

*Johannes Friedrich Diehl*

## **Radioaktivität in Lebensmitteln**



**WILEY-  
VCH**

WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA

This Page Intentionally Left Blank

*Johannes Friedrich Diehl*

**Radioaktivität in Lebensmitteln**

This Page Intentionally Left Blank

## **Weitere Titel WILEY-VCH**

Johannes Friedrich Diehl

### **Chemie in Lebensmitteln**

**Rückstände, Verunreinigungen, Inhalts- und Zusatzstoffe**

2000, ISBN 3-527-30233-6

Claus Bliefert

### **Umweltchemie**

3. aktualisierte Auflage

2002, ISBN 3-527-30374-X

Manfred Reitz

### **Gene, Gicht und Gallensteine**

**Wenn Moleküle krank machen**

2001, ISBN 3-527-30313-8

John Emsley, Peter Fell

### **Wenn Essen krank macht**

2000, ISBN 3-527-30261-1

Georg Schwedt

### **Taschenatlas der Lebensmittelchemie**

1999, ISBN 3-527-30871-7

**Prof. Dr. Johannes Friedrich Diehl**  
Wildbader Straße 6  
76228 Karlsruhe

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autor und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

**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.

© 2003 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Printed in the Federal Republic of Germany  
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

**Satz** K+V Fotosatz GmbH, Beerfelden  
**Druck** betz-druck gmbh, Darmstadt  
**Bindung** J. Schäffer GmbH & Co. KG, Grünstadt

**ISBN** 3-527-30722-2

## Inhalt

Vorwort VII

<b>1</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>1</b>
1.1	Entdeckung der Radioaktivität	1
1.2	Struktur der Materie	5
1.3	Strahlungsmessung	11
1.4	Energiedosis – Äquivalentdosis – Effektive Dosis	16
1.5	Biologische Strahlenwirkung	19
1.6	Inkorporierte Radionuklide	23
1.7	Wirkung niedriger Strahlendosen	26
<b>2</b>	<b>Natürliche Radionuklide in Lebensmitteln</b>	<b>35</b>
2.1	Kosmogene Radionuklide	36
2.2	Primordiale Radionuklide ohne Zerfallsreihe	39
2.3	Primordiale Radionuklide der Zerfallsreihen	41
2.4	Natürliche Radionuklide in Trinkwasser und Mineralwässern	45
2.5	Durch zivilisatorische Maßnahmen und Lebensstil beeinflusste Strahlenexposition	47
2.6	Regionen hoher natürlicher Umweltradioaktivität	53
2.7	Vergleich interne/externe Strahlenexposition	56
<b>3</b>	<b>Künstliche Radionuklide in Lebensmitteln</b>	<b>63</b>
3.1	Entdeckung der künstlichen Radioaktivität	63
3.2	Entdeckung der Kernspaltung	64
3.3	Radioaktiver Fallout von Kernwaffenexplosionen	69
3.4	Radionuklide des Fallout in Lebensmitteln	74
3.5	Sonstige Wege der Kontamination durch künstliche Radionuklide	82
3.6	Strahlenexposition des Menschen durch künstliche Radionuklide	87

<b>4</b>	<b>Lebensmittelkontamination als Folge der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl</b>	<b>95</b>
4.1	Die Situation im Umfeld von Tschernobyl	96
4.2	Die Situation in der Bundesrepublik Deutschland	109
4.3	Die Situation in anderen europäischen Ländern	127
4.4	„Strahlenmolke“ und ähnliche Verirrungen	134
<b>5</b>	<b>Überwachung der radioaktiven Kontamination der Lebensmittel und Maßnahmen der Strahlenschutzvorsorge</b>	<b>143</b>
5.1	Rückblick auf die Zeit vor Tschernobyl	143
5.2	Maßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl	147
5.3	Das Tauziehen um Grenzwerte	154
5.4	Internationale Maßnahmen	157
<b>6</b>	<b>Transfer von Radionukliden in Nahrungsketten</b>	<b>161</b>
6.1	Verteilung der Radionuklide im Boden	161
6.2	Transfer Boden → Pflanzen	164
6.3	Transfer Pflanze → Tier	173
6.4	Transfer in aquatischen Systemen	177
6.5	Transfer zum Menschen	178
6.6	Radioökologische Berechnungsmodelle	181
<b>7</b>	<b>Maßnahmen zur Minimierung radioaktiver Kontamination</b>	<b>187</b>
7.1	Maßnahmen im Ackerbau	188
7.2	Maßnahmen in der Tierhaltung	190
7.3	Dekontamination durch Be- und Verarbeitung von Lebensmitteln	194
7.4	Wohin mit hochkontaminierten Lebensmitteln?	200
<b>8</b>	<b>Rückblick und Ausblick</b>	<b>203</b>
8.1	Unsichere Zukunft der Strahlenforschung und des Strahlenschutzes	203
8.2	Die Ingestionsdosis als Teil der gesamten Strahlenexposition	207
8.3	Worüber streiten die Experten noch?	212
8.4	Schwierige Risikokommunikation	218
	<b>Bibliographie</b>	<b>221</b>
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>243</b>

## Vorwort

Das Vorkommen von Radioaktivität in Lebensmitteln hat eine breite Öffentlichkeit in den letzten 50 Jahren wiederholt intensiv beschäftigt. Als Folge der atmosphärischen Kernwaffenversuche, vor allem der Vereinigten Staaten von Amerika und der Sowjetunion, wurde die Erdatmosphäre in den 1950er Jahren zunehmend mit Spaltprodukten aus den Testexplosionen kontaminiert. Der radioaktive Niederschlag („Fallout“) sammelte sich auf der Erdoberfläche an und gelangte damit auch auf und in Pflanzen und über Tierfutter in Lebensmittel tierischer Herkunft. Das Ausmaß der radioaktiven Verunreinigung der Lebensmittel nahm Anfang der '60er Jahre beunruhigende Dimensionen an und löste weltweite Proteste aus. Erst nachdem die beiden Großmächte sich 1963 auf ein Teststopabkommen geeinigt hatten, das nur noch unterirdische Kernwaffenversuche erlaubte, konnte der Radioaktivitätspegel in Lebensmitteln allmählich abnehmen.

Ab etwa 1970 wandte sich die Aufmerksamkeit der an Umweltthemen interessierten Verbraucher, Journalisten, Politiker und Wissenschaftler anderen Themen zu. Das Vorkommen von Blei, Cadmium, Quecksilber, Benzpyren, polychlorierten Biphenylen, DDT und vielerlei sonstiger Rückstände und Verunreinigungen in Lebensmitteln beschäftigte die Öffentlichkeit viel stärker als die immer mehr abnehmende Umweltradioaktivität.

Dann kam 1986 die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl und die dadurch verursachte radioaktive Kontamination weiter Teile Europas. Kaum ein Ereignis der letzten Jahrzehnte hat viele Menschen so beunruhigt oder sogar in Schrecken versetzt wie dieses Unglück und seine Folgen. Wochenlang wurde über Radioaktivität in Lebensmitteln auf den Titelseiten der Zeitungen berichtet. Erstaunlich, dass es trotz des großen Interesses bisher kein Buch über dieses Thema gab, sieht man einmal von Tagungsberichten ab, die für Fachleute bestimmt waren. Es gibt ausgezeichnete Texte über Radioaktivität in der Umwelt, die ein Kapitel oder ein paar Seiten der Kontamination von Lebensmitteln widmen – aber eben keines, das dieses Thema zur Hauptsache macht, weder auf dem deutschen noch auf dem englischsprachigen Buchmarkt.

