

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 53 (1962)

Heft: 9

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

Autor: Beger, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916933>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://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. Hierzu 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

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

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. Andererseits bedeutet eine hohe Repetitionsfrequenz, dass auch der Energiegewinn je Teilchenlauf 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 10Ω gegeben. Daraus ergeben sich im System Spitzestromen 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-

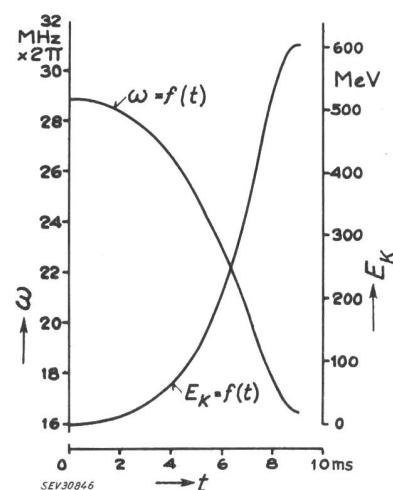


Fig. 1
Beschleunigungsfrequenz ω und Protonenenergie E_K als Funktion der Zeit t

gie von 600 MeV ein Durchmesser des Beschleunigungs-
systems 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 Frequenz-
bereich von 29,0...16,5 MHz mit einer Repetitionsfre-
quenz von etwa 100 Hz zu liefern. Die zur Beschleuni-
gung eine Strahles von etwa 1 μ A nötige Hochfrequenz-
wirkleistung liegt in der Größenordnung einiger Kilo-
watts.

II

Wenn man einen Breitbandsender benützen wollte,
um die vorstehend aufgeführten Forderungen zu er-
füllen, so müssten Wirkleistungen in der Größenord-
nung von Megawatts erzeugt und in Dämpfungswider-
ständen vernichtet werden. Um die aufzubringende
Leistung in vernünftigen Grenzen zu halten, ist es da-
her notwendig, abgestimmte Leistungsstufen zu verwen-
den. Der Einfachheit halber werden stets eigenerregte
Schaltungen verwandt. Um eine Frequenzvariation der
geforderten Grösse und im geforderten Leistungsbe-
reich 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 me-
chanischen Abmessungen. Seine Vorteile bestehen in
den sehr geringen elektrischen Verlusten und der va-
riablen Repetitions-(Umlauf)-Frequenz. Unvorteilhaft
ist, dass der erreichbare Frequenzhub konstant ist, und
dass sich bei der Konstruktion besonders durch die Tat-
sache Schwierigkeiten ergeben, dass die Lager des ro-
tierenden Teiles unter allen Umständen frei von Hoch-
frequenzströmen gehalten werden müssen, da sonst die
Lebensdauer der Lager sehr stark reduziert wird. Trotz-
dem 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 Kapazitäts-
änderung durch translatorische Bewegung der Elektro-
den bewirkt. Die Ausführung kann aus einer Kombina-
tion einer grossen Stimmagabel bestehen, deren Maul
als Gegenelektrode variablen Abstands gegenüber einer
festen Elektrode arbeitet. Als Vorteile sind zu nennen:
die elektrischen Verluste sind gering und der erreich-
bare Frequenzhub ist variabel. Dafür ist es ein Nach-
teil, dass die Repetitionsfrequenz konstant ist. Schwie-
rigkeiten 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 Ber-
keley in Betrieb [2].

C. Ferritmodulator

Beim Ferritmodulator wird das frequenzbestim-
mende Koaxialsystem teilweise mit Ferrit gefüllt.
Durch Vormagnetisierung wird die Wechselfeldper-
meabilität und damit die elektrische Länge des Reso-
nanzsystems geändert. Ein solches System ist sehr flexi-

bel. Variabel sind Repetitionsfrequenz, Frequenzhub
sowie das Frequenz-Zeit-Programm. Ein grosser Nach-
teil sind die hohen Hochfrequenzverluste des Ferrits,
die bisher die Anwendung dieses Prinzips bei grösseren
Maschinen verhindert haben. Seit 1959 ist im 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 Schwierig-
keiten sind bei Bariumtitanaten jedoch noch vielfach
höher als bei Ferriten. Das 30-MeV-Cyclotron der Uni-
versität Bonn arbeitet seit etwa 2 Jahren mit einem
solchen Bariumtitanatmodulator [4].

