Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 53 (1962)

Heft: 5

Artikel: Das Hochfrequenz-Beschleunigungssystem des CERN-Protonsynchrotrons

Autor: Fischer, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916913

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: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Es ist klar, dass man nur durch eine interkontinentale Zusammenarbeit an die Verwirklichung solcher Projekte denken kann. Bei der CERN wird gegenwärtig die Frage geprüft, ob unabhängig von der übrigen Welt eine neue Maschine in der Grössenordnung von 100...300 GeV gebaut werden, oder ob der Anschluss an eine interkontinentale Organisation gesucht werden soll. Im ersten Fall bestünde die Gefahr, dass die CERN nach Fertigstellung einer sehr kostspieligen Maschine bald von einer andern Organisation überflügelt würde; im zweiten Fall müsste sie ihren Status als rein europäische Organisation aufgeben.

Diese schwierigen Fragen werden gegenwärtig sowohl innerhalb wie ausserhalb der Organisation lebhaft diskutiert. Ein Entscheid ist nicht in nächster Zukunft zu erwarten, darf aber anderseits auch nicht zu lange hinausgezögert werden, denn grosse Maschinen haben lange Bauzeiten und die Physiker werden schon in wenigen Jahren weit mächtigere Einrichtungen und wesentlich höhere Teilchenenergien für ihre Forschungen auf dem Gebiet des Atomkerns verlangen.

Adresse des Autors:
F. Grütter, Leiter der CERN Engineering Division, Genève 23.

Das Hochfrequenz-Beschleunigungs-System des CERN-Protonsynchrotrons

Vortrag, gehalten an der 25. Hochfrequenztagung des SEV am 26. Oktober 1961 in Genf,
von *H. Fischer*, Genf

621.384.612

Das Hochfrequenz-Beschleunigungsprogramm des CPS wird beschrieben, mit dem Protonen in 1,2 s auf maximal 28 GeV beschleunigt werden können. Die für die Beschleunigung notwendige Hochfrequenz-Spannung durchläuft dabei die Frequenzen 3...9,4 MHz. Die Spannung verteilt sich auf 16 Doppelresonatoren, die auf dem Umfang des Synchrotrons angeordnet sind. Die richtige Beschleunigungsfrequenz und -phase wird aus der Messung der rotierenden Protonenpakete selbst abgeleitet. Das entsprechende Strahlregelungssystem wird beschrieben.

Description du programme d'accélération à haute fréquence du C. P. S., avec lequel des protons peuvent être accélérés en 1,2 s à la valeur maximale de 28 GeV. Ce faisant, la tension à haute fréquence nécessaire pour l'accélération passe de 3 à 9,4 MHz. Elle est répartie entre 16 résonateurs doubles, disposés sur le pourtour du synchrotron. La fréquence et la phase qui conviennent pour l'accélération résultent de la mesure des paquets de protons en rotation. L'auteur décrit le système de réglage du faisceau.

1. Einleitung

Die Erzeugung von Gleichspannungen ist bekanntlich auf etwa 10 MV begrenzt. Will man Elementarteilchen höhere Energien als 10 MV verleihen, muss man sie viele Male nacheinander kleinere Spannungen durchlaufen lassen, so dass sich die aufgenommene Energie akkumuliert. Dies ist nur bei Verwendung von Wechselspannungen möglich. Bei hochfrequenten Wechselspannungen kann man den Skin-Effekt ausnützen und dadurch einen besonders guten Wirkungsgrad der Beschleunigung erhalten. Dieses Prinzip wird bei allen modernen Beschleunigern angewendet. Die Elementarteilchen müssen die Hochfrequenzspannungen in der richtigen Phase durchlaufen, um beschleunigt und nicht gebremst zu werden. Es haben sich verschiedene Beschleunigertypen herausgebildet, und zwar unterscheidet man die Linearbeschleuniger von den Zirkularbeschleunigern und bei den Zirkularbeschleunigern die beiden Grundtypen des Synchrotrons und des Zyklotrons. Bei den Zirkularbeschleunigern werden die Teilchen durch Magnetfelder auf kreisförmigen oder spiraligen Bahnen gehalten.

