

Abschließend sei erwähnt, daß auch in radioaktiven Stoffen nach dem gleichen Prinzip Röntgenstrahlen auftreten können, nämlich dann, wenn die von dem Präparat ausgehenden Kernteilchen auf einen festen Stoff fallen, der auch das Präparat selbst sein kann. So erklärt es sich, daß man auch an radioaktiven Präparaten Röntgenstrahlen feststellt, die an sich identisch mit der ohnehin erzeugten Gammastrahlung sind, sich jedoch von dieser durch ihre andere Wellenlänge unterscheiden können. Die Technik der Röntgenanlagen ist heute außerordentlich fortgeschritten. Es stehen Einrichtungen für alle nur denkbaren Zwecke und Leistungen zur Verfügung, angefangen von kleinsten, transportablen Geräten bis zu riesigen stationären Anlagen. Selbstverständlich werden Röntgenstrahlungen auch zur Kernzertrümmerung eingesetzt. Sie müssen dann allerdings eine so kurze Wellenlänge bzw. eine so große Energie haben, daß sie mit normalen Röntgenröhren nicht mehr erzeugt werden können. Hier setzt das Betatron ein, dessen Aufbau und Wirkungsweise nun besprochen werden sollen (9, 27).

4. Das Betatron

Das Betatron, auch Rheotron, Strahlentransformator oder Elektronenschleuder genannt, dient zur Beschleunigung freier Elektronen auf sehr hohe Energiewerte. Die Elektronen können nach erfolgter Beschleunigung entweder nach außen geleitet werden oder sie prallen auf einen festen Körper und erzeugen dort äußerst kurzwellige Röntgenstrahlen. Meistens macht man von der zweiten Methode Gebrauch, weil es sehr schwer ist, Elektronen mit genügend großem Wirkungsgrad aus der Röhre in die Umgebung zu leiten.

Das Betatron beruht grundsätzlich auf dem Gedanken, Elektronen in eine Kreisbahn zu zwingen und sie dort mit Hilfe zeitlich ansteigender magnetischer Felder sehr stark zu beschleunigen. Zur Erzeugung des beschleunigenden Feldes verwendet man leistungsfähige Elektromagnete, deren Aufbau ähnlich dem eines Transformators mit Mantelkern ist. In seinem mittleren Schenkel ist ein Luftspalt mit Polschuhen angebracht, zwischen denen die Elektronen umlaufen. Sie bilden gewissermaßen die Sekundärwicklung eines Transformators,

dessen Primärseite die Wicklung des Elektromagneten darstellt.

Zur Erzeugung der Elektronen selbst dient ein Strahl-erzeugungssystem mit geheizter Kathode. Es ist an eine toroid-förmige Beschleunigungsröhre (s. Abb. 3, Tafel I) angesetzt, die meistens aus Frequentia besteht und im Inneren einen we-nige Tausendstel Millimeter dicken Metallbelag hat, um Auf-ladungen durch Streuelektronen zu verhindern. Das Strahl-erzeugungssystem „schießt“ gewissermaßen die Elektronen mit relativ geringer Geschwindigkeit in die Beschleunigungs-röhre, die sich zwischen den Polen des schon erwähnten Elektro-magneten befindet. Dieser wird normalerweise mit Wechsel-strom erregt, so daß sich ein sinusförmig verlaufender Magnet-fluß ergibt. Jeweils eine Viertelwelle des Flusses wird zur Be-schleunigung der Elektronen ausgenutzt. Dabei werden die Elektronen dem Magnetfeld kurz nach dessen Nulldurchgang ausgesetzt; die Anfangsgeschwindigkeit entspricht bereits etwa 40% der Lichtgeschwindigkeit.

