

EXPERIENTIA

Vol. I - Nr. 3

Pag. 69-98

15. Juni 1945

Die Cyclotron-Anlage der Eidgenössischen Technischen Hochschule

Von H. BAUMGARTNER, C. R. EXTERMANN, P. C. GUGELOT, P. PREISWERK und P. SCHERRER, Zürich

Einleitung: Um künstliche Atom-Umwandlungen hervorzurufen, müssen Atomkerne auf sehr hohe Geschwindigkeit, ungefähr $1/10$ Lichtgeschwindigkeit, gebracht werden. Diese schnellen Teilchen sind dann imstande, die Barriere des abstoßenden Coulombfeldes, die wegen der positiven Ladung zwischen Atomkernen besteht, zu überwinden und in andere ruhende Atomkerne einzudringen. Durch Vereinigung der zwei sich treffenden Atomkerne entsteht dann ein sehr kurzlebiger Zwischenkern, der sofort wieder zerfällt. Bei diesem Zerfall entstehen wegen Umgruppierung der in den ursprünglichen Kernen vorhandenen Protonen und Neutronen neue, meist radioaktive Atome.

Für die Beschleunigung von Atomkernen besitzt die Physik bis heute nur die einzige Möglichkeit, dieselben durch sehr hohe elektrische Spannungsfelder fallen zu lassen. Man überlegt leicht, daß die Spannung, die nötig ist, um den leichtesten Kern, das Proton, auf $1/10$ Lichtgeschwindigkeit zu bringen, etwa 5 Millionen V beträgt. Versuche, Stromquellen zu bauen, welche so hohe oder höhere Spannungen liefern, sind zwar gelungen (VAN DE GRAAFF), jedoch ist der Bau der nötigen Beschleunigungsrohren für so hohe Spannungen auf unüberwindliche Schwierigkeiten gestoßen, so daß die Grenze für solche Anlagen heute bei etwa drei Millionen Volt zu liegen scheint.

Aus diesem Grunde erweist sich das *Cyclotron* immer mehr als unentbehrliches Instrument der heutigen Atomphysik. Es ist zurzeit der einzige Apparat, mit welchem Atomkerne auf Energien von über 3-4 Millionen Elektron-Volt gebracht werden können. Tatsächlich sind bei den größten Anlagen dieser Art Energien bis 30 Millionen Elektron-Volt erreicht worden und prinzipiell liegt die maximale Energie noch wesentlich höher. Ein Super-Cyclotron, das Atomkerne auf 100 Millionen Elektron-Volt beschleunigen soll, ist in Berkeley im Bau. Da mit wachsender Energie die Ausbeute von Kernreaktionen stark ansteigt, ist das Cyclotron allen andern Apparaturen bei der Herstellung großer Neutronenintensitäten und starker radioaktiver Präparate, wie sie für biologische und chemische Versuche Verwendung finden, wesentlich überlegen.

Prinzip des Cyclotrons: Das Cyclotron beruht auf dem Prinzip, daß der zu beschleunigende Kern dieselbe

relativ niedrige Wechselspannung mehrmals durchläuft und in einer großen Reihe von Einzelbeschleunigungen die hohe Endgeschwindigkeit erreicht. Dabei ist die schwierige Bedingung zu erfüllen, daß das Teilchen immer dann wieder ins beschleunigende Feld zurückgebracht wird, wenn dieses das richtige Vorzeichen hat.

Erstmals versuchte R. WIDEROE 1929 eine solche sukzessive Beschleunigung mit Wechselspannung. Bei hoher Endgeschwindigkeit der Teilchen wird aber seine

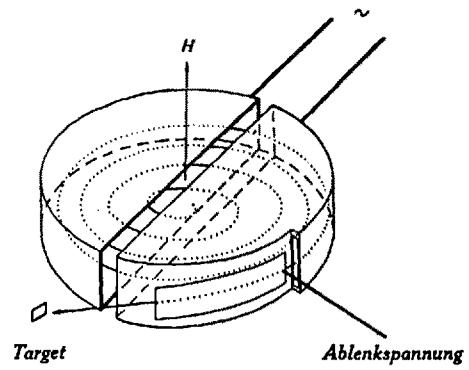


Fig. 1.

geradlinig gebaute Apparatur unmöglich lang. E. O. LAWRENCE hatte die geniale Idee, den sehr langen Beschleunigungsweg des Teilchens spiralförmig aufzwickeln. Dies gelingt mit Hilfe eines Magnetfeldes.

Die Beschleunigung der Kerne geschieht beim Cyclotron in einer zylindrischen Kammer. In dieser befinden sich zwei Elektroden, welche die Form von Hälften einer in der Mitte durchgeschnittenen Dose haben (Fig. 1). Sie wurden von LAWRENCE wegen ihrer Form — abgeleitet vom Buchstaben D — als «Dees» bezeichnet. An diese wird die Wechselspannung gelegt, die im Spalt zwischen den Dosenhälften das beschleunigende Feld entstehen läßt. Im Mittelpunkt der Dose erzeugt eine Ionenquelle freie Atomkerne, welche, vom Wechselfeld erfaßt, im Innern der Dose mit allmählich anwachsender Geschwindigkeit ihre Spiralbahn durchlaufen. Jedesmal beim Durchqueren des Spaltes werden sie durch die angelegte Spannung beschleunigt.

Daß eine solche Beschleunigung trotz der konstanten Frequenz der angelegten Wechselspannung möglich ist, d. h. daß das Teilchen immer im richtigen Moment im Beschleunigungsspalt eintrifft, hängt mit

einem Satz von LARMOR zusammen, nach welchem die Umlaufsdauer eines elektrisch geladenen Teilchens auf der durch das Magnetfeld erzwungenen Kreisbahn unabhängig von seiner Geschwindigkeit ist. Das Teilchen trifft daher nach seiner Umlenkung in immer gleichen Zeitintervallen wieder im Beschleunigungsspalt ein, immer dann, wenn die angelegte elektrische Spannung wieder in richtiger Phase gerade ihr Maximum hat. Natürlich muß zur Erreichung dieser richtigen Phasenlage eine gewisse «Resonanzbedingung» zwischen der Stärke des angelegten Magnetfeldes und der verwendeten Frequenz des Wechselfeldes erfüllt sein. Diese Bedingung erhält man durch folgende Überlegung: Ein elektrisch geladenes Teilchen (Masse m , Ladung e), das sich mit der Geschwindigkeit v senkrecht zur Feldrichtung in einem Magnetfeld bewegt, erfährt die sogenannte Lorentzkraft, welche das Teilchen auf eine Kreisbahn vom Radius r zwingt:

$$\text{Zentripetalkraft} = \frac{mv^2}{r} = \mu_0 \cdot e \cdot v \cdot H = \text{Lorentzkraft} \quad (1)$$

(μ_0 = Induktionskonstante).

Jeder Teilchengeschwindigkeit v ist nach (1) ein ganz bestimmter mit v wachsender Radius zugeordnet:

$$r = \frac{v}{\mu_0 \cdot \frac{e}{m} \cdot H} \quad (2)$$

Die Umlaufzeit T für einen vollen Kreis ist unabhängig von der Geschwindigkeit v des Teilchens und vom Radius r der Bahn.