2. CERN-Protonsynchrotron

2.1 Allgemeines

Fig. 1 zeigt das Schema des CERN-Protonsynchrotrons (CPS). Unten links der Linearbeschleuniger, der den Protonen die nötige Anfangsenergie von 50 MeV verleiht, mit der sie in das Synchrotron injiziert werden können. Das CERN-Synchrotron beschleunigt die Protonen im Gegensatz zum Zyklotron auf konstantem Radius, und zwar ist $R = 100$ m. Das Magnetfeld des Synchrotrons muss mit wachsender Energie der Protonen ansteigen, um diese auf der Kreisbahn zu halten. Auf dem Umfang sind 16 Beschleunigungseinheiten angeordnet, die von den Protonen sehr viele Male durchlaufen werden, wobei diese jedesmal an Energie gewinnen. Ein Beschleunigungsvorgang beim Synchrotron dauert etwa 1 s und die Teilchen durchlaufen die Kreisbahn dabei etwa 500000mal.

Um ein Proton auf einer Kreisbahn zu halten, braucht man folgende Magnetfeldstärke:

$$B = \frac{p}{e R_0} \qquad (1)$$

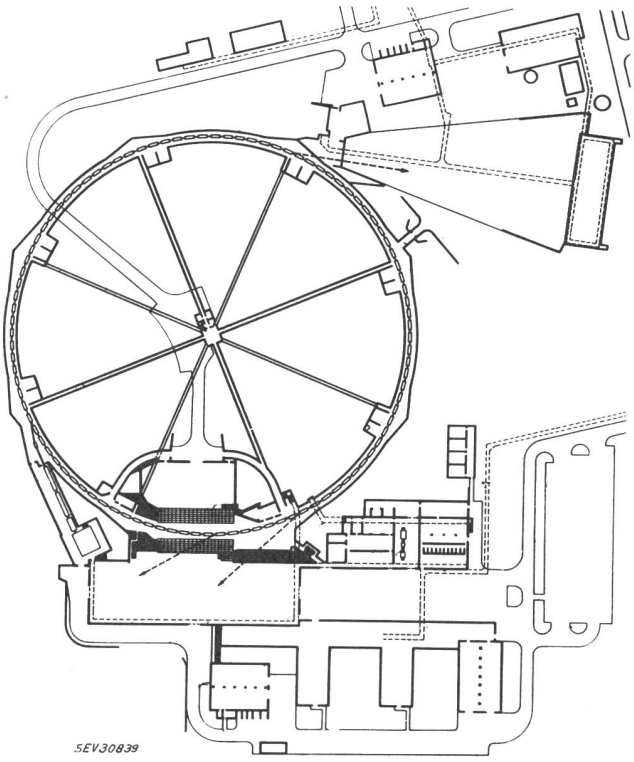

Fig. 1
CERN-Protonsynchrotron (CPS)

p ist der Impuls des beschleunigten Protons, e seine Ladung und R_0 der notwendige Krümmungsradius. Der Führungsmagnet des CPS wiegt 3500 t und die Energie des magnetischen Feldes muss in 1 s auf mehr als 10^7 Ws ansteigen. Da dieser Vorgang sich nur relativ träge regeln lässt, bringt man das Magnetfeld ungefähr linear zum Ansteigen und regelt die für den vorgegebenen Radius richtige Beschleunigungsfrequenz und -spannung. Die richtige Frequenz ist proportional der Geschwindigkeit der Protonen, sie muss also mit der Beschleunigung ansteigen. Die Beschleunigungsspannung wird so geregelt, dass der Energiezuwachs pro Umlauf dem Anstieg des Magnetfeldes entspricht. Da wir es mit Hochfrequenzspannungen zu tun haben, geht nicht nur die Amplitude ein, sondern auch der Phasenwinkel Φ_0, bei dem die Protonen den Beschleunigungsspalt durchlaufen. Fig. 2 zeigt oben die sinus-förmige Beschleunigungsspannung. Je grösser der mittlere Phasenwinkel Φ_0 gewählt wird, umso grösser wird der Winkelbereich, bzw. der Teil des Umfangs, in dem Protonen nach ihrer Injektion vom Beschleunigungsfeld des Synchrotrons eingefangen werden. Unten in Fig. 2 sieht man die Einfangbereiche, die sich im CPS vor und nach der Übergangsenergie einstellen.

