



Universität Hamburg

DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG

Physik V

Beschleuniger

Christian Sander
Institut für Experimentalphysik

WS 2014/15



Inhalt

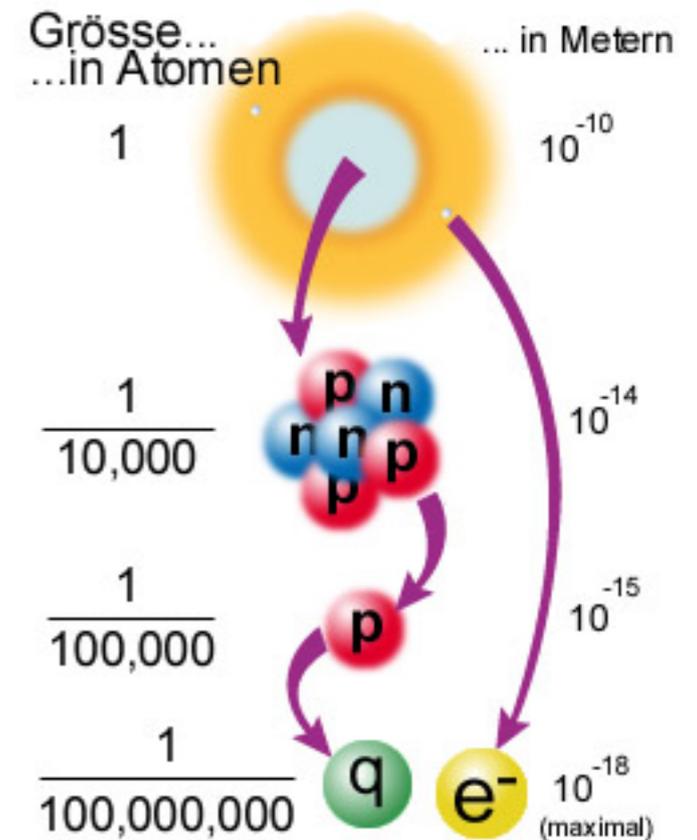
1. Einleitung
2. Kosmische Höhenstrahlung
3. Teilchenbeschleuniger
 - a. Linearbeschleuniger
 - b. Zyklotron
 - c. Synchrotron
4. Einschub: Wirkungsquerschnitt und Luminosität
5. Wichtige Beschleunigerexperimente
6. Zusammenfassung

Quellen:

- *J. Haller, Physik V, Uni Hamburg, WS 2012/13*
- *R. Klanner & W. Scobel, Physik V, Uni Hamburg, WS 2005/06*
- *U. Uwer, Einführung in die Kern- und Teilchenphysik, Uni Heidelberg, WS 2006/07*
- *K. Wille, Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, Teubner, 1992*
- *Bergmann & Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik - Band 4: Bestandteile der Materie, Walter de Gruyter, 2003*

Warum hohe Schwerpunktsenergie?

- Heisenberg: $\Delta x \cdot \Delta p \sim \hbar$
höhere Energie/Impuls → **bessere Ortsauflösung**
heutige Beschleuniger $\Delta x \sim 10^{-18} \dots 10^{-19} \text{ m}$
- Einstein: $E = mc^2$
höhere Energie/Impuls → **Produktion schwerer Teilchen**, z. B. top-Quark mit $m = 172 \text{ GeV}/c^2$



Kenngroßen von Beschleunigern:

- **Strahl-** E_{beam} oder **Schwerpunktsenergie** $E_{\text{CMF}} = \sqrt{s} = \sqrt{4E_A E_B} = 2E$
- **Strahlintensität:** Luminosität → Reaktionsrate
- **Strahlqualität:** Impulsschärfe, zeitliche Stabilität, ...
- **Projektilart:** e, p, Hl, kurzlebige Teilchen (“radioactive beams”)

Kosmische Höhenstrahlung

Kosmische Höhenstrahlung

KH Quelle hochenergetischer Strahlung

entdeckt 1912: V. Hess, NP1936

- Intensität ionisierender Strahlung nimmt mit Höhe zu
- Nachweis durch Entladung von Elektroskop
- primär: $\sim 1000 \text{ Teilchen m}^{-2} \text{ s}^{-1}$



