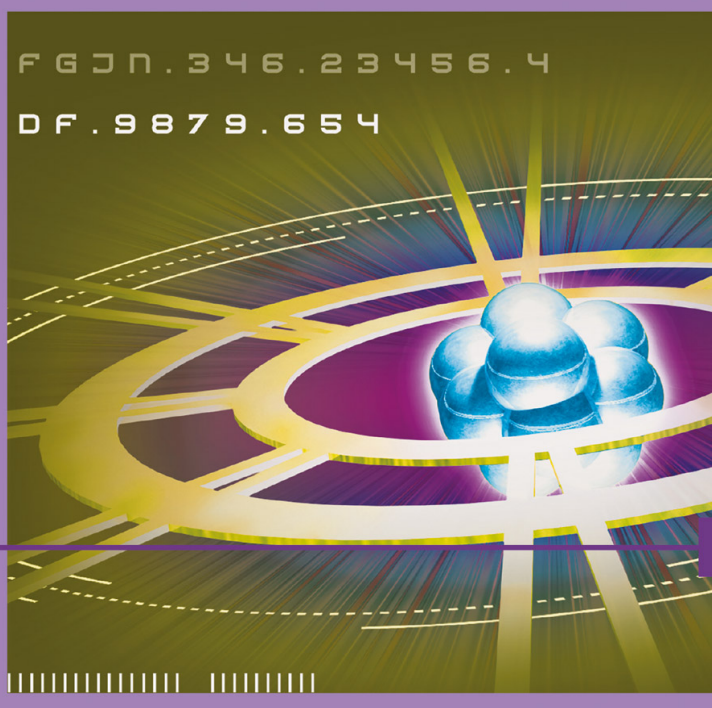


Hans-Gerrit Vogt  
Jan-Willem Vahlbruch



# Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes



8., überarbeitete Auflage

HANSER

### **Disclaimer zur Barrierefreiheit**

Der Carl Hanser Verlag unternimmt große Anstrengungen, um seine Produkte barrierefrei zu machen. Dazu gehört auch, dass Bilder oder Tabellen für blinde und sehbehinderte Menschen zugänglich gemacht werden. Dies geschieht durch zusätzliche beschreibende Texte (Alternativtexte), die in den Daten integriert sind. Die Alternativtexte können von assistiven Technologien (z. B. Screenreadern) vorgelesen werden. Bei der Erstellung dieser Texte kommt eine KI zum Einsatz. Die inhaltliche Verantwortung liegt weiterhin bei den Lektor:innen und Autor:innen.

Hans-Gerrit Vogt  
Jan-Willem Vahlbruch

# **Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes**

8., überarbeitete Auflage

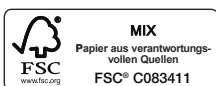
Unter Mitarbeit von Christoph Stettner

HANSER

Über die Autoren:

*Dr. Hans-Gerrit Vogt* war Leiter der Strahlenschutzkurse im Zentrum für Strahlenschutz und Radioökologie der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

*Dr. Jan-Willem Vahlbruch* ist Leiter der Strahlenschutzkurse am Institut für Radioökologie und Strahlenschutz (IRS) der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.



Print-ISBN: 978-3-446-48098-8

E-Book-ISBN: 978-3-446-48484-9

Die allgemein verwendeten Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2025 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München  
Vilshofener Straße 10 | 81679 München | [info@hanser.de](mailto:info@hanser.de)

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Julia Stepp

Herstellung: Eberl & Koesel Studio GmbH, Kempten

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Covergestaltung: Thomas West

Titelmotiv: © Frank Wohlgemuth, Lilienthal/Hamburg

Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Druck: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

---

# Inhalt

---

<b>Vorwort</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Aufbau der Materie</b> .....	<b>3</b>
<b>3 Strahlungsarten</b> .....	<b>7</b>
3.1 Materiestrahlung .....	7
3.2 Wellenstrahlung .....	7
3.3 Eigenschaften der Strahlung .....	8
<b>4 Strahlungsquellen</b> .....	<b>11</b>
4.1 Radioaktive Stoffe .....	11
4.1.1 Aktivität .....	11
4.1.2 Kernprozesse .....	12
4.1.3 Halbwertszeit .....	17
4.1.4 Natürliche und künstliche Radioaktivität .....	18
4.1.5 Aktivitäten bei Umwandlungsreihen .....	20
4.1.6 Kenngrößen radioaktiver Stoffe .....	23
4.1.7 Radioaktive Quellen .....	25
4.2 Strahlungsgeneratoren .....	27
4.2.1 Röntgenröhre .....	27
4.2.2 Teilchenbeschleuniger .....	29
4.2.2.1 Gleichspannungsfeld-Beschleuniger .....	30
4.2.2.2 Wechselfeld-Linearbeschleuniger .....	31
4.2.2.3 Ringbeschleuniger mit konstantem Magnetfeld .....	34

4.2.2.4	Ringbeschleuniger mit veränderlichem Magnetfeld ...	36
4.2.2.5	Strahlungsfelder an Beschleunigern .....	38
4.2.3	Kernreaktor .....	40
4.2.4	Störstrahler .....	42
4.2.5	Ultrakurzpuls laser (UKP-Laser) .....	44
<b>5</b>	<b>Ausbreitung von Strahlung in Materie .....</b>	<b>47</b>
5.1	Strahlungsfelder und Wechselwirkungen .....	47
5.2	Direkt ionisierende Strahlung .....	51
5.2.1	Alphastrahlung .....	54
5.2.2	Beta- und Elektronenstrahlung .....	54
5.3	Indirekt ionisierende Strahlung .....	55
5.3.1	Photonenstrahlung .....	55
5.3.2	Neutronenstrahlung .....	57
5.4	Kernreaktionen .....	59
5.5	Kernspaltungskettenreaktionen .....	62
5.6	Teilchenkaskaden .....	65
5.7	Änderung von Materialeigenschaften .....	66
<b>6</b>	<b>Strahlungswirkung .....</b>	<b>69</b>
6.1	Allgemeine Dosisbegriffe .....	69
6.1.1	Energiedosis .....	69
6.1.2	Ionendosis .....	70
6.1.3	Kerma .....	71
6.2	Dosisbegriffe im Strahlenschutz .....	73
6.2.1	Schutzgrößen .....	73
6.2.1.1	Organ-Äquivalentdosis .....	74
6.2.1.2	Effektive Dosis .....	76
6.2.2	Messgrößen .....	79
6.2.2.1	Mess-Äquivalentdosis .....	79
6.2.2.2	Ortsdosis .....	81
6.2.2.3	Personendosis .....	88
6.2.2.4	Luftkerma .....	90
6.2.3	Ausblick .....	92
6.3	Dosisleistung .....	93
6.4	Potenzielle Alphaenergie-Exposition .....	94