III

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

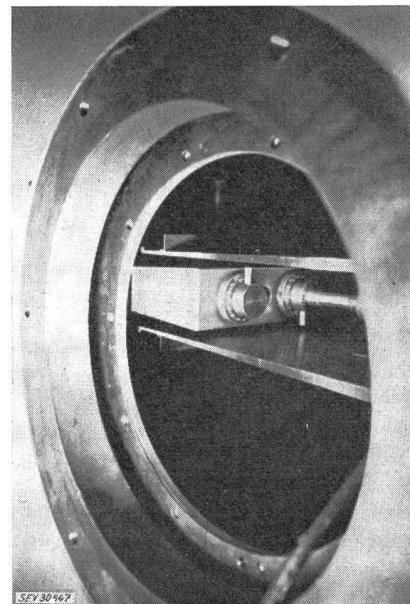
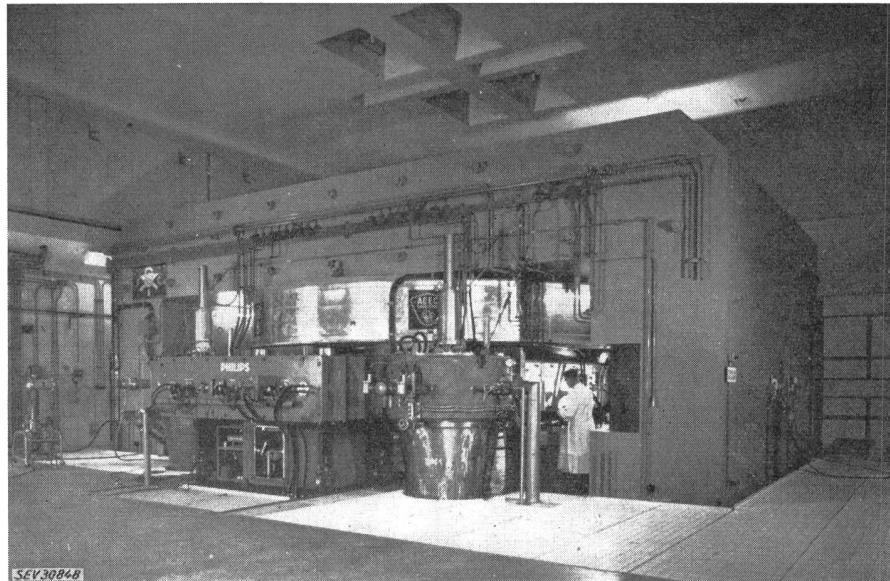


Fig. 2
Blick auf den Stimmagabel-Kondensator und die Kontrollkontakte
für die Regelung der mechanischen Position der Stimmagabel im
Vakuumtank

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 Luftkonvektion 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 Gleichspannung erhalten. Dazu war die Konstruktion eines HF-Kurzschlusskondensators von $1 \mu\text{F}$ für einen Spitzstrom 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 Oszillatroröhre 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 Oszillatroröhre durch eine negative Gitterspannung 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 $0,8 \mu\text{A}$ 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 Beschleunigungselektronensystem 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. Hierzu 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 $\pm 500 \text{ kHz}$ frequenzmodulierten Spannung von 7 kV beliefert.

V

Von der SC-Maschine der CERN wird jeweils ein 6tägiger unterbrechungloser 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. Poliakov: 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 Accelerators 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 -Synchrocyclotron 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.