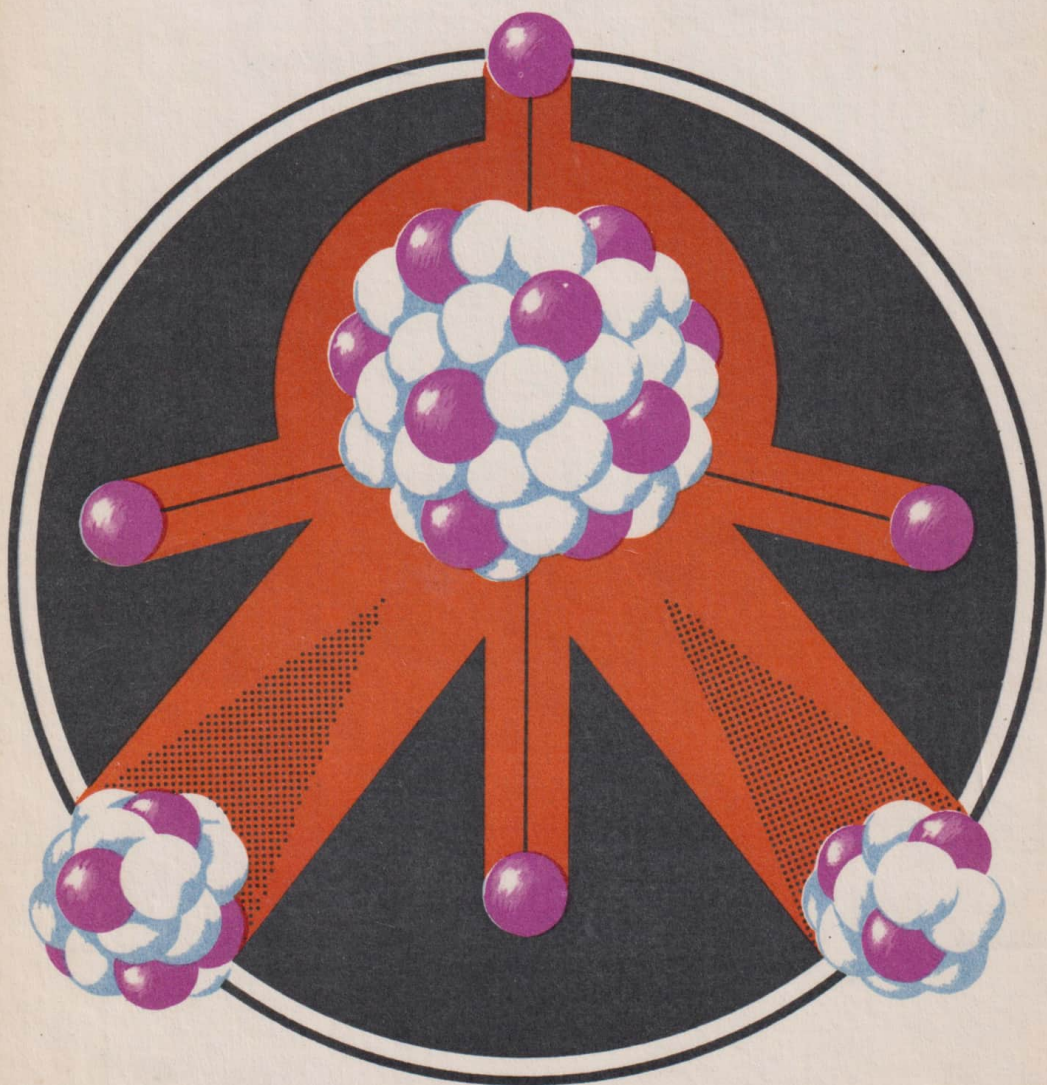


HEINZ KLEFFE

Als das Atom in Stücke sprang



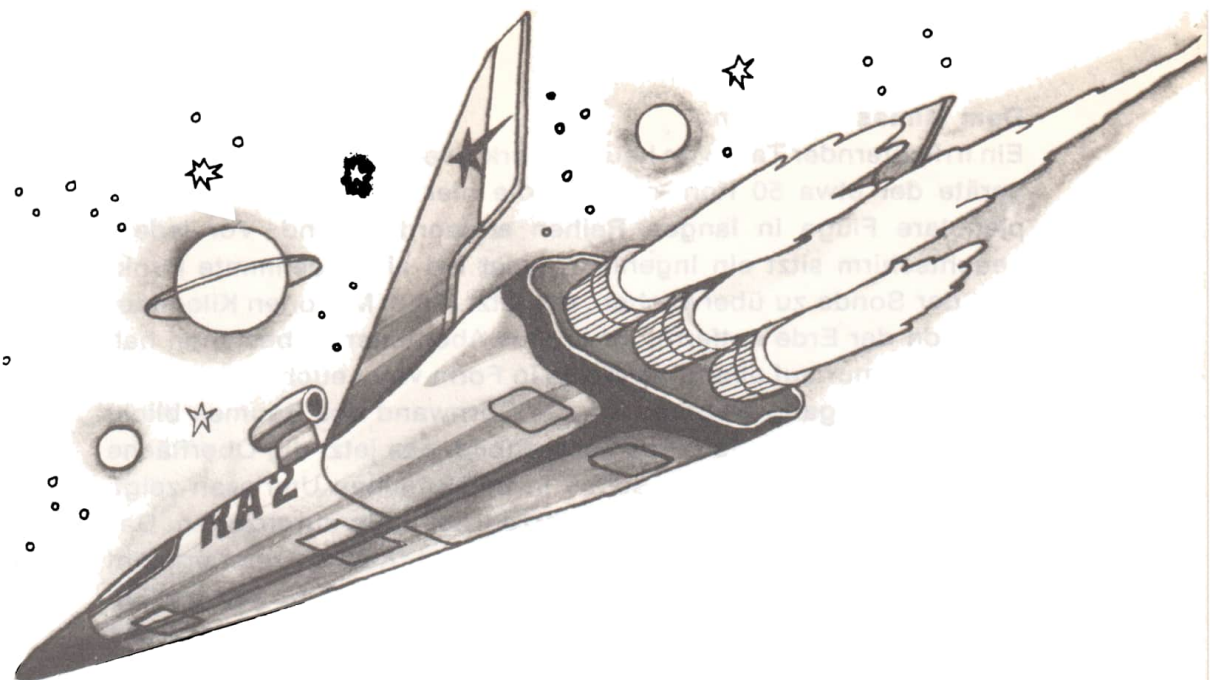
HANS KLEFFE

Als das Atom in Stücke sprang

Illustrationen von Thomas Schallnau

DER KINDERBUCHVERLAG BERLIN

Alle Rechte vorbehalten
Printed in the German Democratic Republic
Lizenz-Nr. 304-270/81/73-(15)
Lichtsatz: GG Interdruck Leipzig
Repro, Druck und buchbinderische Verarbeitung: Röderdruck Leipzig
1. Auflage
Es 9 F
Für Leser von 13 Jahren an
Best.-Nr. 629 091 2
EVP 8,50



Abenteuer am Kontrollpult

Fiebernde Hochspannung herrscht im Kontrollzentrum für interplanetare Flüge. In 10 Minuten wird die Sonde „Saturn 1“, ein Gemeinschaftsprojekt der sozialistischen Länder, auf dem Saturnmond Mimas landen – oder zerschellen. Der ferne Saturn hat seit je das Interesse der Menschen besonders angezogen. Schon rein äußerlich betrachtet bietet er mit seinem Ringsystem im Fernrohr einen prächtigen Anblick. Die Geheimnisse der Saturnringe noch genauer zu ergründen ist eine der vielen Aufgaben der Saturnsonde. Doch soll sie vorerst nicht direkt auf dem Planeten landen, sondern auf dem ihm nächsten seiner neun Monde, dem Mimas. Hier wird sie eine automatische und, von der Erde aus ferngesteuert, fahrbare kosmische Station „Mimochod“ absetzen. In einer späteren Phase des Raumflugabenteuers soll „Mimochod“ wieder mit einem Teil des Raketenfahrzeugs verbunden werden und die Weiterreise zum Saturn antreten.

Dem Mimas entgegen

Ein irrlichternder Tanz von Leuchtspurkurven huscht über die Sichtgeräte der etwa 50 Kontrollpulte, die hier im Zentrum für interplanetare Flüge in langen Reihen angeordnet sind. Vor jedem Leuchtschirm sitzt ein Ingenieur, jeder hat eine bestimmte Funktion der Sonde zu überwachen, die jetzt, 1 500 Millionen Kilometer weit von der Erde entfernt, ihr großes Abenteuer zu bestehen hat. Aber nicht nur auf abstrakte Weise in Form von Leuchtspuren wird der Landevorgang sichtbar. An der Stirnwand des Raumes blickt man auf ein großes farbiges Fernsehbild, das jetzt die Oberfläche des Saturnmondes Mimas schon in undeutlichen Umrissen zeigt. Sie ist rotbraun, von vielen schwarzen Schatten durchzogen. Das Gelände scheint keine flache Ebene zu sein. Kleine Krater erkennt man bereits. Aber sie scheinen klein im Vergleich zu den großen Kratern des Erdmondes. Kritischer für die Landung ist das bizarr gezackte Relief steil ansteigender Berge. Etwas Derartiges ist auf der Erde fast unbekannt oder kommt höchstens als Seltenheit der Natur vor, die Tausende von Touristen anlockt. Inzwischen ist das Bild deutlicher geworden. Die Sonde hat sich der Oberfläche des Mimas so weit genähert, daß man das Gelände besser erkennt. Etwa in der Mitte des Fernsehbildes erscheint ein weißes Kreuz. Es markiert den Landeort, den die Rakete „Saturn 1“ ansteuert. Die Computer an Bord der Sonde haben gut gearbeitet. Das Kreuz liegt auf einem flachen Terrain, das sich inmitten von Kratern und Gebirgen befindet.

Sekunden entscheiden über Jahre

Die Spannung wächst. Jetzt sind es nur noch drei Minuten bis zu dem großen Augenblick. Geht die Landung schief, so ist eine jahrelange Arbeit großer Kollektive von Wissenschaftlern, Technikern und Facharbeitern nutzlos vertan. Den Experten an den Kontrollpulten klopft das Herz. Außer dem Surren der Geräte hört man keinen Laut. Und dabei hat sich das Schicksal der Saturnsonde, die jetzt in unvorstellbaren Fernen operiert, in Wirklichkeit längst entschieden! Alles, was hier an Signalen über die Leuchtschirme huscht und was man als Fernsehbild an der Stirnwand sieht, ist nämlich schon Vergangenheit. Hier auf der Erde zählt man zwar

noch drei Minuten bis zur Landung. In Wirklichkeit aber ist „Saturn 1“ schon vor 80 Minuten entweder glücklich gelandet oder zerschellt. Denn Mimas ist 1 500 Millionen Kilometer von der Erde entfernt. Licht- und Radiowellen breiten sich aber nur mit endlicher Geschwindigkeit aus. Diese Geschwindigkeit ist zwar für normale Begriffe unvorstellbar groß, nämlich 300 000 km in jeder Sekunde. Aber die Rechnung $1\,500\,000\,000\text{ km} : 300\,000\text{ km}$ ergibt trotzdem die stattliche Summe von 5000 Sekunden oder rund 83 Minuten. So lange brauchen die Funkwellen von der Saturnsonde, um uns Aufschluß über die Funktion der verschiedenen Bordgeräte zu geben und das Bild des fernen Mondes Mimas zur Erde zu übertragen.

Deshalb kann der Mensch bei der Landung nicht mehr korrigierend eingreifen. Jeder Befehl zur Änderung des Kurses käme zu spät. Die Möglichkeiten der Fernsteuerung derart weit entfernt operierender Gerätesysteme beschränken sich auf das Ein- und Ausschalten bestimmter Arbeitsprogramme und Funktionssysteme, den Abruf bestimmter Daten, die Übertragung neuer Daten von der Erde zur Einspeicherung in das Gedächtnis der Bord-Computer oder für notwendige Umprogrammierungen der von ihnen zu steuernden Funktionen. Aber überall da, wo es auf schnelles Reagieren ankommt, ist die Sonde auf die „Geistesgegenwart“ ihrer bordeigenen Computer angewiesen. Die Kunst des Menschen besteht aber darin, die Computer mit allen „Kenntnissen“ für die Beherrschung jedes möglichen vorherberechenbaren Falles auszustatten. Ein Computer an Bord der Sonde selbst muß das Radarbild des Landgebietes blitzschnell auswerten, ob es für die Landung geeignet ist oder nicht, und dementsprechend gegebenenfalls einen anderen Landeort berechnen. Haben die Wissenschaftler, die dieses automatische Landesystem programmierten, gute Arbeit geleistet, so wird die Landung klappen. Haben sie etwas übersehen, so kann der Computer durch die wirkliche Situation überfordert und eine Bruchlandung die Folge sein. – – –

Auf dem Bildschirm: der Saturn

Doch die Landung ist geglückt! Das Fernsehbild, das soeben noch von Schwaden rötlichbraunen Staubes verhüllt war, klärt sich



langsam wieder. Befehlsgemäß ist nach der Landung die Fernsehkamera von „Saturn 1“ in eine andere Richtung geschwenkt und fährt jetzt langsam rundum den Horizont ab. Es bietet sich ein grandioses Bild. Die Männer und Frauen im Kontrollzentrum sind vor Erregung und Freude von ihren Sitzen aufgesprungen und umarmen sich gegenseitig. Dem Chefindgenieur kommen fast Tränen in die Augen. Noch kann man es kaum glauben: Das große Abenteuer ist geglückt, zumindest in der ersten Phase. Ein von Menschen geschaffenes automatisches Labor wird sich in wenigen Stunden in Bewegung setzen und den Saturnmond Mimas erforschen!

Langsam wandert auf dem großen Fernsehschirmbild der Horizont des Mimas vorüber. Wir blicken auf eine rostbraune zerklüftete Landschaft mit bizarren Bergen, kleinen Kratern. Viel Geröll liegt auf dem Plateau herum, auf dem unsere Sonde gelandet ist. Doch nun kommt der Höhepunkt. Langsam rückt das gigantische Halbrund des Planeten Saturn ins Bild. Er ist so groß, daß man ihn von seinem nächsten Mond Mimas überhaupt nicht ganz sehen kann, so wie man den Mond von der Erde und die Erde vom Mond aus bei entsprechendem Sonnenstand als volle Scheibe sieht. Vielmehr ragt immer nur eine Hälfte des Saturn über den Horizont des Mimas, die andere bleibt unter dem Horizont und daher unsichtbar. Als eine gewaltige mattgelb schimmernde Halbkugel, die auch die höchsten Berge des Mimas noch um ein Vielfaches überragt, steht der Saturn am Horizont. Schräg in den pechschwarzen Weltraum hinein sticht aus dem Planeten eine haarfeine weiße Lichtnadel. Dies ist das Ringsystem des Planeten, das uns die Fernsehkamera ganz von der Seite zeigt, weil sie genau in Richtung der Ebene des Rings blickt. Das Bild bestätigt, daß der Ring aus einer ganz flachen Schicht von kleinen Körpern besteht, die sich um den Planeten bewegen, gewissermaßen eine Ansammlung unzähliger Mündchen, die alle in einer Ebene umlaufen. Trotzdem müssen die Körper in der Ringebene sehr dicht angeordnet sein. Denn der Ring wirft bei dem etwas schräg einfallenden Sonnenlicht einen breiten dunklen Schattenstreifen auf den Saturn. Um diesen einzigartigen Anblick würden uns Generationen von Menschen, die vor dieser großartigen Epoche der Weltraumfahrt lebten, beneiden.

Der Saturn ist jetzt genau in die Mitte des Bildes gerückt. Da hält das Bild an. Die Fernsehkamera hat ihre gleichförmige Panoramabewegung abgebrochen und steht still. Auch das war den Steuer-Computern vorher einprogrammiert worden. Sobald die Halbscheibe des Saturn voll im Bilde ist, sollte die Schwenkbewegung der Kamera für drei Minuten unterbrochen werden. Auf der Erde laufen jetzt die Videorecorder und speichern das einzigartige Naturschauspiel auf Magnetband, so daß es unabhängig von den Fernsehübertragungen der Sonde jederzeit wieder rekonstruiert, betrachtet und wissenschaftlich analysiert werden kann, so wie eine einmal auf Band gespielte Musiksendung beliebig oft abgehört werden kann.

Die Welt hält den Atem an

Inzwischen eilt die Nachricht von der erfolgreichen ersten Landung eines Flugkörpers auf dem Saturnmond Mimas durch alle Länder der Erde. Alle Rundfunk- und Fernsehstationen haben – soweit sie nicht an das Kontrollzentrum für interplanetare Flüge des Vereinigten Raumforschungs-Instituts der sozialistischen Länder angeschlossen waren – ihre Programme unterbrochen und geben die Nachricht als Sondermeldung durch. Auf den Bildschirmen in den Wohnungen von vielen Millionen Menschen erscheinen bereits die ersten Farbfernsehbilder des Mimas und seines Planeten Saturn. Überall herrscht großer Jubel. Die Menschen freuen sich über den Erfolg, der ihnen durch die gemeinsame Anstrengung ihrer Wissenschaftler und Techniker gelungen ist.

In vielen Fachrichtungen von Wissenschaft und Technik mußten bahnbrechende neue Leistungen als Voraussetzung dafür erbracht werden, daß ein so großartiges Unternehmen gelingen konnte. Um nur einige wenige Beispiele dafür herauszugreifen: Es mußten Computer geschaffen werden, die so leistungsfähig wie große, ganze Zimmerfluchten füllende elektronische Datenverarbeitungsanlagen sind und dabei trotzdem nur die Größe einer Schreibmaschine haben. Mikroelektronik heißt dieses neue Fachgebiet. Die einzelnen Bauelemente und Schaltungen der Computer der Saturnsonde sind mikroskopisch klein. Die Steuer- und Regeleinrichtungen mußten entscheidend verbessert werden. Neue Funkempfangs-

und Sendeanlagen waren zu konstruieren. Nicht zuletzt aber hing die Durchführbarkeit davon ab, eine neue Energiequelle zu erschließen, die aus ganz geringen Mengen „Brennstoff“ riesige Mengen elektrische Energie liefert.

Die Erforschung der Himmelskörper unseres Sonnensystems mit Hilfe ferngesteuerter Flugkörper begann im Jahre 1970 mit „Lunochod 1“. Diese Station wurde auf dem Mond der Erde, also ganz in unserer „Nähe“, abgesetzt. „Lunochod 1“ war mit Sonnenbatterien ausgestattet, die die Energie des Lichts, das von der Sonne während des Mondtages zugestrahlt wird, in elektrische Energie umwandeln. Sehr große Energien lassen sich auf diese Weise aber nicht gewinnen. Um die Signale und Fernsehbilder von „Lunochod 1“ zu empfangen, bedurfte es daher sehr komplizierter, großer und extrem empfindlicher Empfangsanlagen. Mit einer gewöhnlichen Antenne und einem normalen Funkempfänger lassen sich die Signale nicht einwandfrei aufnehmen. Wenn wir eine fahrbare Station auf dem Mimas absetzen wollen, so brauchen wir für die Übertragungen zur Erde an Bord der Station Funk- und Fernsehsender mit viel größerer Sendeleistung, damit die Signale auf der Erde überhaupt empfangen werden können.

Der Mond ist nämlich durchschnittlich „nur“ 384 000 km von der Erde entfernt, der Planet Saturn und mithin sein Mond Mimas ist aber selbst bei der größtmöglichen Annäherung an die Erde immer noch 1200 Millionen km von uns entfernt. Das ist rund 3000mal weiter! Nun nimmt aber sowohl die Stärke von Licht- wie von Radiowellen im Quadrat der Entfernung ab. Würden die Saturn-sonde und ihr Mimochod-Fahrzeug nur mit derselben Leistung senden wie einst „Lunochod 1“, so kämen die Signale also 3000mal $3000 = 9\,000\,000$ mal schwächer auf der Erde an. Sie könnten daher nicht mehr mit ausreichender Deutlichkeit empfangen werden und eindeutige Meßdaten und scharfe Farbfernsehbilder liefern. Man mußte also die Sendeleistung beträchtlich erhöhen. Das aber erforderte auch entsprechend größere elektrische Energie. Außerdem müssen die Computer, die Meßgeräte, die vielen komplizierten Steuer- und Regeleinrichtungen und nicht zuletzt der Antriebsmotor des Mimochod mit elektrischer Energie versorgt werden.

Auf dem weiten Wege zum Saturn waren auch einige Kurskorrek-

turen erforderlich, weil die interplanetare Sonde durch die Schwer-
kraftfelder mehrerer Planeten fliegen mußte und dabei Störungen
ihrer vorausberechneten Bahn eintraten. Auch für solche Kurs-
korrekturen wird Antriebsenergie benötigt. Die Saturnsonde er-
zeugte sie nicht durch Verbrennung von Treibstoff. Vielmehr wur-
den von dem „Ionenantriebwerk“ elektrisch geladene Teilchen, Ionen
genannt, ausgestoßen. Sie ergeben eine schwache Schubkraft, die
für Kurskorrekturmanöver aber ausreicht. Die Ionen werden durch
ein elektrisches Spannungsfeld beschleunigt und auf sehr hohe
Ausströmungsgeschwindigkeit gebracht. Dafür braucht man eben-
falls elektrische Energie.

Ein Kraftwerk fliegt durch den Weltraum

Wollte man die großen Energiemengen aus elektrischen Batterien
beziehen, so wären sehr viele und sehr große Batterien erforder-
lich. Sie wären viel zu schwer, um von einer Rakete mitgeführt
werden zu können. Außerdem haben Batterien nur eine begrenzte
Lebensdauer – wir kennen das von der Taschenlampe und vom
Transistorradio her. Auch wenn man Batterien keine elektrische
Leistung entnimmt, entladen sie sich allmählich von selbst. Für die
viele Jahre dauernde Flugzeit einer interplanetaren Sonde bilden
elektrochemische Energiequellen daher keine brauchbare Lösung.
Auch Sonnenbatterien, wie sie für „Lunochod 1“ verwendet wur-
den, können die erforderlichen großen Mengen Elektroenergie nicht
liefern, und schon gar nicht, wenn die interplanetare Sonde ein so
fernes Flugziel wie den Saturn ansteuert. Denn dieser Planet ist
 $9\frac{1}{2}$ mal weiter von der Sonne entfernt als die Erde. Die Erde hat
rund 150 Millionen km Abstand von der Sonne, der Saturn im Mit-
tel 1428 Millionen km. Da auch Lichtenergie im Quadrat der Ent-
fernung abnimmt, trifft auf den Saturn und seine Monde nur noch
der $9\frac{1}{2}$ mal $9\frac{1}{2}$ = rund 90. Teil der Sonnenlichtenergie des Mondes
der Erde.

Es gibt für so ferne Ziele interplanetarer Sonden, die mit einem
umfangreichen technischen und wissenschaftlichen Gerätesystem
ausgerüstet sind, nur einen Ausweg für die Energieversorgung:
Man muß ein komplettes kleines Kraftwerk an Bord der Rakete
installieren. Aber ein Kraftwerk ist wertlos ohne Brennstoff. Kraft-

werke „fressen“ täglich viele Waggon Kohle oder Erdöl. So viel Brennstoff kann man in einer Rakete nicht mitnehmen. Denn je größer die transportierte Last ist, desto stärker müssen die Triebwerke und desto größer die Treibstoffvorräte beim Start von der Erde sein. Da auch die Treibstoffvorräte ein hohes Gewicht haben, braucht man noch mehr Treibstoff, nur um die Treibstoffvorräte transportieren zu können. – – Hier beißt sich der Hund in den Schwanz. Es gibt aus diesem Problem keinen Ausweg, außer es gäbe die Möglichkeit, aus geringen Mengen Brennstoff riesige Energiemengen zu gewinnen.

Städte im Eis

Seit die Wissenschaftler lernten, die Energien der Atomkerne zu entfesseln, gibt es eine solche Möglichkeit! Aus einem einzigen Kilogramm „Kernbrennstoff“ kann man so viel Energie gewinnen wie aus der Verbrennung von 2375 000 Kilogramm bester Steinkohle! Diese Energiegewinnung ermöglicht nicht nur interplanetare Flüge, sondern auch die Lösung vieler anderer technischer Probleme auf der Erde. Mit Hilfe der Kernenergie kann man heute in den entlegensten Gebieten des hohen Nordens Städte gründen, obwohl es dort weder Kohle gibt noch Möglichkeiten, sie in den benötigten großen Mengen dorthin zu bringen. Doch ist man wegen der bitteren Kälte gerade dort besonders auf die Erzeugung von Wärme- und Elektroenergie angewiesen. Vor dem Zeitalter der Kernenergie konnten in diesen eisigen Einöden Menschen nicht angesiedelt werden, selbst, wenn dort noch so wertvolle Bodenschätze lagern.

Aber Brennstoff, der für ein Kernkraftwerk auf Jahre hin ausreicht, kann man mit einer einzigen Flugzeugladung befördern. Es gibt bereits ein Beispiel dafür. In Bilibino, einer neugegründeten kleinen Stadt im höchsten Norden der Sowjetunion, versorgt ein einziges Kernkraftwerk alle Wohnungen sowohl mit Heizung als auch mit elektrischer Energie. Zwischen vielen der Gebäude gibt es Verbindungstunnel, die ebenfalls beheizt sind, so daß man bei der bitteren Kälte nicht auf die offene Straße zu gehen braucht, um von einem Haus in ein anderes zu gelangen.

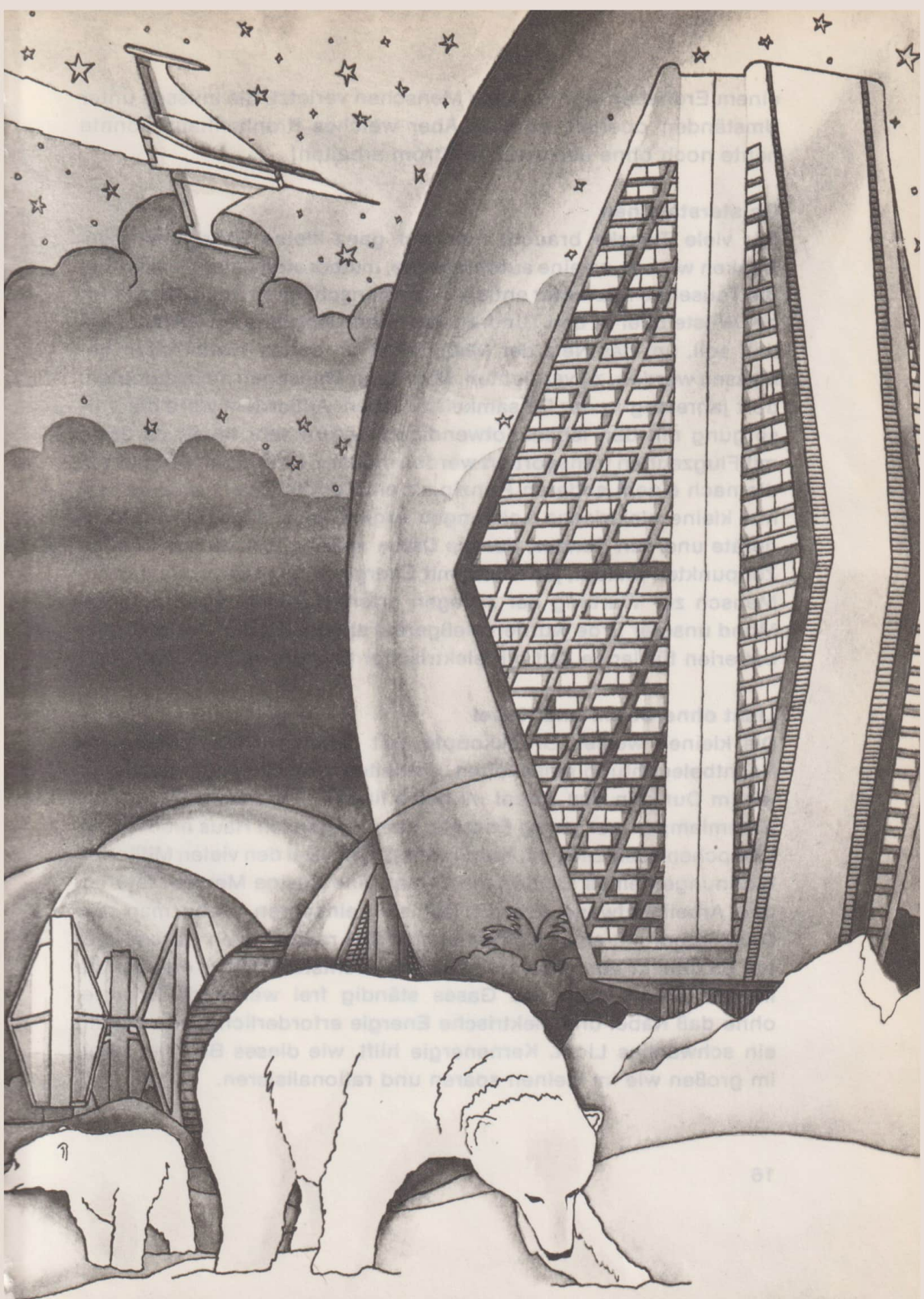
Ferner kann mit Hilfe von Kernkraftwerken z.B. das Problem

der ausreichenden Wasserversorgung gelöst werden. Überall auf der Erde wird das Süßwasser knapp. Süßwasser nennt man es nicht, weil es süß schmeckt, sondern um es von dem salzigen Meerwasser zu unterscheiden. Süßwasser braucht man aber nicht nur zum Trinken und zum Bewässern in der Landwirtschaft, sondern auch für viele industrielle Produktionsprozesse. Würde man Meerwasser in die Dampfkessel leiten, so wären sie infolge des hohen Salzgehalts des Wassers binnen kurzem verkrustet und völlig unbrauchbar. Aber auch für unzählige andere technische Prozesse wird Süßwasser benötigt. Wo soll das viele Wasser herkommen?

Unsere Flüsse und Seen können es nicht mehr liefern. Nur die Quelle des Meerwassers ist unerschöpflich. Doch müßte man die in ihm gelösten Salze entfernen, um das Meerwasser verwendbar zu machen. Das ist aber eine Kostenfrage. Denn um die Salze aus dem Wasser abzuscheiden, muß man es verdampfen, destillieren. Um die großen benötigten Wassermengen vor ihrer Verwendung zu verdampfen, benötigt man enorme Energiemengen. Nur mit Kernkraftwerken kann man sie wirtschaftlich, d. h. ohne untragbar hohen Geld- und Arbeitsaufwand, erzeugen. Denn die im Kernkraftwerk frei werdende Energie kann man gleichzeitig zum Verdampfen von Wasser und zur Erzeugung elektrischer Energie verwenden.

Als erstes Land der Welt hat die Sowjetunion Anfang des Jahres 1972 ein Kernkraftwerk in Betrieb genommen, das sich in dreifacher Hinsicht vor allen anderen auszeichnet. Es erzeugt einmal elektrische Energie, zum andern entsalzt es täglich 120 000 Tonnen Meerwasser, und drittens produziert es noch große Mengen neuen Kernbrennstoff. Denn das „Herz“ dieses Kraftwerks, das in Schewtschenko am Kaspischen Meer errichtet wurde, ist ein sogenannter schneller Brutreaktor, der nicht nur Kernbrennstoff verbraucht, sondern bei seinem Betrieb auch gleichzeitig neuen erzeugt.

Ein weiteres Beispiel von vielen möglichen Anwendungen der Kernenergie: Kleine, leicht mit dem Flugzeug transportable Kernenergieanlagen stehen heute bereit für Katastrophenfälle. Wenn z. B. durch ein Erdbeben ein Kraftwerk beschädigt wird und ausfällt, kann man ein transportables Kleinkraftwerk zur Aufrechterhaltung der notwendigen Versorgung mit Elektroenergie schnell in das Katastrophengebiet fliegen. Das ist äußerst wichtig. Denn bei



einem Erdbeben werden viele Menschen verletzt. Sie müssen unter Umständen operiert werden. Aber welches Krankenhaus könnte heute noch ohne elektrischen Strom arbeiten!

Geisterstationen

Für viele Zwecke braucht man nur ganz kleine Energiemengen. Denken wir z. B. an eine automatische, meteorologische Meßstation, die Tausende Kilometer entfernt von menschlichen Ansiedlungen in der Wüste oder in den Tundren des hohen Nordens aufgestellt werden soll, um das Netz der Meßpunkte, an denen Wetterdaten gemessen werden, zu verdichten. Man kann Menschen nicht zumuten, dort jahrelang in der Einsamkeit zu leben. Außerdem wäre die Versorgung mit den lebensnotwendigen Gütern sehr teuer, da diese mit Flugzeugen transportiert werden müßten. Eine Isotopenbatterie, die nach einem anderen Prinzip als ein Kernkraftwerk arbeitet und nur kleine elektrische Leistungen ergibt, kann dagegen die Meßgeräte und den Sender, der die Daten automatisch zu bestimmten Zeitpunkten meldet, jahrelang mit Energie versorgen, ohne daß ein Mensch zur Wartung der Anlagen erforderlich ist. Auch auf dem Mond unserer Erde wurden Meßgeräte abgesetzt, die von Isotopenbatterien für lange Zeit mit elektrischer Energie versorgt werden.

Licht ohne Strom und Kabel

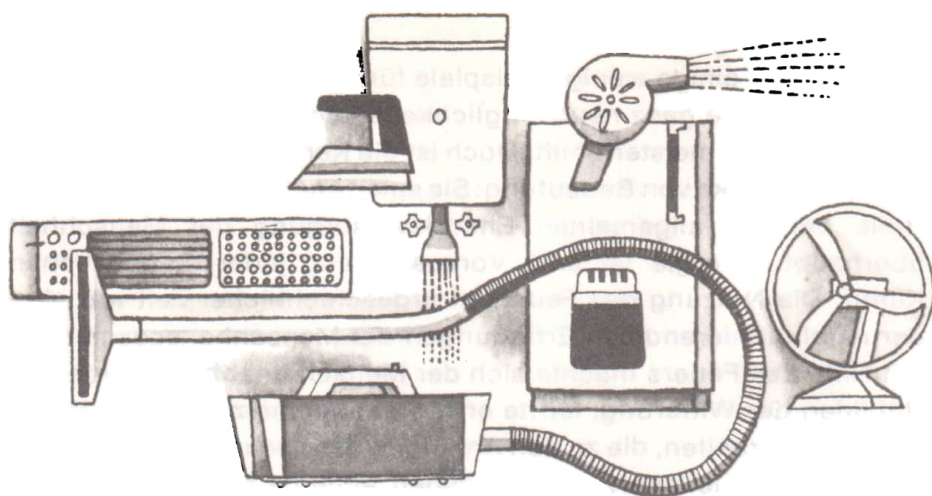
Die kleinen weißen Druckknöpfe, mit denen wir im Hausflur die Nachtbeleuchtung einschalten, enthalten eine Glimmlampe, damit wir im Dunkeln den Knopf mühelos finden. Zwar verbrauchen die Glimmlampen nur wenig Energie, aber im ganzen Haus muß für die Lämpchen zusätzlich ein Kabel verlegt sein. Bei den vielen Millionen Wohnungen eines Landes macht das eine riesige Menge Material- und Arbeitsaufwand aus. Er läßt sich einsparen, wenn man den Druckknopf mit einer kleinen Menge des radioaktiven Gases Krypton 85 füllt. In Verbindung mit einer Leuchtstoffschicht erzeugt die in den Atomkernen des Gases ständig frei werdende Energie, ohne daß Kabel und elektrische Energie erforderlich sind, ständig ein schwaches Licht. Kernenergie hilft, wie dieses Beispiel zeigt, im großen wie im kleinen sparen und rationalisieren.

Voraussetzung jeder Technik

Das sind nur einige wenige Beispiele für Anwendungen, bei denen die Kernenergie ganz neue Möglichkeiten schafft und zuvor unlösbare Probleme meistern hilft. Doch ist die Kernenergie nicht nur für spezielle Zwecke von Bedeutung: Sie spielt auch eine immer größere Rolle bei der allgemeinen Energieversorgung der Menschheit überhaupt. Energie ist eine Voraussetzung jeder menschlichen Kultur. Die Nutzung des Feuers in urgeschichtlicher Zeit war eine der revolutionierendsten Erfindungen der Menschheitsgeschichte. Mit Hilfe des Feuers machte sich der Mensch unabhängig von den Unbilden der Witterung, lernte er Metalle schmelzen und zu Werkzeugen verarbeiten, die zu den Anfängen der Technik führten. Doch war der Energiebedarf des Menschen anfangs noch sehr gering. In der ganzen Geschichte der Menschheit bis etwa zur Mitte des vorigen Jahrhunderts ist weniger Energie verbraucht worden als gegenwärtig in einem einzigen Jahrhundert verbraucht wird. Und während früher etwa 90 Prozent aller verwendeten Energie durch menschliche oder tierische Muskelkraft erzeugt wurden, entfällt heute weniger als ein Prozent der Gesamtenergieerzeugung auf menschliche und tierische Muskelkraft.

Elektroenergie ist Trumpf

Man hat berechnet, daß sich der Bedarf der Menschheit an Energie in unserem Jahrhundert etwa alle 20 Jahre verdoppelt. Der Bedarf an Elektroenergie verdoppelt sich sogar schon alle zehn Jahre. Denn elektrische Energie wird in immer größerem Maße bevorzugt, weil sie gegenüber den anderen Energieformen einen großen Vorteil hat: Man kann sie leicht überall hintransportieren und für fast alle Zwecke anwenden. Mit Hilfe des elektrischen Stroms kann man Motoren antreiben, Licht und Wärme erzeugen, chemische Prozesse in Gang setzen, Funk- und Fernmeldegeräte und Rechenautomaten betreiben usw. Die Elektroenergie ist in den vielfältigsten Formen verwendbar. Für den Transport elektrischer Energie braucht man nur Kabel zu verlegen. Folglich kann diese Energie überall hingelangen. Ihre Nutzung hinterläßt keine Rückstände, keine Asche und keinen Rauch. Immer mehr technische Vorgänge wurden deshalb „elektrifiziert“: Statt der Dampfbahnen verkehren elektrische



Schnellbahnen. Alle Energie verbrauchenden Haushaltgeräte – mit Ausnahme des Gasherdes – werden von Anfang an für elektrischen Betrieb konstruiert. Und es kommen immer neue Arten elektrischer Haushaltgeräte hinzu. Zum Staubsauger und Radio kamen der Kühlschrank, der Warmwasserspeicher, der Trockenrasierer, der Ventilator, der Fön zum Haartrocknen, und neuerdings gibt es sogar elektrische Zahnbürsten.

Aber auch die Industriewerke haben ihre Produktionsprozesse immer mehr auf die Anwendung elektrischer Energie umgestellt. Die Industrie verbraucht von der gesamten Elektroenergie eines Landes weitaus mehr als alle Haushalte zusammen. Durch die Einführung industrieller Produktionsmethoden in der sozialistischen Landwirtschaft wird der Verbrauch von Elektroenergie noch beträchtlich steigen. Es gibt fast keinen Produktionsprozeß, der nicht mit dem Verbrauch elektrischer Energie verbunden ist. Im Haushalt nimmt der Verbrauch mit dem steigenden Lebensstandard immer weiter zu.

In den Ländern, die sich bis vor kurzer Zeit in kolonialer oder halb-kolonialer Abhängigkeit von imperialistischen Ländern befanden, ist die wirtschaftliche Entwicklung weit zurückgeblieben. Während der Zeit ihrer kolonialen Unterdrückung wurde der größte Teil aller zum Leben erforderlichen Energie hier noch wie bei uns vor Jahr-

hunderterten durch die Muskelkraft von Mensch und Tier aufgebracht. Körperliche Arbeit war eine billige „Ware“ in diesen Ländern, billiger als die Anschaffung von Maschinen, die elektrische Energie verbrauchen. Nach der Befreiung vom Kolonialjoch bauen diese Länder jedoch eine eigene Industrieproduktion auf. Dadurch entsteht ein großer Bedarf an elektrischer Energie.

Man könnte den steigenden Energiebedarf zwar noch bis weit über das Jahr 2000 hinaus decken, indem immer mehr Kohle, Erdöl und Erdgas verbrannt werden. Aber erstens würde sich die Energieerzeugung dadurch in manchen Gebieten, in denen es keine Kohlenvorräte gibt oder die ursprünglich vorhanden gewesenen bereits erschöpft sind, sehr verteuern. Denn die Brennstoffe müßten über weite Entfernungen antransportiert werden. Zweitens dürfen wir aber auch nicht alle Vorräte unserer Erdrinde an Kohle, Erdöl und Erdgas einfach verheizen. Denn das sind keine bloßen Brennstoffe, sondern auch äußerst wertvolle Rohstoffe für die chemische Industrie, aus denen viele wichtige Erzeugnisse gewonnen werden: Plastikwerkstoffe, Arzneimittel, Chemikalien der verschiedensten Art, Chemiefasern für unsere Bekleidung und für industrielle Textilien usw. Deshalb muß zu den bisher genutzten Energiequellen als neue die Kernenergie hinzukommen. In der Zukunft wird sie sogar einmal die Hauptrolle bei der Energieerzeugung spielen.

Was ist Energie?

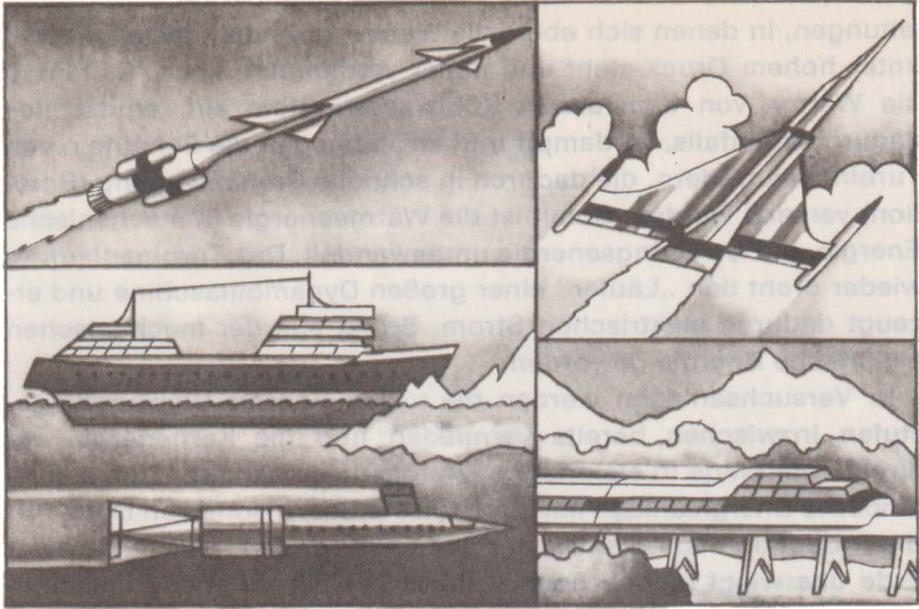
Wir lesen schon viele Seiten lang ständig das Wort „Energie“. Aber was ist eigentlich Energie? In unserer Umgangssprache benutzen wir das Wort in unterschiedlichem Sinne. So sagen wir z. B. von einem Menschen, er habe große Energie, wenn er mit Ausdauer und Anstrengung eine Aufgabe gegen Hindernisse und Schwierigkeiten meistert. Die Aufgabe braucht durchaus nicht nur in körperlichen Leistungen zu bestehen, sondern kann z. B. eine Erfindung sein. In so weitem Sinne benutzt man in der Physik und Technik das Wort Energie nicht. Hier hat es einen ganz bestimmten, eng umrissenen Sinn. In der Physik bedeutet Energie gespeicherte Arbeit oder die Fähigkeit, Arbeit zu leisten; wobei das Wort Arbeit ebenfalls nicht in dem Sinne verstanden wird, in dem wir es in der Umgangssprache verwenden. Arbeit im Sinne

der Physik und Technik ist vielmehr das Produkt aus der an einem Körper angreifenden Kraft und dem Weg, den dieser Körper unter der Einwirkung der angreifenden Kraft zurücklegt. Das ist ziemlich abstrakt. Veranschaulichen wir es uns an einem Beispiel:

Wenn dem Elektromotor der Straßenbahn elektrische Energie zugeführt wird, so wandelt er sie in mechanische Energie um. Die Welle des Motors dreht sich mit einer bestimmten Kraft, die ausreicht, um die Räder des schweren Fahrzeugs in Drehung zu versetzen. Dadurch fährt die Bahn z.B. von der einen Haltestelle bis zur nächsten. Die elektrische Energie hat damit eine Arbeit geleistet, nämlich das Fahrzeug über eine bestimmte Wegstrecke weiterbefördert. Man kann die Arbeit auch mengenmäßig, „quantitativ“ berechnen, ebenso wie man die Menge eines Stoffes, die Länge einer Strecke, die Zeitdauer eines Vorganges usw. quantitativ bestimmen kann. Man braucht dafür eine Maßeinheit. Das ist bei Stoffen das Gramm oder Kilogramm, bei einer Weglänge das Meter oder Zentimeter, bei einer Zeitdauer die Sekunde oder Stunde usw. Die Maßeinheit für Arbeit heißt Kilopondmeter, abgekürzt kpm, weil Arbeit das Produkt von Kraft mal Weg ist. Kraft aber wird in der Technik in Kilopond (kp) und Weg in Metern (m) gemessen. Bewegt der Elektromotor z. B. eine 3000 kp wiegende Straßenbahn um 2000 m weiter, so hat er eine Arbeit von $3000 \text{ kp} \times 2000 \text{ m} = 6000000 \text{ kpm}$ geleistet.

Physikalische Verwandlungsspiele

Dieses Beispiel zeigt uns noch einen wichtigen Sachverhalt: Energie kann aus einer Form in eine andere umgewandelt werden. Hier wurde elektrische Energie in mechanische Energie umgesetzt. Außer der elektrischen und mechanischen Energie gibt es noch weitere Energieformen: Wärmeenergie, chemische Energie, magnetische Energie und schließlich die Kernenergie. Alle diese verschiedenen Formen der Energie können ineinander umgewandelt werden. In unserer Nahrung z.B. ist chemische Energie gespeichert, sie wird bei der Verdauung in unserem Körper in Wärmeenergie umgewandelt. Auch die Kohle, die wir im Ofen verheizen, enthält chemische Energie, die bei der Verbrennung in Wärmeenergie verwandelt wird. Die mechanische Energie der Bewegung



fließenden Wassers wird im Wasserkraftwerk ausgenutzt und in elektrische Energie umgewandelt. In manchen Gegenden der Erde wird die mechanische Energie der Luftströmung in elektrische Energie umgewandelt. Der sich im Winde drehende Propeller treibt eine kleine Dynamomaschine an. Lunochod und einige Erdsatelliten wandeln die Strahlungsenergie des Sonnenlichts in elektrische Energie um.

Im Kernkraftwerk wird Kernenergie in Wärme, diese wieder in mechanische Energie und diese schließlich in Elektroenergie umgewandelt. Das geschieht im einzelnen so: Die aus den Atomkernen frei werdende Energie äußert sich als Wärme. Im Innern des Kernreaktors, in dem die Spaltungen der Atomkerne erfolgen, wird es nämlich ungeheuer heiß, so heiß, daß der Kernreaktor schmelzen und zerstört würde, wenn man nicht ständig Kühlwasser hindurchlaufen läßt. Das Kühlwasser erhitzt sich dadurch, entzieht also dem Reaktor die Wärme. Da es unter hohem Druck steht, kann es aber trotzdem nicht verdampfen wie das Wasser in unserem Teekessel, das nur unter dem normalen Druck der Luft steht. Das sehr heiße, unter Druck stehende Wasser umspült Rohr-

leitungen, in denen sich ebenfalls Wasser befindet, das aber nicht unter hohem Druck steht und daher verdampfen kann. Es nimmt die Wärme von dem ersten Kühlwassersystem auf, erhitzt sich dadurch ebenfalls, verdampft und strömt gegen die Schaufeln von Turbinenlaufrädern, die dadurch in schnelle Drehbewegung (Rotation) versetzt werden. Somit ist die Wärmeenergie in mechanische Energie, in Bewegungsenergie umgewandelt. Das Turbinenlaufrad wieder dreht den „Läufer“ einer großen Dynamomaschine und erzeugt dadurch elektrischen Strom. So ist aus der mechanischen elektrische Energie geworden.

In Versuchsanlagen werden die vielen Energie-Umwandlungsstufen inzwischen bereits vermieden und die Kernenergie auf direkterem Wege in elektrische Energie umgewandelt. Eine solche moderne Energieanlage hat auch unsere Saturnsonde an Bord. Für die Produktion von Elektroenergie in sehr großen Mengen auf der Erde überwiegt jedoch noch weitaus der beschriebene umständliche Weg über die verschiedenen Stufen, da die Technik dafür seit rund einem Jahrhundert immer weiter vervollkommen wurde, während die Technik der direkten Umwandlung anderer Energieformen in elektrische Energie erst in ihren Anfängen steht.

Was sind Energieträger?

Ausgangspunkt der Energiegewinnung können also ganz verschiedene Naturstoffe oder Naturerscheinungen sein: Kohle, Erdöl, Erdgas, Kernbrennstoffe oder auch Wind- und Wasserkraft. Man nennt sie Energieträger. Außer Kohle, Erdöl und Erdgas gehören auch Torf und Holz dazu. Denken wir an das Brennholz, das wir im Ofen verheizen.

Ob ein in der Natur vorhandener Stoff als Energieträger für uns nutzbar ist oder nicht, hängt von der Entwicklung der Wissenschaft und Technik ab. Holz war schon für die Menschen der Steinzeit ein Energieträger, seit sie gelernt hatten, das Feuer zu nutzen. Uran und Thorium wurden dagegen erst zu Energieträgern, als der Mensch lernte, die Kernenergie freizusetzen.

Wenn es in den kommenden Jahrzehnten gelingen sollte, Energie statt durch Kernspaltung auch durch Kernverschmelzung zu gewinnen, so würde der im Wasser in geringer Menge enthaltene

schwere Wasserstoff (Deuterium) ebenfalls zu einem Energieträger. Wissenschaftler und Techniker arbeiten daran, immer neue Energieträger zu erschließen.

Kohle wird entthront

Nach dem Stande von 1965 hatten die verschiedenen Energieträger folgende Anteile am Gesamtenergieverbrauch auf der Erde:

Kohle	39,9 Prozent
Erdöl	33,5 Prozent
Erdgas	16,3 Prozent
Wasserkraft	5,9 Prozent
Torf, Holz u. ä.	4,4 Prozent

Kohle und Erdöl stehen hier noch weit im Vordergrund und machten rund drei Viertel der Energieträger überhaupt aus. Daneben spielt das Erdgas bereits eine bedeutende Rolle. Alle anderen Energieträger stehen weit an Bedeutung zurück. Der Anteil der Kernenergieträger war noch so gering, daß er in der Statistik überhaupt nicht in Erscheinung trat. Bis zum Jahre 2000 wird sich das Bild aber grundlegend wandeln und so aussehen:

Kernenergie	25,8 Prozent
Erdöl	25,8 Prozent
Erdgas	25,8 Prozent
Kohle	18,5 Prozent
Wasserkraft	2,4 Prozent
Torf, Holz u. ä.	1,5 Prozent

Man nimmt also an, daß etwa drei Viertel der gesamten Energieerzeugung im Jahre 2000 zu etwa gleichen Anteilen auf Kernenergie, Erdöl und Erdgas entfallen werden, während der Anteil der Kohle stark zurückgeht.

Auf den Kern kommt es an

Die neue, seit der Entdeckung der Kernspaltung möglich gewordene Form der Energiegewinnung wird häufig auch als „Atomenergie“ bezeichnet. Das ist eigentlich falsch. Denn *alle* Energie stammt aus Atomen. Auch die Menschen der Steinzeit, die sich die Wärmeenergie des Feuers nutzbar machten, verwendeten bereits

„Atomenergie“. Denn die bei der Verbrennung frei werdende Energie stammt ebenfalls aus Atomen, aber aus den Elektronenhüllen der Atome. Neu ist nur, daß wir jetzt Energie nicht nur aus den *Atomhüllen*, sondern auch aus den *Atomkernen* freisetzen können. Wenn wir diese Energie meinen, dürfen wir deshalb nicht „Atomenergie“, sondern müssen „Atomkernenergie“ oder kürzer „Kernenergie“ sagen.

Jedes Atom besteht – wir werden das später noch genauer erfahren – aus einem Kern und einer Hülle von Elektronen. Die Elektronen bewegen sich auf kreis- oder ellipsenförmigen Bahnen um den Atomkern. Bei Atomen, deren Hülle aus vielen Elektronen besteht, sind Elektronen auf verschiedene Bahnen verteilt, die unterschiedliche Abstände vom Atomkern haben. Man sagt: Die Elektronen sind in „Schalen“ um den Kern angeordnet. Bei chemischen Reaktionen „verzahnen“ sich die äußersten Elektronenschalen zweier oder mehrerer Atome miteinander und bilden ein Molekül. Bei solchen Reaktionen wird entweder Energie verbraucht oder frei. Wird Energie frei, so spricht man von exothermen, wird Energie verbraucht, so spricht man von endothermen chemischen Reaktionen. Man kann für jede chemische Reaktion voraussagen, ob sie exotherm oder endotherm verläuft und die frei werdende oder dabei verbrauchte Energie vorherberechnen.

Zwischen den Energie liefernden chemischen Reaktionen der Atomhüllen und den Energie liefernden Prozessen der Atomkerne besteht nun ein ganz gewaltiger Unterschied: Kernprozesse liefern größenordnungsmäßig millionenfach mehr Energie als chemische Reaktionen der Atomhüllen! Das ist der Grund, weshalb durch Kernspaltung eines Kilogramms Uran millionenfach mehr Energie freizusetzen ist als durch Verbrennen eines Kilogramms Steinkohle. Warum die Atomkerne so sehr viel mehr Energie liefern als die Atomhüllen, das haben die Wissenschaftler nur sehr allmählich im Verlaufe vieler Jahrzehnte zu verstehen und zu erklären gelernt. Ja, zu Anfang unseres Jahrhunderts wußte man noch nicht einmal, daß Atome überhaupt aus einem Kern und einer Hülle aus Elektronen zusammengesetzt sind. Um die Jahrhundertwende begann erst jenes spannende Abenteuer der Wissenschaft, das schließlich bis zur Atomkernspaltung führte.

Rätselvolle Strahlen

Man schrieb den 8. November 1895. Professor Röntgen, der an der Universität Würzburg Physik lehrte, war schon seit Tagen nervös und für niemand zu sprechen. Er schloß sich in sein Labor ein und unternahm immer wieder denselben Versuch, weil das Ergebnis des Experiments fast unglaublich erschien. Wenn er an eine Vakuumröhre, die fast luftleer gepumpt war, eine hohe elektrische Spannung anlegte, so sah er plötzlich einen Papierschirm aufleuchten, der in der Nähe der Vakuumröhre stand. Und das, obwohl die Vakuumröhre vollständig mit eng anliegendem schwarzem Papier umkleidet und alle Fenster des Zimmers verdunkelt waren. Den Papierschirm hatte Professor Röntgen mit Bariumplatinzyanür bestrichen. Das ist ein Leuchtstoff. Solche, auch fluoreszierende Stoffe genannten Substanzen haben die Eigenschaft, aufzuleuchten, wenn sie von Licht oder anderen Strahlen getroffen werden. Auch der Bildschirm unseres Fernsehers besteht aus fluoreszierenden Stoffen und leuchtet auf, wenn der Elektronenstrahl, der im hinteren Ende der Bildröhre erzeugt wird, auf den Leuchtstoff trifft.

Eine unglaubliche Erscheinung

Aber was brachte in den Versuchen Professor Röntgens den mit Leuchtstoff bestrichenen Papierschirm zum Aufleuchten? Licht konnte aus der Vakuumröhre nicht austreten. Denn die schwarze Papierumhüllung schloß die Glasröhre allseitig lichtdicht ab. Wenn die elektrische Entladung durch die Röhre ging, sah man nicht die geringste Spur von Licht aus der Röhre austreten. Von draußen konnte auch kein Licht auf den Leuchtstoffschirm fallen. Denn die Fenster waren bis auf die letzte Ritze verdunkelt. War die elektrische Beleuchtung im Labor ausgeschaltet, so konnte man nicht mehr die Hand vor den Augen sehen.

Professor Röntgen wiederholte den Versuch immer wieder. Aber

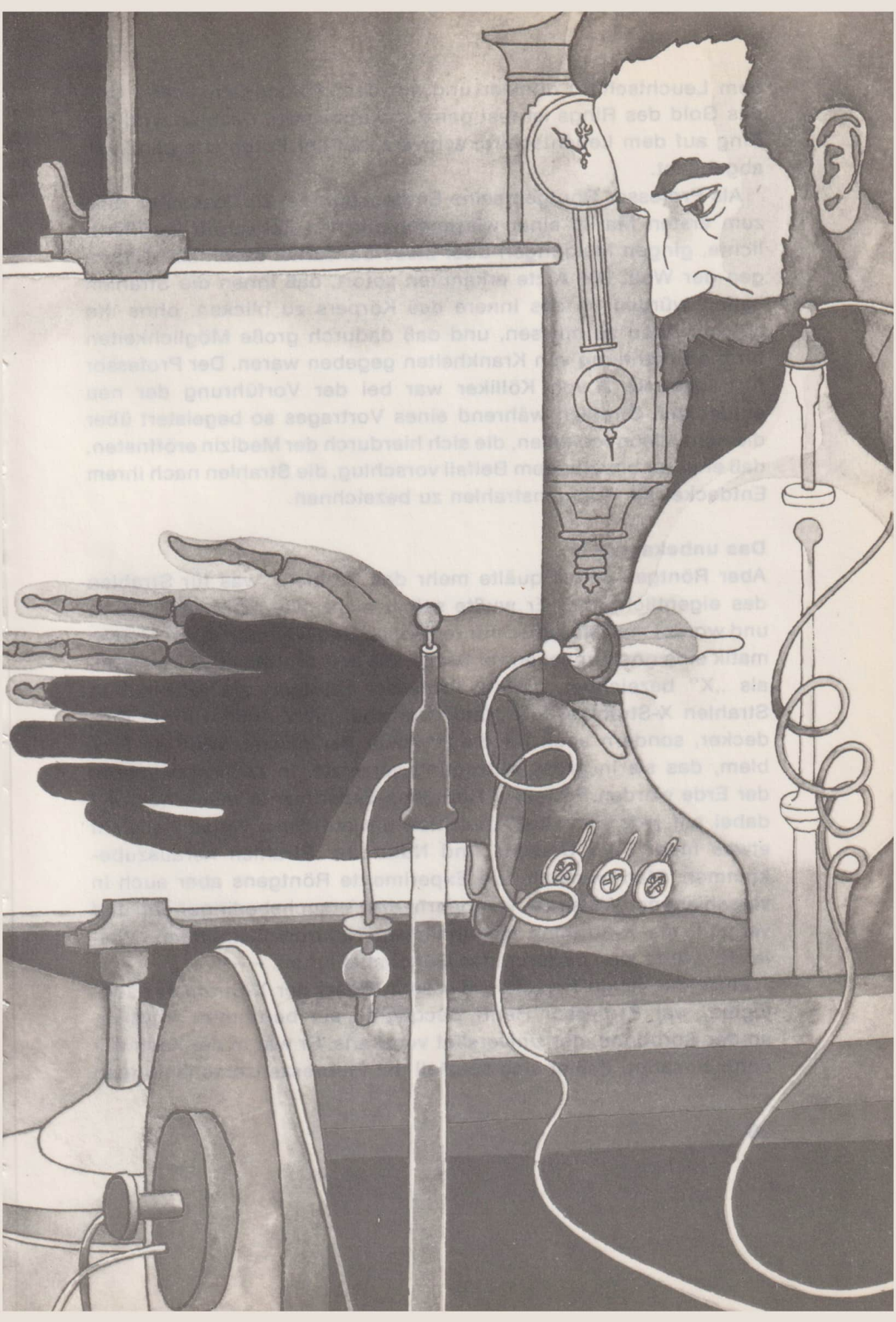
seine Sinne hatten ihn nicht getäuscht. Jedesmal, wenn er den Schalter betätigte, der der hohen elektrischen Spannung den Weg durch die Vakuumröhre freigab, trat das rätselhafte Leuchten auf. Der Wissenschaftler rückte den Papierschirm weiter von der Vakuumröhre ab. Bei vergrößertem Abstand wurde das Leuchten zwar schwächer, aber bis zu zwei Meter Abstand war es noch ganz deutlich zu bemerken.

Die Hand wird durchsichtig

Zufällig hielt Professor Röntgen einmal die Hand zwischen Vakuumröhre und Leuchtschirm. Da gab es eine neue große Überraschung: Für einen kurzen Moment sah der Professor auf dem Leuchtstoffschirm die Umrissse seiner Hand, aber nicht wie in einem gewöhnlichen Schattenspiel, bei dem man die Hand vor eine Lichtquelle hält. Vielmehr sah man auf dem Leuchtstoffschirm die Knochen der Finger. Sie waren auf dem Leuchtschirm dunkler, während das Fleisch, das die Knochen umgibt, heller abgebildet war. Ganz deutlich zeichnete sich auch der Ring ab, den der Professor an einem Finger trug. Er war auf dem Leuchtschirmbild ganz dunkel.

Um zu überprüfen, ob er sich nicht getäuscht hatte, stellte Professor Röntgen eine Fotoplatte statt des Leuchtstoffschirms auf. Als die Platte entwickelt wurde, zeigte sie deutlich, so wie Professor Röntgen es auf dem Leuchtstoffschirm gesehen hatte, die Umrissse der Hand mit den Knochen inmitten der Finger und dem Ring. Nur war auf dem fotografischen Negativ natürlich alles umgekehrt.

Nun konnte kein Zweifel mehr bestehen, daß in dem Moment, in dem die elektrische Spannung an die Vakuumröhre angelegt wurde, Strahlen entstehen, die selbst unsichtbar sind, die aber die Glaswand der Röhre, das umhüllende schwarze Papier und sogar die Hand durchdringen. Wenn die Strahlen auf den Leuchtstoff auftreffen, leuchtet er für einen kurzen Moment auf. Die unterschiedlichen Stoffe sind für die rätselvollen Strahlen aber offensichtlich verschieden durchlässig. Das Fleisch der Muskeln läßt viel von der Strahlung hindurch. Deshalb wird es auf dem Leuchtschirm hell, auf dem Fotonegativ dunkel abgebildet. Die Knochen sind schon weniger durchlässig für die Strahlen. Deshalb zeigen sie sich auf



dem Leuchtschirm dunkler und auf dem Fotonegativ heller. Und das Gold des Rings ist fast ganz undurchlässig. Deshalb wird der Ring auf dem Leuchtschirm schwarz, auf der Fotoplatte ganz hell abgebildet.

Als Professor Röntgen seine Entdeckung am 28. Dezember 1895 zum ersten Mal in einer wissenschaftlichen Zeitschrift veröffentlichte, gingen Meldungen über diese Sensation durch alle Zeitungen der Welt. Die Ärzte erkannten sofort, daß ihnen die Strahlen helfen würden, in das Innere des Körpers zu blicken, ohne ihn aufschneiden zu müssen, und daß dadurch große Möglichkeiten für die Erkennung von Krankheiten gegeben waren. Der Professor für Anatomie A. von Kölliker war bei der Vorführung der neu entdeckten Strahlen während eines Vortrages so begeistert über die neuen Möglichkeiten, die sich hierdurch der Medizin eröffneten, daß er unter brausendem Beifall vorschlug, die Strahlen nach ihrem Entdecker als Röntgenstrahlen zu bezeichnen.

Das unbekannte X

Aber Röntgen selbst quälte mehr das Problem, was für Strahlen das eigentlich sind. Er wußte selbst nicht, wie man sie erklären und worauf man sie zurückführen sollte. Und weil man in der Mathematik eine noch unbekannte Größe, die erst errechnet werden soll, als „X“ bezeichnet, nannte Professor Röntgen die rätselhaften Strahlen X-Strahlen. Ihre Natur war aber nicht nur für ihren Entdecker, sondern auch für die Physiker der ganzen Welt ein Problem, das sie in große Aufregung versetzte. In zahllosen Labors der Erde wurden Professor Röntgens Experimente wiederholt und dabei auf jede Einzelheit geachtet, um auf diese Weise vielleicht etwas mehr über Ursache und Natur der Strahlen herauszubekommen. Man wandelte die Experimente Röntgens aber auch in verschiedener Weise ab, veränderte die Versuchsbedingungen und verglich die X-Strahlen mit ähnlichen Naturerscheinungen. Vielleicht würde sich dadurch das Geheimnis lüften. – – –

Einer der vielen Forscher, die dem Rätsel der X-Strahlen nachjagten, war Professor Henri Becquerel, ein berühmter Physiker an der Sorbonne, der Universität von Paris. Er war in der Fachwelt dafür bekannt, daß er sich speziell mit Fluoreszenzerscheinungen

beschäftigte, also mit dem Aufleuchten von Stoffen bei Einwirkung einer anderen Strahlung. Professor Becquerel war noch nicht ganz davon überzeugt, daß Röntgens rätselvolle X-Strahlen *nur* dann auftreten, wenn eine elektrische Spannung an eine Vakuumröhre angelegt wird. Er hielt es für möglich, daß alle fluoreszierenden Stoffe außer dem sichtbaren Licht, das sie aussenden, wenn Sonnen- oder anderes intensives Licht auf sie fällt, auch X-Strahlen aussenden.

Auf dem Holzweg...

Das war durch einen verhältnismäßig einfachen Versuch nachzuprüfen. Man brauchte nur einen fluoreszierenden Stoff in die Sonne zu legen, so daß er intensiv mit Licht bestrahlt wurde. Dann sandte er seinerseits ebenfalls sichtbares Licht aus. Das war nichts Neues. Aber vielleicht sandte er dabei auch zugleich X-Strahlen aus. Das ließ sich feststellen, indem man den fluoreszierenden Stoff auf eine Fotoplatte legte. Dabei mußte die Fotoplatte freilich in schwarzes Papier eingewickelt sein. Dann konnte weder das sichtbare Licht, das der fluoreszierende Stoff aussandte, noch das Sonnenlicht selbst auf die Platte einwirken. Wenn aber der Stoff gleichzeitig X-Strahlen aussandte, mußten sie auf der Fotoplatte nach der Entwicklung eine Schwärzung ergeben, weil X-Strahlen das schwarze Papier durchdringen.

Professor Becquerel begann mit seinen Versuchen im Februar 1896, schon wenige Wochen nach Bekanntwerden der Entdeckung Röntgens. Zunächst hatte er für seine Versuche immer gutes Wetter. Die Sonne schien. Das kam ihm recht. Denn wenn das Sonnenlicht auf das fluoreszierende Material einwirkte, mußte es eine kräftige Licht- und – wie Becquerel hoffte – Röntgenstrahlung aussenden. Gespannt verfolgte er die Arbeit der Laborantin, die die Fotoplatten entwickelte. Und siehe da: Die Platten zeigten tatsächlich an der Stelle, an der das Plättchen des fluoreszierenden Stoffes aufgelegt hatte, eine deutliche Schwärzung. Aber weil man in der Wissenschaft nicht vorschnell triumphieren darf, wollte Professor Becquerel die Versuche noch einige Male wiederholen, bevor er mit seiner neuen Entdeckung an die Öffentlichkeit trat.

Doch am 26. und 27. Februar war ihm das Wetter nicht hold.

Henri Becquerel



Die Sonne zeigte sich in Paris nur kurze Zeit. Dann bezog sich der Himmel, und als erfahrener Spezialist für Fluoreszenz wußte Professor Becquerel, daß nun kein Ergebnis der Versuche zu erwarten war. Denn nur Sonnenlicht ist kräftig genug, um das benutzte Mineral zu einer kräftigen Fluoreszenz anzuregen. Er nahm die Fotoplatten mit den aufgelegten Scheibchen des Minerals und legte sie in das Schreibtisch-Schubfach; wo sie tagelang im Dunkeln liegenblieben. Man muß auf besseres Wetter warten, sagte sich Becquerel.

... und doch etwas gefunden

Aber auch am 28. und 29. Februar – es war ein Schaltjahr – schien die Sonne nicht. Fast hätte Professor Becquerel deshalb die Platten, die er für einen neuen späteren Versuch nicht mehr verwenden wollte, weggeworfen. Aber dann ließ er sie dennoch entwickeln, obwohl auf ihnen keine Schwärzung zu erwarten war. Und da gab es eine neue sensationelle Entdeckung: Auf den Platten zeigte sich an der Stelle, an der die Mineralien gelegen hatten, eine viel stärkere Schwärzung als bei den vorangegangenen Versuchen mit kräftigem Sonnenlicht.

Warum war die Schwärzung der Platten, die im Dunkeln gelegen hatten, stärker? Auf ihnen lagen die Mineralien viele Tage lang, auf den anderen Platten hatten sie nur einige Stunden gelegen. Folglich mußten die Mineralien selbst Strahlen aussenden, die die Fotoplatte schwärzen!

Professor Becquerels Hypothese, die X-Strahlen seien eine Begleiterscheinung der Fluoreszenz, brach damit zusammen. Denn auf den jetzt entwickelten Fotoplatten hatte das fluoreszierende Material tagelang nur im Dunkeln gelegen. Da keine Sonne darauf schien, konnte es auch kein Fluoreszenzlicht ausgesandt haben. Die Schwärzung der Platten konnte daher weder durch Fluoreszenzlicht noch durch X-Strahlen hervorgerufen worden sein. Die Ursache der Schwärzung mußte eine neue Strahlung sein, die Professor Becquerel bei seinen Versuchen zur Enträtselung der X-Strahlen unvermutet entdeckt hatte. Statt die Natur der Röntgenstrahlen zu enträtseln, war Professor Becquerel auf ein neues Rätsel der Natur gestoßen.

Noch ein Rätsel mehr

Die X-Strahlen mußte man künstlich mit Hilfe von Hochspannung und Vakuumröhre erzeugen. Die neu entdeckten Strahlen waren von Natur aus da. Man brauchte keinen Apparat zu bauen, um sie hervorzurufen. Sie waren immer vorhanden, konnten weder ein- noch ausgeschaltet werden. Solange die Erde existiert, gab es auch diese Strahlen. Schon als sich die ersten Menschen aus dem Tierreich entwickelten, waren sie ständig von den Strahlen umgeben, ohne es zu merken. Erst jetzt war man mit Hilfe einer einfachen Fotoplatte dahintergekommen, daß es diese Strahlen gibt.

Mit den Röntgenstrahlen hatten die neuen Strahlen die Eigenschaft gemeinsam, für das Auge unsichtbar zu sein. Und noch eine weitere Gemeinsamkeit bestand: X-Strahlen und die rätselvollen, neuen Strahlen durchdringen schwarzes Papier und andere undurchsichtige Stoffe. Es ist verständlich, daß die Forscher jetzt darauf brannten, Näheres über die rätselhaften neuen Strahlen herauszubekommen. Die erste Frage war: Welche Stoffe senden die Strahlen aus? An dieser Stelle begegnen wir zum ersten Mal in dem großen Abenteuer der Wissenschaft dem Begriff Uran. Zufällig hatte Professor Becquerel für seine Versuche Plättchen aus Uran- und Natriumsulfat verwendet. In den Mineralien waren also die chemischen Elemente Uran, Natrium, Schwefel und Sauerstoff enthalten. Sandten alle diese Elemente die Strahlen aus oder nur eines von ihnen? Es stellte sich heraus, daß Natrium, Schwefel und

Sauerstoff keine Strahlen aussenden, aber das Uran. Man sprach jetzt von Uranstrahlen.

Die Assistenten Professor Becquerels machten Überstunden. Noch am ersten Tage der Entdeckung stellten sie fest, daß die Strahlung nicht nur fotografische Platten schwärzt, sondern auch imstande ist, Elektroskope zu entladen. Elektroskope sind einfache Apparate, mit denen man niedrige elektrische Spannungen und schwache Ladungen leicht feststellen kann. Ferner zeigte sich, daß die Uranstrahlen nicht nur durch Papier, sondern auch durch dünne Aluminium- und Kupferfolien von einem Zehntelmillimeter Dicke hindurchgehen. Bereits am 3. März stand fest, daß die Intensität der Strahlen innerhalb von 72 Stunden – der Versuch erstreckte sich vom 1. bis 3. März – nicht im geringsten nachließ, obwohl das Uransulfat in dieser Zeit ununterbrochen im Dunkeln gehalten wurde, ihm also weder Licht noch irgendeine andere Energie von außen zugeführt worden war.

Heute wissen wir, daß die Strahlung des Urans erst in $4\frac{1}{2}$ Milliarden Jahren um die Hälfte nachläßt.

Eine Studentin greift ein

Damals studierte bei Professor Henri Becquerel eine junge Polin, Marie Skłodowska. Unter größten Entbehrungen hatte sie sich etwas Geld erspart, um an der berühmten Pariser Sorbonne studieren zu können. In ihrem Heimatland hatte sie dazu keine Gelegenheit. Denn Polen wurde damals vom russischen Zaren unterjocht. Das brachte ihrer Heimat große Not und Unterdrückung. An den Schulen durfte nicht einmal die polnische Sprache gesprochen werden, nur Russisch war erlaubt. Zwar gab es auch in Polen Universitäten, aber in dieser Zeit der Not und der Unterdrückung waren auch für die freie Entfaltung der Wissenschaft an den polnischen Universitäten die Bedingungen nicht gegeben. Deshalb wollte Marie Skłodowska, was uns heute merkwürdig erscheinen könnte, nicht in ihrer Heimat, sondern an der Pariser Sorbonne studieren, um gründliche Kenntnisse nach dem neuesten Stande der Naturwissenschaft zu erwerben. Später wollte sie in ihre Heimat zurückkehren, um als Lehrerin das erworbene Wissen ihren jungen Landsleuten weiterzuvermitteln.