Während nun das sinusförmig verlaufende Magnetfeld mehr und mehr wächst, werden die Elektronen beschleunigt. Nach mehrmaligen Durchläufen der Elektronen durch die Be-schleunigungsröhre erzielt man nahezu Lichtgeschwindigkeit. Um die Elektronen während des Beschleunigungsvorganges in dem radial nach außen abfallenden Magnetfeld auf einer Kreisbahn mit konstantem Halbmesser zu halten, muß die Dichte des Magnetfeldes auf der Kreisbahn halb so groß sein wie der Mittelwert der Flußdichte innerhalb der von dieser eingeschlossenen Fläche. Diese Bedingung wurde theoretisch ermittelt. Trotzdem würden sich Abweichungen von der idealen Kreisbahn ergeben, weil durch Raumladungsabstoßung, Feldunsymmetrien, Zusammenstöße der Elektronen mit rest-lichen Gasmolekülen usw. Störungen möglich sind. Indessen können auch diese Störungen aufgehoben werden, wenn die Flußdichte des Feldes schwächer als umgekehrt proportional mit dem Halbmesser abfällt.

Um den Elektronen im Augenblick des Einschießens in die Beschleunigungsröhre die erforderliche Mindestgeschwindig-keit zu erteilen, werden sie nach dem Verlassen des Strahl-erzeugungssystems mit einem statischen Feld beschleunigt. Ist die durch das Magnetfeld erteilte Beschleunigung groß ge-nug, so wird das Magnetfeld beeinflußt, wodurch man die Bahn

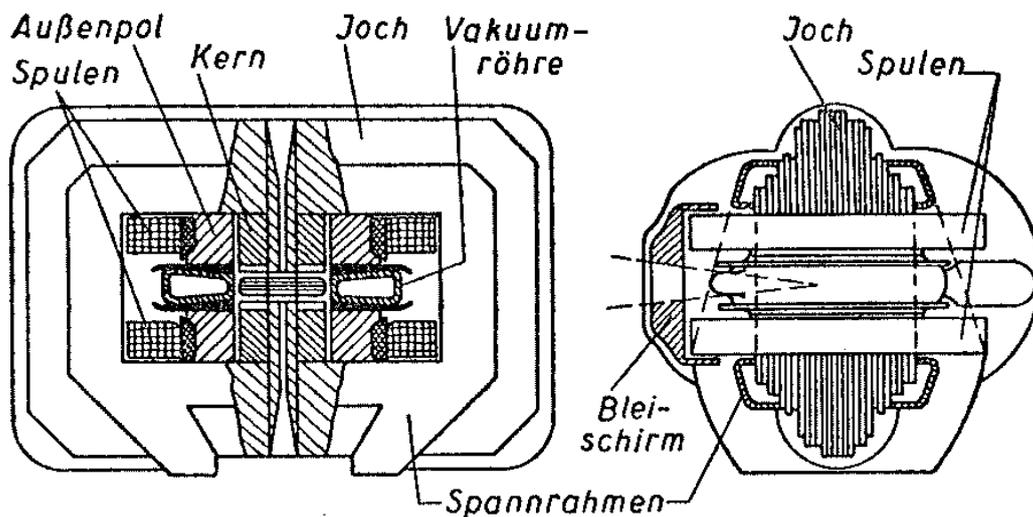


Abb. 9. Die Konstruktion eines Betatrons (Schnittzeichnung)

der Elektronen einengen oder erweitern kann. An der richtigen Stelle befindet sich wie bei einer Röntgenröhre eine Antikathode, auf die die Elektronen prallen und dort eine äußerst wirksame Röntgenstrahlung auslösen.