Ballon-Experiment von Hess

Zusammensetzung der primären Strahlung

- 85% Protonen, 12% α , 2% Elektronen, 1% andere Kerne

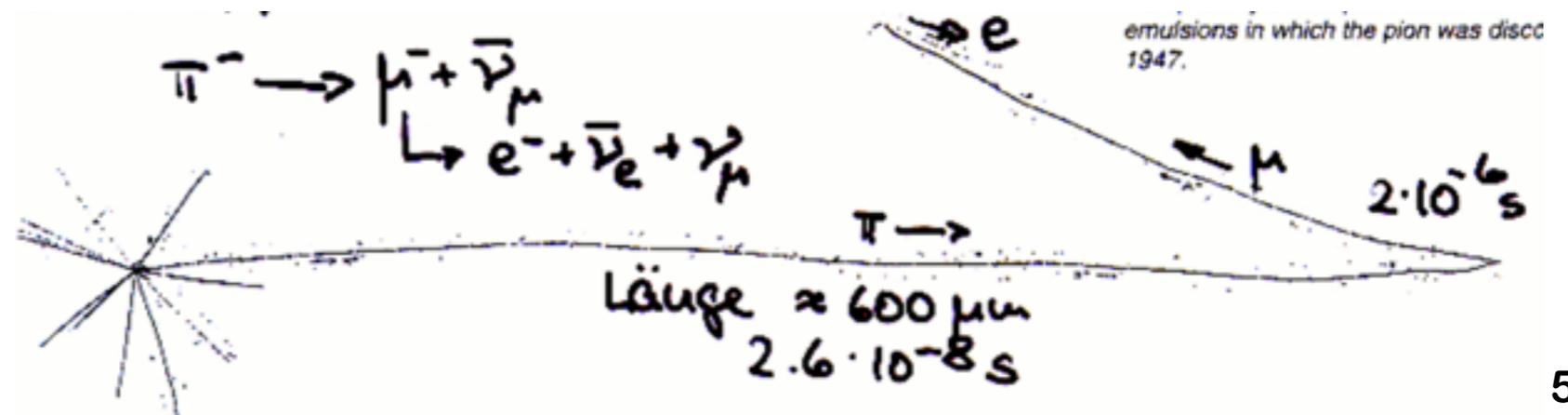
Photoplatten in großer Höhe \rightarrow Entdeckung neuer Teilchen

- z. B. 1947: Entdeckung des Pions

Fälschlicherweise interpretiert als
“double meson tracks”

heute: $\pi^- = \bar{u}d \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$

$\pi^+ = u\bar{d} \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$





Beschleunigung kosm. Teilchen

Niedere Energien: Sonnenwind (Tag)

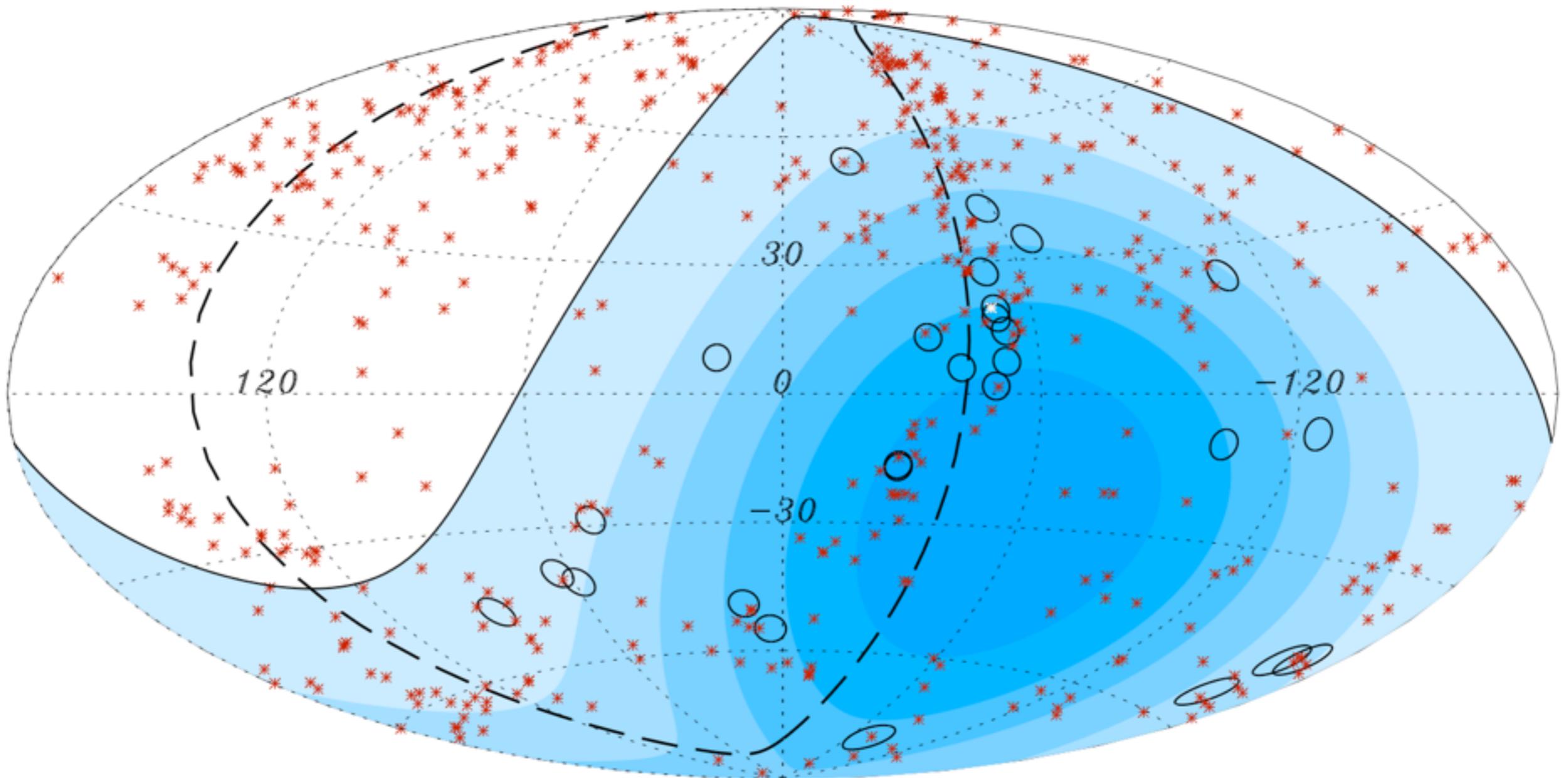
Hohe Energien: nicht-solarer Ursprung (Tag/Nacht)