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\mu_0 \cdot \frac{e}{m} \cdot H} \quad (3)$$

Damit die oben erwähnte Resonanzbedingung erfüllt sei, muß die Umlauffrequenz des Teilchens genau übereinstimmen mit der Frequenz der angelegten Beschleunigungswechselspannung:

$$\omega_{\text{Larmor}} = \frac{2\pi}{T} = \mu_0 \cdot \frac{e}{m} \cdot H = \omega_{\sim} \quad (4)$$

Aus (2) folgt auch sofort die Maximalgeschwindigkeit v_{max} der Kerne, welche bei einem bestimmten Dosenradius R und bei einem bestimmten Magnetfeld H erreicht werden kann:

$$v_{\text{max}} = \mu_0 \cdot \frac{e}{m} \cdot H \cdot R \quad (5)$$

Die maximal erreichbare kinetische Energie hat den Wert:

$$E_{\text{max}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = \frac{\mu_0^2}{2} \cdot \frac{e^2}{m} \cdot H^2 R^2 \quad (6)$$

Sie ist für eine bestimmte Teilchenart vom angelegten Magnetfeld und vom maximal möglichen Radius R abhängig. Überraschend ist die Tatsache, daß die Endenergie nicht von der Amplitude V_0 der angelegten Beschleunigungsspannung abhängt: diese bestimmt nur die Anzahl der nötigen Umläufe, die das Teilchen braucht, um E_{max} zu erreichen. Passiert das Teilchen

den Beschleunigungsspalt immer gerade bei der maximalen Spannungsamplitude V_0 , so gewinnt es pro Umlauf die Energie $2eV_0$ und benötigt daher im ganzen

$$N = \frac{E_{\text{max}}}{2eV_0} \quad (7)$$

Umläufe.

Bei einem Cyclotron, welches 10 Millionen Elektron-Volt liefert, liegt die totale Bahnlänge für ein Teilchen in der Größenordnung von 200 Metern. Es ist klar, daß die Beschleunigung in einem sehr guten Hochvakuum von 10^{-4} bis 10^{-5} mm Hg-Druck vorgenommen werden muß, damit das umlaufende Teilchen nicht unterwegs durch Zusammenstöße mit den Atomen des Füllgases aus seiner Bahn geworfen wird.

Um einen möglichst hohen Wert der Endenergie zu erhalten, müssen nach (6) der Radius des Cyclotrons und das Magnetfeld möglichst hoch gewählt werden. Dem Magnetfeld H sind indessen aus zwei Gründen engere Grenzen gesetzt: Einmal kann man nicht auf Werte von H gehen, welche wesentlich oberhalb des Sättigungswertes von Eisen liegen, weil sich sonst der Stromverbrauch des Magneten und damit die Betriebskosten außerordentlich erhöhen. Dann bedingt eine hohe magnetische Feldstärke wegen der Resonanzbedingung auch eine sehr hohe Frequenz der Wechselspannung. Bei einer magnetischen Feldstärke von $H = 1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Amp}}{\text{m}}$ (entspr. 18800 Gauß) ergibt sich für Deutonen ($\frac{e}{m} = 4,83 \cdot 10^7 \frac{\text{Clb}}{\text{kg}}$) eine Frequenz $\omega_{\sim} = \omega_L = 0,91 \cdot 10^8 \text{ sec}^{-1}$, entsprechend einer Umlaufdauer der Teilchen von weniger als einer Zehnmillionstelsekunde. Die Wechselspannung, welche zur Beschleunigung dient, muß also außerordentlich hochfrequent sein; sie liegt im Gebiet der Radiokurzwellen in der Gegend von etwa 20 m Wellenlänge. Im Gebiet dieser hochfrequenten Wechselströme ist aber die Energieerzeugung, welche durch Röhren geschehen muß, sehr kostspielig.

Dabei wächst die nötige Hochfrequenzleistung mit zunehmender Frequenz sehr stark an. Das Beschleunigungssystem hat eine erhebliche Kapazität. Durch dieses fließen deshalb bei der hohen Frequenz sehr große Ströme, die infolge der Ohmschen Widerstände eine nicht unerhebliche Wirkkomponente besitzen. Die Hochspannungsanlage muß daher ziemlich viel Leistung abgeben. Je höher also das Magnetfeld und damit die Larmorfrequenz werden, desto schwieriger ist es, die nötige Hochfrequenzleistung zu beschaffen.

Infolge der angeführten Gründe, welche einer Vergrößerung von H entgegenstehen, kann eine Steigerung der maximalen Energie nur durch Vergrößerung des Cyclotronradius R erreicht werden. Mit dem Radius wachsen aber das Gewicht des Magneten und die Betriebskosten außerordentlich stark an. Mit einem Magneten von 40 Tonnen Gewicht können Deutonen auf etwa 14 Millionen eV Energie beschleunigt werden;

das Super-Cyclotron mit 100 Millionen eV benötigt bereits einen Magneten von 4000 Tonnen Eisengewicht.

Unbedingt notwendig erweist sich eine *Fokussierung* des in der Kammer laufenden Strahles. Wenn man bedenkt, daß die Strahllänge etwa 200 m, die Dosenhöhe hingegen nur wenige cm beträgt, so sieht man, daß ohne Fokussierung die Teilchen sehr bald auf die Wände treffen würden. Es ist nun möglich, Bedingungen aufzufinden, unter welchen sowohl das magnetische als auch das elektrische Feld Linsenwirkungen zeigen, welche den Strahl in der gewünschten Weise zusammenhalten.

wachsendem Teilchenradius könnte durch ein nach außen stärker werdendes Magnetfeld entgegengewirkt werden, doch würde bei einem solchen Feldverlauf vollständige Defokussierung des Strahles eintreten. Es läßt sich jedoch zeigen, daß diese Schwierigkeit nicht unüberwindlich ist und daß durch geeignete radiale und azimutale Änderung des Magnetfeldes der Strahl bis zu sehr hohen Energien zusammengehalten werden kann und doch in Phase bleibt.

Das ETH.-Cyclotron. Das ETH.-Cyclotron wurde für eine Deutonenenergie von 15 Millionen Elektro-

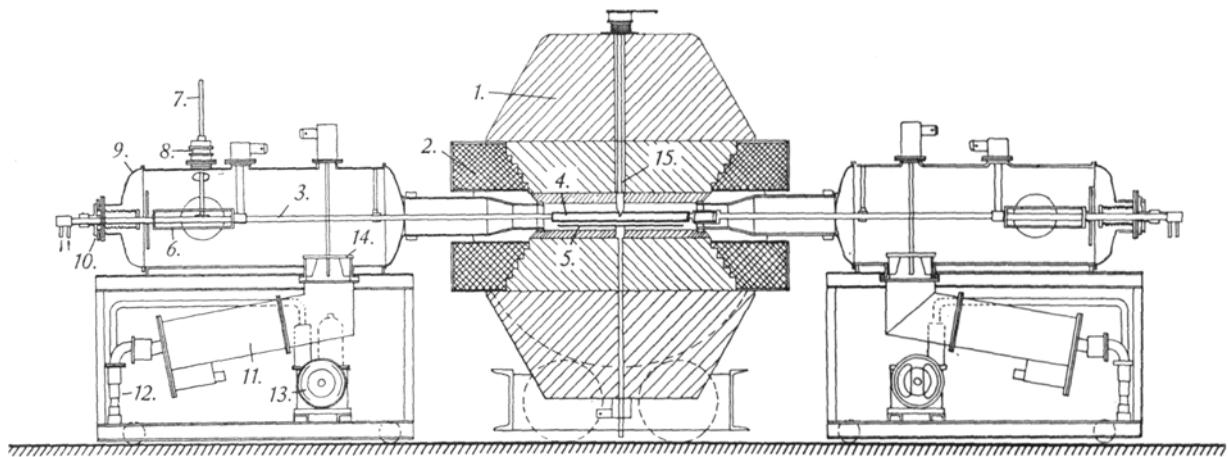


Fig. 2. Querschnitt durch das Cyclotron.

