Das Hochfrequenzsystem des 600-MeV-Synchrocyclotrons der CERN sowie allgemeine Hochfrequenzprobleme von Synchrocyclotrons

Autor(en): **Beger, H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **53 (1962)**

Heft 9

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-916933

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Das Hochfrequenzsystem des 600-MeV-Synchrocyclotrons der CERN sowie allgemeine Hochfrequenzprobleme von Synchrocyclotrons

Vortrag, gehalten an der 25. Hochfrequenztagung des SEV vom 26. Oktober 1961 in Genf,

von *H. Beger*, Genf

621.384.612

Zur Beschleunigung von Protonen in Synchrocyclotrons auf Energien von mehreren hundert MeV benötigt man Hochfrequenzspannungen von einigen zehn kV an räumlich ausgedehnten und kapazitätsbehafteten Beschleunigungsspalten. Die Frequenz der Beschleunigungsspannung liegt bei einigen zehn MHz und muss maximal um den Faktor zwei während einer Beschleunigungsperiode geändert werden. Hiezu sind variable Blindleistungsspeicher mit grossem Fassungsvermögen notwendig. Verschiedene Lösungsmöglichkeiten werden erwähnt und das bei der CERN installierte HF-System näher beschrieben.

Pour l'accélération de protons à des énergies de plusieurs centaines de MeV dans des synchrocyclotrons, il faut des tensions à haute fréquence de quelques dizaines de kV dans des cavités d'accélération de grande étendue et à capacités. La fréquence de la tension d'accélération est de l'ordre de quelques dizaines de MHz et doit pouvoir être doublée, au maximum, durant une période d'accélération. Pour cela, de grands accumulateurs d'énergie réactive sont nécessaires. L'auteur indique plusieurs possibilités de résoudre ce problème et décrit en détail le système à haute fréquence installé au CERN.

I

Abgesehen von der grossen 28-GeV-Synchrotronmaschine besitzt die CERN einen zweiten kleineren Protonenaccelerator, das 600-MeV-Synchrocyclotron. Bei einem Cyclotron bewegen sich die zu beschleunigenden Partikel auf einer Spiralbahn in einem nahezu homogenen magnetischen Feld, nachdem sie die in der Mitte der Maschine liegende Ionenquelle verlassen haben. Die Teilchen durchlaufen bei einer Umdrehung zweimal einen Beschleunigungsspalt, an dem bei den gewöhnlichen Cyclotrons eine Hochfrequenzspannung mit der konstanten Frequenz ω liegt. Diese Frequenz ist gerade so gross, dass die Teilchen nach einer halben Umdrehung eine um 180° phasenverschobene Spannung vorfinden und im richtigen Sinne beschleunigt werden.

$$\omega = \frac{e\,B}{m}$$

e Ladung des Partikels
m Masse des Partikels
B Induktion im Magnetspalt

Während e und B Konstante sind, ist die Grösse der Masse dann einer Änderung unterworfen, wenn die Geschwindigkeit der Partikel in die Grössenordnung der Lichtgeschwindigkeit kommt. Diese Massenänderung erfolgt nach dem Gesetz

$$m_v = m_0 \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

m_0 Ruhemasse
m_v Masse bei der Geschwindigkeit v
c Lichtgeschwindigkeit

Bis zu einer Energie von etwa 15 MeV kann man bei der Beschleunigung von Protonen diese Massenänderung vernachlässigen. Will man jedoch Teilchen zu höheren Energien beschleunigen, so muss die Frequenz der beschleunigenden Hochfrequenzspannung während des Beschleunigungsvorganges mit steigender Teilchenenergie erniedrigt werden. Das ist das Prinzip des Synchrocyclotrons, bei dem die Beschleunigungsfrequenz synchron mit der Umlauffrequenz der Teilchen geändert wird. Während man bei Protonenenergien von 50 MeV noch mit einigen Prozenten relativer Frequenzmodulation auskommt, wird für das 600-MeV-Synchrocyclotron (SC) der CERN eine Frequenzvariation zwischen 29,0 MHz und 16,5 MHz notwendig (Fig. 1).

