

III. Experimentelle Methoden

1. Teilchenbeschleuniger

- Höhere Schwerpunktsenergien →
- Bessere Auflösung von Substrukturen
 - Erzeugung neuer (schwerer) Teilchen

Kosmische Höhenstrahlung

Für lange Zeit war die **kosmische Höhenstrahlung** die einzige Quelle hochenergetischer Teilchenstrahlung

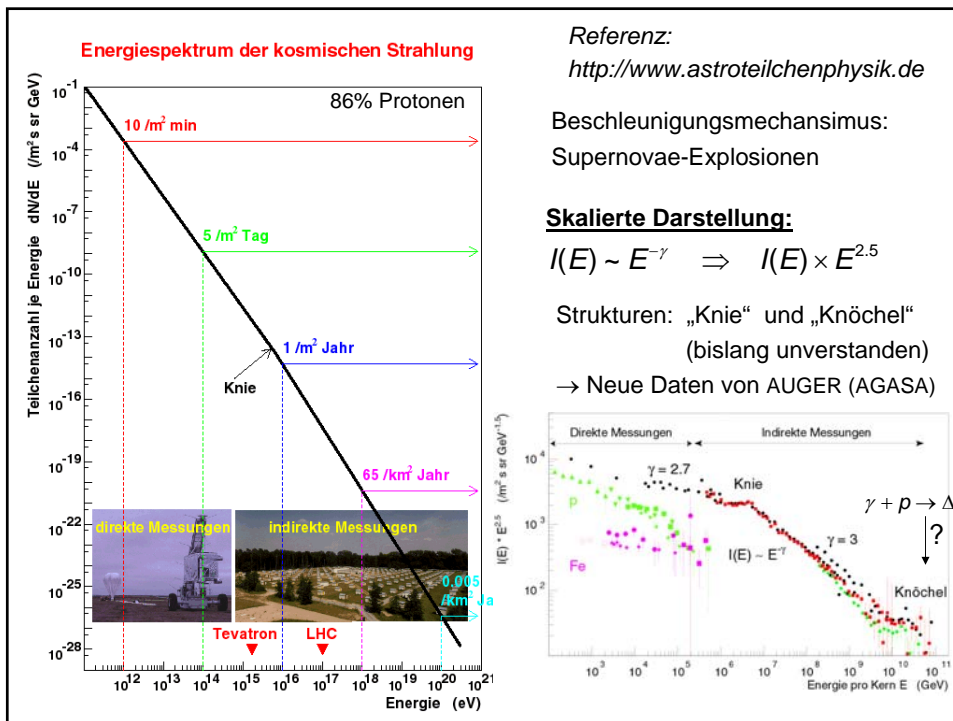
Entdeckt wurde die kosmische Höhenstrahlung 1912 durch V.Hess:

„Intensität ionisierender Strahlung nimmt mit der Höhe zu.“

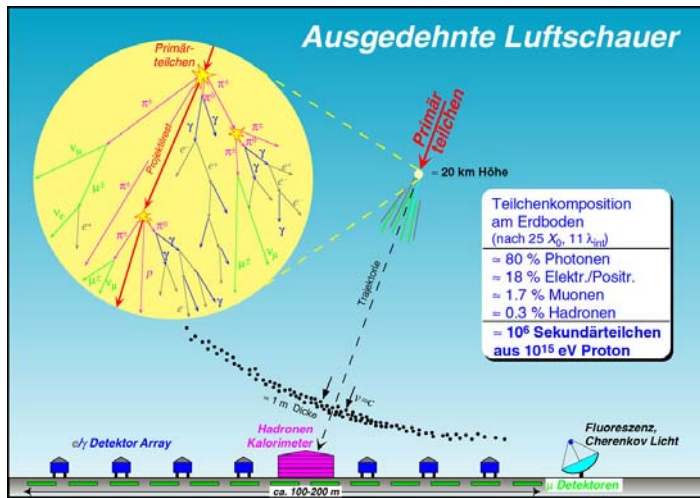
(Nobelpreis 1936)



