mit einem Szintillationszähler gemessen wurde.

Bei Angaben von Dosiswerten oder Dosisleistungswerten ohne die Vorsilben Ionen-, Energie- oder Äquivalentdosis ist der Einheit C/kg (R), Gy (rad) oder Sv (rem) zu entnehmen, um welche Dosis es sich handelt. Bei Umrechnung von gemessenen Werten der Ortsdosisleistung pro Stunde in eine Personen-Jahresdosis sind zu berücksichtigen: die Aufenthaltsdauer der Person am Ort und die physikalische Halbwertszeit der Probe. Bei der Äquivalentdosis sind die Dosis-Messgrößen und die Körperdosisgrößen zu unterscheiden, siehe Kapitel 12.

Viele Messinstrumente, insbesondere Kontaminationsmonitore und Geiger-Müller-Zählrohre, haben Anzeigen "Impulse pro Zeit". Diese dürfen niemals unmittelbar als Gesamtzahl

der Zerfälle pro Zeit, das wären Becquerel, verstanden werden, obwohl beide die Einheit 1/s haben. Zur Umrechnung ist zu kalibrieren.

Trotz dieser Problematik gibt es zur biologischen Bewertung von Strahlungsmesswerten mehrere konsistente Vergleichsskalen:

1. die mittlere natürliche Strahlenexposition mit circa 2,4 mSv/Jahr und starken Schwankungen von 1–10 mSv/a, von Ort zu Ort und Person zu Person,
2. die medizinische Diagnostik mit Dosen von 0,01–10 mSv bei großen Unterschieden der Exposition je nach Technik und Körperteil,
3. die medizinische Therapie mit nochmals bis hundertfach höheren Dosen in dem den Tumor umschließenden gesunden Gewebe.

Als politisch-juristischer Maßstab der Bewertung von Messwerten dienen die in der Röntgen-, der Strahlenschutz- und weiteren Verordnungen festgesetzten Grenzwerte für Körperdosen bzw. für inkorporierte Aktivitäten. Bei Körperdosen gelten stark unterschiedliche Grenzwerte für beruflich und für nicht beruflich strahlenexponierte Personen, ferner stark unterschiedlich je nach Körperteil und Radionuklid.

Einen wesentlich psychologischen Aspekt haben alle Risikoabschätzungen bei kleinen Strahlendosen. Risikoabschätzungen beruhen stets auf mehrfachen, multiplikativen Mittelwertbildungen, behandeln große Kollektive und geben für Einzelpersonen nur Wahrscheinlichkeiten an. Bei der Abschätzung von stochastischen Strahlenrisiken ist dies besonders problematisch. Eine kleine Dosis bei jedem Einzelnen eines großen Kollektivs wird gleich behandelt, wie wenn von einer kleinen Zahl von Personen jeder eine große Dosis erhalten hätte. Deshalb werden von Fachleuten aus Kollektivdosen keine Schadensfallzahlen berechnet.

Das ALARA Prinzip - Grundsätze für den Strahlenschutz

Der Strahlenschutz hat das Ziel, beim Menschen nicht-stochastische Strahlenschäden zu vermeiden und das Risiko für stochastische Strahlenschäden auf ein annehmbares Maß zu senken unter Abwägung des Nutzens und der

Kosten, welche die Schäden und ihre Vermeidung verursachen.

Die Internationale Strahlenschutzkommission schreibt:
"Die Begrenzung stochastischer Wirkungen ist dadurch zu erreichen, dass alle gerechtfertigten Strahlenexpositionen so niedrig gehalten werden, wie es unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und sozialer Faktoren vernünftigerweise erreichbar ist, wobei immer darauf geachtet werden muss, dass die entsprechenden Grenzwerte für die Äquivalentdosis nicht überschritten werden".

Es ist dies das ALARA-Prinzip (As Low As Reasonably Achievable). Es umfasst die drei Prinzipien:

- 1. Prinzip der Rechtfertigung der Tätigkeit:**
Es darf keine Tätigkeit, die zu Strahlenexpositionen führt, gestattet werden, wenn sie nicht zu einem positiven Gesamtnutzen führt.
- 2. Prinzip der Dosisbegrenzung:**
Es legt die Dosisgrenzwerte für die allgemeine Bevölkerung und für beruflich strahlenexponierte Personen fest.
- 3. Prinzip der Minimierung der Dosis = Optimierung des Verfahrens:**
Alle Strahlenexpositionen müssen auch unterhalb der Grenzwerte so niedrig gehalten werden, wie sie unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und sozialer Aspekte vernünftigerweise erreichbar sind.

Die Strahlenschutzverordnung der Bundesrepublik Deutschland hat etwas abweichende Grundsätze, insbesondere lässt sie das ALARA-Prinzip aus Gründen allein der Wirtschaftlichkeit nicht zu. Es wird gefordert, die Strahlenexposition auch unterhalb der Grenzwerte "so gering wie möglich" zu halten, d.h. es ist dafür Sorge zu tragen, dass die Ausschöpfung der Grenzwerte vermieden wird. Beim ALARA-Prinzip fehlt der in der StrlSchV verwendete Begriff "Stand von Wissenschaft und Technik".

Strahlenschutzvorsorge in der Bundesrepublik Deutschland

Die Ereignisse von Tschernobyl haben zum Strahlenschutzvorsorgegesetz StrVG vom 19.12.1986 geführt. Mit diesem Gesetz wurden bundeseinheitlich Regelungen für die Überwachung der Umwelt auf Radioaktivität bei großräumig wirkenden Kontaminationen geschaffen und die Voraussetzungen, um bei einem Ereignis mit nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen bundeseinheitlich Schutz- und Vorsorgemaßnahmen zu treffen.

