Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:02
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm

1
Die Welt der Strahlen und Wellen

1.1
Einführung

Das Wort „Strahlen“ birgt für viele Menschen – je nach Gemütslage – etwas Leuchtendes, oft aber auch Unheimlich-Mystisches. Im Alltag verbindet man damit Gedanken an die strahlenden Augen der Kinder oder von Liebenden, man denkt an das strahlende C-Dur gegen Ende von Mozarts „Zauberflöte“, wo es heißt „Die Strahlen der Sonne vertreiben die Nacht.“ Bei manchen wird allerdings auch die Erinnerung an den Physikunterricht wach, was nicht in jedem Fall mit positiven Gefühlen besetzt ist. Dieser Rückgriff lässt sich allerdings nicht vermeiden, denn „Strahlung“ ist eine physikalische Erscheinung, will man sie und ihre Wirkungen verstehen, muss man auf die Grundlagen zurückgreifen, und die sind nun mal (leider wird mancher seufzen) physikalischer Natur. Es mag dabei trösten, dass auch der Physiker hier oft seine Probleme hat, wie die Geschichte dieser Wissenschaft zeigt. Auf der anderen Seite ist die Entwicklung der modernen Physik auf das Engste mit der Erforschung der Strahlen verbunden, ohne sie gäbe es weder Relativitäts- noch Quantentheorie, zu schweigen von den vielfältigen technischen Entwicklungen

Am Anfang sollte man sich darüber einigen, wovon man spricht, wenn man sich mit Strahlen beschäftigt. Gängige Physikbücher sind hier bemerkenswert zurückhaltend, sie verzichten meist auf eine Definition und setzten voraus, dass der Leser schon weiß, wovon die Rede ist. Die Erfahrung zeigt allerdings, dass selbst Physikstudenten sich schwer tun, „Strahlen“ zu definieren. Früher schaute man im Konversationslexikon nach, heute befragt man das Internet und die universelle Wissensbörse WIKIPEDIA. Dort findet man in der deutschen Ausgabe (6. Juni 2010): „Der Begriff *Strahlung* bezeichnet die Ausbreitung von Teilchen oder Wellen.“ Danach wäre also jedes Paddelboot eine Strahlenquelle, denn unzweifelhaft gehen von ihm Wellen aus. So geht es also nicht. Die englische Version ist schon etwas genauer (ebenfalls 6. Juni 2010): „*Radiation describes any process in which energy travels through a medium or through* space.“ („*Strahlung* beschreibt einen Prozess, bei dem Energie sich durch ein Medium oder den Raum bewegt.“) Strahlung ist also Energietransport, die Übertragung ist nicht notwendigerweise an ein Medium gebunden, sie geschieht auch durch den leeren

Strahlen und Gesundheit: Nutzen und Risiken, 1. Auflage. Jürgen Kiefer
© 2012 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Published 2012 by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:03
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm

Raum. Wäre es nicht so, gäbe es kein Leben auf der Erde, denn zwischen der Sonne und uns herrscht auf dem größten Teil der Strecke Vakuum. Nach dieser engeren Definition gehören elektromagnetische Wellen zu den Strahlen, nicht aber der Schall, der bekanntlich Luft (oder manchmal auch andere Träger) zu seiner Ausbreitung benötigt.

In der Medizin hat man weniger Skrupel: Die Sonographie, Diagnostik mit Hilfe von Ultraschall, gehört zum selbstverständlichen Handwerkszeug des Radiologen. Aus diesem Grunde werden wir uns hier auch mit dieser Anwendung beschäftigen, also etwas von der „reinen Lehre“ abweichen, ohne allerdings die Unterschiede zu verwischen.

Für eine genauere Auseinandersetzung mit dem Thema Energie reichen qualitative Überlegungen nicht aus. Gerade im Hinblick auf mögliche Wirkungen muss man genau hinschauen, d. h. die Energie quantitativ erfassen, und dazu benötigt man Maßeinheiten, Dimensionen. Grundsätzlich ist man frei in ihrer Wahl, doch ist es praktischer, sich auf ein allgemein übliches System zu einigen. International eingeführt und in Deutschland auch verbindlich sind die SI-Einheiten (SI steht für ***S**ystème **I**nternational d'Unités*), die von dem ***B**ureau **I**nternational des **P**oids et **M**esures* (abgekürzt: BIPM) koordiniert und überwacht werden, das seinen Sitz in der Nähe von Paris hat. Die SI-Einheit für die Energie ist das „Joule“ (J), die früher übliche und beliebte „Kalorie“ ist nicht mehr zulässig (s. Glossar). In der Atom- und Strahlenphysik ist die Verwendung des Joule auch möglich, jedoch unpraktisch, da man eine Menge Zehnerpotenzen dauernd mitführen müsste. Aus diesem Grunde hat man für dieses spezielle Gebiet eine besondere Einheit kreiert, das „Elektronvolt“ (eV). Seine Definition geht auf ein wichtiges physikalische Gesetz zurück, das nach seinem Entdecker, dem französischen Physiker Charles Augustin de Coulomb (1736–1806), dem Begründer der Elektrostatik, benannt ist (Coulombsches Gesetz). Es besagt, dass sich ungleichnamige elektrische Ladungen anziehen, gleichnamige abstoßen, und dass die Kräfte mit dem Quadrat der Entfernung abnehmen. Es ist wie im menschlichen Leben „Gegensätze ziehen sich an...“. Der praktisch wichtigste Ladungsträger ist das Elektron, das negativ geladen ist. In einem elektrischen Feld wird es zum positiven Pol beschleunigt und gewinnt dadurch Bewegungsenergie. Wenn die Beschleunigungsspannung gerade 1 Volt beträgt, so beträgt die Energie des Elektrons gerade 1 Elektronvolt (eV) (Abb. 1.1).

Einige Beziehungen zwischen Energieeinheiten sind im Glossar zusammengestellt.

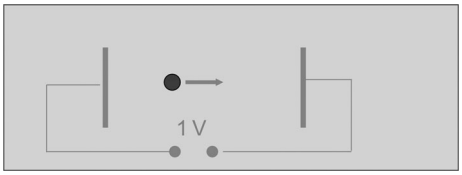


Abb. 1.1 Zum Verständnis der Energieeinheit „Elektronvolt“. Wenn ein Elektron durch ein elektrisches Feld von 1 V beschleunigt wird, gewinnt es die Energie von 1 eV.

Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:05
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm

Kehren wir zum Ausgangspunkt zurück: Strahlen im eigentlichen Sinne treten in zwei Erscheinungsformen auf, als elektromagnetische Wellen und als Teilchenstrahlen. Letztere sind typische Erscheinungen der Radioaktivität, mit der wir uns weiter unten beschäftigen werden. Zunächst aber geht es um die Wellenstrahlung.