Die erfreulich gute Akzeptanz, die mein im Jahr 2000 bei Wiley-VCH erschienenes Buch „Chemie in Lebensmitteln – Rückstände, Verunreinigungen, Inhalts- und Zusatzstoffe“ bei Rezensenten und Käufern fand, hat mich ermutigt, einen Begleitband zu verfassen, der für den gleichen breiten Leserkreis geschrieben ist,

den ich mit dem ersten Band ansprechen wollte: Ernährungsberater, Ärzte, Tierärzte, Apotheker, Studenten der Ökotoxikologie, Agronomie, Lebensmittelchemie und -technologie, Praktiker in der Ernährungsindustrie und dem Lebensmittelhandel und alle, die sich für Ernährungsfragen interessieren und sich eine eigene Meinung zu dem hier behandelten Thema bilden wollen. Wenn so unterschiedliche Interessenten angesprochen werden sollen, sind gewisse Vereinfachungen unvermeidlich. Die Experten mögen mir diese verzeihen.

Wie „Chemie in Lebensmitteln“ hat mich das Aufgabengebiet „Radioaktivität in Lebensmitteln“ während meiner langjährigen Tätigkeit an der Bundesforschungsanstalt für Ernährung intensiv beschäftigt. Ich habe die Wochen nach der Tschernobylkatastrophe, als Ministerien, Firmen der Ernährungsindustrie, Journalisten und Verbraucherorganisationen ständig neue Informationen über den Stand der Lebensmittelkontamination erwarteten, als die arbeitsreichste Periode meines Lebens in Erinnerung. Der Forschungsanstalt zugeordnet war in dieser Zeit eine „Leitstelle zur Überwachung der Umweltradioaktivität in Lebensmitteln“, die zu meinem Aufgabenbereich gehörte. Ich konnte daher beim Schreiben dieses Buches auf eine Fülle von Erfahrungen zurückgreifen. Diesen Fundus habe ich ergänzt durch viele neuere und neueste Literaturhinweise, die dem an einer weiteren Vertiefung seiner Kenntnisse interessierten Leser Gelegenheit geben sollen, sich eingehender über den aktuellen Stand der Forschung auf diesem Gebiet zu informieren.

Vielleicht wird auf Kritik stoßen, dass der Text häufig vom Titelthema des Buches abschweift. Ich meine aber, dass ein strikt auf Radioaktivität in Lebensmitteln beschränktes Buch eine sehr trockene Lektüre wäre. Eine Aufzählung von Becquerels in diversen Lebensmitteln ohne einen Hinweis auf die Person Becquerel und auf Namen wie Marie Curie oder Otto Hahn und Enrico Fermi hätte mir nicht genügt. Wie könnte man über Radioaktivität in Lebensmitteln nach der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl sprechen, ohne etwas über Bodenkontamination oder über die Folgen dieses Desasters für die Bevölkerung in der Umgebung von Tschernobyl zu sagen? Der Leser könnte das Vorkommen von Radioaktivität in Lebensmitteln kaum richtig einschätzen, wenn er nicht auch etwas über die biologische Wirkung ionisierender Strahlen erführe. Ich hoffe, ein Buch geschrieben zu haben, das man mit Interesse von Anfang bis Ende lesen kann, ja vielleicht sogar stellenweise mit Spannung.

Frau Diana Inkster danke ich für die Anfertigung eines wesentlichen Teils der Abbildungen, meinen Kollegen, Dipl.-Chem. Otto Frindik und Dr. Michael Heilgeist, für kritische Durchsicht des Manuskripts und für wertvolle Hinweise. Mein Dank gilt auch Dr. Norbert Czerwinski, Karlsruhe, Dipl.-Phys. Winfried Koelzer, Dettenheim, Dr. Heinz Müller, Neuherberg und Uwe Schöppler, Salzgitter, für tatkräftige Hilfe bei der Beschaffung von Bildmaterial.

# 1

## Grundlagen

### 1.1 Entdeckung der Radioaktivität

Man schrieb das Jahr 1896, als dem französischen Physiker Becquerel, Professor an der Ecole Polytechnique in Paris und in seinen letzten Lebensjahren Präsident der Akademie der Wissenschaften (Abb. 1.1), eine merkwürdige Entdeckung gelang. Beim Entwickeln fotografischer Platten zeigten sich Schwärzungen, die nicht durch Licht verursacht sein konnten. Er hatte die in schwarzes Papier lichtdicht verpackten Platten zusammen mit einem Uranpräparat aufbewahrt, und die Schwärzungen waren dort am stärksten, wo diese Uranprobe gelegen hatte. Von dem Uranpräparat musste eine Strahlung ausgegangen sein, die schwarzes Papier durchdringen und wie Licht auf Fotoplatten wirken konnte. Wie Becquerel weiter feststellte, erhöhte diese Strahlung die elektrische Leitfähigkeit der Luft – und dies um so stärker, je höher der Urananteil in dem Präparat war. Die Strahlung schien also von dem Element Uran auszugehen [1].

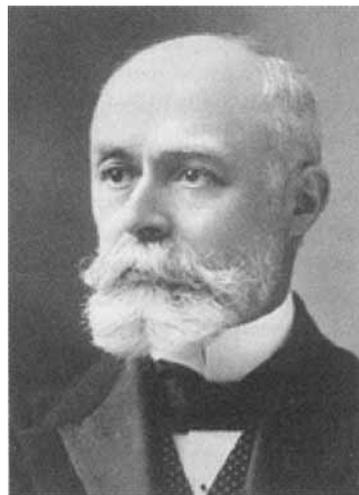
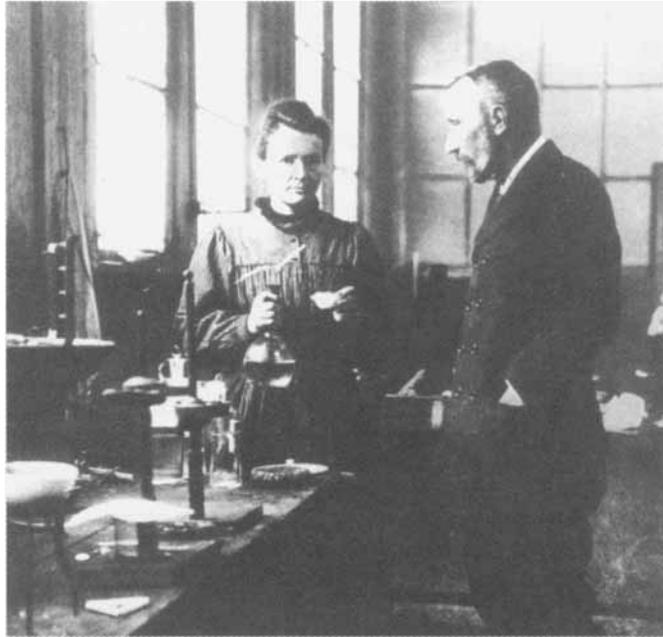


Abb. 1.1 Henry Becquerel, 1852–1908, Entdecker der Radioaktivität des Urans. Quelle: Verlag Wiley-VCH.

Nur wenige Monate vorher hatte der Würzburger Physikprofessor Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923) bei der Beobachtung elektrischer Entladungen in einer Vakuumröhre die von ihm als X-Strahlen bezeichneten und später nach ihm benannten Strahlen entdeckt. Auch sie können lichtdichtes Material durchdringen und Fotoplaten schwärzen; auch sie verstärken die elektrische Leitfähigkeit von Luft. Röntgen erkannte schnell die enorme Bedeutung seiner Entdeckung für die Medizin. Da Muskeln und Bindegewebe für Röntgenstrahlen stärker durchlässig sind als Knochen, konnten die Skeletteile eines Menschen auf Fotoplaten sichtbar gemacht werden – eine damals sensationelle Erfindung. Nachrichten darüber wurden innerhalb von Tagen um die ganze Welt verbreitet. Röntgen wurde 1901 mit dem erstmals verliehenen Nobelpreis für Physik geehrt.

