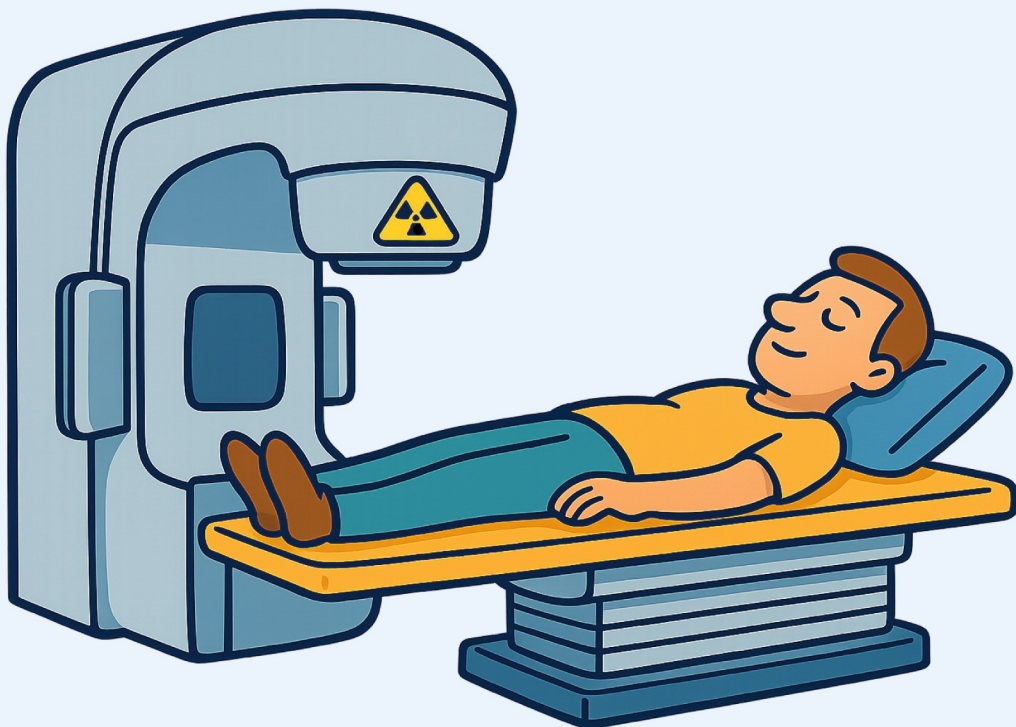


Axel Donges

Lehr- und Übungsbuch für MTR - Ionisierende Strahlung

Physikalische Grundlagen und Anwendungen in der Medizin



Axel Donges

Lehr- und Übungsbuch für MTR

Ionisierende Strahlung –

Physikalische Grundlagen

und

Anwendungen in der Medizin

Axel Donges

Lehr- und Übungsbuch für MTR

Ionisierende Strahlung –

Physikalische Grundlagen

und

Anwendungen in der Medizin

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über dnb.dnb.de abrufbar.

Die automatisierte Analyse des Werkes, um daraus Informationen insbesondere über Muster, Trends und Korrelationen gemäß §44b UrhG („Text und Data Mining“) zu gewinnen, ist untersagt.

© 2026 Axel Donges

Herstellung und Verlag:

BoD · [Books on Demand GmbH](http://www.bod.de), Überseering 33, 22297 Hamburg

ISBN: 978-3-6963-1137-7

Vorwort

Ziel dieses Lehr- und Übungsbuchs ist es, die physikalisch-technischen Grundlagen – insbesondere im Bereich der Strahlenphysik und der medizinischen Anwendung ionisierender Strahlung – verständlich, systematisch und praxisnah zu vermitteln. Besonderer Wert wurde auf eine klare und anschauliche Darstellung gelegt. Zahlreiche Beispiele, Abbildungen und Übungsaufgaben sollen den Zugang zum Stoff erleichtern und den Transfer in die berufliche Praxis unterstützen. Dabei hoffe ich, den Spagat geschafft zu haben, die Inhalte so weit wie möglich zu vereinfachen, ohne die wissenschaftliche Genauigkeit zu beeinträchtigen.



Das Lehrbuch ist sowohl als Begleitmaterial zum Unterricht als auch zur eigenständigen Vertiefung gedacht. Es richtet sich in erster Linie an angehende Medizintechnologinnen und Medizintechnologen, kann aber ebenso Studierenden der Medizinphysik, Medizintechnik und verwandter Fachrichtungen sowie interessierten Fachkräften im Gesundheitswesen als fundierte Grundlage dienen. Ziel ist es, ein solides Fundament zu vermitteln, auf dem fachliche Kenntnisse aufgebaut, vertieft und reflektiert angewendet werden können.

Bei der Erstellung dieses Lehr- und Übungsbuchs kamen neben fachlicher Literatur und eigener Lehrerfahrung auch moderne Werkzeuge der Künstlichen Intelligenz (KI) zum Einsatz. Diese wurden insbesondere zur sprachlichen Überarbeitung, Illustration und didaktischen Gestaltung sowie zur Unterstützung bei sprachlichen Formulierungen genutzt. Die fachliche Konzeption, inhaltliche Auswahl, Prüfung und Endredaktion sämtlicher Inhalte erfolgten jedoch durch den Autor.

Hinweis zu den Abbildungen

Ein Teil der in diesem Lehr- und Übungsbuch verwendeten Abbildungen wurde mithilfe von Werkzeugen der Künstlichen Intelligenz (KI) erstellt oder bearbeitet. Die Darstellungen dienen ausschließlich der didaktischen Veranschaulichung und besitzen keinen dokumentarischen Charakter. Soweit Personen, Objekte oder Szenen dargestellt werden, handelt es sich um künstlich erzeugte oder künstlerisch gestaltete Illustrationen. Sie dienen ausschließlich der didaktischen Veranschaulichung und erheben keinen Anspruch auf historische, technische oder fotografische Authentizität.

Hinweis zu rechtlichen Inhalten und Haftung

Bei allen Ausführungen zu den Themen Dosimetrie und Strahlenschutz – insbesondere zu Strahlungs- und Gewebe-Wichtungsfaktoren, Dosisgrenzwerten, Strahlenschutzbereichen sowie Verantwortlichkeiten und Pflichten – wurde großer Wert auf fachliche Sorgfalt und rechtliche Genauigkeit gelegt. Die entsprechenden Inhalte orientieren sich an den zum Zeitpunkt der Erstellung geltenden gesetzlichen und fachlichen Grundlagen, insbesondere am Strahlenschutzgesetz (StrlSchG), der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) sowie den Veröffentlichungen des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS).

Dieses Lehr- und Übungsbuch dient ausschließlich Lehr-, Lern- und Informationszwecken und stellt keine amtliche Rechtsquelle dar. Trotz sorgfältiger Recherche, Prüfung und Erstellung kann keine Gewähr für die Vollständigkeit, Richtigkeit, Aktualität oder Fehlerfreiheit der enthaltenen Informationen übernommen werden. Der Autor übernimmt – soweit gesetzlich zulässig – keine Haftung für Schäden oder Nachteile, die unmittelbar oder mittelbar aus der Nutzung, Anwendung oder Interpretation der Inhalte entstehen. Für berufliche Entscheidungen und die praktische Anwendung sind stets die jeweils gültigen gesetzlichen Vorschriften, Verordnungen, Richtlinien sowie die aktuellen Originalfassungen der maßgeblichen Rechtsgrundlagen heranzuziehen. Im Zweifelsfall sind ausschließlich diese verbindlich.

Die Inhalte dieses Lehr- und Übungsbuchs ersetzen weder medizinische Fachanweisungen noch betriebliche Arbeitsanweisungen, behördliche Vorgaben oder verbindliche Herstellerinformationen. Für diagnostische oder therapeutische Entscheidungen sowie für die praktische Anwendung sind ausschließlich die jeweils gültigen Rechtsvorschriften, Richtlinien und dienstlichen Vorgaben maßgeblich.

Dieses Lehrbuch wurde mit großer Sorgfalt erstellt. Dennoch können trotz aller Bemühungen Fehler oder Unstimmigkeiten auftreten. Über entsprechende Hinweise, Anregungen oder Verbesserungsvorschläge freue ich mich jederzeit (z. B. per E-Mail an [adonges\(at\)gmx.de](mailto:adonges(at)gmx.de)).

Isny im Allgäu, im August 2026

Axel Donges



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Inhaltsverzeichnis	9
0. Größen, Formelzeichen und Abkürzungen	17
1. Einleitung	21
2. Physikalische Grundlagen	25
2.1 Grundlagen der Atomphysik.....	25
2.1.1 Aufbau der Atome	25
2.1.2 Schalenmodell	27
2.1.3 Bindungsenergie eines Elektrons.....	28
2.1.4 Ionen	30
2.2 Photonenstrahlung.....	31
2.2.1 Grundlegendes zu Photonen	31
2.2.1.1 Was ist Licht?	31
2.2.1.2 Energie, Leistung, Intensität und spektrale Größen	33
2.2.2 Erzeugung von Photonen	35
2.2.2.1 Elektronischer Übergang eines gebundenen Elektrons.....	35
2.2.2.2 Bremsstrahlung	36
2.2.2.3 Gamma-Strahlung	37
2.2.3 Wechselwirkung von Photonen mit Materie.....	38
2.2.3.1 Photoeffekt	38
2.2.3.2 Compton-Effekt.....	38
2.2.3.3 Paarbildung	40
2.2.3.4 Schwächungsgesetz.....	41
2.2.3.5 Analogie zwischen Photonenabsorption und Schuss in einen Wald.....	43
2.2.3.6 Energie- und Z-Abhängigkeit des Schwächungskoeffizienten.....	44
2.2.3.8 Anwendungsbeispiel: Messung der „Knochendichte“	50
2.2.3.9 Schwächung und Strahlenhärtung von Röntgenstrahlung	53
2.2.3.10 Entstehung eines Röntgenbildes	55
2.2.3.11 Strahlbegrenzung und Richtungsselektion	59
2.3 Elektronenstrahlen	63
2.3.1 Glühelektrischer Effekt.....	63

2.3.2	Beschleunigung von Elektronen	63
2.3.2.1	Prinzip der Beschleunigung	63
2.3.2.2	Elektronenkanone	64
2.3.2.3	Linearbeschleuniger	65
2.3.2.4	Bewegte Ladungen im Magnetfeld	68
2.3.3	Wechselwirkung von Elektronen mit Materie	72
2.4	Grundlagen der Kernphysik	77
2.4.1	Isotope und Nuklidkarte	77
2.4.2	Bindungsenergien von Kernen	78
2.4.3	Radioaktive Zerfälle	82
2.4.3.1	Alpha-Zerfall	83
2.4.3.2	Beta-Zerfall	84
2.4.3.3	Gamma-Zerfall	89
2.4.3.4	Innere Konversion (IC)	91
2.4.3.5	Radioaktive Zerfälle in der Nuklidkarte	92
2.4.3.6	Radioaktives Zerfallsgesetz	93
2.4.3.7	Natürliche Radioaktivität	95
2.4.3.8	Künstliche Radioaktivität	99
2.4.3.9	Ergänzung: Statistik des radioaktiven Zerfalls	101
2.4.4	Wechselwirkung von radioaktiver Strahlung mit Materie	105
2.4.4.1	Absorption von Alpha-Strahlung	105
2.4.4.2	Absorption von Beta-Strahlung	108
2.4.4.3	Abschirmung von Neutronen	110
	Wichtige Formeln aus Kapitel 2	113
	Aufgaben zur Selbstüberprüfung – Kapitel 2	115
3.	Strahlungsquellen in der Medizin	123
3.1	Ionisierende Strahlung und ihre biologische Wirkung	123
3.2	Strahlungsquellen für ionisierende Strahlung	125
3.2.1	Röntgenröhre	125
3.2.1.1	Wilhelm Conrad Röntgen – Entdecker und Privatmensch	125
3.2.1.2	Aufbau und Funktionsprinzip der Röntgenröhre	127
3.2.1.3	Strahlenschutzgehäuse und Nutzstrahl	128
3.2.1.4	Röntgenspektrum und Intensität	129
3.2.1.5	Filterung	131

3.2.1.6	Kühlung	133
3.2.1.7	Brennfleck	135
3.2.1.8	Heel-Effekt	139
3.2.1.9	Strom-Zeit-Produkt	141
3.2.1.10	Betrieb unter fallender Last	142
3.2.1.11	Computer-Tomographie.....	143
3.2.2	Linearbeschleuniger	145
3.2.2.1	Photonenmodus.....	145
3.2.2.2	Elektronenmodus	147
3.2.2.3	Moderne Bestrahlungstechniken	148
3.2.3	Zyklotron und Synchrotron.....	151
3.2.3.1	Protonen- und Ionenstrahlung	151
3.2.3.2	Neutronenstrahlung.....	154
3.2.4	Radioaktive Quellen in der Medizin.....	156
3.2.4.1	Grundformen des Einsatzes radioaktiver Quellen	156
3.2.4.2	Beispiele spezieller Radionuklide und deren Einsatz	158
3.2.4.3	Beispiel: „Kobalt-Kanone“	160
3.2.4.4	Beispiel: Radon-Therapie	161
3.2.5	UV-Strahlung	162
3.2.6	Typische Energien von medizinischen Strahlungsquellen.....	162
3.2.7	Röntgenstrahlung – kurz und bündig	164
	Wichtige Formeln aus Kapitel 3.....	165
	Aufgaben zur Selbstüberprüfung – Kapitel 3.....	166
4.	Detektion ionisierender Strahlung	173
4.1	Wie alles begann – der Röntgenfilm	173
4.1.1	Röntgenfilm	174
4.1.2	Schwärzungskurve	176
4.1.3	Schlussbemerkung zum Röntgenfilm.....	178
4.2	Gas-Detektoren	180
4.2.1	Ionisationskammer.....	180
4.2.1.1	Aufbau der Ionisationskammer	180
4.2.1.2	Physikalisches Funktionsprinzip	181
4.2.1.3	Betriebsspannung der Ionisationskammer.....	182
4.2.1.4	Ionendosisleistung	184

