

# ATOMPHYSIK

EIN LEHRHEFT FÜR DAS 10. SCHULJAHR



VOLK UND WISSEN VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN

# ATOMPHYSIK

EIN LEHRHEFT FÜR DAS 10. SCHULJAHR

Mit 56 Abbildungen · Ausgabe 1959



VOLK UND WISSEN VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN · 1960

**Verfaßt von Alfons Böhm, Kurt Gogler, Alfred Priem**

**Zeichnungen von Kurt Dornbusch  
Redaktionsschluß: 15. 12. 1959**

**ES 11 H · Bestell-Nr. 02 925-1 · 0,75 DM · Lizenz Nr. 203 · 1000/59 (E)  
Satz: B. G. Teubner, Leipzig (III/18/154)  
Druck: VEB Offizin Andersen Nexö, Leipzig (III/18/36)**

## INHALTSVERZEICHNIS

1. Der Weg zur wissenschaftlichen Untersuchung des Atoms .....	5
2. Die Radioaktivität .....	8
3. Geräte zum Nachweis der radioaktiven Strahlen ..	10
4. Der Aufbau der Atome — Die Atommodelle...	13
5. Der Bau der Atomkerne — Die Isotope.....	20
6. Der natürliche radioaktive Zerfall der Atomkerne— Die künstliche Radioaktivität .....	26
7. Beschleuniger.....	29
8. Gewinnung der Kernenergie .....	34
9. Die Ausnutzung der Kernenergie .....	41
10. Die Anwendung radioaktiver Isotope .....	52
Namen- und Sachverzeichnis .....	62
Quellenverzeichnis der Abbildungen .....	64

## 1. Der Weg zur wissenschaftlichen Untersuchung des Atoms

**1. Der Atombegriff im Altertum.** Schon im 5. und 6. Jahrhundert vor unserer Zeitrechnung beschäftigte sich in verschiedenen griechischen Stadtstaaten eine ganze Anzahl von Menschen mit Fragen der Philosophie, der Mathematik und des Zusammenhangs sowie der Entwicklung in der Natur. Die damals dort bestehende Sklavenhaltergesellschaft ermöglichte es vielen Angehörigen der herrschenden Klasse, ihre Zeit der Pflege von Wissenschaft und Kunst zu widmen.

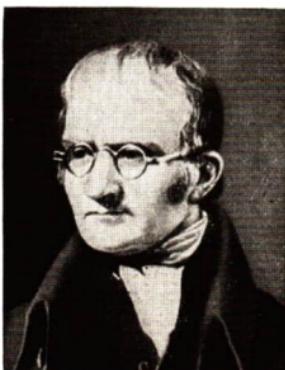
Die griechischen Philosophen kamen aber lediglich durch Überlegungen, nicht durch Experimente zu bedeutenden Ergebnissen über die Natur und ihre Entwicklung. Einer der größten von ihnen war *Demokrit von Abdera*, der von 400 bis 390 vor unserer Zeitrechnung lebte. Er lehrte, daß alle Stoffe der Welt aus kleinsten Teilchen aufgebaut seien, die sich voneinander nicht unterscheiden. Diese Teilchen nannte er *Atome*; das griechische Wort „atomos“ bedeutet „unteilbar“. Ähnliche Vorstellungen vom Aufbau der Welt aus kleinsten Teilen hatte auch *Epikur*, ein etwas später lebender griechischer Philosoph.

Der Begriff des Atoms, wie er im Altertum gebraucht wurde, ist nur durch Überlegungen entstanden. Die Naturwissenschaft und die Technik waren damals noch nicht so weit entwickelt, daß man den Atombegriff wissenschaftlich ableiten konnte. Der Stand der Technik veränderte sich auch in den darauffolgenden Jahrhunderten nur wenig, und die Entwicklung der Naturwissenschaften wurde durch die gesellschaftlichen Verhältnisse stark behindert.

Erst gegen Ende des Mittelalters trat ein Umschwung in der industriellen Entwicklung ein, der auch Fortschritte in der Wissenschaft zur Folge hatte.

**2. John Dalton.** England war im 16. und 17. Jahrhundert das wirtschaftlich fortgeschrittenste Land. Dort ging man auf Grund der Erfindung der Dampfmaschine von der Handarbeit zu den Anfängen der industriellen Produktion über. Damit stiegen auch die Ansprüche, die man an die Güte der Werkstoffe stellen mußte. Die Fragen nach dem Aufbau und nach der Zusammensetzung der Stoffe wurden nunmehr bedeutungsvoll, und man ging daran, sie wissenschaftlich zu erforschen.

Der Engländer *John Dalton* untersuchte die Zusammensetzung chemischer Verbindungen. Er entdeckte, daß sich chemische Grundstoffe nur in einem ganz bestimmten Massenverhältnis verbinden können. So verbinden sich zum Beispiel 32 Teile Schwefel immer nur mit 56 Teilen Eisen zu Schwefeleisen. Diese Zusammenhänge wurden in den *Gesetzen von*



John Dalton (1766 bis 1844)

den festen und vielfachen Gewichtsverhältnissen formuliert. Sehr deutlich erkennt man die Gültigkeit dieser Gesetze bei den Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen. In den Verbindungen

Distickstoffmonoxyd ( $N_2O$ ),  
Stickstoffmonoxyd ( $NO$ ),  
Distickstofftrioxyd ( $N_2O_3$ ),  
Stickstoffdioxyd ( $NO_2$ ),  
Distickstoffpentoxyd ( $N_2O_5$ )

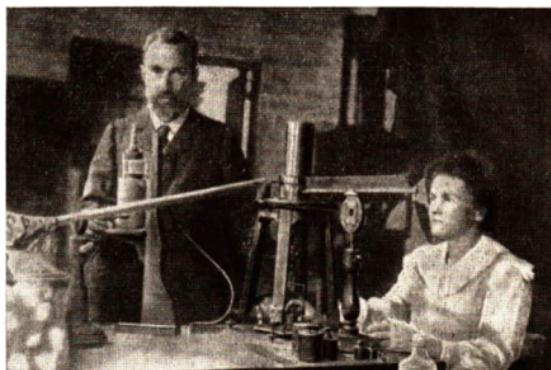
verhalten sich die Mengen Sauerstoff, die sich mit der gleichen Menge Stickstoff verbinden, wie 1 : 2 : 3 : 4 : 5.

Es verbinden sich:      24 g N mit 16 g O zu  $N_2O$ ,  
                                  24 g N mit 32 g O zu  $NO$ ,  
                                  24 g N mit 48 g O zu  $N_2O_3$  usw.

Diese Gesetzmäßigkeiten können auf einfache Weise nur mit Hilfe des Atombegriffs erklärt werden. Die Verhältniszahlen führten später zur Bestimmung der *Atommassen*. Bei der wissenschaftlichen Entwicklung dieser Beziehungen hat sich dafür der Begriff *Atomgewicht* eingebürgert. *Dalton* bezog die Gewichtsverhältnisse auf das leichteste Element, den Wasserstoff. Wasserstoff sollte das Atomgewicht 1 haben. Später jedoch bezog man die Atomgewichte auf die Masse des Sauerstoffatoms mit dem Wert 16. *Dalton* war der Ansicht, daß *jedes chemische Element aus arteigenen Atomen besteht*, die sich von denen der anderen Elemente unterscheiden.

**3. Henri Becquerel – Marie und Pierre Curie.** Nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen hatte man festgestellt, daß einige Stoffe bei Bestrahlung mit Röntgenstrahlen fluoreszieren. Der französische Physiker *Becquerel* wollte im Jahre 1896 diese Vorgänge systematisch untersuchen. Er hatte Stücke eines Uransalzes, Pechblende genannt, in einem Schrank längere Zeit auf Fotoplatten liegen lassen, die gegen Lichteinwirkung durch schwarzes Papier geschützt waren. Beim Entwickeln der Fotoplatten stellte er zu seiner großen Verwunderung fest, daß alle Platten belichtet waren.

*Becquerel* schloß daraus, daß von der Pechblende Strahlen ausgegangen waren, die die fotografische Schicht wie Lichtstrahlen chemisch verändert hatten. Der Gedanke, daß die Ursachen dieser Veränderungen unsichtbare Strahlen waren, lag deshalb nahe,



Marie Curie-Sklodowska (1867 bis 1934) und  
Pierre Curie (1859 bis 1906)

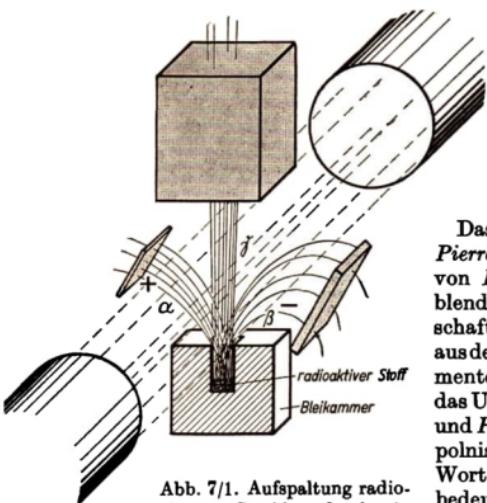


Abb. 7/1. Aufspaltung radioaktiver Strahlen durch ein magnetisches Feld

weil kurz vorher *Conrad Wilhelm Röntgen* unsichtbare Strahlen, die Röntgenstrahlen, entdeckt hatte, die Stoffe durchdringen können. So wurde als Folge der vielseitigen Untersuchungen zur Erforschung der Röntgenstrahlen eine neue Erscheinung entdeckt, die später als *Radioaktivität* bezeichnet wurde.

Das französische Forscherehepaar *Marie* und *Pierre Curie* beschäftigte sich eingehend mit der von *Bequerel* entdeckten Strahlung der Pechblende und untersuchte ihre Ursachen und Eigenschaften. Es gelang ihnen nach jahrelanger Arbeit, aus der Pechblende zwei bis dahin unbekannte Elemente zu gewinnen, die noch stärker strahlen als das Uran. Es sind dies die Elemente *Radium* (Ra) und *Polonium* (Po). Das Polonium wurde nach der polnischen Heimat von *Marie Curie* benannt, das Wort Radium stammt aus dem Lateinischen und bedeutet „das Strahlende“.

Zur Gewinnung von 1 g Radium mußte das Ehepaar *Curie* 7 t Uranerz verarbeiten. Das geschah unter schwierigsten Arbeitsbedingungen:

der Arbeitsraum war ein Schuppen und die Arbeitsgeräte waren völlig unzureichend. *Marie Curie* erlag im Jahre 1934 der schweren Gesundheitsschädigung, die sie sich durch ihre jahrelange Arbeit mit radioaktiven Stoffen zugezogen hatte. Sie hat ihr Leben ganz in den Dienst der Wissenschaft gestellt. Heute sind jedoch alle Menschen, die mit radioaktiven Strahlen arbeiten, gegen die gesundheitsschädigenden Wirkungen dieser Strahlen geschützt.

Da die radioaktive Strahlung sich allseitig ausbreitet, brachte man zu ihrer genauen Untersuchung ein Radiumpräparat in einen Bleiblock, der ein kleines Fenster hatte (Abb. 7/1). Die Strahlung konnte nur aus dem Fenster austreten, weil Blei bei genügender Dicke die Strahlen völlig absorbiert. Bei der Untersuchung dieser Strahlung in einem magnetischen Feld stellte man fest, daß zwei Anteile aus dem Strahlenbündel nach entgegengesetzten Seiten abgelenkt wurden. Man bezeichnet diese Strahlen als  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen. Auch in einem elektrischen Feld wurden diese Strahlen aufgespalten. Ein dritter Teil, der durch elektrische und magnetische Felder nicht beeinflußbar ist, wurde  $\gamma$ -Strahlung genannt. Aus der Richtung der Ablenkung der  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen konnte man schließen, daß die  $\alpha$ -Strahlen *positiv elektrisch* und die  $\beta$ -Strahlen *negativ elektrisch* geladen sind. Später stellte man fest, daß die  $\alpha$ - und die  $\beta$ -Strahlen aus kleinen Masseteilchen, aus *Korpuskeln*, bestehen.

#### 4. Fragen:

1. Woher stammt das Wort „Atom“ und welche Vorstellung hatte man damals vom Atom?
2. Warum kam man gerade in England im 18. Jahrhundert zu wesentlich neuen Erkenntnissen über den Atombegriff?
3. Wie stellte man zuerst fest, daß es die drei unterschiedlichen radioaktiven Strahlenarten gibt?

## 2. Die Radioaktivität

**1. Die Wirkungen der radioaktiven Strahlen.** Bei ihren Untersuchungen stellten *Marie* und *Pierre Curie* folgende Wirkungen der radioaktiven Strahlen fest:

1. *Radioaktive Strahlen ionisieren Gase.* Bringt man ein radioaktives Präparat zwischen die Platten eines aufgeladenen Kondensators, so sinkt die Ladung des Kondensators schneller als ohne Präparat. Die Luft ist durch die Ionisation leitend geworden.
2. *Durch die radioaktive Strahlung wird die Umgebung des Präparates erwärmt.* Die Energie der Strahlen wird in Wärmeenergie umgewandelt.
3. *Die radioaktive Strahlung schwärzt Fotoplatten.* Durch diese Wirkung hatte Becquerel die radioaktive Strahlung entdeckt.
4. *Die radioaktiven Strahlen üben eine zerstörende Wirkung auf lebende Zellen aus.* Infolge dieser biologischen Wirkungen erkrankten in der ersten Zeit nach der Entdeckung der Strahlen viele Forscher. Manche von ihnen, wie auch *Marie Curie*, starben an den Folgen dieser Erkrankungen.

**2. Die Eigenschaften und die Zusammensetzung der radioaktiven Strahlen.** Nach der Entdeckung der Wirkungen der radioaktiven Strahlen konnten nach und nach die wichtigsten Eigenschaften der Strahlen festgestellt werden. Dabei ergab sich, daß die drei Arten der Strahlen, die  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen, völlig verschiedenartig sind.

a) **Die  $\alpha$ -Strahlen.** Die *Masse eines geladenen Teilchens* läßt sich aus der Ablenkung des bewegten Teilchens in elektrischen und magnetischen Feldern bestimmen. Auf Grund entsprechender Messungen hat man festgestellt: *Ein  $\alpha$ -Teilchen hat die vierfache Masse eines Wasserstoffkerns und ist zweifach positiv geladen*. Dieselbe Masse und die gleiche Ladung hat aber auch ein doppelt positiv geladenes Heliumion.  *$\alpha$ -Teilchen sind also Heliumkerne*. Tatsächlich findet man immer in der Umgebung eines  $\alpha$ -Strahlers Heliumionen und neutrale Heliumatome, die durch Aufnahme von zwei Elektronen aus den  $\alpha$ -Teilchen entstehen. Bei Versuchen mit  $\alpha$ -Teilchen stellte man fest, daß diese bei ihrer Bewegung durch flüssige, feste und gasförmige Körper *je nach Art und Dicke des Stoffes verschieden stark gebremst werden*. Sie legen einen gewissen Weg in geradliniger Bewegung zurück und sind danach nicht mehr nachzuweisen. Die Länge dieses Weges bezeichnet man als Reichweite. So beträgt zum Beispiel die Reichweite von  $\alpha$ -Teilchen aus Uran in der Luft 2,7 cm, aus Radium 3,4 cm. In festen und flüssigen Körpern ist die Reichweite bedeutend geringer.

Die Geschwindigkeit der  $\alpha$ -Teilchen aus Uran ist etwa  $1 \dots 2 \cdot 10^8 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ . Aus der Geschwindigkeit und der Masse eines  $\alpha$ -Teilchens läßt sich seine kinetische Energie berechnen. Man erhält etwa  $10^{-12} \text{ J}$ .

Da bei kleinen Teilchen, wie den  $\alpha$ -Teilchen, die kinetische Energie selbst bei hoher Geschwindigkeit noch relativ klein ist, verwendet man zweckmäßigerweise in der Atom- und Kernphysik eine kleinere Energieeinheit als das Joule. Diese Einheit ist das **Elektronenvolt (eV)**. 1 Elektronenvolt ist die kinetische Energie eines Elektrons, das in einem elektrischen Feld bei einem Spannungsunterschied von 1 V beschleunigt wird und damit eine bestimmte Geschwindigkeit

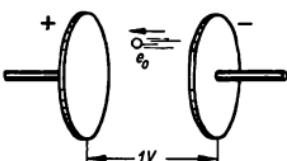


Abb. 8/1. Schematische Erläuterung der Größe 1 eV

erreicht (Abb. 8/1).  $10^6$  eV nennt man **Megaelektronenvolt (MeV)**. Das Elektronenvolt ist bedeutend kleiner als die Energieeinheiten J beziehungsweise kWh:

$$1 \text{ eV} \cong 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \cong 4,44 \cdot 10^{-28} \text{ kWh}$$

$$1 \text{ MeV} \cong 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J} \cong 4,44 \cdot 10^{-20} \text{ kWh}$$

Der Energie eines  $\alpha$ -Teilchens von  $10^{-12}$  J entspricht also 6 MeV.

b) **Die  $\beta$ -Strahlen.** Aus der Ablenkung der  $\beta$ -Strahlung konnte festgestellt werden, daß die  $\beta$ -Teilchen **Elektronen** mit großer Geschwindigkeit und damit auch mit hoher Energie sind. Da die Geschwindigkeit der Elektronen bei ein und demselben Element sehr unterschiedliche Werte hat, ist auch die Energie der  $\beta$ -Strahlen ganz verschieden groß. Sie kann bis zu 16 MeV betragen. Die  $\beta$ -Teilchen haben ein größeres Durchdringungsvermögen als die  $\alpha$ -Teilchen, da einerseits ihre Masse bedeutend geringer, andererseits ihre Energie größer ist. Auch Katodenstrahlen bestehen aus schnellen Elektronen. Man hat Entladungsrohren auf der der Katode gegenüberliegenden Seite mit mehreren kleinen Öffnungen versehen, die mit sehr dünnen Aluminiumfolien von etwa  $10 \dots 20 \mu\text{m}$  Dicke verschlossen wurden (Abb. 9/1).

Es wurde festgestellt, daß viele der von der Katode senkrecht ausgehenden Elektronen die Metallfolie ohne Ablenkung durchdringen. Diese und ähnliche Versuche führten zu ersten Vorstellungen über den Aufbau der Atome (vgl. S. 13).

c) **Die  $\gamma$ -Strahlen.** Während die  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen aus Masse-Teilchen, aus sogenannten Korpuskeln, bestehen, sind die  $\gamma$ -Strahlen **elektromagnetische Wellen** mit noch kürzeren Wellenlängen als Röntgenstrahlen. Die Wellenlängen liegen im Gebiet von  $10^{-10} \dots 10^{-9}$  cm.

Man hat festgestellt, daß die Energie einer elektromagnetischen Welle der Frequenz proportional ist (vgl. S. 17). Daher haben die  $\gamma$ -Strahlen eine größere Energie als die Lichtwellen und die Röntgenwellen. Wegen dieser verhältnismäßig großen Energie haben  $\gamma$ -Strahlen ein hohes Durchdringungsvermögen. Eine weitere Folge der großen Energie ist die schädigende Wirkung der  $\gamma$ -Strahlen. Alle Menschen, die mit  $\gamma$ -Strahlen arbeiten, müssen sich daher gegen die unmittelbare Einwirkung der Strahlen schützen. Bevor man diese Wirkung kannte, haben sich viele Forscher gesundheitliche Schäden zugezogen.

Die  $\gamma$ -Strahlen schwärzen Fotoplatten. Diese Tatsache führte bekanntlich zur Entdeckung der Radioaktivität.

### 8. Fragen und Aufgaben:

1. Berechnen Sie aus der Geschwindigkeit und der Masse eines  $\alpha$ -Teilchens ( $v = 1,5 \cdot 10^9 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ ,  $m = 6,64 \cdot 10^{-24} \text{ g}$ ) seine kinetische Energie in J und MeV!
2. Welche Geschwindigkeit hat ein Elektron, wenn seine kinetische Energie 12 MeV beträgt ( $m = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ g}$ )?
3. Welcher grundsätzliche Unterschied besteht zwischen  $\alpha$ - beziehungsweise  $\beta$ -Strahlen und  $\gamma$ -Strahlen?
4. Nennen Sie Wirkungen der radioaktiven Strahlen, bei denen man eine Energieumwandlung feststellen kann!

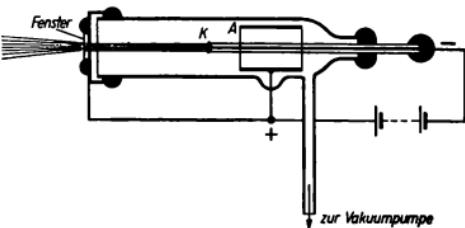


Abb. 9/1. Entladungsrohre mit Lenardfenster

### 3. Geräte zum Nachweis der radioaktiven Strahlen

Zur Beobachtung und Untersuchung der radioaktiven Strahlen und zum Schutze der Menschen vor diesen Strahlen hat man besondere Geräte entwickelt. Die wichtigsten sind das *Geiger-Müller-Zählrohr*, die *Wilsonsche Nebelkammer*, die *Diffusionsnebelkammer* und der *Szintillationszähler*. Diese Geräte beruhen unter anderem auf der ionisierenden Wirkung radioaktiver Strahlen.

**1. Die ionisierende Wirkung der radioaktiven Strahlen.** Fliegen geladene Teilchen,  $\alpha$ -Teilchen und Elektronen, durch ein Gas, so ionisieren sie *Gasmoleküle beziehungsweise Gasatome*. Ein geladenes Teilchen kann aus der Elektronenhülle eines Gasmoleküls ein oder mehrere Elektronen herausreißen. Anstelle des neutralen Gasmoleküls sind nach der Ionisation zum Beispiel ein positiv geladenes Ion und ein Elektron vorhanden. Beide Teilchen können auf ihrer weiteren Bahn ebenfalls wieder ionisieren. Ein ionisierendes Teilchen verliert bei jeder Ionisation Energie und fliegt daher immer langsamer, bis es schließlich nur noch die gleiche ungeordnete Wärmebewegung ausführt wie die anderen Gasmoleküle auch. Auf dieser Ionisation von Gasmolekülen durch geladene Teilchen beruht die Wirkungsweise verschiedener Nachweisgeräte.

$\gamma$ -Strahlen können ebenfalls ionisieren. Dabei wird ihre kinetische Energie vollständig zur Ionisierung verwendet. Das herausfliegende Elektron hat fast die gesamte Energie der  $\gamma$ -Strahlung aufgenommen und kann nun seinerseits Gasmoleküle ionisieren.

**2. Das Geiger-Müller-Zählrohr.** In der Achse eines Metallrohres ist isoliert ein Draht gespannt (Abb. 10/1). Das Rohr wird luftdicht verschlossen, ausgpumpt und mit einem Gas, beispielsweise mit Argon, gefüllt. Über einen hohen Widerstand von etwa  $10^6 \Omega$  wird eine Hochspannung zwischen Zylinder und Draht gelegt, wobei der positive Pol am Draht liegt. Zylinder und Draht bilden einen Kondensator, den man wegen seiner Form Zylinderkondensator nennt. Da das Gas im Zählrohr ein Isolator ist, fließt zunächst über den Widerstand kein Strom. Bringt man aber in die Nähe des Zählrohres ein radioaktives Element, das beispielsweise  $\beta$ -Teilchen aussendet, so dringen die Elektronen in das Zählrohr ein, wenn die Zählrohrwand genügend dünn ist. Sie ionisieren im Zählrohr Moleküle des Gases. Im elektrischen Feld zwischen Zylinder und Draht bewegen sich die Elektronen zum positiv geladenen Draht, der Anode, und die positiven Ionen zur negativ geladenen Zylinderwand, zur Kathode.

In der Nähe des Drahtes haben die Elektronen eine so hohe Geschwindigkeit, daß sie nun selbst Gasmoleküle ionisieren können. Dieser Vorgang steigert sich, so daß man von einer *Ionenlawine* sprechen kann. Infolgedessen fließt ein Strom, bis sämtliche Ladungsträger die Kathode beziehungsweise die Anode erreicht haben. Dieser kurzzeitig fließende Strom erzeugt am Widerstand einen *Spannungsstoß*, einen sogenannten *Impuls*. Jedes in das Zählrohr fliegende Teilchen verursacht einen solchen Spannungsimpuls. Die Impulse zählt man mit Hilfe elektronischer Geräte und kann dadurch die Anzahl der in das Rohr eingedrungenen Teilchen feststellen (Abb. 11/1 und 11/2).

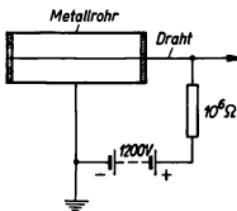


Abb. 10/1. Geiger-Müller-Zählrohr



Abb. 11/1. Zählrohr, hergestellt im VEB Vakutronik Dresden

Zum Nachweis von  $\gamma$ -Strahlen besteht die Zählrohrwand aus Elementen hoher Ordnungszahl, damit möglichst viele Photoelektronen erzeugt werden, die dann Spannungs-impulse verursachen. Geigerzähler werden heute in sehr verschiedenen Größen vielseitig eingesetzt.

Zur Kontrolle der radioaktiven Strahlung werden von den Menschen, die in Forschungsinstituten mit radioaktiven Stoffen zu tun haben, Dosimeter und andere Strahlenmeßgeräte getragen, (Abb. 11/3). Diese zeigen an, wenn die Stärke der Strahlung einen Wert erreicht, der gesundheitsschädlich ist.

