

# 1

## Die Physik im 20. Jahrhundert



# Röntgenstrahlung und Radioaktivität

Mit unseren Besuchern betreten wir den Aufzug und drücken den Knopf »Moderne Physik«. Als sich die Tür im zweiten Obergeschoss öffnet, treten wir eine Halle, von der aus verschiedene Gänge sternförmig auseinanderlaufen.

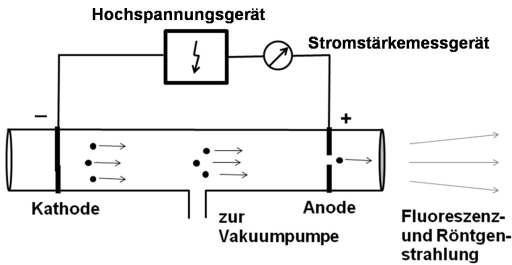
*Hanna schaut uns fragend an. »Wo geht's zu Einstein?«*

Nicht so schnell! Auch sein Zimmer werden wir besuchen, aber nicht sofort.

Im Hintergrund hört man ein unregelmäßiges Ticken. Wir gehen dem Geräusch nach – es ist das Ticken eines Geigerzählers – und erreichen den Raum, in dem die Führung beginnen soll. Es wird um Radioaktivität gehen, deren Entdeckung am Anfang der modernen Physik stand und deren Aufklärung die Physiker viele Jahrzehnte beschäftigte. Es war – wie so oft in der Physik – eine Zufallsentdeckung, die ihren Anfang mit dem Interesse an den Röntgenstrahlen nahm. Hätte Röntgen nicht »seine« Strahlen entdeckt, wer weiß, wann man auf die Radioaktivität aufmerksam geworden wäre. Aus diesem Grund wird die Führung mit Röntgen beginnen.

## Die Entdeckung der Röntgenstrahlen

Man weiß auf den Tag genau, wann die Strahlen, die heute Röntgens Namen tragen, entdeckt wurden, nämlich am 8. Nov. 1895. Wie viele Physiker seiner Zeit experimentierte auch Wilhelm Conrad Röntgen, Professor an der Universität Würzburg, mit einer Gasentladungsröhre, die mit ihren wesentlichen Komponenten im Bild 1 gezeigt ist. Es handelt sich um eine evakuierbare Glasröhre, d. h. eine Röhre, in der man mithilfe einer Pumpe den Druck erniedrigen kann. An den Enden sind zwei Metallkontakte, Kathode und Anode genannt, eingeschmolzen, an die eine Gleichspannung von mehre-



**Bild 1** Vereinfachte Darstellung der Gasentladungsröhre in Röntgens Experiment. Die an der Kathode austretenden negativen Elektronen (Pünktchen im Bild) werden zur positiv geladenen Anode hin beschleunigt. Einige fliegen durch die Öffnung und prallen auf die Glaswand, wodurch Fluoreszenz- und Röntgenstrahlung erzeugt wird.

ren Tausend Volt angeschlossen wird, der Minuspol an die Kathode und der Pluspol an die Anode. Herrscht in der Röhre Normaldruck, so zeigt das Messgerät keinen Strom an. Erst wenn durch Pumpen ein bestimmter Unterdruck erreicht ist, leuchtet das in der Röhre verbliebene Gas auf, und es fließt ein Strom. Sinkt der Druck weiter, erlischt das Leuchten im Gas, obwohl immer noch Strom fließt. Nur das schwache grünliche Leuchten (Fluoreszieren), das von dem Glas am Ende der Röhre hinter der Anode ausgeht, bleibt.

Dieses Verhalten war schon vor Röntgen bekannt. Man erklärte es damit, dass von der Kathode unsichtbare Strahlen, sogenannte Kathodenstrahlen, ausgehen, die auf ihrem Weg das Licht im Gas und die Fluoreszenzstrahlung in der hinteren Glaswand erzeugen. Heute weiß man, dass die Kathodenstrahlen aus Elektronen bestehen.

In einem seiner Versuche deckte Röntgen die Röhre mit schwarzem Papier ab, sodass es im Laboratorium ganz dunkel war. Neben der verdunkelten Röhre stand zufällig ein Leuchtschirm, der von einem früheren Versuch stehen geblieben war. Der Schirm leuchtete auf, als in der vollständig abgedunkelten Röhre bei angelegter Spannung der Druck erniedrigt wurde. Jetzt gab es für Röntgen zwei Möglichkeiten: Entweder er stellte den Schirm weg, um das störende Leuchten los zu werden, oder er ging dem unerwarteten Phänomen auf den Grund. Röntgens große Leistung besteht darin, dass er die zweite Alternative wählte. Erst damit wurde aus einer zufälligen Beobachtung eine wissenschaftliche Entdeckung.

Woher kam nun das Leuchten? Offenbar war in der Röhre eine Strahlung entstanden, die die Abdeckung durchdrang. Röntgen hielt verschiedene Materialien zwischen die abgedunkelte Röhre und den Schirm, um zu untersuchen, ob und wie sich das Leuchten auf dem Schirm veränderte. Papier und Holz schwächten die Strahlung kaum, während schwere Metalle einen Großteil der Intensität verschluckten. Röntgen fand auch heraus, dass die neuen Strahlen eine Fotoplatte schwärzten. Das war seine zweite wichtige Entdeckung, denn damit ließ sich die Wirkung der neuen Strahlen auch auf Bildern festhalten. Nicht die erste Aufnahme seiner eigenen Hand, sondern eine spätere, die die Hand Alfred von Kollikers zeigt, ist weltbekannt geworden (Bild 2). Jedem Mediziner, der dieses Foto sah, musste das Herz höher schlagen. Denn durch diese neuen Strahlen war der Mensch auf einmal durchsichtig geworden!