Das Forscherehepaar Pierre und Marie Curie

Aber dazu kam es nicht. Denn Marie Skłodowska übernahm die schwere Aufgabe, jene rätselvollen Uranstrahlen zu erforschen. Daß diese Aufgabe auf Jahrzehnte ihre Arbeitskraft in Anspruch nehmen würde und daß damit jenes große Abenteuer der Wissenschaft begann, das der Menschheit eine gigantische, neue Energiequelle erschloß, aber auch eine große Gefahr brachte, ahnte die junge polnische Studentin damals ebensowenig wie irgendein anderer Mensch.

Aber daß am Beginn dieser neuen und für unser ganzes Jahrhundert so entscheidenden Wissenschaft der Kernphysik eine Frau steht, ist vielleicht symbolisch. Frauen hatten bis dahin in der Gesellschaft keine dem Manne gleichrangige Rolle gespielt. In der Wissenschaft war die Frau fast bedeutungslos. Es war eine große Seltenheit, wenn ein junges Mädchen einen wissenschaftlichen

Beruf erlernte. Insbesondere die Naturwissenschaft war fast ausschließlich Männern vorbehalten. Wie denkwürdig daher, daß ausgerechnet diese große und bedeutungsvolle Wissenschaft der Kernphysik von einer jungen Frau begründet wurde! Sie hat dadurch ein überzeugendes Beispiel gegeben, daß Frauen zu ebenso hervorragenden wissenschaftlichen Leistungen befähigt sind wie Männer und daß die Frauen und Mädchen das Recht haben, in Gesellschaft und Wissenschaft ebenso geachtet zu werden wie Männer. In der sozialistischen Gesellschaft ist das längst eine Selbstverständlichkeit. Zu Beginn unseres Jahrhunderts mußten die Frauen aber um ihre gleichberechtigte Stellung in der Gesellschaft noch kämpfen, und in der kapitalistischen Gesellschaftsordnung müssen sie es noch heute. So bekommen z.B. in der BRD Frauen für gleiche Arbeit weniger Lohn als Männer.

Unter dem Namen Marie Skłodowska ist die Frau, die das Atomzeitalter eröffnete, heute nur noch den Fachleuten bekannt. Sie heiratete später den französischen Physiker Doktor Pierre Curie. Als Marie Curie ist sie in die Geschichte eingegangen; ihr Name wird über Jahrtausende hinweg leuchten und seinen Klang behalten. Wir wollen dem Leben Marie Curies ein wenig nachspüren und ihren Schicksalsweg bis zum Beginn ihrer großen Lebensaufgabe verfolgen.

In die Naturwissenschaft verliebt

Marie war ein für die damalige Zeit ganz ungewöhnlicher Mensch. Während andere junge Mädchen ihres Alters hauptsächlich darauf bedacht waren, sich glücklich zu verheiraten und nur ihrer Familie zu leben, weil das in der bürgerlichen Gesellschaft als einziger Lebensinhalt der Frau galt, war Marie Skłodowska von einem leidenschaftlichen Interesse für die Naturwissenschaft beseelt. Für sie bedeutete es das höchste Glück, die Gesetzmäßigkeiten der Naturerscheinungen zu erkennen. Wenn sie im Hörsaal der Sorbonne saß und mit gespannter Aufmerksamkeit dem Vortrag ihrer Professoren lauschte, war sie begeistert von der Folgerichtigkeit und Logik der Naturwissenschaft.

Ihre Tochter Eve Curie, die später eine weltberühmt gewordene Biographie ihrer großen Mutter schrieb, schildert die Gefühle und

Empfindungen Marie Skłodowskas im Hörsaal einmal mit folgenden Worten: „Die Polin auf ihrer Bank lächelt begeistert. Ihre hellgrauen Augen unter der hohen gewölbten Stirn leuchten vor Glück. Wie kann man die Wissenschaft trocken finden? Gibt es etwas Schöneres als die unveränderlichen Regeln, die die Welt regieren, etwas Wunderbareres als den menschlichen Geist, der fähig ist, sie zu entdecken? Wie leer, wie phantasielos scheinen Romane und Märchen neben diesen außerordentlichen Phänomenen, die durch harmonische Gesetze miteinander verbunden sind... Ein Aufschwung, den man nur mit Liebe vergleichen kann, strömt von der Seele des Mädchens zu der Unendlichkeit des Wissens, zu den Dingen und ihrem Gesetz.“

Wir sollten über solche Worte, die die innere Einstellung Marie Skłodowskas zur Wissenschaft charakterisieren, einmal nachdenken! Wie ein echter Künstler für die Kunst, so muß ein guter Wissenschaftler für die Wissenschaft begeistert sein, wenn er auf seinem Gebiet etwas leisten will. Wissenschaftler zu werden, nur oder hauptsächlich, um etwas mehr Geld zu verdienen, ist keine richtige Einstellung zu einem wissenschaftlichen Beruf. Man muß von Leidenschaft für die Wissenschaft gepackt sein, wenn man Ungewöhnliches und Überdurchschnittliches leisten will.

Marie Skłodowska wurde am 7. November 1867 als Tochter eines Professors, der eine höhere Schule leitete, in Warschau geboren. Als Professor wurden damals in Polen nicht nur Universitätslehrer bezeichnet, sondern auch Lehrer an allgemeinbildenden Schulen. Heute würden wir also sagen, Maries Vater sei Direktor einer Oberschule gewesen. Die materiellen Lebensbedingungen der Familie Skłodowska waren hart. Marie hatte viele Geschwister. Ihr Vater verlor durch ein unbedachtes Darlehen an einen Fabrikanten, der Bankrott machte, sein ohnehin geringes Vermögen. Noch während der Kindheit Maries starb ihre Mutter an Lungentuberkulose. Marie und alle ihre Geschwister hatten eine sehr sorgenvolle und entbehrungsreiche Jugend.

In der Schule brachte es Marie zu hervorragenden Leistungen. Das Lernen fiel ihr leicht; doch wurde sie dadurch nicht nachlässig, sondern nutzte alle ihre Fähigkeiten mit großem Fleiß. Sie sprach so gut Russisch und Französisch, daß man glaubte, es wären

ihre Muttersprachen. Auch in den übrigen Fächern ragte sie durch ausgezeichnete Kenntnisse hervor. Unbedingt wollte sie einmal studieren und dann selbst Lehrerin werden und durch die Verbreitung wissenschaftlicher Kenntnisse und fortschrittlicher Ideen dazu beitragen, die Freiheit ihres Volkes wiederzuerringen.

Aber zunächst mußte sie nach dem abgeschlossenen Besuch der höheren Schule eine Stellung als Hauslehrerin annehmen. Die vermögenden Leute ließen nämlich damals ihre Kinder nicht in den öffentlichen Schulen zusammen mit den Kindern von Ärmern unterrichten, sondern stellten eine eigene Lehrerin an, die im Hause Unterricht gab und die Kinder erzog. Dadurch sollten die Kinder von ihren Altersgenossen abgesondert, zum Standesdünkel und zur Überheblichkeit erzogen werden, zu dem Gefühl, „etwas Besseres“ zu sein als andere, nicht vermögende Menschen.

Ein Wunschtraum erfüllt

Von dem wenigen Geld, das Marie für ihre Arbeit als Hauslehrerin bekam, sparte sie dennoch Jahr für Jahr kleine Summen. Das kostete sie viele Entbehrungen. Aber sie nahm sie auf sich, um einmal den großen Traum ihres Lebens erfüllen zu können: ein Studium an der berühmten Universität von Paris. Sie war damals eine der besten Ausbildungsstätten der Welt; man erhielt dort eine sehr gründliche und moderne naturwissenschaftliche Ausbildung. Niemals hätte Marie das Geld, das sie für ihr Studium in Paris brauchte, vollständig zusammensparen können. Aber mit Hilfe ihrer bereits in Paris lebenden und dort mit einem Arzt verheirateten älteren Schwester, von der sie ein bißchen materielle Unterstützung erhoffen konnte, wurde es ihr schließlich möglich, im November 1891 das lang ersehnte Studium zu beginnen.

Marie war damals schon 24 Jahre alt – ein Alter, in dem viele junge Menschen heute bereits ihr Studium abgeschlossen haben. Wie glücklich war Marie, als sie an der Sorbonne als Studentin eingeschrieben, „immatrikuliert“, wurde! Und das trotz der Armut, in der sie ihr Studium würde zubringen müssen! Unter welchen harten Lebensbedingungen sie sich durch das Studium hungerte, das ist für unsere jungen Menschen, die heute in einer sozialistischen Gesellschaft studieren, gar nicht mehr vorstellbar. Das Geld reichte

weder zum Sattessen noch zum Heizen ihrer ärmlichen „Bude“. Wenn sie im Winter morgens aufstand, war das Wasser in der Waschschüssel gefroren, und infolge des dauernden Hungerns wurde sie mehrmals schwer krank. Trotzdem minderte das nicht ihren Eifer für die Wissenschaft. Sie nutzte jede Minute zum Lesen oder Experimentieren. Wie einst an der Schule, so bestand Marie Skłodowska auch an der Universität alle Prüfungen mit glänzenden Zensuren. Als Professor Becquerel die Uranstrahlen entdeckt hatte, fesselte sie das dadurch aufgeworfene naturwissenschaftliche Problem so stark, daß sie es zu ihrer großen Lebensaufgabe machte. Sie wollte versuchen, das Rätsel dieser Strahlen zu lösen, obwohl sie wußte, daß das möglicherweise äußerst schwierig sein könnte.

Aber sie hatte jetzt einen gleichgesinnten Gefährten, der von ebensolcher Begeisterung für die Naturwissenschaft beseelt war: Doktor Pierre Curie, ein genialer, aber mittelloser Wissenschaftler. Gemeinsame Interessen hatten die beiden zusammengeführt. Die erste große Bewährungsprobe ihrer Ehe waren die vier Jahre harter, gemeinsamer Forschungsarbeit zur Lösung des Rätsels der Uranstrahlen. Diese Forschungen bildeten zugleich Marie Curies Doktorarbeit, die sie am 25. Juni 1903 den Professoren der Sorbonne vorlegte. Wohl selten ist eine Doktorarbeit verfaßt worden, die von so revolutionierender Bedeutung für die Wissenschaftsgeschichte werden sollte! Daß Marie und Pierre Curie mit ihren Untersuchungen eine ganz neue und äußerst wichtige Wissenschaft begründen würden, ahnten damals weder die Curies selbst noch ihre Professoren.

Das Atomzeitalter beginnt im Schuppen

Die Curies erhielten keinerlei staatliche Unterstützung für ihre Forschungen, wie es heute bei uns selbstverständlich wäre. Es ist grotesk: Der Grundstein für die neue weltverändernde Wissenschaft wurde von den Curies mit ihrem eigenen Geld finanziert, das sie von ihrem bescheidenen Gehalt aufbringen mußten. Das einzige, was die Öffentlichkeit an materieller Unterstützung beitrug, bestand in einem alten halbverfallenen Schuppen, der zu einem Labor der Pariser Fachschule für Physik gehörte; diesen Schuppen

durften die Curies kostenlos für ihre Arbeit benutzen. An dieser Fachschule war Pierre Curie als Dozent angestellt.

Seinen Kenntnissen nach hätte er zwar gut als ordentlicher Professor an der Pariser Universität lehren können. Dann hätten ihm auch ein gut eingerichtetes und aus staatlichen Mitteln finanziertes Labor mit allen Apparaten sowie wissenschaftlich ausgebildete Hilfskräfte zur Verfügung gestanden. Aber obwohl sich Doktor Curie dreimal innerhalb jener Jahre, in denen er gemeinsam mit seiner Frau die bahnbrechenden Forschungen durchführte, um eine Professur bewarb, erhielt er keinen Lehrstuhl. Denn für die Berufung zum Professor mußte man einflußreiche Freunde in Regierungsstellungen haben, der herrschenden bürgerlichen Klasse angehören oder zumindest um ihre Gunst betteln und sich vor ihr demütigen. Doktor Pierre Curie hatte einen zu aufrechten Charakter, um vor Leuten zu kriechen, die nur einflußreich und wohlhabend, aber sonst dumm und eingebildet waren.

So wurde die elende Bretterbude auf dem Hofe der Fachschule für Physik für die beiden Curies das „Labor“ für ihre wissenschaftlichen Arbeiten. Der Schuppen hatte nur ein Glasdach, durch das es an vielen Stellen regnete. Dann tropfte das Wasser auf die Arbeitstische. Die Curies markierten die Stellen der Tische, auf die es plötzlich einmal tropfen konnte, um nicht aus Versehen empfindliche Apparate dort hinzustellen. Im Sommer war es unter dem Glasdach heiß wie in einem Treibhaus, im Winter fror man darin beinahe so wie im Freien.

Häufig mußten die Curies ihre Apparate mit klammen Fingern bedienen bei nur sechs Grad über Null. Kam im Winter jedoch Tauwetter, so tropfte unaufhörlich das Schmelzwasser oder der Regen auf ihre Arbeitstische. Bei der Verarbeitung der chemischen Substanzen entstanden beizende Dämpfe. Aber es gab keinen Abzug dafür. Man konnte höchstens die große Tür öffnen. Dann aber entstand ein heftiger Luftzug, in dem man sich schnell erkältete. Doch alle diese Widerwärtigkeiten hielten sie nicht von der Durchführung der großen Forschungsaufgabe ab, die sie sich gestellt hatten.

Als erstes prüfte Marie Curie, ob wirklich nur das chemische Element Uran die rätselvollen Strahlen aussendet. Jedes der damals bekannten chemischen Elemente untersuchte sie daraufhin. Es

stellte sich heraus, daß außer dem Uran auch das Element Thorium diese Strahlen aussendet. Thorium ist ebenso wie Uran ein Metall und eines der schwersten Elemente. Also konnte man nicht mehr exakt von Uranstrahlen sprechen. Marie Curie nannte die rätselhafte Erscheinung deshalb von jetzt an Radioaktivität, was wörtlich übersetzt Strahlungstätigkeit bedeutet. Die Elemente, die die eigenartigen Strahlen aussenden, bezeichnete sie als radioaktive Elemente. Heute liest man auch öfter den Ausdruck „radioaktive Strahlen“. Das ist sprachlich nicht ganz korrekt. Denn nicht die Strahlen sind radioaktiv, sondern die Stoffe, die die Strahlen aussenden.

Wenn alle anderen Elemente außer Uran und Thorium nicht radioaktiv sind, so müßten chemische Verbindungen, in denen die beiden Elemente nur einen von mehreren Bestandteilen bilden, eine schwächere Strahlung aussenden als reines Thorium und Uran. Chemische Verbindungen sind praktisch alle Mineralien, also Gesteine und Metallerze, die man in der Erde findet. Denn kaum jemals kommt ein chemisches Element in der Natur in völlig reinem, nicht mit anderen Stoffen verbundenem oder vermischtem Zustand in der Erdkruste vor. Darum untersuchte Marie Curie jetzt die ganze Mineraliensammlung der Fachschule für Physik auf die Stärke der ausgesandten Strahlung.

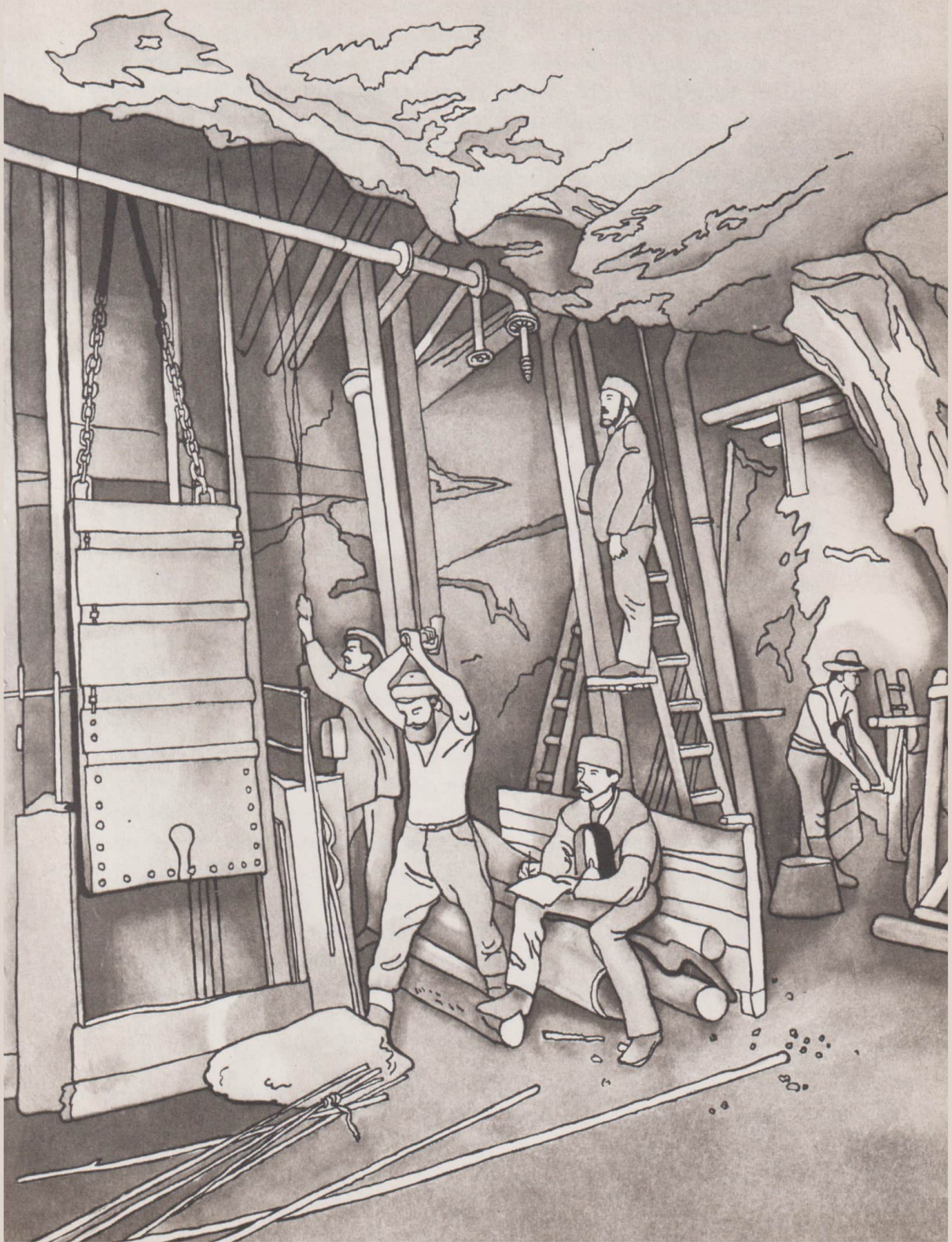
Das Geheimnis der Pechblende

Dabei gab es eine neue große Überraschung, die allen Wissenschaftlern zunächst wieder ein schwieriges Rätsel aufgab: Die Pechblende, das ist ein Mineral, aus dem man Uranoxid gewinnt, erwies sich als viermal stärker radioaktiv als reines Uran. Das war mit der bereits als sicher geltenden Tatsache, daß Uran und Thorium Strahlen aussenden, zunächst vollkommen unvereinbar. Die Wissenschaftler standen ratlos vor dem Widerspruch. Nur Marie Curie stellte sofort die richtige Vermutung über die Lösung des Rätsels auf: Es mußte außer dem Uran und Thorium noch ein drittes radioaktives Element geben, das wesentlich stärker radioaktiv ist als die beiden bereits bekannten radioaktiven Elemente. Doch konnte dieses noch unbekannte radioaktive Element nur in so winzigen Mengen in der Natur vorkommen, daß es bisher noch nicht

entdeckt worden war. In der Pechblende, so vermutete Marie Curie, würde das gesuchte, noch unbekannte radioaktive Element stecken.

Die gelehrte Fachwelt nahm diese Hypothese einer jungen Naturwissenschaftlerin, die soeben erst ihr Examen bestanden und ihre Doktorarbeit begonnen hatte, nicht ernst. Teils lächelte man über die junge Wissenschaftlerin, teils betrachtete man sie mit mitleidigem Zweifel. An die Hypothese Marie Curies glauben wollte keiner der angesehenen Fachgelehrten. Nur Pierre Curie war von der Ernsthaftigkeit der Hypothese überzeugt und auch davon, daß sie unbedingt eine exakte Nachprüfung wert war. Ansonsten aber stießen die Curies nur auf Ablehnung. Alle vermuteten, daß hier ein Irrtum vorlag, der sich später schon irgendwie aufklären würde. Ein noch unbekanntes Element, das nur in so winzigen Mengen existiert, daß es vielen Generationen von Chemikern noch nicht gelungen war, auch nur Spuren davon zu entdecken – nein, eine solche Vermutung erschien ihnen als haltlose Phantasie, noch dazu, da das Element die sonderbare Eigenschaft haben sollte, schon in winzigen Mengen eine so starke Strahlung auszusenden. Die Gelehrten beriefen sich auf ihre jahrzehntelangen wissenschaftlichen Erfahrungen, während Marie Curie nur eine Anfängerin war. Man warnte die Curies nachdrücklich davor, so viel Arbeit für die Beweisführung einer derart unglaublichen Hypothese aufzuwenden. Sie würden dadurch Jahre ihres Lebens nutzlos verlieren. Die Chemiker waren noch ablehnender als die Physiker. Sie glaubten nur an die Existenz von Elementen, die man sehen, berühren, wiegen, untersuchen, mit Säuren in Verbindung bringen und deren relative Atommasse man bestimmen konnte. „Zeigt uns das neue rätselhafte Element Eurer Phantasie, dann werden wir Euch glauben!“, so lautete ihr Argument.

Nicht nur, um die Zweifler zu überzeugen, sondern vor allem, weil man das gesuchte neue Element erst einmal rein darstellen mußte, um es analysieren und untersuchen zu können, machten sich die Curies an die Arbeit. Dabei ahnten sie nicht, daß es vier Jahre härtester Arbeit kosten würde, um auch nur ein einziges Zentogramm einer chemischen Verbindung des gesuchten Elements aus mehreren tausend Kilogramm Pechblende abzutrennen!



Zuerst ließen sich die Curies etwa 1000 kg Rückstände verarbeiteter Pechblende aus der erzgebirgischen Stadt Joachimsthal im Eisenbahnwaggon nach Paris kommen. In Joachimsthal wurde Pechblende bergmännisch abgebaut und verarbeitet. Der Abfall war wirtschaftlich wertlos, die Curies bekamen ihn deshalb umsonst. Aber die Fracht für die Beförderung von Joachimsthal nach Paris mußten sie bezahlen. Als das Pferdefuhrwerk, das die Pechblende vom Bahnhof zur Fachschule für Physik brachte, vorfuhr, schleppten die Curies die schmutzigbraune Masse in Säcken in ihren Schuppen. Trotz dieser harten Strapaze war es ein froher Tag für sie. Marie vergrub fast zärtlich ihre Hände in die dreckige, noch mit den Fichtennadeln des Waldes vermischte Masse. War sie doch überzeugt, daß sie daraus das gesuchte wunderbare neue Element gewinnen würden. Wieviel davon mochten die vielen Säcke voll Pechblende enthalten? Wenn es nur im Verhältnis von 1:1000 darin steckte, so mußte man immerhin ein ganzes Kilogramm daraus gewinnen können. Daß das gesuchte Element in Wirklichkeit nicht einmal den millionsten Teil der Pechblende ausmacht, ahnten Marie und Pierre Curie nicht.

Ein Element wehrt sich, entdeckt zu werden

Die braune Masse enthielt natürlich sehr viele verschiedene chemische Elemente in ganz unterschiedlichen Mengen. Diese Elemente galt es nun erst einmal durch chemische Reaktionen voneinander zu trennen. Ungezählte chemische Analysen waren dafür erforderlich. Schließlich zeigte sich, daß das gesuchte Element, das man jederzeit auf Grund der von ihm ausgesandten Strahlung feststellen konnte, nicht bloß in einer der vielen chemischen Verbindungen steckte, in die die Curies die Pechblende schon zerlegt hatten. Nein, an sehr vielen Verbindungen „klebte“ das rätselvollen Element. Durch einfache chemische Reaktionen war es also gar nicht möglich, es sauber von allen anderen Stoffen abzutrennen. Man konnte das gesuchte Element weder sehen noch riechen noch wägen. Einzig und allein durch seine starke Strahlung, die mit dem Elektroskop deutlich festzustellen war, verriet es sein Vorhandensein.

Es mußte in den verschiedenen chemischen Verbindungen, die aus der Pechblende abgetrennt worden waren, in unterschiedlichen

Mengen stecken. Denn die Stärke der Strahlung der einzelnen Verbindungen war unterschiedlich. Das gab den Curies eine Spur, die sie verfolgen konnten. Die Verbindungen, von denen die stärkste Strahlung ausging, versuchten sie nun durch immer neue chemische Reaktionen weiter zu zerlegen. Einmal mußte man dabei doch das gesuchte Element in reiner Form erhalten. Doch immer wieder standen die Curies vor neuen Rätseln. Das gesuchte Element zog sich in Verbindungen zurück, die recht unterschiedlicher Natur waren. Ein und dasselbe Element konnte nach allem, was man über chemische Gesetzmäßigkeiten wußte, aber unmöglich in chemisch so ganz andersartigen Verbindungen enthalten sein. Also wurde schon wieder eine neue Hypothese erforderlich. Man mußte annehmen, daß es nicht nur ein, sondern sogar zwei noch unbekannte radioaktive Elemente von äußerst starker Strahlungsfähigkeit gibt.

Immer unglaublicher

Den Fachgelehrten wurden die Hypothesen der Curies immer unglaublicher. Den Curies gelang es trotz verzweifelter Anstrengungen nicht, weder das eine noch das andere unbekannte Element aufzufinden und rein darzustellen. Sie jagten buchstäblich hinter etwas Unauffindbarem her. War denn die Hypothese, daß ein Stoff, der einerseits nur in unauffindbar winzigen Mengen existiert, der aber andererseits eine sehr starke Strahlung aussendet, überhaupt noch ernst zu nehmen? – Es gehörte ziemlich viel Mut und Selbstvertrauen für die Curies dazu, noch weiter an ihre eigene Hypothese zu glauben!

Das Forscherehepaar Curie brauchte kein Hobby. Die große wissenschaftliche Aufgabe, die sie sich gestellt hatten, war ihnen Arbeit und Hobby zugleich. Auch in der Freizeit ließ sie sie nicht mehr los. Es kam vor, daß es sie abends vor dem Schlafengehen noch einmal in ihren Schuppen zog, in dem ihnen tagsüber der beizende Rauch die Tränen in die Augen getrieben und sie zum Husten gereizt hatte. Dann saßen sie vor den Regalen, schalteten das Licht aus und sahen das schimmernde Leuchten, das von den Flaschen ausging, in denen sich die aus der Pechblende gewonnenen Chemikalien befanden. Die Strahlung des gesuchten Elements

war so stark, daß sie viele Stoffe zur Aussendung von Licht anregte. Leuchtfarben, die radioaktive Stoffe enthalten, wurden deshalb später für die Herstellung von Leuchtzifferblättern verwendet. Heute benutzt man sie dafür nicht mehr, weil ihre Strahlung zu gesundheitsgefährdend ist. Das wußten die Curies noch nicht. Ungeschützt befanden sie sich ständig in einem unsichtbaren „Strahlungsnebel“. Marie Curie zog sich dadurch, ohne es zu ahnen, eine chronische Krankheit zu. Bei Pierre kam sie nicht mehr zum Ausbruch, weil er bereits 1906 durch einen Verkehrsunfall ums Leben kam, bevor sich die Schädigung seiner Gesundheit durch die Strahlen hatte auswirken können.

Polonium

Noch immer hatten die Curies keines der beiden gesuchten radioaktiven Elemente rein darstellen können. Aber auf Grund der chemischen Verbindungen, die eins der beiden Elemente einging, konnten sie, gestützt auf ihre Kenntnisse der chemischen Gesetze, voraussagen, daß es ein Stoff sein muß, der sich chemisch ähnlich wie das Metall Wismut verhält. Da die Existenz des Stoffes eigentlich schon nicht mehr bezweifelt werden konnte und seine Reindarstellung nur eine Frage der Zeit war, schlugen die Curies bereits im voraus einen Namen für das Element vor. Sie nannten es Polonium. Damit brachten sie eine politische Idee zum Ausdruck. Den Staat Polen gab es damals offiziell nicht mehr, er war von der Landkarte gestrichen. Das zaristische Rußland hatte ihn sich gewaltsam einverleibt. Der Name Polonium sollte deshalb die Weltöffentlichkeit und alle Wissenschaftler daran erinnern und gemahnen, daß es dennoch ein Polen gab, das eines Tages seine Freiheit wiedererringen würde.

Vier Jahre für ein Zehntelgramm

Allerdings stellte sich später heraus, daß Polonium bei weitem keine so große wissenschaftliche Bedeutung erlangte wie das zweite gesuchte radioaktive Element, von dem die beiden Curies 1902 nach vierjähriger Arbeit ein ganzes Zehntelgramm gewonnen hatten. Da der Name Polonium aber bereits vergeben war, nannten die Curies das zweite Element Radium, was so viel bedeutet wie

„das Strahlende“. Radium wurde weit berühmter als Polonium, das in noch winzigeren Mengen als Radium existiert und daher noch schwieriger rein darzustellen ist.

Vier Jahre für ein Zehntelogramm reines Radiumsalz! War es dieser Stoff wirklich wert, so viel Mühe und Entbehrungen auf sich zu nehmen? Alle gelehrten Zweifler mußten sich nun geschlagen geben. Die Existenz eines in der Natur in unvorstellbar winzigen Mengen vorkommenden, aber dennoch äußerst stark strahlenden radioaktiven Elements war eindeutig bewiesen. Aber der Wert des Zehntelgramms Radiumsalz beschränkte sich keineswegs auf den Beweis, daß die Curies mit ihrer wissenschaftlichen Hypothese recht behalten hatten. Viel entscheidender für den weiteren wissenschaftlichen Fortschritt war vielmehr, daß man nun einen sehr wichtigen Schlüssel zur Enträtselung des Baus der Atome besaß. Mit dem Radiumsalz konnte man experimentieren und die von ihm ausgesandte Strahlung auf das genaueste untersuchen.

Das geheimnisvolle Salz

Das Salz des Radiums ist ein mattweißes Pulver; es sieht beinahe wie gewöhnliches Kochsalz aus, das wir in der Küche verwenden. Die relative Atommasse des Radiums ist schwerer als die von Blei und beträgt 226. Seine Strahlung ist etwa zweimillionenmal stärker als die reinen Urans. Radiumsalze leuchten deshalb im Dunkeln. Aber nicht nur das. Die ungeheuer intensive Strahlung erzeugt sogar Wärme. Ein Gramm Radium gibt 250 000mal mehr Wärme ab als die Verbrennung von einem Gramm Kohle. Allerdings wird diese Wärmemenge nicht innerhalb kurzer Zeit und nicht durch Verbrennung wie bei der Kohle frei gesetzt. Abgesehen davon, daß Radium viel zu selten ist, käme es daher als Energieträger nicht in Frage.

Außer als Strahlenquelle für die wissenschaftliche Forschung erlangte das Radium jedoch auch schnell Bedeutung für die Medizin. Als sich Professor Becquerel von den Curies für seine Vorlesung eine winzige Menge Radiumsalz in einer Ampulle geben ließ und sie in die Westentasche steckte, empfand er einige Tage später ein starkes Brennen an der Stelle des Körpers, an der sich die Ampulle befunden hatte. Auf das Brennen folgte eine starke

Rötung, die einem Brandfleck ähnelte. Später platzte die Haut auf, und es bildete sich ein Geschwür, das nur allmählich wieder heilte. Und das alles, obwohl Professor Becquerel die Ampulle mit dem Radium nur einige Stunden lang in der Westentasche getragen hatte. Daraufhin unternahm Dr. Pierre Curie an sich selbst ein Experiment. Die Folgen waren die gleichen wie bei Professor Becquerel: ein schwerheilendes Geschwür.

750 000 Francs für 1 Gramm

Man entdeckte jedoch bald, daß Radium in wesentlich kleineren Mengen, die eine geringere Strahlung aussenden, auch heilende Wirkung hat. Eine Fabrik in Paris begann 1904 mit der Herstellung von Radium für medizinische Zwecke. Die Curies stellten dafür ohne jede geldliche Entschädigung alle ihre Kenntnisse über das Verfahren der Gewinnung von Radium zur Verfügung. Denn sie wollten das ohnehin äußerst teure Radium nicht noch mehr verteuern. Ein einziges Gramm Radium kostete damals 750 000 französische Francs. Marie Curie gelang es in Fortführung ihrer Arbeiten später insgesamt etwas mehr als ein Gramm Radium zu gewinnen. Sie verkaufte es aber nicht für den hohen Preis, sondern stellte es der wissenschaftlichen Forschung zur Verfügung. Bis 1916 sind auf der ganzen Erde etwa 48 Gramm, bis 1937 etwa 760 Gramm und bis heute wenig mehr als ein Kilogramm Radium gewonnen worden. An der Gewinnung von reinem Radium besteht inzwischen kaum noch Interesse, weil die Kosten dafür zu hoch sind und weil es heute viele künstlich hergestellte radioaktive Stoffe gibt, die dieselben Wirkungen wie Radium haben, aber wesentlich billiger zu gewinnen sind.

Nach Jahren harter Arbeit begann für Marie und Pierre Curie nun eine Zeit des Ruhms und größter internationaler Anerkennung. Die Entdeckung des Radiums machte die beiden Curies schlagartig weltberühmt. Sie konnten sich bald nirgends mehr sehen lassen, ohne von Journalisten belästigt zu werden. Jeder wollte das berühmte Forscherehepaar gesprochen haben und irgendwelche noch nicht durch die Zeitungen gegangenen Einzelheiten über ihr Leben, ihre Gewohnheiten und Besonderheiten berichten können. Aber auch Wissenschaftler gaben sich bei den Curies die Klinke

in die Hand, so daß Marie und Pierre fast nicht mehr zum Arbeiten kamen und die beiden unter ihrem Ruhm beinahe mehr zu leiden hatten als vor Jahren in ihrem armseligen Schuppen als unbekannte und namenlose junge Leute. Zusammen mit Professor Becquerel erhielten sie 1903 den Nobelpreis.

Der schwarze Tag

Nun endlich konnte auch die Universität von Paris nicht mehr umhin, Doktor Pierre Curie die Professur zu übertragen, die ihm seinen wissenschaftlichen Fähigkeiten nach längst gebührt hätte. Aber dem Gelehrten waren nicht mehr viele Jahre wissenschaftlichen Schaffens beschieden. In Gedanken versunken, wie er meist war, überquerte er unachtsam eine Straße in Paris. Ein schwer beladener Pferdewagen erfaßte ihn, er fiel unter den Wagen und wurde tödlich verletzt. Dieser 19. April des Jahres 1906 war der schwerste Tag im Leben Marie Curies, der einen Schatten auf ihr weiteres Leben warf. Die Sorbonne übertrug ihr die Professur, die zuvor ihr Mann bekleidet hatte. Sie setzte die Vorlesung ihres Lebensgefährten und Mitarbeiters an derselben Stelle fort, an der er in der vorangegangenen Vorlesung geendet hatte.

Der Geigerzähler tickt noch immer

Marie Curie starb am 3. Juli 1934 an den Folgen einer sich immer stärker auswirkenden schleichenden Krankheit, die sie sich durch vier Jahrzehnte des Umgangs mit Radium und anderen radioaktiven Stoffen zugezogen hatte. Heute werden in jedem Institut und Betrieb, in dem mit radioaktiven Stoffen gearbeitet wird, umfangreiche Schutzmaßnahmen getroffen, die gesetzlich festgelegt sind, so daß die Menschen, die dort arbeiten, nicht mehr zu Schaden kommen können. Zunächst hatte man über das Ausmaß der Strahlengefahren noch keine richtigen Vorstellungen und ließ es deshalb bei unzureichenden Schutzmaßnahmen bewenden. Auf der Weltausstellung von 1958 in Brüssel sah man die Besucher ehrfürchtig vor einem sehr eigenartigen Stand verharren. Dort lag ein Notizbuch, das einst Marie und Pierre Curie 60 Jahre zuvor für Aufzeichnungen über ihre wissenschaftliche Arbeit in dem Schuppen benutzt hatten. Neben dem Notizbuch stand ein Geigerzähler, der

die Strahlung radioaktiver Substanzen durch Ticken anzeigt. Der Zähler tickte unaufhörlich in schneller Folge. Ursache dafür waren die radioaktiven Substanzen, die sich in dem Papier des Notizbuches befanden. Noch nach 60 Jahren ging von dem Papier also eine Strahlung aus, die von dem Geigerzähler noch angezeigt wurde. Die Curies hatten radioaktive Substanzen offenbar an ihren Fingern gehabt und beim Blättern im Notizbuch auf das Papier übertragen. Auch die Dämpfe, die bei den chemischen Analysen entwichen, enthielten radioaktive Stoffe, die sich in winzigen Mengen auf dem Papier niederschlugen.

Kriminalisten der Physik

Das Radiumsalz, das Marie und Pierre Curie aus der Uranpechblende abgetrennt hatten, wurde zum Schlüssel für die Geheimnisse des Atombaus. Was sind eigentlich Atome? Das Wort ist aus der Sprache der alten Griechen abgeleitet und bedeutet so viel wie „das Unteilbare“. Dem Namen nach sind Atome also die kleinsten Teilchen, in die man die Stoffe zerlegen kann. Die Zusammensetzung der Stoffe aus Atomen können wir uns durch den Vergleich mit einem Sandhaufen veranschaulichen. Sowie ein Haufen Sand aus ungezählten einzelnen Körnchen besteht, so sind alle Stoffe aus vielen kleinen Teilchen, den Atomen, zusammengesetzt. Das gilt nicht nur für die festen Stoffe, sondern auch für die Flüssigkeiten und Gase. Dabei bilden jedoch in der Regel zwei oder mehr Atome desselben chemischen Elements oder verschiedener Elemente ein sogenanntes Molekül. Alle Moleküle lassen sich wieder in Atome zerlegen.

10 hoch minus 8 cm

Moleküle und Atome sind aber sehr viel kleiner als die kleinsten Sandkörnchen. Die Größe der Atome beträgt nur Zehnmillionstel-millimeter. In der Wissenschaft gibt man die Größen üblicherweise aber nicht in Millimetern, sondern in Zentimetern an. 1 Zehnmillionstel Millimeter = 1 Hundertmillionstel Zentimeter, in Zahlen ausgedrückt: 0,00000001 cm oder kürzer: 10^{-8} cm (sprich: 10 hoch minus 8 cm). Selbst die Wellenlänge des kurzwelligsten sichtbaren Lichts ist noch 400mal größer als der Durchmesser von Atomen. Daher kann man auch mit den am stärksten vergrößernden Mikroskopen keine einzelnen Atome sichtbar machen. Ein Vergleich kann uns eine ungefähre Vorstellung von der Winzigkeit der Atome vermitteln: Würden wir ein Atom und einen Apfel im gleichen Maßstab vergrößern, so wäre der Apfel zur Größe der Erde angewachsen, wenn das Atom erst einen Durchmesser von 2 cm hätte.

Die Experimente mit den Strahlen des Radiumsalzes führten die Wissenschaftler aber zu einer ganz neuen und revolutionierenden Erkenntnis: Das Atom ist nicht das kleinste Teilchen der Stoffe, es ist vielmehr aus noch kleineren Teilchen zusammengesetzt! Im Mittelpunkt des Atoms befindet sich der *Atomkern*. Um ihn kreisen mit unvorstellbar großer Geschwindigkeit winzige Teilchen, die man Elektronen nennt. Alle Elektronen eines Atoms zusammen genommen bilden die *Atomhülle*. Der Atomkern enthält jedoch über 99 Prozent der gesamten Stoffmenge des Atoms. Die Elektronen sind im Vergleich zum Atomkern also tausendfach leichter. Trotzdem ist der Durchmesser des Atomkerns 100 000mal kleiner als der des ganzen Atoms einschließlich der Elektronenhülle. Die Größe des Atomkerns mißt nur nach 10^{-13} cm. Würden wir Atomkern und -hülle im selben Maßstab vergrößern, und zwar so, daß der Kern die Größe einer Murmel erlangt, dann würden die Elektronen in Entfernungen bis zu 25 m um den Kern kreisen.

Aber auch die unvorstellbar winzigen Atomkerne bilden noch nicht die kleinsten Teilchen der Materie, sondern sind – außer bei dem einfachsten chemischen Element, dem Wasserstoff – aus noch kleineren Teilchen zusammengesetzt. Obwohl nie ein Mensch die winzigen Teilchen direkt sehen konnte, wissen die Physiker heute über die Zusammensetzung der Atomkerne so genau Bescheid, daß man fast sagen darf, sie kennen sie besser als den Inhalt ihrer Jackentasche. Sie kennen auch die Vorgänge und Gesetzmäßigkeiten, die sich in den Atomkernen bei der Aussendung der rätselhaften Strahlen abspielen, und sie können vorausberechnen, welche Energien bei welchen Vorgängen in den Atomkernen frei werden oder verbraucht werden. Wie konnte man zu so genauen Kenntnissen über derart winzige und unfäßbare Teilchen gelangen?

Indizien

Alles, was wir über die Atomkerne wissen, ist nicht direkt zu sehen oder abzulesen, sondern kann nur indirekt durch viele komplizierte Schlußfolgerungen anhand von Begleiterscheinungen, von „Indizien“, erkannt werden. Den Physikern geht es hierbei wie den Kriminalisten, die ein Verbrechen aufzuklären haben, das irgendwo



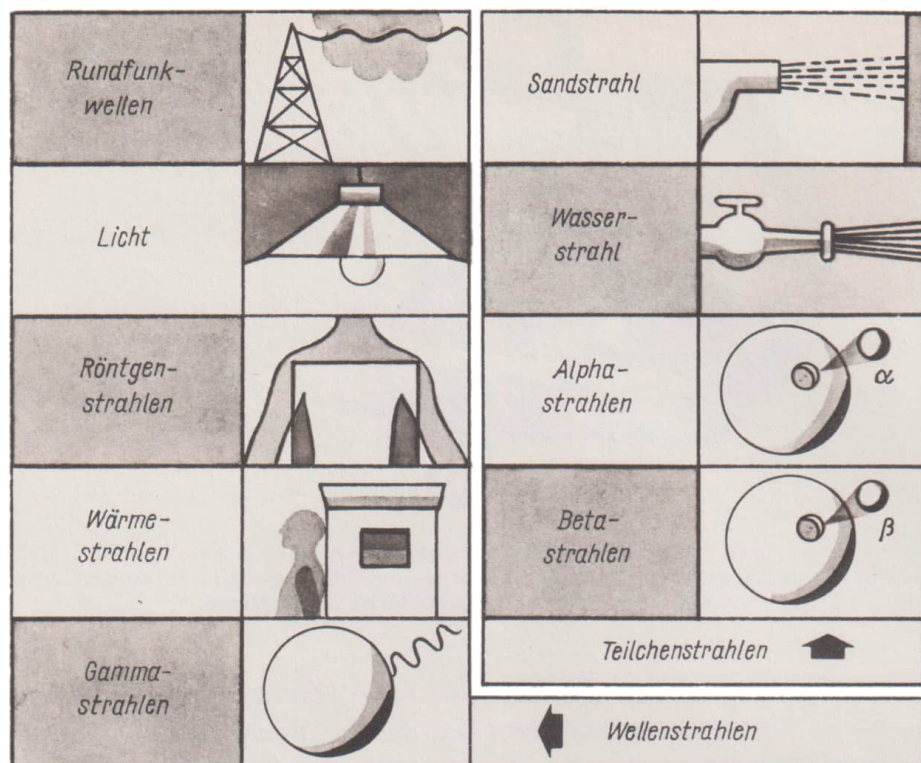
Der höchste Berg der Erde, der 8880 m hohe Mount Everest, wäre in einem Handkoffer zu verpacken, wenn man die Kerne und Hüllenelektronen seiner Atome ohne stofflich leere Zwischenräume aneinanderbacken könnte

stattgefunden hat, das aber außer von den Tätern selbst von keinem anderen Menschen beobachtet wurde. Dennoch müssen sie versuchen, aus Indizien den ganzen Hergang zu rekonstruieren und den schlüssigen Beweis dafür zu erbringen, daß es so und nicht anders gewesen sein muß. Nur so waren die Zusammensetzung und das Verhalten der Atomkerne aus Indizien zu enträtseln.

Als erste Indizien dafür dienten jene geheimnisvollen Strahlen, die von den radioaktiven Stoffen ausgehen. Doch konnte man nicht gleich damit beginnen, aus der Strahlung weitreichende Schlüsse über den Bau der Atome abzuleiten. So wie die Kriminalisten erst einmal die Spuren untersuchen, so kam es auch bei der Erforschung der Atomkerne zunächst darauf an, die Strahlung selbst genauestens und nach allen Methoden, die sich ein gescheiter Kopf einfallen lassen konnte, zu analysieren.

Was sind Strahlen?

Bevor wir uns mit den Eigenschaften der Strahlen beschäftigen, müssen wir fragen: Was sind überhaupt Strahlen? In der Umgangssprache benutzen wir das Wort Strahlen für die verschiedensten



Verschiedene Arten von Teilchen- und Wellenstrahlen

Dinge. So sprechen wir z. B. von Lichtstrahlen, aber auch vom Wasserstrahl, der aus dem Hahn fließt. In beiden Fällen wenden wir das Wort „Strahlen“ richtig an. Es gibt nämlich zwei verschiedene Hauptgruppen von Strahlen. Die einen bestehen aus elektromagnetischen Wellen. Dazu gehören das Licht, die Röntgenstrahlen und die Rundfunkwellen, auch die Wärmestrahlen, die wir z. B. auf der Haut spüren, wenn wir die Hand in die Nähe des heißen Teekessels oder Ofens halten, ohne ihn direkt zu berühren. All diesen Wellenstrahlen ist gemeinsam, daß sie sich mit großer Geschwindigkeit – 300 000 km je Sekunde – ausbreiten. Für diese Geschwindigkeit hat man deshalb in der Formelsprache der Physik ein eigenes, einheitliches Zeichen eingeführt, das kleine „c“.

Es gibt aber noch eine andere Gruppe von Strahlen, die Teilchenstrahlen. Sie bestehen aus Salven unzählig vieler, äußerst kleiner

und in einer bestimmten Richtung bewegter Teilchen. Der Wasserstrahl besteht aus vielen Wassertröpfchen; der Sandstrahl aus Sandkörnchen, der Feuerstrahl, der aus der Triebwerksdüse einer Rakete ausströmt, aus Gasmolekülen.

Alpha – Beta – Gamma

Die Strahlen radioaktiver Substanzen können Wellen- und Teilchenstrahlen sein. Beide Arten kommen vor. Doch unterscheiden sie sich in ihren Eigenschaften von allen anderen bekannten Arten der Wellen- und Teilchenstrahlen. Die Wellenstrahlen radioaktiver Stoffe heißen Gammastrahlen. Bei den Teilchenstrahlen unterscheidet man Alpha- und Betastrahlen. Alpha, Beta und Gamma sind die drei ersten Buchstaben des griechischen Alphabets. Man benutzt diese Buchstaben zur sprachlichen Unterscheidung der drei Strahlenarten, so wie man in der Schule manchmal die Parallelklassen desselben Schuljahres durch den Zusatz a, b und c kennzeichnet.

Die Wellenstrahlen radioaktiver Stoffe, also die Gammastrahlen, unterscheiden sich von anderen Wellenstrahlen durch ihre kürzere Wellenlänge. Gammastrahlen sind die kurzweiligsten Strahlen, die man kennt. Sie haben weit kleinere Wellenlängen als das Licht und noch kürzere als die Röntgenstrahlen.

Zwischen den Teilchenstrahlen radioaktiver Substanzen und Wasser- oder Sandstrahlen bestehen noch mehr und tiefergreifende Unterschiede. Zählen wir hier einige davon auf:

2000mal schneller als ein Sputnik

1. Die Teilchen der Alpha- und Betastrahlung sind weit winziger als die Wassertropfen eines Wasserstrahls oder die Sandkörnchen eines Sandstrahls. Das verwundert uns nicht, wenn wir bedenken, wie winzig Atome sind. Denn die von radioaktiven Atomen ausgestrahlten Teilchen müssen noch kleiner als die Atome selbst sein. Die Teilchen sind so winzig und leicht, daß wir es nicht spüren, wenn Alpha- oder Betastrahlen auf unsere Haut treffen. Sie hinterlassen, wenn sie die Haut oder andere Körper durchdringen, auch keine Löcher.

2. Die von radioaktiven Stoffen ausgesandten Teilchen bewegen

sich unvergleichlich schneller als die Wassertropfen eines Wasserstrahls oder die Sandkörnchen eines Sandstrahls. Ihre Geschwindigkeit übertrifft auch die der Gasmoleküle, die aus dem Triebwerk einer kosmischen Rakete strömen. Alpha- und Betateilchen haben sogar eine noch höhere Geschwindigkeit als die künstlichen Erdsatelliten. Die Sputniks umkreisen die Erde mit etwa 8 km je Sekunde. Ein Alphateilchen der Radiumstrahlung hat z. B. eine Geschwindigkeit von 19200 km/s, das ist mehr als das 2000fache Sputnik-Tempo. In jeder Bewegung aber steckt eine Form der Energie, Bewegungsenergie. In der Physik bezeichnet man sie auch als kinetische Energie. Die Teilchen der Strahlung radioaktiver Stoffe haben daher sehr große Bewegungsenergie.

Aber trotz ihrer phantastischen Geschwindigkeit legen sie keine weiten Strecken zurück. Denn sie treffen schon nach ganz kurzer Strecke unvermeidlich auf die Moleküle oder Atome, aus denen alle Stoffe bestehen, auch die Luft. Die vom Radium ausgesandten Alphateilchen haben in Luft normalen Druckes von 760 Torr z. B. eine Reichweite von nur etwa sieben Zentimetern. Auf dieser Wegstrecke stoßen sie derart oft mit Gasmolekülen zusammen, daß sie immer mehr von ihrer hohen Geschwindigkeit verlieren. Dafür haben sie aber die Gasmoleküle zu schnellerer Bewegung angestoßen. Die Bewegungsenergie der Strahlenteilchen ist also nicht verlorengegangen, sondern nur auf andere Moleküle und Atome übertragen worden.

Die Alpha- und Betateilchen selbst verlieren dabei aber immer mehr an Geschwindigkeit, und schließlich bewegen sie sich nicht mehr schneller als normale Moleküle bzw. Elektronen. Dann haben sie aufgehört, Alpha- bzw. Betateilchen zu sein. Sie sind zu normalen Teilchen geworden. Als Alpha- oder Betateilchen bezeichnet man sie so lange, wie sie eine hohe Bewegungsenergie besitzen. Haben sie keine größere Energie mehr als die übrigen Teilchen, so üben sie auf die anderen Teilchen auch keine besonderen Wirkungen mehr aus. Man könnte sie mit erschöpften Rekordläufern vergleichen, die nun in der Masse der Spaziergänger überhaupt nicht mehr auffallen, weil sie sich nicht schneller bewegen als alle Straßenpassanten.

3. Ein sehr wesentlicher Unterschied zwischen den Teilchenstrah-

len radioaktiver Stoffe einerseits und den Wasser- und Sandstrahlen oder dem Feuerstrahl eines Raketentriebwerks andererseits besteht ferner darin, daß man Wassertröpfchen, Sandkörnchen oder die Moleküle des Feuerstrahls durch Aufwendung von Energie künstlich beschleunigen muß. Die Alpha- und Betateilchen bedürfen einer solchen Energiezufuhr von außen nicht. Sie brauchen nicht künstlich beschleunigt zu werden, da sie aus den Atomkernen mit dieser großen Geschwindigkeit ausgestoßen werden. Während man eine Flamme schüren oder dämpfen, einen Wasser- oder Sandstrahl schneller oder langsamer aus der Düse jagen kann, je nachdem, unter wie hohem Druck wir ihn setzen, kann der Mensch auf die Bewegungsenergie der Strahlenteilchen radioaktiver Stoffe keinen Einfluß nehmen. Weder durch hohen oder niedrigen Druck, weder durch Erhitzen noch durch Abkühlen der radioaktiven Stoffe können wir die Strahlung abschwächen oder verstärken. Sie bleibt unter allen äußeren Bedingungen völlig gleich.

Lassen wir es vorerst mit dieser Beschreibung der sonderbaren Eigenschaften der Strahlung radioaktiver Stoffe bewenden. All das mußte erst mühsam im Verlauf vieler Jahre durch unzählige Experimente zahlreicher Wissenschaftler festgestellt werden. Die geheimnisvollen Stoffe haben ihre Rätsel nicht so einfach preisgegeben, wie wir das heute in den Lehrbüchern nachlesen können. Zunächst einmal mußte man versuchen herauszubekommen, was diese unsichtbaren Strahlen überhaupt sind.

Magnetische und elektrische Felder

Wenn jemand Briefmarken sammelt, so kann er jede einzelne Marke durch bestimmte Eigenschaften genau beschreiben: Größe, Zahl der Zähnen, Wert, Ursprungsland, Ausgabedatum, Farbe, Art des Bildes auf der Marke usw. So gibt es auch für die kleinsten Stoffteilchen Eigenschaften, nach denen man sie beschreiben und von anderen unterscheiden kann. Dazu gehören z. B. die Masse und, falls es sich um elektrisch geladene Teilchen handelt, die Größe der elektrischen Ladung und deren Vorzeichen, also ob sie elektrisch positiv oder negativ geladen sind.

Die Bestimmung dieser Eigenschaften der geheimnisvollen Strahlung war eine der ersten Aufgaben der Wissenschaftler. Da man

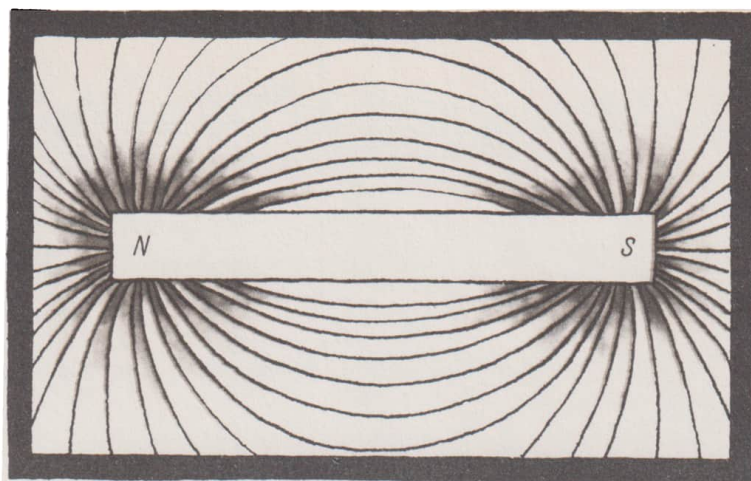
die Teilchen nicht einzeln fassen und ihre Masse und Ladung bestimmen kann, waren die Messungen nur indirekt möglich. Dafür erwiesen sich zwei Naturerscheinungen als sehr aufschlußreich, die schon zuvor viele andere Rätsel kleiner Teilchen der Materie lösen halfen, nämlich der Magnetismus und die Elektrizität.

Was ist Magnetismus? Magnetismus ist die Lehre vom magnetischen Feld und den magnetischen Erscheinungen. Einen Hufeisenmagneten kennen wir alle. Er besteht aus einem flachen Eisenstab, der hufeisenförmig umgebogen ist. Man braucht dem Stab aber nicht unbedingt Hufeisenform zu geben. Es kann ebenso ein gerader Stab sein. Dann nennt man ihn Stabmagnet. Die beiden Enden des Stabes sind die Magnetpole. Der eine ist der Nordpol, der andere der Südpol. Diese Bezeichnungen sind willkürlich. Man könnte ebenso von A- und B-Pol sprechen. Aber stets stößt der Nordpol eines Magneten den Nordpol eines anderen Magneten ab. Dagegen zieht der Nordpol eines Magneten den Südpol eines anderen Magneten an und umgekehrt. Verallgemeinert ausgedrückt: Ungleichnamige Magnetpole ziehen sich an, gleichnamige stoßen sich ab.

Doch zieht ein Magnet nicht nur einen anderen Magneten an, sondern auch einige solcher Stoffe, die nach außen hin keinen Magnetismus zeigen, z. B. Eisen, Stahl und Nickel. Holz, Papier, Glas und überhaupt die meisten Stoffe werden dagegen von Magneten nicht angezogen. Wichtig für die Erforschung der Strahlen radioaktiver Stoffe ist, daß Magnetismus auch auf bewegte elektrisch geladene Teilchen wirkt und ihre Bewegungsrichtung in gesetzmäßiger, berechenbarer Weise verändert.

Im Raum zwischen den beiden Polen eines Magneten besteht eine magnetische Kraftwirkung, man sagt: ein magnetisches Kraftfeld oder kurz Magnetfeld. Bewegen sich elektrisch geladene Teilchen durch ein Magnetfeld, so werden sie aus ihrer ursprünglichen Bewegungsrichtung abgelenkt. Folglich kann man mit Hilfe eines Magnetfeldes feststellen, ob die Teilchen der Strahlung radioaktiver Substanzen elektrisch geladen sind oder nicht.

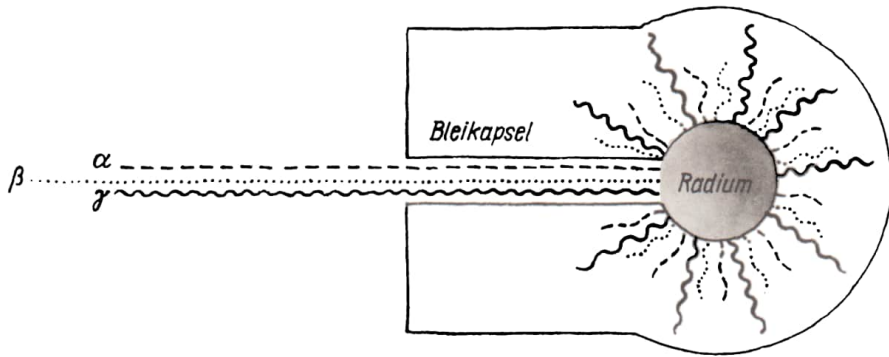
So wie man beim Magneten Nord- und Südpol unterscheidet, so unterscheidet man auch zwei Arten von elektrischer Ladung, nämlich positive und negative. Die positive wird durch das Plus-



Ebener Schnitt durch das Kraftfeld eines Stabmagneten.
Die Striche symbolisieren die magnetischen Kraftlinien

zeichen (+), die negative durch das Minuszeichen (–) symbolisiert. Auf manchen Taschenlampenbatterien finden wir diese Symbole. Bei Flachbatterien ist im allgemeinen das kurze Kupferblech der Plus-, das lange Kupferblech der Minuspol, bei den Monozellen ist der Boden der Minus-, der kleine runde Stift am oberen Ende der Pluspol. In dieser einfachen Weise lassen sich nur Gleichstrom-Spannungsquellen kennzeichnen. Bei den Löchern einer Steckdose für Wechselstrom können wir nicht sagen, daß eines der Plus- und das andere der Minuspol sei, weil die Polarität der Spannung ständig wechselt, in jeder Sekunde 50mal hin und her.

Für die Elektrizität gilt Ähnliches wie für den Magnetismus. Gleichnamig geladene Teilchen stoßen sich gegenseitig ab, ungleichnamig geladene ziehen sich an. Das ergibt eine Möglichkeit, festzustellen, ob die Teilchen der Strahlung radioaktiver Stoffe positiv oder negativ geladen sind. Im Raum zwischen einer negativ und einer positiv aufgeladenen Kondensatorplatte besteht wie zwischen den Polen eines Magneten ein Kraftfeld, das elektrische Feld. Bewegen sich die Teilchen der Strahlung einer radioaktiven Substanz durch ein elektrisches Feld, so werden die positiv geladenen Teilchen zur negativen, die negativ geladenen zur positiven Kondensatorplatte abgelenkt.



Radium-Strahlenquelle in einer Bleikapsel

Strahlenbündel aus der Bleikapsel

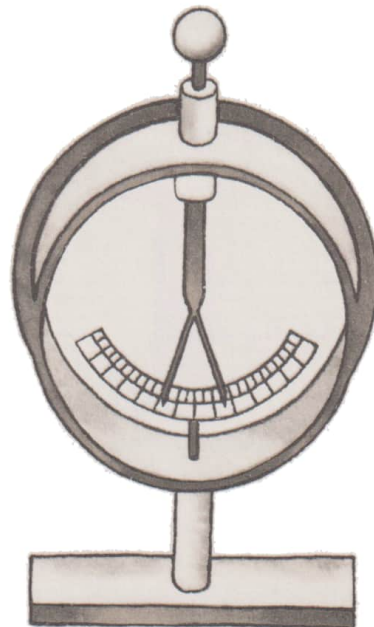
Mit dem von Marie und Pierre Curie gewonnenen Radiumsalz standen sehr ergiebige Strahlenquellen zur Verfügung, und man konnte in vielfältiger Weise damit experimentieren. Eine winzige Menge Radiumsalz wurde in eine dickwandige Bleikapsel gefüllt, die nur an einer Stelle eine kleine Öffnung hatte. Das war nötig, weil radioaktive Stoffe ihre Strahlen in alle Richtungen aussenden. Die Wellen- und auch die Teilchenstrahlen gehen nach allen Richtungen, etwa so wie die Fünkchen einer Wunderkerze, die man zu Weihnachten und Silvester abbrennt. In der dicken Wand der Bleikapsel bleiben die Strahlenteilchen jedoch stecken, sie werden von dem Blei „absorbiert“. Auch die Wellenstrahlen werden bis auf einen geringen Rest in der Bleimasse absorbiert. Nur an der Stelle, an der die Kapsel ein Loch hat, können alle Strahlen ungehindert austreten, und man erhält auf diese Weise ein feines Bündel von Strahlen, die sich nur in einer bestimmten Richtung bewegen.

Schon bei den ersten Versuchen von Pierre und Marie Curie zeigte sich eine Aufspaltung des Strahlenbündels in zwei Komponenten. Die eine wurde vom elektrischen und magnetischen Feld überhaupt nicht beeinflusst, sondern breitete sich geradlinig weiter aus. Die andere Komponente wurde deutlich in Richtung zur positiven Kondensatorplatte hin abgelenkt. Damit war bewiesen, daß es sich um negativ geladene Teilchen handeln mußte. Als andere Forscher die Versuche mit noch stärkeren Magneten wiederholten, stellten sie fest, daß sich das ursprünglich geradlinige

Strahlenbündel noch in zwei Komponenten auffächerte. Die eine ging weiter geradeaus und war auch durch stärkste elektrische und magnetische Felder nicht abzulenken. Die andere Komponente wurde zur Seite der negativen Kondensatorplatte abgelenkt, aber schwächer als die dritte, zur positiven Platte abgelenkte Komponente. Folglich konnte man jetzt folgende Behauptung aufstellen: Die Strahlung des Radiums besteht aus drei verschiedenen Komponenten. Die eine schwach abgelenkte, Alphastrahlen genannt, besteht aus positiv geladenen Teilchen, die zweite stärker abgelenkte, Betastrahlen genannt, besteht aus negativ geladenen Teilchen. Die dritte Komponente, die Gammastrahlen, kann, da sie nicht abgelenkt werden, nicht aus geladenen Teilchen bestehen.

Zwei schmale Stanniolblättchen

Wenn aber die Strahlung des Radiums unsichtbar ist, woran konnte man dann überhaupt erkennen, daß sie sich in drei Komponenten aufspaltet? Auch das war nur indirekt feststellbar. Zu diesem Zwecke muß man die Wirkungen der unsichtbaren Strahlen irgendwie sichtbar oder anderweitig wahrnehmbar machen. Schon lange bevor es die komplizierten und sehr empfindlichen heutigen Nachweisgeräte dafür gab, war ein ganz einfaches kleines Instrument gebräuchlich, das man sich sogar selbst basteln kann. (Eine An-

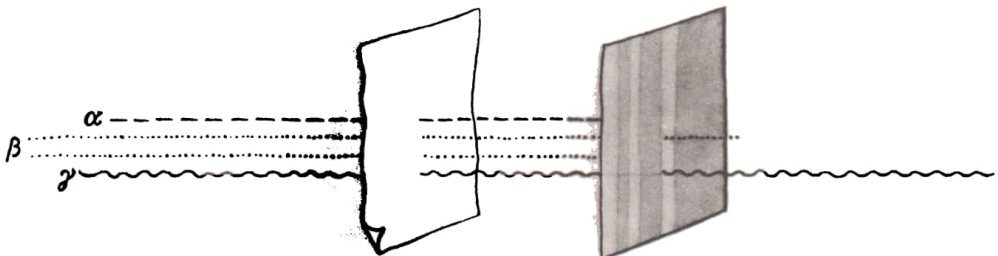


Elektroskop

leitung dafür enthält z. B. das Buch „Physik selbst erlebt“ von Hans Backe.) Das Instrument heißt Elektroskop. Es enthält zwei Blättchen aus sehr dünnem Stanniol. Lädt man die Blättchen elektrisch auf, so spreizen sie sich auseinander, weil sie die gleiche Ladung tragen und sich gleichnamige Ladungen abstoßen.

Alle drei Strahlungskomponenten haben nun die Eigenschaft, daß sie Luft in einen elektrisch leitfähigen Zustand versetzen. Normalerweise leitet Luft die Elektrizität nicht. Durch die Einwirkung der Strahlen wird sie aber vorübergehend schwach leitend. Dadurch kann die elektrische Ladung der beiden Blättchen des Elektroskops abfließen, folglich stoßen sie sich jetzt nicht mehr ab, sondern klappen zusammen. Man kann mit dem Elektroskop sogar abschätzen, wie stark die unsichtbare Strahlung ist. Je stärker sie ist, desto stärker wird die Luft leitfähig, und um so schneller klappen die Stanniolblättchen zusammen. Mit so einfachen Instrumenten wurde anfangs von Marie und Pierre Curie und anderen Forschern, die sich mit der Untersuchung der Radioaktivität befaßten, sehr viel gearbeitet, bis man genauere und empfindlichere Meßgeräte konstruierte.

Die Verschiedenartigkeit der drei Strahlungskomponenten äußerte sich noch in einer weiteren Eigenschaft, nämlich in ihrer unterschiedlichen Durchdringungsfähigkeit. Dünnes Papier durchdringen alle drei Komponenten der Strahlung. Alphastrahlung wird jedoch schon von verhältnismäßig dünnen Metallplatten vollständig absorbiert. Die Betastrahlen haben keine einheitliche Durchschlagskraft, woraus zu schließen war, daß sie auch keine einheitliche Bewegungsenergie haben. Die Gammastrahlen gehen noch durch Metallplatten, die Alphastrahlen vollständig und Betastrahlen größtenteils absorbieren.



Schema der unterschiedlichen Durchdringungsfähigkeit von Alpha-, Beta- und Gammastrahlen

Alphateilchen werden in einem gleich starken elektrischen Feld weniger abgelenkt als Betateilchen. Das war ein weiteres wichtiges Indiz für ihre Eigenschaften. Daraus ist nämlich nach bekannten Naturgesetzen die sogenannte spezifische Ladung zu errechnen. Dies ist das Verhältnis der Größe der Ladung zur Masse des Teilchens. Was elektrische Ladung ist, wissen wir inzwischen. Mit dem Begriff Masse müssen wir uns noch vertraut machen.

Masse und Gewicht

In der Umgangssprache sagt man häufig „Gewicht“, wenn eigentlich Masse gemeint ist. Besser ist es, die Begriffe Gewicht und Masse auch in der Umgangssprache auseinanderzuhalten. Das Gewicht ist die Kraft, mit der ein Körper von der Anziehungskraft der Erde (Schwerkraft) angezogen wird. Diese Kraft wird mit zunehmender Entfernung vom Erdmittelpunkt geringer. Auf einem hohen Berge ist sie bereits ein klein wenig geringer als in Meereshöhe, weil der Berggipfel weiter vom Mittelpunkt der Erdoberfläche entfernt ist als die Meeresoberfläche. Der Unterschied ist aber so gering, daß er für das praktische Leben keine Bedeutung hat. Anders verhält es sich bei den Entfernungen, in denen Erdsatelliten unseren Planeten umkreisen. Entfernen wir uns so weit in den Weltraum hinaus wie die Erdoberfläche vom Erdmittelpunkt entfernt ist, befinden wir uns also in einem Abstand vom Erdmittelpunkt, der gleich zwei Radien der Erdoberfläche ist, so beträgt das Gewicht eines Körpers hier nur noch ein Viertel des Gewichts an der Erdoberfläche. Auch haben die verschiedenen Himmelskörper unterschiedlich starke Anziehungskraft. Auf dem Mond wiegen Menschen und Gegenstände nur ungefähr ein Sechstel des Gewichts, das sie auf der Erde haben. Das Gewicht eines Körpers hängt also von den Schwerkraftbedingungen ab.

Die Masse desselben Körpers bleibt dagegen unter allen Schwerkraftbedingungen gleich. Denn die Masse gibt die Stoffmenge eines Körpers an. 1 kg Kohle ist auch auf dem Mond 1 kg Kohle. Die Masse wird in Gramm (g) und Kilogramm (kg), das Gewicht in Pond (p) und Kilopond (kp) angegeben. Auf der Erdoberfläche beträgt das Gewicht eines 1 kg schweren Körpers aber ebenfalls fast genau 1 kp. Am Äquator ist sein Gewicht ein wenig kleiner, am Nord- oder

Südpol etwas größer, weil die Erde keine genaue Kugelform hat, sondern an den Polen leicht abgeplattet ist. An den Polen ist die Erdoberfläche daher dem Mittelpunkt der Erde etwas näher als am Äquator. Die hierdurch bedingten Gewichtsunterschiede betragen jedoch höchstens $\frac{1}{2}$ Prozent.

Atomares Kegelspiel

Doch zurück zur spezifischen Ladung, also dem Verhältnis von Ladung zu Masse. Warum muß sich dieses Verhältnis auf den Grad der Ablenkung eines Teilchens im elektrischen Feld auswirken? Das Teilchen wird im elektrischen Feld nicht abgelenkt, weil es Masse hat, sondern nur auf Grund seiner Ladung. Die Masse behindert im Gegenteil die Ablenkung des Teilchens. Das beruht auf einem weiteren Naturgesetz, dem Gesetz von der „Trägheit der Masse“. Es besagt, daß sich jeder Körper mit derselben Geschwindigkeit und in gleicher Richtung weiterbewegt, solange keine anderen Kräfte auf ihn einwirken. Wäre ein Strahlenteilchen nicht geladen, so würde es sich daher im elektrischen Feld unbeirrt geradlinig weiterbewegen. Zwar wird es auch auf Grund seiner Masse durch die Schwerkraft der Erde angezogen, doch ist diese Ablenkung infolge der äußerst geringen Masse so kleiner Teilchen derart klein, daß wir sie für unsere Überlegungen nicht zu berücksichtigen brauchen.

Das geladene Strahlenteilchen unterliegt also gleichzeitig zwei unterschiedlich wirkenden Kräften. Auf Grund der Trägheit seiner Masse wird ihm eine geradlinige, infolge der Ladung eine gekrümmte Bahn aufgezwungen. Welche Kraft wird sich nun stärker auswirken? Das hängt von der Größe der Ladung, aber auch von der Größe der Masse ab. Stellen wir uns zwei Teilchen vor, die eine gleich große Ladung, aber eine verschiedene Masse haben. Das schwere Teilchen hat auf Grund der größeren Masse einen stärkeren „Impuls“, sich geradeaus zu bewegen als das leichtere Teilchen. Folglich wird bei gleich großer Ladung das schwere Teilchen weniger stark im elektrischen Feld abgelenkt als das leichte.