Während die Schwärzung von Fotoplaten mit X-Strahlen der damals verfügbaren, wenig leistungsfähigen Apparate eine Belichtungszeit von Minuten benötigte, wurden mit den viel schwächer strahlenden Uranpräparaten die fotografischen Emulsionen oft erst nach tagelanger Einwirkung geschwärzt. Für die Abbildung von Knochen lebender Personen schienen also die *Rayons de Becquerel* ungeeignet. Die Wissenschaft interessierte sich daher mehr für die Röntgenstrahlen. Auch Becquerel selbst verfolgte zunächst seine Entdeckung nicht weiter. Das änderte sich, als die aus Polen nach Paris gekommene Marie Curie, geborene Sklodowska, das von ihm entdeckte Phänomen zum Thema ihrer Doktorarbeit machte. Sie wollte damit rasch vorankommen, und das lange Warten auf ausreichende Schwärzung von Fotoplaten war dabei hinderlich. Ein entscheidender Fortschritt gelang ihr, als sie begann, die Stärke der Becquerelstrahlung statt mit der Fotomethode mit einem von ihrem Mann Pierre Curie und dessen älterem Bruder Jacques entwickelten hochempfindlichen Galvanometer zu bestimmen. Da die Becquerelstrahlung die elektrische Leitfähigkeit der Luft erhöht, konnte ein durch ein bestimmtes Luftvolumen fließender schwacher elektrischer Strom durch Einwirken der Strahlung verstärkt werden. Der Messung dieser Veränderung der Stromstärke diente das Galvanometer.

Marie Curie prüfte unterschiedlichste Mineralien auf Strahlung und arbeitete die strahlenden Proben chemisch auf, um die in ihnen enthaltenen Anteile strahlenden Materials anzureichern. Wie sie bald erkannte, gibt nicht nur Uran, sondern auch das Element Thorium Strahlung ab. In dem Uranerz Pechblende aus Joachimsthal im Erzgebirge fand sie ein bis dahin unbekanntes, stärker als Uran oder Thorium strahlendes, sehr schwierig in Reinform zu gewinnendes Element, für das sie und Pierre zu Ehren ihres Heimatlandes den Namen Polonium vorschlugen. In der über diese Entdeckung berichtenden Veröffentlichung (*Sur une nouvelle substance fortement radio-active, contenue dans la pechblende*), die 1898 erschien, wird erstmals der Begriff Radioaktivität verwendet. Die Fortsetzung der mit ihrem Mann Pierre durchgeführten Arbeiten gipfelte in der Entdeckung eines weiteren hochradioaktiven Elements, das nach einem Vorschlag der Curies Radium genannt wird. Welche Schwierigkeiten die Isolierung von reinem Radium bereitete, kann man ahnen, wenn man erfährt, dass in einer Tonne Pechblende nur 1.4 g Radium enthalten sind. Marie und Pierre Curie (Abb. 1.2) erhielten 1903 gemeinsam die Hälfte des Physik-Nobelpreises, die andere Hälfte wurde Becquerel



**Abb. 1.2** Marie Curie, geb. Sklodowska, 1867–1934, und Pierre Curie, 1859–1906, gemeinsame Entdecker des Poloniums und des Radiums und Namensgeber für den Begriff „Radioaktivität“. Quelle: AIP Emilio Segre Visual Archives, Physics Today Collection.

zuerkannt. Nach dem tragischen Tod Pierres, der von einem Pferdefuhrwerk überfahren wurde, setzte Marie Curie die mühsamen Arbeiten zur Isolierung wägbarer Mengen von Radium aus Pechblende fort, um die chemischen und physikalischen Eigenschaften dieses Elements bestimmen zu können. Als erste Frau erhielt die Mutter von zwei Töchtern 1906 eine Professur an der Sorbonne und 1911 den Nobelpreis für Chemie. Immer mehr andere Forscher interessierten sich für dieses Arbeitsgebiet und bis 1913 war die Anzahl der bekannten „Radioelemente“ auf 40 gestiegen.

Der in Neuseeland gebürtige britische Physiker Ernest Rutherford (1871–1937) widmete sich der Erforschung der von radioaktivem Material ausgehenden Strahlung. Er fand zunächst zwei Komponenten: eine im Magnetfeld schwächer ablenkbare und eine in die entgegengesetzte Richtung stärker ablenkbare, die er  $\alpha$ - bzw.  $\beta$ -Strahlung nannte. Einer von dem französischen Physiker Paul Villard im Jahr 1900 entdeckten dritten, im Magnetfeld nicht ablenkbaren Komponente gab Rutherford den Namen  $\gamma$ -Strahlung. Das Verhalten der drei Strahlenarten und der später entdeckten positiv geladenen  $\beta$ -Teilchen (Positronen) im Magnetfeld wird in Abb. 1.3 schematisch dargestellt.

Wie Rutherford in Zusammenarbeit mit dem Chemiker Frederic Soddy beobachtete, lassen sich dort, wo  $\alpha$ -Strahlen auftreten, Spuren des Edelgases Helium

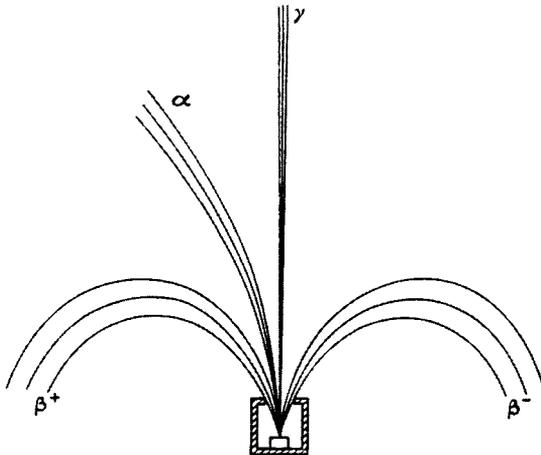


Abb. 1.3 Verhalten der von einer radioaktiven Quelle ausgehenden Strahlung im magnetischen Feld: starke Ablenkung von Elektronen ( $\beta^-$ ) und Positronen ( $\beta^+$ ), schwächere Ablenkung von  $\alpha$ -Teilchen, keine Ablenkung von  $\gamma$ -Strahlen. Quelle: [2].

## Strahlenarten und ihre Eigenschaften

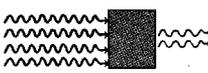
Strahlenart	maximale Reichweite	
	in Luft	in Gewebe
Alpha-Strahlen  Heliumkern 	bis 12 cm	bis 0,15 mm
Beta-Strahlen  Elektron 	bis 15 m	bis 2 cm
Gamma-Strahlen 	35 - 100 m	5 - 15 cm
	Schwächung auf die Hälfte	

Abb. 1.4 Strahlenarten und ihre Reichweite in Luft und in Körpergewebe. Quelle: [3].

nachweisen. In weiteren Untersuchungen erwiesen sich  $\alpha$ -Strahlen als zweifach positiv geladene Heliumteilchen,  $\beta$ -Strahlen als Elektronen (einfach negativ geladene Teilchen) und die  $\gamma$ -Komponente als ladungsfrei und sehr durchdringend, ähnlich den Röntgenstrahlen. Eine Vorstellung vom sehr unterschiedlichen

Durchdringungsvermögen der drei Strahlenarten gibt Abb. 1.4.  $\alpha$ -Strahlen können kaum ein Blatt Papier durchdringen, ein Aluminiumblech oder eine kräftige Glasscheibe schützen vor  $\beta$ -Strahlen, während zum Schutz vor  $\gamma$ -Strahlen dicke Bleimauern oder Betonwände erforderlich sind<sup>1)</sup>.