So einfach das Prinzip des Betatrons auf den ersten Blick erscheinen muß, so kompliziert ist die technische Gestaltung dieser Einrichtung. Abb. 9 zeigt einen Schnitt durch ein Beta-tron-System. Wir erkennen die Spulen des Elektromagneten, die sich auf einem Kern befinden, der einen Außenpol trägt. Die magnetische Einheit ist durch ein Joch vollkommen eingeschlossen. Die Beschleunigungsröhre sitzt zwischen dem Magnet, so daß das Kraftfeld voll auf die Elektronen einwirken kann. Ein Spannrahmen hält die Teile zusammen, ein Bleischirm sorgt für eine wirksame Abschirmung der Strahlen zum Schutz des Bedienungspersonals. Die Induktion im Magnetkern liegt bei modernen Ausführungen bei etwa 19 000 Gauss, d. h. jeder Quadratzentimeter des betrachteten Raumes wird von 8000 magnetischen Kraftlinien durchsetzt. Der gesamte Magnet wird aus Blechen von einigen Zehnteln Millimeter Stärke aufgebaut, die durch eine Kunstharzschicht gut voneinander isoliert sind. Die Erregerspulen bestehen häufig aus Kupferrohr, damit sie durch Ölumlauf gekühlt werden können, denn es treten Ströme bis etwa 100 A auf. Es gibt Betatrons, denen man sowohl Elektronen als auch Röntgenstrahlen entnehmen kann. Zur Elektronenentnahme wird die Röhre mit einer wenige Tausendstel Millimeter starken Nickelfolie verschlossen, durch die die Elektronen dringen können. Zur Erzeugung von Röntgenstrahlen wird die Antikathode aus Platin