6.5	Biologische Wirkung ionisierender Strahlung .....	97
6.5.1	Grundlagen .....	97
6.5.2	Deterministische Strahlenschäden .....	102
6.5.3	Stochastische somatische Strahlenschäden .....	104
6.5.4	Genetische Strahlenschäden .....	111
<b>7</b>	<b>Natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition .....</b>	<b>115</b>
<b>8</b>	<b>Strahlungsmessung .....</b>	<b>131</b>
8.1	Messaufgaben .....	131
8.2	Strahlungsdetektoren .....	132
8.2.1	Ionisationskammer .....	132
8.2.2	Proportionalzählrohr .....	134
8.2.3	Auslösezählrohr .....	137
8.2.4	Szintillator .....	140
8.2.5	Photoemulsion .....	145
8.2.6	Lumineszenzdetektor .....	146
8.2.7	Halbleiterdetektor .....	147
8.2.8	Festkörper-Kernspurdetektor .....	156
8.2.9	Sonstige Detektoren und Messverfahren .....	157
8.3	Strahlenschutzmessgeräte .....	158
8.3.1	Einsatzweise von Messgeräten .....	158
8.3.2	Personendosismessgeräte .....	160
8.3.2.1	Photonenstrahlung .....	161
8.3.2.2	Beta- und Photonenstrahlung .....	167
8.3.2.3	Neutronenstrahlung .....	169
8.3.2.4	Alphastrahlung .....	174
8.3.2.5	Anwendungshinweise .....	175
8.3.3	Ortsdosis- und Ortsdosisleistungsmessgeräte .....	176
8.3.3.1	Beta- und Photonenstrahlung .....	176
8.3.3.2	Neutronenstrahlung .....	185
8.3.3.3	Anwendungshinweise .....	189
8.3.4	Oberflächenkontaminationsmessgeräte .....	191
8.3.4.1	Mobile Geräte .....	192
8.3.4.2	Stationäre Geräte .....	196
8.3.4.3	Anwendungshinweise .....	197

8.3.5	Aktivitätsmessgeräte .....	198
8.3.5.1	Messung an Festsubstanzproben .....	198
8.3.5.2	Messung an Flüssigkeiten .....	201
8.3.5.3	Messung an Luft .....	203
8.3.5.4	Messung inkorporierter radioaktiver Stoffe .....	207
8.3.5.5	Anwendungshinweise .....	210
8.3.6	Messsysteme der Spektrometrie .....	212
8.3.6.1	Messungen mit Impulshöhenanalysatoren .....	212
8.3.6.2	Messungen mit Bonnerkugeln .....	224
8.3.6.3	Anwendungshinweise .....	225
8.4	Berechnung von Aktivitäten aus Impulsraten .....	228
8.5	Statistische Messunsicherheit bei Impulszählungen .....	235
8.5.1	Grundlegendes .....	235
8.5.2	Primäres Ergebnis und Standardunsicherheit .....	238
8.5.3	Vertrauensgrenzen .....	240
8.5.4	Erkennungs- und Nachweisgrenze .....	244
8.5.5	Messungen mit Impulszähler .....	247
8.5.6	Messung mit Ratemeter .....	251
8.5.7	Prüfung auf statistische Reinheit .....	253
<b>9</b>	<b>Schutzmaßnahmen gegen Strahlungsfelder .....</b>	<b>257</b>
9.1	Grundregeln für den Schutz gegen Strahlungsfelder .....	257
9.2	Begrenzung der Quellstärke .....	258
9.3	Beschränkung der Aufenthaltsdauer .....	258
9.4	Einhalten großer Abstände zur Quelle .....	259
9.4.1	Alphastrahlung .....	263
9.4.2	Beta- und Elektronenstrahlung .....	263
9.4.3	Gammastrahlung und monoenergetische Photonenstrahlung ...	265
9.4.4	Röntgen- und Bremsstrahlung .....	267
9.4.5	Neutronenstrahlung .....	268
9.5	Abschirmung von Strahlungsfeldern .....	270
9.5.1	Alphastrahlung und schnell bewegte Atomkerne .....	271
9.5.2	Beta- und Elektronenstrahlung .....	272
9.5.3	Gammastrahlung und monoenergetische Photonenstrahlung ...	272
9.5.4	Röntgen- und Bremsstrahlung .....	280
9.5.5	Neutronenstrahlung .....	281