4.2.1.5	Energieabhängigkeit der Ionisationskammer	185
4.2.1.6	Anwendungen der Ionisationskammer in der Medizin	187
4.2.2	Zählrohr	192
4.2.2.1	Aufbau eines Zählrohrs	192
4.2.2.2	Gasverstärkung und Betriebsbereiche	193
4.2.2.3	Funktionsweise eines Zählrohrs	195
4.2.2.4	Proportional-Zähler vs. Geiger-Müller-Zähler	196
4.2.2.5	Tot- und Erholungszeit	199
4.2.2.6	Zählrate	200
4.2.2.7	Kennlinie eines Geiger-Müller-Zählers	201
4.3	Lumineszenz-Detektoren	204
4.3.1	Einführung: Radiolumineszenz in Uhren	204
4.3.2	Was ist Lumineszenz?	205
4.3.3	Szintillationszähler	208
4.3.3.1	Eigenschaften des NaI(Tl)-Kristalls	209
4.3.3.2	Detektion der Szintillationsphotonen	210
4.3.3.3	Auswertung des Signals	211
4.3.3.4	Interpretation des Gamma-Spektrums	212
4.3.3.5	Messung von Alpha- und Beta-Strahlung mit Szintillatoren	218
4.3.3.6	Anwendungsbeispiele der Gamma-Spektroskopie in der Medizin	220
4.3.3.7	Röntgenbild-Verstärker	229
4.3.3.8	Verstärkerfolie	232
4.3.4	OSL-Detektoren	233
4.3.4.1	Prinzip der optisch stimulierten Emission	233
4.3.4.2	Anwendungen der OSL in der Medizin: Speicherfolie	233
4.3.5	Thermolumineszenz-Detektoren	236
4.4	Halbleiter-Detektoren	237
4.4.1	Physikalische Grundlagen	237
4.4.2	Grundprinzip eines Halbleiter-Detektors	239
4.4.3	Halbleiter-Detektoren in der Medizin	242
4.4.3.1	Ganzkörper-Zähler mit Halbleiter-Detektoren	242
4.4.3.2	Flachbild-Detektoren in der digitalen Röntgendiagnostik	243
4.4.3.3	Digitale Dosimeter auf Halbleiterbasis	245
4.5	Tabelle der Strahlungsdetektoren	247
	Wichtige Formeln aus Kapitel 4	249

Aufgaben zur Selbstüberprüfung – Kapitel 4.....	250
5. Dosimetrie.....	257
5.1 Physikalische Dosimetrie	257
5.1.1 Ionendosisleistung und Ionendosis	257
5.1.2 Energiedosis und Energiedosisleistung.....	258
5.1.3 Kerma und Kermaleistung	260
5.1.3.1 Direkt und indirekt ionisierende Strahlung	260
5.1.3.2 Definition von Kerma und Kermaleistung.....	261
5.1.4 Dosisverteilungen in Wasser bei Photonenstrahlung	263
5.1.4.1 Wasser-Phantom.....	263
5.1.4.2 Tiefendosiskurve eines Photonenstrahls.....	264
5.1.4.3 Rückstreufaktor.....	269
5.1.4.4 Dosisquerprofile	271
5.1.4.5 Isodosen-Verteilung	274
5.1.4.6 Kenndosisleistung	277
5.1.4.7 Kalibrierung einer Photonen-Strahlungsquelle	278
5.1.4.8 Äquivalente quadratische Feldgröße.....	283
5.1.5 Dosisverteilungen in Wasser bei Elektronenstrahlen	284
5.1.5.1 Kenndosisleistung einer Elektronenquelle	284
5.1.5.2 Tiefendosiskurve von Elektronenstrahlen	284
5.1.5.3 Dosisquerprofile bei Elektronenstrahlen.....	286
5.1.5.4 Anwendung von Elektronenstrahlen.....	287
5.1.5.5 Feldgrößenabhängigkeit.....	287
5.2 Biologische Wirkungen ionisierender Strahlung	288
5.2.1 Zerstörung von Zellen.....	288
5.2.2 Linearer Energietransfer (LET)	289
5.3 Dosisgrößen im Strahlenschutz	292
5.3.1 Äquivalentdosis	292
5.3.1.1 Definition der Äquivalentdosis	292
5.3.1.2 Ortsdosis	293
5.3.1.3 Personendosis	295
5.3.1.4 Körperdosen (Organ-Äquivalentdosis und effektive Dosis).....	296
5.3.1.5 Übersicht Dosisgrößen	300
Wichtige Formeln aus Kapitel 5.....	301

Aufgaben zur Selbstüberprüfung – Kapitel 5	303
6. Strahlenschutz	311
6.1 Als es noch keinen Strahlenschutz gab	311
6.1.1 Opfer ionisierender Strahlung	311
6.1.1.1 Das Schicksal des Clarence Madison Dally	311
6.1.1.2 Die Radium Girls.....	314
6.1.1.3 Röntgenepilation – Kosmetische Anwendung mit dramatischen Folgen	316
6.1.1.4 Weitere frühe Opfer ionisierender Strahlung	317
6.1.2 Zum Gedenken – die Opfer der Atombombenabwürfe.....	318
6.1.3 Zeitleiste: Vom Röntgen-Boom zum heutigen Strahlenschutz	320
6.2 Schädigungen durch ionisierende Strahlung	323
6.2.1 Woher unser Wissen über Strahlenschäden stammt	323
6.2.2 Deterministische Strahlenschäden	324
6.2.2.1 Was sind deterministische Schäden?	324
6.2.2.2 Bedingungen für deterministische Schäden.....	327
6.2.2.3 Schwellendosen	328
6.2.3 Stochastische Strahlenschäden	330
6.2.3.1 Was sind stochastische Schäden?	330
6.2.3.2 Fakten zu stochastischen Strahlenschäden	332
6.2.3.3 Wahrscheinlichkeit stochastischer Schäden.....	333
6.2.4 Vergleich deterministische vs. stochastische Schäden	336
6.2.5 Alltagsbeispiele für deterministische und stochastische Strahlenschäden.....	338
6.2.5.1 Beispiel: Alkohol.....	338
6.2.5.2 Beispiel: UV-Strahlung.....	339
6.2.5.3 Beispiel: Lärm.....	340
6.2.5.4 Beispiel: Zigarettenrauchen und Nikotin.....	340
6.3 Typische Strahlenexpositionen.....	342
6.3.1 Strahlenexposition in Deutschland.....	342
6.3.1.1 Natürliche Strahlenquellen	342
6.3.1.2 Künstliche Strahlenquellen	346
6.3.1.3 Fazit: Typische Strahlenexpositionen	348
6.3.2 Körperdosen bei radiologischen Anwendungen.....	348
6.3.2.1 Strahlenbelastung für Patienten	348
6.3.2.2 Strahlenbelastung für medizinisches Personal.....	352
6.3.2.3 Strahlenexposition von MTRA/MTR – Entwicklung über vier Jahrzehnte	353

6.4	Vorschriften im Strahlenschutz.....	357
6.4.1	Einführung: Strahlenschutzrecht in Deutschland	357
6.4.2	Verantwortlichkeiten im Strahlenschutz	359
6.4.2.1	Strahlenschutz-Verantwortliche (SSV).....	359
6.4.2.2	Strahlenschutz-Beauftragte (SSB).....	359
6.4.2.3	Aufsichtsbehörden	360
6.4.2.4	Fachkunde im Strahlenschutz.....	361
6.4.2.5	Medizinphysik-Experte (MPE)	363
6.4.3	Grundzüge des Strahlenschutzes.....	364
6.4.3.1	Strahlenschutzgrundsätze	364
6.4.3.2	Strahlenschutzbereiche	368
6.4.4	Kategorien beruflicher Strahlenexposition	373
6.4.5	Arbeitsmedizinische Vorsorge	374
6.4.6	Dosisgrenzwerte.....	375
6.4.7	Regelungen für schwangere und gebärfähige Frauen	378
6.4.8	Beschäftigungs- und Zutrittsverbote für Jugendliche	379
6.5	Dosisflächenprodukt und diagnostische Referenzwerte.....	380
6.5.1	Dosisflächenprodukt.....	380
6.5.1.1	Definition des DFP	380
6.5.1.2	Bedeutung des DFP	380
6.5.2	Diagnostische Referenzwerte (DRW).....	383
6.5.2.1	DRW in der Röntgendiagnostik	383
6.5.2.2	DRW bei CT-Aufnahmen.....	384
6.5.2.3	DRW in der Nuklearmedizin	384
6.6	Strahlenschutz bei Beschleunigern	385
6.6.1	Baulicher Strahlenschutz	385
6.6.2	Strahlungsarten bei Beschleunigern.....	386
6.6.3	Strahlenschutzbereiche	389
6.6.4	Betrieblicher Strahlenschutz	391
6.7	Praktischer Strahlenschutz	393
6.7.1	3-A-Regel	393
6.7.1.1	Die 3-A-Regel – erklärt mit einem wilden Cowboy	393
6.7.1.2	Abstand halten	395
6.7.1.3	Aufenthaltsdauer beschränken	399
6.7.1.4	Abschirmungen verwenden	399

6.7.1.5	Fazit der 3-A-Regel	402
6.7.1.6	Erweiterung der 3-A-Regel zur 5-A-Regel.....	403
6.7.2	Schutz vor Kontamination	405
6.7.3	Schutz vor Inkorporation.....	407
6.7.4	Persönliche Schutzausrüstung und Hilfsmittel	410
6.7.5	Entsorgung radioaktiver Abfälle	412
6.8	Wichtige Fakten im Strahlenschutz – kurz und bündig.....	415
6.9	MRT und Strahlenschutz.....	419
6.9.1	Physikalische Grundlagen der MRT	419
6.9.2	Mögliche Gefahren bei der MRT	422
	Wichtige Formeln aus Kapitel 6	425
	Aufgaben zur Selbstüberprüfung – Kapitel 6	426
	Lösungen der Aufgaben zur Selbstüberprüfung	433
	Zu Kapitel 2	433
	Zu Kapitel 3	437
	Zu Kapitel 4	443
	Zu Kapitel 5	449
	Zu Kapitel 6	456
	Glossar	463
	Begriffserklärungen	463
	Zweisprachiges Glossar der Strahlenschutzbegriffe.....	482
	Literaturverzeichnis.....	489
	TEIL A — Grundlegendes, Ergänzung und Vertiefung	489
	TEIL B — Im Text zitierte Quellen.....	491
	TEIL C — Historische Quellen	499
	Sachwortverzeichnis	501

0. Größen, Formelzeichen und Abkürzungen

Zu Beginn eine kleine Übersicht:

Tab. 0.1 Größen, Formelzeichen, Einheiten

Größe	Formelzeichen	Einheit	abgek. Einheit
Aktivität	A	Becquerel	Bq = 1/s
Äquivalentdosis (z. B. Ortsdosis, Personendosis, Organdosen) effektive Dosis	H E _{Eff}	Sievert	Sv
Äquivalentdosisleistung	$\dot{H}$		Sv/s
Dichte	ρ		kg/m ³
Dichte, optische	D		
Energie	E	Elektronenvolt Joule	eV = 1,602·10 ⁻¹⁹ J J = 6,242·10 ¹⁸ eV
Energiedosis	D	Gray	Gy = J/kg
Energiedosisleistung	$\dot{D}$		Gy/s
Fläche	A	Quadratmeter	m ²
Frequenz	f	Hertz	Hz = 1/s
Intensität	I		W/m ²
Ionendosis	J		C/kg
Ionendosisleistung	$\dot{J}$		A/kg = C / (s·kg)
Kerma	K	Gray	Gy = J/kg
Kermaleistung	$\dot{K}$		Gy/s
Ladung	Q	Coulomb	C = As
Leistung	P	Watt	W = J/s
Masse	m	Kilogramm	kg
Spannung	U	Volt	V
spektrale Intensität	I _λ oder I _f		W/m ³ oder W/(m ² Hz)
spektrale Leistung	P _λ oder P _f		W/m oder W/Hz
Strom	I	Ampere	A = C/s
Strecke	a, b, c, ... x, y, z	Meter	m
Transmission	T		
Volumen	V		m ³
Wellenlänge	λ	Meter	m
Zahl der Impulse	Z		
Zählrate	$\dot{z}$		1/s
Zeit	t	Sekunde	s

Tab. 0.2 Größen, Formelzeichen, Einheiten

Giga (G)	$10^9 = 1\,000\,000\,000$
Mega (M)	$10^6 = 1\,000\,000$
Kilo (k)	$10^3 = 1\,000$
Milli (m)	$10^{-3} = 0,001$
Mikro (μ)	$10^{-6} = 0,000\,001$
Nano (n)	$10^{-9} = 0,000\,000\,001$
Pico (p)	$10^{-12} = 0,000\,000\,000\,001$
Femto (f)	$10^{-15} = 0,000\,000\,000\,000\,001$

Tab. 0.3 Konstanten

Elementarladung	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Eulersche Zahl	$e = 2,718$
Lichtgeschwindigkeit	$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Plancksche Konstante	$h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$
Produkt aus Planckscher Konstante und Lichtgeschwindigkeit	$h \cdot c = 1,24 \cdot 10^{-6} \text{ eV} \cdot \text{m}$

Beachte: Das Symbol **e** kann zwei Bedeutungen haben: die **Eulersche Zahl (2,718)** oder die **Elementarladung ($1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)**. Der Kontext entscheidet, welche Größe gemeint ist.