**3. Die Wilsonsche Nebelkammer.** Eine zylindrische Kammer ist mit einem beweglichen Kolben verschlossen und enthält Luft oder ein anderes Gas. Bringt man eine Schale mit Wasser in diese Kammer, so verdunstet das Wasser, bis der gesamte Innenraum mit Wasserdampf gesättigt ist. Wird dann durch Herausziehen des Kolbens das Gas ausgedehnt, so muß es bei der Ausdehnung Arbeit verrichten und kühlte sich ab. Das abgekühlte Gas kann nun nicht mehr soviel Wasserdampf aufnehmen wie vorher. Es ist daher mit Wasserdampf übersättigt. Befinden sich im Gas Staubteilchen, so schlägt sich der Wasserdampf an diesen Teilchen nieder und bildet feine Wassertropfchen, ähnlich wie bei der Nebel-

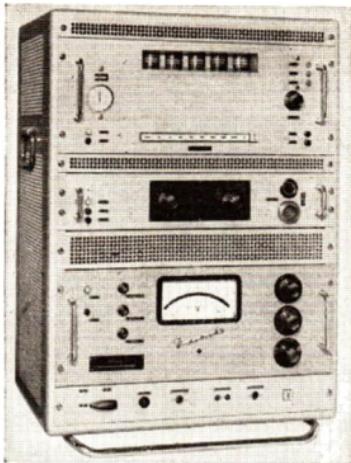


Abb. 11/2. Strahlenmeßplatz, hergestellt im VEB Vakutronik Dresden



Abb. 11/3. Dosimeter

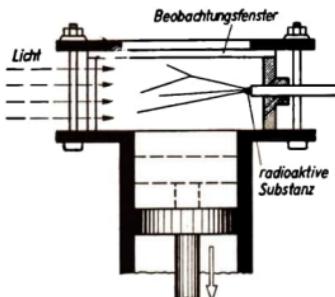


Abb. 12/1. Wilsonsche Nebelkammer

sichtbar und kann fotografiert werden. Bei einem starkstrahlenden Präparat liegen die Bahnen so dicht wie etwa die Haare eines Rasierpinsels. Mit Hilfe von *Nebelkammeraufnahmen* wurden für die Forschung entscheidende Beobachtungen gemacht. Auf einer Nebelkammeraufnahme beobachteten die Mitarbeiter *Rutherford*s die erste Kernumwandlung (vgl. S. 20).

**4. Die Diffusionsnebelkammer.** Da man mit der Nebelkammer oft Vorgänge beobachten will, die verhältnismäßig selten eintreten, sind für genaue Untersuchungen sehr viele fotografische Aufnahmen notwendig. Dies erfordert bei einer Wilsonschen Nebelkammer immer wieder eine Ausdehnung des Gases, um eine Wasserdampf-Übersättigung hervorzurufen. Vorteilhafter ist es, wenn in der Kammer ein Gebiet ständig mit Dampf übersättigt ist. Dies wird bei der *Diffusionsnebelkammer* erreicht.

Eine zylindrische Kammer ist mit Luft oder einem Gas gefüllt. Während der Kammerboden durch flüssiges Kohlendioxyd auf einer Temperatur von  $-70^{\circ}\text{C}$  gehalten wird, hat der obere Teil der Kammer Zimmertemperatur, etwa  $20^{\circ}\text{C}$ . In ihm befindet sich ein Gefäß mit Alkohol, der verdampft. Die im Gas befindliche Dampfmenge hängt von der Gastemperatur ab. Die Alkoholdampfmoleküle führen ständig eine unregelmäßige Wärmebewegung aus und gelangen dadurch auch in den unteren Teil der Kammer, sie diffundieren. Da der Alkoholdampf im oberen Teil ständig gesättigt ist, breitet er sich durch Diffusion auch nach unten aus. Im unteren Teil herrscht jedoch eine niedrigere Temperatur, so daß der Dampf dort übersättigt ist. Daher gibt es in der Diffusionsnebelkammer ein Gebiet ständiger Übersättigung, in dem die Bahnen ionisierender Teilchen durch Tröpfchenbildung sichtbar werden.

**5. Der Szintillationszähler.** Eines der ersten Nachweisgeräte für radioaktive Strahlen war der *Szintillationsschirm*. Treffen geladene Teilchen mit großer Geschwindigkeit auf eine Schicht aus Zinksulfid, so entsteht an der Stelle des Aufstreffens ein Lichtblitz. Mischt man Zinksulfid oder einen ähnlich wirkenden Stoff, einen sogenannten Phosphor, mit einer winzigen Menge eines radioaktiven Stoffes, so wird der Phosphor ständig zum Leuchten angeregt. Eine derartige Mischung benutzt man beispielsweise zur Herstellung der Leuchtziffern auf Uhren.

bildung. Man bezeichnet Teilchen, an denen Wasserdampf kondensiert, als *Kondensationskerne*.

Der englische Physiker *Wilson* beobachtete, daß auch Ionen als Kondensationskerne wirken. Bringt man ein radioaktives Präparat, das beispielsweise  $\alpha$ -Strahlen aussendet, einen  $\alpha$ -Strahler, in die Nebelkammer, so ionisieren die  $\alpha$ -Teilchen längs ihrer Bahn das Gas in der Kammer. Wird nun das Gas durch Herausziehen des Kolbens abgekühlt, so wird der Raum mit Wasserdampf übersättigt, und längs der Bahn der  $\alpha$ -Teilchen bilden sich an den Ionen feine Wasserdampftröpfchen (Abb. 12/1). Bei geeigneter Beleuchtung ist diese Tröpfchenstruktur sichtbar und kann fotografiert werden. Bei einem starkstrahlenden Präparat liegen die Bahnen so dicht wie etwa die Haare eines Rasierpinsels. Mit Hilfe von *Nebelkammeraufnahmen* wurden für die Forschung entscheidende Beobachtungen gemacht. Auf einer Nebelkammeraufnahme beobachteten die Mitarbeiter *Rutherford*s die erste Kernumwandlung (vgl. S. 20).

**4. Die Diffusionsnebelkammer.** Da man mit der Nebelkammer oft Vorgänge beobachten will, die verhältnismäßig selten eintreten, sind für genaue Untersuchungen sehr viele fotografische Aufnahmen notwendig. Dies erfordert bei einer Wilsonschen Nebelkammer immer wieder eine Ausdehnung des Gases, um eine Wasserdampf-Übersättigung hervorzurufen. Vorteilhafter ist es, wenn in der Kammer ein Gebiet ständig mit Dampf übersättigt ist. Dies wird bei der *Diffusionsnebelkammer* erreicht.

Eine zylindrische Kammer ist mit Luft oder einem Gas gefüllt. Während der Kammerboden durch flüssiges Kohlendioxyd auf einer Temperatur von  $-70^{\circ}\text{C}$  gehalten wird, hat der obere Teil der Kammer Zimmertemperatur, etwa  $20^{\circ}\text{C}$ . In ihm befindet sich ein Gefäß mit Alkohol, der verdampft. Die im Gas befindliche Dampfmenge hängt von der Gastemperatur ab. Die Alkoholdampfmoleküle führen ständig eine unregelmäßige Wärmebewegung aus und gelangen dadurch auch in den unteren Teil der Kammer, sie diffundieren. Da der Alkoholdampf im oberen Teil ständig gesättigt ist, breitet er sich durch Diffusion auch nach unten aus. Im unteren Teil herrscht jedoch eine niedrigere Temperatur, so daß der Dampf dort übersättigt ist. Daher gibt es in der Diffusionsnebelkammer ein Gebiet ständiger Übersättigung, in dem die Bahnen ionisierender Teilchen durch Tröpfchenbildung sichtbar werden.

**5. Der Szintillationszähler.** Eines der ersten Nachweisgeräte für radioaktive Strahlen war der *Szintillationsschirm*. Treffen geladene Teilchen mit großer Geschwindigkeit auf eine Schicht aus Zinksulfid, so entsteht an der Stelle des Aufstreffens ein Lichtblitz. Mischt man Zinksulfid oder einen ähnlich wirkenden Stoff, einen sogenannten Phosphor, mit einer winzigen Menge eines radioaktiven Stoffes, so wird der Phosphor ständig zum Leuchten angeregt. Eine derartige Mischung benutzt man beispielsweise zur Herstellung der Leuchtziffern auf Uhren.

Bei der Anwendung der Szintillation für den Teilchennachweis werden die Lichtblitze mit Hilfe eines Mikroskops beobachtet und gezählt. Mit einem solchen Szintillationsschirm wie bereits Rutherford die  $\alpha$ -Teilchen nach (vgl. S. 20).

Diese Methode hat aber große Nachteile. Um nämlich eine fehlerfreie Zählung zu ermöglichen, dürfen nicht mehr als ein bis zwei Teilchen je Sekunde auf den Schirm treffen. Außerdem erfordert der Teilchennachweis eine große Übung des Beobachters und wirkt auf die Dauer ermüdend. Daher verdrängten andere Methoden der Teilchenzählung diese Szintillationsmethode.

Heute benutzt man statt eines Mikroskops einen *fotoelektrischen Vervielfacher*, kurz *Fotovervielfacher* genannt. In diesem Gerät werden die Lichtblitze in elektrische Impulse umgewandelt. Die Impulse werden, ebenso wie beim Zählrohr, durch elektronische Geräte nachgewiesen und gezählt. Der *Szintillationszähler* ist in der modernen Kernphysik eines der wichtigsten Nachweisgeräte.

#### 6. Fragen und Aufgaben:

1. Welche Wirkung der radioaktiven Strahlen nutzt man in den Geräten zu ihrem Nachweis aus? Beschreiben Sie die entsprechenden Vorgänge!
2. Welchen Vorteil hat die Diffusionsnebelkammer gegenüber der Wilsonschen Nebelkammer?
3. Erläutern Sie am Beispiel des Szintillationszählers, wie man auf der Grundlage eines alten Prinzips ein modernes Gerät entwickelt hat!

### 4. Der Aufbau der Atome – Die Atommodelle

**1. Der zusammengesetzte Aufbau der Atome.** Die Erforschung der Katoden- und Röntgenstrahlen führte um die Jahrhundertwende zu völlig neuartigen Kenntnissen über die Atome.

Da man zur Erzeugung der Katodenstrahlen beliebiges Katodenmaterial benutzen kann, müssen die Elektronen offensichtlich in allen Atomen vorkommen. Diese Hypothese wurde später durch viele andere Erscheinungen bestätigt. beispielsweise durch die Vorgänge der Elektrolyse.

**Die Elektronen sind ein Bestandteil der Atome. Mithin sind die Atome nicht die kleinsten Teilchen.**

Man hat durch zahlreiche Versuche festgestellt, daß *alle vorkommenden Ladungsmengen ganze Vielfache einer kleinsten Ladung sind*; beim Auf- und Entladen eines Körpers ändert sich die Ladung nicht stetig, sondern in kleinen Portionen. Das Elektron besitzt diese kleinste, in der Natur vorkommende Ladung. Man nennt sie die **elektrische Elementarladung** ( $e$ ). Die Elementarladung wurde zuerst von Millikan im Jahre 1909 gemessen; sie ist unvorstellbar klein:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

(vgl. Aufgabe 1 auf S. 20).

Auch die **Masse des Elektrons** ( $m_e$ ) ist sehr klein. Man hat sie aus der Ablenkung der Katodenstrahlen in elektrischen und magnetischen Feldern bestimmt. Es ergab sich folgender Wert:

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ g.}$$

Diese Masse verhält sich zur Masse eines 10-Pfg.-Stückes wie diese zur Masse der Erde. Die Masse des leichtesten Atoms, des Wasserstoffatoms, ist 1837,3 mal so groß wie die eines Elektrons. Sie beträgt:

$$m_H = 1,67 \cdot 10^{-24} \text{ g.}$$

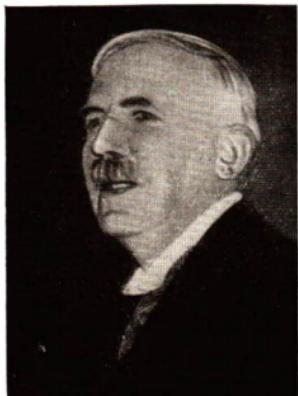
Nachdem man die Anwesenheit der Elektronen im Atom festgestellt hatte, ergab sich die Frage: Wie läßt sich die elektrische Neutralität der Atome nach außen hin erklären? Offenbar müssen die Atome außer den Elektronen noch Teilchen enthalten, die eine der Ladung der Elektronen entsprechende positive Ladung haben. Man nahm daher an, daß sich im Atom außer einer bestimmten Anzahl von Elektronen eine gleiche Anzahl einfach positiv geladener Teilchen befindet.

**2. Das Atommodell von Rutherford.** Der deutsche Physiker *Lenard* untersuchte im Jahre 1903 den Durchgang von Katodenstrahlen durch dünne Metallblättchen, sogenannte *Folien* (vgl. S. 9). Er fand, daß die meisten Elektronen eine Folie ohne Ablenkung passieren. Da ein Atom sehr klein ist, sind auch noch in der dünnsten Folie viele Atome aneinander und übereinander geschichtet. Das Elektron muß also bei seinem Durchgang durch eine Folie eine große Anzahl von Atomen passieren. Wenn nun jedes Atom eine kompakte Masse aus positiv geladenen Teilchen und Elektronen wäre, dann müßten viele Elektronen mit den Atomteilchen zusammenstoßen und dadurch ihre ursprüngliche Richtung ändern; denn die Abstände zwischen den Atomen sind verhältnismäßig gering. Da man derart viele Richtungsänderungen jedoch nicht beobachtete, folgerte man, daß im Atom selbst viel freier Raum vorhanden sein müßte. *Rutherford* benutzte in seinen Versuchen anstelle der Katodenstrahlen  $\alpha$ -Teilchen. Er fand, daß die meisten  $\alpha$ -Teilchen die Folie ohne Richtungsänderung durchdringen, daß jedoch einige um große Winkel abgelenkt werden; man sagt, sie werden gestreut.

*Rutherford* vermutete, daß die relativ wenigen abgelenkten  $\alpha$ -Teilchen von positiv geladenen Atomteilchen abgestoßen würden. Die Seltenheit dieser Ablenkung er-

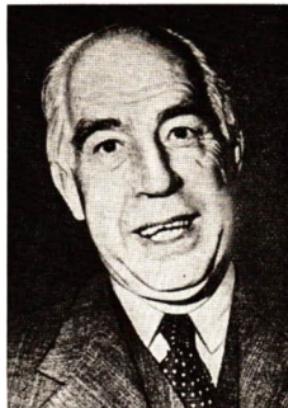
klärte er mit der Annahme, daß die positiven Teilchen in einem sehr geringen Raumteil des Atoms konzentriert sind. In den meisten Fällen durchqueren die  $\alpha$ -Teilchen die Atome, ohne in unmittelbare Nähe des positiven Abstoßungszentrums, des sogenannten Kerns, zu kommen.

Die Durchmesser der Atomkerne lassen sich aus den Versuchen *Rutherford*s bestimmen und sind etwa  $10^{-13}$  cm groß. Dagegen betragen die Durchmesser der Atome  $10^{-8}$  bis  $10^{-9}$  cm, sie sind also etwa 100 000 mal so groß. Die Größenverhältnisse zwischen Atom und Atomkern kann man sich angenähert durch Vergleiche anschaulich machen. Vergleicht man den Atomkern mit einem Fußball von 22 cm Durchmesser, dann hat das Atom einen Durchmesser von etwa 22 km (vgl. Aufgabe 3 auf S. 20). Befindet sich der Atomkern, der Fußball, in der Mitte zwischen Erfurt und Weimar, so gehen die Elektronenbahnen durch die genannten Städte.



Ernest Rutherford (1871 bis 1937)

Rutherford faßte seine Erkenntnis in einer Modellvorstellung zusammen, die man das Rutherford'sche Atommodell nennt. Solche Modellvorstellungen sollen physikalische Erkenntnisse verständlich und anschaulich machen, können aber die Wirklichkeit meist nur teilweise wiedergeben. Sie müssen stets unter bestimmten Einschränkungen verstanden werden. Rutherford nahm als *Gestalt des Atoms die Kugel* an, da sie der einfachste Körper ist. Die positiven Teilchen bilden den Atomkern, der sich im Mittelpunkt der Atomkugel befindet und fast die gesamte Masse des Atoms in sich vereinigt. Da die Elektronen negativ geladen sind und daher vom Atomkern angezogen werden, müssen sie sich um den Kern bewegen, ähnlich wie die Planeten um die Sonne; denn sonst müßten sie in den Kern stürzen. Dieser Vergleich mit dem Planetensystem gibt aber, wie die ganze Modellvorstellung, nur einen Teil der Erkenntnisse wieder. So sind zum Beispiel die Anziehungskräfte in beiden Fällen völlig verschieden; die Bewegung der Himmelskörper wird durch die Gravitationskraft, die der Elektronen im Atom durch die Anziehungskraft zwischen verschiedenen elektrischen Ladungen bestimmt.



Niels Bohr (geb. 1885)

**3. Das Bohrsche Atommodell.** Mit dem Fortschreiten der Erkenntnisse führte das Rutherford'sche Atommodell zu Widersprüchen zwischen den theoretischen Überlegungen und den praktischen Versuchsergebnissen. Die Erforschung der Spektren glühender Elemente im gasförmigen Zustand ergab, daß jedes Element Lichtwellen bestimmter Wellenlängen aussendet. Die Spektren bestehen infolgedessen aus einzelnen Linien, den sogenannten *Spektrallinien*. Der dänische Physiker Niels Bohr legte 1912 dar, daß jene für die einzelnen Elemente charakteristischen Spektrallinien ihre Ursache in den Bewegungen der Elektronen um den Atomkern haben. Nach Bohr kreisen die Elektronen nicht auf beliebigen Bahnen, sondern nur auf ganz bestimmten (vgl. Abb. 17/1). Diese Elektronenbahnen nennt man auch *Schalen*. Ihre Durchmesser lassen sich auf Grund bestimmter Bedingungen berechnen. Man bezeichnet diese Schalen von innen nach außen als *K-, L, M, ..., Q-Schale* (vgl. Abb. 19/1).

Da jede Lichtaussendung mit einer Energieabgabe verbunden ist, müßten sich die Elektronen infolgedessen immer mehr dem Kern nähern und sich schließlich mit ihm vereinigen. Das steht aber im völligen Widerspruch zu den bekannten Tatsachen. Diesen und andere Widersprüche zwischen dem Rutherford'schen Atommodell und den Versuchsergebnissen löste Bohr dadurch, daß er ein *Atommodell mit gewissen Bedingungen für die Bahnen der Elektronen* aufstellte. Bohr benutzte dabei aber die Grunderkenntnisse Rutherford's. Neuartig sind die folgenden Annahmen, mit denen Bohr die Entstehung der Linienspektren erklärte (Abb. 16/1):

1. *Die Elektronen bewegen sich im Atom auf bestimmten kreisförmigen Bahnen um den Kern.* Dabei werden keine elektromagnetischen Wellen, also auch keine Lichtwellen, ausgesandt.
2. *Jedes Elektron hat je nach seiner Bahn, auf der es sich bewegt, eine bestimmte Energie* ( $E_1, E_2, E_3$ ). Diese ist um so größer, je größer der Bahnradius ist.

3. Unter bestimmten Bedingungen springen Elektronen von einer Bahn auf eine andere. Dabei wird beim Sprung eines Elektrons von einer Bahn mit höherer Energie, das heißt mit größerem Radius, auf eine Bahn mit niedrigerer Energie, das heißt mit kleinerem Radius, eine elektromagnetische Welle ausgesandt (Abb. 16/2). Auch der umgekehrte Übergang ist möglich, er ist die Folge einer Energieaufnahme, beispielsweise durch die Absorption einer elektromagnetischen Welle.

4. Die ausgesandten oder absorbierten elektromagnetischen Wellen haben ganz bestimmte Wellenlängen beziehungsweise Frequenzen. Die Frequenz  $\nu$  einer solchen Welle ist der Energiedifferenz der Bahnen, zwischen denen der Elektronenübergang erfolgte, proportional:

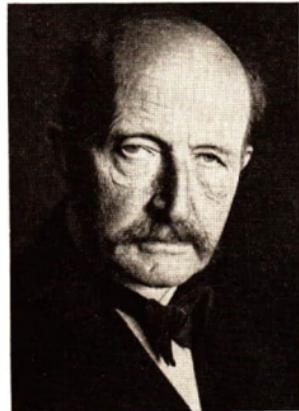
$$\nu \sim E_2 - E_1.$$

Den Proportionalitätsfaktor  $h$  für diese Beziehung fand im Jahre 1900 der deutsche Physiker *Max Planck*.  $h$  ist eine Konstante, die als **Plancksches Wirkungsquantum** bezeichnet wird. Unter Verwendung von  $h$  wird aus der obenstehenden Proportion die Gleichung:

$$E_1 - E_2 = h \cdot \nu.$$

Nach dieser Gleichung hat eine elektromagnetische Welle mit der Frequenz  $\nu$  eine Energie von  $E = h \cdot \nu$ .

Zahlreiche Forschungsergebnisse haben bewiesen, daß mit Hilfe der rein theoretischen Bohrschen Annahmen viele Einzelheiten des Atombaus, der Spektren der Atome und der chemischen Eigenschaften der Elemente erklärt werden können. Aber auch dieses Atommodell und eine später erweiterte Form reichen zur Erklärung neuester Forschungsergebnisse nicht mehr aus. Wiederum treten Widersprüche zwischen Atommodellen beziehungsweise Hypothesen und den Versuchsergebnissen auf. Mit neuartigen Atommodellen versucht man auch diese Widersprüche zu lösen und neue Beobachtungen zu erklären. Zur Erklärung grundlegender Erkenntnisse über den Bau der Atome ist das *Bohrsche Atommodell* auch heute noch geeignet. Die Forschung hat aber ergeben, daß manche Erscheinungen



Max Planck (1858 bis 1947)

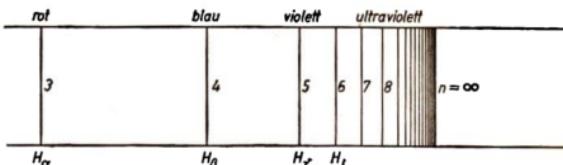


Abb. 16/1. Atomlinienspektrum

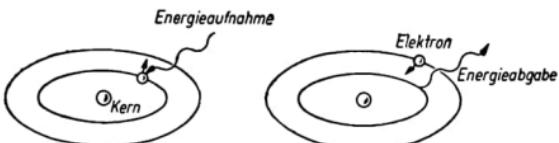


Abb. 16/2. Bei einem Elektronensprung wird eine elektromagnetische Welle ausgesandt, beziehungsweise absorbiert

im Atom nur mit Hilfe sehr komplizierter mathematischer Gleichungen beschrieben werden können.

**4. Das Wasserstoffatom und sein Spektrum.** Das Wasserstoffatom ist am einfachsten aufgebaut. Es besteht nur aus einem positiv geladenen Kernteilchen, einem Proton, und einem Elektron, das um das Proton kreist. Der kleinstmögliche Bahnradius dieses Elektrons beträgt nach dem Bohrschen Atommodell

$$r_0 = 0,53 \cdot 10^{-8} \text{ cm.}$$

In diesem Zustand kann das H-Atom keine elektromagnetische Strahlung aussenden, da es keine Elektronenbahn gibt, die dem Kern noch näher ist. Man sagt, das H-Atom befindet sich im *Grundzustand*, wenn das Elektron auf der kernnächsten Bahn kreist. Das Wasserstoffatom kann elektromagnetische Wellen nur dann aussenden, wenn sich das Elektron auf einer zweiten oder auf einer höheren, das heißt, weiter vom Kern entfernten Bahn bewegt (Abb. 17/1).

Man sagt in diesem Falle, das H-Atom befindet sich in *angeregtem Zustand*. Dazu muß dem Atom ein gewisser Energiebetrag zugefügt werden, der mindestens dem Energieunterschied zwischen der ersten und der zweiten Elektronenbahn entspricht. Danach kann das Atom unter Aussendung einer Lichtwelle beziehungsweise einer nicht sichtbaren elektromagnetischen Welle wieder in den Grundzustand zurückgehen. Die Frequenz dieser Welle ergibt sich im einfachsten Falle aus der Beziehung  $h \cdot v = E_2 - E_1$ . Ein H-Atom kann zum Beispiel bei Gasentladungen durch den Zusammenstoß mit Elektronen in einen angeregten Zustand übergehen. Beim Zusammenstoß übertragen die Elektronen den Atomen einen Teil ihrer kinetischen Energie; dadurch werden die Atome angeregt.

Entsprechend der Beziehung  $h \cdot v = E_2 - E_1$  werden beispielsweise beim Übergang eines Elektrons im Wasserstoffatom

- von der 3. zur 2. Bahn eine Lichtwelle der Frequenz  $v_1 = 457,1 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ ,
- von der 4. zur 2. Bahn eine Lichtwelle der Frequenz  $v_2 = 617,2 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ ,
- von der 5. zur 2. Bahn eine Lichtwelle der Frequenz  $v_3 = 691,2 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$

ausgesandt. Man erkennt aus der Größe dieser Frequenzen die Beziehung  $v \sim E_2 - E_1$ : Je größer die Energiedifferenz ist, desto höher ist die Frequenz. Alle drei Spektrallinien, die den obengenannten Frequenzen entsprechen, liegen im sichtbaren Gebiet des Spektrums, und zwar die erste im roten, die beiden anderen Linien im blauen Teil des Spektrums. Alle Spektrallinien, bei denen der Endzustand der Elektronen nach dem Sprung gleich ist, faßt man zu einer *Serie* zusammen. Entsprechend anderen gemeinsamen Endzuständen gibt es für jedes Element solche Serien von Spektrallinien. Übergänge auf die 1. Bahn und damit zum Grundzustand haben wegen der höheren Energiedifferenz Spektrallinien im ultravioletten Gebiet zur Folge. Andere Übergänge ergeben Spektrallinien im ultravioletten Gebiet des Spektrums.

Zur Veranschaulichung dieser Beziehung wendet man, wie oft in den Naturwissenschaften, die graphische Darstellung an. Jeder Energiewert, der einem kreisenden

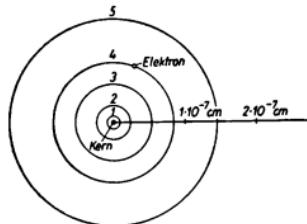


Abb. 17/1. Bohrsches Modell eines Wasserstoffatoms

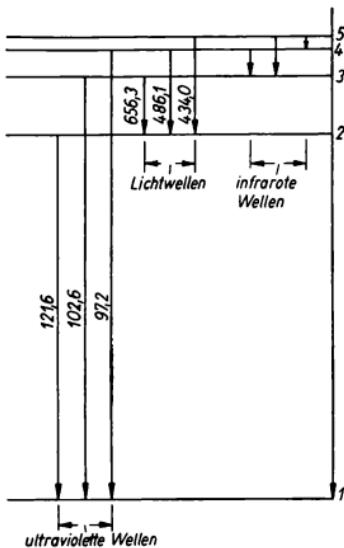


Abb. 18/1. Energieniveauschema des Wasserstoffatoms mit eingeziehenen Serien von Spektrallinien

Elektron in einem bestimmten Atom zukommt, wird durch eine horizontale Gerade dargestellt. Die Energiewerte bezeichnet man auch als *Energieniveaus*. Bei der graphischen Darstellung zieht man zuerst eine horizontale Linie und nimmt diese als *Grundniveau* an. Diesem Niveau entspricht die Energie eines Elektrons auf der kernnächsten Bahn, wenn sich das Atom also im Grundzustand befindet (Abb. 18/1). Oberhalb der ersten horizontalen Geraden zeichnet man weitere horizontale Geraden ein, die den *Energieniveaus auf den höheren Bahnen* entsprechen. Die Abstände werden maßstäblich entsprechend dem Energieunterschied zum Grundniveau gewählt. Mit vertikalen Linien, die zwei Niveaus verbinden, wird ein Elektronensprung angedeutet. Jeder solchen Linie entspricht dann auch eine Spektrallinie.