Ballon-Experiment von Hess



Referenz: <http://www.astroteilchenphysik.de>



Hochenergetische „Primärteilchen“ (p, γ) erzeugen in Kollision mit Kernen der Luft „Sekundärteilchen“-Schauer



Entdeckung neuer Teilchen:

- Positronen
- Myonen
- Pionen

1.1 Teilchenbeschleunigung und Linearbeschleuniger

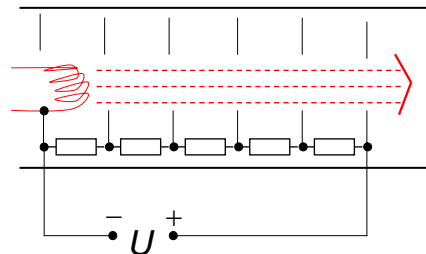
Alle Laborbeschleuniger nutzen elektrische Felder.

K.Wille, Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, Teubner

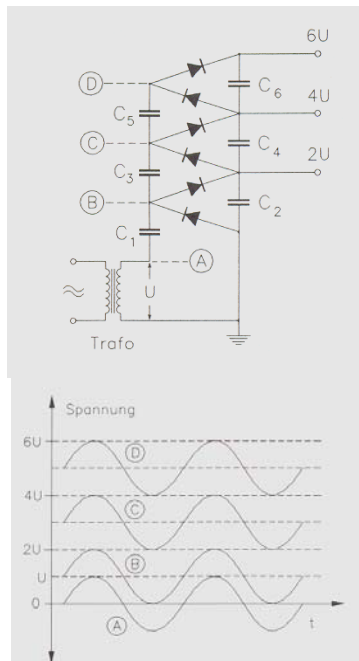
a) Statische Beschleunigung

Prinzip der Elektronenröhre

$$\Delta E = qU$$

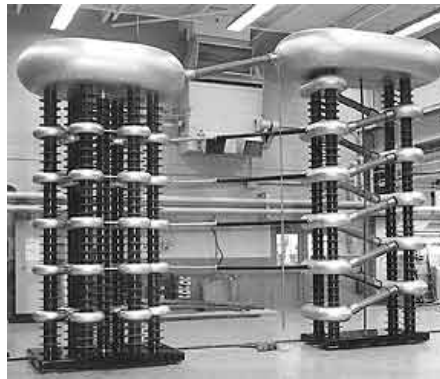


- Analog anwendbar auch für Ionen
- Probleme: Spannungsstabilität bei Leckströmen
Erzeugung hoher Spannungen
Betrieb bei hohen Spannungen (Koronabildung, Überschlüge)



Cockcroft-Walton Kaskaden-Hochspannungsgenerator (~1930)

↓
~ 1...2 MV



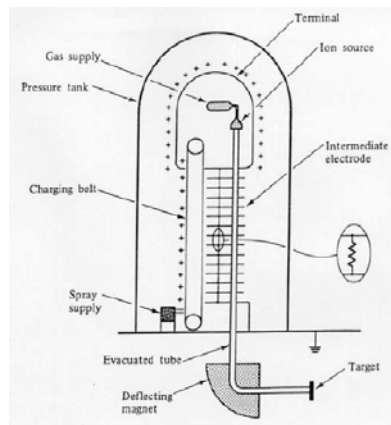
Van de Graaff Beschleuniger:
(1930)

Korona-Effekt wird genutzt um positive Ladung auf Generatorband zu sprühen

↓
~ 2 MV

Betrieb von Generator und Beschleuniger in einem mit Isoliergas (SF_6 bei bis zu 10 bar) gefülltem Tank

↓
~ 10 MV



Tandem Beschleuniger:

(Van de Graaff, 1936)