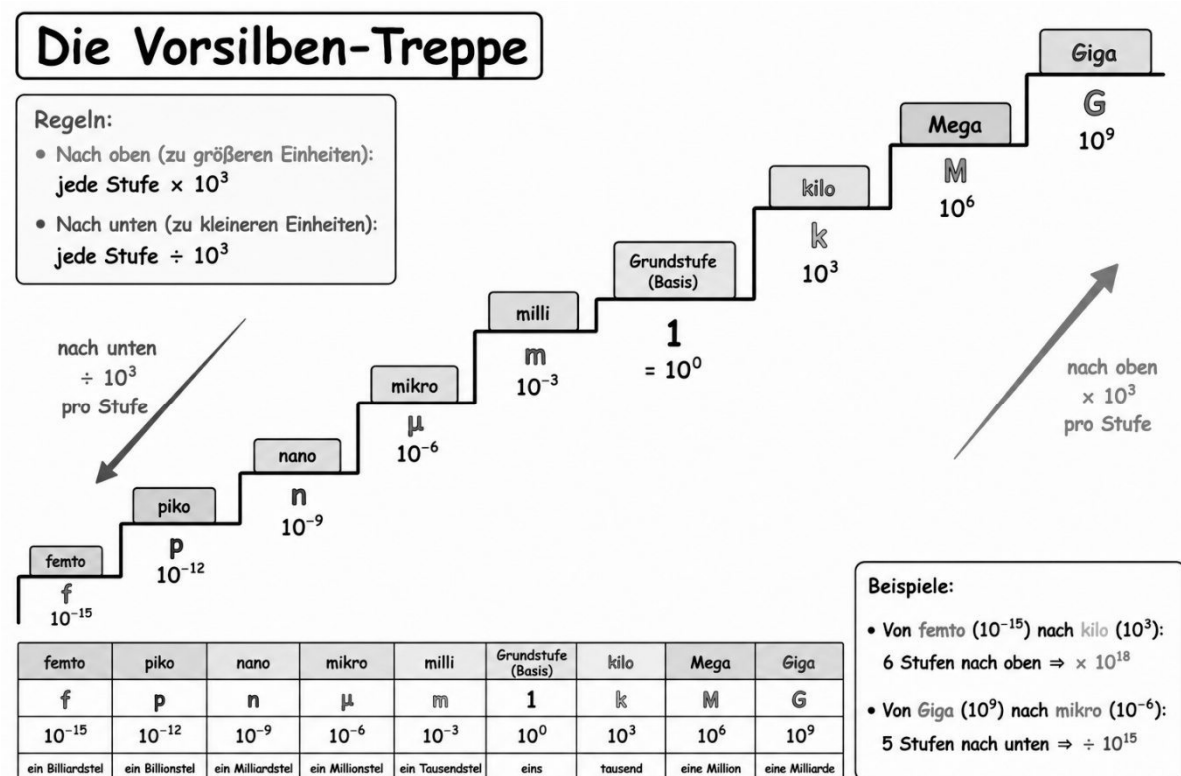


Abb. 0.1 Die Vorsilben-Treppe

Merksatz für Vorsilben-Treppe:

**finstere piraten navigieren μ-metergenau motorboote Bei
kräftigem Monsun im Gelbenmeer.**

(Anmerkung: Die von der deutschen Rechtschreibung abweichende Schreibweise ist beabsichtigt. Die Anfangsbuchstaben bilden die SI-Vorsilben **f** (femto), **p** (piko), **n** (nano), **μ** (mikro), **m** (milli), **B** (Basis = 1), **k** (kilo), **M** (Mega) und **G** (Giga) ab).

Tab. 0.4 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BÄK	Bundesärztekammer
BMD	Bone Mineral Density (areale Knochenmineraldichte)
CT	Computer-Tomographie
DFP	Dosisflächenprodukt
DNA	Desoxyribonukleinsäure
DRW	Diagnostischer Referenzwert
DXA	Dual-Röntgen-Absorptiometrie
GMZ	Geiger-Müller-Zähler
IC	Innere Konversion
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
IMRT	intensitätsmodulierte Strahlentherapie
LET	linearer Energietransfer
LINAC	Linear Accelerator (Linearbeschleuniger)
MLC	Multi-Leaf-Kollimator
MPE	Medizinphysik-Experte
MRT	Magnetresonanz-Tomographie
MTR	Medizinische Technologin für Radiologie / Medizinischer Technologie für Radiologie
MTRA	Medizinisch-technische/r Radiologieassistent/in (alte Berufsbezeichnung)
OSL	Optisch stimulierte Lumineszenz
PET	Positronen-Emissions-Tomographie
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
QHA	Quelle-Haut-Abstand
RSF	Rückstreu faktor
SPECT	Single-Photon Emission Computed Tomography
StrlSchG	Strahlenschutzgesetz
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
TDK	Tiefendosiskurve
TLD	Thermolumineszenz-Detektor
UV	Ultraviolett / ultraviolette Strahlung
VMAT	Volumetric Modulated Arc Therapy

Tab. 0.5 Verzeichnis der verwendeten griechischen Buchstaben

Griechischer Buchstabe		Name
klein	groß	
α		Alpha
β		Beta
γ		Gamma
	Δ	Delta
ε		Epsilon
θ		Theta
λ		Lambda
μ		Mu (sprich: Mü)
ν		Nu (sprich: Nü)
π		Pi
ρ		Rho
τ		Tau
φ		Phi

1. Einleitung

Radiologie, Strahlentherapie und Nuklearmedizin bilden die drei zentralen Säulen der medizinischen Nutzung ionisierender Strahlung (Abb. 1.1).

- Die **Radiologie** dient überwiegend der **Diagnostik**: Röntgenaufnahmen, Computer-Tomographie (CT), Mammographie und Durchleuchtung erzeugen Bilder durch die unterschiedliche Absorption von Photonen im Körper. Ergänzt wird sie durch bildgebende Verfahren ohne ionisierende Strahlung, wie die Sonographie (Ultraschall) und Magnetresonanztomographie (MRT).
- Die **Strahlentherapie** nutzt **hochenergetische** Photonen, Elektronen oder andere Teilchen, um gezielt krankhaftes Gewebe zu zerstören, vor allem Tumoren, aber auch bestimmte nicht-onkologische Erkrankungen. Seltener kommt auch **niederenergetische Strahlung** zum Einsatz, etwa bei entzündlichen oder degenerativen Erkrankungen, bei denen eine **schmerzlindernde** bzw. **entzündungshemmende Wirkung** im Vordergrund steht.
- Die **Nuklearmedizin** verwendet **radioaktive Stoffe**, die im Körper biologische Prozesse sichtbar machen oder therapeutisch wirken. Diagnostisch stehen Verfahren wie Szintigraphie, SPECT¹ und PET² im Vordergrund; therapeutisch kommen Radionuklide zum Einsatz, die Strahlung direkt im Gewebe freisetzen, etwa bei Schilddrüsenerkrankungen oder bestimmten Tumoren.



Abb. 1.1 Die drei Säulen der medizinischen Nutzung ionisierender Strahlung

¹ Einzelphotonen-Emissions-Computer-Tomographie (= Single-Photon Emission Computed Tomography)

² Positronen-Emissions-Tomographie

Gemeinsam zeigen diese drei Fachgebiete die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten ionisierender Strahlung in der modernen Medizin.

Die Anwendung ionisierender Strahlung hat die moderne Medizin grundlegend verändert. Ob in der **diagnostischen Radiologie** (Abb. 1.2), der **Strahlentherapie** (Abb. 1.3) oder der **nuklearmedizinischen Bildgebung** (Abb. 1.4) – überall kommt Strahlung zum Einsatz, um Krankheiten zu erkennen, zu bewerten oder gezielt zu behandeln. Damit diese Anwendungen sicher, effektiv und wissenschaftlich fundiert durchgeführt werden können, ist ein tiefgehendes Verständnis der physikalischen Grundlagen unabdingbar.

Dieses Lehr- und Übungsbuch widmet sich der **Strahlenphysik** und der Natur **ionisierender Strahlung** mit besonderem **Fokus auf deren medizinische Anwendungen**. Es führt in die Struktur von Atomen und Kernen ein, beschreibt die Entstehung und Eigenschaften verschiedener Strahlungsarten – von Photonen bis hin zu schweren Teilchen – und erklärt deren Wechselwirkungen mit Materie. Dabei wird stets der Bezug zur medizinischen Praxis hergestellt: Wie funktionieren Röntgengeräte? Und wie lässt sich Strahlung messen und dosieren?

Neben der physikalischen Theorie werden auch biologische Wirkungen, Strahlenschutzaspekte und technologische Entwicklungen behandelt.

Ionisierende Strahlung ist ein mächtiges Werkzeug – ihre sichere und verantwortungsvolle Nutzung erfordert fundiertes Wissen, kritisches Denken und das Verständnis physikalischer Zusammenhänge. Dieses Lehr- und Übungsbuch will hierzu beitragen.



Abb. 1.2 MTR bereitet eine Röntgenaufnahme vor

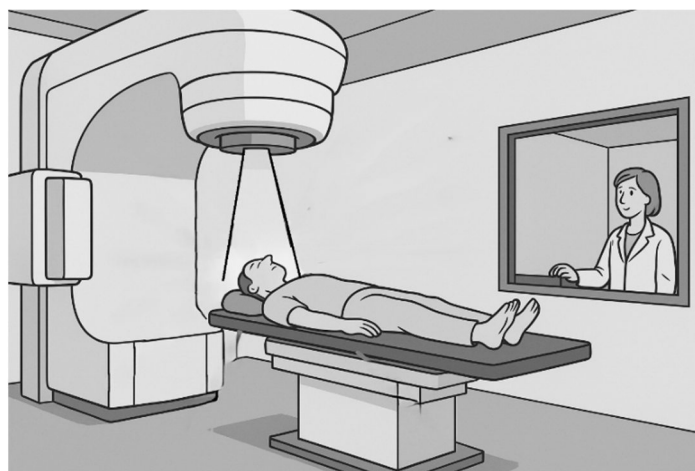


Abb. 1.3 Patient bei der Strahlentherapie



Abb. 1.4 MTR im Nuklearmedizinlabor

2. Physikalische Grundlagen

2.1 Grundlagen der Atomphysik

Atome sind die grundlegenden Bausteine der Materie. Alles, was uns umgibt – ob Menschen, Tiere, Pflanzen oder Gegenstände – besteht aus Atomen (Abb. 2.1.1 und Abb. 2.1.2). Sie sind so winzig, dass man sie mit bloßem Auge nicht sehen kann. Atome können sich auf verschiedene Weise miteinander verbinden und dadurch größere Strukturen wie Moleküle oder Kristalle bilden.

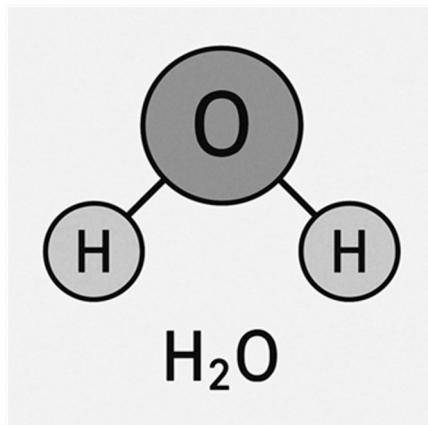


Abb. 2.1.1 Ein Sauerstoff-Atom (O) und zwei Wasserstoff-Atome (H) vereinigen sich zu einem Wassermolekül

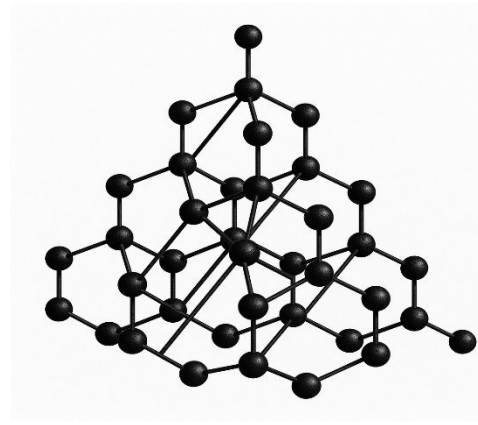


Abb. 2.1.2 Kohlenstoff-Atome fügen sich zu einem Diamant-Gitter zusammen

2.1.1 Aufbau der Atome

Ein Atom besteht aus einem positiv geladenen Kern, der Protonen und Neutronen enthält, und einer negativ geladenen Elektronenhülle, die den Kern umgibt. Im Kern befinden sich **Z positiv geladene Protonen** und **N ungeladene Neutronen**. Die Protonen und Neutronen werden auch als **Nukleonen** bezeichnet. Um den positiven Kern bewegen sich Z negativ geladene Elektronen in verschiedenen Bahnen (Abb. 2.1.3). Die Zahl Z heißt **Ordnungszahl**. Die Zahl Z legt den Namen des Atoms fest.

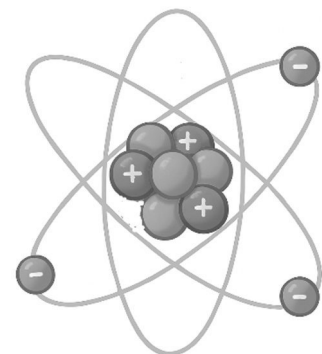


Abb. 2.1.3 Li-Atom mit 3 Elektronen, 3 Protonen und meist 4 Neutronen

Beispiele: $Z = 1 \rightarrow$ Wasserstoff-Atom

$Z = 2 \rightarrow$ Helium-Atom

$Z = 3 \rightarrow$ Lithium-Atom

Die Ladung eines Protons beträgt $e = +1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ und die eines Elektrons ist $-e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. e heißt **Elementarladung**. Da es immer gleich viele Elektronen wie Protonen in einem Atom gibt, ist ein Atom immer ungeladen (neutral).

Die **Durchmesser der Atome** (d. h. die Durchmesser der Hüllen) liegen typischerweise im Bereich von **100 bis 500 Pikometern** ($1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$). Zum Vergleich: Ein menschliches Haar ist etwa 80 bis 100 μm ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$) dick – also etwa eine Million Mal dicker als ein Atom. Der Atomkern, der aus Protonen und Neutronen besteht, ist im Verhältnis zum gesamten Atom winzig. Die **Kern-durchmesser** betragen typischerweise einige **Femtometer** ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$). Die Durchmesser der Atome sind also etwa 100 000-mal größer als die Kerndurchmesser (Abb. 2.1.4).

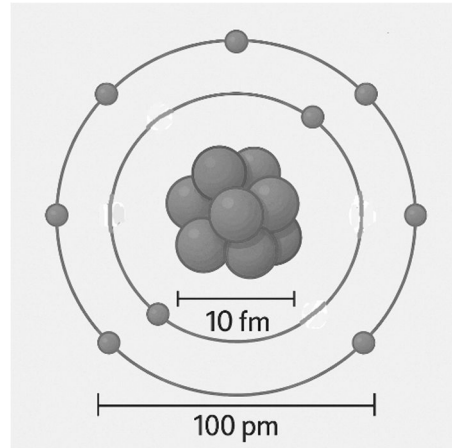


Abb. 2.1.4 Größe eines Atoms

Die **Masse eines Protons** beträgt $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Die Masse eines **Neutrons** ist geringfügig größer, nämlich $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Die **Masse eines Elektrons** ist vergleichsweise gering. Sie beträgt nur $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$. Das Proton ist also 1 836-mal schwerer als ein Elektron (Tab. 2.1.1). Bei der Berechnung der Atommasse können wir daher in erster Näherung die Elektronen vernachlässigen und die Formel $m_{\text{Atom}} \approx Z \cdot m_p + N \cdot m_n$ verwenden (Z : Zahl der Protonen, N : Zahl der Neutronen).

