

# Praktische Strahlenschutz- physik

Birgit Dörschel • Volkmar Schuricht • Joachim Steuer

Mit 234 Abbildungen und 87 Tabellen

Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg • Berlin • New York • 1992

**&I4.-SIOT-)**

# Inhalt

<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>15</b>
<b>I. DIE PHYSIKALISCHEN GRUNDLAGEN DES STRAHLEN- SCHUTZES</b>	<b>19</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>21</b>
<b>2. Strahlungsquellen und Strahlungsfelder</b>	<b>23</b>
2.1. Größen zur Beschreibung von Strahlungsquellen und Strahlungsfeldern	23
2.2. Kosmische Strahlung	27
2.3. Radionuklide	28
2.4. Kernreaktoren	35
2.5. Beschleuniger	39
2.6. Kernexplosionen	<b>42</b>
<b>3. Wechselwirkung zwischen Strahlung und Stoff</b>	<b>44</b>
3.1. Grundprozesse der Wechselwirkung	44
3.1.1. Charakteristische Größen der Wechselwirkung	44
3.1.2. Wechselwirkungsprozesse geladener Teilchen	45
3.1.3. Wechselwirkungsprozesse von Neutronen	48
3.1.4. Wechselwirkungsprozesse von Photonen	52
3.2. Die Strahlungstransportgleichung	56
3.3. Lösung der Strahlungstransportgleichung	59
3.3.1. Lösungen für einfache Spezialfälle	59
3.3.2. Einfache Näherungslösungen unter Verwendung von Aufbaufaktoren	61
3.3.3. Numerische Lösungen	64
3.4. Makroskopische Größen zur Beschreibung der Wechselwirkung von Strahlung mit Stoffschichten	69
3.4.1. Absorption und Streuung geladener Teilchen	69
3.4.2. Bremsung und Diffusion von Neutronen	74
3.4.3. Schwächung von Photonenstrahlung	77

3.5.	Strahlungsfeldänderungen und Energieübertragung an Stoffe im Ergebnis des Strahlungstransports	79
3.5.1.	Änderung des Strahlungsfeldes durch Abschirmungen und Detektoren	79
3.5.2.	Energiebilanz im Strahlungsfeld	87
3.5.3.	Energieübertragung an Stoffe und Objekte	89
3.5.4.	Dosisgrößen	<b>92</b>
<b>4.</b>	<b>Strahlenwirkungen und Strahlenschäden</b>	<b>96</b>
4.1.	Physikalische und chemische Effekte	96
4.2.	Strahlenschäden in Stoffen	<b>102</b>
4.3.	Biologische Effekte	<b>104</b>
4.3.1.	Energieübertragung an biologische Strukturen	<b>104</b>
4.3.2.	Modelle und Theorien zur Beschreibung von Strahleneffekten	<b>106</b>
4.4.	Strahlenschäden beim Menschen	<b>108</b>
<b>5.</b>	<b>Grundkonzept des Strahlenschutzes</b>	<b>112</b>
5.1.	Das Strahlenrisiko	<b>112</b>
5.2.	Größen zur Charakterisierung der Strahlenexposition	<b>116</b>
5.3.	Grundlegende Prinzipien des Strahlenschutzes	<b>121</b>
<b>6.</b>	<b>Strahlenexposition des Menschen</b>	<b>124</b>
6.1.	Strahlenexposition durch natürliche und künstliche Quellen	<b>124</b>
6.1.1.	Strahlenexposition durch natürliche Quellen	<b>125</b>
6.1.2.	Strahlenexposition durch künstliche Quellen	<b>130</b>
6.2.	Berechnung der Strahlenexposition des Menschen	<b>135</b>
6.2.1.	Modelle zur Berechnung der Strahlenexposition	<b>135</b>
6.2.2.	Berechnung der äußeren Strahlenexposition	<b>140</b>
6.2.3.	Berechnung der inneren Strahlenexposition	<b>148</b>
6.3.	Größen und Meßkonzepte zur Bestimmung und Limitierung der Strahlenexposition	<b>155</b>
6.3.1.	Primäre Größen zur Limitierung der Strahlenexposition	<b>155</b>
6.3.2.	Sekundäre Größen zur Limitierung und Kalibrierung	<b>156</b>
6.3.3.	Meßkonzepte im operativen Strahlenschutz	<b>165</b>
<b>7.</b>	<b>Strahlenschutzmeßtechnik</b>	<b>169</b>
7.1.	Grundaufgaben der Strahlenschutzmeßtechnik	<b>169</b>
7.2.	Bestimmung der Dosis und Dosisleistung	<b>169</b>
7.2.1.	Meßprinzipien	<b>169</b>
7.2.2.	Elektronen- und Photonendosimetrie mit Sonden	<b>170</b>