Nutzt die Beschleunigungsspannung durch Umladen der beschleunigten Ionen doppelt

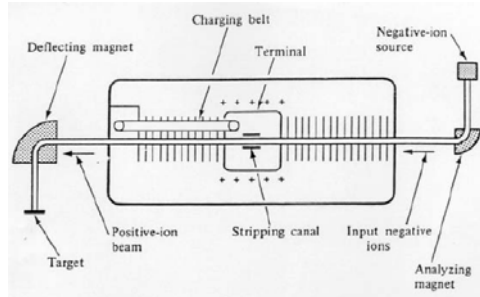


~20 MeV

(bei einfach geladenen Ionen)

$$E_{\max} = (|q^-| + |q^+|)U \approx (|q^-| + |q^+|) \cdot 10 \text{ MV}$$

*Tandem-Beschleuniger,
MPI für Kernphysik, Heidelberg*

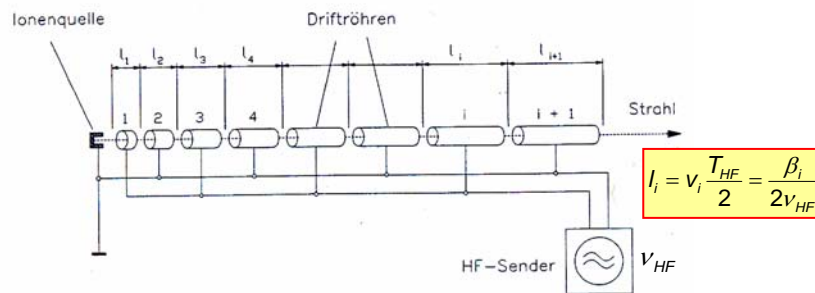


b) Beschleunigung mit Hochfrequenz (HF) Spannungen

Elektrostatische Beschleunigung durch Koronabildung/Überschläge begrenzt

Idee: Mehrfache Benutzung einer **Hochfrequenzspannung** (Ising, 1925)

Realisierung durch Wideröe (1928): Erster HF Linearbeschleuniger



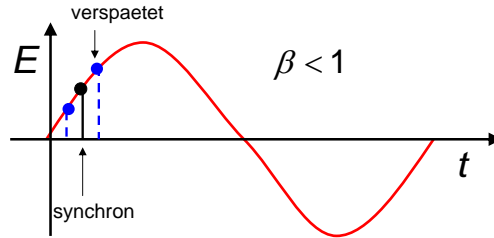
- Obwohl eine max. Spannung U_0 nie überschritten wird können im Prinzip beliebig hohe Teilchenenergien erzeugt werden: $E_i = i \cdot q U_0 \sin \psi_s \leftarrow \text{Phase}$
- Länge d. Driftröhren müssen mit Teilchenenergie zunehmen

Phasenfokussierung: Energie der Teilchen hängt von der Phasenlage ψ_s ab



Phasenfokussierung um Sollphase:

Arbeitspunkt nicht am Maximum ($\pi/2$) sondern früher



- verspätete Teilchen sehen größeres Feld
- zu schnelle Teilchen sehen kleineres Feld

➔ Schwingung der Teilchen um Soll(Arbeits)phase

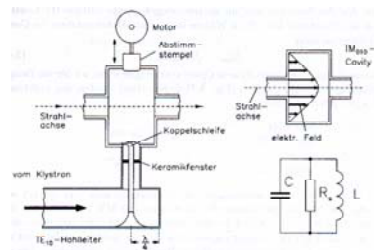
Phasenfokussierung ist für alle HF Beschleuniger von fundamentaler Bedeutung

c) Hohlraumresonatoren (Kavitäten, cavities)

Statt einfachen Driftröhren werden heute fast ausschließlich Hohlleiterstrukturen zur Beschleunigung verwendet. Durch Einstrahlung elektromagnetischer HF Strahlung kommt es zur Ausbildung von stehenden Wellen bzw. Wanderwellen:

Stehende Wellen:

TM₀₁ Mode =
 Transversales magn. Feld
 Longitudinales elektr. Feld

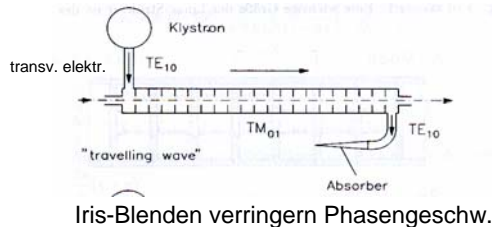


Wanderwellen: Linacs

Teilchen reiten auf Wellenberg
 Problem für Teilchen mit $v \approx c$:

i.a. $v_{\text{Phase}} > c$

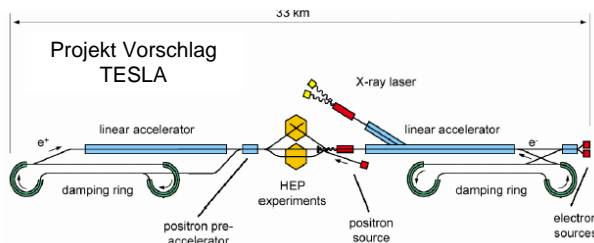
Lösung: Alvarez-Struktur
 „Runzelröhre“



Erreichbare Strahlenergien bei Linearbeschleunigern

Maximale Strahlenergie ~ max. Feldgradient in Kavitäten
 ~ Länge (Zahl der Kavitäten)

Beschleuniger	Länge	Feldgradient	Strahlenergie
SLC (bis 1997)	3 km	~ 15 MV/m	45 GeV
TESLA / ILC (Projekt)	2 × 16.5 km	bis ~ 40MV/m	2 × (500...650) GeV



Supraleitende Cavities



http://tesla.desy.de/new_pages/TDR_CD/start.html

Gemeinsame internationale Collaboration:
 International Linear Collider (ILC)

1.2 Kreisbeschleuniger

Linearbeschleuniger: beliebig hohe Energien aber Kosten wachsen proportional an

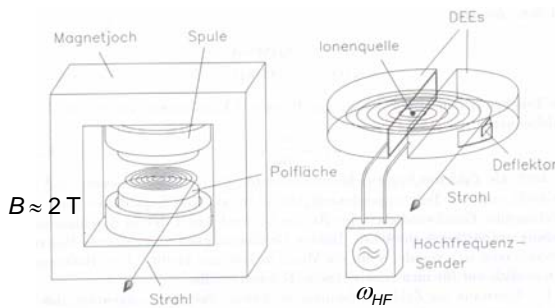


Idee: Teilchen auf Kreisbahn können Beschleunigungsstrecken mehrfach durchlaufen

a) Zyklotron (erster Kreisbeschleuniger)

Prinzip, 1930, E.O. Lawrence

Erstes nutzbares Zyklotron,
 1932 Lawrence / Livingston



$$m\omega^2 r = evB$$

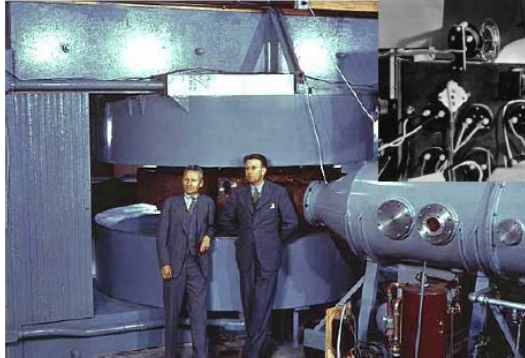
$$\omega_{\text{Cyclo}} = \frac{e}{m} B$$

$$\omega_{\text{Cyclo}} = \omega_{\text{HF}}$$

$$E_{\text{kin}}^{\text{max}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{q^2 R_{\text{max}}^2 B^2}{2m}$$

Für nicht relativistische Teilchen: $\omega_{\text{HF}} = \omega_{\text{Cyclo}} = \text{const.}$

Zyklotron



Ernest O. Lawrence
(~1937)

Mit klass. Zyklotrons können Proton/Deuteron/ α -Teilchen auf etwa 22 MeV pro Elementarladung beschleunigt werden

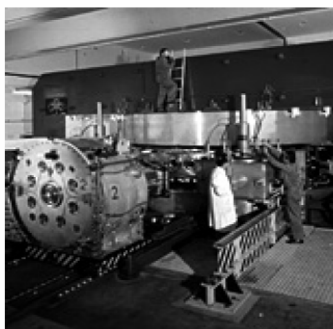
⇒ Bewegung ist nicht-relativistisch und die Umlauffrequenz ist konstant.

