

# Effekte der Physik und ihre Anwendungen

herausgegeben von

Manfred von Ardenne  
Gerhard Musiol  
Uwe Klemradt

Verlag  
Harri  
Deutsch 

## Herausgeber

**Prof. Dr. Manfred von Ardenne** (†) erlangte durch zahlreiche Erfindungen und Publikationen Weltruhm.

**Prof. Dr. Gerhard Musiol**, Hauptautor des *Bronstein*, lehrte an der Technischen Universität Dresden.

**Prof. Dr. Uwe Klemradt** lehrt Physik an der RWTH Aachen.

## Verlag

Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch

Gräfstr. 47

60486 Frankfurt

[www.harri-deutsch.de/verlag/](http://www.harri-deutsch.de/verlag/)

[verlag@harri-deutsch.de](mailto:verlag@harri-deutsch.de)

Fax: 069 77 01 58 69

## Webseite zum Buch

<http://effekte.harri-deutsch.de>

### *Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek*

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über (<http://dnb.ddb.de>) abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches – oder von Teilen daraus – sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet werden. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Der Inhalt des Werkes wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Herausgeber, Autoren und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

3., überarbeitete, neu strukturierte und wesentlich erweiterte Auflage 2005

©Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH, Frankfurt am Main, 2005

Druck: fgb • freiburger graphische betriebe <[www.fgb.de](http://www.fgb.de)>

Printed in Germany

# Vorwort zur dritten Auflage

Diese kompakte, übersichtliche Darstellung weit gefächerter physikalischer Phänomene unter Betonung der Anwendungen füllt offenkundig eine Lücke zwischen den zahlreichen hervorragenden einführenden Lehrbüchern und lexikalischen Werken, so dass auch die 2. Auflage in vergleichsweise kurzer Zeit vergriffen war. Aufgrund des großen Zuspruchs der Leserschaft wurde daher eine 3. Auflage ins Auge gefasst, die sich jedoch deutlich von der vorigen unterscheiden sollte: Zum einen musste der raschen Weiterentwicklung der Physik seit der 1. Auflage Rechnung getragen werden, zum anderen erschien es angemessen, noch besser auf die Bedürfnisse von Studierenden einzugehen, die mittlerweile neben dem ursprünglich angesprochenen Leserkreis – Physiker, Ingenieure und Technologen in der Berufspraxis – zu den häufigsten Nutzern dieses Buches gehören.

Die bisherigen acht Sachgebiete wurden gemeinsam mit den neuen Artikeln in der vorliegenden Auflage in 17 Kapitel und einen Anhang eingeordnet. Dies ermöglichte es, umfangreiche Sachgebiete mit deutlich verbesserter Trennschärfe darzustellen und Effekte in wichtigen Stoffgebieten wie Gase und Flüssigkeiten, Strömungsmechanik, Akustik, Phasenübergänge und dynamische Systeme (Chaos), die bisher nicht oder nur am Rande vertreten waren, zusätzlich in eigenen Kapiteln zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang sei angemerkt, dass ein Kapitel zur Nanotechnologie bewusst (noch) nicht aufgenommen wurde, da sich dieses Gebiet zur Zeit noch stark im Fluss befindet; bei einer zukünftigen Auflage mag hier eine Neubewertung erforderlich sein. Die wichtigsten methodischen Grundlagen dieser Richtung sind jedoch eingearbeitet.

Insgesamt wurde die 3. Auflage der „Effekte der Physik und ihre Anwendungen“ deutlich erweitert und umfasst nunmehr 345 Artikel von rund 150 Autoren, einschließlich der 14 federführenden Autoren, gegenüber 225 Artikeln von 90 Autoren mit 9 federführenden Autoren in den ersten beiden Auflagen. Alle Artikel (es gibt einige wenige Ausnahmen), die bereits in der vorigen Auflage vertreten waren, wurden redigiert und auf den neuesten Stand gebracht, zum Teil durch neue Autoren. Auch der Anhang wurde vollständig überarbeitet und enthält jetzt angesichts des Umfangs des Buches nur noch Anmerkungen zu SI-Einheiten sowie eine Tabelle wichtiger Konstanten.

Einen schnellen Zugriff auf den außerordentlich umfangreichen Informationsgehalt des Buches ermöglichen zwei Stichwortverzeichnisse: eins für die Stichworte der Effekte an sich und eins für die Anwendungen der Effekte einschließlich physikalisch–methodischer sowie spezieller apparativer Entwicklungen.

Die Herausgeber hoffen, dass die neubearbeitete 3. Auflage ebenso positiv aufgenommen wird wie die vorangegangenen zwei. Die Notwendigkeit, vielschichtige Themen knapp abzuhandeln und einzelnen Kapiteln zuzuordnen, führte an mancherlei Stellen zu Kompromissen; ebenso ist die Auswahl der behandelten Effekte sicherlich subjektiv und keinesfalls erschöpfend. Wir sind jedoch zuversichtlich, dass sich auch die vorliegende 3. Auflage als nützlich erweisen und in der Praxis bewähren wird.

Schließlich möchten wir noch einmal den wichtigen Umstand betonen, dass unser Buch insbesondere die Anwendungen der Effekte darstellen bzw. möglichst viele von ihnen wenigstens aufzählen soll. Das Spektrum dieser Anwendungen ist teilweise sehr groß, unterschiedlich von Effekt zu Effekt, bei manchen gibt es zur Zeit nur erste Hinweise auf mögliche Anwendungen, und es kommen im Verlaufe der Zeit immer wieder neue hinzu. Einen vollständigen Überblick zu erarbeiten ist ein schwieriges Unterfangen, auch weil neue Anwendungen meist in technischen und technologischen Fachzeitschriften veröffentlicht werden, die nur von den auf diesen Gebieten arbeitenden Fachvertretern gelesen werden. Herausgeber und Verlag wenden sich daher an die Leserschaft des Buches mit der Bitte, noch nicht erfasste Anwendungen der im Buch dargestellten physikalischen Effekte dem Verlag mitzuteilen, damit sie in der nächsten Auflage berücksichtigt werden können. Auch Hinweise auf noch nicht einbezogene Effekte und deren Anwendungen sind willkommen.

Zuletzt ein Wort zur Herausbergerschaft: Leider ist Herr Prof. Dr. h. c. mult. Manfred von Ardenne, auf dessen Initiative die vorliegende Herausarbeitung der Anwendungen physikalischer Effekte zurückgeht, noch vor dem Beginn der Arbeiten zur 3. Auflage verstorben. Es ist uns ein Bedürfnis, auch in Anerkennung und unter Betonung seines großen wissenschaftlichen Gesamtwerkes, an dieser Stelle unseren besonderen Dank für sein Engagement zum Ausdruck zu bringen.

An der Erarbeitung und Gestaltung der 1. Auflage hatte Herr Dr. S. Reball entscheidenden Anteil. Nach seinem Ausscheiden als Mitherausgeber möchten wir ihm noch einmal für seinen bemerkenswerten Einsatz herzlich danken.

Mit der Aufnahme von Herrn Prof. Dr. U. Klemradt als zweiten Herausgeber anlässlich der Erarbeitung der 3. Auflage wurde ein Generationswechsel eingeleitet, der die Kontinuität der „Effekte der Physik und ihre Anwendungen“ sichert.

Zum Schluss möchten wir dem Verlag Harri Deutsch für die stete Unterstützung und, in Anbetracht der relativ langen Zeitspanne der Erarbeitung der 3. Auflage, auch für Verständnis und Geduld unseren Dank zum Ausdruck bringen.

Dresden und Aachen, im Juni 2005

Prof. Dr. Gerhard Musiol  
Prof. Dr. Uwe Klemradt

## **Aus dem Vorwort zur ersten Auflage**

Ein relativ leichter und zugleich praktischer Zugang zu dem umfangreichen Wissensfundus der Physik eröffnet sich über die beobachtbaren physikalischen Erscheinungen. Viele von ihnen wurden besonders in den frühen Jahren der Entwicklung der Physik mit dem Begriff des Effekts gekennzeichnet. Damit sollte der grundlegende Charakter zum Ausdruck gebracht werden. Allerdings hat sich für andere Erscheinungen mit der gleichen Tragweite dieses Attribut nicht eingebürgert. Wenn in dem vorliegenden Buch von Effekten die Rede ist, dann sind damit beide Gruppen gemeint.

Dementsprechend wurde bei der Erarbeitung dieses Buches eine Auswahl von sowohl seit langem bekannter als auch erst in jüngster Zeit gefundener wesentlicher beobachtbarer physikalischer Erscheinungen vorgenommen und in einheitlicher Form und im Umfange eines einbändigen Werkes zusammengestellt und aufbereitet. Rund 90 Autoren haben unter der Leitung von 9 federführenden Autoren 225 Beiträge zu Erscheinungen aus den Materiestrukturen des Atomkerns, der Atomhülle, der Moleküle und des Plasmas, über elektrische, elektromagnetische und Halbleitereffekte, über optische und photographische, mechanische und wärmetechnische Effekte verfaßt. Einige psychologische Erscheinungen, die bei der Beobachtung und Messung physikalischer Erscheinungen von Bedeutung sind, ergänzen dieses Spektrum.

Dresden, im November 1986

Manfred von Ardenne  
Gerhard Musiol  
Siegfried Reball

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Effekte der subatomaren Physik (Prof. Dr. G. Musiol)</b>	<b>1</b>
Einführung (Prof. Dr. G. Musiol)	1
Abschirmung ionisierender Strahlung (Prof. Dr. B. Dörschel †, Dr. J. Henniger)	2
Aktivierung (Dr. K. Irmer; Dr. E. J. Langrock)	6
Alphazerfall, Alphastrahlung (Prof. Dr. W. Stolz)	10
Annihilation (Prof. Dr. A. Andreeff)	14
Betazerfall, Betastrahlung (Prof. Dr. W. Stolz)	16
Braggsche Reflexion (Prof. Dr. E. Wieser)	21
Bremsstrahlung (Dr. R. Wedell)	24
Brüten (Dr. S. Tesch)	27
Cherenkov-Effekt (Dr. S. Tesch)	30
Compton-Effekt (Prof. Dr. A. Andreeff)	32
Elementarteilchen (Prof. Dr. G. Bohm, Prof. Dr. S. Nowak)	34
Gammastrahlung (Prof. Dr. W. Stolz)	43
Isotopentrennung (Dr. G. Müller)	47
Isotopie und Isotopie-Effekte (Dr. G. Müller)	50
Kernanregung, Kernabregung (Dr. S. Tesch)	53
Kernfusion (Dr. S. Tesch)	56
Kernreaktionen (Dr. S. Tesch)	61
Kernspaltung (Dr. S. Tesch)	67
Kumakhov-Strahlung (Dr. R. Wedell)	71
Magnetische Resonanz (Prof. Dr. S. Wartewig)	74
Magnet-Resonanz-Tomographie (Prof. Dr. A. Keller)	82
Markierung (Dr. A. Zeuner)	87
Myonenatome (Dr. S. Tesch)	91
Naturkonstanten (Prof. Dr. A. Andreeff)	94
Neutronenstrahlen (Prof. Dr. A. Andreeff)	98
Neutronenstreuung (Prof. Dr. E. Wieser)	102
Paarbildung (Dr. S. Tesch)	107
Polarisation von Teilchen (Dr. S. Tesch)	109
Positronenstrahlen (Prof. Dr. K. Uhlmann)	112
Radioaktivität (Prof. Dr. W. Stolz)	116
Relativistische Effekte (Dr. H.-R. Kissener)	119
Schwerionenstrahlen (Prof. Dr. R. Bock, Prof. Dr. G. Kraft, Prof. Dr. R. Neumann)	125
Strahlfokussierung (geladene Teilchen) (PD Dr. J. Dietrich)	132
Strahlkühlung (PD Dr. J. Dietrich)	139
Strahlungstransport (Dr. J. Henniger)	145
Szilárd-Chalmers-Effekt (Prof. Dr. E. Herrmann)	152
Teilchenbeschleunigung (PD Dr. J. Dietrich)	154
Tunnel-Effekt (Prof. Dr. A. Andreeff)	162
Übergangsstrahlung (Dr. R. Wedell)	163
Winkelkorrelationen (Prof. Dr. A. Andreeff)	166