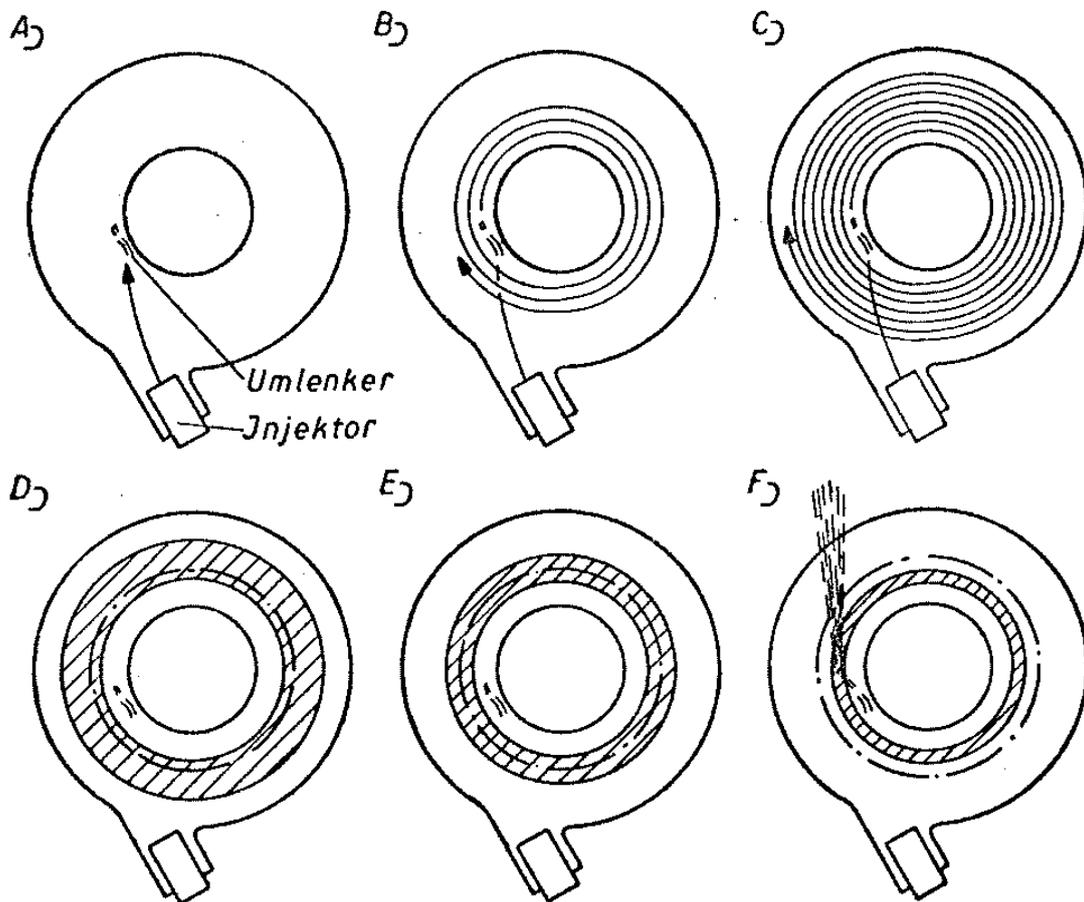


Abb. 10. Der Verlauf des Einschieß- und Beschleunigungsvorganges beim Betatron

hergestellt. Für die Röntgenstrahlen ist ein besonderes Fenster nicht erforderlich.

Das Strahlungssystem besteht außer der Kathode meistens noch aus einem Wehneltzylinder und einer geerdeten Anode. Diese hat einen Spalt, durch den die Elektronen in den Beschleunigungsraum kommen. Sehr wichtig ist ein richtiges „Einschießen“ der vorbeschleunigten Elektronen in das Betatron. Abb. 10 zeigt verschiedene Phasen des Beschleunigungsvorganges. In Fig. A werden die Elektroden gerade eingeschleust, die Abbildung zeigt also den Anfangszustand. In Fig. B haben die Elektronen schon mehrere Umläufe beendet und sind dabei so beschleunigt worden, daß sich der Durchmesser der Kreisbahn infolge der jetzt auftretenden starken Zentrifugalkraft erhöht hat. Nach weiteren Umläufen ist die Geschwindigkeit noch mehr gestiegen und der Kreisbahndurchmesser hat sich noch weiter vergrößert (Fig. C). Bei noch stärkerer Beschleunigung treten Kräfte auf, die die Elektronen zusammenschnüren und auf eine relativ enge Kreisbahn zwingen. Dieser Zustand ist in den Figuren D und E dargestellt.

Schließlich ist in Fig. F gezeigt, wie Röntgenstrahlen durch den Aufprall der Elektronen auf die Antikathode entstehen.

Leistungsfähige Betatrons erreichen beachtliche Ausmaße und Gewichte; vor allem das Gewicht wird durch die Größe des Elektromagneten bestimmt. Abb. 4, Tafel II, zeigt eine kleine Versuchsausführung. Von Siemens wird beispielsweise eine fahrbare Betatron-Anlage herausgebracht, die nahe an die zu untersuchenden Werkteile, z. B. Kesseltrommeln usw., geführt werden kann. Die Untersuchungstechnik geht etwa derart vor sich, daß man den zu prüfenden Körper den Röntgenstrahlen aussetzt und an der gegenüberliegenden Seite eine photographische Folie, evtl. unter Zwischenschaltung einer Verstärkerfolie, anbringt. Die entwickelte Folie zeigt dann das durchleuchtete Werkstück in großer Deutlichkeit. Selbstverständlich kann das Betatron auch für medizinische Zwecke eingesetzt werden (12, 18, 24, 25, 29, 36, 37).

5. Das Zyklotron

Im Zyklotron werden nicht Elektronen, sondern Ionen, also positiv geladene Teilchen, auf hohe Energien beschleunigt. Die Einrichtung wurde im Jahre 1932 erfunden und bewährte sich sehr schnell.

Im Prinzip besteht ein Zyklotron aus halbkreisförmigen, flachen Metallkästen in der Form eines großen lateinischen D, weshalb man auch kurz von D-Kästen spricht. Sie befinden sich in einem Hochvakuumgefäß und bilden den Raum, in dem sich die Ionen bewegen. Zu ihrer Erzeugung ist im Inneren des Raumes eine Ionenquelle vorgesehen, die z. B. aus einem elektrischen Lichtbogen besteht, der in Wasserstoffgas, Helium oder schwerem Wasserstoff brennt. Von diesem Lichtbogen gehen Ionen aus, die nun durch ein starkes, gleichförmiges Magnetfeld gezwungen werden, sich auf Kreisbahnen zu bewegen. Es kommt also dasselbe Prinzip wie beim Betatron zur Anwendung; wie man aber nachweisen kann, hängt die Umlaufzeit der Ionen auf einer solchen Bahn nicht von der Ionengeschwindigkeit ab, vorausgesetzt, daß die Geschwindigkeit noch so klein ist, daß sich kein Massenzuwachs im Sinn der Einsteinschen Relativitätstheorie gibt. Der Kreishalbmesser und der dazu