Für hohe Energien: $m \rightarrow \gamma m$



Synchro-Zyklotron: HF wird während Beschleunigung synchron heruntergefahren

CERN Synchro-Cyclotron 1957



600 MeV



Das 600 MeV Synchro-Zyklotron war der erste Beschleuniger im CERN und lief 33 Jahre lang

b) Betatron

D.W. Kerst, 1940

Zyklotron: Magnetfeld konst.
 ⇒ Bahnradius wächst mit Energie an

Betatron: Magnetfeld wird erhöht
 ⇒ Bahnradius bleibt konstant

Zeitl. veränderliches B-Feld
 induziert beschleunigendes E-Feld

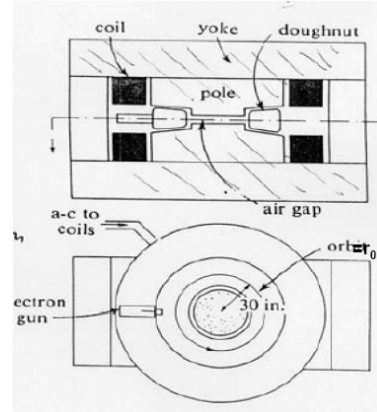
= Wechselstromtransformator mit
 Teilchen als Sekundärspule

Mit Induktionsgesetz findet man
 die Betatron-Bedingung:

$$|\vec{B}(r_0, t)| = \frac{1}{2} \left(\langle \dot{\vec{B}}(t) \rangle + |\dot{\vec{B}}_0| \right)$$

Über Fläche der Kreisbahn
 r_0 gemitteltes Magnetfeld

Korrekturfeld mittels Korrekturspulen
 erlaubt Justierung der Teilchenbahn



Pole des Magneten müssen
 entsprechend gestaltet sein um stabile
 Teilchenbewegungen zu erhalten



D.W. Kerst (1940)

Bem.:

Teilchen führen transversale
 Schwingungen um die Idealbahn
 aus: **Betatron-Schwingungen**

Heute bezeichnet man
 transversale Schwingungen in
 Beschleunigern allgemein als
Betatron-Schwingungen

erstes Betatron: $E(e) \approx 2.3 \text{ MeV}$

Limitierung:
 (Synchro-Zyklotron
 & Betatron)

• Bahnradius wächst für relativ. Teilchen ($\beta \approx 1$) an

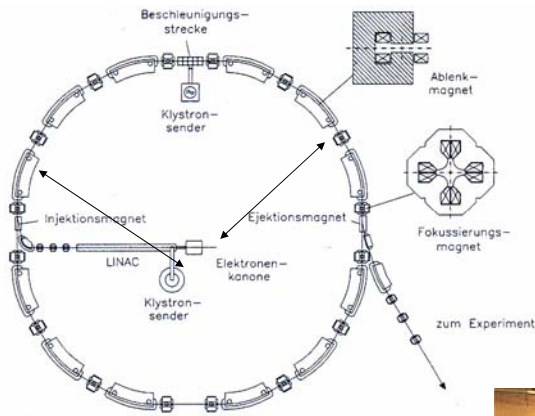
$$R = \frac{\beta E}{ecB} \approx \frac{E}{ecB}$$

• Magnetfeld limitiert

$B \approx 1.5 \text{ T}$ (normaleitende Dipole)

$B \approx 5 \text{ T}$ (supraleitende Dipole)

c) Synchrotron



Maschinenradius > Dipolradius

Anfang der 50er Jahre entstand das erste 3 GeV Proton-Synchrotron „Cosmotron“ am Brookhaven National Lab



Prinzip entwickelt von E.M. McMillan (1945) V. Veksler (1945)