9.6	Schutz gegen Oberflächenstreustrahlung .....	283
9.6.1	Photonenstrahlung .....	284
9.6.2	Neutronenstrahlung .....	285
<b>10</b>	<b>Schutzmaßnahmen gegen Kontaminationen .....</b>	<b>287</b>
10.1	Gefährdung durch Kontaminationen .....	287
10.2	Grundregeln für den Schutz gegen Kontaminationen .....	297
10.2.1	Kontamination der Luft .....	298
10.2.2	Kontamination des Wassers .....	299
10.2.3	Kontamination von Oberflächen .....	299
10.2.4	Kontamination von Nahrungsmitteln .....	301
10.3	Abschätzung der Folgedosis .....	301
10.3.1	Inhalation .....	301
10.3.2	Ingestion .....	303
10.3.3	Permeation und Injektion .....	304
10.4	Abschätzung der zugeführten Aktivität .....	305
10.4.1	Messung von Aktivitätskonzentration und spezifischer Aktivität ...	306
10.4.2	Ganzkörper- und Teilkörpermessung .....	306
10.4.3	Ausscheidungsmessung .....	308
10.5	Strahlenexposition bei kontaminierter Umgebung .....	310
10.5.1	Submersion und Immersion .....	310
10.5.2	Bodenkontamination .....	312
10.6	Strahlenexposition nach Aktivitätsfreisetzung in die Umgebung .....	312
10.6.1	Kurzzeitige Ausbreitung in der Atmosphäre .....	313
10.6.1.1	Aktivitätsverteilung in der Luft .....	313
10.6.1.2	Wirkungen von Aktivitätskonzentrationen .....	316
10.6.2	Langzeitige Ausbreitung in der Atmosphäre .....	320
10.6.3	Ausbreitung über die Nahrungskette .....	320
10.6.4	Ausbreitung durch Verschleppen bei Ortsveränderungen .....	321
<b>11</b>	<b>Rechtsvorschriften im Strahlenschutz .....</b>	<b>323</b>
11.1	Grundlagen .....	323
11.2	Strahlenschutzrecht in der Europäischen Gemeinschaft .....	327
11.3	Rechtsvorschriften in Deutschland .....	329
11.3.1	Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) .....	330
11.3.2	Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) .....	335
11.3.3	Atomrechtliche Entsorgungsverordnung (AtEV) .....	337

11.4	Strahlenschutz nach StrlSchG und StrlSchV .....	338
11.4.1	Strahlenschutz bei geplanten Expositionssituationen .....	338
11.4.1.1	Organisation des Strahlenschutzes .....	338
11.4.1.2	Grenzwerte beruflicher Exposition .....	341
11.4.1.3	Strahlenschutzbereiche .....	342
11.4.1.4	Personenüberwachung .....	348
11.4.1.5	Schutz der Bevölkerung .....	349
11.4.1.6	Organisatorische Schutzmaßnahmen .....	350
11.4.2	Strahlenschutz bei Notfallexpositionssituationen .....	352
11.4.3	Strahlenschutz bei bestehenden Expositionssituationen .....	353
11.5	Mess- und Eichwesen im Strahlenschutz .....	355
11.6	Beförderung radioaktiver Stoffe .....	358
<b>12</b>	<b>Strahlenschutz in speziellen Tätigkeitsbereichen .....</b>	<b>365</b>
12.1	Umgang mit umschlossenen radioaktiven Stoffen .....	366
12.1.1	Allgemeine Gesichtspunkte .....	366
12.1.2	Mess- und Regeltechnik .....	373
12.1.3	Zerstörungsfreie Prüfung .....	375
12.1.4	Bestrahlungsanlagen .....	381
12.2	Strahlungsgeneratoren .....	384
12.2.1	Röntgeneinrichtungen .....	384
12.2.1.1	Allgemeine Gesichtspunkte .....	384
12.2.1.2	Mess- und Regeltechnik .....	386
12.2.1.3	Zerstörungsfreie Prüfung .....	392
12.2.1.4	Prüfung, Erprobung, Wartung und Instandsetzung ...	396
12.2.2	Teilchenbeschleuniger .....	398
12.2.3	Störstrahler .....	406
12.2.4	Ultrakurzpulslaser (UKP-Laser) .....	409
12.3	Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen .....	411
12.3.1	Allgemeine Gesichtspunkte .....	411
12.3.2	Arbeitsplanung und Handlungsweisen .....	416
12.3.3	Verhaltens- und Arbeitsregeln .....	420
12.3.4	Überwachungsmessungen .....	423
12.3.5	Abfallbehandlung .....	432

12.4	Tätigkeiten in natürlichen Strahlungsfeldern .....	435
12.4.1	Exposition durch kosmische Strahlung .....	436
12.4.2	Strahlenexposition durch uran- und thoriumhaltige Stoffe .....	439
12.4.3	Exposition durch Radon .....	445
12.4.4	Exposition durch Baustoffe und Altlasten .....	447
12.5	Kerntechnische Anlagen .....	448
12.6	Beförderung radioaktiver Stoffe .....	455
12.7	Maßnahmen bei außergewöhnlichen Ereignissen .....	457
<b>13</b>	<b>Aufgaben und Pflichten nach StrlSchG, StrlSchV und AtEV im nicht medizinischen Bereich .....</b>	<b>461</b>
<b>14</b>	<b>Anwendungsbeispiele .....</b>	<b>493</b>
<b>15</b>	<b>Anhang: Tabellen und Diagramme .....</b>	<b>543</b>
<b>16</b>	<b>Fachverzeichnisse .....</b>	<b>677</b>
16.1	Bezugsquellen für Literatur, Zeitschriften, Formblätter und Dienstleistungen .....	678
16.2	Online-Nukleardaten/Programm-Service .....	689
16.3	Computerprogramme .....	692
16.4	Literaturverzeichnis .....	696
16.4.1	Allgemeine Literatur .....	697
16.4.2	Wissenschaftliche Berichte und Empfehlungen .....	719
16.4.3	Veröffentlichungen der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) .....	749
16.4.4	Regeln der Technik .....	749
16.4.5	Bekanntmachungen und Verwaltungsvorschriften .....	760
16.4.6	Rechtsvorschriften .....	766
<b>Index</b> .....		<b>771</b>



---

# Vorwort

---

Dieses Buch ist aus Manuskripten zu Strahlenschutzkursen entstanden, die vornehmlich zur Ausbildung von Strahlenschutzbeauftragten für den Umgang mit radioaktiven Stoffen sowie für den Betrieb von Röntgeneinrichtungen, Störstrahlern und Beschleunigern dienen. Es wendet sich daher insbesondere an Techniker, Ingenieure und Naturwissenschaftler sowie andere Mitarbeiter in Betrieben und Einrichtungen, die sich berufsbedingt mit den Grundlagen des Strahlenschutzes vertraut machen wollen oder müssen.