Die Beschleunigungsamplitude V berechnet sich aus der Arbeit $\int_0^L k\,\mathrm{d}l$, die während eines Umlaufs L des Protons aufgebracht werden muss:

$$eV \cdot \cos \Phi_0 = \int_0^L k\,\mathrm{d}l \tag{2}$$

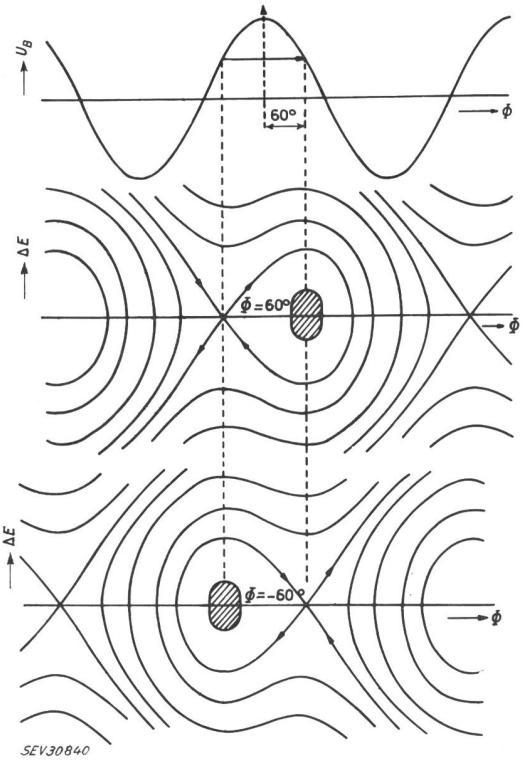

Fig. 2
Beschleunigungsspannung U_B und Einfangbereiche ΔE
mitte: nach der Übergangsenergie
unten: vor der Übergangsenergie
Φ Phase der Beschleunigungsspannung

Die Kraft k ist gleich der Ableitung des Impulses über der Zeit $\mathrm{d}p/\mathrm{d}t$. Aus Gl. (1) erhält man:

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} = e R_0 \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}$$

und damit

$$V \cos \Phi_0 = L R_0 \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

2.2 Frequenzprogramm

Für die Frequenz gilt:

$$f = f_\infty \frac{v}{c} \tag{4}$$

f_∞ ist die Frequenz, die bei unendlicher Proton-Energie erreicht würde, wenn nämlich die Geschwindigkeit v des Protons gleich der Lichtgeschwindigkeit c ist. Die Beschleunigungsfrequenz f kann gleich der Umlauffrequenz oder ein beliebiges Vielfaches davon sein. Im CPS wurde die 20. Harmonische gewählt. Für die Geschwindigkeit des Protons ergibt sich unter Berücksichtigung der Relativitätstheorie die Beziehung:

$$v = \frac{cp}{\sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}} \tag{5}$$

(p, m_0: Impuls und Ruhemasse des Protons), und daraus die Beschleunigungsfrequenz:

$$f = f_\infty \frac{B}{\sqrt{B^2 + B^2{}_0}} \tag{6}$$

Der Ausdruck B_0 ist eine Konstante der jeweiligen Maschine:

$$B_0 = \frac{m_0 c}{e R_0} \tag{7}$$

Fig. 3 zeigt diese Frequenzfunktion für das CPS. Am Anfang, bei der Injektion der Protonen, steigt sie sehr schnell an, und zwar mit 260 MHz/s. Nach etwa $^1/_{10}$ s haben die Protonen nahezu Lichtgeschwindigkeit erreicht, so dass die Beschleunigungsfrequenz kaum noch anwachsen kann. Der Anfangsenergie von 50 MeV entspricht ein Magnetfeld von 147 Gs und eine Frequenz von etwa 3 MHz, während die Frequenz für unendliche Energie der Protonen 9,4 MHz erreicht. Das Frequenzprogramm wird aus dem Magnetfeld mit einem Analogrechner berechnet. Ein Hallgenerator im Thermostaten misst das Magnetfeld und rechnet gleichzeitig die richtige Beschleunigungsfrequenz aus. Er gibt eine Ausgangsspannung propor-