1.2 Elektromagnetische Wellenstrahlung

Unsere Welt ist voll von elektromagnetischen Wellen, sie sind also keineswegs nur Erzeugnisse moderner Technik, obwohl diese einiges dem Spektrum hinzugefügt hat. Die ohne Zweifel wichtigste Spielart ist das (sichtbare) Licht, die einzige Strahlung, für die wir ein spezielles Sinnesorgan besitzen. Über seine Natur haben die Physiker lange gerätselt und auch oft handfest gestritten. Seit der Mitte des 17. Jahrhunderts weiß man, dass es sich dabei um ein Wellenphänomen handelt. Sehr viel später erkannte man, dass es noch andere Strahlungen gibt, die, obwohl unsichtbar, ähnlichen Gesetzen folgen. Erst im 19. Jahrhundert gelang es, sie als elektromagnetische Felder zu identifizieren. Elektrisches und magnetisches Feld sind untrennbar verbunden, beide schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung und senkrecht zueinander.

Charakteristische Größen sind Wellenlänge (meist mit dem griechischen λ abgekürzt) und Frequenz (kurz ν), worunter man die Zahl der Schwingungen pro Zeiteinheit versteht. Beide stehen in einem einfachen Zusammenhang:

$$\lambda = c/\nu$$

Hierbei ist c die Ausbreitungsgeschwindigkeit, welche im Vakuum (und näherungsweise auch in der Luft) 300.000 Kilometer pro Sekunde beträgt. Als Einheiten benutzt man für die Wellenlänge das Meter (m) bzw. Vielfache oder Bruchteile davon, für die Frequenz die Zahl der Durchgänge pro Sekunde mit dem speziellen Namen „Hertz“, abgekürzt Hz, benannt nach dem deutschen Physiker Heinrich Hertz (1847–1894), der die Natur des Lichtes als elektromagnetische Wellenstrahlung experimentell bestätigte. Sein Neffe war übrigens Gustav Hertz (1887–1975), der entscheidende Beiträge zum Verständnis des Atoms lieferte.

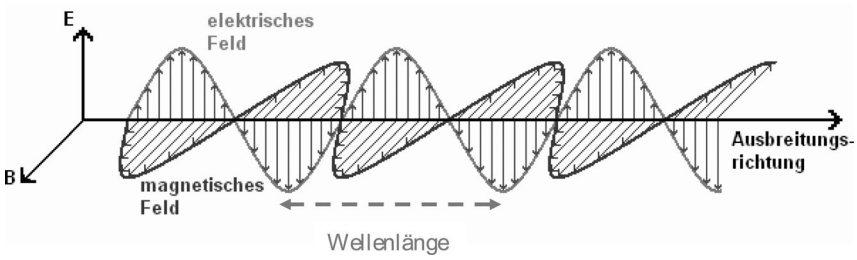


Abb. 1.2 Elektromagnetische Wellen. (s. auch Farbtafel S. XVII.) [1]

Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:08
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm

Die Natur des Lichtes hat die Physiker über Jahrhunderte beschäftigt. Isaac Newton (1643–1727) vertrat noch die Auffassung, dass es sich um Teilchen handelte, was jedoch der experimentellen Evidenz widersprach. So schien die Wellentheorie die einzige Erklärungsmöglichkeit bis Max Planck (1858–1947) auf Grund theoretischer Überlegungen im Jahre 1900 zu dem Schluss kam, dass die Energieübertragung in einzelnen Beträgen (*Quanten*) erfolgen müsste, was 1915 durch Albert Einstein (1879–1955) experimentell bestätigt wurde. Damit befinden wir uns in dem Dilemma eines unauflösbaren Widerspruchs – es kann eigentlich nicht sein, dass eine Erscheinung sowohl Wellen- als auch Teilchencharakter hat. Wellen sind räumlich ausgedehnt (man denke an den ins Wasser geworfenen Stein), Teilchen kompakt und lokalisierbar. Das ist offenbar eine Frage für Philosophen, die sich dieser Thematik auch ausführlich angenommen haben. Für unsere Betrachtung möge eine praktische Einstellung genügen: Elektromagnetische Strahlen haben sowohl Wellen- als auch Quantencharakter, je nach der experimentellen Anordnung tritt einmal die eine oder die andere Eigenschaft in Erscheinung. Eigentlich zeigen sie also fast menschliche Facetten ...

Die Planckschen Überlegungen führten zu folgender berühmten Beziehung, in der festgestellt wird, dass Quantenenergie E und Frequenz ν zueinander proportional sind:

$$E = h\,\nu$$

Der verbindende Faktor h heißt „Plancksches Wirkungsquantum“ (sein Wert beträgt im internationalen Einheitensystem $6{,}63 \times 10^{-34}$ J s). Will man elektromagnetische Wellen näher beschreiben, so kann man also auf Wellenlänge, Frequenz oder Quantenenergie zurückgreifen.

Abbildung 1.3 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Strahlenarten und ihre Energien. Man sieht, dass ein sehr großer Energiebereich, nämlich ca. 15 Zehnerpotenzen, abgedeckt wird. In Tabelle 1.1 sind außerdem die Beziehungen zwischen Wellenlängen, Frequenzen und Quantenenergien im Einzelnen zusammengestellt, wobei auch noch feinere Unterteilungen mit aufgeführt sind, auf die noch einzugehen ist.

In Tabelle 1.1 sind in den Spalten jeweils die oberen und unteren Grenzen des jeweiligen Bereichs angegeben. Eine wichtige grundsätzliche Klassifizierung ist gerade im Zusammenhang mit der in diesem Buch diskutierten Problematik anzusprechen: Es gibt *ionisierende* und *nicht ionisierende* Strahlung. Unter Ionisierung (oder auch Ionisation) versteht man die Loslösung eines Elektrons aus dem Atom- oder Molekülverband. Da die Elektronen durch Kräfte gebunden sind, bedarf es zu ihrer Abtrennung einer gewissen Energie (in der Größenordnung von 100 eV). Sie kann nur von ionisierenden Strahlen aufgebracht werden. Alle Folgeerscheinungen, die auf einer initialen Ionisation beruhen, wie auch z. B. Gesundheitsschäden, können daher von nicht ionisierenden Strahlen nicht hervorgerufen werden. Dabei spielt die Intensität, d. h. die Zahl der auftreffenden Quanten, keine Rolle. Man kann sich das in einem simplen Bild verdeutlichen: Bekanntlich lassen sich Fensterscheiben durch Gewehrschüsse („ionisierend“)

Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:11
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm

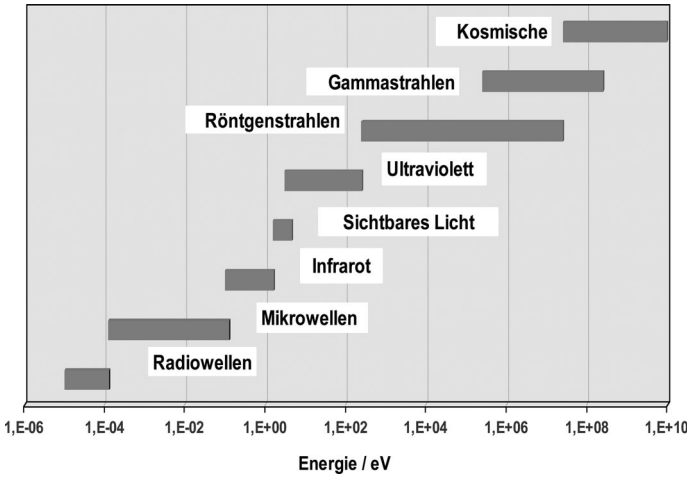


Abb. 1.3 Quantenenergien verschiedener elektromagnetischer Wellenstrahlungen.

durchlöchern, nicht aber durch Wattekugeln („nicht ionisierend"). Auch wenn man mit vielen Wattebäuschchen in schneller Folge die Scheibe bewirft, sie wird standhalten.

Der physikalischen Ehrlichkeit halber ist hier eine einschränkende Bemerkung angezeigt: Das Gesagte gilt nicht für Strahlenquellen sehr hoher Intensität, wie z. B. Hochleistungslaser. Bei ihnen treten so genannte nichtlineare Effekte auf, wodurch sekundäre Strahlen mit hoher Frequenz (und somit auch hoher Quanten-

Tabelle 1.1 Frequenzen, Wellenlängen und Photonenenergien elektromagnetischer Wellen.

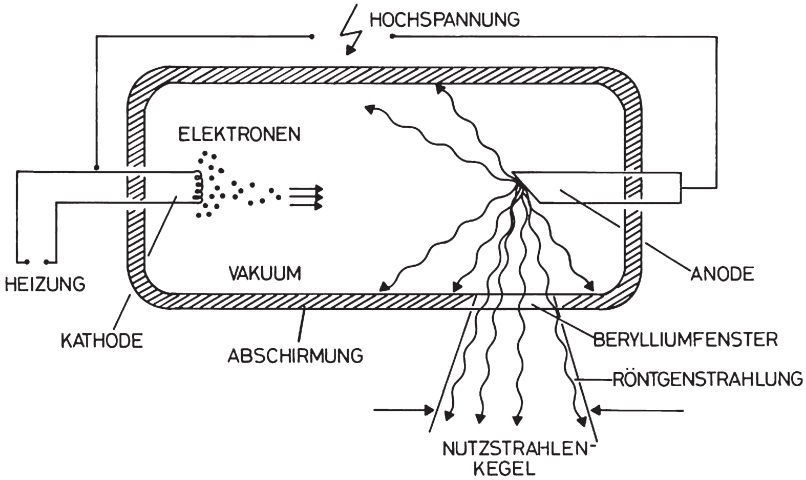
Frequenz [Hz]	Wellenlänge [m]		Quantenenergie [eV]
$> 3 \times 10^{15}$	$< 10^{-7}$	Ionisierende Strahlung	$> 12{,}4$
3×10^{15}	10^{-7}	Ultraviolett	$12{,}4$
$7{,}5 \times 10^{14}$	4×10^{-7}		$3{,}1$
$7{,}5 \times 10^{14}$	4×10^{-7}	Sichtbares Licht	$3{,}1$
$3{,}75 \times 10^{14}$	8×10^{-7}		$1{,}6$
$3{,}75 \times 10^{14}$	8×10^{-7}	Infrarot	$1{,}6$
3×10^{12}	10^{-4}		$1{,}2 \times 10^{-2}$
3×10^{12}	10^{-4}	Terahertz	$1{,}2 \times 10^{-2}$
3×10^{10}	10^{-2}		$1{,}2 \times 10^{-4}$
3×10^{10}	10^{-2}	Mobilfunk, Mikrowellen	$1{,}2 \times 10^{-4}$
3×10^{9}	10^{-1}		$1{,}2 \times 10^{-5}$
3×10^{9}	10^{-1}	Hochfrequenz	$1{,}2 \times 10^{-5}$
3×10^{4}	10^{4}		$1{,}2 \times 10^{-10}$
$< 3 \times 10^{2}$	$> 10^{2}$	Extrem niedrige Frequenzen (ELF)	$<10^{-12}$

Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:16
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm

energie) entstehen. Auf diesem Wege können also unter sehr besonderen Bedingungen auch durch nicht ionisierende Strahlen Ionisationen bewirkt werden.

Es gibt zwei Arten ionisierender Strahlen, Röntgenstrahlen und Gammastrahlen. Beide unterscheiden sich nicht grundsätzlich in ihrer physikalischen Natur (und daher auch nicht in ihren Wirkungen), sondern nur in Bezug auf den Entstehungsprozess. Röntgenstrahlen treten überall auf, wo beschleunigte Elektronen auf Materie treffen (z. B. in Röntgenröhren), Gammastrahlen bilden immer eine Begleiterscheinung des radioaktiven Zerfalls. Entgegen verbreiteter populärer Vermutungen sind Gammastrahlen weder immer energiereicher als Röntgenstrahlen noch etwa gefährlicher, sie entstehen nur anders.

Box 1.1: Erzeugung von Röntgenstrahlen



Röntgenstrahlen entstehen, wenn beschleunigte Elektronen in Metallen abgebremst werden, z. B. in Röntgenröhren, aber nicht nur dort. Das Prinzip ist im Bild dargestellt. In der Röntgenröhre werden Elektronen durch Erhitzung der als Heizdraht ausgebildeten Kathode freigesetzt. Durch die zwischen Kathode und Anode anliegende Hochspannung werden sie beschleunigt, wobei durch das im Inneren aufrechterhaltene Vakuum dafür gesorgt wird, dass sie sich frei bewegen können. Bei dem Auftreffen auf die Anode entstehen Röntgenstrahlen, allerdings wird auch Wärme frei (nur ungefähr 5% der aufgewendeten Energie wird zu Röntgenstrahlung umgesetzt). Die Röhrenummantelung schirmt die Röntgenstrahlung weitgehend ab, nur an der Austrittstelle ist ein durchlässiges Fenster aus Beryllium eingesetzt.

Genau genommen muss noch eine andere Strahlenart erwähnt werden, die in das bisherige Schema nicht passt und die später in diesem Kapitel angesprochen wird,

Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:17
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm

die *Vernichtungsstrahlung*. Fälschlicherweise wird sie häufig, selbst in manchen Physikbüchern, als Gammastrahlung bezeichnet.

Abbildung 1.3 und Tabelle 1.1 illustrieren die beachtliche Vielfalt elektromagnetischer Wellenstrahlen. Sehr hohe Energien treten im Weltraum auf, die allerdings keine praktische Bedeutung haben, jedoch von besonderem wissenschaftlichem Interesse sind. Ihre Intensität ist sehr gering, für die Strahlengefährdung bei der Raumfahrt spielen sie keine Rolle, diese geht von geladenen Teilchen, vor allem Protonen und Alphateilchen aus.