**5. Elektronenhülle und Spektren der übrigen Atome.** Aus dem Chemieunterricht ist bekannt, daß die Atome der anderen chemischen Elemente komplizierter als das Wasserstoffatom aufgebaut sind. Sie haben mehrere Elektronen, die sich auf verschiedenen Bahnen um den Kern bewegen. Die Bahnen sind gegeneinander geneigt. Bahnen mit annähernd gleichem Durchmesser faßt man zu einer Schale zusammen.

Aus der Ablenkung von  $\alpha$ -Teilchen beim Durchgang durch Folien fand man unter anderem eine Gesetzmäßigkeit über die Ladung der Atomkerne. Danach ist die *Anzahl der positiven Elementarladungen eines Atomkerns*, die sogenannte *Kernladungszahl*  $Z$  gleich der *Ordnungszahl*  $N$  des betreffenden Elements im Periodensystem. Wegen der elektrischen Neutralität der Atome muß aber auch die Anzahl der Elektronen gleich der Kernladungszahl sein. Daher gilt die wichtige Beziehung:

$$\text{Ordnungszahl} = \text{Kernladungszahl} = \text{Elektronenzahl}.$$

Außer seiner Bewegung um den Kern hat aber jedes Elektron noch verschiedene andere Eigenschaften, durch die es sich von anderen Elektronen unterscheidet. Man fand, daß niemals zwei Elektronen in allen Eigenschaften übereinstimmen. Sie unterscheiden sich wenigstens durch eine Eigenschaft. Aus dieser Tatsache erklärt sich die höchstmögliche Anzahl der Elektronen in den einzelnen Schalen, die schon aus dem Chemieunterricht bekannt ist. Numeriert man die Schalen von innen nach außen mit 1, 2, ...,  $n$  so ist die Anzahl der Elektronen  $2 \cdot 1^2, 2 \cdot 2^2, \dots, 2 \cdot n^2$  (Abb. 19/1).

Aus dem Periodensystem ist bekannt, daß diese Gesetzmäßigkeit nur bis zur 4. Schale, der N-Schale, festzustellen ist; die Atome der heute bekannten Elemente haben nicht so viele Elektronen, daß die 5. Schale voll besetzt werden kann.

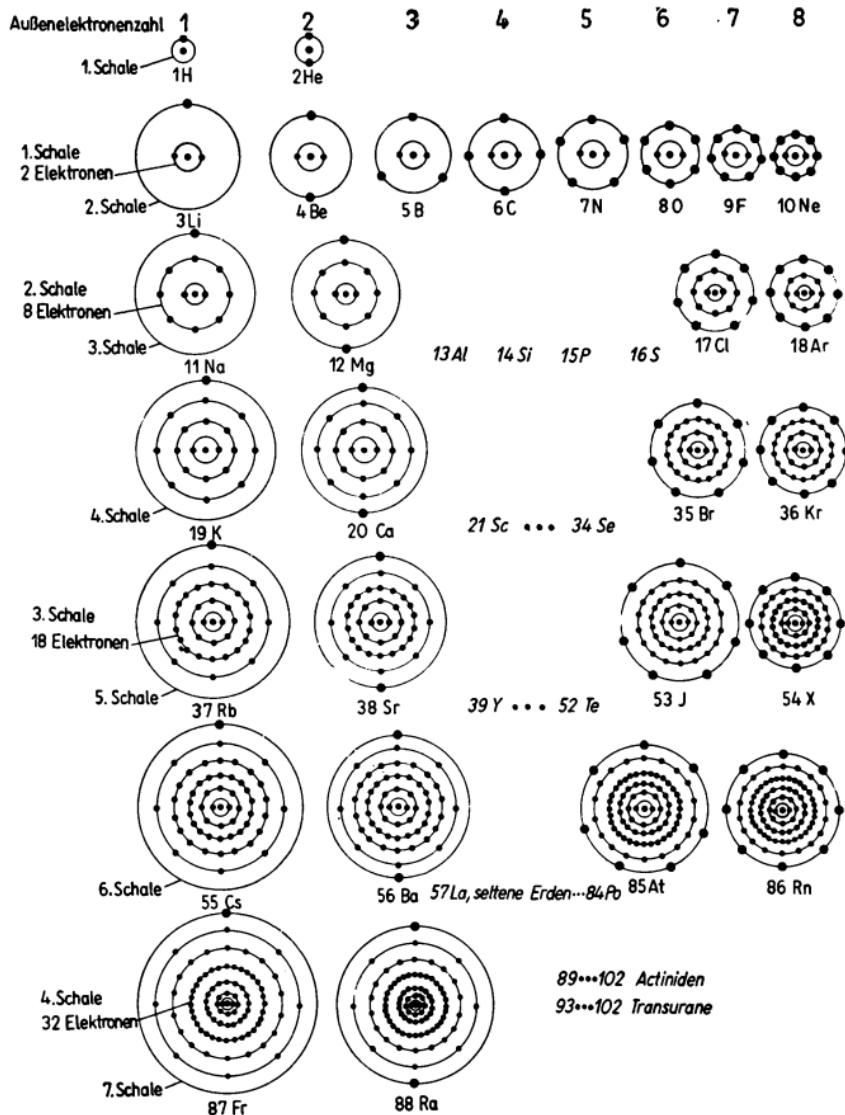


Abb. 19/1. Schalenaufbau der Atome

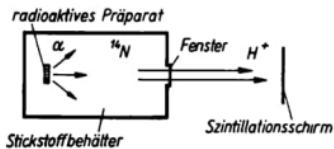
## 6. Fragen und Aufgaben:

1. Die Ladung einer Taschenlampenbatterie beträgt 3600 C. Wieviel Elektronen haben zusammen die gleiche Ladung?
  2. Wodurch unterscheidet sich das Bohrsche Atommodell vom Rutherford'schen?
  3. Bilden Sie einen anschaulichen Vergleich für die Größenverhältnisse zwischen Atomkern und Atom in der Größenordnung des Klassenzimmers!
  4. Erklären Sie mit Hilfe des Bohrschen Atommodells die Entstehung eines Linienspektrums! Warum faßt man bestimmte Spektrallinien zu einer Serie zusammen?
  5. Aus welchen Angaben kann man die Anzahl der Elektronen eines neutralen Atoms und die Ladung des Atomkerns bestimmen? Nennen Sie Beispiele aus dem Periodensystem!

## 5. Der Bau der Atomkerne – Die Isotope

**1. Die Protonen.** Die ersten Erkenntnisse über den Aufbau der Atomkerne gewann Rutherford im Jahre 1919 auf Grund des folgenden Versuchs. Er ließ  $\alpha$ -Teilchen, die von Radon ausgestrahlt wurden, durch Stickstoff hindurchgehen (Abb. 20/1). Rutherford beobachtete, daß aus dem Stickstoffbehälter durch ein Fenster aus Strahlen austraten, die noch in 40 cm Entfernung vom radioaktiven Präparat einen Szintillationschirm zum Leuchten brachten. Diese Szintillationen konnten aber nicht durch die  $\alpha$ -Teilchen des Radon ausgelöst worden sein, da deren Reichweite nur etwa 6,3 cm beträgt.

Die Aufnahmen der Spuren der  $\alpha$ -Teilchen in einer mit Stickstoff gefüllten Wilsonschen Nebelkammer zeigten die geradlinigen dikken Spuren der  $\alpha$ -Teilchen, die nach einer für alle Teilchen fast gleichen Strecke in der Gasfüllung endeten (Abb. 20/1). Lediglich am



### Abb. 20/1 Der Versuch von Rutherford

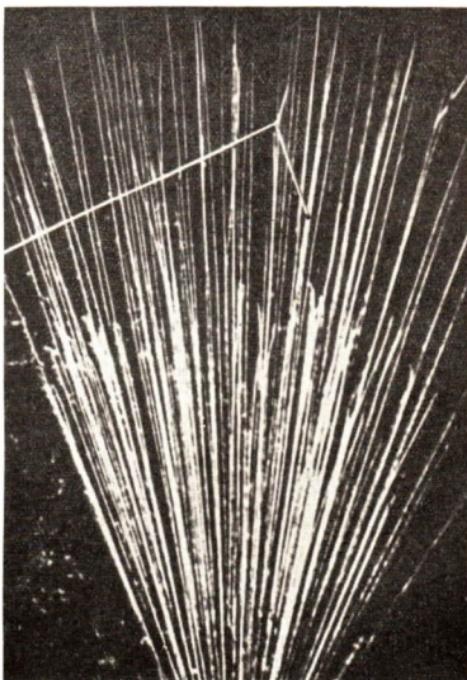


Abb. 20/2. Nebelkammer-aufnahme der ersten Kernreaktion

Ende der Bahn traten manchmal Änderungen in der Flugrichtung auf, die eine Ablenkung der doppelt positiv geladenen  $\alpha$ -Teilchen infolge eines kurzzeitigen Zusammenstoßes mit einem Stickstoffkern anzeigen. Unter Tausenden von Aufnahmen waren jedoch auch einige, auf denen eine Gabelung der Nebelspur zu sehen war. Unter verschiedenen Winkeln zur ursprünglichen Bahn des  $\alpha$ -Teilchens ließen von einem Punkt dieser Bahn zwei verschiedene geradlinige Spuren aus; die ursprüngliche Bahn gabelte sich in zwei Äste. Der eine Ast war kurz und dick wie eine Spur schwerer Teilchen; der andere war stärker als die Spur eines Elektrons, gegenüber der Spur des  $\alpha$ -Teilchens aber relativ dünn und sehr lang. Durch weitere Versuche in elektrischen und magnetischen Feldern konnte man die Masse und die Ladung dieses Teilchens bestimmen. Es hatte vermutlich die Lichtblitze auf dem Schirm verursacht. Man fand, daß es sich um den leichtesten Atomkern, den Wasserstoffkern, handelte. Man bezeichnetet ihn als **Proton** und gibt ihm das Symbol  $p$ .

Die Masse des Protons beträgt etwa  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-24}$  g. Sie ist 1886,8 mal so groß wie die des Elektrons. Das Proton hat eine positive Elementarladung ( $+e$ ).

Rutherford deutete das Ergebnis dieser Versuche folgendermaßen: Die  $\alpha$ -Teilchen haben eine hohe Geschwindigkeit und damit eine große kinetische Energie. Diese Energie ist so groß, daß ein  $\alpha$ -Teilchen trotz der abstoßenden Kräfte zwischen ihm und dem positiv geladenen Kern in einen Bereich eindringen kann, in dem andersartige Kraftwirkungen auftreten als in der weiteren Umgebung des Kerns. Wie überall in der Natur führt auch hier eine quantitative Änderung, nämlich die Änderung des Abstandes vom Kern, zu einer qualitativen Änderung, zur Änderung der Kraftwirkung. Statt abgestoßen zu werden, wird das Teilchen jetzt vom Kern aufgenommen; man sagt, *es wird vom Kern eingefangen*. Der dadurch neugebildete Kern zerfällt in dem erwähnten Beispiel in außerordentlich kurzer Zeit unter Aussendung eines Protons, das die lange dünne Spur verursacht. Es entsteht wiederum ein neuer Kern, der in der Nebelkammer die kurze dicke Spur hinterläßt. Den gesamten Vorgang bezeichnet man als **Kernreaktion** (vgl. S. 34). Durch solche Kernreaktionen gelang es, auch aus anderen Kernen leichter Elemente Protonen frei zu machen. Daraus folgerte man:

Alle Atomkerne enthalten Protonen.

Zu der Erkenntnis, daß das Atom nicht unteilbar ist, kam nun die neue Feststellung, daß auch *der Atomkern teilbar ist* und sich aus einzelnen Teilchen zusammensetzt.

**2. Die Entdeckung des Neutrons.** Wenn im Atomkern Teilchen mit gleichartigen Ladungen vorhanden sind, müssen sich diese Teilchen nach den bisherigen Kenntnissen abstoßen. Andererseits halten aber die Atomkerne der nicht radioaktiven Stoffe fest zusammen. Infolge dieses Widerspruchs ergab sich die Frage: wodurch halten die Atomkerne trotz gleichartig geladener Teilchen so außerordentlich fest zusammen? Man vermutete, daß die Atomkerne nicht nur aus Protonen zusammengesetzt sein können.

*Irène und Frédéric Joliot-Curie* untersuchten das Verhalten von Atomen beim Beschuß mit  $\alpha$ -Teilchen. Sie ließen  $\alpha$ -Strahlen aus Polonium auf ein Beryllium-Präparat fallen. Dabei ergab sich, daß außer einer bei diesem Prozeß schon bekannten  $\gamma$ -Strahlung noch weitere, besonders intensive Strahlen ausgesandt wurden; die ionisierende Wirkung der Gesamtstrahlung war nämlich größer als es bisher bekannt war. Die neuen Strahlen unterschieden sich von den  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen hauptsächlich

durch ihr hohes Durchdringungsvermögen. Sie gingen zum Beispiel durch Bleischichten hindurch, welche die  $\alpha$ -Strahlen und  $\beta$ -Strahlen vollständig absorbierten. Da man die neuen Strahlen im Magnetfeld nicht ablenken konnte, hielt man sie zunächst für  $\gamma$ -Strahlen sehr kurzer Wellenlänge, also mit hoher Energie. Diese Annahme war aber nicht mit den weiteren Versuchsergebnissen in Einklang zu bringen, die man mit den Strahlen gewann. So lösten sie beispielsweise aus Paraffin Protonen aus, was durch  $\gamma$ -Strahlen nicht möglich sein konnte.

Der englische Physiker *Chadwick* wies 1932 auf Grund von Berechnungen nach, daß die unbekannte Strahlung aus jenen ungeladenen Teilchen besteht, nach denen bereits *Rutherford* im Jahre 1920 vergeblich gesucht hatte. Man nennt diese Teilchen **Neutronen**, ihr Symbol ist  $n$ .

**Das Neutron ist ungeladen und hat die Masse  $m_n = 1,67 \cdot 10^{-24}$  g. Seine Masse ist etwa 0,15 Prozent größer als die des Protons.**

Auf Grund der Versuche *Rutherford*s und des Ehepaars *Joliot-Curie* stellten *Iwanenko* und *Heisenberg* 1932 unabhängig voneinander die Hypothese auf, daß die Atomkerne aus Neutronen und Protonen zusammengesetzt sind. Heute steht fest:

**Neutronen und Protonen sind die Bausteine der Atomkerne (Abb. 22/1).**

Für beide Teilchen verwendet man auch die Bezeichnung **Nukleonen**.

**3. Allgemeine Eigenschaften des Atomkerns.** Zu den wichtigsten Eigenschaften eines Atomkerns gehören seine **Masse** und seine **Ladung**. Die Kernladung wird bekanntlich durch die Anzahl der Protonen bestimmt, die der Kern enthält. Die Protonenzahl im Kern heißt Kernladungszahl ( $Z$ ). **Die Kernladung ist daher das Produkt aus der Elementarladung e und der Kernladungszahl Z.**

Die Masse des Kerns wird durch die Anzahl der Nukleonen bestimmt. Sie wird meistens nicht in Gramm, sondern in **physikalischen Masseneinheiten (ME)** angegeben.

**Eine physikalische Masseneinheit ist gleich  $\frac{1}{16}$  der Masse des Sauerstoffatoms, dessen Kern aus 8 Protonen und 8 Neutronen besteht.**

$$1 \text{ ME} \cong 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g.}$$

Eine Masseneinheit ist also etwas geringer als die Masse eines Protons beziehungsweise eines Neutrons:

$$m_n = 1,00898 \text{ ME} \quad \text{und} \quad m_p = 1,00759 \text{ ME.}$$

Die Massen einiger anderer Kerne sind in der Tabelle auf S. 23 zusammengestellt. **Atommassen und Atomkernmassen unterscheiden sich um die Masse der Elektronen.**

**Die auf eine ganze Zahl abgerundete Kernmasse bezeichnet man als Massenzahl  $A$  des Kerns. Sie ist gleich der Anzahl der Nukleonen.**

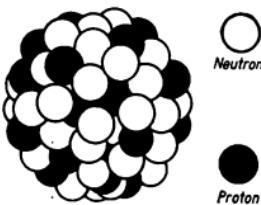


Abb. 22/1  
Modell eines Atomkerns

### Charakteristische Größen einiger Atomkerne

Kern (Teilchen)	Symbol	Massen- zahl	Protonenzahl (Kernladungs- zahl)	Neu- tronen- zahl	Kernmasse bzw. Teilchenmasse	Schreib- weise
Neutron ...	n	1	0	1	1,00899	$n_0^1$
Proton ....	p	1	1	0	1,00814	$p_1^1$
Helium ....	He	4	2	2	4,00278	$He_2^4$
Stickstoff ...	N	14	7	7	14,00368	$N_7^{14}$
Sauerstoff ...	O	16	8	8	15,99561	$O_8^{16}$
Natrium ...	Na	23	11	12	22,99110	$Na_{11}^{23}$
Jod ....	J	127	53	74	126,9157	$J_{53}^{127}$
Uran ....	U	238	92	146	238,125	$U_{92}^{238}$

**Die Massenzahl  $A$  ist die Summe der Neutronen- und Protonenzahl. Die Differenz zwischen der Massenzahl  $A$  und der Kernladungszahl  $Z$  ist die Neutronenzahl  $N$ .**

$$A = N + Z, \quad N = A - Z.$$

Die beiden Werte  $A$  und  $Z$  charakterisieren den Aufbau eines Kerns (vgl. die obenstehende Tabelle).

Da sich über die äußere Gestalt der Kerne nur wenige Aussagen machen lassen, nimmt man für sie die Gestalt an, aus der sich die geringsten Folgerungen ergeben: die Kugel. Die Kugel ist der einfachste und regelmäßigste Körper. Bei jeder anderen Gestalt würden sich sofort Folgerungen ergeben, die man z. Zt. noch nicht genügend überprüfen kann. Der Radius der Kerne hängt von der Massenzahl  $A$  ab. Je größer  $A$  ist, um so größer ist auch der Kernradius. Der einfachste Kern, das Proton, hat einen Radius von  $r_p = 1,3 \cdot 10^{-13}$  cm. Der Radius des  $U^{238}$ -Kerns mit 238 Nukleonen beträgt  $r_U = 8 \cdot 10^{-13}$  cm.

Da der Atomkern auf engstem Raum fast die ganze Masse des Atoms enthält, ist seine Dichte sehr groß. Die mittlere Dichte der Atomkerne hat den unvorstellbar hohen Wert von  $2 \cdot 10^{14} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ , (siehe Aufgabe 5 auf S. 25).

**4. Die Isotope.** Nach unseren bisherigen Erkenntnissen müßten die Massen der Atome nahezu ganzzahlige Werte sein. Die „Atomgewichte“ der chemischen Elemente weichen aber meist erheblich von ganzen Zahlen ab. Die Atomkerne eines Elementes haben nämlich *nicht alle die gleiche Anzahl von Neutronen*, sondern stimmen nur in der Anzahl der Protonen überein. So gibt es zum Beispiel Eisenatome mit 29 Neutronen, aber auch solche mit 28 und 30 Neutronen. Man nennt solche Atome des gleichen Elementes, die sich nur durch ihre Neutronenzahl unterscheiden, **Isotope**. Isotope sind Elemente, die auf Grund gleicher Protonenzahl beziehungsweise Kernladungszahl an derselben Stelle des periodischen Systems stehen. Sie haben verschiedene physikalische Eigenschaften, verhalten sich aber chemisch gleichartig.

**Isotope sind Elemente mit Kernen gleicher Protonenzahl, aber verschiedener Neutronenzahl. Sie unterscheiden sich in ihren chemischen Eigenschaften nicht.**

Mehr als ein Drittel aller in der Natur vorkommenden Elemente sind Gemische aus verschiedenen Isotopen mit einem bestimmten Mischungsverhältnis. Chlor zum Beispiel besteht aus zwei Isotopen mit den Massenzahlen 35 und 37, die in einem Häufigkeitsverhältnis von ungefähr 3 : 1 stehen. Für Chlor ergibt sich daher ein Atomgewicht von 35,457. Von Zinn sind sogar 10 Isotope bekannt.

Weil es sich bei den meisten Elementen um Isotopen-gemische handelt, führt die Bestimmung der Atomgewichte auf chemischem Wege zu großen Abweichungen von ganzen Zahlen. Die Atomgewichte hängen davon ab, mit welcher relativen Häufigkeit die verschiedenen Isotope eines Elements in dem Gemisch enthalten sind.

Auch der Wasserstoff hat 3 Isotope:  $H^1$ ,  $H_2^1$  und  $H_3^1$  (Abb. 24/1). In der Natur kommt in der Hauptsache der leichte Wasserstoff ( $H_1^1$ ) vor. In sehr geringen Mengen findet man schweren Wasserstoff ( $H_2^1$ ). Man bezeichnet ihn auch als Deuterium (D). In dem natürlichen Wasser ( $H_2O$ ) sind stets geringe Mengen des sogenannten schweren Wassers ( $D_2O$ ) enthalten. Beide Arten lassen sich durch Elektrolyse trennen. Aus 5000 l Wasser kann man etwa 1 l schweres Wasser gewinnen. Schweres Wasser hat andere physikalische Eigenschaften, beispielsweise einen höheren Gefrierpunkt ( $3,8^\circ C$ ) und einen höheren Siedepunkt ( $101,0^\circ C$ ). Es gibt noch ein drittes Wasserstoffisotop ( $H_3^1$ ), das man als Tritium (T) bezeichnet. In geringen Spuren kommt es in der Erdatmosphäre vor. Die Kerne der schweren und überschweren Wasserstoffatome bezeichnet man als Deuteronen und Tritonen.

Alle Isotope lassen sich trennen. Zur Isotopentrennung gibt es verschiedene Verfahren, die auf den unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Isotope beruhen. Das älteste und bekannteste Gerät zur Isotopentrennung ist der Massenspektrograph, der bereits 1919 von dem englischen Physiker Aston entwickelt wurde (Abb. 24/2). Dieses Gerät beruht auf der Tatsache, daß bewegte Teilchen gleicher Ladung aber unterschiedlicher Masse in elektrischen und magnetischen Feldern verschieden stark abgelenkt werden. Aus einem starken Ionenstrom des zu untersuchenden Isotopengemisches wird durch ein Blendensystem ein schmaler Strahl ausgesondert. Die Ionen treten in das elektrische Feld eines Kondensators und werden beschleunigt. Dabei wird der Strahl aus seiner ursprünglichen Richtung parabelförmig abgelenkt. Bei Teilchen gleicher Masse hängt die Größe der Ablenkung von der Länge des Weges der Ionen im Feld, von der Stärke des Feldes und der

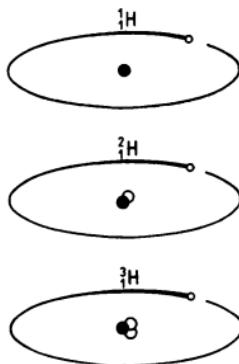


Abb. 24/1. Die Isotope des Wasserstoffs

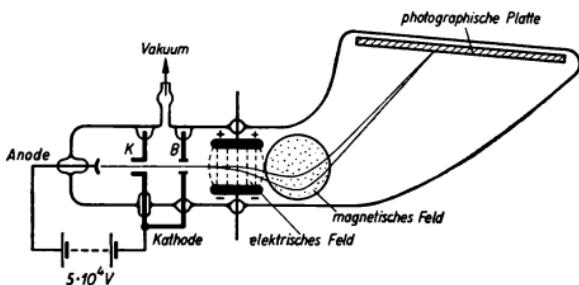


Abb. 24/2. Schema des Massenspektrographen

**Geschwindigkeit der Ionen ab.** Teilchen mit hoher Geschwindigkeit werden weniger stark abgelenkt als Teilchen mit niedriger Geschwindigkeit. Nach Passieren des elektrischen Feldes tritt der ausgesonderte Strahl in ein Magnetfeld ein. Die Feldlinien des Magnetfeldes stehen senkrecht auf den Feldlinien des elektrischen Feldes und bewirken eine fächerförmige Aufspaltung der Bahnen. An der Austrittsstelle des Strahls aus den Feldern befindet sich eine Fotoplatte. Besteht nun der Strahl aus Teilchen unterschiedlicher Masse, dann kann man durch eine geeignete Abmessung und Anordnung der Felder und der Fotoplatte erreichen, daß Ionen unterschiedlicher Geschwindigkeit aber gleicher Masse auf den gleichen Punkt der Fotoplatte auftreffen. Man erhält Aufnahmen, die mit den optischen Linienspektren vergleichbar sind.

Sowohl radioaktive als auch stabile Isotope werden in Wissenschaft und Technik häufig angewendet. Dazu braucht man sie unvermischt oder wenigstens in einem Mischungsverhältnis, das man gegenüber dem natürlichen Verhältnis als *angereichert* bezeichnet. Außerdem müssen die Isotope in genügender Menge zur Verfügung stehen. Der Massenspektrograph liefert zwar Isotope in reinster Form, aber nicht in genügender Menge. Man erhält mit ihm nur geringe Mengen, zum Beispiel einige Zehntel Gramm je Stunde. Da man aber größere Mengen von Isotopen in kurzer Zeit benötigt, hat man zahlreiche andere Methoden der Isotopen-trennung ausgearbeitet. Professor *Gustav Hertz*, Nobel- und Leninpreisträger, hat eine Diffusionsmethode entwickelt, die bei gasförmigen Isotopen angewendet wird.

