

Inhaltsverzeichnis

	Seite
I. Grundbegriffe des Atomaufbaues 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 Absorbermaterials	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, Zählrohrearakteristik	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

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, Halbwertszeit, 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 Präparatmessung und Null-effektmessung	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 Meßeffectes 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 Luftschicht . .	116
d) Einfluß des schrägen Durchgangs der β -Teilchen durch Luftschicht 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 verschieden 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 Meßeffect	127
c) Nulleffect des Veallschen Zählers	128
4. Aktivitätsmessung großer Flüssigkeitsmengen	128
5. Messung von sehr schwach radioaktiven Flüssigkeiten	129
D. Nachweis energiereicher 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 Sub- stanzen	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 Phosphores- cenzlichtes (quenching)	143
4. Nachweisempfindlichkeit	145
F. Nachweis von γ -Strahlung mit dem Geiger-Müller-Zählrohr oder dem Szin- tillationszähler	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

	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 Bahnsuren	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

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