Aufgabe des Bundes ist die flächendeckende und großräumige Ermittlung der Radioaktivität in Luft, Niederschlag und Bundesgewässern. Aufgabe der Länder sind Messungen an Lebensmitteln, Tabakerzeugnissen, Arzneimitteln, Futtermitteln, Bedarfsgegenständen, Trink-, Grund-, und Oberflächenwässern, in Boden und Pflanzen sowie in Düngemitteln. Für die zentrale Sammlung und Bewertung der Messdaten ist das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) zuständig. Es kann per Rechtsverordnung einheitliche Grenz- und Richtwerte festlegen, auf deren Grundlage Verbote und Beschränkungen, insbesondere für Lebens- und Futtermittel erlassen werden können.

Im Vollzug des StrVG wird von den Bundesländern die Umweltradioaktivität durch gammaspektrometrische Laboruntersuchungen von Lebensmitteln und anderen Stoffen überwacht. Zusätzlich zu den vom Bund wahrzunehmenden Aufgaben wird in Bayern ein kontinuierlich arbeitendes, automatisches Messnetz zur Überwachung der Gamma-dosisleistung sowie der Aerosol- und Iod-131-Aktivität in der Luft betrieben.

Der gesetzliche Auftrag zur Überwachung der Umweltradioaktivität umfasst neben der Messung auch die Pflicht, die Messdaten und deren Bewertung durch den BMU zu veröffentlichen und jährlich dem Bundestag einen Bericht über die Entwicklung der Radioaktivität in der Umwelt vorzulegen. In Bayern ist ein eigenes Informationssystem über Internet öffentlich zugänglich: www.bayern.de/LfU/Strahlen.

Bewertung natürlicher und zivilisatorischer Strahlenrisiken

Zur Bewertung von Messwerten sind diese mit Maßstäben zu vergleichen. Ein sinnvoller Maßstab für Risiken zusätzlicher, technischer anthropogener Strahlenexposition ist das unvermeidbare Risiko der Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide. Verglichen werden dabei Werte der effektiven Dosis, die in konsistenter Weise aus den Messwerten der Energiedosis oder der Aktivität berechnet werden. Die Risiken werden aufgrund von Dosis-Wirkungs-Beziehungen nach bestem Wissen und Gewissen abgewogen.

Unterschiede zwischen natürlichen und künstlichen Radionukliden bzw. der von ihnen ausgehenden Strahlenexposition werden durch die Qualitätsfaktoren (Strahlungswichtungsfaktoren) für verschiedene Strahlungsarten und die Dosiskoeffizienten für verschiedene Radionuklide berücksichtigt. Ist dies geschehen, bestehen keine Unterschiede im Risiko durch natürliche oder künstliche Strahlenexposition bei gleichen Werten der effektiven Dosis.

Die Medizin verursacht mit Röntgenstrahlen und Radionukliden für Diagnostik und Therapie den größten Teil der künstlichen oder zivilisatorischen Strahlenexposition. Dies gilt immer noch, obwohl die Strahlenexposition pro Fall durch empfindlichere Detektoren und kurzlebige Radionuklide stark gesenkt werden konnte. Die Zahl der Fälle ist aber durch häufigere Indikation (z.B. Verkehrsunfälle) und vermehrte Diagnosemöglichkeiten (z.B. Computertomographie) sehr stark gestiegen.

Zahlenwerte für mittlere Strahlendosen bei Röntgenuntersuchungen zeigen: Es sind zum Teil erheblich höhere Werte als die der natürlichen Strahlenexposition. Trotzdem sind Früh- oder Spätschäden nicht nachweisbar. Die erkannten Schäden bei Patienten und vor allem bei Ärzten aus früherer Zeit sind durch wesentlich höhere Expositionen verursacht worden.

Erhöhten Expositionen durch kosmische Strahlung sind Flugpassagiere in größerer Höhe ausgesetzt. Genaue Werte sind aus messtechnischen Gründen schwer zu erhalten.

Eine Kalibrierung von Instrumenten für die Umgebungsstrahlung auf der Erde ist nicht die Gleiche wie für die höchstenergetische Höhenstrahlung, über deren biologischen Wirkungen auch wenig bekannt ist. Messungen mit einem Szintillationszähler (Detektor 44 mm Durchmesser, ca. 10 mm Höhe, Kunststoff) auf einem Flug nach Australien in 11000 m Höhe ergaben zeitweise Werte von $1 \mu\text{Gy/h}$, statt $0,05 \mu\text{Gy/h}$ auf dem Boden. Gewisse Komponenten der kosmischen Strahlung, wie Neutronen, werden vom Gerät stark unterbewertet.

Um für die kosmische Strahlung von der Energiedosis zu der für den Strahlenschutz wichtigen Äquivalentdosis zu gelangen, macht die Wahl des Bewertungsfaktors sehr viel aus. Das GSF Forschungszentrum für Umwelt und Strahlenschutz verwendete bei neueren Messungen zusammen mit der Lufthansa extra große Szintillationszähler (75 mm Durchmesser, 75 mm Höhe, Kunststoff, plus 0,5 mm Zinksulfid für niederenergetische Photonen) und Neutronenzähler (Moderator plus BF_3 Zähler), mit einem gewebeäquivalenten Proportionalzähler als Referenzgerät. Auf der nördlichen Halbkugel wird in allen Höhen der Höchstwert zwischen 40° und 50° Breite beobachtet. In typischen Flughöhen von 33 000 ft (10 km) und 39 000 ft (11,7 km) beträgt die Äquivalentdosis 5 bzw. $8 \mu\text{Sv/h}$.

Weiterführende Literatur

J. Abele: Wachhund des Atomzeitalters. Geigerzähler in der Geschichte des Strahlenschutzes. Deutsches Museum München 2002.

Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen: Strahlenschutz - Radioaktivität und Strahlenschutzvorsorge. 72. p., München 1999.

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz: Radioaktivität, Röntgenstrahlen und Gesundheit. 6. Auflage 2006.

Deutscher Bundestag Drucksache 14/9995 vom 08.10.02: Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2001.

F. Fehringer, G. Seitz: Strahlenschutz. Institut für Strahlenschutz. Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln, 17. Auflage in Neubearbeitung.