**Bild 2** Röntgenbild der Hand von Alfred von Kollikers. (© Copyright 2001 British Photographers' Liaison Committee/Finers Stephens Innocent. As agreed by BAPLA, AOP, NUJ, MPA and the BFP)

*»Ich wollte schon immer verstehen, wie eine Röntgenaufnahme zustande kommt. Können Sie das etwas Genauer erklären«, bittet Hanna.*

Die Schwächung der Röntgenstrahlen beim Durchgang durch Materie hängt von drei Faktoren ab: von der Art des Materials, der Dicke der Schicht, und von der Energie der Röntgenstrahlung, die mit der an der Röhre angelegten Spannung zusammenhängt. Trifft die in die Materie eindringende Strahlung auf die in den Atomen gebundenen Elektronen, so können Elektronen aus dem Atomverband herausgestoßen werden, was mit einer Schwächung der Strahlung verbunden ist. Dieser Prozess ist umso wichtiger, je größer die Kernladungszahl  $Z$  der chemischen Substanz ist. Zum Beispiel ist der Prozess in etwa achtmal stärker, wenn sich die Zahl  $Z$  nur ver-

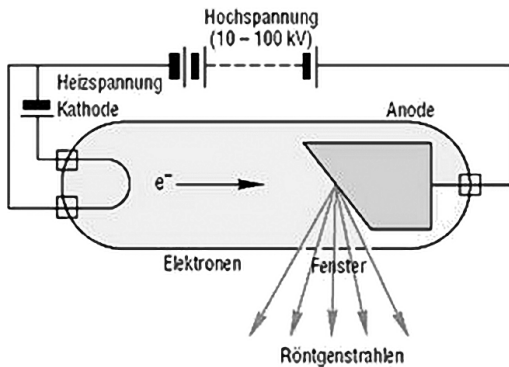
doppelt hat. Das lässt sich im Bild 2 gut erkennen: Während die kalziumhaltigen Knochen ( $Z = 20$ ) und der metallene Ring ( $Z = 47$  für Silber) die Strahlung stark schwächen und zu dunklen Stellen, eine Art »Schatten«, auf der Fotoplatte führen, absorbiert das umgebende Gewebe, das im Wesentlichen aus Wasser ( $Z = 1$  für Wasserstoff und  $Z = 8$  für Sauerstoff) besteht, die Röntgenstrahlung nur unwesentlich.

## Die Natur der Röntgenstrahlen

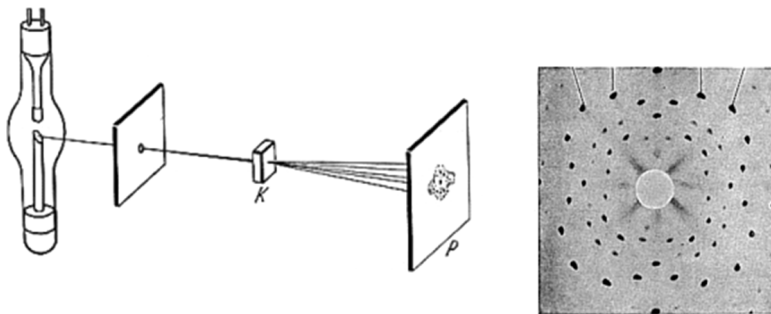
Heute erzeugt man Röntgenstrahlen in speziell konstruierten Röhren, deren Prinzip im Bild 3 dargestellt ist. Die Frage, um was für eine Strahlung es sich dabei handelt, wurde allerdings nicht von Röntgen selbst, sondern erst etwa 16 Jahre nach ihrer Entdeckung von Max von Laue beantwortet. Die Röntgenstrahlen gehören wie die Radiowellen und das sichtbare Licht zu den elektromagnetischen Wellen, wobei sich die drei Formen nur durch ihre Wellenlängen unterscheiden. Die Wellenlänge der Röntgenstrahlung hängt von der an der Röhre anliegenden Spannung ab, wobei gilt: je höher die Spannung zwischen Kathode und Anode, desto kleiner die Wellenlänge. Die Strahlen entstehen, wenn die Elektronen der Kathodenstrahlen auf ihrem Weg zur Anode auf hohe Energien beschleunigt und dann plötzlich in der Anode abgebremst oder abgelenkt werden. Dabei wird – wie bei einer Antenne – elektromagnetische Strahlung ausgesandt.

Mit der im Bild 4 gezeigten Apparatur wiesen von Laue und seine Mitarbeiter den Wellencharakter der Röntgenstrahlung nach. Sie schickten die Strahlung durch einen Kristall und registrierten auf einer Fotoplatte hinter dem Kristall ein »Interferenzmuster« aus regelmäßig angeordneten hellen Flecken. Interferenz tritt bei der Überlagerung von zwei oder mehreren Wellen auf und wird später genauer besprochen.

In einer Röntgenröhre, die mit einer Spannung von 10 000 Volt betrieben wird, entsteht ein Spektrum von Röntgenstrahlen, deren kürzeste Wellenlänge  $\lambda = 0,1$  Nanometer beträgt. Dieser Wert ist nur wenig größer als der Durchmesser eines Wasserstoffatoms.



**Bild 3** Röntgenröhre. In eine evakuierte Glasröhre sind zwei Metallelektroden, Kathode und Anode, eingeschmolzen. Die Kathode ist heizbar, sodass dort durch Glühemission Elektronen ( $e^-$ ) freigesetzt werden, während die Anode häufig mit Wasser gekühlt wird. Im Betrieb sind Anode und Kathode an ein Hochspannungsgerät angeschlossen, wobei die angelegten Spannungen von einigen 1000 bis zu etwa 100 000 Volt variieren können. Die Elektronen treten aus der Kathode aus, werden zur Anode hin beschleunigt, schlagen dort mit großer Energie auf und werden abgebremst oder abgelenkt. Dabei wird Röntgenstrahlung ausgesandt.



**Bild 4** Die Versuchsanordnung, mit der Max von Laue die Natur der Röntgenstrahlung untersuchte. Die durch eine Lochblende gebündelten Strahlen durchdringen einen Kristall (K) und werden auf einer Fotoplatte aufgefangen, wo sie ein charakteristisches Interferenzmuster hinterlassen. Dieses ist in vergrößerter Form auf dem rechten Bild gezeigt. Da es sich um ein Negativ handelt, wird an den dunklen Punkten besonders viel Intensität registriert.

*Hanna unterbricht: »Stopp! Was sind Nanometer?«*

Die Vorsilbe »nano« steht für »ein Milliardstel«. Ein Nanometer, abgekürzt 1 nm, ist also der Milliardste Teil eines Meters. Oder in Zahlen:  $1 \text{ nm} = 0,000\,000\,001 \text{ m} = 10^{-9} \text{ m}$ . Zum Vergleich: sichtbares Licht hat Wellenlängen zwischen 400 und 800 Nanometern.