Das Buch vermittelt Grundkenntnisse sowie weiterführende Informationen zu einigen ausgesuchten Fachgebieten der nichtmedizinischen Anwendung. Die Darstellungen beschränken sich auf die wesentlichen Sachverhalte, ohne ausführliche Begründungen, mathematische Ableitungen und technische Einzelheiten zu liefern. Die ersten Kapitel behandeln die physikalischen Grundlagen, die Dosimetrie sowie die biologischen Wirkungen ionisierender Strahlung. Auch die Thematik der natürlichen Umgebungsstrahlung wird behandelt, um eine realistische Einschätzung der Richtwerte und Dosisgrenzwerte in den Rechtsvorschriften zu ermöglichen. Schwerpunkte des Buches sind die Strahlungsmessung und die Schutzmaßnahmen gegen die äußere und innere Strahlenexposition. Neben den grundsätzlichen Erläuterungen werden die für viele Aufgabenstellungen erforderlichen Berechnungsregeln dargelegt. Zahlreiche Tabellen und Diagramme vervollständigen die Inhalte, sodass das Buch auch in der Praxis Verwendung finden kann. Eine Anleitung zur Lösung praktischer Probleme wird durch die Beispiele geliefert, bei denen Formeln und Daten angewendet werden.

Trotz einer grundlegenden Überarbeitung der Inhalte wurde der Aufbau des Buches auch in der achten Auflage beibehalten. Wesentliche Veränderungen betreffen Kapitel 9 und Kapitel 10 und die dazugehörigen Tabellen und Diagramme in Kapitel 15 (Anhang). Neu berechnet wurden neben den Dosisleistungskonstanten für ausgesuchte Radionuklide auch die Schwächungsfaktoren für Gammastrahlung der ge-

bräuchlichen Abschirmmaterialien. Hierzu werden mehrere Datensätze für unterschiedliche Abschirmungsgeometrien zur Verfügung gestellt. Zum Teil stehen diese unter *plus.hanser-fachbuch.de* zum Download bereit. Neu überarbeitet wurden die Tabellen mit den Kenndaten von Radionukliden, mit den Dosiskoeffizienten für Inhalation und Ingestion und mit den Dosisleistungskoeffizienten für Luft- und Wasser-Submersion sowie für Bodenstrahlung. Im Zusammenhang mit dem überarbeiteten Modell zur Beschreibung des biokinetischen Verhaltens radioaktiver Stoffe im menschlichen Körper wurden auch die grafischen Darstellungen der Retentions- und Exkretionsfunktionen erneuert.

Die Fachverzeichnisse (Kapitel 16) sind grundlegend überarbeitet und ergänzt worden. Sie sollen dem Leser weiterführende Informationsquellen zur Vertiefung der Fachkenntnisse erschließen. Erfahrungsgemäß sind dabei nicht nur Fundstellen für Literatur von Interesse, sondern auch solche Quellen, die Fundstellen verwalten oder Informationen in Form von Datenbanken und Applikationssoftware selbst zur Verfügung stellen. Das Internet ist hierbei eine unverzichtbare Quelle. Dementsprechend liefern die Fachverzeichnisse auch eine Auswahl von Internetadressen zu physikalischen und dosimetrischen Grundlagendaten, Rechenprogrammen, Institutionen, Dienstleistungsunternehmen usw., die für den Strahlenschützer hilfreich sein können.

Da die Praxis des Strahlenschutzes entscheidend durch administrative Tätigkeiten bestimmt wird, sind auch die grundlegenden deutschen Rechtsvorschriften zum Strahlenschutz in das Buch einbezogen worden. Schwerpunktmäßig befasst sich das Buch mit den sogenannten *geplanten Expositionssituationen*, während die außerdem vom StrlSchG formulierten *Notfallexpositionssituationen* und die *bestehenden Expositionssituationen* nicht in gleicher Breite abgehandelt werden. Allerdings sind bei Drucklegung dieses Buches noch nicht alle amtlichen Bekanntmachungen, Empfehlungen und vor allem Richtlinien – obwohl weiterhin in Kraft – formal an die seit der Neuorganisation des deutschen Strahlenschutzrechtes (StrlSchG, StrlSchV) im Jahre 2019 geltenden Rechtsvorschriften angepasst worden. Insofern beziehen sich die im Text gewählten Verweise auf amtliche Verwaltungsvorschriften [bmu] teilweise auf die vor 2019 geltenden Rechtsvorschriften. Es bleibt zu hoffen, dass die Überarbeitung des untergesetzlichen Regelwerkes in nächster Zeit so weit abgeschlossen sein wird, dass die aktuelle Verordnungs- und Gesetzeslage abgebildet wird. Die Pflichten der im Strahlenschutz verantwortlichen Personen nach Strahlenschutzgesetz, Strahlenschutzverordnung und Atomrechtlicher Entsorgungsverordnung (AtEV) sind in Kapitel 13 zusammengestellt.

An dieser Stelle sei auch ein Hinweis auf die 2. Auflage unseres Buches *Fit für den technischen Strahlenschutz* gestattet, das ebenfalls im Carl Hanser Verlag erschienen ist (ISBN 978-3-446-47571-7). Das Aufgaben- und Übungsbuch ist eine hilfreiche Ergänzung zum vorliegenden Buch, kann jedoch auch unabhängig davon eingesetzt werden.

Wir danken unseren Fachkolleginnen und -kollegen für hilfreiche Diskussionen, insbesondere aber DI Dr. Christoph Stettner für seine umfangreiche Unterstützung bei der Neuberechnung der Dosisleistungskonstanten und Schwächungsfaktoren für Photonenstrahlung.