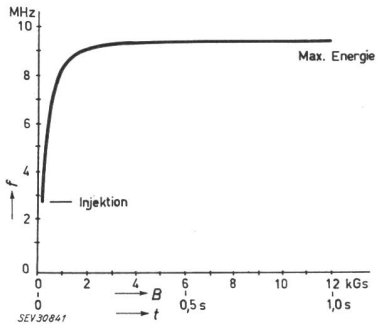

Fig. 3
Verlauf der Beschleunigungsfrequenz f
B Feldstärke des Führungsmagneten; t Zeit

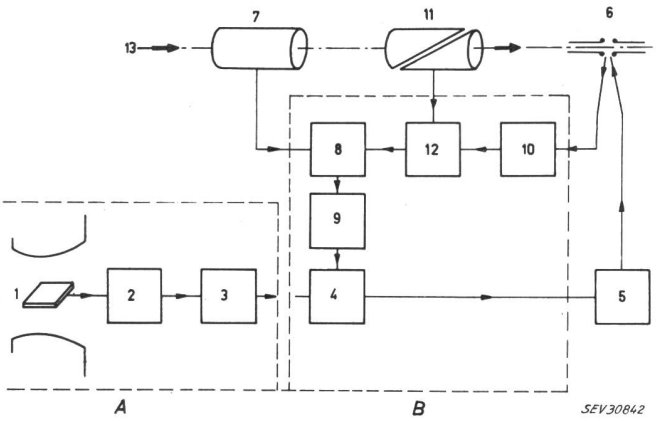

Fig. 4
Schema des HF-Beschleunigungssystems

A Frequenzprogrammsystem; *B* Strahlregelung; *1* feldmessende Hallsonde; *2* Analogrechner; *3* Hauptoszillator; *4* Überlagerungssystem; *5* Leistungsverstärker; *6* Beschleunigungsspalt; *7* Phasenelektrode; *8* Phasendiskriminator; *9* FM-Oszillator; *10, 12* Phasenschieber; *11* radiale Messelektrode; *13* Teilchenstrahl

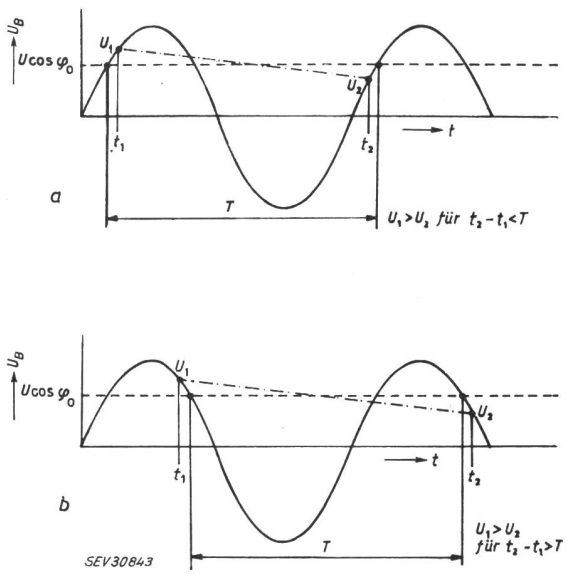

Fig. 5
Phasenstabilisierung

a stabile Phase vor Erreichen der Übergangsenergie; *b* stabile Phase nach Erreichen der Übergangsenergie
U_B Beschleunigungsspannung; T Laufzeit eines Protons mit idealer Phasenlage; $t_2 - t_1$ Laufzeit eines Protons mit Phasenfehler

tional dieser Frequenz, die wiederum den Hauptoszillator steuert.