proportionale, durchlaufene Weg werden nämlich im gleichen Verhältnis größer als die anwachsende Geschwindigkeit.

Die Ionen kommen, wenn sie sich auf der angedeuteten Kreisbahn bewegen, in periodischen Abständen einmal in den einen und dann wieder in den anderen D-förmigen Metallkästen. Man legt nun an die beiden (natürlich voneinander isolierten) Kästen eine sehr hohe Wechselspannung, deren Frequenz man derart wählt, daß die Ionen beim Übergang vom einen zum anderen Kasten jeweils in Phase mit der Hochfrequenz sind. Das führt zu einer entsprechend starken Beschleunigung der Teilchen. Diese Beschleunigung findet bei jedem Umlauf zweimal statt, weil die Ionen jeweils nach 180° vom einen zum anderen Kasten überwechseln. Auf diese Weise kommt man zu sehr hohen Ionengeschwindigkeiten. Ist die gewünschte Endgeschwindigkeit erreicht, so sorgt eine Ablenk-Elektrode dafür, daß die Ionen aus der Beschleunigungskammer gelangen und sich in der freien Luft ausbreiten können.

In Abb. 11 ist der Aufbau eines modernen Zyklotrons schematisch wiedergegeben. Wir sehen die luftleere Beschleunigungskammer 1, in deren Mitte sich die Ionenquelle 2 befindet. Am Umfang ist eine Treffplatte 3 angeordnet, auf der man z. B. ein Präparat befestigen kann, das von den Ionen bombardiert werden soll. Ferner ist in der Beschleunigungskammer deutlich das D-förmige Elektrodensystem 4 zu sehen; zwischen den einzelnen Elektroden herrscht eine große Hochfrequenzspannung. Diese ganze Anordnung befindet sich zwischen den beiden Magnetpolen 5 in einem Joch 6. Zwei mit Gleichstrom gespeiste Spulen 7 sorgen für das Zustandekommen eines konstanten Magnetfeldes. Die eine der beiden Kastenelektroden ist über eine konzentrische Hochfrequenzleitung 8 mit dem Hochfrequenzoszillator 9 verbunden. Die Pumpen 10 und 11 sorgen für ein richtiges Vakuum in der Anlage. Jedesmal, wenn die Teilchen den Spalt zwischen den beiden Elektroden passieren, werden sie beschleunigt, weil sie gerade in diesem Augenblick von der gegenüberliegenden Elektrode angezogen werden. Hierfür ist, wie schon erwähnt, Voraussetzung, daß die Frequenz des Wechselfeldes richtig gewählt wird.

Der Elektromagnet eines Zyklotrons kann große Abmessungen und ein riesiges Gewicht haben. Beispielsweise wiegt der Elektromagnet des Riesenzyklotrons in Berkeley allein 5000 Tonnen. Der Ionen-Bahndurchmesser beträgt bei diesem Zy-