<b>2</b>	<b>Effekte der Atom- und Molekülphysik (Prof. Dr. G. Musiol)</b>	<b>168</b>
	Einführung (Prof. Dr. G. Musiol) . . . . .	168
	AUGER-Effekt (Prof. Dr. K. Uhlmann) . . . . .	169
	Elektronenbeugung (Dr. W. Leikam) . . . . .	172
	Elektronenmikroskopie (Dr. Martina Luysberg) . . . . .	177
	Elektronenstrahlen (Dr. S. Panzer) . . . . .	182
	Feldionisation (Prof. Dr. Chr. Edelmann) . . . . .	188
	Ionenstrahlen (Prof. Dr. W. Hauße) . . . . .	191
	Kossel-Effekt (Dr. V. Geist) . . . . .	195
	Linienverbreiterung (PD Dr. G. Zschornack) . . . . .	198
	Matrix-Effekt (Dr. P. Jugelt, Dr. M. Schiekel) . . . . .	202
	Paul-Falle (Prof. Dr. J. Leonhardt) . . . . .	208
	Photo-Effekt (Prof. Dr. K. Uhlmann) . . . . .	210
	Rastersondenmikroskopie (PD Dr. Ph. Ebert) . . . . .	215
	Rekombination (Prof. Dr. J. Leonhardt) . . . . .	220
	RÖNTGEN-Strahlen (Dr. P. Jugelt, Dr. M. Schiekel) . . . . .	222
	RÖNTGEN-Computertomographie (Prof. Dr. A. Keller) . . . . .	230
	RÖNTGEN-Übergänge in mehrfach ionisierten Atomen (PD Dr. G. Zschornack) . . . . .	235
	Synchrotron-Strahlung (Dr. O. Schwarzkopf) . . . . .	239
	Vielfach-Ionisationsprozesse (PD Dr. G. Zschornack) . . . . .	246
	ZEEMAN-Effekt (Prof. Dr. S. Wartewig) . . . . .	249
<b>3</b>	<b>Effekte der Plasmaphysik (Prof. Dr. A. Rutscher)</b>	<b>252</b>
	Einführung (Prof. Dr. A. Rutscher) . . . . .	252
	Erzeugung des Plasmazustandes (Prof. Dr. A. Rutscher) . . . . .	253
	Gasentladung (Dr. G. Hartel) . . . . .	255
	Gasionisierung (Prof. Dr. A. Rutscher) . . . . .	259
	Hohlkatoden-Effekt (Prof. Dr. A. Rutscher) . . . . .	262
	PENNING-Effekt (Prof. Dr. A. Rutscher) . . . . .	264
	Plasmachemische Stoffwandlung (Prof. Dr. A. Rutscher) . . . . .	266
	Plasma-Einschluss (Dr. M. Endler) . . . . .	269
	Plasma-Heizung (Dr. H. P. Laqua) . . . . .	273
	Plasma-Strahlen (Prof. Dr. A. Rutscher) . . . . .	275
	Plasma-Strahlung (Dr. E. Kindel) . . . . .	277
	Plasma-Wand-Wechselwirkung (Prof. Dr. J. Meichsner) . . . . .	281
	Thermonukleare Fusion (Dr. M. Endler) . . . . .	285
<b>4</b>	<b>Effekte der Festkörperphysik (Prof. Dr. U. Klemradt)</b>	<b>289</b>
	Einführung (Prof. Dr. U. Klemradt) . . . . .	289
	Ausheilung von Materialdefekten (Dr. R. Klages) . . . . .	290
	Austauscheffekt (Prof. Dr. Chr. Edelmann) . . . . .	292
	Bestrahlungseffekte in Festkörpern (Prof. Dr. L. Wuckel) . . . . .	294
	Carter-Leck-Effekt (Prof. Dr. Chr. Edelmann) . . . . .	302
	Desorption (Prof. Dr. Chr. Edelmann) . . . . .	304
	Diffusion (Dr. H.-J. Weiss) . . . . .	307
	Felddesorption, Feldverdampfung (Prof. Dr. Chr. Edelmann) . . . . .	309
	Festkörperverdampfung (Dr. G. Beister) . . . . .	311
	Festkörperzerstäubung (Prof. Dr. W. Hauße) . . . . .	313
	Formgedächtnis-Effekt (Prof. Dr. P. Paufler) . . . . .	318
	Gasabgabe (Prof. Dr. Chr. Edelmann) . . . . .	320
	Gasaufzehr- und Blears-Effekt (Prof. Dr. Chr. Edelmann) . . . . .	322
	Ionenimplantation (Dr. R. Klages) . . . . .	324

Ionenstreuung ( <i>Dr. R. Klabes</i> ) . . . . .	329
Kanalisierungs- und Blockierungseffekte ( <i>Dr. R. Klabes</i> ) . . . . .	333
Kristallbaufehler ( <i>Prof. Dr. P. Paufler</i> ) . . . . .	336
Magnetische Ordnung ( <i>Prof. Dr. E. Wieser</i> ) . . . . .	341
Mößbauer-Effekt ( <i>Prof. Dr. E. Wieser</i> ) . . . . .	347
Nachwirkung ( <i>Prof. Dr. P. Paufler</i> ) . . . . .	351
Permeation, Superpermeation ( <i>Prof. Dr. Chr. Edelmann</i> ) . . . . .	353
Richardson-Effekt ( <i>Dr. W. Leikam</i> ) . . . . .	356
RÖNTGEN-Effekt ( <i>Prof. Dr. Chr. Edelmann</i> ) . . . . .	359
Schottky-Effekt und Feldelektronenemission ( <i>Dr. W. Leikam</i> ) . . . . .	360
Sekundärelektronen ( <i>Prof. Dr. K. Uhlmann</i> ) . . . . .	363
Sekundärionen ( <i>Prof. Dr. K. Uhlmann</i> ) . . . . .	367
Sorption ( <i>Prof. Dr. Chr. Edelmann</i> ) . . . . .	370
<b>5 Effekte der Halbleiterphysik (Prof. Dr. J. Auth)</b> . . . . .	<b>374</b>
Einführung ( <i>Prof. Dr. J. Auth</i> ) . . . . .	374
Avalanche-Effekt ( <i>Dr. M. Mocker, Dr. G. Genzow</i> ) . . . . .	375
Dember-Effekt ( <i>Dr. D. Genzow</i> ) . . . . .	380
Elektrolumineszenz ( <i>Dr. D. Genzow, Prof. Dr. K. H. Herrmann</i> ) . . . . .	382
Feldeffekt, Feldeffekt-Transistor ( <i>Prof. Dr. J. Auth</i> ) . . . . .	385
Franz-Keldysch-Effekt ( <i>Prof. Dr. J. Auth</i> ) . . . . .	392
Gunn-Effekt ( <i>Prof. Dr. J. Auth, Dr. F. Kugler †, Dr. H. W. Mittenzwei †</i> ) . . . . .	394
Halbleiter-Photoeffekte ( <i>Dr. D. Genzow</i> ) . . . . .	398
Hall-Effekt ( <i>Dr. W. Hoerstel</i> ) . . . . .	402
Heißeleiter ( <i>Prof. Dr. A. Rost, PD Dr. G. Tschuch</i> ) . . . . .	406
Heteroübergänge ( <i>Prof. Dr. J. Auth</i> ) . . . . .	408
Injektion ( <i>Prof. Dr. J. Auth</i> ) . . . . .	415
Injektionslaser ( <i>Dr. D. Genzow, Prof. Dr. K. H. Herrmann</i> ) . . . . .	419
Injektionslumineszenz ( <i>Dr. D. Genzow, Prof. Dr. K. H. Herrmann</i> ) . . . . .	426
Lumineszenz in Festkörpern ( <i>Dr. D. Genzow, Prof. Dr. K. H. Herrmann</i> ) . . . . .	430
Magnetophonon-Effekt ( <i>Dr. W. Hoerstel</i> ) . . . . .	434
Magnetowiderstandseffekt ( <i>Dr. W. Hoerstel</i> ) . . . . .	436
Metall-Halbleiter-Kontakt ( <i>Prof. Dr. J. Auth</i> ) . . . . .	440
Moss-Burstein-Effekt ( <i>Dr. D. Genzow, Prof. Dr. K. H. Herrmann</i> ) . . . . .	443
n-Leitung, p-Leitung ( <i>Prof. Dr. J. Auth</i> ) . . . . .	445
Ovshinsky-Effekt ( <i>Dr. D. Genzow, Dr. M. Mocker</i> ) . . . . .	449
Peltier-Effekt ( <i>Dr. W. Hoerstel</i> ) . . . . .	451
Phonon-drag-Effekt ( <i>Dr. W. Hoerstel</i> ) . . . . .	454
Photo-Elektromagnetischer Effekt ( <i>Dr. D. Genzow</i> ) . . . . .	456
Photoleitung ( <i>Dr. D. Genzow, Prof. Dr. K. H. Herrmann</i> ) . . . . .	458
Photon-drag-Effekt ( <i>Dr. D. Genzow</i> ) . . . . .	462
Pinch-Effekt in Halbleitern ( <i>Dr. W. Hoerstel</i> ) . . . . .	464
pn-Photoeffekt ( <i>Dr. D. Genzow</i> ) . . . . .	467
Quanten-Hall-Effekt ( <i>PD Dr. W. Kraak</i> ) . . . . .	472
Quantenfäden, Quantenpunkte ( <i>Prof. Dr. M. Grundmann</i> ) . . . . .	478
Sasaki-Shibuya-Effekt ( <i>Dr. W. Hoerstel</i> ) . . . . .	484
Seebeck-Effekt ( <i>Dr. W. Hoerstel</i> ) . . . . .	486
Shubnikov-de Haas-Effekt ( <i>Dr. W. Hoerstel</i> ) . . . . .	489
Sperrschicht-Photoeffekt ( <i>Dr. D. Genzow</i> ) . . . . .	492
Thermomagnetische Effekte ( <i>Dr. W. Hoerstel</i> ) . . . . .	495
Thyristor-Effekt ( <i>Dr. K. Lehnert</i> ) . . . . .	498
Transistor-Effekt (bipolar) ( <i>Prof. Dr. J. Auth</i> ) . . . . .	503