H. Fritz-Niggli: Strahlengefährdung/Strahlenschutz. Huber Verlag Bern, 4. Auflage 1997.

R. Geipel, K. Kreisel: Physik 10/I. Buchners Verlag Bamberg 1997.

C. Grupen: Grundkurs Strahlenschutz. Vieweg Verlag Braunschweig, 2. Auflage 2000.

H. Kiefer, W. Koelzer: Strahlen und Strahlenschutz. Springer Verlag Heidelberg, 3. Auflage 1992, vergriffen.

H. Krieger: Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz. Teubner Verlag Stuttgart, Band 1, 5. Auflage 2002. Band 2, 3. Auflage 2001.

Krieger: Grundlagen der Strahlenphysik und des Strahlenschutzes. Teubner Verlag Stuttgart 2004.

R. Lehmann, H. Landfermann, A. Junkert, U. Schöppler: Radon-Handbuch Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Bonn 2001.

K. H. Lieser: Einführung in die Kernchemie. Verlag Chemie Weinheim. 3. Auflage 1991.

W. Minder: Geschichte der Radioaktivität, Springer Verlag Heidelberg 1981, vergriffen.

G. Pfennig, H. Klewe-Nebenius und W. Seelmann-Eggebert: Karlsruhe Nuklidkarte. 6. Auflage 1995. Korrigierter Nachdruck 1998. Forschungszentrum Karlsruhe.

H. von Philipsborn, R. Geipel: Neuartige Schul- und Praktikumsexperimente zur Radioaktivität. Physikalische Blätter 55 (1999) 67 - 69.

H. von Philipsborn, R. Geipel, U. Dollinger, G. Just, C. Klinger: Uranfarben Urangläser Uranglasuren - radiometrisch technisch historisch. Band 46 Schriftenreihe Bergbau- und Industriemuseum Theuern 2005.

A. Siehl (Hrsg.): Umweltradioaktivität. Ernst & Sohn Verlag Berlin 1996.

Strahlenschutzgesetz (Schweiz). Herausgegeben von der Bundeskanzlei, 2000. Vertrieb: EDMZ 3003 Bern.

H.-M. Veith: Strahlenschutzverordnung, Neufassung 2001. Textausgabe mit einer erläuternden Einführung. Bundesanzeiger Verlag Köln 2001.

H.-G.Vogt, H. Schultz: Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes. Hanser Verlag München, 3. Auflage 2004.

J. Wagner: Röntgenverordnung. Text mit Einführung und Materialien. Bundesanzeiger Verlag Köln. 5. Auflage 2002.

Personenregister

Becquerel, H. 3, 5, 9, 39, 59	Klaproth, M. H. 22
Chadwick, J. 175	Meitner, L. 175
Compton, A. H. 81	Müller, W. 72
Curie, M. 3, 5, 40	Röntgen, W.C. 2, 5, 9, 44, 56, 59, 60
Einstein, A. 2, 74	Rutherford, E. 9, 156, 175, 223
Elster, J. 9	Sievert, R. 5, 38, 51
Geiger, J. W. 69, 72	Soddy, E. 9
Geitel, H. 9	Stokes, G. G. 59
Giacconi, R. 8	Straßmann, F. W. 175
Gray, L. H. 5, 45	Wilson, C. T. R. 66
Hahn, O. 175	
Heß, V. F. 4, 9, 29	
Hevesy, G. K. von 220	
Hofstadter, R. L. 63	
Joliot-Curie, J. F. und I. 175	

Sachregister

*Kapitelteile sind fett gedruckt,
Querverweise kursiv.*

- Abschirmung 29, 32-34, 47,
137-138, 178, 186, 227
- Absorption 45, 54, 77-84, 128-130,
160, 180-182, 186, 226, s.a.
Selbstabsorption
- Abstand 37, 78, 93, 111, 178, 226
- Aerosole **118-119**, 145, 148, 169
- Aktivierungsanalyse 187, 188
- Aktivität, Aktivitätskonzentration
39-41, 9, 10, 36, 49, 90, 93, 112,
123-126, 131, 145, 210, 212,
226-227
- Aktivität, spezifische **43-44**, 40
- Aktivitätsangaben **41-42**
- Aktivitätsmessungen, schnelle
113-115, 117
- Aktivkohle 119, 167, 210
- Aktivkohle-Exposimeter **158-160**
- ALARA Prinzip **230-231**
- Albedo, -Dosimeter 185
- Alpha-Plateau 71, 109, 138
- Alphasonde 115, 139
- Alphaspektrometrie **138-140**, 86,
123, 153, 172
- Alphastrahler, Alphastrahlung,
Alphateilchen 8, 50, 77-78, 109,
144, 146, 157, 160, 176, 182,
195, 217,
Messung **138-139**, 58, 86, 110,
115, 118, 120, 160,
Wechselwirkung **86**
- Alphazerfall 12, 24, 43, 156, 165,
176
- Altersbestimmung, radiometrische
223-224, 28, 30
- Anregung 54, 55, 64, 65, 82, 85,
180, 216
- Antikoinzidenzschaltung 138, 139
- Antineutrino 12, 175
- Äquivalentdosis **50-52, 191**,
196-198, 186, 190, 234, s.a.
*Richtungs-, Umgebungs-Äqui-
valentdosis*
- Arbeiten, StrlSchV 199, 202
- Atemtraktmodell 214
- Atomkern **11**, 3, 9, 10, 39, 42, 85,
174-176, 180-183
- Aufenthaltsdauer 51, 169, 208,
226-227, 229
- Auflösung 94-95, s.a. *Energie-,
numerische-, Orts-, Zeitauflösung*
- Auger-Elektronen 11, 13
- Ausbeute, 32, 61, 81, 118, 125-127,
130-132, 153-154, s.a. *Effizienz*
- Auslösezähler 69
- Ausscheidungen, Analyse 200,
210-213
- Autoradiographie **119-122**, 26-27,
56, 95
- Baddeleyit 20, 21
- barn (Einheit) 181-184
- Baryt 186
- Bauxit 18, 21, 98
- Becquerel (Einheit) 39, 49, 230
- Becquerel-Monitor **117-118**
beruflich Strahlenexponierte
33, 56, 113, 152, 190, 199-201,
203, 212, 226, 228, 230, 231,
s.a. *Strahlenschutz*
- Beta-Lights 217
- Beta-Plateau 71, 109, 138
- Betareflektor 85, 114
- Betastrahler, Betastrahlung, Beta-
teilchen 8, 50, 65, 77, 85, 195, 227,
Messung 102, 104, 109, 113, 115,
118, 120, 153, 202,
Reichweite **83-84**, 102,
Schwächung **83**,
Selbstabsorption **84**,
Streuung **84**,
Wechselwirkung **82**
- Betazerfall 12, 13, 175
- Beugung 57, 189, 216
- Bewertungen **228-230, 233-234**, 185
- Bildgebende Verfahren **119**
- Bildschirmgeräte, s. *Störstrahler*
- Blei 118, 130, 137, 186, 204, 223,
227
- Boden 16, 44, 166, 232
- Bohrlochdetektor 132
- Bremsstrahlung **85**, 31-33, 46, 82,
83, 86, 124
- Castor, s. *Neutronen*
- Comptoneffekt **81**, 129, 130
- Coulomb/kg (Einheit) 44
- cpm, cps (Einheit), s. *ipm, ips*
- Curie (Einheit) 40, 43, 216