Die Existenz strahlender Elemente war für die Wissenschaft zunächst völlig rätselhaft. Woher kam die Energie, die die Atome eines radioaktiven Elements ständig Strahlung abgeben ließ? Unverständlich war auch, wieso die Radioaktivität mancher Elemente konstant zu bleiben schien, so bei Uran, Thorium und Radium, während Polonium in vier bis fünf Monaten die Hälfte seiner Aktivität verlor. Warum gaben manche Elemente nur  $\beta$ -Strahlen ab, andere nur  $\alpha$ -Strahlen und wieder andere außerdem  $\gamma$ -Strahlen? Atome galten damals als die kleinste Einheit aller Materie und als völlig stabil, unwandelbar, unteilbar. Wenn aber Atome Teilchen und Energie abgaben, dann konnten sie weder unteilbar noch unwandelbar sein. Es bedeutete eine Revolution des naturwissenschaftlichen Denkens, als sich zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts die Erkenntnis durchsetzte, dass Atome aus noch kleineren Einheiten bestehen, und dass manche Elemente instabil sind und sich in andere umwandeln [4].

## 1.2

### Struktur der Materie

Rutherford, der 1908 den Nobelpreis für Chemie erhalten hatte, schlug 1911 ein Atommodell vor, in dem ein positiv geladener Atomkern von *Elektronen* umhüllt oder umkreist wird, ähnlich wie die Sonne von Planeten. Die Zahl der positiven Ladungen im Kern ist der Zahl der Elektronen in der Hülle gleich, das Atom insgesamt also elektrisch neutral. Unter bestimmten Bedingungen kann ein Atom ein Elektron aus der Hülle verlieren. Dann überwiegt die Zahl der positiven Ladungen die der negativen. Aus dem Atom ist ein positiv geladenes *Ion* (Kation) geworden. Nimmt ein Atom ein zusätzliches Elektron in die Hülle auf, überwiegen die negativen Ladungen. Aus dem Atom wird ein negativ geladenes Ion (Anion). Die bereits von den Curies zur Messung der Radioaktivität genutzte Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit der Luft wird durch Ionisierung von in der Luft vorhandenen Atomen bewirkt. Je mehr Ionen in der Luft, desto höher die Leitfähigkeit. Eine Strahlung, die dazu in der Lage ist, Ionen zu erzeugen, wie  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - oder Röntgenstrahlen, bezeichnet man als *ionisierende Strahlung*.

Was Rutherford zunächst noch nicht wusste: die Atomkerne bestehen aus *Protonen*, die eine positive Ladung tragen und (mit Ausnahme des Wasserstoffs) aus ungeladenen *Neutronen*. In Abb. 1.5 wird dies schematisch für die Beispiele Wasserstoff (1 Proton, 1 Elektron), Helium (2 Protonen, 2 Neutronen, 2 Elektronen) und Kohlenstoff (6 Protonen, 6 Neutronen, 6 Elektronen) demonstriert.

1) Das geringe Durchdringungsvermögen der  $\alpha$ -Strahlen darf nicht zu der Annahme verleiten, diese Strahlen seien weniger biologisch wirksam. Gerade weil diese Strahlen beim

Eindringen in Materie auf kurzer Strecke ihre gesamte Energie abgeben, sind inkorporierte  $\alpha$ -Strahler biologisch besonders wirksam.

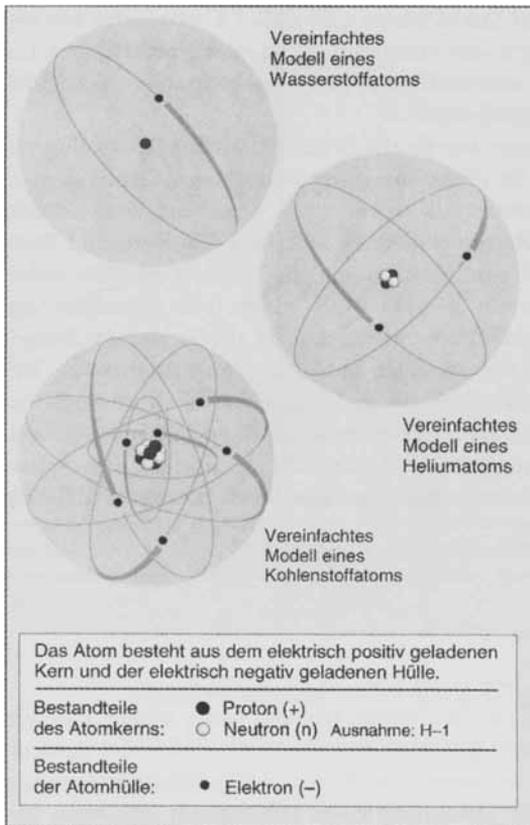


Abb. 1.5 Atome in vereinfachter Modelldarstellung. Quelle: [5].

Die Zahl der Protonen wird als *Kernladungszahl* bezeichnet oder als *Ordnungszahl*, weil sie die Anordnung im Periodischen System der Elemente angibt. Die Summe von Protonenzahl und Neutronenzahl heißt *Massenzahl*. Zur Kennzeichnung des Kernaufbaus wird die Massenzahl oben links und die Kernladungszahl unten links neben das chemische Symbol des Elements gesetzt. Also für die Beispiele in Abb. 1.5:  ${}^1_1\text{H}$  für Wasserstoff,  ${}^4_2\text{He}$  für Helium und  ${}^{12}_6\text{C}$  für Kohlenstoff. Da die Kernladungszahl für jedes Element festliegt, die Massenzahl aber verschieden sein kann, wird oft eine abgekürzte und leichter zu schreibende Darstellung gewählt, bei der lediglich die Massenzahl, ohne Hoch- oder Tiefstellung, mit Bindestrich rechts neben das Symbol oder den Namen des Elements geschrieben wird. Also zum Beispiel C-12 oder Kohlenstoff-12. Protonen und Neutronen haben fast die gleiche Masse. Die Masse des Elektrons beträgt nur ungefähr  $1/2000$  derjenigen des Protons. Das ist ein so geringer Betrag, dass man ihn bei der Betrachtung der Atommassen meist vernachlässigt. Der Atomkern ist, obwohl er fast die gesamte Masse des Atoms enthält, im Vergleich zur Hülle außerordentlich klein, viel kleiner als man dies in Abb. 1.5 graphisch darstellen kann. Beim Was-

serstoffatom zum Beispiel ist der Durchmesser des Kerns fast 100000-mal kleiner als der der Hülle. Das Innere des Atoms ist also weitgehend leer.

Die in Abb. 1.5 dargestellten Atomkonfigurationen sind aber nicht die einzigen, in denen die dort genannten drei Elemente vorkommen. Die Atome jedes Elements können bei gleicher Protonenzahl eine unterschiedliche Neutronenzahl besitzen. Solche Atome gleicher Kernladungszahl, aber mit unterschiedlicher Massenzahl, bezeichnet man als *Isotope*. Die Isotope eines Elements unterscheiden sich nicht in ihren chemischen, wohl aber in ihren kernphysikalischen Eigenschaften. Beispielfhaft werden in Tab. 1.1 Isotope von Wasserstoff, Helium und Kohlenstoff genannt. Wasserstoff kommt demnach in der Natur ganz überwiegend als H-1 vor. Stabil ist aber auch H-2, der in sehr geringer Menge vorkommende schwere Wasserstoff, auch Deuterium genannt. Tritium (H-3 oder T) wird in hohen Schichten der Atmosphäre durch Einwirkung kosmischer Strahlen auf Stickstoff erzeugt (Kapitel 2). Es ist instabil und zerfällt unter Abgabe von Elektronen. Stabiles Helium besteht ganz überwiegend aus He-4, mit einem sehr kleinen Anteil He-3. Künstlich können auch He-6 und He-8 erzeugt werden, beide sind instabil. Kohlenstoff kommt überwiegend als C-12 vor, aber auch C-13 ist stabil. Die leichteren Isotope C-9, -10 und -11 zerfallen unter Abgabe von positiv geladenen  $\beta$ -Teilchen, auch *Positronen* oder Antielektronen genannt, die schwereren, mehr als sieben Neutronen enthaltenden Isotope unter Abgabe von Elektronen. Wie das Tritium entsteht der Kohlenstoff-14 durch Einwirkung kosmischer Strahlen auf Stickstoff (Kapitel 2) und wird unter Abgabe von einem Elektron zum stabilen Stickstoff (N-14) umgewandelt. Instabile Atomarten bezeichnet man als *Radionuklide*.