Im Gegensatz zu dem kontinuierlich arbeitenden Festfrequenz-Cyclotron wird beim Synchrocyclotron diskontinuierlich immer nur ein Teilchenpaket innerhalb einer Frequenzvariationsperiode beschleunigt. Um einen grossen Teilchenausstoss zu bekommen, wird man bestrebt sein, die Repetitionsfrequenz möglichst hoch zu legen. Anderseits bedeutet eine hohe Repetitionsfrequenz, dass auch der Energiegewinn je Teilchenumlauf hoch sein muss, um innerhalb der gegebenen kurzen Zeit auf die gewünschte Endenergie zu kommen. Daher muss bei einer Erhöhung der Repetitionsfrequenz auch die Beschleunigungsspannung erhöht werden. Einer solchen Erhöhung sind aber durch Isolationsprobleme Grenzen gesetzt. Infolge des komplizierten Aufbaus der Hochfrequenzsysteme der Synchrocyclotrons liegen die Spannungsgrenzen bei diesen viel niedriger als bei Festfrequenzcyclotrons, wo man Spitzenspannungen von 100...200 kV verwenden kann. Beim SC der CERN liegen die höchstzulässigen Beschleunigungsspannungen bei 25 kV. Durch andere Umstände ist der Wellenwiderstand des zwischen den Magnetpolen liegenden Elektrodensystems und in gewissen Grenzen damit auch der des übrigen notwendigen Koaxialsystems mit etwa 10 Ω gegeben. Daraus ergeben sich im System Spitzenströme von rund 2,5 kA. Die 25 kV entsprechende Repetitionsfrequenz liegt in der Grössenordnung von 100 Hz. Die Höhe der magnetischen Induktion im Luftspalt des Magneten ist infolge der Eiseneigenschaften auf 18 000 Gs begrenzt. Daraus ergibt sich für eine Protonenendener-

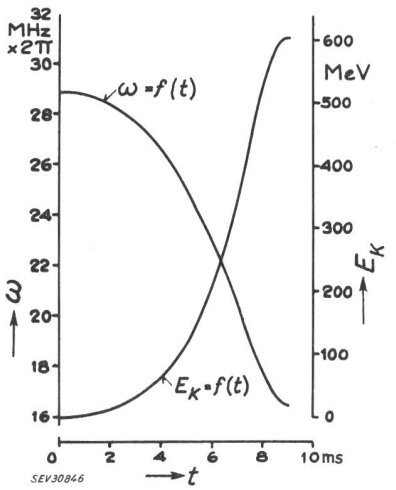

Fig. 1
Beschleunigungsfrequenz ω und Protonenenergie E_K als Funktion der Zeit t

gie von 600 MeV ein Durchmesser des Beschleunigungssystems von rund 5 m.

Das SC-Hochfrequenzsystem muss also in der Lage sein, an einem Beschleunigungsspalt von 5 m Länge eine Maximalspannung von 25 kV in einem Frequenzbereich von 29,0...16,5 MHz mit einer Repetitionsfrequenz von etwa 100 Hz zu liefern. Die zur Beschleunigung eine Strahles von etwa 1 μA nötige Hochfrequenzwirkleistung liegt in der Grössenordnung einiger Kilowatts.

II

Wenn man einen Breitbandsender benützen wollte, um die vorstehend aufgeführten Forderungen zu erfüllen, so müssten Wirkleistungen in der Grössenordnung von Megawatts erzeugt und in Dämpfungswiderständen vernichtet werden. Um die aufzubringende Leistung in vernünftigen Grenzen zu halten, ist es daher notwendig, abgestimmte Leistungsstufen zu verwenden. Der Einfachheit halber werden stets eigenerregte Schaltungen verwandt. Um eine Frequenzvariation der geforderten Grösse und im geforderten Leistungsbereich durchführen zu können, benötigt man grosse Blindleistungsspeicher, deren Fassungsvermögen im Takte der Repetitionsfrequenz geändert werden muss. Verschiedene praktische Lösungen bieten sich dazu an.