Detektoren 54-60, 78, 95, 96, 150, s.a. *Gasionisations-, Halbleiter-, Kernspur-, Proportional-, Szintillationsdetektoren*,
 deterministische Strahlenwirkungen **192, 52**
 Dosen, kleine , s. *Dosisbereich*
 Dosimeter, s. *Aktivkohle-, Albedo-, elektronische-, Eisensulfat-, Elektret-, ESR-, Fricke-, Film-, Fingerring-, Glas-, Kernspur-, Stab-, Orts-, Personen-TLD-Dosimeter, s.a. Exposimeter*
 Dosimetrie 38
 dosimetrische Modelle 213
 Dosis, Dosisleistung 44, 15, 38, 51, 190, 191, 231, s.a. *Äquivalent-, effektive -, Energie-, Folge-, Haut-, Individual-, Ionen-, Knochen-, Kollektiv-, Körper-, Oberflächen-Personen-, Organ-, Orts-, Personen-, Richtungs-Äquivalent-, Tiefen-, Personen-, Umgebungs-Äquivalentdosis*
 Dosisbereich, niedriger 7, 193, 194, 225, 230
 Dosisgrößen **191**
 Dosiskoeffizienten **212-214**, 17, 125, 170, 196, 208, 233
 Dosisleistung, s. *Dosis*
 Dosisleistungskonstante 39, 52
 Dosis-Messgrößen **190, 191, 194**, 50-51
 Dosisverteilung, räumliche, zeitliche 34, 51, 205
 Dosis-Wirkungs-Beziehung 192, 194, 233
 DU = depleted uranium 22
 Durchleuchtungen 33, 56, 216
 Effekte ionisierender Strahlung elektrische **55, 64**, optische **55** physikalische **54** thermische **74**
 effektive Dosis **195-196, 207-209**, 15, 50, 170, 198-201
 effektive Folgedosis 191, 194, 213
 Effizienz 49, 54, 78, 85, 91, 93, 98, 109, 114, 115, 130, 209, s.a. *Ausbeute*
 Eisensulfatdosimeter 57
 Elektret-Dosimeter 163
 elektromagnetische Strahlung 2, 3, 8, 31, s.a. *Gamma-, Röntgenstrahlung*
 Elektrometer 55, 69, 156, 206
 Elektronenspinresonanz, ESR-Dosimeter **73**
 Elektronen 8, 12, 13, 31, 50, 54, 82, 128, s.a. *Photoeffekt*
 Elektronenstrahlung 82, s.a. *Betastrahlung*
 Elektronenvolt (Einheit) 2
 elektronische Dosimeter **207**, 203
 Elektrostatische Ladungseinheit esu 45, 145
 Eman (Einheit) 146, 148
 Emanation 67, 141, s.a. *Radon*
 Empfindlichkeit, Alpha-, Beta-, Gamma- **109-110**, s.a. *Ausbeute*
 Endfensterzählrohr 110
 Energie 1, 2, s. *Strahlungsenergie*
 Energieauflösung **73, 95, 126, 130, 134**
 Energiedosis **45-46**, 50, 74, 75, 100, 191, 196
 Ereignisrate 36, 39, 49
 Exposimeter s. *Radon*
 Exposition (Größe) s. *Radon*
 Exposition, s. *Strahlenexposition*
 Fallout 28, 136
 Fehler, s. *Standardmessunsicherheit*
 Filmdosimeter **203-205**
 Filme 6, 64, 94, s.a. *Autoradiographie, Kernspurdosimeter, Photofilme*
 Fingerringdosimeter **205**
 Flächenmasse 79, 83-86, 102, 104, 108, 109, 111, 116, 138, 204
 Fliesen 26, 27, 98, 122
 Fluoreszenz (optische) **59-60**, 25, 58, s. a. *Röntgenstrahlung*
 Fluorit 21, 57, 59, 63, 98
 Flüssigszintillometrie **118**, 159, 162
 Folgedosis, s. *effektive -, Organfolgedosis*
 Folgeprodukte, s. *Radonzerfallsprodukte*
 Freigrenzen, s. *Grenzwerte*
 Frickedosimeter, s. *Eisensulfat*
 Gammakamera 119
 Gammaquanten, s. *Photonen, Gammastrahler*