- Beschleunigung durch mehrmaliges Streuen geladener Teilchen an nicht-relativistischen Gaswolken (**Fermi-Beschleunigung 2. Art**):
 - stat. Prozess → Beschleunigung (aber ineffektiv; $\sim \beta^2$ und $\beta \approx 10^{-4}$)
- Beschleunigung in Schockwellen von Supernova-Überresten (**Fermi-Beschleunigung 1. Art**):
 - Teilchen können beim mehrmaligen Passieren von Schockwelle (Plasmaschicht mit umgebenden turbulenten B -Feldern) effektiv Energie gewinnen ($\sim \beta^1$)
 - Vorhersage: Spektralindex $\gamma \gtrsim 2$ ($\phi \sim E^{-\gamma}$)
 - Höchstenergien ($\sim 10^{16}$ eV) beschränkt durch typische Lebensdauer der Schockwellen ($\sim 10^5$ a)
 - Höchste Energien $\sim 10^{18...19}$ eV dadurch nicht erklärbar (extra-galaktischen Ursprungs?)

Very High Energetic Cosmic Rays

○ $E > 57 \text{ EeV}$

✱ Aktive Galaxienkerne → Hinweis auf Korrelation mit UHE CR





Energiespektrum

$$\Phi \propto E^{-2.7}$$

“Knie” bei $\sim 1 \dots 10$ TeV

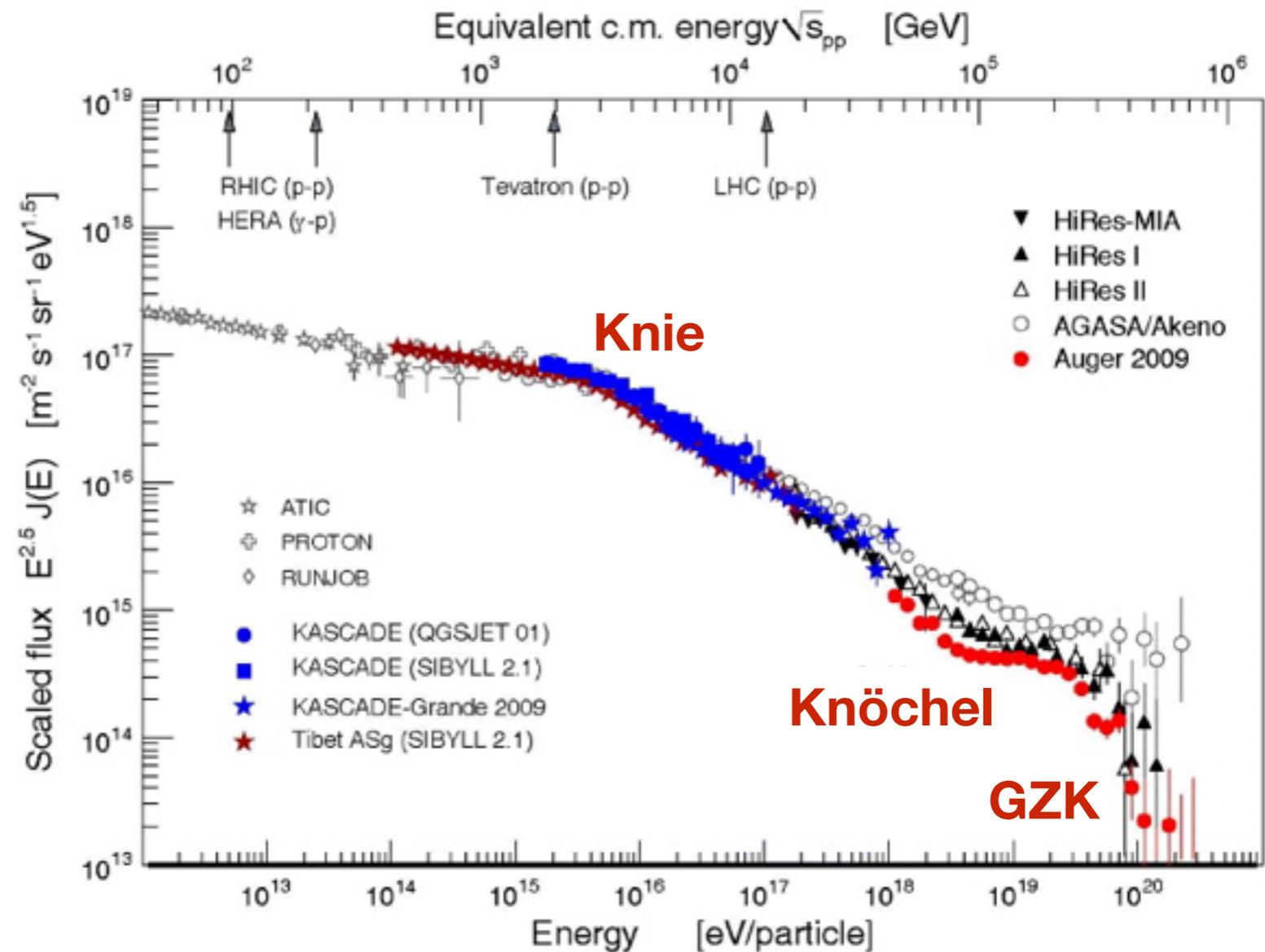
- Ursache: schwerere Kerne werden dominant