A. Rotierender Kondensator

Der rotierende Kondensator ist ein Drehkondensator mit unbegrenztem Drehwinkel und entsprechenden mechanischen Abmessungen. Seine Vorteile bestehen in den sehr geringen elektrischen Verlusten und der variablen Repetitions-(Umlauf-)-Frequenz. Unvorteilhaft ist, dass der erreichbare Frequenzhub konstant ist, und dass sich bei der Konstruktion besonders durch die Tatsache Schwierigkeiten ergeben, dass die Lager des rotierenden Teiles unter allen Umständen frei von Hochfrequenzströmen gehalten werden müssen, da sonst die Lebensdauer der Lager sehr stark reduziert wird. Trotzdem sind rotierende Kondensatoren an vielen Stellen sowohl bei kleinen als auch bei grössten Maschinen zu finden (z. B. in Dubna bei Moskau, 680 MeV) [1] [1]).

B. Vibrationskondensator

Beim Vibrationskondensator wird die Kapazitätsänderung durch translatorische Bewegung der Elektroden bewirkt. Die Ausführung kann aus einer Kombination einer grossen Stimmgabel bestehen, deren Maul als Gegenelektrode variablen Abstands gegenüber einer festen Elektrode arbeitet. Als Vorteile sind zu nennen: die elektrischen Verluste sind gering und der erreichbare Frequenzhub ist variabel. Dafür ist es ein Nachteil, dass die Repetitionsfrequenz konstant ist. Schwierigkeiten ergeben sich ferner bei der Herstellung, der Aufhängung und Positionskontrolle sowie dem Antrieb. Hochfrequenzsysteme mit Vibrationskondensatoren sind in Europa bei der CERN und in den USA in Berkely in Betrieb [2].

C. Ferritmodulator

Beim Ferritmodulator wird das frequenzbestimmende Koaxialsystem teilweise mit Ferrit gefüllt. Durch Vormagnetisierung wird die Wechselfeldpermeabilität und damit die elektrische Länge des Resonanzsystems geändert. Ein solches System ist sehr flexibel. Variabel sind Repetitionsfrequenz, Frequenzhub sowie das Frequenz-Zeit-Programm. Ein grosser Nachteil sind die hohen Hochfrequenzverluste des Ferrits, die bisher die Anwendung dieses Prinzips bei grösseren Maschinen verhindert haben. Seit 1959 ist in Moskau ein 30-MeV-Cyclotron mit Ferritmodulator in Betrieb [3].

D. Bariumtitanatmodulator

Die Abhängigkeit der Dielektrizitätskonstanten von Bariumtitanat von der elektrischen Feldstärke ergibt ähnliche Möglichkeiten zum Bau eines Modulators wie beim Ferritmodulator. Die technologischen Schwierigkeiten sind bei Bariumtitanaten jedoch noch vielfach höher als bei Ferriten. Das 30-MeV-Cyclotron der Universität Bonn arbeitet seit etwa 2 Jahren mit einem solchen Bariumtitanatmodulator [4].

III

Beim Synchrocyclotron der CERN ist nach eingehenden Überlegungen im Jahre 1957 ein HF-System mit Schwingkondensator zur Ausführung gekommen, das nach einigen Anfangsschwierigkeiten nunmehr sehr zufriedenstellend seinen Dienst versieht. Der Modulationskondensator besteht aus der Kombination «feste Elektrode — vibrierende Stimmgabel». Die Stimmgabel hat Abmessungen von 2000 × 550 × 130 mm. Sie ist durch Fräsen aus einem Aluminiumblock hergestellt. Die Kapazität dieser Anordnung variiert bei einer Schwingamplitude von 25 mm zwischen 230 und 2300 pF. Die Resonanzfrequenz der Stimmgabel ist 55 Hz. Ihre Lebensdauer war auf etwa 10^9 Schwingungen berechnet worden, bis jetzt hat sie aber schon 4×10^9 Schwingungen gemacht, ohne Ermüdungserscheinungen zu zeigen. Der Antrieb der Stimmgabel erfolgt mittels eines elektromechanischen Wandlersystems von ihrem Fusse aus. Die erforderliche Antriebsleistung (Wandlerverluste mit eingeschlossen) liegt bei 30 W. Die hohe HF-Stromdichte von 7 A/cm auf der Ober-