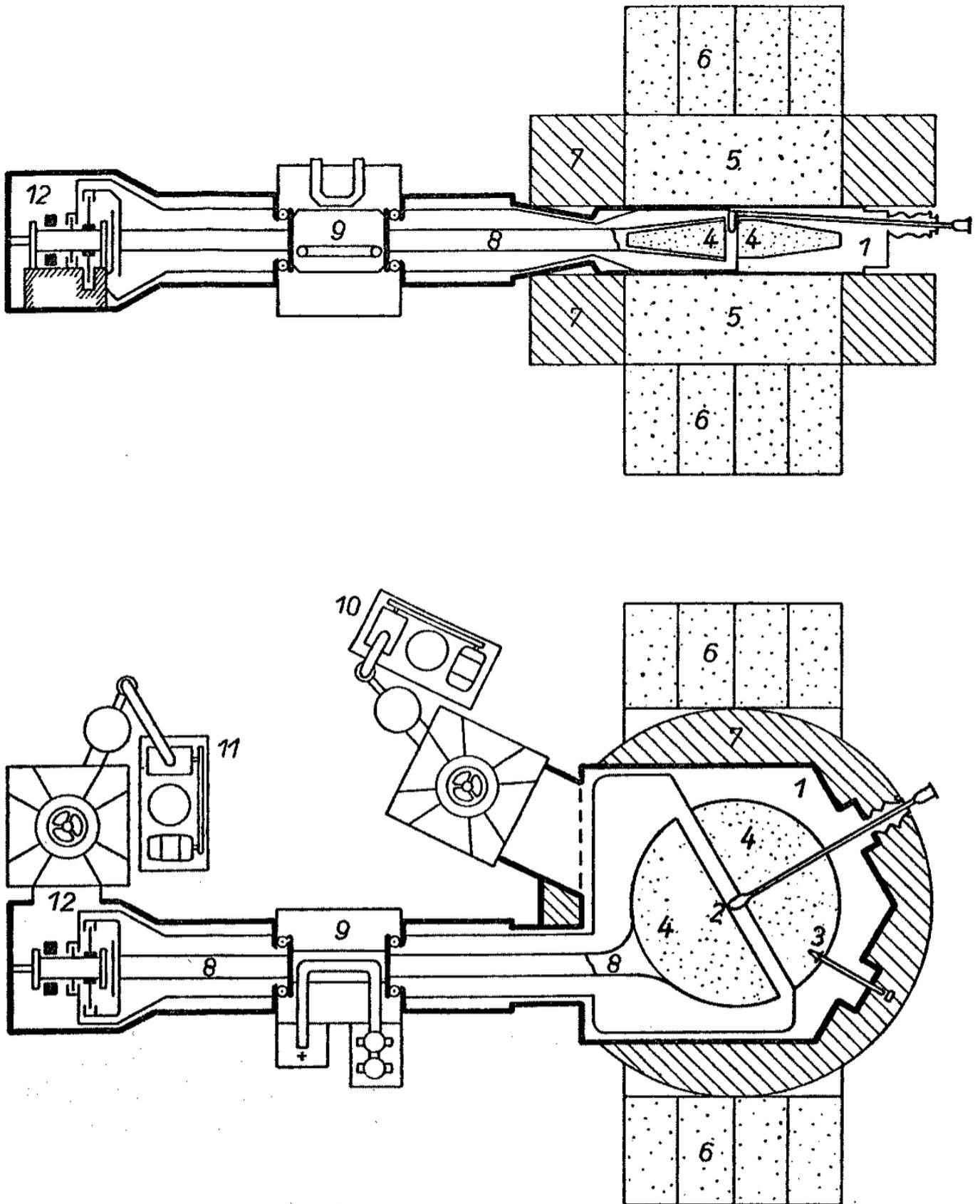


Abb. 11. Schnittzeichnung eines Zyklotrons (Philips)

kyklotron $4\frac{1}{2}$ m. Das Hauptanwendungsgebiet des Zyklotrons besteht in der Bombardierung bestimmter Präparate mit dem Zweck, in diesen Kernreaktionen hervorzurufen. Außerdem lassen sich mit Zyklotrons in recht wirtschaftlicher Weise radioaktive Isotopen herstellen.