1. Magnet, 2. Erregerwicklungen, 3. Lechersystem, 4. Dee, 5. Abstimmkapazität, 6. Abstimminduktivität 7. Hochfrequenzzuführung, 8. Einführungsisolator, 9. Aluminiumtank, 10. Spannvorrichtung, 11. Hochvakuum-Öldiffusionspumpe, 12. Vorrakuum-Öldiffusionspumpe, 13. Mechanische Vorrakuumpumpe, 14. Vakuumklappe, 15. Ionenquelle

ten. Am Anfang der Bahn, wenn die Teilchen noch keine große Geschwindigkeit haben, ist hauptsächlich die elektrische Fokussierung wirksam, welche darauf beruht, daß die elektrische Feldstärke des Wechselfeldes während des Durchgangs des Teilchens durch den Beschleunigungsspalt zeitlich etwas ändert. Für diese Fokussierung kommt es aber sehr auf die Phasenlage des Teilchens an: sie ist nur vorhanden, wenn das Teilchen bei zeitlich abnehmender Feldstärke durch den Spalt tritt. Bei hohen Teilchengeschwindigkeiten, wo der Kern auf großen Bahnradien läuft, kann man eine Fokussierung dadurch erreichen, daß man die magnetische Feldstärke mit wachsendem Bahnradius geeignet abnehmen läßt. Dem Verlauf des Magnetfeldes zwischen den Polplatten ist außerordentliche Sorgfalt zu widmen, weil von demselben die Güte des Apparates in hohem Maße anhängt.

Man hat ferner zu bedenken, daß für hohe Teilchenenergien sich die Resonanzbedingung mit einem konstanten Magnetfeld nicht mehr erfüllen läßt. Mit zunehmender Teilchengeschwindigkeit wächst wegen der Äquivalenz von Masse und Energie die Masse des Teilchens an. Seine Umlaufsfrequenz im Magnetfeld nimmt nach Formel (1) ab und es fällt rasch außer Phase. Der Verkleinerung der Larmorfrequenz mit

nen-Volt projektiert. Wegen des verschiedenen e/m -Wertes kann man dann mit demselben Heliumkerne auf 30 Millionen Elektron-Volt, Protonen auf 7,5 Millionen Elektron-Volt beschleunigen. Wie die Messungen am fertigen Apparat zeigten, wurden die berechneten Energien genau erreicht. Die Intensität des Ionenstrahles läßt sich nicht vorherberechnen; sie hängt wesentlich von der Ionenquelle, der Höhe der verwendeten Elektrodenspannung und der Güte der erreichten Fokussierung ab.

Um die erwähnten Teilchenenergien zu bekommen, ist ein Magnet von 95 cm Poldurchmesser notwendig. Im homogenen Teil des Magnetfeldes können die dosenförmigen Beschleunigungselektroden von 75 cm Durchmesser untergebracht werden. Der Magnet wiegt bei gedrängtester Konstruktion 40 Tonnen. Er gibt bei 14 cm Luftspalt eine Feldstärke von 17500 A/cm. Der Hochfrequenzsender zur Erzeugung der Wechselspannung arbeitet im Frequenzbereich von 1,35–1,70 Megahertz, entsprechend 22–18 m Wellenlänge. Er ist für eine Ausgangsleistung von 40 kW gebaut.

Großer Wert wurde auf die *technische Durchbildung* der ganzen Apparatur gelegt, um die sprichwörtlich geringe Betriebssicherheit der äußerst komplizierten Anlage nach Möglichkeit zu steigern. Gegenüber den

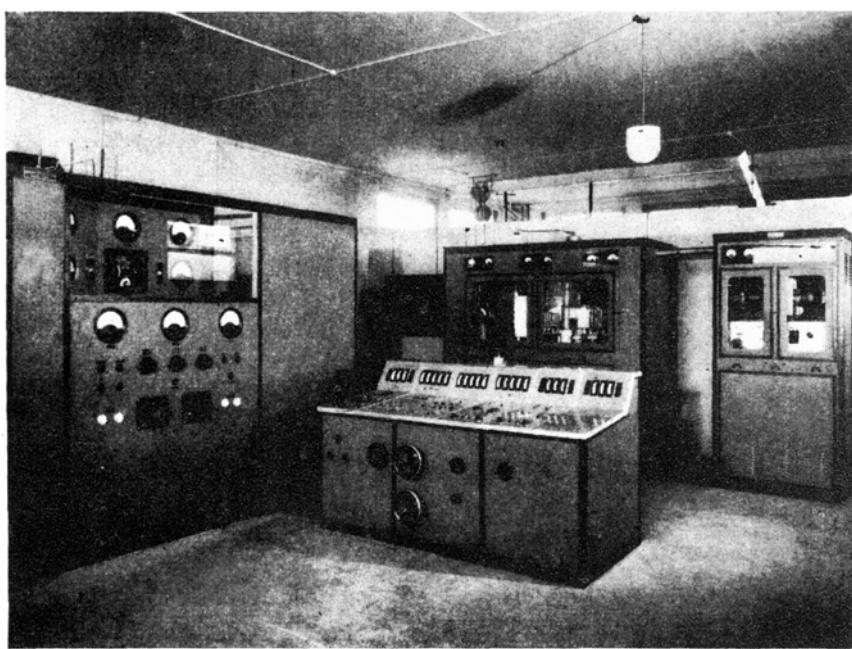


Fig. 3. Schaltpult und Sendeanlage.

bisher bekannten Konstruktionen sind eine große Reihe von Neuerungen versucht worden, die sich im Betriebe sehr gut bewährt haben.

Erfahrungsgemäß sollte ein Cyclotron wegen der außerordentlich hohen Intensität der Neutronenstrahlung, welche mit demselben erzeugt werden kann, nicht in einem physikalischen Institut untergebracht werden, weil es dort die Messungen in sämtlichen Laboratorien stört. Es wurde daher ein im Boden versenkter Raum von $17 \times 14 \times 4 \text{ m}^3$ Größe gebaut, der mit dem Hauptgebäude durch einen unterirdischen Gang verbunden ist. Die ganze Anlage ist von 1 m dicken und 2,5 m hohen Strahlenschutztank umgeben, welche zur Bremsung und Vernichtung der schnellen Neutronen mit Wasser gefüllt sind. Im Wasser werden die schnellen Neutronen nämlich durch Zusammenstoß mit den gleich schweren Wasserstoffkernen gebremst und dann, zur Ruhe gebracht, von den Protonen eingefangen und zu Deutonen gebunden. Bei dieser Kernreaktion entstehen γ -Strahlen von 2,2 Millionen Elektron-Volt Energie, die aber leicht absorbiert werden können.

Die gesamte Bedienung der Anlage geschieht durch Fernsteuerung von einem zentralen

Kommandopult aus. Die Einhaltung der Resonanzbedingung ist durch einen Schnellreglermechanismus ebenfalls automatisiert. Die Anlage enthält viele Sicherungsmechanismen und Verriegelungen, welche Fehlschaltungen unmöglich machen und bei Störungen (z. B. Vakuumverschlechterung, Lichtbogenbildung in der Beschleunigungskammer usf.) die Anlage mittels Schnellschaltern außer Betrieb setzen sollen.