Hannover, Januar 2025

*Hans-Gerrit Vogt*

*Jan-Willem Vahlbruch*



---

# 1

## Einleitung

---

Die energiereiche Strahlung von radioaktiven Stoffen oder Strahlungsgeneratoren kann vom Menschen nicht unmittelbar wahrgenommen werden. Je nach Art und Dauer einer Strahlenexposition können jedoch Gesundheitsschäden entstehen, die im Allgemeinen erst nach Verzögerungen von Tagen bis Jahren in Erscheinung treten. Für direkte Schutzmaßnahmen gegen die Strahlenwirkungen ist es dann häufig zu spät, sodass nur noch versucht werden kann, den Krankheitsverlauf mit medizinischen Mitteln günstig zu beeinflussen. Der hier gemeinte Strahlenschutz befasst sich jedoch nicht mit der medizinischen Behandlung, sondern mit der Verhütung von Strahlenschäden durch geeignete Maßnahmen und technische Vorkehrungen. Diese beruhen auf wissenschaftlichen Untersuchungen der Strahlenwirkungen und langjährigen Erfahrungen beim Umgang mit Strahlungsquellen.

Zum besseren Verständnis der praktischen Strahlenschutzmaßnahmen werden im Folgenden zunächst einige grundlegende Zusammenhänge der Strahlenphysik und Strahlenbiologie erläutert, bevor in den Kapiteln zur Strahlungsmessung, zu den Schutzmaßnahmen sowie zu den Rechtsvorschriften das eigentliche Thema Strahlenschutz behandelt wird. Dabei werden nur solche Strahlungsquellen berücksichtigt, bei denen die Energie der Strahlung etwa 100 MeV nicht überschreitet.



---

# 2

## Aufbau der Materie

---

Materie ist aus Atomen aufgebaut. Diese bestehen, wie in Bild 2.1 modellmäßig dargestellt, aus einem sehr kleinen Atomkern, der fast die gesamte Masse enthält, und einer sehr leichten Atomhülle, durch die das Atomvolumen bestimmt ist. Der Atomkern ist elektrisch positiv geladen, wobei die Ladungsmenge durch die Anzahl der in ihm enthaltenen Protonen gegeben ist, die jeweils mit einer Elementarladung behaftet sind. Ein neutrales Atom enthält in der Atomhülle eine gleich große Anzahl negativ geladener Elektronen sowie positiv geladener Protonen im Kern. Im Unterschied zur in Bild 2.1 gewählten Darstellung nimmt der wirkliche Atomkern innerhalb der durch die elektrischen Felder von Protonen und Elektronen erfüllten Atomhülle einen sehr viel kleineren Raum ein. Infolgedessen ist die dichte Packung von Atomen in fester Materie nur gegenüber anderen Atomen undurchlässig, während sie gegenüber schnell fliegenden Elementarteilchen wie Elektronen, Protonen oder Neutronen wegen der relativ großen Zwischenräume zwischen Atomkernen und Hüllenelektronen weitgehend durchlässig wirkt. Ein chemisches Element ist durch die Anzahl  $Z$  der Elektronen in der Hülle bzw. der Protonen im Kern (Kernladungszahl) charakterisiert, z. B. Wasserstoff:  $Z = 1$ , Sauerstoff:  $Z = 8$ , Eisen:  $Z = 26$  (siehe Anhang 15.13<sup>1)</sup>). Die chemischen Elemente sind im sogenannten Periodensystem entsprechend ihrer Kernladungszahl angeordnet, die deshalb auch als Ordnungszahl bezeichnet wird. Das in der Natur vorkommende Element mit der höchsten Kernladungszahl ist Uran ( $Z = 92$ ). Künstlich wurden Transurane mit Kernladungszahlen bis über 115 hergestellt.

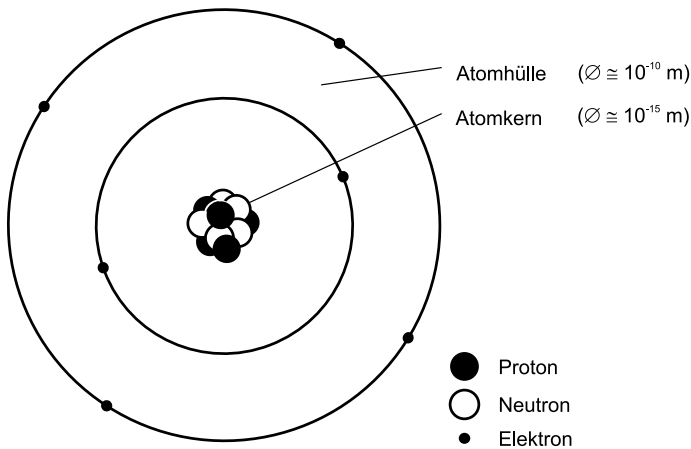
Außer den Protonen enthält der Atomkern eine vergleichbare Anzahl etwa gleich schwerer Kernteilchen, die elektrisch ungeladen (neutral) sind und Neutronen genannt werden. Protonen und Neutronen werden gemeinsam als Nukleonen bezeich-

---

<sup>1</sup> Bei Verweisen auf Anhang 15.1, Anhang 15.2, Anhang 15.3 etc. sind die numerisch sortierten Tabellen und Diagramme in Kapitel 15, „Anhang: Tabellen und Diagramme“, gemeint.

net. Die Nukleonenzahl  $A$ , auch Massenzahl genannt, ist demnach gleich der Summe aus der Anzahl  $Z$  der Protonen und der Anzahl  $N$  der Neutronen ( $A = Z + N$ ). In Bild 2.1 ist durch unterschiedlich weite Elektronenbahnen symbolisch dargestellt, dass sich die Elektronen in der Atomhülle in verschiedenen Abständen um den Atomkern bewegen, wobei sie mit unterschiedlichen Kräften an ihn gebunden sein können. Die Bahnen veranschaulichen damit bestimmte Zustände der Elektronen in der Atomhülle, die dadurch gekennzeichnet sind, dass zur Elektronenablösung vom Atom unterschiedliche Energien zugeführt werden müssen (Bindungsenergien). Es ist üblich, die Bahnen gemäß ihrer Bindungsenergien bestimmten Elektronenschalen zuzuordnen, die von innen nach außen mit den Buchstaben K, L, M, ... usw. bezeichnet werden. In ähnlicher Weise kann auch der Atomkern durch charakteristische Bewegungs- und Anregungszustände der Nukleonen (Energiezustände) gekennzeichnet werden, wobei zwischen Grundzustand und „angeregten“ Zuständen zu unterscheiden ist (siehe Bild 4.2 und Bild 4.3).

