

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|---|-------|
| I. Grundbegriffe des Atomaufbaus und Möglichkeiten zur Herstellung von Radionucliden | 1 |
| A. Atomkernaufbau und Isotopie | 1 |
| 1. Protonen und Neutronen als Kernbausteine | 1 |
| 2. Symbolische Schreibweise für Atomkerne | 2 |
| 3. Begriff der Isotopie, stabile Isotope | 2 |
| 4. Isotopenhäufigkeit | 3 |
| 5. Atomgewicht und Isotopengewicht | 6 |
| 6. Massendefekt, Bindungsenergie | 7 |
| B. Künstliche Herstellung von radioaktiven Atomkernen | 10 |
| 1. In der Natur vorkommende, radioaktive Atomkerne | 10 |
| 2. Erste künstliche Atomumwandlung | 13 |
| 3. Verschiedene Möglichkeiten zur künstlichen Erzeugung radioaktiver Atomkerne (Radionuclide) | 14 |
| a) Umwandlung stabiler Atomkerne in radioaktive durch Beschuß mit α -Teilchen | 14 |
| b) Erzeugung von radioaktiven Atomkernen mit Hilfe von hochbeschleunigten, geladenen Teilchen | 15 |
| c) Radioaktive Spaltprodukte | 15 |
| d) Erzeugung von Radionucliden durch Beschuß mit Neutronen | 18 |
| e) Atomumwandlung mittels γ -Strahlen | 19 |
| 4. Gleichzeitige Erzeugung mehrerer Arten von radioaktiven Atomkernen | 19 |
| 5. Trägerlose Substanzen | 21 |
| 6. Umwandlungswahrscheinlichkeit | 21 |
| a) Definition des Wirkungsquerschnittes | 21 |
| b) Erforderliche Mindestenergie von geladenen Teilchen | 22 |
| c) Wirkungsquerschnitt von Neutronen | 24 |
| 7. Van de Graaff-Generator, Kaskadengenerator | 25 |
| 8. Das Cyclotron als Teilchenbeschleuniger | 26 |
| 9. Physikalische Vorgänge im Kernreaktor | 29 |
| II. Wechselwirkung von α -, β - und γ -Strahlung mit Materie | 33 |
| A. Anregung und Ionisation | 33 |
| 1. Anregung von Atomen | 33 |
| 2. Ionisation | 34 |
| 3. Primäre, sekundäre und totale Ionisation | 35 |
| 4. Energieverlust von Elektronen durch Ionisation | 35 |
| 5. Ionisationsdichte, spezifische Ionisation | 35 |
| 6. Bildung von negativen Ionen | 36 |
| B. Streuung und Absorption von Elektronen | 36 |
| 1. Streuung von Elektronen | 36 |
| 2. Absorption monoenergetischer Elektronen | 37 |
| 3. Veränderung der Energieverteilung von Elektronen | 38 |

| | Seite |
|---|-------|
| C. Verhalten von Zerfallselektronen beim Durchgang durch Materie | 39 |
| 1. Vergleich mit monoenergetischen, geladenen Teilchen | 39 |
| 2. Maximale Reichweite von Zerfallselektronen | 39 |
| D. Verhalten von γ -Strahlung beim Durchgang durch Materie | 41 |
| 1. Absorption und Streuung von γ -Strahlung | 41 |
| a) Photoelektrischer Effekt | 42 |
| b) Compton-Effekt | 42 |
| c) Paarbildung | 43 |
| 2. Absorptionsgesetz | 43 |
| 3. Abhängigkeit der γ -Absorption von der γ -Energie und der Art des Absorber-materials | 43 |
| 4. Compton-Absorption und Compton-Streuung | 45 |
| 5. Energieverteilung der γ -Quanten | 45 |
| 6. Energieverteilung der Sekundärelektronen | 45 |
| 7. Zuwachsfaktor | 47 |
| E. Wechselwirkung von α -Strahlung mit Materie | 49 |
| III. Nachweisgeräte für radioaktive Strahlung | 52 |
| A. Ionisationskammer, Elektroskop, Proportionalzähler und Geiger-Müller-Zählrohr | 52 |
| 1. Ionisationskammer | 53 |