Diese Diffusionsmethode beruht darauf, daß leichte Gase durch geeignete Filter schneller diffundieren als schwere Gase. Durch Hintereinandersetzen sehr vieler Diffusionsstufen kann man zum Beispiel aus dem Isotopengemisch Uran der Verbindung Uranhexafluorid ( $UF_6$ ) die Isotope  $U^{235}$  und  $U^{238}$  gewinnen (Abb. 25/1).

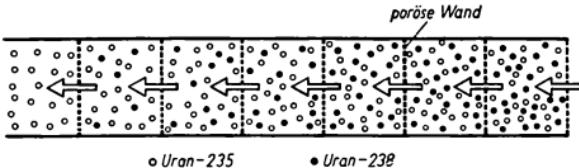


Abb. 25/1. Schematische Darstellung einer Stufendiffusion

## 5. Fragen und Aufgaben:

- Der natürliche Sauerstoff der Luft besteht aus drei Isotopen: zu 99,76 % aus  $O^{16}$ , zu 0,04 % aus  $O^{17}$  und zu 0,20 % aus  $O^{18}$ . Beschreiben Sie den Aufbau der Sauerstoffkerne und unterscheiden Sie die Nukleonen! Erklären Sie an diesem Beispiel, woraus sich das chemische Atomgewicht des Sauerstoffes ergibt!
- Beschreiben Sie den Aufbau der folgenden Atomkerne:  
 $H_1^1$ ,  $C_6^{12}$ ,  $N_7^{13}$ ,  $Co_{27}^{60}$ ,  $Ni_{28}^{60}$ ,  $Au_{79}^{197}$ ,  $H_1^2$ ,  $Hg_{80}^{197}$ ,  $Hg_{80}^{204}$ ,  $C_6^{13}$ !  
 Stellen Sie Kerne gleicher Ordnungs- beziehungsweise Massenzahl zusammen und erklären Sie die Unterschiede!
- Schildern Sie die Versuche, die zur Entdeckung der Neutronen führten!
- Erklären Sie die große Dichte der Atomkerne! Warum ist die Dichte aller Stoffe wesentlich kleiner?
- Die jährliche Weltproduktion an Eisen beträgt zur Zeit etwa  $4 \cdot 10^8$  t. Wie groß ist der Würfel, in dem alle Atomkerne dieser Eisenmenge dicht neben- und übereinander gepackt Platz haben? Die Masse der Elektronen ist zu vernachlässigen.

## 6. Der natürliche radioaktive Zerfall der Atomkerne — Die künstliche Radioaktivität

**1. Die Gesetzmäßigkeiten des Zerfalls.** Da die  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen aus Masseteilchen bestehen, müssen die Atomkerne der radioaktiven Stoffe Teilchen aussenden und sich verändern. Man spricht daher von einem *radioaktiven Zerfall der Atomkerne*. Mit den neuen veränderten Kernen entstehen auch neue Elemente. Schon *Marie und Pierre Curie* stellten bei ihren Untersuchungen fest, daß außer dem ursprünglichen radioaktiven Element neue vorher nicht vorhandene Elemente nachweisbar sind (s. S. 7).

Alle Elemente, deren Atomkerne selbständig radioaktiv zerfallen, nennt man **natürliche radioaktive Elemente**. Außer den zuerst bekannten Elementen *Uran*, *Radium*, *Polonium* und *Thorium* wurden noch andere radioaktive Elemente entdeckt, die am Ende des Periodensystems stehen. Dazu kamen später noch einige Elemente mit mittleren beziehungsweise kleinen Atomgewichten. Heute kennt man etwa 50 natürliche radioaktive Elemente.

Bald nach der Entdeckung der Radioaktivität beschäftigten sich die Forscher mit der Frage, ob es beim radioaktiven Zerfall eine Gesetzmäßigkeit gibt. Viele Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, daß *von einer bestimmten Menge eines radioaktiven Elements in gleichen Zeitabschnitten immer der gleiche Anteil zerfällt*. So zerfällt beispielsweise von 1 g Ra innerhalb von 1622 Jahren  $\frac{1}{2}$  g; innerhalb der nächsten 1622 Jahre zerfällt von dem restlichen  $\frac{1}{2}$  g wieder die Hälfte, also  $\frac{1}{4}$  g usw. Man hat es nun für zweckmäßig gehalten, die Zeit, in der jeweils die Hälfte der vorhandenen Atome eines radioaktiven Elements zerfallen, als charakteristische Größe für den Zerfall festzulegen. Man nennt sie die **Halbwertszeit**. Wie aus der nebenstehenden Tabelle hervorgeht, sind die Halbwertszeiten verschiedener radioaktiver Stoffe sehr unterschiedlich. Sie umfassen die verschiedensten Zeitabschnitte zwischen etwa  $10^{-6}$  s und  $10^9$  Jahren.

*Einige Halbwertszeiten (vgl. Abb. 27/1)*

Element	Halbwertszeit
U	$4,5 \cdot 10^9$ Jahre
Ra	1590 Jahre
Rn	3,82 Tage
RaC'	$1,5 \cdot 10^{-4}$ s

**2. Die radioaktiven Zerfallsreihen.** Bald nach der Entdeckung der natürlichen Radioaktivität untersuchte man die chemischen Eigenschaften der Zerfallsprodukte. Man fand, daß je nach der Art des radioaktiven Zerfalls neue Elemente entstehen.

1. Ein  $\alpha$ -Teilchen hat etwa die Masse von vier Atomgewichtseinheiten und die Ladung von zwei positiven Ladungseinheiten. *Daher nimmt bei einem  $\alpha$ -Zerfall die Ordnungszahl des zerfallenden Elements um zwei Einheiten ab, während sich das Atomgewicht um vier Einheiten verringert*. Es entsteht also ein neues Element, das im Periodensystem um zwei Stellen weiter nach links steht als das ursprüngliche.

2. Bei einem  $\beta$ -Zerfall nimmt die Ordnungszahl um eine Einheit zu, während die Masse fast unverändert bleibt. Da nämlich das  $\beta$ -Teilchen aus dem Kern stammt, wird damit dem Kern eine negative Ladung entzogen, oder anders ausgedrückt, die Kernladungszahl steigt um 1. Beim  $\beta$ -Zerfall entsteht ein Element, das um eine Stelle weiter rechts steht als das ursprüngliche.
3. Die  $\gamma$ -Strahlung tritt beim radioaktiven Zerfall nur in Verbindung mit dem  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Zerfall auf. Der  $\beta$ -Zerfall ist die häufigste Form der Radioaktivität. Bei jedem Zerfallsprozeß werden jeweils nur ein  $\alpha$ -Teilchen oder ein  $\beta$ -Teilchen, in seltenen Fällen beide Teilchen gleichzeitig von einem Kern ausgesendet.

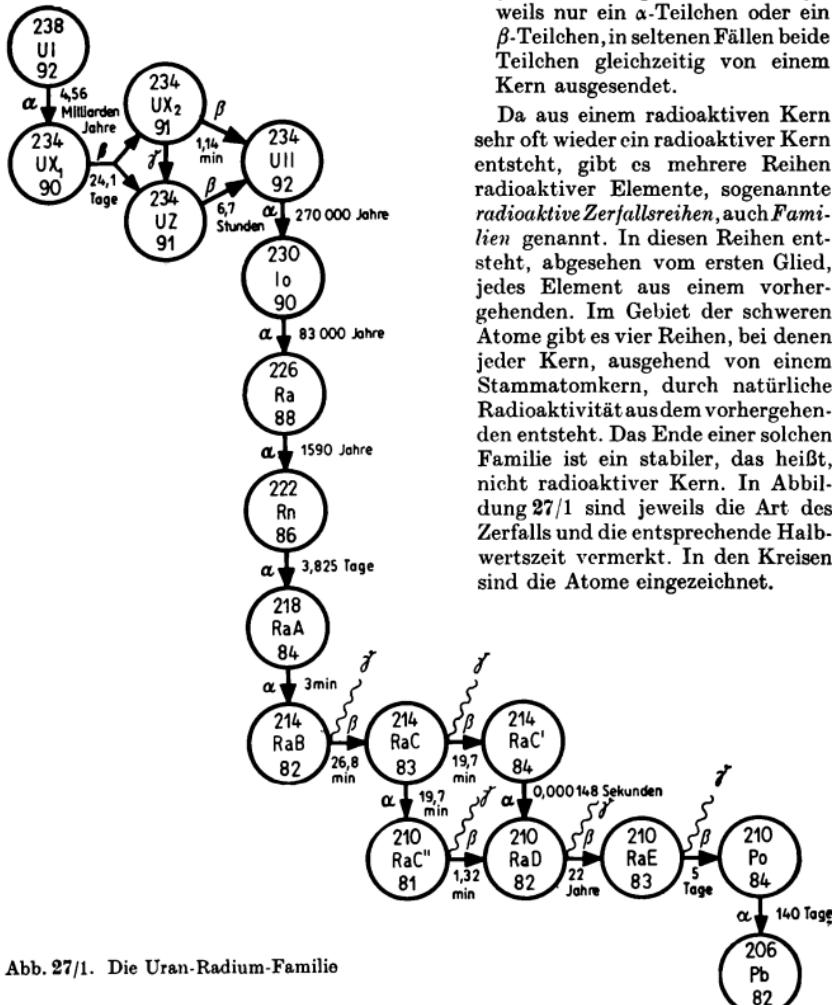
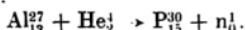


Abb. 27/1. Die Uran-Radium-Familie

**3. Die künstliche Radioaktivität.** Im Jahre 1932 ließ das französische Forscherpaar *Irène und Frédéric Joliot-Curie*  $\alpha$ -Teilchen von einem Poloniumpräparat auf Aluminiumatome einwirken. Dabei stellten sie zunächst eine starke Neutronenstrahlung fest. Der Vorgang läßt sich durch die folgende Reaktionsgleichung, ähnlich wie in der Chemie, darstellen:



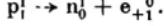
Außerdem beobachteten sie in der Nebelkammer dünne Bahnen, wie sie von Elektronen erzeugt werden. Die Ablenkung in einem elektrischen Feld ergab jedoch, daß diese Teilchen positive Ladung hatten. Solche Teilchen hatte man kurz vorher in der aus dem Weltraum stammenden *Höhenstrahlung* mit Hilfe von Nebelkammeraufnahmen entdeckt. Jetzt waren sie erstmalig bei einem Kernumwandlungsprozeß auf der Erde festgestellt worden. Man nennt diese Teilchen **Positronen** ( $e^+_0$  oder  $e^+$ ).

**Das Positron hat die gleiche Masse aber die entgegengesetzt gleiche Ladung wie das Elektron. Beide Teilchen werden auch als positive beziehungsweise negative Elektronen bezeichnet ( $\beta^+$ ,  $\beta^-$ ).**

Nach Entfernen des radioaktiven Präparats hörte zwar, wie zu erwarten war, die Neutronenstrahlung sofort auf, die Positronenstrahlung aber dauerte an. Ihre Intensität nahm wie bei der natürlichen radioaktiven Strahlung ab. Die Halbwertszeit betrug 130,6 s. Das aus  $\text{Al}^{27}_{13}$  durch den Beschuß mit  $\alpha$ -Teilchen entstandene Phosphor-isotop  $\text{P}^{30}_{15}$  ist instabil. Es zerfällt unter Aussendung eines Positrons in einen stabilen Siliziumkern:



In dem Phosphorkern muß sich also *ein Proton in ein Neutron und ein Positron verwandelt haben*:



**Bei Kernreaktionen können radioaktive Kerne entstehen. Diese Erscheinung heißt künstliche Radioaktivität. Man kennt bisher rund 1000 verschiedene künstlich radioaktive Kerne.**

Beim Vergleich der Zusammensetzung radioaktiver und nicht radioaktiver Kerne stellt man fest, daß *nur Kerne mit einem bestimmten Verhältnis der Protonen- (Z) zur Neutronenzahl (N) stabil sind*. Wird durch eine Kernreaktion die Zahl der Pro-



tonen oder Neutronen und damit das Verhältnis  $Z : N$  geändert, so kann ein instabiler Kern entstehen. Bei diesem Kern ändert sich das Verhältnis dann wieder: Bei Protonenüberschüß wandelt sich ein Proton in ein Neutron um, bei Neutronenüberschüß umgekehrt ein Neutron in ein Proton. Dabei wird jeweils ein Positron beziehungsweise ein Elektron ausgesendet. Man sagt, die Kerne sind  $\beta^+$ -aktiv beziehungsweise  $\beta^-$ -aktiv.

**Kerne mit einem Überschuß (Mangel) an Protonen sind  $\beta^+$ -aktiv ( $\beta^-$ -aktiv). Nur künstlich radioaktive Isotope sind  $\beta^+$ -aktiv.**

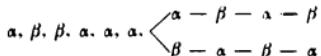
Wenn beim Übergang eines instabilen Kerns in einen stabilen die freiwerdende Energie nicht vollständig auf das ausgestrahlte Teilchen übertragen wird, gibt der entstehende Kern die restliche Energie in Form von  $\gamma$ -Strahlung ab.

**Bei vielen radioaktiven  $\beta$ -Strahlern ist die Umwandlung in ein stabiles Isotop von einer  $\gamma$ -Strahlung begleitet.**

Damit ist es den Wissenschaftlern gelungen, die früher unerklärbaren Vorgänge bei der natürlichen und künstlichen Radioaktivität zu erklären.

#### 4. Fragen und Aufgaben:

1. Geben Sie für den Zerfall von 1 g bis zu  $\frac{1}{16}$  g Rn die einzelnen Zerfallszeiten an und erläutern Sie daran den Begriff der Halbwertszeit (vgl. Tabelle auf S. 26)!
2. Stellen Sie die Thorium-Zerfallsreihe nach dem Beispiel der Abbildung 27/1 auf! Ausgangskern ist  $\text{Th}_{90}^{232}$ . Die zu den einzelnen Gliedern der Reihe führenden Strahlenarten sind:



Der Endkern ist  $\text{Pb}_{82}^{208}$ . Zu welchen Elementen gehören die einzelnen Glieder der Reihe?

3. Das radioaktive Wasserstoffisotop  $\text{H}_1^3$  wandelt sich mit einer Halbwertszeit von 12,46 Jahren unter Aussendung eines Elektrons in  $\text{He}_2^3$  um. Geben Sie die Reaktionsgleichung an und zeigen Sie, daß sich dabei ein Neutron in ein Proton verwandelt!
4. Welcher grundsätzliche Unterschied besteht zwischen der natürlichen und der künstlichen Radioaktivität, und worin stimmen sie überein?

#### 7. Beschleuniger

**1. Das Zyklotron.** Zur Durchführung von Kernumwandlungen werden energiereiche Teilchen als Geschosse benötigt. Zur Gewinnung energiereicher geladener Teilchen wurden im Laufe der Entwicklung der Kernphysik eine große Anzahl sinnreicher Geräte gebaut, die zum Teil gewaltige Ausmaße angenommen haben.

Solche **Beschleunigungsanlagen** beruhen unter anderem darauf, daß man geladene Teilchen in einem elektrischen Feld beschleunigen kann. Die kinetische Energie bewegter Teilchen ist bekanntlich dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional. Wenn daher genügend hohe Spannungen zur Verfügung stehen, kann man energiereiche Teilchen erhalten. Die Erzeugung sehr hoher Spannungen ist aber durch Isolationsschwierigkeiten begrenzt. Die Erzeugung einer Spannung von 3 bis 4 Millionen Volt erfordert bereits einen beträchtlichen Materialaufwand. Derartig hohe Span-

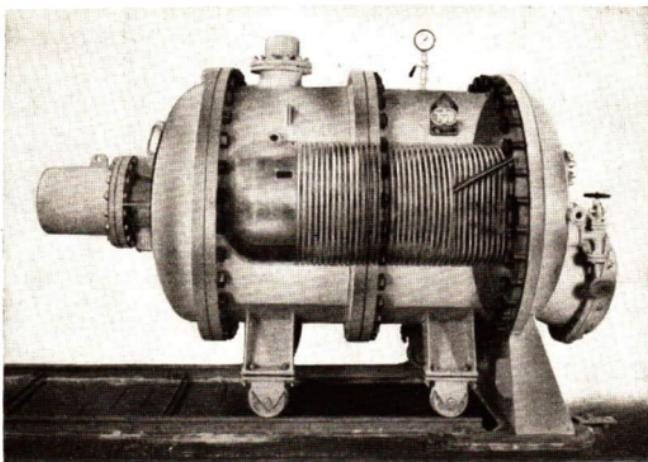


Abb. 30/1  
Van de Graaf'scher Generator für 1,5 Millionen Volt, entwickelt im Forschungs-institut „Manfred von Ardenne“, Dresden

nungen erzeugt man mit einem *van de Graaf'schen Generator* (Abb. 30/1). Bei dieser Spannung erhält man zum Beispiel Protonen mit einer Energie von 3 bis 4 MeV. Diese Energie ist etwa halb so groß wie die von  $\alpha$ -Strahlen aus einem natürlichen radioaktiven Zerfall.

Da die Erhöhung der Energie mit Hilfe sehr hoher Spannungen technisch sehr schwierig ist, beschleunigt man die Teilchen in mehreren Stufen. Dabei sind keine sehr großen Beschleunigungsspannungen erforderlich. Dieses Prinzip der mehrmaligen Beschleunigung ist zum Beispiel beim *Zyklotron* verwirklicht. In einer Vakuumkammer befinden sich in horizontaler Lage zwei Elektroden, die die Form

der Hälften einer in der Mitte getrennten Schuhkremdose haben (Abb. 30/2). An diesen beiden Dosenhälften, den sogenannten *Duanten* oder *D's*, liegt eine Wechselspannung. Sie verursacht im Raum zwischen den beiden *D's* ein elektrisches Feld, das sich in der Richtung periodisch ändert. Durch einen großen Elektromagneten wird außerdem ein unveränderliches Magnetfeld erzeugt, dessen Richtung vertikal verläuft. Die Ionen, die man beschleunigen will, läßt man aus einer Öffnung in der Mitte des Spaltes zwischen den *Duanten* in den Ionenraum eintreten. Dort wird zum Beispiel Heliumgas eingeschlossen und durch Elektronen ionisiert, so daß  $\alpha$ -Teilchen entstehen.

Diese  $\alpha$ -Teilchen werden von dem elektrischen Feld zwischen den beiden *D's*

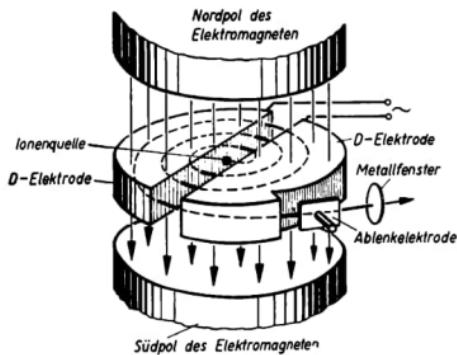


Abb. 30/2  
Anordnung eines Zyklotrons (schematisch)

beschleunigt und gelangen in den Raum innerhalb der D's. Dort wirkt auf die Teilchen nur das Magnetfeld. Da sich die Ionen senkrecht zum Magnetfeld bewegen, werden sie so abgelenkt, wie ein elektrischer Strom in einem Magnetfeld. Die Ionen bewegen sich daher innerhalb der D's auf einer Kreisbahn. Dabei ergibt sich eine Zentrifugalkraft, die gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet ist wie die durch das Magnetfeld bedingte Kraft. Da die Größe der Zentrifugalkraft von der Geschwindigkeit der Teilchen abhängt, wird der Radius der Teilchenbahn durch die Geschwindigkeit festgelegt. Die Umlaufdauer eines Teilchens ist konstant. Das bedeutet, daß die Zeit zwischen zwei Durchgängen durch den Beschleunigungs- spalt gleich bleibt. Die Teilchen lassen sich daher beschleunigen, wenn die an den D's liegende Wechselspannung im gleichen Zeitabstand ihr Vorzeichen wechselt. Die Umlauffrequenz der Teilchen und die Frequenz der beschleunigten Wechsel- spannung müssen übereinstimmen.

Bei jedem Durchgang durch die Beschleunigungsstrecke, den Spalt, nimmt die Geschwindigkeit eines Teilchens zu. Dadurch wächst auch der Radius der Umlaufbahn, so daß sich das beschleunigte Teilchen auf einer spiralenähnlichen Bahn von innen nach außen bewegt (Abb. 31/1).

Bringt man in eine äußere Teilchenbahn eine Materialprobe, so treffen die energiereichen Teilchen auf diese Probe und können darin Kernumwandlungen hervorrufen.

Die energiereichen Teilchen können aber auch mittels einer elektrisch geladenen Platte, einer sogenannten *Ablenkelektrode*, aus der Zyklotronkammer herausgelenkt werden und durch ein dünnes Metallfenster in die Luft eintreten. Da die Teilchen Luftmoleküle ionisieren, entsteht am Austrittsfenster des Zyklotrons ein leuchtendes Strahlenbündel (Abb. 32/1). Außerhalb des Zyklotrons werden dann die energiereichen Teilchen für weitere Versuche verwendet. Der Elektromagnet des ersten Zyklotrons unserer Republik hat ein Gewicht von 120 Mp. Der größte Teilchenbahnradius beträgt 105 cm.  $\alpha$ -Teilchen können mit diesem Zyklotron so beschleunigt werden, daß sie eine Energie von 25 MeV haben. Die mit einem Zyklotron erreichbare Teilchen- energie ist nach oben begrenzt.

Eine Abwandlung des Zyklotrons ist das *Synchrozyklotron* oder *Phasotron*. Bei diesem Gerät wird die Frequenz des elektrischen Wechselfeldes in einem bestimmten Rhythmus geändert, oder wie man sagt, moduliert. Man hat nämlich festgestellt, daß Teilchen bei sehr hoher Geschwindigkeit eine größere Masse als im Ruhezustand haben. Daher muß man die Frequenz des Wechselfeldes dieser Masseänderung anpassen, damit die Richtungsänderung des Feldes immer im richtigen Zeitpunkt erfolgt.

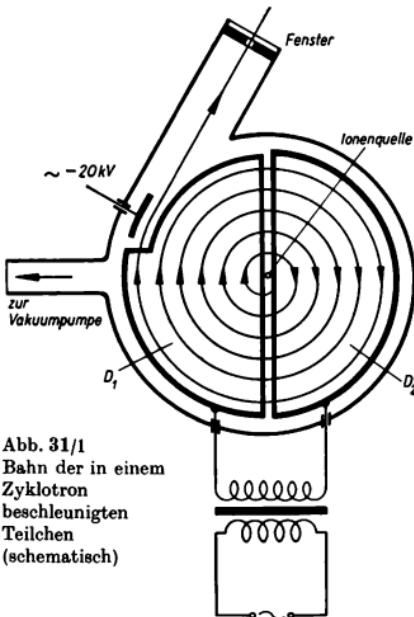


Abb. 31/1  
Bahn der in einem  
Zyklotron  
beschleunigten  
Teilchen  
(schematisch)

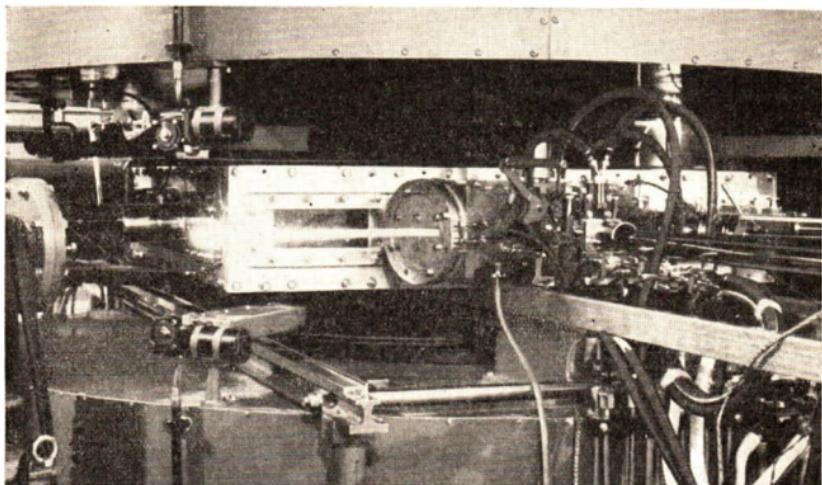


Abb. 32/1. Deuteronenstrahl

Abbildung 32/2 zeigt das größte Synchrozyklotron der Welt, das Protonen mit einer Energie von 680 MeV liefert. Der große Elektromagnet, der das Magnetfeld erzeugt, wiegt 7000 Mp. Das entspricht etwa dem Gewicht von 7 Güterzügen.

Aber noch größere Anlagen zur Beschleunigung geladener Teilchen wurden in den letzten Jahren gebaut. Abbildung 33/1 zeigt als eine der größten Anlagen das

sowjetische *Synchrophasotron* in Dubna, auch *Protonensynchrotron* genannt. Mit Hilfe dieser Anlage erhält man Protonen mit einer Energie von 10000 MeV. Die Protonen laufen in einer ringförmigen Vakuumkammer auf einer Kreisbahn um, die einen Durchmesser von 56 m hat. Der Magnet hat einen Durchmesser von 60 m und wiegt 36000 Mp; er ist damit über fünfmal so schwer wie der des Synchrozyklotrons. Dieser riesige Magnet muß mit größter Präzision in die richtige Lage gebracht werden, damit die Protonen ihre kreisförmige Bahn einhalten. Abb. 33/2

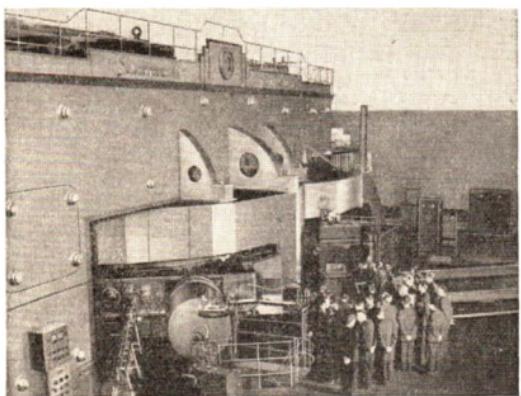


Abb. 32/2. Synchrozyklotron im Kernforschungsinstitut in Dubna bei Moskau

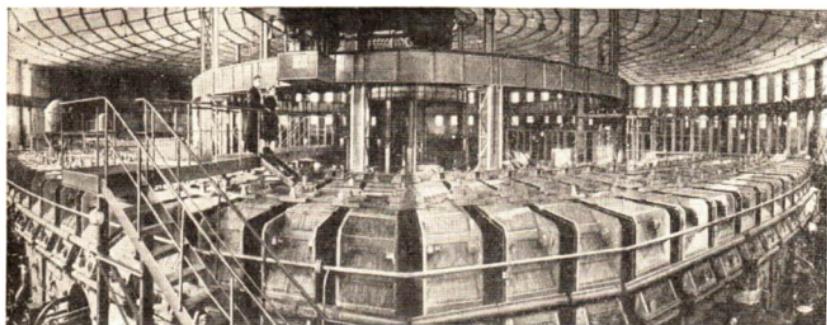


Abb. 33/1. Synchrophasotron

zeigt das Steuerpult der Anlage.