An die ionisierende Strahlung schließt sich nach unten in der Energieskala der ultraviolette Teil (UV) des Spektrums an. Aus praktischen Gründen, die vor allem mit der medizinischen Wirkung in Zusammenhang stehen, hat man eine genauere Einteilung in verschiedene Unterbereiche nach Wellenlängen vorgenommen:

„Schumann"- oder Vakuum-UV	100–200 nm[1)],
UV-C	200–280 nm,
UV-B	280–315 nm,
UV-A	315–380 nm.

Hauptquelle ultravioletter Strahlung auf der Erde ist die Sonne (Abb. 1.4). Betrachtet man nur die Strahlungseigenschaften, so unterscheidet sich unser Gestirn im Prinzip nicht von den klassischen Glühlampen mit der Heizwendel (die in Zukunft verboten sein werden): Sie ist ein Temperaturstrahler, allerdings deutlich wärmer als nahezu alles, was wir aus unserer Umgebung kennen. Ihre Temperatur beträgt annähernd 6000 Grad. Sie sendet Strahlen über einen weiten Wellenlängenbereich aus, vom kurzwelligen Ultraviolett bis hin zum fernen Infrarot. Nicht alles gelangt auf die Erde, die Atmosphäre und darin enthaltene Gase schirmen große Teile ab, wie man in Abb. 1.4 sieht.

Von besonderer Bedeutung ist in Bezug auf UV das Ozon, dreiatomiger Sauerstoff (O_3), das in den oberen Schichten der Stratosphäre photochemisch unter Einwirkung der Sonnenstrahlung gebildet wird. Es filtert kurzwelliges UV-C, teilweise auch UV-B, aus dem solaren Spektrum aus, so dass hiervon nur geringe Mengen die Erdoberfläche erreichen. Dies ist für das Leben auf unserem Planeten von erheblicher Bedeutung, da kurzwelliges UV biologische Vorgänge nachhaltig schädigen kann, wie später noch erläutert wird. Durch den Einfluss bestimmter Spurengase in der Atmosphäre (z. B. Fluorchlorkohlenwasserstoffe FCKW) kann das Ozon photochemisch abgebaut werden, was dann zu dem viel diskutierten „Ozonloch" führt. Durch die rigorose Beschränkung der Verwendung dieser Chemikalien konnte die Ausdehnung des Ozonlochs eingeschränkt werden, das bedeutet allerdings nicht, dass vollständige Entwarnung gegeben werden kann. Dies Ganze hat übrigens nichts mit der derzeit akuten CO_2-Problematik zu tun, dabei spielt die Infrarotstrahlung die entscheidende Rolle (siehe weiter unten).

1) 1 nm = 10^{-9} m oder 1 millionstels Millimeter

Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:18
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm

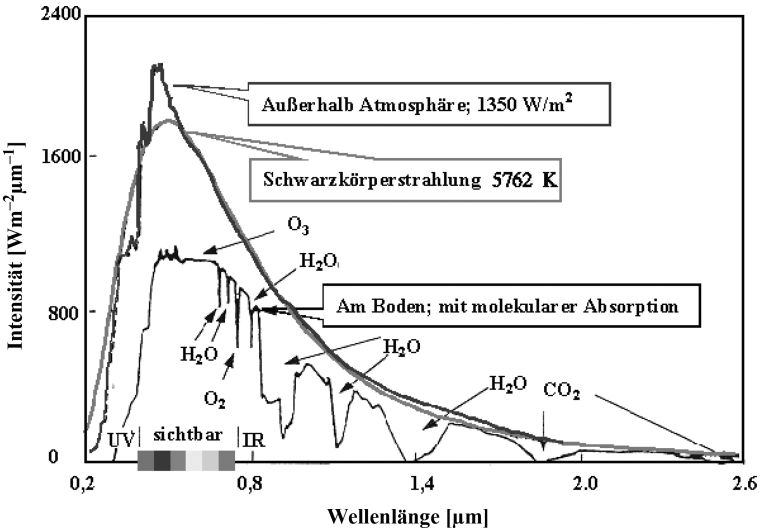


Abb. 1.4 Strahlenspektrum der Sonne: Man sieht, dass im UV und im IR große Bereiche durch die Absorption von Ozon (O_3), Sauerstoff (O_2), Wasser (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2) in der Atmosphäre abgeschwächt werden. (s. auch Farbtafel S. XVII.) [2]

Ultraviolette Strahlen können technisch z. B. mit Gasentladungslampen erzeugt werden. Man findet sie in Sterilisierungseinrichtungen, aber auch in Solarien. Außerdem treten sie auch beim Elektroschweißen auf.

An das UV schließt sich der Bereich des sichtbaren Lichts an, was eigentlich ein Pleonasmus ist, da „Licht“ per definitionem sichtbar ist. Leider hat sich häufig eine etwas schlampige Ausdrucksweise eingeschlichen, wenn man z. B. auch von „ultraviolettem“ oder „infrarotem Licht“ spricht. Eigentlich meint man damit die „optische Strahlung“ zu der neben dem Sichtbaren auch das UV und das Infrarot gehören. Licht im engeren Sinne bildet nur einen sehr kleinen Teil des gesamten Spektrums elektromagnetischer Wellen. Es umfasst den Wellenlängenbereich von 380–800 nm und fällt recht genau mit dem Maximum der Sonnenemission zusammen, was interessante Rückschlüsse auf die Evolution des Auges zulässt.

Infrarotstrahlung (IR) besitzt eine geringere Energie als UV oder sichtbare Strahlung und überstreicht den Wellenlängenbereich von 800 nm bis ca. 1 mm. Auch hier gibt es eine weitere Unterteilung, nämlich

IR-A 780–1400 nm,
IR-B 1,4–3 µm,
IR-C 3 µm – 1 mm.

IR-C ist weitgehend identisch mit der sogenannten *Terahertz-Strahlung*, die in letzter Zeit mit den für die Passagierüberwachung vorgeschlagenen „Körperscan-

Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:21
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm

nern“ von sich reden machte, ihre effektive Erzeugung ist erst seit Kurzem technisch möglich geworden. Ansonsten äußert sich IR vor allem durch Wärme, alle erhitzten Körper senden infrarote Strahlen aus, nicht zuletzt auch die Sonne.