Tunnel-Diode (Prof. Dr. A. Rost, PD Dr. G. Tschuch)	509
Zyklotron-Resonanz (Prof. Dr. J. Auth)	512
<b>6 Werkstoffphysikalische Effekte (Dr. H.-J. Weiß)</b>	<b>515</b>
Einführung (Dr. H.-J. Weiß)	515
BAUSCHINGER-Effekt (Prof. Dr. G. Backhaus, Prof. Dr. H. Balke)	516
Festigkeit (Prof. Dr. W. Pompe)	519
Härte (Dr. H.-J. Weiß)	522
Mechanische Ermüdung (Prof. Dr. C. Holste)	525
Plastizität (Prof. Dr. L. Eberlein)	530
Rekristallisation (Prof. Dr. L. Eberlein)	534
Sintern (Prof. Dr. G. Leitner)	536
Thermomechanische Behandlung (Prof. Dr. G. Zouhar)	538
Verbundprinzip (Dr. H.-J. Weiß)	542
Verformungsinduzierte Schallemission (Prof. Dr. G. Zouhar)	546
Zerspanen (Prof. Dr. K. Künanz)	549
<b>7 Effekte in Gasen und Flüssigkeiten (Prof. Dr. S. Hess)</b>	<b>553</b>
Einführung (Prof. Dr. S. Hess)	553
Ferrofluide (Dr. St. Odenbach)	555
Fréedericksz-Effekt (Prof. Dr. G. Heppke, Dr. G. Hauck)	558
Magneto- und Elektrorheologischer Effekt (Dr. St. Odenbach)	562
Nicht-NEWTONsche Effekte in Fluiden (Dr. M. Kröger)	564
SENFLEBEN-BEENAKKER-Effekt (Prof. Dr. S. Hess)	569
Sonolumineszenz (Dr. S. Hilgenfeldt, Prof. Dr. D. Lohse)	571
Strömungs-Doppelbrechung: MAXWELL-Effekt (Prof. Dr. S. Hess)	575
Struktur-Effekte in Flüssigkeiten (Prof. Dr. S. Hess; Dr. M. Kröger)	579
Thermo-Diffusions-Effekt, Diffusions-Thermo-Effekt; Ludwig-Soret-Effekt, Dufour-Effekt (Prof. Dr. S. Hess)	582
Viskosität von nematischen Flüssigkristallen (Prof. Dr. F. Schneider)	585
<b>8 Strömungsmechanische Effekte (PD Dr. M. Buschmann)</b>	<b>590</b>
Einführung (PD Dr. M. Buschmann)	590
Coanda-Effekt (Dr. R. Pauer)	591
Dynamischer Auftrieb (PD Dr. M. Buschmann, Dr. R. Pauer)	593
Grenzschichten (PD Dr. M. Buschmann)	595
Hydrodynamisches Paradoxon (Dr. H.-J. Weiß)	598
Hydrostatischer Auftrieb (Dr. D. Bock)	599
Kavitation (Dr. W. Heller)	602
Kelvin-Helmholtz-Instabilität (Dr. A. Ickler)	605
Magnus-Effekt (Dr. G. Schlanzke)	608
Riblets (Dr. J. Klingenberg)	610
Strömungsablösung (PD Dr. M. Buschmann)	613
Strömungsinstabilitäten (Dr. M. Wimmer)	616
Toms-Effekt (Prof. Dr. B. Gampert, Dipl.-Ing. C. Wilkes)	620
Turbulenz (Dr. H.-J. Mascheck)	623
Verdichtungsstoß (Dr. S. Niebergall)	626
Weissenberg-Effekt (Prof. Dr. B. Gampert, Dipl.-Ing. C. Wilkes)	630



<b>9</b>	<b>Elektro- und magnetophysikalische Effekte (Prof. Dr. H.-J. Dubrau †, Prof. Dr. H. Hofmann †)</b>	<b>632</b>
	Einführung (Prof. Dr. H. Hofmann †) . . . . .	632
	Akustoelektrischer Effekt (Prof. Dr. H. Hofmann †) . . . . .	633
	Akustooptischer Effekt (Prof. Dr. H. Hofmann †) . . . . .	635
	Brennstoffzellen (Prof. Dr. J. Garche) . . . . .	638
	Elektrete <sup>1</sup> (Prof. Dr. H.-J. Dubrau †) . . . . .	643
	Elektrokinetische Effekte (Prof. Dr. J. Garche, Prof. Dr. H.-J. Jacobasch †) . . . . .	645
	Elektromagnetische Induktion (Prof. Dr. H.-J. Dubrau †) . . . . .	650
	Elektronisches Rauschen (Prof. Dr. G. Dörfel) . . . . .	654
	Elektrostriktion, Magnetostruktion (Dr. D. Bock) . . . . .	660
	Elektrowärme (Dr. D. Bock) . . . . .	662
	Festelektrolyte (Prof. Dr. J. Garche) . . . . .	664
	GMR-Effekt (Prof. Dr. Ingrid Mertig) . . . . .	669
	Hysterese (Dr. D. Bock) . . . . .	673
	Johnson-Rahbeck-Effekt (Dr. D. Bock) . . . . .	675
	Koinzidenz (Prof. Dr. H.-J. Dubrau †) . . . . .	677
	Kompensation (Prof. Dr. H.-J. Dubrau †) . . . . .	679
	Magnetoelastischer Effekt (Dr. D. Bock) . . . . .	683
	Miller-Effekt (Prof. Dr. H.-J. Dubrau †) . . . . .	686
	Piezoelektrischer Effekt (Dr. H.-J. Weiß) . . . . .	687
	Ryftin-Effekt (Prof. Dr. S. Kaiser) . . . . .	689
	Skin-Effekt (Dr. K. Lehmann) . . . . .	691
	Transversaler Ettingshausen-Nernst-Effekt (Prof. Dr. Th. Elbel) . . . . .	694
	Zener-Effekt (Prof. Dr. H. Hofmann) . . . . .	697
<b>10</b>	<b>Optische Effekte (Prof. Dr. W. Brunner)</b>	<b>699</b>
	Einführung (Prof. Dr. W. Brunner) . . . . .	699
	Absorption des Lichtes (Dr. J. Hirsch) . . . . .	700
	Adaptive Optik (Dr. R. Spolaczyk) . . . . .	703
	Beugung des Lichtes (Diffraktion) (Dr. J. Hirsch) . . . . .	706
	Bildwandlung (Dr. R. Spolaczyk) . . . . .	711
	Brechung des Lichtes (Dr. J. Hirsch) . . . . .	713
	Dispersion des Lichtes (Dr. J. Hirsch) . . . . .	715
	Doppler-Effekt des Lichtes (Dr. J. Hirsch) . . . . .	718
	Elektrooptische Effekte (Dr. H.-H. Ritze) . . . . .	721
	Holografie (Dr. R. Spolaczyk) . . . . .	725
	Interferenz (Dr. R. Spolaczyk) . . . . .	727
	Kohärente optische Transient-Effekte (Dr. H.-H. Ritze) . . . . .	732
	Laser (Prof. Dr. F. Fink) . . . . .	735
	Laserkühlung (Prof. Dr. F. Fink) . . . . .	747
	Linienverbreiterung im optischen Bereich (Dr. G. Hartel) . . . . .	750
	Lumineszenz (Dr. J. Hirsch) . . . . .	753
	Magnetooptische Effekte (Dr. H.-H. Ritze) . . . . .	756
	Nichtlineare Optik (Prof. Dr. F. Fink) . . . . .	759
	Optische Abbildung (Dr. R. Spolaczyk) . . . . .	767
	Optische Aktivität (Dr. H.-H. Ritze) . . . . .	775
	Optische Anisotropie-Effekte (Dr. H.-H. Ritze) . . . . .	777
	Optische Bistabilität (Dr. H.-H. Ritze) . . . . .	780
	Optische Informationsübertragung (Prof. Dr. W. Karthe) . . . . .	783
	Optische Nahfeldmikroskopie (Prof. Dr. L. Eng) . . . . .	789
	Optische Quantencomputer (Prof. Dr. B. Wilhelmi) . . . . .	793
	Optische Quantenkryptographie (Prof. Dr. B. Wilhelmi) . . . . .	798

Optische Sättigungseffekte (Dr. H.-H. Ritze) . . . . .	803
Optische Solitonen (Dr. H. Steudel) . . . . .	807
Optischer Stark-Effekt (Dr. H.-H. Ritze) . . . . .	811
Optoakustischer und Photoakustischer Effekt (Dr. C. Hartung) . . . . .	813
Optoelektronik (Prof. Dr. W. Karthe) . . . . .	815
Optogalvanischer Effekt (Dr. C. Hartung) . . . . .	822
Optothermischer Effekt (Dr. C. Hartung) . . . . .	823
Phasenkontrast (Dr. R. Spolaczyk) . . . . .	825
Photonische Kristalle (Prof. Dr. B. Wilhelmi) . . . . .	827
Polarisation des Lichtes (Dr. H.-H. Ritze) . . . . .	832
Raman-Effekt (Prof. Dr. F. Fink) . . . . .	836
Reflexion des Lichtes (Dr. J. Hirsch) . . . . .	840
Röntgen-Optik (Prof. Dr. N. Langhoff, Dr. V. A. Arkadiev, Dr. A. A. Bjeoumikhov) . . . . .	843
Strahlungstransport im optischen Bereich (Dr. G. Hartel) . . . . .	848
Streuung des Lichtes (Dr. J. Hirsch) . . . . .	850
Terahertz-Optik (Prof. Dr. B. Wilhelmi) . . . . .	853
<b>11 Photographische Effekte (Prof. Dr. P. Süptitz)</b> . . . . .	<b>858</b>
Einführung (Prof. Dr. P. Süptitz) . . . . .	858
Absorption und Lichtstreuung in der photographischen Schicht (Dr. E. Görgens) . . . . .	859
Belichtungseffekte (Dr. E. Görgens) . . . . .	861
Bildfixierung und Stabilisierung (Dr. H. Brandenburger) . . . . .	864
Diazytopie (Prof. Dr. J. Epperlein) . . . . .	866
Elektrophotographie (Prof. Dr. P. Süptitz) . . . . .	868
Entwicklungseffekte (Dr. E. Görgens) . . . . .	873
Farbentwicklung (Prof. Dr. J. Epperlein) . . . . .	875
Farbphotographie (Prof. Dr. J. Epperlein) . . . . .	877
Farbstoffdiffusion (Prof. Dr. J. Epperlein) . . . . .	880
Helligkeitswiedergabe (Dr. E. Görgens) . . . . .	882
Körnung und Körnigkeit (Dr. E. Görgens) . . . . .	885
Lichthof (Dr. E. Görgens) . . . . .	887
Nachbar- und Eberhard-Effekt (Dr. E. Görgens) . . . . .	890
Optische Entwicklung (Prof. Dr. J. Epperlein) . . . . .	892
Photochromie (Prof. Dr. J. Epperlein) . . . . .	894
Photographischer Elementarprozess (Prof. Dr. P. Süptitz) . . . . .	897
Photographische Modulationsübertragung (Dr. E. Görgens) . . . . .	899
Photolyse (Prof. Dr. J. Epperlein) . . . . .	904
Photopolymerisation und Photovernetzung (Prof. Dr. J. Epperlein) . . . . .	906
Schwarzschild-Effekt und andere direkte Äußerungen des Reziprozitätsfehlers (Dr. E. Görgens) . . . . .	908
Schwarzweiß-Entwicklung (Dr. H. Brandenburger) . . . . .	910
Schwarzweiß-Photographie (Dr. H. Brandenburger) . . . . .	913
Silbersalz-Diffusions-Verfahren (Prof. Dr. J. Epperlein) . . . . .	915
Spektrale Sensibilisierung (Prof. Dr. P. Süptitz) . . . . .	917
Thermographie und Photothermographie (Prof. Dr. J. Epperlein) . . . . .	919
Umkehrentwicklung (Dr. H. Brandenburger) . . . . .	921
<b>12 Akustische Effekte (Prof. Dr. M. Möser)</b> . . . . .	<b>923</b>
Einführung (Prof. Dr. M. Möser) . . . . .	923
Antischall (Prof. Dr. M. Möser) . . . . .	924
Akustische Kavitation (Prof. Dr. H. Kuttruff) . . . . .	927
Beugung von Schall (Prof. Dr. M. Möser) . . . . .	931
Elektroakustische Aufnahmeeffekte (Dr. E. Werner) . . . . .	933