Tab. 2.1.1 Masse und Ladung von Proton, Neutron und Elektron

Teilchen	Proton	Neutron	Elektron
Masse	$1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Ladung	$+1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	0	$-1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

2.1.2 Schalenmodell

Die Elektronen der Hülle bewegen sich mit bestimmten Energien um den Atomkern herum. Das Schalenmodell geht davon aus, dass sich die Elektronen nicht irgendwo im Raum befinden, sondern sich auf festen, konzentrischen **Kreisbahnen** mit definierten **Energiewerten**, den sogenannten **Schalen**, bewegen³. Jede Schale wird durch die **Hauptquantenzahl n** charakterisiert und kann nur eine bestimmte Anzahl von Elektronen aufnehmen.

- Die dem Kern am nächsten liegende Schale heißt K-Schale. Sie hat die Hauptquantenzahl $n = 1$. Sie kann maximal 2 Elektronen aufnehmen.
- Die folgende Schale heißt L-Schale. Sie hat die Hauptquantenzahl $n = 2$. Sie kann maximal 8 Elektronen aufnehmen.
- Die darauf folgende Schale heißt M-Schale. Sie hat die Hauptquantenzahl $n = 3$. Sie kann maximal 18 Elektronen aufnehmen.
- Eine Schale mit der Hauptquantenzahl n kann maximal **$2n^2$ Elektronen** aufnehmen. Die Schalen werden alphabetisch mit den Buchstaben K, L, M, N, O, P und Q bezeichnet, wobei K die innerste Schale ist.

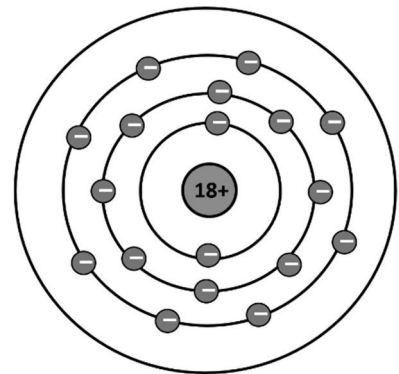


Abb. 2.1.5 Schalenmodell des Argon-Atoms

Abbildung 2.1.5 zeigt das Schalenmodell eines Argon-Atoms im Grundzustand (Zustand geringster Gesamtenergie). In der K-Schale (innerste Schale) befinden sich 2, in der L-Schale (mittlere Schale) 8 und in der M-Schale (äußerste Schale) sind ebenfalls 8 Elektronen platziert. Die M-Schale ist bei Argon noch nicht gefüllt. Sie könnte maximal 18 Elektronen aufnehmen.

Die **Hauptquantenzahl n** gibt an, zu welcher Schale ein Elektron gehört. Sie bestimmt maßgeblich die Energie des Elektrons. Je größer n ist, desto höher ist die Energie des Elektrons. Elektronen mit größerer Hauptquantenzahl n befinden sich weiter vom Atomkern entfernt.

³ Das Schalenmodell ist ein vereinfachtes Modell; tatsächlich befinden sich Elektronen in quantenmechanischen Orbitalen

Die Energie eines Elektrons wird im Wesentlichen durch die Hauptquantenzahl n bestimmt, aber auch die **Nebenquantenzahl l** beeinflusst die Energie – besonders in Atomen mit mehreren Elektronen. Die vollständige Beschreibung eines Elektrons im Atom benötigt **vier Quantenzahlen: n , l , m_l und m_s** . Darauf soll hier nicht weiter eingegangen werden.

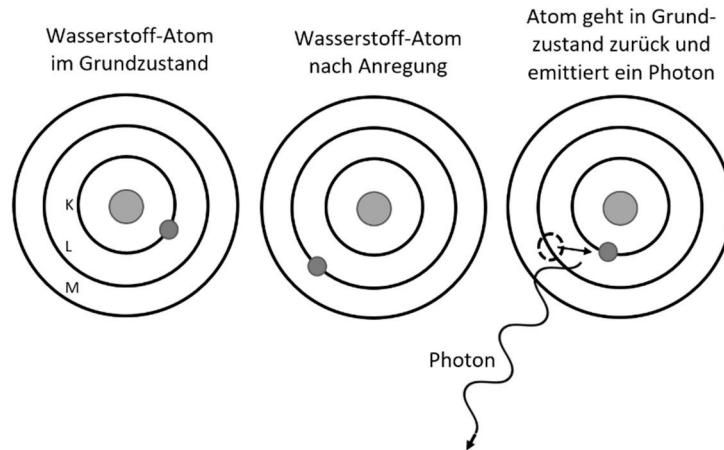


Abb. 2.1.6 H-Atom im Grundzustand wird durch ein Photon geeigneter Frequenz angeregt und geht in einen angeregten Zustand über. Danach kehrt das Atom unter Emission eines Photons gleicher Energie wieder in den Grundzustand zurück.

Abbildung 2.1.6 zeigt ein Wasserstoff-Atom im **Grundzustand**. Wird dem Atom jedoch Energie in geeigneter Form zugeführt (z. B. Licht passender Frequenz), so kann das Elektron der K-Schale beispielsweise in die energetisch höhere L-Schale wechseln. Dadurch erhöht sich die Gesamtenergie des Atoms und das Atom ist **angeregt**. Dieser angeregte Zustand ist jedoch instabil, d. h., das Atom wird die Energie nach einer gewissen Zeit wieder abgeben (z. B. in Form eines Photons gleicher Energie) und in den Grundzustand zurückkehren.

2.1.3 Bindungsenergie eines Elektrons

Die **Bindungsenergie** eines Elektrons beschreibt die Energie, die nötig ist, um ein Elektron vollständig aus einem Atom zu entfernen. Sie ist ein Maß dafür, wie stark das Elektron an den Atomkern gebunden ist. Die Bindungsenergie kann für jedes Hüllenelektron angegeben werden. Die Bindungsenergie für das am schwächsten gebundene Elektron wird auch **Ionisierungsenergie** des Atoms genannt.

In einem Atom ziehen die positiv geladenen Protonen im Kern die negativ geladenen Elektronen an. Diese Anziehung ist umso stärker, je näher sich das Elektron am Kern befindet und je größer die Kernladung ist. Elektronen in der innersten Schale (der sogenannten K-

Schale) sind daher besonders stark gebunden. Um sie zu entfernen, ist viel Energie nötig (Tab. 2.1.2).

Tab. 2.1.2 Vereinfachte Elektronen-Bindungsenergien ausgewählter Elemente ⁴ [31]

Element	Z	K-Schale [keV]	L-Schale [keV]	M-Schale [keV]
Wasserstoff (H)	1	0,0136	-	-
Kohlenstoff (C)	6	0,284	0,011	-
Eisen (Fe)	26	7,11	0,84	0,07
Silber (Ag)	47	25,5	3,9	0,6
Gold (Au)	79	80,7	14,4	3,3
Uran (U)	92	115,6	20,9	3,7

Beispiel: Das Wasserstoffatom besitzt nur ein Elektron. Die Bindungsenergie dieses Elektrons beträgt etwa 13,6 eV. Das bedeutet: Man muss dem Elektron mindestens 13,6 eV an Energie zuführen, um es aus dem Atom zu lösen – d. h., um das Wasserstoffatom zu ionisieren.

Je nach Atomart und Elektronenschale variiert die Bindungsenergie stark. In Atomen mit vielen Protonen (z. B. Uran) ist die Anziehungskraft auf die inneren Elektronen sehr groß, und die Bindungsenergie kann mehrere tausend Elektronenvolt betragen.

Die Bindungsenergie eines Elektrons hängt also von zwei Faktoren ab:

- Abstand zum Kern: Je näher sich das Elektron am Kern befindet, desto stärker ist die Anziehung.
- Anzahl der Protonen im Kern: Je größer die Kernladung (Ordnungszahl), desto stärker ist die Bindung.

⁴ Die exakte Bindungsenergie eines Elektrons hängt von seiner Schale und der jeweiligen **Unterschale** ab. Für Eisen (Z = 26) ergeben sich aus präzisen Messungen folgende Werte:

K-Schale: 7 112 eV ($\approx 7,1$ keV)

L-Schale: $L_1 = 844$ eV, $L_2 = 721$ eV, $L_3 = 708$ eV (für die L-Schale gibt man oft den größten Wert $\approx 0,84$ keV an)

M-Schale: $M_1 = 91$ eV, $M_2/M_3 = 53$ eV (für die M-Schale gibt man oft einen zusammengefassten Wert $\approx 0,07$ keV an)

2.1.4 Ionen

Ein **Ion** ist ein elektrisch geladenes Teilchen. Ionen entstehen, wenn ein Atom (oder Molekül) Elektronen aufnimmt oder abgibt (Abb. 2.1.7). Ein Atom ist neutral, d. h., es besitzt gleich viele positive Protonen wie negative Elektronen. Gibt ein Atom ein Elektron ab oder nimmt ein Elektron auf, entsteht ein Ion. Man unterscheidet zwei Arten von Ionen:

Kationen: Das sind positiv geladene Ionen. Sie entstehen, wenn ein Atom ein oder mehrere Elektronen abgibt. Dadurch überwiegt die positive Ladung der Protonen. Ein bekanntes Beispiel ist das Natrium-Ion (Na^+). Es entsteht, wenn ein Natrium-Atom ein Elektron abgibt.

Anionen: Das sind negativ geladene Ionen. Sie entstehen, wenn ein Atom ein oder mehrere Elektronen aufnimmt. Dadurch gibt es mehr negative als positive Ladungen. Ein Beispiel ist das Chlorid-Ion (Cl^-). Es entsteht, wenn ein Chlor-Atom ein Elektron aufnimmt.

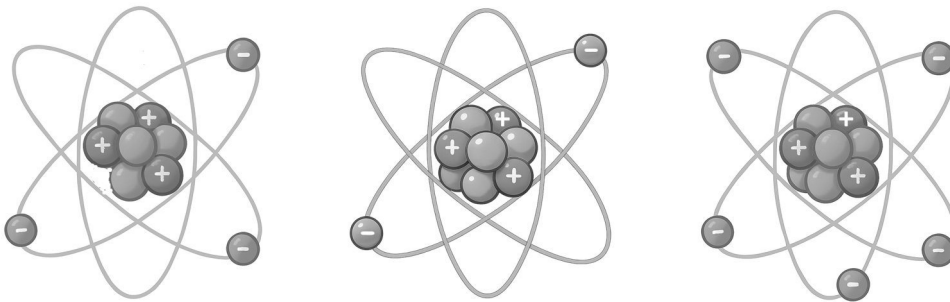


Abb. 2.1.7 Atom (neutral)

Kation (1-fach positiv)

Anion (2-fach negativ)

2.2 Photonenstrahlung

2.2.1 Grundlegendes zu Photonen

2.2.1.1 Was ist Licht?

Licht war lange Zeit ein Rätsel für die Wissenschaft (Abb. 2.2.1). Schon im 17. Jahrhundert gab es verschiedene Vorstellungen darüber, was Licht eigentlich ist. Eine wichtige Theorie ist das sogenannte **Teilchenbild** des Lichts, das vor allem von **Isaac Newton** vertreten wurde (Abb. 2.2.2). Das moderne Konzept der Lichtteilchen, der sogenannten **Photonen**, entstand jedoch erst Anfang des 20. Jahrhunderts durch die Arbeiten

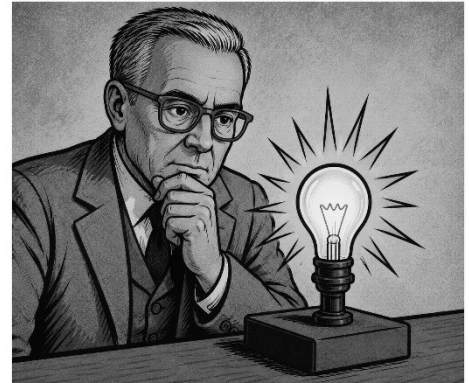


Abb. 2.2.1 Was ist Licht?

von **Max Planck** und **Albert Einstein** (Abb. 2.2.3 und 2.2.4). Im Teilchenbild wird Licht als ein Strom winziger Teilchen, sogenannter Lichtquanten oder **Photonen**, beschrieben. Diese Photonen bewegen sich geradlinig mit sehr hoher Geschwindigkeit. Im Vakuum beträgt die Lichtgeschwindigkeit etwa $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.



Abb. 2.2.2 Porträt von Isaac Newton (1642-1727). Quelle: Wikimedia Commons, Datei *Hw-newton.jpg* (gemeinfrei/Public Domain), ursprünglich aus *History of the World* (1902) [103].

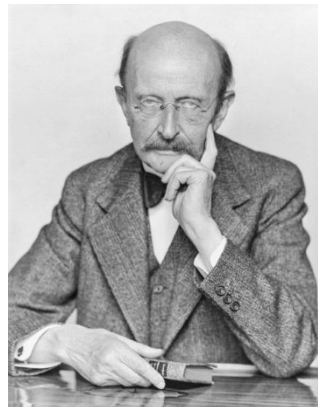


Abb. 2.2.3 Porträt von Max Planck, 1938. Fotografie von Hugo Erfurth. Quelle: Wikimedia Commons, gemeinfrei (Public Domain) [104].

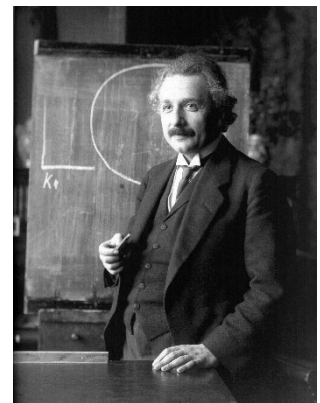


Abb. 2.2.4 Albert Einstein, 1921. Fotografie von Ferdinand Schmutzer. Quelle: Wikimedia Commons (gemeinfrei/Public Domain) [105]

Die Photonen verhalten sich ähnlich wie Teilchen. Sie haben zwar keine Ruhemasse ($m_0 = 0$), aber Energie und Impuls. Es gelten die folgenden Formeln:

Energie eines Photons

$$E_{\text{ph}} = hf$$

Impuls eines Photons

$$p_{\text{ph}} = \frac{E_{\text{ph}}}{c}$$

f ist die **Frequenz** des Lichts und $h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ ist das **Plancksche Wirkungsquantum**.