## Inhalt

7.2.3.	Neutronendosimetrie durch Fluenzmessungen	174
7.3.	Bestimmung der Aktivität	180
7.4.	Detektoren in der Strahlenschutzmeßtechnik	182
7.4.1.	Ionisationsdetektoren	182
7.4.2.	Anregungsdetektoren	186
7.4.3.	Chemische Detektoren	189
7.4.4.	Filmdetektoren	190
7.4.5.	Aktivierungsdetektoren	192
7.4.6.	Thermolumineszenzdetektoren	196
7.4.7.	Exoelektronendetektoren	200
7.4.8.	Radiophotolumineszenzdetektoren	200
7.4.9.	Festkörperspurdetektoren	203
7.4.10.	Sonstige Detektoren	206
7.4.11.	Spezielle Detektorsysteme für die Dosimetrie	209
7.5.	Grundverfahren zur Verarbeitung der Detektorsignale, Strahlenschutzmeßgeräte und Anwendung von Computern im Strahlenschutz	213
7.5.1.	Grundverfahren zur Verarbeitung der Detektorsignale	213
7.5.2.	Strahlenschutzmeßgeräte	214
7.5.3.	Anwendung von Computern im Strahlenschutz	218
<b>8.</b>	<b>Physikalische Grundlagen zur Begrenzung der Strahlenexposition</b>	<b>221</b>
8.1.	Prinzipien zur Begrenzung der Strahlenexposition	221
8.2.	Begrenzung der äußeren Strahlenexposition	222
8.2.1.	Optimierung von Einflußgrößen	222
8.2.2.	Abschirmungen	224
8.3.	Begrenzung der inneren Strahlenexposition	241
8.3.1.	Begrenzung der Abgabe radioaktiver Stoffe an die Umgebung	242
8.3.2.	Vermeidung von Kontaminationen und Inkorporationen	243
8.3.3.	Lagerung und Beseitigung radioaktiver Abfälle	247
II. RECHENÜBUNGEN ZUM STRAHLENSCHUTZ		251
<b>Einleitung</b>		<b>253</b>
<b>Berechnung von Strahlungsfeldern</b>		<b>254</b>
1.	Flußdichten in gegebenem Abstand von Punkt-, Linien- und Flächenquellen	254 (278) <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> In Klammern ist jeweils die Seitenzahl der Lösung angegeben

2. Flußdichten an Grenzflächen bei Strahlungseinfall unter verschiedenem Winkel	254 (278)
3. Jährliche Luftdosis von kosmischer Strahlung in verschiedenen Höhen	254 (279)
4. Aktivitätsbestimmung von Uran bei gegebener Masse	255 (279)
5. Dosisleistungskonstante eines Radionuklids bei gegebenem Zerfallsschema	255 (279)
6. Aktivitätsverhältnisse von Mutter-Tochter-Nukliden	255 (280)
7. Strahlungsfeldgrößen in Kernreaktoren	255 (280)
8. Aktivitätsaufbau in Kernreaktoren	255 (280)
9. Bremsstrahlungserzeugung	256 (281)
10. Strahlungsfeldberechnung unter Verwendung von Aufbauaktoren	256 (282)
11. Quellverteilungen bei gegebener Geometrie (Monte-Carlo-Methode)	256 (283)
12. Auftreffpunkte von $\gamma$ -Quanten auf einem Körperphantom (Monte-Carlo-Methode)	256 (285)
13. Teilschritte des Neutronentransports (Monte-Carlo-Methode)	257 (287)
14. Albedo thermischer Neutronen	258 (288)
15. Reichweite geladener Teilchen	258 (289)
16. Schwächung von $\gamma$ -Strahlung	259 (289)
17. Lösung der Neutronendiffusionsgleichung für Spezialfälle	259 (290)
<b>Berechnung der Strahlenexposition des Menschen</b>	<b>260</b>
18. Schädigungsraten nach Modellen des absoluten und relativen Risikos	260 (291)
19. Risikofaktoren (Lebenszeitrisiken)	260 (293)
20. Dosisabhängigkeit des RBW-Faktors und Energieabhängigkeit des Qualitätsfaktors	260 (293)
21. Transport von Radionukliden in der Atmosphäre (Aktivitätskonzentration)	261 (295)
22. Transport von Radionukliden im Wasser (Aktivitätskonzentration)	261 (296)
23. $\gamma$ -Strahlungsexposition beim Aufenthalt an Linienquelle (Rohrleitung mit kontaminiertem Wasser)	261 (297)
24. $\gamma$ -Strahlungsexposition beim Aufenthalt an/auf Flächenquelle (kontaminiertes Gelände)	262 (298)