Magnet. Der 40 Tonnen schwere Magnet ist von der Maschinenfabrik Oerlikon hergestellt worden. Es wurde versucht, mit dem Minimum an magnetisch hochwertigem Eisen auszukommen, das mit einem nicht allzu großen Stromkonsum verträglich ist. Den Guß des Eisenteils be

sorgte die Aktiengesellschaft der Eisen- und Stahlwerke, vormals Georg Fischer, Schaffhausen. Die Polplatten, welche einen Durchmesser von 95 cm und eine Dicke von 4,5 cm haben, sind auf $1/100$ mm genau eben geschliffen und mit derselben Genauigkeit parallel. Zwischen den Polschuhen und den Polplatten befindet sich ein Luftspalt von 1 cm Höhe, um Korrekturplatten für das Magnetfeld, sogenannte Shimmings, anbringen zu können. Diese Shimmings sind erforderlich, um genau den für die Fokussierung des

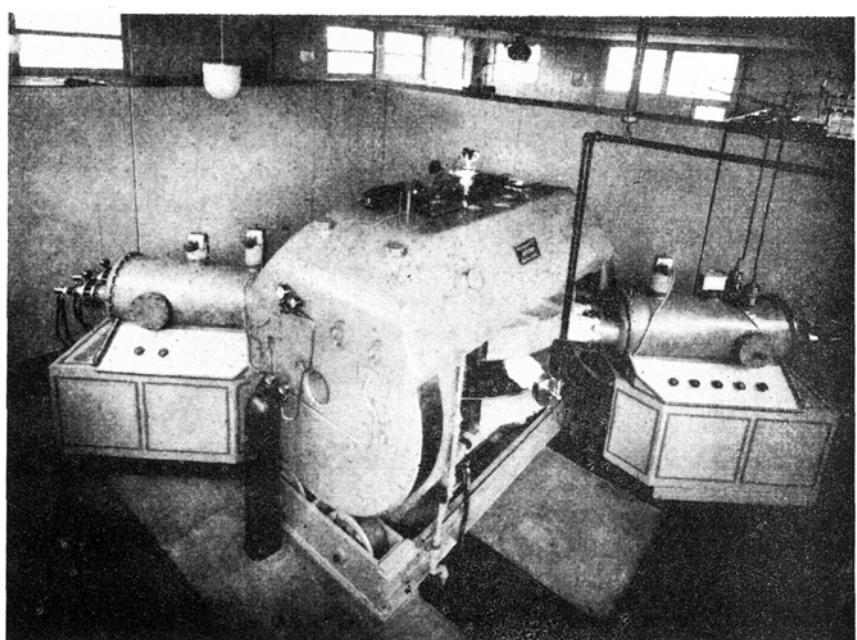


Fig. 4. Gesamtansicht des Cyclotrons.

Strahles nötigen, nach außen etwas abnehmenden, Feldstärkeverlauf zu erzielen. Die Polplatten haben kreisrunde Durchbohrungen von 4 cm Durchmesser, welche magnetisch durch Einsätze korrigiert sind und durch die die Ionenquelle (von oben) und die Abstimmplatte (von unten) in die Vakuumkammer eingeführt werden. Zum Ein- und Ausfahren der Cyclotronkammer kann das obere Magnetjoch mittels einer hydraulischen Presse gehoben werden.

Die Wicklungen des Magneten bestehen aus isolierten Kupferröhren von äußerlich quadratischem Querschnitt, in deren kreisrunder Bohrung das Kühlwasser (60 l/min) fließt. Die maximale Amperewindungszahl beträgt 300 000. Eine Wechselstrom-Gleichstrom-Umformergruppe von 200 kW Leistung liefert den nötigen Strom von 800 A für den Magneten.

Der Magnetfeldverlauf muß auf das genaueste in radialer und azimutaler Richtung vermessen und korrigiert werden. Um die Inhomogenität des Feldes, die aus der Durchbohrung der Polplatten resultiert, zu kompensieren, wurden Korrekturringe hergestellt, deren Profil so gewählt ist, daß die Feldstärke in der Mittelebene im Zentrum 1% größer ist als weiter außen. Durch diese Feldvergrößerung wird erreicht, daß die Ionen im Innern etwas rascher umlaufen als außen. Dies ist nötig, weil die Ionen am Anfang dem Maximum der elektrischen Wechselspannung etwas nacheilen müssen, wenn sie bei kleinen Radien *elektrisch* fokussiert werden sollen. Bei mittleren Radien, wo die *magnetische* Fokussierung wirksam wird, müssen sie aber diese Nacheilung aufgeholt haben und in Phase mit dem Spannungsmaximum den Beschleunigungsspalt passieren. Damit aber bei großen Radien der Phasenverlust nicht zu rasch erfolgt, wird eine zweite Korrektur angebracht, durch welche der Magnetfeldabbau gegen außen verringert wird. Fünf Zentimeter breite Eisenringe, am äußeren Rande zwischen Polplatten und Joch eingeschoben, heben den Wert der Feldstärke etwas an. Mit diesen Korrekturen ergibt sich die nötige Gesamtabnahme der Feldstärke zu 2% für das Protonenfeld und zu 2,5% für das Deutonenfeld.

Fig. 5 zeigt den Feldverlauf in der Mittelebene als Funktion des Radius. Die berechneten Korrekturen erwiesen sich im Betrieb als durchaus genügend.

Magnetfeldstabilisierung: Die Spannungsschwankungen des Gleichstromgenerators, der den Strom für den Magneten liefert, betragen ungefähr 1%. Diese Schwankungen röhren in der Hauptsache von Frequenzschwankungen des Netzes her. Wegen der scharfen Resonanzbedingung (4) sind jedoch, um einen stabilen Ionenstrahl zu erreichen, nur Magnetfeldschwankungen von ungefähr 0,1% zulässig. Eine automatische Stabilisierung des Magnetfeldes ist daher unmöglich. Die Konstanz des Magnetfeldes läßt sich am einfachsten dadurch erreichen, daß der Magnetstrom stabilisiert wird. Es treten dann nur noch Magnetfeld-

änderungen infolge der Temperaturänderungen des Eisens auf, die aber wegen der großen Masse des Magneten und der guten Kühlung äußerst langsam verlaufen.

Das Prinzip der ausgeführten Stabilisierung geht aus dem Schema der Figur 6 hervor. In den Erregerkreis

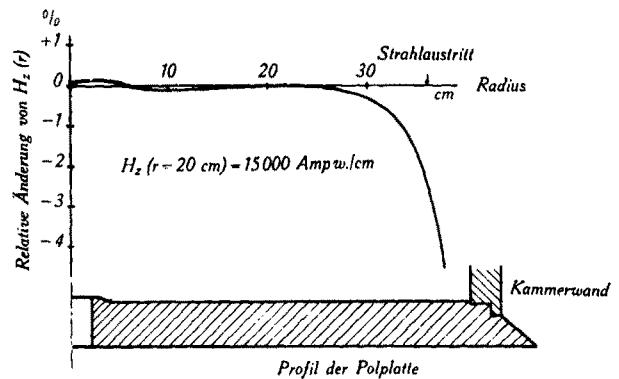


Fig. 5. Magnetfeldverlauf in der Mittelebene des Luftspaltes.

des Magnetstromkreises ist ein Widerstand von $3 \cdot 10^{-3} \Omega$ eingeschaltet. Die darüberliegende Spannung von 1 bis 2 V wird mit einer konstanten Spannung, die ein Philips-GM-Spannungsgerät liefert, dauernd verglichen. Schwankungen um den eingestellten konstanten Wert des Magnetstromes bringen ein empfindliches Galvanometer zum Ausschlag. Dessen Lichtzeiger fällt auf zwei Photozellen und beleucht-

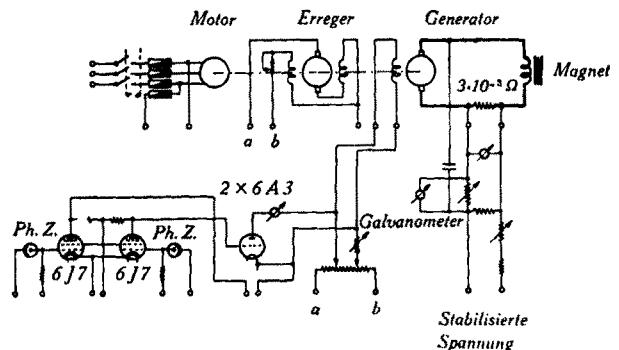


Fig. 6. Prinzipschema der Magnetfeldstabilisierung.

tet, je nach Ausschlag, mehr oder weniger die eine oder andere davon. Der verstärkte Photozellenstrom regelt den inneren Widerstand zweier Trioden, die parallel zum Reglerwiderstand des Gleichstromgenerators liegen. Dadurch wird die Erregung der Gleichstrommaschine bei Stromschwankungen in stetiger Weise entsprechend korrigiert. Eine Rückführung des an den Magnetspulen beim Regelvorgang auftretenden Spannungsstoßes auf das Galvanometer verhindert eine Überkompensation und namentlich auch das Einsetzen von Schwingungen mit Sicherheit.