| a) Aufbau und Wirkungsweise | 53 |
| b) Messung der gesammelten elektrischen Ladung | 54 |
| c) Nulleffekt | 55 |
| 2. Elektroskop | 55 |
| a) Aufbau und Wirkungsweise | 55 |
| b) Durchführung der Messungen | 56 |
| c) Meßgenauigkeit und Nachweisempfindlichkeit | 57 |
| 3. Geiger-Müller-Zählrohr | 58 |
| a) Prinzipieller Aufbau eines Zählrohres, Zählrohrcharakteristik | 58 |
| b) Entladungsmechanismus beim Geiger-Müller-Zählrohr | 59 |
| c) Zeitlicher Verlauf des Zählrohrimpulses und der Zählrohrspannung. Begriff der Totzeit und Erholungszeit | 60 |
| d) Nachentladung beim Geiger-Müller-Zählrohr | 61 |
| e) Nicht selbstlöschende und selbstlöschende Zählrohre | 61 |
| f) Der Nulleffekt eines Geiger-Müller-Zählrohres | 62 |
| g) Lebensdauer von selbstlöschenden Zählrohren | 62 |
| h) Halogenzähler | 63 |
| i) Impulsverstärker zur Registrierung von Zählrohrimpulsen | 63 |
| 4. Proportionalzähler | 64 |
| B. Szintillationszähler | 66 |
| 1. Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise eines Szintillationszählers | 66 |
| 2. Nachweisempfindlichkeit des Szintillationszählers | 67 |
| a) Strahlenabsorption im Leuchtkristall | 68 |
| b) Geringe Intensitätsverluste des entstehenden Lumineszenzlichtes auf dem Wege zur Photozelle (Photomultiplier) | 69 |
| c) Eigenschaften des Photomultipliers | 69 |
| d) Großes zeitliches Auflösungsvermögen des Szintillationszählers | 70 |
| 3. Nulleffekt des Szintillationszählers | 70 |
| 4. Charakteristik des Szintillationszählers | 73 |

Inhaltsverzeichnis

| | VII |
|--|------------|
| | Seite |
| IV. Der radioaktive Zerfall | 73 |
| A. Zerfallsgesetz und Zerfallskurven | 73 |
| 1. Natürliche und künstliche Radionuclide | 73 |
| 2. Verschiedene Zerfallsarten | 73 |
| a) α -Zerfall | 74 |
| b) β -Zerfall | 74 |
| 3. Radioaktives Zerfallsgesetz | 74 |
| 4. Zerfallskonstante, Halbwertzeit, mittlere Lebensdauer | 75 |
| 5. Radioaktive Einheiten | 78 |
| 6. Gesamtzahl der radioaktiven Atomkerne eines Präparates | 78 |
| 7. Zerfallskurve für ein Gemisch von zwei oder mehr Arten von Radionucliden | 78 |
| a) Genetisch unabhängige Radionuclide | 78 |
| b) Genetisch voneinander abhängige Radionuclide | 79 |
| 8. Radioaktives Gleichgewicht | 80 |
| B. Umwandlungsarten eines Radionuclids beim β-Zerfall | 81 |
| 1. Energieverteilung der Zerfallselektronen beim β^- - und β^+ -Zerfall | 81 |
| 2. K -Einfang | 82 |
| 3. γ -Emission, Kern- γ -Strahlung | 83 |
| 4. Kernisomerie | 83 |
| 5. Innere Umwandlung | 83 |
| 6. Zerfallsschemata | 84 |
| C. Genauigkeit radioaktiver Messungen | 86 |
| 1. Statistische Meßgenauigkeit | 86 |
| a) Statistische Natur der Radioaktivität | 86 |
| b) Mittlerer statistischer Fehler | 88 |
| c) Gaußsches Fehler-Fortpflanzungsgesetz | 89 |
| d) Mittlerer statistischer Fehler einer Differenzmessung | 90 |
| e) Mittlerer statistischer Fehler für den Quotienten zweier Differenzen | 91 |
| f) Günstige Aufteilung der Gesamtmeßdauer auf Präparametremessung und Nulleffektmessung | 92 |
| g) Mittlerer statistischer Fehler für Ratemeter und Ionisationskammer | 93 |