Die Frequenz f und die **Wellenlänge** λ des Lichts hängen über die Gleichung

$$\lambda \cdot f = c$$

zusammen. Die Energie eines Photons hängt von der Frequenz f des Lichts ab: Je höher die Frequenz, desto energiereicher ist das Photon. Blaue Photonen haben zum Beispiel mehr Energie als rote Photonen.

Frage: Gelbes Licht hat eine Wellenlänge von $\lambda = 550 \text{ nm}$. Welche Energie haben die Photonen?

Antwort: Es ist $f = \frac{c}{\lambda}$ und damit gilt $E_{\text{ph}} = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{550 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 2,26 \text{ eV}$.

Sichtbares Licht umfasst den Bereich des elektromagnetischen Spektrums, den das menschliche Auge wahrnehmen kann. Das erkennt man beispielsweise am **Regenbogen** (Abb. 2.2.5). Die Photonenenergie von sichtbarem Licht liegt zwischen etwa 1,7 eV (rot) und 3,1 eV (violett). **UV-Strahlung** hat eine höhere Photonenenergie als sichtbares Licht und beginnt bei etwa 3,1 eV und reicht bis etwa 100 eV. Noch höhere Photonenenergien haben **Röntgen-** und **Gamma-Strahlen**. Röntgenstrahlung wird grob in **weiche** (100 eV – 10 keV) und **harte** (10 keV – 250 keV



Abb. 2.2.5 Regenbogen – sichtbarer Bereich des elektromagnetischen Spektrums

oder mehr) **Röntgenstrahlung** unterteilt. Die Abgrenzung zur **Gamma-Strahlung** erfolgt jedoch nicht nach der Energie, sondern nach dem **Ursprung**: Röntgenstrahlung entsteht in der Elektronenhülle (z. B. Brems- oder charakteristische Strahlung). Gamma-Strahlung geht vom Atomkern aus (Kernübergänge, radioaktive Zerfälle, Abb. 2.2.6). Da sich die Energiebereiche stark überlappen, ist allein die Energie kein Unterscheidungsmerkmal. Gamma-Strahlung reicht typischerweise von einigen 10 keV bis in den MeV-Bereich und darüber hinaus (Abb. 2.2.7).

Das Teilchenbild erklärt gut einige Phänomene, bei denen das Licht wie ein Strom von kleinen Energiepaketen wirkt. Heute wissen wir, dass Licht sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften hat. Dieses Konzept nennt man **Welle-Teilchen-Dualismus**. Je nachdem, wie man misst oder beobachtet, zeigt Licht mal Eigenschaften von Wellen und mal die von Teilchen. Wir nutzen im Weiteren Licht immer das Teilchenbild.

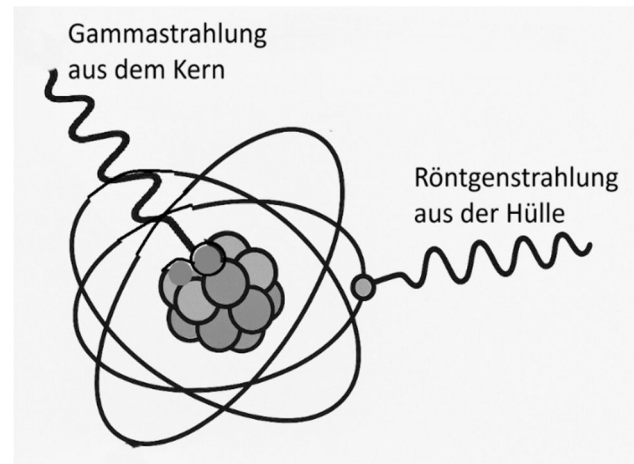


Abb. 2.2.6 Röntgenstrahlung kommt aus der Atomhülle, Gamma-Strahlung aus dem Atomkern

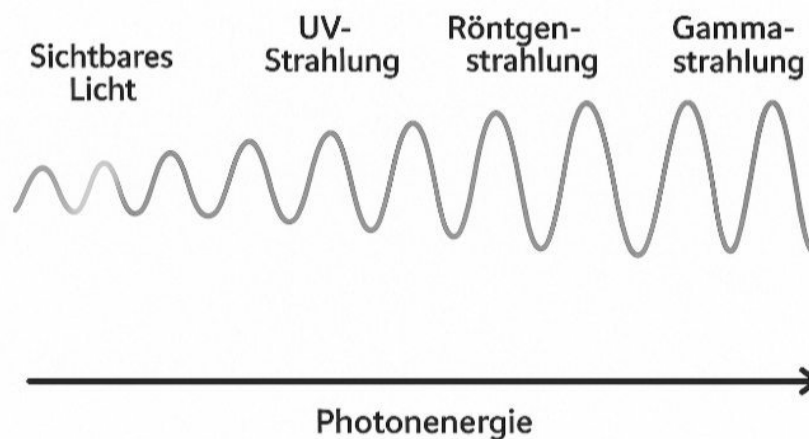


Abb. 2.2.7 Photonen-Energien der verschiedenen Bereiche des elektromagnetischen Spektrums

2.2.1.2 Energie, Leistung, Intensität und spektrale Größen

Betrachten wir eine Lampe. Diese Lampe sendet während einer bestimmten **Zeit t** die **Energie E** in Form von Licht aus. Diese Energie E (Einheit Joule, abgek. J) verteilt sich über das **gesamte Spektrum** – also über viele verschiedene Wellenlängen vom Ultraviolett über das sichtbare Licht bis ins Infrarote. Misst man, wie viel Energie die Lampe in einer bestimmten Zeit t abgibt, und teilt diese Energiemenge E durch die Zeit t, erhält man die **Leistung P** der Lampe.

$$P = \frac{E}{t}.$$

Diese Leistung wird oft in **Watt** (W) angegeben. Strahlt die Lampe auf eine bestimmte **Fläche** **A**, kann man die Leistung **P** durch diese bestrahlte Fläche **A** teilen. Das Ergebnis nennt man **Intensität**.

$$I = \frac{P}{A} = \frac{E}{A \cdot t}.$$

Sie hat die Einheit Watt pro Quadratmeter (W/m^2). Man beachte, dass sich alle betrachteten Größen – Energie **E**, Leistung **P** und Intensität **I** – auf das **gesamte Spektrum** – unabhängig von der Wellenlänge bzw. Frequenz – beziehen (Abb. 2.2.8).

Beispiel: Unsere Sonne strahlt eine Leistung (über alle Wellenlängen bzw. Frequenzen gemessen) von $P_{\text{Sonne}} = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ W}$ ab.

Man kann die Sache auch spektral aufgelöst betrachten: Die **spektrale Leistung** beschreibt beispielsweise, wie viel Leistung die Lampe pro Wellenlängenbereich oder pro Frequenzbereich abgibt.

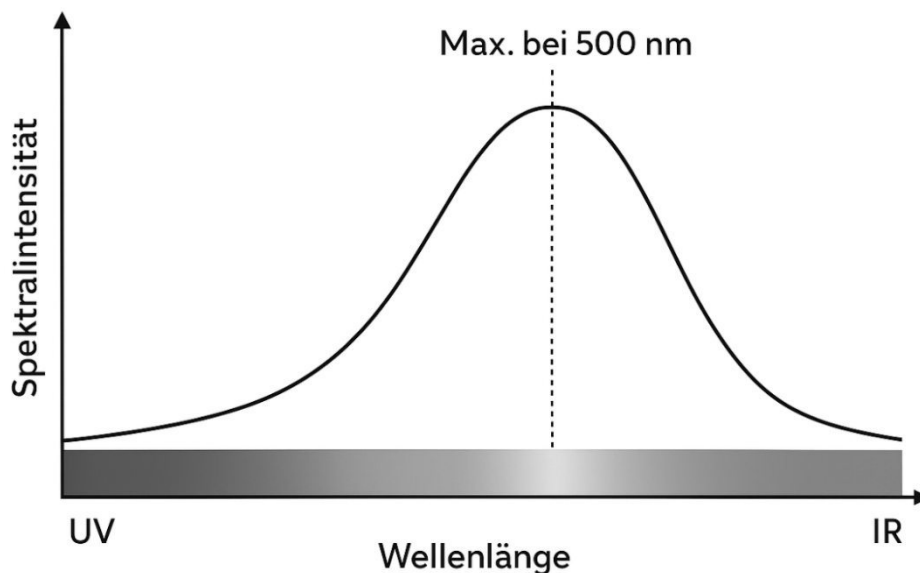
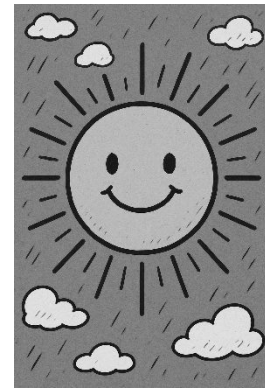


Abb. 2.2.8 Die von der Lampe oder der Sonne abgegebene Energie verteilt sich auf viele Wellenlängen bzw. Frequenzen

Beispiel: Unsere Sonne strahlt **43 %** ihrer Leistung im **sichtbaren Spektralbereich** ab. Das sind $1,66 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

Die exakte Definition der spektralen Leistung lautet:

$$P_{\lambda}(\lambda) = \frac{\text{abgestrahlte Leistung im Wellenlängenbereich von } \lambda \text{ bis } \lambda + \Delta\lambda}{\Delta\lambda}$$

oder

$$P_f(f) = \frac{\text{abgestrahlte Leistung im Frequenzbereich von } f \text{ bis } f + \Delta f}{\Delta f}.$$

Hierbei sind $\Delta\lambda$ bzw. Δf sehr klein zu wählen. Die Einheiten sind W/m bzw. W/Hz. Teilt man $P_{\lambda}(\lambda)$ bzw. $P_f(f)$ durch die bestrahlte Fläche, erhält man die spektrale Intensität $I_{\lambda}(\lambda)$ bzw. $I_f(f)$.

2.2.2 Erzeugung von Photonen

Photonen können immer dann entstehen, wenn geladene Teilchen Energie abgeben, die dann in ein Photon umgewandelt wird.

2.2.2.1 Elektronischer Übergang eines gebundenen Elektrons

In einem Atom befinden sich die gebundenen Elektronen in bestimmten Energieschalen. Wenn ein Elektron von einer höheren Schale mit der Energie E_2 auf eine niedrigere Schale mit der Energie E_1 übergeht (Abb. 2.2.9), wird die Energiedifferenz $\Delta E = E_2 - E_1$ frei. Diese Energiedifferenz kann in Form eines Photons mit der Energie

$$E_{\text{ph}} = E_2 - E_1$$

abgestrahlt werden.

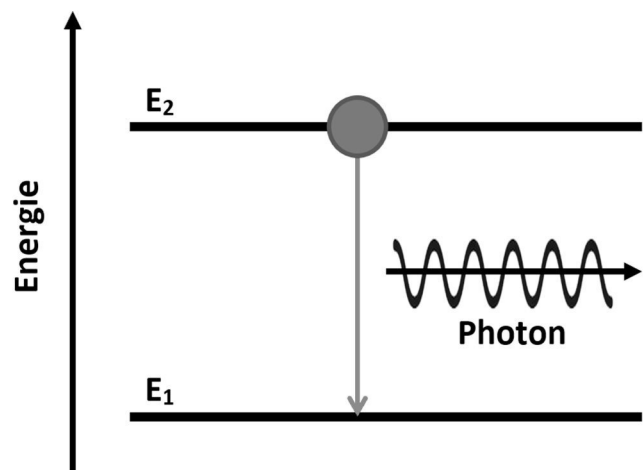


Abb. 2.2.9 Beim Übergang von einer höheren in eine niedrigere Bahn eines Atoms kann ein Photon abgestrahlt werden

Ein typisches Beispiel ist die Entstehung der **charakteristischen Röntgenstrahlung**. Sie entsteht, wenn Elektronen aus einer inneren Schale durch energiereiche Teilchen herausgeschlagen werden. Beim Auffüllen dieser Lücke durch ein Elektron aus einer höheren Schale wird ein Photon im Röntgenbereich emittiert.

Beispiel: Beim Übergang eines Elektrons vom Zustand mit $E_2 = 20 \text{ keV}$ in den Zustand mit $E_1 = 8 \text{ keV}$ entsteht ein Photon mit einer Energie von $E_{\text{ph}} = E_2 - E_1 = 12 \text{ keV}$.

2.2.2.2 Bremsstrahlung

Auch freie Elektronen, also Elektronen, die nicht an ein Atom gebunden sind, können Photonen erzeugen. Wenn ein solches Elektron in der Nähe eines Atomkerns abgebremst wird, verliert es einen Teil seiner kinetischen Energie. Diese Energie kann als Photon abgestrahlt werden (Abb. 2.2.10). Man spricht hier von **Bremsstrahlung**. Für die Photonenenergie gilt

$$E_{\text{ph}} = E_{\text{kin},1} - E_{\text{kin},2} \cdot$$

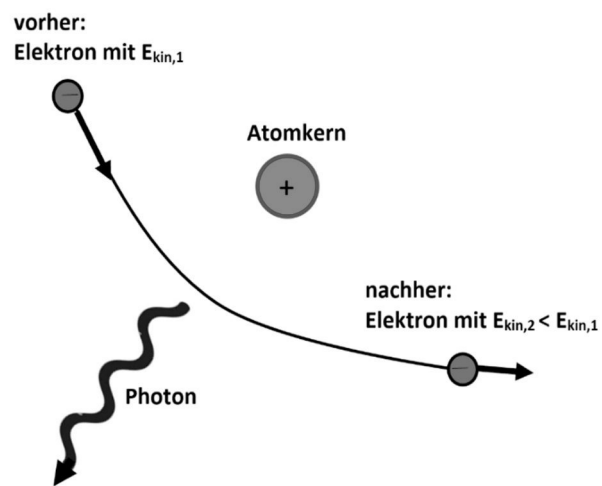


Abb. 2.2.10 Entstehung von Bremsstrahlung

Dabei ist $E_{\text{kin},1}$ die höhere kinetische Energie des Elektrons vor und $E_{\text{kin},2} < E_{\text{kin},1}$ die geringere kinetische Energie des Elektrons nach der Emission des Photons. Da $E_{\text{kin},2}$ jeden beliebigen Wert im Bereich $0 < E_{\text{kin},2} < E_{\text{kin},1}$ annehmen kann, können Bremsstrahlungsphotonen jeden Wert im Bereich

$$0 < E_{\text{ph}} < E_{\text{kin},1}$$

annehmen. Bremsstrahlung besitzt daher ein **kontinuierliches Spektrum** im Bereich mit einer **Maximalenergie** von

$$E_{\text{ph,max}} = E_{\text{kin},1} \cdot$$

Die minimale Wellenlänge λ_{min} im Spektrum entspricht der maximalen Photonenenergie:

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}} = \frac{hc}{hf_{\max}} = \frac{hc}{E_{\text{Ph,max}}}$$

Sie liegt genau dann vor, wenn ein Elektron seine gesamte kinetische Energie in ein einziges Photon umwandelt.