**2. Das Betatron.** Elektronen werden in einem *Betatron* beschleunigt. Das Betatron ähnelt im Prinzip einem Transformator. Schickt man durch die Primärspule eines



Abb. 33/2. Zentrale Steuerungsanlage des Synchrophasotrons in Dubna. Die Steuerung ist in einem besonderen Gebäude untergebracht.

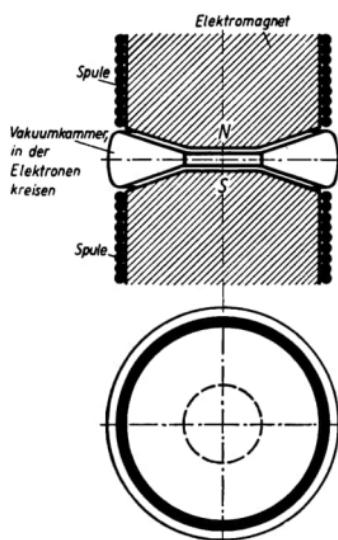


Abb. 33/3. Schematische Darstellung eines Betatrons

Transformators einen Stromstoß, so wird in der Sekundärwicklung eine Induktionsspannung erzeugt. Ist die Sekundärwicklung geschlossen, so fließt ein elektrischer Strom.

Auch beim Betatron ist eine Primärspule vorhanden (Abb. 33/3). Der Induktionsstrom wird durch einen Strom geladener Teilchen, durch Elektronen, gebildet, die sich in einem ringförmigen Gefäß bewegen. Damit sich dieser Ringstrom ungestört ausbilden kann, muß das Gefäß luftleer sein. Durch ein soge-

nanntes *magnetisches Führungsfield* werden die Elektronen ständig auf eine Kreisbahn gezwungen. Am Ende des Beschleunigungsvorganges kann man die energiereichen Elektronen dann für Versuche verwenden. Betatrons werden in sehr unterschiedlichen Größen gebaut, sowohl als sogenannte Tischgeräte, wie auch als große Anlagen.

### 8. Fragen und Aufgaben:

1. Vergleichen Sie die Energie von  $\alpha$ -Teilchen aus einer natürlichen  $\alpha$ -Strahlung mit der Energie von Teilchen aus Beschleunigungsanlagen!
2. Warum wendet man bei Beschleunigungsanlagen das Prinzip der mehrmaligen Beschleunigung an? Schildern Sie dieses Prinzip am Beispiel des Zyklotrons!
3. Welche grundsätzlichen Unterschiede bestehen zwischen der Wirkungsweise eines Zyklotrons und eines Betatrons?
4. Im Kernforschungsinstitut in Dubna arbeiten die Kernphysiker verschiedener sozialistischer Länder und benutzen unter anderem die großen Beschleunigungsanlagen gemeinsam. Welche Bedeutung hat diese gemeinsame Arbeit auch für unsere Republik?

## 8. Gewinnung der Kernenergie

**1. Begriff und Ablauf einer Kernreaktion.** Bei der natürlichen und künstlichen Radioaktivität beobachtet man einen Kernzerfall, wobei unter Aussendung von Strahlen neue Kerne entstehen. Auch bei von Natur aus stabilen Kernen kann man durch geeignete Mittel Kernumwandlungen erreichen. Diese Tatsache wurde im Jahre 1919 von *Rutherford* entdeckt (vgl. S. 20). Nach den Arbeiten dieses Forschers gingen die Physiker der Frage nach, ob man nicht auch mit anderen Geschoßteilchen bei anderen Elementen ebenfalls Kernumwandlungen durchführen kann. Es zeigte sich, daß dies zwar möglich, jedoch häufig mit sehr großen Schwierigkeiten bei der praktischen Durchführung verbunden ist.

**Die Vorgänge, die sich ereignen, wenn ein Teilchen in den Wirkungsbereich eines Kernes gerät, bezeichnet man als Kernreaktion.**

In den Versuchen von *Rutherford* drang ein  $\alpha$ -Teilchen in den Kern ein; dabei entstand ein neuer Kern und ein Proton wurde ausgesendet. Als Geschoßteilchen lassen sich außer  $\alpha$ -Teilchen auch Protonen, Neutronen und die Kerne des schweren Wasserstoffisotops  $H_2^+$ , des Deuteriums, verwenden. Bei Kernreaktionen mit positiv geladenen Teilchen; zum Beispiel Protonen, müssen die Abstoßungskräfte zwischen dem zu treffenden Kern und dem Geschoßteilchen überwunden werden; denn gleichnamige elektrische Ladungen stoßen sich ab. Das ist aber nur möglich, wenn die Teilchen eine genügend große Geschwindigkeit und damit eine entsprechende kinetische Energie besitzen. Dann können sie in den nächsten Bereich des Kerns, in das *Kernfeld*, gelangen. Dort werden zwischen den gleichnamig geladenen Teilchen Kräfte wirksam, die zu einem Zusammenstoß mit dem Kern führen. Die Protonen haben infolge ihrer großen kinetischen Energie den sogenannten *Potentialwall*, das heißt die Grenze des Abstoßungsbereichs des Kerns überwunden. Die dafür notwendige Energie muß um so größer sein, je größer die Kernladung des umzuwandelnden Elements ist. Bei Kernreaktionen mit Protonen zum Beispiel an einem Element der Ordnungszahl 70 müssen die Protonen eine Energie von 12,5 MeV haben,  $\alpha$ -Teilchen,

Abb. 35/1  
Aufnahme eines  
von einem  
Höhenstrahl-  
teilchen getroffe-  
nen Atomkerns



deren Masse größer ist, sogar 25 MeV. Da aber  $\alpha$ -Teilchen beim radioaktiven Zerfall eine Energie von beispielsweise 6 MeV haben, müßten sie noch zusätzlich beschleunigt werden. Neutronen eignen sich besonders gut für Kernreaktionen, da sie elektrisch neutral sind. Abb. 35/1 zeigt die Spuren der nach verschiedenen Richtungen auseinanderfliegenden Bruchstücke eines Atomkerns. Der Kern wurde von einem Teilchen getroffen, das aus einer großen Höhe auftretenden Strahlung stammt.

**2. Die Kernspaltung.** Bei allen bisherigen Versuchen, Atomkerne durch Bestrahlung Neutronen zu verändern, entstanden Elemente, deren Ordnungszahlen sich nur wenig von der des Ausgangsstoffes unterschieden. Diese Kernumwandlungen führten zu einer großen Anzahl von Isotopen und bisher unbekannten Elementen mit höheren Ordnungszahlen als Uran. Man nennt sie *Transurane*. Die bei Beschuß mit  $\alpha$ -Teilchen und anderen Geschossen getroffenen Kerne sandten Neutronen, Protonen oder  $\alpha$ -Teilchen aus. Im Vergleich zu den bestrahlten Kernen waren das nur sehr kleine Teilchen, die man als *Kernsplitter* bezeichnen könnte. Im Jahre 1934 ließ der italienische Physiker *Fermi* Neutronen auf Urankerne treffen. Dabei stellte er fest, daß sich eine große Anzahl neuartiger radioaktiver Kerne gebildet hatten, die er für *Transurane* hielt. Als die deutschen Forscher *Hahn* und *Straßmann* 1939 die Versuche von *Fermi* wiederholten, kamen sie zu völlig anderen überraschenden Ergebnissen. Durch vielfältige und komplizierte chemische Untersuchungen fanden sie, daß bei dem Beschuß der Urankerne mit Neutronen Kerne entstehen, deren Kernaladungszahlen den in der Mitte des Periodensystems stehenden Elementen entsprechen, also etwa die Hälfte der des Urankernes betragen. Nach mühevollen Untersuchungen konnten sie diese als *Krypton* ( $Kr^{90}_{36}$ ) und *Barium* ( $Ba^{139}_{56}$ ) bestimmen.

Otto *Hahn*, geboren 1879, ist Professor der Physik in Göttingen und Präsident der Max-Planck-Gesellschaft. Fritz *Straßmann*, geboren 1902, ist Professor der Chemie in Mainz. Beide Forscher haben im April 1957 den Appell gegen die atomare Auf-

rüstung in Westdeutschland mit unterzeichnet. In diesem Appell haben berufene Wissenschaftler dagegen protestiert, daß ihre Forschungsergebnisse mißbraucht werden.

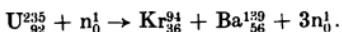
Die österreichische Physikerin *Lise Meitner* vermutete, daß bei den Versuchen von *Hahn* und *Straßmann* zum ersten Mal eine *Kernspaltung nachgewiesen* worden sei. Weitere Untersuchungen bestätigten die Richtigkeit dieser Vermutung. Die Auswertung vieler gleichartiger Versuche ergab, daß außer bei Uran auch noch bei anderen schweren Kernen, wie Thorium- und Plutonium-Kernen, nach einem Neutroneneinfang eine Kernspaltung eintritt. Das Neutron führt dabei dem Kern die zur Spaltung notwendige Energie zu.

Bei der Kernspaltung zerfällt ein Kern in zwei etwa gleichgroße Bruchstücke, die meistens radioaktiv sind.

Bei manchen Kernen reicht die bei Neutroneneinfang aufgenommene Energie aus, um die Spaltung herbeizuführen. Bei diesen Kernen ist eine Spaltung durch relativ *langsame Neutronen* möglich. Solche Neutronen haben eine Geschwindigkeit von etwa  $2000 \frac{m}{s}$ . Dem entspricht eine Energie von etwa  $\frac{1}{40}$  eV. Man nennt diese langsamsten Neutronen *thermische Neutronen*. Neutronen mit einer Energie größer als  $\frac{1}{40}$  eV heißen *schnelle Neutronen*.

Bereits durch thermische Neutronen spaltbar sind die Kerne  $U^{235}$ ,  $U^{233}$ ,  $Pu^{239}$ , während die Kerne  $U^{238}$  und  $Th^{232}$  nur durch schnelle Neutronen gespalten werden.

**3. Die Kettenreaktion.** Bei der Kernspaltung läuft noch ein anderer wichtiger Vorgang ab, der ebenfalls im Jahre 1939 von *Irène und Frédéric Joliot-Curie* entdeckt wurde. Sie stellten fest, daß außer den beiden Bruchstücken noch ein bis drei Neutronen frei werden. Man bezeichnet sie als *Spaltneutronen*. Eine häufig beobachtete Kernspaltung ist die folgende (Abb. 36/1):



So wie bei diesem Beispiel ist bei allen diesen Kernspaltungen die Summe der *Ordnungszahlen* der entstandenen Atomkerne gleich der des gespaltenen Kernes. Auch die Summe der *Massenzahlen* ist auf beiden Seiten der Reaktionsgleichung gleich. Die frei werdenden Neutronen können nun weitere Spaltungsvorgänge auslösen. Es kommt zu einer Kette von Kernspaltungen, die sich nicht nur von selbst immer weiter

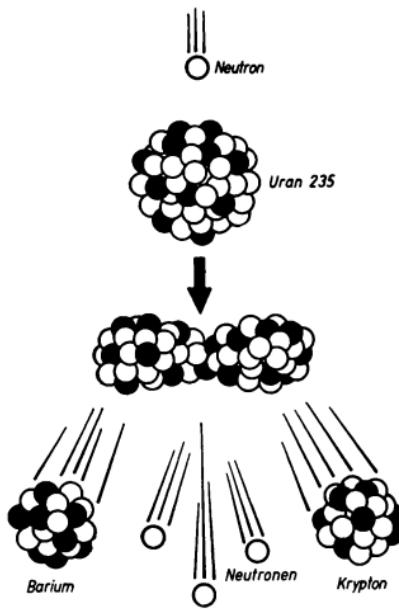


Abb. 36/1  
Schematische Darstellung der Uranspaltung

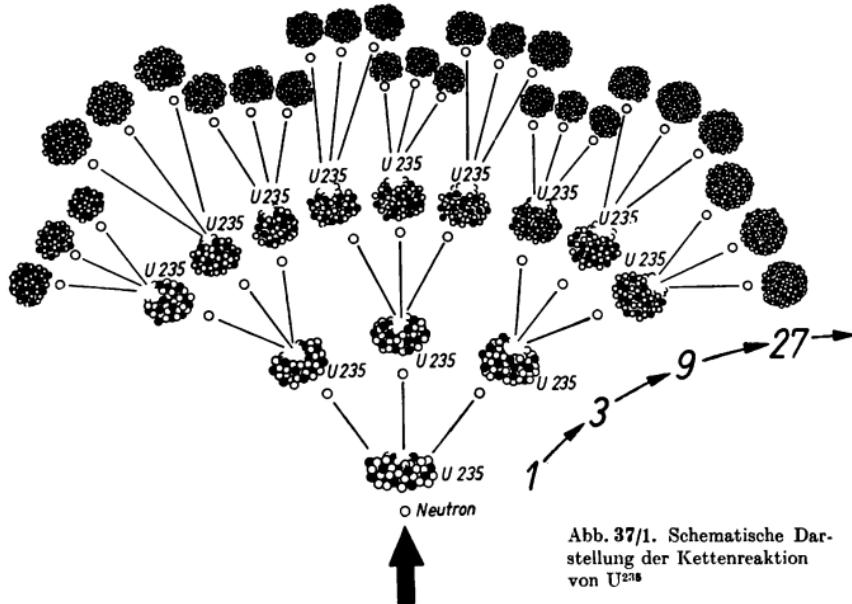


Abb. 37/1. Schematische Darstellung der Kettenreaktion von  $U^{235}$

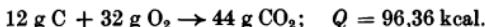
fortsetzt, sondern auch in kurzer Zeit lawinenartig anschwellen kann (Abb. 37/1). Einen Vorgang, der sich bei einmaligem Anstoß von selbst fortpflanzt, bezeichnet man als **Kettenreaktion**. Beispiele dafür sind das Anzünden eines Gasofens und die Entstehung einer Feuersbrunst.

Die Kettenreaktion kann sich lawinenartig fortsetzen wie die Explosion einer Sprengstoffmenge. Nimmt man an, daß zum Beispiel nach jeder Kernspaltung jeweils drei Neutronen Kerne spalten, so wächst die Zahl der Kernspaltungen wie die Potenzen von 3: 3, 9, 27, 81, 243 ...

Aber nicht alle frei werdenden Neutronen lösen eine Reaktion aus. Ein Teil von ihnen entweicht nach außen und verläßt das spaltbare Material. Andere Neutronen werden von den Beimischungen des Spaltmaterials absorbiert. Viele haben außerdem zu hohe Geschwindigkeiten. Es müssen daher einige Voraussetzungen erfüllt sein, damit bei der Uranspaltung eine Kettenreaktion entstehen kann:

1. *Es muß genügend spaltbares Material vorhanden sein*, damit nicht zu viele Neutronen wirkungslos entweichen. Man bezeichnet die Mindestmenge als *kritische Masse*. In einer kleineren Menge, einer *unterkritischen Masse*, kann keine Kettenreaktion entstehen. Wird die Masse größer, das heißt wird eine Quantität verändert, so ändert sich bei einer bestimmten Menge, der kritischen Masse, auch die Qualität der Vorgänge: es kommt zu einer Kettenreaktion. Eine größere Menge wird *überkritische Masse* genannt.
2. *Die frei werdenden Neutronen müssen für die Kettenreaktion notwendige Geschwindigkeiten haben*.

**4. Der Energieumsatz bei Kernreaktionen.** Die Kernumwandlungen sind ebenso wie die sich in der Atomhülle abspielenden chemischen Reaktionen mit Energieumsetzungen verbunden. Man unterscheidet in der Chemie bekanntlich *endotherme Reaktionen*, bei denen Energie, meist in Form von Wärme, zugeführt werden muß, und *exotherme Reaktionen*, bei denen Energie frei wird. Eine exotherme Reaktion ist zum Beispiel die Oxydation des Kohlenstoffs:



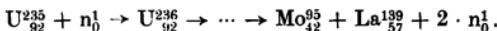
Eine weitere wichtige Erfahrung war, daß bei Kernumwandlungen *immer Massenveränderungen auftreten*. Die Summen der Massen auf beiden Seiten einer Kernreaktionsgleichung sind stets verschieden. Vergleicht man die Masse eines Atomkerns, die Kernmasse, mit der Summe der Masse der einzelnen Nukleonen, so stellt man bei allen Kernen die merkwürdige Tatsache fest, daß die Kernmasse kleiner als die Summe der Masse der Nukleonen ist.

Diese *Massendifferenz* soll am Beispiel des Heliumkerns deutlich werden. Ein Heliumkern besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen.

Die Summe der einzelnen Protonen- und Neutronenmassen beträgt . . . 4,0338 ME  
die Kernmasse des gesamten Heliumkernes dagegen beträgt . . . . . 4,0038 ME  
daraus ergibt sich eine Differenz von . . . . . 0,0300 ME

Diese Differenz nennt man den **Massendefekt** ( $\Delta m$ ). Alle Atomkerne zeigen einen Massendefekt.

Da bei den Kernreaktionen die Atomkerne sich ändern, müssen hierbei auch Massendefekte auftreten, ebenso bei der Spaltung des Urankerns. Unter den vielen Möglichkeiten der Spaltung eines Urankerns  $U^{235}_{92}$  ergeben sich als Endprodukte auch die beiden Kerne  $Mo^{95}_{42}$  und  $La^{139}_{57}$ . Die radioaktiven Zwischenprodukte sollen hier nicht berücksichtigt werden.



Vergleicht man die Summe der Masse des Urankerns und der Masse des eingefangen Neutrons mit der Summe der Massen der Spaltprodukte und der freiwerdenden Neutronen, so stellt man eine Differenz fest.

Massen von $U^{235}$ + n (U <sup>236</sup> ) . . . . .	236,134 ME
Massen von $Mo^{95}$ . . . . .	94,946 ME
Massen von $La^{139}$ . . . . .	138,953 ME
Massen von 2 n . . . . .	2,018 ME
<b>Summe der Einzelmassen</b> . . . . .	<b>235,917 ME</b>
<b>Massendifferenz</b> . . . . .	<b>0,217 ME</b>

Die Masse der Spaltprodukte und Spaltneutronen ist also um 0,217 ME geringer als die Masse des Ausgangskerns U<sup>236</sup>.

Der bedeutende Physiker *Albert Einstein* hat eine mathematische *Beziehung zwischen Masse und Energie* aufgestellt, nach der jeder Masse ein ganz bestimmter Energiebetrag entspricht. Die berühmte *Einstein'sche Gleichung* lautet:

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

Hierbei bedeutet  $E$  die Energie,  $m$  die Masse und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit. Gibt man die Masse in kg an und setzt für die Lichtgeschwindigkeit den gerundeten Wert

$$c = 300000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1},$$

so ist die Energie, die 1 g Masse entspricht:

$$E = 0,001 \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 = 0,001 \text{ kg} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2},$$
$$E = 9 \cdot 10^{13} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m} = 9 \cdot 10^{13} \text{ N} \cdot \text{m}.$$

$\text{N} \cdot \text{m}$  ist die Arbeitseinheit Newtonmeter (Nm) oder Wattsekunde (Ws). Daher erhält man

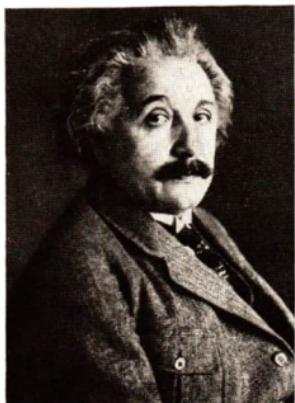
$$E = 9 \cdot 10^{13} \text{ Ws} = 25 \cdot 10^6 \text{ kWh}.$$

Diese große Energiemenge wird bei einem Massendefekt von 1 g frei. Dieselbe Energiemenge wird beispielsweise als elektrische Energie in einer Großstadt von 100000 Haushaltungen in zwei bis drei Monaten für den Hausbedarf verbraucht. Man kann diesen Energiebetrag auch als Wärmeenergie in Kalorien umrechnen (vgl. Aufgabe 3 auf S. 41).

Die bei Kernreaktionen frei werdende Energie ist im Vergleich zur chemischen Energie, beispielsweise zur Verbrennungswärme, sehr groß. Ein Massendefekt von etwa 1 g würde bei der vollständigen Spaltung von etwa 1 kg  $\text{U}^{235}$  entstehen. Dabei wird die oben berechnete Energie frei. Jedoch ist es technisch nicht möglich, 1 kg Uran so vollständig zu spalten, daß diese Energiemenge erreicht wird.

**Unter Ausnutzung der Kernenergie kann man aus verhältnismäßig geringen Mengen spaltbaren Materials sehr große Energiemengen gewinnen.**

*Albert Einstein* war einer der bedeutendsten Physiker der Neuzeit. Durch die von ihm entwickelte *Relativitätstheorie* wurde er zum Mitbegründer eines neuen physikalischen Weltbildes. Einstein hat von 1914 bis 1933 in Berlin und Potsdam gewirkt.



Albert Einstein (1879 bis 1955)

Schon seit Beginn des ersten Weltkrieges hat er sich für Frieden und Völkerverständigung eingesetzt und ist gegen jede Rassen- und Kriegshetze aufgetreten. Nach dem Beginn der faschistischen Diktatur mußte er Deutschland verlassen. Er emigrierte nach Amerika und setzte seine Forschungen als Professor an der Universität in Princeton fort. Auch hier nahm er, besonders durch Vorträge, mutig gegen den Mißbrauch der Atomenergie für kriegerische Zwecke Stellung.

Die Frage nach der Herkunft der bei der Kernspaltung festgestellten Energiemenge führte zu der Erkenntnis, daß Energie, die bisher zum Zusammenschnitt des Atomkerns notwendig war, frei wird. Diese Energie bezeichnet man als *Bindungsenergie*. Sie ist gleich dem Massendefekt. Bei allen Kernreaktionen, bei denen ein Massendefekt auftritt, wird Energie frei, im umgekehrten Falle wird Energie verbraucht. *Man unterscheidet daher in der*

*Kernphysik wie in der Chemie exotherme und endotherme Reaktionen.* Der Massendefekt tritt bei leichten Kernen bei ihrer Bindung auf, jedoch bei schweren Kernen bei ihrer Spaltung (s. S. 38). Während ein Kern gegenüber der Summe seiner Bestandteile einen Massendefekt aufweist, der seiner Bindungsenergie entspricht, wird bei der Spaltung eines Kerns seine Bindungsenergie frei, die der oben genannten Massendifferenz entspricht.

Die Spaltprodukte geben bei Zusammenstößen mit anderen Atomen ihre kinetische Energie ab. Diese Energie wandelt sich daher in Wärmeenergie um.

Bei der Spaltung eines Urankerns  $U^{235}$  wird eine Energie von etwa 200 MeV frei, die sich als Wärmeenergie äußert.

Da 1 g  $U_{92}^{235}$  über 2500 Trillionen Atome hat, wird – theoretisch – bei der vollständigen Spaltung von 1 g  $U_{92}^{235}$  eine Energie von

$$5 \cdot 10^{23} \text{ MeV} \doteq 8 \cdot 10^{10} \text{ J} \doteq 22300 \text{ kWh}$$

frei (vgl. S. 9). Diese Energie entspricht dem täglichen Elektroenergieverbrauch der Haushaltungen einer Kleinstadt.

**5. Die Kernfusion.** Außer bei der Spaltung von Atomkernen ergibt sich auch bei der Verschmelzung leichter Atomkerne zu schwereren eine Möglichkeit, Kernenergie freizumachen. Man bezeichnet diese Verschmelzung als **Kernfusion**. Es tritt ein Massendefekt auf. Zur Entdeckung der Kernfusion kamen die Wissenschaftler durch die Beschäftigung mit der Frage nach dem Energiehaushalt der Sonne. Die Strahlung der Sonne hat die unvorstellbar große Leistung von etwa  $3,72 \cdot 10^{23}$  kW. Das bedeutet, daß die Sonne in jeder Sekunde eine Energie von etwa  $10^{20}$  kWh in den Weltraum ausstrahlt. Davon entfällt auf die Erde in jeder Sekunde eine Energie von 46 000 000 kWh, das sind etwa  $\frac{1}{2}$  Billionstel der Gesamtenergie. Diese Energie entspricht etwa der im Wasserkraftwerk *W. I. Lenin* bei Kuibyschew, dem größten Wasserkraftwerk der Welt, innerhalb von 22 Stunden gewonnenen Energie.

Eingehende theoretische Untersuchungen führten zu der Erkenntnis, daß diese Energie der Sonne bei der Verschmelzung von je 4 Wasserstoffkernen, Protonen, zu einem Heliumkern frei wird. Dieser Prozeß geht im Sonneninneren bei einer Temperatur von rund 20 Millionen Grad vor sich. Erst bei dieser hohen Temperatur erreichen die gleichartig geladenen Kerne eine genügend hohe Geschwindigkeit, so daß sie den Potentialwall überwinden und in den Wirkungsbereich des Kernfeldes eindringen können. Solche Reaktionen bezeichnet man auch als *thermonukleare Reaktionen*. Die Verschmelzung kann auf verschiedenen Wegen in sogenannten *Reaktionszyklen* erfolgen.

Vergleicht man insgesamt bei allen Reaktionsgleichungen eines solchen Zyklus die auf beiden Seiten auftretenden Kerne miteinander, so stellt man fest, daß letzten Endes vier Protonen zu einem Heliumkern vereinigt worden sind, wobei noch zwei Positronen ausgestrahlt wurden:



Bei dieser Verschmelzung ergibt sich ein Massendefekt, da die Summe der Massen auf der rechten Seite der Reaktionsgleichung kleiner ist als die auf der linken Seite.