Vielleicht hilft uns ein Vergleich, das noch besser zu verstehen. Wir lassen in Gedanken zwei Kugeln über die Kegelbahn rollen. Die eine Kugel sei doppelt so schwer wie die andere, aber beide haben gleiche Ladung und werden deshalb mit gleich starker Kraft

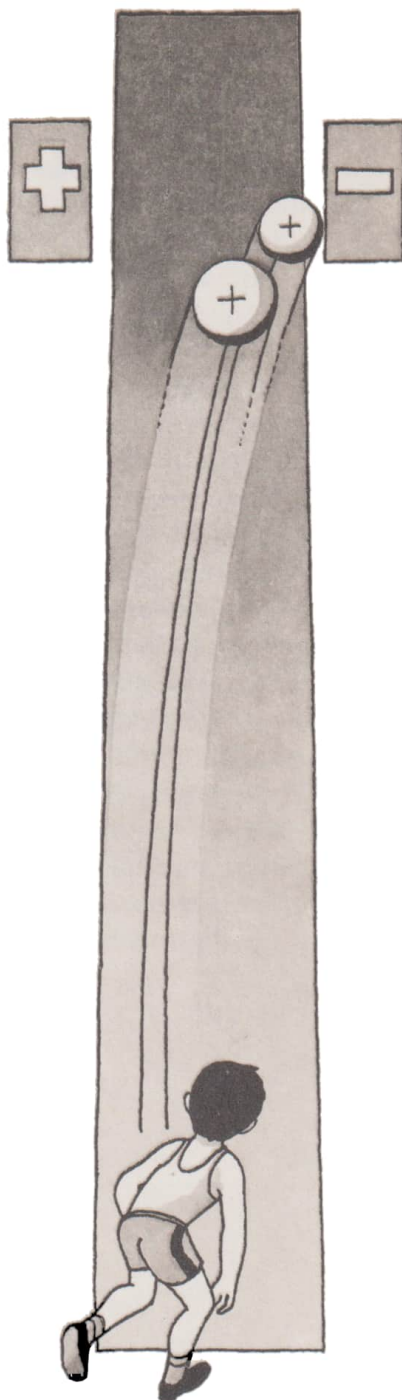
am Ende der Kegelbahn durch ein elektrisches Feld nach der Seite abgelenkt. Die schwere Kugel wird, weil sie mit größerer „Wucht“ geradeaus rollt als die leichtere, weniger zur Seite gelenkt.

Ein Schleier hebt sich

Die genauen Messungen über die spezifische Ladung der Strahlenteilchen ergaben, daß Betateilchen dieselbe spezifische Ladung wie Elektronen haben, während die Alphateilchen ihrer spezifischen Ladung nach Atomkerne des Elements Helium sein konnten. Damit war eine interessante neue Fragestellung aufgeworfen: Sind Alphateilchen mit Heliumkernen identisch?

Helium ist wie Wasserstoff und Sauerstoff ein Gas, das aber sehr viel seltener vorkommt und nicht brennbar ist. Man nennt es ein Edelgas, weil es keine chemischen Verbindungen mit anderen Elementen eingeht. Um zu prüfen, ob Alphateilchen wirklich Heliumkerne sind, wurden Alphastrahlen längere Zeit in ein luftleer gepumptes Glasgefäß gestrahlt. Allmählich mußte sich dadurch eine Menge der Teilchen ansammeln, die aller-

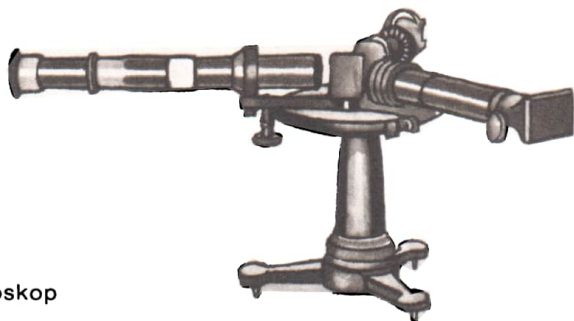
Bewegte elektrisch geladene Teilchen von unterschiedlicher Masse werden im elektrischen Kraftfeld verschieden stark abgelenkt



dings zu klein war, um mit gewöhnlichen chemischen Analysen untersucht zu werden. Für so kleine Mengen gibt es aber ein anderes Untersuchungsverfahren, die sogenannte Spektralanalyse. Darin steckt das Wort Spektrum. Das Spektrum ist das bunte Farbengebilde, das man erhält, wenn Licht z. B. mit einem Prisma in seine einzelnen Farbbestandteile zerlegt wird.

Das weiße Tageslicht, das uns die Sonne zustrahlt, besteht aus einem Gemisch von Licht verschiedener Farben, von Violett über Blau, Grün, Gelb und Orange bis zum Rot. Im Sommer können wir gelegentlich ein Spektrum am Himmel erblicken: den Regenbogen. Wenn er deutlich ausgeprägt ist, erkennen wir, daß in ihm die einzelnen Lichtfarben in der oben genannten Reihenfolge nebeneinanderliegen. Jede Farbe umfaßt einen bestimmten Bereich von Wellenlängen des Lichts.

Das Gemisch der verschiedenen Farben bzw. Wellenlängen entsteht dadurch, daß in der Sonne die Atome sehr vieler verschiedener chemischer Elemente Licht aussenden. Wenn man aber nur ein einziges Element zur Aussendung von Licht veranlaßt, so strahlt es nicht Licht aller möglichen Wellenlängen aus, sondern nur einige wenige Wellenlängen, die für dieses Element spezifisch sind. Im Spektralapparat sieht man dann nicht mehr ein breites, lückenlos ineinander übergehendes Lichtband sämtlicher Farben wie beim Regenbogen, sondern nur ganz bestimmte schmale helle Linien. Man nennt sie Emissionsspektrallinien. Sie befinden sich nicht an beliebigen, sondern an ganz bestimmten Stellen des Spektrums. Aus ihrer Lage läßt sich bestimmen, um welches Element es sich handelt.



Spektroskop

Der Funke wird befragt

Wenn man die beiden Enden des Gefäßes, in dem die Alphateilchen aufgefangen wurden, mit elektrisch leitenden Metallteilen versieht (Elektroden genannt und nicht zu verwechseln mit Elektronen) und an sie eine hohe elektrische Spannung anlegt, so wird die Spannung durch das im Glasgefäß befindliche Gas entladen. Es springt ein Funke von der einen zur anderen Elektrode über. Betrachtet man das Licht des Funkens im Spektralapparat, so sieht man die Spektrallinien. Man kann sie auch fotografieren und dann noch genauer auswerten.

Die Untersuchungen bestätigten die Vermutung, daß Alphateilchen schnell bewegte Heliumkerne sind, genauer gesagt: daß sie einen Stoff ergeben, der dieselben Spektrallinien aussendet wie das Element Helium. Denn daß es sich um Heliumkerne handelt, konnte man zunächst schon deshalb nicht wissen, weil noch gar nicht bekannt war, daß Atome aus einem Kern und einer Elektronenhülle bestehen.

Damit haben wir an einigen wenigen Beispielen physikalischer Untersuchungsmethoden verfolgt, wie man Eigenschaften von Teilchen ermitteln kann, die unvorstellbar winzig und absolut unsichtbar sind. Doch wurden hier nur die einfachsten und am leichtesten zu verstehenden Methoden ausgewählt. Wir wollten uns damit einen kleinen Einblick in die Schwierigkeiten naturwissenschaftlicher Forschung verschaffen.

Ein Naturgesetz gerät ins Wanken

Die Feststellung, daß die Alphastrahlung aus Heliumkernen besteht, hatte eine Konsequenz, die ein Grundgesetz der Chemie zum Einsturz brachte. Jahrhundertlang hatten Alchimisten, das waren Vorläufer der Chemiker, vergeblich versucht, einen chemischen Stoff künstlich in einen anderen umzuwandeln. Insbesondere wollten sie aus unedlen Stoffen das begehrte Gold machen. Aber als aus der unwissenschaftlichen Alchimie allmählich die wissenschaftliche Chemie wurde, erkannte man, daß eine solche künstliche Umwandlung eines Elements in ein anderes überhaupt nicht möglich ist. Das war eine der grundlegenden Erkenntnisse der neuen, exakt wissenschaftlich betriebenen Chemie.

Doch diese Grunderkenntnis schien sich nun als falsch zu erweisen. Denn wenn ein Radiumatom ein Teilchen ausstrahlt, das mit dem Heliumkern identisch ist, so kann das, was von dem Radiumatom nach dem Ausschleudern des Heliumkerns übrigbleibt, kein Radium mehr sein. Denn die Atome jedes chemischen Elements sind u. a. durch eine bestimmte Masse charakterisiert. Verliert ein Atom ein so großes „Stück“ seiner Masse, wie es der Heliumkern darstellt, so muß sich das Atom dadurch in ein anderes Element umgewandelt haben.

Das war ein Widerspruch zu der bisher erkannten Unveränderlichkeit der Elemente, der den Wissenschaftlern zunächst viel Kopferbrechen bereitete. Heute weiß man, daß es nur ein scheinbarer Widerspruch war. Durch chemische Reaktionen lassen sich Elemente tatsächlich nicht umwandeln. Insofern behielten die Chemiker recht. Aber mit der Radioaktivität war eine ganz neue, zuvor unbekannte Erscheinung entdeckt worden. Die Radioaktivität ist kein chemischer, sondern ein physikalischer Vorgang, und durch Radioaktivität ist die Umwandlung eines Elements in ein anderes tatsächlich möglich.

Ist Radioaktivität ansteckend?

Aber was ist das für ein Element, das aus dem Radium nach der Aussendung von Alphateilchen entsteht? Es mußte das Element sein, dessen relative Atommasse der Differenz zwischen der des Radiums und der des Heliums entsprach. Längst gab es eine Tabelle, in der die Elemente nach ihrem Atomgewicht geordnet waren. Und es war auch schon das von D. I. Mendelejew und Lothar Meyer unabhängig voneinander entwickelte Periodensystem der Elemente bekannt, das jedem Element einen bestimmten Platz mit bestimmten Eigenschaften zuweist. Aus diesem Periodensystem konnte man voraussagen, daß das Element, das aus dem Radium durch Aussendung eines Alphateilchens entsteht, ein Gas sein muß. Das paßte nun gut zu einer Beobachtung, die schon dem Forscherehepaar Curie aufgefallen war, die man damals aber noch nicht erklären konnte.

In unmittelbarer Nähe von Radiumsalzen ließ sich in der Luft ebenfalls eine schwache Radioaktivität nachweisen. Diese Er-

scheinung konnte aber nicht darauf beruhen, daß Radioaktivität gewissermaßen ansteckend auf alle benachbarten Stoffe wirkt. Denn sonst müßten im Verlaufe der jahrmilliardenlangen Geschichte unserer Erde längst alle Stoffe durch „Ansteckung“ radioaktiv geworden sein.

Diese Radioaktivität der Luft ging aber schnell wieder verloren. Das ermöglichte folgende Hypothese: Vielleicht ist der Stoff, in den sich das Radium nach der Aussendung der Alphateilchen verwandelt, ebenfalls radioaktiv.

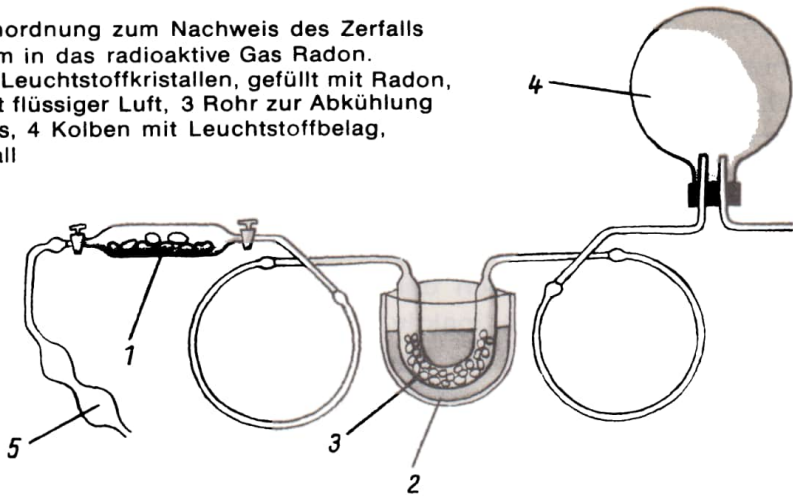
Wenn dieser Stoff ein Gas ist, so war verständlich, warum die umgebende Luft radioaktiv wurde. Denn Gase vermischen sich schnell. Alle aus dem Radium entstandenen Atome eines radioaktiven Gases würden sich daher sofort mit der umgebenden Luft vermischen. Dabei tritt zuerst eine Vermischung mit der Luft ein, die sich in unmittelbarer Nähe des Radiums befindet. Darin sind daher anfangs so viele Teilchen des radioaktiven Gases enthalten, daß man eine schwache Radioaktivität feststellen kann. Erst wenn sich nach einiger Zeit das radioaktive Gas mit einer größeren Luftmasse vermischt, sind je Kubikzentimeter Luft nur noch so wenige Atome des radioaktiven Gases vorhanden, daß die sehr schwache Radioaktivität auf so einfache Weise nicht mehr festzustellen ist.

Heute weiß man, daß es tatsächlich so ist. Die Atmosphäre unseres Planeten enthält das radioaktive Gas, in das sich Radium nach der Aussendung von Alphateilchen verwandelt, aber nur in äußerst geringen Mengen. Wir atmen es ständig mit ein. Doch weil es so wenig ist, schadet es uns nicht.

Ob Radium durch Aussendung von Alphateilchen tatsächlich in ein radioaktives Gas „zerfällt“, wurde wieder durch ein Experiment geprüft. In ein Glasröhrchen, das zunächst luftleer gemacht wurde, pumpte man mit einem Gummiball solche Luft hinein, auf die längere Zeit die Strahlung von Radium eingewirkt hatte. Folglich mußte sich das gesuchte radioaktive Gas in dieser Luft befinden. Stimmt die Vermutung, so würde die Strahlung des radioaktiven Gases Leuchtstoff zum Aufleuchten bringen. Tatsächlich leuchteten die Leuchtstoffkristalle, die in dem Glasröhrchen waren, auf, sobald die Luft mit dem radioaktiven Gas hineingepumpt wurde.

Versuchsanordnung zum Nachweis des Zerfalls von Radium in das radioaktive Gas Radon.

1 Rohr mit Leuchtstoffkristallen, gefüllt mit Radon,
2 Gefäß mit flüssiger Luft, 3 Rohr zur Abkühlung
des Radons, 4 Kolben mit Leuchtstoffbelag,
5 Gummiball



Damit war erst einmal bewiesen, daß die Luft tatsächlich einen radioaktiven Stoff enthält. Denn die in normaler Luft enthaltenen Gase bringen Leuchtstoffe nicht zum Aufleuchten. Aber ist der radioaktive Stoff wirklich ein Gas? Das war die nächste Frage, die es zu klären galt.

Probe mit verflüssigter Luft

Zu den Eigenschaften aller Gase gehört es, daß sie bei sehr niedrigen Temperaturen flüssig werden. Auch Luft kann man verflüssigen, wenn man sie auf minus $194,4^{\circ}\text{C}$ abkühlt. Das schon geschilderte Experiment wurde deshalb erweitert. Aus dem ersten Röhrchen pumpte man die Luft mit dem radioaktiven Stoff in einen zweiten Glaskolben, der wie der Bildschirm unserer Fernsehröhre innen mit Leuchtstoff beschichtet war. Würde die Luft mit dem radioaktiven Stoff hier eindringen, so müßte der Kolben aufleuchten. Zwischen das erste Glasröhrchen und den Leuchtstoffkolben wurde jedoch ein U-förmiges Rohr eingefügt, das man in verflüssigte Luft tauchen konnte.

Immer wenn man das U-Rohr eintauchte, verflüssigte sich das Gas auf dem Wege vom ersten Röhrchen in den Leuchtstoffkolben. Dann half kein Pumpen mehr. Denn das verflüssigte Gas konnte man nicht mit dem Gummiball in den Leuchtstoffkolben hinüberpumpen. Folglich konnte der zweite Glaskolben nicht aufleuchten.

Hob man das U-Rohr jedoch wieder aus der verflüssigten Luft, die als Kältemittel diente, so mußten die Tröpfchen des verflüssigten radioaktiven Gases verdampfen, und man konnte das Gas durch Zusammendrücken des Gummiballs jetzt wieder in den Leuchtstoffkolben drücken. Dabei mußte er aufleuchten. Der Versuch bestätigte die Vermutung: War das U-Rohr in das Kältemittel getaucht, so leuchtete der Kolben nicht, wurde es aus dem Kältemittel herausgehoben, so leuchtete er.

Damit war schrittweise bewiesen:

1. Der Stoff, in den das Radium durch Aussendung von Alphateilchen zerfällt, ist ebenfalls radioaktiv; denn er bringt Leuchtstoffe zum Leuchten.

2. Der entstandene radioaktive Stoff ist ein Gas.

Zu klären blieb 3. noch die Frage: Welches chemische Element ist dieses radioaktive Gas?

Atommasse 222

Hierüber gab die Tabelle der chemischen Elemente bereits einen genauen Hinweis. Jedes Element ist durch eine bestimmte Masse seiner Atome charakterisiert, also durch die Stoffmenge, die ein Atom des Elements enthält. Da diese Masse noch weit kleiner als der millionste Teil eines Millionstelgramms ist, wäre es unpraktisch, sie in Gramm auszudrücken. Man kennzeichnet die Masse der Atome daher durch eine Zahl, die angibt, wie groß die Atommasse der verschiedenen Elemente im Verhältnis zur Atommasse eines anderen als Maßstab benutzten Elements ist.

Veranschaulichen wir uns das durch einen Vergleich: Die Deutsche Demokratische Republik ist 108174 Quadratkilometer groß. Die Größe aller anderen Staaten der Erde können wir statt in Quadratkilometern auch in der Form angeben, daß wir sagen, sie seien soundso viel mal größer oder kleiner als die DDR. Die Sowjetunion ist z. B. rund 210mal größer als die DDR. Sie umfaßt also 210 „DDR-Größen“. Weil die Massen der Atome im Verhältnis zu der Masse einer bestimmten, als Maßstab benutzten Atomsorte ausgedrückt werden, bezeichnet man sie als „relative Atommasse“.

Für jedes bekannte Element kannte man auch seine relative Atommasse. (In älteren Büchern finden wir dafür noch die nicht

exakte Bezeichnung „Atomgewicht“.) Radium hat die relative Atommasse 226, Helium 4. Folglich mußte das durch Aussendung von Alphateilchen aus dem Radium entstandene „Zerfallsprodukt“ ein Element mit der relativen Atommasse 222 sein! Diesem Element hatte man inzwischen schon einen Namen gegeben: Radiumemanation, das bedeutet so viel wie „das vom Radium Ausgestrahlte“. Später wurde der Name gekürzt auf „Radon“.

Die Bestimmung der relativen Atommasse des Radons mußte die neue revolutionierende Theorie von der Umwandlung der Elemente durch Radioaktivität entweder schlüssig beweisen oder widerlegen. Doch die Bestimmung der relativen Atommasse des Radons war äußerst schwierig. Da man einzelne Atome nicht wägen kann, braucht man für die Messung der relativen Atommasse stets eine gewisse Mindestmenge des betreffenden Elements. Radon entstand aber nur in extrem winzigen Mengen. Ein berühmter Chemiker, Sir William Ramsay, konstruierte eigens für die Bestimmung der relativen Atommasse des Radons eine ganz neuartige Waage, mit der man noch Mengen von weniger als einem zehnmillionstel Gramm wägen konnte. Das Ergebnis war ein großer Triumph der neuen Theorie: Die relative Atommasse des Radons betrug tatsächlich wie erwartet 222!

Ein Element verschwindet

Aber die Wissenschaftler, die sich der Erforschung der Radioaktivität verschrieben hatten, konnten bei dieser mühsam errungenen neuen Erkenntnis nicht lange ausruhen. Denn schon gaben die weiteren Beobachtungen ihnen wieder ein neues Rätsel auf. Das radioaktive Gas Radon verschwand nach kurzer Zeit von selbst. Wenn man Luft, in der Radon enthalten war, in ein mit Leuchtstoff versehenes Glasröhrchen einschloß und die Intensität des Leuchtens täglich überprüfte, so fiel schon nach wenigen Tagen auf, daß das Leuchten immer schwächer wurde. Nach etwa einem Monat war es schließlich ganz verschwunden.

Völlig überraschend und rätselhaft war das für die Wissenschaftler allerdings nicht. Denn schon die einfache Überlegung lehrte: Wenn sich Radium durch Aussendung von Alphateilchen in Radon umwandelt, warum sollte es dann nicht auch möglich sein, daß sich

Radon ebenfalls durch Aussendung von Strahlenteilchen in ein anderes Element umwandelt?

Tatsächlich entdeckte man später, daß es ganze *Zerfallsreihen* von radioaktiven Elementen gibt, das heißt: Das radioaktive Element A wandelt sich nacheinander in die radioaktiven Elemente B, C, D, E, F, G und so weiter um, bis der Zerfall einmal zum Stillstand kommt und als Endergebnis der langen Reihe von Umwandlungen ein Element entsteht, das nicht mehr radioaktiv, sondern „stabil“ ist. „Stabil“ ist der Gegenbegriff zu „radioaktiv“. Stabile Atome zerfallen also nicht mehr, sie wandeln sich nicht mehr um, sondern bleiben unverändert. Die einzelnen Elemente einer Zerfallsreihe, die nacheinander entstehen, bezeichnet man auch zusammenfassend als „radioaktive Familie“.

Bevor die Physiker die Gesetzmäßigkeit dieser Umwandlungen voll verstehen konnten, mußten sie erst den Aufbau der Atome aus Hülle und Kern und die Zusammensetzung der Atomkerne enträtseln. Den ersten schlüssigen Beweis – wiederum nur anhand komplizierter Schlußfolgerungen auf Grund bestimmter Indizien – erbrachte Sir Ernest Rutherford.

Dem Atomkern auf der Spur

„Talk softly, please!“ (Bitte leise sprechen!). Ein großes Schild mit dieser Aufschrift hing im Labor von Ernest Rutherford. Der große Gelehrte wollte beim Nachdenken nicht durch das Sprechen der Mitarbeiter gestört werden. Hier in seinem Labor an der Universität von Manchester wurde als Ergebnis mühsamer Versuche jene Erkenntnis gewonnen, die wir bisher vorwegnahmen, nämlich, daß das Atom aus einem Kern und einer Hülle besteht! Das war wohl die grundlegendste Erkenntnis der neuen Atomforschung überhaupt.

Bis 1912 wußte niemand genau, wie ein Atom gebaut ist. Man stellte sich Atome als feste kleine Kugeln vor. Zwar wußte man aus verschiedenen Versuchen, daß Elektronen im Atom enthalten sein müssen. Denn man konnte die Stoffe auf verschiedene Weise veranlassen, Elektronen auszusenden.

Doch niemand wußte, daß die Elektronen die Atomhülle bilden und ähnlich wie Planeten eines unvorstellbar winzigen Sonnensystems den Atomkern umlaufen. Rutherford ahnte es, aber er brauchte sechs Jahre, um diese völlig umwälzende Vorstellung vom Bau eines Atoms zu beweisen.

Marie Curie ist gelegentlich als „Mutter“ des Atomzeitalters bezeichnet worden. Dann darf man Rutherford den „Vater“ des Atomzeitalters nennen. So viele grundlegende Erkenntnisse über den Atomkern hat er der Wissenschaft erarbeitet! Wenn wir ihn auf Fotos sehen, sind wir geneigt zu sagen: ein typischer „steifer“ Engländer. Oft trug er einen Gehrock und einen steifen, weißen Umlegekragen. Wenn er mit jemand sprach, so pflegte er die Hände in die Hüften zu stützen. Nachdenklich und wie in die Ferne schweifend schauten seine Augen.

Ein genialer Handwerkersohn

Sir Ernest Rutherford war aber gar kein Engländer und ursprünglich auch kein „Sir“, also kein Träger eines englischen Adelstitels,

sondern der Sohn eines neuseeländischen Handwerkers. In einem kleinen Ort auf der Südinsel von Neuseeland, das südöstlich von Australien liegt, wurde er am 30. August 1871 geboren. Er fiel unter allen Schülern durch große Begabung auf, aber – ebenso wie bei Marie Curie – war es nicht die Begabung allein, die ihn auszeichnete, sondern auch ein unbändiger eiserner Fleiß. Er lernte nicht, weil er glaubte, damit seinen Lehrern eine Freude zu machen oder um durch gute Zensuren zu glänzen, sondern weil es ihm die größte Freude bereitete, wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen.

Obwohl es in der bürgerlichen Gesellschaft ungemein schwer war und noch ist, als Sohn oder Tochter unbemittelter Eltern eine höhere Schulbildung und gar eine Universitätsausbildung zu erhalten, konnte man sie dem jungen Ernest Rutherford angesichts seiner überragenden Kenntnisse und seines großen Fleißes doch nicht versagen. Er erhielt Stipendien für den Schul- und Universitätsbesuch und studierte an der Universität der neuseeländischen Hauptstadt Christchurch Mathematik und Physik. Mit 22 Jahren errang er bereits den akademischen Grad eines Master of Arts, was an englischen Universitäten soviel wie der Doktorgrad an unseren Hochschulen bedeutet. Mit 24 Jahren, also 1895, trat er eine Stellung im Cavendish-Laboratorium an der englischen Universität Cambridge an.

Dieses Laboratorium, das nach dem englischen Chemiker Henry Cavendish (1731–1810) benannt ist, war eine der berühmtesten Forschungsstätten der damaligen Zeit. Hier beschäftigte sich Rutherford zunächst mit Hochfrequenzerscheinungen und mit der drahtlosen Übertragung hochfrequenter Signale, wie sie heute im Rundfunk angewandt wird. Er las dann aber von der Entdeckung der Röntgenstrahlen und der Radioaktivität und interessierte sich sofort brennend für diese neuen Probleme.

Um wissenschaftlich selbständig arbeiten zu können, bewarb er sich 1897 um eine frei gewordene Professur an der MacGill-Universität der kanadischen Stadt Montreal. Er erhielt die Professur und wurde so mit erst 28 Jahren ordentlicher Professor. Hier in Kanada verfolgte er die Probleme der radioaktiven Strahlung in Zusammenarbeit mit Frederic Soddy weiter. Aus diesen Versuchen

ergab sich seine „Atomzerfallstheorie der Elemente“, die er 1903 veröffentlichte. Diese Theorie beruht unter anderem auf den Experimenten, die wir schon im vorigen Kapitel kennenlernten.

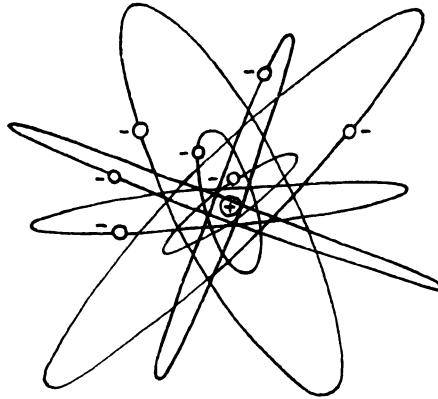
Man muß eine eigene Meinung haben

Es gehörte viel geistige Selbständigkeit dazu, um eine derart revolutionisierende Theorie aufzustellen. „Aber Herr Professor, das widerspricht doch allen Erkenntnissen der Chemie“, hatte man dem damals noch jungen Rutherford entgegengehalten. „Dann sind die bisherigen Erkenntnisse der Chemie eben falsch“, antwortete Rutherford selbstbewußt. Aber er sprach solche Worte nicht leichtfertig aus. Bevor er eine von anderen Wissenschaftlern erarbeitete Theorie umstieß, prüfte er mit unerbittlicher Genauigkeit immer wieder, ob er selbst nicht doch irgend etwas in seinen Experimenten falsch gemacht hatte, ohne es zu merken. Professor Rutherford führte seine Experimente unter allen möglichen Schutzmaßnahmen zur Abschirmung fremder Strahlen durch, um die Ergebnisse nicht durch noch unbekannte Faktoren beeinflussen zu lassen.

1907 hatte sich Rutherfords neue Theorie bereits so weit durchgesetzt, daß die Universität Manchester in England darauf bedacht war, den großen Denker und Experimentator der Physik für sich zu gewinnen. Und so stand der energische Mann dann eines Tages an der Reeling des Schiffes, das ihn von seiner alten Wirkungsstätte zu einer neuen bringen sollte. Er blickte auf das blaue Meer, aber seine Gedanken schweiften schon vorweg in das neue Institut. Er überlegte bereits die wichtigsten Änderungen, die er dort vornehmen wollte, um für seine geplanten Experimente die besten Voraussetzungen zu schaffen. In Manchester begann ein neuer Abschnitt seiner Forschungen, der in der „Entdeckung“ des Atomkerns seine Krönung fand. Bereits 1908 wurde Rutherford für seine Erkenntnisse über den radioaktiven Zerfall mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

Entdeckung bei Schneetreiben

Gegen Ende des Jahres 1910 hatten sich die Rätsel, die die von Rutherford durchgeführten Experimente der Wissenschaft aufgaben, kritisch zugespitzt. Rutherford verfolgte bei seinen Experi-



menten von Anfang an eine bestimmte Vorstellung vom Bau des Atoms. Als die vermuteten Ergebnisse eintraten, setzte er sich tagelang grübelnd an den Schreibtisch, rechnete und erwog. Aber er kam dem Beweis für seine Vermutung nicht so recht auf die Spur. Draußen war rauhes Dezemberwetter. Beinahe ärgerlich stand Rutherford von seinem Schreibtisch auf, zog den Mantel an, preßte den Hut auf seinen Kopf, damit der Wind ihn nicht wegblasen sollte, und ging dann hinaus in den Schneesturm.

Wichtig stapften seine Schritte. Während die Flocken um ihn wirbelten, konzentrierte er seine Gedanken auf das Problem, wie denn eigentlich ein Atom gebaut sein könnte. Da auf einmal kam ihm der große Einfall. Mit begeistert leuchtenden Augen ging der sonst so kühle und nüchterne Mann zurück in sein Institut und erklärte, noch die Schneeflocken auf dem Mantel, seinen Assistenten: „Meine Herren, jetzt weiß ich, wie ein Atom gebaut ist!“ Mit flüchtigen Kreidestrichen skizzierte er zum ersten Mal jenes Atommodell an der Tafel, das wir inzwischen schon unzählige Male in Büchern und Zeitungen gesehen haben, nämlich den Atomkern, der von einer Schar von Elektronen umkreist wird wie die Sonne von ihren Planeten.

Man erhob gegen dieses Atommodell sofort Einwände. Es sei zum Beispiel nicht mit den Erkenntnissen der Physik vereinbar. Rutherford ließ sich dadurch aber nicht von seiner Theorie abbringen und meinte, dann müsse die „klassische“ Physik eben berichtigt werden. Und Rutherford behielt damit recht.

Für den Krieg brachte Rutherford kein Fünkchen Begeisterung auf. Als ihn die britische Regierung nach Ausbruch des ersten Weltkrieges damit beauftragte, sich an kriegswichtigen Forschungsarbeiten zu beteiligen, lehnte er den Auftrag und damit symbolisch den ganzen Krieg ab. Er schrieb zurück, daß er mit wissenschaftlichen Forschungen beschäftigt sei, die viel wichtiger wären als der ganze Krieg.

In seiner wissenschaftlichen Laufbahn übernahm Rutherford nach seiner Zeit in Manchester die verantwortungsvolle Aufgabe des Leiters der berühmten Forschungsstätte in Cambridge, in der er selbst einmal als junger Assistent gearbeitet hatte, des Cavendish-Laboratoriums. Nach dem ersten Weltkrieg gelang ihm dort die erste „Atomzertrümmerung“, wie man es damals nannte, obwohl es nicht eigentlich eine Zertrümmerung, sondern nur eine künstliche Umwandlung des Atomkerns war.

Später leitete Rutherford als Präsident das Akademische Hilfswerk. Diese internationale Organisation half besonders den aus dem faschistischen Hitler-Deutschland emigrierten Wissenschaftlern. Rutherford empfand einen tiefen Abscheu gegenüber dem deutschen Faschismus; er setzte sich dafür ein, den vor dem Hitler-Regime geflohenen Wissenschaftlern wieder Arbeitsmöglichkeiten zu verschaffen und ihnen materielle Hilfe zu leisten.

Aber so viele grundlegende Erkenntnisse Rutherford für die Kernphysik auch gewann, er glaubte niemals daran, daß es gelingen würde, die Energien der Atomkerne technisch zu nutzen. Er pflegte zu sagen: „An die Energien der Atomkerne herankommen zu wollen, das bedeutet soviel wie den Mond anzubellen.“ Er leistete seine Arbeit also nicht unter dem Gesichtspunkt, der Menschheit dadurch eine neue gigantische Energiequelle zu erschließen, sondern nur aus Drang nach neuen, tieferen wissenschaftlichen Erkenntnissen über die Natur. Das ist ein besonders eindrucksvolles Beispiel für den unbedingten Forscherdrang des Menschen, der nicht allein nach dem materiellen Nutzen des Forschens fragt, sondern dem auch die Erkenntnis als solche wichtig ist. Viele Menschen sind sorgsam darauf bedacht, ja kein Quentchen mehr zu lernen, als unbedingt nötig ist, um Geld zu verdienen. Das ist eine Einstellung, die jeden Fortschritt der Menschheit unmöglich machen würde. Zu

welch großen Fortschritten der Erkenntnisdrang des Menschen führt, das zeigt das Beispiel der Kernphysik besonders deutlich.

Der Mensch muß nachhelfen

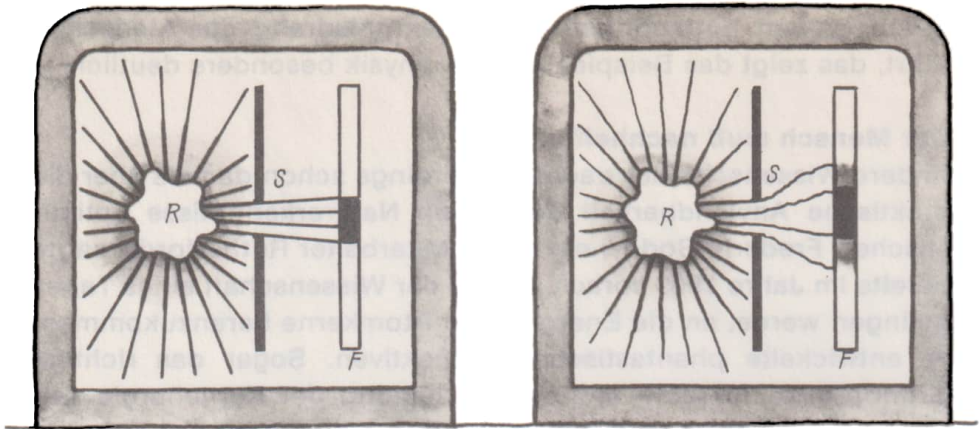
Andere Wissenschaftler dachten allerdings schon damals über die praktische Anwendbarkeit der neuen Naturerkenntnisse optimistischer. Frederic Soddy, ein enger Mitarbeiter Rutherfords, sagte bereits im Jahre 1909 voraus, daß es der Wissenschaft eines Tages gelingen werde, an die Energien der Atomkerne heranzukommen; er entwickelte phantastische Perspektiven. Sogar das richtige Grundprinzip für eine technische Nutzung der Kernenergie sah er voraus, nämlich eine künstliche Beschleunigung der energieliefernden Kernprozesse, die von Natur aus zu langsam ablaufen, als daß man sie nutzen könnte.

Solange Rutherford lebte, behielt er allerdings recht mit seiner Ansicht, daß man die Energien der Atomkerne nicht nutzen könne. Denn als Professor Otto Hahn, der übrigens auch einmal Schüler und Assistent Rutherfords war, 1938 durch die Entdeckung der Urankernspaltung den Schlüssel zur Kernenergie fand, war Rutherford bereits tot. Er starb am 19. Oktober 1937. Er ist als eine der bedeutendsten Forscherpersönlichkeiten in die Geschichte der Naturwissenschaft eingegangen.

Eine Kleinigkeit führt auf die Spur

Rutherfords große Entdeckung fing mit einer Beobachtung an, die ganz nebensächlich erschien. Aber da Rutherford gründlich über alles nachdachte, entging ihm nicht, daß hinter dieser beiläufig gemachten Beobachtung möglicherweise ein Schlüssel zum Geheimnis des Atombaues stecken könnte. Rutherford hatte folgenden Versuch durchgeführt: Die Alphastrahlen des Radiums ließ man auf eine Fotoplatte einwirken. Doch befand sich zwischen der Strahlenquelle und der Platte eine Metallscheibe, die nur einen schmalen Spalt hatte. Deshalb konnten nur diejenigen Alphastrahlen auf die Platte gelangen, die durch den Spalt drangen. Die übrigen blieben in der Metallplatte stecken. So konnte auch auf der Fotoplatte nur ein schwarzer Streifen von der Form des Spalts entstehen.

Da man zunächst von den Alphastrahlen annehmen mußte, daß



Versuchsanordnung zum Nachweis der Streuung von Alphateilchen in Luft.
 R Radium-Strahlenquelle, S Spalt, F Fotoplatte

sie sich genau geradlinig ausbreiten, und da ferner die Strahlenquelle sehr klein war, vergleichbar einer punktförmigen Lichtquelle, mußte auch der in der Metallplatte befindliche Spalt mit scharfen Rändern abgebildet werden. Das war tatsächlich der Fall, aber nur dann, wenn das Gefäß, in dem der Versuch stattfand, luftleer gepumpt war.

Befand sich dagegen Luft in dem Behälter, so wurde der Spalt auf der Platte unscharf, mit verwaschenen Rändern abgebildet. Das war nach allen bekannten physikalischen Gesetzen nur so zu erklären, daß die Alphateilchen bei Vorhandensein von Luft nicht geradlinig fliegen, sondern unterwegs mehr oder weniger ihre Richtung ändern. Die Richtungsänderung konnte nicht durch elektrische oder magnetische Felder verursacht sein, da diese durch die Versuchsanordnung abgeschirmt waren.

Da die Erscheinung nur beim Vorhandensein von Luft auftrat, konnte man daraus leicht schlußfolgern, daß die Gasteilchen der Luft die Ablenkung der Alphateilchen bewirken.

Offensichtlich wurden die Alphateilchen auf ihrem Wege durch die Luft durch „Wechselwirkung“ mit Atomen der Luftgase aus ihrer ursprünglichen Bewegungsrichtung abgelenkt, so wie eine Billardkugel ihre Richtung ändert, wenn sie mit einer anderen

Billardkugel zusammenstößt. Man bezeichnet diese Ablenkung auch als „Streuung“. Mit der Streuung der Alphateilchen beschäftigten sich nun viele Physiker.

Kursabweichungen werden wichtig

Die Streuung war für die Kernphysiker ein interessantes Indiz, und sie versuchten daher wie Kriminalisten, daraus etwas über die Eigenschaften der Atome zu entnehmen. Zu diesem Zweck mußte man die Streuung der Alphateilchen freilich erst einmal in allen Einzelheiten genau untersuchen. Man veränderte zunächst die Versuchsbedingungen. Anstelle der Luft als ablenkenden Stoff benutzte man dünne Plättchen aus Metall. Die Fotoplatte wurde durch einen Leuchtstoffschirm ersetzt, der bei jedem Aufprall eines Alphateilchens einen Lichtblitz aussendet.

Die Alphateilchen mußten, wenn sie auf den Leuchtstoffschirm gelangen sollten, durch die Metallplättchen fliegen. Die Frage war nun: Wie viele Alphateilchen fliegen durch die Metallplättchen, ohne eine wesentliche Ablenkung zu erfahren, und wie viele werden beim Durchgang durch das Metall abgelenkt, gestreut? Ferner: Bis zu welchem Winkel werden die Alphateilchen aus ihrer ursprünglichen Bewegungsrichtung abgelenkt?

Man stellte den Leuchtstoffschirm einmal so auf, daß nur diejenigen Alphateilchen beobachtet und gezählt wurden, die ohne oder fast ohne Ablenkung ihrer Richtung durch das Metallplättchen hindurchflogen. Dann änderte man die Versuchsbedingungen und stellte den Schirm so auf, daß nur diejenigen Alphateilchen auf den Schirm prallten, die eine Ablenkung um einen bestimmten Winkel, zum Beispiel um 15° , erfuhren. Man zählte, wie viele Alphateilchen das waren. Dann stellte man den Schirm so auf, daß nur die Alphateilchen auftrafen, die um 30° abgelenkt wurden, und so fort. Auf diese Weise zählte man die Alphateilchen für alle erdenklichen Ablenkungswinkel.

Wie ist das Atom gebaut?

Das Ergebnis dieser Versuche: Die weitaus meisten Alphateilchen flogen durch die Metallplättchen glatt hindurch, ohne eine Ablenkung ihrer Bewegungsrichtung zu erleiden! Einige wenige Alpha-

teilchen wurden aber abgelenkt. Und zwar wurden um kleine Winkel noch verhältnismäßig viele Teilchen abgelenkt, um große Winkel aber nur sehr wenige. Je größer der untersuchte Winkel war, desto weniger abgelenkte Teilchen zählte man.

Da die meisten Alphateilchen durch die dünnen Metallplättchen glatt hindurchflogen, konnten die Atome, aus denen die Metallplättchen und alle anderen Stoffe der Welt bestehen, nicht ganz undurchdringlich sein.

Wie war ein Atom gebaut? Eine der damaligen Vorstellungen darüber, und zwar die älteste und einfachste, besagte, daß Atome winzige, undurchdringliche Kügelchen sind. Diese Vorstellung konnte jedoch nicht richtig sein, denn es hatte sich ja erwiesen, daß die meisten der Alphateilchengeschosse, die Atome des Metallplättchens durchdringen.

Eine weitere, damals von einigen Gelehrten vertretene Meinung bestand darin, daß die Atome durchdringlich sind, gewissermaßen wie Wattebäusche, durch die alle Geschosse glatt hindurch fliegen würden. Aber auch das konnte nicht der Fall sein. Denn immerhin wurden einige der Alphateilchen infolge des Zusammenpralls mit den Atomen aus ihrer Bahn abgelenkt.

Auf Grund der Versuchsergebnisse mußte man annehmen, daß die Atome teils durchdringlich, teils undurchdringlich sind. Nach langem Grübeln kam Rutherford auf die Idee, daß das Atom aus einem Kern und einer Hülle besteht. Zwischen Hülle und Kern ist stofflich leerer Raum. Nur der Kern ist undurchdringlich.

Rutherford überlegte: Stößt ein Alphateilchen beim Durchdringen der Metallplättchen auf einen Atomkern, so wird das Alphateilchen durch den Zusammenstoß aus seiner Bahn abgelenkt. Durchfliegt es dagegen die stofflich leeren Räume zwischen Kern und Hülle, so gelangt es unabgelenkt geradeaus weiter. Denn die Hülle des Atoms wird aus Elektronen gebildet, die etwa 7500mal leichter als Alphateilchen sind. Trifft ein Alphateilchen auf ein Elektron der Atomhülle, so stößt es das Elektron nur weg und ändert dabei seine Richtung nicht. Stellen wir uns als Vergleich vor, ein fahrendes Auto stoße gegen einen kleinen Stein. Der Stein wird beiseite geschleudert, das Auto ändert seine Fahrtrichtung dadurch nicht. Warum ist aber der Atomkern undurchdringlich und das

übrige Atom durchdringlich? Der Atomkern muß sehr viel schwerer sein als die Atomhülle, in ihm muß der weitaus größte Teil der Masse des Atoms konzentriert sein.

Diese Überlegungen führten Rutherford zu der Annahme, daß der Atomkern undurchdringlich ist und infolgedessen aufprallende Teilchen ablenkt. Andererseits mußte der Atomkern, obwohl er fast die gesamte Masse des Atoms enthält, sehr klein im Verhältnis zum Durchmesser des gesamten Atoms, also der Atomhülle, sein. Denn sonst hätten nicht nur einige wenige, sondern viele Alphateilchen den Kern treffen und von ihm abgelenkt werden müssen.

Rutherford errechnete den Durchmesser des Atomkerns mit ungefähr 0,000 000 000 000 1 Zentimeter (10^{-13} cm). Der Durchmesser des gesamten Atoms, also einschließlich seiner Hülle, ist dagegen 100 000mal größer (10^{-8} cm). Es ist also sehr viel stofflich leerer Raum zwischen Kern und Hülle. Die Atome liegen so gepackt, daß sich nur die Hüllen der benachbarten Atome berühren, nicht aber ihre Kerne.

Wenn hier von einem „stofflich leeren“ Raum zwischen Atomkern und Hülle gesprochen wurde, so bedeutet dies, daß sich in diesem Raum keine Teilchen befinden. Doch ist der Raum nicht völlig leer, sondern in ihm sind Kraftfelder vorhanden, die ebenfalls eine Erscheinungsform der Materie darstellen.

Sonnensysteme des Mikrokosmos?

Wenn man bedenkt, daß die Abstände der Elektronen im Verhältnis zum Durchmesser des Kerns sehr groß und die Elektronen sehr viel leichter als der Atomkern sind, so wird man an das Sonnensystem mit seinen Planeten erinnert. Auch die Planeten haben Abstände von der Sonne, die im Vergleich zum Sonnendurchmesser sehr groß sind, und die Planeten sind auch sehr viel leichter als die Sonne. Doch diese Ähnlichkeit ist nur äußerlich, denn zwischen einem Atom und einem Planetensystem bestehen viele grundsätzliche Unterschiede, so daß es falsch wäre, das Atom als ein Planetensystem im kleinen zu bezeichnen.

Die Planeten eines Sonnensystems werden durch die Massenanziehungskraft (Gravitation) der Sonne auf ihren Bahnen gehalten. Da aber die Größe der Massenanziehungskraft auch von der Größe

der Masse abhängig ist, würde sie – bei der winzigen Masse der Atomkerne – nicht ausreichen, um die Elektronen auf ihren Bahnen zu halten.

Elektronen und Atomkern sind vielmehr durch elektrische Anziehungskräfte miteinander verbunden, da sich ungleichnamige Ladungsträger gegenseitig anziehen. Würden sich die Elektronen nicht bewegen, so müßten sie in den Kern hineinstürzen. Aber durch ihre schnelle Bewegung um den Kern entsteht eine Fliehkraft, die der elektrischen Anziehungskraft die Waage hält – so wie ein künstlicher Erdsatellit durch Fliehkraft bei seiner hohen Umlaufgeschwindigkeit der Anziehungskraft der Erde die Waage hält.

Die Planetenbahnen können beliebige Abstände von der Sonne haben. Das hängt nur von der Umlaufgeschwindigkeit der Planeten ab. Die Elektronenbahnen können dagegen, wie später der dänische Physiker Niels Bohr erkannte, nicht beliebige, sondern nur ganz bestimmte Abstände vom Atomkern haben. Die dazwischenliegenden Bahnabstände sind den Elektronen „verboten“. Wenn sich die Elektronen auf diesen Bahnen bewegten, müßten sie ständig Energie ausstrahlen und folglich schnell ihre gesamte Energie verlieren. Ursprünglich wurde angenommen, daß die Elektronen auf jeder Umlaufbahn Energie ausstrahlen müßten. Dies entsprach der Konsequenz eines anderen Naturgesetzes. Das war zunächst ein harter Widerspruch zu Rutherfords „Planetenmodell“ des Atoms. Aber Bohr löste den Widerspruch durch einen genialen Gedanken. Er nahm an, daß keine Energieausstrahlung erfolgt, wenn sich die Elektronen auf bestimmten Bahnen bewegen. Die Erfahrung bestätigte die Hypothese.

Springende Elektronen erzeugen Licht

Es gibt noch einen weiteren eigenartigen Unterschied zwischen dem Planetensystem und einem Atom. Die Elektronen können von einer Bahn auf eine andere überspringen. In unserem Planetensystem ist es dagegen unvorstellbar, daß die Erde plötzlich auf die Bahn des Mars oder der Venus überspringt. Soll ein Elektron von einer dem Atomkern näheren Bahn auf eine fernere überspringen, so muß dem Atom Energie zugeführt werden.

Ist das Elektron auf eine kernfernere Bahn übergesprungen, so

befindet sich das Atom im „angeregten Zustand“, in dem es aber nicht lange verbleibt. Vielmehr springt das Elektron sehr bald wieder auf die kernnähere Bahn zurück, und dabei wird die zuvor aufgenommene Energie wieder ausgestrahlt. Die Ausstrahlung der Energie erfolgt in Form sogenannter Lichtquanten.

Das Licht unserer Glühlampen und anderer Beleuchtungsmittel erzeugen wir tatsächlich auf diese Weise. Wenn wir die Lampe einschalten, wird unzähligen Atomen des Glühfadens durch den elektrischen Strom Energie zugeführt. In den Atomen springen dadurch Elektronen auf eine kernfernere Bahn, und bei ihrem Zurückspringen auf die ursprünglichen Bahnen werden Lichtquanten ausgesandt. Alles Licht ist aus einer riesigen Anzahl solcher einzelnen Lichtquanten zusammengesetzt. Nicht nur die Stoffe bestehen also aus kleinen Teilchen, den Atomen, sondern auch das Licht und alle anderen elektromagnetischen Wellenstrahlen bestehen aus kleinen Teilchen, Energiequanten genannt. Die Lichtquanten werden auch als Photonen bezeichnet, von griechisch phos = Licht.

Bohr ging bei seiner Theorie noch von der Vorstellung aus, daß Elektronen tatsächlich kleine Körperchen sind, die auf kreis- und ellipsenförmigen Bahnen den Atomkern umlaufen. Die immer tiefere, gedankliche Analyse der experimentell beobachteten Erscheinungen führte später jedoch zu der Erkenntnis, daß die Elektronen in Wirklichkeit keine kleinen Kügelchen sein können. Hier stoßen wir zum ersten Mal auf die Tatsache, daß die uns aus der Welt der sichtbaren Gegenstände gewohnten Vorstellungen auf Atome und Atomkerne nicht vollständig übertragbar sind. Die Verhältnisse im Atom lassen sich daher mit bestimmten Erscheinungen aus der Welt der großen Körper nur vergleichen und versinnbildlichen, aber man darf die Vergleiche und Sinnbilder nicht wörtlich nehmen. Um die Atom- und Kernphysik leichter zu begreifen, wollen wir aber trotzdem weiterhin Vergleiche und Sinnbilder – in der Fachsprache der Wissenschaft bezeichnet man sie auch als „Modelle“ – benutzen.

Das Geheimnis einer Zahl

Doch zurück zu den Versuchen Rutherfords! Er kam durch die Ergebnisse seiner Experimente nicht nur zu der Schlußfolgerung,

daß die Atome aus einem verhältnismäßig kleinen, aber massereichen Kern und einer Hülle aus davon weit entfernten Elektronen bestehen, sondern er kam noch einem weiteren Geheimnis auf die Spur. Erinnern wir uns zunächst wieder daran, daß einige Alphateilchen ohne wesentliche „Kursabweichung“ glatt durch die dünnen Metallplättchen fliegen, andere hingegen um mehr oder wenige große Winkel aus der ursprünglichen Richtung abgelenkt werden. Rutherford fiel auf, daß Plättchen aus Elementen mit größerer relativer Atommasse die Alphateilchen stärker ablenken als Elemente mit geringerer relativer Atommasse.

Versuchen wir einmal, für diesen Effekt mit Hilfe einer „Modellvorstellung“ eine plausible Erklärung zu finden! Nehmen wir an, wir werfen Murmeln gegen eine andere Kugel, die vor uns liegt. Ist die Kugel groß, so werden viele Murmeln nach den Seiten hin abprallen. Je kleiner die Kugel ist, desto mehr der geworfenen Murmeln fliegen weiter geradeaus, weil wir die kleine Kugel gar nicht getroffen haben.

Daß die Ablenkung der Alphateilchen von der geometrischen Größe der Atomkerne abhängt, können wir aber nicht annehmen. Dafür sind sowohl die Alphateilchen als auch die Atomkerne zu klein. Außerdem ist ein wirkliches Zusammenstoßen von Alphateilchen und Atomkern in dem Sinne, daß sich die Oberflächen beider Teilchen berühren, noch aus anderen Gründen ausgeschlossen. Denn sowohl das Alphateilchen als auch der Atomkern sind positiv elektrisch geladen, gleichnamige Ladungen aber stoßen sich gegenseitig ab. Die Abstoßungskraft nimmt zu mit abnehmender Entfernung zwischen den Teilchen und wird, noch bevor sich die Teilchen gegenseitig berühren, derart stark, daß sie das Alphateilchen von dem Atomkern wieder abstößt.

Der unsichtbare Wall

Der Atomkern ist also von einem unsichtbaren Wall elektrischer Abstoßung umgeben. Für das Zurückstoßen des Alphateilchens ist daher nicht die geometrische Größe des Atomkerns ausschlaggebend, sondern der unsichtbare „Abstoßungswall“. Der aber wird um so weiter über den Kern hinaus reichen, je größer die positive elektrische Ladung des Atomkerns ist. Ein Kern mit hoher

positiver Ladung muß sich daher in bezug auf die Abstoßung des Alphateilchens ebenso verhalten wie ein großer Ball in bezug auf die Murmeln in unserer Modellvorstellung. Von einem Kern mit hoher Ladung werden also mehr Alphateilchen stark abgelenkt.

Die systematischen Versuche, die Rutherford und seine Assistenten mit Plättchen aus verschiedenen chemischen Elementen durchführten, bestätigten diese Vermutung. Je größer die positive Ladung der Atomkerne eines Elements ist, um so mehr Alphateilchen wurden stark aus ihrer Richtung abgelenkt. Stellte man eine Rangliste der Elemente hinsichtlich ihrer Ablenkungswirkung auf Alphateilchen auf, so ergab sich dieselbe Reihenfolge der Elemente, die auch entsteht, wenn man die Elemente nach ihren relativen Atommassen ordnet, also angefangen vom leichtesten Element Wasserstoff bis zum Uran, dem schwersten der damals bekannten Elemente. Numeriert man die Elemente in dieser Reihenfolge ihrer relativen Atommassen, so ergibt sich für jedes Element eine *Ordnungszahl*.

Die positive elektrische Ladung des Atomkerns ist stets ein ganzzahliges Vielfaches einer bestimmten Ladungsmenge. Diese Ladungsmenge bezeichnet man als „Elementarladung“. Wasserstoff hat 1, Helium 2, Lithium 3 usw. positive Elementarladungen in den Kernen seiner Atome bis hin zum Urankern mit 92 positiven Elementarladungen. Die Zahl der positiven Elementarladungen eines Atomkerns bezeichnet man als *Kernladungszahl*. Sie stimmt stets überein mit der Ordnungszahl des Elements. Ordnungszahl = Kernladungszahl.

Die Kernladungszahl ist das wichtigste Merkmal eines chemischen Elements überhaupt. Von ihr hängt ab, zu welchem Element ein bestimmter Atomkern gehört. Daraus wird nun verständlich, warum sich ein chemisches Element durch Aussendung von Alphateilchen in ein anderes Element umwandeln muß. Denn das Alphateilchen enthält ja 2 positive Elementarladungen. Verliert ein Atomkern durch die Aussendung des Alphateilchens 2 positive Elementarladungen, so muß er sich in das Element mit der um 2 niedrigeren Kernladungs- bzw. Ordnungszahl verwandeln! Dadurch wurde das Dunkel um die etwas undurchsichtigen „Verwandtschaftsverhältnisse“ der Elemente der radioaktiven Zerfallsreihen aufgeheilt.

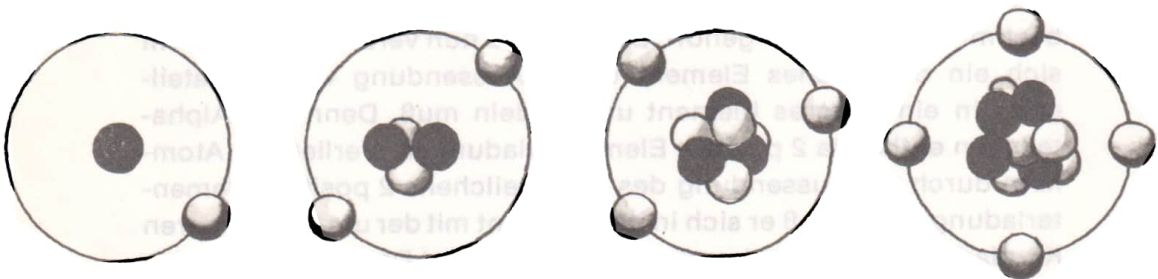
Radioaktive „Familienverhältnisse“

Die Zusammensetzung des Atoms aus Kern und Hülle entdeckte Rutherford im Jahre 1912. Aber es dauerte noch 20 Jahre, bis 1932 endlich Klarheit über die Zusammensetzung der Atomkerne gewonnen wurde. Überspringen wir jedoch die vielfältig verschlungenen Wege zwischen Irrtum und Erkenntnis, die gegangen werden mußten, bis die Wissenschaftler den Bau der Atomkerne völlig enträtselt hatten! Der Aufbau der Atomkerne aus noch kleineren Teilchen bildet den Schlüssel zum Verständnis der kernphysikalischen Vorgänge, auch für die Umwandlung der radioaktiven Elemente.

Der enträtselte Kern

Mit Ausnahme des einfachen Wasserstoffkerns bestehen die Kerne aller anderen Elemente aus noch kleineren Bausteinen, die man zusammenfassend Kernteilchen oder Nukleonen nennt (von lateinisch *nucleus* = Kern). Es gibt zwei Arten von Nukleonen, nämlich *Protonen* und *Neutronen*.

Die Protonen sind die Träger der positiven Ladung des Kerns. Jedes Proton enthält 1 positive Elementarladung. Die Neutronen sind, worauf ihr Name schon hindeutet, elektrisch neutral, also nicht elektrisch geladen. Protonen und Neutronen unterscheiden sich also dadurch, daß sie geladen bzw. nicht geladen sind.



Die dunklen Kugeln der Kerne symbolisieren Protonen, die hellen Neutronen. Jedes Atom hat in seiner Hülle soviel Elektronen wie Protonen im Kern

Doch haben Protonen und Neutronen eine fast genau gleich große Masse. Zur Masse des Atomkerns tragen also die Protonen und Neutronen bei, zur Ladung des Kerns nur die Protonen.

Der einzige nicht aus zwei oder mehr Teilchen zusammengesetzte Atomkern ist der des einfachen Wasserstoffs. Sein Atomkern besteht nur aus einem Proton. In allen anderen Atomkernen sind stets Protonen *und* Neutronen enthalten.

Massenzahl und Kernladungszahl

Die Zusammensetzung jedes Atomkerns ist folglich durch zwei Zahlen gekennzeichnet. Die erste ist die *Massenzahl*. Sie gibt die Summe der im Atomkern enthaltenen Protonen *und* Neutronen an, da beide Kernteilchenarten zur Masse des Kerns beitragen. Die zweite ist die schon erwähnte *Kernladungszahl*. Sie gibt stets die Zahl der im Kern enthaltenen Protonen und damit die Zahl der positiven Elementarladungen des Kerns an. Sie ist außerdem gleich der Ordnungszahl des betreffenden Elements.

In der Formelsprache der Chemie verzichtet man auf die Angabe der Massen- und Kernladungszahl und kennzeichnet ein chemisches Element nur durch Angabe des Buchstabensymbols. In einer chemischen Formel kommen zwar meist auch Zahlen vor, doch bedeuten sie nicht die Massen- oder Kernladungszahl, sondern geben an, wie das Verhältnis der Atome jeden Elements in dem Molekül einer chemischen Verbindung ist. Wasser hat z. B. die Formel H_2O . H ist das Symbol für Wasserstoff (lateinisch Hydrogenium, daher Symbol H). O ist das Symbol für Sauerstoff (lateinisch Oxygenium, daher Symbol O). Die „2“ rechts unten neben dem „H“ besagt, daß 2 Atome Wasserstoff neben einem Atom Sauerstoff in dem Wassermolekül enthalten sind. Die Formel für Schwefelsäure H_2SO_4 besagt, daß das Molekül aus 2 Atomen Wasserstoff, 1 Atom Schwefel und 4 Atomen Sauerstoff besteht.

Doch dies nur nebenbei, um Verwechslungen der chemischen und der kernphysikalischen Formelsprache auszuschließen. In der Kernphysik interessieren nicht die Formeln chemischer Verbindungen, sondern die Umwandlungen der Atomkerne. Dafür müssen die Massen- und Kernladungszahlen angegeben werden. Diese Zahlen werden nicht rechts, sondern links neben das Buch-

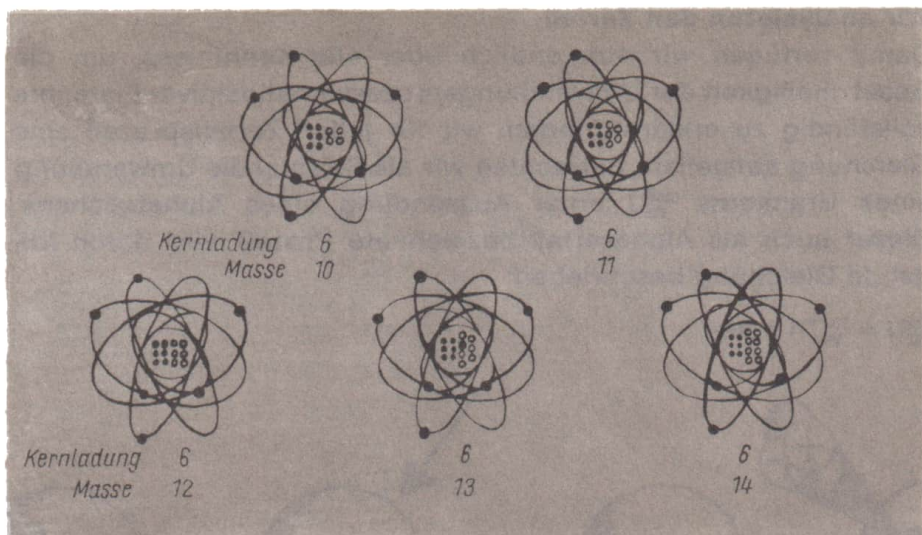
stabensymbol der Elemente geschrieben, und zwar steht links oben die Massenzahl, links unten die Kernladungszahl. Die Formel für den Atomkern des einfachen Wasserstoffs lautet dementsprechend ${}^1_1\text{H}$. Denn da der Kern nur aus einem Proton besteht, hat er die Massenzahl 1 und die Kernladungszahl 1. Der Atomkern des nächstschwereren Elements Helium hat die Formel ${}^4_2\text{He}$, da er insgesamt 4 Teilchen, darunter 2 Protonen enthält. Die Zahl der Neutronen eines Kerns ist stets gleich der Differenz zwischen der Massen- und der Kernladungszahl. Der Heliumkern enthält folglich $4 - 2 = 2$ Neutronen.

Da das Alphateilchen mit einem Heliumkern identisch ist, führt es in der Formelsprache der kernphysikalischen Gleichungen ebenfalls das Symbol ${}^4_2\text{He}$. Das Betateilchen ist bei der Strahlung natürlicher, radioaktiver Substanzen meist ein Elektron, also ein negativ elektrisch geladenes Teilchen. Da es rund 2000mal leichter als ein Neutron oder Proton ist, kann man seine Masse in der Formelsprache vernachlässigen und gleich Null setzen. Folglich lautet das Symbol für das Elektron ${}^0_{-1}\text{e}$. Das „e“ ist die Abkürzung für Elektron, das Minuszeichen vor der 1 ist erforderlich, da es sich um eine negative Ladung handelt.

Nuklide und Isotope

Wir erwähnten schon, daß alle Atomkerne eines chemischen Elements stets die gleiche Anzahl Protonen enthalten (also auch stets dieselbe Kernladungs- und Ordnungszahl haben). Die Zahl der Neutronen kann dagegen auch in den Kernen eines Elements unterschiedlich sein. Beim Element Wasserstoff haben diese unterschiedlichen Kernarten sogar verschiedenartige Namen. So bezeichnet man Wasserstoff, dessen Atome 1 Proton enthalten und kein Neutron, einfach als Wasserstoff. Wasserstoff, dessen Atomkerne 1 Proton und 1 Neutron enthalten, heißt schwerer Wasserstoff oder Deuterium. Ein dritter Wasserstoff, überschwerer Wasserstoff oder Tritium, enthält 1 Proton und 2 Neutronen im Kern. Bei den übrigen Elementen hat man jedoch keine besonderen Namen für die verschiedenen Atomarten desselben Elements eingeführt.

Was wir hier als Atomkernart bezeichneten, heißt in der Fachsprache der Physik Nuklid. Mehrzahl: Nuklide. Darin steckt wieder



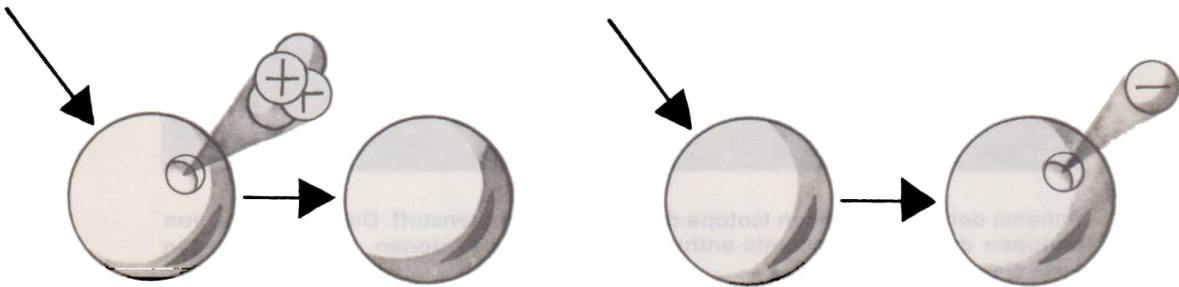
Schema der verschiedenen Isotope des Elements Kohlenstoff. Die Atomkerne von Isotopen desselben Elements enthalten gleich viele Protonen, aber verschieden viele Neutronen.

der Wortstamm des lateinischen nucleus = Kern. In der Chemie spricht man statt von Nukliden von Isotopen. Dieses Wort bedeutet, daß die verschiedenen Atomarten desselben Elements am selben Ort des Periodensystems der Elemente stehen, da sie sich bei chemischen Reaktionen – bis auf wenige unwesentliche Ausnahmen – völlig gleich verhalten. Da in der Kernphysik aber nicht das chemische Verhalten der Atome interessiert, sondern die Zusammensetzung der Atomkerne, wird hier die Bezeichnung Nuklide verwendet. In Zeitungsartikeln und in älterer Fachliteratur ist diese Unterscheidung aber häufig noch nicht getroffen und der Ausdruck Isotope wird auch dann verwendet, wenn es um Kernprozesse geht.

Es gibt viele Elemente, deren Atomkern eine verschiedene Anzahl von Neutronen enthält. Ein Beispiel dafür ist das Kalzium. Alle Kalziumkerne enthalten zwar 20 Protonen, aber die Neutronenzahl kann 20, 22, 23, 24, 26 oder 28 betragen. Es gibt aber auch Elemente, deren Atomkerne stets die gleiche Anzahl Neutronen enthalten, von denen es also keine natürlich vorkommenden Nuklide gibt. Dazu gehören z. B. Beryllium, Fluor, Natrium und Phosphor.

Wir analysieren den Zerfall

Damit verfügen wir nun endlich über alle Kenntnisse, um die Gesetzmäßigkeit der Umwandlungsprozesse radioaktiver Elemente vollständig zu erklären, indem wir für jeden Zerfallsprozeß eine Gleichung aufstellen. Betrachten wir als Beispiel die Umwandlung eines Urankerns $^{238}_{92}\text{U}$ unter Aussendung eines Alphateilchens. Dieser auch als Alphazerfall bezeichnete Prozeß wird durch folgende Gleichung beschrieben:

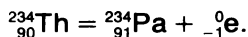


Zerfall von Uran 238 in Thorium 234 unter Aussendung eines Alphateilchens und Zerfalls von Thorium 234 in Protaktinium 234 unter Aussendung eines Betateilchens

Das erste Symbol kennzeichnet das Urannuklid 238. (Im Text, aber nicht in Gleichungen, kann man die Schreibweise vereinfachen und lediglich die Massenzahl in gleicher Höhe (!) rechts neben den Namen des Elements oder dessen chemisches Symbol schreiben.) Durch die Aussendung des Alphateilchens entsteht aus dem Kern von Uran 238 ein Kern des Elements Thorium, und zwar das Thoriumnuklid 234. Wie aus dem Symbol hervorgeht, besteht der Kern dieses Thoriumnuklids aus 234 Kernteilchen, von denen 90 Protonen sind. Die Neutronenzahl ist gleich der Differenz, also 144. Daß ^4_2He ein Alphateilchen bedeutet, erwähnten wir schon.

Wir können uns schnell davon überzeugen, daß die Gleichung auch rein rechnerisch aufgeht. Links vom Gleichheitszeichen steht oben 238, rechts davon $234 + 4 =$ ebenfalls 238. Links unten steht 92, rechts unten $90 + 2 =$ ebenfalls 92. Jede Gleichung eines radioaktiven Zerfallsprozesses muß aufgehen. Das zeigt sich auch bei

dem weiteren Zerfall des Thoriumkerns 234. Er ist ebenfalls radioaktiv und verwandelt sich durch Aussendung eines Betateilchens in das Element Protaktinium. Die Gleichung lautet:



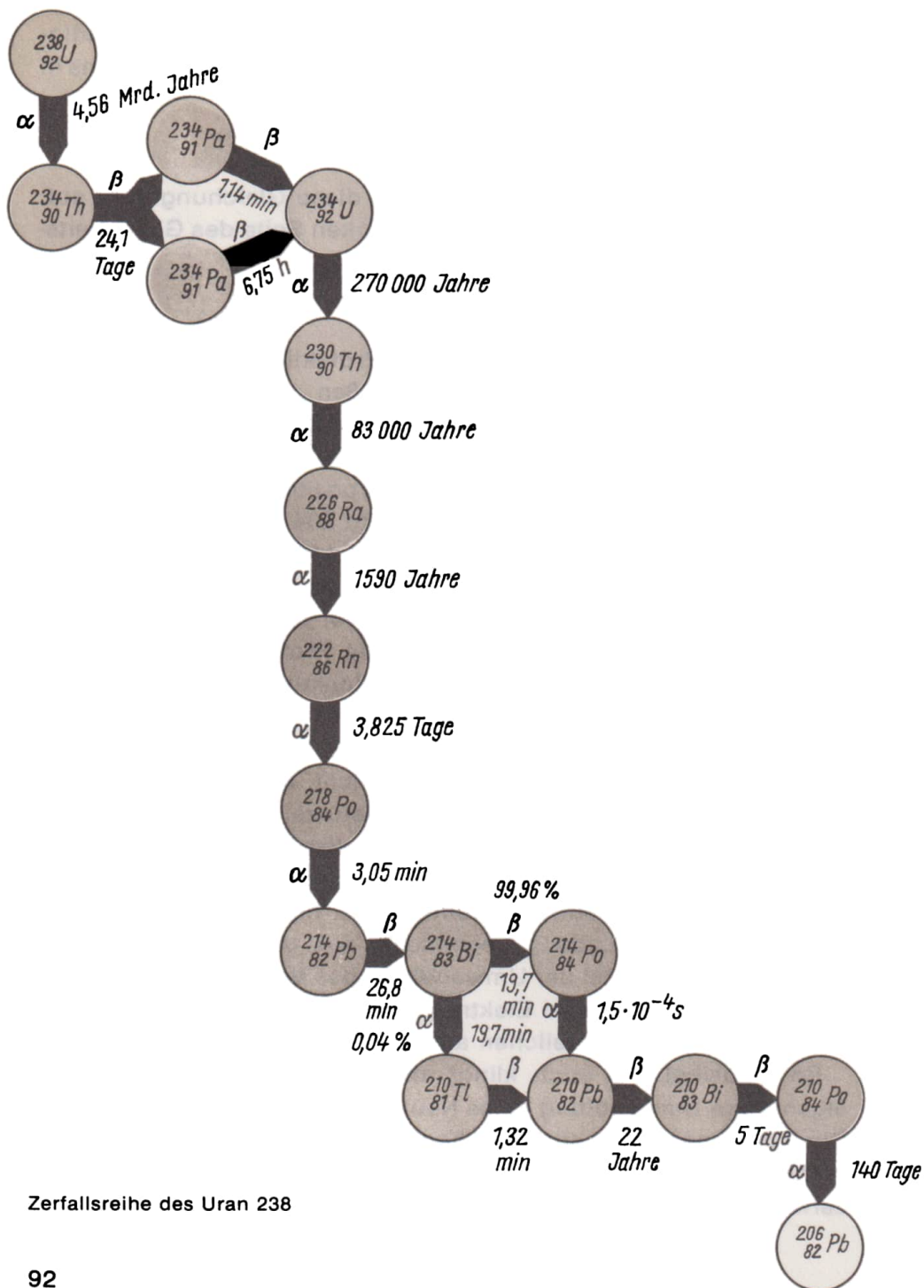
(Pa = Symbol für Protaktinium.) Auch diese Gleichung geht auf: 91 – 1 ergeben wieder 90, wie auf der linken Seite des Gleichheitszeichens.

Aus Weibchen werden Männchen

Wenn wir uns den Betazerfall des Protaktiniums etwas näher betrachten, kommt er uns einigermaßen „komisch“ vor. Die Massenzahl des aus dem Thoriumkern 234 entstandenen Protaktiniums ist ebenfalls 234. Aber die Kernladungszahl hat sich um 1 erhöht. Wo kommt diese zusätzliche positive Elementarladung plötzlich her? Ferner: Beim Thoriumkern 234 betrug die Differenz zwischen Massen- und Kernladungszahl 144, folglich enthielt der Kern 144 Neutronen. Bei dem entstandenen Protaktiniumkern beträgt die Differenz aber nur noch 143, folglich ist 1 Neutron „verschwunden“. Demgegenüber ist ein Proton neu entstanden.