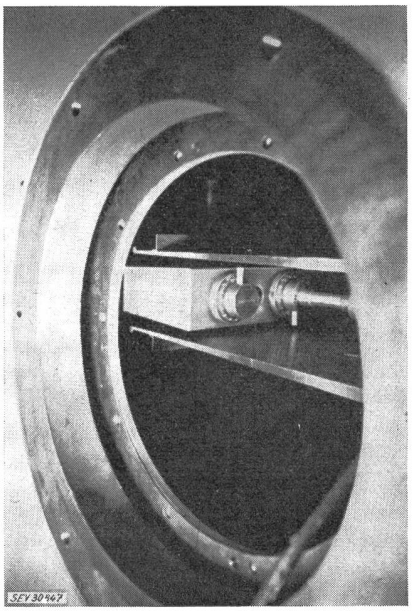

Fig. 2
Blick auf den Stimmgabel-Kondensator und die Kontrollkontakte für die Regelung der mechanischen Position der Stimmgabel im Vakuumtank

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

fläche der Stimmgabel verursacht eine erhebliche Erwärmung, weswegen der Fuss der Stimmgabel wassergekühlt ist. Da sich das ganze HF-System im Vakuum befindet, fällt die normalerweise stattfindende Kühlung durch Luftkonfektion völlig weg. Die mechanische Position der Stimmgabel gegenüber der festen Elektrode wird mittels mechanischer Kontakte periodisch kontrolliert und durch Servomotoren automatisch in die Sollage gebracht (Fig. 2).

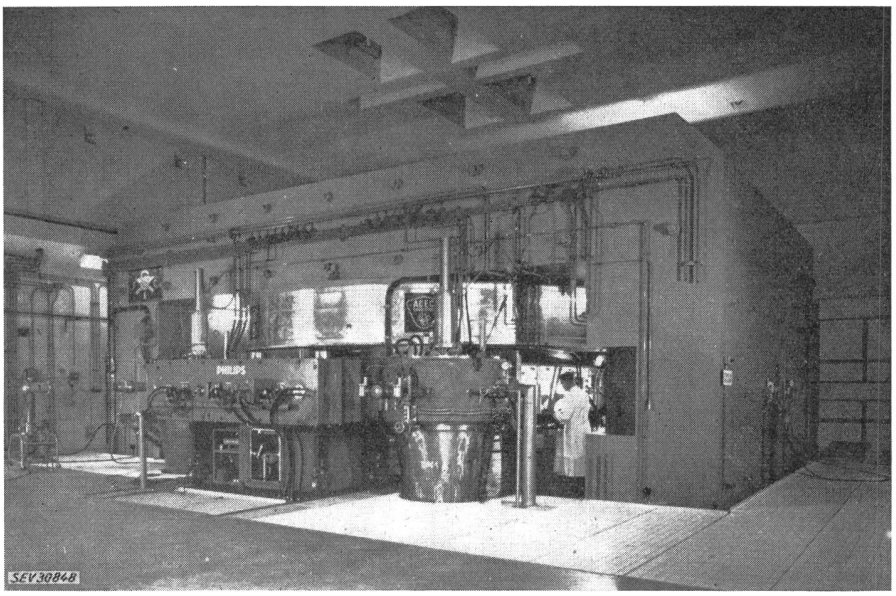

Fig. 3
Ansicht des Zyklotrons

Der Schwingkondensator befindet sich nun als Verkürzungsserienkondensator im Mittelleiter des frequenzbestimmenden Koaxialsystems, das an einem Ende hochfrequenzmässig kurzgeschlossen ist. Das offene Ende der als $\lambda/4$-Resonator arbeitenden Koaxialleitung wird durch die im Magnetspalt liegende Beschleunigungselektrode zusätzlich kapazitiv belastet. Um Elektronentanzschwingungen zwischen Innen- und Aussenleiter zu unterbinden, muss der Innenleiter gegenüber dem Aussenleiter eine negative Gleichvorspannung erhalten. Dazu war die Konstruktion eines HF-Kurzschlusskondensators von 1 µF für einen Spitzenstrom von 3 kA notwendig. Er wurde unter Verwendung grossflächiger Bariumtitanatplatten gebaut, um Eigenresonanzen zu vermeiden.