Röntgenstrahlen sind also in ihrer Natur nichts anderes als sichtbares Licht, von dem sie sich nur durch ihre wesentlich kleinere Wellenlänge unterscheiden.

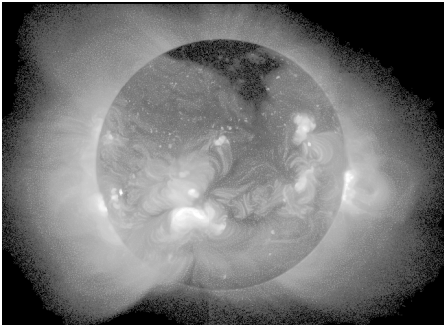
## **Röntgenstrahlen heute**

In unserer Zeit sind Röntgenstrahlen selbst kein Objekt der Forschung mehr, sondern ein Werkzeug für Forschung und Anwendung. Dabei ist die medizinische Anwendung am bekanntesten. Wohl jeder ist schon mehrmals in seinem Leben »durchleuchtet« worden. Auch hier hat es seit Röntgen wesentliche Fortschritte gegeben. Neben qualitativen Verbesserungen bei den Röntgenröhren und den Nachweisgeräten gab es eine prinzipielle Neuerung, die Computertomographie (CT), die aus der Verbindung von Röntgenbildern und Computerauswertung hervorging. Sie erlaubt es, dreidimensionale Bilder vom Inneren des Menschen aufzunehmen.

*»Da die Wellenlänge von Röntgenstrahlen mit der Größe von Atomen vergleichbar ist, benutzt der Chemiker die Strahlen auch, um die Struktur von Molekülen aufzuklären«, fügt Herr Weber hinzu. »Dazu wird ein Kristall aus den zu untersuchenden Molekülen hergestellt und in einen Röntgenstrahl gebracht. Aus der dabei entstehenden Interferenzfigur kann auf die Struktur der Moleküle zurückgeschlossen werden. Zum Beispiel wurde der Aufbau der DNA, die berühmte Doppelhelix, auf diese Weise entdeckt.«*

Während auf der Erde natürliche Quellen für Röntgenstrahlen selten sind, trifft man sie im Weltall recht häufig an. Die meisten astronomischen Objekte, die im sichtbaren Licht strahlen wie z. B. unsere Sonne, senden auch Röntgenstrahlung aus (siehe Bild 5). Ganz allgemein kann man sagen: Röntgenstrahlen entstehen in solchen Bereichen des Kosmos, in denen die Temperaturen sehr hoch (über eine Million Grad) sind, wie z. B. in der Sonnenkorona (der äußerste Teil der Sonnenatmosphäre). Allerdings ist es nicht einfach, die kosmische Röntgenstrahlung zu untersuchen, da sie von der Erdatmo-





**Bild 5** Ein »Bild« der Sonne im Röntgenlicht. Man erkennt verschiedene starke Quellen auf der Sonnenscheibe und auch deutlich außerhalb der Sonne in der sogenannten Korona.

sphäre vollständig absorbiert wird. Deshalb schickt man Röntgenteleskope mit einem Ballon in die obere Atmosphäre oder mit einem Satelliten in den Weltraum.

### Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923)



*»Welcher Natur die Strahlen sind, kommt für mich erst in zweiter Linie in Betracht. Die Tatsachen sind die Hauptsache.«*

Wilhelm Conrad Röntgen

**Bild 6** Wilhelm Conrad Röntgen (Fotogravyr General Stabens Litografiska Anstalt)

1901, fünf Jahre nach Alfred Nobels Tod, wurden die ersten Nobelpreise verliehen. Im Fach Physik erhielt ihn Wilhelm Conrad Röntgen für seine Entdeckung der durchdringenden Strahlung. Röntgen wurde in Lennep, heute ein Stadtteil von Remscheid, als einziger Sohn eines Kleiderfabrikanten geboren. Aus wirtschaftlichen Gründen zog die Familie drei Jahre nach seiner Geburt nach Apeldoorn in den Niederlanden, in das Geburtsland seiner Mutter. Dort besuchte

Wilhelm die Schule, ohne dass den Lehrern spezielle Begabungen aufgefallen wären. Er liebte die freie Natur und beschäftigte sich andererseits gern mit mechanischen Apparaten.

Mit 17 Jahren wechselte er auf eine technisch ausgerichtete Schule in Utrecht. Doch schon bald darauf wurde er von der Schule verwiesen, weil er eine Karikatur eines Lehrers angefertigt haben sollte. In Wahrheit jedoch hatte ein Mitschüler, den Röntgen nicht verraten wollte, die Zeichnung angefertigt.

Da Röntgen kein Abschlusszeugnis einer Schule nachweisen konnte, bewarb er sich am Polytechnikum in Zürich, der späteren Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH), wo er nach einer Prüfung aufgenommen wurde und ein Ingenieurstudium begann. Er besuchte Vorlesungen bei Clausius und arbeitete in Kundts Labor und wurde von diesen beiden Professoren stark geprägt. Nach seiner Promotion 1869 wurde er Kundts Assistent – zunächst an der Universität Zürich und dann in Würzburg.

Röntgen heiratete die Tochter eines Züricher Gastwirts. Die beiden hatten keine eigenen Kinder und adoptierten die Tochter eines Verwandten.

Mit 29 Jahren habilitierte sich Röntgen in Straßburg und wurde ein Jahr später außerordentlicher Professor an der Landwirtschaftlichen Akademie in Hohenheim. Danach folgten Professuren in Straßburg und Gießen und ab 1888 in Würzburg. Hier entdeckte er die nach ihm benannte Strahlung. Fünf Jahre später wechselte er nach München, wo er trotz verlockender Angebote, u. a. der Präsidentschaft der Physikalisch Technischen Reichsanstalt in Berlin, bis an sein Lebensende blieb.