Gammaskpektrometrie **123-137**
 Gammastrahlenkonstante, spezifische 37
 Gammastrahler, Gammastrahlung 8, 13, 44, 46, 50, 65, 75, 77, 177, 195, 197, s.a. *Photonenstrahlung*
 Anwendungen 216-220
 Messung 101-103, 105-106, 109-111, 202-207,
 Ganzkörperzähler 211
 Gase, Messungen 118-119
 Gasglühstrümpfe 18, 20, 28, 202
 Gasionisationsdetektoren **67-69**, 108
 Geiger-Müller-Zähler **72, 116**, 49, 69, 105-106
 Geothermie **74**
 Germanium (Detektor) 73, 129-130
 Gesamtkörperaktivität 17, 30
 Gewebeäquivalent 100, 102, 104, 196, 205, 207, 234
 Gewebe-Wichtungsfaktoren **195-196**
 Glasdosimeter **206**
 Glasfaserfilter 114, 153, 163, 164, 172, 210
 Gleichgewicht, radioaktives 24, 41-42, 154, 164, s. a. *Radon*
 Gleichgewichtsäquivalente, Radonkonzentration 146-147, 151, 169
 Gleichgewichtsfaktor, s. *Radon*
 Granit 16, 18, 21, 98, 111, 167, 171
 Gray (Einheit) 34, 38, 45, 46, 75, 195-196
 Grenzwerte **201, 202**, 50, 108, 173, 178, 190, 208, 230, 231
 Großflächenmonitore **112-113**
 Großflächenproportionalzähler **108**
 Halbleiterdetektoren **128-130**, 73, 139, 150, 154, 186, 209
 Halbwertsschichtdicke (für Photonen) **79**
 Halbwertszeit, biologische 43, 213
 Halbwertszeit, physikalische **42-43**, 10, 36, 51, 88, 124, 158
 Hautdosis 22, 100, 104, s. *Oberflächen-Personendosis* 198
 Heiße Teilchen 57, 94, 120, 121
 Helium 12, 24, 30, 223
 Höhenstrahlung **29-30**, 9, 14-16, 38, 67, 175, 202, 234, s.a. *kosmische Strahlung*
 ICRP 15, 192, 193, 212
 ICRU Weichteilgewebe, Kugel 196-198
 Impulsrate 48, 49, 71, 83, 87, 89, s.a. *Zählrate*
 Individualdosis **193**
 Ingestion 78, 209, 210, 212, 214, 228
 Inhalation 78, 147, 169, 172, 208-210, 212, 219, 228
 Inkorporationsüberwachung **209**, 190, 211
 innere Konversion, s. *Konversion innere*
 Instabilität von Atomkernen 9, 11, 14, 48
 Integration, zeitliche 100, 120
 Ionendosis, Ionendosisleistung **44-45**, 70, 103, 145
 Ionisation **85**, 44-45, 55, 64-73, 80, 82-86, 108, 150, 166, 216
 Ionisationskammer **69-70, 103-105**, 66, 68, 128, s.a. *Stabdosimeter*
 Ionisationsrauchmelder 98, 216-217
 Ionisationsstrom 44, 69, 70, 162
 Ionisationsvermögen 67, 108
 ionisierend, dicht, locker **65-66**
 ionisierend, direkt, indirekt **65-66**
 ionisierende Strahlung **2, 3, 5**, 44
 Ionisierungsarbeit, -energie 46, 67, 73, 128, 130, 157
 ipm, ips (Einheiten) 38, 40, 47, 49, 110
 Isobare, Isomere, Isotone 14
 Isotope **11, 14, 182, 220, 223, 228**
 Kalibrierfaktoren **48-50**, 93, 111, 112, 115, 159-161, 209
 Kalibrierstrahler **220-221**, 86, 131-132, 226
 Kalibrierung **110-112, 131-132**, 203
 Kalium-40 **16-17**, 15, 95, 210
 Kathodenstrahlung 33, 58, 82
 K-Einfang 11, 13, 16, 222
 Kennzeichnung von Quelle, Strahlung und Wirkung **36-39**
 Keramik, uranglasierte 26, 27, 122
 Kerma **46**
 Kernenergie 2, 18, 22, 27, 28, 174, 178, 181
 Kernladungszahl 9, 11, s. a. *Ordnungszahl*
 Kernphotoeffekt **82**, 177