Der HF-Generator selbst, der das Koaxialsystem speist, besteht aus einer 100 kW Sendetriode in Gitterbasisschaltung mit induktiver Spannungsteilung im Rückkopplungszweig. Durch einen in Serie mit der Kathode liegenden Kondensator kann die optimale Rückkopplungsphase etwa in die Mitte des Frequenzbandes gelegt werden. Die Anode der Oszillatorröhre ist über eine kurze Koaxialleitung bei etwa $^1/_7$ der Gesamtlänge mit dem grossen Koaxialsystem verbunden. Um eine unnötige Erwärmung des ganzen HF-Systems insbesondere der Stimmgabel zu vermeiden, wird die Oszillatorröhre durch eine negative Gittervorspannung während der Zeit gesperrt, während der sich die Eigenfrequenz des Systems von 16,5 nach 29 MHz bewegt und wo keine Teilchenbeschleunigung möglich ist. (Fig. 3) [5].

IV

Im Anschluss an die Beschreibung des SC-HF-Systems des CERN soll noch kurz von einigen Entwicklungsprojekten berichtet werden. Eine wichtige Aufgabe besteht in der Erhöhung der z. Z. etwa 0,8 µA betragenden Strahlintensität, was auf verschiedenen Wegen erreicht werden kann. So kann zum Beispiel das Amplitudenprogramm der Beschleunigungsspannung optimiert werden und zwar bei bestehenbleibendem durch die Stimmgabel gegebenem Frequenz-Zeit-Programm. Ein entsprechender Anodenspannungsmodulator ist im Bau und wird in Kürze in Dienst gestellt werden. Eine andere Möglichkeit besteht in der Optimierung des Frequenz-Zeit-Programmes und der Repetitionsfrequenz durch Änderung des Modulatorsystems in einen Ferritmodulator. Diese Möglichkeit wird zur Zeit studiert. Ferner wird daran gedacht, das Beschleunigungselektrodensystem in mehrere Teile aufzuspalten, die dann von normalen Breitbandverstärkern betrieben werden könnten. Eine weitere Entwicklungsaufgabe besteht darin, die beschleunigten Partikel nicht alle während eines kurzen Zeitraumes am Ende des Beschleunigungsvorganges zur Verfügung zu stellen sondern sie kontinuierlich anzuliefern. Hiezu werden die Protonen auf einem bestimmten Radius gespeichert und mittels einer weiteren Ablenkelektrode kontinuierlich ausgelenkt. Diese Elektrode wird von einem Breitbandsender mit einer Frequenz von 17 MHz und einer sägezahnförmig ± 500 kHz frequenzmodulierten Spannung von 7 kV beliefert.

V

Von der SC-Maschine der CERN wird jeweils ein 6tägiger unterbrechungsloser 24-Stunden-Betrieb gefordert. Es gelingt jetzt, die durch Fehler im HF-System bedingten Ausfallzeiten unter 2 % zu halten.

Literatur

[1] *Mints, A. L., I. H. Neviazhski* und *B. I. Poliakow:* Radio Frequency System for the 680 MeV Proton Synchrocyclotron. Proc. CERN Symposium 1956, Bd. 1, S. 419...424.

[2] *Thornton, R. L.:* Frequency Modulation and Radiofrequency-system for the Modified Berkeley Cyclotron. Proc. CERN Symposium 1956, Bd. 1, S. 413...418.

[3] *Antonow, A. V. u. a.:* Ferrite Modulation System Designed for Operating a Fixed Frequency Cyclotron in an FM-Mode. Proc. Internat. Conference on High Energy Accelators and Instrumentation-CERN, S. 631...636.

[4] *Brückmann, H.:* An Modulator for the Bonn Synchrocyclotron Using Ferroelectric Ceramic. Nuclear Instrum. & Methods (Internat.) 6(1960)2, S. 169...175.

[5] *Das 600-MeV-Synchrozyklotron des Cern in Genf.*
I. Gentner, W.: Entwurf und Problemstellung. Philips' techn. Rdsch. 22(1960/61)3, S. 82...89.
II. Schmitter, K. H. und *S. Kortleven:* Die Hochfrequenzanlage. Philips' techn. Rdsch. 22(1960/61)3, S. 89...102.
III. Bollée, B. und *F. Krienen:* Der Stimmgabel-Modulator. Philips' techn. Rdsch. 22(1960/61)3, S. 102...122.

Adresse des Autors:

Dr.-Ing. *H. Beger*, Chef der Entwicklungssektion der Synchrocyclotron-Abteilung, CERN, Genf.