Wir können also sagen: Bei dieser radioaktiven Umwandlung hat sich ein Neutron in ein Proton verwandelt, wobei gleichzeitig ein Betateilchen, also ein negativ geladenes Elektron, ausgestrahlt wurde. Erklären können wir das hier nicht. Aber wir können uns eine „Eselsbrücke“, eine Gedächtnisstütze, bauen, indem wir annehmen, das Neutron sei gewissermaßen aus einem positiven Proton und einem negativen Elektron zusammengesetzt. Solange beide Teilchen im Neutron vereinigt sind, heben sich die positive und die negative Ladung gegenseitig auf, und das Teilchen ist elektrisch neutral. Bei der Umwandlung des Neutrons in ein Proton trennen sich Proton und Elektron. Das Proton bleibt im Kern, das Elektron wird als Betateilchen ausgeschleudert.

So plausibel das auch klingt, die wirkliche Erklärung für die eigenartige Umwandlung eines Neutrons in ein Proton ist es nicht. Die Zusammenhänge sind weit komplizierter. Aber die Eselsbrücke verhilft uns dazu, daß wir nie vergessen können, daß beim Betazerfall stets eine Umwandlung eines Neutrons in ein Proton erfolgt,



Zerfallsreihe des Uran 238

ein negatives Elektron ausgesandt wird, die Massenzahl des Kernes gleichbleibt und die Kernladungszahl um 1 zunimmt.

Das entstandene Protaktinium ist ebenfalls radioaktiv und wandelt sich wieder in Uran um, aber nicht in dasselbe Urannuklid, das den Ausgangspunkt der Zerfallsreihe bildet, sondern in das seltenere Uran 234. Dieses zerfällt radioaktiv in Ionium 230, dieses in Radium 226, dieses in Radon 222 usw. Man kann die ganze Zerfallsreihe, die mit dem Uran 238 beginnt und beim Bleinuklid 206 endet, in einem einzigen Schema sehr übersichtlich darstellen.

Ein aufschlußreiches Schema

Mit dem Schema der Zerfallsreihe des Uran 238 auf Seite 92 können wir uns lange beschäftigen und sehr viel daraus entnehmen. Das Schema bildet ein typisches Beispiel dafür, daß man sehr viele miteinander zusammenhängende Naturerscheinungen in einer einzigen graphischen Darstellung übersichtlich und anschaulich machen kann. Jahrelange Arbeiten in vielen Forschungsinstituten der Welt haben die Daten für dieses Zerfallsschema ergeben.

Die erste und wichtigste Erkenntnis, die uns das Schema zeigt, besteht darin, daß aus dem Uran 238 nacheinander sehr viele verschiedene Elemente entstehen, die alle ebenfalls radioaktiv sind, bis schließlich ein Atomkern entsteht, der nicht mehr radioaktiv, sondern stabil ist, nämlich das Blei 206. Das Kästchen für dieses Bleinuklid ist deshalb schwarz gezeichnet, während alle anderen Elemente bzw. Nuklide als bunte Kästchen dargestellt sind. Das soll darauf hinweisen, daß sie radioaktiv sind.

Manche der Kästchen sind rot, andere grün. Das deutet auf einen weiteren Unterschied. Die grün gezeichneten wandeln sich unter Aussendung eines Alphateilchens um. Man bezeichnet sie deshalb als *Alphastrahler*. Die rot gezeichneten wandeln sich unter Aussendung eines Betateilchens um, sie sind *Betastrahler*. Die Umwandlung durch Aussendung eines Alphateilchens nennt man *Alpha-zerfall*, die Umwandlung durch Aussendung eines Betateilchens *Betazerfall*. Der Pfeil, der von jedem Kästchen (oder Kreis) zum nächsten verläuft, symbolisiert den Umwandlungsprozeß. Deshalb ist neben den Pfeil noch der griechische Buchstabe α oder β

gestellt, je nachdem, ob es sich um einen Alpha- oder Betazerfall handelt. Häufig ist der Betazerfall noch von der Aussendung eines Gammastrahls begleitet. Doch ist dies nicht extra angegeben, um das Schema nicht komplizierter als für unsere Zwecke nötig zu machen.

Auf die Bedeutung der Zeitangabe neben dem Pfeil kommen wir später zurück. Bei aufmerksamer Betrachtung des Schemas fällt uns vielleicht noch auf, daß bei Alphazerfällen das nächstfolgende Kästchen stets *unter* das vorangegangene gestellt, bei Betazerfällen rechts *daneben* gestellt ist. Auch dies erhöht die Übersichtlichkeit des Schemas.

Die meisten der in dem Schema vorkommenden chemischen Elemente sind uns gewöhnlich dem Namen nach nicht bekannt. Das ist kein Zufall. Denn die Elemente mit den unbekannten Namen kommen nur in winzigen Mengen vor und haben daher keinerlei Bedeutung als Werkstoffe für die Anfertigung irgendwelcher Gegenstände. In der Zerfallsreihe begegnet uns auch das Element Radium. Aber wie wir sehen, ist es nur eines unter vielen Elementen der Zerfallsreihe. Fassen wir nur den Ausgangsstoff der Reihe, das Uran 238, und das stabile Endprodukt, das Bleinuklid 206, ins Auge, so können wir sagen, daß Radium gewissermaßen eine der vielen Durchgangsstufen darstellt, die das Uran auf seinem Wege der stufenweisen Umwandlung in Blei durchläuft.

Daß sich Thorium 234 in zwei verschiedene Protaktiniumarten umwandelt, zwischen denen wir weder einen Unterschied der Massen- noch der Kernladungszahl finden, soll uns hier nicht irritieren. Man bezeichnet solche Stoffe als Isomere, doch sind sie für unsere weiteren Gedankengänge belanglos. Interessanter ist es schon, einen Blick auf den unteren Teil des Schemas zu werfen, in dem die Pfeile zweimal ein Viereck bilden. Hier lehrt das Schema, daß dasselbe Nuklid, nämlich Wismut 214 (chemisches Symbol Bi, da lateinische Bezeichnung Bismutum), auf verschiedene Weise zerfallen kann, entweder durch Alphazerfall in Thallium 210 oder durch Betazerfall in Polonium 214.

Warum gibt es noch Uran?

Wer über das Schema selbständig weiter nachdenkt, dem muß es aber auch ein neues Rätsel aufgeben. Zeigt das Schema doch, daß sich alles Uran 238 schließlich einmal in das stabile Bleinuklid 206 (chemisches Symbol Pb, da lateinische Bezeichnung Plumbum) verwandelt. Warum gibt es dann überhaupt noch Uran? Müßte in den rund 5 Milliarden Jahren, die unsere Erde schon mindestens existiert, nicht alles Uran längst in Blei zerfallen sein?

Die verschiedenen radioaktiven Stoffe zerfallen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit, manche sehr schnell, manche sehr langsam, das Uran 238 z. B. erst im Verlaufe vieler Jahrmilliarden. Was heißt das? Die Geschwindigkeit des Zerfalls hat nichts zu tun mit der Geschwindigkeit, mit der das Alpha- oder Betateilchen von dem Atomkern ausgeschleudert wird. Um von der Geschwindigkeit des radioaktiven Zerfalls einer Substanz eine klare Vorstellung zu bekommen, müssen wir uns noch von einer ganz anderen Seite her mit der rätselhaften Strahlung beschäftigen.

Wir sahen: Uran, Radium oder andere radioaktive Stoffe senden eine Strahlung aus. Aber was bedeutet das ganz konkret? Wir wissen schon, daß die Strahlung nicht aus der Atomhülle, sondern aus dem Atomkern stammt. Jeder Atomkern eines bestimmten Elements oder Nuklids sendet bei seinem radioaktiven Zerfall nur ein Alpha- oder Betateilchen aus, also nicht etwa einen kontinuierlichen Teilchenstrom. Daß die Alpha- oder Betastrahlung einer radioaktiven Substanz trotzdem kontinuierlich ist, beruht nur darauf, daß schon eine winzige Stoffmenge, z. B. ein Millionstel- oder Milliardstelgramm, unvorstellbar viele einzelne Atome enthält. Das ist die Konsequenz der Winzigkeit der Atome: Da das einzelne Atom so unvorstellbar klein ist, enthält selbst die kleinste Stoffmenge eine ungeheuer große Anzahl Atome.

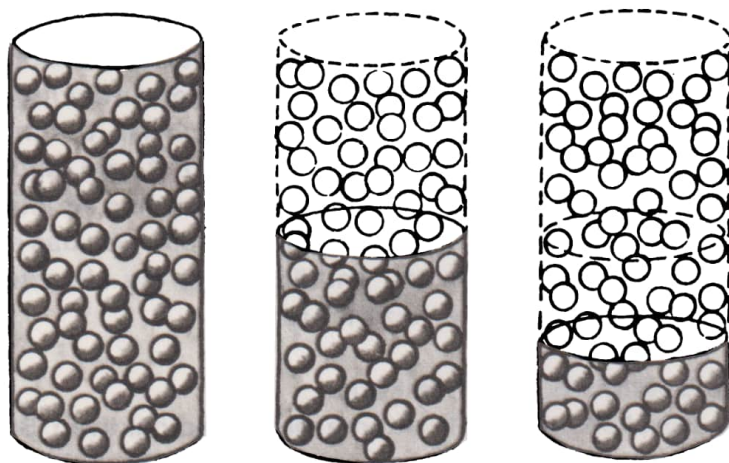
Sterbestatistik der Atomkerne

Es zerfallen nicht alle Atome eines radioaktiven Stoffes gleichzeitig; sie zerfallen nacheinander zu zufälligen Zeitpunkten. Den Moment, in dem ein bestimmter Atomkern zerfällt und dabei ein Teilchen aussendet, kann selbst der klügste Gelehrte nicht vorausberechnen, ebensowenig wie man voraussagen kann, wann ein

bestimmter Mensch sterben wird. Man kann nur sagen, daß jeder Mensch irgendwann einmal stirbt, und man kann heute auch statistisch berechnen, welches Alter die Menschen eines Landes *im Durchschnitt* erreichen.

Aber diese „durchschnittliche Lebenserwartung“ ist nur eine statistische Angabe. Wenn die Statistiker z. B. eine durchschnittliche Lebenserwartung von 70 Jahren errechnen, so kann kein einziger Mensch daraus mit Sicherheit schlußfolgern, daß er 70 Jahre alt wird. Der *einzelne* Mensch kann früher als mit 70 Jahren sterben, er kann ebenso gut auch älter als 70 Jahre werden. Nur wenn man das durchschnittlich erreichte Lebensalter berechnet, also alle erreichten Lebensjahre addiert und die Summe durch die Anzahl der Gestorbenen dividiert, ergibt sich die Zahl 70.

So ähnlich – nicht genau so – verhält es sich mit den Atomkernen einer radioaktiven Substanz. Doch spricht man hier nicht von einer „durchschnittlichen Lebenserwartung“, sondern von der „Halbwertszeit“, Abkürzung HWZ. Die HWZ gibt an, innerhalb welcher Zeit von einer bestimmten, anfangs vorhandenen Anzahl Atome des betreffenden Stoffes genau die halbe Anzahl zerfallen ist. Ist die Zeit-



Schema der Halbwertszeit. Links: Anfangszustand. Mitte: nach 1 HWZ ist die Hälfte der anfänglichen Menge des radioaktiven Nuklids zerfallen. Rechts: nach 2 HWZ sind drei Viertel der Anfangsmenge zerfallen

spanne kurz, so hat der betreffende Stoff eine schnelle Zerfallsgeschwindigkeit, ist sie lang, so hat er eine langsame Zerfallsgeschwindigkeit.

HWZ 3 Sekunden

Nehmen wir einmal an, wir hätten am 1. Januar 1973 von einem bestimmten Stoff genau 1 Million Atome, und dieser Stoff habe die HWZ von 1 Jahr. Dann wären am 31. Dezember 1973 um 24 Uhr, also nach Ablauf von genau 1 HWZ, 500 000 Atome radioaktiv zerfallen und noch 500 000 unzerfallen vorhanden. Am 31. Dezember 1974, also nach einer weiteren HWZ, sind von den 500 000 Atomen 250 000 zerfallen und noch 250 000 unzerfallen übrig. Nach einem weiteren Jahr, also am 31. Dezember 1975, ist von den übriggebliebenen 250 000 erneut die Hälfte zerfallen, so daß nur noch 125 000 übrig sind usw. Nach 1 HWZ ist stets die halbe Anzahl der Atome zerfallen, nach 2 HWZ drei Viertel, nach 3 HWZ sieben Achtel usw.

Die verschiedenen radioaktiven Stoffe haben ganz unterschiedliche HWZ. So hat das Uran 238 z. B. eine HWZ von rund 4,56 Milliarden Jahren, das Radium von 1590 Jahren, das Polonium von nur 3 Minuten, und es gibt auch Stoffe, deren HWZ nur winzige Sekundenbruchteile beträgt. Hat ein Stoff eine lange HWZ, dann ist auch nach vielen Jahren immer noch viel davon vorhanden. Ein solcher Stoff ist „langlebig“. Hat ein Stoff eine kurze HWZ, dann ist nach kurzer Zeit fast nichts mehr davon vorhanden, er ist „kurzlebig“.

Uran ist mit seiner HWZ von 4,56 Milliarden Jahren ein sehr langlebiges Element. Nimmt man an, daß die feste Erdoberfläche ebenfalls ungefähr 4,5 Milliarden Jahre alt ist, dann muß von der ursprünglich auf unserem Planeten vorhandenen Menge Uran heute immerhin noch die Hälfte übrig sein, und es wird noch weitere viereinhalb Milliarden Jahre dauern, bis der Uranvorrat auf ein Viertel des ursprünglichen Wertes verringert ist.

Aber müßten dann nicht wenigstens die kurzlebigen radioaktiven Stoffe der Zerfallsreihe längst restlos verschwunden sein? Ja und nein! Von dem Radium, das beispielsweise vor einer Milliarde Jahren im Gefolge des Uranzerfalls entstanden ist, existiert heute

tatsächlich so gut wie nichts mehr. Aber es wird durch den ständig weiter andauernden Zerfall des Urans ja auch dauernd etwas Radium, Radon, Polonium usw. neu gebildet. Deshalb können, solange es noch Uran auf der Erde gibt, auch die sehr kurzlebigen radioaktiven Stoffe nicht vollständig verschwinden.

Warum ist Radium selten?

Aber etwas anderes können wir aus den unterschiedlichen HWZ der Elemente zwingend schlußfolgern: Die Mengen, in denen die Nuklide auf der Erde vorhanden sind, müssen der Größe ihrer HWZ proportional sein. Das heißt: Von einem Stoff A, der beispielsweise eine tausendmal längere HWZ hat als ein Stoff B, muß tausendmal mehr vorhanden sein als vom Stoff B. Damit haben wir endlich auch die Erklärung dafür, warum Radium, Radon, Polonium usw. so ungeheuer seltene Elemente sind. Da die HWZ des Radiums von 1590 Jahren rund 3000000mal kürzer als die des Urans 238 ist, gibt es in der Erdrinde auch etwa drei Millionen mal weniger Radium als Uran. Auf 3000 Kilogramm Uran kommt also nur ungefähr 1 Gramm Radium. Deshalb hatten die Curies so große Mühe, das Radium aus der Pechblende abzutrennen. Vom Radon und Polonium sind die Mengen noch geringer. Diese Elemente konnten daher durch chemische Analysen ursprünglich überhaupt nicht entdeckt werden. Sie wurden erst durch ihre Strahlung bemerkt, als man im Zeitalter der Erforschung der Radioaktivität begann, die verschiedenen Strahlungskomponenten genau zu untersuchen.

Wir sehen nun auch, warum der mit Leuchtstoff beschichtete Glaskolben in dem früher beschriebenen Versuch zum Nachweis des radioaktiven Gases Radon nach kurzer Zeit aufhörte zu leuchten. Radon hat eine HWZ von nur 3,825 Tagen, also knapp 4 Tagen. Schon nach 4 Wochen = 28 Tagen = 7 HWZ war von dem Gas nur noch der 128. Teil der Anfangsmenge vorhanden. Die anderen Radonatome hatten sich zwar auch in radioaktive Substanzen umgewandelt, aber sie sind keine Gase, sie füllten deshalb nicht den Glaskolben gleichmäßig aus, sondern schlugen sich irgendwo an der Wandung des Kolbens in einer kaum nachweisbaren winzigen Menge fester Stoffe nieder.

Das unmögliche Element

Noch ein anderer scheinbarer Widerspruch wird aus dem Zerfallsschema des Uran 238 erklärbar. Wir hatten früher gesagt, daß von Radiumsalz Alpha-, Beta- und Gammastrahlen ausgehen. Das Schema besagt aber, daß Radium nur ein Alphastrahler ist, also lediglich Alphateilchen aussendet. Woher kommt dann die Beta- und Gammastrahlung? Da unaufhörlich einige Radiumkerne zerfallen, entstehen laufend auch die radioaktiven Folgeprodukte, wie z. B. Radon, Polonium, Astatin usw. Man kann daher Radium überhaupt nicht in völlig reinem Zustand erhalten, weil in dem Radiumsalz laufend radioaktive Folgestoffe, „Zerfallsprodukte“, gebildet werden. Unter den Zerfallsprodukten befinden sich aber auch Betastrahler, manche senden zugleich Gammastrahlen aus. Die Beta- und Gammastrahlen eines Radiumpräparats stammen also nicht vom Radium, sondern von den zwangsläufig darin mit enthaltenen Zerfallsprodukten. Selbst wenn es eine Möglichkeit gäbe, in jeder Sekunde das Radium wieder neu von allen seinen Zerfallsprodukten zu reinigen, erhielte man kein völlig reines Radium. Denn innerhalb einer Sekunde zerfallen bereits Tausende von Radiumkernen.

Das wollen wir überschlagsweise einmal berechnen. Dabei lerner wir eine interessante Zahl kennen, die es ermöglicht, auszurechnen, wieviel Atome eine beliebige Menge eines chemischen Elements oder einer chemischen Verbindung enthält. Die Zahl ist nach dem österreichischen Physiker Josef Loschmidt, der von 1821 bis 1895 lebte, benannt, weil er zum ersten Mal erkannte, daß in einer bestimmten Menge eines Elements stets eine gleich große Zahl von Atomen enthalten ist. Diese Menge nennt man „Grammatom“. Ein Grammatom eines Elements sind so viel Gramm, wie die Zahl der relativen Atommasse des betreffenden Elements angibt. Da Radium die relative Atommasse 226 hat, sind 226 g Radium = 1 Grammatom Radium. 1 Grammatom Wasserstoff sind 1 Gramm Wasserstoff, weil Wasserstoff die relative Atommasse 1 hat. Von Sauerstoff kommen 16 g auf 1 Grammatom, da Sauerstoff die relative Atommasse 16 hat usw.

Im Reich der Riesen Zahlen

Jedes Grammatom eines Elements enthält nun stets eine gleich große Anzahl Atome, nämlich die Loschmidtsche Zahl. Sie ist sehr groß und beträgt nach neuesten Bestimmungen

602 500 000 000 000 000 000 000.

Wir können sie für unsere Übersichtsrechnung der Einfachheit halber auf

600 000 000 000 000 000 000 000.

abrunden.

Derart große Zahlen begegnen uns außer in der Atomkernphysik sonst kaum in anderen Wissenschaften, selbst in der Astronomie nicht, die ebenfalls für ihre großen Zahlen bekannt ist. Wir wollen die Zahl erst einmal zerlegen, um sie uns wenigstens einigermaßen verständlich zu machen. Um die Loschmidtsche Zahl zu erhalten, müssen wir 1 Milliarde nochmals mit 1 Milliarde multiplizieren und das so erhaltene Produkt noch mit 602 252 multiplizieren. Da es schon schwierig ist, derart große Zahlen aufzuschreiben, bedient man sich dafür einer anderen Schreibweise. Sie lautet: $6 \cdot 10^{23}$ (sprich: 6 mal 10 hoch 23). 10^{23} bedeutet: eine 1 und dahinter 23 Nullen.

226 Gramm Radium (= 1 Grammatom Radium) enthalten also rund $6 \cdot 10^{23}$ Radiumatome. Dann enthält 1 g Radium

$600\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000 : 226$
= 2 654 000 000 000 000 000 000 Atome.

1 Millionstelgramm Radium enthält folglich

$2\,654\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000 : 1\,000\,000$
= 2 654 000 000 000 000 Atome.

Das sind in Worten ausgedrückt immer noch 2 Billiarden und 654 Billionen Atome oder anders ausgedrückt: 2 Millionen 654 Tausend mal 1 Milliarde Atome!

Von diesen 2 654 000 000 000 000 Atomen zerfallen im Verlaufe 1 HWZ, also in 1590 Jahren genau die Hälfte, also

1 327 000 000 000 000 Atome.

26 500 Strahlen je Sekunde

Vereinfachen wir uns die Rechnung nun abermals und nehmen an, es würden während der 1590 Jahre in jeder einzigen Sekunde gleich viel Atome zerfallen. Dann müssen wir zunächst die 1590 Jahre in Sekunden umrechnen und dann die Zahl der Atome durch die Zahl der Sekunden dividieren. Da 1 Jahr 365 Tage, 1 Tag 24 Stunden, 1 Stunde 60 Minuten und 1 Minute 60 Sekunden hat, umfassen 1590 Jahre $1590 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 = 50\,142\,240\,000$ Sekunden. Das sind rund 50 Milliarden Sekunden. Daher lautet die Endrechnung $1\,327\,000\,000\,000\,000 : 50\,000\,000\,000$, das gibt abgerundet 26 500.

26 500 Radiumatome zerfallen also in einer Menge von nur 1 Millionstelgramm Radium in jeder Sekunde, und da jedes zerfallende Radiumatom 1 Alphateilchen aussendet, erhalten wir in der Sekunde 26 500 Alphateilchen und ebenso viele Radonatome. Diese Atome haben jedoch eine viel kürzere HWZ als das Radium, nämlich nur knapp 4 Tage. Folglich entstehen schon innerhalb von 4 Tagen aus den 26 500 Radonatomen die Hälfte dieser Zahl, also 13 250 Poloniumatome. Das Polonium zerfällt sogar innerhalb von nur 3 Minuten, so daß praktisch sofort die auf das Polonium folgenden Zerfallsprodukte entstehen, unter denen sich auch Betastrahler befinden. Man kann in den Zerfallsprodukten des Urans die Alpha- und Betastrahler daher überhaupt nicht sauber trennen, da sie sich zu schnell ineinander umwandeln.

Wieviel Atome enthält 1 Gramm Wasser?

Schließen wir an dieser Stelle noch eine weitere interessante Berechnung an. Bisher können wir mit Hilfe der Loschmidtschen Zahl die Anzahl der Atome errechnen, die sich in einer bestimmten Menge eines chemischen Elements befinden. Reine Elemente kommen auf der Erde aber fast überhaupt nicht vor. In der Regel sind stets zwei oder mehrere Atome verschiedener Elemente (oder auch desselben Elements) zu einem Molekül verbunden. Ist das Atom die kleinste Menge eines chemischen Elements, so ist das Molekül die kleinste Menge einer chemischen Verbindung. Die meisten bekannten, in der Natur vorkommenden Stoffe sind chemische Verbindungen, so z. B. auch das Wasser. Es hat die Formel H_2O ,

wie wir gesehen haben. So wie jedes chemische Element eine relative Atommasse hat, so hat jede chemische Verbindung ein relatives Molekulargewicht. (Man spricht hier von Gewichten, obwohl es sich um Massen handelt.) Das relative Molekulargewicht ist stets gleich der Summe der relativen Atommassen. Da Wasserstoff die relative Atommasse 1, Sauerstoff die relative Atommasse 16 hat, lautet die Rechnung: $2 \times 1 + 16 = 18$. Das Molekulargewicht des Wassers beträgt folglich 18.

Die Loschmidtsche Zahl kann man nun ebenso auf die Moleküle anwenden. Jedes Grammolekül eines Stoffes enthält $6 \cdot 10^{23}$ Moleküle (nicht Atome!), und 1 Grammolekül eines Stoffes sind wiederum so viel Gramm, wie das relative Molekulargewicht angibt. 18 Gramm Wasser sind also 1 Grammolekül Wasser. Folglich enthalten 18 g Wasser $6 \cdot 10^{23}$ Moleküle. Da aber jedes Wassermolekül aus 3 Atomen besteht, enthalten 18 g Wasser $3 \times 6 \cdot 10^{23} = 18 \cdot 10^{23} = 1,8 \cdot 10^{24}$ Atome. Als Zahl ausgeschrieben sind das

1 800 000 000 000 000 000 000 000 Atome.

Um die Anzahl der Atome in 1 Gramm Wasser zu errechnen, müssen wir die obige Zahl durch 18 dividieren. Das ergibt genau $1 \cdot 10^{23}$ oder

100 000 000 000 000 000 000 000 Atome.

Abzählen aussichtslos

Nehmen wir nun einmal an, zu Beginn der Entwicklung unserer Erde vor 5 Milliarden Jahren hätte ein Mechanismus begonnen, die Atome zu zählen, die in einem einzigen Gramm, also in 1 Kubikzentimeter Wasser enthalten sind. Der Mechanismus soll in jeder Sekunde 10 Teilchen abzählen. Ob das Zählwerk in den vergangenen 5 Milliarden Jahren die Atome eines Kubikzentimeters Wasser schon fertig durchgezählt hätte? Rechnen wir es einmal aus! Ein Jahr hat $365 \times 24 \times 60 \times 60 = 31\,536\,000$ Sekunden. 5 Milliarden Jahre haben folglich

$5\,000\,000\,000 \times 31\,536\,000 = 157\,680\,000\,000\,000\,000$ Sekunden.

Da das Zählwerk je Sekunde 10 Teilchen zählt, hätte es bis jetzt



erst 1 576 800 000 000 000 000 Atome ausgezählt. Das ist nur der etwa 60 000. Teil, also $\frac{1}{60000}$ Gramm Wasser. Diese Berechnung verschafft uns vielleicht eine kleine Vorstellung davon, wie winzig Atome sind und wie riesig daher ihre Anzahl ist.

Wer sich selbst prüfen will, ob er richtig verstanden hat, wie man die Zahl der Atome einer bestimmten Stoffmenge ermitteln kann, der rechne einmal aus, wieviel Atome 1 Tausendstelgramm Kochsalz enthält. Kochsalz ist chemisch Natriumchlorid, Formel NaCl. Jedes Kochsalzmolekül besteht also aus 1 Atom Natrium und 1 Atom Chlor. Natrium hat die relative Atommasse 23, Chlor 35,5. Ob Ihr richtig gerechnet habt, könnt Ihr auf Seite 245 nachlesen. Dort steht das abgerundete Ergebnis.

Stellen wir abschließend in diesem Kapitel, in dem so viele „Schleier“ hinsichtlich der rätselhaften Zusammenhänge des radioaktiven Zerfalls gelüftet wurden, noch eine ganz grundlegende theoretische Frage: Warum sind eigentlich manche Atomkerne radioaktiv und andere stabil?

Mit Protonen überfüttert

Es fällt auf, daß gerade die schwersten Elemente mit den höchsten Kernladungszahlen sämtlich radioaktiv sind. Von einigen schweren Elementen gibt es zwar sowohl stabile wie radioaktive Nuklide, aber von den schwersten Elementen der Tabelle gibt es nur radioaktive. Das führt uns schon auf eine erste Spur zur Beant-

wortung der Frage. Die schwersten Elemente haben nämlich besonders viele Protonen in ihren Atomkernen, und offensichtlich begünstigt das seine Zerfallsneigung. Denn jedes Proton enthält 1 positive Elementarladung, und da sich gleichnamige Ladungen gegenseitig abstoßen, wird mit jedem Proton etwas Abstoßungskraft in den Kern hineingebracht.

Man kann sich daher gut vorstellen, daß ein Atomkern nicht zu viele von den Abstoßungskräfte erzeugenden Protonen enthalten darf. Sind die Abstoßungskräfte zu groß, so führen sie zum Zerfall des Kerns. Bildlich ausgedrückt ist das so, als würde ein Kern, der sehr viele Protonen enthält, an „inneren Spannungen“ leiden. Diese führen früher oder später dazu, daß der Kern elektrisch geladene Teilchen von sich fortschleudert. Er sendet ein Alphateilchen aus und „erleichtert“ sich dadurch um 2 positive Elementarladungen.

Deshalb ist es nicht verwunderlich, daß viele der schwersten Elemente mit den höchsten Kernladungszahlen Alphastrahler sind. Ein Blick auf das Zerfallsschema des Uran 238 bestätigt das. Die Alphazerfälle, die senkrecht eingetragen sind, herrschen vor. Erst wenn der Kern schon ziemlich weit „unten“ angekommen ist, finden auch viele Betazerfälle in waagerechter Richtung statt.

Allerdings kann der Protonenüberschuß nicht die einzige Ursache der Radioaktivität sein, denn dann wären die Betazerfälle, bei denen sich die Kernladung sogar um 1 erhöht, unerklärbar. Offensichtlich spielt nicht nur die Kernladungszahl als solche eine Rolle, sondern das *Verhältnis* der Kernladungs- zur Massenzahl oder anders ausgedrückt: der Protonen- zur Neutronenzahl.

Nur wenn die Protonen- und Neutronenzahl eines Kerns in einem bestimmten Verhältnis stehen, „fühlt sich der Kern wohl“ und bleibt stabil. Bei „ungünstigem“ Protonen-Neutronen-Verhältnis leidet der Kern unter „inneren Spannungen“. Er ist dann „bestrebt“, durch eine oder mehrere radioaktive Umwandlungen auf ein günstiges Protonen-Neutronen-Zahlenverhältnis zu kommen.

Verdauungsbeschwerden

Halten wir also fest: Die Zusammensetzung der Atomkerne aus Protonen und Neutronen kann nicht beliebig sein. Zu viele Protonen und eine dementsprechend zu hohe Kernladungszahl ver-

trägt der Atomkern nicht. Aber auch eine zu hohe Neutronenzahl und ein ungünstiges Verhältnis zwischen Protonen- und Neutronenzahl ist dem Kern nicht zuträglich. Warum bestimmte Verhältnisse für den Kern verträglich sind und andere nicht, darüber gibt es bereits theoretische Vorstellungen, die wir aber hier nicht verfolgen wollen, weil sie zu kompliziert sind. Die „Fehler“ in seiner Zusammensetzung werden vom Kern korrigiert, indem er die Zusammensetzung stufenweise so lange verändert, bis eine günstige erreicht ist. So etwa könnte man in groben Zügen das Wesen der Radioaktivität umreißen.

Die inneren Spannungen, unter denen eine Kernart bei ungünstiger Zusammensetzung leidet, können verschieden stark sein. Sind die Spannungen sehr groß, dann ist auch die Neigung der Kerne, sich umzuwandeln, entsprechend groß. Sie werden daher verhältnismäßig schnell zerfallen und folglich eine kurze HWZ haben. Sind die inneren Spannungen einer Kernart nur schwach, so hat der betreffende Stoff eine lange HWZ.

An dieser Stelle wird man vielleicht einen Einwand erheben. Zwar ist die „innere Spannung“ sowieso nur als Vergleich gemeint. Aber wenn wir schon den Vergleich benutzen, so könnte man einwenden, daß sich jeder einzelne Atomkern des gleichen radioaktiven Nuklids eigentlich zum gleichen Zeitpunkt umwandeln müßte, da die inneren Spannungen gleich groß sind. Daß sich die einzelnen Kerne zu verschiedenen Zeitpunkten umwandeln und sich für die Gesamtheit aller Kerne des Nuklids nur eine *durchschnittliche* Zerfallsgeschwindigkeit bestimmen läßt, kann aber dennoch erklärt werden. Der Kern, der unter einer inneren Spannung leidet, muß nämlich erst auf eine „passende Gelegenheit“ warten, sich umzuwandeln.

Kranke Atomkerne

Die Nukleonen, Proton und Neutron, hängen nicht bewegungslos im Atomkern wie die Beeren in einer Weintraube. Der Atomkern ist vielmehr voller innerer Bewegung, da sich die Kernteilchen dauernd bewegen.

Nun übt aber jedes Kernteilchen auf die benachbarten Kernteilchen Kräfte aus, und zwar haben die Protonen sowohl Anzie-

hungs- als auch Abstoßungskräfte, die Neutronen nur Anziehungskräfte. Die Anziehungskräfte – man nennt sie Kernkräfte – sind lediglich auf äußerst kurze Entfernungen wirksam, die Abstoßungskräfte aber auch auf größere Entfernungen. Infolge des verschiedenen Wirkungsbereichs der Anziehungs- und Abstoßungskräfte kann es bei bestimmten Stellungen der Kernteilchen zueinander vorkommen, daß die Abstoßungskräfte überwiegen und dadurch ein Kernteilchen oder eine Kernteilchengruppe aus dem Kern herausfliegt. Bei einem Kern, der an starker „innerer Spannung“ leidet, wird dieser Zerfallsprozeß leichter eintreten als bei einem anderen Kern. Ziehen wir dazu wieder einen Vergleich: Ein Mensch, dessen Organismus z. B. durch hohes Alter geschwächt ist, stirbt eher an einer harmlosen Erkältung als ein junger, kerngesunder Mensch.

Da die Protonen starke elektrische Abstoßungskräfte besitzen, kann es keinen Atomkern geben, der nur aus mehreren Protonen besteht. Die Teilchen würden sich gegenseitig so stark abstoßen, daß der Kern sofort auseinanderfliegt. Sobald ein Kern mehrere Protonen enthält, befinden sich auch stets Neutronen in ihm. Sie haben nur Anziehungskräfte und geben dem Kern dadurch einen Zusammenhalt. Sie wirken wie eine Art „Kitt“, der die Teilchen des Kerns miteinander verbindet. Die Kittwirkung macht aber nur einen Teil des Kräftespiels der Kernteilchen aus. Würden die Neutronen nur wie Kitt wirken, so müßte der Zusammenhalt von Atomkernen um so stärker sein, je mehr Neutronen sie enthalten. Ein so einfacher Zusammenhang besteht jedoch nicht. In Wirklichkeit ist auch ein zu hoher Neutronen-Überschuß für den Kern „schädlich“. Solche Kerne sind ebenfalls nicht stabil und wandeln sich um.

In den Kernen der leichten Elemente gibt es in der Regel nur ebenso viele Neutronen wie Protonen. So besteht zum Beispiel der Sauerstoffkern aus 8 Protonen und 8 Neutronen. Mit zunehmender Kernladungszahl der Elemente übersteigt die Zahl der Neutronen jedoch in immer höherem Maße die Zahl der Protonen. So kommen auf die 27 Protonen des Kobaltkerns bereits 32 Neutronen, und das häufigste Nuklid des schwersten natürlichen Elements, des Urans 238, enthält in seinem Kern bei nur 92 Protonen 146 Neutronen.

Apparate für das Unsichtbare

Der Kernphysiker hat es bei seiner Arbeit stets mit Teilchen zu tun, die unsichtbar bleiben. Mit keinem der menschlichen Sinnesorgane sind die winzigen atomaren Teilchen direkt wahrzunehmen. Um trotzdem so erstaunlich genaue Kenntnisse über die Atome und ihre Bestandteile zu erlangen, mußten Apparate und Meßgeräte ersonnen werden, mit denen die Teilchen, ihre Bewegungsbahnen und die von ihnen ausgehenden Wirkungen mittelbar festzustellen und zu messen sind.

Feuerwerk der Alphateilchen

Für die Untersuchungen, die zur „Entdeckung“ des Atomkerns führten, wurde noch ein ganz einfaches Instrument benutzt. Es ist heute in Schulen zur Demonstration von Alphateilchen gebräuchlich und heißt Spinthariskop. Damit kann man einzelne Alphateilchen zählen. Zwar werden die Alphateilchen selbst nicht sichtbar. Aber der schwache Lichtblitz, den jedes Alphateilchen hervorruft, wenn es auf eine Leuchtstoffschicht trifft, ist zu sehen. Voraussetzung ist allerdings, daß nicht zu viele Alphateilchen innerhalb kurzer Zeit auf den Leuchtschirm prallen. Denn sonst entstehen so viele Lichtblitze, daß wir sie nicht einzeln zählen können.

Das Spinthariskop ist ein kleines Rohr, an dessen einem Ende sich eine Lupe befindet. Am anderen Ende ist ein Leuchtstoffschirm angeordnet. Jedesmal wenn ein Alphateilchen auf den Leuchtschirm trifft, entsteht ein schwacher grünlicher Lichtblitz, den man durch die Lupe sieht. Da das Licht nur sehr schwach ist, muß man seine Augen vorher erst einige Minuten an Dunkelheit gewöhnen.

Geheimnisse des Leuchtzifferblatts

Aus vielen solcher Lichtblitze setzt sich übrigens auch das Licht zusammen, das von dem Leuchtzifferblatt älterer Armbanduhren ausgeht. Bei ihnen wurden häufig noch Radium enthaltende



Leuchtfarben verwendet. Dabei sind der Leuchtstoff und der Alphastrahler nicht getrennt angeordnet wie im Spinthariskop. Vielmehr ist der Leuchtstoff selbst mit einer Substanz vermischt, die radioaktive Nuklide enthält. Es wird so viel radioaktive Substanz mit dem Leuchtstoff vermischt, daß in jeder Sekunde sehr viele Lichtblitze entstehen, die das Auge nicht mehr einzeln erkennen kann, sondern als zusammenhängendes Dauerlicht empfindet. Doch wenn man seine Augen gut an die Dunkelheit gewöhnt hat und das Zifferblatt sehr genau beobachtet, kann man unter Umständen bemerken, daß der Leuchtstoff kein ganz ruhiges, ständig gleichbleibendes Licht aussendet, sondern daß das Licht stellenweise einmal heller, ein andermal etwas dunkler wird.

Das beruht darauf, daß die einzelnen Alphazerfälle, die sich in dem radioaktiven Stoff ereignen, nicht in gleichen Zeitabständen aufeinander folgen, sondern daß die Zahl der Zerfälle je Zeiteinheit zufällig schwankt. Das bestätigt uns nun sogar augenscheinlich, was bereits früher erwähnt wurde: Für keinen einzigen Atomkern ist der Zeitpunkt des Zerfalls genau vorher zuberechnen. So wie an einem Tage mehr Menschen in einer großen Stadt sterben oder geboren werden als an einem anderen Tage, aber die Zahl der Geburten und Sterbefälle pro Jahr trotzdem ungefähr gleich-

bleibt, so wechselt von Sekunde zu Sekunde die Zahl der Zerfälle.

Man nennt solche Vorgänge „statistisch“. Das bedeutet: Man kann nur statistisch die durchschnittliche Zahl der Ereignisse angeben, die innerhalb einer bestimmten, längeren Zeit stattfinden. Aber innerhalb kurzer Zeiträume kann die Anzahl der Ereignisse schwanken, und es ist für keines der einzelnen Ereignisse genau zu berechnen, wann es stattfinden wird. Alle Zerfallsprozesse radioaktiver Substanzen und auch die meisten anderen Prozesse, die sich an und in Atomen und Atomkernen abspielen, sind statistische Vorgänge!

Gespeichertes Licht

In neuerer Zeit werden für die Leuchtzifferblätter von Uhren jedoch keine radioaktiven Stoffe mehr verwendet. Denn auch die schwache Strahlung, die von den winzigen Mengen der radioaktiven Nuklide ausgeht, ist nicht ganz unbedenklich. Es gibt noch andere Stoffe, die im Dunkeln leuchten. Man nennt sie phosphoreszierende Substanzen oder kurz Phosphore, obwohl sie – wie man erst später merkte – mit dem chemischen Element Phosphor nichts zu tun haben. Sie haben die Eigenschaft, die Lichtenergie, die sie bei Tage aufnehmen, gewissermaßen zu speichern und erst nach längerer Zeit wieder abzugeben, indem sie einen schwachen Lichtblitz aussenden. Diese Lichtausstrahlung erfolgt nach Stunden oder Tagen. Wann jedes einzelne Atom das Lichtquant aussendet, ist ebenfalls nicht vorher zu berechnen. Auch das ist ein statistischer Vorgang. Doch wegen der großen Zahl der Atome, die schon in ganz geringen Stoffmengen enthalten sind, strahlen in jeder Sekunde genügend viele Atome ein Lichtquant (Photon) aus. Die vielen Lichtquanten zusammen erscheinen uns als mehr oder weniger gleichmäßiges Licht.

Phosphoreszierende Substanzen können jedoch nur Licht ausstrahlen, wenn sie vor nicht zu langer Zeit Lichtenergie aufgenommen haben, also hellem Licht ausgesetzt waren. Lassen wir aber eine Uhr, die ein phosphoreszierendes Zifferblatt hat, einen Monat unter Lichtabschluß in einem Kästchen liegen und betrachten sie dann bei Nacht, so werden wir kaum Lichtspuren erkennen. Denn

im Verlaufe der langen Zeit haben die Atome des Leuchtstoffs die vorher aufgenommene Lichtenergie längst wieder ausgestrahlt. Ihr ganzer Vorrat an Lichtenergie ist dadurch erschöpft. Leuchtfarben, die radioaktive Stoffe enthalten, senden dagegen auch dann noch Licht aus, wenn sie monate- oder jahrelang völlig unter Lichtabschluß gehalten werden. Denn ihre Lichtausstrahlung wird durch radioaktiven Zerfall verursacht, und dies ereignet sich unabhängig davon, ob der Leuchtstoff Lichtenergie aufnehmen konnte oder nicht. Damit haben wir zugleich eine einfache Möglichkeit, zu entscheiden, ob das Zifferblatt und die Zeiger einer Uhr mit Radium enthaltenden Leuchtfarben versehen sind oder ob sie nur phosphoreszierende Substanzen enthalten.

Fotoplatte als Strahlendetektiv

Ob ein Zifferblatt Leuchtstoffe mit radioaktiven Nukliden enthält, läßt sich noch auf andere Weise feststellen. Wir legen die Uhr mit der Zifferblattseite auf ein Stück fotografischen Film oder auf eine kleine Fotoplatte, wie sie als Diapositivplatte im Format $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ erhältlich ist. Zwischen Uhr und Film bzw. Fotoplatte muß unbedingt ein Stück schwarzes lichtundurchlässiges Papier gelegt werden. Nun umschlingen wir das Ganze fest mit einem Gummi oder Bindfaden, so daß Uhr und Fotomaterial nicht gegeneinander verrutschen können, sondern in fester Lage zueinander gehalten werden. Das alles muß im Dunkeln erfolgen. Falls wir eine Diapositivplatte verwenden, darf Dunkelkammerlicht eingeschaltet sein. Ebenfalls noch im Dunkeln verpacken wir das Ganze in einen lichtdichten Behälter, z. B. in einen leeren Fotopapierkarton. Wenn wir den Karton dann nochmals in einen größeren Karton legen und diesen im Schrank aufbewahren, kann kein Licht in das Innere des Kartons eindringen.

Wir lassen die Uhr eine Woche auf dem Fotomaterial liegen, packen unsere Versuchsanordnung dann im Dunkeln wieder aus und entwickeln das Fotomaterial. Wenn sich die Leuchtstoffpunkte oder Striche auf dem entwickelten Film oder der Platte als schwarze Punkte oder Striche mit unscharfer Begrenzung zeigen, so enthält das Zifferblatt radioaktive Substanzen. Das von dem Leuchtstoff ausgehende Licht kann die Schwärzung des Fotomaterials nicht

bewirkt haben, weil das schwarze Papier dazwischen lag. Falls die Uhr während der Zeit nicht ging, die Zeiger also stillstanden, markieren sie sich ebenfalls auf dem entwickelten Fotomaterial.

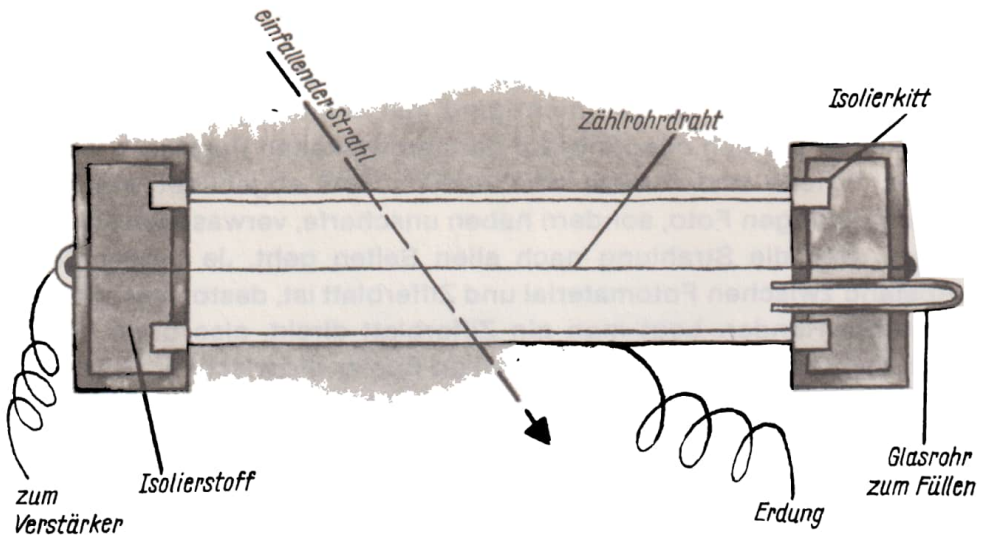
Die Striche und Punkte sind nicht scharf abgebildet wie auf einem richtigen Foto, sondern haben unscharfe, verwaschene Konturen, weil die Strahlung nach allen Seiten geht. Je größer der Abstand zwischen Fotomaterial und Zifferblatt ist, desto unschärfer sind die Ränder. Legt man ein Zifferblatt direkt, also ohne Uhrscheibe, lediglich mit dem schwarzen Papier dazwischen, auf eine Fotoplatte, so ist die Abbildung der Leuchtstriche oder -punkte am schärfsten. Die Schwärzung entsteht, weil alle energiereichen Strahlen, folglich auch Alpha-, Beta- und Gammastrahlen, dieselbe Wirkung auf Fotomaterial haben wie Licht.

Nach diesem Ausflug in ein Gebiet angewandter Kernphysik zurück zum Spinthariskop! Mit diesem einfachen Instrument haben die Assistenten Professor Rutherfords ausgezählt, wie viele Alphateilchen um welche Winkel abgelenkt wurden, wenn man ihnen Plättchen aus verschiedenen Metallen in den Weg stellte. Das war eine höchst mühevollen und anstrengende Arbeit. Mehrere Jahre mußten die Physiker stundenlang in einem dunklen Raum arbeiten, um ihre Augen für das Zählen der schwachen Lichtblitze empfindlich genug zu halten.

Heute ist das Spinthariskop als Hilfsmittel der kernphysikalischen Forschung veraltet und durch bessere Geräte abgelöst worden. Es gibt inzwischen Geräte, die die Lichtblitze mit einem elektronischen Zählwerk bestimmen. Sie heißen Szintillationszähler, denn der Lichtblitz wird in der Fachsprache als Szintillation bezeichnet. Das Gerät ist so vervollkommen, daß nicht nur Alphateilchen, sondern auch andere energiereiche Strahlen schwache Lichtblitze in einem Kristall auslösen. Mit dem Szintillationszähler können bis zu einer Million Lichtblitze je Sekunde gezählt werden.

Warum der Geigerzähler tickt

Für viele Zwecke ist es nicht erforderlich, die Strahlenteilchen auf Grund der von ihnen erzeugten Szintillationen einzeln zu zählen. Oft interessiert nur die Intensität der von einem radioaktiven Nuklid ausgehenden Strahlung. Sie kann man z. B. mit dem Geiger-



Schema des Zählrohrs

zähler messen. Unter diesem Namen oder als Geiger-Müller-Zählrohr ist er heute auch vielen Nichtfachleuten bekannt. Dieser Strahlungsdetektor wurde von dem Physiker Hans Geiger erfunden und von einem anderen Physiker namens Müller wesentlich verbessert.

Die Arbeitsweise des Geigerzählers und vieler anderer Strahlenmeßgeräte beruht darauf, daß Alpha-, Beta- und Gammastrahlen Gas in einen elektrisch leitfähigen Zustand versetzen. Normalerweise leiten Gase den elektrischen Strom nicht. Aber durch Einwirkung der Strahlen werden Gase elektrisch leitend und ermöglichen daher einen Stromübergang durch das Gas. Dadurch entsteht ein schwacher Stromstoß. Man kann ihn verstärken und z. B. mittels eines Lautsprechers als Knackton hörbar machen.

Wenn sich der Geigerzähler einem radioaktiven Stoff nähert, hört man eine schnelle Aufeinanderfolge von Knack- oder Ticktönen. Sie folgen um so schneller aufeinander, je dichter das Zählrohr dem radioaktiven Stoff angenähert wird und je stärker die Strahlung des Stoffes ist. Dadurch kann man auch radioaktive Substanzen aufspüren, die hinter einer Wand, unter der Erde oder in einem Schrank verwahrt liegen. Betastrahlen und noch mehr die Gammastrahlen durchdringen selbst feste Gegenstände, wie z. B. die Holz-

wände eines Schrankes. Gammastrahlen durchdringen sogar Mauern.

Atome mit Havarie

Das Gas, mit dem das Zählrohr gefüllt ist, wird unter der Einwirkung der Strahlen elektrisch leitend, weil alle energiereichen Strahlen aus den Atomhüllen Elektronen herausschlagen. Normalerweise enthält die Atomhülle stets ebenso viele Elektronen wie der Atomkern Protonen. Daher ist die negative Ladung der Atomhülle ebenso groß wie die positive Ladung des Kerns. Die positiven und negativen Ladungen heben sich deshalb gegenseitig auf, und das Atom ist nach außen hin elektrisch neutral, d. h. nicht elektrisch geladen.

Werden jedoch durch die Strahlen ein oder mehrere Elektronen aus den Hüllen der Atome herausgeschlagen, so wird die positive Ladung des Kerns größer als die negative Ladung der Hülle. Jetzt ist das Atom kein Atom mehr, sondern ein Ion (sprich: I-on, nicht: Jon). Ionen sind also gewissermaßen „beschädigte“ Atome, sie sind stets elektrisch geladen. Im Füllgas des Zählrohrs bilden sich außer positiven auch negative Ionen, weil die aus den Hüllen einiger Atome herausgeschlagenen Elektronen sich an die Hüllen anderer Atome anlagern. Diese Atome haben nun mehr Elektronen in der Atomhülle als Protonen im Atomkern und folglich einen Überschuß an negativer Ladung. Die Strahlen erzeugen im Füllgas des Zählrohrs und auch in allen anderen Stoffen also stets Ionenpaare.

Ionen aber werden, da es geladene Teilchen sind, in einem elektrischen Kraftfeld in Bewegung gesetzt. Die negativen Ionen wandern zur positiven Anode, die positiven Ionen wandern zur negativen Katode. Dieser Wanderung verdanken die Ionen ihren Namen, der wiederum aus der Sprache der alten Griechen entlehnt ist und so viel wie „die Wandernden“ bedeutet. Die von der ausgesandten Strahlung im Füllgas des Zählrohrs erzeugten freien Elektronen lösen durch Stoßionisation eine ganze Elektronenlawine aus.

Ein aufschlußreicher Stromstoß

Das elektrische Feld im Zählrohr wird durch Anlegen einer hohen Spannung von etwa 1000 Volt erzeugt. Längs durch das Rohr verläuft ein dünner, gegen das Rohr isolierter Draht. Das Rohr selbst ist geerdet. An den dünnen Draht wird die Spannung angelegt. Sie hat daher die Neigung, vom Draht auf das Rohr überzuspringen wie der Blitz auf einen geerdeten Blitzableiter. Doch kann kein Stromübergang erfolgen, solange keine Ionen im Füllgas vorhanden sind. Erst wenn die in das Rohr einfallenden energiereichen Strahlen einige Gasatome „ionisieren“, schlägt die Spannung vom Draht auf das Rohr durch. Dadurch entsteht ein kurzzeitiger elektrischer Stromfluß, ein Stromstoß.

An der Vorderseite hat das Zählrohr ein „Fenster“ aus Glimmer. Es schließt das Rohr zwar luftdicht gegen die Außenwelt ab. Aber es ist für die Strahlen durchlässig. Die hohe elektrische Spannung wird nicht im Zählrohr selbst erzeugt, sondern in einem getrennt angeordneten Generatorteil. Zählrohr und Generator sind durch ein Kabel verbunden. Bei Geigerzählern für beweglichen Einsatz ist der Generatorteil mit einem Tragegurt versehen. Wie sich ein Fotoreporter den Generatorteil seines Blitzgeräts über die Schulter hängt, so kann man den Generatorteil des Geigerzählers bequem am Schulterriemen tragen und das eigentliche Zählrohr frei bewegen. In dem Kästchen, in dem sich der Generator befindet, ist außerdem der Verstärker untergebracht, der die schwachen, im Zählrohr entstehenden Stromstöße verstärkt.

Wenn man das Zählrohr in die Nähe eines radioaktiven Stoffes bringt, z. B. einer älteren Armbanduhr, die noch ein Zifferblatt mit Radium enthaltenden Leuchtfarben hat, so hört man es deutlich knacken. Auch hier bestätigt sich, daß die Knacktöne nicht in gleichmäßigen Zeitabständen erfolgen wie das Ticken einer Uhr. Vielmehr tickt der Zähler einmal schneller, einmal langsamer. Wir begegnen hier wiederum dem statistischen Charakter der Radioaktivität.

Für die Messung der Stärke der Radioaktivität eines Stoffes sind die zufälligen Schwankungen der Häufigkeit von Zerfallsprozessen jedoch störend. Man hat deshalb Zählgeräte gebaut, die die Stromstöße nicht durch einzelne Knacktöne anzeigen,

sondern bereits einen Durchschnittswert des Stromflusses ermitteln, der über eine längere Zeitspanne hin erfolgt. Der Mittelwert wird durch einen Zeiger auf einer Skala angezeigt. Solche Geräte heißen Integrationszähler.

Wir leben im Strahlungsnebel

Nun könnte man denken, daß ein Geigerzähler oder ein anderes hochempfindliches Nachweisgerät für die Strahlung radioaktiver Stoffe überhaupt nicht knacken bzw. nichts anzeigen dürfte, wenn das Zählrohr nicht in die Nähe radioaktiver Stoffe gebracht wird. In Wirklichkeit verstummt ein Geigerzähler aber nie ganz. Einzelne Knacktöne hört man dauernd in unregelmäßigen Abständen, solange das Gerät überhaupt eingeschaltet ist. Wie kommt das?

Erinnern wir uns daran, daß überall in der Luft winzige Mengen des Gases Radon enthalten sind, das laufend durch den Zerfall von Radium neu gebildet wird. Luft, die völlig frei von radioaktiven Stoffen ist, gibt es daher auf der Erde nicht. Durch die Versuchsexplosionen von Kernwaffen sind künstliche radioaktive Stoffe hinzugekommen. Reste von ihnen sind noch heute in der Luft, im Wasser und im Boden vorhanden. Es gibt in der Natur aber außer Radium und Radon noch andere radioaktive Stoffe. Erinnern wir uns an die lange Zerfallsreihe des Urans. Auch das Element Thorium hat eine solche Zerfallsreihe mit vielen radioaktiven Zwischenprodukten. Außerdem gibt es von dem weitverbreiteten Element Kohlenstoff in äußerst geringfügigen Mengen ein radioaktives Nuklid. In ganz winzigen Mengen sind praktisch alle Stoffe der Erde mit radioaktiven Nukliden vermischt. Auch das Material, aus dem das Zählrohr selbst besteht, sowie das Gas, mit dem es gefüllt ist, enthält spurenweise radioaktive Stoffe.

Bombardement aus dem Kosmos

Gewöhnliche Zählrohre sind allerdings kaum empfindlich genug, um die äußerst winzigen Mengen radioaktiver Substanzen, die sich überall in der Erde, im Wasser und in der Luft befinden, anzuzeigen. Wenn das Zählrohr trotzdem fortlaufend tickt, so verrät sich dadurch noch eine andere Erscheinung: die sogenannte kos-



kosmische Strahlung! Sie wurde besonders von dem sowjetischen Wissenschaftler D.W. Skobelzyn erforscht. Aus dem Weltraum prasseln unaufhörlich energiereiche, atomare Teilchen, hauptsächlich Protonen und Elektronen, auf die Erde herab. Sie werden nicht von Atomkernen radioaktiver Stoffe ausgesandt. Ihre Geschwindigkeit und damit ihre Energie ist sogar noch weit größer als die der Alpha- und Betateilchen radioaktiver Substanzen. Die Teilchen der kosmischen Strahlung erlangen ihre hohe Bewegungsenergie durch andere komplizierte Vorgänge, die sich in den Weiten des Weltalls abspielen, auf die wir hier aber nicht eingehen wollen.

Die Teilchen der aus dem Weltraum stammenden kosmischen Strahlung gelangen nur in seltenen Ausnahmefällen bis zur Erdoberfläche. Die weitaus größte Zahl der Teilchen stößt schon vorher in großen Höhen mit Atomen und Molekülen der Gase der Erdatmosphäre zusammen. Die Wucht, mit der die kosmischen Teilchen auftreffen, ist dabei so groß, daß die Atome und Moleküle der Luftgase nicht nur wie in einem Zählrohr ionisiert werden. Vielmehr werden Atomkerne, wenn sie den „Volltreffer“ eines

kosmischen Strahlenteilchens erhalten, zersplittert. So wie ein Stück Glas, das wir mit großer Wucht gegen eine steinerne Wand werfen, in viele Stücke zerspringt, die wahllos nach verschiedenen Richtungen auseinanderfliegen, ergeht es einem Atomkern, der von einem kosmischen Teilchen sehr hoher Energie getroffen wird. Auch das kosmische Teilchen selbst kann dabei zersplittern. Die Splitter haben dabei ebenfalls so viel Energie, daß sie bei Zusammenstößen mit anderen Atomkernen aus diesen gleichfalls kleine Teilchen herausschlagen.

Durch ein einziges hoch energiereiches Teilchen der kosmischen Strahlung werden daher ganze Schauer, auch Kaskaden genannt, weiterer energiereicher Teilchen erzeugt. Die aus dem Kosmos kommenden, energiereichen Strahlenteilchen bezeichnet man als primäre kosmische Strahlung, die durch sie entstandenen, sehr viel zahlreicheren anderen Teilchen als sekundäre kosmische Strahlung. Sie wurde von dem Sowjetwissenschaftler Skobelzyn zum ersten Mal entdeckt. Die beiden jungen sowjetischen Physiker Alichanow und Alichanjan führten Anfang der 40er Jahre in einem Observatorium auf dem 4095 m hohen Berg Aragaz in der Armenischen SSR umfangreiche Forschungen über die Zusammensetzung der sekundären kosmischen Strahlung durch. Sie setzt sich in der Atmosphäre kaskadenförmig bis in die bodennahen Schichten fort. Sie ist es auch, die unseren Geigerzähler unaufhörlich in unregelmäßigen Abständen knacken läßt. Denn die Teilchen der kosmischen Strahlung ionisieren das Füllgas des Geigerzählers ebenso wie die von radioaktiven Atomkernen ausgesandten Strahlen. Ein Geigerzähler und auch die anderen Nachweisgeräte der Kernphysik zeigen daher nicht nur Strahlen radioaktiver Stoffe, sondern überhaupt ionisierende Strahlen an.

Um die sekundäre kosmische Strahlung auszuschalten, müßte man mit dem Geigerzähler in einen sehr tiefen Bergwerksschacht gehen. Tatsächlich finden wissenschaftliche Untersuchungen, bei denen der störende Einfluß der kosmischen Strahlung möglichst ausgeschlossen werden soll, in tiefen Bergwerksschächten Hunderte und Tausende von Metern unter der Erdoberfläche statt.

Kondensstreifen in der Nebelkammer

Doch nach dieser Abschweifung in die kosmische Strahlung zurück zu weiteren und anderen Geräten der Kernphysik! Für manche Probleme der Atomkernphysik kommt es darauf an, die Bahn eines einzelnen Teilchens genau auszumessen, also zu ermitteln, wie weit es sich mit hoher Energie bewegt, ob es sich geradlinig bewegt oder abgelenkt wird, wie stark es im elektrischen oder magnetischen Feld abgelenkt wird usw. Ein Physiker namens Charles T. R. Wilson erfand ein Gerät, mit dem man die Bahn eines energiereichen Teilchens (nicht das Teilchen selbst!) sichtbar machen kann. Das Funktionsprinzip dieser sogenannten Nebelkammer können wir uns an einem Vorgang veranschaulichen, der öfter am Himmel zu beobachten ist.

Am wolkenlosen, blauen Himmel sieht man häufig dünne, weiße Spuren. Es sind „Kondensstreifen“ von Flugzeugen, die in großer Höhe fliegen, z. B. von Kampfflugzeugen unserer Luftstreitkräfte. Die weißen Streifen sind nicht, wie viele Menschen annehmen, einfach das Auspuffgas des Flugzeugs. Sie haben allerdings mittelbar etwas mit den Abgasen des Triebwerks zu tun. Wenn die Abgase Kondensstreifen erzeugen sollen, so muß die Luft eine bestimmte Menge Wasserdampf enthalten. Wasserdampf ist Wasser in gasförmigem Zustand. Wasserdampf ist also unsichtbar! Wolken und Nebel bestehen daher *nicht* aus Wasserdampf, sondern aus Wasser im bereits flüssigen Zustand. Doch bildet das Wasser im Nebel und in den Wolken nur so kleine und leichte Tröpfchen, daß sie lange in der Luft schweben können, ohne herunterzufallen. Aus solchen winzigen schwebenden Wassertröpfchen bestehen Wolken und Nebel. Erst wenn sich viele solcher kleinen Wassertröpfchen zu einem großen Tropfen vereinigen, fällt er als Regen zur Erde.

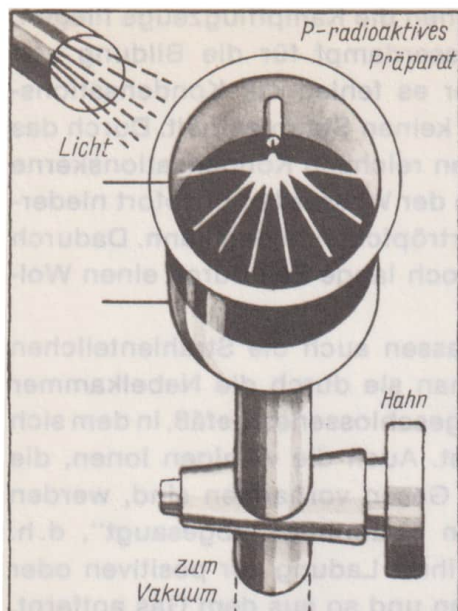
Überschreitet der unsichtbare Wasserdampf in der Luft eine bestimmte Menge bei einer bestimmten Temperatur, dann beginnt er sich zu verflüssigen – der Wasserdampf kondensiert – und winzige Wassertröpfchen zu bilden, aus denen Wolken und Nebel bestehen. Das ist aber nur möglich, wenn in der Luft sogenannte Kondensationskerne vorhanden sind, an denen er sich niederschlagen kann so wie der Tau auf den Pflanzenblättern. Als Kondensationskerne können winzige Staubteilchen dienen, aber auch

lonen. In den großen Höhen, in denen die Kampfflugzeuge fliegen, ist zwar häufig ausreichend Wasserdampf für die Bildung von Wassertröpfchen vorhanden. Aber es fehlen die Kondensationskerne, weil die Luft hier oben fast keinen Staub enthält. Durch das Abgas des Strahltriebwerks werden reichlich Kondensationskerne in die Luft gestreut, an denen sich der Wasserdampf sofort niederschlagen und schwebende Wassertröpfchen bilden kann. Dadurch bleibt die Spur des Flugzeuges noch lange Zeit durch einen Wolkenfaden markiert.

Solche Kondenssstreifen hinterlassen auch die Strahlenteilchen radioaktiver Substanzen, wenn man sie durch die Nebelkammer fliegen läßt. Das ist ein luftdicht abgeschlossenes Gefäß, in dem sich ein sehr staubarmes Gas befindet. Auch die wenigen Ionen, die normalerweise in Luft und allen Gasen vorhanden sind, werden durch Anlegen einer elektrischen Spannung „abgesaugt“, d. h. ständig je nach dem Vorzeichen ihrer Ladung zur positiven oder negativen Elektrode hin angezogen und so aus dem Gas entfernt. In dem Gas befindet sich außerdem der Dampf einer Flüssigkeit, z. B. Alkoholdampf, der ebenso wie Wasserdampf unsichtbar ist.

Was ein Kolben vermag

Nun hängt die Kondensation des Dampfes zu feinen Tröpfchen auch von der Temperatur ab. Bei hoher Temperatur z. B. kann Luft relativ viel Wasserdampf enthalten, ohne daß er zu Tröpfchen kondensiert. Kühlt sich die Luft ab, so bildet der Wasserdampf – Kondensationskerne vorausgesetzt – sofort Wassertröpfchen. Gas kann man abkühlen, indem man den Gasdruck erniedrigt. Das Umgekehrte beobachten wir an der Luftpumpe. Sie wird beim Pumpen deutlich warm, weil wir die Luft unter hohen Druck setzen, wenn wir den Kolben der Pumpe nach unten bewegen. Durch die Druckerhöhung erwärmt sich die Luft, und ihre Wärme überträgt sich auf das metallene Luftpumpengehäuse. Verringern wir dagegen den Druck in einem Gas, so kühlt es sich ab. Der Druck des Gases in der Nebelkammer wird schlagartig vermindert, indem man einen Kolben nach unten zieht. Dadurch wird der Raum, der dem Gas zur Verfügung steht, größer, aber die Gasmenge bleibt dieselbe. Folglich ist der Druck des Gases jetzt geringer.



In der Nebelkammer markieren sich Bahnen von Alphateilchen durch Nebelspuren

Wir können nun schon voraussagen, was geschehen muß, wenn ein radioaktiver Stoff in die Nebelkammer eingeführt wird. Die von dem Stoff ausgesandten Strahlen erzeugen auf ihrem Wege durch das Füllgas der Kammer zahlreiche Ionen. Diese aber sind Kondensationskerne. Jetzt brauchen wir nur noch den Kolben zu betätigen und dadurch Druck und Temperatur des Füllgases schlagartig zu vermindern. Dann muß sich der im Füllgas enthaltene Alkoholdampf sofort an den entstandenen Ionen niederschlagen und sichtbare Nebelspuren bilden. Sie zeigen die Bahnen an, die die Strahlenteilchen durch das Gas der Nebelkammer genommen haben. Beleuchtet man die Kammer, so lassen sich die Nebelspuren fotografieren und damit für immer sichtbar festhalten. Wird die Nebelkammer zwischen den Polen eines starken Elektromagneten aufgestellt, so zeigen die Spuren, in welcher Richtung und wie stark die Strahlenteilchen abgelenkt werden.

Die Nebelkammer ist in größeren Forschungszentren heute durch die Blaskammer ersetzt. Ihr Grundprinzip ist sehr ähnlich. Nur markieren sich hier die Bahnen der energiereichen Teilchen nicht

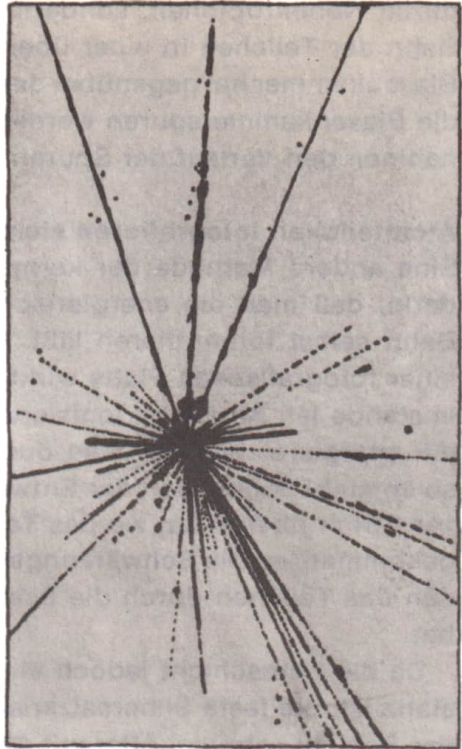
durch Nebeltröpfchen, sondern durch Bläschen, die entlang der Bahn der Teilchen in einer überhitzten Flüssigkeit entstehen. Die Blaskammer hat gegenüber der Nebelkammer viele Vorteile. Auch die Blaskammerspuren werden fotografiert, um anhand der Aufnahmen den Verlauf der Spuren genau ausmessen zu können.

Atomteilchen fotografieren sich selbst

Eine andere Methode der kernphysikalischen Forschung besteht darin, daß man die energiereichen Teilchen gewissermaßen ihre Bahn selbst fotografieren läßt. Auf die lichtempfindliche Schicht einer fotografischen Platte wirkt jedes energiereiche Teilchen, das imstande ist, Atome zu ionisieren, ebenso wie Licht. Bewegt sich ein energiereiches Teilchen durch die lichtempfindliche Schicht, so entsteht daher nach der Entwicklung der Fotoplatte ein schwarzer Strich überall da, wo das Teilchen mit hoher Energie entlanggekommen ist. Die Schwärzungsspur kennzeichnet genau den Weg, den das Teilchen durch die lichtempfindliche Schicht genommen hat.

Da die Fotoschicht jedoch eine verhältnismäßig kompakte Substanz ist, die feste Silbersalzkristalle enthält, stößt das Teilchen in der Schicht sehr viel öfter mit Atomen zusammen als in der Nebelkammer, die nur mit Gas gefüllt ist. In einem Gas haben die Atome bzw. Moleküle wesentlich größere Abstände voneinander als in einem festen Körper. In der Fotoschicht verliert das Teilchen durch die vielen Zusammenstöße mit Atomen und Molekülen daher schneller seine hohe Bewegungsenergie und kommt dadurch schon nach kürzerer Wegstrecke „zur Ruhe“. Daher sind die Bahns Spuren energiereicher Teilchen in Fotoschichten so klein, daß man sie nur mit Hilfe eines Mikroskops sehen und ausmessen kann.

Trotzdem sind aus solchen Fotoplaten viele und sehr wesentliche Erkenntnisse der Atomkernphysik für spätere Forschungen gewonnen worden, mit denen wir uns noch beschäftigen werden. Um die Beobachtung der Teilchen zu erleichtern, werden Fotoplaten für kernphysikalische Zwecke mit einer sehr dicken Schicht hergestellt. „Sehr dick“ bedeutet hierbei allerdings nur einen halben oder ganzen Millimeter. Die Schicht normaler Fotofilme, wie wir sie zum Fotografieren benutzen, ist nur etwa $\frac{1}{100}$ mm dick.



Kernspuren auf einer Fotoplatte

Bewegt sich das Teilchen schräg oder gar senkrecht durch die Schicht, so kann man in der dickeren Schicht seinen Weg länger verfolgen als in einer dünnen.

Kernspuren vom Tatort

Die von den energiereichen Teilchen hervorgerufenen Schwärzungen nennt man Kernspuren. Sie werden sehr genau und sorgfältig untersucht. Wieder drängt sich hierbei der Vergleich mit der Arbeit der Kriminalisten auf, die Fingerabdrücke untersuchen, jedes feinste Härchen, ein paar Lacksplitter und ähnliche Dinge am Tatort auflesen und im Labor mit Hilfe komplizierter Verfahren analysieren, um einen Täter zu überführen. Bei den Kernspuren werden mit einem Mikroskop z. B. folgende Eigenschaften gemessen: Spurlänge in Tausendstelmillimetern, jede feinste Abweichung der Spur

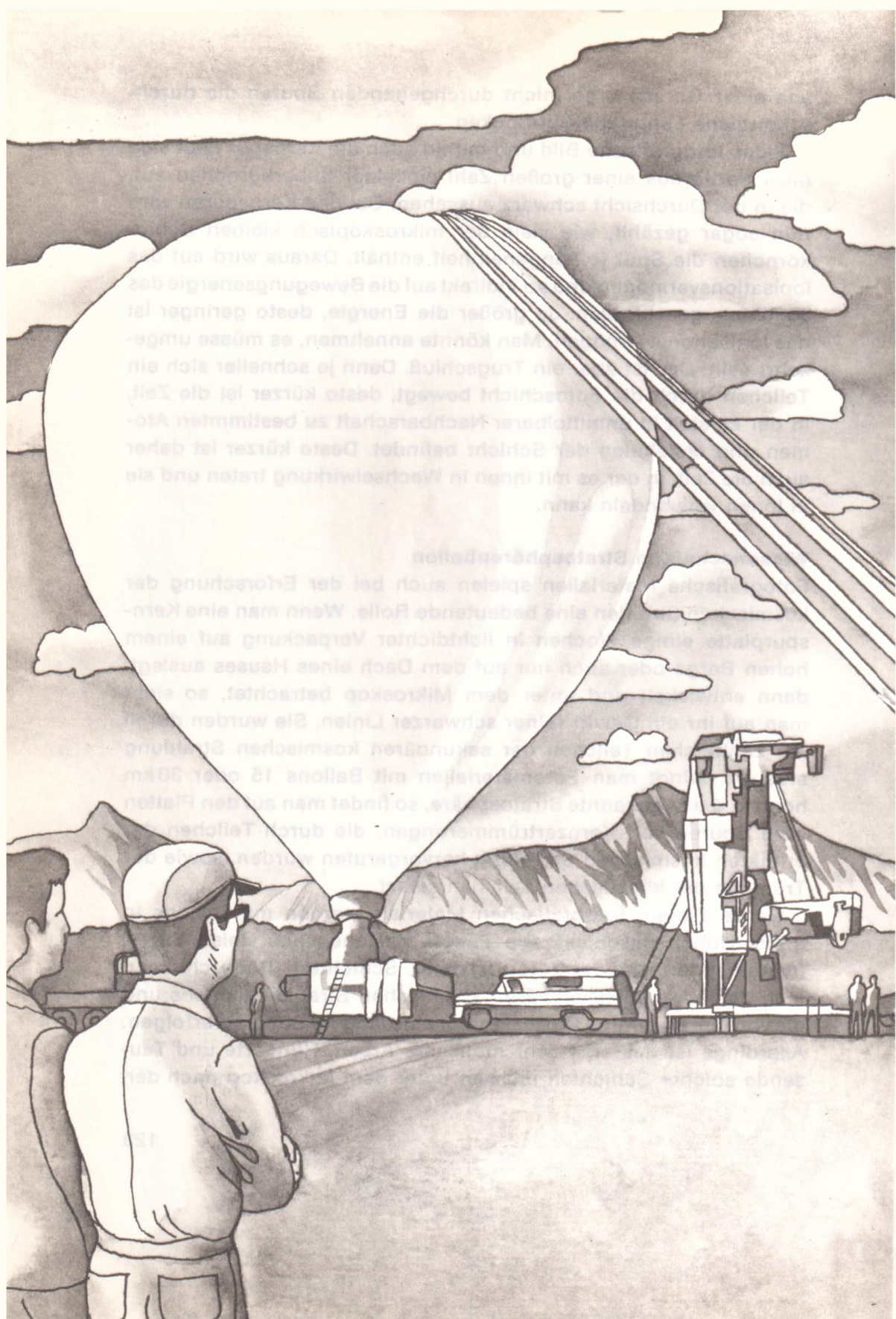
aus einer Geraden, bei nicht durchgehenden Spuren die durchschnittliche Länge der Spurlücken.