Röntgen beschäftigte sich zunächst mit klassischen Fragestellungen, z. B. auf den Gebieten der spezifische Wärme oder der thermischen Leitfähigkeit von Gasen. Bis zum Jahre 1895 hatte er 48 wissenschaftliche Arbeiten veröffentlicht, die schon bald in Vergessenheit gerieten. Durch seine 49. wurde er jedoch weltberühmt. Diese handelte von der Entdeckung der X-Strahlen, wie er die neuentdeckten Strahlen nannte und die später in Deutschland seinen Namen erhielten, während man im Ausland weiter von X-Strahlen oder »X-rays« spricht. Bei seiner Entdeckung war Röntgen schon 50 Jahre alt, was deshalb bemerkenswert ist, da Wissenschaftler im Allgemeinen bahnbrechende Entdeckungen im Alter zwischen 25 und 40 Jahren machen.

Was geschah dann nach dem 8. November 1865, dem Tag ihrer Entdeckung? In wenigen Wochen konzentrierter Arbeit erforschte Röntgen ihre wesentlichsten Eigenschaften. Bereits am 28. Dezember reichte er das Manuskript »Über eine neue Art von Strahlen« bei der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft in Würzburg ein und schon vier Tage später lag die Arbeit gedruckt vor. Als am 4. Januar 1896 die Deutsche Physikalische Gesellschaft in Würzburg tagte, waren in der zugehörigen Ausstellung auch zwei Röntgenaufnahmen zu sehen, die aber keine Aufmerksamkeit erregten. Das war ganz anders auf einer Sitzung des Vereins für Innere Medizin, die zwei Tage später stattfand. Dort wurde ein Vortrag über die Methode der Röntgenstrahlung gehalten, in dessen Rahmen auch Röntgenbilder vorgestellt wurden. Die Mediziner erkannten die Nützlichkeit der neu entdeckten Strahlen sofort. Kurz darauf erschienen Pressemitteilungen in Wien, Frankfurt und London, und schon am 9. Januar 1896 gratulierte Kaiser Wilhelm II. Röntgen telegraphisch zu der neuen »weltbewegenden Entdeckung« und lud ihn zur Vorführung in Berlin ein. Nur etwa zwei Monate waren von der ersten Beobachtung der Strahlung bis zum nationalen Ruhm vergangen. Es gibt wohl kaum eine andere physikalische Entdeckung, die sich schneller durchsetzte.

Röntgen erhielt im Lauf seines Lebens zahlreiche Ehrungen, u. a. den ersten Nobelpreis für Physik im Jahre 1901. In vielen Städten wurden Straßen nach ihm benannt und die Liste der Preise, Ehrendoktorwürden und Mitgliedschaften in wissenschaftlichen Vereinigungen ist lang. Trotz allem blieb er ein äußerst bescheidener und zurückhaltender Mann. Er bewahrte während seines gesamten Lebens seine Liebe zur Natur und verbrachte viele Ferien in Weilheim am Fuße der bayerischen Alpen, wo er ein Ferienhaus besaß. Von dort aus unternahm er mit Freunden Bergtouren, bei denen er auch hin und wieder in gefährliche Situationen geriet, obwohl er ein ausgezeichneter Bergsteiger war.

## **Der Nobelpreis**

Seit 1901 ist der Nobelpreis zu einer Art Gütesiegel für herausragende Entdeckungen in den Naturwissenschaften geworden. Er wurde von dem schwedischen Industriellen und Erfinder Alfred

Nobel gestiftet, der u. a. mit der Produktion von Dynamit reich geworden war. In seinem Testament verfügte er, dass der größte Teil seines Vermögens in eine Stiftung eingebracht werden sollte, deren Zinsen »als Preise denen zugeteilt werden, die im verflassenen Jahr der Menschheit den größten Nutzen geleistet haben«.

Der Zinsertrag sollte zu fünf gleichen Beträgen auf die Gebiete Physik, Chemie, Physiologie oder Medizin, Literatur und für Bemühungen um den Frieden aufgeteilt werden. Es ist nicht nur die Höhe des Preisgelds, das heute ca. eine Million Euro beträgt, die den Preis so begehrt macht, sondern auch das damit verbundenen Ansehen. Die Preise werden jeweils am 10. Dezember, dem Todestag des Stifters, vom schwedischen König überreicht, mit einer Ausnahme: Der Friedensnobelpreis wird in Oslo verliehen. [1]

## **Die Entdeckung der Radioaktivität**

Auch in Frankreich wurde die Entdeckung der Röntgenstrahlen zu einer Sensation, jedenfalls unter den Wissenschaftlern. Schon im Januar des Jahres 1896 waren sie während einer Sitzung der Akademie der Wissenschaften in Paris Thema einer Diskussion. Der Mathematiker Jules Henri Poincaré äußerte die Vermutung, dass die Röntgenstrahlung an den Stellen in der Entladungsröhre entstünde, wo man auch die Fluoreszenz beobachtet hatte. Diese Bemerkung setzte den Physiker Henri Antoine Becquerel auf eine wichtige, aber zunächst falsche Fährte. Becquerel hatte sich nämlich schon länger mit sogenannten phosphoreszierenden Stoffen beschäftigt. Das sind Stoffe, die nach Bestrahlung mit Licht für eine gewisse Zeit nachleuchten. Nach Poincarés Bemerkung vermutete er, dass auch die von ihm untersuchten nachleuchtenden Stoffe Röntgenstrahlen ausenden könnten. Er nahm also eine Fotoplatte, verpackte sie lichtdicht und legte darauf verschiedene phosphoreszierende Stoffe, die er vorher mit hellem Sonnenlicht bestrahlt hatte. Von den vielen Proben führte nur eine, ein Uranmineral, zu einer Schwärzung der Fotoplatte. Nur ein halber Erfolg! Dann kam ihm ein Zufall – wieder einmal ein Zufall – zu Hilfe. Als in einer Periode schlechten Wetters keine Sonne schien, konnte Becquerel seine Substanzen nicht zum Leuchten anregen, und er packte die Kristalle in eine Schublade, wobei er das Uranmineral ohne besondere Absicht auf eine noch

nicht belichtete Fotoplatte legte. Als er diese nach einigen Tagen entwickelte, war auch sie geschwärzt! Das Uranmineral sandte also auch dann durchdringende Strahlung aus, wenn es vorher nicht zum Leuchten angeregt worden war. Das neue Phänomen hatte also nichts mit der Phosphoreszenz zu tun. Als er dem zufällig beobachteten Phänomen genauer nachging, entdeckte er die Radioaktivität.