Elektroakustische Richtungsaufnahme (Dr. E. Werner) . . . . .	937
Elektroakustische Schallerzeugung (Dr. E. Werner) . . . . .	941
Elektroakustische Schallfeldbeeinflussung (Dr. E. Werner) . . . . .	944
Gesundheitliche Folgen von Schall (Dr. B. Schulte–Fortkamp) . . . . .	948
Luftschalldämmung (Prof. Dr. M. Möser) . . . . .	951
Präzedenz–Effekt (Prof. Dr. J. Blauert) . . . . .	954
Reflexionsschalldämpfung (Dr. F. Lehringer) . . . . .	956
Rollgeräusche (Dr. J. Feldmann) . . . . .	959
Schallstrahlungsdruck (Prof. Dr. H. Kuttruff) . . . . .	964
Ultraschalldiagnostik (Prof. Dr. H. Kuttruff) . . . . .	966
<b>13 Wärmephysikalische Effekte (Prof. Dr. G. Heinrich)</b>	<b>970</b>
Einführung (Prof. Dr. G. Heinrich) . . . . .	970
Brennstoffzellen (Kraftwerke) (Prof. Dr. D. Hebecker) . . . . .	971
Brennwertnutzung (Prof. Dr. D. Hebecker) . . . . .	976
Emission von Wärmestrahlung (Prof. Dr. G. Hofmann) . . . . .	980
Energietransformation (Prof. Dr. D. Hebecker) . . . . .	982
Erzeugung hoher Drücke (Prof. Dr. H. Vollstädt) . . . . .	985
JOULE–THOMSON–Effekt (Dr. R. Agsten) . . . . .	990
Kaltgasmaschinen (Dr. R. Agsten) . . . . .	993
Konvektion (Prof. Dr. J. Huhn) . . . . .	998
Kreisprozesse (Prof. Dr. D. Hebecker) . . . . .	1000
Kryobiophysikalische Effekte (Dr. R. Herzog) . . . . .	1003
Kryopumpe (PD Dr. M. Jäckel) . . . . .	1007
Prinzipien der Temperaturmessung (Dr. G. Pompe) . . . . .	1010
Pyroelektrischer Effekt (Dr. V. Baier) . . . . .	1014
Siedeverzug (Dr. H. Trommer) . . . . .	1016
Sorptions–Wärmetransformator (Prof. Dr. D. Hebecker) . . . . .	1019
Thermoakustischer Effekt (Prof. Dr. R. Quack, Dr. M. Christov) . . . . .	1023
Thermodiffusion (Prof. Dr. N. Elsner, Prof. Dr. J. Huhn) . . . . .	1026
Thermoelastische Effekte (Dr. N. Heß) . . . . .	1028
Transpirationskühlung (Prof. Dr. J. Huhn) . . . . .	1030
Verdampfen, Kondensieren (Prof. Dr. H. Jungnickel, Dr. W. E. Kraus) . . . . .	1033
Wärmeisolation (Dr. B. Kluge) . . . . .	1036
Wärmepumpen (Prof. Dr. G. Heinrich) . . . . .	1039
Wärmerohre (Dr. R. Müller) . . . . .	1043
<b>14 Effekte der Tieftemperaturphysik (Prof. Dr. G. Heinrich)</b>	<b>1048</b>
Einführung (Prof. Dr. P. Seidel) . . . . .	1048
Erzeugung tiefer Temperaturen kleiner 1 K (Prof. Dr. A. Gladun) . . . . .	1049
Erzeugung tiefer Temperaturen kleiner 1 mK (Prof. Dr. A. Gladun) . . . . .	1051
Hochtemperatur–Supraleitung (Prof. Dr. R. Herrmann) . . . . .	1053
JOSEPHSON–Effekte (Prof. Dr. P. Seidel) . . . . .	1060
Restwiderstand von Metallen (Dr. D. Elefant) . . . . .	1062
Suprafluidität (Prof. Dr. C. F. Barenghi) . . . . .	1064
Supraleitfähigkeit (Prof. Dr. P. Seidel) . . . . .	1067
Wärmeleitung bei tiefen Temperaturen (PD Dr. M. Jäckel) . . . . .	1071
<b>15 Phasenübergänge (Prof. Dr. U. Klemradt)</b>	<b>1074</b>
Einführung (Prof. Dr. U. Klemradt) . . . . .	1074
Ferroelektrizität (Dr. M. Aspelmeyer, Prof. Dr. U. Klemradt) . . . . .	1075
Martensitische Umwandlungen (Prof. Dr. U. Klemradt) . . . . .	1078
Ordnungs–Unordnungs–Phasenübergänge (Prof. Dr. K. Binder) . . . . .	1083

Phasenwechselmedien ( <i>Dipl.– Phys. I. Thomas, Prof. Dr. M. Wuttig</i> ) . . . . .	1089
Schaltbare optische Schichten ( <i>Dr. H. Weis, Prof. Dr. M. Wuttig</i> ) . . . . .	1091
Benetzung und Benetzungsphasenübergänge ( <i>Dr. A. Plech</i> ) . . . . .	1094
Geordnete Phasen in Blockcopolymer-Schmelzen ( <i>Prof. Dr. G. Krausch</i> ) . . . . .	1097
Flüssig–Glas–Übergänge ( <i>Dr. A. Meyer</i> ) . . . . .	1100
Flüssigkristalline Phasen ( <i>Prof. Dr. P. M. Knoll</i> ) . . . . .	1103
Umwandlungen und Phasenübergänge in biologischen Systemen ( <i>Dr. Th. Heimburg</i> ) . . . . .	1107
Bose–Einstein–Kondensation ( <i>Prof. Dr. T. Esslinger</i> ) . . . . .	1112
Phasenübergänge in hadronischer Materie ( <i>Prof. Dr. H. Satz</i> ) . . . . .	1115
Schmelzen und Erstarren ( <i>Prof. Dr. K. Kassner</i> ) . . . . .	1118
<b>16 Chaos–Effekte (Prof. Dr. R. Leven)</b> . . . . .	<b>1122</b>
Einführung ( <i>Prof. Dr. R. Leven</i> ) . . . . .	1122
Bifurkationen und Chaos ( <i>Prof. Dr. R. Leven</i> ) . . . . .	1124
Chaotische Attraktoren ( <i>Prof. Dr. R. Leven</i> ) . . . . .	1128
Chaotische Zeitreihen ( <i>Prof. Dr. R. Leven</i> ) . . . . .	1133
Schmetterlings–Effekt ( <i>Prof. Dr. R. Leven</i> ) . . . . .	1136
Transientes Chaos ( <i>Prof. Dr. R. Leven</i> ) . . . . .	1140
<b>17 Physiologische Effekte (Prof. Dr. H. G. Lippmann)</b> . . . . .	<b>1143</b>
Einführung ( <i>Prof. Dr. H. G. Lippmann</i> ) . . . . .	1143
Adaptation ( <i>Prof. Dr. H. G. Lippmann</i> ) . . . . .	1144
Farbsehen ( <i>Prof. Dr. H. G. Lippmann</i> ) . . . . .	1147
Unterschiedsempfindlichkeit ( <i>Prof. Dr. H. G. Lippmann</i> ) . . . . .	1150
Wahrnehmungstäuschungen ( <i>Prof. Dr. H. G. Lippmann</i> ) . . . . .	1154
<b>Anhang</b> . . . . .	<b>1157</b>
Système International d’Unitès (SI–System) ( <i>Prof. Dr. A. Andreeff</i> ) . . . . .	1157
Fundamentale physikalische Konstanten . . . . .	1160
<b>Verzeichnisse</b> . . . . .	<b>1163</b>
Index-Effekte . . . . .	1163
Index-Anwendungen . . . . .	1210

# Kapitel 1

## Effekte der subatomaren Physik

Federführender: Prof. Dr. G. Musiol

### Einführung

Prof. Dr. G. Musiol

Die Effekte der subatomaren Physik, d.h. der Kern- und Elementarteilchenphysik, sind selten mit dem Begriff Effekt belegt worden, obgleich sie dem Begriffsinhalt in hohem Maße genügen. Seien es die Zerfallskanäle der Radioaktivität mit den unterschiedlichsten Teilchenarten bis hin zur spontanen Spaltung, oder seien es die Kernreaktionen mit ihrer Vielfalt an Eingangs- und Ausgangskanälen, von Teilchenstreuung bis Spallation, wofür alle hinreichend langlebigen Geschossteilchen, wie Neutrinos, Myonen, Nukleonen und sogar schwerste Kerne zur Verfügung stehen: alle sind sie grundlegende beobachtbare Phänomene mit bedeutendem Charakter.

Die klassische Physik kann die Effekte dieses Gebietes nur phänomenologisch, nicht aber mikroskopisch beschreiben. Eine genauere Beschreibung erfordert die Einbeziehung der Quantenmechanik und der speziellen Relativitätstheorie, und das unter Berücksichtigung aller in dieser Hierarchieebene der Struktur der Materie wirkenden fundamentalen Wechselwirkungen. Dabei kommt man ohne Kenntnisse der innernuklearen Umwandlungen und damit der Umwandlungen der Elementarteilchen nicht aus, die ihrerseits die Existenz einer tieferen Hierarchieebene, die der Fundamentarteilchen offenbaren und in genauere Theorien einzubeziehen sind [1]. Auch das ist ein Grund dafür, warum beide Gebiete in einem Kapitel eingeordnet wurden.

Das Kapitel enthält einige Artikel zu Themenkreisen mit übergreifendem Charakter für alle Gebiete der Physik, weil sie hier zum Verständnis benötigt werden, bzw. weil sie von hier wesentliche Impulse zu ihrer Weiterentwicklung erfahren haben. Dazu gehören Artikel über die fundamentalen Naturkonstanten, die spezielle Relativitätstheorie und die Teilchenbeschleunigung.

Entsprechend der Zielstellung des Buches wurden vor allem anwendungsträchtige Effekte einbezogen. Für

die Kern- und Elementarteilchenphysik gilt das in unterschiedlichem Maße, wobei der Schwerpunkt naturgemäß bei der Kernphysik liegt. Die Vielfalt der Anwendungen lässt sich in die Gebiete Stoff- und Prozessanalyse mit Kernstrahlungen sowie Stoffumwandlungen mit Kernstrahlungen einordnen [1]. An erster Stelle ist hier ausgehend von Kernspaltung und Kernsynthese die Kernenergetik zu nennen. Auf der Grundlage der Erscheinungen des Kernzerfalls und der Kernreaktionen konnte ein breites Anwendungsspektrum der physikalischen, chemischen, geologischen, technischen und biologisch-medizinischen Analysemethodik entwickelt werden [1–4]. Darüber hinaus war es möglich, besonders in Physik und Chemie unikale Stoff-Syntheseverfahren einzuführen [1].

Unter den Analysemethoden verdienen besondere Erwähnung Untersuchungen von Element- und Isotopenzusammensetzungen, von Stoffstrukturen in Festkörpern und Flüssigkeiten (z.B. durch Neutronenstreuung, des Weiteren bildgebende Verfahren wie Magnet-Resonanz- und Positronen-Emissions-Tomographie) sowie Altersbestimmungen. Zum Spektrum der Anwendungen auf der Grundlage von kernphysikalisch hervorgerufenen Stoffumwandlungen gehören z.B. Veränderungen von mechanischen, elektrischen, magnetischen und anderen Materialeigenschaften, strahlenchemische Synthesen der Chemie und Strahlenwirkungen in biologischem Gewebe.

### Literatur

- [1] MUSIOL, G.; RANFT, J.; REIF, R.; SEELIGER, D.: Kern- und Elementarteilchenphysik, 2. Auflage. – Frankfurt/Main, Thun (Schweiz): Verlag Harri Deutsch 1995.
- [2] SCHATZ, G.; WEIDINGER, A.: Nukleare Festkörperphysik, 3. Auflage. – Stuttgart, Leipzig: B.G. Teubner 1997.
- [3] HERING, W.T.: Angewandte Kernphysik. – Stuttgart, Leipzig: B.G. Teubner 1999.
- [4] TSIPENYUK, Y.M.: Nuclear Methods in Science and Technology. – Bristol, Philadelphia: Institute of Physics Publishing 1997.