Für die Erwärmung der Erde ist aber nicht nur die einfallende Infrarotstrahlung verantwortlich. Alle Teile des gesamten Spektrums werden absorbiert und letztlich weitgehend in Wärme umgewandelt, wovon allerdings ein großer Teil zurück in den Weltraum abgestrahlt wird. Wird nun die Durchlässigkeit der Atmosphäre für IR vermindert, so sinkt dieser „Strahlungsverlust“ und die Temperatur der Erde steigt. In *Abb. 1.4* sieht man, dass hierfür vor allem das Wasser, aber auch das Kohlendioxid CO^2 verantwortlich sind. Diese Klimaproblematik ist auch unter dem Namen „Treibhauseffekt“ (greenhouse effect) bekannt geworden. Dort findet man nämlich ganz ähnliche Verhältnisse: Die Glasscheiben lassen das Licht durch, das im Innern des Häuschens absorbiert und in Wärme umgewandelt wird. Dafür sind die Glasscheiben aber undurchlässig, die Wärme bleibt gefangen. Was zur Aufzucht von Salat und Tomaten sehr erwünscht ist, kann für die Erde dramatische Folgen haben. Erhöht sich der CO^2-Gehalt der Atmosphäre, so heizt sich auf längere Sicht unser Planet auf, mit bisher noch nicht absehbaren Folgen. Spurenelemente in der Atmosphäre können unser Leben also entscheidend beeinflussen: Weniger Ozon lässt mehr schädliche UV-Strahlung in die Biosphäre kommen, mehr Kohlendioxid hält wärmende Infrarotstrahlung zurück.

Noch geringere Quantenenergien als die bisher angesprochenen Strahlenarten haben Mikro- und Radiowellen. Die ersten von beiden bildeten noch vor wenigen Jahrzehnten eine Spezialität der Experimentalphysiker, ohne große praktische Bedeutung. Heute assoziiert man mit ihnen vor allem „Mikrowellenherde“, nicht so bekannt ist, dass sich auch die gesamte Mobilfunkkommunikation, also die allgegenwärtigen „Handys“, sich ihrer bedient, ebenso wie auch die Radarortung. Über diese Anwendungen wird später noch ausführlich zu sprechen sein. Radiowellen, die zur Übertragung unserer täglichen Rundfunk- und Fernsehprogramme dienen, haben noch geringere Quantenenergien.

Nur der Vollständigkeit halber sind in Tabelle 1.1 auch Felder „extrem niedriger Frequenz“ (ELF) aufgeführt, sie gehören eigentlich nicht zu den Wellenstrahlen, werden aber häufig gerade wegen vermuteter gesundheitlicher Wirkungen im selben Zusammenhang diskutiert, deshalb sollen sie hier nicht fehlen. Sie hängen vor allem mit der Elektrizitätsversorgung zusammen, sind also in der Nähe von Überlandleitungen, Erdkabeln oder entlang der Trasse elektrischer Züge zu finden.

Ein Wort noch zu einer „Strahlenart“, die bei manchen ein gewisses Unwohlsein auslöst, nämlich der „Laserstrahlung“. Es handelt sich hier eigentlich nicht um eine besondere Spezies, sondern nur um eine besondere Art der Erzeugung. Mit Hilfe von Lasern (*Light amplification by stimulated emission of radiation*) ist es möglich, sehr hohe Intensitäten zu erreichen. Dadurch ist die Besonderheit charakterisiert, nicht jedoch durch hohe Quantenenergien, denn Laser gibt es heute praktisch für den gesamten Bereich der optischen Strahlung, also UV, sichtbares Licht und Infrarot, sogar auch für Mikrowellen (dann heißen die Geräte „Maser“). Durch die große Energiekonzentration kann man hohe lokale Tempera-

Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:21
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm

turerhöhungen erzielen, was auch in der Medizin, z. B. in der Augenheilkunde oder der Dermatologie, benutzt wird. Wegen dieser Eigenschaften müssen bei Lasern besondere Schutzvorkehrungen beachtet werden.

Hiermit ist die kurze Besprechung elektromagnetischer Wellen abgeschlossen, es folgen die Teilchenstrahlen, die hauptsächlich im Zusammenhang mit radioaktiven Prozessen entstehen.

1.3 Radioaktivität

1.3.1 Teilchenstrahlen

Elektromagnetische Wellen übertragen Energie in Form von Quanten oder Photonen. Für sie ist charakteristisch, dass sie weder Masse noch Ladung besitzen und sich in homogenen Medien alle mit gleicher Geschwindigkeit fortbewegen. Bei dem Energietransport durch Teilchen ist alles anders: Die Partikel besitzen eine Masse (die der Regel sehr klein ist), in vielen Fällen eine Ladung und ihre Geschwindigkeit ändert sich mit ihrer Energie. Für unsere Anschauung bereiten sie geringere Probleme. Denn sie verhalten sich weitgehend wie die Objekte, die wir aus unserer Umgebung kennen, auch wenn sie sehr viel kleiner sind.

Teilchenstrahlen treten vor allem bei der Radioaktivität auf, d. h. dem Zerfall instabiler Atomkerne. Gleichgültig um welche Teilchenart es sich handelt, die emittiert wird, der Akteur ist immer der Atomkern, die Elektronenhülle ist höchstens manchmal sekundär und am Rande beteiligt. Nicht zu Unrecht umgibt die Radioaktivität eine Aura des Geheimnisvollen: Warum zerfallen Atomkerne? Die meisten Menschen machen sich nicht klar, dass diese Frage eigentlich falsch gestellt ist. Sie müsste lauten: Warum sind die meisten Atomkerne stabil? Sie bestehen bekanntlich aus Protonen, also positiv geladenen Teilchen, und Neutronen, die keine Ladung tragen. Nach dem schon erwähnten Coulombschen Gesetz stoßen sich gleichnamige Ladungen ab, und das umso mehr, je näher sie beieinander liegen. Atomkerne besitzen Radien in der Größenordnung von ca. 10^{-12} m, es ist also wirklich eng in ihrem Inneren, und dennoch fliegen die meisten nicht auseinander. Dies liegt daran, dass die Bestandteile – Protonen und Neutronen – durch spezielle Kräfte zusammengehalten werden, die allerdings nur auf sehr kurze Entfernungen wirksam sind, sie stellen also gewissermaßen den Kontaktkleber für den Zusammenhalt des Kerns dar. Da diese „starke Wechselwirkung“ sowohl Protonen als auch Neutronen gleichermaßen erfasst, kompensieren die neutralen Komponenten einen Teil der elektrostatischen Abstoßung. Dies ist auch ein Grund dafür, dass man bei hohen Kernladungszahlen immer mehr Neutronen als Protonen findet. Aber alles hat seine Grenzen, bei einer Kernladungszahl von 82 (Blei) hört die Stabilität auf. Alle Elemente mit höheren Kernladungszahlen sind natürlicherweise radioaktiv. Auf der Erde geht das bis 92

Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:21
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm

(Uran), allerdings kann man durch Kernreaktionen diese Grenze herausschieben. Der derzeitige Rekord liegt bei 112, einem künstlichen Element, das 1996 am GSI-Helmholtz-Forschungszentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt erstmalig erzeugt wurde und im Jahre 2010 den offiziellen Namen „Copernicium" erhielt.