25. $\gamma$ -Strahlungsexposition beim Aufenthalt an Volumenquelle (Transportcontainer)	262 (299)
26. $\beta$ -Strahlungsexposition durch kontaminierte Fläche	262 (300)
27. Exposition durch thermische Neutronen	262 (301)
28. Neutronenexposition beim Umgang mit Californiumquellen	263 (302)
29. Neutronenexposition an Kernreaktoren	263 (302)
30. Innere Strahlenexposition bei zeitabhängiger Aktivitätszufuhr	264 (303)
31. Innere Strahlenexposition infolge Tritium-Inhalation	264 (304)
32. Grenzwert der Tritiumkonzentration in Luft	264 (305)
33. Innere Strahlenexposition bei kurzzeitiger Aufnahme von $^{131}\text{I}$	264 (305)
<b>Berechnungen zur Konzipierung und Einschätzung von Meßverfahren der Strahlenschutzmeßtechnik</b>	<b>266</b>
34. Dimensionierung von Bragg-Gray- und Gleichgewichtssonden	266 (306)
35. Ansprechvermögen von Ionisationskammern für Expositionsdosisleistungsmessungen	266 (307)
36. Ansprechvermögen von Zählrohren für Dosisleistungsmessungen	267 (308)
37. Ansprechvermögen von Szintillationsdosimetern	267 (308)
38. Optimierung von Metallfilterdicken für Filmdosimeter	267 (309)
39. Fading von Thermolumineszenzdetektoren	268 (310)
40. Eigenschaften von Thermolumineszenzdetektoren für Umgebungsüberwachung	268 (310)
41. Teilschritte der Spurbildung in Festkörperspurdetektoren	268 (311)
42. Ansprechvermögen von Festkörperspurdetektoren mit Radiatoren	269 (312)
43. Berechnungen zur Neutronenflußdichtebestimmung mit Aktivierungssonden	269 (313)
44. Optimierung der Einzelempfindlichkeiten für Kombinationsdosimeter	270 (315)
45. Ansprechvermögen für Kombinationen von Detektoren mit dünnen und dicken Radiatoren	271 (316)
46. Peakflächen in Impulshöhenspektren	271 (317)
47. Empfindlichkeit bei Messung der Aktivität radioaktiver Gase	272 (319)
48. Auswertung von Filtermessungen	272 (320)

<b>Berechnungen zur Konzipierung von Maßnahmen zur Herabsetzung der Strahlenexposition</b>	<b>273</b>
49. Optimierung von Abstand und Aufenthaltszeit an Quellen	273 (320)
50. Einfluß geometrischer Parameter auf die Strahlenexposition bei Röntgenuntersuchungen	273 (321)
51. Dimensionierung von $\beta$ -Strahlungsabschirmungen	273 (321)
52. Abschirmdicke bei scheibenförmiger Quelle	274 (321)
53. $\gamma$ -Dosisleistung hinter ebener Abschirmung für Linienquelle (senkrechte Anordnung)	274 (322)
54. $\gamma$ -Dosisleistung hinter ebener Abschirmung für Linienquelle (parallele Anordnung)	275 (323)
55. $\gamma$ -Dosisanteile hinter ebener Abschirmung für Punktquelle	275 (323)
56. Schwächung von $\gamma$ -Strahlung durch Schichtstruktur verschiedener Materialien	275 (324)
57. Absorption thermischer Neutronen durch Cadmium-Filter	276 (325)
58. Dimensionierung einer Abschirmung für Californium-Quelle	276 (325)
59. Flußdichteverteilung schneller Neutronen in Umgebung von Punkt- und Flächenquelle in Wasser	276 (326)
60. Dosisberechnung für Neutronen und $\gamma$ -Strahlung hinter Reaktorabschirmungen	276 (326)
61. $\gamma$ -Dosis hinter Abschirmung mit Rohrdurchführung	277 (327)
<b>Lösungen</b>	<b>278</b>
<b>III. PRAKTIKUM DER STRAHLENSCHUTZPHYSIK</b>	<b>329</b>
<b>Einleitung</b>	<b>331</b>
<b>Grundlagen der Strahlungsmeßtechnik</b>	<b>332</b>
Strahlungsdetektoren	332
1. Auslösezählrohre	332
2. Proportionalzählrohre	337
3. Ionisationskammern	342
4. Szintillationsdetektoren	344
5. Halbleiterdetektoren	346