Jedes fotografische Bild und mithin auch die Kernspur baut sich mosaikartig aus einer großen Zahl einzelner Silberkörnchen auf, die in der Durchsicht schwarz aussehen. Bei den Kernspuren wird nun sogar gezählt, wie viele der mikroskopisch kleinen Silberkörnchen die Spur je Längeneinheit enthält. Daraus wird auf das Ionisationsvermögen und so indirekt auf die Bewegungsenergie des Teilchens geschlossen. Je größer die Energie, desto geringer ist das Ionisationsvermögen. Man könnte annehmen, es müsse umgekehrt sein. Das ist aber ein Trugschluß. Denn je schneller sich ein Teilchen durch die Fotoschicht bewegt, desto kürzer ist die Zeit, in der es sich in unmittelbarer Nachbarschaft zu bestimmten Atomen und Molekülen der Schicht befindet. Desto kürzer ist daher auch die Zeit, in der es mit ihnen in Wechselwirkung treten und sie in Ionen verwandeln kann.

Wissenschaft im Stratosphärenballon

Fotografische Materialien spielen auch bei der Erforschung der kosmischen Strahlen eine bedeutende Rolle. Wenn man eine Kernspurplatte einige Wochen in lichtdichter Verpackung auf einem hohen Berge oder auch nur auf dem Dach eines Hauses auslegt, dann entwickelt und unter dem Mikroskop betrachtet, so sieht man auf ihr ein Gewirr feiner schwarzer Linien. Sie wurden durch die zahlreichen Teilchen der sekundären kosmischen Strahlung erzeugt. Bringt man Fotomaterialien mit Ballons 15 oder 30 km hoch in die sogenannte Stratosphäre, so findet man auf den Platten viele Spuren von Kernzertrümmerungen, die durch Teilchen der primären kosmischen Strahlung hervorgerufen wurden, sowie der Trümmer der kosmischen Teilchen selbst.

Ganze Pakete fotografischen Materials werden mit Ballons in große Höhen geschickt. Die Pakete bestehen aus vielen Lagen übereinanderliegender fotografischer Schichten. Dadurch kann man den Weg eines primären kosmischen Strahlenteilchens und die von ihm erzeugten Prozesse über eine längere Strecke verfolgen. Allerdings ist das eine sehr mühsame Arbeit. Hunderte und Tausende solcher Schichten müssen unter dem Mikroskop nach den



Spuren interessanter „Ereignisse“ abgesucht werden. Da die interessantesten Ereignisse sehr selten sind, gehört eine Portion Glück und sehr viel Ausdauer dazu, sie zu finden.

Wenn ein Teilchen mit hoher Energie auf einen Atomkern trifft, diesen zertrümmert und die Splitter nach allen Seiten fliegen, so markiert sich das fotografisch dadurch, daß von einem Punkt viele Linien nach verschiedenen Richtungen ausstrahlen.

Auf die 29. Stelle hinter dem Komma

Eines der bewundernswertesten „Handwerkszeuge“ der Kernphysiker ist der Massenspektrograph. Erinnern wir uns an das Gedankenexperiment, die in einem einzigen Kubikzentimeter Wasser enthaltenen Atome auszuzählen! Wir kamen zu dem Ergebnis, daß ein Mechanismus, der je Sekunde 10 Atome zählt und mit dem Zählen vor 5 Milliarden Jahren begonnen hätte, bis jetzt erst den 60 000. Teil dieser kleinen Wassermenge abgezählt hätte. So winzig und daher so leicht sind also Atome. Würden wir die Masse eines einzelnen Wasserstoffatoms in Gramm ausdrücken, so entstünde eine Zahl mit 28 Nullen hinter dem Komma. Trotzdem kann man mit Hilfe des Massenspektrographen die Masse eines Atoms bzw. Atomkerns mit dieser phantastischen Genauigkeit „wägen“. Das Wort „wägen“ müssen wir hier allerdings in Anführungsstriche setzen, denn diese „Wägung“ geschieht auf höchst komplizierte Weise und ganz anders als mit einer normalen Waage.

Jedes bewegte elektrisch geladene Teilchen wird in einem Magnetfeld abgelenkt. Auf diese Weise hatte man zu Anfang der Erforschung der Radioaktivität herausbekommen, daß es sich bei den Alpha- und Betastrahlen um Salven elektrisch geladener Teilchen handelte. Die geradlinige Bewegung der geladenen Teilchen geht in einem Magnetfeld in eine Kreisbahn über. Würden wir ein Magnetfeld benutzen, das entweder genügend groß, d. h. weit genug ausgedehnt, oder aber genügend stark ist, so könnten wir das Teilchen ständig wie auf einem Karussell im Kreise „tanzen“ lassen. Natürlich muß das im Hochvakuum, also in einer möglichst luftleer gepumpten Kammer erfolgen, damit das Teilchen nicht mit Gasatomen oder -molekülen zusammenstößt und dadurch seine Bewegungsenergie verliert.

Für das „Wägen“ der Atome braucht man aber kein so großes oder starkes Magnetfeld, das ausreichen würde, um das Teilchen im Kreise umlaufen zu lassen. Es genügt, wenn das Teilchen ein Stück durch das Magnetfeld „läuft“. Dabei krümmt sich seine Bahn, als wollte es einen Vollkreis einschlagen. Aus der Krümmung der Teilchenbahn kann man bereits berechnen, wie groß der Radius des Kreises wäre, den das Teilchen beschreiben würde, wenn das Magnetfeld ausgedehnt genug wäre. Aus diesem Krümmungsradius läßt sich berechnen, wie schwer das Teilchen ist.

Mit Magnetismus wägen

Wie stark sich die ursprünglich geradlinige Bahn des Teilchens im Magnetfeld krümmt, hängt von vier Faktoren ab:

1. von der Größe der Ladung des Teilchens,
2. von der Stärke des Magnetfeldes,
3. von der Geschwindigkeit des Teilchens,
4. von der Masse des Teilchens.

Sind drei dieser Größen bekannt, so kann man die vierte berechnen.

Nehmen wir einmal an, zwei Atomkerne von gleich großer elektrischer Ladung bewegen sich mit gleicher Geschwindigkeit in einem Magnetfeld bestimmter Stärke. Drei von den vier Faktoren sind also gleich. Nur der vierte Faktor ist bei den beiden Atomkernen verschieden. Der eine Kern ist etwas schwerer als der andere. Dann wird der schwerere Atomkern weniger stark durch das Magnetfeld abgelenkt als der leichtere. Denn der Bewegungs-„impuls“, die „Wucht“, mit der sich ein Körper bewegt, ist stets gleich dem Produkt von Geschwindigkeit *und* Masse. Eine 10 kg schwere Kugel ist schwerer abzubremesen und auch schwerer aus ihrer ursprünglichen Bewegungsrichtung abzulenken als eine nur 9 kg schwere Kugel. Aus dem gleichen Grunde werden die leichten Betateilchen im Magnetfeld stärker abgelenkt als die sehr viel schwereren Alphateilchen. Aus dem unterschiedlichen Krümmungsradius der beiden Atomkerne kann also der Unterschied ihrer Masse berechnet werden.

Das „Rezept“ zum „Wägen“ von Atomen lautet daher: Man verwandle zunächst die elektrisch neutralen Atome in elektrisch geladene Ionen. Infolge ihrer Ladung kann man sie dann im Vakuum



durch ein elektrisches Kraftfeld beschleunigen. Positive Ionen fliegen dabei mit einer Beschleunigung, die von der Größe der Ladung der Ionen und der angelegten Spannung abhängt, in Richtung zur negativen Elektrode. Etwas Ähnliches geschieht in jeder Bildröhre des Fernsehempfängers. Im hinteren Ende der Röhre, in ihrem schmalen „Hals“, werden Elektronen frei gesetzt und durch Anlegen einer hohen elektrischen Spannung von vielen tausend Volt in Richtung auf die Leuchtstoffschicht des Bildschirms beschleunigt.

Die Bahnkrümmung verrät's

Im Massenspektrographen werden die Ionen durch ein elektrisches und magnetisches Feld genau bestimmter Stärke geschickt. Dabei krümmen sich ihre Bahnen entsprechend der unterschiedlichen Masse der Ionen in verschiedenem Grade. Um den Grad der Bahnkrümmung festzustellen, genügt es, einen Punkt jener Bahn zu bestimmen. Gegen Ende des Kreisbahnausschnitts läßt man die Ionen auf eine fotografische Platte prallen. In der Fotoschicht erzeugen die auftreffenden Ionen wieder eine Schwärzung. In diesem Falle interessiert nicht der Verlauf der Spur in allen ihren Einzelheiten, die wir vorhin erwähnten. Es kommt lediglich darauf an, an welcher Stelle der Fotoplate die Ionen auftreffen. Aus dem Ort des Auftreffens läßt sich der Krümmungsradius ihrer Bahn und aus diesem wiederum ihre Masse berechnen.

Die Fotoplatte, die man auf diese Weise erhält und die als Massenspektrogramm bezeichnet wird, zeigt nichts weiter als nebeneinanderliegende schwarze Striche. Ein Laie könnte absolut nichts daraus entnehmen. Erst auf Grund genauer Berechnungen verraten die schwarzen Striche, wie schwer die Ionen waren, die die Schwärzungen hervorriefen. Bei der Massenbestimmung werden nicht bloß ein oder zwei Ionen durch das Magnetfeld geschickt – das wäre technisch gar nicht möglich –, sondern ganze Salven von Ionen. Alle Ionen, die die gleiche Masse haben, treffen sich auf der Fotoplatte an derselben Stelle.

Daraus ergibt sich noch eine andere Möglichkeit. Man kann die verschiedenen Isotope eines Elements, die chemisch identisch sind (gleiche Protonenzahl) und sich nur durch ihre größere Masse (unterschiedliche Neutronenzahl) voneinander unterscheiden, mit Hilfe dieses Prinzips voneinander trennen. Ferner lassen sich Stoffe daraufhin kontrollieren, ob sie ganz rein sind, d. h. daß sie nur Atome bzw. Moleküle des gewünschten chemischen Elements enthalten und keine Beimengungen anderer Elemente. Der Massenspektrograph und ein als Massenspektrometer bezeichnetes sehr ähnliches Gerät findet noch die geringsten Beimengungen fremder Elemente, die durch chemische Analysen nicht mehr festzustellen sind.

Im Reich der Zahlenzwerge

Atome kann man mit dem Massenspektrographen nicht „wägen“, sondern nur Ionen. Da aber bekannt ist, wie viele Elektronen Ionen bestimmter Ladung aus der Atomhülle verloren oder auch hinzubekommen haben, und da auch die Masse des Elektrons genau bekannt ist, läßt sich berechnen, wie schwer ein bestimmtes Atom ist.

Die Masse von Atomen oder Atomkernen in Grammauszudrücken, wäre äußerst unpraktisch, da die Maßeinheit Gramm für die leichten Teilchen viel zu groß ist. Daher wurde für die Zwecke der Kernphysik eine eigene Maßeinheit eingeführt, die „atomphysikalische Masseinheit“, Kurzzeichen u.

$1\text{ u} = 0,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,001\,660\,227\text{ Gramm},$

anders geschrieben: $1,660\,277 \cdot 10^{-24}\text{ Gramm}.$

Wie die zum Vergleich angeführte Grammzahl zeigt, ist es also möglich, die unsichtbar winzigen Atomkerne weit genauer zu „wägen“ als jeden sichtbar großen Körper, den man in die Hand nehmen und auf eine richtige Waage legen kann. Denn bis auf die 29. Stelle hinter dem Komma genau ist selbst mit den besten chemischen Analysenwaagen die Masse eines sichtbar großen Körpers oder einer sichtbar großen Stoffmenge nicht zu wägen.

1 atomphysikalische Masseeinheit ist gleich dem 12. Teil der Masse eines Atoms des Kohlenstoff-Isotops C 12. Man hat die Masse dieses Atoms willkürlich als Maßstab gesetzt und ihr genau 12,000 000 u zugeschrieben. Alle anderen Atome, Atomkerne und Atomteilchen werden aus dem Verhältnis ihrer Masse zu der des Atoms dieses Kohlenstoff-Isotops berechnet.

In älteren Büchern findet man die Masse atomarer Teilchen auch in ME angegeben. Das ist die Abkürzung für „atomare Masseeinheit“. Sie unterscheidet sich nur wenig von der atomphysikalischen Masseeinheit u.

$$1 \text{ ME} = 0,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,001\,660\,1 \cdot \text{g}$$

(anders geschrieben: $1,6601 \cdot 10^{-24} \text{ g}$).

Nach dieser Maßeinheit hat das Proton eine Masse von 1,008 13 ME, das Neutron von 1,008 94 ME und das Elektron von 0,000 584 ME.

Kosmische Kräfte zertrümmern den Kern

Kleinigkeiten führen in der Wissenschaft oft auf die Spur einer großen Entdeckung. Wissenschaftler nehmen deshalb jede Kleinigkeit ernst und verfolgen sie weiter. So auch Rutherford. In seinen Versuchen über die Ablenkung von Alphateilchen beim Durchgang durch dünne Blättchen verschiedener Stoffe hatte er die grundlegende Erkenntnis vom Aufbau der Atome aus Atomkern und Elektronenhülle gewonnen. Diese ganze Theorie basierte letzten Endes auf der Annahme, daß die Alphateilchen gar nicht in die Atomkerne der Stoffe eindringen, sondern schon bevor sie in direkte Berührung mit dem Kern kommen, von den gleichnamigen elektrischen Ladungen abgestoßen werden. Diese Abstoßungskraft bildet gewissermaßen einen Schutzwall um den Atomkern; jedes positiv geladene Teilchen, mithin auch das Alphateilchen, prallt von dem Schutzwall ab.

Aber wenn sich Rutherford die Kurven und Diagramme genau ansah, in denen die Ergebnisse der langjährigen Versuche über die verschiedenen Ablenkungswinkel der Alphateilchen zusammengefaßt waren, so zeigten sich doch einige Abweichungen, die nicht ganz in die Vorstellung paßten, daß Alphateilchen vom Schutzwall der Atomkerne *aller* Stoffe in gleicher Weise abgestoßen wurden. Es fiel auf, daß es dabei einen gewissen Unterschied zwischen den leichten und den schweren Elementen gab.

Wir wissen bereits, daß ein wichtiger Unterschied zwischen leichten und schweren Elementen darin besteht, daß die schweren mehr Protonen in ihren Atomkernen enthalten als die leichten. Folglich ist auch die positive elektrische Ladung der schweren Atomkerne größer als die der leichten. Also müssen die Alphateilchen von den Atomkernen schwerer Elemente stärker zurückgestoßen werden als von den Kernen leichter Elemente. Rutherford fragte sich, ob mit Alphateilchen sehr hoher Energie die Abstoßungskraft der leichten Atomkerne vielleicht überwunden werden

könnte. Wenn man es schaffte, den Schutzwall der elektrischen Abstoßungskraft zu durchdringen, so müßte es möglich sein, ein Alphateilchen in den Atomkern hineinzuschießen. Das wäre eine neue, phantastische Möglichkeit! Zu welchen Folgen würde sie führen? Müßte man dadurch nicht das verwirklichen können, was die Alchimisten jahrhundertlang durch chemische Reaktionen vergebens versuchten, nämlich ein chemisches Element künstlich in ein anderes zu verwandeln?...

Daß sich Elemente auf natürlichem Wege durch radioaktiven Zerfall in andere Elemente umwandeln, war inzwischen schon gesichert. Wir hatten ja gesehen, daß aus dem Element Uran über viele Zwischenprodukte, zu denen das Radium, Radon, Polonium, Wismut usw. gehören, das Element Blei entsteht. Beim radioaktiven Zerfall wandelt sich ein Element in ein anderes um, indem Teilchen aus dem Atomkern ausgeschleudert werden. Müßte aber nicht auch eine Umwandlung von Elementen dadurch möglich sein, daß Teilchen in den Atomkern hineingeschossen werden?...

Atomkerne unter Beschuß

Wieder war damit eine interessante Problemstellung für die Wissenschaft gegeben. Für ihre Lösung kam es darauf an, eine Art Atomartillerie aufzubauen und damit systematisch Atomkerne zu beschießen. Aber wie macht man das? – Mit Kanonenkugeln kann man nicht nach Mücken schießen. Will man so kleine Ziele wie Atomkerne treffen, so braucht man entsprechend kleine Geschosse. Alphateilchen waren dafür klein genug. Aber man kann weder einen einzelnen Atomkern als Ziel sehen, noch kann man ein einzelnes Alphateilchen gezielt auf einen Atomkern abschießen. In der „Atomartillerie“ geht es daher ganz anders als beim gewöhnlichen Schießen zu. Man muß die Geschosse ungezielt abfeuern. Da man nicht zielen kann, braucht man sehr viele Geschosse, um einen einzigen Treffer zu erreichen. Denn jeder Treffer ist nur ein günstiger Zufall.

Selbstverständlich kann man sich auch nicht darauf versteifen, einen bestimmten Atomkern zu treffen, sondern muß sich damit begnügen, irgendeinen zu treffen. Atomkerne sind zwar in der kleinsten Stoffmenge in enormer Anzahl enthalten, und Alpha-

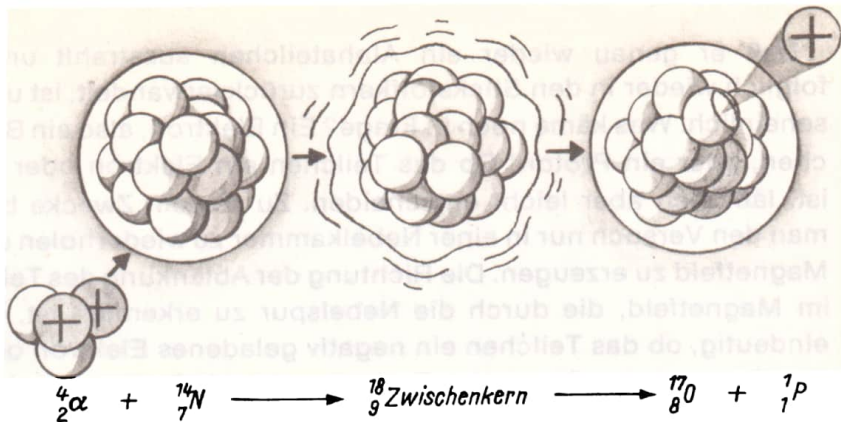
teilchen werden ebenfalls von radioaktiven Substanzen in riesiger Zahl ausgesandt. Aber bei den großen Abständen, die die Atomkerne in den Stoffen voneinander haben – erinnern wir uns daran, daß die Kerne größenordnungsmäßig 100 000fach kleiner als das ganze Atom sind! –, ist es trotzdem ein sehr seltener Zufall, einen Atomkern zu treffen. Hinzu kommt noch die große Schwierigkeit, daß die Alphateilchen eine enorme Bewegungsenergie besitzen müssen, um den Schutzwall der elektrischen Abstoßungskraft zu durchbrechen und in den Atomkern selbst einzudringen.

Im Jahre 1919 gelang aber, trotz aller Schwierigkeiten, die erste künstliche Umwandlung von Atomkernen durch Beschuß mit Alphateilchen. Rutherford benutzte als Geschosse die energiereichsten Alphateilchen, die bis dahin bekannt waren. Er sonderte einen radioaktiven Stoff ab, der Alphateilchen mit der phantastischen Geschwindigkeit von 19 200 Kilometern je Sekunde ausschleudert. Sie wurden in Stickstoffgas hineingestrahlt. Aber wie konnte man nun feststellen, ob die Alphateilchen wirklich bis in die Atomkerne des Stickstoffs eindringen?

Die Versuchsanordnung Rutherfords war wie folgt aufgebaut: Das Stickstoffgas befand sich in einem luftdicht verschlossenen Gefäß. Etwa in der Mitte des Gefäßes war die Alphateilchenquelle angeordnet und an dem einen Ende des Gefäßes ein Leuchtstoffschirm. Das Gefäß war aber so groß, daß die Alphateilchen nicht wie im Spinthariskop bis auf den Leuchtschirm treffen und dort Lichtblitze erzeugen konnten. Dafür war ihre Reichweite zu kurz. Wenn Szintillationen auf dem Leuchtschirm aufblitzten, mußten dort also andere energiereiche Teilchen auftreffen. Wie groß die Reichweite von Alphateilchen ist, wenn sie sich durch Gas bewegen, läßt sich mit der Nebelkammer leicht feststellen.

Leuchtschirmblitze und Geistesblitze

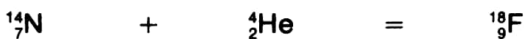
Tatsächlich entstanden auf dem Leuchtstoffschirm Lichtblitze, obwohl er außerhalb der Reichweite der Alphateilchen lag. Nun kam es darauf an, aus dem Indiz der Lichtblitze einen Beweis dafür abzuleiten, daß die Alphateilchen in die Stickstoffkerne eingedrungen waren! – Überlegen wir zunächst einmal, auf welche eini-germaßen plausibel erklärbare Weise überhaupt beim Beschuß von



Umwandlung von Stickstoff in Sauerstoff nach Beschuß mit einem Alphateilchen

Stickstoffkernen mit Alphateilchen andere Teilchen entstehen könnten, die Energie genug haben, um beim Auftreffen auf dem Leuchtschirm Lichtblitze auszulösen!

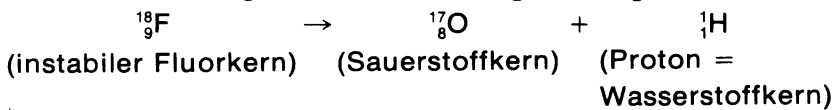
Normale Stickstoffkerne strahlen solche energiereichen Teilchen nicht aus. Denn wenn man normalen Stickstoff mit einem Leuchtschirm in Berührung bringt, treten keinerlei Szintillationen auf. In den Stickstoffkernen mußte daher durch die Einwirkung der Alphateilchen tatsächlich eine Veränderung vor sich gegangen sein. Aber wie müßte die Veränderung aussehen? Wir können auf dem Papier berechnen, was geschehen würde, wenn ein Alphateilchen in einen Stickstoffkern eindringt. Schreiben wir diesen Prozeß einmal als Reaktionsgleichung nieder:



(Stickstoffkern) (Alphateilchen) (neuer Kern)

Nehmen wir nun weiter an, der „neue Kern“ würde nicht stabil sein, in dieser Zusammensetzung also nicht existieren können, und sich deshalb unter Aussendung jenes Teilchens, das den Lichtblitz erzeugt, sofort in einen anderen Kern umwandeln. Damit hätten wir bereits eine Erklärung dafür, warum überhaupt Teilchen entstehen, die die Lichtblitze auf dem Leuchtschirm erzeugen. Nun wäre weiter zu fragen: Was könnten das für Teilchen sein, die der nicht existenzfähige „instabile Zwischenkern“ ausstrahlt?

Daß er genau wieder ein Alphateilchen ausstrahlt und sich folglich wieder in den Stickstoffkern zurückverwandelt, ist unwahrscheinlich. Was käme noch in Frage? Ein Elektron, also ein Betateilchen, oder ein Proton! Ob das Teilchen ein Elektron oder Proton ist, läßt sich aber leicht entscheiden. Zu diesem Zwecke braucht man den Versuch nur in einer Nebelkammer zu wiederholen und ein Magnetfeld zu erzeugen. Die Richtung der Ablenkung des Teilchens im Magnetfeld, die durch die Nebelspur zu erkennen ist, besagt eindeutig, ob das Teilchen ein negativ geladenes Elektron oder ein positiv geladenes Proton ist. Es erwies sich als Proton. Nun können wir die vorhin begonnene Reaktionsgleichung fortsetzen:

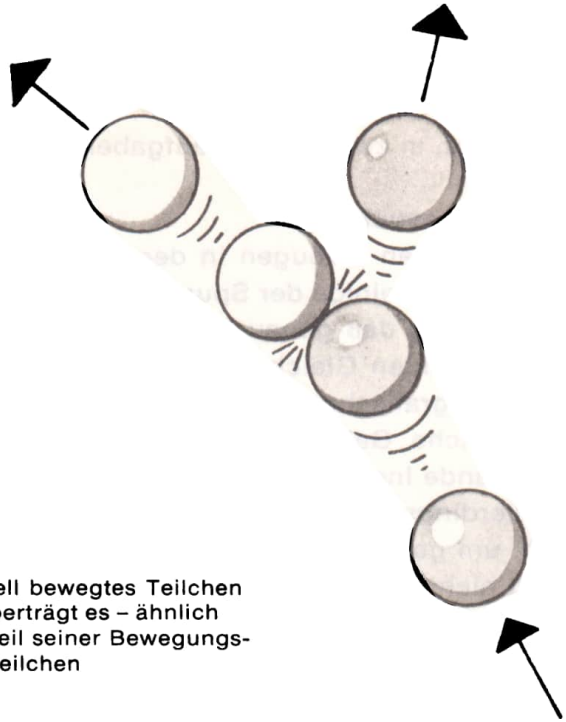


Der instabile Kern hat sich also sofort in einen Sauerstoffkern umgewandelt, wobei ein freies Proton ausgestrahlt wird. Das Proton trifft auf den Leuchtschirm und erzeugt einen Lichtblitz.

Atombillard

So plausibel die Berechnung und Erklärung klingt, vollkommen schlüssig bewiesen war sie damit noch nicht. Es mußte noch ein eindeutiger Beweis dafür erbracht werden, daß das Alphateilchen wirklich in den Stickstoffkern eingedrungen war. Diese Aufgabe löste der britische Forscher Professor Blackett. Er wiederholte die Versuche Rutherfords in einer Nebelkammer, die mit Stickstoff gefüllt war. Die Bahnen der Alphateilchen zeichneten sich deutlich als Nebelspuren ab. Nun kam es darauf an, die Nebelspuren eines Vorganges zu finden, bei dem ein Alphateilchen in einen Stickstoffkern eingedrungen war.

Wie die Spuren dieses Prozesses aussehen müßten, kann man sich ungefähr vorstellen. Vielleicht haben wir schon einmal beim Billardspiel zugesehen. Wenn man mit dem Stock eine Kugel kräftig anstößt und diese Kugel gegen eine andere, ruhig daliegende rollt, so wird die ursprünglich ruhende Kugel ebenfalls in Bewegung gesetzt. Ein Teil der Bewegungsenergie, die der Spieler der ersten Kugel mit dem Stock gab, überträgt sich durch den Zusammenstoß auf die zweite, ursprünglich ruhende Kugel.



Trifft ein energiereiches, schnell bewegtes Teilchen auf ein relativ ruhendes, so überträgt es – ähnlich wie beim Billardspiel – einen Teil seiner Bewegungsenergie auf das angestoßene Teilchen

Die mit dem Stock angestoßene Kugel können wir mit dem Alphateilchen vergleichen, die zweite, ursprünglich ruhende mit einem Stickstoffkern. Wenn das Alphateilchen auf den Stickstoffkern trifft, wird er in so heftige Bewegung versetzt, daß der angestoßene Kern ebenfalls ionisierend wirkt und eine Nebelspurerzeugt. Dabei ist es äußerst unwahrscheinlich, daß die Nebelspur des getroffenen Stickstoffkerns eine geradlinige Fortsetzung der Spur des auftreffenden Alphateilchens ist. Denn der Stickstoffkern wird nicht in genau derselben Richtung fliegen, aus der das Alphateilchen kam. Die Fortsetzung der Nebelspur wird nach dem Auftreffen des Alphateilchens auf den Stickstoffkern mit großer Wahrscheinlichkeit einen Knick machen und in eine andere Richtung gehen.

Aber da ist ja noch das Proton, das sofort aus dem getroffenen Kern herausfliegt. Es hat ebenfalls so viel Energie, daß es ionisierend wirkt und eine Nebelspur hinterläßt. Folglich müssen von dem Punkt, an dem das Alphateilchen auf den Stickstoffkern traf, nicht nur eine, sondern zwei Nebelspuren in verschiedenen Rich-

tungen ausgehen. Mit anderen Worten: Die Spur des Alphateilchens wird sich an der Stelle, an der es in einen Stickstoffkern eindringt, in zwei Spuren aufgabeln.

Gabeln gesucht!

Alphateilchen erzeugen in der Nebelkammer geradlinige Spuren. Sollten sich einige der Spuren aufgabeln, so wäre das ein weiteres Indiz dafür, daß genau jener Vorgang stattgefunden hat, den wir in den beiden Gleichungen beschrieben haben. Blackett fand in den fotografischen Aufnahmen der Nebelkammerspuren tatsächlich solche Gabeln! Auch noch andere aus den Fotos zu entnehmende Indizien führen zu der gleichen Annahme.

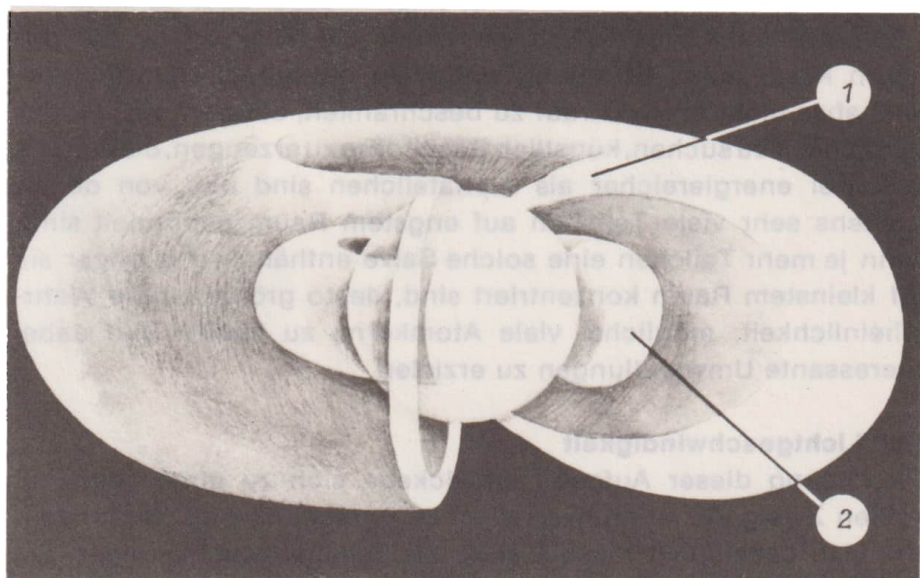
Allerdings waren nicht weniger als 23 000 Aufnahmen erforderlich, um ganze 8 Gabeln zu finden! Doch das mindert die Beweiskraft nicht. Denn man kann überschlagsweise berechnen, daß nur ein einziges von 500 000 Alphateilchen einen Stickstoffkern trifft. Erinnern wir uns wieder daran, daß Atomkerne größenordnungsmäßig 100 000mal kleiner als die ganzen Atome sind. Wenn man da schießt, ohne zielen zu können, also bloß auf Zufallstreffer angewiesen ist, sind gar nicht mehr Treffer zu erwarten. Hinzu kommt noch, daß nicht jeder Treffer von der Nebelkammer auch registriert wird. Denn sie ist nicht ständig arbeitsbereit, sondern immer nur für kurze Zeit unmittelbar nach Niederdrücken des Kolbens, der schlagartig die Temperatur und den Druck in der Gasfüllung erniedrigt.

An der Tatsache der künstlichen Kernumwandlung des Stickstoffs durch Beschuß mit Alphateilchen war schließlich nicht mehr zu zweifeln. Auch viele weitere Versuche bestätigten, daß sich Atomkerne durch Beschuß mit energiereichen Teilchen umwandeln lassen. Es gelangen Kernumwandlungen bei den Elementen Neon, Magnesium, Silizium, Schwefel, Chlor, Argon und Kalium. Weiter in der Reihe der Ordnungszahlen der chemischen Elemente als bis zum Kalium (Ordnungszahl 19) kam man allerdings nicht. Elemente, die schwerer als Kalium sind, ließen sich durch Beschuß mit Alphateilchen nicht umwandeln. Aber das war nicht weiter verwunderlich, sondern leicht zu erklären. Die Kerne der schwereren Elemente mit noch höherer Ordnungszahl enthalten mehr Protonen, und

daher ist ihre elektrische Abstoßungskraft größer. Offensichtlich war die Energie von Alphateilchen nicht groß genug, um diese starken Abstoßungskräfte zu durchbrechen.

Munition aus dem Weltraum

Um die Forschungen fortzusetzen, brauchte man also Geschosse mit noch höherer Energie. Eine natürliche Quelle solcher Geschosse ist die primäre kosmische Strahlung. Aber erstens müssen die Versuche dann entweder auf hohen Bergen oder noch besser in Höhenballons stattfinden, und zweitens werden interessante Treffer dabei noch viel seltener erzielt. Eine Alphastrahlenquelle sendet auf kleinen Raum sehr viele Teilchen aus. Man kann diese Strahlenquelle auch willkürlich in die Nähe der verschiedensten Stoffe bringen und so beliebige Elemente mit Alphateilchen beschießen. Von der kosmischen Strahlung gibt es nicht so viele hoch energiereiche Teilchen auf kleinstem Raum, zumindest nicht in den dem Menschen ohne weiteres zugänglichen Gebieten des Kosmos. Mit



1 Äußerer, 2 Innerer Strahlungsgürtel der Erde. In den die Erde umgebenden Strahlungsgürteln bewegen sich atomare Teilchen mit hoher Energie auf gesetzmäßigen Bahnen

Hilfe der künstlichen Erdsatelliten wurde zwar inzwischen festgestellt, daß in Höhen oberhalb etwa 1000 km über dem Erdboden sogenannte Strahlungsgürtel im Weltraum vorhanden sind. Sie bestehen aus unvorstellbar vielen, energiereichen Teilchen, die vom Magnetfeld der Erde eingefangen und auf bestimmte Bahnen gezwungen werden. So interessant diese Feststellung auch ist, kernphysikalische Experimente kann man mit diesen von der Natur kostenlos gelieferten energiereichen Teilchen kaum anstellen.

In den Höhen, die dem Ballon zugänglich sind, gibt es nur verhältnismäßig wenig Teilchen der primären kosmischen Strahlung mit höchsten Energien. Dadurch ist das Erzielen eines interessanten Treffers ein Zufall, der noch seltener vorkommt als die Umwandlung von Stickstoffkernen durch Alphateilchen. Es kostet deshalb ungewöhnlich viel Arbeit, die vielen fotografischen Materialien, die man mit Ballons in die Höhe geschickt hat, auf interessante Spuren durchzusehen. Die weitaus meisten Spuren zeigen den Wissenschaftlern heute nichts Neues mehr. Ein noch unbekanntes und interessantes Ereignis unter den zahlreichen Spuren zu entdecken ist ungefähr so schwer, wie eine Stecknadel in einem Heuschaber zu finden.

Es kam deshalb darauf an, einerseits die Erforschung der primären kosmischen Strahlung weiter zu betreiben, sich andererseits aber nicht allein darauf zu beschränken, sondern nach einer Möglichkeit zu suchen, künstlich Geschosse zu erzeugen, die erstens sehr viel energiereicher als Alphateilchen sind und von denen zweitens sehr viele Teilchen auf engstem Raum gebündelt sind. Denn je mehr Teilchen eine solche Salve enthält und je enger sie auf kleinstem Raum konzentriert sind, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, möglichst viele Atomkerne zu treffen und dabei interessante Umwandlungen zu erzielen.

Ziel: Lichtgeschwindigkeit

Die Lösung dieser Aufgabe entwickelte sich zu einem eigenen großen Zweig der kernphysikalischen Forschung und Gerätetechnik. Man bezeichnet diese Geräte als Teilchenbeschleuniger. Sie sind Vorrichtungen, in denen elektrisch geladene Teilchen künstlich auf enorme Geschwindigkeiten gebracht werden und folglich eine enorme Bewegungsenergie erhalten. Mit den größten Teilchen-

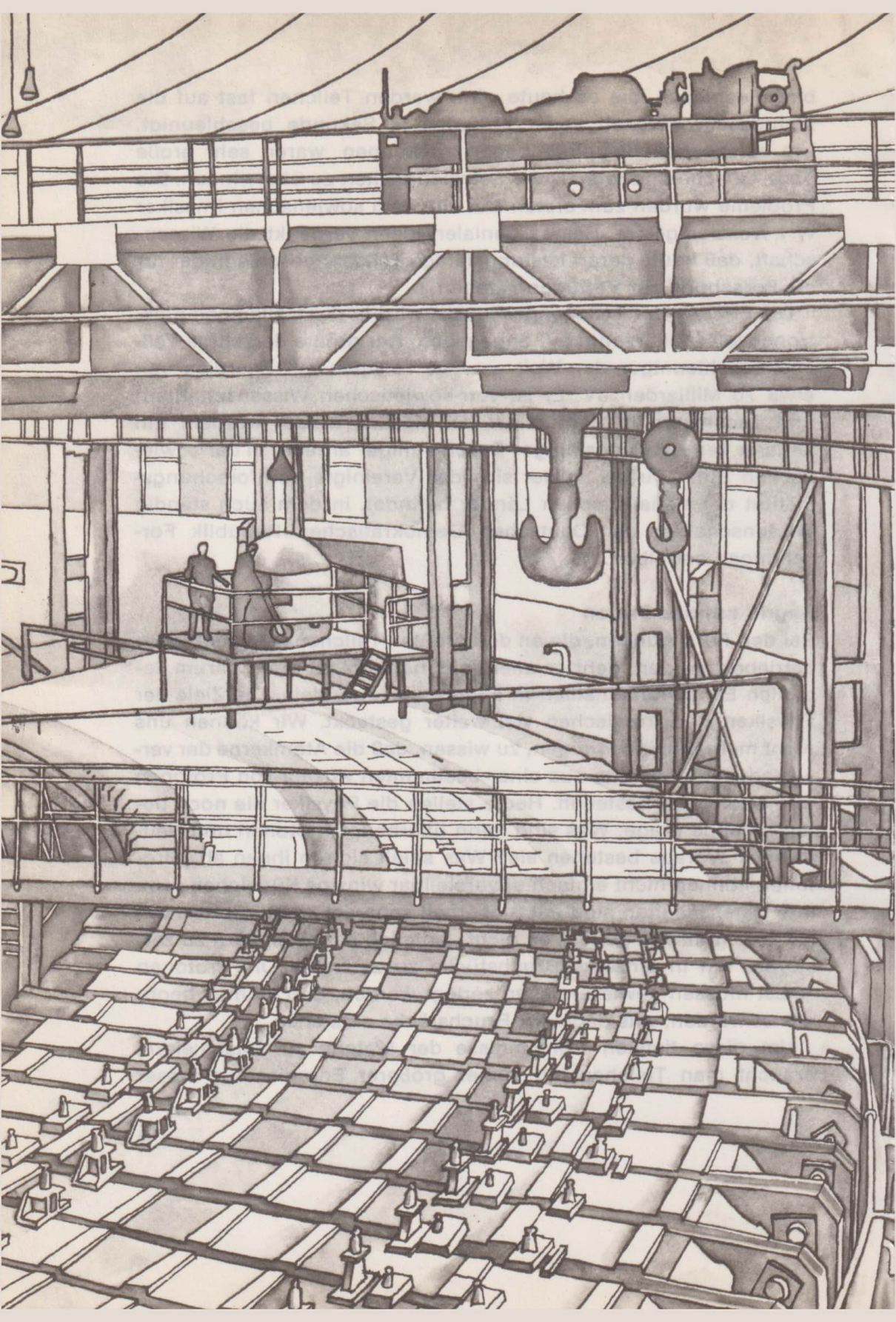
beschleunigern, die es heute gibt, werden Teilchen fast auf die Lichtgeschwindigkeit von 300 000 km je Sekunde beschleunigt. Um solche Beschleuniger bauen zu können, waren sehr große physikalische und technische Schwierigkeiten zu überwinden. Die Probleme wurden zum ersten Mal von dem sowjetischen Physiker W. I. Wexler gelöst. Seinen genialen Ideen verdankt die Wissenschaft, daß heute derart leistungsfähige Teilchenbeschleuniger für die Forschung zur Verfügung stehen.

Die Energie der Teilchengeschosse wird in der Maßeinheit Elektronenvolt (Abkürzung: eV) angegeben. Der größte derzeitige Teilchenbeschleuniger der Welt erzeugt Teilchen mit Energien von etwa 70 Milliarden eV. Er ist von sowjetischen Wissenschaftlern und Technikern in Serpuchow bei Moskau erbaut worden. Ein anderer sehr leistungsfähiger Beschleuniger arbeitet in der sowjetischen Stadt Dubna, in der sich das Vereinigte Kernforschungsinstitut der sozialistischen Länder befindet, in dem auch ständig Wissenschaftler der Deutschen Demokratischen Republik Forschungen betreiben.

Angriff auf das Proton

Bei den Forschungen, die an den größten Teilchenbeschleunigern betrieben werden, geht es allerdings heute nicht mehr darum, lediglich Elemente künstlich in andere umzuwandeln. Die Ziele der Physiker sind inzwischen viel weiter gesteckt. Wir können uns nicht mehr damit begnügen, zu wissen, daß die Atomkerne der verschiedenen Elemente aus einer bestimmten Anzahl von Protonen und Neutronen bestehen. Heute stellen die Physiker die noch tiefergreifende Frage: Was sind denn überhaupt Protonen und Neutronen? Woraus bestehen sie? Was spielt sich in ihnen ab? Protonen können nicht einfach unvorstellbar winzige Kügelchen sein. Ihre Eigenschaften sind mit Sicherheit sehr viel komplizierter. Um sie zu enträtseln, genügt es nicht, lediglich den Atomkern zu zerstören, ihn in einzelne Bruchstücke zu zerlegen. Die Protonen selbst müssen gewissermaßen zerlegt werden, und es muß beobachtet werden, was dabei für Bruchstücke entstehen.

Um diese tiefsten Geheimnisse der Materie zu entschleiern, braucht man Teilchen mit immer größerer Energie. Aus dieser



Notwendigkeit entstanden die riesigen Beschleuniger, die – ohne die vielen Hilfseinrichtungen gerechnet – Durchmesser von etwa einem halben Kilometer haben. Um sie in Betrieb zu halten, sind so viel Menschen erforderlich, daß sich eine eigene kleine Stadt in der Nähe des Beschleunigers entwickelt, in der die Forscher, Ingenieure, Techniker, die Arbeiter und Verwaltungsangestellten wohnen.

Sogar ein eigenes Kraftwerk ist für einen großen Beschleuniger erforderlich, denn er verbraucht Unmengen elektrischer Leistung. Daß die Forschungen, die so bescheiden in dem alten baufälligen Schuppen der Curies begannen, einmal derartige Ausmaße annehmen würden, konnte um die Jahrhundertwende kein Mensch ahnen. Ist es nicht merkwürdig, daß ausgerechnet für die Erforschung der kleinsten Teilchen der Materie die größten Maschinen benötigt werden, die es überhaupt gibt? Sie übertreffen bei weitem jede andere Maschine, selbst die Förderbrücken der Braunkohlentagebaue, an Größe, Kompliziertheit und Kostspieligkeit.

In der Gefahrenzone

„Achtung! Nicht stehenbleiben! Gefahrenzone!“ – Auf dem Wege zu dem „Herz“ einer großen Beschleunigungsanlage, das den eigentlichen Beschleunigungsring birgt, begegnen wir solchen Schildern. Und das, obwohl wir uns noch gar nicht in dem riesigen Gebäude befinden, in dessen „Keller“ der Teilchenbeschleuniger steht. Viele Meter dicke Betonwände trennen uns noch von ihm. Aber wenn er in Betrieb ist, soll man auch hier draußen nicht stehenbleiben. Denn der Beschleuniger erzeugt Teilchen von so hoher Energie, wie sie selbst in der kosmischen Primärstrahlung bereits sensationelle Seltenheiten bilden. So wie einzelne der primären kosmischen Strahlenteilchen höchster Energie noch durch mehrere hundert Meter Erdoberfläche bis in tiefe Bergwerksschächte gelangen, durchschlagen auch einige der künstlich beschleunigten Teilchen die meterdicken Betonwände und dringen ins Freie. Da aber in dem Beschleuniger auf engstem Raum sehr viel mehr solcher Teilchen erzeugt werden als in der primären kosmischen Strahlung auf gleichem Raum vorhanden sind, dringen auch entsprechend mehr Teilchen durch die Wände der Anlage nach außen.

Deshalb wäre es gefährlich, sich hier aufzuhalten, wenn der Beschleuniger in Betrieb ist. Zwar würde man keines der Teilchenschosse auf der Haut oder im Körper spüren. Aber man könnte sich Erkrankungen innerer Organe zuziehen.

Hier hat der Mensch also buchstäblich den Weltraum auf die Erde herabgeholt, indem er die energiereiche Strahlung, die von Natur aus nur durch Vorgänge im Kosmos erzeugt wird, künstlich nachahmt. Dabei übertrifft der Mensch jedoch die Natur insofern, als es ihm gelingt, sehr viel mehr solcher Teilchen auf engstem Raum zu erzeugen und zu konzentrieren.

Das Gebäude, in dem der Beschleuniger selbst steht, darf während des Betriebs selbstverständlich nicht von Menschen betreten werden. Die ganze Anlage arbeitet ferngesteuert. Ein kompliziertes System von Licht- und Tonsignalen und automatischen Blockierungen ist hier installiert. Sie verhindern, daß der Beschleuniger eingeschaltet werden kann, wenn sich irgendwo in der Anlage noch ein Mensch befindet. Sie verhindern aber auch, daß ein Mensch die Anlage betritt, während sie in Betrieb ist. Alle Zugänge werden automatisch blockiert. Die Türen lassen sich nicht mehr öffnen.

Im Keller der Titanen

Aber heute ist der Beschleuniger nicht in Betrieb, und wir dürfen deshalb in den gigantischen Tunnel hinabsteigen, in dem die „große Maschine“ steht. Der kreisförmige Tunnel liegt unter der Erde. Der Umfang des Kreises beträgt anderthalb Kilometer. Den Tunnel durchzieht eine ebenfalls kreisförmige große Röhre aus rostfreiem Stahl. Auch dieses Beschleunigungsrohr hat anderthalb Kilometer Umfang. Das Rohr selbst sieht man aber nicht. Es ist von riesigen Elektromagneten und von Geräten umgeben, die die Fachleute Beschleunigungsstationen nennen. 120 Elektromagnete und 54 Beschleunigungsstationen sind entlang dem Ringrohr verteilt. Außerdem sind in kurzen Abständen viele Hochvakuumumpumpen angeordnet. Sie pumpen ständig feinste Reste von Luft und anderen Gasen aus dem Rohr ab. In seinem Innern muß das bestmögliche Vakuum bestehen, das man technisch überhaupt erzeugen kann. Weniger als ein Milliardstel des normalen Luftdrucks herrscht in dem riesigen Rohr. Alle Geräte haben hier

riesige Dimensionen. Jeder der Magneten ist viele Tonnen schwer und mehrere Meter groß. Aber was geschieht in dem Beschleuniger eigentlich, wenn er in Betrieb ist?

Es werden Protonen, also Wasserstoffkerne, beschleunigt. Wie kann man das bewerkstelligen? Wir wissen schon, daß Protonen und auch alle anderen atomaren Teilchen viel zu klein sind, um sie einzeln fassen zu können. Folglich kann man sie auch nicht wie Gewehrketten in einen Lauf stecken und durch Pulver oder Luftdruck beschleunigen. Selbst wenn das möglich wäre, könnte man den Protonen dadurch nur Beschleunigungen erteilen, die lächerlich gering sind. Eine Gewehrketten erreicht vielleicht anderthalb Kilometer Geschwindigkeit je Sekunde, die Protonen aber sollen auf fast 300 000 km/s beschleunigt werden.

Man kann Gegenstände aber auch beschleunigen, ohne sie direkt zu berühren. Nähern wir uns einer Stahlketten, die ruhig auf dem Tisch liegt, mit einem Magneten, so setzt sie sich in Bewegung und rollt mit zunehmender Geschwindigkeit auf den Magneten zu. Aber nicht nur durch magnetische Kraft kann man Gegenstände in Bewegung setzen und beschleunigen, sondern auch durch elektrische Kraftfelder. Voraussetzung dafür ist, daß die zu beschleunigenden Teilchen elektrisch geladen sind. Das ist bei den Protonen der Fall. Sie tragen eine positive Elementarladung.

Von Hochspannung gepeitscht

Bringt man Protonen in ein elektrisches Kraftfeld, also zwischen eine positive und negative Elektrode, und legt eine hohe elektrische Spannung an, so setzen sich die positiv geladenen Protonen in Richtung auf die negative Elektrode in Bewegung. Ihre Geschwindigkeit nimmt dabei ständig zu, und die Bewegungsenergie, mit der sie auf die negative Elektrode prallen, ist um so größer, je höher die angelegte elektrische Spannung ist. Eine Voraussetzung ist freilich noch zu erfüllen: Der Beschleunigungsvorgang muß im Hochvakuum stattfinden. Denn sonst stoßen die beschleunigten Teilchen schon nach kurzer Wegstrecke mit Atomen und Molekülen von Luftgasen zusammen und werden dadurch wieder abgebremst. Der Zweck der zahlreichen Vakuumpumpen ist damit schon klar.

Die erwähnten Beschleunigungsstationen liefern die hohe elek-

trische Spannung und erzeugen somit die elektrischen Kraftfelder, die die Protonen beschleunigen. Es ist aber nicht möglich, den Protonen auf einmal ihre hohe Geschwindigkeit zu geben. Vielmehr erfolgt die Beschleunigung stoßweise, „auf Raten“. Die Protonen durchlaufen viele Male elektrische Kraftfelder und bekommen dabei jedesmal einen neuen „Schubs“, der ihre Geschwindigkeit bzw. Energie weiter erhöht. Bevor die Protonen die volle Energie erreicht haben, laufen sie millionenmal durch das große Ringrohr! Aber sie würden sich nicht von selbst kreisförmig durch das Rohr bewegen, sondern geradeaus fliegen wie jeder andere in einer bestimmten Richtung beschleunigte Körper auch.

Aber man kann ja bewegte elektrische Ladungsträger durch ein Magnetfeld ablenken und auf eine Kreisbahn zwingen! Das besorgen die 120 Elektromagnete, die entlang dem Ringrohr verteilt sind. Sie erzeugen so starke Magnetfelder, daß die beschleunigten Protonen genau auf einer Kreisbahn gehalten werden. Die Techniker mußten, um diese Forderung zu erfüllen, höchste Präzisionsarbeit leisten und die viele Tonnen schweren und mehrere Meter großen Elektromagnete auf Tausendstelmillimeter genau ausgerichtet montieren. Das Fundament, auf dem die ganze Anlage steht, muß so fest sein, daß es nicht mit der Zeit nachgibt und dadurch die Lage der Magnete verändert wird.

Wenn wir uns den ganzen Vorgang auf sehr einfache Weise veranschaulichen wollen, so könnten wir folgenden Vergleich dafür heranziehen: Die Protonen bewegen sich im Beschleuniger wie Zirkuspferde in einer Arena. Beim Durchlaufen jeder Beschleunigungsstation erhalten sie immer wieder einen Peitschenhieb, der sie zu noch etwas höherem Tempo antreibt. Die Elektromagneten halten die Pferde dabei am Zaum, so daß sie nicht aus der Kreisbahn ausbrechen, sondern sie mit äußerster Genauigkeit einhalten.

Am Zaum des Magnetfeldes

Beim Teilchenbeschleuniger ist das alles freilich viel schwieriger. Die Zentrifugalkraft, mit der die Protonen aus der Kreisbahn auszuweichen bestrebt sind, wird mit wachsender Geschwindigkeit immer größer. Denn der „Impuls“ der Teilchen ist gleich dem Produkt aus Masse und Geschwindigkeit. Wächst die Geschwindig-



keit, so wird der Impuls und damit die Kraft, die die Teilchen aus der gekrümmten in eine geradlinige Bahn zwingt, größer. Um die Teilchen trotzdem auf eine gleichbleibende Kreisbahn zu zwingen, darf die Stärke des elektromagnetischen Feldes daher nicht gleich bleiben. Sie muß sich genau in dem Maße steigern, in dem die Geschwindigkeit der Teilchen zunimmt.

Bei der Beschleunigung von Teilchen auf sehr hohe Energien kommt aber noch ein weiteres Problem hinzu, das Albert Einstein durch seine Relativitätstheorie aufdeckte. Aus der Theorie folgt eine Konsequenz, die merkwürdig und unglaublich erscheinen könnte, aber trotzdem Tatsache ist: Wenn sich ein Körper schneller bewegt, ist seine Masse größer, als wenn er sich gar nicht oder nur langsam bewegt. Das bedeutet praktisch: Ein Pkw ist während der Fahrt schwerer als im Stillstand. Die Differenz seiner Masse bei der Fahrt und im Stillstand ist allerdings bei Geschwindigkeiten, die im Verhältnis zur Lichtgeschwindigkeit klein sind,

derart gering, daß wir sie für technische Berechnungen überhaupt nicht zu berücksichtigen brauchen. Da alle Geschwindigkeiten, die man mit dem Auto und Flugzeug und auch mit Raketen erreichen kann, im Verhältnis zur Lichtgeschwindigkeit klein sind – selbst ein künstlicher Erdsatellit erreicht ja „nur“ etwa 8 km/s! –, ist die Differenz der Masse der Körper in Ruhe und in Bewegung unmeßbar klein und wirkt sich überhaupt nicht aus.

Anders verhält es sich aber bei Geschwindigkeiten, die der des Lichts nahekommen, wie es bei den beschleunigten Protonen der Fall ist. Hier wird der Zuwachs der Masse der Teilchen sehr groß. Auch das muß bei der Bemessung der Stärke des Magnetfeldes genau berücksichtigt werden. Schneller, als ein Mensch denken und schalten kann, muß sich die Stärke des Magnetfeldes in gesetzmäßiger Weise ändern, damit in jedem Augenblick seine ablenkende Kraft auf die Protonen gerade so groß ist, daß sie immer genau auf der gleichen Kreisbahn bleiben. Denn wenn sie von ihrem Kurs abkämen, würden sie nutzlos gegen die Wände des stählernen Rohrs prallen.

Man versuche, sich einmal vorzustellen, wie genau die Berechnungen und wie präzise die Technik sein müssen, um unsichtbare, winzige Teilchen auf einem rasenden Flug über viele Millionen Kilometer so genau auf Kurs zu halten, daß sie keinen Zentimeter zur Seite abweichen! Millionen Kilometer legen die Teilchen während des Beschleunigungsvorgangs zurück, weil sie millionenmal den großen Ring durchlaufen und jede Runde anderthalb Kilometer lang ist.

Nicht weniger kompliziert ist das Problem, den Protonen bei jedem Durchlauf durch eine der Beschleunigungsstationen genau „nach Fahrplan“ einen neuen „Schubs“ zu geben. Bis auf die milliardstel Sekunde genau müssen die elektrischen Spannungstöße einsetzen, die das elektrische Kraftfeld erzeugen, das die Protonen weiter beschleunigt. Dabei dürfen die Zeitabstände der Spannungstöße ebenfalls nicht gleich bleiben. Denn da die Teilchen immer schneller werden, durchlaufen sie die Strecke von einer Beschleunigungsstation bis zur nächsten in immer kürzer werdenden Abständen. Kommt der elektrische „Peitschenschlag“ zur falschen Zeit, so geht er ins Leere. Die Protonen bekommen

dadurch nicht die vorgesehene Beschleunigung, treffen daher „mit Verspätung“ an der nächsten Beschleunigungsstation ein und geraten dadurch mit den beschleunigenden Kraftfeldern immer mehr außer Tritt. Damit haben wir noch längst nicht alle Probleme, die beim Bau und Betrieb eines großen Teilchenbeschleunigers auftreten, erwähnt.

Der Zoo der Elementarteilchen

Was geschieht nun mit den Protonen, wenn sie nach Millionen Umläufen durch das Ringrohr die vorgeschriebene höchste Energie erreicht haben? Sie werden gewissermaßen „freigelassen“, also von dem Zwang befreit, unter dem Einfluß eines Magnetfeldes auf einer Kreisbahn zu bleiben. Durch eine Öffnung in dem großen ringförmigen Rohr treten sie aus dem Kreis aus und bewegen sich jetzt geradeaus. Auch dabei bleiben sie freilich in einem Hochvakuum, bis sie auf das „Target“ (wörtlich übersetzt: Zielscheibe) treffen, das die Substanzen enthält, auf die sie einwirken sollen.

Bei dem Zusammenstoß mit den Atomkernen dieser Substanzen entstehen eine Vielzahl interessanter „Trümmer“. Doch dürfen wir das Wort Zusammenstoß dabei nicht im wörtlichen Sinne unserer Umgangssprache verstehen. Die Wissenschaftler bezeichnen den Prozeß, den wir uns durch das Wort Zusammenstoß veranschaulichen, allgemeiner und neutraler als „Wechselwirkung“. Bei der Wechselwirkung der hochbeschleunigten Protonen mit anderer Materie entstehen als „Bruchstücke“ der Atomkerne nicht etwa bloß jene Neutronen und Protonen, die wir als Bestandteile der Atomkerne bereits kennen. Vielmehr gehen auch die Protonen und Neutronen selbst in „Trümmer“. Dabei entstehen viele Arten ganz neuer Teilchen mit verschiedenen Eigenschaften: elektrisch positiv und negativ geladene, elektrisch neutrale, mit verschiedener Masse, die größer als die von Elektronen, aber nicht so groß wie die von Protonen und Neutronen ist. Es entstehen auch Teilchen, die sogar eine größere Masse als Protonen und Neutronen haben. Die Physiker sagen scherzhaft, es gäbe einen ganzen „Zoo“ verschiedener Teilchen, so wie es viele verschiedene Tierarten gibt. Man kennt bisher schon über 200 Arten von Teilchen, die bei der Wechselwirkung der Materie mit Teilchen höchster Energien ent-

stehen. Man bezeichnet alle diese Teilchen sowie auch die uns schon bekannten Protonen, Neutronen und Elektronen zusammenfassend als Elementarteilchen.

Daß bei der Wechselwirkung hoch energiereicher Teilchengeschosse mit anderen Kernen als „Trümmer“ nicht nur die bekannten „Standard“-Bausteine der Atomkerne, Protonen und Neutronen, sondern viele weitere Teilchenarten entstehen, beweist einmal mehr, daß Protonen und Neutronen auch noch nicht die kleinsten und nicht weiter zerlegbaren Teilchen der Materie sein können. Vielmehr sind auch die Protonen und Neutronen offensichtlich sehr komplizierte Gebilde. Doch weiß man noch nicht, wie wir uns ihre innere Beschaffenheit und ihre „Lebensgesetze“ vorstellen sollen. So viel steht aber schon fest: Wir können die Beschaffenheit und die Vorgänge, die sich in den Elementarteilchen abspielen und die zu ihrer Umwandlung führen, nicht mehr durch Vergleiche mit Vorgängen aus der uns bekannten Welt der großen, sichtbaren Körper erklären. In dieser Welt der kleinsten Teilchen der Materie herrschen ganz andere Gesetze, die man nur in abstrakten mathematischen Formeln ausdrücken kann.

Lebensdauer: 10^{-23} Sekunden

Noch eine merkwürdige Eigenschaft haben die meisten der Elementarteilchen, die bei der Wechselwirkung mit Teilchengeschossen höchster Energien entstehen: Sie existieren nur für eine uns unvorstellbar kurze Zeit. Bei manchen Teilchen beträgt sie millionstel Sekunden, bei anderen nur zehnmilliardstel Sekunden, und es gibt sogar Teilchen, die nur 100000mal kürzer existieren, als der milliardstel Teil einer Milliardstelsekunde dauert. Nach dieser Zeit wandeln sie sich bereits wieder in andere Teilchen um. Welch eine bewundernswerte Leistung der Meßtechnik gehört schon allein dazu, derart kurzlebige Teilchen zu beobachten, ihre Eigenschaften und ihre Lebensdauer zu bestimmen.

„Langlebig“ sind nur Protonen, Neutronen und Elektronen. Neutronen haben aber auch nur eine mittlere Lebensdauer von 1013 Sekunden, also von knapp 17 Minuten. Dann zerfallen sie in ein Proton und ein Elektron, wobei noch ein ebenfalls langlebiges Teilchen ausgestrahlt wird, das Antineutrino genannt wird.

Woher wissen die Forscher, welche Prozesse sich bei der Wechselwirkung der hoch energiereichen Protonen mit den Kernbausteinen abspielen? – Dort, wo der Teilchenstrahl aus dem Kreisring austritt, schließt sich ein großer Experimentiersaal an. Er ist etwa so groß wie eine Sporthalle und mißt 90 m im Durchmesser. In langen Reihen stehen hier die kompliziertesten Geräte und Meßeinrichtungen. Dazu gehört z.B. eine Blasenkammer. Man sieht in ihr ein irrlichterndes Spiel von beleuchteten Bläschen Spuren vor einem dunklen Hintergrund. In jeder Sekunde wechselt die Szene. Immer wieder bilden sich neue Kombinationen von Lichtspuren. Sie verlaufen teils geradlinig, teils gekrümmt. Oft strahlen von einem Punkt ganze Kaskaden von Lichtspuren aus. Und unaufhörlich klicken die Verschlüsse von Kameras, die in jedem Augenblick das Spurenbild stereoskopisch auf fotografischem Film festhalten, so daß man auf Grund der Aufnahmen später alle Teilchenspuren genau analysieren kann.

Aus sorgfältigen Messungen und genauen Berechnungen wird ermittelt, welche Arten von Teilchen die verschiedenen Spuren hervorgerufen haben. Nach Schätzungen von Fachleuten werden in den Forschungszentren der ganzen Erde in jedem Jahr etwa 10 Millionen fotografische Aufnahmen von Kernspuren angefertigt. Weil ihre Auswertung so viel Arbeit bereitet, daß sie von den zur Verfügung stehenden Fachkräften gar nicht bewältigt werden kann, ist man in neuester Zeit zu noch komplizierteren Methoden übergegangen. Dabei erzeugen die energiereichen Teilchen direkt elektrische Daten, mit denen ein Computer, also eine elektronische Datenverarbeitungsanlage, „gefüttert“ wird, die sogleich alle für die Auswertung der Teilchenbahnen erforderlichen Berechnungen automatisch vornimmt.

Der derzeit größte Teilchenbeschleuniger der Welt in Serpuchow erzeugt Protonen von 70 Milliarden eV Energie. Aber damit sind die Wissenschaftler noch immer nicht zufrieden. Sie brauchen Teilchen noch höherer Energie, um ihre Forschungen fortsetzen und zu neuen Erkenntnissen vorstoßen zu können.

Supermagnete durch Superkälte

Bisher konnte die Beschleunigungsleistung nur dadurch erhöht werden, daß man das Ringrohr immer größer baute. Warum eigentlich? Ganz einfach deshalb, weil mit der wachsenden Energie der Teilchen auch die Zentrifugalkraft, mit der sie aus der Kreisbahn auszubrechen bestrebt sind, größer wird. Man muß deshalb entweder die Kraft der Magnetfelder, die die Teilchen auf die Kreisbahn zwingen, verstärken oder, falls das nicht mehr möglich ist, die Kreisbahn selbst größer machen. So kam es, daß die Beschleuniger immer gigantischere Ausmaße erhielten. Aber wie lange kann das noch so weitergehen? Je größer die Anlage, desto teurer wird sie, und schließlich kommt man an eine Grenze, von der an eine so große Anlage auch nicht mehr mit der Tausendstelmillimeter-Genauigkeit aufzubauen ist, die für das reibungslose Funktionieren erforderlich ist. Dieser Grenze ist man schon sehr nahe. Doch haben die Wissenschaftler bereits den Ausweg gefunden.

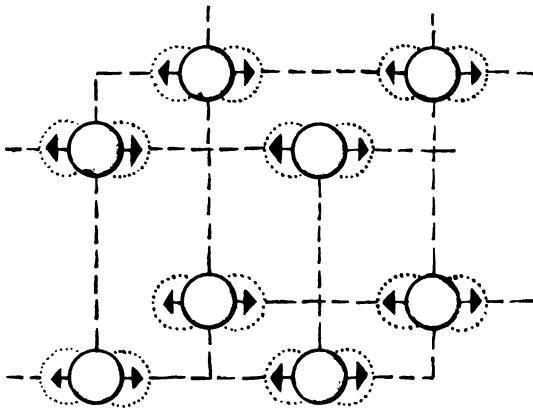
Die Sowjetunion plant künftige Beschleuniger mit noch höherer Leistung, die dennoch sehr viel kleiner als die bisherigen sein werden. Dabei wird man die eigentümliche Naturerscheinung ausnutzen, daß einige Metalle bei Abkühlung auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt, der $-273,15^{\circ}\text{C}$ entspricht, supraleitend werden und praktisch keinen elektrischen Widerstand mehr haben. Der elektrische Widerstand eines Leiters ist gleich dem Verhältnis der am Leiter liegenden Spannung zur Stärke des durch ihn fließenden Stromes. Daher muß die Stromstärke bei Verringerung des elektrischen Widerstands und damit auch die Kraft des elektromagnetischen Feldes zunehmen. Durch die stärkeren Magnetfelder aber wird es möglich, die rasenden Teilchen auf eine viel engere Kreisbahn zu zwingen. Folglich kann die ganze Anlage sehr viel kleiner gebaut werden. Vielleicht werden die Forschungsergebnisse, die man mit diesen Beschleunigern einmal erzielen wird, der Menschheit ganz neue Wege zur Energiegewinnung weisen. Es ist möglich, daß die heutigen Kernkraftwerke, in denen Energie durch Spaltung von Uran- und Plutoniumkernen gewonnen wird, den Menschen der nächsten Jahrhunderte so primitiv erscheinen werden wie uns heute lebenden Menschen die erste Dampfmaschine, die James Watt im Jahre 1778 baute.

Doch nach diesem Abstecher in die modernste Forschung, deren praktische Nutzanwendungen noch in der Zukunft liegen, zurück zu dem Wege, der zur heute möglichen Form der Gewinnung von Energie aus Atomkernen führte! Die Teilchenbeschleuniger haben dazu nicht direkt beigetragen. Es waren ganz andere und vergleichsweise einfache Experimente, die den Weg zur Erschließung der Kernenergie wiesen.

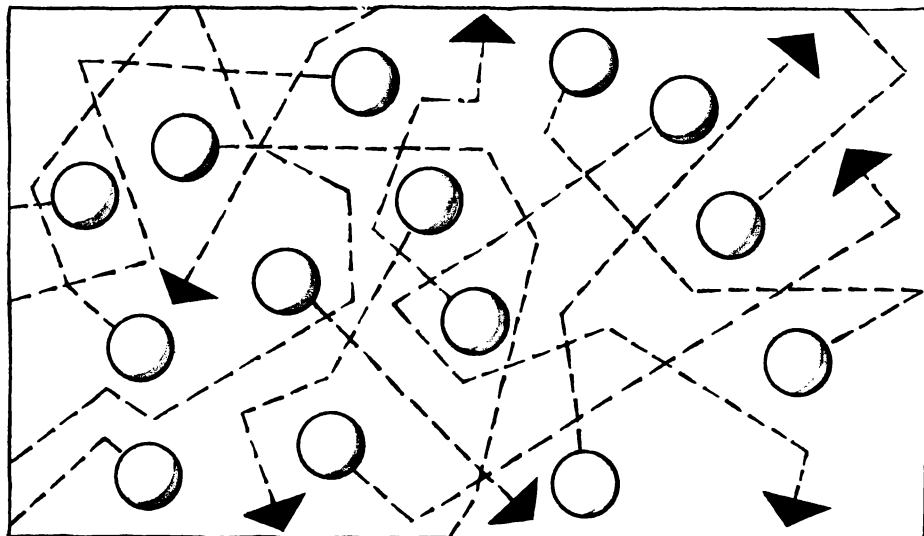
An der Schwelle der Superenergie

Der Schriftsteller H.G.Wells hatte in dem utopischen Roman „Die Welt – entfesselt“ für das Jahr 1933 die Erschließung der im Uran schlummernden Energie beschrieben. Dadurch sollte der Menschheit eine gewaltige neue Energiequelle erschlossen werden. Der Gedanke hatte einen realen Kern. Denn bei jedem radioaktiven Zerfallsprozeß wird Energie frei. Sie steckt in der rasenden Bewegung des Teilchens, das bei dem Zerfallsprozeß von dem radioaktiven Atomkern ausgestrahlt wird. Denn ein energiereiches Alpha- oder Betateilchen „stößt“ auf seinem Wege viele Atome und Moleküle zu gleichfalls schneller Bewegung an.

Seine Bewegungsenergie verteilt sich dabei allmählich auf andere Atome und Moleküle. Sie schwingen schneller. Das aber ist gleichbedeutend damit, daß sich der Stoff erwärmt. Denn Wärme ist eine Energieform, die auf der Bewegung von Atomen und Molekülen beruht. Je schneller sie sich bewegen, desto wärmer ist ein Stoff. In heißem Wasser bewegen sich die Moleküle schneller als in kaltem, in warmer Luft schneller als in kalter usw.



Schema der Wärmebewegung von Molekülen. In festen Stoffen schwingen die Teilchen um eine Mittelpunktslage hin und her. In Gasen (Seite 153) bewegen sie sich chaotisch in zufälligen Richtungen, stoßen dabei aufeinander und werden dadurch in andere Richtungen abgelenkt. An jeder Knickstelle der gestrichelten Linien hat ein Zusammenstoß mit einem anderen Gasteilchen stattgefunden



Stoffe, die sich selber heizen

Schon die beiden Curies hatten in ihren Versuchen festgestellt, daß sich Lösungen, die stark strahlende, radioaktive Substanzen enthalten, von selbst erwärmen, sich also nicht auf die niedrigere Temperatur der umgebenden Luft abkühlen, wie es normalerweise der Fall ist. Die Energie der von den radioaktiven Stoffen ausgesandten Strahlen heizt die Flüssigkeit ständig neu auf.

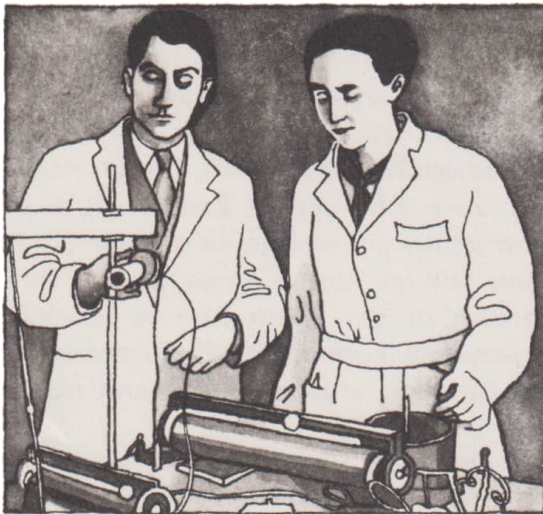
Wieviel Wärme dabei in einer bestimmten Zeiteinheit z. B. in einer Stunde, frei wird, das hängt außer von der Energie der Strahlenteilchen aber auch von der Zahl der Strahlen ab, die in der Stunde ausgesandt werden. Radioaktive Stoffe mit kurzer Halbwertszeit senden zwar *relativ* viele Strahlen je Zeiteinheit aus. Relativ bedeutet hierbei: im Verhältnis zur Menge, in der der Stoff überhaupt vorhanden ist. Eine Million Atome eines Stoffes mit einer HWZ von 1 Stunde senden in der einen Stunde 500000 Strahlen aus. Aber als Energiequelle kommt der Stoff trotzdem nicht in Frage. Denn 500000 Strahlen ergeben insgesamt noch keine große Energiemenge.