*»Ist das eigentlich immer so, dass große wissenschaftliche Entdeckungen mit einem Zufall beginnen«, fragt Hanna.*

Nicht immer, aber doch recht häufig, und das auch aus gutem Grund. Denn wie kann man nach etwas suchen, von dem man gar nicht weiß, dass es existiert?

Schon zwei Monate nach der ersten Beobachtung veröffentlichte Becquerel seine Ergebnisse. Aber handelte es sich bei den von ihm entdeckten Strahlen auch um Röntgenstrahlen? Um diese Frage zu beantworten, untersuchte er die Wirkungen »seiner« Strahlen und fand, dass auch sie wie die Röntgenstrahlen die umgebende Luft ionisierten, d. h. für den elektrischen Strom leitfähig machten. Damit hatte er eine gemeinsame Eigenschaft der beiden Strahlungen entdeckt, aber nicht nachgewiesen, dass sie identisch sind. Und sie sind es auch nicht. Das Ionisierungsvermögen stellte sich jedoch als wichtige Entdeckung heraus, auf der auch heute noch alle Nachweise der neuen Strahlung beruhen. Da Becquerel schon bald das Interesse an den von ihm gefundenen Strahlen verlor, verbindet man die Radioaktivität meist nicht mit seinem Namen, sondern mit dem von Madame Curie.

*»Endlich eine Frau, die in der Physik etwas Wichtiges geleistet hat«, freut sich Hanna.*

## **Radium und Polonium**

Auf der Suche nach einem Thema für ihre Doktorarbeit wurde Marie Curie von ihrem Mann Pierre auf die erst kürzlich entdeckten Becquerel-Strahlen aufmerksam gemacht. Sie war von dieser Idee begeistert und fing sofort an, sich in die Problematik an Hand der Becquerelschen Experimente einzuarbeiten. Hierbei konnte sie zum Nachweis der Strahlen auf ein sehr empfindliches Elektrometer zurückgreifen, das Pierre Curie zusammen mit seinem Bruder einige Zeit zuvor entwickelt hatte. Schon nach kurzer Zeit erkannte

sie, dass die Strahlungsintensität einer Uransalzprobe nur von der Menge des in ihr enthaltenen Urans abhing und nicht von ihrer chemischen Zusammensetzung. Daraus zog sie den Schluss, dass die Strahlung nicht mit der Anordnung der Atome in einem Molekül zusammenhängt, sondern direkt aus dem Innern des Atoms stammen müsse – eine zur damaligen Zeit sehr gewagte, aber richtige Hypothese.

Daraufhin machte sich Marie Curie daran, alle damals bekannten chemischen Elemente auf Radioaktivität hin zu untersuchen. Schon nach einigen Tagen fand sie, dass Thorium die gleichen Strahlen wie das Uran aussandte, doch diese beiden Elemente blieben zunächst die einzigen. Als nächstes untersuchte sie verschiedene Erze der beiden radioaktiven Elemente, wobei sie herausfand, dass das natürlich vorkommende Mineral Pechblende, ein Uranoxyd, vier- bis fünfmal soviel Strahlung aussandte, wie aufgrund des Uran-gehalts zu erwarten war. Daraus folgerte sie, dass in der Pechblende weitere radioaktive Elemente in kleinen Mengen enthalten sein müssten. Aufgrund dieser Entdeckung gab Pierre Curie seine eigenen Arbeiten über Kristalle und zur Symmetrie in der Natur auf und beteiligte sich am Projekt seiner Frau. Durch chemische Analysen fanden die beiden, dass die hohe Aktivität sich in den Fraktionen befand, die Wismut oder Barium enthielten. Bereits in einer im Juli 1898 veröffentlichten Arbeit kündigten sie an, dass sie wahrscheinlich ein neues Metall gefunden hätten, das dem Wismut chemisch sehr ähnlich sei. In dieser Arbeit, in der sie als Namen für das neu entdeckte Element Polonium vorschlugen, taucht auch der Begriff »Radioaktivität« zum ersten Mal auf. Schon einige Monate später informierten die Curies die Akademie der Wissenschaften über eine weitere sehr aktive Substanz, die dem Barium chemisch sehr ähnlich sei und für die sie den Namen Radium vorschlugen.

Um die Existenz dieser beiden neuen Elemente sicher nachzuweisen, mussten Marie und Pierre Curie nun daran gehen, die Substanzen rein darzustellen. In sehr aufwendigen chemischen Trennverfahren gelang es ihnen, vier Jahre nach der Entdeckung des Radiums aus einer Tonne Pechblendenreste endlich 0,1 Gramm Radiumchlorid herzustellen. Es war eine äußerst harte Arbeit, die sie in ihrem primitiven Labor ohne entsprechende Abzüge durchführten mussten. Und sie schützten sich nicht vor den Strahlen, da deren Gefährlichkeit noch nicht bekannt war.

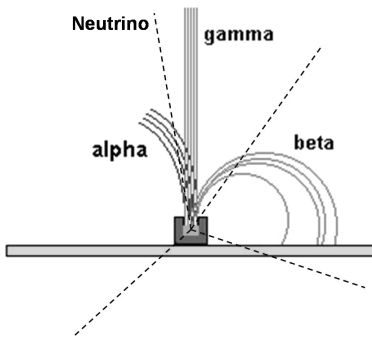
An ihrem Radiumpräparat fiel auf, dass es immer eine höhere Temperatur als die Umgebung zeigte. Hierfür war nur eine Erklärung möglich: die Wärme stammte aus dem Präparat selbst. Damit hatten die Curies eine neue Energiequelle entdeckt, die Kernenergie, die im 20. Jahrhundert noch sehr wichtig werden sollte.

*Das interessiert Herrn Weber: »Konnten die Curies sich schon damals den Ursprung dieser Energie erklären?«*

In ihrer Veröffentlichung von 1902 diskutierten sie verschiedene Möglichkeiten, darunter die folgende: Jedes radioaktive Atom enthält die Energie, die es ausstrahlt, in Form von potentieller Energie. Auch Einstein wies 1905 in seiner Arbeit über die Gleichung  $E = m c^2$  auf einen möglichen Zusammenhang mit der Radioaktivität hin. Heute wissen wir, dass jeder Atomkern, der mehr Energie enthält, als er zum Zusammenhalt braucht, diese irgendwann in Form von radioaktiver Strahlung abgibt.