| h) Statistische Reinheit | 94 |
| 2. Zählverluste durch begrenztes Auflösungsvermögen des Meßgerätes | 96 |
| a) Ermittlung der Zählverluste bei bekanntem Auflösungsvermögen | 96 |
| b) Direkte experimentelle Bestimmung der Zählverluste | 98 |
| c) Totzeitbestimmung mit Hilfe von zwei Präparaten | 99 |
| d) Verminderung der Zählverluste durch Verwendung von Untersetzern | 100 |
| 3. Systematische Fehlerquellen | 101 |
| V. Nachweis radioaktiver Strahlung | 107 |
| A. Allgemeine Bemerkungen zum Nachweis radioaktiver Strahlung | 107 |
| 1. Hohe Empfindlichkeit des radioaktiven Nachweises | 107 |
| 2. Relative und absolute Messungen | 107 |
| 3. Auswahl von Radionucliden | 108 |
| 4. Herstellung von Meßproben | 109 |
| B. Nachweis von β-Strahlung bei radioaktiven Präparaten in fester Form | 111 |
| 1. Einleitende Bemerkung | 111 |
| 2. Versuchsanordnung | 112 |
| 3. Abhängigkeit des Meßeffektes vom Abstand des Präparates vom Zählrohr | 112 |
| 4. Geometriefaktor, punktförmige und kreisförmige Präparate | 114 |

| | Seite |
|---|-------|
| 5. Absorption von β -Strahlen | 115 |
| a) Absorptionsgesetz | 115 |
| b) Gleichzeitige Bestimmung zweier Radionuclide in ein und demselben Präparat | 115 |
| c) Absorption der β -Strahlung im Zählrohrfenster und in der Luftsicht . . | 116 |
| d) Einfluß des schrägen Durchgangs der β -Teilchen durch Luftsicht und Zählrohrfenster | 118 |
| 6. Selbstabsorption von β -Strahlung | 118 |
| a) Begriffsbestimmung | 118 |
| b) Selbstabsorption bei dünner Präparatschicht | 119 |
| c) Dicke Präparatschicht | 119 |
| d) Selbstabsorption für verschiedene dicke Präparate | 120 |
| e) Berechnung des Selbstabsorptionskoeffizienten | 120 |
| 7. Selbststreuung | 121 |
| 8. Rückstreuung | 124 |
| C. Messung von β -Strahlen emittierenden Präparaten in flüssiger Form | 124 |
| 1. Vorteile der Methode | 124 |
| 2. Bestimmung der Aktivität kleiner Flüssigkeitsproben | 125 |
| 3. Messung von Flüssigkeitsproben von etwa 15 cm ³ Volumen | 125 |
| a) Veallscher Flüssigkeitszähler | 125 |
| b) Einfluß verschiedener Flüssigkeitsdichte auf den Meßeffekt | 127 |
| c) Nulleffekt des Veallschen Zählers | 128 |
| 4. Aktivitätsmessung großer Flüssigkeitsmengen | 128 |
| 5. Messung von sehr schwach radioaktiven Flüssigkeiten | 129 |
| D. Nachweis energieärmer β -Strahlung in gasförmigem Zustand (Messung von C ¹⁴ , H ³ oder S ³⁵) | 131 |
| 1. Vorteile und Nachteile des Gaszählers | 131 |
| 2. Geiger-Müller-Zählrohre als Gaszähler | 132 |
| 3. Proportionalzähler zur Ausmessung gasförmiger radioaktiver Präparate . . | 134 |
| 4. Herstellung gasförmiger C ¹⁴ - oder H ³ -Proben und Füllung des Gaszählers . | 134 |
| 5. Messung gasförmiger, radioaktiver Proben in der Ionisationskammer . . | 136 |
| E. Anwendung flüssiger Szintillatoren zur Messung von C ¹⁴ - und H ³ -markierten Substanzen | 138 |
| 1. Vorteile und Nachteile des Flüssig-Szintillationszählers | 140 |
| 2. Eigenschaften der Szintillationsflüssigkeit, Lösungsmittel, primäre und sekundäre Leuchtstoffe | 140 |
| 3. Verminderung der Nachweisempfindlichkeit durch Löschen des Phosphoreszenzlichtes (quenching) | 143 |