Nun wissen wir schon, daß die Mengen, in denen die verschiedenen radioaktiven Stoffe der Zerfallsreihe des Urans in der Natur vorhanden sind, umgekehrt proportional der Länge ihrer Halb-

wertszeiten sind. Das heißt: Gerade von den Stoffen mit kurzen HWZ, die relativ viel Strahlen je Zeiteinheit aussenden, gibt es nur winzige Mengen. Große Mengen gibt es dagegen von den Stoffen mit langer HWZ, vor allem vom Uran selbst. Aber da die HWZ des Urans 4,56 Milliarden Jahre beträgt, verteilt sich die Strahlungsenergie über einen zu langen Zeitraum, um sie nutzen zu können. Innerhalb kurzer Zeit werden zu wenige Strahlen ausgesandt, und man erhält daher z. B. innerhalb einer Stunde durch den radioaktiven Zerfall des Urans nur sehr wenig Energie. Das Uran erwärmt sich nicht einmal merklich. Als energieliefernder Stoff kommt es in dieser Form daher überhaupt nicht in Betracht.

Das würde sich aber ändern, wenn man künstlich bewerkstelligen könnte, daß vom Uran nicht erst in 4,56 Milliarden Jahren die Hälfte zerfällt, sondern sehr viel schneller, wenn man also die Zerfallsrate, d.h. die Anzahl der pro Zeiteinheit zerfallenden Kerne künstlich erhöhen könnte. Dann erhielte man innerhalb kurzer Zeit viele Strahlen und dementsprechend viel Energie. Eine solche Erhöhung der Zerfallsrate des Urans hatte der utopische Roman für das Jahr 1933 vorausgesagt.

Aber der Romanschriftsteller irrte. Nichts dergleichen geschah.



Das Forscherehepaar Frédéric und Irène Joliot-Curie

Noch standen die Wissenschaftler vor der Atomkernenergie wie vor einem festverschlossenen Tor, für das es keinen Schlüssel gab. Einstweilen behielt Rutherford völlig recht mit seiner Behauptung, man werde die Energie der Atomkerne niemals anzapfen und praktisch nutzen können.

Doch etwas anderes geschah im Jahre 1934, was die Wissenschaftler auf eine erste Fährte bei der Suche zum Schlüssel der Kernenergie brachte. Das große wissenschaftliche Ereignis vollzog sich wieder in Paris, wo einst auch die Radioaktivität entdeckt worden war. Und wieder einmal war es ein Forscherehepaar Curie, das die neue Fährte fand, diesmal aber die Curies der nächsten Generation.

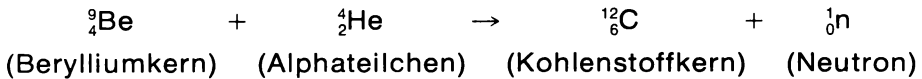
Marie Curies Tochter Irène hatte mit gleichem Eifer und gleicher Leidenschaft Physik studiert und wie ihre Mutter die Forschung zu ihrer Lebensaufgabe erwählt. Auch sie fand bei gemeinsamer Arbeit durch gleich gerichtete Interessen ihren Lebensgefährten, den begabten jungen Physiker und Chemiker Dr. Frédéric Joliot. Weil er und seine Frau Irène die großen wissenschaftlichen Leistungen von Marie und Pierre Curie würdig fortsetzten, nahm er später den Namen der traditionsreichen Familie an: Joliot-Curie.

Die Neutronenhaubitze greift ein

Irène und Frédéric Joliot-Curie arbeiteten in dem Pariser Radium-Forschungsinstitut, das von Marie Curie geleitet wurde. Die beiden jungen Curies beschäftigten sich damals gerade mit der Fortsetzung der Experimente von James Chadwick, der zwei Jahre zuvor das Neutron entdeckt hatte. Chadwick gewann „freie Neutronen“, die also nicht mehr fest an einen Atomkern gebunden, sondern von dem Kern ausgeschleudert wurden, indem er das chemische Element Beryllium mit Alphateilchen beschoß, die vom Polonium ausgestrahlt werden. Wenn man Beryllium mit etwas Polonium in ein Glasröhrchen – Ampulle genannt – einschließt, so ist das eine sehr handliche kleine Neutronenquelle. Diese Polonium-Beryllium-Ampulle wird in der oft recht bildhaften Sprache der Physiker auch als „Neutronenhaubitze“ bezeichnet.

Jedesmal, wenn ein Alphateilchen in einen Berylliumkern eindringt, wandelt er sich in einen Kohlenstoffkern um, wobei ein

freies Neutron ausgesandt wird. Die Reaktionsgleichung dafür lautet:



Beryllium ist ein sehr leichtes Metall, das in Mineralien enthalten ist, die als Berylle bekannt sind. Sie gaben übrigens der Brille ihren Namen. Der römische Kaiser Nero besaß einen grünen Edelstein, der zu den Beryllen zählte. Zufällig war der Stein so geformt, daß er eine optische Wirkung hatte. Nero, der etwas schlecht sehen konnte, hielt sich daher gelegentlich den Beryll vor ein Auge, um besser zu sehen. Als viele Jahrhunderte später optische Linsen aus geschliffenem Glas als Sehhilfen in Gebrauch kamen, nannte man sie anknüpfend an Neros Beryll Brille.

Irène und Frédéric Joliot-Curie untersuchten die Frage, ob *nur* Beryllium oder auch andere Stoffe bei Beschuß mit Alphaeilchen Neutronen aussenden. Sie stellten bald fest, daß das auch bei Aluminium und Magnesium der Fall ist. Wenn man die Alphaeilchenquelle einen Zentimeter neben einem Aluminiumplättchen aufstellte, strahlte das Plättchen Neutronen aus. Da die Aussendung der Neutronen in dem Moment erfolgt, in dem die Alphaeilchen in die Aluminiumkerne eindringen, und sich diese dadurch umwandeln, dürften Neutronen freilich nur so lange ausgesandt werden, wie das Aluminiumplättchen unter dem Beschuß der Alphaeilchen liegt. Nimmt man die Alphaeilchenquelle weg oder entfernt das Aluminium von dem Alphastrahler, so müßte die Neutronenstrahlung des Aluminiums aufhören.

Doch in diesem Punkte gab es eines Tages wieder eine Überraschung. Ein Aluminiumplättchen, das schon zehn Minuten lang nicht mehr mit Alphaeilchen beschossen worden war, löste, als es in die Nähe eines Geigerzählers kam, ein merkliches Ticken aus. Was hatte das zu bedeuten? Aluminium ist von Natur aus kein radioaktives Element. War es plötzlich doch radioaktiv geworden? Und was waren es für Strahlen, die der Geigerzähler anzeigte?

Mit Hilfe der Nebelkammer stellten die Joliot-Curies fest, daß das Aluminium energiereiche Teilchen aussendet, die die gleiche Masse wie Elektronen haben, im Unterschied zu diesen aber nicht eine

negative, sondern eine positive Elementarladung tragen. Man nennt diese Teilchen deshalb Positronen und die Strahlen Beta-Plus-Strahlen, in der Formelsprache mit β^+ bezeichnet. Positronen waren der Wissenschaft damals schon bekannt. Bei der Erforschung der kosmischen Strahlung hatte man bereits 1932 Positronen entdeckt.

Die Positronenstrahlung des mit Alphateilchen beschossenen Aluminiumplättchens ließ nach demselben sogenannten Exponentialgesetz nach wie die Strahlung aller radioaktiven Substanzen. Man konnte deutlich feststellen, daß sich die Zahl der ausgestrahlten Teilchen alle $3\frac{1}{4}$ Minuten auf die Hälfte verringerte. Also hatte die Strahlung eine HWZ von 3 Minuten und 15 Sekunden. Die naheiegendste Erklärung für die rätselhafte Erscheinung war daher, daß in dem Aluminiumplättchen durch den Beschuß mit Alphateilchen ein radioaktives Nuklid entstanden ist, das es zwar in der Natur nicht gibt, das durch den Beschuß mit Alphateilchen aber künstlich erzeugt wird.

Madame Curies letzte große Freude

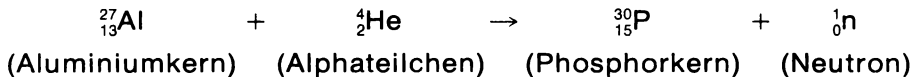
Das war eine neue große Sensation für die Wissenschaft. Besagte sie doch, daß es nicht nur von Natur aus radioaktive Stoffe gibt, sondern daß man darüber hinaus radioaktive Nuklide künstlich erzeugen kann. Im selben Institut war neben der natürlichen nun auch die künstliche Radioaktivität entdeckt worden. Für Marie Curie war das die letzte große Freude ihres Lebens. Frédéric Joliot-Curie schilderte den historischen Augenblick, als sie „Madame Curie“ die neue Entdeckung zeigten, später einmal mit folgenden Worten: „... ich werde nie den Ausdruck der lebhaften Freude vergessen, die sie überwältigte, als Irène und ich ihr in einem Glasröhrchen das erste künstliche Radioelement zeigten. Ich sehe noch, wie sie dieses Röhrchen ... in ihre schon vom Radium verbrannten Finger nahm. Um das, was wir ihr mitgeteilt hatten, sofort nachzuprüfen, hielt sie das Röhrchen an ein Geiger-Müller-Zählrohr und konnte dabei den Strahlenzähler ticken hören. Das war zweifellos die letzte große Genugtuung ihres Lebens.“

Einige Monate später starb Marie Curie an Leukämie. Das ist eine durch Schädigung der blutbildenden Organe des mensch-

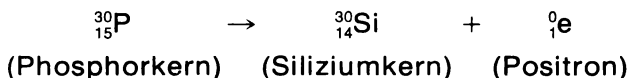
lichen Körpers hervorgerufene Krankheit. Marie Curie hatte sie sich zugezogen, weil sie viele Jahre ohne ausreichenden Schutz mit hoch radioaktiven Substanzen gearbeitet hatte.

Radioaktivität – künstlich erzeugt

Welches künstliche, radioaktive Nuklid war durch den Beschuß des Aluminiums mit Alphateilchen entstanden? Theoretisch ließ sich darüber folgende Berechnung anstellen:



Die Gleichung beschreibt das Eindringen eines Alphateilchens in den Aluminiumkern und die Aussendung eines Neutrons. Offensichtlich ist der dabei entstandene Phosphorkern aber nicht stabil, sondern radioaktiv und wandelt sich unter Aussendung eines Positrons um. Da keine Masse und Ladung verlorengehen kann (Gesetz der Erhaltung von Masse und Ladung), mußte die Umwandlung nach folgender Gleichung erfolgen:



Die Summen von Masse und Ladung auf der rechten Seite sind dabei wieder gleich der Massen- bzw. Ladungszahl auf der linken Seite. Das radioaktive Nuklid Phosphor 30 zerfällt also in das stabile Siliziumnuklid 30. Da Siliziumkerne aber ein Proton und folglich eine positive Ladung weniger enthalten als Aluminiumkerne, muß ein Teilchen mit einer positiven Elementarladung ausgestrahlt werden. Da das Teilchen nur die Masse eines Elektrons hat, kann es kein Proton sein.

Die Gleichung stimmt also gut mit den experimentell zu beobachtenden Daten überein. Trotzdem mußte noch chemisch der Beweis geführt werden, daß durch den Beschuß des Aluminiums mit Alphateilchen ein künstliches Phosphornuklid entsteht. Das war ungemein schwer, noch schwerer als seinerzeit die Bestimmung der relativen Atommasse des radioaktiven Elements Radon, weil bei den Versuchen der Joliot-Curies das radioaktive Phosphor 30 in noch kleineren Mengen entstand als das Radon beim natür-

lichen radioaktiven Zerfall des Radiums. Doch die Aufgabe wurde gelöst, und damit war bewiesen: man hatte zum ersten Mal in der Geschichte der Wissenschaft ein künstliches radioaktives Nuklid erzeugt! Wie hoch die Bedeutung der Entdeckung von der wissenschaftlichen Fachwelt eingeschätzt wurde, geht unter anderem daraus hervor, daß Irène und Frédéric Joliot-Curie bereits im darauffolgenden Jahre den Nobelpreis erhielten. Das ist eine ungewöhnlich kurze Zeit zwischen Entdeckung und Verleihung.

Die Entdeckung brachte in den physikalischen Instituten der Welt, die sich mit Kernphysik befaßten, eine ganze Lawine weiterer Experimente ins Rollen. Überall begann man jetzt Versuche mit dem Ziel, durch Beschuß nicht radioaktiver, stabiler Elemente mit Alphateilchen künstliche radioaktive Nuklide zu erzeugen. Zwar hatten die künstlichen Radionuklide, wie man sie kurz nennt, damals noch kaum praktische Bedeutung, sondern waren nur von theoretischem Interesse. Aber die Forscher kamen dadurch dem Schlüssel zur Nutzung der Kernenergie ein großes Stück näher.

Die Erfolge bei der Erzeugung künstlicher, radioaktiver Nuklide kamen jetzt Schlag auf Schlag. Immer neue künstliche Stoffe gelang es herzustellen. Doch zeichnete sich auch wieder eine Grenze ab: Chemische Elemente mit einer höheren Ordnungszahl als Kalium (19) waren durch Beschuß mit Alphateilchen nicht in künstliche Radionuklide umzuwandeln. Das war leicht zu erklären. Da mit jeder „Hausnummer“ der Ordnungszahl die Zahl der Protonen zunimmt, wird die positive Ladung der Kerne mit steigender Ordnungszahl größer.

Je größer aber die positive Ladung, desto stärker auch die gegenseitige Abstoßungskraft zwischen Atomkern und Alphateilchen. Den starken Schutzwall elektrischer Abstoßungskraft konnten die Alphateilchen nicht mehr durchdringen.

Spielereien mit Neutronen

Der italienische Kernphysiker Enrico Fermi kam auf eine gute Idee. Wie wäre es, Atomkerne statt mit Alphateilchen mit Neutronen zu beschießen? Neutronen sind nicht elektrisch geladen und müßten folglich viel leichter in Atomkerne eindringen. Die kleine Beryllium-Polonium-Ampulle, die „Neutronenhaubitze“, wurde jetzt

zum schweren „Geschütz“ der Kernphysiker. Die Experimente bestätigten die Vermutung Fermis vollauf. Innerhalb kurzer Zeit gelang es, von 60 untersuchten Elementen 40 durch Neutronenbeschuß in künstliche radioaktive Stoffe umzuwandeln.

Bisher hatte man zur Erzeugung künstlicher Radionuklide die Neutronen so verwendet, wie sie von der Polonium-Beryllium-Ampulle ausgestrahlt werden. Sie haben ebenso wie auch Alphateilchen eine hohe Bewegungsenergie. Man bezeichnet sie als „schnelle Neutronen“. Der junge Physiker Bruno M. Pontecorvo, damals erst 25 Jahre alt und Assistent bei Fermi in Rom, entdeckte nun noch etwas sehr Wichtiges. Wenn man die schnellen Neutronen abbremst, verlangsamt, dann eignen sie sich im allgemeinen noch weit besser zur Erzeugung künstlicher Radionuklide. Doch wie kann man Neutronen abbremsen?

Werfen wir einen kleinen Tennisball gegen die Wand, so prallt er mit fast unverminderter Geschwindigkeit zurück. Stoßen wir dagegen eine Billardkugel gegen eine gleich große andere, so setzt sich die angestoßene Kugel ebenfalls in schnelle Bewegung. Dagegen kommt die erste Kugel fast oder ganz zum Stillstand. Sie gibt also den größten Teil ihrer Bewegungsenergie an die angestoßene Kugel ab.

Ursächlich hängt das damit zusammen, daß die beiden Kugeln eine gleich große Masse haben. Würden wir eine leichte Kugel, z. B. einen Tischtennisball, gegen eine Kugel gleicher Größe stoßen, die aber sehr viel schwerer ist, weil sie z. B. aus Blei besteht, so würde der Tischtennisball von der Bleikugel mit fast unverminderter Geschwindigkeit zurückprallen, während die Bleikugel allenfalls ein paar Zentimeter weiterrollt.

Daraus folgt: Um Neutronen abzubremsen, muß man sie mit Atomkernen zusammenstoßen lassen, die nicht wesentlich schwerer als das Neutron selbst sind. Dann überträgt sich ein großer Teil der Bewegungsenergie des Neutrons auf die angestoßenen Kerne, das Neutron selbst aber verliert nach einer Reihe von Zusammenstößen seine hohe Geschwindigkeit. Es wird zu einem langsamen Neutron. Weil seine Bewegungsenergie dann in derselben Größenordnung liegt wie die der Wärmebewegung von Molekülen, bezeichnet man die langsamen Neutronen auch als

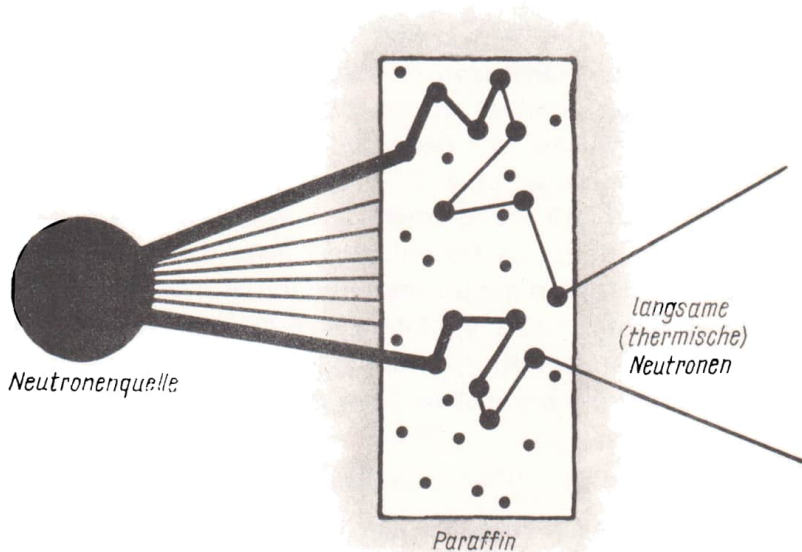
„thermische Neutronen“. Darin steckt das altgriechische Wort „thermos“ = Wärme.

Fermi umgab die Polonium-Beryllium-Ampulle deshalb mit einer Paraffinschicht. Paraffin ist eine Substanz, in der viel Wasserstoff enthalten ist. Wasserstoffkerne, also Protonen, haben aber fast die gleiche Masse wie Neutronen. Daher kann man für einfache experimentelle Zwecke Neutronen durch eine Paraffinschicht abbremsen.

Das Element 93

Mit thermischen Neutronen lassen sich fast alle stabilen Elemente in künstliche Radionuklide umwandeln. Dabei gibt es kaum einen Unterschied zwischen leichten und schweren Elementen. Auch die schwersten Elemente können durch langsame Neutronen umgewandelt werden. Das brachte Fermi auf eine weitere Idee.

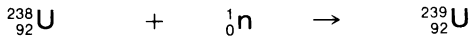
Die meisten der durch Beschuß mit thermischen Neutronen entstandenen künstlichen Radionuklide zeigten dieselbe Art des Zerfalls, nämlich den Betazerfall. Dabei bleibt die Massenzahl des



Abbremsung schneller Neutronen in einer Paraffinschicht

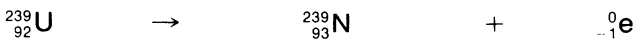
Kerns gleich, die Kernladungszahl erhöht sich um 1, und es wird ein Betateilchen ausgestrahlt. Man kann den Vorgang auch so ausdrücken: Ein Neutron des Kerns wandelt sich in ein Proton um, wobei ein Elektron ausgesandt wird.

Dringt ein Neutron in einen Urankern 238 ein, so müßte daher zunächst nach der Reaktionsgleichung



(Urankern 238) (Neutron) (Urankern 239)

das künstliche Radionuklid Uran 239 entstehen. Wenn es sich durch Betazerfall nach der Gleichung

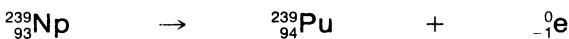


(Urakern 239) (Neptuniumkern 239) (Betateilchen)

umwandelt, wäre ein Atomkern des Elements mit der nächsthöheren Ordnungszahl 93 entstanden. Das ist ein Element, das es bis dahin überhaupt nicht gegeben hatte, also nicht nur ein künstliches Nuklid, sondern sogar ein neues künstliches Element. Man nennt das Element 93 heute Neptunium.

Als man Uran mit Neutronen beschloß, entstand entsprechend dieser Vermutung tatsächlich ein neuer Stoff. Er war chemisch zwar nicht zu analysieren und zu identifizieren, weil er in zu winzigen Mengen gebildet wurde. Aber er sandte eine Betastrahlung aus, deren HWZ keinem der in Frage kommenden bereits bekannten Radionuklide entsprach. Dieses Indiz sprach stark dafür, daß sich aus Uran 239 das Element 93 – Neptunium – bildet.

Ja, noch mehr: Es traten sogar zwei verschiedene Betastrahlungskomponenten mit unterschiedlichen HWZ auf. Das legte einen weiteren Schluß nahe: Vielleicht zerfällt auch das Neptunium nochmals unter Aussendung eines Betateilchens. Aus diesem Zerfall läßt sich berechnen, daß er nach der Reaktionsgleichung



(Neptuniumkern) (Plutoniumkern) (Betateilchen)

zu einem weiteren künstlichen Element führen muß, das man heute Plutonium nennt und das die Ordnungszahl 94 hat. Alle Elemente, die eine höhere Ordnungszahl als das bis dahin bekannte schwerste

natürliche Element 92 Uran haben, werden zusammenfassend als Transurane bezeichnet. Die Vorsilbe „trans“ bedeutet sinngemäß so viel wie jenseits. Die Transurane stehen hinsichtlich ihrer Ordnungszahl jenseits des Urans. Die Namensgebung der Transurane schließt sich zunächst an die Reihenfolge der Planeten unseres Sonnensystems an. Das 1789 entdeckte Element Uran war nach dem wenige Jahre zuvor entdeckten Planeten Uranus benannt worden. Der nächstfernere Planet nach dem Uranus ist der Neptun, auf den Neptun folgt als weitester, bisher sicher bekannter Planet unseres Sonnensystems der Pluto.

Das Rätsel der Transurane

Aber waren das nicht alles bloß phantastische Ideen? Künstliche Elemente, schwerer als das schwerste natürliche Element? Gab es sie wirklich oder nur in den Berechnungen Fermis auf dem Papier? Mit den klassischen Mitteln der chemischen Analyse ließ sich die Existenz von Neptunium und Plutonium nicht beweisen. Denn wenn wir bisher der Einfachheit halber davon sprachen, dies oder jenes Element habe sich in ein anderes Element umgewandelt, dann bedeutet das nicht, daß sich *alle* Atomkerne des Stoffes umwandeln. Da stets nur einzelne, wenige Atomkerne von einem Neutron getroffen werden, entstehen auch nur entsprechend wenige umgewandelte Kerne. Auch das Aluminium, das mit Alpha-Teilchen beschossen wird, bleibt zu über 99,9 Prozent Aluminium. Nur einige wenige Phosphorkerne bilden sich in dem Aluminiumplättchen. Ebenso bleibt das mit Neutronen beschossene Uran zu über 99,9 Prozent Uran. Nur einige wenige Neptunium- bzw. Plutoniumkerne bilden sich in dem Uran.

Dabei müssen wir freilich berücksichtigen, daß im Reich der Atome nicht die Maßstäbe des gewöhnlichen Lebens gelten. 100000 ist für das normale Leben eine große Zahl. Im Reich der Atome ist es dagegen eine sehr kleine Zahl. Obwohl 100000 Atomkerne eine verschwindend kleine Menge sind, kann man sie, wenn es sich um radioaktive Kerne handelt, dennoch nachweisen, weil jeder zerfallende Kern einen Strahl aussendet. 100000 Atome chemisch zu identifizieren ist dagegen auf einfache Weise nicht möglich.

Das einzige, was man also zunächst beweisen konnte, war dies:

Durch Beschuß des Urans mit langsamen Neutronen entstehen in ganz winzigen Mengen neue radioaktive Stoffe, die kein Uran sind. Es mußte sich dabei um mehrere Stoffe handeln. Denn es lassen sich in der Strahlung mehrere Komponenten mit verschiedenen HWZ nachweisen. Die HWZ sind gewissermaßen der Steckbrief der neu entstandenen Stoffe. Die Stoffe selbst kannte man noch nicht, nur die Art der Strahlung und ihre HWZ konnten festgestellt werden. Weil man die Stoffe nicht identifizieren konnte, nannte man sie einfach nach ihrer Halbwertszeit, also z. B. „Dreieinhalb-stundenkörper“ oder dergleichen.

Es gab nicht bloß zwei solcher nicht identifizierten „Körper“, sondern noch mehr. Fermi vermutete deshalb, nicht nur die Elemente 93 und 94, sondern auch weitere Transurane mit noch höheren Ordnungszahlen erzeugt zu haben. Das wurde freilich von den übrigen Fachwissenschaftlern immer skeptischer aufgenommen. Hatte Fermi wirklich recht oder irrte er? Und wenn er sich irrte, was waren die rätselhaften Substanzen, die bei der Neutronenbestrahlung im Uran entstanden, dann wirklich?

Die Frage, ob es Transurane wirklich gibt und wie man sie eindeutig chemisch identifizieren kann, versetzte die Wissenschaftler in große Spannung. Viele Forscher stürzten sich deshalb jetzt auf die künstliche Erzeugung von Transuranen und prüften in Versuchen die Experimente und Behauptungen Fermis nach. Die dabei erzielten Ergebnisse brachten aber eher noch mehr Verwirrung als Klarheit in die Sache. Es wurde immer rätselhafter.

In Wirklichkeit hatten Fermi und die anderen Experimentatoren bei ihren Experimenten nämlich nicht nur Transurane erzeugt, sondern sogar Atomkerne des Urans gespalten! Sie hatten also jene Kernreaktion erzeugt, die heute in den Kernkraftwerken zur Gewinnung gigantischer Energien ausgenutzt wird. Aber sie wußten es nicht; sie ahnten es nicht einmal. Sie merkten einstweilen nur, daß die Ergebnisse ihrer Versuche immer mehr von den theoretisch geschlußfolgerten Erwartungen abwichen.

Vielleicht wird man jetzt fragen: Wie ist es denn überhaupt möglich, daß man Atomkernspaltung gar nicht bemerkt, obwohl dabei doch so große Energiemengen frei werden? – Die Energiemenge, die bei der Spaltung einiger weniger Atomkerne frei wird – „wenig“

hier wiederum im Sinne der in der Kernphysik üblichen Größenordnungen verstanden! – ist so klein, daß man damit nicht einmal eine elektrische Taschenlampenbirne zum Aufleuchten bringen kann. Große Energiemengen entstehen erst durch die Spaltung sehr vieler Atomkerne. Enorm groß ist die Energiemenge, die bei der Spaltung eines einzigen Atomkerns frei wird, aber auch, wenn man sie mit der Energiemenge vergleicht, die bei der chemischen Reaktion eines Atoms frei wird. Trotzdem war auf den Experimentiertischen von Enrico Fermi und anderen Forschern, die damals im Laborversuch bereits, allerdings ohne es zu ahnen, Urankerne spalteten, keine große Energieentfaltung zu bemerken. Dafür war die Zahl der gespaltenen Atomkerne viel zu klein.

Die Forscher rätselten weiter, was das für Stoffe sein könnten, die bei der Neutronenbestrahlung des Urans entstehen. Nur eine wenig bekannte deutsche Chemikerin, Ida Noddack, ahnte die richtige Lösung des Rätsels. Sie meinte, daß durch den Beschuß von Uran mit Neutronen eine ganz neue, bisher nicht beobachtete Kernreaktion ausgelöst werden könnte. Sie würde darin bestehen, daß der Urankern nicht bloß Alpha- oder Betateilchen ausstrahlt, sondern daß der große schwere Kern in zwei, etwa mittelgroße Bruchstücke zerplatzt. Diese Bruchstücke könnten jene Substanzen sein, die die Strahlungen mit den festgestellten Halbwertszeiten abgeben.

Ida Noddack war mit dieser Vermutung zwar auf dem richtigen Wege; da sie aber in der wissenschaftlichen Fachwelt nicht sehr bekannt war, nahm man ihre Ansicht nicht ernst. Man hielt sie sogar für vollkommen absurd. Sprach doch bisher alles dafür, daß kein materielles Gebilde einen so festen Zusammenhalt hat wie gerade der Atomkern. Es erschien unmöglich, daß sich ein Atomkern in zwei etwa halbgroße Bruchstücke spaltet.

Dagegen fand ein anderer Einwand gegen Fermis Hypothese der künstlichen Transurane Beachtung. Man wandte ein, es sei viel naheliegender, daß statt Transuranen neue künstliche Radionuklide des Elements 91 Protaktinium entstehen. Entdecker und genauer Kenner des Protaktiniums war der deutsche Kernchemiker Professor Dr. Otto Hahn in Berlin. Er und seine Mitarbeiter waren Spezialisten dafür, winzigste Mengen radioaktiver Stoffe chemisch

zu analysieren. Hahn prüfte jetzt gleichfalls die Experimente Fermis nach und versuchte, durch genaue chemische Analysen zu klären, welche Stoffe durch den Neutronenbeschuß von Uran nun tatsächlich entstehen. Es war vor allem seine langjährige Mitarbeiterin Dr. Lise Meitner, die ihren Chef dazu ermunterte, das interessante Problem in Angriff zu nehmen.

Professor Hahn und Dr. Lise Meitner gewannen aus ihren Untersuchungen zunächst die Überzeugung, daß Fermi recht hatte. Es entstand durch Beschuß des Urans mit Neutronen nicht nur das Element 93, sondern auch noch die künstlichen Transurane 94, 95, 96 und 97. So meinten sie. Aber an den Ergebnissen der genauen Untersuchungen blieb einiges rätselhaft.

Der geheimnisvolle Dreieinhalbstundenkörper

Besonderes Kopfzerbrechen bereitete der sogenannte „Dreieinhalbstundenkörper“, eine radioaktive Substanz mit einer HWZ von 3 Stunden und 30 Minuten. Die chemischen Analysen sprachen eigentlich dafür, daß es sich um das Element Barium handelt. Aber das schien Professor Hahn unmöglich. Denn bei allen Kernumwandlungen, die bisher beobachtet worden waren, befand sich das neu entstandene Element seiner Ordnungszahl nach in nächster Nachbarschaft des Ausgangsstoffs. Die Ordnungszahl verschob sich nur um 1 oder 2. Aber niemals hatte sie sich um mehr als 2 verändert. Barium hat jedoch die Ordnungszahl 56. Das ergibt gegenüber der Ordnungszahl 92 des Urans eine Differenz von 36! Allenfalls mochte Professor Hahn noch glauben, aus dem Uran könnten künstliche radioaktive Nuklide des Radiums entstanden sein. Da Radium die Ordnungszahl 88 hat, ergäbe das nur eine Differenz von 4. Das könnte man sich eher vorstellen.

Erinnern wir uns daran, daß die Ordnungszahl eines Elements zugleich die Zahl der Protonen angibt, die in den Atomkernen des betreffenden Elements enthalten sind! Dann verstehen wir die Zweifel an der Möglichkeit von Kernumwandlungen mit großer Veränderung der Ordnungszahl. Wenn aus dem Urankern mit 92 Protonen ein Bariumkern mit nur 56 wurde, wo sollten dann die übrigen 36 Protonen geblieben sein?

Frauen auf der richtigen Spur

Wieder war es eine Frau, nämlich Professor Hahns Assistentin Lise Meitner, die trotzdem an die Möglichkeit glaubte, der Urankern könne in zwei etwa halbgroße Bruchstücke zerplatzen. Aber der Professor blieb bei seinen Zweifeln. Er lächelte auch über die aus Paris von Irène Joliot-Curie kommenden wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die immer stärker darauf hindeuteten, daß beim Neutronenbeschuß des Urans Stoffe entstehen, die in der Reihenfolge der Ordnungszahlen weit vom Uran entfernt sind. Hahn nahm an, daß Irène Joliot-Curie von der chemischen Analyse winzigster Stoffmengen nicht so viel verstünde und sich deshalb geirrt habe.

Erst als ihm im Herbst 1938 sein Mitarbeiter Dr. Fritz Straßmann wieder einmal die neueste Veröffentlichung aus dem Pariser Forschungsinstitut der Joliot-Curies in den wichtigsten Punkten vortrug, wurde er stutzig. Wenn das stimmte, was sein Mitarbeiter da in groben Zügen entwarf, dann hatte nicht Madame Joliot-Curie, sondern er selbst sich geirrt. Otto Hahn war wie vom Blitz getroffen. Er vergaß sogar, seine schon angerauchte Zigarre weiterzurauchen. Er ließ sie auf dem Aschenbecher verqualmen, während er mit Straßmann sofort ins Labor hinunterlief und neue Versuche anordnete.

Jetzt wurde in Otto Hahns Institut pausenlos gearbeitet und die Experimente von Irène Joliot-Curie und ihrem Mitarbeiter Savitch überprüft und weitergeführt.

Gesetzt den Fall, es würde sich bei dem rätselhaften Dreieinhalbstundenkörper doch um Barium handeln, dann müßte bei der Spaltung des Urankerns außer dem Barium noch ein Kern mit 36 Protonen entstehen. Das wäre ein Atomkern des Edelgases Krypton. Also kam es darauf an, diese beiden Stoffe – Barium und Krypton – als „Spaltprodukte“ des Urankerns eindeutig chemisch nachzuweisen.

Im Dezember 1938 waren die Forschungsarbeiten so weit gediehen, daß kein Zweifel mehr daran bestand: Es handelte sich bei den entstandenen Stoffen tatsächlich um künstliche Radionuklide der Elemente Barium und Krypton! Trotz all seiner Zweifel mußte Professor Hahn zugeben: Die Urankerne wurden gespalten!

Von dem Moment an, in dem Otto Hahn die Spaltbarkeit des Urankerns nachgewiesen hatte, stand die Wissenschaft unmittelbar an der Schwelle der neuen gigantischen Energiequelle. Jetzt begannen die Wissenschaftler zu ahnen, daß ihre Forschungen möglicherweise umwälzende Konsequenzen haben könnten.

Warum?

Daß bei Atomkernumwandlungen millionenfach mehr Energie frei wird als bei chemischen Reaktionen, war seit langem klar. Aber während bei chemischen Reaktionen, z. B. der Verbrennung, sämtliche Atome des betreffenden Elements von der chemischen Reaktion erfaßt werden, konnte man Kernumwandlungen bisher immer nur vereinzelt bei relativ wenigen Atomkernen auslösen. Bei der Kernspaltung des Urans bestand dagegen eine Hoffnung, daß sehr viele Urankerne nacheinander von der Spaltungsreaktion erfaßt würden. Diese Hoffnung gründete sich auf folgende Überlegung:

Bariumkerne enthalten je nach dem Nuklid höchstens 82 Neutronen, Kryptonkerne höchstens 50 Neutronen. Das ergibt zusammen erst 132 Neutronen. Die Urankerne aber enthalten 143 bis 146 Neutronen. Die überzähligen Neutronen können nicht einfach verschwinden. Vermutlich entstehen daher bei der Kernspaltung des Urans nicht nur zwei Kerne mittelschwerer Elemente, sondern auch freie Neutronen. Durch Neutronen aber werden Urankerne gespalten. Damit schließt sich der Kreis! Könnte man die bei der Spaltung eines Urankerns frei werdenden Neutronen dazu benutzen, um weitere Urankerne zu spalten, so entstände eine „Kettenreaktion“ von Urankernspaltungen: Eine Spaltung löst andere aus. Da hierbei in kurzer Zeit sehr viele Urankerne gespalten werden, entstünden auch riesige Energiemengen.

Freilich war das einstweilen nur ein Gedanke. Seine Verwirklichung hing u. a. davon ab, ob bei der Urankernspaltung wirklich Neutronen frei werden. Zwar war das mit hoher Wahrscheinlichkeit anzunehmen, es mußte aber noch exakt bewiesen werden. Damit war den Wissenschaftlern ein Problem gestellt, das nicht mehr bloß rein theoretisch interessant war, sondern enorme praktische Bedeutung hatte. Und das nicht nur als friedliche Energiequelle für Kraftwerke, sondern auch als Waffe! Denn militärisch

angewendet, mußte eine Kettenreaktion von Urankernspaltungen eine ungeheure Vernichtungskraft entfalten, die die der schwersten Bomben und Granaten um mehr als das Tausendfache übertraf. In Deutschland aber herrschte der Faschismus, der seinen großen Raubkrieg gegen die europäischen Völker schon vorbereitete. Würde die Urankernspaltung Hitler dazu verhelfen, seine Welteroberungspläne zu verwirklichen?

Der Faschismus wütet

In Deutschland waren schon ungezählte Menschen der Gewaltherrschaft des faschistischen Regimes zum Opfer gefallen. In den KZs wurden aufrechte Bürger, die aus ihrer antifaschistischen Gesinnung kein Hehl machten, zu Tode geschunden. Systematisch wurden die Juden vernichtet. Man entließ sie aus ihrer Arbeitsstellung, vertrieb sie aus ihren Wohnungen, raubte ihnen sämtlichen Besitz und brachte sie in KZs, wo sie durch schwerste Arbeit bei völlig unzureichender Ernährung und durch gemeinste Mißhandlungen zugrunde gerichtet wurden. Auch Lise Meitner war inzwischen ein Opfer der Faschisten geworden. Zwar kam sie mit dem Leben davon. Aber sie hatte ihre wissenschaftliche Arbeit bei Professor Hahn noch vor der großen Entdeckung, die ihrer Vermutung recht geben sollte, verlassen und aus Deutschland fliehen müssen. Sie war Jüdin, konnte aber anfangs noch im Institut Professor Hahns arbeiten, weil sie österreichische Staatsangehörige und somit Ausländerin war.

Aber als Hitler-Deutschland Österreich überfiel und dem „Großdeutschen Reich“ gewaltsam einverleibte, galt sie nicht mehr als Ausländerin. Sie war jetzt ebenfalls den Vernichtungsgesetzen unterworfen, nach denen die Faschisten alle Juden behandelten, deren sie habhaft wurden. Jetzt konnte Lise Meitner nur noch versuchen, ihrem Schicksal durch die Flucht zu entgehen. Ihre wissenschaftliche Arbeit mußte sie daher gerade zu dem Zeitpunkt aufgeben, als die Frage, ob Urankerne durch Neutronen gespalten werden, ihrer Entscheidung entgegenreifte. Mit Mühe und Not entkam sie – vielleicht in letzter Minute – als Touristin getarnt über die holländische Grenze. Das war im Sommer 1938. Im Dezember des gleichen Jahres gelang Hahn die große Entdeckung.

Der Professor fühlte sich bedrückt. Was war das für ein verbrecherisches Regime, unter dem er leben mußte! Zu einem guten Teil verdankte er seine Entdeckung Lise Meitner. Nun durfte sie nicht einmal dabeisein, als ihre Idee den großen Triumph feierte. Professor Hahn wollte ihn ihr wenigstens so schnell wie möglich mitteilen! Noch bevor die Entdeckung in einer wissenschaftlichen Zeitschrift veröffentlicht wurde, schrieb Otto Hahn an Lise Meitner einen ausführlichen Brief, in dem er das genaue Ergebnis der Untersuchungen schilderte. Lise Meitner lebte damals in Kopenhagen, wo sie bei dem dänischen Gelehrten Niels Bohr eine vorläufige Arbeitsstelle gefunden hatte.

Für Lise Meitner bedeutete die Entdeckung der Urankernspaltung eine große Aufregung. Das war eine Sensation, wie es nur wenige in einem Jahrhundert gibt! Sie schickte ihrem neuen Chef, der gerade zu einem Physiker-Kongreß nach den USA gereist war, ein langes Telegramm. Es war wohl das längste Privattelegramm, das jemals über die Transatlantik-Kabel lief. Denn alle wichtigen Einzelheiten der Ergebnisse Professor Hahns waren darin geschildert. Das Telegramm kostete 400 Dollar. Der Postbeamte schüttelte den Kopf, wie jemand für ein Telegramm, das noch dazu kein „normaler Mensch“ verstand, derart viel Geld zum Fenster hinauswerfen konnte.

Auch Niels Bohr war, als er das Telegramm erhielt, voller Erregung über den sensationellen Inhalt. Er gab ihn sofort auf dem Physiker-Kongreß bekannt. Und so kam es, daß sich die große Nachricht gewissermaßen mit telegrafischer Eile in der ganzen Fachwelt verbreitete. Der Schlüssel zur Kernenergie lag greifbar nahe. Es fehlte nur noch eine Kleinigkeit, nämlich der Beweis dafür, daß bei der Kernspaltung des Urans Neutronen frei werden, die eine Kettenreaktion von Kernspaltungen in Gang setzen.

Das kann eine Katastrophe werden ...

In fieberhafter Eile begannen die Physiker in mehreren Ländern der Erde sofort Experimente, die die Frage klären sollten. Der erste, dem es gelang, war wiederum Frédéric Joliot-Curie. Noch in den ersten Wochen des Jahres 1939 stellte er in Versuchen mit seinen Mitarbeitern Halban und Kowarski fest, daß bei der Uran-

kernspaltung manchmal zwei, manchmal drei, im Durchschnitt etwa 2,5 freie Neutronen entstehen. Doch es war kein froher Tag für ihn, als das Versuchsergebnis eindeutig feststand. Nachdenklich, ja bedrückt saßen die Wissenschaftler um den Tisch. Sie waren nicht in Stimmung, um auf das Versuchsergebnis, das den Anbruch eines neuen Zeitalters ankündigte, anzustoßen. Tiefes Schweigen war auf den ernsten Gesichtern. Dann sprudelte es aus dem Munde des jüngsten Mitarbeiters: „Das kann eine Katastrophe werden!“ Was in diesem Moment entdeckt worden war, barg nicht nur den Schlüssel zur Freisetzung unvorstellbarer Energien für die friedliche Wirtschaft und Wissenschaft, sondern auch für die Entfesselung der verheerendsten Zerstörungskräfte. Und diese Entdeckung zu einer Zeit, in der Hitler-Deutschland gerade seinen großen Raubkrieg vorbereitete!



Frédéric Joliot-Curie

Frédéric Joliot-Curie sagte: „Wir müssen trotzdem die Forschungen fortsetzen. Aber wir müssen es als Wissenschaftler ebenso als unsere Pflicht ansehen, im gesellschaftlichen und politischen Leben alles zu tun, daß unsere Entdeckung nur für friedliche Zwecke angewendet wird!“ In dieser Stunde faßte er den festen Entschluß, zusammen mit den Volksmassen für die ausschließlich friedliche Anwendung der Atomkernenergie zu kämpfen!

Frédéric Joliot-Curie hat diesen Entschluß beispielhaft in die Tat umgesetzt. Von den Wissenschaftlern der kapitalistischen Länder war er derjenige, der sich am stärksten und entschiedensten gegen den Mißbrauch der Kernenergie einsetzte, für die Sicherung des Friedens in der Welt eintrat und für diesen politischen Kampf viele persönliche Opfer auf sich nahm. Er führte den Kampf nicht wie andere Wissenschaftler der kapitalistischen Länder allein und isoliert, sondern verbunden mit den Volksmassen. 1942 trat Professor Joliot-Curie der Kommunistischen Partei Frankreichs bei.

Die Entdeckung, daß bei der Kernspaltung Neutronen frei werden, einfach zu verschweigen, hätte nichts genutzt. Denn nicht nur im Pariser Institut wurde die Frage untersucht, sondern in vielen Forschungsstätten der Welt. Ein schnelles Übereinkommen zwischen den Wissenschaftlern der verschiedenen Länder darüber zu erreichen, daß keiner die weiteren Möglichkeiten, die zur Atom-bombe führen könnten, aufzeigt, war ausgeschlossen. Dafür waren die politischen Meinungen der bürgerlichen Wissenschaftler der kapitalistischen Länder viel zu unterschiedlich. Außerdem wußte man nicht, was man im faschistischen Deutschland mit der Entdeckung anfangen würde. Daß auch hier eines Tages das Freiwerden von Neutronen entdeckt werden würde, konnte nicht bezweifelt werden. Würde Hitler nicht die Wissenschaftler zwingen, ihm die Bombe als Instrument zur Durchsetzung seiner Vorherrschaftsansprüche in Europa zu bauen?

Wettlauf mit einem Phantom

Im Sommer 1939 erschien in der angesehenen deutschen Zeitschrift „Die Naturwissenschaften“ von einem Mitarbeiter Professor Hahns namens Flügge ein Aufsatz, in dem unter Hinweis auf das von Joliot-Curie entdeckte Freiwerden von Neutronen deutlich die Möglichkeit beschrieben wurde, durch die bei der Kernspaltung ausgelöste Kettenreaktion eine gewaltige Uran-Energiemaschine zu betreiben. Es fehlte in dem Aufsatz aber auch nicht der Hinweis darauf, daß die Anwendung der Kettenreaktion für militärische Zwecke zu einer Uranbombe führen könnte, die in einem einzigen Augenblick eine Energie entfesselt, die ausreichen würde, um beispielsweise das gesamte Wasser des großen Wannsees zwi-

schen Berlin und Potsdam schlagartig zu verdampfen. Die Idee der Atombombe war also in Hitler-Deutschland nicht unbekannt.

Noch etwas versetzte die ausländischen Wissenschaftler, die um die große Gefahr des kriegesischen Mißbrauchs dieser Kettenreaktion wußten, in größte Besorgnis. Nachdem die Faschisten die tschechoslowakische Republik überfallen und besetzt hatten, verboten sie kurze Zeit später jegliche Ausfuhr der dort abgebauten Uranerze in das Ausland. Als sie 1940 in Frankreich eindrangen, suchten sie systematisch nach Thorium. All das mußte den Verdacht der ausländischen Wissenschaftler verstärken, daß Hitler-Deutschland fieberhaft dabei war, Atombomben herzustellen, ja daß man vielleicht sogar schon die Möglichkeit entdeckt hatte, nicht nur Uran, sondern auch Thorium zur Herstellung von Atombomben zu verwenden. Offiziell wurde die Suche nach Thorium von den faschistischen Behörden damit begründet, daß das Thorium für die Herstellung einer neuartigen Zahnpasta bestimmt war. Aber durfte man das glauben? War es nicht nur Tarnung?

Erst nach dem zweiten Weltkrieg stellte sich heraus, daß Thorium tatsächlich nur für die Zahnpastaproduktion gesucht wurde. Ernstere Bewandnis hatte allerdings das Ausfuhrverbot für Uranerze. Tatsächlich wurde im faschistischen Deutschland daran gearbeitet, einen Urankernreaktor zur Energiegewinnung zu bauen. Auch gewisse Vorarbeiten für die Herstellung von Atombomben wurden geleistet. Doch kam man damit nicht weit voran. Hitler-Deutschland war dafür wissenschaftlich zu weit im Rückstand, und auch seine technisch-industrielle Kraft reichte nicht aus, um neben der Massenproduktion gewöhnlicher Waffen und Kriegsgüter auch noch die äußerst schwierigen Voraussetzungen für die Produktion von Kernwaffen zu schaffen. Doch das wußten die ausländischen Wissenschaftler nicht; sie befürchteten im Gegenteil, daß Hitler-Deutschland im Begriff war, die Welt mit der Atombombe zu bedrohen. Sie sahen deshalb den einzigen Ausweg darin, Hitler möglichst zuvorzukommen und selbst so schnell wie möglich Atombomben herzustellen.

Aber es war ein Wettlauf mit einem Phantom. Als Hitler-Deutschland besiegt war, stellten die Wissenschaftler überrascht fest, daß die Faschisten nicht einmal einen funktionierenden Kernreaktor

besaßen, geschweige denn Atombomben! Infolge des tragischen Irrtums, der in der Überschätzung der wissenschaftlichen und technischen Möglichkeiten Hitler-Deutschlands lag, spielten die Wissenschaftler westlicher Länder jedoch in jahrelanger, angestrenzter Arbeit der USA-Regierung die Atombombe in die Hände, die sie dann ohne militärische Notwendigkeit gegen das faktisch bereits besiegte Japan einsetzte.

Über 200000 japanische Männer, Frauen und Kinder in den Städten Hiroshima und Nagasaki und ihrer Umgebung wurden durch den Abwurf von zwei US-amerikanischen Atombomben getötet, weitere Zehntausende Menschen verletzt und für den Rest ihres Lebens gesundheitlich geschädigt. Sie blieben krank und leidend. Ihr Leben verkürzte sich durch die Schäden, die sie infolge der Strahlung der bei der Kernexplosion massenhaft erzeugten radioaktiven Substanzen erlitten hatten.

Nachdem der „heiße Krieg“ 1945 beendet war, benutzten die USA die Atombombe als Drohmittel im „kalten Krieg“. Viele aufrichtige amerikanische Wissenschaftler, die zunächst ihre ganze Kraft eingesetzt hatten, um der befürchteten Atombomben-Produktion des faschistischen Hitler-Deutschlands zuvorzukommen, bereuten jetzt, was sie getan hatten. Sie waren weder mit dem militärisch nicht mehr gerechtfertigten Einsatz dieser furchtbaren Waffen gegen die japanische Bevölkerung einverstanden noch damit, daß die USA durch Drohungen mit der Atombombe jetzt anderen Ländern ihren Willen aufzuzwingen versuchten. Aber die USA-Regierung ließ sich dadurch nicht von ihrem friedensfeindlichen Kurs abbringen. So blieb schließlich der Sowjetunion nichts weiter übrig, als die Bedrohung durch die amerikanischen Atomwaffen dadurch abzuwenden, daß man jetzt auch in der Sowjetunion derartige 'Waffen herstellte. Mit Hilfe ihrer Kernwaffen schützt die Sowjetunion nicht nur sich selbst, sondern das ganze sozialistische Lager gegen die Erpressung durch imperialistische Staaten. Die Sowjetunion und mit ihr alle friedliebenden Menschen der Welt haben mehrfach die völlige Ächtung aller Kernwaffen auf der ganzen Erde vorgeschlagen. Doch sind die USA und die anderen imperialistischen Mächte auf diesen Vorschlag niemals eingegangen

Von der imperialistischen Propaganda ist behauptet worden, Spione hätten der Sowjetunion Produktionsgeheimnisse der amerikanischen Kernwaffen verraten. Das ist eine verlogene Schauer-
geschichte. Die physikalischen Grundlagen für die Herstellung von Kernwaffen waren schon seit Ende der dreißiger Jahre in der gesamten wissenschaftlichen Fachwelt bekannt. Man brauchte nur entsprechende Technologien auszuarbeiten. Dafür gab es in der Sowjetunion ebenso wie in den USA, England oder Frankreich genügend viele versierte Wissenschaftler und Techniker. Selbstverständlich hätte man in der Sowjetunion viel lieber ausschließlich die Technik von Atomkraftwerken zur friedlichen Nutzung der Kernspaltungsenergie ausgearbeitet und in die Praxis umgesetzt. Welches große Reservoir an Fachleuten die Sowjetunion dafür besitzt und auch damals schon besaß, um sowohl Kernkraftwerke als auch Kernwaffen selbständig und ohne fremde Hilfe oder gar Spionage zu bauen, beweist am deutlichsten die Tatsache, daß das erste Atomkraftwerk der Welt in der Sowjetunion in Betrieb genommen wurde. Obwohl die Sowjetunion von dieser Aufgabe zunächst dadurch abgehalten wurde, daß sie zu ihrer Verteidigung Kernwaffen entwickeln mußte, kam sie den imperialistischen Staaten mit dem ersten Atomkraftwerk der Welt trotzdem noch zuvor.

Die Maschine der Titanen

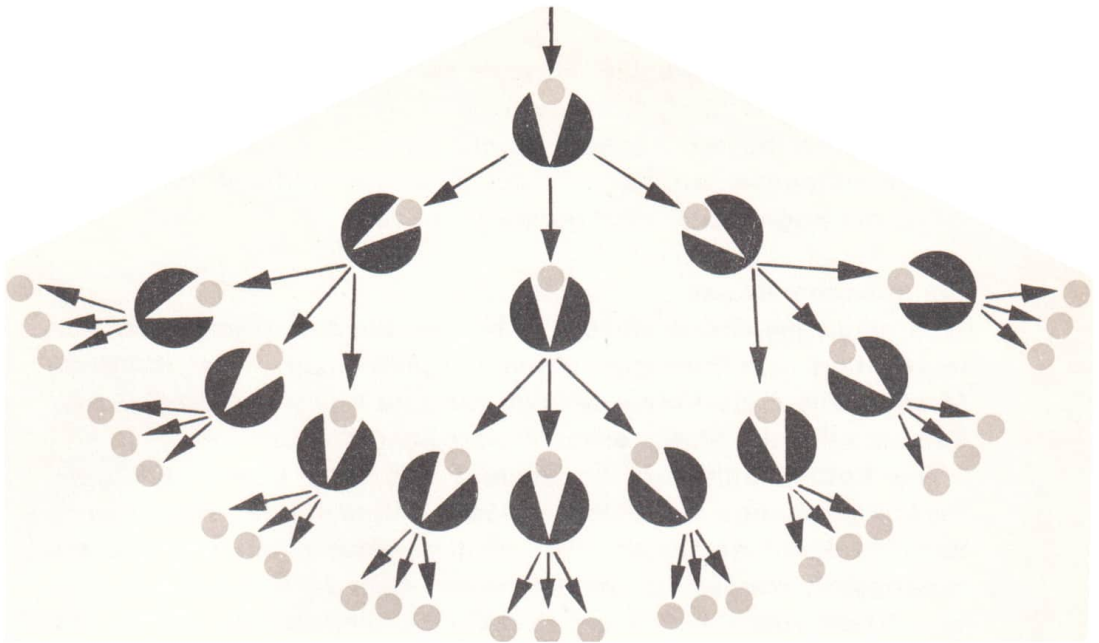
Die erste, ausschließlich friedlichen Zwecken dienende Anwendung der Kernspaltung erfolgte in der sozialistischen Sowjetunion. Am 27. Juni 1954 nahm das erste Versuchskernkraftwerk der Welt in der Nähe von Moskau seinen Betrieb auf. Das war ein bedeutender Markstein in der Geschichte der Menschheit. An diesem Tage begann die neue Ära der Kernenergiegewinnung, die dem Menschen ungeahnte Energien erschließt und ihn weitgehend unabhängig von Kohle, Erdöl, Erdgas und anderen herkömmlichen Brennstoffen macht, die es nur in begrenzten Mengen in der Erdrinde gibt!

Wie arbeitet ein Kernkraftwerk? – Das „Herz“ des Kernkraftwerks ist der Kernreaktor, auch kurz Reaktor genannt. In ihm spielt sich der Prozeß der gesteuerten Kettenreaktion der Kernspaltung ab. Der Gegensatz zur gesteuerten Kettenreaktion ist die unkontrollierte, explosive. Sie findet in der Kernspaltungsbombe statt, die uns als Atombombe oder A-Bombe bekannt ist. Aber wie entsteht die Kettenreaktion?

Die Kernspaltungslawine

Erinnern wir uns zunächst daran, daß bei der Spaltung eines Urankerns durchschnittlich 2,5 Neutronen frei werden. Nehmen wir der Einfachheit halber an, es seien rund 3. Dann bewirken die drei Neutronen, die bei der ersten Spaltung eines Urankerns entstehen, in der „zweiten Generation“ bereits die Spaltung von 3 Urankernen. Die drei gespaltenen Urankerne ergeben insgesamt 9 freie Neutronen. Folglich werden in der dritten Generation schon 9 Kerne gespalten, wobei mindestens 27 Neutronen freigesetzt werden. Sie bewirken in der nächsten Generation 27 Kernspaltungen, wobei 81 Neutronen frei werden, usw.

Voraussetzung dafür ist, daß jedes frei gewordene Neutron wieder einen Urankern trifft. Wir wissen, daß sich in den Atomen riesige, stofflich leere Räume befinden. Das ganze Atom einschließ-



Schema der Kernspaltungs-Kettenreaktion

lich seiner Hülle ist 100000mal größer als der kleine Kern. Auch in den festen Stoffen sind die Atome so locker gepackt, daß sich nur die Atomhüllen berühren, aber nicht die Kerne. Das aus einem gespaltenen Kern herausfliegende Neutron wird sich also durch sehr viele Uranatome hindurchbewegen, ohne auf einen Atomkern zu treffen.

Als Länge der Wegstrecke, die das Neutron zurücklegt, bis es auf einen Kern trifft, läßt sich wiederum nur ein statistischer Durchschnittswert errechnen. Das heißt: Einige Neutronen werden durch Zufall schon nach kürzerer Strecke wieder auf einen Kern treffen, andere dagegen werden einen besonders langen Weg zurückzulegen haben. Die durchschnittliche Weglänge beträgt in einem kompakten Stück Uran 4,1 cm. Man bezeichnet das in der Fachsprache der Physik als „mittlere freie Weglänge“. Denn sie ist die Weglänge, die sich ein Neutron im Durchschnitt frei bewegen kann, bevor es wieder auf einen Urankern trifft.

Sollen viele frei gewordene Neutronen auf einen Urankern treffen, so muß das Stück Uran also einen Durchmesser von bei-

spielsweise 2 freien Weglängen, in diesem Falle also von $2 \times 4,1 \text{ cm} = 8,2 \text{ cm}$, haben. Dann würden selbst die Neutronen, die aus einem Kern in der Mitte der Urankugel nach zwei entgegengesetzten Richtungen herausfliegen, nach Zurücklegen der mittleren freien Weglänge die Kugel noch nicht verlassen haben.

Die kritische Masse

Man nennt die Größe eines Uranblocks, die den Ablauf einer Kettenreaktion von Kernspaltungen möglich macht, die „kritische Masse“. Die erste Voraussetzung für eine Kettenreaktion ist also, daß die kritische Masse erreicht oder überschritten wird.

Die Kernspaltungsbombe besteht aus zwei Uran-Halbkugeln, deren Uranmenge die kritische Masse unterschreitet, so daß keine Kettenreaktion entstehen kann. Mit gewöhnlichem chemischem Sprengstoff werden die beiden Halbkugeln aufeinandergeschossen. Beide zusammen ergeben mehr als die kritische Masse. Dadurch werden schlagartig, innerhalb von weniger als einer millionstel Sekunde, eine unvorstellbar große Anzahl von Urankernen

Berechnen wir einmal überschlagsweise, wie schnell die Lawine der Kettenreaktion anwächst! Nehmen wir an, die Geschwindigkeit eines schnellen Neutrons betrage 10^9 cm/s (das sind 1 Milliarde cm oder 10000 km je Sekunde). Dann würde es eine Strecke von 10 cm im einhundertmillionsten Teil einer Sekunde ($= 10^{-8} \text{ s}$) zurücklegen. Die zweite Generation der Kernspaltungen würde also bereits eine hundertmillionstel Sekunde nach der ersten Kernspaltung erfolgen, die dritte Generation nach $2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ usf. Innerhalb von $100 \cdot 10^{-8} \text{ s} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ ($= 1$ millionstel Sekunde) können 100 Generationen von Kernspaltungen erfolgen. Das ergibt die Zahl von $2^{100} = \text{rund } 10^{30}$ Kernspaltungen. Ausgeschrieben lautet die Zahl:

1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000.

1 kg Uran 235 enthält aber nur $2 \cdot 10^{24}$ Atome. Folglich können in nur 1 millionstel Sekunde mehr als 1 kg Uran 235 gespalten werden.

Die Atombombe

Da jede einzelne Kernspaltung Energie freisetzt, entsteht in einem Zeitraum, der weit kürzer als der sprichwörtliche Augenblick ist, eine ungeheure Energiemenge. Auf diesem Prinzip beruht die Explosion der Atombombe. Schon der erste noch verhältnismäßig einfache Atombombentyp hatte eine Sprengkraft, die der von 20 Millionen kg des gefährlichsten chemischen Sprengstoffs Trinitrotoluol (Abkürzung: TNT) entsprach. Die Explosionsstärke von Kernwaffen ist ein Maß für die freigesetzte Energiemenge und wird gewöhnlich als Energieäquivalent von TNT in Tonnen, Kilotonnen oder Megatonnen (Mega = 10^6) angegeben. Das bedeutet, daß die Sprengkraft der Atombombe der angegebenen Menge des Sprengstoffs TNT entspricht. Außer der Sprengkraft entfalten Kernwaffen aber noch andere gefährliche Wirkungen. Die Temperatur im Zentrum einer explodierenden Atombombe wurde mit etwa 10 Millionen Grad Celsius berechnet. Es entsteht ein Feuerball riesiger Größe. Wenn sich die Feuerkugel bereits auf 100 m Durchmesser vergrößert hat, beträgt ihre Temperatur immer noch 7000°C . Das ist heißer als die Oberfläche der Sonne. Der unheimlich heiße Gasball sendet eine so sengende Wärmestrahlung aus, daß noch im Umkreis von 3500 Metern alle brennbaren Gegenstände entflammt werden. Verheerende Wirkungen haben die Gammastrahlung und die anderen radioaktiven Stoffe, die in großen Mengen entstehen und deren Strahlung erst sehr allmählich, im Verlauf von Wochen und Monaten nachläßt.

Voraussetzung für die explosionsartig verlaufende Kettenreaktion von Kernspaltungen ist, daß *jeder* Atomkern der Urankugel leicht spaltbar ist, d. h. sofort mit einer Spaltung reagiert, wenn er von einem Neutron getroffen wird. Diese Voraussetzung ist in Uran mit natürlicher Zusammensetzung der Isotope – als Natururan bezeichnet – nicht gegeben. Denn leicht spaltbar ist nur das Isotop Uran 235, nicht dagegen Uran 238. Daher muß das Uran 235 von dem schwer spaltbaren Uran 238 abgetrennt werden, oder man muß als Kernsprengstoff reines Plutonium verwenden.

Explosiv verlaufende Kettenreaktionen von Kernspaltungen sind für wirtschaftliche Zwecke nur in Ausnahmefällen von Interesse, nämlich wenn es darum geht, gewaltige Erdmassen zu bewegen,

um beispielsweise künstlich einen anderen Verlauf von Flußbetten zu schaffen, der für die Menschen günstiger ist. Es sind bereits Projekte erörtert worden, durch Atomspaltungen den Lauf von Flüssen zu begradigen oder neue große Schifffahrtskanäle auf Landengen anzulegen. Beispielsweise wurde erwogen, einen zweiten Panamakanal durch die mittelamerikanische Landenge zu verlegen und damit einen weiteren Seeweg zwischen Atlantischem und Stilleem Ozean zu eröffnen. Doch sind solche Projekte noch nicht verwirklicht worden. Zumindest in von Menschen bewohnten Gebieten wären derartige Sprengungen durch Kernexplosion nicht ganz ungefährlich.

Für die Energieerzeugung kann man mit einer explosiv verlaufenden Kettenreaktion überhaupt nichts anfangen. Denn die gewaltige Energiemenge wird in einem Moment frei, ohne daß man sie verwerten kann. Für die technische Energiegewinnung kommt es darauf an, die Energiemenge, die bei einer Kernexplosion schlagartig innerhalb kürzester Zeit frei wird, über einen langen Zeitraum zu verteilen. Deshalb darf die Kettenreaktion nicht lawinenartig anwachsen, sondern muß so gesteuert werden, daß von den durchschnittlich 2,5 Neutronen, die bei einer Kernspaltung frei werden, nur etwa 1 Neutron eine weitere Kernspaltung auslöst. Von den 2,5 dabei erneut frei werdenden Neutronen darf wiederum nur etwa 1 Neutron eine neue Kernspaltung bewirken und so fort in unendlicher Kette.

Gezügelter Titanenstrom

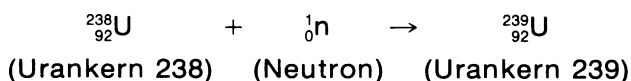
Wie kann man die Kettenreaktion steuern? Ja, vielleicht muß man sogar die Frage aufwerfen: Warum hat sich nicht bereits alles Uran, das auf der Erde vorhanden ist, durch eine allmählich verlaufende langsame Kettenreaktion gespalten?

Auch die gesteuerte, langsame Kettenreaktion kann unter natürlichen Bedingungen niemals von selbst einsetzen, sondern man muß erst künstlich die Bedingungen dafür schaffen. Selbst wenn man das Uran aus seinen Erzen sorgfältig abtrennt und chemisch völlig reines Uran herstellt, kann noch keine Kettenreaktion von Kernspaltungen entstehen. Wenn wir die „Neutronenhaubitze“, also eine Polonium-Beryllium-Ampulle, unmittelbar neben einem

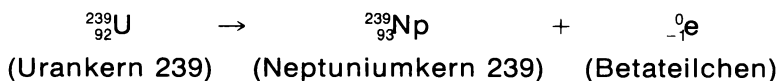
Stück reinem Uran aufstellen, werden immer nur einzelne wenige Urankerne gespalten, aber auf keinen Fall entsteht eine Kettenreaktion. Es ist ungemein schwierig, die Bedingungen für eine Kernkettenreaktion künstlich zu schaffen!

Wenn wir bisher davon sprachen, daß Atomkerne des Urans durch Neutronen gespalten werden, so war das eine Vereinfachung. Jetzt müssen wir den Vorgang genauer betrachten. Das chemische Element Uran besteht hauptsächlich aus den beiden Isotopen 238 und 235. Das Uran-Isotop mit der Massenzahl 238 wurde hier zuerst genannt, weil es den weitaus überwiegenden Teil des Elements Uran ausmacht, nämlich 99,3 Prozent. Nur 0,7 Prozent entfallen auf das Isotop 235. (In extrem geringfügigen Mengen gibt es noch das Isotop Uran 234. Wegen der winzigen Menge können wir es für unsere nachfolgenden Überlegungen jedoch außer Betracht lassen.)

Hinsichtlich der Spaltbarkeit besteht zwischen Uran 235 und Uran 238 ein großer Unterschied. Uran-235-Kerne spalten sich leicht, d. h. in jedem Fall, gleichgültig, ob sie von einem schnellen oder langsamen (thermischen) Neutron getroffen werden. Uran-238-Kerne spalten sich dagegen nicht, genauer gesagt, äußerst selten. Überdies haben die Kerne von Uran 238 die Eigenschaft, schnelle Neutronen einzufangen. Sie wandeln sich dadurch nach den früher schon einmal angeführten Gleichungen



zunächst in das radioaktive Nuklid Uran 239 um, das sich durch Betazerfall entsprechend der Gleichung



unter Aussendung eines Betateilchens in das Transuran Neptunium umwandelt. Dieses schließlich wandelt sich durch nochmaligen Betazerfall in das Transuranelement Plutonium um.

Wir können daher jetzt Licht in die anfangs so rätselhaften Ergebnisse der Versuche bringen, bei denen Uran mit Neutronen bestrahlt wurde. In den Fällen, in denen das Neutron von einem Kern

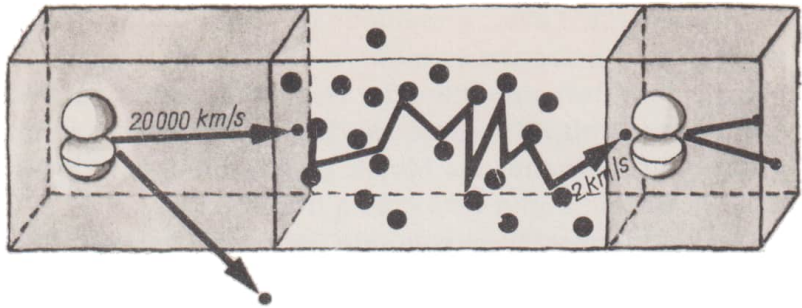
Uran 238 eingefangen wurde, entstanden tatsächlich Transurane, wie Fermi richtig vermutete. In den Fällen, in denen das Neutron jedoch einen Kern von Uran 235 traf, fand eine Kernspaltung statt, und es bildeten sich als „Spaltprodukte“ Kerne mittelschwerer Elemente wie Barium und Krypton. Beide Hypothesen waren daher richtig, sowohl die, daß durch Neutronenbeschuß Kernspaltungen erfolgen, als auch die, daß dabei Transurane gebildet werden.

Kalkulationen mit Neutronen

Für die Kettenreaktion von Urankernspaltungen ist jedes Neutron, das von einem Uran-238-Kern eingefangen wird, zunächst verloren. Da Natururan 142mal mehr Uran 238 enthält als Uran 235, würde von durchschnittlich 143 freien Neutronen nur ein einziges auf einen Kern von Uran 235 treffen. Alle übrigen treten mit Kernen von Uran 238 in Wechselwirkung, werden also eingefangen und sind verloren.

143 Neutronen je Kernspaltung entstehen aber gar nicht, sondern nur durchschnittlich 2,5 Neutronen. Folglich ist in Natururan eine Kettenreaktion von Kernspaltungen unmöglich. Ein Ausweg bestände darin, daß man das Isotop Uran 238 abtrennt, so daß nur noch reines Uran 235 übrig bleibt. Da aber nicht alle 2,5 Neutronen, sondern nur 1 Neutron wieder einen Kern Uran 235 spalten soll, ist es für die gesteuerte Kettenreaktion gar nicht nötig, das Uran 238 *völlig* abzutrennen. Es genügt schon, die Prozentsätze, in denen die beiden Uranisotope vorhanden sind, künstlich zu verändern, wobei der Prozentsatz des Uran 238 verringert und der des Uran 235 erhöht wird.

Das in dieser Weise veränderte Element bezeichnet man im Unterschied zum „Natururan“ als „angereichertes Uran“. Zum Beispiel wird der Prozentsatz des Uran 235 von 0,7% im Natururan auf 3 oder 5% im angereicherten Uran erhöht. Das allein würde aber nicht genügen, denn bei 5 Prozent Uran-235-Gehalt verbleiben immer noch 95 Prozent, also 19mal mehr Uran 238. Daher würde jetzt im statistischen Durchschnitt erst jedes 20. Neutron einen Kern von Uran 235 treffen. Das reicht noch nicht für eine Kettenreaktion.



Wirkungsweise des Moderators. Die bei einer Kernspaltung (links) frei werdenden schnellen Neutronen werden durch Zusammenstöße mit Atomkernen des Moderators stark abgebremst, bevor sie wieder auf andere Urankerne treffen und sie spalten (rechts)

Moderato...

Doch gibt es noch einen zweiten Ausweg. Er beruht darauf, daß *langsame* Neutronen von den Kernen Uran 238 nicht bzw. nur selten eingefangen werden. Folglich kann man das Zustandekommen einer Kettenreaktion dadurch begünstigen, daß die Neutronen, bevor sie auf einen Kern U 238 treffen, abgebremst werden. Bei den meisten derzeitigen Reaktoren werden beide Wege zugleich beschritten: Uran 235 wird künstlich angereichert, *und* als Neutronen werden thermische Neutronen verwendet.

Beide Maßnahmen kommen sich gewissermaßen auf halbem Wege entgegen. Würde man die Neutronen nicht abbremsen, so müßte man das Uran 235 sehr hoch anreichern. Wir können schon überschlagsweise berechnen, daß dann das Uran 235 auf mindestens 40 Prozent angereichert sein müßte, wenn von 2,5 Neutronen im Durchschnitt wenigstens 1 auf einen Kern von Uran 235 treffen soll. In Wirklichkeit müßte der Prozentsatz des Uran 235 sogar noch höher liegen, weil Neutronen außer durch Einfang in Uran-238-Kernen noch auf andere Weise verlorengehen.

Kombiniert man jedoch die Methode der Anreicherung des leicht spaltbaren Urans 235 mit der Methode der Neutronenverlangsamung, so genügt eine wesentlich geringere Anreicherung, weil die meisten Neutronen dann trotz der Überzahl der Uran-238-Kerne von diesen nicht mehr eingefangen werden, da langsame

Neutronen für diese „ungenießbar“ sind. Jeder Reaktor, der mit langsamen Neutronen arbeitet, muß deshalb in geeigneter Anordnung einen Stoff enthalten, der Neutronen abbremst. Man bezeichnet diesen Stoff im Reaktor als Moderator. Darin steckt das auch in der Fachsprache der Musik gebräuchliche Wort „moderato“, das die Bezeichnung für „mäßig bewegt“ ist.

Der als Moderator verwendete Stoff muß bestimmte Eigenschaften haben: Erstens muß er die Neutronen möglichst stark abbremsen. Wir erfuhren früher schon, daß das dann der Fall ist, wenn seine Atomkerne nicht wesentlich schwerer als die Neutronen selbst sind. Folglich eignen sich nur leichte Elemente als Moderator. Es eignen sich aber auch nicht alle leichten Elemente dafür. Denn die zweite, äußerst wichtige Eigenschaft, die ein Moderator haben muß, besteht darin, daß er Neutronen zwar abbremst, aber nicht einfängt. Denn sonst „schluckt“ der Moderator selbst zu viele Neutronen.

Nicht nur Uran 238 fängt also Neutronen ein, sondern sehr viele, ja sogar die meisten Stoffe. Das ist nur eine andere Ausdrucksweise für die uns schon bekannte Tatsache, daß sich von fast allen chemischen Elementen durch Beschuß mit Neutronen künstliche radioaktive Nuklide herstellen lassen. Denn die künstlichen Radionuklide entstehen ja gerade dadurch, daß ein zusätzliches Neutron in den Atomkern eingebaut, also eingefangen wird. Statt Einfang sagt man in der Fachsprache auch Absorption.

Schweres Wasser

Es gibt gute und weniger gute Moderatoren, auch Bremssubstanzen genannt. Ein Hauptunterschied zwischen ihnen besteht darin, daß sie schnelle Neutronen mehr oder weniger stark abbremsen. Ein sehr guter Moderator ist sogenanntes schweres Wasser. Das ist Wasser, dessen Moleküle statt normaler Wasserstoffatome Atome des schweren Wasserstoffs enthalten. Schweres Wasser ist sehr teuer. Denn es ist nur in sehr winzigen Mengen im Wasser enthalten. Man muß es durch komplizierte Vorrichtungen aus dem normalen Wasser abtrennen oder zumindest sehr stark anreichern.