## **Die verschiedenen Arten radioaktiver Strahlen**

Inzwischen begannen auch viele andere Physiker die radioaktive Strahlung zu untersuchen. In relativ einfachen Experimenten, z. B. durch die Ablenkung in einem Magnetfeld, ergab sich, dass beim radioaktiven Zerfall nicht nur eine Art von Strahlung ausgesandt wird, sondern mehrere. Diese unterscheiden sich durch ihre physikalischen Eigenschaften, wie z. B. durch ihre Ladung oder ihre Absorption in Materie (Bild 7) Recht fantasielos nannte man sie einfach Alpha-, Beta- und Gammastrahlen nach den ersten drei Buchstaben des griechischen Alphabets. Alphastrahlen sind positiv geladen und werden leicht, z. B. schon durch ein Blatt Papier oder durch eine Luftschicht von weniger als zehn Zentimetern Dicke, absorbiert. Betastrahlen sind negativ geladen, durchdringen ein Blatt Papier, werden aber durch eine einige Millimeter dicke Aluminiumplatte gestoppt. Die Gammastrahlen werden nicht durch einen Magneten abgelenkt, tragen also keine Ladung und werden erst von einer stärkeren Bleiplatte beträchtlich geschwächt. Bald hatte man auch die Natur der verschiedenen Strahlen herausgefunden: Die Gammastrahlung ist wie die Röntgenstrahlung eine elektromagnetische Strahlung, hat jedoch meist eine noch kleinere Wellenlänge als diese. Die Betastrahlung besteht aus Elektronen wie die schon



**Bild 7** Ablenkung und Auffächerung radioaktiver Strahlung, die von einer Quelle ausgeht, die in einem Bleibehälter mit einer kleinen Öffnung gelagert ist. Es herrscht ein Magnetfeld, dessen Feldlinien in die Papierebene hinein zeigen. Aus dem Bild ergibt sich, dass Alphastrahlen positiv und Betastrahlen negativ geladen sind, während Gammastrahlen neutral sind. Die gestrichelten Linien gehören zu den Neutrinos, die lange übersehen wurden, weil sie alle Materie, also auch den Bleimantel der Quelle, mühelos durchdringen.

bekannte Kathodenstrahlung. Nur die Alphastrahlung stellt etwas Neues dar: Sie besteht aus Atomkernen des Edelgases Helium.

Neben diesen drei Arten von radioaktiver Strahlung tritt noch eine vierte auf: die Neutrinostrahlung, die uns auf unserer Führung noch mehrfach beschäftigen wird. Mit jedem Elektron der Betastrahlung wird auch ein Neutrino (genauer ein Anti-Neutrino) ausgesandt, das eine sehr kleine Masse hat und – wie sein Name schon andeutet – ungeladen ist. Diese Strahlung war lange Zeit nicht bemerkt worden, da sie die am stärksten durchdringende Strahlung überhaupt ist. Während man sich vor den anderen radioaktiven Strahlen durch eine Bleiabschirmung von einigen Zentimetern Dicke schützen kann, durchdringen Neutrinos selbst kilometerdicke Bleimauern. Vor ihnen kann man sich also überhaupt nicht schützen, was jedoch nicht tragisch ist, da sie den menschlichen Körper durchdringen, ohne irgendwelche Spuren und Wirkungen zu hinterlassen. Der Nachweis der Neutrinos gelang erst 1956.

*»Ich möchte noch einmal auf die die Alpha-, Beta- und Gammastrahlen zurückkommen. Wie können diese drei so grundverschiedenen Strahlen zusammen auftreten? Wie entstehen sie eigentlich?«, fragt Hanna.*



Alle radioaktiven Strahlen haben ihren Ursprung im Atomkern und entstehen aufgrund verschiedener fundamentaler Wechselwirkungen.

- Die starke Wechselwirkung, die auch die Kerne zusammenhält, ist für die Alphastrahlen verantwortlich,
- die Betastrahlung (einschließlich der Neutrinos) wird aufgrund der schwachen Wechselwirkung ausgesandt
- und die Gammastrahlung ist ein elektromagnetisches Phänomen.

Diese Wechselwirkungen werden später noch ausführlich besprochen. Besitzt ein Atomkern überschüssige Energie, zerfällt er in einen Tochterkern, der selbst wieder radioaktiv sein kann. Das wird in der Vertiefung »Radioaktive Zerfallskette« genauer erläutert.

---

### Radioaktive Zerfallskette

Während die Hülle jedes Atoms aus Elektronen besteht, ist der Kern aus positiv geladenen Protonen und ungeladenen Neutronen aufgebaut. Die Zahl der Protonen wird Ordnungszahl  $Z$  genannt, die Gesamtzahl der Nukleonen (Protonen plus Neutronen) Massenzahl  $A$ . Ein Beispiel: Jedes Uranatom enthält im Kern  $Z = 92$  Protonen und, da es insgesamt elektrisch neutral ist, gleichzeitig in der Hülle  $Z = 92$  Elektronen. Die meisten Urankerne (99,3 %) bestehen aus 238 Nukleonen, d. h. 92 Protonen und 146 Neutronen. Man bezeichnet diese Kerne abgekürzt mit  $^{238}\text{U}$ , worin »U« das chemische Symbol für das Element Uran ist. Der verbleibende Rest des Urans von 0,7 % besteht fast ausschließlich aus  $^{235}\text{U}$  mit der Ordnungszahl  $Z = 92$ , aber der kleineren Massenzahl 235. Atome eines Elements mit verschiedenen Massenzahlen, z. B.  $^{238}\text{U}$  und  $^{235}\text{U}$ , heißen Isotope und lassen sich mit chemischen Mitteln nicht voneinander trennen.