## Abschirmung ionisierender Strahlung

Prof. Dr. B. Dörschel †, Dr. J. Henniger

Unmittelbar nach der Entdeckung der verschiedenen Arten ionisierender Strahlung durch W. C. RÖNTGEN, H. BEQUEREL, M. und P. CURIE, J. CHADWICK u.a. stellte man fest, dass Materialschichten unterschiedlicher Art und Dicke die Strahlungsintensität verschieden stark reduzieren. Genaue Untersuchungen ergaben eine zum Teil erhebliche Abhängigkeit der Abschirmwirkung von den Eigenschaften der Strahlung. Es konnten daher aus den Resultaten wichtige Schlussfolgerungen über die Natur der registrierten Strahlungen gezogen werden. In der Folgezeit wurde die Abschirmung ionisierender Strahlung zu einer wesentlichen Voraussetzung für den gefahrlosen Umgang mit Strahlungsquellen, insbesondere in der Medizin, wobei das Ziel in einer Vermeidung oder Verringerung der Strahlenbelastung von Patienten und Personal besteht. Aber auch bei vielen technischen Anwendungen ist durch geeignete Abschirmanordnungen dafür zu sorgen, dass die Schwächung der Strahlungsintensität auf ein festgelegtes Maß erfolgt und die Anforderungen an den Strahlungsschutz erfüllt werden.

### Sachverhalt

Die physikalische Grundlage für die Abschirmung ionisierender Strahlung besteht in der Wechselwirkung der einfallenden Strahlung mit dem Abschirmmaterial, wodurch es zu einer Veränderung des Strahlungsfeldes kommt. Dabei können folgende Prozesse im Abschirmmaterial stattfinden:

- vollständige Absorption von Teilchen oder Photonen,
- Änderung der Energie und Richtung von Teilchen oder Photonen,
- Erzeugung von Sekundärstrahlung.

Diesen Prozessen liegen die elementaren Wechselwirkungen von Teilchen oder Photonen mit den Atomkernen bzw. Atomhüllen zugrunde. Die Wirkung einer Abschirmanordnung wird daher entscheidend durch die Art der einfallenden Strahlung sowie deren Energie- und Richtungsverteilung bestimmt. Darüber hinaus hängt sie wesentlich von der stofflichen Zusammensetzung und den geometrischen Eigenschaften, insbesondere der Dicke der Abschirmung ab.

Die Verwendung von Abschirmungen erfolgt zu dem Zweck, die Flussdichte oder Dosisleistung von Teilchen bzw. Photonen am interessierenden Ort im Strahlungsfeld zu vermindern oder die Energie der Strahlung zu verringern. Dabei ist darauf zu achten, dass im Ergebnis der Wechselwirkungen keine oder ihrerseits leicht abschirmbare Sekundärstrahlung entsteht.

Die Bestimmung des veränderten Strahlungsfeldes hinter einer Abschirmung ist prinzipiell durch Lösung

der Strahlungstransportgleichung (s. *Strahlungstransport*, S. 145) möglich, wenn die Eigenschaften der einfallenden Strahlung und die Parameter der Abschirmung bekannt sind. Strahlungstransportrechnungen sind relativ schwierig. Zudem sind die Resultate meist nicht als geschlossene Lösungen angebar. Daher wird bei der Auswahl und Dimensionierung von Abschirmungen i. Allg. auf einfache Näherungsbeziehungen zur Beschreibung des Strahlungstransports zurückgegriffen. Die Ergebnisse werden mithilfe von rechnerisch oder experimentell bestimmten Korrekturfaktoren entsprechend den jeweiligen Bestrahlungsbedingungen modifiziert.

### Kennwerte, Funktionen

Da sich die Wechselwirkungsprozesse zwischen Strahlung und Stoff für verschiedene Strahlungsarten grundsätzlich unterscheiden, gelten für die Abschirmung von  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung sowie von Neutronen unterschiedliche Gesetzmäßigkeiten.

**Alpha-Teilchen**, die von Radionukliden emittiert werden, besitzen eine kinetische Energie von einigen MeV. Da sich die Teilchenrichtung bei der Wechselwirkung mit Stoffen kaum ändert, stimmt die Reichweite annähernd mit der Länge der  $\alpha$ -Teilchenbahnen überein. Für den Zusammenhang zwischen der Reichweite  $R_\alpha$  in Luft und der Energie  $E_\alpha$  der  $\alpha$ -Teilchen gilt für  $E_\alpha > 2,5$  MeV die empirische Beziehung

$$\frac{R_\alpha}{\text{m}} = 3,1 \cdot 10^{-3} \sqrt{\left(\frac{E_\alpha}{\text{MeV}}\right)^3}. \quad (1)$$

Alpha-Teilchen weisen i. Allg. ein diskretes Energiespektrum auf, sodass alle Teilchen annähernd die gleiche Reichweite besitzen. Die Teilchenanzahl bleibt daher bis zum Ende aller Teilchenbahnen nahezu konstant und sinkt dann relativ schnell auf null ab.

**Beta-Teilchen** Beim Durchgang von  $\beta$ -Teilchen durch Materialschichten werden die Teilchenbahnen durch eine Vielzahl von Streuprozessen gekrümmt, sodass sich die Weglänge von der Reichweite der Teilchen unterscheidet. Hinzu kommt, dass eine kontinuierliche Energieverteilung der  $\beta$ -Teilchen zwischen Null und einer Maximalenergie vorliegt. Die Abhängigkeit der Teilchenanzahl von der Abschirmdicke zeigt daher einen komplizierten Verlauf. Bei geringen Schichtdicken wird zunächst ein annähernd exponentieller Abfall beobachtet:

$$z = z_0 e^{-\mu_a x} \quad (2)$$

$z$  – die während einer bestimmten Zeit registrierte Anzahl von  $\beta$ -Teilchen hinter einer Abschirmschicht der

Dicke  $x$ ,  $z_0$  – die entsprechende Anzahl ohne Abschirmung,  $\mu_a$  – linearer Absorptionskoeffizient, der von der Energie der  $\beta$ -Strahlung und der Dichte des Abschirmmaterials abhängt. Mit zunehmender Dicke der zu durchdringenden Abschirmschichten treten Abweichungen vom exponentiellen Absorptionsgesetz auf (Abb. 1). Der mit entsprechenden Messgeräten registrierte Untergrund hat seine Ursache insbesondere in der Erzeugung von Bremsstrahlung bei der Wechselwirkung der  $\beta$ -Teilchen mit den Atomen des Abschirmmaterials. Diese Röntgenstrahlung besitzt Energien von Null bis zur Maximalenergie. Die Intensität der Bremsstrahlung ist umso höher, je größer die maximale Energie der  $\beta$ -Strahlung und je größer die Ordnungszahl des Abschirmmaterials ist. Die maximale Reichweite  $R_{\max}$  der  $\beta$ -Teilchen mit der maximalen Energie  $E_{\beta,\max}$  im Energiebereich  $0,05 < E_{\beta,\max} < 3 \text{ MeV}$  berechnet sich nach Subtraktion des Untergrundes für ein Medium der Dichte  $\rho$  mithilfe der empirischen Beziehung

$$\frac{R_{\max}}{\text{m}} = \frac{1,1}{\frac{\rho}{\text{kg m}^{-3}}} \left[ \sqrt{1 + 22,4 \left( \frac{E_{\beta,\max}}{\text{MeV}} \right)^2} - 1 \right]. \quad (3)$$

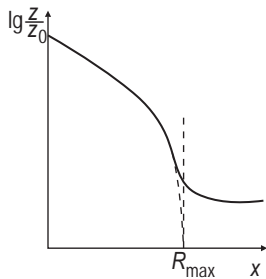


Abb. 1 Absorptionskurve für  $\beta$ -Strahlung (schematisch)

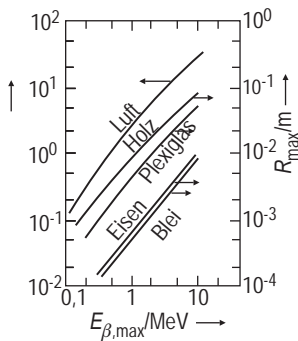


Abb. 2 Reichweite  $R_{\max}$  von  $\beta$ -Strahlung in Abhängigkeit von der Energie  $E_{\beta,\max}$  für verschiedene Abschirmmaterialien [9]

**Gamma-Strahlung** folgt beim Durchgang durch eine Abschirmung unter bestimmten Bedingungen ebenfalls einem exponentiellen Schwächungsgesetz:

$$\varphi = \varphi_0 e^{-\mu x} \quad (4)$$

$\varphi$  –  $\gamma$ -Flussdichte hinter einer Abschirmung der Dicke  $x$ ,  $\varphi_0$  – Flussdichte ohne Abschirmung. Der lineare Schwächungskoeffizient  $\mu$  setzt sich aus den Wirkungsquerschnitten der auftretenden Elementarprozesse zusammen. Da diese von der Energie der  $\gamma$ -Strahlung und der Ordnungszahl des Abschirmmaterials abhängen, finden sich derartige Abhängigkeiten in  $\mu$  wieder. Das exponentielle Schwächungsgesetz gilt nur unter der Annahme, dass beim Durchgang eines parallelen Strahlenbündels durch die Abschirmung jedes  $\gamma$ -Quant durch einen einzigen Wechselwirkungsprozess völlig aus dem Strahl entfernt wird. Da die Wahrscheinlichkeit hierfür an jeder Stelle der Abschirmschicht gleich ist, kann eine maximale Reichweite für  $\gamma$ -Strahlung nicht angegeben werden. Außerdem gilt die Beziehung (4) nur für schmale, vor und hinter der Abschirmung kollimierte Strahlenbündel. Die in der Abschirmung gestreuten  $\gamma$ -Quanten können dabei den Detektor nicht erreichen, sodass nur die primären  $\gamma$ -Quanten mit der Energie  $E_\gamma = E_0$  registriert werden. Beim Einfall breiter Strahlungsbündel erreichen auch gestreute und sekundäre  $\gamma$ -Quanten den Detektor, sodass eine Vergrößerung des Detektormesseffektes auftritt. Um diesen Umstand zu berücksichtigen und gleichzeitig die einfache Beschreibung mithilfe des exponentiellen Schwächungsgesetzes beizubehalten, werden zur Korrektur Aufbauaktoren  $B$  (build-up-Faktoren) verwendet. Für die Photonflussdichte ( $E_\gamma \leq E_0$ ) gilt dann

$$\varphi = B \varphi_0 e^{-\mu x}. \quad (5)$$

Die Auswahl der Aufbauaktoren, die für viele Fälle in Form umfangreicher Tabellenübersichten und graphischer Darstellungen zur Verfügung stehen [1–4], ist sorgfältig vorzunehmen, da eine beträchtliche Abhängigkeit von der Energie- und Richtungsverteilung der  $\gamma$ -Strahlung sowie von der stofflichen Zusammensetzung und den geometrischen Eigenschaften der Abschirmung vorliegt. Außerdem sind die Aufbauaktoren nur für die zugrunde gelegte Strahlungsfeldgröße gültig. Neben den Flussdichte-Aufbauaktoren existieren weitere Aufbauaktoren, z.B. für die Energiedosis, die Äquivalentdosis u.a.