Figur 7 zeigt die gemessene Strahlintensität als Funktion der Magnetfeldstärke. Man erkennt an der geringen Halbwertsbreite von 8 Ampw./cm, daß schon

eine Änderung des Magnetfeldes von 1 % den Strahl völlig zum Verschwinden bringt.

Hochfrequenz-Sende anlage: Der Sender wurde von Brown, Boveri & Cie., Baden gebaut. Die scharfe Re-

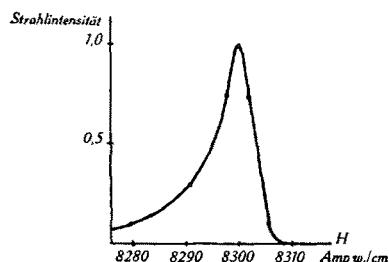


Fig. 7. Resonanzkurve des Ionenstrahles: Strahlintensität als Funktion der Magnetfeldstärke ($\lambda = 18,9$ m; Kupfertarget bei Radius $R = 35$ cm).

sonanzbedingung (4) verlangt natürlich, daß nicht nur das Magnetfeld genau konstant sei, sondern daß auch die Frequenz der Beschleunigungsspannung mit gleicher Genauigkeit konstant gehalten werde. Für diese konstante Frequenz empfiehlt sich ein fremderregter Sen-

der zugleich Gitterkreis für die folgende Pufferstufe ist. Im nachfolgenden Verstärker erfolgt wiederum eine Frequenzverdopplung. Sie wird dadurch erreicht, daß der in Klasse C arbeitende Verstärker im Gitterkreis im Gegentakt geschaltet ist, während der Anodenkreis, der auf die doppelte Frequenz abgestimmt ist, parallel schwingt. Diese Stufe gibt mit zwei RCA-833-Röhren eine Steuerleistung von 1 kW an den Gitterkreis der Endstufe ab. Diese Leistungsstufe enthält zwei BBC-Trioden vom Typ ATL 54, die in Gegentaktschaltung, Klasse C, arbeiten und eine Leistung von 40 kW abgeben. Mit dem Anodenschwingkreis ist eine Parallel draht-Übertragungsleitung induktiv gekoppelt, welche die Hochfrequenzenergie auf die Beschleunigungselektroden überträgt. Die Anodengleichspannung für die Senderöhren wird durch eine 70 kW-Mutatoranlage geliefert. Die Gleichrichtung geschieht durch einen luftgekühlten und gittergesteuerten Quecksilbergleichrichter, der eine von 0–15 kV kontinuierliche regelbare Gleichspannung liefert.

Cyclotronkammer und Beschleunigungsschwingkreis. Der Cyclotronschwingkreis, aus den halbdosenförmig-

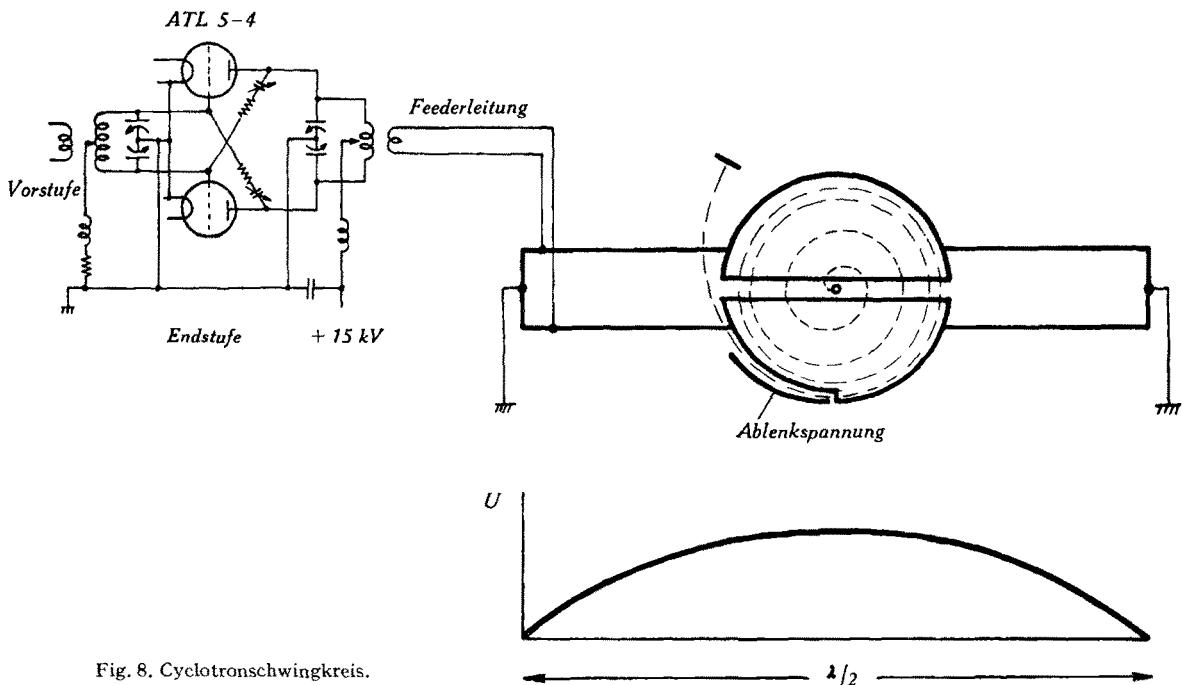


Fig. 8. Cyclotronschwingkreis.

der. Weil sich Schwingungskreise mit temperaturunabhängiger konstanter Frequenz leichter für niedrige als für hohe Frequenzen bauen lassen, wurde primär eine niedrige Frequenz hergestellt und in der Steuerstufe eine zweimalige Frequenzverdopplung vorgenommen. Gleichzeitig vermeidet man dadurch eine Rückwirkung der Endstufe und der Verstärkerstufe auf den ersten Kreis, von welchem die Erregung ausgeht. Der Erregerkreis arbeitet in Dreipunktschaltung mit Frequenzverdopplung im Anodenkreis,

gen Beschleunigungselektroden und ihren Halterungen bestehend, ist als kapazitiv verkürztes Lechersystem der Länge $\lambda/2$ ausgebildet.

Die Elektroden werden beidseitig durch lange dicke wandige, sehr starke Kupferrohre gehalten. Diese Rohre sind am Ende mit dem Gehäuse verbunden und haben dort Erdpotential. Diese Befestigungsart hat den Vorteil, daß alle Isolatoren, an denen die hohe Beschleunigungsspannung liegt, wegfallen. Auf der Strahlaustrittsseite sind die Kupferrohre durch

rechteckige Bügel, durch welche der Ionenstrahl durchtreten kann, unterbrochen. Damit das Lechersystem nicht in mechanische Schwingungen gerät, stehen diese Kupferrohre unter konstantem Zug, welcher durch

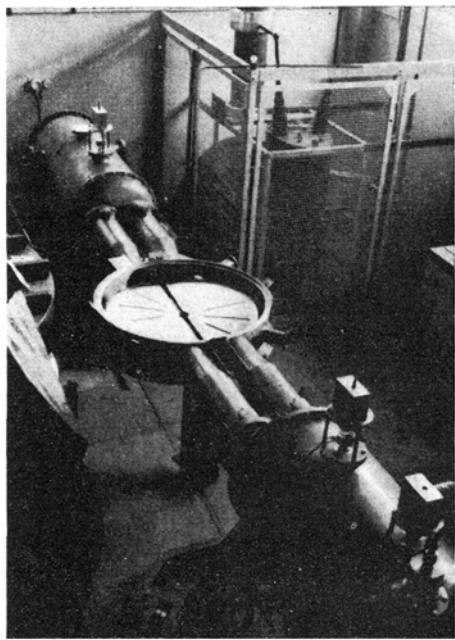


Fig. 9. Dee-System, während der Montage.