Tab. 1.1 Isotope der Elemente Wasserstoff, Helium und Kohlenstoff

Element	Anzahl der Protonen	Isotopen-symbol	Anzahl der Neutronen	Häufigkeit stabiler Isotope im natürl. Isotopengemisch (%)	Stabilität bzw. Art des Zerfalls
Wasserstoff (Deuterium) (Tritium)	1	H-1	0	99,985	stabil
		H-2	1	0,015	stabil
		H-3	2	–	$\beta^-$ -Zerfall
Helium	2	He-3	1	0,000138	stabil
		He-4	2	99,99862	stabil
		He-6	4	–	$\beta^-$ -Zerfall
		He-8	6	–	$\beta^-$ -Zerfall
Kohlenstoff	6	C-9	3	–	$\beta^+$ -Zerfall
		C-10	4	–	$\beta^+$ -Zerfall
		C-11	5	–	$\beta^+$ -Zerfall
		C-12	6	98,9	stabil
		C-13	7	1,1	stabil
		C-14	8	–	$\beta^-$ -Zerfall
		C-15	9	–	$\beta^-$ -Zerfall
		C-16	10	–	$\beta^-$ -Zerfall

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, sind die Isotope nur dann stabil, wenn das Verhältnis von Neutronen zu Protonen 1:1 oder, wie im Fall des C-13, etwas größer als 1:1 ist. Ein Isotop, das durch zu viele Neutronen im Atomkern instabil ist, wird unter Elektronenabgabe in ein stabiles Isotop mit einer um eine Einheit höheren Ordnungszahl umgewandelt. So wird z. B. aus Tritium ( ${}^3_1\text{H}$ ) stabiles Helium ( ${}^3_2\text{He}$ ). Sind die Protonen in der Überzahl, erfolgt unter Positronenabgabe eine Umwandlung in ein stabiles Isotop mit einer um eine Einheit niedrigeren Ordnungszahl, z. B. wird aus  ${}^{11}_6\text{C}$  das Borisotop  ${}^{11}_5\text{B}$ .

Ein Zerfall unter Abgabe von  $\alpha$ -Teilchen findet im Bereich der bisher besprochenen Elemente mit niedriger Ordnungszahl (und damit auch niedriger Massenzahl) nicht statt, wohl dagegen bei schweren Elementen, wie Radium. Das schwerste natürliche, also nicht menschlichen Aktivitäten entstammende, Isotop, ist das Uranisotop U-238, dessen Kern aus 92 Protonen und 146 Neutronen besteht<sup>2)</sup>. Das Verhältnis Neutronen zu Protonen liegt hier erheblich über dem bei leichten Elementen vorhandenen 1:1. Alle Isotope der Elemente mit Ordnungszahlen über 83 (Wismut) sind radioaktiv.

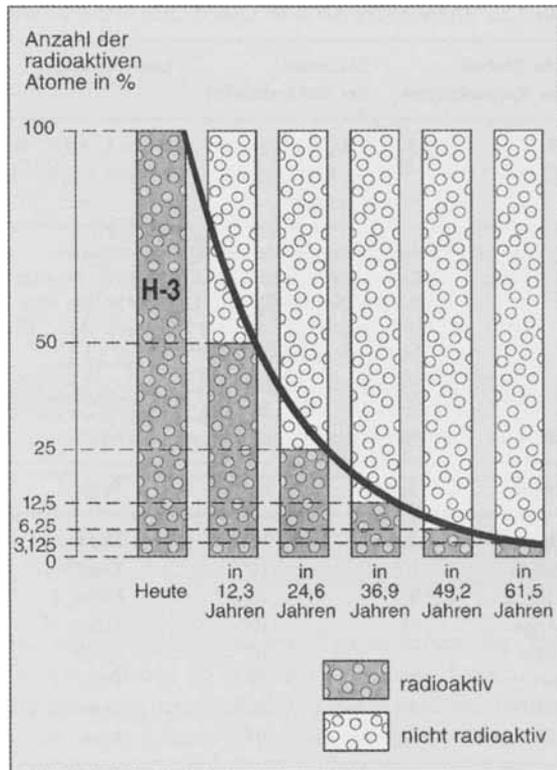
Nicht in jedem Fall kann durch eine einzige Kernumwandlung der Übergang von einem instabilen Radionuklid in ein stabiles Nuklid erreicht werden. Häufig erfolgt über mehrere instabile Zwischenstufen die Umwandlung in ein stabiles Endprodukt. Rutherford war mit seinem Kollegen Frederic Soddy, der den Begriff „Isotop“ eingeführt hat und 1921 den Chemienobelpreis erhielt, bereits 1905 zu der Erkenntnis gekommen, dass Radium ( ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ ) unter Abgabe von  $\alpha$ -Strahlung in ein gasförmiges Element übergeht, damals Emanation genannt, heute Radon ( ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ ), das wiederum unter  $\alpha$ -Strahlung in das Poloniumisotop  ${}^{218}_{84}\text{Po}$  und über weitere instabile Zwischenstufen, unter Abgabe von  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Strahlung, letztendlich zum stabilen Bleisotop  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$  wird.

Die Instabilität der Radionuklide ist sehr unterschiedlich. Man drückt sie durch ihre *Halbwertszeit* (HZ) aus; die Zeit, die vergeht, bis nur noch die Hälfte der ursprünglich vorhandenen radioaktiven Atomkerne vorhanden ist. Radium-226 zerfällt mit einer HZ von 1600 Jahren. Die HZ von Polonium-210 beträgt 138 Tage, die von Polonium-218 etwa 3 Minuten und die von Polonium-214 nur 164 Mikrosekunden. Kein Wunder, dass die Curies große Schwierigkeiten hatten, reines Polonium zu isolieren. Es zerfiel ihnen unter den Händen. Tritium, mit einer HZ von 12,3 Jahren, dient in Abb. 1.6 als Beispiel für den Zeitverlauf des radioaktiven Zerfalls. Jedes Radionuklid hat eine charakteristische HZ, die durch äußere Bedingungen, wie Hitze oder Druck, nicht beeinflusst werden kann<sup>3)</sup>.

2) Bei der Entstehung unseres Sonnensystems vor etwa 4,5 Milliarden Jahren wurden auch Transurane gebildet, Elemente mit Ordnungszahlen über 92. Wegen ihrer hohen Instabilität sind sie inzwischen zerfallen. Lediglich von damals entstandenem Plutonium-244 konnten Spuren in einem kalifornischen Cer-Mineral entdeckt werden.

3) Genauer sollte man hier von  $\text{HZ}_{\text{phys}}$ , der physikalischen Halbwertszeit sprechen, da es auch eine biologische Halbwertszeit gibt, wie wir weiter unten sehen werden. Wenn HZ ohne weitere Kennzeichnung verwendet wird, steht dies immer für  $\text{HZ}_{\text{phys}}$ .

**Abb. 1.6** Zerfall einer gegebenen Menge radioaktiven Tritiums im Verlauf der Zeit. Die Anzahl der radioaktiven Atome nimmt während jeder Halbwertszeit auf die Hälfte der jeweiligen Ausgangsmenge ab. Quelle: [5].