- Bahnradius wird sehr groß: Dipolfeld nur noch im engen Bereich der Sollbahn
- B-Feld muss mit Teilchenenergie E hochgefahren werden $R = \frac{E}{ecB}$

Synchrotron-Betrieb

Einschussimpuls p_i
Umlauffrequenz ω_{Cyclo}

$$\omega_{Cyclo,i} = \frac{2\pi}{T_{Cycl,i}} = \frac{p_i c^2}{RE_i}$$

für B-Feld muss immer gelten:

$$B = \frac{p}{qR} \quad \text{Muss stets nachgefahren werden}$$

für HF muss gelten:

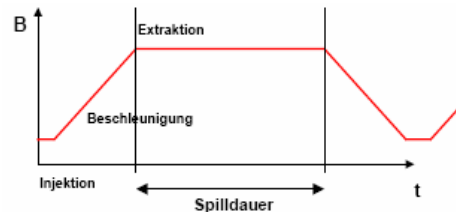
$$\omega_{HF} = n \cdot \omega_{Cyclo}$$

muss nachgefahren werden, bis Teilchen hochrelativistisch ($p \approx E$).

Danach ist HF konstant:

$$\omega_{HF} = \frac{nc}{R}$$

Nicht möglich Synchrotron von Null hochzufahren !



Beispiel:
Typischer Hub ist Faktor 10
Einschussenergie 1 GeV
Endenergie 10 GeV

Spil

Verfügbare Magnetfeldstärke 1 T
Krümmungsradius $R = 10/0.3 = 33\text{m}$
Maschinenradius $R = 40\text{m}$
Umfang 250m
Max. Umlauffrequenz: 1.2 MHz

Beschleunigungsspannung: 1 MV/m
Beschleunigungsstrecke: 1 m
Anzahl der Umläufe: 9000
Zurückgelegte Wegstrecke: $9000 \cdot 250\text{m} = 2250\text{km}$

d) Fokussierung

Strahlen durchlaufen den Ring viele tausend Mal \Rightarrow aufgrund unvermeidbarer Divergenz ist eine Fokussierung des Strahls notwendig

Schwache Fokussierung

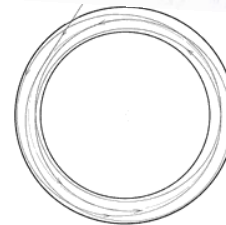
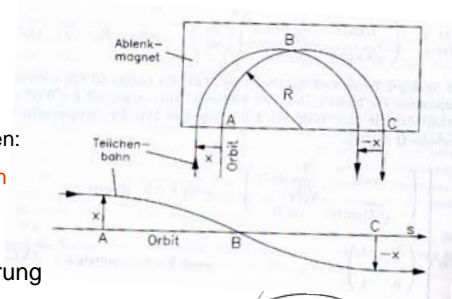
Prinzip der schwachen Fokussierung aufgrund der homogenen Ablenkmagneten:

Teilchen zur nominellen Bahn hingebogen

\rightarrow Schwache radiale Strahl-Fokussierung

\rightarrow Dipole mit großer Apertur notwendig

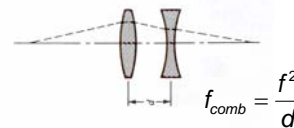
Durchbruch bei Strahlfokussierung und damit auch für Bau großer Synchrotrone: **Starke Fokussierung**



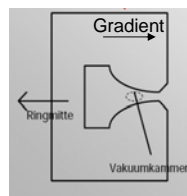
Weak focusing accelerator

Starke Fokussierung

Idee: Kombination aus fokussierender + defokussierender Linse = fokussierend



(1) Alternating Gradient Synchrotron (AGS)

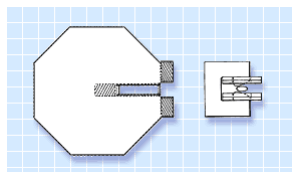
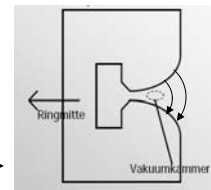


a) Spezielle Formgebung der Polschuhe

b) Wechsel mit gespiegelter Magnet Konfiguration

Radiale Fokussierung

Vertikale Fokussierung



- CERN 25 GeV Proton Synchrotron (1959)
- Brookhaven 33 GeV AGS (1960)