| 4. Nachweisempfindlichkeit | 145 |
| F. Nachweis von γ -Strahlung mit dem Geiger-Müller-Zählrohr oder dem Szintillationszähler | 146 |
| 1. Zweckmäßigkeit der Messung von γ -Strahlung | 146 |
| 2. γ -Nachweisempfindlichkeit | 147 |
| a) Von Geiger-Müller-Zählrohren | 147 |
| b) γ -Empfindlichkeit von Szintillationszählern | 149 |
| 3. Beispiel von γ -Messungen mit dem Geiger-Müller-Zählrohr oder dem Szintillationszähler | 149 |
| a) Thoriumbestimmung durch Absorptionsmessung weicher γ -Strahlung . . | 149 |
| b) Selbstabsorptionserscheinung bei γ -Strahlung | 150 |
| c) Abstandsgesetz bei γ -Strahlung | 151 |

| Inhaltsverzeichnis | IX |
|---|------------|
| | Seite |
| 4. γ-Spektroskopie | 152 |
| a) Einkanal-Analysator | 152 |
| b) Mehrkanal-Analysator | 156 |
| c) Graukeil-Spektroskopie | 158 |
| d) Möglichkeiten zur Unterdrückung oder Reduzierung des Comptonkontinuums | 158 |
| G. Nachweis von α-Strahlung | 159 |
| 1. Einleitende Bemerkungen | 159 |
| 2. α -Zähler nach WARD | 160 |
| 3. α -Nachweis mit den Szintillationszählern | 161 |
| H. Messung intensitätsarmer Präparate | 161 |
| J. Absolute Messungen | 166 |
| 1. Geeichte Standardpräparate | 166 |
| 2. Absolutbestimmung der Aktivität durch Berücksichtigung von Selbstabsorption, Streuung, Absorption, Rückstreuung, Geometriefaktor | 167 |
| 3. Berücksichtigung des Zerfallsschemas | 167 |
| 4. 4π -Zählrohr | 168 |
| 5. Koinzidenzmethode | 169 |
| K. Verdünnungsanalyse | 172 |
| L. Aktivierungsanalyse | 174 |
| 1. Einleitende Bemerkungen | 174 |
| 2. Beschreibung der Aktivierungsanalyse | 174 |
| 3. Größe der induzierten Aktivität | 175 |
| 4. Neutronenquellen | 176 |
| a) Kernreaktor als Quelle langsamer Neutronen | 176 |
| b) Teilchenbeschleuniger | 176 |
| c) Erzeugung von Neutronen durch Beschuß von Beryllium mit α -Teilchen | 178 |
| 5. Absolut- und Vergleichsmethode | 179 |
| 6. Vor- und Nachteile der Aktivierungsanalyse | 179 |
| 7. Messung der induzierten Aktivität | 180 |
| a) Direkte Messung der induzierten Aktivität | 180 |
| b) Auswertung einer Zerfallskurve | 181 |
| c) Absorptionsmessungen | 181 |
| d) Internal Standard-Methode | 182 |
| e) Zuhilfenahme der γ -Spektroskopie oder einer Koinzidenzmessung | 183 |
| 8. Messung kurzlebiger Radionuclide | 184 |
| 9. Fehlerbetrachtungen | 186 |
| a) Unterschiedliche Bestrahlungsbedingungen | 186 |
| b) Selbstabschirmung | 186 |
| c) Fehlerquellen durch konkurrierende Kernprozesse | 187 |
| M. Analyse durch Papierchromatographie oder Papierelektrophorese unter Zuhilfenahme von Radionucliden | 189 |
| N. Autoradiographie | 191 |
| 1. Methode und Anwendungsbereich | 191 |
| 2. Physikalische Grundlagen | 193 |
| a) Photographischer Vorgang | 193 |
| b) Auflösungsvermögen eines Autoradiogrammes | 195 |
| c) Beeinflussung des Auflösungsvermögens | 195 |
| d) Experimentelle Bestimmung des Auflösungsvermögens | 197 |
| e) Abschätzung der günstigsten Belichtungsdauer | 197 |

| | Seite |
|--|------------|
| 3. Herstellung von Präparatschnitten | 198 |
| a) Fixieren der Probe | 199 |