Professor Joliot-Curie hatte in Frankreich bereits eine große Menge – 185 kg – schweres Wasser gesammelt. Als 1940 die Front der französischen Truppen bei Sedan durchbrochen wurde, be-

stand die Gefahr, daß die kostbare Flüssigkeit in die Hände der Faschisten geraten und ihnen behilflich sein könnte, den ersten Versuchsreaktor zu bauen und die Produktion von Atombomben vorzubereiten. Joliot-Curie beschloß, noch in derselben Nacht die versiegelten Kanister mit dem schweren Wasser in Sicherheit zu bringen. Man schaffte sie vorläufig in den zentralen Teil Frankreichs. Als die faschistische Wehrmacht auf Paris vorrückte, verbrannten Professor Joliot-Curie und seine Mitarbeiter alle wertvollen Aufzeichnungen über die mühsam errungenen Forschungsergebnisse. Die Kanister mit dem schweren Wasser aber wurden von dem französischen Hafen Bordeaux aus auf einem Kohlendampfer nach England verfrachtet.

Zwei Mitarbeiter Joliot-Curies begleiteten das Schiff und hielten für den Fall, daß es versenkt werden sollte, an Bord ein Floß bereit. Sie versprachen Professor Joliot-Curie, notfalls auf das Floß überzustiegen und sich nicht von den Kanistern zu trennen, was auch geschehen würde. Doch es kam zu keinem Abenteuer. Der Kohlendampfer mit der kriegswichtigen Fracht kam unbehelligt in England an. Joliot-Curie aber spielte dem faschistischen Geheimdienst die falsche Nachricht in die Hände, das schwere Wasser sei zusammen mit einem anderen versenkten Schiff untergegangen.

Ein weniger guter Moderator ist auch das natürliche Wasser. Doch muß Wasser, um es als Moderator verwenden zu können, durch mehrmaliges Destillieren erst von den darin gelösten Mineralstoffen befreit werden, die sich als Kesselstein absetzen. Denn viele der im Wasser gelösten Mineralien absorbieren Neutronen ebenfalls sehr stark. Ein dritter gebräuchlicher Moderator ist Graphit sehr hoher Reinheit. Graphit ist die hexagonal kristallisierende Modifikation (Form) des Kohlenstoffs.

Und wieder einmal: Wahrscheinlichkeitsrechnung

Was bedeutet es eigentlich, wenn wir sagen, ein Stoff absorbiert Neutronen stärker oder weniger stark als ein anderer? Müßte es nicht so sein, daß die Atomkerne eines bestimmten Elements Neutronen entweder stets einfangen oder gar nicht einfangen? Einen Ball kann man doch auch nur entweder fangen oder nicht fangen. Ein Mittelding gibt es nicht.

Bleiben wir bei dem Vergleich mit dem Ballspiel! Es gibt geschickte und weniger geschickte Spieler. Manchen entgleitet ein Ball noch, wenn er ihnen so gut wie in den Schoß geworfen wird. Andere Spieler hingegen verstehen es, einen scharf geworfenen Ball noch zu fangen. Atomkerne sind freilich keine Lebewesen mit mehr oder weniger sportlichem Geschick, und der Prozeß der Absorption eines Neutrons ist etwas anderes als das Fangen eines Balls. Es war also nur ein Vergleich.

Aber es ist nicht so, daß die Atomkerne eines bestimmten Elements ein Neutron entweder gar nicht oder aber in jedem Falle absorbieren. Man kann nur sagen, daß die Atomkerne eines bestimmten Stoffes Neutronen mit einer gewissen „statistischen“ Wahrscheinlichkeit absorbieren. Auch die Neutronenabsorption ist also ein *statistischer* Vorgang. Die Wahrscheinlichkeit, mit der Neutronen eingefangen werden, ist bei den verschiedenen Elementen unterschiedlich.

Sie ist sogar bei den einzelnen Isotopen desselben chemischen Elements verschieden. Für dasselbe Isotop desselben Elements ist ferner die Wahrscheinlichkeit für die Absorption von Neutronen verschiedener Bewegungsenergie unterschiedlich. So ist z. B. die Wahrscheinlichkeit für das Einfangen von energiereichen, „schnellen“ Neutronen durch Uran-238-Kerne sehr groß, für thermische Neutronen dagegen sehr gering. Das bedeutet: Man kann nicht sagen, daß ein Kern von Uran 238 niemals ein langsames Neutron einfängt; man kann nur sagen, daß es äußerst selten vorkommt. Und umgekehrt: Ein schnelles Neutron wird von einem Uran-238-Kern nicht immer eingefangen. Es kommt ganz selten auch vor, daß sich der U-238-Kern dabei spaltet. Aber meist fängt er das Neutron nur ein.

Man könnte sagen: Die Ausnahme bestätigt die Regel. Da wir es bei kernphysikalischen Prozessen aber stets mit sehr großen Anzahlen von Atomen und Teilchen zu tun haben, interessiert das ausnahmsweise Verhalten des einen oder anderen Kerns im Einzelfall nicht, sondern nur das durchschnittliche Verhalten. Berechnungen kann man daher nur die Wahrscheinlichkeit der Absorption zugrunde legen.

Die Wahrscheinlichkeit der Absorption von Neutronen mit un-

terschiedlicher Energie kann für alle Elemente genau gemessen werden. Solche Messungen haben die Physiker viele Jahre lang beschäftigt und werden noch heute fortgesetzt, da sich im Reaktor nicht nur Uran und der Moderator befinden, sondern auch viele andere Werkstoffe, aus denen die Hilfseinrichtungen bestehen. Zum Beispiel muß das Uran mit einer Korrosionsschutzschicht umgeben werden. Das Reaktorgefäß braucht eine Wandung aus irgendeinem Material usw. Für alle überhaupt im Reaktor verwendeten Werkstoffe muß die Wahrscheinlichkeit der Absorption von Neutronen bekannt sein. Werkstoffe, die sich jahrzehntelang in der Technik hervorragend bewährt hatten, konnte man für den Bau von Kernreaktoren nicht mehr verwenden, weil sie Neutronen leicht absorbieren.

Alles dreht sich um Neutronen

Die Bemühungen der Wissenschaftler, die einen Reaktor konstruieren, konzentrieren sich also immer wieder darauf, alle Neutronenverluste so weit wie möglich auszuschalten. Die Gewinnung von Energie durch die Kernspaltungs-Kettenreaktion läuft letzten Endes darauf hinaus, mit den bei jeder Spaltung frei werdenden Neutronen äußerst sparsam hauszuhalten. Das Prinzip der Sparsamkeit mit Neutronen muß dabei um so strenger gehandhabt werden, je weniger das leicht spaltbare Isotop Uran 235 angereichert ist. Verwendet man Natururan, das nur 0,7 Prozent Uran 235 enthält, so muß man Neutronenverluste durch Absorption unterbinden. In diesem Falle braucht man den besten Moderator.

Da zwischen den Atomhüllen und Atomkernen viel stofflich leerer Raum ist, können Teilchen von der Größe der Neutronen, Protonen usw. selbst dicke Stahlwände durchdringen. Die Teilchen „schlüpfen“ durch die vielen stofflich leeren Zwischenräume zwischen den Atomhüllen und ihren Kernen hindurch. Eine weitere Ursache von Neutronenverlusten besteht daher neben der Absorption darin, daß die Neutronen einfach aus dem Reaktor abwandern, z. B. in das Stahlgehäuse eindringen, das den Reaktor umschließt, und darin steckenbleiben. Oder sie durchdringen auch das stählerne Reaktorgefäß noch und bleiben in den daran angrenzenden dicken Betonmauern stecken, die um das Reaktorgefäß errichtet werden,

damit sie die starke Strahlung abschirmen. Reaktoren müssen deshalb, um Neutronenverluste durch Abwandern zu vermeiden, an der Innenwand des Reaktorgefäßes nochmals mit einem „Reflektor“ ausgekleidet werden. Dafür eignen sich dieselben Stoffe wie für den Moderator. Die Atomkerne des Reflektormaterials stoßen die Neutronen, die den Reaktor verlassen wollen, in das Innere zurück, ohne sie zu absorbieren.

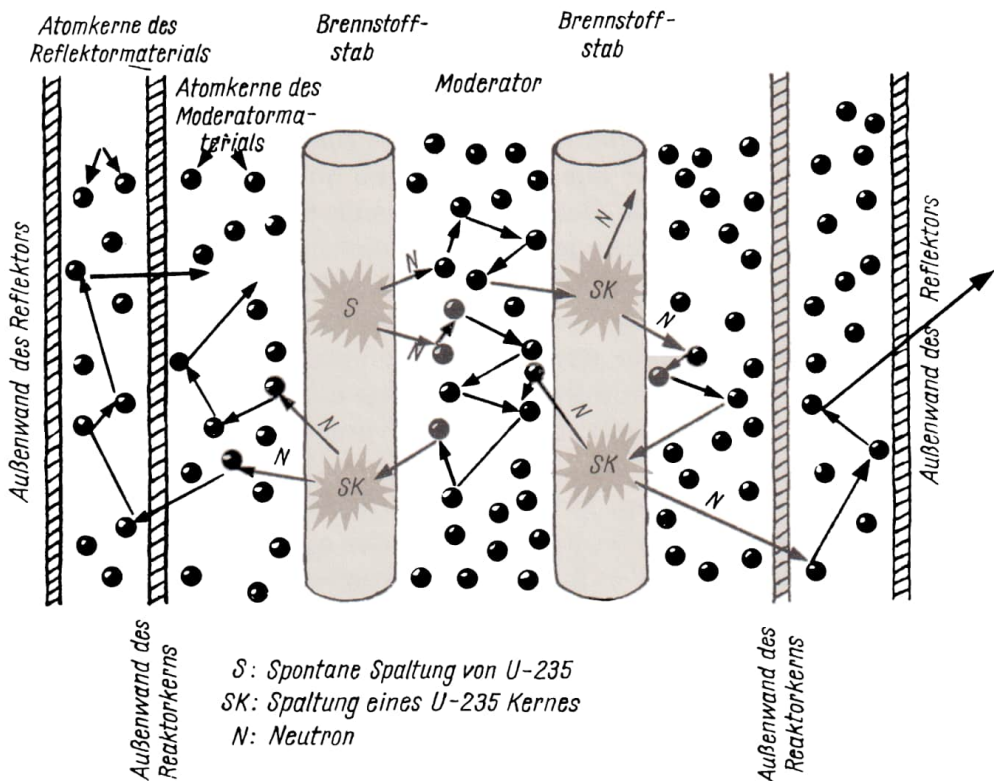
Fassen wir noch einmal die wichtigsten Bedingungen zusammen, die im Kernreaktor für das Entstehen einer Kettenreaktion erfüllt sein müssen:

1. das Vorhandensein einer kritischen Menge Uran oder allgemein ausgedrückt: spaltbaren Materials (das man auch „Kernbrennstoff“ nennt, obwohl es nicht im chemischen Sinne verbrannt wird);
2. die Verlangsamung der Neutronen durch einen Moderator, um Neutronenverluste infolge Absorption weitgehend einzuschränken;
3. weitere Einschränkungen von Neutronenverlusten, die infolge des Abwanderns von Neutronen aus dem Reaktor entstehen, durch einen Reflektor.

Neutronen auf Zickzackkurs

Kernbrennstoff und Moderatorsubstanz müssen im Reaktor in geeigneter Weise angeordnet sein. Die Neutronen können ja nicht gezielt auf die Atomkerne des spaltbaren Materials „abgeschossen“ werden, sondern fliegen aus den gespaltenen Kernen wahllos nach allen Richtungen heraus. Nach den statistischen Wahrscheinlichkeitsgesetzen können wir annehmen, daß sich in jeder beliebigen Richtung etwa gleich viel Neutronen durch den Reaktor bewegen. Die Forderung lautet nun, daß die soeben aus einem gespaltenen Kern austretenden Neutronen möglichst nicht sofort wieder auf einen Urankern treffen, da diese mit höchster Wahrscheinlichkeit ein nicht spaltbarer U-238-Kern sein würde.

Die Forderung ist nicht zu erfüllen, wenn das Uran als großer kompakter Block in den Reaktor eingesetzt wäre. Denn dann würden die Neutronen mit großer Wahrscheinlichkeit sogleich auf einen Urankern 238 treffen. Sie sollen aber zunächst nicht mit Urankernen, sondern mit Kernen des Moderators zusammenstoßen.



Die Vorgänge im Reaktor. Die bei den Kernspaltungen frei werdenden Neutronen wandern in den zwischen den Kernbrennstoffstäben befindlichen Moderator ein und werden dort verlangsamt, bevor sie auf weitere Urankerne der Brennstoffstäbe treffen. Bei ihrem zufälligen Zickzack-Kurs geraten auch Neutronen zur Außenwand des Reaktors. Doch werden die meisten von dem Reflektor wieder ins Innere des Reaktors zurückgeworfen. Einige Neutronen entweichen jedoch und müssen in einer dicken Betonschutzwand, die den Reaktor umschließt, absorbiert werden.

Darum hat der Kernbrennstoff nicht die Form eines kompakten Würfels oder einer Kugel, sondern ist zu vielen dünnen Stäben verarbeitet, die nur etwa die Dicke eines Bleistifts haben. Viele solcher Stäbe hängen getrennt voneinander im Kernreaktor und sind jeweils von der Moderatorsubstanz umgeben. Dient Wasser als Moderator, so hängen die Brennstoffstäbe also mit gewissen Abständen voneinander im Wasser. Ein Graphitmoderator hat die Form eines Blocks mit vielen Löchern. Die Brennstoffstäbe hängen

in den Löchern. Stets ist also um einen Brennstoffstab der Moderator angeordnet.

Noch bevor die aus einem gespaltenen Kern herausgefliegenen Neutronen mit dem nächsten Urankern zusammenstoßen, sind sie daher bereits wieder aus dem Uranstab ausgetreten. Nur die wenigen Neutronen, die sich zufällig gerade in Richtung der Längsachse des Stabs bewegen, stoßen nach längerer oder kürzerer Strecke sofort wieder auf einen Urankern. Die große Masse der freien Neutronen aber verläßt zunächst den Stab und wandert in den Moderator hinein, der alle Kernbrennstoffstäbe umgibt. Im Moderator stößt das Neutron nacheinander mit vielen Kernen zusammen und prallt dadurch zufällig in die verschiedensten Richtungen hin und her.

Irgendwann bewegt sich das Neutron auf seinem Zickzackkurs durch das Spiel des Zufalls auch wieder aus dem Moderator hinaus und tritt erneut in irgendeinen Brennstoffstab ein. Durch die zahlreichen Zusammenstöße mit Atomkernen des Moderators ist es inzwischen aber zu einem langsamen Neutron geworden und wird daher nicht mehr von den Kernen U 238 eingefangen. Es wandert im Brennstoffstab weiter, bis es schließlich irgendwann und irgendwo auf einen der seltenen Urankerne 235 trifft.

In diesem Moment hat sich der Zweck des Neutrons erfüllt. Es spaltet den Kern und erzeugt dadurch weitere Neutronen, mit denen dasselbe Spiel von neuem beginnt: Sie fliegen zunächst aus dem Uranstab heraus, gehen in den Moderator über, werden dort zu thermischen Neutronen, treten bei ihrer Zickzackwanderung irgendwo wieder in einen Uranstab über und treffen schließlich auf einen U-235-Kern. Die Kettenreaktion ist in Gang gekommen.

Ist es nicht ein faszinierendes „Spiel“, das die Physiker und Ingenieure, die sich der Kerntechnik verschrieben haben, hier mit den winzigen, unsichtbaren Teilchen treiben? Obwohl sie kein einziges Neutron direkt lenken und dirigieren können, organisieren sie die unzähligen Zufälle dennoch so, daß ein genau vorherberechenbarer Endeffekt dabei entsteht! In einem Kernreaktor bewegen sich in jeder Sekunde durch jeden beliebigen Quadratzentimeter etwa 10^{13} Neutronen. Das sind 10000mal eine Milliarde Neutronen! Obwohl jedes dieser Teilchen sich nur zufällig in einer

der vielen möglichen Richtungen bewegt, sind von den Kernphysikern die technischen Anlagen so klug durchdacht worden, daß die zufälligen, nur statistisch erfaßbaren Bewegungen der Teilchen zu einem ganz bestimmten, vorherberechneten Ergebnis führen. Die Kernphysik und -technik ist gewiß eine der größten und bewundernswertesten Leistungen des menschlichen Geistes.

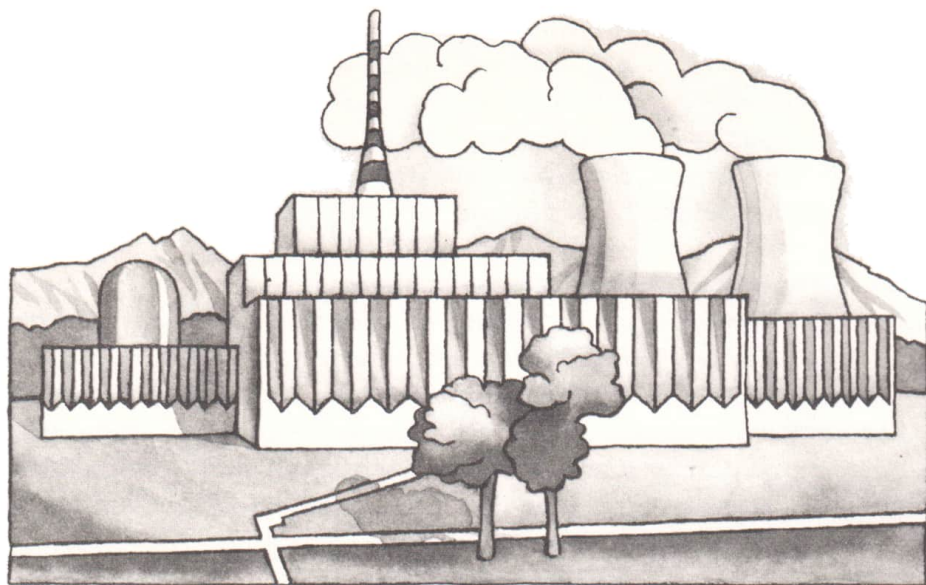
Aus Kernenergie wird Wärme

Die hohe Bewegungsenergie, mit der die Neutronen aus den gespaltenen Kernen herausfliegen, geht beim Abbremsen durch den Moderator aber nicht schlechthin verloren, sondern wird auf den Moderator übertragen. Unzählig viele Moleküle der Moderatorsubstanz werden zu schnelleren Schwingungen angeregt. Das aber bedeutet, wie wir schon erfuhren, daß sie eine höhere Temperatur annehmen. Der Moderator wird heiß.

Aber nicht nur die schnellen Neutronen, sondern auch die Bruchstücke, in die sich die Urkerne spalten, die Spaltprodukte, weisen eine hohe Bewegungsenergie auf. Sie fliegen gleichfalls mit großer Geschwindigkeit umher und stoßen dabei mit vielen anderen Atomen und Molekülen des Kernbrennstoffs, des Moderators und aller anderen im Reaktor befindlichen Materialien zusammen. Dabei übertragen sie ihre Bewegungsenergie auf diese. Alles, was sich im Reaktor befindet – Kernbrennstoff, Moderator, Reflektor –, wird heiß. Würden wir nichts gegen diese sich immer mehr steigende Erhitzung tun, so müßte sich der Reaktor schon nach kurzer Zeit überhitzen.

Wir müssen deshalb laufend Wärme aus dem Reaktor abführen. Zu diesem Zwecke fließt ständig ein Kühlmittel, im einfachsten Falle Wasser, durch den Reaktor, so wie der Motor eines Kraftwagens durch Wasser gekühlt wird. Das Kühlmittel erfüllt einen doppelten Zweck. Es verhindert die Überhitzung des Reaktors und bietet die Möglichkeit der technischen Nutzung der abgeführten Wärme.

In der Schule haben wir eine Zentralheizung. Im Keller des Schulhauses befindet sich ein großer Heizungskessel. Darin wird durch Verbrennen von Kohle Wasser erhitzt. Das heiße Wasser strömt durch die Rohrleitungen in die Zentralheizungskörper der



einzelnen Räume und gibt seine Wärme dabei an die Luft der Klassenzimmer ab. Das Wasser selbst kühlt sich dadurch wieder ab, fließt abgekühlt in den Heizungskessel zurück, wird dort von neuem erhitzt, gelangt als warmes Wasser wieder in die Zentralheizungskörper der Klassenräume, fließt abgekühlt in den Heizkessel zurück und so weiter in ständigem Wechsel.

So ergeht es auch dem Kühlmittel, das durch den Reaktor fließt. Nur ist das Kühlmittel, wenn es durch die Rohrleitungen aus dem Reaktor kommt, sehr viel heißer als das Wasser in einem Zentralheizungskessel. Man heizt mit dem erhitzten Kühlmittel auch keine Räume, sondern benutzt es dazu, um anderes Wasser zu erhitzen. Im Reaktor und in den Rohrleitungen, die aus dem Reaktor hinaus und wieder in ihn zurückführen, steht das Kühlmittel unter hohem Druck. Deshalb verdampft es trotz sehr hoher Temperatur nicht, da die Verdampfungstemperatur vom Druck abhängt. Steht Wasser nur unter dem normalen Druck der Luft, so verdampft es bei 100°C . Ist der Druck niedriger, wie z. B. auf sehr hohen Bergen, so verdampft es schon bei Temperaturen unter 100°C . Ist der Druck entsprechend hoch, so verdampft es unter Umständen erst bei 200°C .

Wärme wird ausgetauscht

Dieses sehr stark erhitze Wasser fließt in einem geschlossenen Rohrsystem durch den Reaktor und gibt in einem sogenannten Wärmeaustauscher die aufgenommene Wärme an Wasser in einem zweiten Rohrsystem ab. Etwas ganz Ähnliches geschieht manchmal auch im Haushalt. Ist der Kaffee in der Kanne schon zu kalt geworden, so stellt die Mutter die Kanne in einen Topf, der mit kochend heißem Wasser gefüllt ist. Das ist auch ein einfacher Wärmeaustauscher. Das heiße Wasser im Topf überträgt einen großen Teil seiner Wärme auf den kalten Kaffee in der Kanne, der dadurch wieder heiß wird.

Das im Wärmeaustauscher erhitze Wasser des zweiten Kühlsystems steht jedoch nicht unter hohem Druck und kann daher verdampfen. Der Dampf strömt gegen die Schaufeln eines Turbinenlaufrades, das mit dem Rotor (Läufer) einer großen Dynamomaschine verbunden ist. Sie erzeugt elektrische Energie. Damit sind wir am Ziel: Aus der Kernenergie wurde Wärme, diese wurde über das erste Kühlmittel und den Wärmeaustauscher auf Wasser übertragen, das dadurch verdampft und in strömende Bewegung gerät. Die Bewegungsenergie des strömenden Dampfes wird in die Bewegungsenergie des rotierenden Läufers der Dynamomaschine umgewandelt und diese schließlich in elektrische Energie. Das sind noch viele Umwege und Wandlungen der Energieform. Künftig wird man das vielleicht vereinfachen und elektrische Energie auf direkterem Wege aus der Kernenergie gewinnen.

Im Kernkraftwerk erfüllt der Wärmeaustauscher zugleich noch einen anderen Zweck. Da das Kühlmittel durch den Reaktor fließt, enthält es viele hochradioaktive Stoffe. Denn alle Spaltprodukte, die bei der Spaltung der Urkerne entstehen, sind radioaktiv. Auch Neutronen wandern in das Kühlmittel ein und erzeugen durch Neutroneneinfang radioaktive Nuklide. In die Turbinen und Dynamomaschinen sollen aber keine radioaktiven Stoffe eindringen. Das würde die Arbeitskräfte, die die Maschinen bedienen und reparieren, gefährden. Durch den Wärmeaustauscher wird erreicht, daß das stark radioaktive Kühlmittel immer nur im Reaktor selbst und in den dazugehörigen Rohrleitungen zirkuliert. Es bleibt streng getrennt von dem Wasserdampf, der die Turbinen treibt.

Stäbe halten ihn in Schach

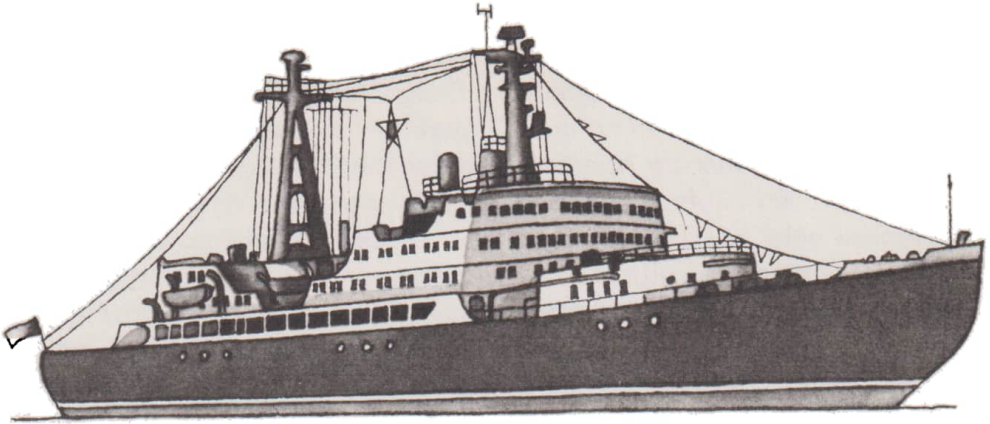
Die Kernspaltungs-Kettenreaktion in Gang zu setzen ist schwierig, sie zu drosseln oder sogar ganz zu unterbinden ist dagegen außerordentlich leicht. Man braucht nur einen oder mehrere Stäbe in den Reaktor einzufahren, die aus einem Material bestehen, das Neutronen stark absorbiert. Es gibt Stoffe, die Neutronen gierig aufsaugen wie ein Schwamm das Wasser. Dazu gehören z. B. die Elemente Kadmium und Bor. Die Wahrscheinlichkeit der Absorption von thermischen Neutronen durch Kadmium ist rund 10000mal so groß wie die durch Wasserstoff. Schiebt man einen Stab aus diesen Materialien in die „aktive Zone“ des Reaktors, in der die Kernspaltungen stattfinden, so werden so viele Neutronen eingefangen, daß nicht mehr genügend für die Aufrechterhaltung der Kettenreaktion übrigbleiben. So kann die Kettenreaktion nicht nur völlig „erstickt“, sondern auch sehr fein reguliert werden.

Das geschieht sogar automatisch. Wächst die Kettenreaktion zu stark an, so schalten sich elektrische Antriebe ein, die Regulierstäbe aus Bor oder Kadmium etwas tiefer in den Reaktor einfahren. Außerdem sind noch ein oder mehrere Sicherheitsstäbe vorgesehen. Sobald die Gefahr entsteht, daß der Reaktor „durchgehen“ könnte, werden sie automatisch in den Reaktor eingefahren und ersticken schlagartig die Kettenreaktion.

Minireaktoren – 30 cm groß

So weit der prinzipielle Aufbau eines Kernreaktors und eines Kernkraftwerks. Nicht jeder Kernreaktor ist mit einem Kraftwerk verbunden. Zur Zeit gibt es noch viele Reaktoren auf der Erde, die lediglich experimentellen Zwecken dienen und daher nicht für große Wärmeleistungen konstruiert sind. Die hauptsächlichen Konstruktionsmerkmale eines Reaktors werden schon in seiner Bezeichnung zum Ausdruck gebracht. So bedeutet z. B. die Bezeichnung „Wasser-Wasser-Reaktor“, daß Wasser als Moderator und Kühlmittel benutzt wird. Das erste Wort benennt den Moderator, das zweite das Kühlmittel.

Die hier geschilderte Art der Anordnung von Brennstoff und Moderator ist nicht die einzig mögliche, sondern nur kennzeichnend für den sogenannten heterogenen Reaktor. Das bedeutet:



Atomeisbrecher „Lenin“

Brennstoff und Moderator sind räumlich getrennt. Unter bestimmten Bedingungen funktionieren aber auch „homogene Reaktoren“, bei denen Brennstoff und Moderator innig in einer Flüssigkeit vermischt sind. Als Moderator dient dabei Wasser, in dem zugleich chemische Verbindungen gelöst sind, die den Kernbrennstoff enthalten. Oder es sind im Wasser sehr kleine, feste Teilchen des Kernbrennstoffs aufgeschlämmt wie Kreideteilchen in der Schlämmschleim, mit der wir Decken und Wände weißen.

Ein homogener Reaktor kann sehr klein sein. Doch muß das spaltbare Material darin sehr hoch angereichert sein. Ein Reaktormodell dieses Typs besteht z. B. aus einer Kugel von nur 30 cm Durchmesser, die mit einer Uranyl-sulfatlösung gefüllt ist, in der das leicht spaltbare Uran 235 sehr hoch angereichert ist. Die Kühlung erfolgt durch eine Rohrschlange, die die Kugel durchläuft und von Kühlwasser durchflossen wird. Ein solcher Reaktor kann eine Leistung bis zu 50 Kilowatt abgeben. Allerdings muß die kleine Kugel zum Schutz gegen die austretende starke Strahlung mit einer dicken Betonschutzwand umgeben werden. Auch große Reaktoren haben dicke Betonschutzwände. Von dem eigentlichen Reaktor-gefäß sieht man daher von außen nichts.

Der schnelle Brüter

Fast alle bisher gebauten Kernreaktoren sind „langsame Reaktoren“, das heißt, sie arbeiten mit abgebremsten Neutronen. Für die

Zukunft sind dagegen „schnelle“, d.h. mit schnellen Neutronen arbeitende Reaktoren vorgesehen. Einige Versuchsreaktoren dieser Art gibt es bereits. Ein schneller Reaktor hat also keinen Moderator. Man kann auf die Abbremsung der Neutronen verzichten, weil nur Kernbrennstoff verwendet wird, in dem das leicht spaltbare Material sehr hoch angereichert ist. Dieser Reaktortyp wirft noch viele technische Probleme auf. So kann er z.B. nicht mit Wasser gekühlt werden, als Kühlmittel sind flüssige Metalle erforderlich, die sehr viel mehr Wärme abführen können. Beispielsweise wird Quecksilber oder Natrium dafür verwendet. Natrium ist ein Metall, das schon bei $97,8^{\circ}\text{C}$ schmilzt. Das flüssige Metall strömt wie Wasser durch die Rohrleitungen des Kühlsystems.

Ein wesentlicher Vorteil des schnellen Reaktors besteht darin, daß man zugleich mit der Energiegewinnung durch Kernspaltungen neues, spaltbares Material in großer Menge erzeugen kann. Theoretisch läßt sich bis zu 1,39mal mehr neuer Kernbrennstoff im schnellen Reaktor erzeugen, als in gleicher Zeit an Brennstoff verbraucht wird. In der bilderreichen Fachsprache der Physik sagt man: Es wird Kernbrennstoff „erbrütet“. Der Reaktor wird deshalb auch als „schneller Brüter“ oder Brutreaktor bezeichnet. Wie ist das „Erbrüten“ von spaltbarem Material möglich?

Zauberstoff Plutonium

Bisher sagten wir stets: Ein Neutron, das von einem Kern Uran 238 eingefangen wird, ohne daß sich der Kern spaltet, ist verloren. Das stimmt aber nur bedingt. Für die laufende Kettenreaktion von Kernspaltungen ist es zwar tatsächlich verloren, für die Kernenergetik im ganzen gesehen jedoch nicht. Nach den bereits angeführten Reaktionsgleichungen wandelt sich der Kern von Uran 238 durch Neutroneneinfang in Uran 239 um, das radioaktiv ist und sich durch zweimaligen Betazerfall nacheinander in Neptunium und Plutonium 239 umwandelt. Plutonium aber ist ebenfalls ein leicht spaltbares Material. Man kann es ebenso verwenden wie Uran 235!

In einem langsamen Reaktor werden längst nicht alle Neutronen, die nicht für Kernspaltungen verbraucht wurden, zur Bildung von Uran-239-Kernen verwendet. Denn die Neutronen sind infolge ihrer

Abbremsung für die Uran-238-Kerne weitestgehend „ungenießbar“ geworden. Die meisten der nicht für Spaltungen der Uran-235-Kerne verbrauchten Neutronen gehen deshalb wirklich ungenutzt verloren.

Im schnellen Brüter dagegen würde im Idealfall jedes Neutron, das nicht für die Kernspaltung verbraucht wird, von einem Kern des Uran 238 eingefangen, der sich dadurch in den neuen Kernbrennstoff Plutonium umwandelt. Daher kann fast der gesamte Uranvorrat der Erde einschließlich des Isotops Uran 238 für die Kernenergie-Gewinnung verwertet werden. Etwas Plutonium erbrütet zwar auch der langsame Reaktor, aber der schnelle Reaktor erbrütet wesentlich mehr.

Künstliches Gold?

Otto Hahn fand bei der Kernspaltung des Urans als Bruchstücke, als „Spaltprodukte“, Atomkerne der Elemente Krypton und Barium. Diese Elemente passen als Spaltprodukte des Urans zusammen, weil die Summe ihrer Ordnungszahlen wieder die Ordnungszahl 92 des Urans ergibt. Anders ausgedrückt: Die 92 Protonen des Urankerns sind nach dessen Spaltung auf zwei Atomkerne verteilt worden. Der Bariumkern hat davon 56, der Kryptonkern 36 erhalten.

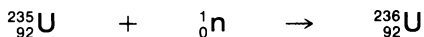
Aber der Urankern kann sich nicht *nur* in einen Barium- und Kryptonkern spalten! Vielmehr entstehen als Spaltprodukte auch viele Kombinationen anderer Elemente. Stets ergibt die Summe der Protonen beider Elemente aber wieder die 92 Protonen des Ausgangskerns Uran.

Eine häufig vorkommende Kombination von Spaltprodukten bilden z. B. auch Cäsium (Ordnungszahl 55) und Rubidium (Ordnungszahl 37). Vereinzelt spaltet sich der Urankern statt in zwei sogar in drei Bruchstücke. Eines davon ist dann ein Alphateilchen, also ein Heliumkern mit 2 Protonen. Die beiden übrigen Bruchstücke bilden Atomkerne von Elementen, deren Ordnungszahlen zusammen 90 ergeben.

Asche aus dem Atomofen

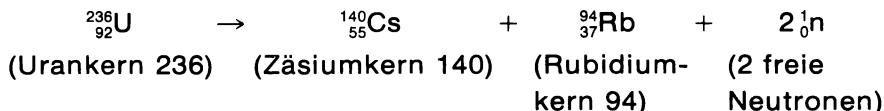
Durch die Kernspaltung entstehen als Spaltprodukte also Atomkerne sehr vieler chemischer Elemente. Aber alle diese Atomkerne sind radioaktiv, und zwar handelt es sich dabei meist um solche künstlichen Radionuklide, die Beta- und Gammastrahlen aussenden. Das ist leicht erklärbar, wenn wir den Vorgang der Kernspaltung einmal rechnerisch untersuchen.

Gehen wir dabei vom Beispiel einer Spaltung des Urankerns in Cäsium 140 und Rubidium 94 aus und schreiben den Prozeß in Form einer Reaktionsgleichung nieder:



(Urankern 235) (Neutron) (Zwischenkern Uran 236)

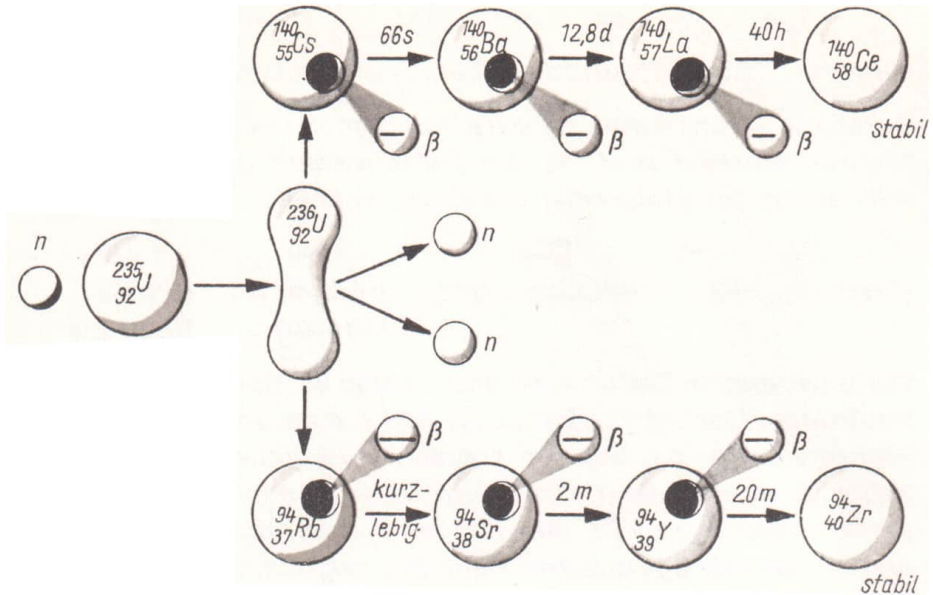
Durch die Wechselwirkung zwischen dem Urankern 235 und einem Neutron entsteht zunächst ein Zwischenkern Uran 236, der sich aber sofort nach folgender Gleichung spaltet:



Der entstandene Zäsiumkern enthält also 85, der Rubidiumkern 57 Neutronen. Das ist für beide Elemente eine ungewöhnlich hohe Neutronenzahl, die bei den stabilen, natürlichen Isotopen überhaupt nicht vorkommt. Die in der Natur vorkommenden Zäsiumkerne enthalten nur 78, die Rubidiumkerne höchstens 50 Neutronen. In der sich aus unserer Gleichung ergebenden Zusammensetzung sind die entstandenen Atomkerne nicht stabil. Sie wandeln sich deshalb um, sind also radioaktiv.

Doch entledigen sich die entstandenen radioaktiven Kerne in der Regel ihres hohen Neutronenüberschusses nicht, indem sie ein freies Neutron aussenden, sondern dadurch, daß sich ein Neutron in ein Proton verwandelt. Wir hatten als „Eselsbrücke“ uns vorgestellt, daß das Neutron aus einem Proton und einem Elektron zusammengesetzt ist. Dann muß bei der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton das Elektron übrigbleiben und ausgestrahlt werden. Jeder Atomkern, in dem sich ein Neutron in ein Proton umwandelt, strahlt daher ein energiereiches, negativ geladenes Elektron, ein Betateilchen, aus!

Der durch den Betazerfall aus dem ursprünglichen Spaltprodukt entstandene neue Atomkern hat meist noch einen Neutronenüberschuß und wandelt sich erneut durch Betazerfall um. Auch dieser Kern „leidet“ gewöhnlich noch unter Neutronenüberschuß, ist deshalb gleichfalls radioaktiv und unterliegt nochmals einem Betazerfall. Die Bruchstücke des gespaltenen Atomkerns bilden mithin Ausgangspunkte kleiner Betazerfallsreihen, die erst nach etlichen Zerfallsstufen schließlich mit einem Kern enden, der ein „gesundes“ Protonen-Neutronen-Verhältnis hat und deshalb stabil ist.



Im Gefolge einer Urankernspaltung entstehen viele verschiedene radioaktive Nuklide als Spaltprodukte

Schauen wir uns das am Beispiel der Uranspaltung in Zäsium 140 und Rubidium 94 einmal an (Bild oben). Sowohl der Zäsium- als auch der Rubidiumkern sendet dreimal Betateilchen aus. Der Zäsiumpfad ($^{140}_{55}\text{Cs}$) zerfällt in Barium 140, dieser in Lanthan 140, dieser in das stabile Nuklid Cer 140. Damit endet die Zerfallsreihe. Der Rubidium-94-Kern zerfällt nacheinander in Strontium 94, Yttrium 94 und schließlich in das stabile Zirkon 94. Wie das Schema zeigt, sind die HWZ dieser künstlichen Radionuklide sehr kurz. Die Betastrahlen und die sie begleitenden Gammastrahlen werden also innerhalb kurzer Zeit abgegeben. Anders ausgedrückt: Die entstandenen Spaltprodukte und deren Zerfallsprodukte sind hochradioaktiv, sie senden je Menge und Zeiteinheit sehr viel Strahlen aus.

Der gefährlichste Müll der Welt

Da infolge der großen Anzahl Urankerne, die bei einer Kettenreaktion gespalten werden, auch entsprechend viele Spaltprodukte entstehen, ist eine erste Konsequenz die, daß Brennstoffstäbe, die

bereits einmal im Reaktor benutzt worden waren, ein außerordentlich gefährliches Material darstellen. Denn sie stecken voller radioaktiver Spaltprodukte. Wenn der Brennstoff aus dem Reaktor entnommen werden muß, so darf sich niemand in der Nähe aufhalten, weil von den „ausgebrannten“ Uranstäben eine gefährliche Strahlung ausgeht. Durch ferngesteuerte Spezialkräne oder andere Vorrichtungen werden die Brennstoffstäbe in Abwesenheit von Menschen aus dem Reaktor gezogen und in Kammern transportiert, in denen sich ebenfalls niemand aufhalten darf.

Diese Kammern haben meterdicke Betonschutzwände, die die Strahlung absorbieren, so daß Menschen nicht gefährdet werden. Man läßt in den Kammern zunächst die kurzlebigsten Spaltprodukte zerfallen. Dadurch klingt die Intensität der Strahlung bereits stark ab. Aber sie ist noch immer so intensiv, daß der Mensch die Stäbe nicht in die Hand nehmen und verarbeiten kann. In weiteren Kammern gibt es fernbediente automatische Drehmaschinen, mit denen die Stäbe ohne direkte Arbeit von Menschen in kleine Stücke zerschnitten werden.

Man nennt Räume, in denen eine für den Menschen unerträglich hohe Strahlungsintensität herrscht, in der Fachsprache „heiße Kammern“. Das besagt nicht, daß dort hohe Temperaturen herrschen. Es kann darin allerdings außerdem wirklich heiß sein. Denn es gibt Spaltprodukte, die eine so intensive Strahlung aussenden, daß sie, in Flüssigkeiten gelöst, diese jahrzehntelang heiß halten, ohne daß ihnen Wärme zugeführt wird. Man könnte solche Stoffe zum Betrieb einer Zentralheizung verwenden, die jahrzehntelang, tagaus, tagein, die Räume heizt, ohne daß ein einziges Stückchen Kohle verfeuert zu werden braucht. Wegen der Gefährlichkeit der Strahlen ist das aber nicht möglich.

Die in kleine Stücke geschnittenen Uranstäbe lassen sich durch geeignete chemische Reaktionen in eine große Palette verschiedener künstlicher radioaktiver Nuklide zerlegen. Welche Bedeutung haben sie?

Zunächst einmal müssen wir eine negative Bedeutung anführen. Je mehr Spaltprodukte sich in den Uranstäben anreichern, desto stärker treten sie auch gegenüber den spaltbaren Urankernen in Konkurrenz. Manche der entstandenen Stoffe absorbieren gleich-

falls Neutronen. Da aber der Überschuß an freien Neutronen in einem Reaktor niemals sehr groß ist – denn sonst könnte er durchgehen und die lawinenartig anwachsende Kettenreaktion zur Explosion führen –, stören schon kleine Mengen von neu in dem Reaktor auftretenden Neutronenabsorbern die Kettenreaktion erheblich. In der Sprache der Kernphysik sagt man: Der Reaktor wird durch die Spaltprodukte „vergiftet“. Schon lange bevor alle in dem Brennstoff enthaltenen leicht spaltbaren Urankerne gespalten sind, reißt daher die Kettenreaktion ab und läßt sich nicht mehr aufrechterhalten.

Um die verbliebenen, noch ungespaltenen Kerne auszunutzen, müssen aus den Brennstoffstäben die Spaltprodukte durch geeignete chemische Prozesse daher abgetrennt werden. Da die Arbeiten sehr langwierig sind, weil man die „frisch ausgebrannten“ Stäbe erst längere Zeit „abklingen“ lassen muß, und da ferner eine Verarbeitung nur unter komplizierten Schutzmaßnahmen erfolgen kann, ist diese Aufarbeitung von Kernbrennstoff sehr teuer.

Würden alle Umwandlungsprodukte, die aus den ursprünglich entstandenen Spaltbruchstücken der Urankerne entstehen, sehr kurze HWZ haben, so brauchte man nur einige Zeit zu warten, bis die Strahlung abgeklungen ist. Es gibt aber auch eine Reihe verhältnismäßig langlebiger Stoffe in den Zerfallsreihen der Spaltprodukte. Die ungefährliche Aufbewahrung dieses „Atommülls“ bildet ein nicht geringes Problem. Die USA haben große Mengen solchen Atommülls, in Behältern verpackt, unverantwortlicherweise einfach in den Ozean versenkt. Das kann aber unabsehbare Gefahren heraufbeschwören, falls die Behälter undicht werden. Besser ist es, sie – ebenfalls in dicht schließenden Behältern – tief in der Erde in stillgelegten Bergwerken, die von keinem Menschen mehr betreten werden, zu lagern.

Elemente – im Atomofen „gebacken“

Die künstlichen, radioaktiven Nuklide haben aber auch eine sehr positive und nützliche Bedeutung. Allerdings werden sie für diese Zwecke überwiegend nicht aus den Spalt- und Zerfallsprodukten gewonnen, die aus den ausgebrannten Kernbrennstoffstäben chemisch abgetrennt werden, sondern auf eine andere Weise erzeugt.

Produktionsstätte ist hierbei aber gleichfalls der Kernspaltungsreaktor.

Im Reaktor ist ständig ein dichter Strom von freien Neutronen vorhanden. Wir wissen aber bereits, daß man durch Beschuß mit Neutronen, insbesondere mit langsamen Neutronen, von fast allen chemischen Elementen künstliche, radioaktive Isotope gewinnen kann. In kleinen Mengen wurden sie schon, bevor es Kernreaktoren gab, dadurch erzeugt, daß man die aus einer Polonium-Beryllium-Ampulle abgestrahlten Neutronen auf die verschiedenen Stoffe einwirken ließ. Aber da diese kleine „Neutronenhaubitze“ nur verhältnismäßig wenige Neutronen ausstrahlt, erhält man auch nur äußerst winzige Mengen künstlicher Radionuklide.

Das ist beim Kernreaktor anders. In ihm bewegen sich in jeder Sekunde durch jeden Quadratzentimeter mindestens 1000 bis 10000 Milliarden Neutronen! Daher kann man durch Wechselwirkung der Neutronen mit anderen Stoffen im Reaktor viel größere Mengen radioaktiver Nuklide erzeugen.

Dafür befinden sich in der viele Meter dicken Betonschutzwand des Reaktors enge Löcher, „Kanäle“. Durch sie werden Behälter mit stabilen Elementen mittels langer Stäbe in den Reaktor geschoben wie Brote in den Backofen. Nach einer gewissen Zeit zieht man die bestrahlten Stoffe wieder aus dem Reaktor heraus. Jetzt enthalten sie sehr viele, durch Neutroneneinfang umgewandelte radioaktive Atome. Meist tritt dabei aber nicht nur eine Umwandlung in ein anderes Isotop desselben Elements ein, sondern es entsteht auch ein neues Element. Um beispielsweise künstliches, radioaktives Phosphor zu erhalten, muß man Schwefel in den Reaktor einbringen. Er wandelt sich im Reaktor in Phosphor um.

3,44 Millionstelgramm in 14 Tagen

Mit dem Begriff große Mengen künstlicher, radioaktiver Nuklide dürfen wir aber wiederum keine falschen Vorstellungen verbinden. Wir dürfen nicht vergessen, daß wir es im Reich der Atome mit Zahlen und Zahlenverhältnissen zu tun haben, die für das normale Leben ungewöhnlich sind. Wenn z. B. 1000 Gramm Schwefel 14 Tage lang im Reaktor bestrahlt werden, so bilden sich im Schwefel nur 3,44 Millionstelgramm radioaktiver Phosphor. Für normale Be-

griffe würden wir daher sagen: Der aus dem Reaktor entnommene Schwefel ist nach wie vor Schwefel. Hätten die winzigen Mengen des künstlichen Phosphors, die jetzt darin enthalten sind, nicht die Eigenschaft, Strahlen auszusenden, so würde man vom Vorhandensein des Phosphors kaum etwas bemerken. Aber die winzige Menge von 3,44 Millionstelgramm Phosphor besteht aus einer unvorstellbar großen Anzahl Atome. Wir haben ja gelernt, wie man die Anzahl der Atome berechnet, und wer Lust hat, kann es selbst ausrechnen. Jedes dieser vielen Atome sendet irgendwann eine Strahlung aus. Das ergibt infolge der vielen Atome auch entsprechend viele Strahlen.

Bedenken wir aber folgendes: Wenn sich die 1000 Gramm Schwefel im Reaktor restlos in 1000 Gramm radioaktiven Phosphor umwandeln würden, so könnten wir damit praktisch kaum etwas anfangen. Denn von 1000 Gramm reiner, radioaktiver Substanz mit kurzer HWZ ginge eine derart intensive Strahlung aus, daß sie sich erhitzen und sofort verdampfen würde. Man könnte eine solche Menge reiner und kurzlebiger, radioaktiver Substanz also überhaupt nicht handhaben.

Für die vielfältigen Anwendungen, die künstliche Radionuklide heute in Wirtschaft und Technik, in Wissenschaft und Forschung sowie in der Medizin finden, müssen daher die radioaktiven Stoffe stets mit einer sehr viel größeren Menge nichtradioaktiver Träger-substanz vermischt oder verbunden sein. Nur dadurch kann man sie handhaben und verwenden.

Unbezahlbares Gold

Das erklärt zugleich, warum noch niemand auf die Idee gekommen ist, mit Hilfe der Kernphysik jetzt endlich den alten Wunschtraum der Alchimisten zu verwirklichen, nämlich unedle Stoffe in Gold umzuwandeln. Im Prinzip ist das heute möglich. Man kann durch Kernreaktionen künstliches Gold erzeugen. Es entstehen dabei aber nur äußerst geringe Mengen, die durch hochempfindliche, chemische Umsetzungen von den gleichzeitig, ebenfalls nur in geringen Mengen entstehenden anderen Stoffen abgetrennt werden müßten.

Daher wäre ein Ring aus reinem, künstlich hergestelltem Gold unbezahlbar, märchenhaft teurer als natürliches Gold. Außerdem

könnte niemand den Ring tragen, weil seine Strahlung zu stark ist. Ja, man könnte einen solchen Ring nicht einmal herstellen, weil sich eine so große Menge reinen, radioaktiven Goldes infolge seiner Strahlung selbst erhitzen und schmelzen würde. Schließlich würde dieses Gold „unter den Fingern zerrinnen“. Denn es wandelt sich nach einer gewissen Zeit wieder in ein anderes Element um. Man könnte künstliches, stabiles, also nicht radioaktives Gold höchstens in der Weise gewinnen, daß man radioaktive Stoffe erzeugt, die ihrerseits in stabiles Gold zerfallen. Aber auch sie wären viel zu teuer.

Wir können also feststellen: Durch künstliche Kernumwandlungen lassen sich keine in der Technik und Wirtschaft verwertbaren Mengen von Werkstoffen herstellen. Alle Schilderungen in utopischen Romanen, nach denen man chemische Elemente, die auf der Erde selten sind, durch Kernumwandlungen in großen Mengen herstellen wird, gehören daher ins Reich der Phantasie. Es gibt nur einen einzigen Stoff, der in großen, nach Kilogramm oder gar Tonnen messenden Mengen mit vertretbarem Kostenaufwand künstlich gewonnen werden kann, nämlich Plutonium.

Es verdankt seine Sonderstellung dem Umstand, daß es – wenigstens im Prinzip – in etwa gleicher Menge zu gewinnen ist, in der Uran im Kernreaktor durch Kettenreaktion „verbrannt“ wird. Als Werkstoff verwendet, wäre aber auch Plutonium zu teuer, wenn man die hohen Kosten berücksichtigt, die der Bau und Betrieb von Reaktoren erfordern. Nur weil Plutonium zugleich neuer Kernbrennstoff ist und bei entsprechender Konstruktion des Reaktors zwangsläufig als Nebenprodukt der Urankernspaltungen entsteht, ist seine Gewinnung in großen Mengen möglich und sinnvoll.

Arbeit für magische Hände

Um die im Reaktor durch Neutronenbestrahlung oder im Teilchenbeschleuniger durch Beschuß mit Protonen oder anderen energiereichen Teilchen erzeugten künstlichen Radionuklide in der Wissenschaft, Technik und Medizin anwenden zu können, müssen sie meist nochmals „verdünnt“ werden. Erst recht gilt das für Radionuklide, die bei der Aufarbeitung von Kernbrennstoffstäben aus Uran gewonnen werden. In jedem Institut, das solche Stoffe herstellt, gibt

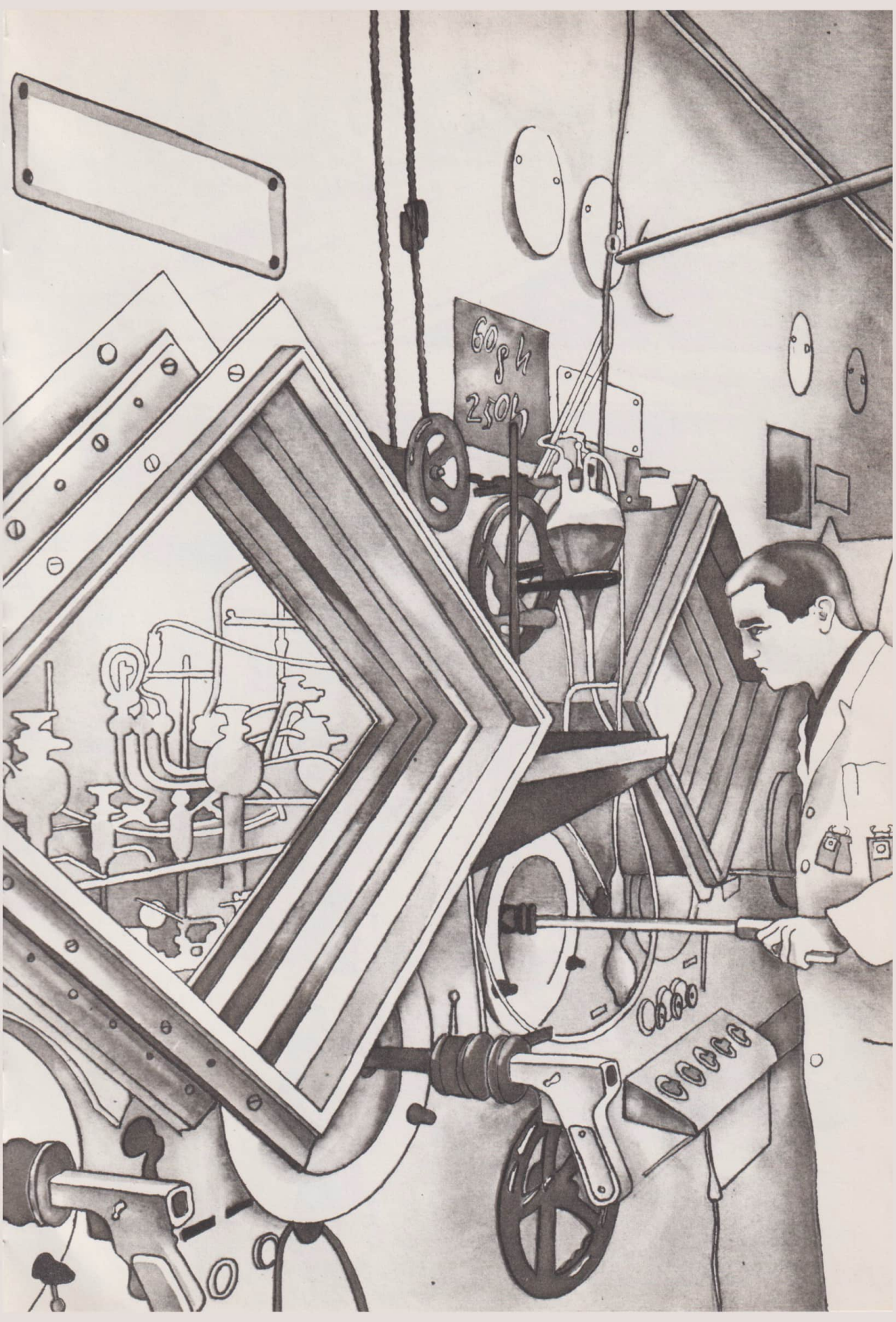
es außerordentlich komplizierte Apparate und Verfahren. Ein bedeutender Hersteller von künstlichen Radionukliden ist auch das Zentralinstitut für Kernforschung in der Deutschen Demokratischen Republik. Es befindet sich in Rossendorf bei Dresden und liefert Radionuklide nicht nur für die DDR, sondern exportiert sie in viele Länder.

Die aus dem Reaktor nach der Neutronenbestrahlung erhaltenen Stoffe werden in dickwandigen Bleibehältern, die die starke Strahlung absorbieren, in chemische Speziallabors gebracht, in denen es sehr merkwürdig zugeht. Dort arbeiten die Chemiker nicht direkt mit den Substanzen, sondern nur aus der Ferne mit Hilfe von Manipulatoren.

Die Chemiker stehen nicht im selben Raum, in dem sich die Flaschen und anderen Gefäße mit den radioaktiven Stoffen befinden, sondern sind von diesem Raum durch eine dicke Wand getrennt. In der Wand befinden sich dicke Fenster aus Bleiglas. Diesseits ragen aus der Schutzwand pistolenähnliche Griffe sowie Hebel heraus. Wenn man gelernt hat, sie geschickt zu bedienen, werden dadurch jenseits, hinter den Bleiglasfenstern, an langen Hebeln Greifer und andere Werkzeuge bewegt.

So können aus der Ferne die chemischen Reaktionsgefäße gehoben und abgestellt werden, Flüssigkeiten in andere Flaschen umgegossen werden usw. Alles, was man im chemischen Labor normalerweise bei ungefährlichen Stoffen direkt mit der Hand ausführt, darf hier nur mit Hilfe von Fernmanipulatoren erfolgen. Man nennt die Manipulatoren deshalb auch „magische Hände“. Sie sind nötig, weil von den Stoffen eine so starke Strahlung ausgeht, daß man sich nicht in ihre unmittelbare Nähe begeben darf. Zwischen den Stoffen und den Chemikern müssen sich stets dicke Schutzwände befinden, die praktisch die gesamte Strahlung absorbieren.

Nicht alle radioaktiven Stoffe senden eine so gefährliche Strahlung aus. Denn einmal ist die Reichweite der Strahlen unterschiedlich groß, und auch die Zahl der Strahlen ist verschieden, je nachdem, ob der radioaktive Stoff noch verhältnismäßig hoch konzentriert oder ob er schon stärker verdünnt ist. Dementsprechend gibt es verschiedene Abstufungen des erforderlichen Strahlenschutzes. Für manche Stoffe braucht man nur eine soge-





nannte Handschuhbox. Das ist ein allseitig geschlossener Kasten mit durchsichtigen Wänden, in den von außen nach innen Handschuhe hineinragen. Man steckt seine Hände und Finger in die Handschuhe und kann dann mit den im Innern des Kastens befindlichen Stoffen und Behältern arbeiten. Da der Kasten geschlossen ist, kann der Chemiker niemals in direkte Berührung mit den Stoffen kommen oder sie einatmen.

Die unsichtbare Gefahr

Es gibt sogar ganze Räume, in die man hineingehen kann und trotzdem in gewissem Sinne draußen bleibt. Man schlüpft mit dem ganzen Körper in einen durchsichtigen Beutel aus Plastwerkstoff, der nach hinten einen langen schwanzförmigen Fortsatz hat. Mit dem Schutzanzug kann man zum Beispiel in einen Raum gehen, in dem pulver- und staubförmige radioaktive Stoffe zu verarbeiten sind, die man nicht einatmen darf und die sich auch nicht auf der Haut oder Kleidung absetzen dürfen. Denn man atmet die Luft aus dem gefahrlosen Nachbarraum, in den der „Schwanz“ des Anzugs mündet. Man kann auch an keiner Stelle seines Körpers oder seiner Kleidung mit dem radioaktiven Stoff in direkte Berührung kommen.

In allen Laboratorien, in denen mit radioaktiven Stoffen gearbeitet wird, gelten äußerst strenge Schutzvorschriften. Niemand darf in die Räume sein Frühstück oder auch nur eine Milchflasche mitnehmen. Ja selbst Zigaretten darf man nicht bei sich haben, das Rauchen ist in den Räumen sowieso untersagt. Meßgeräte überwachen ständig die Strahlungsintensität. Wenn sie durch irgendeinen Zwischenfall einmal zu stark ansteigt, lösen sie automatisch Licht- und Tonsignale aus.

Um das Verschleppen winziger Spuren radioaktiver Stoffe in die Umgebung zu verhindern, muß man vor dem Betreten der Räume Schutzkleidung überziehen und vor dem Verlassen wieder ausziehen. Man darf auch nicht mit seinen Straßenschuhen die Räume betreten.

Am Hauseingang befindet sich ebenfalls ein Meßgerät, das anzeigt, ob am Körper oder der Kleidung radioaktive Stoffe haften. Sollte das der Fall sein, so wird der Ausgang automatisch blockiert, und man kann das Gebäude nicht verlassen.



Schutzanzug für das Arbeiten mit pulverförmigen radioaktiven Stoffen

Außerdem tragen alle in „Strahlenbetrieben“ Beschäftigten ständig eine Filmkassette mit einer Sicherheitsnadel am Arbeitskittel. Sie enthält ein kleines Stück fotografischen Film und ist in verschiedene Felder unterteilt, die unterschiedlich stark Strahlen absorbierende Metallplättchen enthalten. In regelmäßigen Zeitabständen werden die Kassetten an die staatliche Zentrale für Strahlenschutz eingesandt und dort entwickelt. Aus dem Grade der Schwärzung läßt sich beurteilen, ob der Träger der Kassette evtl. mehr als die zulässige Strahlungsmenge empfangen hat. Über jeden in einem Strahlenbetrieb Beschäftigten wird eine Karteikarte geführt und jeder Fall einer Überschreitung der Strahlungs-dosis sofort auf das genaueste untersucht. Eine solche Überschreitung bedeutet für den Betreffenden freilich noch keine Gefahr. Doch ist sie ein Hin-

weis, daß an irgendeiner Stelle des Betriebes die Schutzmaßnahmen nicht ausreichend waren und deshalb verbessert werden müssen.

Millionstelgramm verhindern Millionenschäden

So viel Aufwand muß getrieben werden, um ohne Gefahr mit künstlichen Radionukliden arbeiten zu können. Aber der Aufwand lohnt; denn richtig angewendet bringen die strahlenden Stoffe einen sehr großen Nutzen. Betrachten wir einige Beispiele dafür!

In der chemischen Industrie werden unter anderem riesige sogenannte Drehrohröfen verwendet. Sie haben einen Durchmesser von 3,5 Metern und sind bis zu 150 Meter lang. In ihnen befinden sich große Mengen von Rohstoffen, die durch Drehen der Rohre um ihre Längsachse ständig gut durchmischt werden. Das ist für das Zustandekommen der beabsichtigten chemischen Reaktionen sehr wichtig. Außerdem werden die Rohre beheizt, so daß die darin befindlichen Rohstoffe die hohen Temperaturen erreichen, bei denen die gewünschten Reaktionen ablaufen.

Ein so langes Rohr ist freilich nicht in einem Stück herzustellen, sondern muß aus kürzeren Stücken zusammengeschweißt werden. Jede Schweißnaht aber kann an irgendeiner Stelle fehlerhaft sein, ohne daß man es äußerlich sieht. Bei der starken Belastung der Rohre durch das Gewicht der darin gemischten Stoffe und durch die Hitzebeanspruchung können die Rohre an fehlerhaften Schweißstellen undicht werden und aufreißen. Das gefährdet die Arbeiter und bringt monatelangen Produktionsausfall, der großen volkswirtschaftlichen Schaden bedeutet.

Mit Hilfe von Röntgenstrahlen kann man nicht nur Krankheitsherde im menschlichen Körper entdecken, sondern auch äußerlich nicht sichtbare Materialfehler erkennen. Die großen Drehrohre mit Röntgengeräten zu untersuchen ist aber praktisch kaum durchführbar. Zumindest würde es einen enormen Arbeits- und Kostenaufwand erfordern. Man müßte transportable Röntgengeräte in die Rohre bringen. Da die Röntgenstrahlen nur in einer Richtung austreten, müßte man an jeder Schweißnaht nacheinander sehr viele Aufnahmen anfertigen, wobei die Strahlrichtung jedesmal ein Stück weiter herumgeschwenkt wird. Die Röntgengeräte würden

viel elektrische Energie verbrauchen und die Röntgenröhren verschleifen.

Mit Hilfe von Radionukliden, die eine harte, d. h. sehr durchdringende Gammastrahlung aussenden, ist die Aufgabe wesentlich einfacher und billiger zu lösen. Gammadefektoskopie nennt man das Verfahren. Der Ausdruck bedeutet soviel wie Erkennung von Defekten, Fehlern mittels Gammastrahlen. Dafür eignen sich die künstlichen Radionuklide Kobalt 60, Zäsium 137, Iridium 192 und Thulium 170. Schon ein kleines zylinderförmiges Metallstück, in dem eines dieser Nuklide enthalten ist, genügt als Strahlenquelle.

Im Unterschied zum Röntgengerät sendet sie Strahlen nicht nur in einer Richtung, sondern in alle Richtungen aus. Man kann daher eine ganze Schweißnaht des Rohres gleichzeitig untersuchen. Zu diesem Zwecke wird der Strahler in die Mitte des Rohrs gebracht, und außen auf der Rohrwandung werden fotografische Filme aufgelegt. Sie sind in lichtdichtem, schwarzem Papier verpackt und werden durch Magnete fest gegen das Rohr gedrückt. Nach einer entsprechenden Bestrahlungszeit werden die Filme entwickelt, und man erkennt die in den Schweißnähten eventuell vorhandenen Fehler. Der Gammastrahler verbraucht kein einziges Kilowatt elektrische Leistung und arbeitet jahrzehntelang, ohne daß ein Verschleiß eintritt. Eine Röntgenröhre muß dagegen öfter erneuert werden, weil sie ebenso wie Glühlampen und Radoröhren allmählich unbrauchbar wird.

Nicht nur große, sondern auch kleine Werkstücke lassen sich mit Gammastrahlen vorteilhaft auf Materialfehler untersuchen. Dabei wird der Strahler in der Mitte aufgestellt, und die Werkstücke werden kreisförmig darum gruppiert. Da die Strahlen gleichzeitig nach allen Seiten gehen, können sehr viele Werkstücke auf einmal untersucht werden. Mit dem Röntgengerät könnte man sie nur einzeln, Stück für Stück, durchstrahlen.

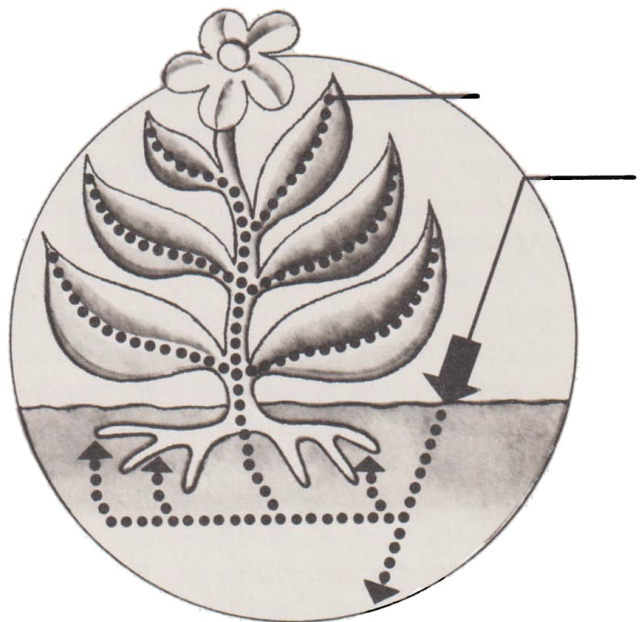
Damit der Strahler gefahrlos gehandhabt werden kann, befindet er sich in einem dickwandigen Bleibehälter, aus dem er nur ausgefahren wird, wenn damit gearbeitet werden soll. Der Schutzbehälter mit dem Strahler ist auf einem Fahrgestell montiert, das man wie einen Karren mittels langer Griffe fahren kann. Dadurch braucht sich der Mensch dem Strahler nicht zu nähern. Das Ausfahren aus

dem Schutzbehälter erfolgt durch einen kleinen Elektromotor. Gammadefektoskopie wird aber auch in ortsfesten Labors durchgeführt.

Röntgengerät in der Aktentasche

Das künstlich hergestellte Thulium 170 kann als Ersatz für ein medizinisches Röntgengerät verwendet werden und stellt gewissermaßen ein „Röntgengerät in der Aktentasche“ dar. Thulium 170 sendet eine sehr weiche, wenig durchdringende Gammastrahlung aus, die einerseits für den Patienten unschädlich ist und andererseits bereits durch verhältnismäßig leichte und dünnwandige Schutzbehälter während des Nichtgebrauchs und Transports absorbiert wird. Ein solches Röntgengerät kann der Arzt zur Unfallstelle mitnehmen und sofort feststellen, ob ein Verletzter z.B. einen Knochenbruch erlitten hat.

Von ganz anderer Art ist die Anwendung von Radionukliden als Radioindikator. Das könnte man etwa mit „Anzeiger“ übersetzen. Der Radioindikator zeigt z.B. an, in welchem Teil einer Pflanze sich bestimmte Stoffe, die als Düngemittel in den Boden gebracht



Mittels radioaktiver Markierung kann man die Aufnahme von Düngemitteln durch die Pflanze aus dem Boden sowie auch die nutzlos verlorengehenden Anteile des Düngemittels verfolgen

oder als Schädlingsbekämpfungsmittel auf die Pflanze gesprüht werden, ablagern, ob die Pflanze diese Stoffe überhaupt aufnimmt, wie lange sie in ihr verbleiben usw. Mit solchen Indikatoren kann daher die Wirksamkeit bestimmter Düngemittel und Düngemethoden, aber auch die mögliche Gefährlichkeit von Schädlingsbekämpfungsmitteln bei Pflanzen überprüft werden.

Detektive der Forschung

Das Prinzip der Radioindikormethode ist folgendes: Der Stoff, dessen Verbleib zu untersuchen ist, wird durch Einbau eines Radionuklids „markiert“. Da die Strahlung des Nuklids die Zellwände der Pflanzen sowie die Haut von Menschen und Tieren durchdringt, macht sich der markierte Stoff durch die Strahlung überall bemerkbar, in welchem Teil des Organismus er sich immer auch befindet. Der Nachweis der Strahlung kann z. B. durch Auflegen eines fotografischen Films auf die Pflanze erfolgen. An allen Stellen, an denen der markierte Stoff in der Pflanze enthalten ist, zeigt der entwickelte Film eine Schwärzung. Man kann die Strahlung aber auch mit dem Geigerzähler oder anderen Geräten feststellen.

Die Indikormethode wird auch in der Medizin für vielfältige Zwecke angewendet. Spritzt man beispielsweise eine kleine Menge eines Radionuklids in die Blutbahn, so kann die Zeit bestimmt werden, die das Herz benötigt, um das Blut einmal durch den ganzen Körper zu pumpen. Für alle Zwecke, bei denen radioaktive Stoffe in den menschlichen Körper gebracht werden, verwendet man Radionuklide mit sehr kurzer HWZ, so daß sie innerhalb kürzester Frist wieder nahezu restlos zerfallen und damit unschädlich sind. Außerdem werden die Radionuklide stark mit einer anderen, nicht radioaktiven Trägersubstanz verdünnt.

Auf ähnliche Weise sind Verschleißuntersuchungen an Motoren- und anderen Maschinenteilen möglich. Wird z. B. der Kolbenring eines Motors vor dem Einbau mit Neutronen bestrahlt, so bilden sich darin winzige Mengen radioaktiver Nuklide. Mit dem Verschleiß des Kolbenringes gelangen die Nuklide in das Schmieröl. Aus der Intensität der Strahlung des Schmieröls lassen sich Rückschlüsse auf den eingetretenen Verschleiß des Kolbenrings ziehen. In analo-

ger Weise läßt sich der Verschleiß der Schneidwerkzeuge von Drehmaschinen ermitteln und feststellen, welche Werkstoffe den geringsten Verschleiß haben.

In der Produktion wird die Dickenmessung mittels Radionukliden häufig angewendet. Sie beruht auf der Tatsache, daß die Strahlung radioaktiver Stoffe um so stärker absorbiert wird, je dicker die absorbierende Materialschicht ist. Da man die Strahlungsintensität äußerst genau messen kann, ist es möglich, schon sehr geringe Schwankungen in der Dicke des absorbierenden Materials zu bestimmen. Bereits die Abweichung der Dicke eines Papierstreifens um einen Tausendstelmillimeter macht sich im Meßergebnis des Strahlendetektors bemerkbar.

Beim Walzen von Stahlblechen in Walzwerken wird die Dickenmessung mit Radionukliden noch mit einer automatischen Nachregulierung der Stahlblechdicke gekoppelt. Sobald das Strahlenmeßgerät Abweichungen der vorgeschriebenen Dicke des Blechs anzeigt, wird der Anpreßdruck der Walzen so lange automatisch verändert, bis wieder die vorgesehene Dicke erreicht ist.