Kernreaktionen 176-177, 180, 182-184
 Kernspaltung **28-29**, 22, 175, 177, 178, 180
 Kernspuren **58**, 150, 160, 224
 Kernspurdosimeter, -exposimeter **160-161**, 184, 209
 Kernstrahlung 3, 8, **216-221** s.a. *Alpha-, Beta-, Gammastrahlung, Wirkungen und Anwendungen*
 Kernzerfall 28, s. *Alpha-, Betazerfall*
 Knochendosis 100, 104, s. *Tiefen-Personendosis* 198
 Kohlenstoff-14 **30**, 14, 112, 118, 223-224
 Kollektivdosis **193-194**, 195, 230
 Kompartimentmodell 213
 Kontaminationen **108**, 43, 97, 135-137, 200, 201, 209, 210, 229, 232
 Kontaminationsmonitore 107, **108-113**, 95, 99, 151, 227, 229
 Kontrollbereich 199, 200
 Konversion, innere 11, 13, 222, 227
 Konversion von Neutronen 182, 183, 185, 186, 208
 Körperdosis 50, **190-192, 194-196**, 199, 201, 210
 Kosmische Strahlung **29-30**, 4, 9, 36, 138, 202, 233, 234, s.a. *Höhenstrahlung*
 Krebs 2, 141, 147, 151, 168, 169, 172, 192-194, 206, 219, s.a. *Tumore*
 Ladungsträger **73**, 44, 54, 65, 67-69, 71, 108, 128, 129, 157
 Lebensmittel 95, 117, 125, 210, 212, 219, 231
 Leuchtfarben 26, 98, 217
 Leuchtschirme **60**, 56, 59
 Lichtverstärker 47, 60, 61, 127, s. a. *Photomultiplier*
 Linearbeschleuniger **33**, 26
 Linear-No-Threshold-Modell LNT 192-194
 Lineares Energietransfervermögen LET 66, 161, 197
 Linienspektren 12, 124
 Low-Level-Messgerät 105, 107, 113
 Low-Level-Messungen **137**
 Lucas-Kammer 60, 150, 152, 154, 163
 Luftwechselrate 34, 172
 Lumineszenz **58-59**, 56, 61, 127
 Lumineszenz-Radiographie, digitale **64**, 120
 Lungenkrebs 33, 34, 53, 141, 147, 151, 168, 169, 172
 Mache (Einheit) 145
 Marinelli-Messschale 118, 132, 137, 163
 Massenphotoabsorptionskoeffizient 81, 129, 180
 Massenschwächungskoeffizient 79, 83
 Massenzahl, s. *Nukleonenzahl*
 Materie 1, 2, 6, 174
 Matrix 36, 40, 41, 84, 96
 Memory effect 146, 166
 Messgeräteparameter **96-97**
 Messgrößen, s. *Dosis-Messgrößen*
 Mess-Systeme, Optimierung 93
 Messtechnik 47, 48, 57
 messtechnische Charakterisierung **77-78**
 Messungen, s. *Alpha-, Beta-, Gamma-, Röntgenstrahlung, Neutronen, Radon*
 Messungen, Signifikanz **90-92**, 113, 164
 Messwerte, Statistik **87-90**, 92, 94, 106, 155
 Messziele **93-96**
 Milch 17, 40, 84, 98, 210
 millistat (Einheit) 145
 Monazit 18, 21, 96, 98, 133
 Nachweisgrenze 102, 131, 211
 Natriumiodid (Detektor) 47, 63, 118, 211
 Nebelkammer **66-67**, 10
 Neutrino 12, 13
 Neutronen, Neutronenstrahlung **174-189**, 6, 9, 22, 28, 30, 65, 77
 Abschirmung **186**
 Anwendungen **187-189**
 Castor Transporte **178**
 Eigenschaften Vorkommen **174-175**
 Einfang 180, 181
 Klassifizierung **178-179**
 Messung **183-184**
 Moderation 181, 186
 Nachweisprinzipien **182-183**
 Personendosimeter **184-186**
 Quellen **176-178**

Strahlenschutz **186**,
 Streuung 180-181, 186, 189
 thermische 179, 183
 Wechselwirkungen **179-181**
 Wirkungsquerschnitte **181-182**
 Neutronenzahl 11, 12, 14
 Nicht-Gleichgewicht, s. *Gleichgewicht*
 nicht-ionisierende Strahlung **2**
 Niedrigdosisbereich 193
 Nukleonenzahl (Massenzahl) 11,
 14, 23, 28, 43, 174, 177, 183, 222
 Nuklide **11**, 176, 182
 Nuklidkarte **13-14**
 nuklidspezifisch 17, 42, 63, 73, 93,
 95, 111-112
 Nulleffekt **47**, 100, s.a. *Umgebungsstrahlung*
 numerische Auflösung 90-92
 Oberflächen-Personendosis 22, 198
 Optimierung e. Mess-Systems **93**
 Ordnungszahl (Kernladungszahl)
 9, 11, 32, 49, 54, 60, 77, 79-81,
 83, 84, 86, 186, 205
 Organodosis, Organfolgedosis
194-195, 192, 202, 213
 Ortsauflösung 57, 95, 121
 Ortsdosimeter **202-203**
 Ortsdosis, Ortsdosisleistung
100-103, **191**, **197-198**, 29, 34,
 37, 51, 91, 99, 105, 106, 178, 200,
 227, 229, s.a. *Äquivalentdosis*
 Paarbildung **81-82**, 127
 Peak/Comptonverhältnis 130, 131
 Pechblende 21, 25, 57, 98, 121,
 133, 226, 227
 Personendosis **198**, 50, 191, 200,
 201, 227, s.a. *Äquivalentdosis*,
Oberflächen-, Tiefen-Personen-
dosis
 Personendosimeter **202-207**, 198,
 für Neutronen 184-186
 Philion-Platte, s. *Radon*
 Phoswich Detektor 101
 Photoeffekt **80-81**, 60, 61, 62, 73,
 81, 127, 129, 130
 Photofilme **56-57**, 61, s.a. *Auto-*
radiographie, *Filmdosimeter*
 Photolumineszenz **63**, 64, s.a.
Glasdosimeter
 Photomultiplier 60-62, 64, 101-103,
 110, 113, 115, 118, 127-128, 152
 Photonen, Photonenstrahlung
 34, 62, s.a. *Gammastrahlung*,
Röntgenstrahlung
 Bewertung, Eigenschaften 46, 50,
 65, 66, 75, 195
 Energie (Quantenenergie),
 s. *Strahlungsenergie*
 Schwächung, Wechselwirkung
78-81
 Photopeak 130, 131
 Pilze 98, 120, 122, 132, 214
 Polymerisation 218
 Polystyrol 156
 Porzellan, mit Uranfarben 25, 26
 Positron 12, 30, 77, 81, 82, 210
 Potentielle-Alpha-Energie-Konzentration
147-148, 153
 Pottasche (Kaliumcarbonat) 17, 111
 Probengeometrie 131-132
 Probennahme **132**
 Probensammlung **97-98**
 Probenvorbereitung **132**
 Proportionaldetektor, -zähler, **71-72**,
 67-69, 108-109, 114, 121, 153,
 183, 234
 Protonen, Protonenzahl 11, 14, 30,
 77, 175
 Prüfstrahler, s. *Kalibrierstrahler*
 Pulshöhenspektren 62, 85, 129
 Qualitätsfaktoren **196-197**, 50, 175,
 233, s.a. *Strahlungs-Wichtungsfaktoren*
 Quantenenergie, s. *Strahlungsenergie*
 Quarzsand 18, 53, 96
 Quellen **3-4**, 33, 36-37, 107, 142
 rad (Einheit) 46, 51
 Radikale 65, 73
 radioaktiver Zerfall, s. Zerfall
 radioaktives Gleichgewicht,
 s. *Gleichgewicht*
 Radioaktivität, Entdeckung, Name
 1, 3, 39, 59, 120
 radiogen, s. Helium, Wärme
 Radiographie 187, 189, 216
 Radiolyse 55, 65, 219
 Radiometrie 38, 77, 97
 Radionuklidbatterien 135, 217
 Radionuklide 11, 39
 Kenndaten **222**
 kosmogene 15, 30
 künstliche **28-29**, 187