Die meisten Atomkerne in der Natur befinden sich in ihrem niedrigsten Energiezustand und streben keine Veränderung an, weshalb man sie »stabil« nennt. Einige natürlich vorkommende Atomkerne, wie z. B. das  $^{238}\text{U}$ , befinden sich jedoch in einem höheren Energiezustand und versuchen, die überschüssige Energie durch einen radioaktiven Zerfall abzugeben, indem sie Alpha-, Beta-, oder Gammastrahlen aussenden. Das Wort »versuchen« soll andeuten, dass dies nicht immer ganz einfach ist; denn es dauert manchmal recht lang, bis ein Zerfall stattfindet. Man nennt diejenige Zeit, nach der die Hälfte der Kerne eines radioaktiven Isotops zerfallen ist, seine Halbwertszeit. Außerdem kann ein instabiler Kern seinen Energieüberschuss oft nicht in einem einzigen Zerfall abstrahlen, sondern nur in einer Reihe von nacheinander ablaufenden Zerfällen. Die natürliche Zerfallsreihe des  $^{238}\text{U}$  besteht z. B. aus 14 Alpha- und Beta-Zerfällen, die von einigen

Gamma-Zerfällen begleitet werden. Die ersten Stufen in dieser Reihe sind die folgenden:

1.  $^{238}\text{U}$ -Kerne gehen mit einer Halbwertszeit von 4 Milliarden Jahren durch Alpha-Zerfall in Thoriumkerne des Isotops  $^{234}\text{Th}$  über.
2. Diese Kerne senden jeweils innerhalb eines Bruchteils einer Sekunde Energie in Form von Gammastrahlung aus, wobei sie als  $^{234}\text{Th}$ -Kerne erhalten bleiben.
3.  $^{234}\text{Th}$  wandelt sich mit einer Halbwertszeit von 24 Tagen durch Emission von Betastrah-

lung in das Protaktiniumisotop  $^{234}\text{Pa}$  um.

4. Die  $^{234}\text{Pa}$ -Kerne gehen mit einer Halbwertszeit von 7 Stunden durch Betazerfall in  $^{234}\text{U}$  über.

Danach führen zwei Alpha-Zerfälle zum Radium  $\text{Ra}^{226}$ , das selbst durch zwei weitere Alpha-Zerfälle in Polonium übergeht. Am Ende der Kette steht das stabile Bleisotop  $^{206}\text{Pb}$ . Da in der Zerfallskette des Urans auch Radium und Polonium gebildet werden, konnten die Curies diese Elemente in der Pechblende, einem natürlich vorkommenden Uranmineral, entdecken.

---

Die Atome der allermeisten irdischen Stoffe besitzen stabile Atomkerne. In der Natur kommen nur wenige radioaktive Elemente vor, wie z. B. das oben besprochene Uran oder das Isotop  $^{40}\text{K}$ , eine besondere Form des Kaliums. Ihr Zerfall trägt wesentlich zu der im Erdinneren herrschenden hohen Temperatur bei. Im Gegensatz zu dieser natürlichen Radioaktivität entstehen bei der Uranspaltung in einem Kernreaktor neue, sogenannte künstliche radioaktive Isotope. Sie sind das größte Problem bei der Nutzung der Kernenergie, da die Halbwertszeit dieser Substanzen von Bruchteilen einer Sekunde bis zu Tausenden von Jahren reicht. Bisher gibt es nur die Möglichkeit, sie zu vergraben, um die Lebewesen vor den von ihnen ausgehenden Strahlen zu schützen.

Da man radioaktive Strahlung nicht mit den Sinnesorganen, sondern nur mit aufwendigen Geräten erkennen kann, sind viele Menschen wegen der Gefahren, die von den Strahlen ausgehen können, sehr verunsichert. Radioaktive Strahlung und auch Röntgenstrahlung dringen in den Körper ein und schädigen das Gewebe dadurch, dass Moleküle aufgebrochen und damit Lebensvorgänge in den Zellen gestört werden, wobei sich auch das Erbmateriale verändern kann. Viele Forscher, die sich in der Anfangszeit beim Experimentieren diesen Strahlen ausgesetzt haben, kannten diese Gefahren nicht. Daher schützten sie sich nicht und trugen oft schwere Schäden davon.

Ein bekanntes Beispiel ist Marie Curie. Sie ist eine der großen Forscherinnen des 20. Jahrhunderts. Gleichzeitig ist ihr Leben interessant, weil sie eine der ersten bedeutenden Frauen in der Wissenschaft war. Durch ihren wissenschaftlichen Erfolg und ihre innere Stärke wurde sie Vorbild für Generationen junger Frauen, insbesondere in Frankreich.

### Marie Curie (1867–1934)



*»Sie ist der einzige unter allen berühmten Menschen, den der Ruhm nicht verdorben hat.«*

Albert Einstein

**Bild 8** Marie Curie

In der über hundertjährigen Geschichte des Nobelpreises gibt es nur zwei Preisträgerinnen im Fach Physik. Marie Curie war die erste Frau, die ihn erhielt – mit 36 Jahren im Fach Physik und dann acht Jahre später auch im Fach Chemie. Zwei Nobelpreise für eine Person! Das ist etwas ganz Außergewöhnliches. Dabei begann das Leben dieser später so erfolgreichen Wissenschaftlerin mit vielen Schwierigkeiten.

Geboren wurde Maria Sklodowska als Jüngste von fünf Geschwistern in Warschau zu einer Zeit, als Polen unter russischer Herrschaft stand. Ihre Eltern waren beide Lehrer, der Vater, ein überzeugter Atheist, unterrichtete Physik an einem Gymnasium, während die sehr gläubige Mutter ein Mädchenpensionat leitete. Die Kinder durchlebten keine leichte Jugend, da der Vater aus politischen Gründen seine Stellung verlor und die Mutter bereits 1878 an Tuberkulose starb.

Schon mit 16 Jahren bestand Maria das Abitur, und zwar als Jahrgangsbeste. Da Frauen zur damaligen Zeit in Polen nicht studieren durften, schmiedeten Maria und ihre ältere Schwester Bronia folgenden Plan. Sie wollten beide nacheinander in Paris studieren; die dazu nötigen Mittel wollten sie dadurch aufbringen, dass jeweils eine der beiden Geld verdiente und damit der anderen das Studium ermöglichte. Zunächst ging die ältere Bronia zum Medizinstudium nach Paris, während Maria in Warschau vier Jahre lang als Gouvernante arbeitete. Im Herbst 1891 folgte Maria ihrer Schwester, die inzwischen geheiratet hatte. Sie begann, in Paris Physik und Mathematik zu studieren und legte schon nach zwei Jahren ihr Examen in Physik als Beste und ein Jahr später das in Mathematik als Zweitbeste ab.