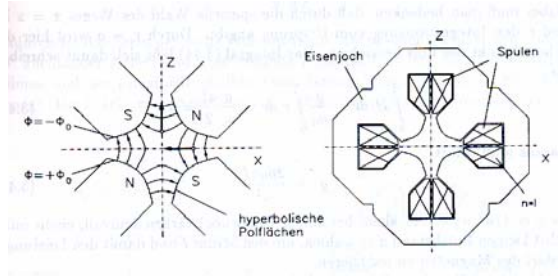
Zum Vergleich: Dipol-Apertur des Cosmotrons bzw. AGS

(2) Quadrupol-Magnete

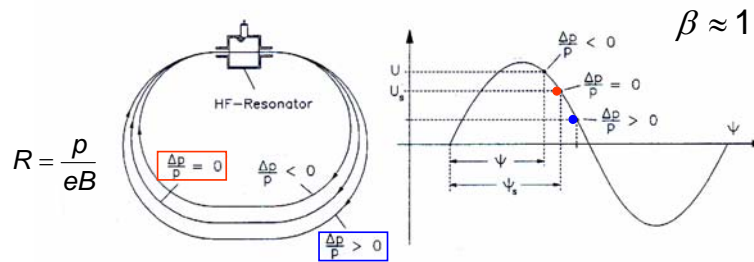
Heute werden zur Strahlfokussierung Einheiten aus zwei hintereinander geschalteten Dipolen verwendet.



Fokussierung in einer / Defokussierung in anderen Ebene



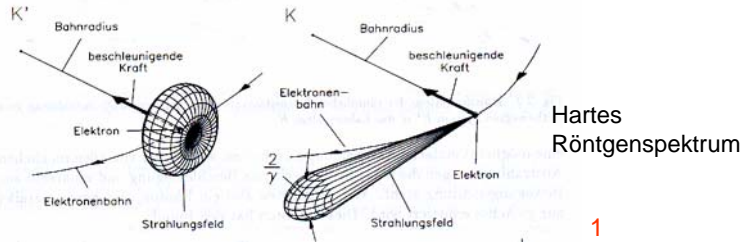
e) Phasenfokussierung beim Synchrotron



→ Synchrotronschwingungen um die Sollphase

e) Synchrotronstrahlung

Geladene Teilchen (Elektronen) emittieren unter dem Einfluss der Kreisbeschleunigung Synchrotronstrahlung (begrenzt Energie von e-Beschleunigern):



Abgestrahlte Leistung:

$$P = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \frac{e^2 c}{R^2} \beta^4 \gamma^4 \quad (\text{SI-Einheiten})$$

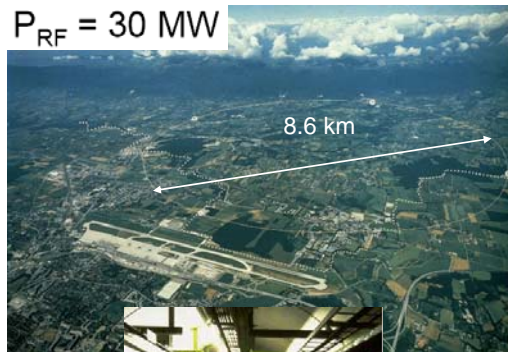
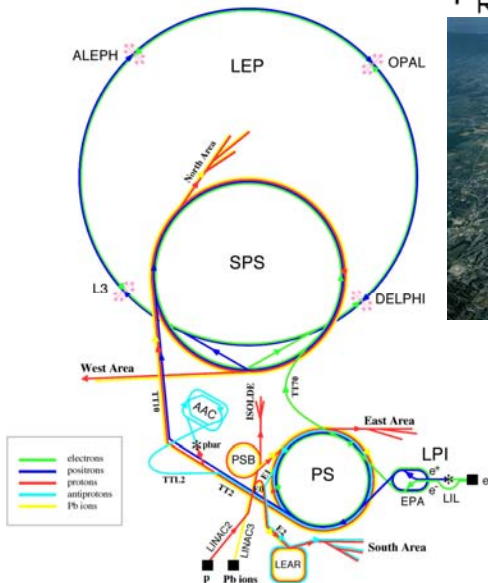
$$= \frac{2\alpha}{3R^2} \beta^4 \gamma^4 \xrightarrow{\beta \approx 1} = \frac{2\alpha}{3R^2} \left(\frac{E}{m}\right)^4 \quad (\text{Natürliche Einheiten})$$