| b) Entwässern | 200 |
| c) Einbetten | 200 |
| d) Schneiden mit dem Mikrotom | 201 |
| e) Färbung der Präparatschnitte | 202 |
| 4. Photographische Emulsionen | 202 |
| 5. Verschiedene Techniken zur Herstellung von Autoradiogrammen | 203 |
| a) Kontaktmethode | 203 |
| b) Verwendung von flüssigen Emulsionen | 205 |
| c) Strippingfilm-Methode | 207 |
| d) Finksche Methode | 210 |
| e) Autoradiographie unter Verwendung flüssiger Emulsionen (wetprocess-autoradiography) | 211 |
| 6. Artefakte | 212 |
| 7. Quantitative Autoradiographie | 213 |
| a) Vergleichsmessung mit Autoradiogrammen, welche mit Strahlungsquellen bekannter Aktivität aufgenommen worden sind | 213 |
| b) Auszählung der ausgeschiedenen Silberkörner | 214 |
| c) Photometrische Bestimmung der Schwärzung in einem Autoradiogramm . | 214 |
| d) Beobachtung und Auszählen der entwickelten Körner einzelner Bahnspuren | 216 |
| VI. Anwendungsbeispiele | 216 |
| A. Verwendung von Radionucliden als Tracer | 216 |
| 1. Studium der Infusionstherapie nach operativen Eingriffen am Magen | 216 |
| 2. Synthese und Resorbierbarkeit einer mit C ¹⁴ markierten organisch-chemischen Verbindung, radioaktiv kontrolliert | 218 |
| 3. Studium des Oxydationsmechanismus von Propen | 219 |
| 4. Kontrolle der chemischen Trennung zweier Substanzen | 219 |
| 5. Nachweis der Luftradioaktivität | 220 |
| 6. Zur Diagnostik der Schilddrüsenfunktion unter Verwendung von Radiojod . | 220 |
| 7. Lokalisierung von Hirntumoren mit Hilfe von Positronenstrahlen | 229 |
| B. Einige technische Anwendungsbeispiele | 230 |
| 1. Radioaktive Überwachung einer Phosphorofenausmauerung | 230 |
| 2. Standmessungen | 231 |
| 3. Dichtebestimmung mit Hilfe radioaktiver Strahlung | 233 |
| a) Dichtemessung bei Flüssigkeiten | 233 |
| b) Kontinuierliche Analyse von Schwefel in Gasen | 234 |
| 4. Dickenmessung mit radioaktiver Strahlung | 235 |
| 5. γ -Radiographie | 236 |
| a) Methode | 237 |
| b) Abbildungsschärfe | 237 |
| c) Belichtungsdauer | 238 |
| d) Strahlungsquellen und ihr Anwendungsbereich | 240 |
| e) Anwendungsbeispiele | 244 |
| f) Transportbehälter zur Aufnahme des radioaktiven γ -Strahlers | 246 |
| VII. Strahlenschutz | 247 |
| A. Strahlenbelastungen | 247 |
| 1. Strahlenbelastungen bei der Anwendung von Radionucliden | 247 |
| 2. Strahlenbelastung durch Umwelts- und Zivilisationseinflüsse | 248 |

| | Inhaltsverzeichnis | XI |
|---|--------------------|----|
| | Seite | |
| B. Erste Strahlenschutzverordnung | 249 | |
| 1. Genehmigung zum Bezug und zur Verwendung radioaktiver Stoffe | 250 | |
| 2. Ärztliche Untersuchung | 250 | |
| 3. Versicherungsschutz | 250 | |
| C. Objektives Maß einer Strahlenbelastung | 251 | |
| 1. Strahlungseinheiten | 251 | |
| 2. Maximal zulässige Dosis bzw. Dosisleistung | 253 | |
| 3. Abschätzung und Messung der Strahlendosisleistung | 255 | |
| a) Inkorporierte Strahlung | 255 | |
| b) Strahlenbelastungen von außen | 257 | |
| D. Strahlenschutz | 259 | |
| 1. Abschirmung gegen β - und γ -Strahlung | 259 | |
| 2. Vorsichtsmaßnahmen | 261 | |
| Sachverzeichnis | 279 | |