“Knöchel” bei ~ 2 EeV

- Ursache: extragalaktische Komponente

Greisen-Sazepin-Kusmin (GZK) cutoff

- Ursache: resonante Streuung mit Mikrowellenhintergrundstrahlung, z. B.



Reaktion (hadronische Wechselwirkung von Kernen) in der oberen Atmosphäre (~20 km)

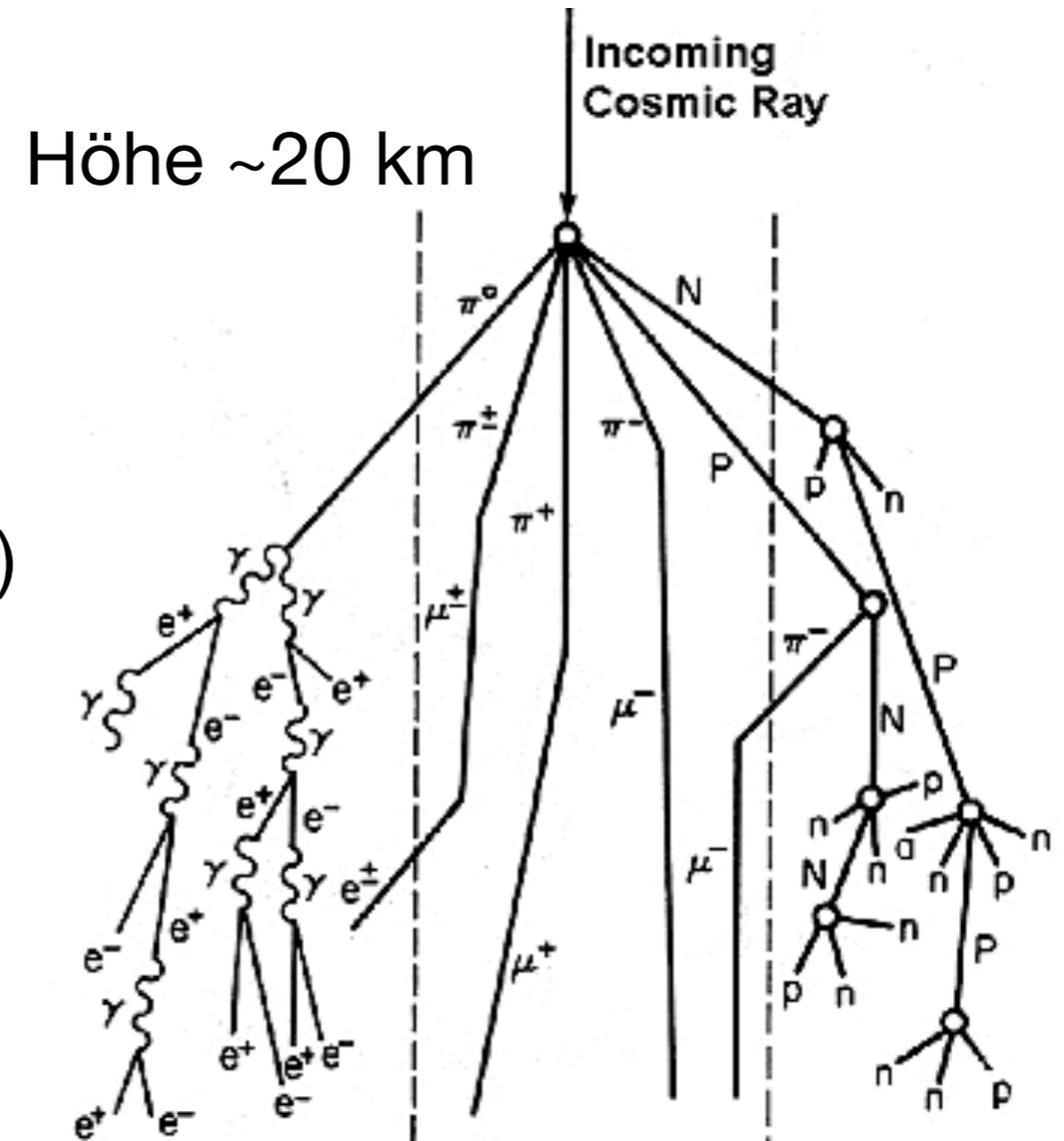
Typische Schauerentwicklung
(**Zusammensetzung am Boden**):