Wie schon erwähnt, gelten die für das Zyklotron maßgebenden Bewegungsgesetze für die Ionen nur dann, wenn der Einfluß der Relativitätstheorie zu vernachlässigen ist. Bei sehr großen Geschwindigkeiten bzw. Energien trifft das aber nicht mehr zu. Die Masse der Teilchen wird dann größer. Ferner ist das Magnetfeld an der Außenseite der Pole etwas schwächer als in der Mitte. Infolgedessen bleiben die Teilchen im hochfrequenten Wechselfeld zwischen den Elektroden um so mehr zurück, je größer die Geschwindigkeit wird. Folglich wird die Anzahl der Steigungen der spiralförmigen Teilchenbahn und damit auch die Endgeschwindigkeit beschränkt. Will man diese Schwierigkeit umgehen, so muß man die Frequenz des hochfrequenten Wechselfeldes kleiner machen, und zwar im gleichen Maße, wie die Geschwindigkeit der Teilchen zunimmt. Dann bleiben diese nicht zurück, sondern sie passieren den Spalt im Takt mit dem Wechselfeld, also zu diesem synchron. Eine solche Einrichtung nennt man daher Synchrozyklotron; die Frequenz des hochfrequenten Wechselfeldes wird dabei moduliert. Die jeweils im Augenblick des Frequenzhöchstwertes von der Ionenquelle abgeschleuderten Ionen werden jedesmal zu Gruppen gebündelt, die synchron mit dem Feld laufen. Nicht alle Ionen werden von diesem Vorgang erfaßt; ein Teil geht verloren. Auf der Treffplatte herrscht ein pulsierender Strom, der von der Gruppenbildung der Teilchen herrührt.

Eine weitere Abart des Zyklotrons ist das Synchrotron, eine Kombination aus Betatron und Zyklotron. Die Teilchen werden im Synchrotron in drei Stufen hochbeschleunigt:

1. Von kleinen Energien nach mittleren Energien (10 MeV) nach dem Prinzip des Zyklotrons.

2. Von mittleren Energien zu dem Punkt, wo die Teilchengeschwindigkeit an die Lichtgeschwindigkeit heranreicht (40 MeV bei Protonen) nach dem Prinzip des Synchrozyklotrons.

3. Ist die Teilchengeschwindigkeit nicht sehr viel mehr von der Lichtgeschwindigkeit verschieden, werden die Teilchen nach dem Betatron-Prinzip bis zu extrem hohen Energien von mehreren Milliarden Volt hochbeschleunigt.

In den Zyklotronanordnungen können leichte Kerne, z. B. Protonen, Deuteronen, Alphateilchen usw. außerordentlich beschleunigt werden. Auch in Deutschland werden heute bereits Zyklotrons gebaut. Selbstverständlich ist der Umgang mit die-

sen Anlagen außerordentlich gefährlich, wenn nicht entsprechende Schutzmaßnahmen getroffen werden, denn die Strahlungen sind so stark, daß sie schon bei kurzer Dauer erhebliche Schädigungen des menschlichen Organismus hinterlassen können. Es sei noch erwähnt, daß es noch weitere elektronische Teilchenbeschleuniger gibt, zu denen z. B. der Linear-Akzelerator gehört. Am wichtigsten und praktisch bedeutsamsten sind jedoch nach wie vor das Betatron und das Zyklotron mit seinen verbesserten Spielarten. Diese elektronischen Einrichtungen liefern allerdings unmittelbar nur Teilchen mit negativer oder positiver Ladung; Neutronen, also ungeladene Teilchen, lassen sich mit ihnen nicht herstellen. Durch einen Kunstgriff erhält man jedoch auch Neutronenstrahlen, indem man die Strahlung des Zyklotrons unter Zwischenschaltung von Beryllium in Neutronenstrahlen umsetzt. Dadurch wird das Zyklotron zu einem universalen Hilfsmittel in der Atomtechnik und Atomphysik. Die Strahlungen sind so energiereich, daß sie unmittelbar in schwere Atomkerne eindringen können. Die Energie ist doppelt so groß wie die der kräftigsten Alphastrahlen natürlicher radioaktiver Präparate und kommt in ihrer Wirkung mehreren Zentnern Radium gleich (11, 20).