3.3 Strahlregelungssystem

Die Genauigkeit des Analogrechners und des Hauptoszillators liegt in der Grössenordnung von 10^{-4}. Die Anforderungen an die Frequenzgenauigkeit für 1 cm Fehler im Strahlradius sind:

3,5‰ bei Injektion
10^{-6} bei 5 GeV (Übergangsenergie)
10^{-4} bei 28 GeV

Diese Zahlen zeigen, dass man unmöglich den ganzen Beschleunigungsvorgang mit dem Frequenzprogramm durchfahren kann. Deshalb wird ein Strahlregelungssystem benützt, welches das Frequenzprogramm und sogar dessen Phase Φ_0 korrigiert. Es bezieht die richtige Beschleunigungsfrequenz und -phase von kapazitiven Elektroden, in denen die rotierenden Protonenpakete Spannungen influenzieren. Fig. 4 zeigt die prinzipielle Anordnung: *1*, *2* und *3* sind die Teile des Frequenzprogramms. *1* ist die feldmessende Hallsonde, *2* der Analogrechner, *3* der Hauptoszillator. Dieses Frequenzprogramm wird durch die Frequenz der Protonenpakete korrigiert, die mit der Phasen-Elektrode *7* abgegriffen wird. Der Phasendiskriminator *8* vergleicht die Phase der Protonenpakete mit der Phase am Beschleunigungsspalt *6*. Der richtige Phasenwinkel Φ_0, bei dem die Protonen genau in der Mitte des Vakuumgefässes bleiben, wird mit Hilfe des Phasenschiebers *12* eingestellt, der wiederum von der radialen Messelektrode *11* gesteuert wird. Die notwendige Frequenz-Korrektur, die der Phasendiskriminator *8* im FM-Oszillator *9* hervorruft, wird in dem Überlagerungssystem *4* zum Frequenzprogramm addiert. Die aus dem Überlagerungssystem *4* austretende richtige Beschleunigungs-Frequenz wird im Leistungsverstärker *5* auf die notwendige Amplitude verstärkt. Der Phasenschieber *10* muss das Vorzeichen des Phasenwinkels Φ_0 bei Erreichen der Übergangsenergie umkehren, d.h., die Beschleunigungs-Phase um etwa 120° verschieben.

Der Begriff Übergangsenergie kann an Hand von Fig. 5 erklärt werden. Während des Beschleunigungs-Vorganges weichen die Protonen mehr oder weniger vom idealen Phasenwinkel Φ_0 ab. Es genügt jedoch, wenn dieser im Mittel eingehalten wird, d.h., wenn die Protonen um den richtigen Wert herum schwingen. Diese Phasenschwingung entsteht dadurch, dass ein Proton mit einem Phasenfehler etwas mehr oder weniger Energie aufnimmt als dem Anstieg des Magnetfeldes entspricht. Dieser Energiefehler bewirkt einen Unterschied in den Umlaufzeiten, der seinerseits den Phasenfehler korrigiert. Die relative Zeitdifferenz pro Umlauf:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta v}{v}$$

hängt ab von dem Unterschied in der Länge des Bahnweges $\Delta L/L$ und dem Unterschied in der Geschwindigkeit $\Delta v/v$ der Protonen für einen gegebenen Energieunterschied $\Delta p/p$. Bei dem stark fokussierenden CPS ist der Unterschied im Radius und damit im Strahlweg verhältnismässig klein:

$$\frac{\Delta L}{L} = 0{,}027\,\frac{\Delta p}{p}$$

Am Anfang der Beschleunigung überwiegt daher der Geschwindigkeitsunterschied, und der stabile Phasenwinkel Φ_0 befindet sich auf der vorderen Flanke der Sinusspannung (Fig. 5a). Bei sehr hohen Energien kann sich die Geschwindigkeit aus relativistischen Gründen kaum noch ändern. Hier überwiegt also die Änderung des Strahlweges und der stabile Phasenwinkel Φ_0 liegt auf der hinteren Flanke (Fig. 5b). Bei der Übergangsenergie, — im CPS 4,8 GeV —, heben sich beide Einflüsse gerade auf. Bei ihrem Erreichen muss die Beschleunigungsphase um 2 Φ_0 springen.