**Neutronen** verlieren ihre Energie beim Durchgang durch Abschirmschichten als Folge von Streuprozessen stufenweise. Die Abbremsung endet bei Erreichen der thermischen Energie oder beim Einfang der Neutronen durch Atomkerne. Vielfach wird bei den Streu- und Absorptionsprozessen sekundäre  $\gamma$ -Strahlung freigesetzt, deren Einfluss bei der Gestaltung von Neutronenabschirmungen zu berücksichtigen ist. Die Wahrscheinlichkeit für einen bestimmten Wechselwirkungsprozess hängt von der Neutronenenergie und von den Eigen-

schaften der Abschirmungen ab. Aufgrund der Komplexiertheit dieser Abhängigkeiten ist es kaum möglich, einfache Näherungsbeziehungen für die Schwächung von Neutronenstrahlung anzugeben, sodass auf kompliziertere Lösungsmethoden der Transportgleichung zurückgegriffen werden muss [1, 5]. Für eine Reihe von Anwendungsfällen sind die Ergebnisse so aufbereitet worden, dass daraus Aufbaufaktoren abgeleitet wurden. Unter genauer Beachtung der Bestrahlungsbedingungen kann in diesen Fällen mit dem exponentiellen Schwächungsgesetz analog Gl. (5) gerechnet werden [1, 4, 5]. Für Spaltneutronen lässt sich ein einfaches exponentielles Schwächungsgesetz für die Dosisleistung  $\dot{D}$  hinter einer Abschirmung der Dicke  $x$  angeben [3]:

$$\dot{D} = \dot{D}_0 e^{-\Sigma_r x} \quad (6)$$

$\dot{D}_0$  – Dosisleistung ohne Abschirmung,  $\Sigma_r$  effektiver Beseitigungsquerschnitt (effective removal cross section). Der makroskopische Querschnitt  $\Sigma_r$  ergibt sich aus

$$\Sigma_r = n\sigma_r \approx n(\sigma_u + 0,5\sigma_e) \quad (7)$$

$\sigma_r$  – mikroskopischer Beseitigungsquerschnitt,  $\sigma_u$  bzw.  $\sigma_e$  – mikroskopische Querschnitte für die unelastische bzw. elastische Neutronenstreuung,  $n$  – Anzahldichte der Wechselwirkungspartner.

**Anwendungen**

Zur praktischen Realisierung von Abschirmanordnungen sind die Gesetzmäßigkeiten der Wechselwirkung von Strahlung mit Stoffen zugrunde zu legen.

**Die Abschirmung von  $\alpha$ -Strahlung** ist sehr einfach, da ihre Reichweite in Luft nur wenige Zentimeter beträgt; es reicht z.B. ein Blatt Papier.

**Die Abschirmung von  $\beta$ -Strahlung** ist trotz der größeren Reichweiten von einigen 100 cm in Luft ebenfalls unproblematisch, da die  $\beta$ -Teilchen in Materialschichten von wenigen Zentimetern Dicke vollständig absorbiert werden. Die Reichweite ist dabei umso kleiner, je höher die Ordnungszahl des Abschirmmaterials ist (Abb. 2). Abschirmmaterialien hoher Ordnungszahl führen zur Entstehung intensiver Bremsstrahlung. Optimale Abschirmung von  $\beta$ -Strahlung erreicht man i. Allgemeinen durch Kombination zweier verschiedener Absorbermaterialien. Die Abschirmschicht auf der der  $\beta$ -Quelle zugewandten Seite besteht aus Material niedriger Ordnungszahl, dessen Dicke etwas größer als die maximale Reichweite der  $\beta$ -Strahlung sein soll. Daran schließt sich eine zweite Schicht aus Material möglichst hoher Ordnungszahl an, die zur Schwächung der entstehenden Bremsstrahlung dient. Die Dicke dieser Schicht

richtet sich nach den Anforderungen an den Strahlenschutz hinter der Abschirmung. In Tab. 1 sind lineare Schwächungskoeffizienten von Blei für die Bremsstrahlung angegeben, die bei Absorption von  $\beta$ -Teilchen des  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  in verschiedenen Materialien entsteht. Eine in der Praxis sehr oft verwendete Abschirmung für  $\beta$ -Strahlung stellt die Kombination Plexiglas-Blei dar.

**Tabelle 1** Schwächungskoeffizient  $\mu$  von Blei für Bremsstrahlung [6].

Absorbermaterial	$\mu/\text{m}^{-1}$	Absorbermaterial	$\mu/\text{m}^{-1}$
Paraffin	260	Eisen	190
Aluminium	220	Blei	150

**Abschirmung von Gamma-Strahlung** Zur Konzipierung von Abschirmungen für  $\gamma$ -Strahlung ist die Abhängigkeit der Schwächungskoeffizienten von der Energie der  $\gamma$ -Strahlung und von der Ordnungszahl des Abschirmmaterials zu berücksichtigen. Aus Tab. 2 ist diese Abhängigkeit für einige, im praktischen Strahlenschutz interessierende Abschirmmaterialien ersichtlich, wobei der Massenschwächungskoeffizient  $\mu/\rho$  angegeben ist. Daraus geht hervor, dass zur Schwächung von  $\gamma$ -Strahlung Materialien hoher Ordnungszahl besonders geeignet sind. Bleiabschirmungen besitzen deshalb im Strahlenschutz große Bedeutung (z.B. in Form von Containern, Abschirmblenden, Bleiziegeln, Bleiglasfenstern, Bleischutzbekleidung). Zur Abschirmung größerer Räume dienen meist Wände aus Normal- oder Barytbeton.

**Tabelle 2** Massenschwächungskoeffizient  $\mu/\rho$  (in  $\text{m}^2/\text{kg}$ ) verschiedener Abschirmmaterialien in Abhängigkeit von der Energie  $E_\gamma$  der  $\gamma$ -Strahlung [1].

$E_\gamma/\text{MeV}$	Luft	Wasser	Aluminium	Beton	Eisen	Blei
0,01	0,482	0,499	2,58	2,65	17,2	13,20
0,05	0,0196	0,0214	0,0334	0,0361	0,184	0,717
0,08	0,0162	0,0179	0,0189	0,0200	0,055	0,212
0,1	0,0151	0,0168	0,0162	0,0171	0,0342	0,0562
0,2	0,0123	0,0136	0,0120	0,0125	0,0139	0,0969
0,4	0,00954	0,0106	0,00921	0,00957	0,00921	0,0221
0,6	0,00804	0,00894	0,00777	0,00807	0,00761	0,0120
0,8	0,00706	0,00785	0,00682	0,00708	0,00664	0,00856
1,0	0,00635	0,00706	0,00613	0,00637	0,00596	0,00689
2,0	0,00444	0,00493	0,00431	0,00447	0,00425	0,00450
4,0	0,00308	0,00340	0,00311	0,00319	0,00331	0,00415
6,0	0,00252	0,00277	0,00266	0,00270	0,00306	0,00435
8,0	0,00223	0,00243	0,00244	0,00245	0,00299	0,00460
10	0,00205	0,00222	0,00232	0,00231	0,00299	0,00487

Zur Dimensionierung von Abschirmungen müssen weiterhin die Aufbaufaktoren verfügbar sein, mit denen die Beeinflussung des Strahlungsfeldes durch die in der Abschirmung entstandene Streu- und Sekundärstrahlung berücksichtigt werden kann. Diese Aufbaufaktoren hängen von der Energie der  $\gamma$ -Strahlung, von der Größe  $\mu x$  des Abschirmmaterials und von den geometrischen



**Tabelle 3** Dosis–Aufbaufaktoren für Beton bei normalem Einfall eines breiten Strahlenbündels [1].

$E_\gamma/\text{MeV}$	$\mu x$			
	0,5	1,0	2,0	4,0
0,2	1,51	1,95	2,99	5,24
0,5	1,45	1,92	2,90	5,45
1,0	1,42	1,79	2,58	4,57
2,0	1,35	1,67	2,38	3,80

**Tabelle 4** Parameter  $A$ ,  $\alpha$  und  $\beta$  zur Berechnung des Dosis–Aufbaufaktors für Betonabschirmungen [7].

$E_\gamma/\text{MeV}$	$A$	$\alpha$	$\beta$
0,5	12,5	0,111	0,01
1	9,9	0,088	0,029
2	6,3	0,068	0,058
4	3,9	0,059	0,079
6	3,1	0,0585	0,083
8	2,7	0,057	0,0835
10	2,6	0,05	0,0855

**Tabelle 5** Effektiver Beseitigungsquerschnitt  $\sigma_r$  für Spaltneutronen [3].

Material	$\sigma_r/10^{-28} \text{ m}^2$	Material	$\sigma_r/10^{-28} \text{ m}^2$
Aluminium	1,31	Lithium	1,01
Beryllium	1,07	Nickel	1,89
Blei	3,53	Paraffin	2,84
Bor	0,97	B <sub>4</sub> C	4,7
Eisen	1,98	D <sub>2</sub> O	2,76
Kupfer	2,04		

Eigenschaften der Strahlungsquelle ab. Für Strahlungsschutzzwecke interessieren dabei besonders die Dosis–Aufbaufaktoren. In Tab. 3 sind Dosis–Aufbaufaktoren für normalen Einfall eines breiten Strahlenbündels auf Betonabschirmungen unterschiedlicher Dicke angegeben. Im Falle isotroper Punktquellen kann der Dosis–Aufbaufaktor nach der Näherungsbeziehung

$$B(\mu x) = A e^{\alpha \mu x} + (1 - A) e^{-\beta \mu x} \quad (8)$$

bestimmt werden. Die Größen  $A$ ,  $\alpha$  und  $\beta$  sind für Betonabschirmungen in Tab. 4 angegeben.

**Abschirmung von Neutronen** Zur Abschirmung von Neutronen sind komplexe Anordnungen zu verwenden. Diese bestehen aus Komponenten, in denen vorzugsweise die Abbremsung der Neutronen auf niedrige Energien, die Absorption der abgremsten Neutronen sowie die Schwächung entstehender Sekundärstrahlung erfolgt. Zur Abbremsung energiereicher Neutronen werden Materialien hoher Ordnungszahl (z.B. Eisen) eingesetzt, in denen die Neutronen durch unelastische Streuung einen großen Teil ihrer Energie verlieren. Die mittlere Neutronenenergie nach Passieren einer solchen Abschirmschicht von einigen cm Dicke liegt bei ca. 0,1 MeV – 1 MeV. Daran schließt sich zur weiteren Abbremsung eine Abschirmschicht aus Materialien niedriger Ordnungszahl (wasserstoffhaltige Substanzen, Graphit) mit einer Dicke von einigen 10 cm an, in

der die Neutronen durch eine Vielzahl elastischer Streuungen ihre Energie abgeben. Ist der Bereich thermischer Energien erreicht, können die Neutronen in Materialien mit hohem Einfangquerschnitt absorbiert werden. Solche Materialien sind z.B. Cadmium (Dicke einige mm, Ausnutzung der Reaktion  $^{113}\text{Cd}(n, \gamma)^{114}\text{Cd}$ ) oder Bor (Dicke einige cm, Ausnutzung der Reaktion  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ ). Insbesondere im ersten Falle entsteht hochenergetische sekundäre  $\gamma$ –Strahlung, die durch eine weitere Schicht aus Material hoher Ordnungszahl abzuschirmen ist. Günstiger ist daher die Verwendung von Borverbindungen als Neutronenabsorber (z.B. in Form von Borstahl, Boral, boriertem Graphit). Anstelle einer solchen komplizierten geschichteten Anordnung kann es in verschiedenen Fällen ökonomischer sein, ein homogenes, billigeres Material mit größerer Dicke (bis zu einigen m) als Abschirmung einzusetzen. Hierfür kommt Barytbeton, mitunter auch Normalbeton zur Anwendung. Genauere Angaben, insbesondere über die erforderlichen Abschirmdicken, können nur mithilfe spezieller Lösungen der Strahlungstransportgleichung erhalten werden (s. z.B. [8]).