Ein Atomkern ist durch die Kernladungszahl  $Z$  und die Nukleonenzahl  $A$  gekennzeichnet. In der physikalischen Schreibweise für einen Atomkern  $X$  wird dazu die Kernladungszahl unten links und die Nukleonenzahl oben links neben das Elementsymbol gesetzt ( ${}^A_ZX$ , z. B.  ${}^{60}_{27}\text{Co}$ ). Zumeist wird  $Z$  weggelassen, da die Kernladungszahl bereits durch das Elementsymbol bestimmt ist ( ${}^{60}\text{Co}$ ). Eine ebenfalls gebräuchliche Schreibweise setzt die Nukleonenzahl hinter das Elementsymbol (z. B. Co-60 oder Co 60).



**Bild 2.1** Schematische Darstellung eines Atoms

Wenn Atomkerne untereinander sowohl die gleiche Ordnungszahl  $Z$  als auch die gleiche Massenzahl  $A$  haben, gehören sie zur gleichen Atomart, die als Nuklid bezeichnet wird. Atomarten, bei denen nur die Anzahl der Protonen gleich ist, heißen Isotope des Elements mit der Kernladungszahl  $Z$ , z. B. Cs-134 und Cs-137. Für Nuklide mit Atomker-

nen gleicher Massenzahl  $A$  wird der Begriff Isobare verwendet, z. B. P-32 und S-32. Durch den Buchstaben  $m$  oben rechts neben dem Elementsymbol werden Atomarten gekennzeichnet, deren Atomkerne sich in sogenannten metastabilen Energiezuständen befinden ( ${}^A_ZX^m$ , z. B.  ${}^{137}_{56}\text{Ba}^m$  bzw. Ba-137m). Als metastabil wird hier ein angeregter Zustand des Kerns bezeichnet, dessen mittlere Lebensdauer (siehe Abschnitt 4.1.3) so groß ist, dass dieser Atomkern in der Praxis als eigenständiges Nuklid betrachtet werden kann (Isomer).

Die Masse eines Atomkerns ist, was nach klassischen Gesetzen nicht zu erwarten wäre, stets kleiner als die Summe der Massen seiner Bestandteile. Diese Massendifferenz, der sogenannte Massendefekt, stellt nach der Einsteinschen Relativitätstheorie, welche Masse und Energie als äquivalent betrachtet, ein Maß für die Bindungsenergie des Atomkerns dar, in der sich die starken Massenanziehungskräfte geringer Reichweite zwischen den Bestandteilen des Atomkerns ausdrücken, die den Atomkern zusammenhalten.

Für die Masse  $m_a$  eines Atoms ergibt sich bei allen Nukliden ein sehr kleiner Zahlenwert (z. B.  $m_{\text{H}-1} = 1,6735 \cdot 10^{-24}$  g). Um das Rechnen mit derart kleinen Zahlenwerten zu vermeiden, wird anstelle der Atommasse  $m_a$  die sogenannte relative Atommasse  $A_r$  verwendet, die als dimensionslose Zahl das Verhältnis der Atommasse  $m_a$  zu einer Bezugsmasse  $m_u$  (Atommassenkonstante) bezeichnet ( $A_r = m_a/m_u$ ). Als Bezugsmasse dient heute der 12. Teil der Masse eines Atoms des Nuklids C-12, d. h.,  $m_u = 1,66054 \cdot 10^{-24}$  g. Mit der relativen Atommasse und der Atommassenkonstanten gilt für die Masse  $M$  von  $N$  Atomen eines Nuklids folgende Formel:

$$M = N \cdot A_r \cdot m_u \quad (2.1)$$

Da die meisten chemischen Elemente in unserer Natur Gemische mehrerer Isotope sind, ergibt sich die mittlere relative Atommasse  $\bar{A}_r$  eines Elements aus den relativen Häufigkeiten  $h_i$  des natürlichen Vorkommens der stabilen Isotope auf der Erde und ihren relativen Atommassen  $A_{ri}$  gemäß folgender Formel:

$$\bar{A}_r = \sum_i h_i \cdot A_{ri} \quad (2.2)$$

Die relativen Atommassen der Nuklide sind der Fachliteratur zu entnehmen. In Anhang 15.13 sind die mittleren relativen Atommassen der Elemente für die in der Natur vorkommende Isotopenzusammensetzung angegeben.

### Fachliteratur

[aud17], [eva82], [fri14], [iup16], [kra12], [mus95], [pov14]

### Online-Nukleardaten/Programm-Service

[iupac], [ndc]



---

# 3

## Strahlungsarten

---

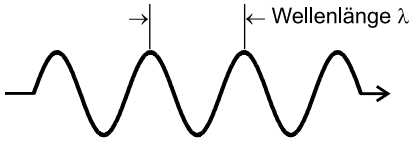
### 3.1 Materiestrahlung

Als materielle Strahlungsteilchen (Korpuskularstrahlung) werden mit hoher Geschwindigkeit den Raum durchsetzende kleinste Teilchen, insbesondere Bestandteile des Atoms, bezeichnet, die eine Ruhemasse besitzen. Die wichtigsten materiellen Strahlungsteilchen sind schnell fliegende Elektronen (e), Protonen (p), Neutronen (n) sowie Alphateilchen ( $\alpha$ ). Unter einem Alphateilchen wird dabei ein Teilchen verstanden, das aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht, die gemeinsam als besonders stabiles Gebilde aus einem größeren Atomkern ausgestoßen werden. Die bei Umwandlungen von Atomkernen ausgestoßenen Elektronen werden als Betateilchen ( $\beta$ ) bezeichnet.