Der Massendefekt bei der Umwandlung von 1 kg Wasserstoff in Helium beträgt 6,45 g. Diesem Massendefekt entspricht eine Energie von

$$6,45 \cdot 25 \cdot 10^6 \text{ kWh} \approx 160 \cdot 10^6 \text{ kWh} \triangleq 138 \cdot 10^9 \text{ kcal.}$$

Diese Energie entspricht der Verbrennungswärme von etwa 50000 t Rohbraunkohle bei einem Heizwert von  $2800 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$ .

#### 6. Fragen und Aufgaben:

1. Unterscheiden Sie eine Kernumwandlung bei einem natürlich radioaktiven Kern, eine Kernreaktion nach Art des berühmten Rutherford'schen Versuches und eine Kernspaltung hinsichtlich der Auslösung der Reaktion und der Größe der auftretenden Teilchen!
2. Was versteht man unter einer Kettenreaktion, und unter welchen Voraussetzungen entsteht bei der Kernspaltung eine Kettenreaktion?
3. Rechnen Sie die Energie, die nach der Einsteinschen Gleichung 1 g Masse entspricht, in Wärmeenergie, gemessen in kcal, um! Benutzen Sie dazu die Beziehung 1 cal  $\triangleq 4,187 \text{ Ws}$ ! Wieviel Liter Wasser von  $18^\circ\text{C}$  könnte man mit dieser Wärmeenergie in Dampf von  $100^\circ\text{C}$  verwandeln?
4. Bei der Verbrennung von 12 g Kohlenstoff mit 32 g Sauerstoff wird eine Wärmeenergie von 96,36 kcal frei (vgl. S. 38). Berechnen Sie den Massendefekt, der dieser Energie entspricht! Vergleichen Sie ihn mit dem bei der Spaltung eines Urankerns auftretenden Massendefekt (vgl. S. 38)!
5. Bei der Spaltung eines Urankerns  $\text{U}^{238}$  treten Spaltprodukte mit Ordnungszahlen zwischen 30 und 63 auf. Bilden Sie nach Art der Reaktionsgleichung auf S. 38 selbst ein Beispiel! Benutzen Sie dazu das Periodensystem!
6. Wie erklärt man heute die Tatsache, daß die Fixsterne, zum Beispiel unsere Sonne, seit vielen Hunderttausenden von Jahren riesige Energiemengen ausstrahlen! Erklären Sie mit Hilfe einer Reaktionsgleichung den betreffenden Vorgang!

### 9. Die Ausnutzung der Kernenergie

**1. Das Energieproblem.** Der Energiebedarf der sozialistischen Länder steigt ständig, da die Erfüllung der umfangreichen Wirtschaftspläne bedeutende Energiequellen erfordert. So wird zum Beispiel in der Deutschen Demokratischen Republik nach dem Siebenjahrplan durch den Bau neuer Kraftwerke und die Erweiterung bestehender Anlagen die Kraftwerksleistung bis 1965 auf 196% erhöht. Andererseits sind, auf lange Sicht gesehen, die Vorräte an Kohle, die bei gleichbleibendem Energieverbrauch noch einige hundert Jahre ausreichen würden, begrenzt. Ebenso ist es mit den Reserven an Wasserkraft, die man zur Energieerzeugung ausnutzen kann. Die Braunkohle ist aber neben anderen auch ein wichtiger Rohstoff für die chemische Industrie, die uns, ebenfalls im Rahmen des Siebenjahrplans, in steigendem Maße unentbehrliche synthetische Werkstoffe liefert, so daß die Kohlevorräte geschont werden müssen. Deshalb ist es für die Zukunft notwendig, neue Energiequellen zu erschließen, um die weitere Entwicklung von Technik und Wirtschaft zu sichern. Wissenschaftler und Techniker haben aber bereits einen Ausweg gefunden. Die Ausnutzung der Kernenergie ist eine Möglichkeit, das Energieproblem zu lösen. Die Kern-

spaltung und die Kernverschmelzung, die Fusion, sind Prozesse, bei denen die Energie der Atomkerne frei gemacht werden kann.

Um die Kernenergie für die Energieversorgung nutzbar zu machen, muß man die Vorgänge der Kernspaltung beziehungsweise die der Kernverschmelzung unter Kontrolle bringen. Das ist bisher lediglich bei der Kettenreaktion in spaltbaren Materialien gelungen. Wissenschaftler und Techniker haben in gemeinsamer Arbeit dieses schwierige Problem gelöst. Viel schwieriger erscheint die Aufgabe, auch die Energie der Kernverschmelzung für friedliche Zwecke nutzbar zu machen. Aber auch hier sind schon, besonders von sowjetischen Forschern, die ersten Schritte getan worden. Man kann die Fusion bereits in kleinem Maßstab im Laboratorium durchführen.

**2. Bauelemente und Wirkungsweise eines Kernreaktors.** Sehr schwierig war die technische Lösung des Problems, die bei Kernspaltungen frei werdende Energie wirtschaftlich nutzbar zu machen. *Dazu muß man die Kettenreaktion steuern können.*

**Eine abgeschlossene Anlage, in der eine gesteuerte Kettenreaktion abläuft, heißt Reaktor.**

Der erste, von dem italienischen Physiker *Fermi* gebaute Reaktor wurde 1942 in Chikago in Betrieb genommen. Seitdem sind zahlreiche andere Reaktortypen entwickelt worden, die verschiedenen Zwecken dienen. Ein Reaktor besteht aus folgenden Hauptteilen (Abb. 43/1):

1. Spaltbares Material (Brennstoff, s. „Kanal für Uranstab“)
2. Bremssubstanz (Moderator, s. „Graphitblock“)
3. Regelstäbe (s. „Kanal für Regulierstab“)
4. Kühlsystem (s. „Kühlaggregat“)
5. Strahlenschutzmantel (s. „seitliche Schutzschicht“ und äußere Begrenzung)

Die Kettenreaktion läuft in den sogenannten *Brennelementen* ab, die meistens die Form von Stäben haben. Als Brennstoffe werden natürliches Uran, an  $U^{235}$  angereichertes Uran oder auch die reinen Isotope  $U^{235}$ ,  $U^{233}$  und  $Pu^{239}$  verwendet.

Als *Moderatoren* benutzt man meist gewöhnliches oder schweres Wasser, Graphit oder Beryllium. Diese Bremssubstanzen sind zwischen den Brennstäben angeordnet und bremsen die schnellen Spaltneutronen auf die für die Spaltvorgänge günstige thermische Geschwindigkeit.

Die *Regelstäbe*, auch *Absorberstäbe* genannt, bestehen aus Stoffen, die thermische Neutronen in hohem Maße einfangen, absorbieren. Hierfür eignen sich die Elemente Cadmium und Bor.

**Mit Hilfe der Regelstäbe kann man die Zahl der Neutronen im spaltbaren Material regulieren und so die Kettenreaktion steuern.**

Will man den Ablauf der Kettenreaktion hemmen, dann schiebt man die Absorberstäbe tiefer zwischen die Brennelemente ein. Dadurch werden viele Neutronen eingefangen, so daß sie für die Kettenreaktion verlorengehen. Damit umgekehrt die Kettenreaktion nicht zum Erliegen kommt, muß man die Regelstäbe weiter herausziehen.

Mit Hilfe des *Kühlsystems* wird die bei der Kettenreaktion frei werdende Energie abgeführt. Als *Kühlmittel* verwendet man meist gewöhnliches Wasser ( $H_2O$ ), schweres Wasser ( $D_2O$ ) oder auch flüssiges Metall, zum Beispiel Natrium.

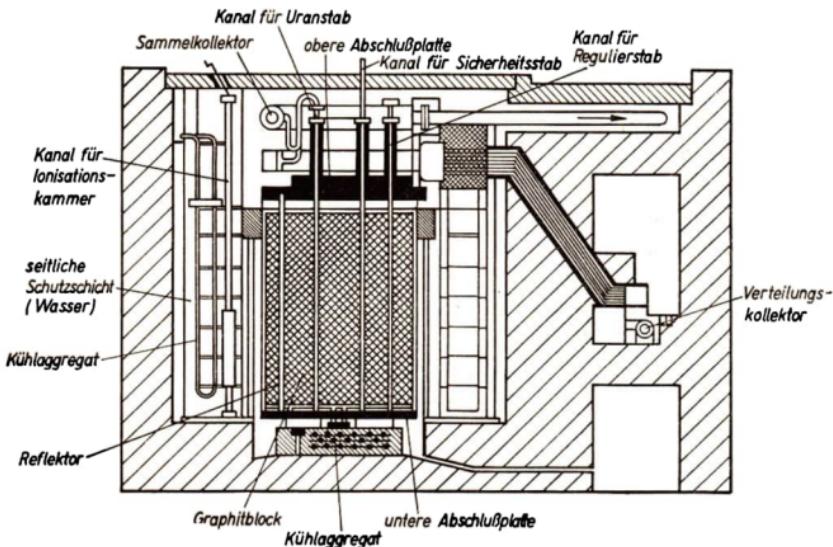


Abb. 43/1. Kernreaktor (schematisch)

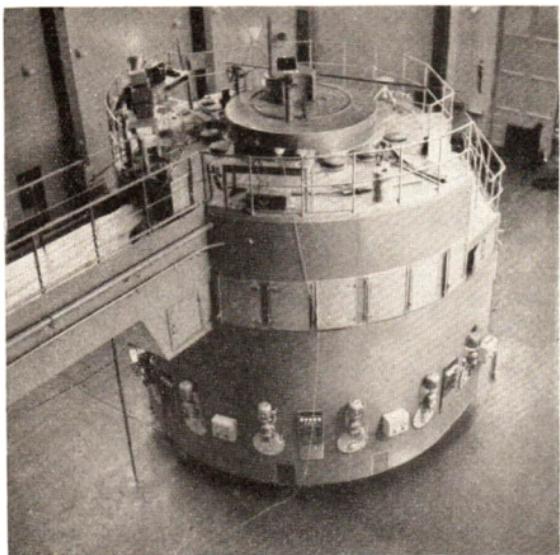
Ein zwei bis drei Meter dicker *Strahlenschutzmantel* aus Beton verhindert das Ausstreiten von Neutronen und  $\alpha$ -Strahlen aus dem Reaktor. Dadurch ist es überhaupt erst möglich, daß Menschen in der Nähe des Reaktors ohne Gefahr für ihre Gesundheit arbeiten können.

Die gesamte Reaktoranlage wird von einem zentralen *Schaltraum* aus gesteuert und automatisch überwacht. Bei diesen Steuerungsanlagen werden die modernsten Geräte der Steuerungs- und Regelungstechnik angewendet. Ohne die Entwicklung dieses Gebietes wäre die Steuerung eines Reaktors nicht möglich. Die Fernsteuerung und die Überwachung eines Reaktors sind außerdem wegen der Gesunderhaltung der ständig am Reaktor arbeitenden Menschen nötig.

**3. Reaktortypen — Der Rossendorfer Reaktor.** Nach ihrem Verwendungszweck teilt man die Reaktoren in Forschungsreaktoren, die zur Grundlagenforschung benutzt werden, und Energiereaktoren, die zur Energiegewinnung dienen, ein. Bei vielen Reaktoren kann man die im Reaktor frei werdenden Neutronen dazu verwenden, durch Kernreaktionen künstlich radioaktive Isotope zu erzeugen. Die Erzeugung dieser sogenannten Radioisotope in großen Mengen ist heute für verschiedene Gebiete der Wissenschaft und Technik notwendig (vgl. S. 52).

Je nach der Geschwindigkeit der Neutronen, die die Kernspaltung im spaltbaren Material hervorrufen, unterscheidet man *thermische* und *schnelle Reaktoren*.

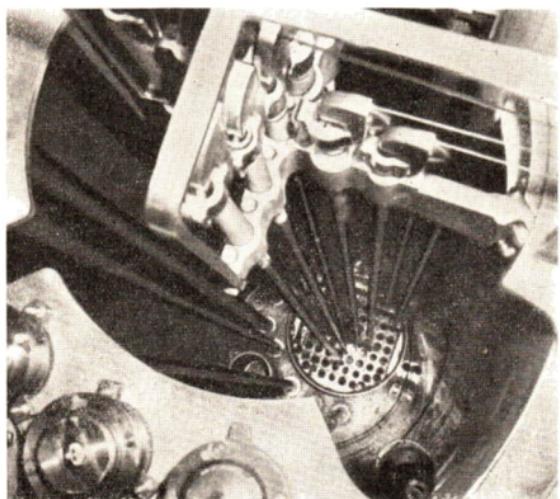
**In thermischen Reaktoren erzeugen thermische Neutronen die Spaltung.** Arbeitet ein Reaktor mit schnellen Neutronen, die eine Energie von über 0,1 MeV haben, so bezeichnet man ihn als *schnellen Reaktor*.



a) Gesamtansicht

Abb. 44/1. Der Rossendorfer Reaktor

b) Blick in das Innere des Reaktors



Schnelle Reaktoren arbeiten nur mit angereichertem Uran, reinem  $U^{235}$  oder  $U^{239}$  und ohne Moderator. Reaktoren, in denen durch die Kettenreaktionen spaltbares Material erzeugt wird, zum Beispiel Plutonium, nennt man *Brutreaktoren*.

Der Reaktor des Zentralinstituts für Kernphysik in Rossendorf bei Dresden ist ein *Forschungsreaktor* (Abb. 44/1). Sein Bau wurde durch die großzügige Hilfe der Sowjetunion ermöglicht. Nicht nur wichtige Bauteile stellten uns die sowjetischen Wissenschaftler zur Verfügung, sondern sie halfen auch beim Aufbau. Dadurch erhielten die Atomwissenschaftler in der Deutschen Demokratischen Republik die Möglichkeit, sich an der internationalen Forschungsarbeit auf diesem Gebiete aktiv zu beteiligen. Das war ohne einen eigenen Reaktor vorher nicht möglich. Außerdem sind wir dadurch in der Lage, selbst Radioisotope herzustellen (vgl. S. 52).

Der Brennstoff im Rossendorfer Reaktor ist Uran, das auf 10% an  $U^{235}$  angereichert ist. Als Moderator und Kühlmittel wird gewöhnliches, destilliertes Wasser verwendet. Die Brennstäbe

sind mit Aluminium verkleidet und haben einen Durchmesser von 1 cm und eine Länge von 60 cm. 16 Brennstäbe sind in einer Kassette vereinigt. Die kritische Masse des Rossendorfer Reaktors beträgt 3,2 kg  $U^{235}$ . Die Kernspaltung wird durch thermische Neutronen erzeugt. Die erreichte Leistung beträgt 2000 kW.

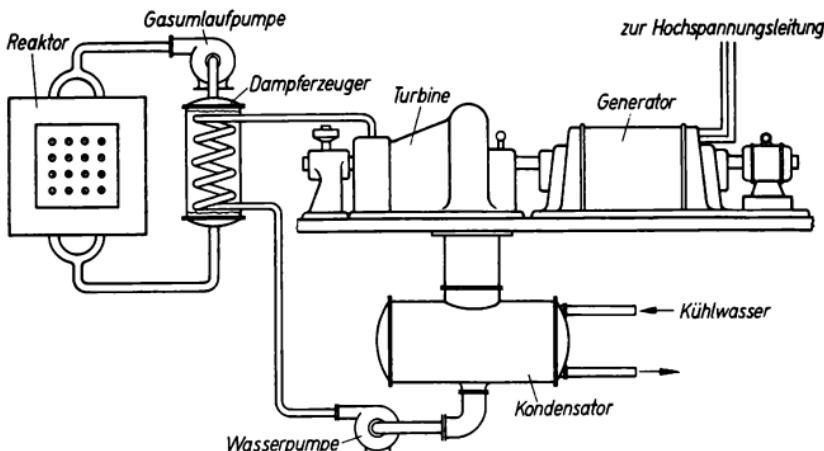


Abb. 45/1. Schematische Darstellung eines Reaktorkraftwerkes (stark vereinfacht)

**4. Das Reaktorkraftwerk.** Man gewinnt beim Atomreaktor Energie durch die Ausnutzung der bei der Uranspaltung entstehenden Wärme. Durch die Kühlmittel wird diese Wärme einem sogenannten *Wärmeaustauscher* (Dampferzeuger) zugeführt (Abb. 45/1). Da das aus dem Reaktor kommende Kühlmittel radioaktiv ist, kann es nicht unmittelbar zum Antrieb von Wärmekraftmaschinen verwendet werden. Deshalb ist noch ein zweiter, vom ersten getrennter Kreislauf notwendig, in dem zugleich hochgespannter Wasserdampf entsteht. Über eine Turbine und einen Generator wird dann elektrische Energie erzeugt. Sie ist das Endglied mehrfacher Energieumwandlungen:

Massendefekt durch Kernspaltung – Bewegungsenergie durch Spaltprodukte – – Wärmeenergie des Kühlmittels – Wärmeenergie des Austauschmittels – – mechanische Energie der Dampfturbine – elektrische Energie in Generator.

Eine vereinfachte Darstellung der Energieumwandlung zeigt Abb. 45/2.

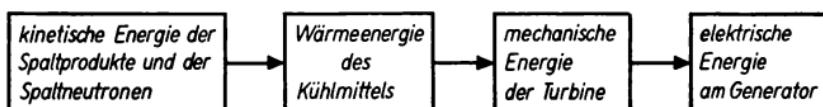


Abb. 45/2. Energieumwandlungen in einem Reaktorkraftwerk

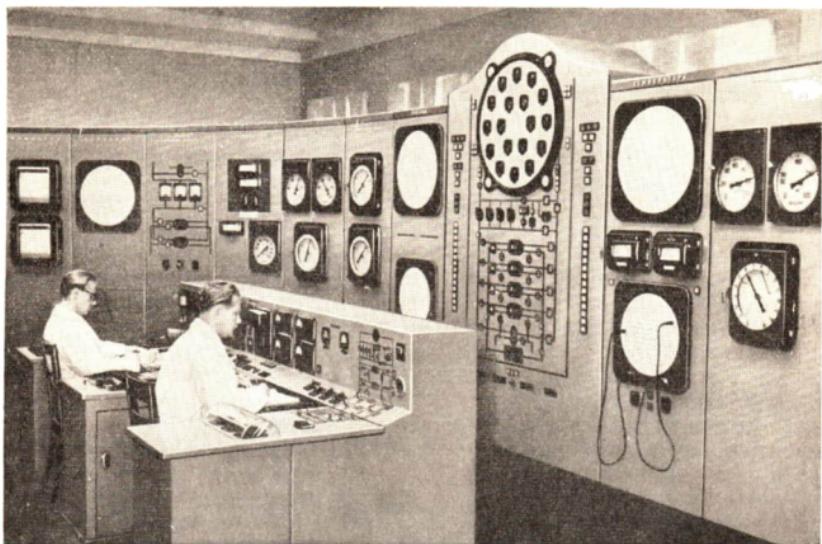


Abb. 46/1. Zentrales Schaltpult des ersten sowjetischen Reaktorkraftwerkes



Abb. 46/2. Überwachung der radioaktiven Strahlung in den Räumen eines Reaktorkraftwerkes

Bei allen Energieumwandlungen treten sogenannte Verluste auf. Infolge dieser Tatsache und besonders wegen der noch in der Entwicklung stehenden technischen Anlagen ist der vom Reaktorkraftwerk erzeugte Strom gegenwärtig noch teurer als der Strom von anderen Elektrizitätswerken.

In den Reaktorkraftwerken nutzt man im großen Maßstab die modernen Möglichkeiten der Fernsteuerung und Fernüberwachung aus. Die Entwicklung der Reaktorkraftwerke stellte der Steuerungs- und Regelungstechnik neue Aufgaben und führte zu einer schnellen Entwicklung dieses Gebietes. Von einem zentralen *Schaltpult* aus können sämtliche Vorgänge im Kraftwerk überwacht werden, so daß ein Betreten der gefahrbringenden Räume nicht notwendig ist (Abb. 46/1). Im Schaltraum kann außerdem festgestellt werden, ob in irgendeinem Raum der gesamten Anlage radioaktive Strahlung vorhanden ist und welche Stärke sie hat. Das geschieht durch in den Räumen angebrachte Geigerzähler (Abb. 46/2). Für einen ausreichenden Schutz der im Kraftwerk arbeitenden Menschen ist dadurch gesorgt.

Das erste Reaktorkraftwerk der Welt, das nur der Erzeugung von elektrischer Energie dient, wurde am 27. Juni 1954 in der Sowjetunion in Betrieb genommen (Abb. 47/1). Es erreicht eine elektrische Leistung von 5000 kW. Sein Reaktor läuft mit bis zu 5% an  $U^{235}$  angereichertem Uran als Brennstoff und Graphit als Moderator. 1958 wurde in der Sowjetunion der erste Bauabschnitt (100 000 kW) des größten Reaktorkraftwerkes der Welt mit einer Gesamtleistung von 600 000 kW fertiggestellt. Der Bau eines Reaktorkraftwerkes ist jedoch sehr viel teurer und dauert wesentlich länger als der Bau eines mit Kohle oder Öl betriebenen Kraftwerkes. Da die Sowjetunion noch über reiche Vorräte an Erdöl, Braun- und Steinkohle verfügt, die mit verhältnismäßig geringen Mitteln erschlossen werden können, werden gegenwärtig vorwiegend Kraftwerke errichtet, die mit solchen Brennstoffen betrieben werden. Außerdem hat der Bau von diesen sogenannten Wärmekraftwerken den Vorteil, daß in verhältnismäßig kurzer Zeit neue große Energiemengen zur Verfügung stehen. Dies ist für die schnelle Entwicklung der Volkswirtschaft in der Sowjetunion besonders wichtig.

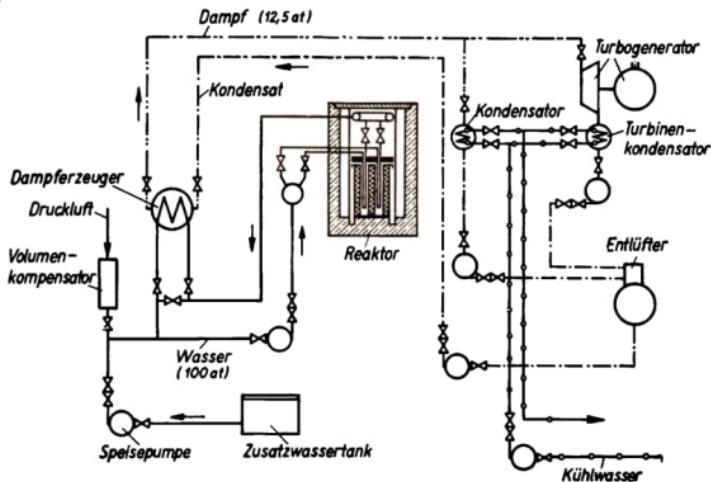


Abb. 47/1. Schema des ersten Reaktorkraftwerkes der Welt

Auch in der Deutschen Demokratischen Republik entsteht bis 1962 am Großen Stechlinsee bei Berlin mit tatkräftiger Unterstützung sowjetischer Wissenschaftler das erste Reaktorkraftwerk Deutschlands. Es wird eine Leistung von 70000 kW haben und in einem zweiten Bauabschnitt auf die doppelte Leistung erweitert werden. Damit wird unsere Republik zu den wenigen Ländern gehören, die bereits Reaktorkraftwerke haben. Im Rahmen des Siebenjahrplans werden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Anwendung der Atomenergie für friedliche Zwecke verstärkt fortgeführt.

**5. Anwendung der Kernenergie zum Antrieb von Schiffen.** Die Kernenergie wird bereits heute zum *Antrieb von Schiffen* ausgenutzt. In der Sowjetunion wurde im September 1959 der erste durch Kernenergie angetriebene Eisbrecher fertiggestellt. Der Eisbrecher *Lenin* hat eine Länge von 134 m, eine Breite von 27,6 m und eine Wasserdrängung von 16000 BRT. Er ist damit der größte Eisbrecher der Welt. Eisbrecher müssen eine sehr starke Maschinenleistung haben. Da die üblichen Eisbrecher täglich etwa 50 t Heizöl verbrauchen, nehmen die notwendigen Vorräte an Brennstoff etwa ein Drittel des gesamten Schiffsraumes ein.

Der Atomeisbrecher ist mit drei unabhängigen voneinander arbeitenden Reaktoren ausgerüstet, die mit angereichertem Uran arbeiten und Wasser als Moderator und Kühlmittel verwenden. Zu einer Wärmeleistung von 150000 kW kommt noch eine mechanische Leistung von 32000 kW. Die bei der Kühlung des Reaktors außerdem anfallende Wärme wird zur Heizung des Schiffes verwendet. Zum Brechen des Eises wird ein neues Verfahren angewandt. Heißes Wasser wird mit einem Druck von über 1000 Atmosphären gegen die Eismassen geschleudert und macht diese nicht nur infolge der Erwärmung brüchig, sondern zerteilt sie außerdem mechanisch. Ein Schiff dieser Größe verbraucht bei ununterbrochenem Betrieb im Laufe eines Jahres nur ungefähr 80 kg Uran, während ein gleich großes, ölbetriebenes Schiff annähernd 100 000 t Rohöl benötigt. Der Eisbrecher kann ohne Brennstoffaufnahme 1 bis 2 Jahre laufen.

Es ist anzunehmen, daß die Atomenergie später auch als *Antriebsmittel für Landfahrzeuge und Flugzeuge* beziehungsweise *Raumschiffe* verwendet wird. Es liegen bereits erste Entwürfe für eine Atomlokomotive vor. Die Spurweite müßte jedoch gegenüber der heute üblichen wesentlich größer sein. Für Atomflugzeuge gibt es mehrere sehr verschiedenartige Entwürfe. Die Schwierigkeiten liegen unter anderem in dem notwendigen Strahlenschutz, der bei dem heutigen Stand der Technik noch ein sehr hohes Gewicht haben müßte.

**6. Die Atombombe.** Als sichtbar wurde, welche gewaltigen Energiemengen bei der Kernspaltung freiwerden, begannen in den imperialistischen Ländern Versuche, diese Energie für Kriegszwecke auszunutzen. Besonders in den USA wurde die technische Verwirklichung der ungesteuerten Kettenreaktion vorangetrieben.