Bei nahezu allen Elementen gibt es bei gleicher Protonenzahl verschiedene Kernmassen, die sich durch die Zahl von Neutronen unterscheiden, man bezeichnet sie dann als „Isotope". Manche von ihnen sind radioaktiv und Bestandteil unserer natürlichen Umwelt. Heute ist es möglich, von praktisch allen Elementen radioaktive Isotope herzustellen, wovon vor allem auch die Nuklearmedizin profitiert.

Der Zerfall eines individuellen Kerns ist nicht voraussagbar, Gesetzmäßigkeiten lassen sich nur für eine Vielzahl von ihnen formulieren. Es handelt sich hierbei um einen „stochastischen" (d. h. zufallsbestimmten) Prozess. Eine wichtige charakteristische Größe stellt die *Halbwertszeit* dar. In jedem betrachteten Zeitintervall zerfällt nämlich immer ein bestimmter Anteil der Kerne, während einer Halbwertszeit also gerade die Hälfte. Nach einer Halbwertszeit sind also bezogen auf die Ausgangmenge noch 50% vorhanden, nach zwei Halbwertszeiten 25% ($½ \times ½ = (½)^2$), nach drei $1/8 = (½)^3$ usw. Die Halbwertszeiten radioaktiver Isotope erstrecken sich über einen riesigen Bereich, von kleinsten Bruchteilen einer Sekunde bis zu Milliarden von Jahren.

Die Radioaktivität wurde 1896, also weniger als ein Jahr nach Röntgens Experimenten, von dem französischen Physiker Henri Becquerel (1852–1908, Nobelpreis 1903) bei Versuchen mit Röntgenstrahlen fast zufällig entdeckt. Als er eines Tages dadurch überrascht wurde, dass seine Filme, die er in einer Schublade aufbewahrte, geschwärzt waren, schloss er, dass Mineralien die daneben lagen (es handelte sich um das Uranerz Pechblende), wohl die Ursache sein müssten. Zusammen mit seinen Mitarbeitern, dem Ehepaar Marie Sklodowska-Curie (1867–1934) und Pierre Curie (1859–1906, Nobelpreis 1903 gemeinsam mit Henri Becquerel und Marie Curie), erforschte er dieses neue unerwartete Phänomen und identifizierte 1900 die Betastrahlung.

Es gibt verschiedene Arten des radioaktiven Zerfalls, denen wir uns jetzt im Einzelnen zuwenden wollen (s. Box 1.2). Offensichtlich steigt die Wahrscheinlichkeit der Instabilität mit wachsender Protonenzahl wegen der Abstoßung der positiven Ladungen. Man könnte das Problem lösen, indem Protonen ausgestoßen würden. Dieses findet aber nicht statt, es gibt keine Protonenemission. Stattdessen werden Alphateilchen emittiert, die aus zwei Protonen und zwei Neutronen bestehen und chemisch den Kernen von Helium-4 entsprechen. Bei jedem Alphazerfall findet eine Elementumwandlung statt: die Kernladungszahl vermindert sich um zwei, die Massenzahl um vier. Alphazerfälle findet man nur bei schweren Kernen, was verständlich ist, da damit doch ein erheblicher „Substanzverlust" einhergeht.

Es gibt aber auch andere Möglichkeiten, Stabilität zu erreichen, die vor allem bei leichteren Kernen auftreten. Die „Elementarteilchen" Proton und Neutron sind

Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:22
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm

nämlich keineswegs so unveränderbar wie der Name suggeriert, vielmehr können sie sich ineinander umwandeln, d. h. aus einem Proton kann ein Neutron entstehen und umgekehrt. Bei einem solchen Prozess muss allerdings die Gesamtladung erhalten bleiben. Wird also aus einem Proton ein Neutron, so muss die positive Ladung abgegeben werden. Dies geschieht durch die Emission eines positiv geladenen Teilchens, des *Positrons*, dessen Masse dem des Elektrons entspricht. Man bezeichnet diesen Vorgang als *β^+-Zerfall* („Beta-plus-Zerfall") (Identifizierung durch Irène und Frederic Joliot-Curie 1934).

Die genaue Analyse zeigt, dass dabei auch noch ein anderes, allerdings neutrales, Teilchen entsteht, das eine äußerst geringe Masse besitzt und als *Neutrino* bezeichnet wird. Es zeigt nur eine sehr geringe Neigung zur Wechselwirkung mit Materie und gibt auch heute noch den Physikern eine ganze Menge an Rätseln auf, was es natürlich recht interessant macht.

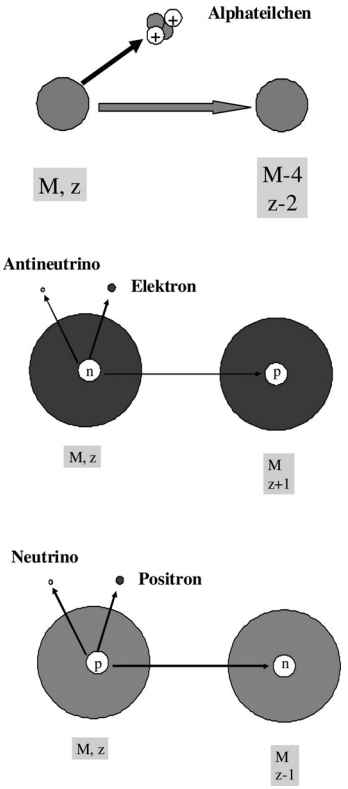
Der β^+-Zerfall besitzt ein Spiegelbild, nämlich den *β^--Zerfall* („Beta-minus-Zerfall"), der sehr viel häufiger vorkommt und deshalb auch früher als Bestandteil der natürlichen Radioaktivität entdeckt wurde. Hierbei entsteht aus einem Neutron ein Proton, das im Kern verbleibt, während zur Ladungserhaltung ein negatives Elektron emittiert wird. Die bei dem Betazerfall auftretende Elektronenstrahlung kommt also aus dem Kern und nicht, wie man vielleicht vermuten könnte, aus der Atomhülle. Außerdem gibt es auch bei diesem Zerfall ein neutrales Teilchen, hier das „Antineutrino", das dem schon erwähnten Neutrino spiegelbildlich entspricht. Diese Tatsache eröffnet im wahrsten Sinn des Wortes neue Welten, nämlich die von Materie und Antimaterie.