natürliche 14
 primordiale 14, 15
 Radium **24-26**, 40, 98, 142-144,
 161-165, 175, 176, 217, 219
 Radium im Mineralwasser **170-172**
 Radon **141-173**, 6, 15, 16, 97
 Bäder **172-173**, 153, 170, 219
 Baustoffe **167**, 143
 Bewertung **169-170**, **207-209**, 160
 Exhalation **165-166**, 18
 Exposimeter 146, 151, **158-161**,
 209
 Exposition (Größe) 146, 169-170,
 208
 Gleichgewichtsfaktor **148-149**,
 151, 154, 164, 168-170, 173
 Herkunft **142-143**
 im Boden **166**
 in Wasser **161**, **162**
 in Wohnräumen **167-170**
 Messungen 114-116, 118, **149-**
164, 166, 169, 172, 173
 Phillion-Platte **156-158**, 134, 139,
 140, 144
 radiometrische Größen **145-148**
 Zerfall, Zerfallsprodukte
 (= Radontöchter) **143-145**,
 Rate (Einheit) 38, *s.a. Zählrate*,
Zerfallsrate
 Referenzstrahler, *s. Kalibrierstrahler*
 Regel der fünf A's 226
 Reibungselekttrizität 156
 Reichweite 43, 77, 83, 84, 86, 102,
 138, 189
 Relative Biologische Wirksamkeit
 RBW 50, 195
 rem (Einheit) 51
 Reparaturmechanismen 194
 retrospektive Radondosimetrie 115
 Richtungs-Äquivalentdosis 99, 197
 Risiko, *s. Strahlenrisiko*
 Röntgen (Einheit) 44, 45, 51
 Röntgenröhren 31, 36, 37, 45
 Röntgenstrahlung **31-33**, 2, 3, 8,
 44, 50, 58, 60, 65, 80, 124, 217
s.a. Bremsstrahlung
 Anwendungen **215-216**, 56,
 Messungen 61, 95, 102, 105,
 129, 203
 Röntgenverordnung 203, 230, 236
 Rotschlamm 18, 21, 98
 Sandstein 21, 112
 Sättigungsbereich 68
 Schwächung, *s. Alpha-, Beta-,*
Gamma-, Photonenstrahlung,
Absorption
 Schwarzschiefer 21
 Schweißelektroden 20, 202
 Schwellenwert 192, 193
 Selbstabsorption **84**, 20, 86, 93,
 111, 115, 125, 138, 153, 157, 213
 Sievert (Einheit) 50-52, 75
 Sibyllenbad 153, 173
 Signifikanz zählender Messungen
90-92, 113, 164
 Silicium (Detektor) 73, 129, 139,
 150, 154
 Spaltprodukte 28-29, 177
 Spaltspuren 28, 224
 Speicherleuchtstoffe 64
 Spektrometrie, *s. Alpha-, Gamma-,*
Zeitspektrometrie
 Sperrbereich 199-200
 spontan (Zerfall) 9, 28
 Spontanspaltung 28, 224
 Stabdosisimeter **206-207**, 69
 Standardabweichung 88, 90
 Standardmessunsicherheit
 88-92, 229
 Statistik, *s. Messwerte Statistik*
 statistischer Charakter **10**, 39, 59
 stochastische Strahlenwirkungen
192, 193, 230, 231
 Störstrahler 33, 85
 Stoßionisation, *s. Ionisation*
 Strahlenbelastung, 51, 235
s. Strahlenexposition
 Strahlenchemie 218
 Strahlendosis, *s. Dosis*
 strahlenexponiert, *s. beruflich*
Strahlenexponierte
 Strahlenexposition 7, 30, 50, 52,
 125, 175, 190-201, 225, 226,
230-231
 natürliche **14-15**, 17, 141, *s.a.*
Exposition
 Strahlenrisiko (Abschätzung) 7,
 192-194, 196, 225, 226, 230,
233-234
 Strahlenschäden, *s. Kernspuren,*
Strahlenwirkungen
 Strahlenschutz 4, 7, 25, 32, 50, 56,
 77, 78, 191, 186, 225
 Grundsätze **230-231**