### 3.2 Wellenstrahlung

Ähnliche Wirkungen wie durch materielle Strahlungsteilchen können auch durch schnelle periodische Änderungen (Schwingungen) von elektrischen und magnetischen Kraftfeldern verursacht werden, die sich im Raum ausbreiten (elektromagnetische Welle, siehe Bild 3.1). Wie bei anderen Wellenbewegungen besteht auch hier zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$ , der Wellenlänge  $\lambda$  (Abstand benachbarter Wellenberge) und der Frequenz  $f$  (Anzahl der Schwingungen pro Zeitintervall = Schwingungszahl) die Beziehung

$$c = \lambda \cdot f \tag{3.1}$$



**Bild 3.1** Schematische Darstellung der elektromagnetischen Wellenstrahlung: Der Wellenzug veranschaulicht die periodische Zu- und Abnahme des elektromagnetischen Kraftfeldes in einem Wellenpaket, das mit Lichtgeschwindigkeit an einem Punkt vorbeiläuft.

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen von weniger als  $10^{-9}$  m (siehe Anhang 15.3 und Anhang 15.4), da solche mit größeren Wellenlängen (sichtbares Licht: ca.  $0,5 \mu\text{m}$ , Wärmestrahlung: ca.  $0,1 \text{ mm}$ , Radarstrahlen: ca.  $10 \text{ cm}$ , Radiowellen: ca.  $100 \text{ m}$ ) keine Strahlenschäden im hier gemeinten Sinne verursachen. Kurzwellige elektromagnetische Wellen lassen sich auch als teilchenhafte Wellenpakete, Photonen genannt, auffassen, weil sie wie Teilchen auf die Materie einwirken können. Photonen haben keine Ruhemasse. Sie transportieren nur Energie (siehe Abschnitt 3.3), wobei sie sich geradlinig mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, die im Vakuum etwa  $c = 299\,792 \text{ km/s}$  beträgt.

Nach ihrer Entstehung wird bei der hier betrachteten elektromagnetischen Wellenstrahlung zwischen Gammastrahlung ( $\gamma$ ) und Röntgenstrahlung (X) unterschieden. Gammastrahlung wird aus radioaktiven Atomkernen emittiert. Röntgenstrahlung entsteht bei Elektronenübergängen in der Atomhülle sowie beim Auftreffen schnell bewegter geladener Teilchen, insbesondere Elektronen, auf Materie (z. B. Wolframtarget in Röntgenröhren). Die bei dem zuletzt genannten Wechselwirkungsprozess entstehende Röntgenstrahlung wird auch als Bremsstrahlung bezeichnet.

### 3.3 Eigenschaften der Strahlung

Das Verhalten materieller Strahlungsteilchen ist durch ihre Bewegungsenergie, ihre Masse und ihre elektrische Ladung gekennzeichnet. Die Bewegungsenergie oder kinetische Energie  $E_k$  bzw. das Arbeitsvermögen eines bewegten Teilchens mit der Masse  $m$  ist, solange die Geschwindigkeit  $v$  klein gegen die Lichtgeschwindigkeit  $c$  bleibt, durch folgende Beziehung gegeben:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (3.2)$$

Wenn sich die Teilchengeschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit nähert, gilt nach der Einsteinschen Relativitätstheorie folgende Formel:

$$E_k = \left( \frac{m}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - m \right) \cdot c^2 \quad (3.3)$$

Darin wird der Quotient  $m/\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$  im Unterschied zur Ruhemasse  $m$  auch als relativistische Masse bezeichnet, die mit zunehmender Geschwindigkeit größer wird.  $m \cdot c^2$  ist die sogenannte Ruheenergie, die einem ruhenden Teilchen ( $v = 0$ ) mit der Ruhemasse  $m$  entspricht. Wegen der sehr kleinen Teilchenmassen werden Bewegungs- und Ruheenergie von Strahlungsteilchen nicht in der technischen Energieeinheit Joule (J), sondern in der atomphysikalischen Einheit Elektronvolt (eV) bzw. Vielfachen davon (keV, MeV, GeV) angegeben. 1 eV ist die Bewegungsenergie eines Elektrons nach Durchlaufen eines elektrischen Spannungsgefälles im Vakuum von 1 Volt. Die Bedeutung der Vorsätze k, M und G kann aus Anhang 15.3 entnommen werden. Es gilt zahlenmäßig  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  (siehe Anhang 15.7). Für die Ruhemassen und -energien der Atombestandteile gelten die in Tabelle 3.1 angegebenen Werte.

**Tabelle 3.1** Ruheenergien und Ruhemassen der Atombestandteile

Teilchen	Energie in MeV	Masse in kg
Elektron	0,511	$9,1094 \cdot 10^{-31}$
Proton	938,272	$1,6726 \cdot 10^{-27}$
Neutron	939,565	$1,6749 \cdot 10^{-27}$

Für die Berechnung der Bewegungsenergie von Photonen lassen sich die vorangegangenen Berechnungsformeln nicht anwenden, da Photonen keine Ruhemasse haben und sich stets mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Die Bewegungsenergie von Photonen ist vielmehr proportional zur Frequenz der Wellen, bzw. gemäß Formel 3.1 umgekehrt proportional zur Wellenlänge.

$$E_k = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3.4)$$

Darin ist  $h$  eine zuerst von Planck angegebene Konstante, das Plancksche Wirkungsquantum ( $h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$ ). Mit dieser Formel lässt sich die Energie von Photonen (ebenfalls im Energiemaß eV bzw. keV oder MeV) berechnen, wenn die Wellenlänge  $\lambda$  bzw. Frequenz  $f$  der Wellen bekannt ist. Umgekehrt wird die zu einer bekannten Photonenenergie  $E_k$  in keV gehörende Frequenz  $f$  in 1/s bzw. Wellenlänge  $\lambda$  in nm (im Vakuum) aus folgenden Zahlenwertgleichungen ermittelt:

$$f = \frac{E_k}{h} = 2,418 \cdot 10^{17} \cdot E_k \quad (3.5)$$

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_k} = 1,240/E_k \quad (3.6)$$

Die Energien von materiellen Teilchen und Photonen, die von praktisch gebräuchlichen radioaktiven Stoffen emittiert werden, liegen im Allgemeinen zwischen etwa 5 keV und 10 MeV. Bei Röntgenröhren stimmt die maximale Photonenenergie (Grenzenergie) in keV wertmäßig mit der Spannung der Röntgenröhre in kV überein, die im Allgemeinen zwischen 10 kV und 500 kV liegt. Mit Beschleunigern können auch Teilchenenergien von vielen GeV erreicht werden.