eine pneumatische Spannvorrichtung hervorgebracht wird. Das Lechersystem hat die Eigenschaft, als Hochfrequenztransformator zu wirken. Die Spannung ist jäh sinusförmig über dem Lechersystem verteilt; sie ist an den beiden Enden niedrig, in der Mitte am höchsten. Wenn nun die Hochspannung dem System auf einer Seite und nahe dem Spannungsknoten zugeführt wird, so braucht sie nur einen kleinen Wert zu haben, damit in der Mitte des Lechersystems zwischen den Beschleunigungselektroden eine hohe Spannungsamplitude entsteht. In unserem Falle tritt eine Spannungsverhöhung um einen Faktor 25 ein. Die Rohrleitungen, welche zugleich die Elektroden tragen und das Kühlwasser zur Kühlung der Elektroden ins Innere der Cyclotronkammer bringen, treten durch konische Stutzen aus der Kammer aus. Diese Stutzen, ebenfalls wassergekühlt, münden in Aluminiumtanks von 50 cm Durchmesser und 1,5 m Länge ein, in welchen sich Stromzuführungen, Abstimmapparate und andere Hilfsvorrichtungen befinden. Da die Kapazitäten der beiden Dees infolge der Strahl-Ablenkelektrode verschieden sind, ist zum Ausgleich dem andern Dee gegenüber eine von

außen verstellbare Symmetrieelektrode angebracht. Nach orientierenden Versuchen über die Spannungsverhältnisse an einem Modell des Dee-Systems wurde die Dee-Spannung mit Hilfe eines Dioden-Voltmeters auch am Original gemessen. Sie beträgt 30 kV bei 10 kW Hochfrequenzleistung. Dementsprechend sind mit 40 kW Leistung 60 kV Dee-Spannung erhältlich.

Die Abstimmung des Lechersystems auf die Erregerfrequenz erfolgt einerseits kapazitiv durch eine bewegliche Kupferplatte, welche unter den Elektroden angebracht ist, anderseits induktiv durch eine geschlossene Kupferwindung, welche im Vakuum drehbar zwischen den Kupferrohren liegt. Die Abstimmung auf elektrische Resonanz wird durch Messen des Schwingungsstromes im Lechersystem mittels einer lose gekoppelten Spule und Thermokreuz kontrolliert.

Die Beschleunigungskammer, von der Firma Hans Kanz, Metallwerk, Zürich-Albisrieden, hergestellt, ist ein schwieriges Stück der Bronzeguss-technik. Sie ist aus einer Legierung von 94% Kupfer und 6% Zinn hergestellt und mit ihrem Kühlungssystem, mit ihren vielen Öffnungen und Ansätzen von sehr komplizierter Form. Alle Ansatzstutzen für die Zuleitungen und auch die Kammer für den Strahlausritt sind angeschweißt. Die Kammer muß stark genug sein, um den Druck des Magneten (~ 130 Tonnen) und, weil sie evakuiert ist, den Luftdruck (5700 kg) ohne wesentliche Deformationen auszuhalten. Sehr wichtig ist, daß an der Kammer auch Vakuumschleusen angebracht sind, durch welche Versuchselektroden usf. ins Vakuum eingebracht werden können, ohne daß die Kammer geöffnet werden muß.

Die Beschleunigungselektroden bestehen aus Kupferblech von 1 mm Dicke, welches auf passend geformte starke Bronzeringe aufgeschraubt ist. Die Kupferstücke im Vakuum sind alle durch hart aufgelötete, an passenden Stellen angebrachte kupferne Wasserschlangen gekühlt.

Für die Vakuumtanks wurde gewalztes Reinaluminium, 6 mm dick, verwendet; alle Flansche sind ebenfalls angeschweißt. Die vollkommen vakuundichten

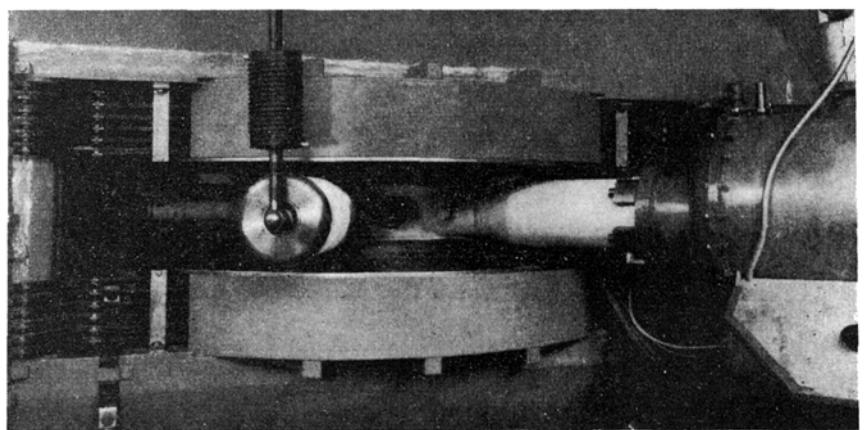


Fig. 10. Beschleunigungskammer zwischen den Magnetpolen.

Ausführung stammt von der Aluminium-Industrie-Aktiengesellschaft, Lausanne-Ouchy (Versuchswerstätte Neuhausen).

Ionenquelle: Als Ionenquelle wurde eine Gasentladung mit Glühkathode und mit magnetischer Fokussierung der gebildeten Kerne auf den Mittelpunkt des

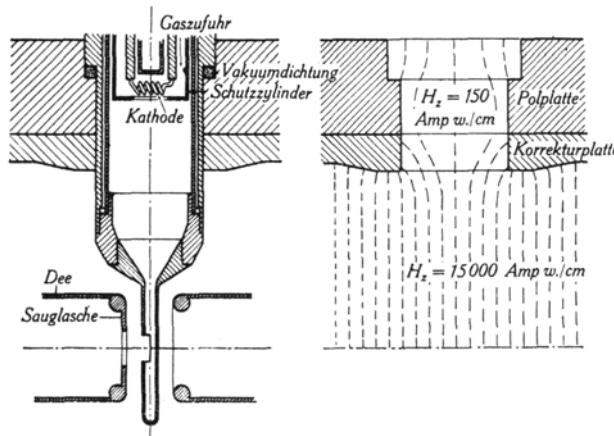


Fig. 11. Ionenquelle und Magnetfeldverlauf in der Polplattendurchbohrung.

Cyclotrons verwendet, die von der üblichen Ausführung nach LIVINGSTON wesentlich abweicht. Die Ionenquelle wird durch einen Kanal von oben durch Magnetjoch und Polplatte in die Beschleunigungskammer eingeführt. Die mit der Durchbohrung des Magneten verbundene Inhomogenität des Magnetfeldes kann so gestaltet werden, daß am Ort der Ionenquelle eine radiale Feldkomponente vorhanden ist, welche auf die Ionen fokussierend wirkt. Bei den kleinen Energien, mit denen die Ionen in der Quelle auftreten, folgen sowohl Ionen als Elektronen auf engen Spiralen den magnetischen Feldlinien. Da diese Feldlinien nach unten konvergieren, kann trotz der großen Ausdehnung der Glühkathode am Konvergenzpunkt der Ionen eine enge Kapillare verwendet werden, durch welche die Ionen in die Beschleunigungskammer austreten. Diese enge Öffnung ist deshalb günstig, weil sie die unvermeidliche Gasnachströmung, welche aus der gasgefüllten Ionenquelle in die hochevakuierte Cyclotronkammer stattfindet, stark drosselt.