Das Strahlregelungs-System muss mit sehr geringer Zeitkonstante arbeiten, um der Phasenschwingung folgen zu können. Die höchste Phasenschwingungsfrequenz, die während der Beschleunigung nicht konstant ist, liegt bei 7,8 kHz. Die Einheitsverstärkung der Strahlregelung liegt bei 30 kHz.

Die notwendige Beschleunigungs-Amplitude pro Umlauf ist $V = 100$ kV. Wollte man diese Spannung an einem einzigen Beschleunigungsspalt aufbringen, ergäbe sich die notwendige Hochfrequenz-Leistung zu:

$$P_{HF} = \frac{V^2}{2R}$$

Mit Rücksicht auf den benötigten Frequenzbereich kann R nicht viel grösser als 8 kΩ betragen. Die notwendige Leistung wäre also $P_{HF} = 0{,}65$ MW. Wird die Beschleunigungsspannung auf n Spalte verteilt, ergibt sich die erforderliche Leistung pro Beschleunigungseinheit

$$P_n = \frac{V^2}{2n^2 R}$$

Die notwendige Gesamtleistung ist also umgekehrt proportional der gewählten Zahl der Beschleunigungsspalten. Bei den 16 Beschleunigungseinheiten im CPS müssen etwa 4 kW Hochfrequenzleistung pro Beschleuniger-Einheit aufgebracht werden.

Fig. 6 zeigt den schematischen Aufbau der Beschleunigungs-Einheit. Sie besteht aus zwei konzentrischen $\lambda/4$-Resonatoren *1*, die im Gegentakt angeregt werden und deren gegenüberstehende Innenleiter *3* den Beschleunigungsspalt *5* bilden. Um die Resonatoren auf die jeweilige Frequenz abstimmen zu können, sind sie teilweise mit Ferrit *2* gefüllt. Die elektrische Länge der Resonatoren wird entsprechend der Permeabilität des Ferrits vergrössert. Durch Sättigung des Ferrits mit Hilfe des Abstimm-Magneten *6* werden die Resonatoren auf die jeweilige Beschleunigungsfrequenz abgestimmt. Die Gegentakterregung geschieht durch die Kopplungsschleife *4*.

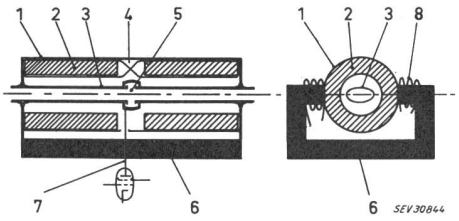

Fig. 6
Schematischer Aufbau der Beschleunigungs-Einheit
1 konzentrische $\lambda/4$-Resonatoren; *2* Ferritfüllung; *3* Innenleiter; *4* Kopplungsschleife; *5* Beschleunigungsspalt; *6* Abstimm-Magnet; *7* Einspeisung der Hochfrequenz; *8* Erregerwicklung für die Abstimmung

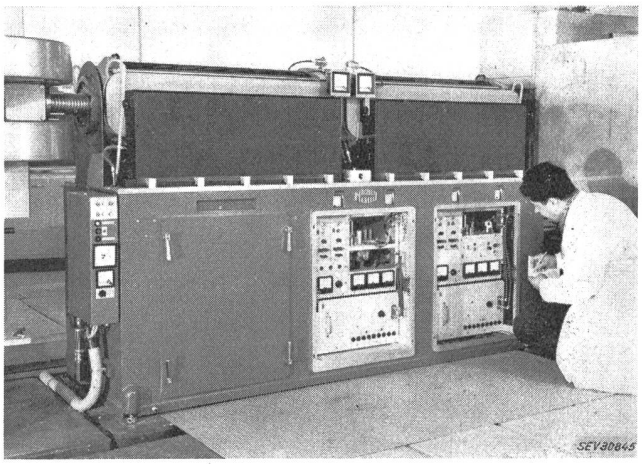

Fig. 7
Beschleunigungseinheit

Fig. 7 zeigt eine Ansicht der Beschleunigungseinheit; oben die Resonatoren mit den Abstimm-Magneten, unten Mitte der Hochfrequenz-Leistungsverstärker, unten rechts der Abstimmungsverstärker.