Schabefleisch, das nicht verdirbt

Gammabestrahlung von Kartoffeln hemmt das Einschrumpfen der Knollen bei der winterlichen Lagerung im Keller und die Entwicklung der langen weißen Keime. Bestrahlte Kartoffeln der vorjährigen Ernte sehen nach einem ganzen Winter Lagerzeit noch so frisch aus, als wären sie soeben vom Felde eingebracht worden. In vielen Ländern ist diese Verbesserung der Lagerfähigkeit von Kartoffeln bereits gesetzlich zugelassen, nachdem in langjährigen Versuchen gewissenhaft überprüft wurde, daß dabei keine für Mensch oder Tier gesundheitsschädliche Veränderungen in den Kartoffeln auftreten. Man konnte sogar noch viel erstaunlichere Wirkungen an Lebensmitteln erzielen. Zum Beispiel wird Schabefleisch nach Bestrahlung so haltbar, daß es bei Zimmertemperatur einige Wochen aufbewahrt werden kann.

Aber man ist bei der Anwendung neuer Verfahren auf Lebensmittel sehr vorsichtig. Die Konservierung von Fleischwaren durch Strahlung ist daher noch nicht gebräuchlich. Zwar ist nicht zu befürchten, daß sich dabei in den Nahrungsmitteln selbst radioak-

tive Nuklide bilden. Das wäre nur bei der Bestrahlung mit Neutronen der Fall. Aber es wäre denkbar, daß sich chemische oder physikalisch-chemische Veränderungen ergeben, die noch nicht genau überschaubar und deren Wirkungen auf den menschlichen Organismus daher nicht mit Sicherheit vorauszusagen sind.

Schließlich können radioaktive Nuklide auch als Energiequellen dienen. Gleich zu Anfang des Buches erwähnten wir bereits die kleinen, mit radioaktivem Krypton gefüllten Lämpchen für die Nachtbeleuchtungsschalter. In ihnen entsteht durch die Energie der Strahlung in einer Leuchtstoffschicht ununterbrochen Licht, für das keine elektrische Energie verbraucht wird. Es lassen sich aber auch „Isotopenbatterien“ herstellen. In ihnen wird Strahlung in elektrische Energie umgewandelt. Sie geben viele Jahre hindurch, ohne Anschluß an irgendein Kabel und ohne jede Wartung, elektrische Leistung ab. Allerdings handelt es sich dabei nur um kleine Leistungen, die keinen wesentlichen Beitrag zur Energiewirtschaft bedeuten, sondern lediglich Spezialaufgaben lösen, wie z.B. die Energieversorgung automatischer Meß- und Funkgeräte, die weit entfernt von menschlichen Ansiedlungen in Wüsten und Einöden oder sogar auf dem Mond aufgestellt sind.

Lassen wir es mit den wenigen Beispielen bewenden. Die Beschreibung aller bisher bekannten nützlichen Anwendungen radioaktiver Nuklide würde viele dicke Bücher füllen.

Auf dem Wege zur künstlichen Sonne

Es war am Morgen des 30. Juni 1908, als eine unheimliche Erscheinung die wenigen Bewohner Mittelsibiriens erschreckte. Ein blendender Feuerball, greller als die Sonne, zog von Süden nach Norden über den Himmel. Man sah ihn im Umkreis von 800 Kilometern. Nahe dem kleinen Ort Wanowar am Flusse Steinige Tunguska ging er zur Erde nieder. Dabei soll nach Augenzeugenberichten eine kilometerhohe Feuersäule entstanden sein. Ihr folgten Donnerschläge und dumpfes Grollen. Orkane rasten heran. Sie rissen noch in mehreren hundert Kilometern Entfernung Dächer von den Häusern.

Die Erdbebenwarten in Irkutsk, Taschkent und Jena verzeichneten Erdstöße. Eine Luftdruckwelle raste zweimal um die Erde. Tagelang sprudelte aus dem Boden eine hohe Wasserfontäne. In den ersten drei Nächten nach dem unheimlichen Ereignis war der Himmel über ganz Westsibirien, Europa und Nordafrika von leuchtenden Nachtwolken so erhellt, daß man dabei die Zeitung lesen konnte. Die Wolken schwebten in etwa 86 km Höhe.

Eine rätselvolle Katastrophe

Niemand weiß bis heute ganz genau, wie diese eigentümliche Katastrophe zustande kam. Auch über die am Ort selbst sichtbaren Erscheinungen gibt es keine völlige Gewißheit. Denn die Bewohner der angrenzenden Gebiete wurden erst Jahrzehnte später befragt, als die Sowjetmacht 1927 eine wissenschaftliche Expedition in das Gebiet entsandte. Das russische Zarenregime bewilligte kein Geld für eine Expedition in das fast unbewohnte Gebiet. So fand die erste Befragung der wenigen Augenzeugen erst rund 20 Jahre später statt. Inzwischen konnte sich die Erinnerung der Überlebenden der Katastrophe getrübt haben.

Die Erdstöße, die Luftdruckwelle und die leuchtenden Nachtwolken sind gesicherte Tatsachen. Sie wurden von wissenschaftlichen

Meß- und Beobachtungsstationen registriert. Man fand 1927 an der Stelle, an der der glühende Feuerball vermutlich auf die Erde niederging, auch noch gewaltige Zerstörungen der Natur in einem Umkreis von fast 40 Kilometern vor. Hundertjährige Bäume waren samt ihren Wurzeln aus dem Boden gerissen. Alle umgestürzten Baumstämme wiesen auf einen Punkt hin. Im Zentrum des großen Windwurfs standen noch die nackten Baumstämme wie Telegrafentangen. Alle Zweige waren abgerissen. Die Wissenschaftler nannten das Gelände daher Telegrafentangenwald.

All das deutet darauf hin, daß hier eine gewaltige Explosion stattgefunden hatte, aber nicht direkt am Erdboden, sondern in einiger Höhe darüber. Jahrzehntlang wurden über die Ursache der Explosion die abenteuerlichsten Vermutungen aufgestellt. Ein Raumschiff vom Mars oder von der Venus sollte hier bei dem Versuch einer Landung explodiert sein. Die Wissenschaftler glaubten jedoch eher an den Einschlag eines riesigen Meteoriten, der aus dem Weltraum auf die Erde fiel. Es sind einige Einschlagstellen solcher Riesenmeteoriten auf der Erde bekannt. Aber sie haben große Krater in die Erdoberfläche gerissen. Doch an der Steinigen Tunguska war keine Spur von einem Einschlagskrater zu finden.

Die Hypothese, ein Raumschiff sei explodiert, ist wissenschaftlich vollkommen unbegründet und leere Phantasie. In den 50er Jahren wurde aber noch eine andere Hypothese über die Ursache der rätselvollen Explosion diskutiert. Es könnte, so meinten einige Wissenschaftler, ein Stück Antimaterie aus weiten Fernen des Weltalls zufällig in unser Sonnensystem geraten und in die Erdatmosphäre eingedrungen sein. Schon ein kleiner Stein von nur einem Kilogramm Masse könnte, falls er aus Antimaterie besteht, bei seinem Eindringen in die Erdatmosphäre eine Energieexplosion entfalten, die Verwüstungen im Umkreis von 40 oder mehr Kilometern bewirkt. Daß an der Steinigen Tunguska wirklich ein Meteorit aus Antimaterie niederging, ist jedoch sehr unwahrscheinlich, wenn nicht sogar ausgeschlossen. Nach dem neuesten Stande der Forschungen wird vermutet, daß ein Kometenkern auf die Erde niederging.



Albert Einstein

Masse = eingefrorene Energie

Aber mit der Hypothese vom Meteoriten aus Antimaterie haben wir ein neues, hochinteressantes Kapitel der Wissenschaft von den Atomkernen und Elementarteilchen aufgeschlagen. Was ist Antimaterie, und warum könnten schon ganz geringe Mengen von Antimaterie beim Zusammentreffen mit Materie eine so ungeheure Explosion auslösen?

Zur Beantwortung der Frage müssen wir einen Umweg einschlagen und uns mit einer Erkenntnis vertraut machen, die heute zu den Fundamenten der Physik und besonders auch der Kernphysik gehört. Ein ungewöhnlich genialer Mensch, Professor Albert Einstein, hat diese Erkenntnis gewonnen und in seiner speziellen Relativitätstheorie formuliert. Man kann sie in einer kurzen Formel ausdrücken. Sie lautet:

$$E = m \cdot c^2$$

In der Gleichung bedeutet E Energie, m Masse und c^2 das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit.

Bevor wir beginnen, nach der Formel zu rechnen, wollen wir uns mit dem Gleichheitszeichen zwischen dem „ E “ und dem „ $m \cdot c^2$ “ auseinandersetzen. Kann man denn zwischen Masse und Energie überhaupt ein Gleichheitszeichen setzen? Eine bestimmte Menge Stoff, „Masse“ genannt, enthalten alle großen und kleinen Gegenstände bis herab zu den kleinsten Elementarteilchen. Aber

chen, ein Positron, Proton oder Neutron. Sie kann aber auch in Form von Gammastrahlen ausgesandt werden. Den einzelnen Gammastrahl, der eine bestimmte Energiemenge enthält, nennt man auch ein Gammaquant.

Nicht bei allen Umwandlungsprozessen, die in einem Atomkern ablaufen, wird Energie frei. Es gibt umgekehrt auch Kernreaktionen, die nur stattfinden können, wenn dem Kern eine große Energiemenge von außen zugeführt wird. In keinem Falle aber kann Energie oder Masse verlorengehen. Jede scheinbar „verschwundene“ Energie hat sich in Masse verwandelt, und umgekehrt: Jede scheinbar „verschwundene“ Masse ist in Energie umgewandelt worden.

Wenden wir diese neu erworbene Erkenntnis gleich einmal auf ein interessantes Beispiel an! Bisher benutzten wir zum Verständnis für die Aussendung eines Betateilchens bei der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton als „Eselsbrücke“ die Vorstellung, als sei ein Neutron aus einem Proton und einem Elektron zusammengesetzt. Bei der Umwandlung des Neutrons in ein Proton bliebe dann das Elektron übrig und würde als Betateilchen mit großer Bewegungsenergie davongeschleudert. Jetzt können wir den Vorgang richtig beschreiben und erklären. Das Neutron hat eine etwas größere Masse als das Proton. Wandelt sich ein Neutron in ein Proton um, so muß daher die überschüssige Masse, die der Massedifferenz zwischen einem Neutron und einem Proton entspricht, irgendwo bleiben. Aus einem Teil dieser Überschußmasse bildet sich ein Elektron, das mit großer Bewegungsenergie davonfliegt. Genaugenommen entsteht bei diesem Betazerfall sogar noch ein weiteres Elementarteilchen, ein Antineutrino.

25 Millionen kWh aus 1 Gramm

Unsere Berechnung ergab, daß ein einziges Gramm Masse einer Energie von 9×10^{20} erg äquivalent ist; das entspricht etwa 25 Millionen Kilowattstunden. Das ist eine elektrische Arbeit, die ausreichen würde, um eine mittelgroße Stadt einen ganzen Monat lang mit elektrischer Energie zu versorgen. Diese gewaltige Energiemenge könnte man aus einem einzigen Gramm Masse freisetzen, wenn es gelänge, sie restlos in Energie umzuwandeln. Aber das ist trotz Kernspaltung noch nicht möglich.

Bei der Spaltung von Uran- oder Plutoniumkernen wird nur etwa der 1000. Teil der Masse der Kerne in Energie umgewandelt. Etwas höher ist der Anteil der in Energie umgesetzten Masse bei einem anderen Prozeß, an dessen technischer Nutzung noch intensiv gearbeitet wird, nämlich bei der Kernverschmelzung, auch Kernfusion genannt.

Die vollständige Umwandlung von Masse in Energie vollzieht sich dagegen, wenn Antimaterie mit Materie in Wechselwirkung tritt. Daher würde der Einfall eines nur 1 kg schweren Meteoriten aus Antimaterie in die Erdatmosphäre eine Energie freisetzen, die der elektrischen Arbeit von 25 Milliarden Kilowattstunden entspricht. Das reicht aus, um eine mittelgroße Stadt rund 83 Jahre zu versorgen.

Allerdings könnten wir diesen Energieblitz, der beim Einfall von Antimaterie in die Erdatmosphäre entstünde, technisch nicht nutzen. Es wäre im Gegenteil eine Katastrophe größten Ausmaßes. Doch brauchen wir nichts dergleichen zu befürchten. Die Wahrscheinlichkeit, daß so etwas passieren könnte, ist unvorstellbar gering. Man weiß bisher nicht einmal, ob es im Weltall überhaupt Körper aus Antimaterie gibt. Auf der Erde und in unserem ganzen Sonnensystem gibt es sie jedenfalls nicht und höchstwahrscheinlich auch in dem ganzen Milchstraßensystem nicht, zu dem als einer von 100 Milliarden Sternen auch unsere Sonne gehört. Man kann bisher nur einzelne Antimaterie-Elementarteilchen auf der Erde künstlich herstellen. Das geschieht mit Hilfe großer Teilchenbeschleuniger.

Antimaterie

Was ist nun eigentlich Antimaterie? Der Ausdruck ist nicht gut und treffend gewählt, weil er zu der falschen Annahme verleiten kann, Antimaterie sei keine Materie. Das ist aber nicht der Fall. Auch Antimaterie ist Materie. Sie gleicht sogar in den meisten ihrer Eigenschaften der gewöhnlichen Materie. Nur einige wenige Eigenschaften ihrer Elementarteilchen sind denen der Elementarteilchen gewöhnlicher Materie entgegengesetzt.

So ist z. B. das Positron, das wir bereits kennenlernten, ein Antimaterieteilchen. Es hat die gleiche Masse wie ein Elektron und hat eine gleich große Ladung. Aber während die Ladung des Elektrons

negativ ist, ist die des Positrons eine positive Ladung. Man könnte das Positron auch Antielektron nennen. In dieser Beziehung bildet das Antimaterieteilchen also das genaue Gegenstück zum entsprechenden Teilchen der gewöhnlichen Materie. Daher die Vorsilbe „Anti...“, die soviel wie „gegen“ oder „gegensätzlich“ bedeutet.

Für fast alle bisher bekannten Arten von Elementarteilchen der Materie konnten die entsprechenden Antiteilchen entdeckt werden, z. B. das Antiproton. Es hat die gleiche Masse und eine gleich große Ladung wie das Proton, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen.

Aus Antiprotonen, Antineutronen und Positronen könnten Antimaterieatome ebenso aufgebaut werden wie die Atome gewöhnlicher Materie aus Protonen, Neutronen und Elektronen. Ein Gebilde, das aus einem Antiproton als Kern und einem Positron als Hülle zusammengesetzt ist, wäre ein Antiwasserstoffatom. Ein Gebilde, dessen Kern aus 2 Antiprotonen und 2 Antineutronen besteht und von 2 Positronen umkreist wird, wäre ein Antiheliumatom usw. Die Atome der Antielemente würden untereinander die gleichen chemischen Reaktionen eingehen und die gleichen Spektrallinien aussenden wie die uns bekannten chemischen Elemente der Materie. Durch die Spektralanalyse des Lichts ferner Sterne oder Milchstraßensysteme kann man daher nicht feststellen, ob sie aus Materie oder evtl. aus Antimaterie bestehen.

Eines aber ist sicher: Jedes Zusammentreffen eines Antiatoms oder auch eines Elementarteilchens der Antimaterie, also eines Positrons, Antiprotons oder Antineutrons mit einem Atom oder Elementarteilchen normaler Materie führt zur Annihilation der Teilchen, auch Paarvernichtung genannt. Diese Wechselwirkung zwischen Teilchen und Antiteilchen ist mit der größtmöglichen Energieausbeute verbunden, die in der Natur überhaupt möglich ist.

Die mit der technischen Nutzbarmachung dieser Energiequelle verbundenen Schwierigkeiten konnten bisher aber nicht überwunden werden. Ein erstes Hindernis besteht darin, daß man ungeheure Energien aufwenden muß, um Antimaterieteilchen zu erzeugen. Sie entstehen auch nicht in großen Mengen etwa in Kettenreaktionen, sondern nur ganz vereinzelt, in unvorstellbar winzigen Stoffmengen. Ein zweites Hindernis: Man kann Antimaterie nicht als „Annihilations-Brennstoff“ auf Vorrat produzieren. Denn sobald ein Anti-

materieteilchen auf ein Materieteilchen trifft, „zerstrahlt“ es zusammen mit diesem zu Energie. Da aber alle Stoffe der Erde und auch des erdnahen Weltraums aus Materie bestehen, ist es unmöglich, ein Antimaterieteilchen längere Zeit von jeder Berührung mit Materie fernzuhalten.

In der Sibirischen Abteilung der Akademie der Wissenschaften der UdSSR hat man das Problem der Aufbewahrung von Antimaterie bis zu einem gewissen Grade gelöst. Man läßt dort elektrisch geladene Antimaterieteilchen im Hochvakuum eines Teilchenbeschleunigers kreisen, so wie man geladene Materieteilchen durch Magnetfelder auf Kreisbahn hält. Diese Methode hat jedoch nur Wert für experimentelle Zwecke der Forschung und ist kein Weg zur technisch nutzbaren Energiegewinnung.

Energie für 1 Milliarde Jahre

Etwas näher sind die Wissenschaftler dagegen bereits der Lösung des Problems gekommen, technisch nutzbare Energie durch Kernfusion zu gewinnen. Energiefreisetzung durch Kernfusion erfolgt wahrscheinlich in allen Fixsternen. Dabei werden die Atomkerne des einfachsten und leichtesten Elements Wasserstoff zu Heliumkernen verschmolzen. Das geschieht allerdings nicht direkt, sondern stufenweise über mehrere Zwischenprozesse.

Eine solche Fusion von Wasserstoff zu Helium erfolgt auch im Innern unserer Sonne. Dadurch wird allmählich ihr Wasserstoff in Helium umgewandelt. Es läßt sich berechnen, daß dieser Prozeß in der Sonne seit mindestens zwei Milliarden Jahren abläuft und dabei in jeder Sekunde 500 Millionen Tonnen Wasserstoff verbraucht wurden. Trotzdem hat die Sonne in dieser langen Zeit erst 3,5 Prozent ihres Wasserstoffvorrats aufgezehrt. Sie kann noch viele Milliarden Jahre mit unveränderter Stärke weiterstrahlen. Erst dann wäre ihr Wasserstoffvorrat erschöpft.

In Zeitungsartikeln und populärwissenschaftlichen Büchern heißt es häufig auch, der Wasserstoff werde in den Sternen zu Helium „verbrannt“. Dieses Wort darf man jedoch nur als bildlichen Vergleich betrachten und nicht wörtlich nehmen. Denn um eine Verbrennung im chemischen Sinne, wie z. B. die Verbrennung von Kohle oder Erdöl, handelt es sich nicht. Sowohl die Kernfusion

als auch die Kernspaltung sind keine chemischen, sondern kernphysikalische Prozesse.

Die Hauptschwierigkeit, die bei der Kernfusion zu überwinden ist, besteht darin, daß sich – wie wir schon wissen – alle Atomkerne auf Grund ihrer gleichnamigen, positiven Ladung gegenseitig abstoßen. Deshalb müssen die Kerne mit außerordentlich großer Bewegungsenergie aufeinanderprallen, um die Abstoßungskraft zu überwinden. Ist der Wall der Abstoßungskraft erst einmal durchbrochen, so werden andere, anziehende Kernkräfte wirksam und sorgen für den Zusammenhalt des neuentstandenen Kerns. Die anziehenden Kernkräfte wirken nur auf sehr kurze Entfernungen, während die Abstoßungskräfte eine größere Reichweite haben.

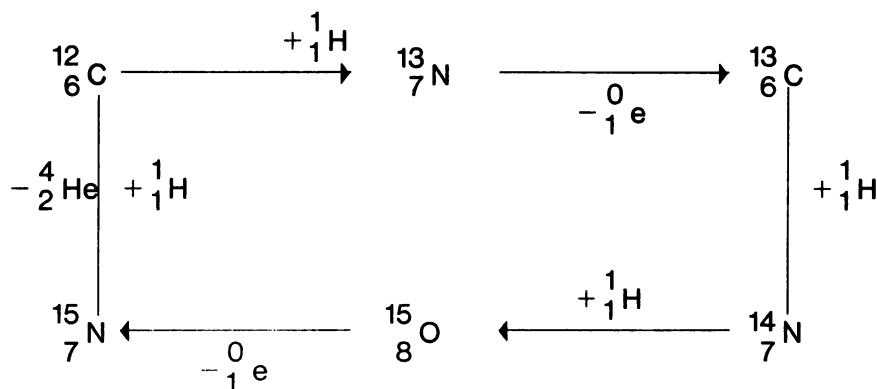
Es wäre kein Problem, den Wasserstoffkernen, also Protonen und Deuteronen (schweren Wasserstoffkernen), mit Hilfe eines Teilchenbeschleunigers so hohe Bewegungsenergien zu erteilen, daß sie aufeinanderprallen und verschmelzen. In dieser Weise können jedoch nur relativ wenige Atomkerne beschleunigt werden, und da man sie außerdem nicht gezielt aufeinanderschießen kann, ist die Anzahl der auf diesem Weg erzielten Kernfusionen viel zu gering. Eine technisch nutzbare größere Energiemenge entsteht dabei nicht. Wir stehen also wieder vor dem gleichen Problem wie bei der Kernspaltung: Es muß eine Art Kettenreaktion gefunden werden, bei der sehr viele Atomkerne gleichzeitig eine so hohe Bewegungsenergie erhalten, daß sie beim Zusammenstoß verschmelzen.

Die technische Lösung dieses Problems gelingt, wenn man den Wasserstoff auf extreme Temperaturen erhitzt. Denn Wärme beruht auf der Bewegung von Atomen und Molekülen. Je höher die Temperatur, desto größer ist die Geschwindigkeit der Atome und Moleküle. Beim Erhitzen geraten außerdem nicht nur einige, sondern alle Atome und Moleküle in schnellere Bewegung. Bei Zimmertemperatur bewegen sich Wasserstoffmoleküle mit einer Geschwindigkeit von etwa 2000 m je Sekunde. Für die Verschmelzung von zwei Atomkernen schweren Wasserstoffs zu einem Kern überschweren Wasserstoffs (Tritium) sind Teilchengeschwindigkeiten von etwa 1000 km/s erforderlich. Das entspricht einer Temperatur von etwa 100 Millionen °C. Da die Bewegungsenergie den zu verschmelzen-

den Atomkernen durch Temperaturerhöhung zugeführt wird, nennt man die durch sie ausgelösten Reaktionen thermonukleare Reaktionen (thermos = Wärme, nucleus = Kern).

Im Innern unserer Sonne und der anderen Fixsterne herrschen Temperaturen von 20 Millionen °C. Bei diesen Temperaturen erfolgt die Kernverschmelzung indirekt, also über mehrere Stufen. Einer der beiden in Sternen von der Art unserer Sonne ablaufenden Fusionsprozesse nimmt folgenden Verlauf: Ein Proton (Wasserstoffkern) dringt in einen Kohlenstoffkern 12 ein und wandelt ihn in Stickstoff 13 um, der unter Aussendung eines Positrons in Kohlenstoff 13 zerfällt. In diesen Kern dringt wieder ein Proton ein und wandelt ihn in Stickstoff 14 um. Dringt in ihn wieder ein Proton ein, so entsteht Sauerstoff 15, der unter Aussendung eines Positrons in Stickstoff 15 übergeht. Wenn in diesen Kern wieder ein Proton eindringt, zerfällt er in je einen Kern Kohlenstoff 12 und Helium 4. Damit ist der Kreis geschlossen; es ist wieder ein Kohlenstoff-12-Kern entstanden, der den Ausgangspunkt des Vorgangs bildete und offensichtlich die Rolle eines Katalysators bei diesem Prozeß spielt. Außerdem ist ein Heliumkern neu entstanden, während 4 Wasserstoffkerne (Protonen) verbraucht wurden.

Bei Verwendung der schon früher benutzten Symbole für die an dieser Reaktion beteiligten Kerne und Elementarteilchen können wir diesen „Kreislauf“ noch plastischer darstellen:



Hierin bedeutet das Zeichen + Aufnahme und das Zeichen – Abgabe der betreffenden Teilchen.

Die Sonne muß noch übertroffen werden

Es dauert jedoch etwa 50 Millionen Jahre, bis ein solcher Kreisprozeß abgelaufen ist. Zwischen den geschilderten Einzelphasen liegen also nicht nur Sekunden, sondern lange Zeiträume. Da in den Sternen aber unzählige solcher Vorgänge gleichzeitig nebeneinander ablaufen, spielt der Zeitverbrauch für den einzelnen Vorgang keine Rolle.

In dieser Weise können wir den Prozeß auf der Erde nicht nachahmen. Das wäre viel zu kompliziert, außerdem könnten wir nicht 50 Millionen Jahre auf das volle Anlaufen und Wirksamwerden warten. Wir müssen Kernfusionen auf viel direktere Weise, ohne die vielen Zwischenphasen, erreichen. Dafür sind noch höhere Temperaturen erforderlich. Wir müssen daher die Sonne sogar übertreffen.

Ein Weg, extrem hohe Temperaturen zu erreichen, besteht in der Explosion einer Kernspaltungsbombe. Sie erzeugt auf kleinem Raum kurzzeitig eine Temperatur von vielen Millionen °C. Umgibt man die eigentliche Kernspaltungsbombe mit einem Mantel aus geeigneten leichten Elementen, so werden diese im Moment der Explosion derart erhitzt, daß Kernfusionen stattfinden. Dadurch addiert sich zur Energiefreisetzung der Kernspaltungen noch die der Kernfusionen; die Auswirkungen sind daher noch weit verheerender als die einer Kernspaltungsbombe. Man nennt eine solche kombinierte Kernspaltungs-Kernfusions-Waffe Wasserstoffbombe oder auch thermonukleare Waffe. Da die Energieentfaltung jedoch momentan, explosiv erfolgt, ist sie technisch nicht nutzbar, sondern nur ein Werkzeug menscheitsfeindlicher Zerstörung. Die sozialistische Menschheit will aber keine zerstörerischen Energien freisetzen. Zur Verteidigung gegen die Bedrohung mit thermonuklearen Waffen durch die imperialistischen Mächte mußte die Sowjetunion zwar auch Wasserstoffbomben herstellen. Aber unser Ziel ist die friedliche und nützliche Anwendung dieser gewaltigen Energiequelle. Das ist ebenso wie bei der Kernspaltung nur dadurch möglich, daß die ungeheure Energiefreisetzung nicht schlagartig erfolgt, sondern über eine längere Zeit verteilt.

Das soll in Zukunft durch den Fusionsreaktor, auch thermonuklearer Reaktor genannt, erfolgen. Bisher sind jedoch nur experi-

mentelle Vorarbeiten dafür gelungen. Die für die Kernfusion erforderliche hohe Temperatur wird erzeugt, indem man durch ein großes Hochvakuumrohr, das nur eine geringe Menge schweren Wasserstoff und Lithium (Ordnungszahl 3) enthält, eine extrem starke elektrische Entladung gehen läßt. Dieser Vorgang ähnelt dem Gewitterblitz. Auch in ihm fließt elektrische Ladung durch den sich in der Luft bildenden Blitzkanal ab. Die Luft ist im Blitzkanal ionisiert, also elektrisch leitfähig.

Durch die Versuchsanlagen für Kernfusion werden stoßartig Ströme von Millionen Ampere geschickt. Dadurch erhitzt sich das Gas auf Millionen °C. Es wird zum Plasma, das sich von gewöhnlichem Gas dadurch unterscheidet, daß die Atome ionisiert sind. Doch reichen die dabei bisher erzielten Temperaturen noch nicht aus, um sehr viele Kernfusionen stattfinden zu lassen. Auch die Dichte des Plasmas ist dafür noch zu gering. Sie entspricht erst einem sehr hoch verdünnten Gas. Ferner ist das Problem, das heiße Plasma dicht zusammenzuhalten, „einzuschließen“, noch nicht befriedigend gelöst.

Man kann ein Millionen °C heißes Plasma ja nicht durch die Wände irgendeines Gefäßes einschließen. Denn erstens würde jedes Material bei dieser Temperatur sofort verdampfen, und zweitens würde sich das heiße Plasma bei Berührung mit der sehr viel kälteren Wand des Gefäßes sofort abkühlen und wäre damit für die Kernfusion unbrauchbar. Man muß daher verhindern, daß das Plasma mit den Rohrwänden in Berührung kommt. Denn Plasma, das die Wände des Rohrs berührt, läßt sich ebensowenig auf Millionen Grade erhitzen, wie es möglich ist, Wasser in einem Topf aus Eis zu kochen.

Wir wissen bereits, daß bewegte Ladungsträger und folglich auch die Teilchen des Plasmas sich in Magnetfeldern nur auf bestimmten Bahnen bewegen können. Mit Hilfe von Magnetfeldern kann man daher das Plasma von den Rohrwänden fernhalten und es wie in einer unsichtbaren, nichtstofflichen Flasche einschließen. Man spricht bildlich von einer „magnetischen Flasche“ oder auch von der „Magnetfalle“, in der die Plasmateilchen gefangen sind. Ein solches Magnetfeld wird sogar durch die im Plasma fließenden elektrischen Ströme erzeugt. Es drückt das Plasma zu einer Ent-

ladungs„schnur“ eng zusammen. Außerdem wird noch ein äußeres Magnetfeld durch eine um das Entladungsrohr gewickelte stromdurchflossene Spule erzeugt.

Doch bestehen gerade auch hinsichtlich des Einschlusses des Plasmas noch viele ungelöste Probleme. So sind die Magnetfelder nicht völlig gleichförmig. Die magnetischen Kraftlinien verlaufen nicht geradlinig und sind nicht überall gleichmäßig verteilt. Bildlich könnte man das Magnetfeld mit einem Schlauch vergleichen, der Löcher hat, durch die das Plasma entweicht.

Aufgaben für die junge Generation

Die junge Generation von Wissenschaftlern steht hier also vor großen Aufgaben. Wenn sie gelöst werden, ist damit der Menschheit eine wahrhaft unerschöpfliche Energiequelle erschlossen, die noch weit reicher und ergiebiger als die Kernspaltung ist. Dann könnte man buchstäblich sogar das Wasser der Ozeane „verheizen“, zwar nicht das gewöhnliche Wasser, sondern nur den darin in geringer Menge enthaltenen schweren Wasserstoff. Ihn abzutrennen würde in Anbetracht der gewaltigen Energien, die durch Kernfusion zu gewinnen sind, lohnen.

Die sozialistische Gesellschaft kann mit Hilfe dieser Energien große technische Aufgaben, wie sie noch niemals in der Geschichte der Menschheit angepackt wurden, erfolgreich meistern. Denken wir – um nur ein Beispiel aufzugreifen – etwa daran, daß zumindest in der jüngsten Geschichte unserer Erde ein mehrfacher Wechsel von Eiszeiten und Zwischeneiszeiten erfolgte. Wir wissen daher nicht, ob wir gegenwärtig nur in einer Zwischeneiszeit leben, der in Jahrtausenden eine erneute Vereisung weiter Gebiete folgt, die heute dicht besiedelt und industrialisiert sind. Mit Hilfe der gigantischen, neuen Energiequelle Kernfusion könnte der Mensch vielleicht sogar das Klima der Erde grundlegend verändern.

Doch das ist nur ein Beispiel. Sicher wird der schöpferische, sozialistische Mensch viele Möglichkeiten finden, mit Hilfe gigantischer Energien sein Leben noch schöner und interessanter zu gestalten. Nicht zuletzt gehört dazu auch die weitere Erforschung unseres Planetensystems und des Weltraums, von der unser Buch seinen Ausgang nahm.



Kleines Lexikon des Atomzeitalters

Absorption – bedeutet in der Kernphysik Schwächung oder völliges „Verschlucktwerden“ einer Strahlung. Zum Beispiel werden Gammastrahlen durch Absorption in Blei geschwächt. Eine große Rolle spielt in der Kerntechnik die Neutronenabsorption.

aktive Zone – Bereich des Kernreaktors, in dem die Kernspaltungen stattfinden.

Alphastrahlen – diejenige Art der Strahlung radioaktiver Stoffe, die aus Alphateilchen besteht. Sie werden aus einer radioaktiven Substanz nach allen Seiten in zufällige Richtungen ausgeschleudert, ähnlich wie die Fünkchen aus einer Wunderkerze.

Alphastrahler – radioaktive Stoffe, die Alphastrahlen aussenden.

Alphateilchen – die Teilchen, aus denen Alphastrahlung besteht. Alphateilchen sind Helium-Atomkerne. Sie bestehen aus 2 Protonen und 2 Neutronen, unterscheiden sich von normalen Heliumkernen aber dadurch, daß sie sich mit großer Geschwindigkeit bewegen, also hohe Bewegungsenergie haben. Ist ein Alphateilchen zur Ruhe gekommen, so ist es nur noch ein gewöhnlicher Heliumkern. Das erklärt, warum in allen Mineralien, die Alphastrahlen aussendende radioaktive Elemente enthalten, spurenweise Helium vorkommt.

Alphazerfall – die Art des radioaktiven Zerfalls von Atomkernen, bei der ein Alphateilchen ausgesandt wird. Durch Alphazerfall wandelt sich ein Atomkern stets in den Kern eines chemischen Elements um, das eine um 2 niedrigere Ordnungszahl hat.

Annihilation – vollständige Umwandlung von Teilchen in Strahlungsenergie, der am stärksten energieliefernde Prozeß überhaupt, dessen technische Nutzung jedoch noch nicht möglich ist. Annihilation, auch Zerstrahlung genannt, erfolgt, wenn sich ein Teilchen und ein ihm entsprechendes Antiteilchen vereinigen.

Anode – positive Elektrode.

Antiatom – ein aus Antiteilchen zusammengesetztes Atom.

Antielemente – chemische Elemente, die aus Antiatomen bestehen würden.

Antimaterie – zusammenfassender Ausdruck für alle Antiteilchen.

Antiproton – ein Antiteilchen, Gegenstück des Protons.

Antiteilchen – Elementarteilchen, die gewissermaßen Gegenstücke zu den „normalen“ Elementarteilchen darstellen. So gibt es z. B. als Gegenstück des Elektrons das Positron. Beide haben gleiche Masse und gleich große elektrische Ladung, jedoch ist das Elektron negativ, das Positron positiv geladen. Das Antiproton gleicht in Masse und Ladung dem Proton, trägt aber keine positive Ladung wie das Proton, sondern negative. Noch andere Eigenschaften von Teilchen und Antiteilchen sind einander entgegengesetzt.

Atom – kleinstes Teilchen eines chemischen Elements, das noch die Eigenschaften des betreffenden chemischen Elements besitzt. Jedes Atom besteht aus einem Kern und einer Atomhülle aus einem oder mehreren Elektronen. Das oder die Elektronen bewegen sich auf kreisförmigen oder elliptischen Bahnen um den Kern.

Atombatterie – Vorrichtung, in der die Energie der Strahlung radioaktiver Stoffe zur Gewinnung elektrischer Energie ausgenutzt wird. Atombatterien liefern sehr lange Zeit elektrische Energie.

Atombombe – Waffe, deren Sprengwirkung nicht durch chemische Reaktionen, sondern durch Spaltung (Kernspaltungsbombe) oder durch kombinierte Spaltung und Verschmelzung von Atomkernen (Wasserstoffbombe, thermonukleare Waffe) erzeugt wird. Atombomben haben vielfach größere Spreng- und Hitzewirkung als mit chemischem Sprengstoff gefüllte Bomben und Granaten. Außerdem entstehen bei der Explosion einer Atombombe große Mengen radioaktiver Stoffe, welche die Umgebung lebensgefährlich verseuchen.

Atomhülle – Gesamtheit der Elektronen, die sich um den Atomkern bewegen, auch Elektronenhülle genannt.

Atomkern – positiv geladener Teil des Atoms, der sich im Zentrum des Atoms befindet und über 99 Prozent der Masse des Atoms enthält.

atomphysikalische Masseneinheit – Maßeinheit zur genauen Bestimmung der Masse von Atomen und Atomkernen.

Atomzertrümmerung – veralteter Ausdruck für die künstliche Um-

wandlung von Atomkernen durch Beschuß mit energiereichen Teilchen.

Antineutron – ein Antiteilchen, Gegenstück des Neutrons.

Betastrahlen – diejenige Art der Strahlung radioaktiver Stoffe, die aus Betateilchen besteht. Vergleiche Alphastrahlen.

Betateilchen – die Teilchen, aus denen Betastrahlen bestehen. Das Betateilchen hat gleiche Masse und Ladung wie ein Elektron, unterscheidet sich von diesem jedoch durch seine hohe Bewegungsenergie. Hat es diese durch Wechselwirkung mit anderen Atomen verloren, so wird es zu einem normalen Elektron oder Positron, je nachdem, ob es sich um ein negativ oder positiv geladenes Betateilchen handelte.

Betazerfall – diejenige Art des radioaktiven Zerfalls von Atomkernen, bei der ein Betateilchen ausgesandt wird. Bei Ausstrahlung eines negativen Betateilchens (β^-) wandelt sich der Atomkern in einen Kern des Elements der nächsthöheren Ordnungszahl um, bei Ausstrahlung eines positiven Betateilchens (β^+ , Positron) in einen Kern des Elements der nächstniedrigeren Ordnungszahl.

Blasenkammer – Gerät zum Nachweis energiereicher Teilchen, wobei die Teilchen längs ihrer Bahn eine Bläschen spur erzeugen.

Brutreaktor – Kernspaltungsreaktor, in dem Kernbrennstoff nicht nur verbraucht, sondern auch in größerer Menge neu erzeugt wird.

chemische Verbindungen – Stoffe, in denen sich zwei oder mehrere Atome verschiedener Elemente zu Atomverbänden, Molekülen, zusammengeschlossen haben. Wasser z. B. ist eine chemische Verbindung von 2 Atomen Wasserstoff und 1 Atom Sauerstoff.

Deuteronen – Atomkerne des schweren Wasserstoffs.

Dynamomaschine – Gerät zum Erzeugen elektrischer Energie.

elektrisches Feld – Kraftfeld zwischen positiver und negativer Elektrode (Anode und Katode), das auf elektrische Ladungsträger wirkt.

Elektrode – allgemein der Teil eines festen Leiters, der mit einer Spannungsquelle verbunden ist und der Zuführung des elektrischen Stroms in eine Flüssigkeit, ein Gas, ein Vakuum oder auf einen festen Körper dient. Elektroden haben häufig die Form von Metallblechen. Die mit dem Pluspol der Spannungsquelle verbun-

dene Elektrode ist die Anode, die mit dem Minuspol verbundene die Katode.

Deuterium – schwerer Wasserstoff (siehe dort).

Elektronen – Träger der kleinsten negativen elektrischen Ladung. Jedes Elektron trägt eine negative elektrische Elementarladung. Aus Elektronen besteht die Atomhülle.

Elektronenstrahl – Bündel, „Salve“ von Elektronen, die sich in gerichteter Bewegung befinden.

Elektronenvolt – in der Kernphysik gebräuchliche Maßeinheit der Energie, nicht zu verwechseln mit der als Volt bezeichneten Maßeinheit für elektrische Spannung.

Elektroskop – einfaches Gerät zum Nachweis kleiner elektrischer Spannungen und schwacher elektrischer Ladungen. Indirekt kann damit auch die Strahlung radioaktiver Stoffe nachgewiesen werden.

Element – in der Chemie bezeichnet man als Element (Grundstoff) einen einheitlichen Stoff, der nicht mehr in chemisch unterschiedliche Stoffe zu zerlegen ist. Die Kernladungszahl und die Ordnungszahl aller Atome desselben chemischen Elements ist gleich, ihre Massenzahl kann verschieden sein (siehe Isotope).

Elementarladung – die kleinste vorkommende Menge elektrischer Ladung. Das Proton ist Träger einer positiven, das Elektron Träger einer negativen elektrischen Elementarladung.

Elementarteilchen – die nach dem gegenwärtigen Stand der Erkenntnis kleinsten „Bausteine“ der Materie.

endotherm – eine Reaktion, für deren Ablauf Wärme zugeführt werden muß.

Energie – In der Physik versteht man darunter im allgemeinsten Sinne die Fähigkeit der Materie, Arbeit zu verrichten. Es gibt verschiedene Energieformen: mechanische, elektrische, magnetische, chemische Energie, Wärmeenergie, Kernenergie. Energie kann von einer in andere Formen überführt werden.

Energieträger – Stoffe, die Energie abgeben können, z. B. Kohle, Erdöl, Erdgas, Kernbrennstoff.

erg – Maßeinheit der Energie.

eV – Abkürzung für die Maßeinheit Elektronenvolt.

exotherm – eine Reaktion, bei der Wärmeenergie freigesetzt wird.

Fernmanipulator – Vorrichtung, mit der man über einige Entfernung, meist durch eine Strahlenschutzwand, mittels geeigneter Greifer Gegenstände handhaben kann, ist bei der Verarbeitung stark radioaktiver Substanzen wegen der Gefährlichkeit der Strahlen erforderlich.

Fluoreszenz – Eigenschaft von Stoffen, bei Einwirken von Wellen- oder Teilchenstrahlen sichtbares Licht auszusenden. Die Lichtaussendung erfolgt dabei nur so lange, wie die Strahlung auf den Stoff einwirkt, es tritt kein Nachleuchten auf.

Fusionsreaktor – Vorrichtung zur fortlaufenden Kettenreaktion von Atomkernverschmelzungen (Kernfusionen), noch nicht verwirklichtes Ziel künftiger Kernenergietechnik.

Gammadefektoskopie – zerstörungsfreie Werkstoffprüfung mit Hilfe der Durchstrahlung von Werkstücken mit Gammastrahlen.

Gammastrahlen – diejenige Art der Strahlung radioaktiver Stoffe, die nicht die Form von Teilchen hat, sondern eine elektromagnetische Wellenstrahlung von der Art des Lichts, jedoch mit wesentlich kürzerer Wellenlänge, ist. Bei Aussendung von Betateilchen wird häufig auch ein Gammastrahl abgegeben.

Geigerzähler – (genauer: Geiger-Müller-Zähler) sehr gebräuchliches Gerät zum Nachweis der Strahlung radioaktiver Stoffe.

Gewicht – vereinfacht ausgedrückt die Kraft, mit der ein Gegenstand aufgrund der allgemeinen Massenanziehungskraft in Richtung auf den Erdmittelpunkt, bei anderen Himmelskörpern in Richtung auf deren Mittelpunkt (Schwerpunkt) angezogen wird. Maßeinheiten des Gewichts sind das Pond (p) und Kilopond (kp), nicht zu verwechseln mit Gramm und Kilogramm, die Maßeinheiten der Masse sind. Die Masse eines Körpers bleibt gleich, wenn er z. B. von der Erde auf den Mond gebracht wird, sein Gewicht ist infolge der geringeren Anziehungskraft des Mondes dort aber wesentlich leichter als auf der Erde.

Grammatom – soviel Gramm eines Elements, wie seine relative Atommasse (Atomgewicht) angibt. Da z. B. Sauerstoff die relative Atommasse 16 hat, sind 16 Gramm Sauerstoff = 1 Grammatom Sauerstoff.

Grammolekül – soviel Gramm eines Elements oder einer chemischen Verbindung, wie seine relative Molekularmasse (Molekular-

gewicht) angibt. Da z.B. Wasser das Molekulargewicht 18 hat, sind 18 Gramm Wasser = 1 Grammolekül Wasser.

Graphit – Kristallform des Kohlenstoffs, wird in manchen Kernreaktoren als Moderator benutzt.

Halbwertszeit – Zeit, nach der von einer radioaktiven Substanz genau die Hälfte durch radioaktiven Zerfall umgewandelt ist. Jedes radioaktive Nuklid hat eine bestimmte, unveränderliche HWZ.

heiße Kammer – Raum, in dem sich sehr stark strahlende radioaktive Substanzen befinden, so daß der Aufenthalt von Menschen in dem Raum nicht möglich ist, sondern die Stoffe mit Fernmanipulatoren gehandhabt werden müssen.

HWZ – Abkürzung für Halbwertszeit.

Ion – elektrisch positiv oder negativ geladenes Teilchen von der Größe eines Atoms oder Moleküls. Atome und Moleküle werden in Ionen verwandelt, indem man ihrer Atomhülle ein oder mehrere Elektronen entreißt oder zusätzlich anlagert. Im ersteren Falle entstehen positiv, im zweiten Falle negativ geladene Ionen.

Ionisation – Vorgang der Umwandlung eines Atoms oder Moleküls in ein Ion.

Isotope – Unterarten desselben chemischen Elements, die sich jedoch in der Anzahl der im Atomkern enthaltenen Neutronen und folglich in der Massenzahl unterscheiden, also etwas verschieden schwer sind. Von den meisten chemischen Elementen gibt es mehrere Isotope.

Isotopenbatterie – anderer Ausdruck für Atombatterie.

Katode – negative Elektrode.

Kernbrennstoff – für die Energiegewinnung durch Kernspaltung geeigneter Stoff, hauptsächlich Uran und Plutonium.

Kernexplosion – explosionsartig verlaufende Kettenreaktion von Kernspaltungen und Kernfusionen, findet bei der Zündung von Kernwaffen statt. Im Unterschied zur Kernexplosion erfolgt im Kernreaktor die Spaltung vieler einzelner Atomkerne nacheinander über lange Zeit hin, in der Kernwaffe in einem kurzen Moment.

Kernfusion – Verschmelzung von Atomkernen, ebenfalls von enormer Energiefreisetzung begleitet.

Kernkräfte – Kräfte, die den Zusammenhalt der Teilchen bewirken, aus denen der Atomkern besteht.

Kernkraftwerk – (auch Atomkraftwerk genannt) ein Kraftwerk, in dem die bei der Spaltung von Atomkernen frei werdende Energie zur Erzeugung elektrischer Energie benutzt wird.

Kernladungszahl – die Zahl der im Atomkern befindlichen positiven elektrischen Elementarladungen. Da jedes Proton eine positive Elementarladung trägt, ist die Kernladungszahl gleich der Zahl der Protonen des Atomkerns und gleich der Ordnungszahl des betreffenden chemischen Elements. Die Kernladungszahl wird links unten vor das chemische Symbol geschrieben, z. B. ${}_{92}\text{U}$.

Kernreaktor – Vorrichtung, in der eine Kettenreaktion von Kernspaltungen erfolgt.

Kernspaltung – Auseinanderbrechen eines schweren Atomkerns in zwei etwa mittelgroße oder zwei etwa mittelgroße und ein kleines Bruchstück. Kernspaltung tritt bei einigen ihrer relativen Atommasse nach sehr schweren Elementen ein, wenn ein Neutron in den Kern eindringt.

Kernspaltungsbombe – Waffe, deren Spreng- und andere Wirkungen durch eine explosive Kettenreaktion von Kernspaltungen hervorgerufen wird.

Kernspur – die von energiereichen Teilchen, also nicht nur von Atomkernen, erzeugten sichtbaren Spuren in einer fotografischen Schicht, einer Nebel- oder Blasenkammer.

Kernverschmelzung – siehe Kernfusion.

Kernwaffen – siehe Atombombe.

Kettenreaktion – In der Kernphysik versteht man darunter den Vorgang, bei dem die durch Spaltung eines Atomkerns frei werdenenden Neutronen weitere Atomkerne spalten, so daß eine fortlaufende Kette von Kernspaltungen entsteht. Da bei der Spaltung eines Atomkerns mehrere, durchschnittlich 2,5 Neutronen frei werden, kann die Kettenreaktion lawinenartig anwachsen (explosive Kettenreaktion, Kernexplosion), so daß in einem Sekundenbruchteil unvorstellbare Anzahlen von Kernen gespalten werden. Im Kernreaktor erfolgt dagegen die Kettenreaktion kontrolliert, gesteuert, gezügelt, d. h.: es wird dafür gesorgt, daß immer nur etwa eines der bei einer Kernspaltung frei werdenden Neutronen einen weiteren Kern spaltet.

kinetische Energie – Bewegungsenergie.

kosmische Strahlung – auch Höhenstrahlung genannt; eine aus dem Weltraum in die Atmosphäre der Erde einfallende energiereiche Strahlung. Die aus dem Weltraum kommenden Teilchen der primären kosmischen Strahlung erzeugen bei ihrer Wechselwirkung mit Atomkernen der Luftgase zahlreiche weitere energiereiche Teilchen, die unter dem Begriff sekundäre kosmische Strahlung zusammengefaßt werden.

kritische Masse – Menge des Kernbrennstoffs (Spaltstoffs), die erforderlich ist, damit eine Kettenreaktion von Kernspaltungen einsetzen bzw. in Gang gehalten werden kann.

Lichtquant – So wie die Stoffe aus Atomen und Elementarteilchen bestehen, so sind auch elektromagnetische Wellenstrahlen aus einzelnen kleinen Strahlungsportionen, Quanten genannt, zusammengesetzt. Ein Lichtquant ist ein Quant der Lichtstrahlung, ein Gammaquant ein Quant der Gammastrahlung.

Loschmidtsche Zahl – benannt nach dem österreichischen Physiker Joseph Loschmidt. Die Zahl gibt an, wie viele Atome sich in einem Grammatom und wieviel Moleküle sich in einem Grammolekül jedes beliebigen chemischen Elements bzw. Verbindung befinden. Die Zahl beträgt nach neuesten Festlegungen $6,025 \cdot 10^{23}$ (= 602 500 000 000 000 000 000 000).

Magnetfalle – bildliche Bezeichnung für magnetische Kraftfelder, die erzeugt werden, um ein hoch erhitztes Plasma in einem Raum einzuschließen, ohne daß es für diesen Einschluß stofflicher Gefäße oder Wände bedarf.

magnetisches Feld – Kraftfeld, das in der Umgebung jedes Magneten und stromdurchflossener elektrischer Leiter Wirkungen auf magnetische oder magnetisierbare und elektrisch geladene Körper bzw. Teilchen ausübt.

magnetische Flasche – siehe Magnetfalle.

Masse – In dem für die Kernphysik interessanten Zusammenhang bedeutet Masse im Unterschied zum Gewicht die Stoffmenge eines Körpers bzw. Teilchens.

Massenspektrograf – Gerät zur Bestimmung der Masse einzelner Atome bzw. Atomkerne.

Massenspektrometer – wie Massenspektrograf, jedoch nach einem etwas anderen Funktionsprinzip arbeitend.

Massenzahl – gibt die Gesamtzahl der in einem Atomkern enthaltenen Protonen und Neutronen an, wird links oben vor das chemische Symbol geschrieben, z. B. ^{238}U .

Moderator – Bremssubstanz, dient im Reaktor zur Abbremsung, Verlangsamung schneller zu langsamen Neutronen.

Molekül – kleinstes Teilchen einer chemischen Verbindung, das noch die chemischen Eigenschaften dieser Verbindung besitzt. Ein Molekül besteht aus mindestens zwei Atomen. Nicht nur Atome verschiedener Elemente, sondern auch desselben Elements schließen sich zu Molekülen zusammen.

Molekulargewicht – Summe der relativen Atommassen aller im Molekül verbundenen Atome. Das Molekulargewicht wird nicht in Gramm, sondern in einer Verhältniszahl angegeben. Sie drückt aus, in welchem Verhältnis die Masse eines Moleküls zur Masse eines Atoms des Kohlenstoff-Isotops 12 steht.

Natururan – Uran natürlicher Isotopenzusammensetzung, das nur 0,7 Prozent des leicht spaltbaren Uran-Isotops 235 enthält. Gegensatz: angereichertes Uran (siehe unter Uran).

Naturwasser – Darunter versteht man in der Kernphysik destilliertes Wasser natürlicher Isotopenzusammensetzung. Gegensatz: schweres Wasser.

Nebelkammer – Gerät zum Nachweis energiereicher Teilchen, wobei die Teilchen längs ihrer Bahn eine Nebelspur erzeugen.

Neutrino – ein elektrisch neutrales Elementarteilchen.

Neutronen – elektrisch neutrale, nicht geladene Elementarteilchen, die etwa die gleiche Masse wie Protonen haben. Aus Neutronen und Protonen sind die Atomkerne zusammengesetzt.

– – **freie Neutronen** – nicht in einem Atomkern gebundene Neutronen. Sie zerfallen mit einer HWZ von 15 Minuten in je 1 Proton und 1 Elektron.

– – **langsame Neutronen** – die aus einem gespaltenen Atomkern frei werdenden Neutronen haben hohe Bewegungsenergie, sind schnelle Neutronen. In den meisten der heutigen Reaktoren müssen sie durch einen Moderator zu langsamen Neutronen abgebremst werden.

– – **schnelle Neutronen** – siehe langsame Neutronen.

– – **thermische Neutronen** – Ausdruck für langsame Neutronen.

Neutronenabsorption – Einfang von Neutronen in den Atomkernen von Stoffen.

Neutroneneinfang – siehe Neutronenabsorption.

Neutronenhaubitze – Röhrchen (Ampulle), das mit einem Stoff gefüllt ist, in dem sich eine Kernreaktion abspielt, bei der Neutronen frei werden, so daß die Neutronenhaubitze freie Neutronen abgibt, die für kernphysikalische Versuche dienen.

Nukleonen – Bausteine der Atomkerne.

Nuklide – Unterarten von Atomkernen radioaktiver Stoffe, vergleiche Isotope.

Ordnungszahl – Ordnet und numeriert man die chemischen Elemente nach der Reihenfolge ihrer Kernladungszahlen, so gibt die Ordnungszahl den Platz an, den ein Element in der Liste einnimmt. Die Ordnungszahl ist gleich der Kernladungszahl.

Paarvernichtung – siehe Annihilation, Umwandlung eines Paares von Elementarteilchen, z. B. eines Elektrons und eines Positrons, in Gammastrahlung.

Phosphoreszenz – Eigenschaft von Stoffen, Licht auszustrahlen, nachdem sie Licht- oder andere Strahlungsenergie aufgenommen haben. Im Unterschied zur Fluoreszenz wird dabei die Energie der aufgenommenen Strahlung zunächst gespeichert und erst später wieder in Form von Licht abgegeben. Während fluoreszierende Stoffe nur so lange leuchten, als sie selbst bestrahlt werden, dauert bei phosphoreszierenden Stoffen (Phosphore genannt, aber nicht mit dem Element Phosphor identisch) die Lichtausstrahlung dabei noch einige Zeit (von Sekundenbruchteilen bis zu 8 Monaten) an. Phosphoreszierende Stoffe sind deshalb z. B. für Leuchtzifferblätter u. dgl. geeignet.

Photon – anderer Ausdruck für Lichtquant. Auch Gammaquanten werden manchmal als Photonen bezeichnet, da sowohl Licht- als auch Gammastrahlen elektromagnetische Wellenstrahlen sind.

Plasma – In der Physik versteht man darunter ein Gas, in dem die Atome bzw. Moleküle zumindest teilweise ionisiert sind. Ionisierte Gase sind im Unterschied zu nicht ionisierten (neutralen) Gasen elektrisch leitfähig.

Plutonium – als Nebenprodukt der Uran-Kernspaltung zu gewinnendes chemisches Element, das ebenso wie das Uran-Isotop 235

leicht spaltbar und daher als Kernbrennstoff und Kernsprengstoff geeignet ist.

Positron – Elementarteilchen, das gleiche Masse und Ladung wie das Elektron hat, jedoch statt der negativen Ladung des Elektrons eine positive. Das Positron ist das Antiteilchen zum Elektron.

Protonen – positiv elektrisch geladene Elementarteilchen von etwa gleicher Masse wie Neutronen. Aus Protonen und Neutronen sind die Atomkerne zusammengesetzt.

Radioaktivität – Eigenschaft mancher Atomkerne, sich von selbst unter Aussendung von Teilchen- oder Wellenstrahlen in andersartige Atomkerne umzuwandeln. Man bezeichnet diesen Umwandlungsprozeß als radioaktiven Zerfall.

radioaktive Elemente – chemische Grundstoffe, die dem radioaktiven Zerfall unterliegen. Siehe Radioaktivität.

Radioelemente – anderer Ausdruck für radioaktive Elemente.

Radioindikatormethode – Dabei werden einem Stoff, dessen Verbleib und Rolle bei bestimmten Vorgängen untersucht werden soll, radioaktive Nuklide zugefügt. Sie machen sich durch ihre Strahlung bemerkbar. Dadurch kann man den Verbleib des mit dem Radionuklid „markierten“ Stoffes leicht verfolgen.

Radionuklid – anderer Ausdruck für radioaktives Nuklid.

– – **künstliche Radionuklide** – solche Radionuklide, die künstlich durch Kernumwandlungen erzeugt werden. Dazu gehören die weitaus meisten in Wissenschaft, Technik und Medizin angewandten radioaktiven Stoffe.

Reaktor – Vorrichtung, in der eine Kettenreaktion von Kernspaltungen stattfindet.

– – **langsamer Reaktor** – ein Reaktor, in dem die Kernspaltungen durch langsame, mittels eines Moderators abgebremster Neutronen erfolgen. Gegensatz: schneller Reaktor, siehe dort.

– – **schneller Reaktor** – ein Reaktor, in dem die Kernspaltungen durch nicht abgebremste, schnelle Neutronen erfolgen.

Reflektor – Auskleidung eines Reaktors mit einem Stoff, der Neutronen, die aus dem Reaktor entweichen wollen, wieder in diesen zurückprallen läßt.

Regelstäbe – Stäbe aus stark Neutronen absorbierendem Material. Je weiter man sie in den Reaktor einführt, desto mehr Neutronen

werden eingefangen und gehen für die Kernspaltungs-Kettenreaktion verloren. Dadurch kann man die Kettenreaktion regulieren.

relative Atommasse – häufig noch als Atomgewicht bezeichnet, gibt die Masse von Atomen an, jedoch nicht in Gramm, sondern in einer Verhältniszahl. Sie besagt, in welchem Verhältnis die Masse eines Atoms zur Masse eines Atoms des Kohlenstoff-Isotops 12 steht. Ein Atom des Kohlenstoff-Isotops 12 hat die relative Atommasse von genau 12,000 000. Hat ein Atom die relative Atommasse 16, so verhält sich seine Masse zu der des Atoms des Kohlenstoff-Isotops 12 also wie 16 : 12.

Relativitätstheorie – von Albert Einstein geschaffene grundlegende Theorie der modernen Physik. Für die Kernphysik besonders wichtig ist die daraus folgende Energie-Massen-Gleichung, nach der errechnet werden kann, welche Energie einer bestimmten Masse entspricht und umgekehrt. Ferner besagt die Relativitätstheorie, daß die Masse eines Teilchens und jedes Körpers überhaupt mit seiner Bewegungsgeschwindigkeit zunimmt. Bei den gewohnten Geschwindigkeiten ist der Massenzuwachs so klein, daß man ihn nicht zu berücksichtigen braucht, bei Geschwindigkeiten, die der des Lichts von etwa 300 000 km/s nahekommen, ist er sehr groß.

schwerer Wasserstoff – die Atomkerne des einfachen Wasserstoffs bestehen nur aus 1 Proton, die des schweren Wasserstoffs (auch Deuterium genannt) aus 1 Proton und 1 Neutron. Schwerer Wasserstoff kommt in der Natur nur in sehr geringen Mengen vor. Die Atomkerne des Deuteriums heißen Deuteronen.

schweres Wasser – Wasser, dessen Moleküle nicht einfachen, sondern schweren Wasserstoff enthalten, dient als Moderator in Kernreaktoren.

Sicherheitsstab – Stab aus stark Neutronen absorbierendem Material. Schwillt im Reaktor die Kettenreaktion der Kernspaltungen zu stark an, so fällt automatisch ein Sicherheitsstab in die aktive Zone des Reaktors. Dadurch werden sofort derart viele Neutronen absorbiert, daß die Kettenreaktion schlagartig erlischt.

Spaltprodukte – Stoffe, die als Bruchstücke gespaltener Atomkerne entstehen.

spezifische Ladung – Verhältnis von elektrischer Ladung zur Masse eines Teilchens.

Spinthariskop – einfaches Instrument zum Erkennen der durch Einwirkung von Alphateilchen auf eine fluoreszierende Schicht ausgelösten schwachen Lichtblitze.

stabil – Gegensatz zu radioaktiv. Stabile Elemente bzw. Isotope unterliegen nicht dem radioaktiven Zerfall.

Strahlenbetrieb – Betriebsteil oder Labor, in dem mit radioaktiven Stoffen gearbeitet wird.

Strahlendosis – Größe der Wirkung ionisierender Strahlung. Wo mit radioaktiven Stoffen gearbeitet wird, muß die Strahlendosis laufend kontrolliert werden, um zu verhindern, daß die Beschäftigten einer gefährlich großen Strahlendosis ausgesetzt sind.

Strahlenkonservierung – Haltbarmachung von Nahrungsmitteln und anderen Stoffen durch die Strahlung radioaktiver Substanzen.

Streuung – Vorgang, bei dem eine gerichtete, gebündelte Strahlung in eine nicht mehr gerichtete und gebündelte übergeht. Durch Streuung werden z. B. Teilchen aus ihrer ursprünglichen in zufällige andere Richtungen abgelenkt oder zurückgeworfen.

Stratosphäre – Schicht der Erdatmosphäre, die von etwa 10 bis 60 km Höhe reicht.

Supraleitung – fast völliges Aufhören des elektrischen Widerstands und folglich stark erhöhte Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit, tritt bei manchen Metallen ein, wenn sie auf sehr tiefe Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt von $-273,15$ Grad C abgekühlt werden.

Szintillationszähler – Gerät zum Nachweis von energiereichen Teilchen- oder Wellenstrahlen.

Teilchenbeschleuniger – Anlage, mit der Elektronen, Atomkerne oder Ionen künstlich auf sehr hohe Geschwindigkeiten und dementsprechende Bewegungsenergien gebracht werden.

Teilchenstrahlen – Strahlen, die aus Salven winziger Teilchen bestehen, im Unterschied zu Wellenstrahlen. Alpha- und Betastrahlen sind Teilchenstrahlen; Gammastrahlen, Licht und Radiowellen sind Wellenstrahlen.

thermonukleare Waffen – anderer Ausdruck für Waffen, die eine kombinierte Kernspaltung und Kernverschmelzung auslösen, siehe Wasserstoffbombe.

Torr – Maßeinheit des Luftdrucks.

Transurane – chemische Elemente, die in der Reihenfolge der Ordnungszahlen (Kernladungszahlen) hinter dem Uran stehen, also größere Ordnungszahlen als 92 haben. Transurane kommen in der Natur nur in äußerst winzigen Mengen vor, werden aber künstlich hergestellt. Das bedeutendste Transuran-Element ist Plutonium.

Tritium – überschwerer Wasserstoff, seine Atomkerne bestehen aus 1 Proton und 2 Neutronen. Die Atomkerne des Tritiums nennt man Tritonen.

Überschwerer Wasserstoff – siehe Tritium.

Uran – radioaktives chemisches Element, dessen Isotop 235 leicht spaltbar und daher als Kernbrennstoff und Kernsprengstoff geeignet ist. Natürliches Uran enthält jedoch nur 0,7 Prozent dieses Isotops. Fast der gesamte Rest entfällt auf das schwer spaltbare Isotop Uran 238, das aber in das leicht spaltbare Plutonium umgewandelt werden kann.

– – **angereichertes Uran** – Uran, in dem der Anteil des leicht spaltbaren Isotops 235 künstlich erhöht wurde.

Vakuummöhre – luftdicht verschlossene Röhre, die nahezu luftleer gepumpt ist.

Wärmeaustauscher – Vorrichtung, in der sich die Wärme eines Stoffes auf einen anderen übertragen läßt, ohne daß sich beide Stoffe vermischen. Im Wärmeaustauscher eines Kernkraftwerks wird das heiße Kühlwasser, das den Reaktor durchströmt und daher radioaktive Stoffe enthält, durch ein Rohrschlängensystem geleitet, das von anderem Wasser umspült ist, das nicht durch den Reaktor strömt. Ohne Vermischung des gefährlichen radioaktiven Wassers mit dem anderen Wasser wird dabei dessen Wärme übertragen.

Wasserstoffbombe – Kernwaffe, in der durch explosive Kernspaltungs-Kettenreaktion eine Temperatur von vielen Millionen Grad erzeugt wird, die ihrerseits eine Kettenreaktion von Kernverschmelzungen leichter Atomkerne auslöst und dadurch die Spreng-, Hitze- und anderen verheerenden Wirkungen einer Kernspaltungsbombe noch bei weitem übertrifft.

Wechselwirkung – Einwirken energiereicher Teilchen- oder Gammastrahlen auf andere Teilchen. Bildlich kann man sich die Wechselwirkung energiereicher Teilchen auf Atome und Atomkerne oder

Elementarteilchen als Zusammenstöße veranschaulichen. Doch handelt es sich dabei genaugenommen meist nicht um Zusammenstöße im eigentlichen Sinne.

Zerfallsprodukte – Stoffe, die durch den Zerfall radioaktiver Atomkerne entstehen.

(Viele Begriffe wurden vereinfacht und nur auf die in diesem Buch behandelten Zusammenhänge bezogen definiert.)

Lösung zu Seite 103:

In 1 Gramm Kochsalz sind (rechnerisch abgerundet)

20 000 000 000 000 000 000 000 Atome enthalten.

Inhalt

5	Abenteuer am Kontrollpult	46	750 000 Francs für 1. Gramm
6	Dem Mimas entgegen	47	Der schwarze Tag
6	Sekunden entscheiden über Jahre	47	Der Geigerzähler tickt noch immer
7	Auf dem Bildschirm: der Saturn		
10	Die Welt hält den Atem an		
12	Ein Kraftwerk fliegt durch den Weltraum	49	Kriminalisten der Physik
13	Städte im Eis	49	10 hoch minus 8 cm
16	Geisterstationen	50	Indizien
16	Licht ohne Strom und Kabel	51	Was sind Strahlen?
17	Voraussetzung jeder Technik	53	Alpha-Beta-Gamma
17	Elektroenergie ist Trumpf	53	2000mal schneller als ein Sputnik
19	Was ist Energie?	55	Magnetische und elektrische Felder
20	Physikalische Verwandlungsspiele	58	Strahlenbündel aus der Bleikapsel
22	Was sind Energieträger?	59	Zwei schmale Stanniolblättchen
23	Kohle wird entthront	61	Masse und Gewicht
23	Auf den Kern kommt es an	62	Atomares Kegelspiel
		63	Ein Schleier hebt sich
		65	Der Funke wird befragt
		65	Ein Naturgesetz gerät ins Wanken
25	Rätselvolle Strahlen	66	Ist Radioaktivität ansteckend?
25	Eine unglaubliche Erscheinung	68	Probe mit verflüssigter Luft
26	Die Hand wird durchsichtig	69	Atommasse 222
28	Das unbekannte X	70	Ein Element verschwindet
29	Auf dem Holzweg ...		
30	... und doch etwas gefunden		
31	Noch ein Rätsel mehr	72	Dem Atomkern auf der Spur
32	Eine Studentin greift ein	72	Ein genialer Handwerkersohn
34	In die Naturwissenschaft verliebt	74	Man muß eine eigene Meinung haben
36	Ein Wunschtraum erfüllt	74	Entdeckung bei Schneetreiben
37	Das Atomzeitalter beginnt im Schuppen	77	Der Mensch muß nachhelfen
39	Das Geheimnis der Pechblende	77	Eine Kleinigkeit führt auf die Spur
42	Ein Element wehrt sich, entdeckt zu werden	79	Kursabweichungen werden wichtig
43	Immer unglaublicher	79	Wie ist das Atom gebaut?
44	Polonium	81	Sonnensysteme des Mikrokosmos?
44	Vier Jahre für ein Zehntelgramm		
45	Das geheimnisvolle Salz		

82	Springende Elektronen erzeugen Licht	122	Kernspuren vom Tatort
83	Das Geheimnis einer Zahl	123	Wissenschaft im Stratosphärenballon
84	Der unsichtbare Wall	125	Auf die 29. Stelle hinter dem Komma
		126	Mit Magnetismus wägen
86	Radioaktive „Familienverhältnisse“	127	Die Bahnkrümmung verrät's
86	Der enträtselte Kern	128	Im Reich der Zahlenzwerge
87	Massenzahl und Kernladungszahl		
88	Nuklide und Isotope	130	Kosmische Kräfte zertrümmern den Kern
90	Wir analysieren den Zerfall	131	Atomkerne unter Beschuß
91	Aus Weibchen werden Männchen	132	Leuchtschirmblitze und Geistesblitze
93	Ein aufschlußreiches Schema	134	Atombillard
95	Warum gibt es noch Uran?	136	Gabeln gesucht!
95	Sterbestatistik der Atomkerne	137	Munition aus dem Weltraum
97	HWZ 3 Sekunden	138	Ziel: Lichtgeschwindigkeit
98	Warum ist Radium selten?	139	Angriff auf das Proton
99	Das unmögliche Element	141	In der Gefahrenzone
100	Im Reich der Riesen Zahlen	142	Im Keller der Titanen
101	26 500 Strahlen je Sekunde	143	Von Hochspannung gepeitscht
101	Wieviele Atome enthält 1 Gramm Wasser?	144	Am Zaum des Magnetfeldes
102	Abzählen aussichtslos	147	Der Zoo der Elementarteilchen
103	Mit Protonen überfüttert	148	Lebensdauer: 10^{-23} Sekunden
104	Verdauungsbeschwerden	150	Supermagnete durch Superkälte
105	Kranke Atomkerne		
		152	An der Schwelle der Superenergie
107	Apparate für das Unsichtbare	153	Stoffe, die sich selber heizen
107	Feuerwerk der Alphateilchen	155	Die Neutronenhaubitze greift ein
107	Geheimnisse des Leuchtzifferblatts	157	Madame Curies letzte große Freude
109	Gespeichertes Licht	158	Radioaktivität – künstlich erzeugt
110	Fotoplatte als Strahlendetektiv	159	Spielerien mit Neutronen
111	Warum der Geigerzähler tickt	161	Das Element 93
113	Atome mit Havarie	163	Das Rätsel der Transurane
114	Ein aufschlußreicher Stromstoß	166	Der geheimnisvolle Dreieinhalbstundenkörper
115	Wir leben im Strahlungsnebel	167	Frauen auf der richtigen Spur
115	Bombardement aus dem Kosmos	169	Der Faschismus wütet
118	Kondensstreifen in der Nebelkammer	170	Das kann eine Katastrophe werden...
119	Was ein Kolben vermag	172	Wettlauf mit einem Phantom
121	Atomteilchen fotografieren sich selbst		

176	Die Maschine der Titanen	204	Unbezahlbares Gold
176	Die Kernspaltungslawine	205	Arbeit für magische Hände
178	Die kritische Masse	209	Die unsichtbare Gefahr
179	Die Atombombe	211	Millionstelgramm verhindern Millionenschäden
180	Gezügelte Titanenkraft	213	Röntgengerät in der Aktentasche
182	Kalkulationen mit Neutronen	214	Detektive der Forschung
183	Moderato . . .	215	Schabefleisch, das nicht verdirbt
184	Schweres Wasser		
185	Und wieder einmal: Wahrscheinlichkeitsrechnung		
187	Alles dreht sich um Neutronen	217	Auf dem Wege zur künstlichen Sonne
188	Neutronen auf Zickzackkurs	217	Eine rätselvollte Katastrophe
191	Aus Kernenergie wird Wärme	219	Masse = eingefrorene Energie
193	Wärme wird ausgetauscht	221	25 Millionen kWh aus 1 Gramm
194	Stäbe halten ihn in Schach	222	Antimaterie
194	Minireaktoren – 30 cm groß	224	Energie für 1 Milliarde Jahre
195	Der schnelle Brüter	227	Die Sonne muß noch übertroffen werden
196	Zauberstoff Plutonium	229	Aufgaben für die junge Generation
198	Künstliches Gold?		
198	Asche aus dem Atomofen		
200	Der gefährlichste Müll der Welt	231	Kleines Lexikon des Atomzeitalters
202	Elemente – im Atomofen „gebacken“		
203	3,44 Millionstelgramm in 14 Tagen		

Gigantische Energien entfesselt heute der Mensch aus Teilchen, die so winzig sind, daß sie noch kein Forscher jemals wirklich gesehen hat, aus Atomkernen. Ihre Erforschung und Nutzbarmachung war eines der spannendsten Abenteuer der Wissenschaft. Wie Kriminalisten, die aus Indizien den Hergang einer Tat rekonstruieren, die niemand beobachtet hat, mußten die Wissenschaftler vorgehen, um die Geheimnisse des Unsichtbaren zu enträtseln. Das wird in diesem Buch geschildert. Wir erleben, wie eine junge polnische Studentin die erste Spur fand, die dazu führte, daß die Physiker Zusammensetzung und Aufbau der unsichtbar und unfäßbar winzigen Atomkerne heute genauer kennen als den Inhalt ihrer Jackentasche. Wir lernen, wie sie Atomkerne auf bestimmte Bahnen lenken und ihnen Geschwindigkeiten verleihen, denen gegenüber Sputniks und andere kosmische Raketen langsam wie Schnecken sind. Wir erfahren, wie man aus einem einzigen Kilogramm Kernbrennstoff soviel Energie freisetzen kann wie aus 2,5 Millionen Kilogramm Steinkohle. Schließlich dürfen wir einen Blick in die Zukunft werfen, in der es dem Menschen vielleicht gelingt, künstliche Sonnen nachzubilden, die nicht bloß Licht, sondern auch Energie in Hülle und Fülle spenden, und zwar aus dem Brennstoff Wasser!