Die Glühkathode der Ionenquelle ist eine Wolframspirale, deren Heizung mit 50 Perioden Wechselstrom erfolgt. Hochfrequenzheizung ist nicht erforderlich, da die Kathode im bereits geschwächten Magnetfeld im Joch liegt und 0,5-mm-Draht verwendet wird, der genügende Festigkeit aufweist. Die Lebensdauer dieser Kathode beträgt über 100 Stunden. Als Gegenelektrode dient der wassergekühlte Mantel der Ionenquelle mit 400 V Anodenspannung. Der Entladungsstrom beträgt 300 mA. Der Gasdruck im Entladungsraum beträgt bis $5 \cdot 10^{-2}$ mm Hg. Die Ionenquelle wurde modellmäßig untersucht, um die Verhältnisse im einzelnen studieren zu können. Der Ionenstrom vor der

Austrittskapillare weist alle charakteristischen Eigenschaften des Plasmas einer Gasentladung auf. Bei negativer Gegenspannung gegenüber der Glühkathode kann mit einer Sonde ein positiver Ionenstrom von mehreren Milliampères herausgezogen werden. Im Cyclotron erfolgt das Herausreißen der Ionen aus einer seitlichen Öffnung der Kapillare durch zwei Saugführer, die an den Dees, der Kapillaröffnung gegenüber, angebracht sind.

Vakuumanlage: Eine Cyclotronanlage erfordert eine außerordentlich leistungsfähige Hochvakuumapparatur. Das Vakuum in der Beschleunigungskammer muß trotz der Gasnachströmung, die dauernd durch die Ionenquelle stattfindet, sehr hoch gehalten werden. Auch besitzt die große Kammer mit den angeschlossenen Tanks sehr viele und große Flansche, die Ursache von kleinen Undichtigkeiten sein können. Die Pumpanlage muß so bemessen sein, daß der Betrieb auch bei geringen Undichtigkeiten aufrecht erhalten werden kann.

Das Volumen, das auf Hochvakuum zu halten ist, beträgt etwa 700 Liter. Mit zwei Pumpaggregaten kann dieses Volumen dauernd auf 10^{-5} mm Hg Druck gehalten werden: Eine Öldiffusionspumpe mit einer Öffnung des Pumprohres von 10 cm hält das Vakuum in der Kammer Tag und Nacht aufrecht. Während des

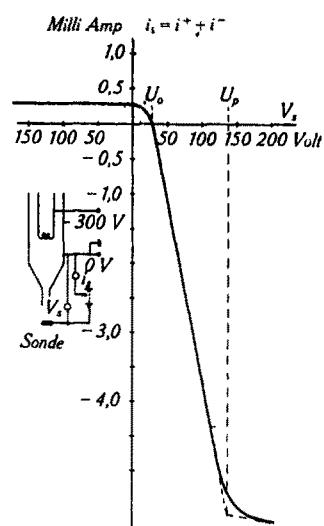


Fig. 12. Gasentladung der Ionenquelle: Plasmacharakteristik.

Betriebes des Apparates mit Gasnachströmung aus der Ionenquelle wird eine zweite, größere Öldiffusionspumpe von 20 cm Öffnung des Pumprohres zugeschaltet. Die kleinere 10-cm-Pumpe hat 200 l/sec Saugleistung. Es ist eine selbstfraktionierende Öldiffusionspumpe von 380 W Heizleistung, die einen Vorrakuumdruck von $1/10$ mm Hg benötigt. Eine zweistufige Öldiffusionspumpe von 4,5 cm Öffnungsdurchmesser, 20 l Saugleistung und 0,3 mm Hg Vorrakuumdruck und eine rotierende BBC.-Kolbenpumpe sorgen für das nötige Vorrakuum.

Die 20-cm-Öldiffusionspumpe mit 3 Stufen hat die große Saugleistung von *über 1000 l/sec*. Ihre Heizleistung beträgt 2700 W. Als Vorpumpe dient ebenfalls eine 4,5-cm-Öldiffusionspumpe. Die 20-cm-Pumpe ist in horizontaler Bauweise ausgeführt.

Durch eingehende Vorversuche verschafften wir uns die für die Konstruktion nötigen Unterlagen. Die Vorstudien wurden an kleineren Pumpenmodellen von 4–10 cm Durchmesser durchgeführt, die nach Angaben von HOLTS MARK gebaut waren. Für den Einfluß der Düsengröße auf die Saugleistung ergab sich, daß eine maximale Saugleistung von ungefähr 3 l/sec pro cm^2 Pumpenöffnung erreicht wird, wenn die Düsenfläche $\frac{2}{5}$ der Pumpenöffnung beträgt. Die *Düsenform* wurde von HICKMANN übernommen und brachte gegenüber den Formen von LANGMUIR und HOLTS MARK eine Verbesserung der Saugleistung um einen Faktor vier.

Um den Einfluß der *Düsentemperatur* zu bestimmen, wurden Messungen ausgeführt, bei denen die Düsentemperatur und die Heizleistung unabhängig voneinander variiert wurden; denn die Düsentemperatur bestimmt im wesentlichen die Molekulargeschwindigkeit des Öldampfes, die Heizleistung dagegen die verdampfende Ölmenge. Die Saugleistung weist bei Variation jeder dieser Variablen ein Maximum auf. Das Optimum der Saugleistung wird durch die entsprechende Wahl von Durchmesser, Material und Wandstärke des Kamins, die die angeführten Größen beeinflussen, erreicht.

Die *Saugleistung* als Funktion des Druckes ist für die 10- und 20-cm-Pumpe im Druckbereich von $5 \cdot 10^{-4}$ bis 10^{-5} Tor praktisch konstant. Sie erweist sich bei unseren selbstfraktionierenden Pumpen unabhängig von der *Qualität* des benützten *Öles*. Nur verlangt ein Öl mit niedrigem Dampfdruck einen niedrigeren Vakuumdruck. Wir verwenden in der Vorpumpe ein Öl mit einem Dampfdruck von 10^{-4} mm Hg, in den Hochvakuumpumpen Valvoline EH.

Um das Pumpenöl bei allfälligem Lufteinbruch zu schützen, sind elektrisch betätigtes, sich bei Verschlechterung des Vakuums automatisch schließende Abschlußklappen vor den Pumpenöffnungen angebracht. Die Betätigung dieser Verschlüsse wird durch Ionisationsmanometer ausgelöst. Als Hochvakuumdichtung für die Flansche bewährten sich je zwei parallele rechteckige Rillen. In die eine Rille kommt als Dichtung eine endlose Gummischlange gleichen Querschnittes, in die zweite wird ein Bleiring eingelegt. Der Zwischenraum zwischen den Rillen kann evakuiert werden und damit läßt sich die Dichtigkeit jedes Flansches gegen die Vakuumseite sowohl als gegen die Außenluft sofort prüfen. Zur Schließung eventuell vorhandener kleiner Poren wurde die Cyclotronkammer mit einer dünnen Schicht Glyptallack überzogen.

Ionenstrahlfokussierung und Intensität: Beim erstmaligen Aufsuchen des Ionenstrahles wurden in radialer Richtung in etwa 1 cm Abstand voneinander dünne

Quarzstäbchen in der Beschleunigungselektrode aufgestellt. Bei geringer Strahlintensität konnte die Breite des Strahles am Aufglühen der getroffenen Stäbchen festgestellt werden. Aus dem Verlauf der elektrischen Feldlinien im Beschleunigungsspalt, der am Modell im elektrolytischen Trog vermessen wurde, und aus der radialen Variation der magnetischen Feldstärke kann der ganze Fokussierungsvorgang auch berechnet werden. Theorie und Beobachtung zeigen beste Übereinstimmung. Fig. 13 zeigt die vertikale Verteilung der Protonenintensität bei 35 cm Radius. Sie wurde gemessen durch die Aktivitätsverteilung auf einer bestrahlten Kupferplatte. Man sieht, daß die Halbwertsbreite des Strahles nach Erreichung der vollen Energie nur noch 8 mm beträgt.