Energieverlust pro Umlauf (für Elektronen): $\Delta E = 8.85 \cdot 10^{-5} \frac{E^4 [\text{GeV}^4]}{R [\text{km}]} \text{ MeV}$ LEP 2: ~3 GeV

vernachlässigbar für Protonen: $\Delta E(p) = 10^{-13} \cdot \Delta E(e)$

1.3 Speicherring-Anlagen: LEP e^+e^- bei $\sqrt{s} = 90 \dots 200 \text{ GeV}$

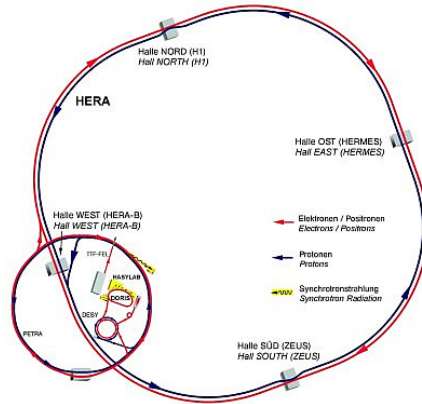
$$P_{\text{RF}} = 30 \text{ MW}$$



Limitiert durch HF Power zur Kompensation von Synchrotronstrhl.

Proton-Anlagen

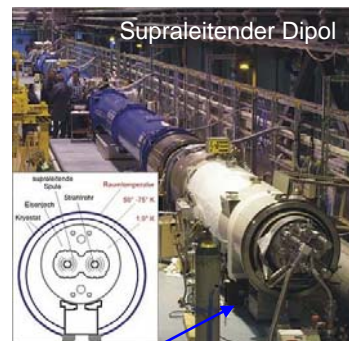
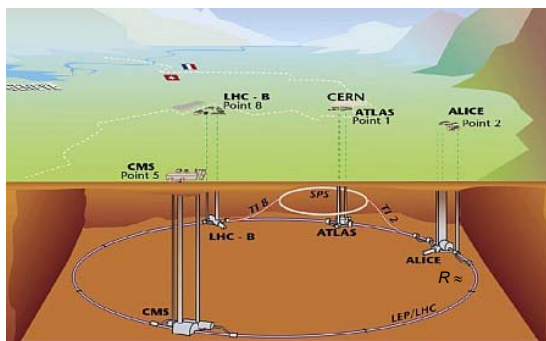
HERA $e(30 \text{ GeV}) + p(920 \text{ GeV})$



Energie bei Proton-Synchrotrons limitiert durch magnetische Dipole

Name	E_B	Umf.	B-Feld	Dipole
SPS	320 GeV	6.9 km	1.4 T	744
HERA	920 GeV	6.3 km	4.6 T	416
LHC	7 TeV	27 km	8.3 T	1232

Large Hadron Collider - LHC



Umfang	26.659 km
Magnete	1232 supraleitende (1.9K) Dipole
Magnetfeld	8.3 T (9 T max)
Teilchen	Protonen und schwere Ionen
\sqrt{s}	14 TeV (Protonen) 5.5 x A TeV (Ionen)
Max. Luminosität	$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Kollisionsrate	40 MHz

„2 in 1“ Dipole
Länge ~ 14.3 m



Hmmm, which one should we get?

Limit von Elektron-Maschinen / Proton-Maschinen