Für eine Abschätzung der Reduzierung der Dosisleistung von Spaltneutronen durch Abschirmungen kann die einfache Beziehung (6) zugrunde gelegt werden. Die dazu benötigten effektiven Beseitigungsquerschnitte sind für einige Beispiele in Tab. 5 angegeben.

## Literatur

- [1] JAEGER, R.G. (Hrsg.): Engineering Compendium on Radiation Shielding. Volume 1. Shielding Fundamentals and Methods. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1968 (Russ. Ausgabe in 2 Bänden. – Moskau: Atomizdat 1972 u. 1973).
- [2] WOOD, J.: Computational Methods in Reactor Shielding. – Oxford: Pergamon Press 1982.
- [3] PRICE, B.T.; HORTON, C.C.; SPINNEY, K.T.: Radiation Shielding. – New York: Pergamon Press 1957.
- [4] SHULTIS, J.K.; FAW, R.E.: Radiation Shielding. – London: Prentice-Hall PTR 1996.
- [5] JAEGER, R.G. (Hrsg.): Engineering Compendium on Radiation Shielding, Volume 3, Shield Design and Engineering. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1970.
- [6] HERFORTH, L.; KOCH, H. u.a.: Praktikum der Radioaktivität und Radiochemie. – Leipzig, Berlin, Heidelberg: Barth; – Berlin: Ed. Dt. Verl. der Wiss. 1992.
- [7] BRODER, D.L. u.a.: Beton v zaštite jadernych ustanovok, 2. überarb. u. erg. Aufl. – Moskau: Atomizdat 1973.
- [8] DÖRSCHTEL, B.; HERFORTH, L.: Neutronen–Personendosimetrie. – Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1977.
- [9] DIMITRIJEVIĆ, Č.: Praktische Berechnung der Abschirmung von radioaktiver und Röntgenstrahlung. – Weinheim/Bergstraße: Verlag Chemie GmbH 1972.

## Aktivierung

Dr. K. Irmer, Dr. E. J. Langrock

Unter Aktivierung wird hier die Erzeugung einer Radioaktivität verstanden. Im Jahre 1934 fand das Ehepaar F. und I. JOLIOT-CURIE, dass das Element Bor, wenn es mit  $\alpha$ -Teilchen bestrahlt wurde, auch nach Aussetzen der Bestrahlung mehrere Minuten eine Strahlung emittierte, die sich später als  $\beta$ -Strahlung erkennen ließ [1]. Der zeitliche Abfall folgte einem Exponentialgesetz mit einer Halbwertszeit von 10,1 min. Damit war es gelungen, durch Bestrahlung eines Grundstoffes künstlich ein radioaktives Nuklid zu erzeugen. Es zeigte sich sehr bald, dass zur künstlichen Umwandlung von Atomkernen und damit zur Erzeugung neuer, in der Natur nicht vorkommender Nuklide grundsätzlich alle Strahlungen geeignet sind. Voraussetzung waren der Bau leistungsfähiger Beschleunigungsanlagen wie Linearbeschleuniger, Zyklotron und Betatron und die Entwicklung des Kernreaktors.

Die Aktivierung ermöglicht die Herstellung radioaktiver Nuklide aller Elemente. Sie ist die Grundlage für alle Arbeiten auf dem Gebiet der angewandten Radioaktivität. Es gibt zwei große Einsatzgebiete der Aktivierung: Die Herstellung von Strahlungsquellen, bei denen die Wirkung der Strahlung auf Stoffe ausgenutzt wird, und die Herstellung radioaktiver Indikatoren, bei denen die Strahlung zum Nachweis des aktivierten Stoffes dient.

## Sachverhalt

Die Aktivierung eines Stoffes erfolgt in der Praxis meist durch Bestrahlung mit Neutronen, geladenen Teilchen oder  $\gamma$ -Quanten. Im bestrahlten Stoff finden Kernreaktionen statt, wodurch radioaktive Nuklide entstehen.

Neutronen ergeben im Gegensatz zu geladenen Teilchen sehr viel größere Reaktionsausbeuten. Jedes freie Neutron beliebiger Anfangsenergie führt schließlich zu einer Kernreaktion, während geladene Teilchen weitaus am häufigsten durch Ionisationsverluste im beschossenen Material ihre Energie aufbrauchen und damit für den Kernprozess verloren gehen. Der Kernreaktor ist die stärkste Neutronenquelle. Die während des Betriebes eines Reaktors im stationären Zustand vorhandene Menge an freien Neutronen wird für die Bestrahlung benutzt. Diese Menge wird angegeben als Neutronenfluss  $\Phi$ , das ist die Anzahl der Neutronen, die je Sekunde durch 1 cm<sup>2</sup> Fläche hindurchtreten. Die Neutronenflüsse von Reaktoren erreichen Werte von 10<sup>11</sup> – 10<sup>15</sup> cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>. Das im Reaktor vorhandene Neutronenenergiespektrum weicht vom Spaltspektrum (s. *Kernspaltung*, S. 67) ab. Es hat einen hohen Anteil thermischer Neutronen, deren Fluss etwa 10fach höher als der der schnellen Neutronen ist. Für die Aktivierung im Kernreaktor werden hauptsächlich Neutroneneinfangreaktionen genutzt, wie z.B. <sup>23</sup>Na(n,  $\gamma$ )<sup>24</sup>Na oder

<sup>59</sup>Co(n,  $\gamma$ )<sup>60</sup>Co, die bei der Wechselwirkung thermischer Neutronen vorherrschend sind. Neutronenquellen kleiner Abmessungen (z.B. 30 mm  $\varnothing$ , 60 mm lang) lassen sich unter Verwendung von Radionukliden durch Ausnutzung von Kernreaktionen mit <sup>9</sup>Be oder der spontanen Spaltung des Nuklids <sup>252</sup>Cf herstellen (Tab. 1). Aufgrund der begrenzten Ausbeute sind nur kleine Neutronenflüsse bis 10<sup>7</sup> cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> erreichbar. Neutronengeneratoren bestehen aus einem Beschleuniger und einem Target, in dem die beschleunigten Teilchen eine neutronerzeugende Kernreaktion auslösen. Für die Aktivierung wird am häufigsten die Reaktion <sup>3</sup>He(d, n)<sup>4</sup>He verwendet. Diese hat einen maximalen Wirkungsquerschnitt bei 150 keV Deuteronenenergie, sodass mit kleinen elektrostatischen Beschleunigern gearbeitet werden kann. Die Neutronen sind nahezu monoenergetisch und besitzen eine Energie von 14 MeV. Der nutzbare Neutronenfluss beträgt maximal 10<sup>10</sup>/cm<sup>2</sup>s. Der Einsatz erfolgt zur Aktivierung von Stoffen, deren Atome aufgrund hoher Schwellwerte nicht mit thermischen Neutronen aktiviert werden können, z.B. <sup>16</sup>O(n, p)<sup>16</sup>N<sub>19</sub> mF(n,  $\alpha$ )<sup>16</sup>N, <sup>14</sup>N(n, 2n)<sup>13</sup>N.

**Tabelle 1** Radionuklid-Neutronenquellen

Kernreaktion	Quellentype	maximale Ausbeute	T <sub>1/2</sub>	Neutronenenergie
$\alpha, n$	<sup>238</sup> Pu/Be	10 <sup>8</sup> s <sup>-1</sup>	86 a	kontinuierliches Spektrum, E <sub>max</sub> = 11 MeV
	<sup>241</sup> Am/Be	10 <sup>8</sup> s <sup>-1</sup>	458 a	
$\gamma, n$	<sup>124</sup> Sb/Be	10 <sup>9</sup> s <sup>-1</sup>	0,17 a	26 keV
Spaltung	<sup>252</sup> Cf	10 <sup>11</sup> s <sup>-1</sup>	2,65 a	Spaltspektrum

**Tabelle 2** Aktivierungsausbeute für die Aktivierung am Zyklotron

Kernreaktion	Teilchenenergie MeV	Aktivierungsausbeute 10 <sup>5</sup> Bq/(mA s)	Zerfallskonstante s <sup>-1</sup>
<sup>7</sup> Li (p, n) <sup>7</sup> Be	22	25,2	1,51(-7)
<sup>10</sup> B (d, n) <sup>11</sup> C	15	72,2	5,66(-4)
<sup>19</sup> F (p, pn) <sup>18</sup> F	22	1100	1,05(-4)
<sup>24</sup> Mg (d $\alpha$ ) <sup>22</sup> Na	15	0,26	8,45(-9)
<sup>27</sup> Al (d, p $\alpha$ ) <sup>24</sup> Na	30	326	1,28(-5)
<sup>31</sup> P (d, p) <sup>32</sup> P	30	59,3	5,61(-7)
<sup>52</sup> Cr (d, 2n) <sup>52</sup> Mn	15	12,0	1,41(-6)
<sup>56</sup> Fe (d, 2n) <sup>56</sup> Co	15	649	1,04(-7)
<sup>65</sup> Cu (d, 2n) <sup>65</sup> Zn	15	0,52	3,27(-8)
<sup>197</sup> Au (d, p) <sup>198</sup> Au	30	148	2,97(-6)

Zur Aktivierung mit geladenen Teilchen (Protonen, Deuteronen, <sup>3</sup>He- und <sup>4</sup>He-Kerne) sind Teilchenenergien von 10...30 MeV erforderlich. Die Ionen verlassen den Beschleuniger annähernd monoenergetisch. Im bestrahlten Stoff verlieren sie infolge Ionisations- und Strahlungsbremmung sehr rasch ihre Energie. Daher ist die Aktivierung mit geladenen Teil-

chen auf dünne Schichten beschränkt. Die Kernreaktionen sind je nach Art des Geschosses, der Energie und des Targetmaterials verschieden und weisen eine sehr große Vielfalt auf, möglich sind z.B. (p,n)-, (p,α)-, (p,pn)- und (p,2n)-Reaktionen. Bei der Bestrahlung von Kupfer mit Deuteronen einer Energie von mehr als 10 MeV treten beispielsweise folgende Reaktionen auf:  $^{63}\text{Cu}(d, p)^{64}\text{Cu}$ ,  $^{65}\text{Cu}(d, 2n)^{65}\text{Zn}$ ,  $^{63}\text{Cu}(d, 2n)^{63}\text{Zn}$  und  $^{65}\text{Cu}(d, 2p)^{65}\text{Ni}$ .

Die Aktivierung mit  $\gamma$ -Strahlung, auch Photoaktivierung genannt, verlangt eine hohe Quantenenergie, da die Aktivierungsreaktionen endoenergetisch sind und die Schwellenenergien bei 10... 20 MeV liegen. Die Quanten werden als Bremsstrahlung von Elektronen einer Energie 15... 30 MeV, die auf ein Target hoher Ordnungszahl geschlossen werden, erzeugt. Als Elektronenbeschleuniger dienen Betatron, Mikrotron oder Linearbeschleuniger. Die Photoaktivierung kann durch Kernreaktionen mit Emission ein oder mehrerer Kernteilchen, z.B. ( $\gamma, n$ ), ( $\gamma, p$ ), ( $\gamma, pn$ ) und ( $\gamma, \alpha$ ), erfolgen oder durch eine ( $\gamma, \gamma'$ )-Reaktion, bei der der Kern nach der Resonanzabsorption des  $\gamma$ -Quants in einen langlebigen isomeren Zustand übergeht, der durch Emission einer  $\gamma$ -Strahlung zerfällt [2].

**Kennwerte, Funktionen**

Die Reaktionsrate  $R$ , das ist die Anzahl der je Sekunde durch Aktivierung eines bestimmten Isotops entstehenden radioaktiven Kerne, beträgt

$$R = \Phi \sigma \frac{h m N_A}{M}; \tag{1}$$

$\Phi$  - Flussdichte der aktivierenden Strahlung (Teilchen·cm<sup>2</sup>·s),  $\sigma$  - Wirkungsquerschnitt der Kernreaktion (cm<sup>2</sup>),  $h$  - relative Häufigkeit des Isotops,  $M$  - Massenzahl,  $N_A$  - AVOGADRO-Konstante (6,022·10<sup>23</sup>/mol).