Mit dem CERN-PS-Beschleunigungssystem werden mehr als 60 % der injizierten Protonen eingefangen und ohne Verlust bis zu der gewünschten Energie beschleunigt. Bei der Höchstenergie von 28 GeV dauert der Beschleunigungsvorgang 1,2 s. Mit dem zur Zeit von dem Linearbeschleuniger injizierten Protonenstrom werden bei jedem Maschinen-Zyklus etwa $3 \cdot 10^{11}$ Protonen auf die gewünschte Energie gebracht. Die jeweilige Endenergie kann bei den aufeinanderfolgenden Zyklen auf besser als 10^{-3} reproduziert werden. Der Bahnradius von 100 m hat am Ende des Beschleunigungsvorgangs einen Fehler von nur wenigen Zehntel Millimetern.

Literatur

[1] *Reich, K. H.:* Technische Probleme beim Bau des 28-GeV-CERN-Protonensynchrotrons. Kerntechn. 3(1961)8, S. 345...355.
[2] *Regenstreif, E.:* Le synchrotron à protons du CERN. CERN 58-6a; 59-26. Genf: CERN 1958; 1959.
[3] *Brunner, A., J. A. Geibel, F. Grütter, K. H. Reich* und *W. Schnell:* Die grösste Beschleunigungsmaschine der Welt. NZZ, Beil. Technik, 3. Febr. 1960. (Auch S.-A., hg. vom CERN-Presse- und Informationsamt, Genf).
[4] *Courant, E. D., M. S. Livingston* und *H. S. Snyder:* The Strong-Focusing Synchrotron-A New High Energy accelerator. Phys. Rev. 88(1952)5, S. 1190...1196.

Adresse des Autors:
Dipl.-Ing. *H. Fischer*, Chef der HF-Sektion des Protonsynchrotron-Beschleunigers, CERN, Genève 23.

Möglichkeiten der Beleuchtung von autobahnähnlichen Hochstrassen

Von *H. Gertig*, München

628.971.6 : 625.711.3

Jahr für Jahr nimmt die Zahl der Motorfahrzeuge zu, die die Autobahnen, Bundesstrassen oder Strassen in geschlossenen Ortschaften befahren. Während der Hauptverkehrszeiten in den Morgenstunden und am Spätnachmittag scheinen die Kolonnen manchmal endlos. Es ist für die Zentralen der Verkehrslenkung nicht immer leicht, diese Fahrzeugschlangen in stetem Fluss zu halten. Eine kleine Stauung, ein Stoppen können zu unübersehbaren Folgen und unter Umständen zu einem Chaos führen.

Aus diesem Grunde werden heute mehr und mehr kreuzungsfreie Hauptstrassen bei der Verkehrsplanung in Betracht gezogen. Kein Halten durch Vorfahrtsbeachtung oder Signaleinrichtungen beeinflusst bei solchen Anlagen den Autoverkehr. In riesigen Schleifen und Bändern werden die Strassen zum Teil in mehreren Ebenen liegend über- und untereinander geführt. Es liegt nahe, dass derartige grosszügige Anlagen unbedingt übersichtlich bleiben müssen, wenn sie für den vorgesehenen Zweck vollauf zufriedenstellen sollen. Vor allem während der Dunkelstunden liegt hier eine grosse Gefahr für ortsunkundige Fahrzeugführer. Von der Möglichkeit, durch eine gute Beleuchtung etwaigen Unfällen vorzubeugen, wird heute weitgehend Ge-