Beispiel: Elektronen mit einer kinetischen Energie von 100 keV erzeugen beim Abbremsen Photonen mit einer Maximalenergie von ebenfalls 100 keV. Die kürzeste Wellenlänge ist dann

$$\lambda_{\min} = \frac{4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{100\,000 \text{ eV}} = 1,24 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 12,4 \text{ pm}.$$

2.2.2.3 Gamma-Strahlung

Auch Atomkerne können Photonen aussenden (Abb. 2.2.11). Für die Energien der Nukleonen (Protonen und Neutronen) gilt ebenfalls ein **Schalenmodell**, analog dem Schalenmodell der Atomhülle (siehe Kapitel 2.1.2). Wenn ein Atomkern von einem energetisch höheren Quantenzustand mit der Energie E_n in einen energetisch niedrigeren Zustand mit der Energie $E_m < E_n$ übergeht, kann die freiwerdende Energie in Form hochenergetischer Photonen mit der Energie $E_{\text{Ph}} = E_n - E_m$ abgegeben werden. Diese Photonen nennt man **Gamma-Quanten** (γ -Quanten). Sie sind i. d. R. deutlich energiereicher als Röntgen-Photonen.

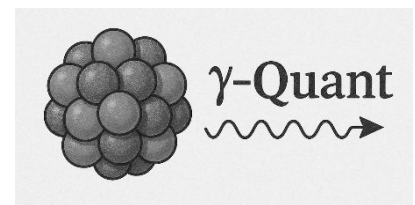


Abb. 2.2.11 Auch ein Atomkern kann Photonen abstrahlen

Gamma-Strahlung entsteht oft im Anschluss an einen radioaktiven Zerfall, z. B. wenn ein Kern nach einem Alpha-Zerfall noch in einem angeregten Zustand ist. Auch bei Kernreaktionen, wie in Kernreaktoren oder bei Kernwaffen, wird Gamma-Strahlung erzeugt.



Merke: Photonen entstehen bei Übergängen in Atomhüllen (charakteristische Strahlung), in Kernen (γ -Strahlung) sowie bei der Abbremsung geladener Teilchen (Bremsstrahlung).

2.2.3 Wechselwirkung von Photonen mit Materie

2.2.3.1 Photoeffekt

Der **Photoeffekt** – auch photoelektrischer Effekt genannt – ist ein physikalisches Phänomen, bei dem Elektronen aus einem Festkörper oder Atom herausgelöst werden, wenn dieser mit Licht bestrahlt wird. Trifft ein Photon auf ein Atom, so kann es

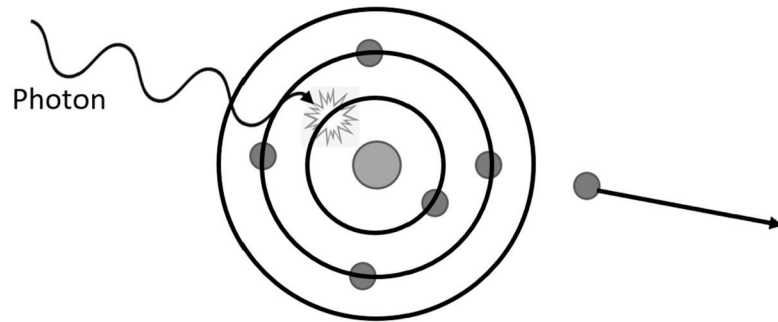


Abb. 2.2.12 Photoeffekt, ein Photon schlägt ein Elektron aus der K-Schale

seine Energie auf ein Elektron im Atom übertragen. Wenn die Energie des Photons E_{ph} groß genug ist, kann das Elektron sogar aus dem Atom herausgelöst werden (Abb. 2.2.12). Danach ist das Photon nicht mehr existent, d. h., es wurde absorbiert. Damit dies passiert, muss allerdings gelten: $E_{\text{ph}} > E_{\text{B}}$. Hierbei ist E_{B} die **Bindungsenergie** des herauszulösenden Elektrons. Das herausgelöste Elektron nennt man **Photoelektron**. Das freigesetzte Photoelektron besitzt eine **kinetische Energie** von

$$E_{\text{kin}} = E_{\text{ph}} - E_{\text{B}}.$$

Beispiel: Ein Photon mit einer Energie von 400 eV löst ein Elektron aus einem Atom. Die Bindungsenergie ist 20 eV. Dann hat das Photoelektron eine kinetische Energie von 380 eV.

2.2.3.2 Compton-Effekt

Der **Compton-Effekt** ist ein physikalisches Phänomen, das die Wechselwirkung zwischen hochenergetischen Photonen (z. B. Gamma-Strahlung) und freien oder schwach gebundenen Elektronen beschreibt. Er wurde 1923 von dem amerikanischen Physiker **Arthur Holly Compton** entdeckt (Abb. 2.2.13).

Trifft ein Photon auf ein Elektron, so gibt es – vergleichbar mit dem Zusammenstoß zweier Billardkugeln (Abb. 2.2.14) – einen Teil seiner Energie und seines Impulses an das Elektron ab.

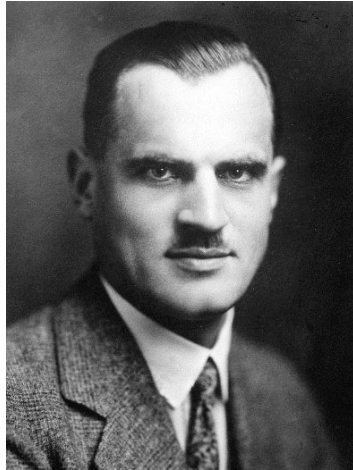


Abb. 2.2.13 Arthur H. Compton (1892–1962), Aufnahme 1927. Fotograf unbekannt (Mondadori Publishers). Quelle: Wikimedia Commons, gemeinfrei (Public Domain) [106]

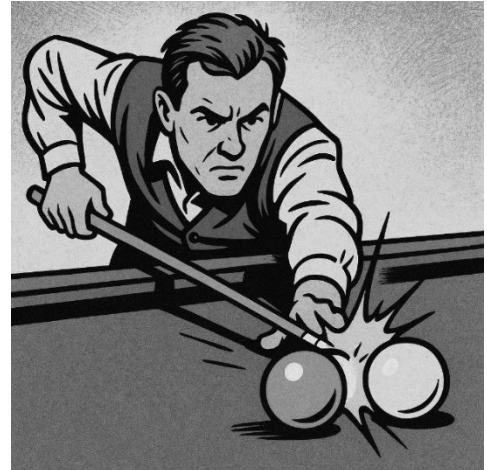


Abb. 2.2.14 Der Stoß zweier Billardkugeln

Dadurch wird das Elektron aus seiner Ruheposition gestoßen (Abb. 2.2.15). Das Photon ändert seine Bewegungsrichtung und verliert einen Teil seiner Energie bzw. seines Impulses. Dies äußert sich in einer Zunahme der Wellenlänge bzw. Abnahme der Frequenz des Photons. Diese Zunahme der Wellenlänge nennt man Compton-Verschiebung.

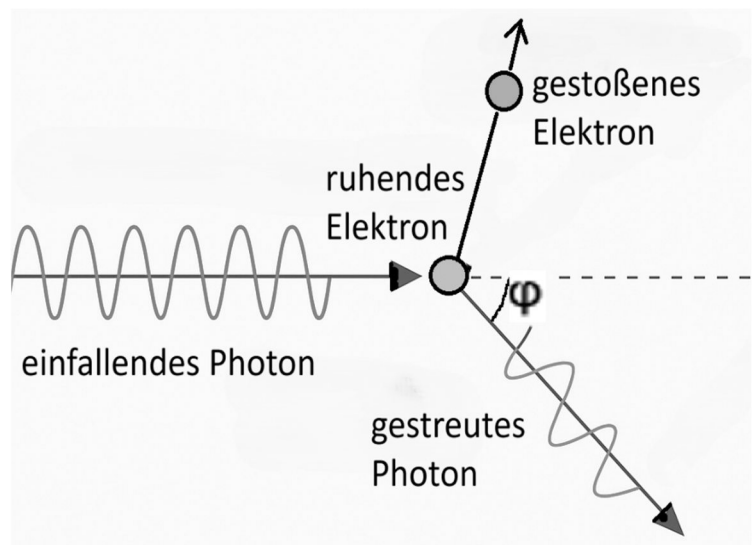


Abb. 2.2.15 Compton-Stoß eines Photons mit einem Elektron

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos(\varphi))$$

Sie hängt vom Streuwinkel φ ab, unter dem das Photon nach dem Stoß beobachtet wird. Für die Energie des Photons nach dem Stoß gilt:

$$E'_{\text{ph}} = \frac{E_{\text{ph}}}{1 + \frac{E_{\text{ph}}}{m_e c^2} (1 - \cos(\varphi))}.$$

Hierbei ist $m_e c^2 = 511 \text{ keV}$ die Ruheenergie des Elektrons.

2.2.3.3 Paarbildung

Der **Paarbildungs-Effekt** ist ein physikalisches Phänomen aus der Quantenphysik, das auftritt, wenn hochenergetische Photonen mit Materie wechselwirken. Dabei wird ein Photon in ein **Elektron-Positron-Paar** umgewandelt. Das bedeutet: Aus reiner elektromagnetischer Energie entstehen zwei Teilchen mit Masse – ein **negativ geladenes Elektron** und sein Antiteilchen, das **positiv geladene Positron** (Abb. 2.2.16).

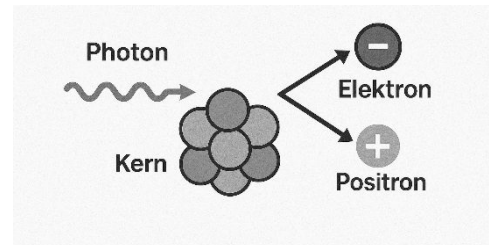


Abb. 2.2.16 Paarbildung in der Nähe eines Atomkerns

Damit dieser Prozess möglich ist, muss das Photon eine Mindestenergie besitzen. Diese sogenannte **Schwellenenergie** beträgt 1,022 MeV (jeweils 0,511 MeV für die Bildung der Elektron- und Positron-Masse). Hat das Photon mehr Energie als diese Schwelle, so wird die überschüssige Energie in Bewegungsenergie (kinetische Energie) der beiden Teilchen umgewandelt. Der Paarbildungs-Effekt kann nur in der Nähe eines Atomkerns stattfinden. Ohne diesen Kern wäre es nicht möglich, den Impulserhaltungssatz zu erfüllen.

Ein freies Positron besitzt nur eine sehr kurze Lebensdauer. Wenn es auf ein Elektron trifft – was unvermeidlich ist – kommt es zur **Annihilation** (Paar-Vernichtung). Dabei vernichten sich Elektron und Positron gegenseitig, da sie ein **Teilchen-Antiteilchen-Paar** sind. Ihre gesamte Masse wird in Energie umgewandelt. Bei der Annihilation entstehen gewöhnlich zwei Gamma-Quanten mit einer Energie von jeweils 511 keV. Diese sogenannte **Vernichtungsstrahlung** entspricht exakt der Ruheenergie eines Elektrons bzw. Positrons. Die beiden Photonen werden dabei in entgegengesetzte Richtungen ausgesendet, das heißt, sie bewegen sich unter einem Winkel von 180° voneinander weg (Abb. 2.2.17). Dies geschieht aufgrund des Impulserhaltungssatzes.

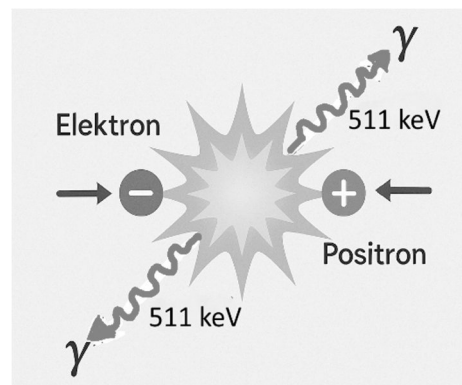


Abb. 2.2.17 Paarvernichtung (Annihilation)

2.2.3.4 Schwächungsgesetz

Trifft ein Photonenstrahl auf Materie (z. B. Blei oder Wasser), so werden Photonen absorbiert und/oder aus ihrer ursprünglichen Richtung gestreut. Dadurch nimmt die Intensität des Photonenstrahls längs seiner Ausbreitungsrichtung ab. Die Intensität einer Photonenstrahlung nimmt beim Durchgang durch Materie gemäß dem **exponentiellen Schwächungsgesetz** ab:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.2.1)$$

Hierbei ist **$I(x)$** die **Intensität des monoenergetisch angenommenen Strahls nach der Strecke x** , I_0 die Intensität, wenn der Strahl bei $x = 0$ in den Absorber eintritt, und **μ** der **Schwächungskoeffizient**. Der Schwächungskoeffizient hängt vom **Absorber** (d. h. von der **Ordnungszahl Z**) und von der **Photonenenergie E_{Ph}** ab. Je größer der Schwächungskoeffizient μ ist, desto stärker wird die Strahlung abgeschwächt (Abb. 2.2.18).