Grundverfahren zur Verarbeitung der Detektorsignale	349
6. Impulszählung und Impulsdichtemessung	349
7. Impulsdiskrimination	354
8. Impulshöhenanalyse	357
<b>Wechselwirkung zwischen Strahlung und Stoff</b>	<b>363</b>
Arten der Wechselwirkung	363
9. Absorption von Alphastrahlung	363
10. Absorption und Streuung von Betastrahlung	366
11. Absorption und Streuung von Röntgen- und Gammastrahlung	369
12. Absorption und Streuung von Neutronen	372
Abschirmungen	376
13. Abschirmung von Gammastrahlung	377
14. Abschirmung von Neutronen	379
15. Entstehung von Sekundärstrahlung in Abschirmungen	382
<b>Quellen ionisierender Strahlung und ihre Strahlungsfelder</b>	<b>386</b>
Quellen ionisierender Strahlung	386
16. Radionuklidquellen	387
17. Röntgeneinrichtungen	389
18. Kernreaktoren	392
Strahlungsfelder	398
19. Strahlungsfelder von Radionuklidquellen	399
20. Verteilung der Neutronenflußdichte in Phantomen	400
<b>Grundlagen der Strahlenschutzmeßtechnik</b>	<b>404</b>
Spezielle Eigenschaften von impulsliefernden Detektoren für die Strahlenschutzmeßtechnik	404
21. Dosisleistungsansprechvermögen von Auslösezählrohren und Szintillationsdetektoren	405
22. Auslösezählrohre und Szintillationsdetektoren bei hoher Dosisleistung	408
23. Energieabhängigkeit des Dosisleistungsansprechvermögens bei Auslösezählrohren und Szintillationsdetektoren	411
Integrierende Detektoren (Dosimeter)	414
24. Ionisationsdosimeter	416
25. Filmdosimeter	418



26. Thermolumineszenzdosimeter	421
27. Radiophotolumineszenzdosimeter	424
28. Aktivierungsdetektoren	426
29. Festkörperspurdetektoren	430
Personendosimetrie	431
30. Bestimmung der Dosis mit Filmdetektoren	432
31. Bestimmung der Neutronendosis mit Aktivierungsdetektoren	437
32. Bestimmung der Dosis mit Thermolumineszenzdetektoren	440
33. Bestimmung der Neutronendosis mit Festkörperspurdetektoren	442
Ortsdosimetrie	444
34. Ortsdosimetrie in Gammastrahlungsfeldern	444
35. Ortsdosimetrie an Abschirmanordnungen für Neutronenstrahlung	445
36. Ortsdosimetrie beim Umgang mit Betastrahlungsquellen	448
Aktivitätsbestimmung und Identifizierung von Radionukliden	451
37. Selektive Aktivitätsbestimmung durch Aufnahme der Zerfallskurve	452
38. Identifizierung von Radionukliden durch Impulshöhenanalyse	453
39. Bestimmung der Aktivität mit einem Gammaskpektrometer	457
40. Bestimmung der Oberflächenkontamination und Identifizierung von Radionukliden durch Direktmessung	461
41. Bestimmung der Aktivität inkorporierter oder durch Neutronenstrahlung induzierter Radionuklide	463
<b>Praktische Strahlenschutzmeßtechnik</b>	467
Ortsdosimetrie an Röntgeneinrichtungen	467
42. Ortsdosimetrie an medizinischen Röntgeneinrichtungen	467
43. Ortsdosimetrie zum Strahlenschutz der Patienten in der Röntgendiagnostik	469
44. Ortsdosimetrie an zahnmedizinischen Röntgeneinrichtungen	475
45. Ortsdosimetrie an Feinstruktur-Röntgeneinrichtungen	476
Kontaminationskontrolle	479
46. Kontaminationskontrolle in Radionuklidlaboratorien	481
47. Kontaminationskontrolle in Kernkraftwerken	483
48. Prüfung umschlossener Strahlungsquellen	484
<b>Literaturverzeichnis</b>	487
<b>Sachverzeichnis</b>	491