Der radioaktive Zerfall bedeutet immer den Übergang von einem höheren zu einem niedrigeren Energieniveau. Die Energie des bei einem radioaktiven Zerfall abgestrahlten  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Teilchens entspricht meist nicht genau der Energiedifferenz zwischen dem Radionuklid und dem daraus entstehenden stabilen Nuklid. Die überschüssige Energie tritt als  $\gamma$ -Strahlung auf. Die Energie der abgestrahlten Teilchen und  $\gamma$ -Strahlen ist für jedes Radionuklid charakteristisch und kann zu dessen Identifizierung dienen.

Wie erwähnt, diente den Curies und anderen Pionieren der Erforschung der Radioaktivität die Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Luft als Maß für die Radioaktivität eines Präparats. Sobald wägbare Mengen Radium zur Verfügung standen, wurden diese zur Standardisierung der Messungen anderer Proben verwendet. Der Bezug auf die von 1 g Radium ausgehende Strahlung bürgerte sich ein und führte zum *Curie* (Ci) als Maßeinheit. Bei Einführung des Internationalen Standard Systems (SI-System, s. Kapitel 4) musste das Curie dem *Becquerel* als Maßeinheit weichen. Ein Becquerel (Bq) bedeutet eine Kernumwandlung pro Sekunde. Die Radioaktivität pro Gewichtseinheit (Bq/kg) bezeichnet man als *spezifische Aktivität*, die Radioaktivität pro Volumeneinheit (Bq/m<sup>3</sup>) als *Aktivitätskonzentration*.

Tab. 1.2a Umrechnung der alten Einheit Curie in die SI-Einheit Becquerel

Alte Einheit der Radioaktivität	SI-Einheit der Radioaktivität	Umrechnung
Ci (Curie)	1 Bq (Becquerel) = 1 Kernzerfall/ Sekunde	1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq oder 37 GBq (Gigabecquerel) <sup>a)</sup> 1 Bq = $2,7 \times 10^{-11}$ Ci oder 27 pCi (Pikocurie)

a) Die verwendeten Präfixe werden in Tab. 1.2b erläutert

Beispiele: 1 pCi (Pikocurie) oder  $10^{-12}$  Ci =  $3,7 \times 10^{-2}$  Bq oder 37 mBq (Millibecquerel)  
1 MCi (Megacurie) oder  $10^6$  Ci =  $3,7 \times 10^{16}$  Bq oder 37 Pbq (Petabecquerel)  
1 MBq (Megabecquerel) oder  $10^6$  Bq =  $2,7 \times 10^{-5}$  Ci oder 27 Ci (Mikrocurie)  
1 TBq (Terabecquerel) oder  $10^{12}$  Bq = 27 Ci

Tab. 1.2b Dezimale Vielfache und Teile von Einheiten

Präfix	Symbol	Faktor	Präfix	Symbol	Faktor
Deka	da	10	Dezi	d	$10^{-1}$
Hekto	h	$10^2$	Zenti	c	$10^{-2}$
Kilo	k	$10^3$	Milli	m	$10^{-3}$
Mega	M	$10^6$	Mikro	$\mu$	$10^{-6}$
Giga	G	$10^9$	Nano	n	$10^{-9}$
Tera	T	$10^{12}$	Piko	p	$10^{-12}$
Peta	P	$10^{15}$	Femto	f	$10^{-15}$
Exa	E	$10^{18}$	Atto	a	$10^{-18}$

Der Zusammenhang zwischen alten und neuen Einheiten ist Tab. 1.2a zu entnehmen. Hier wird deutlich, dass 1 Ci eine sehr hohe, 1 Bq dagegen eine sehr geringe Radioaktivität bedeutet. Da 1 g Radium 1 Ci entspricht, geht aus der Tabelle auch hervor, dass in 1 g Radium pro Sekunde 37 Milliarden Kernumwandlungen stattfinden. Da die Größenordnung von Radioaktivitätsangaben teils in Zehnerpotenzen, teils mit Präfixen angezeigt wird, soll Tab. 1.2b den Umgang mit diesen unterschiedlichen Darstellungsweisen erleichtern<sup>4)</sup>.

Alles bisher über den Aufbau des Atoms Gesagte bezieht sich auf Rutherfords Atommodell von 1911, ergänzt um die Kenntnis der 1932 von James Chadwick entdeckten Neutronen und der im selben Jahr von C. D. Anderson beschriebenen Positronen. Niels Bohr und Arthur Sommerfeld haben das Gedankengut der Planck'schen Quantentheorie auf dieses Atommodell angewandt und dadurch das

4) Missverständnisse entstehen immer wieder durch die Existenz zweier Systeme für die Bezeichnung von Zahlen über einer Million. Nach dem „amerikanischen System“, das auch in Frankreich verwendet wird, gilt:  $10^9 = 1$  Billion,  $10^{12} = 1$  Trillion,  $10^{15} = 1$  Quadrillion,  $10^{18} = 1$  Quintillion. Nach dem „britischen System“, das auch in Deutschland

üblich ist, gilt:  $10^9 = 1$  Milliarde,  $10^{12} = 1$  Billion,  $10^{15} = 1$  Billionarde,  $10^{18} = 1$  Trillion,  $10^{24} = 1$  Quadrillion. Ausdrücke wie „Eine Trillion Becquerel“ sollten unbedingt vermieden werden, denn das könnten  $10^{12}$  oder  $10^{18}$  Bq sein. Mit „1 TBq“ nach Tab. 1.2b sind dagegen eindeutig  $10^{12}$  Bq gemeint.



Abb. 1.7 Der schwierige Umgang mit Atomen – aus der Sicht des Karikaturisten Ivan Steiger in der FAZ vom 8. Mai 2001 (mit Genehmigung der Frankfurter Allgemeinen Zeitung).

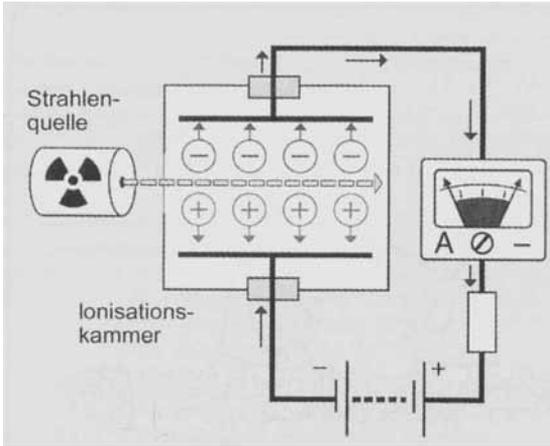
Verständnis für die chemischen und spektroskopischen Eigenschaften der Elemente außerordentlich erweitert. Sie konnten so auch die Kernkräfte berechnen, die verhindern, dass die Anhäufung sich gegenseitig abstoßender positiver Ladungen in stabilen Atomkernen zu einem Auseinanderbrechen des Kerns führt. Für das Verständnis der hier zu besprechenden Themen ist jedoch ein Eingehen auf das Bohr-Sommerfeldsche Modell ebensowenig erforderlich, wie eine Darstellung der zahlreichen weiteren Elementarteilchen des Atoms, die in neuerer Zeit entdeckt wurden (Quarks, Leptonen, Bosonen usw.). Mehr über Atombau und Radioaktivität bei [2]. Einfach scheint das Geschäft der Atomphysiker jedenfalls nicht zu sein (Abb. 1.7).