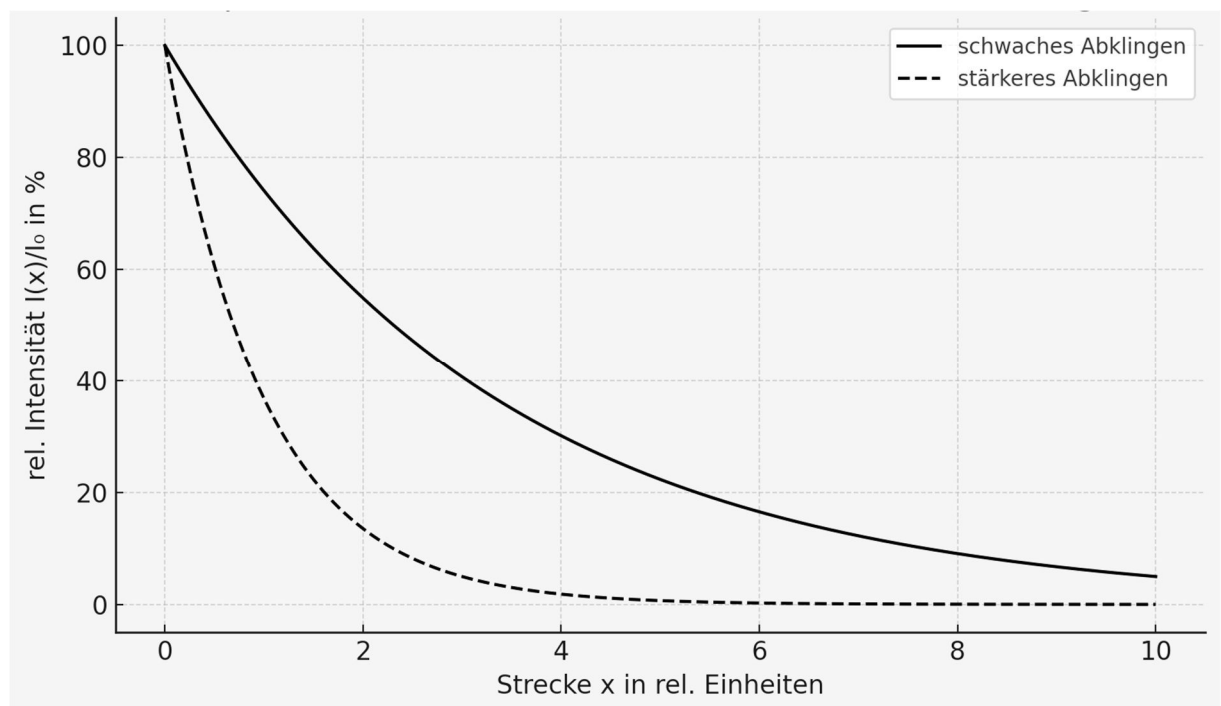


Abb. 2.2.18 Das Schwächungsgesetz

Wird Gl. (2.2.1) nach x aufgelöst, ergibt sich

$$x = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I(x)}\right)}{\mu}.$$

Für $I(x) = \frac{I_0}{e} \approx 0,37 \cdot I_0$ ergibt sich eine Strecke von

$$x_{37\%} = \frac{1}{\mu} ,$$

d. h. entlang dieser Strecke sinkt die Intensität auf 37 % der Anfangsintensität ab. Für

$I(x) = \frac{I_0}{2} = 0,50 \cdot I_0$ ergibt sich

$$x_{50\%} = \frac{\ln 2}{\mu} ,$$

d. h., nach dieser Strecke hat sich die Intensität halbiert. $x_{50\%}$ heißt **Halbwertsdicke des Absorbers**.

Frage: Blei hat für 1-MeV-Photonen eine Halbwertsdicke von $x_{50\%} = 8,7$ mm. Welche Bleidicke ist erforderlich, um die Strahlung auf 12,5 % des Eintrittswertes zu reduzieren?

Antwort: Nach einer Halbwertsdicke besitzt die Strahlung noch 50 % ihrer Anfangsintensität. Gleichbedeutend kann man sagen, dass nach einer Halbwertsdicke noch 50 % der ursprünglichen Photonen vorhanden sind:

$$\frac{I(x_{50\%})}{I_0} = \frac{N(x_{50\%})}{N_0} = \frac{1}{2} .$$

Nach zwei Halbwertsdicken verbleiben noch 25 %, nach drei Halbwertsdicken noch 12,5 % der Anfangsintensität bzw. der ursprünglichen Photonenzahl. Drei Halbwertsdicken haben somit eine Dicke von $3 \cdot 8,7 \text{ mm} = 26,1 \text{ mm}$.

Aufgrund dieser Überlegung kann das exponentielle Schwächungsgesetz auch mithilfe der Halbwertsdicke formuliert werden (Abb. 2.2.19):

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{N(x)}{N_0} = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{x}{x_{50\%}}} .$$

Anmerkung: Die Exponentialfunktion erreicht selbst für große Werte von x nicht den Wert $I = 0$. Es gibt immer noch eine kleine Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon eine kilometerdicke

Bleiwand durchlaufen kann. Daher sagen manche Leute: Photonen haben eine unendliche Reichweite.

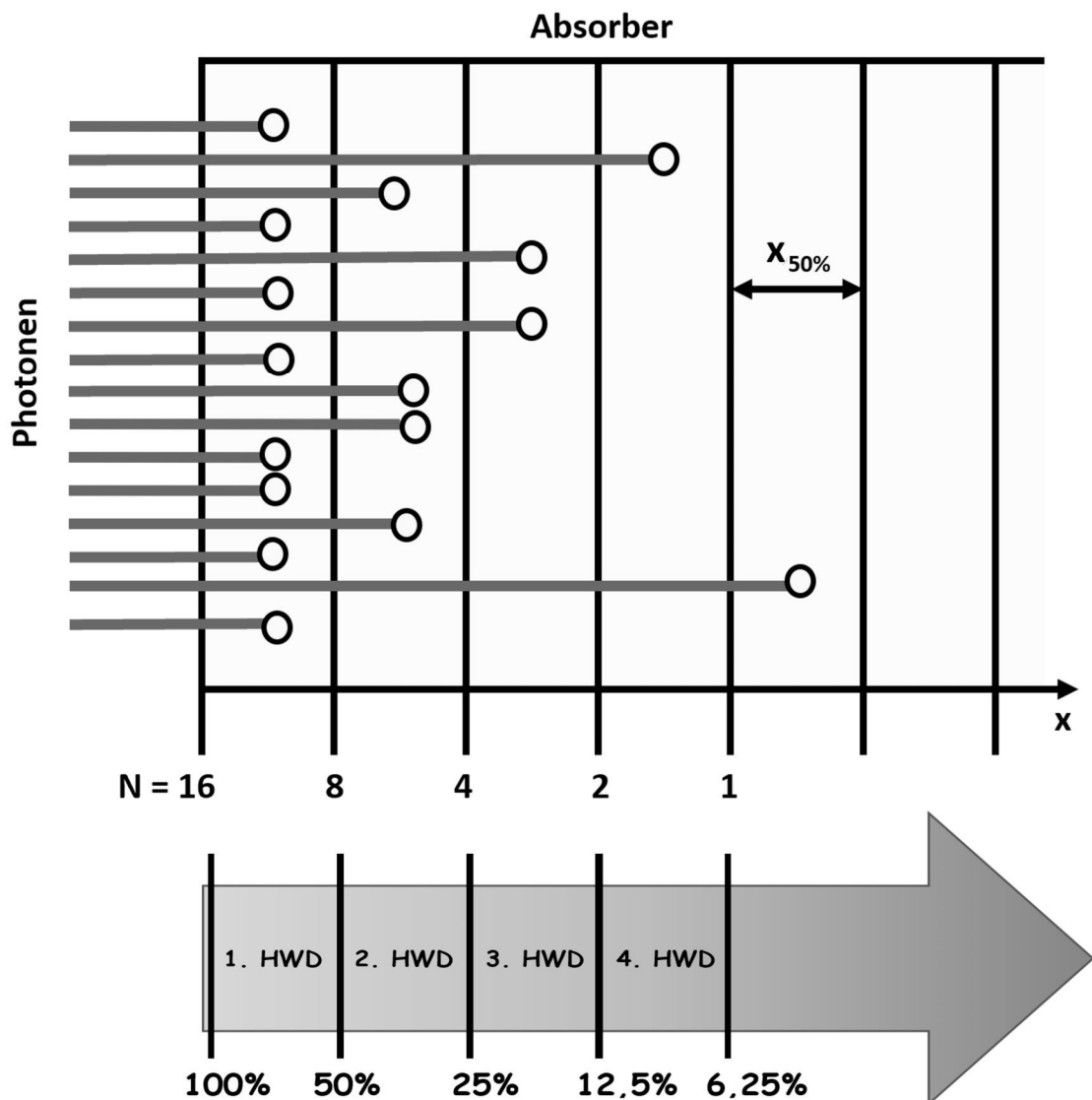


Abb. 2.2.19 Exponentielle Schwächung einer Photonenstrahlung. Nach jeder Halbwertsdicke (HWD) halbiert sich die Zahl der Photonen.

2.2.3.5 Analogie zwischen Photonenabsorption und Schuss in einen Wald

Die Absorption von Photonen in Materie lässt sich anschaulich mit einem Schuss in einen Wald vergleichen. Stell dir vor, ein Jäger steht am Waldrand, schließt die Augen und feuert eine Kugel in den menschenleeren Wald ab (Abb. 2.2.20). Die Bäume sind zufällig, aber gleichmäßig im Raum verteilt. Die Kugel fliegt zunächst eine gewisse Strecke x ungehindert – dann trifft sie irgendwann auf einen Baum und bleibt stecken. Ganz ähnlich verhalten sich Photonen, wenn sie in Materie eindringen. Wenn man viele Schüsse abfeuert, wird deutlich: Mit zunehmender

Tiefe x im Wald nimmt die Zahl der Projektile, die noch ungehindert weiterfliegen, exponentiell ab. Genau diesem Gesetz folgt auch die Abschwächung der Photonenintensität in einem Material.



Abb. 2.2.20 Analogie zwischen Photonenabsorption und Schuss in einen Wald. Die Kugel fliegt zunächst ungehindert, bis sie auf einen Baum trifft – wie ein Photon, das in Materie absorbiert wird.



Merke: Je dichter der Wald / die Materie, desto eher wird das Projektil / das Photon gestoppt.

2.2.3.6 Energie- und Z-Abhängigkeit des Schwächungskoeffizienten

Der **Schwächungskoeffizient** μ beschreibt, wie stark Photonenstrahlung (z. B. Röntgen- oder Gamma-Strahlen) beim Durchgang durch Materie abgeschwächt wird. Seine Größe hängt im Wesentlichen von zwei Faktoren ab:

- der **Ordnungszahl** Z des absorbierenden Materials,
- der **Photonenenergie** E_{ph} der einfallenden monoenergetischen Strahlung.
- Neben der Ordnungszahl beeinflusst auch die **Dichte** eines Materials den Schwächungskoeffizienten. Dieser Einfluss wird im folgenden Kapitel mithilfe des Massenschwächungskoeffizienten getrennt betrachtet.

Der gesamte Schwächungskoeffizient μ ergibt sich als Summe der Beiträge aller drei Effekte (Photoeffekt, Compton-Effekt und Paarbildung):

$$\mu = \mu_{\text{Photo}} + \mu_{\text{Compt}} + \mu_{\text{Paar}}.$$

Je nach Photonenenergie E_{ph} und Ordnungszahl Z dominieren dabei unterschiedliche physikalische Prozesse. Abbildung 2.2.21 zeigt den typischen Verlauf des **Schwächungskoeffizienten** für Blei.

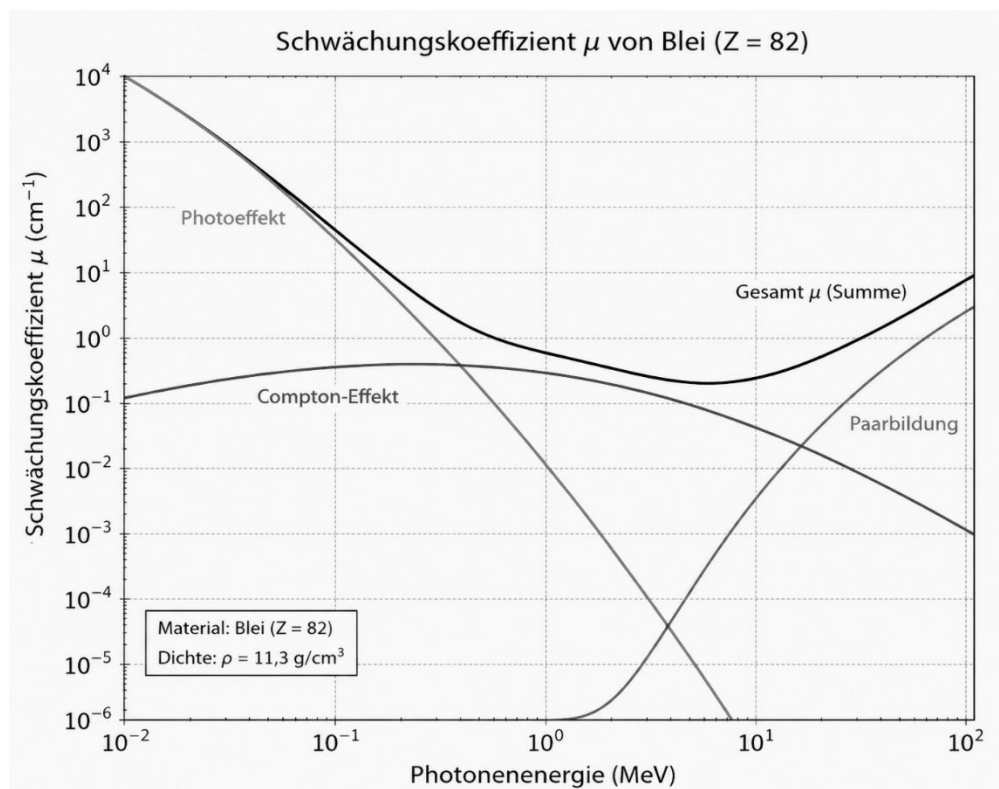


Abb. 2.2.21 Qualitative Darstellung der Beiträge von Photoeffekt, Compton-Effekt und Paarbildung zum Schwächungskoeffizienten von Blei. Eigene Darstellung nach NIST XCOM [42]

Photoeffekt

Beim Photoeffekt schlägt ein Photon ein **gebundenes** Elektron aus der Atomhülle heraus. Meist handelt es sich dabei um ein K-Elektron, da diese am stärksten gebunden sind. Da die Bindung der Elektronen im Atom mit der Ordnungszahl Z ansteigt und das Elektron umso fester gebunden scheint, je kleiner die Photonenenergie E_{ph} ist, ergeben sich folgende Abhängigkeiten:

Der Photoeffekt tritt vor allem bei **niedrigen Photonenenergien** E_{ph} auf und ist stark von der **Ordnungszahl Z** des Materials abhängig. Die Wahrscheinlichkeit für den Photoeffekt steigt sehr stark mit zunehmendem Z an (typischerweise etwa proportional zu Z^4 bis Z^5) und nimmt gleichzeitig mit steigender Photonenenergie E_{ph} deutlich ab. Das bedeutet: In Materialien mit hoher Ordnungszahl, wie z. B. Knochen oder – noch ausgeprägter – Blei, ist der Photoeffekt besonders ausgeprägt – vor allem bei niedrigen Energien. Diese starke Z -Abhängigkeit ist entscheidend für den Bildkontrast in der Röntgendiagnostik, da unterschiedliche Gewebe die Strahlung unterschiedlich stark absorbieren.