Da die radioaktiven Kerne zerfallen können, sobald sie entstehen, beträgt die Aktivität am Ende der Bestrahlungszeit  $t_B$

$$A = \Phi \frac{h m N_A}{M} (1 - e^{-\lambda t_b}) \tag{2}$$

( $\lambda$  - Zerfallskonstante).

Vergeht vom Bestrahlungsende bis zur Anwendung der Aktivität eine Zeit  $t_w$ , so gilt aufgrund des Zerfallsgesetzes

$$A = \frac{h m N_A}{M} (1 - e^{-\lambda t_b}) e^{-\lambda t_w}. \tag{3}$$

Die Gesamtaktivität eines bestrahlten Stoffes ist die Summe der Aktivitäten, die sich für die einzelnen Isotope ergeben.

Bei der Bestrahlung mit geladenen Teilchen ist die Gültigkeit dieser Aktivierungsgleichung auf sehr dünne Stoffschichten begrenzt, da sich  $\Phi$  und  $\sigma$  sehr stark mit der Eindringtiefe ändern. Die Berechnung der Aktivität dicker Schichten kann nach der Beziehung

$$A = \eta I t_B \tag{4}$$

erfolgen (Tab. 2). Dabei ist  $I$  der Strahlstrom des Beschleunigers und  $\eta$  die Aktivierungsausbeute, die sich nach der empirischen Beziehung

$$\eta = 6,24 \cdot 10^{12} k \frac{Bq}{mA s} \tag{5}$$

abschätzen lässt. Die Zerfallskonstante  $\lambda$  ist in s<sup>-1</sup> einzusetzen, und  $k$  ist ein Faktor von 0,1... 1, der von den Bestrahlungsbedingungen abhängt.

**Tabelle 3** Resonanzenergien und Wirkungsquerschnitte für die Aktivierung mit  $\gamma$ -Strahlung bei leichten Elementen

Kernreaktion	Resonanz-	Wirkungs-	
	energie	querschnitt	
	MeV	10 <sup>-27</sup> cm <sup>2</sup>	s <sup>-1</sup>
$^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$	22, 8	10	5,66·10 <sup>-4</sup>
$^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$	23, 5	10	1,16·10 <sup>-3</sup>
$^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$	21, 9	14	5,64·10 <sup>-3</sup>
$^{19}\text{F}(\gamma, n)^{18}\text{F}$	19, 2	14	1,05·10 <sup>-4</sup>
$^{32}\text{S}(\gamma, n)^{31}\text{S}$	20, 1	14, 2	2,55·10 <sup>-1</sup>

Bei der Aktivierung mit  $\gamma$ -Strahlung durch eine ( $\gamma, n$ )-, ( $\gamma, p$ )- oder ( $\gamma, \alpha$ )-Reaktion zeigt die Wirkungsquerschnittskurve über der Energie eine Resonanz die bei leichten Elementen zwischen 18 und 25 MeV liegt (Tab. 3) und deren Energie bei schwereren Elementen mit  $Z > 20$  anhand der Beziehung

$$E_R = 73 M^{-1/3} \tag{6}$$

berechnet werden kann. Der integrale Wirkungsquerschnitt lässt sich mit der einfachen Gleichung

$$\int_0^\infty (E_\gamma) dE_\gamma = 0,058 \frac{(M - Z)Z}{M} 10^{-18} \text{ eV cm}^2 \tag{7}$$

berechnen. Dieser Wirkungsquerschnitt gibt bei mittelschweren Nukliden die Summe der ( $\gamma, p$ )- und ( $\gamma, n$ )- und bei schweren Elementen die Summe der ( $\gamma, n$ )- und ( $\gamma, 2n$ )-Wirkungsquerschnitte an.

**Anwendungen**

**Aktivierungsanalyse** ist die qualitative und quantitative Analyse von Stoffgemischen, Verunreinigungen oder Spuregehalten durch Messung der in den zu analysierenden Stoffen infolge Bestrahlung erzeugten künstlichen Radioaktivität [2, 3]. Die Identifizierung der erzeugten Radionuklide erfolgt qualitativ anhand der Art

und Energie der Strahlung sowie der Halbwertszeit. Für die quantitative Analyse wird die der Menge des zu bestimmenden Elements proportionale Aktivität der gebildeten Radionuklide genutzt. Die Empfindlichkeit  $S$  der Aktivierungsanalyse kann als Produkt der Aktivierungsempfindlichkeit  $S_A$  und der Messempfindlichkeit  $S_M$  ausgedrückt werden. Die Aktivierungsempfindlichkeit entspricht der auf die Masse  $m$  bezogenen Aktivität am Ende der Bestrahlung. Sie wird mit Gl. (2) berechnet; die Parameter ausgewählter Isotope sind für verschiedene Bestrahlungsarten in den Tab. 3 und 4 angegeben. Die Aktivierungsanalyse wird vornehmlich als Neutronenaktivierungsanalyse praktiziert und hat in dieser Form einen festen Platz in der chemischen Analytik. Große praktische Bedeutung hat auch die Photonenaktivierungsanalyse erlangt [9, 10]. Hier ist es vor allem die Möglichkeit, die leichteren Elemente wie C, N und O bestimmen zu können (Tab. 5).

**Tabelle 4** Aktivierungsquerschnitte für 14-MeV-Neutronen – (1) Targetkern, (2) Isotopenhäufigkeit in %, (3) Radionuklid, (4) Wirkungsquerschnitt in  $10^{-27} \text{ cm}^2$ , (5) Zerfallskonstante in  $\text{s}^{-1}$

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
$^{11}\text{B}$	80,4	$^8\text{Li}$	34	7,79 (1)
$^{14}\text{N}$	99,6	$^{13}\text{N}$	6	1,16 (3)
$^{16}\text{O}$	99,8	$^{16}\text{N}$	42	9,71 (2)
$^{19}\text{F}$	100	$^{16}\text{N}$	50	9,71 (2)
$^{23}\text{Na}$	100	$^{20}\text{F}$	222	6,07 (2)
$^{26}\text{Mg}$	11,3	$^{23}\text{Ne}$	10	1,84 (2)
$^{27}\text{Al}$	100	$^{27}\text{Mg}$	80	1,22 (3)
$^{28}\text{Si}$	92,3	$^{28}\text{Al}$	250	5,16 (3)
$^{31}\text{P}$	100	$^{28}\text{Al}$	150	5,16 (3)
$^{37}\text{Cl}$	24,5	$^{37}\text{S}$	30	2,28 (3)
$^{41}\text{K}$	6,9	$^{38m}\text{Cl}$	30	3,12 (4)
$^{50}\text{Ti}$	5,3	$^{50}\text{Sc}$	27	6,72 (3)
$^{51}\text{V}$	99,8	$^{51}\text{Ti}$	27	2,00 (3)
$^{52}\text{Cr}$	83,8	$^{52}\text{V}$	80	3,97 (3)
$^{54}\text{Fe}$	5,8	$^{53}\text{Fe}$	15	1,36 (3)
$^{55}\text{Mn}$	100	$^{52}\text{V}$	50	3,97 (3)
$^{59}\text{Co}$	100	$^{56}\text{Mn}$	40	7,47 (5)
$^{63}\text{Cu}$	69,1	$^{62}\text{Cu}$	550	1,19 (3)
$^{64}\text{Zn}$	48,9	$^{63}\text{Zn}$	170	3,01 (4)
$^{69}\text{Ga}$	60,2	$^{66}\text{Cu}$	110	2,27 (3)
$^{70}\text{Ge}$	20,6	$^{70}\text{Ga}$	130	5,78 (4)
$^{75}\text{As}$	100	$^{75}\text{Ge}$	12	1,41 (4)
$^{79}\text{Br}$	50,5	$^{78m}\text{Br}$	835	1,44 (1)
$^{80}\text{Se}$	49,8	$^{77m}\text{Ge}$	40	1,31 (2)
$^{109}\text{Ag}$	48,7	$^{108}\text{Ag}$	70	4,77 (3)
$^{121}\text{Sb}$	57,3	$^{120}\text{Sb}$	120	7,27 (4)

Die Messempfindlichkeit hängt vom zeitlichen Ablauf des Messregimes und den Eigenschaften der Messanordnung und des Detektors ab. Die Impulsdichte  $z'$  am Ausgang eines Kernstrahlungsmessgerätes ist der gemessenen Aktivität proportional. Der Proportionalitätsfaktor ist die Messausbeute  $K_M$  [4, 5]. Unter der

Berücksichtigung der Messzeit  $t_M$  folgt aus Gl. (3)

$$S_M = K_M e^{-\lambda t_w} (1 - e^{-\lambda t_M}). \quad (8)$$

Damit gilt für die Impulszahl  $Z$ , die für ein bestimmtes Isotop, das in einer Messprobe der Masse  $m_P$  enthalten ist, gemessen wird,

$$Z = S_A S_M m_P. \quad (9)$$

Dieser Impulszahl  $Z$  ist eine durch die Störaktivität und die Untergrundstrahlung hervorgerufene Impulszahl  $Z_S$  überlagert. Die Störaktivität entsteht durch die Aktivierung aller anderen in der Probe enthaltenen Nuklide. Die Impulszahl  $Z_S$  bestimmt die Nachweisgrenze  $m_{\min}$  der Masse eines Elementes. Für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,3% beträgt sie

$$m_{\min} = \frac{3\sqrt{2Z_S}}{S}. \quad (10)$$

**Tabelle 5** Erreichbare Aktivitäten bei der Photonenaktivierung in Bq bei 4 h Bestrahlungszeit

Reaktion	Produkt	25MeV	30MeV	35MeV
$^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$	20,5 min	$6 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2$
$^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$	10,0 min	$1 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^2$	$8 \cdot 10^2$
$^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$	2,1 min	$1 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^2$	$6 \cdot 10^2$
$^{19}\text{F}(\gamma, n)^{18}\text{F}$	1,83 h	$4 \cdot 10^1$	$13 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^2$

Durch die chemische Abtrennung der Störaktivitäten kann  $Z_S$  erheblich verkleinert und damit die Nachweisgrenze verringert werden. Diese Arbeitsmethode wird als chemische Aktivierungsanalyse bezeichnet. Tab. 5 zeigt erreichbare Aktivitäten für die Photonenaktivierung von einigen leichten Elementen.

Die Kalibrierung der Aktivierungsanalyse wird mithilfe von Standardproben durchgeführt. Unter denselben Bestrahlungs- und Messbedingungen wie bei den Messproben wird das Verhältnis Standardmasse zu Standardimpulszahl  $m_{St}/Z_{St}$  ermittelt. Die unbekannte Substanzmasse  $m_p$  wird als Proportion

$$m_p = Z \cdot m_{St}/Z_{St} \quad (11)$$

berechnet. In der betrieblichen Messtechnik werden Radionuklidneutronenquellen zur Analyse einiger gut aktivierbarer Elemente, vorzugsweise Si, Al, Cr, F und V eingesetzt [6, 7]. Die Tab. 6 und 7 zeigen die Nachweisgrenzen der zerstörungsfreien Aktivierungsanalyse für verschiedene Aktivierungsarten.

**Aktivierungsdetektor** Beim Aktivierungsdetektor wird die Energieabhängigkeit des Aktivierungsquerschnittes bestimmter Stoffe ausgenutzt. Es können Schwellwert- oder Resonanzdetektoren verwendet werden. Bevorzugtes Anwendungsgebiet ist die Bestimmung der Energiespektren von Neutronen, wobei Schwellwertdetektoren