- Elektromagnetische Komponente: Photonen und Elektronen (~80%+~18%)
- Myonen (~1.7%)
- Hadronen (~0.3%)

Typische "Tiefe" der maximalen Schauerentwicklung $\sim \log E$

Vergleich mit Kalorimetern in HEP-Experimenten

Schematische Entwicklung eines Luftschauers:



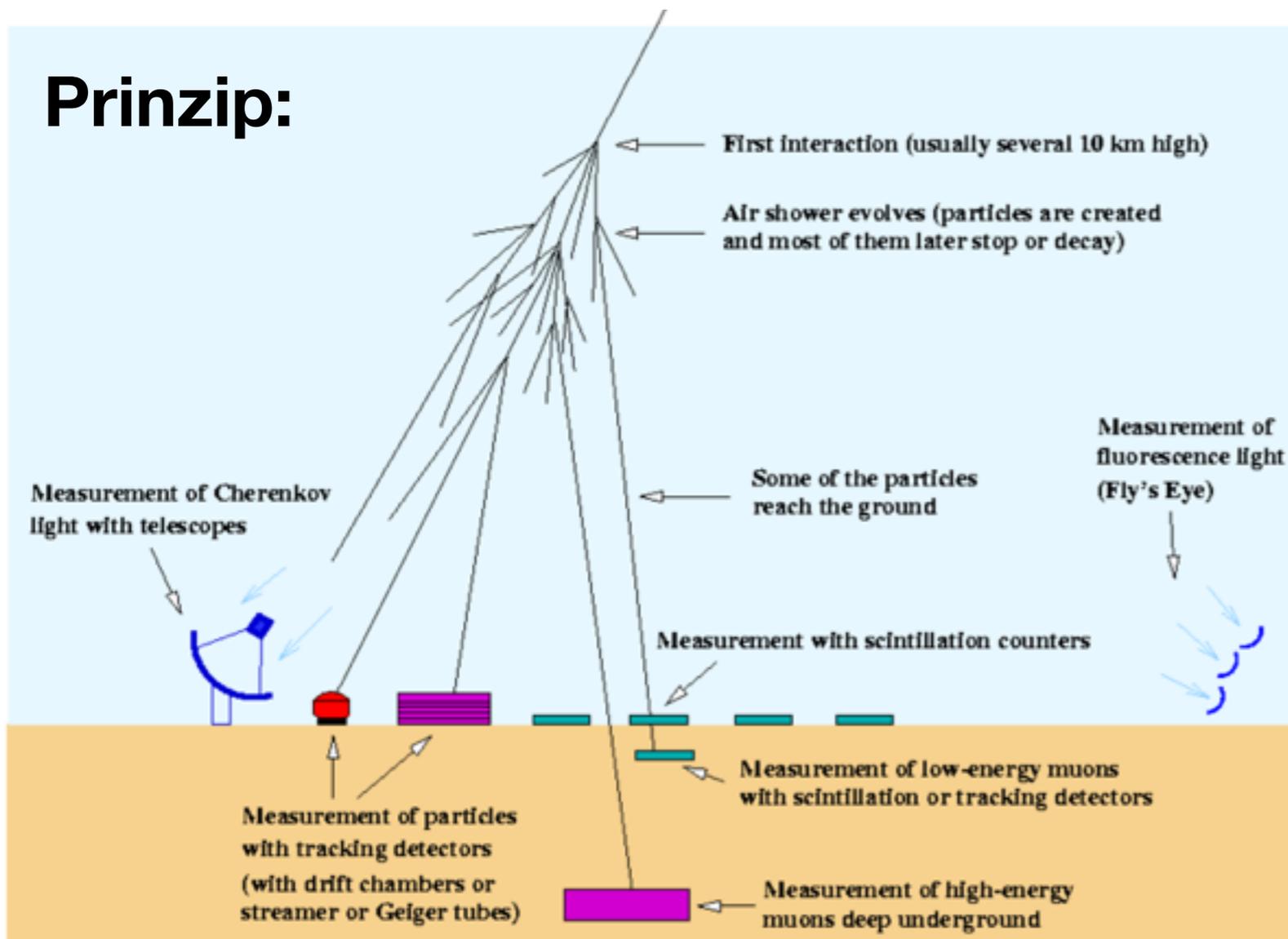
KEY

P	Proton	e	Electron
n	Neutron	μ	Muon
π	Pion	γ	Photon

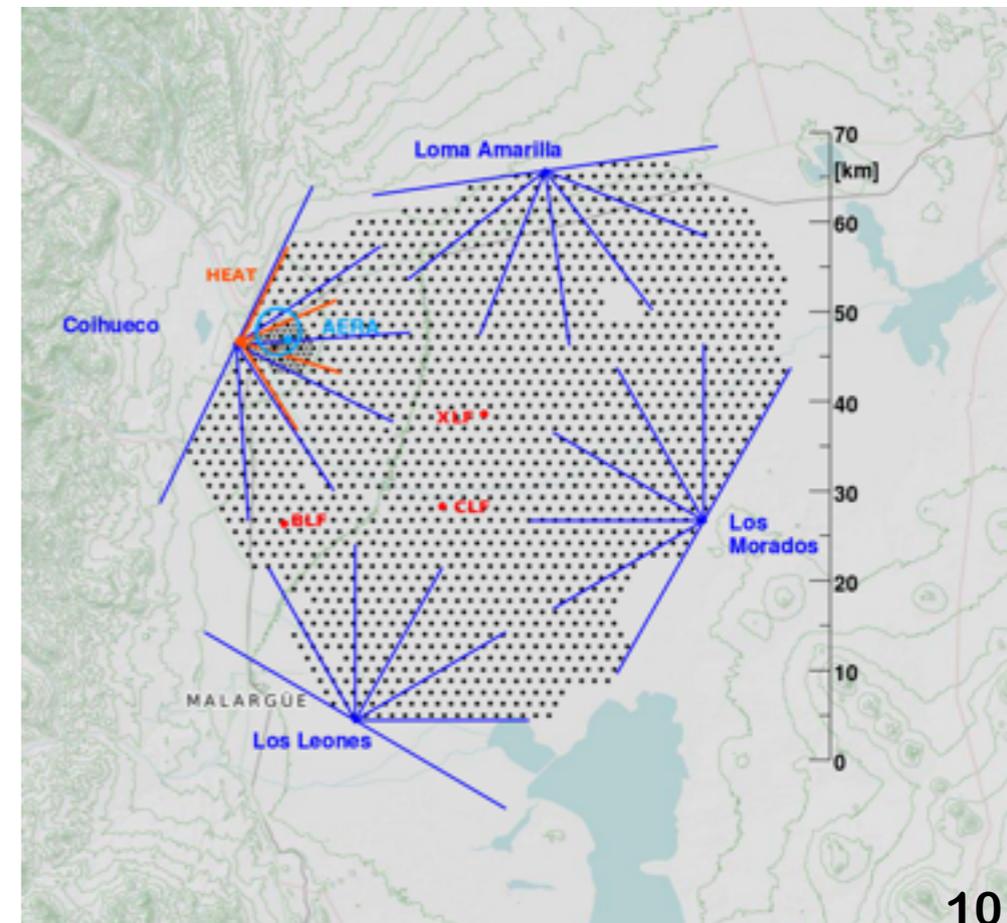
Nachweis Kosmischer Strahlung

- z. B. mit Pierre-Auger Experiment (Argentinien)

Prinzip:



(C) 1999 K. Bernhöfer



Teilchenbeschleuniger

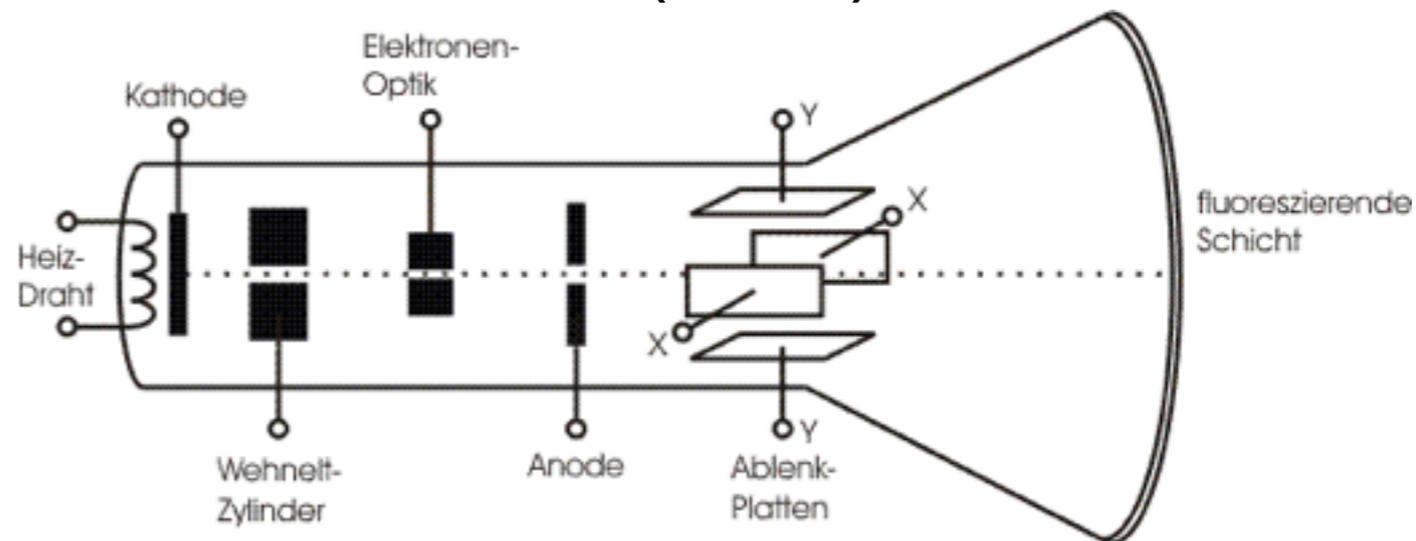
Linearbeschleuniger

- Teilchenbeschleuniger nutzen Lorentzkraft $\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E})$

- Energiegewinn

$$\Delta E = q \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} (\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E}) d\vec{r} = q \cdot U$$

- Kein Energiegewinn durch Magnetfeld ($d\vec{r} \parallel \vec{v}$), aber Bahnablenkung und Strahlfokussierung
- Beschleunigung durch E-Feld
- **Statischer Beschleuniger: Braun'sche Röhre (1897)**



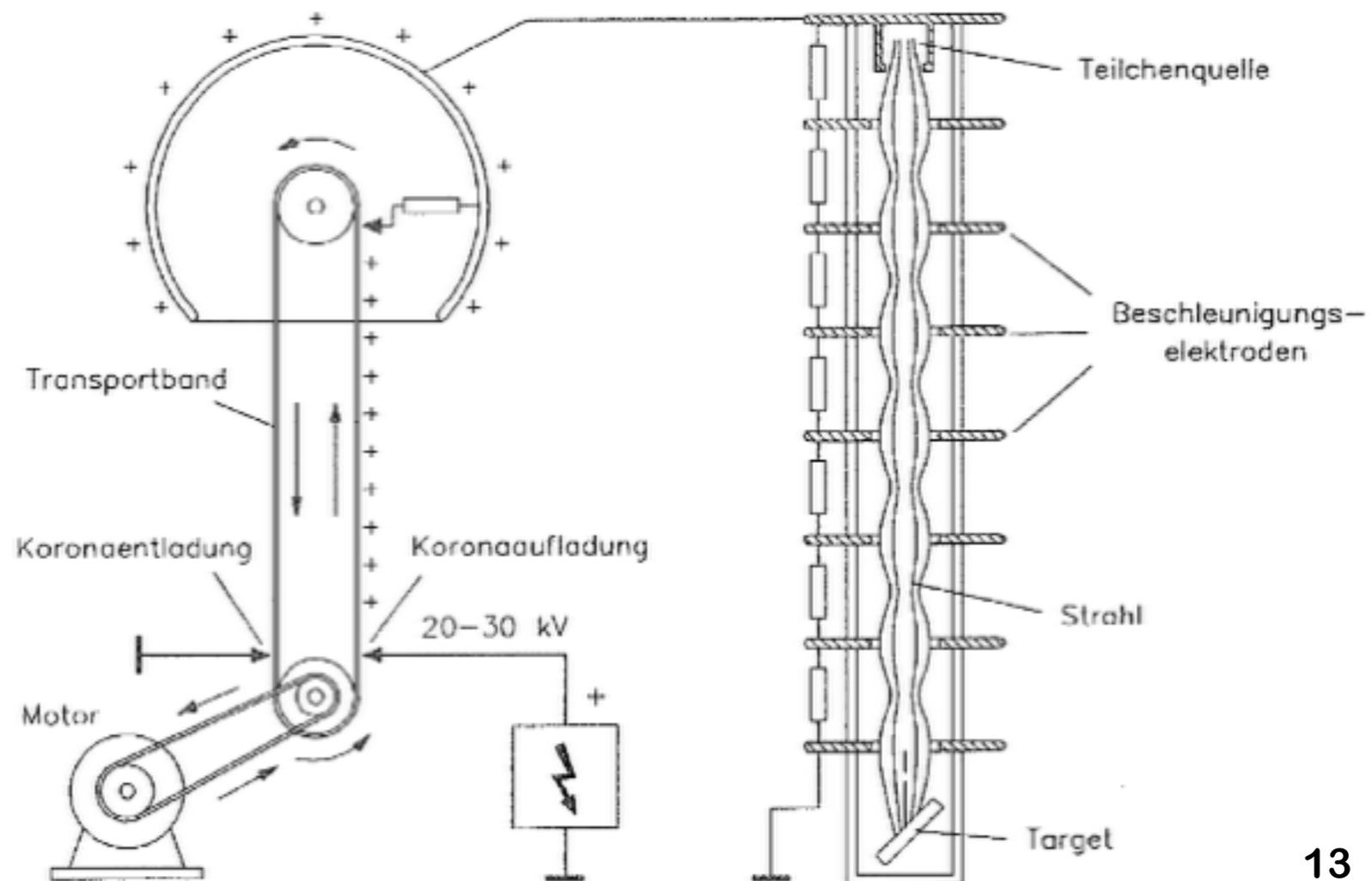
- Elektronenquelle: Glühkathode

- Vakuumröhre

- Energiegewinn eU beschränkt durch Überschlage bei hohen U (~ 10 MV)