praktischer **226-228**, 169, 210,
 Vorsorge **232**, 192, 199, 235
s.a. beruflich Strahlenexponierte
 Strahlenschutzkommission 194,
 196, 231
 Strahlenschutzverordnung StrlSchV
199-202, 26, 34, 40, 42-44, 99,
 108, 152, 154, 168, 169, 170,
 173, 230-231, 236
 Strahlentherapie 33, 34, 53, 180,
 187, 188, 206, 219
 Strahlenwirkungen, *s. Kernstrah-*
lung, deterministische, stochasti-
sche **192-193**
 Strahlung, ionisierende/nicht-
 ionisierende 2, 3
 Strahlung, *s. Alpha-, Beta-, Brems-,*
elektromagnetische, Elektronen-,
Gamma-, Höhen-, kosmische -,
ionisierende, Kern-, Neutronen-,
Röntgen-, Streu-, Teilchen-,
Umgebungsstrahlung
 Strahlungsarten 8, 9, 11, 194, 195,
 197, 233
 Strahlungsenergie 1, 2, 31, 33, 45,
 51, 54, 74, 75, 77, 81, 96, 124,
 127, 197, 216, 217
 Strahlungsfeld Messungen **99**, 37,
 197, 198
 Strahlungskalorimeter **74-75**, 55
 Strahlungs-Wichtungsfaktoren
194-195, 50, 197, 233, *s.a. Quali-*
tätsfaktoren
 Streustrahlung, Streuung 32, 37,
 49, 78-81, 84, 85, 93, 180, 181, 204
 Streuung, *s. Messwerte, Statistik*
 Strom-Spannungskennlinie **67-69**
 Szintigraphie 119
 Szintillation 10, 59, 61
 Szintillationszähler **61-63**, **101-103**,
 117, **126-127**, *s.a. Flüssigszintillo-*
metrie
 Tätigkeiten, StrlSchV 199-201,
 210-211
 Teilchenstrahlung 8-9, *s. Alpha-,*
Beta-, Neutronenstrahlung
 Teilkörperzähler 211
 Thermolumineszenz **63**, 57, 224
 Thermolumineszenzdosimeter TLD
204-205, 184-185
 Thorium **17-20**, 14-15, 41, 74,
 133-134, 142, 202, 210
 Thoron, Thoronzerfallsprodukte 15,
 18-19, 67, 140, 142, 157-158, 166
 Tiefen-Personendosis 198
 Torbernit 22, 98
 Totzeit 72, 126
 Tracermethoden 220
 Transmutation 1
 Trinkwasserverordnung 164
 Tschernobyl 4, 17, 28, 43, 94, 98,
 101, 112, 117, 120-122, 135, 169,
 228, 229, 232
 Tumore, 26, 34, 188, 189, 192,
 219, 220, 225, 230 *s.a. Krebs*
 Überwachungsbereich 199
 Umgebungsstrahlung 10, 37, 45,
 47, 93, 100, 102, 130, 137-139,
 233
 Umgebungs-Äquivalentdosis 99,
 197
 Unfälle 119, 135, *s.a. Tschernobyl*
 Uran **17-29**, 44, 74202, 223-224,
 in Chemie, Kunst, Medizin,
 Technik **24-27**,
 Kernphysik **22**, 28, 29, 177,
 Vorkommen **20-22**, 134, 147, 152,
 167
 Uranerz, Uranminerale 20, 21, 24,
 59, 98, 112, 120, 121, 133, *s.a.*
Monazit, Pechblende, Torbernit,
Zirkon
 Uranfarben, Urangläser,
 Uranglasuren 25-27, 98, 122
 Varianz 88
 Verfärbungen **57**, 55
 Vernichtungsstrahlung 13, 82, 210
 Verstärkerfolien **60-61**
 Vielkanalanalysator 62, 131
 Wärme, *s. Geothermie, Radio-*
nuklidbatterien
 Wasser, *s. Radon, Radium*
 Wechselwirkungen **5**, **76-86**, 126
s.a. Alpha-, Beta-, Gamma-,
Neutronen-, Photonenstrahlung
 Wichtungsfaktoren, *s. Gewebe-,*
Strahlungs-
 Wirkungen 53, *s. Effekte, Kern-*
strahlung, Strahlenwirkungen
 Wirkungsquerschnitt, *s. Neutronen*
 Wischtest 108, 114
 Working Level (Einheit) **147-148**
 Working Level Month (Einheit) 147
 Xenongas 110, 115

yellow cake 24
Zählrate **47-49**, 109-112, 126, s.a. *Impulsrate*
Zählrohre **105-106**, 70, s.a. *Endfenster-*, *Geiger-Müller-Zählrohr*, *Proportionalzähler*
Zeitauflösung 73, 95, 153
Zeitspektrometrie 115, 124, 158
Zerfall, radioaktiver **8-16**, **18-25**, **39-43**
Zerfallsarten **11-13**
Zerfallsgesetz **9-10**, 223
Zerfallskonstante 9, 11, 42
Zerfallsprodukte, s. *Radon-*
Zerfallsrate 30, 39, 48, s.a. *Aktivität*
Zerfallsreihe 14, 17-19, 23-24, 41, 120, 133, 142-144, 157-158
zielgerichtete Nutzung, StrlSchV 199
Zinksulfid 26, 60, 61, 101, 110, 115, 150, 152, 217, 234
Zirkon 18, 20, 21, 96, 98, 165, 224
Zitronenmelisse 17

Radionuklidregister

für Kohlenstoff, Kalium, Radon, Radium, Uran und Zerfallsprodukte, Thorium und Zerfallsprodukte siehe Sachregister

s.a. *Kenndaten Tabelle* S. 222

Americium-241: 28, 98, 112, 176, 211, 217, 227
Argon-41: 119
Barium-140: 28
Beryllium-7: 30
Cäsium-134, -137: 17, 28, 42, 98, 112, 115, 117, 178 210, 214, 218, 219, 221, 226, 228
Californium-252: 177
Chrom-51: 112
Cobalt-57, -60: 41, 112, 211, 218, 219
Curium-242, -244: 178, 217
Iridium-192: 218
Iod-123, -125, -131: 10, 28, 42, 43, 51, 102, 112, 211, 228
Krypton-85: 28, 119
Phosphor-32: 112, 118
Plutonium-238: 28, 211, 217
Rubidium-87: 15
Ruthenium-103, -106: 28, 121, 178
Sauerstoff-13, -15, 34
Schwefel-35: 35, 118
Selen-75: 112
Strontium-89 -90: 28, 112, 217
Technetium-99: 112
Tritium H-3: 14, 30, 118, 119, 177, 184, 217
Xenon-133: 119
Zirkonium-95: 28

www.gesundheit.bayern.de

Herausgeber: Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV)
Rosenkavalierplatz 2, 81925 München

Internet: www.stmugv.bayern.de
E-Mail: poststelle@stmugv.bayern.de

Stand: April 2006
Druck: Medienhaus Mintzel-Münch GmbH, Hof
© StMUGV, alle Rechte vorbehalten

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier

Diese Druckschrift wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbenden oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Bei publizistischer Verwertung - auch von Teilen - Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars erbeten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Broschüre wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Diese Broschüre wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden.



Bayern Direkt ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Telefon 0 1801/20 10 10 (4,6 Cent pro Minute aus dem Festnetz der Deutschen Telekom) oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.