#### **Fachliteratur**

[ber24], [bia18], [das03], [eva82], [fri14], [gai16], [kam14], [kra19], [kri23], [leo94], [mar13], [may02], [mus95], [pet19], [pov14], [rum24], [tur22]

#### **Online-Nukleardaten/Programm-Service**

[amdc], [ciaaw], [iupac], [psi], [ptable], [usndp]

---

# 4

## Strahlungsquellen

---

### 4.1 Radioaktive Stoffe

#### 4.1.1 Aktivität

Radioaktive Strahlungsquellen sind Substanzen, bei denen infolge von Kernprozessen aus einzelnen Atomkernen spontan, d. h. ohne äußere Einwirkung, Photonen und materielle Teilchen, beide kurz Strahlungsteilchen genannt, ausgestoßen werden. Die durchschnittliche Anzahl  $\Delta N$  solcher Kernprozesse, die sich in einem kleinen Zeitintervall  $\Delta t$  in einer Menge von Atomen vollziehen, geteilt durch das Zeitintervall, wird als Aktivität bezeichnet.

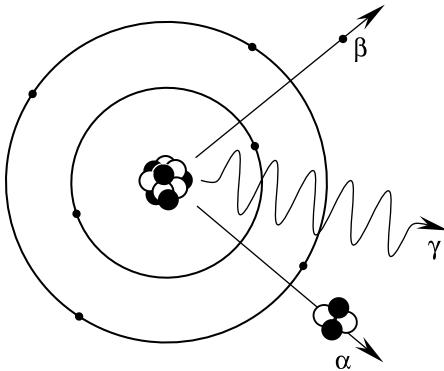
$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad (4.1)$$

Die Einheit der Aktivität ist das Becquerel (Bq), wobei  $1 \text{ Bq} = 1$  Kernprozess pro Sekunde ist. Früher war die Einheit Curie (Ci) gebräuchlich. Es gilt:  $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ , was etwa der Aktivität von 1 g Radium entspricht. Radium wurde als Vergleichselement gewählt, weil es die ersten stärkeren radioaktiven Quellen lieferte und dank seiner großen Halbwertszeit von 1600 Jahren (siehe Abschnitt 4.1.3) praktisch eine nahezu konstante Aktivität besitzt.

Da in der Praxis mit Aktivitäten bis etwa  $10^{15} \text{ Bq}$  zu rechnen ist, sind außer den Grundeinheiten auch noch typische Vielfache bzw. Bruchteile dieser Einheiten in Gebrauch, z. B. TBq, GBq, MBq bzw. kCi, mCi,  $\mu\text{Ci}$  (siehe Anhang 15.3 und Anhang 15.9).

### 4.1.2 Kernprozesse

Bei spontanen Kernprozessen gelangen Atomkerne von einem weniger stabilen Zustand in einen stabileren Zustand, indem sie sich entweder in Kerne anderer Nuklide umwandeln (radioaktive Umwandlung) oder von einem metastabilen Zustand in einen energetisch niedrigeren Zustand übergehen (isomerer Übergang). Dabei können materielle Teilchen ausgestoßen oder Photonen abgestrahlt werden (siehe Bild 4.1).



**Bild 4.1** Schematische Darstellung der Strahlungsemission aus dem Atomkern

Bei den schweren Atomkernen ( $A > 200$ ) werden vielfach Alphateilchen ( $\alpha$ ) emittiert (Alphaerfall). Bei leichteren Kernen führen radioaktive Prozesse fast immer zur Emission von Betateilchen ( $\beta$ ), deren Ladung sowohl negativ als auch positiv sein kann (Betaerfall). Die Emission eines negativen Betateilchens ( $\beta^-$ , Negatron), das an sich kein stabiler Bestandteil des Kerns ist, lässt sich dabei als Folge der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton und ein Elektron innerhalb des Kerns deuten ( $n \rightarrow p^+ + \beta^-$ ). Die Emission eines positiven Betateilchens ( $\beta^+$ , Positron) folgt entsprechend aus der Umwandlung eines Protons in ein Neutron ( $p^+ \rightarrow n + \beta^+$ ). Der  $\beta^+$ -Zerfall tritt nur bei künstlich radioaktiven Stoffen auf. Die Umwandlung von Proton in Neutron ist auch über die Aufnahme eines Elektrons aus der Atomhülle in den Kern möglich (Elektroneneinfang) ( $p^+ + e^- \rightarrow n$ ). Dieser Prozess, der üblicherweise mit dem Symbol  $\epsilon$  gekennzeichnet wird, tritt bevorzugt bei Atomkernen mit Massenzahlen  $A > 60$  auf.

Häufig befindet sich der Atomkern nach einer radioaktiven Umwandlung zunächst noch in einem metastabilen, energetisch angeregten Zustand, aus dem er erst durch Emission eines oder mehrerer Photonen (Gammaquanten) in den Grundzustand übergehen kann. Der isomere Übergang wird mit dem Symbol IT gekennzeichnet. Auf die Primär-Alpha- oder Betaemission folgt somit unmittelbar anschließend eine Gammaemission bzw. eine Kette von mehreren Gammaemissionen, bis der Grundzustand