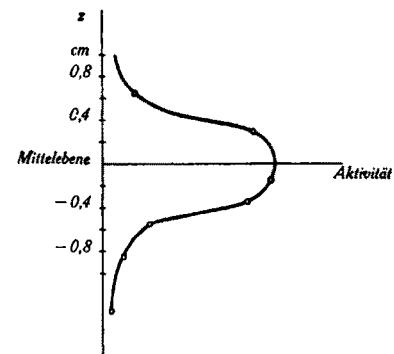


Fig. 13. Verteilung der Vertikalintensität des Protonenstrahles (Aktivität einer Kupfertarget: $\lambda = 18,5$ m, Radius $R = 35$ cm).

Bei den ersten Versuchen machte uns eine Art Strahlsperre viel zu schaffen, deren Ursache wir zuerst nicht auffinden konnten. Beim Bestrahlen von gekühlten Kupfersonden innerhalb der Dees wurde die Aktivität auf der Seite gefunden, welche nicht der Umlaufsrichtung der Protonen, sondern der entgegengesetzten entsprach, in welcher negative H-Ionen umlaufen mußten. Nur durch Umpolen des Magnetfeldes konnte der H^+ -Ionenstrahl erhalten werden. Die eine geometrische Umlaufsrichtung schien also gesperrt zu sein. Als Ursache dieser Erscheinung stellten sich später Oberschwingungen heraus, welche sich auf dem Lechersystem neben der Grundschwingung ausbildeten. Durch Schwächung der Erregung der störenden Oberschwingungen am Sender und Anbringen von Shimmings konnte die Sperrung vermieden werden.

Die Messung der Strahlintensität wurde kalorimetrisch vorgenommen. Die Intensität beträgt bei 10 kW Hochfrequenzleistung bereits $30 \mu\text{A}$ und steigt mit wachsender Beschleunigungsspannung weiter stark an. Meist wird bei Bestrahlungen nicht über den Wert von $50 \mu\text{A}$ gegangen, weil so schon bei 7 Millionen V Spannung eine Strahlleistung von etwa 350 W auf etwa 50 mm^2 Auf trefffläche vernichtet werden müssen. Man erkennt, daß eine intensive Kühlung notwendig ist, damit das bestrahlte Präparat im Hochvakuum nicht schmilzt oder verdampft.

Ein Maß für diese Strahlintensität bildet vielleicht auch die Aktivität künstlich hergestellter radioaktiver Präparate. Um ein anschauliches Beispiel zu geben, sei erwähnt, daß mit $30 \mu\text{A}$ 7 Millionen Protonen das Positronen ausstrahlende radioaktive Zinkisotop Zn^{63} in einer Stärke von über 100 Millicurie erhalten wird. Diese Aktivität entspricht einer Umwandlung von 4000 Millionen Zinkatomen pro Sekunde.

Da bei hoher Protonenenergie der häufigste Kernprozeß, das Herausschlagen eines Neutrons durch das einfallende Proton ist, stellt das Cyclotron während der Bestrahlungen mit Protonen auch eine starke Neutronenquelle dar. Die Intensität einer Neutronenquelle wird vielfach durch die Äquivalenz mit einer Standard-Neutronenquelle, bei der die Neutronen durch die Radium-Alpha-Strahlung in Beryllium ausgelöst werden, ausgedrückt. Wird die Neutronenstärke, wie wir sie unter anderem während der Bestrahlung von Kupfer gemessen haben, in dieser Einheit angegeben, so würden zu ihrer Erzeugung etwa 3 kg Radium nötig

sein. Die vom Cyclotron ausgehende starke Neutronenstrahlung macht sich beispielsweise dadurch bemerkbar, daß Silbermünzen in den Taschen von Personen, die sich während der Bestrahlung in mehreren Metern Distanz vom Cyclotron, durch die Wassertanks geschützt, aufhalten, infolge von Neutroneneinfangung nach kurzer Zeit schon merkliche Radioaktivität aufweisen.

Die ETH.-Anlage ist seit einem Jahr in Betrieb. Sie wurde bisher stets (im Gegensatz zu fast allen andern Anlagen dieser Art, welche mit Deutonen arbeiten) zur Beschleunigung von Protonen benutzt. Wenn das Cyclotron für therapeutische Zwecke, speziell als intensivste Neutronenquelle oder zur Herstellung von maximal-intensiven Präparaten für biologische Zwecke dienen soll, so muß es allerdings mit Deutonen statt mit Protonen betrieben werden. Jedoch sind die mit schnellen Protonen hervorgerufenen Kernumwandlungen bis jetzt sehr wenig studiert, und sie bieten dem Kernphysiker eine schier unerschöpfliche Fülle an interessanten Fragestellungen dar.

L'évolution de la formule chromosomiale chez les Vertébrés

Par R. MATTHEY, Lausanne

(Suite)

4. Etat actuel de nos connaissances

Si la bibliographie d'OGUMA et MAKINO (1937) renferme près de 600 références, ce nombre ne doit pas faire illusion : nos connaissances actuelles sur les chromosomes des Vertébrés sont bien inférieures à ce que le chiffre énoncé pourrait donner à penser : un nombre considérable de travaux sont en effet dépourvus de toute valeur. Ceci provient de ce que, pendant très longtemps, des méthodes adéquates de fixation ont manqué, le problème purement technique étant ici bien plus difficile à résoudre que chez la plupart des Invertébrés. De ce point de vue technique, nous devons d'ailleurs distinguer plusieurs cas : les Amphibiens offrent, d'entre les Vertébrés, les conditions d'étude les plus favorables ; les cellules sont très grandes et le nombre de chromosomes est rarement élevé. Beaucoup de fixateurs classiques donnent, appliqués à ce matériel, des images satisfaisantes ; il s'ensuit que ce groupe est, de beaucoup, le mieux connu, les acquisitions récentes étant venues s'ajouter aux anciennes au lieu de les remplacer. Je citerai ensuite les Mammifères : des pièces traitées par le Bouin-Allen (PAINTER, 1921) ou par le Flemming acétique (WINIWARTER dès 1900) permettent, lorsque la fixation est bien réussie, d'établir le nombre de chromosomes et de préciser les grands traits de leur morphologie. Ces

méthodes ont cependant été complètement éclipsées, à partir de 1928, par l'emploi des fixateurs chromo-oxmiques sans acide acétique, dont l'introduction dans la technique est due à MINOUCHI. Le champ d'action de ces liquides fut étendu aux Reptiles par K. NAKAMURA, puis par MATTHEY. Et ce groupe, sur lequel nous n'avions jusqu'alors que des données très rares, put être activement travaillé : je montrai notamment que la digamétie mâle décrite par PAINTER (1921) et par DALCQ (1921) n'existe pas en réalité. La découverte de MINOUCHI a donc permis à la cytologie descriptive des Mammifères (MAKINO, OGUMA, MATTHEY, TATEISCHI) et des Reptiles (NAKAMURA, MATTHEY) de prendre un essor rapide. Et les nouveaux fixateurs se révèlèrent applicables aux Amphibiens chez lesquels ils donnent des résultats splendides (IRIKI, MAKINO, SATO). Enfin la technique de MINOUCHI convient également aux Poissons, classe longtemps délaissée, et dont un certain nombre d'espèces ont été analysées par IRIKI et MAKINO.

Le résultat le plus marquant que nous devons aux fixateurs chromo-oxmiques, c'est la démonstration de l'inexistence de chromosomes sexuels morphologiquement identifiables chez les Poissons, les Amphibiens et les Reptiles, et de la généralité du type $\text{♂}XY - \text{♀}XX$ chez les Mammifères (MATTHEY, 1936 jusqu'à 1942).