Zunächst wurde reines Uran ( $U^{235}$ ) verwendet. 1 kg  $U^{235}$  spaltet sich, sofern die Kettenreaktion nicht gehemmt wird, in weniger als  $\frac{1}{1000}$  s. Die bei der vollständigen Spaltung von 1 kg  $U^{235}$  freiwerdende Energie entspricht der Energie, die bei der Explosion von etwa 23000 t *Trotyl* frei wird. *Trotyl* oder Trinitrotoluol ist ein viel verwendeter Sprengstoff.

Die überall vorhandenen freien Neutronen lösen in reinem Uran, sofern die kritische Masse vorhanden ist, eine Kettenreaktion aus. Das Uran muß also in einer

Atom bombe in voneinander abgeschirmten unterkritischen Massen angeordnet werden. Die Bombe wird dadurch gezündet, daß zwei unterkritische Massen durch eine Zündvorrichtung aufeinander geschossen werden (Abb. 49/1).

Mit welcher Absicht die USA-Imperialisten Atomwaffen entwickelt haben, wurde zu Ende des zweiten Weltkrieges deutlich. Der Krieg gegen Japan war durch den Vormarsch der sowjetischen Truppen bereits entschieden, da explodierte am 6. August 1945 über Hiroshima eine amerikanische Uran-Atombombe. 80000 Menschen waren sofort tot, viele Tausende wurden durch Brand- oder Strahlenwirkung so verletzt, daß sie langsam dahinsiechen mußten. Noch heute sterben japanische Menschen teilweise unter Qualen an den Folgen dieser Bombe. Außerdem waren 90 Prozent der Gebäude von Hiroshima zerstört, und die Umgebung der Stadt war radioaktiv verseucht. Die amerikanischen Nachrichtenbüros meldeten am nächsten Tag lakonisch, daß über der japanischen Stadt Hiroshima eine Atombombe abgeworfen worden sei. Drei Tage später wurde die Stadt Nagasaki das Opfer einer amerikanischen Plutonium-Atombombe.

Auf Kosten des Lebens und der Gesundheit unzähliger Männer, Frauen und Kinder hatten die amerikanischen Imperialisten eine „neue Waffe taktisch erprobt“ und meinten, der Welt gezeigt zu haben, daß ein Widerstand gegen ihren Anspruch auf Weltherrschaft nutzlos sei.

Die Entwicklungsarbeiten an diesen furchtbaren Massenvernichtungsmitteln gingen weiter und führten zur Wasserstoffbombe. Sie wird mit Hilfe einer Uran- oder Plutoniumbombe gezündet (Abb. 49/2). Dann setzt die thermonukleare Reaktion ein.

Es bilden sich schwerer Wasserstoff und Helium, wobei ungeheure Energiemengen frei werden.

Für die Wasserstoffbombe, auch H-Bomben genannt, gibt es keine Größenbeschränkung, da bei ihnen keine kritische Masse existiert. In ihrer Wirkung übertreffen die H-Bomben die „einfachen“ Atombomben um ein Hundertfaches; so hat bereits eine mittelgroße Wasserstoffbombe die 600- bis 800fache Wirkung der Uranbombe von Hiroshima.

Die verheerende Wirkung der Atombombe ergibt sich aus drei Faktoren: Druck, Hitze, radioaktive Strahlung. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Wirkung einer mittelgroßen H-Bombe. Die schwerwiegenden Folgeerscheinungen, zum Beispiel Auswirkungen der radioaktiven Bestrahlung bei Überlebenden, gehen aus der Tabelle auf S. 50 nicht hervor.

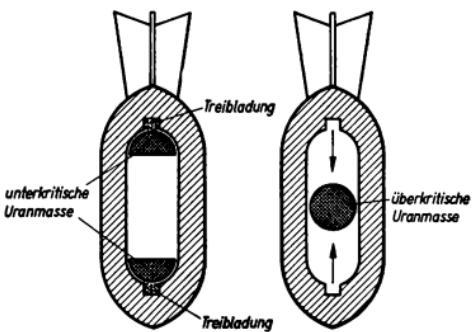


Abb. 49/1. Schematische Darstellung einer Uran-Atombombe

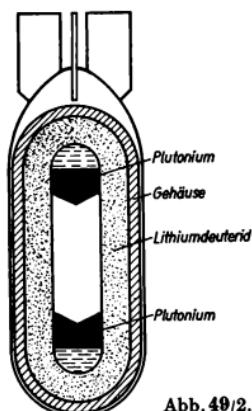


Abb. 49/2. Schematische Darstellung einer Wasserstoffbombe



Bei Kettenreaktionen von derartigen Ausmaßen treten Faktoren auf, die heute noch nicht theoretisch errechnet werden können; deshalb wurden für die Entwicklung von Atomwaffen Versuche durchgeführt. Die Wirkung einer auf den Marshall-Inseln gezündeten H-Bombe übertraf zum Beispiel die vorausberechnete Wirkung um das Sechsfache (Abb. 50/1).

Allein diese Versuche sind eine große Gefahr für die Bevölkerung der Erde, da bei der Explosion *radioaktive Partikel* mit verschiedenen Halbwertszeiten entstehen. Dieser radioaktive Staub kann durch Luftströmungen über weite Strecken getragen werden und sich dort schädigend auf die Lebewesen auswirken. Dadurch besteht nicht nur die Gefahr, daß sich ein so gefährliches Massenvernichtungsmittel in den Händen der Imperialisten befindet, sondern auch die, daß weitere Experimente mit Atomwaffen die radioaktive Verseuchung unserer Erde nach sich ziehen.

Abb. 50/1. Explosionspilz einer Wasserstoffbombenexplosion

*Die Wirkung einer mittleren H-Bombe (unmittelbare Explosionswirkung)*

Abstand vom Explosionszentrum	15 km	30 km	60 km	120 km
Wirkung der Wärmestrahlung	tödliche Verbrennungen, Totalbrände	schwere bis tödliche Verbrennungen, Entflammung aller leicht entzündlichen Gebäude, Anlagen usw.	noch leichte bis schwere Verbrennungen, Brände möglich	leichte Hitze-defekte
Wirkung der radioaktiven Strahlung	absolut tödlich	noch tödlich, schwere Hautschäden	noch Schädigungen bei entsprechenden Windverhältnissen	
Wirkung der Druckwelle	völlige Zerstörung von Gebäuden usw.	mittlere bis schwere Zerstörung		

Solange Atomwaffen in den Händen von imperialistischen Machthabern sind, müssen wir uns und die Errungenschaften unserer Arbeit vor einem überraschenden Überfall schützen.

Angesichts vor allem der verheerenden Strahlenwirkung von Atomwaffen hat sich bei einigen Menschen die Meinung gebildet, im Falle eines Atombombenwurfs gäbe es keinen wirksamen Schutz.

Im Zentrum einer Atombombenexplosion gibt es natürlich keinen Schutz; dieses Zentrum macht jedoch nur ein Prozent der Fläche aus, die von einem Atombombenabwurf in Mitleidenschaft gezogen wird. Mit der weiteren Entfernung vom Zentrum nehmen die Aussichten auf einen wirksamen Schutz ständig zu; zum Beispiel schützen Erdlöcher und Gräben weitgehend gegen die Druck- und Hitzewelle. Da die  $\gamma$ -Strahlung mit der Entfernung vom Zentrum der Explosion wesentlich abnimmt, können Erdwälle und dicke Mauern einen wirksamen Schutz dagegen bieten. Je besser wir die Wirkungen dieser scheußlichen Waffe kennen, und je gründlicher wir uns mit Schutzmaßnahmen befassen, desto besser können wir uns schützen.

Ein besserer Schutz gegen den Atomkrieg aber, an dem jeder Mensch mitarbeiten kann, ist der aktive weltweite Kampf dafür, daß keine Atombombe mehr gebaut wird, die Atombombenversuche aufhören und die vorhandenen Bestände an Atomwaffen vernichtet werden. Das haben viele Menschen in allen Teilen der Erde erkannt und sich zur großen Weltfriedensbewegung zusammengeschlossen, die eine starke Kraft in der Auseinandersetzung mit den Atomkriegern darstellt.

In der gegenwärtigen Lage ist jedoch die wirksamste Waffe gegen die Gefahren des Atomkrieges die Tatsache, daß die Sowjetunion ebenfalls Atomwaffen besitzt. Sie hat rechtzeitig erkannt, welche Gefahr die Atomwaffen in der Hand der Imperialisten für die Menschheit bedeuten. Da die Sowjetunion außerdem im Besitz interkontinentaler ballistischer Raketen ist und mit ihr zu jeder Zeit jeden beliebigen Ort der Erde erreichen kann, hat sie die wirkliche Überlegenheit auf dem Gebiet der Atombewaffnung.

Das erfüllt uns mit Stolz über die wissenschaftlichen und technischen Leistungen der sowjetischen Menschen und gibt uns zugleich die Zuversicht, daß die Imperialisten einen Atomkrieg nicht ohne weiteres auslösen werden. Daß die Sowjetunion diese Atomwaffen nur zum Schutz des sozialistischen Lagers und der gesamten Menschheit entwickelt hat, geht u. a. aus dem Vorschlag von Ministerpräsident Chruschtschow anlässlich seiner Amerikareise im September 1959 vor der Vollversammlung der Vereinten Nationen hervor: „Alle im Besitz der Staaten befindlichen Atom- und Wasserstoffbomben werden vernichtet, ihre weitere Produktion wird eingestellt. Die Energie der spaltbaren Materialien wird ausschließlich für friedliche wirtschaftliche und wissenschaftliche Zwecke verwendet. Die Raketen aller Reichweiten für militärische Zwecke werden abgeschafft, und die Raketentechnik dient nur noch Transportzwecken und der Erschließung des Weltraumes zum Wohle der ganzen Menschheit.“

**7. Frédéric und Irène Joliot-Curie.** In den Reihen der Kämpfer für Frieden und Fortschritt stehen viele der Wissenschaftler, die die Atomenergie entdeckt und weiter erforscht haben. Zu ihnen gehören auch *Frédéric* und *Irène Joliot-Curie*, die zu den bedeutendsten Atomforschern zählen. *Frédéric Joliot-Curie* hat ein Verfahren zur Messung der Halbwertszeit von sehr kurzlebigen Substanzen entwickelt. Seine

Untersuchungen bereiteten das Auffinden des Neutrons vor. Ihre Krönung fanden diese Arbeiten darin, daß er gemeinsam mit seiner Frau die *künstliche Radioaktivität* entdeckte. Im Jahre 1935 erhielt das Ehepaar Joliot-Curie den *Nobelpreis für Chemie*. Frédéric Joliot-Curie hat auch Möglichkeiten zur Ausnutzung der bei der Spaltung von  $U^{235}$  freiwerdenden Energie entwickelt. Es ist sein Verdienst, daß am 15. Dezember 1948 der *erste französische Atomreaktor „Zoë“* in Betrieb genommen worden ist.

Frédéric Joliot-Curie hat schon während seines Studiums am chemisch-physikalischen Institut in Paris entschieden gegen jeden Krieg Stellung genommen. Als Praktikant kam er dann unmittelbar mit Arbeitern in Berührung und lernte hierbei ihre sozialen Probleme kennen. Dieser Einfluß wurde mitbestimmend für seine spätere politische Entwicklung, die ihren Höhepunkt fand, als er 1942 der *Kommunistischen Partei Frankreichs* beitrat. Er nahm am Kampf gegen die faschistische Besetzung Frankreichs teil. 1946 wurde er *Hoher Kommissar für Atomenergie* in Frankreich. Da er es ablehnte, Ergebnisse der Atomforschung kriegerischen Zwecken dienstbar zu machen, wurde er einige Jahre später seines Postens enthoben.

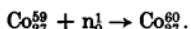
Als die *Weltfriedensbewegung* immer mehr erstarkte und 1949 der *Weltfriedensrat* gegründet wurde, wählte man Frédéric Joliot-Curie zum Präsidenten. In dieser Eigenschaft wurde er Initiator des *Stockholmer Appells* zur Ächtung der Atombombe, zu dem sich über 500 Millionen Menschen aller Erdteile durch ihre Unterschrift bekannten. Seine Arbeit für den Frieden wurde 1951 durch die Verleihung des Leninpreises gewürdigt. Am 14. August 1958 starb Frédéric Joliot-Curie an den Folgen einer Krankheit, die er sich durch seine Forschungsarbeit zugezogen hatte.

Der Präsident des Deutschen Friedensrates, Dr. Dr. h. c. *W. Friedrich*, sagte in seinen Gedenkworten über Frédéric Joliot-Curie: „Er gehört zu den Großen, die der Menschheit das Tor in das Atomzeitalter aufgestoßen haben, und er gehört zugleich zu den Ersten, die erkannten, daß diese neue Epoche gebieterisch neue Formen des internationalen Lebens und der zwischenmenschlichen Beziehungen verlangt.“

## 10. Die Anwendung radioaktiver Isotope

**1. Die Erzeugung von Radioisotopen.** Die in der Atomphysik gewonnenen Erkenntnisse werden nicht allein für die Energieerzeugung angewandt. Sie leisten der Menschheit auch auf andere Weise große Dienste. Besondere Bedeutung für die Wissenschaft und Praxis haben die *radioaktiven Isotope*, die *Radioisotope*, erlangt.

Man kann Radioisotope grundsätzlich in jedem Reaktor gewinnen, sowohl in den ausschließlich der Forschung dienenden Versuchs- oder Forschungsreaktoren, als auch in den Reaktoren der Atomkraftwerke. Will man von einem Element, z. B. von Kobalt, ein radioaktives Isotop erhalten, so bringt man es in den Moderator eines Reaktors. Die zahlreichen Neutronen, die den Moderator durchdringen, vereinigen sich zum Teil mit den Kobaltkernen und bilden dadurch andere radioaktive Kerne:



$Co_{27}^{60}$  ist radioaktiv und geht unter Aussendung von  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen in den Nickelkern  $Ni_{28}^{60}$  über:



Die Halbwertszeit für  $\text{Co}^{60}$  beträgt 5,3 Jahre.  $\text{Co}^{60}$  ist zur Zeit der stärkste  $\gamma$ -Strahler. Die intensive  $\gamma$ -Strahlung wird in der Technik und in der Medizin weitgehend ausgenutzt (vgl. S. 55 und 57).

Auf diese Weise kann man verhältnismäßig billig und in vielen Fällen auch einfach Radioisotope der verschiedensten Elemente herstellen. Beim Arbeiten mit Radioisotopen sind besondere Schutzmaßnahmen notwendig. Die radioaktiven Stoffe befinden sich hinter strahlensicheren Wänden und Fenstern. Mit Hilfe eines besonderen Übertragungsmechanismus, den man *Manipulator* nennt, kann der Wissenschaftler die Bewegungen seiner Hand auf Greifwerkzeuge im Innern des Arbeitsraumes übertragen (Abb. 53/1).

**2. Die Methode der markierten Atome — Anwendungen in der Medizin.** In ihrem chemischen und biologischen Verhalten zeigen die Radioisotope die gleichen Eigenschaften wie die entsprechenden stabilen Atome. Sie machen aber, im Gegensatz zu den stabilen Atomen, ihre Anwesenheit jeweils durch die von ihnen ausgesandte Strahlung kenntlich. Man kann sie daher, auch in geringsten Mengen, mit Hilfe von Fotoplatten, Fluoreszenzschirmen und Geiger-Müller-Zählrohren nachweisen. In dieser Nachweisbarkeit liegt eine große und vielseitige Bedeutung der Radioisotope. Man spricht daher von *markierten Atomen*.

Injiziert man beispielsweise in eine Armvene eine Kochsalzlösung ( $\text{NaCl}$ ), die eine geringe Menge radioaktives Natrium enthält, so kann man den Weg dieser markierten Atome im Blutkreislauf verfolgen. Nach etwa einer Minute lassen sich die radioaktiven Atome bereits im anderen Arm nachweisen. Ungefähr eine Stunde später haben sie sich im gesamten Blutkreislauf verteilt. Daraus kann der Arzt wichtige Rückschlüsse auf den Blutkreislauf ziehen.

Der wichtigste Bestandteil im Farbstoff der roten Blutkörperchen, dem Hämoglobin, ist das Eisen. Mit radioaktiven Eisenatomen lässt sich die Lebensdauer der roten Blutkörperchen und damit eine unter Umständen vorhandene Blutkrankheit feststellen. Gleichzeitig kann der gesamte Blutkreislauf kontrolliert werden. Hierauf beruhen wichtige Erkenntnisse der medizinischen Forschung.

Viele Vorgänge im menschlichen Körper, die bisher der medizinischen Wissenschaft unbekannt geblieben waren, sind mit Hilfe von Radioisotopen erforscht

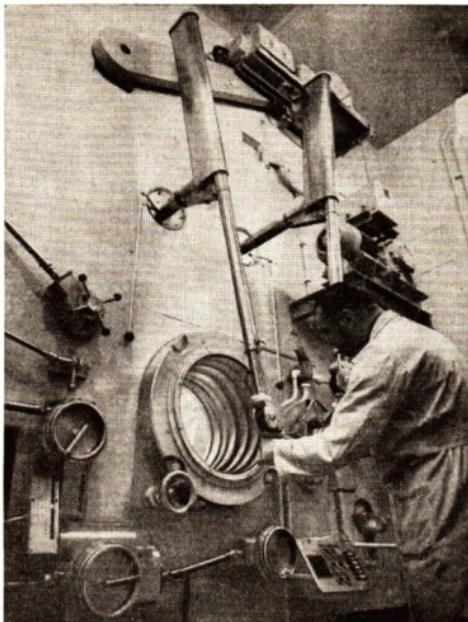


Abb. 53/1. Wissenschaftler bei der Arbeit mit dem Manipulator

worden. So hat man beispielsweise für den Stoffwechsel folgendes nachgewiesen: Die mit der Nahrung dem Körper zugeführten Stoffe werden nicht unmittelbar für die Aufrechterhaltung der Lebensvorgänge verwendet, sondern zunächst gespeichert. Abgebaut werden immer nur die vorhandenen Reserven. In dem Fett unserer Nahrung ist Wasserstoff enthalten. Man hat durch Zugabe von radioaktivem Wasserstoff, von Tritium, festgestellt, daß das neu zugeführte Fett zunächst an bestimmten Stellen des Körpers gespeichert wird. Dasselbe konnte man beim Eiweiß mit Hilfe von radioaktivem Stickstoff nachweisen. Auch über den Weg und Verbleib aller übrigen dem Körper zugeführten Stoffe kann man durch diese Methode Aufschluß erhalten. Das Ergebnis dieser Versuche war die Feststellung, daß sich der größte Teil unseres Körpers im Verlauf eines Jahres erneuert.

Radioisotope sind zu unentbehrlichen Hilfsmitteln bei der Diagnose, das heißt, bei der Feststellung von inneren Erkrankungen geworden. Andererseits kann man Radioisotope auch in vielen Fällen zur Heilung von Krankheiten, zur Therapie, verwenden. Große Schwierigkeiten bereitet die frühzeitige Feststellung von bösartigen Geschwulstkrankheiten, zum Beispiel von Krebs. Das wuchernde krankhafte Gewebe nimmt Phosphor schneller auf als das gesunde. Führt man dem Körper mit der Nahrung radioaktiven Phosphor zu, so kann man mit Hilfe der Fotoplatte einen Krankheitsherd und die evtl. schon vorhandenen Tochtergeschwülste, die sogenannten Metastasen, erkennen (Abb. 54/1). Die Behandlung kann deshalb schon rechtzeitig einsetzen und sich auch auf die Metastasen erstrecken, die besonders gefährlich sind, weil sie bisher nicht erkannt werden konnten. Zum Nachweis von Schilddrüsenkrebs und den bereits vorhandenen Tochtergeschwülsten verwendet man das radioaktive Jod ( $J^{132}$ ). Radioaktives Xenon, in sehr geringen Mengen der Atmungsluft beigemischt, kann nach neuesten Forschungen die frühzeitige und einwandfreie Erkennung des Lungenkrebses ermöglichen. Gerade die rechtzeitige Diagnose und Therapie sind bei diesen Krankheiten besonders wichtig.

Es ist schon seit langer Zeit bekannt, daß Radiumstrahlen je nach ihrer Intensität jedes Gewebe, besonders aber das Gewebe bösartiger Geschwülste zerstören oder im Wachstum hemmen (vgl. S. 9). Eine umfassende Anwendung in den Krankenhäusern aber scheiterte daran, daß Radium nicht in beliebig großer Menge zur Verfügung stand und sehr teuer war. Seit der Entdeckung der künstlichen Radioaktivität lassen sich radioaktive Isotope in beliebiger Menge herstellen. Besonders geeignet ist für die Therapie das Kobaltisotop  $Co^{60}$

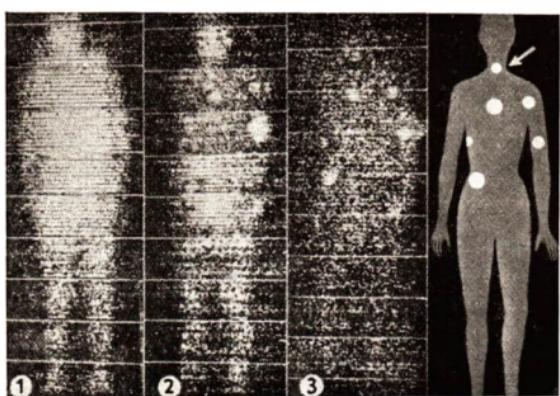


Abb. 54/1. Drei Fotoplatten zeigen die zunehmende Konzentration von  $J^{131}$  an krebskranken Körperstellen

(vgl. S. 53). Bei der Anwendung ist der Arzt nicht mehr auf Bruchteile von einem Gramm beschränkt, sondern es steht in größerer Menge zur Verfügung. Für die Behandlung hat man ein besonderes Gerät entwickelt, die sogenannte *Kobaltkanone* (Abb. 55/1).

Auseinem abgeschirmten Kanal treten die  $\gamma$ -Strahlen gebündelt aus und lassen sich auf eine engbegrenzte Stelle des Körpers richten. Wegen der großen Energie der  $\gamma$ -Strahlen können nicht nur oberflächlich, sondern auch tiefer liegende Geschwülste radioaktiv behandelt werden. Damit das darüberliegende gesunde Gewebe geschont wird, bestraht man den Krankheitsherd durch ständiges Schwenken des Gerätes aus verschiedenen Richtungen (Abb. 55/2). Zur Schonung des gesunden Gewebes kann man das radioaktive Präparat, zum Beispiel Chromphosphat, auch in die Geschwulst einführen. Da bestimmte Organe gewisse Stoffe bevorzugt aufzunehmen, wie zum Beispiel die Schilddrüse Jod aufnimmt, führt man Radioisotope unmittelbar dem Stoffwechsel durch Injektion oder mit der Nahrung zu. Die Isotope gelangen dann auf Grund dieser bevorzugten Aufnahme vorwiegend in das kranke Organ und werden dort wirksam. Diese Methode wendet man beispielsweise bei der Behandlung des Schilddrüsenkrebses an. Dem Körper des Patienten wird hierbei radioaktives Jod zugeführt. Weil die Radioisotope, im Gegensatz zum Radium, verhältnismäßig kurze Halbwertszeiten haben, klingt ihre Wirkung bald ab. Eine Schädigung durch eine Dauerwirkung tritt daher nicht ein.

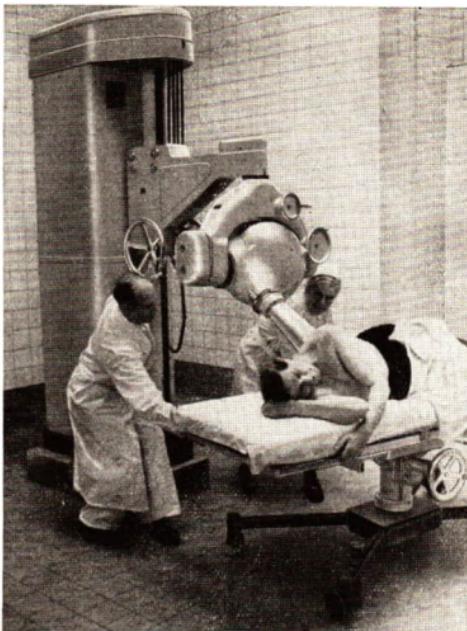


Abb. 55/1. Gerät zur Bestrahlung krebskranker Körperteile, sogenannte Kobaltkanone

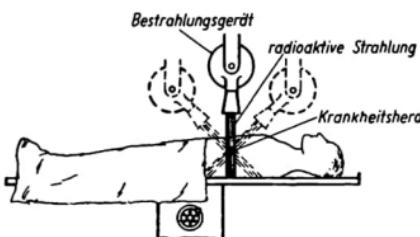


Abb. 55/2. Bestrahlung mit schwenkbarem Kobaltpendelgerät

**3. Anwendungen in Biologie und Landwirtschaft.** In der Biologie und in der Landwirtschaft macht man von der Methode der markierten Atome sehr vielseitigen

Gebrauch. Mit Hilfe markierter Atome läßt sich feststellen, an welcher Stelle und innerhalb welcher Zeit eine Pflanze die mit dem Dünger zugeführten Nährstoffe ablagert. Radioaktiver Phosphor, der dem phosphorhaltigen Düngemittel beigemischt war, wurde bei den verschiedenen Arten der Versuchspflanzen nicht an den gleichen Stellen nachgewiesen. Bei Tomaten fand er sich besonders in den Wurzeln und Blatträndern, bei den Erbsen sammelte er sich ebenfalls in den Wurzeln, in der Spitze des Triebes und in den Blättern. Durch solche Untersuchungen kann festgestellt werden, in welchem Entwicklungsstadium der Pflanzen Dünger zu geben ist, wie tief er in den Boden gebracht werden muß, welche Körnung besonders günstig ist u. a. Die Auswertung und praktische Anwendung dieser Ergebnisse steigert den Ertrag und führt zu einer rationellen Ausnutzung der Düngemittel. Solche Untersuchungen werden planmäßig u. a. in den Instituten der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften durchgeführt.

In der Pflanze werden aus anorganischen Stoffen mit Hilfe der aus der Sonnenstrahlung stammenden Energie organische Stoffe aufgebaut. Dieser Vorgang wird als Fotosynthese bezeichnet. Früher nahm man zum Beispiel an, daß der zum Aufbau der Kohlehydrate notwendige Kohlenstoff ausschließlich aus der Luft von den Blättern aufgenommen wird. Sowjetische Forscher haben mit Hilfe markierter Kohlenstoffatome nachgewiesen, daß im Durchschnitt etwa 10% bis 15% des assimilierten Kohlenstoffes den Karbonaten des Bodens durch die Wurzeln entnommen werden.