Paul Maurice Dirac (1902–1984), einer der genialsten Köpfe der Physik im 20. Jahrhundert, das wahrlich nicht arm war an eminenten Forschern, sagte im Jahre 1928 die Existenz eines „Antiteilchens" zum wohlbekannten Elektron voraus, das von ihm postulierte Positron wurde erstmals 1932 in der kosmischen Strahlung durch den Amerikaner Carl David Anderson (1905–1991) nachgewiesen. Dirac verband die damals modernsten Theorien der Physik, nämlich die Quantentheorie und die spezielle Relativitätstheorie Einsteins, und war damit in der Lage, einige bis dato unerklärte Phänomene zu deuten, zum Beispiel den Elektronenspin, der uns noch später beschäftigen wird. Nach heutiger Kenntnis gibt es zu jedem Teilchen ein Antiteilchen – wir leben also in einer von zwei möglichen Welten. Nach gängigen Vorstellungen entstanden bei dem Urknall, der den Beginn des Universums markiert, Materie und Antimaterie zu gleichen Teilen. Die Frage, warum nur eine Spielart übrig blieb, bildet eines der großen ungelösten Rätsel der Kosmologie. Allerdings verdanken wir dieser Tatsache unsere Existenz.

Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:22
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm

Box 1.2: Der radioaktive Zerfall

Radioaktive Kerne zerfallen unter Aussendung von Teilchen, nämlich Alpha- und Betateilchen.



Alphazerfall

Alphateilchen bestehen aus zwei Protonen und zwei Neutronen und entsprechen somit dem Kern des Elements Helium. Bei einem Alphazerfall vermindert sich die Massenzahl *M* des Kerns um 4, die Kernladungszahl *z* um 2.

Betazerfall

Es gibt zwei Arten von Betazerfällen.

Bei dem β^--Zerfall entsteht aus einem Neutron ein Proton, das im Kern verbleibt, ein Elektron und ein Antineutrino werden emittiert. Die Massenzahlen von Ausgangs- und Folgekern bleiben unverändert, die Kernladungszahl erhöht sich um 1.

Bei dem β^+-Zerfall entsteht aus einem Proton ein Neutron, ein Positron sowie ein Neutrino werden emittiert. Auch hier bleiben die Massenzahlen unverändert, die Kernladungszahl verringert sich um 1.

Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:34
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm

Treffen nämlich Teilchen und Antiteilchen aufeinander, so verschwinden sie und verlieren ihre Masse: Gemäß der wohl berühmtesten Formel der Physikgeschichte wird sie in Energie umgewandelt:

$$E = mc^2$$

Diese Beziehung wurde 1905 von Albert Einstein im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie abgeleitet und besagt, dass Masse und Energie äquivalent sind, also nur unterschiedliche Erscheinungsformen darstellen. In der obigen Formel bedeutet E die Energie und m die Masse. Verbunden sind sie durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit c^2.

Antimaterie kommt auf der Erde nur in Form des äußerst kurzlebigen Positrons vor. Trifft es auf ein Elektron, so entstehen zwei Strahlungsquanten, deren Energie durch die Massen von Elektron und Positron gemäß der obigen Formel bestimmt ist. Sie fliegen in entgegengesetzter Richtung (also mit einem Winkel von 180 Grad) auseinander (Abb. 1.5). Es handelt sich hier um die besondere Art der *Vernichtungsstrahlung* und nicht um Gammastrahlen, auch wenn selbst in manchen Physikbüchern diese falsche Bezeichnung benutzt wird. Beide Quanten besitzen dieselbe Energie von jeweils 511 keV. Der beschriebene Vorgang hat in der modernen medizinischen Diagnostik große Bedeutung erlangt in Form der *Positronen-Emissions-Tomographie* (PET), ein eindrucksvolles Beispiel, dass scheinbar sehr theoretische Entwicklungen der Physik wichtige praktische Entwicklungen auslösen können.

In der Praxis spielen noch andere Teilchen eine Rolle, die hier erwähnt werden sollen, obwohl sie nicht bei radioaktiven Prozessen auftreten, nämlich *Protonen* und *Neutronen*. Sie können mit Hilfe spezieller Apparaturen erzeugt werden. Neutronen werden vor allem bei der Kernspaltung frei, z. B. in den Reaktoren der Kernkraftwerke. Dieser Vorgang ist von den besprochenen Kernzerfällen zu unterscheiden. Die Spaltung wird durch Neutronenbeschuss dazu geeigneter

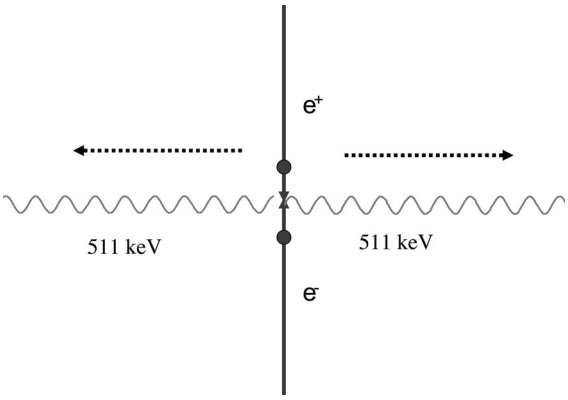


Abb. 1.5 Zur Entstehung von „Vernichtungsstrahlung“.

Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:39
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm

Kerne, z. B. Uran-235, induziert. Mit ihrer Entdeckung im Jahre 1938 durch Otto Hahn (1879–1968) und Fritz Strassmann (1902–1980) begann das Atomzeitalter, dessen Folgen uns noch heute intensiv beschäftigen. Der historischen Wahrheit halber sei angefügt, dass die korrekte Deutung auf Hahns Mitarbeiterin Lise Meitner (1878–1968) und ihren Neffen Otto Robert Frisch (1904–1979) zurückgeht, die zu diesem Zeitpunkt wegen ihrer jüdischen Abkunft schon nach Dänemark emigriert waren. Bei der Spaltung werden die Kerne in annähernd gleichgroße Bestandteile zerlegt, die also um erheblich größere Massen verfügen als Alpha- oder Betateilchen. Ganz selten kommt bei dem künstlichen Transuranelement Californium die Kernspaltung auch spontan vor, das Isotop Californium-252 (Halbwertszeit 2645 Jahre) wird daher auch als Neutronenquelle eingesetzt, die erreichbaren Intensitäten sind allerdings recht gering.

Abgesehen von der kernphysikalischen Forschung spielen Protonen auch in der modernen Strahlentherapie von Tumoren eine Rolle. Die Nutzung von Neutronen zum selben Zweck hat heute nur noch eine vergleichsweise geringe Bedeutung.