Bald danach traf sie Pierre Curie, der seit 1883 das Laboratorium an der Städtischen Schule für Physik und Chemie zu Paris leitete. Auch wenn die beiden von Anfang an Sympathie für einander empfanden, lehnte Marie – wie sie sich jetzt nannte – einen nach kurzer Zeit ausgesprochenen Heiratsantrag zunächst ab. Doch schon im Sommer 1895 heirateten sie. Nach der Geburt ihrer ersten Tochter Irène im September 1897 begann Marie Curie mit ihrer Doktorarbeit zu dem Thema »Forschungen über radioaktive Substanzen«. Für diese Arbeit, mit der sie im Juni 1903 promovierte, erhielt sie ein halbes Jahr später im Alter von 36 Jahren zusammen mit ihrem Ehemann Pierre und Henri Becquerel den Nobelpreis für Physik.

Daraufhin wurde Pierre Curie Professor für Physik an der Sorbonne, doch sein Wunsch nach einem eigenen Labor erfüllte sich nicht. Nach der Verleihung des Nobelpreises ging es den Curies finanziell wesentlich besser, doch sowohl Marie als auch Pierre hatten gesundheitliche Probleme und wirkten häufig erschöpft. Nach der Geburt ihrer zweiten Tochter Eve lebten sie ziemlich zurückgezogen und erholten sich sooft wie möglich auf dem Lande. Dann traf die Familie ein schweres Unglück: Pierre Curie wurde von einem Pferdewagen überfahren und starb. Daraufhin übernahm Madame Curie seine Vorlesungen und war damit die erste Frau, die an der berühmten Pariser Universität als Professorin tätig war. In den folgenden Jahren veröffentlichte sie die Werke ihres Mannes und schrieb ein Buch über Radioaktivität. Für ihre Arbeiten, die zur Reindarstellung des Radiums und zur Aufklärung der Chemie dieses neuen Elements führten, erhielt sie 1911 den Nobelpreis für Chemie.

Damals hatten es Frauen sehr schwer in der Wissenschaft. Trotz der internationalen Anerkennung durch den ersten Nobelpreis bekam das auch Marie Curie zu spüren. Als sie sich 1910 für die Wahl in die Akademie der Wissenschaften nominieren ließ, ging sie davon aus, dass letztlich die wissenschaftliche Leistung hierfür entscheidend sei. Als ihre Kandidatur in der Öffentlichkeit bekannt wurde, erhob sich in der nationalistischen Presse ein Sturm der Entrüstung. Man hielt ihr vor, dass sie eine Ausländerin mit jüdischen Wurzeln sei (was nicht stimmte) und dass sie ihre Forschungsergebnisse nur durch ihren Mann erreicht habe. Obwohl sie von namhaften Wissenschaftlern Hilfe erfuhr, unterlag sie bei der Wahl und wurde dadurch schwer gekränkt. Hinzu kam eine Liebesgeschichte, die sogenannte Langevin Affäre, in der sie ein zweites Mal öffentlich durch den Schmutz gezogen wurde. Ende 1911 war sie völlig ausgelaugt und wurde depressiv. Sie musste eine Klinik aufsuchen und verbrachte anschließend eine längere Zeit in England bei einer Freundin. Es dauerte ein ganzes Jahr, bis sie ihre Arbeit wieder voll aufnehmen konnte

Nachdem Marie Curie 1914 Leiterin des neu gegründeten Radium-Instituts der Pariser Universität geworden war, brach der erste Weltkrieg aus. Da nicht alle Lazarette mit Röntgengeräten ausgestattet werden konnten, entwickelte sie mobile Röntgenstationen und betreute an der Front zusammen mit ihrer Tochter Irène eine dieser Stationen.

Nach dem Krieg nahm Marie Curie ihre Forschungstätigkeit am Radium-Institut wieder auf, wobei sie viele Arbeiten gemeinsam mit Irène durchführte. Im Lauf der Jahre entwickelte sich das Institut zu einem Zentrum der Kernphysik, sodass Marie Curie des Öfteren zu Vorlesungsreisen in verschiedene Länder eingeladen wurde. Ein besonderer Anlass führte sie zusammen mit ihren beiden Töchtern 1921 in die Vereinigten Staaten. Die äußerst publikumsscheue Wissenschaftlerin hatte einer amerikanischen Journalistin ein Interview gegeben, worauf diese ihr eine Sendung Radium versprach. Von Spenden amerikanischer Frauen konnte ein Gramm Radium gekauft werden, das ihr vom Präsidenten der Vereinigten Staaten persönlich übergeben wurde.

Als Folge von Strahlenschäden erkrankte Marie Curie an Leukämie, doch kurz vor ihrem Tod 1934 durfte sie noch eine große Freude erleben: Ihre Tochter Irène und deren Mann Frédéric Joliot-Curie

entdeckten die künstliche Radioaktivität, wofür sie 1935 mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet wurden.

Marie Curie ist neben ihrem Mann im Pariser Pantheon beerdigt. Von den vielen Ehrungen, die ihr zuteil wurden, sei nur noch eine erwähnt: Das chemische Element mit der Ordnungszahl  $Z = 96$  wurde ihr zu Ehren Curium genannt.

*»Was ich gerade über Leben der Marie Curie gehört habe, hat mich doch erschüttert«, sagt Hanna. »Glauben Sie, dass sie glücklich war?«*

Das hängt davon ab, was man unter Glück versteht. Ein angenehmes Leben hatte sie sicherlich nicht.

*»Aber ein erfülltes Leben«, gibt Herr Weber zu bedenken, »und ist das nicht das eigentliche Glück?«*

Dennoch hatte es Madame Curie besonders schwer. Sie war als Polin eine Fremde in der französischen Gesellschaft und als Frau eine Fremde in der Wissenschaft. Vorbehalte gab es hier wie da zu überwinden. Auch heute noch, zu Beginn des 21. Jahrhunderts, haben es Frauen in der Physik schwerer als ihre männlichen Kollegen. Selbst wenn man inzwischen mit viel gutem Willen und konkreten Programmen diesen Missstand zu beseitigen versucht.

### **Literaturhinweise**

- 1 Offizielle Seite der Nobelstiftung: <http://nobelprize.org/>