Von großer Bedeutung ist die Methode der markierten Atome auch für die Schädlingsbekämpfung. Für die Erforschung der Verbreitung von Insekten hat man beispielsweise Fliegen Zuckersirup verabreicht, der radioaktiven Phosphor enthält. Die Fliegen verbreiteten sich in wenigen Stunden über einen ganzen Häuserkomplex. Am nächsten Tag konnte man sie schon in zwei bis drei Kilometer Entfernung nachweisen.

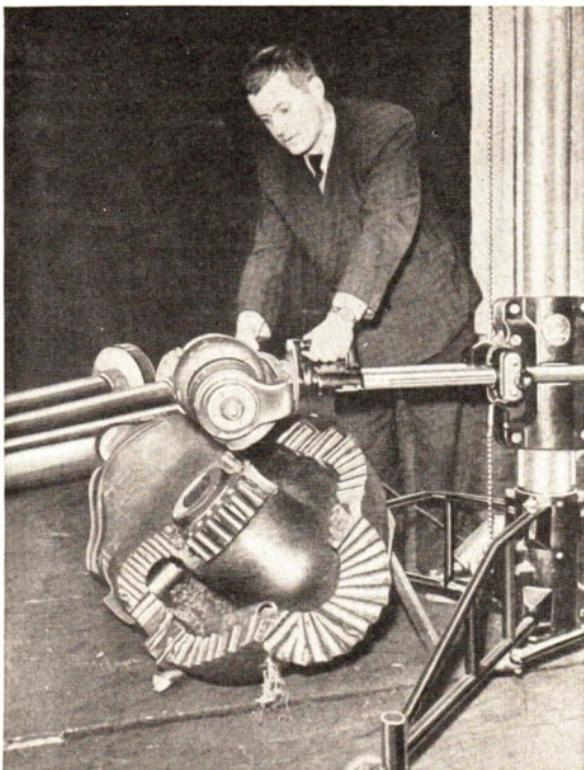
Radioaktive Strahlen wirken besonders stark auf die Keimzellen. Sie verursachen dadurch Erbänderungen, sogenannte Mutationen. Nach den verbrecherischen Bombenabwürfen auf Hiroshima und Nagasaki hat die Zahl der Mißgeburten in den verseuchten Gebieten erschreckend stark zugenommen.

Die künstliche Erzeugung von Mutationen nützt man bei der Pflanzenzüchtung aus. Bestrahlt man Pflanzen oder Samen mit  $\gamma$ - oder Neutronenstrahlen, so werden unter der Vielzahl der Mutationen einige mit wertvollen Eigenschaften auftreten. Die Arbeit der Züchter, die sich sonst über Jahrzehnte erstreckte, kann auf eine verhältnismäßig kurze Zeit beschränkt werden. Große Erfolge hat man auf diesem Gebiet besonders in der Sowjetunion erzielt. Man hat auf diese Art Getreidesorten, die gegen bestimmte Pilzkrankheiten immun sind, und Obstsorten mit kürzeren Reifezeiten gezüchtet.

Die radioaktiven Strahlen können auch zur Lebensmittelkonservierung benutzt werden, da durch die Strahlen Bakterien und andere Fäulniserreger abgetötet werden. Bei Kartoffeln wird durch die Strahlen das frühzeitige Keimen verhindert. Rüben, Zwiebeln und andere Früchte konnten längere Zeit frisch erhalten werden. Sowjetische Wissenschaftler haben ein Verfahren entwickelt, um eingelagertes Getreide und Mehl durch Bestrahlung vor Schädlingsbefall zu schützen.

**4. Anwendungen in der Technik. a) Werkstoffprüfung.** Bevor man Werkstücke aus Guß- oder Schmiedeeisen bearbeitet oder in Maschinen und Geräte einbaut,

Abb. 57/1  
Durchleuchtung  
eines Werkstückes  
mit  $\gamma$ -Strahlen



müssen sie auf innere Fehler genau kontrolliert werden. Das kann durch Röntgenstrahlen geschehen. Für eine Durchleuchtung großer und dicker Metallteile sind aber Strahlen mit sehr starker Durchdringungsfähigkeit erforderlich. Dazu braucht man umfangreiche und sehr kostspielige Röntgenanlagen. Man verwendet darum in zunehmendem Maße die von radioaktiven Isotopen ausgesandten  $\gamma$ -Strahlen. Mit  $\text{Co}^{60}$  kann man Materialien bis zu einer Dicke von 200 mm durchleuchten (Abb. 57/1). Dieses Verfahren nennt man *Gammagraphie*. Auf dieselbe Weise können auch Schweißnähte geprüft werden, was besonders für den Schiffbau wichtig ist.

**b) Untersuchung von Verschleißvorgängen.** Kolbenringe, Lager und andere durch Reibung beanspruchte Maschinenteile unterliegen einer ständigen Abnutzung. Wenn man diese Teile vor dem Einbau mit Neutronen bestrahlt, bildet sich etwas radioaktives Eisen. Durch den Verschleiß gelangen Teilchen in das Schmiermittel. Aus der Größe der radioaktiven Strahlung des Schmiermittels kann man auf den Grad der Abnutzung des entsprechenden Maschinenteiles schließen. Dasselbe erreicht man, wenn bei der Herstellung der Maschinenteile etwas  $\text{Co}^{60}$  hinzufügt

wird. Durch diese Methode kann man Werkstoffe und Schmiermittel finden, bei denen die Abnutzung möglichst gering ist. Auf die gleiche Art läßt sich auch die Abnutzung der Meißel bei der Zerspanung nachweisen. Hier wird der abfallende Span auf seine Radioaktivität untersucht. Auch Autoreifen können mit Hilfe von Radioisotopen auf ihre Abnutzung untersucht und ständig kontrolliert werden. So kann man statt in bisher langwierigen Versuchen in wesentlich kürzerer Zeit für jeden Zweck die geeigneten Werkstoffe finden.

c) **Kontaktfreie Dickenmessung.** Radioaktive Strahlen werden von den Stoffen, die sie durchdringen, absorbiert. Die Absorption hängt u.a. von der Dicke der durchstrahlten Schicht ab. Daher lassen sich radioaktive Strahlen zur Dickenmessung verwenden. Die zu prüfende Schicht, meist eine dünne Folie, gleitet über einen  $\gamma$ -Strahler. Mit Hilfe eines auf der anderen Seite der Folie angebrachten Meßgerätes kann man aus der Stärke der Absorption die Dicke des Materials mit einer Genauigkeit von einem tausendstel Millimeter bestimmen.

Beim Walzen von Stahlblechen läßt sich die Dicke der Bleche in ähnlicher Weise kontrollieren. Stahlplatten und -rohre bis zu einer Dicke von 100 mm können durch diese sogenannte *kontaktfreie Dickenmessung* mit einer Meßgenauigkeit bis zu 0,01 mm Stahldicke geprüft werden. Außerdem läßt sich mit diesem Verfahren die Einhaltung einer bestimmten Dicke der Bleche automatisch regeln. Für die Erzeugung hochwertiger Produkte ist es wichtig, daß eine bestimmte Dicke von Folien oder Platten garantiert werden kann. Eine automatische Regelung von Walzvorgängen erreicht man durch folgendes Verfahren: Ein Stück der Folie oder Platte, das genau die vorgeschriebene Dicke aufweist, wird dauernd von einer Strahlenquelle durchstrahlt. Dabei ergibt sich ein bestimmter Betrag der Absorption, der von einem Meßgerät angezeigt wird. Werden die Strahlen einer zweiten Strahlenquelle, die in den Produktionsprozeß eingeschaltet ist, in der gleichen Stärke absorbiert, so ist die vorgeschriebene Dicke gewährleistet. Abweichungen werden sofort durch den Ausschlag des Meßinstrumentes erkennbar. Die Veränderungen der Meßwerte werden in Veränderungen der Stärke des Walzendruckes übersetzt (Abb. 58/1). Auf diese Weise wird weitgehend Auschuß vermieden.

So wird zum Beispiel im *VEB Kaltwalzwerk Oranienburg* die Dicke von kaltgewalztem Stahlband mit Radioisotopen gemessen. Während das moderne Walzgerät mit  $100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  arbeitet, ist bei einer Messung der Dicke mit Handmikrometer-schrauben nur eine Produktion von 30 m Stahlband je Minute möglich. Mit Hilfe der modernen Dickenmeßgeräte kann die Leistung einer modernen Walzanlage erst voll ausgenutzt werden. Diese Dickenmeßgeräte haben zwar etwa 30 000 DM gekostet, bringen aber eine Einsparung von jährlich 85 000 DM. Die Mehrproduktion an Stahlband macht in diesem Falle einen bisher notwendigen Import überflüssig.

d) **Hochöfenkontrolle.** Das Innere der Hochöfen ist mit einer dicken Schicht von feuerbeständigem Material, mit Schamotte, ausgekleidet, damit die glühenden Massen nicht mit den Außenwänden in Berührung kommen. Mit der Zeit wird aber diese Schutzschicht

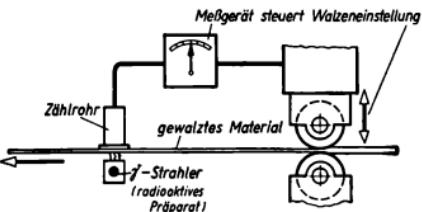


Abb. 58/1. Schematische Darstellung einer automatischen Dickenmessung

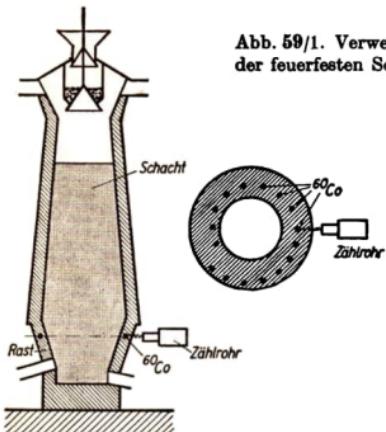


Abb. 59/1. Verwendung von Co 60 zur Kontrolle des Ausbrennens der feuerfesten Schicht (waagerechter und senkrechter Schnitt)

durch Ausbrennen so dünn, daß der Ofen stillgelegt und überholt werden muß. Das muß rechtzeitig geschehen, sonst können schwerste Schäden entstehen. Andererseits will man aber die Öfen möglichst lange ohne Reparatur in Betrieb halten, um unnötigen Produktionsausfall zu vermeiden. Die bisher sehr schwierige Kontrolle des Ausbrennens der feuerfesten Schicht wird durch Verwendung von Co<sup>60</sup> bedeutend vereinfacht. Man mauert in verschiedenen Abständen von der Innenwand kleine Mengen von Co<sup>60</sup>, die in Stahlkapseln eingeschlossen sind, ein (Abb. 59/1). In bestimmten Zeitabständen mißt man mit Hilfe von Zählrohren

die Stärke der von Co<sup>60</sup> ausgesandten  $\gamma$ -Strahlung, die mit nur geringer Schwächung Mauerwerk von 0,5 m Stärke durchdringen kann. Das Zählrohr wird an die Stelle der Außenwand gebracht, an der sich im Innern ein Stück Kobalt befindet, und die ausgesandte Gammastrahlung gemessen. Sobald die Schutzschicht bis zu der innersten Co<sup>60</sup>-Kapsel ausgebrannt ist, wird an dieser Stelle keine Strahlung mehr nachzuweisen sein. Dagegen ist das ausfließende Roheisen jetzt etwas radioaktiv, da beim Ausbrennen das Kobalt in die Schmelze übergegangen ist. Dadurch läßt sich die jeweilige Dicke der feuerfesten Schicht feststellen und ihr allmähliches Ausbrennen kontrollieren.

Nach dieser Methode hat man zum Beispiel im VEB Eisenhütten-Kombinat „J. W. Stalin“ in Stalinstadt an einem Hochofen Untersuchungen über den Mauerwerksverschleiß in verschiedenen Bereichen des Hochofens durchgeführt. Die Auswertung dieser Untersuchungen führte dazu, daß man Hochofen mit besserer Haltbarkeit und höchster Sicherheit bauen kann.

Die Höhe der Schmelze im Hochofen kann ebenfalls durch radioaktive Strahlung bestimmt werden. Man bringt an der einen Seite des Hochofens eine senkrecht verschiebbare Strahlenquelle mit Co<sup>60</sup> an. Ihr gegenüber kann eine Meßvorrichtung für die radioaktiven Strahlen in gleicher Weise bewegt werden. Da das flüssige Roheisen die  $\gamma$ -Strahlung stärker absorbiert als die ungeschmolzene Mischung aus Erzen, Koks und Zuschlägen, läßt sich die Höhe der Schmelze feststellen.

e) Füllstandsmessungen. Durch ein ähnliches Verfahren wie bei der Hochofenkontrolle läßt sich der Stand von Flüssigkeiten in geschlossenen Behältern und Kesseln messen (Abb. 59/2). Sinkt die Oberfläche der Flüssigkeit unter ein bestimmtes Niveau, das durch ein radioaktives Präparat und ein Zählrohr gekennzeichnet ist, so steigt die

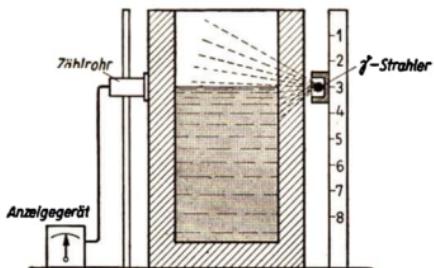


Abb. 59/2. Füllstandsmessung mit Hilfe von  $\gamma$ -Strahlen

Intensität der Strahlung sprunghaft an; die Absorption durch das Füllgut fällt plötzlich fort.

Die Höhe der Flüssigkeit läßt sich auch dadurch messen, daß man das radioaktive Präparat am Boden des Behälters und das Meßgerät an der Decke anbringt. Die gemessene Strahlungsintensität nimmt mit dem Steigen der Flüssigkeit ab.

Mit Isotopenfüllstandsmessern wird zum Beispiel im *VEB Braunkohlenwerk Gustav Sobotka* in Röblingen der Füllstand von Braunkohlenbunkern gemessen. Die Meßwerte werden zu einer automatischen Regelung der Füllung benutzt. Diese Füllstandsmesser können weitgehend in der chemischen Industrie benutzt werden.

**5. Die Altersbestimmung durch Radioaktivität.** Schon bald nach der Entdeckung der natürlichen Radioaktivität hat man die neuen Erkenntnisse zur Altersbestimmung von Gesteinen und damit der Erde benutzt. Das natürliche Uran  $U^{238}$  hat eine Halbwertszeit von etwa 4,5 Milliarden Jahren und verwandelt sich schließlich in das stabile Bleiisotop  $Pb^{206}$  (vgl. Abb. 27/1). Uranerz enthält darum stets Blei, das aus Uran entstanden ist. Aus dem Verhältnis des noch nicht zerfallenen Urans zu dem schon vorhandenen Blei kann man auf die Dauer des Zerfallsprozesses schließen. Dadurch läßt sich zum Beispiel abschätzen, wie lange die Erde schon in dem gegenwärtigen Zustand existiert. Nach den jetzt vorliegenden Ergebnissen dieser sogenannten Uran-Blei-Methode sind die ältesten bekannten Gesteine der Erde etwa 2,5 Milliarden Jahre alt.

Zur Altersbestimmung organischer Reste nutzt man die radioaktive Strahlung des in der Natur vorkommenden radioaktiven Isotops  $C^{14}$  aus. Kohlenstoff ist bekanntlich ein wesentlicher Bestandteil aller organischen Verbindungen. Kohlendioxyd ( $CO_2$ ), das die Pflanzen zu ihrem Aufbau benutzen, enthält neben dem stabilen Isotop  $C^{12}$  immer etwas radioaktiven Kohlenstoff  $C^{14}$ . Durch die Pflanzen gelangt der radioaktive Kohlenstoffanteil auch in den tierischen und in den menschlichen Körper. Solange ein Organismus lebt, wird der Kohlenstoff laufend ergänzt. Mit dem Tode hört aber der Nachschub von neuem radioaktivem Kohlenstoff auf. Sein Zerfall, der mit einer Halbwertszeit von 5600 Jahren vor sich geht, wird nun nachweisbar. Je älter ein organischer Rest ist, desto weniger radioaktiven Kohlenstoff enthält er. Man prüft deshalb die alten Holz- und Knochenreste auf die Stärke ihrer  $\beta$ -Strahlung und vergleicht diese mit der Strahlung der entsprechenden frischen Substanzen. Aus der Stärke der radioaktiven Strahlung läßt sich dann das Alter mit guter Genauigkeit feststellen. Mit dieser Methode hat man zum Beispiel das Alter einer ägyptischen Königsmumie zu 2200 Jahre bestimmen können. Für die Feuerstätten von Höhlenbewohnern aus der Dordogne in Frankreich ergab sich aus Holzkohlenresten ein Alter von 15000 Jahren. Diese Methode der Altersbestimmung hat bei etwa 40000 Jahren ihre Grenze, da die Halbwertszeit des  $C^{14}$  relativ klein ist und seine Radioaktivität daher verhältnismäßig schnell abnimmt.

**6. Anwendungen in der Chemie.** In der chemischen Industrie und Forschung werden radioaktive Isotope vielseitig und erfolgreich angewandt. Bei der quantitativen Analyse müssen oft Stoffe aus einer Lösung ausgeschieden werden. Dabei ist es wichtig, daß die Ausfällung restlos geschieht. Das läßt sich prüfen, wenn man dem Lösungsmittel radioaktive Isotope des auszufällenden Stoffes zusetzt. Weist dann nach Beendigung der Ausfällung das Lösungsmittel bei einer Prüfung mit dem Zählrohr keine radioaktive Strahlung mehr auf, so ist der betreffende Stoff vollstän-

dig abgeschieden worden. Um festzustellen, ob nicht auch geringe Mengen eines anderen gelösten Stoffes mit ausfallen, fügt man radioaktive Isotope dieses Stoffes zu und prüft jetzt den Niederschlag auf Radioaktivität.

Eine wichtige Anwendung finden die Radioisotope bei der Kontrolle chemischer Prozesse. In chemischen Betrieben können die Abgase auf den Gehalt an bestimmten Stoffen kontrolliert werden. So werden beispielsweise die fluorhaltigen Abgase, die bei der Aluminiumgewinnung durch Elektrolyse entstehen, vor dem Ausströmen aus den Schornsteinen durch besondere Anlagen weitgehend gereinigt. Diese Gase können bei einer bestimmten Konzentration in der Land- und Forstwirtschaft Schaden anrichten. Durch Zusetzen von radioaktivem NaF kann man in der Umgebung des Betriebes prüfen, wie groß der Anteil der Abgase an diesen giftigen Verbindungen ist.

Auch die Eigenschaften vieler Plaste lassen sich durch geeignete radioaktive Bestrahlung in günstiger Weise verändern. Polyäthylen zum Beispiel wird dadurch zerreißfester und elastischer. Da es auch wärmebeständig ist, das heißt bei hoher Temperatur nicht so schnell weich wird, eignet sich so behandeltes Polyäthylen zur Umhüllung von Starkstromkabeln besonders gut. Diese können dann etwa mit der doppelten Stromstärke belastet werden wie gewöhnliche Kabel. Hieraus ergibt sich eine wesentliche Einsparung an Kupfer.

## 7. Fragen und Aufgaben:

1. Warum spricht man bei der Anwendung von Radioisotopen von markierten Atomen ? Schildern Sie die Methode der markierten Atome an einem Beispiel!
2. Wie kann man mit Hilfe von Radioisotopen Krankheiten erkennen beziehungsweise heilen ? Geben Sie Beispiele dafür an!
3. Wie kann man die Aufnahme von Nährstoffen durch Pflanzen beobachten ? Welche Folgerungen zieht man daraus für die Düngung ?
4. Welche wirtschaftlichen Vorteile hat die Anwendung der Radioisotope bei der Werkstoffprüfung ?
5. Welche Bedeutung haben Radioisotope für den Betrieb von Hochöfen ?
6. Nennen Sie Anwendungen von Radioisotopen bei der Arbeit des Chemikers !

## Namen- und Sachverzeichnis

- Abdera, Demokrit von** 5  
 **$\alpha$ -Strahlen** 7 u. f., 21 u. f., 26  
 **$\alpha$ -Teilchen** 26, 30  
**Altersbestimmung** 60  
**Aston, Francis William** 24  
**Atombombe** 5 u. f., 14, 17  
**Atomgewicht** 6  
**Atommassen** 6
- Becquerel, Henri** 6 u. f.  
**Beschleunigungsanlagen** 29 u. ff.  
 **$\beta$ -Strahlen** 7, 9, 21 u. f., 26  
 **$\beta$ -Strahler** 29  
 **$\beta$ -Teilchen** 27 u. ff.  
**Betatron** 33 u. f.  
**Bindungsenergie** 39 u. f.  
**Bohr, Niels** 15  
**Bohrsches Atommodell** 15 u. f.  
**Brennelemente** 42  
**Brutreaktor** 44
- Chadwick, James** 22  
**Curie, Marie und Pierre** 7 u. f., 26
- Dalton, John** 5 u. f.  
**Deuterium** 24  
**Deuteronen** 24  
**Dickenmessung** 58  
**Diffusionsnebelkammer** 10, 12  
**Dosimeter** 11  
**Duanten** 30
- Einstein, Albert** 38 u. f.  
**Einstiinsche Gleichung** 38  
**Elektronen** 9, 13, 17 u. f.  
**Elektronenvolt** 8  
**Elementarladung, elektrische** 13
- Elemente, künstliche radioaktive** 28 u. f.  
**—, natürliche radioaktive** 26 u. f.  
**Energieniveau** 18  
**Energiereaktor** 43  
**Epikur aus Samos** 5
- Fermi, Enrico** 35, 42  
**Forschungsreaktor** 43 u. f.  
**Fotosynthese** 56  
**Fotovervielfacher** 13
- Gammagraphie** 57  
 **$\gamma$ -Strahlung** 7, 9, 21, 22, 27, 29  
**Geiger-Müller-Zählrohr** 10  
**Geigerzähler** 11  
**Gesetze von den festen und vielfachen Gewichtsverhältnissen** 5 u. f.  
**van de Graafscher Generator** 30
- Grundniveau** 18
- Hahn, Otto** 35 u. f.  
**Halbwertszeit** 26  
**Heisenberg, Werner** 22  
**Hertz, Gustav** 25  
**Höhenstrahlung** 28
- Impuls** 10  
**Ionenlawine** 10  
**Isotope** 22  
**—, radioaktive** 52 u. f.  
**Isotopentrennung** 24
- Iwanenko, Dmitri Dmitrijevitj** 22
- Joliot-Curie, Irène und Frédéric** 21 u. f., 36, 51 u. f.
- Kernfeld** 34  
**Kernfusion** 40  
**Kernladungszahl** 18  
**Kernmasse** 38  
**Kernreaktion** 21, 42  
**Kernreaktor** 42 u. ff.  
**Kernsplitter** 35  
**Kettenreaktion** 37, 42  
**Kühlsystem** 42
- Masse, kritische** 37, 45  
**—, überkritische** 37  
**—, unterkritische** 37  
**Massendefekt** 38 u. ff.  
**Massendifferenz** 40  
**Masseneinheiten, physikalische**  
**Massenspektrograph** 24 [22]  
**Megaelektronenvolt** 9  
**Meitner, Lise** 36  
**Moderatoren** 42
- Nebelkammeraufnahmen** 12  
**Neutronen** 22 u. f.  
**—, langsame** 36  
**—, schnelle** 36  
**—, thermische** 36  
**Nukleonen** 22
- Ordnungszahl** 18
- Phasotron** 31  
**Planck, Max** 16  
**Plancksches Wirkungsquantum** 16  
**Plutonium-Atombombe** 49  
**Positronen** 28 u. f.  
**Potentialwall** 34  
**Proton** 17, 22 u. f.  
**Protonensynchroton** 32

<b>Radioisotope</b> 52 u. ff.	<b>Schalen</b> 15 u. f.	<b>Vervielfacher, fotoelektrischer</b>
<b>Reaktion, thermonukleare</b>	<b>Spaltneutronen</b> 36	<b>13</b>
40	<b>Spannungsstoß</b> 10	
<b>Reaktoren, schnelle</b> 43	<b>Strahlung, radioaktive</b> 8, 10	<b>Wärmeaustauscher</b> 45
—, thermische 43	<b>Straßmann, Fritz</b> 35 u. f.	<b>Wasser, schweres</b> 24
<b>Reaktorkraftwerk</b> 47 u. f.	<b>Synchrophasotron</b> 32	<b>Wasserstoffbombe</b> 49 u. f.
<b>Relativitätstheorie</b> 39	<b>Synchrozyklotron</b> 31	<b>Werkstoffprüfung</b> 56 u. f.
<b>Röntgen, Conrad Wilhelm</b> 7	<b>Szintillationszähler</b> 10, 12 u. f.	<b>Wilsonsche Nebelkammer</b> 10
<b>Rutherford, Ernest</b> 12 u. ff., 20	<b>Transurane</b> 35	u. f.
u. ff., 34	<b>Tritium</b> 24	<b>Zerfallsreihen, radioaktive</b> 27
<b>Rutherford'sches Atommodell</b>	<b>Tritonen</b> 24	<b>Zyklotron</b> 30 u. f.
15		

#### **Quellenverzeichnis der Abbildungen**

**Rudolf Brand, Sonneberg:** Abbildung 35/1 · **Forschungsinstitut Manfred v. Ardenne, Dresden:** Abbildung 30/1 · **Gesellschaft zur Verbreitung wissenschaftlicher Kenntnisse, „Entschleierete Geheimnisse“:** Abbildung 54 1 · **Werkfoto VEB Vakutronik, Dresden:** Abbildungen 11/1, 11/2 · **Zentralbild, Berlin:** Abbildungen 11 3, 32 2, 33/1, 33 2, 44 1 a, 46/1, 46/2, 50/1, 53/1, 55/1, 57/1 · **Zentralinstitut für Kernphysik, Dresden-Rossendorf:** Abbildungen 32/1, 44 1 b.

**Physiker-Bildnisse:** **Niels Bohr, Marie Curie-Sklodowska und Pierre Curie, John Dalton, Albert Einstein, Irène und Frédéric Joliot-Curie, Max Planck, Ernest Rutherford.**

**02925-1**