1.3.2
Gammastrahlung

Wenn eine Bindung zerfällt, die über lange Zeit in engstem Kontakt bestanden hat, so geschieht das selten, ohne dass Erregung zurückbleibt. Atomkerne zeigen in dieser Hinsicht gewissermaßen menschliche Eigenschaften. Nach einem Zerfallsprozess wird nicht sofort Stabilität erreicht, der Kern befindet sich für kurze Zeit noch in einem angeregten Zustand. Die angestaute Energie wird durch Emission elektromagnetischer Wellenstrahlung abgegeben, der Gammastrahlung. Es wurde schon darauf hingewiesen, dass sie sich in ihrer Natur nicht grundsätzlich von Röntgenstrahlen unterscheidet. Häufig wird zwar unterstellt, dass Gammastrahlen energiereicher und damit durchdringender seien. Das stimmt allerdings nicht generell, es gibt sehr weiche Gammastrahlen, aber sie werden nur selten genutzt. In der Praxis spielen vor allem hochenergetische Gammastrahlen eine Rolle, wie sie z. B. durch Kobalt-60 oder Caesium-137 ausgesandt werden, was wahrscheinlich die Ursache für die falsche Wahrnehmung ist.

Es ist keine Überraschung, dass die Emission in Form wohldefinierter Strahlungsquanten erfolgt. Ihre Energien weisen für jedes Isotop eine charakteristische Verteilung auf, sie stellt gewissermaßen einen spektralen Fingerabdruck dar, durch den die Strahler leicht identifiziert werden können. Gammastrahlende Materialien brauchen dazu nicht chemisch aufbereitet zu werden, da die Strahlen in der Regel durchdringend genug sind, um sie mit Hilfe externer Detektoren messen zu können. Abbildung 1.6 zeigt als Beispiel das Spektrum einer Luftprobe, die am 2. Mai 1986 in dem Heimatinstitut des Autors mit Hilfe eines Filters aufgesammelt wurde. Man erinnert sich, am 26. April 1986 explodierte der Reaktor in Tschernobyl und verteilte die Spaltprodukte weit über Europa. Dank der Gammaspektroskopie wussten wir schon eine Woche später, was in Gießen niedergegangen war, jedenfalls sofern es sich um Gammastrahler handelte. Einige Nuklide sind im Bild markiert.

Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:39
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm

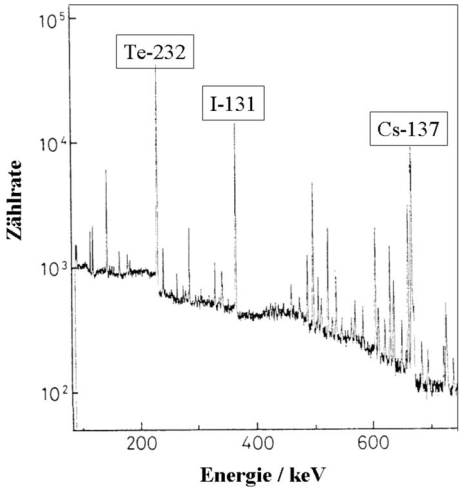


Abb. 1.6 Gammaspektrum einer Luftprobe, genommen am 2. Mai 1986 in Gießen [3].

Nicht alle radioaktiven Substanzen senden auch Gammastrahlen aus, das gilt vor allem für manche Betastrahler und leichtere Kerne. Ein Beispiel ist Strontium-90, ein sehr radiotoxisches Isotop, das auch bei der Kernspaltung frei wird. Eine Identifizierung ist hier ungleich aufwändiger, da komplizierte chemische Trennungen notwendig sind. So dauerte es recht lange, bis festgestellt werden konnte, dass glücklicherweise Strontium-90 durch die Tschernobylkatastrophe in geringerer Menge freigesetzt worden war, als man ursprünglich befürchtet hatte.

1.4 Ultraschall

Obwohl, wie eingangs erwähnt, der Ultraschall (US) nicht zu den Strahlen im engeren Sinne gehört, soll hier von der reinen Lehre abgewichen und eine kurze Besprechung angeschlossen werden, da der Ultraschall in der Medizin vielfach angewendet wird und sowohl die *International Commission on Non Ionising Radiation Protection* (ICNIRP) als auch die Weltgesundheitsorganisation (WHO) ihn als „Strahlung“ betrachten. Ultraschall definiert sich über das menschliche Hörvermögen. Dieses umfasst (theoretisch, im Alter wird es deutlich schlechter) den Bereich von ca. 16 Hz bis 20 kHz. Alle höheren Frequenzen bezeichnet man als *Ultraschall*, alle tieferen als *Infraschall*. Es gibt viele Tiere, die Ultraschall wahrnehmen können, nicht nur die Fledermäuse, die sich mit Hilfe von Ultraschallradar orientieren. Bei Ultraschall handelt es sich nicht um elektromagnetische Felder, sondern um periodische Druckschwankungen, womit sofort klar ist, dass ein übertragendes Medium notwendig ist. Schall breitet sich in Luft aus, aber auch sehr gut in anderen Materialien, z. B. Wasser und auch in Festkörpern. In Luft verlaufen die Schwingungen in Richtung der Ausbreitung, man spricht daher von

Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:47
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm

Longitudinalwellen. In festen Körpern findet man aber auch *Transversalwellen*, bei denen die Schwingungen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung verlaufen (das ist auch bei den elektromagnetischen Wellen der Fall).

Ultraschall wird in der Regel mit Hilfe des „piezoelektrischen Effekts" erzeugt, der übrigens von Pierre Curie, der eigentlich mehr für seine Arbeiten zur Radioaktivität bekannt ist, zusammen mit seinem Bruder Jacques, im Jahre 1880 entdeckt wurde. Piezoelektrische Materialien verändern ihre Länge, wenn sie einem elektrischen Feld ausgesetzt werden. Schwingt dieses mit einer bestimmten Frequenz, so wird diese auf Grund der rhythmischen Ausdehnung des Körpers auf die Luft übertragen, es entsteht Schall bzw. Ultraschall. Diese Erscheinung lässt sich übrigens umkehren: Wird ein piezoelektrischer Kristall von Schallschwingungen getroffen, so verändert sich seine Länge, und es kommt zu einer Verschiebung der Ladungsverteilung, die man messen und zur Detektion von Ultraschall benutzen kann.

In der medizinischen Diagnostik, dem Hauptanwendungsgebiet, verwendet man Frequenzen von 1 bis 40 MHz. Das Prinzip, das später ausführlicher besprochen wird, beruht vor allem auf der Reflexion der Wellen an Grenzflächen und ist vergleichbar der im militärischen Bereich entwickelten Echoortung, die schon im Ersten Weltkrieg benutzt wurde. So kann man auch hier, wie so oft in der angewandten Forschung, mit dem antiken griechischen Philosophen Heraklit (um 500 v. Chr.) feststellen: „Der Krieg ist aller Dinge Vater..." Es gibt eine Reihe von Vorteilen der Darstellung von Organen mit Ultraschall, besonders hervorzuheben ist aber, dass bei den in der Diagnostik verwendeten Intensitäten schädigende Einwirkungen nach heutigem Kenntnisstand auszuschließen sind.

Reemers Publishing Services GmbH
o:/Wiley/978-3-527-41099-6/3d/c01.3d from 13.08.2012 12:18:47
3B2 9.1.580; Page size: 170.00mm x 240.00mm