### 1.3

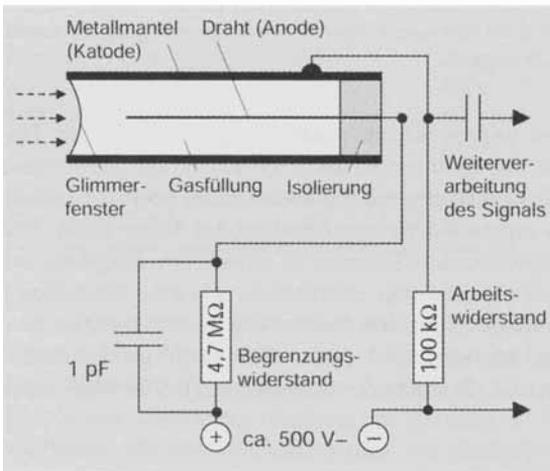
#### Strahlungsmessung

Radioaktivität lässt sich sehr gut messen, leichter als beispielsweise chemische Umweltstoffe. Schon mit einem einfachen Messgerät kann man ohne besondere Probenaufbereitung einen einzelnen zerfallenden Atomkern unter  $10^{18}$  nichtradioaktiven Atomen erkennen. Eine eingehende Vorstellung der verfügbaren Geräte und Messmethoden ist hier nicht möglich, es sollen nur die wichtigsten Verfahren kurz resümiert werden. An einer gründlicheren Darstellung interessierte Leser seien auf die Fachliteratur hingewiesen, die Werke vom Taschenbuch [6, 7] bis zum Handbuch [8] und zur detaillierten Messanleitung bietet [9].

Nachweis und Messung von Radioaktivität beruhen auf der Feststellung der ionisierenden Wirkung der von radioaktivem Material ausgesandten Strahlung. Von



**Abb. 1.8** Schematische Darstellung einer Ionisationskammer. Quelle: [5].



**Abb. 1.9** Schnitt durch ein gasgefülltes Endfensterzählrohr („Geiger-Zähler“). Quelle: Informationskreis KernEnergie [10].

der Wirkung auf Fotoplatten war bereits die Rede. Dieses Prinzip wird heute in großem Umfang in den Filmdosimetern verwendet, die alle in Radioaktivitäts-Kontrollbereichen tätigen Personen am Körper tragen müssen. Die *Film dosimeter* bestehen aus einer lichtdichten Kunststoffkassette, die einen Fotofilm enthält, der auf mehreren Feldern mit verschiedenen Metallfiltern abgedeckt ist. Wird die Kassette von  $\gamma$ -Strahlen getroffen, hat dies eine Trübung des Films zur Folge, die mit speziellen Geräten gemessen werden kann. Aus der unterschiedlich starken Trübung des Films hinter den Metallfiltern lassen sich Rückschlüsse auf die Energie der Strahlung und auf die vom Träger der Kassette empfangene Strahlendosis ziehen.

Das Prinzip der Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Luft und der Verstärkung der Leitfähigkeit durch ionisierende Strahlen wird in der *Ionisationskam-*

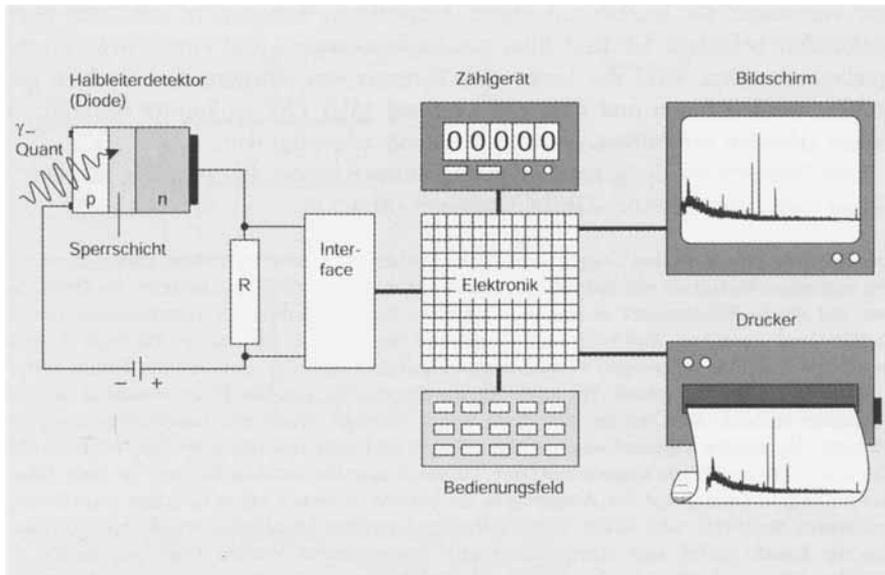
mer verwendet. Sie besteht aus einem luftgefüllten Behälter, in dem sich zwei Elektroden befinden. Sie sind über ein Strommessgerät mit einer Gleichstromquelle verbunden. Wird das Innere der Kammer von ionisierenden Strahlen getroffen, werden Ionen und Elektronen erzeugt (Abb. 1.8). Es kommt dadurch zu einem erhöhten Stromfluss, der vom Messgerät angezeigt wird.

Eine Weiterentwicklung der Ionisationskammer ist das *Endfensterzählrohr*, auch Geiger- oder Geiger-Müller-Zählrohr genannt (Abb. 1.9).

Der deutsche Physiker Hans Geiger, Schüler von Rutherford, erfand 1909 einen Partikeldetektor, der aus einem Metallrohr mit stabförmiger Elektrode in der Zylinderachse bestand; die Elektrode war mit einem Elektrometer verbunden. Das Rohr war mit Luft unter vermindertem Druck gefüllt, und zwischen Elektrode und Rohrwand wurde eine Spannung angelegt. Geiger beschrieb 1913 eine verbesserte Version seines Zählrohrs, das nun eine in einer feinen Spitze auslaufende Elektrode erhielt. Im stark inhomogenen Feld um die Elektrodenspitze ist die Feldstärke so hoch, dass von der Strahlung primär erzeugte Ionen eine Ionenlawine auslösen können. Als weitere Verbesserung versahen Geiger und sein Doktorand Walther Müller 1923 das Zählrohr mit einem Röhrenverstärker. Dieses Geiger-Müller-Zählrohr war für viele Jahre das wichtigste Instrument der Atomphysik. Es besteht in seiner heute üblichen Ausführung aus einem Metallrohr oder einem innen mit aufgedampftem Metallbelag versehenen Glasrohr, das die Katode bildet, und einem innen axial angeordneten dünnen Draht als Anode.  $\beta$ -Strahlen können durch ein sehr dünnes Glimmerfenster in das Rohr eintreten, während  $\gamma$ -Strahlen auch die Metall- oder Glaswand des Rohrs durchdringen können.

Das Rohr ist bei Unterdruck mit einem Gemisch von Edelgasen mit verschiedenen Zusätzen gefüllt. An die Elektroden wird eine Spannung von etwa 500 V gelegt. Im Innern des Rohrs durch ionisierende Strahlen entstandene Ionen werden durch die Spannung so stark beschleunigt, dass sie beim Auftreffen auf Moleküle der Gasfüllung weitere Ionen bilden. Ein Ionenpaar kann so bis zu  $10^8$  Ionen und Elektronen erzeugen. Es entsteht dadurch ein Stromstoß, der elektronisch verarbeitet und durch ein Zählgerät als Impuls registriert wird. Je nach Detektorfenster und Zählrohrgehäuse werden nur  $\gamma$ - oder  $\beta$ - plus  $\gamma$ -Strahlen nachgewiesen, unter bestimmten Bedingungen auch  $\alpha$ -Teilchen. Bei verhältnismäßig niedrigen Spannungen arbeitet das Zählrohr als *Proportionalzähler*, mit dem verschiedene Strahlenarten getrennt registriert werden können. Bei hoher Spannung werden auch schwach ionisierende Teilchen registriert, doch ist eine Unterscheidung verschiedenartiger Strahlenarten nicht mehr möglich. Für den Einsatz als Monitorgerät wird die (meist digitale) optische Anzeige durch ein akustisches Signal ergänzt. Eine Messprobe mit erhöhter Radioaktivität wird so bereits durch ein verstärktes Knistern oder Pfeifen signalisiert.

Eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Radionukliden, die mit Ionisationskammer oder Geiger-Müller-Zählrohr nicht präzise möglich ist, erlaubt die  *$\gamma$ -Spektrometrie*. Da die  $\gamma$ -strahlenden Radionuklide  $\gamma$ -Quanten mit charakteristischer Energie aussenden, kann man durch Bestimmung dieser Energie erkennen, um welches Radionuklid es sich handelt. Das  $\gamma$ -Spektrometer besteht im Wesentlichen aus einem Detektor, einem elektronischen Zähler für die vom Detektor kommenden Spannungsimpulse, einem Computer, der die Spannungsimpulse nach der Energie der eingestrahlenen  $\gamma$ -Quanten sortiert und einem Bildschirm und Drucker zur Darstellung des  $\gamma$ -Spektrums (Abb. 1.10). Die senkrechten Linien (*Peaks*) im Spektrum erlauben durch ihre Position auf der die Energie charakterisierenden x-Achse die Zuordnung zu einem bestimmten Radionuklid, während die Höhe der Linie (y-Achse) die Zahl der Spannungsimpulse pro Energieintervall anzeigt (Abb. 1.11, S. 15).



**Abb. 1.10** Vereinfachte Darstellung eines Versuchsaufbaus zur Gammaskopie. Quelle: Informationskreis KernEnergie [10].

Als Detektor ist in Abb. 1.10 ein *Halbleiterdetektor* dargestellt, der im Prinzip aus einer Halbleiterdiode besteht. Dringt ein  $\gamma$ -Quant in die Sperschicht, werden Elektronen-Loch-Paare erzeugt. Der dadurch hervorgerufene geringe Strom führt an einem Arbeitswiderstand (R) zu einem Spannungsabfall, der elektronisch weiterverarbeitet wird. Jedes  $\gamma$ -Quant erzeugt einen Spannungsimpuls, der gezählt werden kann. Die Amplitude des Spannungsimpulses ist proportional zur Energie, die das Quant an das Halbleitermaterial abgegeben hat. Für die  $\gamma$ -Spektrometrie werden heute fast ausschließlich energetisch hochauflösende Halbleiterdetektoren aus Reinstgermanium eingesetzt. Statt des Halbleiterdetektors kann auch ein *Szintillationszähler* verwendet werden, der ein Szintillatormaterial enthält, das beim Auftreffen ionisierender Strahlung Fluoreszenzlicht aussendet. Die Lichtquanten werden in einem mit dem Szintillator gekoppelten Fotomultiplier in Elektronen umgewandelt und diese werden lawinenartig vervielfacht. Der im Multiplier abgegebene Impuls ist der im Szintillator aufgenommenen Energie proportional. Daher kann, wie beim Halbleiterdetektor, die Energie der Strahlung gemessen werden, was die Identifizierung einzelner Radionuklide erlaubt. Heute werden meist Flüssigkeitsszintillationszähler verwendet, in denen Messprobe und Szintillator nicht räumlich getrennt sind, sondern in einem geeigneten Lösungsmittel gemischt werden.

Während die Bestimmung von  $\gamma$ -strahlenden Radionukliden mittels  $\gamma$ -Spektrometrie keine besondere Probenvorbereitung erfordert und relativ schnell durchgeführt werden kann, ist die Bestimmung von  $\beta$ - und  $\alpha$ -Strahlern zeit- und arbeitsaufwändig. Zu den  $\beta$ -Strahlern zählt Strontium-90, dessen Vorkommen in Lebensmitteln von besonderem Interesse ist (Kapitel 3). Da Sr-90 in Messgeräten nicht von anderen  $\beta$ -Strahlern unterschieden werden kann, muss es zunächst durch aufwändige chemische Trennungsgänge als reines Strontiumsalz gewonnen werden. Beim ra-

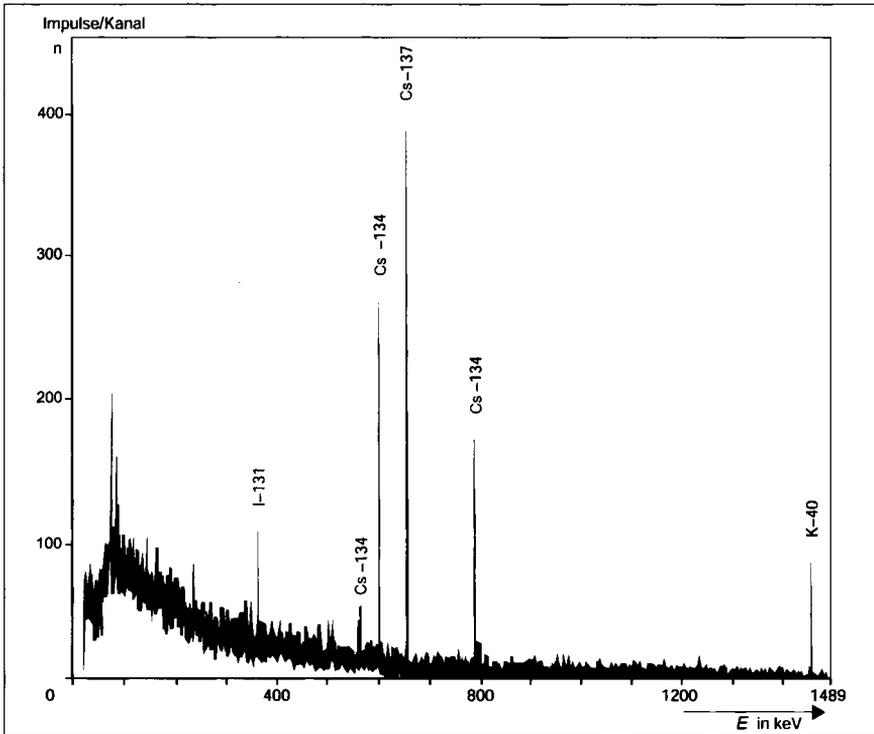


Abb. 1.11 Beispiel eines Gammaenergie-Spektrums. Neben den Linien der künstlichen Radionuklide Iod-131, Cäsium-134 und Cäsium-137 ist eine Linie zu erkennen, die von dem natürlichen Radionuklid Kalium-40 stammt. Quelle: Informationskreis KernEnergie [10].

radioaktiven Zerfall von Sr-90 entsteht Yttrium-90, ebenfalls ein  $\beta$ -Strahler. Misst man im Verlauf von Tagen oder – was genauere Ergebnisse liefert – von 2 bis 3 Wochen die Zunahme der Y-90-Aktivität, so kann man durch Rückextrapolation die Aktivität des ursprünglich vorhandenen Sr-90 berechnen.

Das Problem bei der Bestimmung von  $\alpha$ -Strahlern ist die äußerst geringe Eindringtiefe der ausgesandten Strahlung, die zum überwiegenden Teil bereits im Probenmaterial absorbiert wird. Sind, wie dies in der Praxis oft der Fall ist, sehr geringe Mengen mehrerer  $\alpha$ -Strahler in einer Probe vorhanden, z. B. Radionuklide des Urans, Plutoniums und Americiums, so müssen diese zuerst getrennt werden (Extraktion mit bestimmten Lösungsmitteln, Reinigung durch Ionenaustausch-Chromatographie). Aus den so gewonnenen Lösungen reiner Salze von Uran, Plutonium usw. wird das betreffende Radionuklid elektrolytisch in sehr dünner Schicht auf ein hochpoliertes Metallplättchen (Edelstahl oder Platin) abgeschieden und mit einem speziellen Detektor (Oberflächensperrschichtzähler) die  $\alpha$ -Aktivität bestimmt. Seltener werden Gitterionisationszähler eingesetzt.