Compton-Effekt

Hier streut das Photon an einem (quasi freien, d. h. schwach gebundenen) Elektron. Der Compton-Effekt dominiert im **mittleren Energiebereich** (typisch: einige 10 keV bis mehrere MeV). Im Gegensatz zum Photoeffekt hängt seine Wahrscheinlichkeit nur **schwach von der Ordnungszahl Z** ab, da er im Wesentlichen von der **Elektronendichte** des Materials bestimmt wird. Da die Elektronendichte in vielen Materialien ähnlich ist, tritt der Compton-Effekt in Weichteilgewebe und Knochen in vergleichbarer Weise auf. Mit **zunehmender Photonenenergie** nimmt seine Wahrscheinlichkeit **langsam ab**. Der Compton-Effekt ist daher der wichtigste Streuprozess in der medizinischen Bildgebung und trägt wesentlich zur Bildverschlechterung (Streustrahlung) bei ⁵.

Paarbildung

Die Paarbildung tritt erst oberhalb einer **Schwellenenergie von 1,022 MeV** auf und ist somit ein Prozess der **hochenergetischen Photonenstrahlung**. Ihre Wahrscheinlichkeit steigt mit **zunehmender Photonenenergie** E_{ph} und nimmt zudem **stark mit der Ordnungszahl Z** des Materials zu (näherungsweise proportional zu Z^2). Daher ist die Paarbildung besonders relevant in Materialien mit hoher Ordnungszahl und bei hohen Energien, wie sie z. B. in der

⁵ Die Bildunschärfe durch Compton-Streustrahlung begründet den Einsatz von Antistreugittern (siehe auch Kapitel 2.2.3.10). Es besteht aus vielen dünnen, parallel oder leicht fokussiert stehenden Bleilamellen, die durch strahlendurchlässiges Material (z. B. Kunststoff oder Aluminium) voneinander getrennt sind. Beachte die folgende Unterscheidung: **Kollimator** = **Primärblende vor dem Patienten**, **Antistreugitter** = **hinter dem Patienten, vor Detektor**.

Strahlentherapie auftreten. Unterhalb der Schwellenenergie kann dieser Prozess nicht stattfinden.

 Merke:

- **Photoeffekt:** dominiert bei niedrigen Photonenenergien, ist stark Z-abhängig und tritt daher besonders in Materialien mit hoher Ordnungszahl (z. B. Knochen oder Blei) auf.
- **Compton-Effekt:** dominiert bei mittleren Photonenenergien, ist nur schwach Z-abhängig und ist deshalb in Weichteilgewebe der wichtigste Wechselwirkungsprozess.
- **Paarbildung:** tritt erst oberhalb von 1,022 MeV auf, ist stark Z-abhängig und gewinnt bei hohen Energien zunehmend an Bedeutung.

Abbildung 2.2.22 zeigt den dominierenden Wechselwirkungsprozess in Abhängigkeit von Photonenenergie und Ordnungszahl. Bei Röntgenstrahlung bis etwa 30 keV dominiert der Photoeffekt. Im Weichteilgewebe überwiegt ab etwa 30 keV die Compton-Streuung, während in Knochen der Photoeffekt aufgrund der höheren effektiven Ordnungszahl länger ausgeprägt bleibt. Bei Gamma-Strahlung im unteren MeV-Bereich dominiert meist noch der Compton-Effekt; mit weiter steigender Energie gewinnt die Paarbildung zunehmend an Bedeutung.

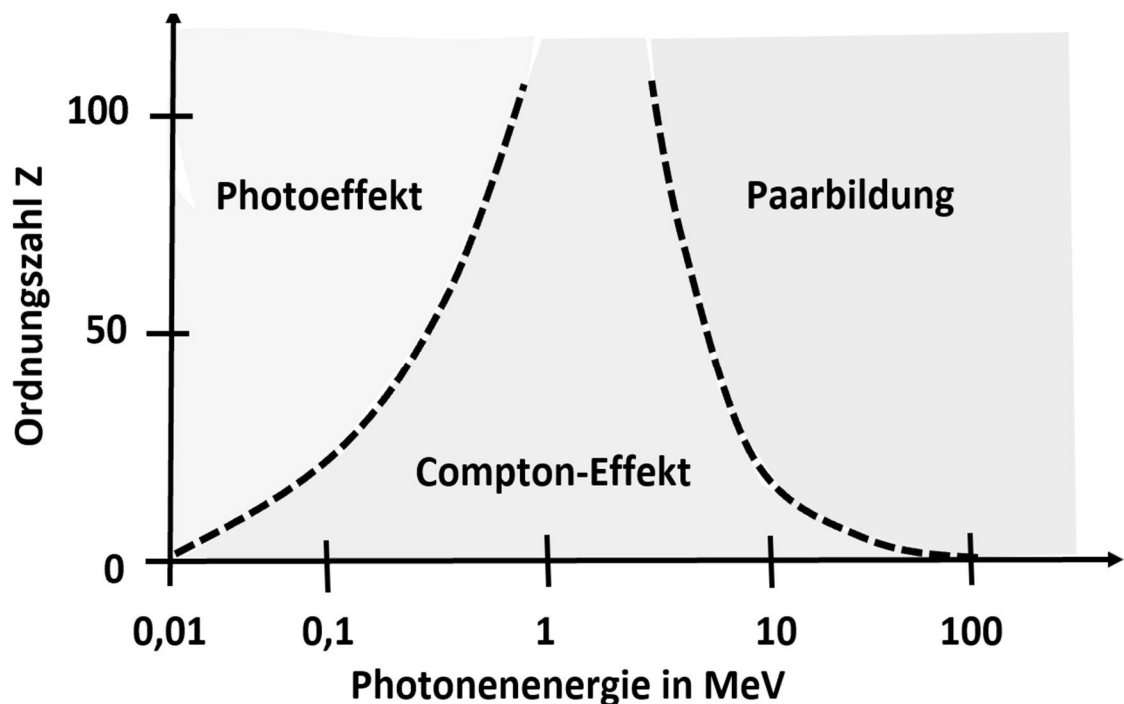


Abb. 2.2.22 Dominierender Wechselwirkungsprozess bei der Absorption von Photonenstrahlung in Abhängigkeit von der Ordnungszahl Z und der Photonenenergie E_{ph} (eigene Darstellung nach Vorlage [81])

Der **Schwächungskoeffizient μ** hängt sowohl von der **Energie der Photonen** als auch von den **Eigenschaften des Materials** (z. B. seiner Dichte und Zusammensetzung) ab. Da dichtere Stoffe auf gleicher Strecke mehr Atome enthalten, schwächen sie die Strahlung stärker. Um den Einfluss der Dichte zu reduzieren, verwendet man den **Massenschwächungskoeffizienten μ/ρ** . Er beschreibt die Schwächung bezogen auf die durchstrahlte Masse pro Flächeneinheit (Einheit: cm^2/g) und ermöglicht dadurch einen besseren Vergleich verschiedener Stoffe.

Tatsächlich besitzen viele Materialien bei **mittleren und hohen Photonenenergien** ähnliche Werte von μ/ρ , da hier vor allem der Compton-Effekt dominiert ⁶. Die großen Unterschiede der Schwächungskoeffizienten entstehen dann hauptsächlich durch die unterschiedlichen Dichten der Materialien. Bei **niedrigen Photonenenergien** spielen jedoch zusätzlich die Ordnungszahl und der Photoeffekt eine wichtige Rolle, sodass Stoffe mit hoher Ordnungszahl (z. B. Blei) deutlich größere Massenschwächungskoeffizienten aufweisen als Stoffe mit niedriger Ordnungszahl (Tab. 2.2.1, Abb. 2.2.23).

Tabelle 2.2.1 Schwächungskoeffizient und Massenschwächungskoeffizient verschiedener Materialien bei einer Photonenenergie von 30 keV bzw. 1 MeV

Material	Dichte ρ [g/cm ³]	μ bei 1 MeV [cm ⁻¹]	μ/ρ bei 1 MeV [cm ² /g]	μ bei 30 keV [cm ⁻¹]	μ/ρ bei 30 keV [cm ² /g]
Luft	0,0012	0,00008	0,063	0,00036	0,30
Wasser	1,0	0,066	0,066	0,38	0,38
Aluminium	2,7	0,165	0,061	0,89	0,33
Blei	11,3	0,79	0,070	373	33

Bei einer Photonenenergie von **1 MeV** unterscheiden sich die **Massenschwächungskoeffizienten** der Materialien nur wenig. Die großen Unterschiede der **Schwächungskoeffizienten μ** entstehen daher hauptsächlich durch die unterschiedlichen Dichten. Bei einer Photonenenergie von **30 keV** besitzt Blei dagegen bereits einen deutlich größeren Massenschwächungskoeffizienten als die übrigen Materialien. Ursache ist der starke Einfluss des Photoeffekts bei Materialien mit hoher Ordnungszahl.

⁶ Beim Compton-Effekt wechselwirken Photonen mit Elektronen. Die Anzahl der Elektronen pro Gramm Material ist bei vielen Stoffen ähnlich, da sowohl die Elektronenzahl als auch die Atommasse näherungsweise proportional zur Ordnungszahl Z sind. Daher unterscheiden sich die Massenschwächungskoeffizienten μ/ρ vieler Materialien im Compton-Bereich nur wenig.

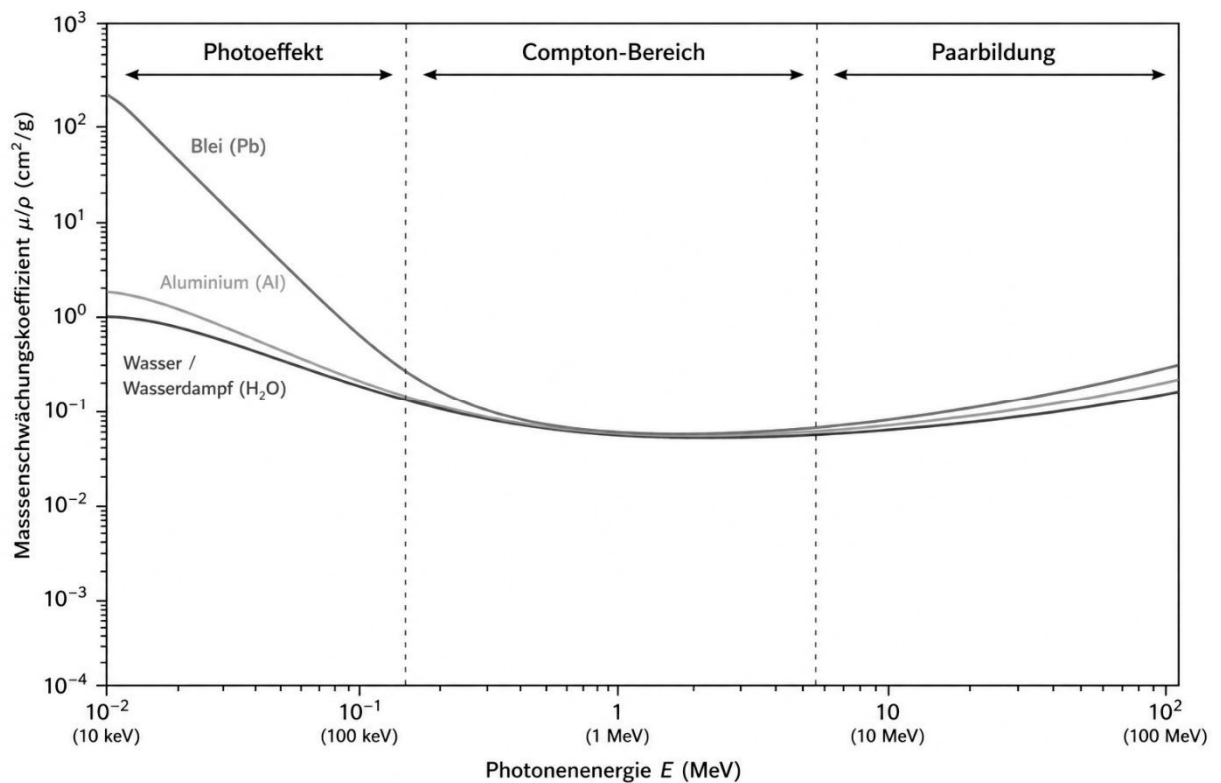


Abb. 2.2.23 Massenschwächungskoeffizient μ/p von Wasserdampf bzw. Wasser, Aluminium, und Blei in Abhängigkeit von der Photonenenergie. Eigene, schematische Darstellung nach NIST-XCOM-Daten [42]



Merke: Der **Massenschwächungskoeffizient μ/p** entfernt den Einfluss der Dichte. Deshalb besitzen Wasser und Wasserdampf nahezu dieselben Werte von μ/p , obwohl ihre Dichten stark unterschiedlich sind.



Merke: Der **Schwächungskoeffizient μ** beschreibt die Schwächung **pro Zentimeter** Material. Der **Massenschwächungskoeffizient μ/p** beschreibt die Schwächung bezogen auf die **Masse des durchstrahlten Materials**. Seine Einheit ist cm^2/g . Der Massenschwächungskoeffizient μ/p ermöglicht einen Vergleich verschiedener Materialien unabhängig von ihrer Dichte.