Van-der-Graaff-Beschleuniger (1930)

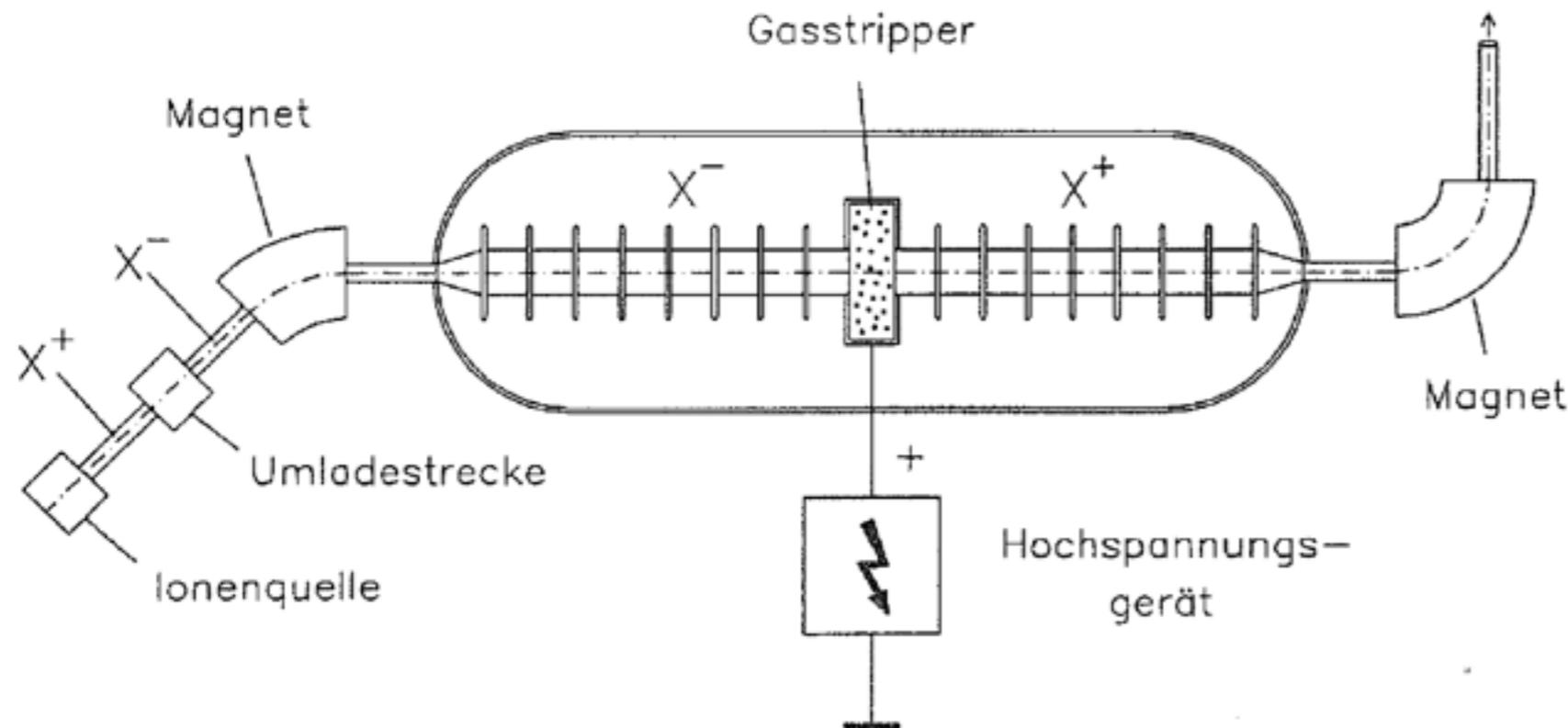
- Band aus isolierendem Material fördert Ladungen in isolierte, leitende Hohlkugel
- Hohlkugel ist mit Teilchenquelle leitend verbunden
- Potentialdifferenz bis zu **2 MV** (mit Isoliergas: **10 MV**)
- Ströme begrenzt auf 0.1 ... 1mA (Ladung muss durch Band nachgeliefert werden)
- Statischer Beschleuniger
- Wird auch als Ionenbeschleuniger eingesetzt



Tandembeschleuniger (1936)

- Weiterentwicklung des Van-der-Graaff-Beschleunigers
- “Umladen” der Ionen erlaubt 2-malige Nutzung der Beschleunigerstrecke
- Mehrfach geladene Ionen → Beschleunigung auf bis zu ~1000 MV

Statische Beschleuniger sind immer durch Spannungsüberschläge limitiert



Stripperfolie

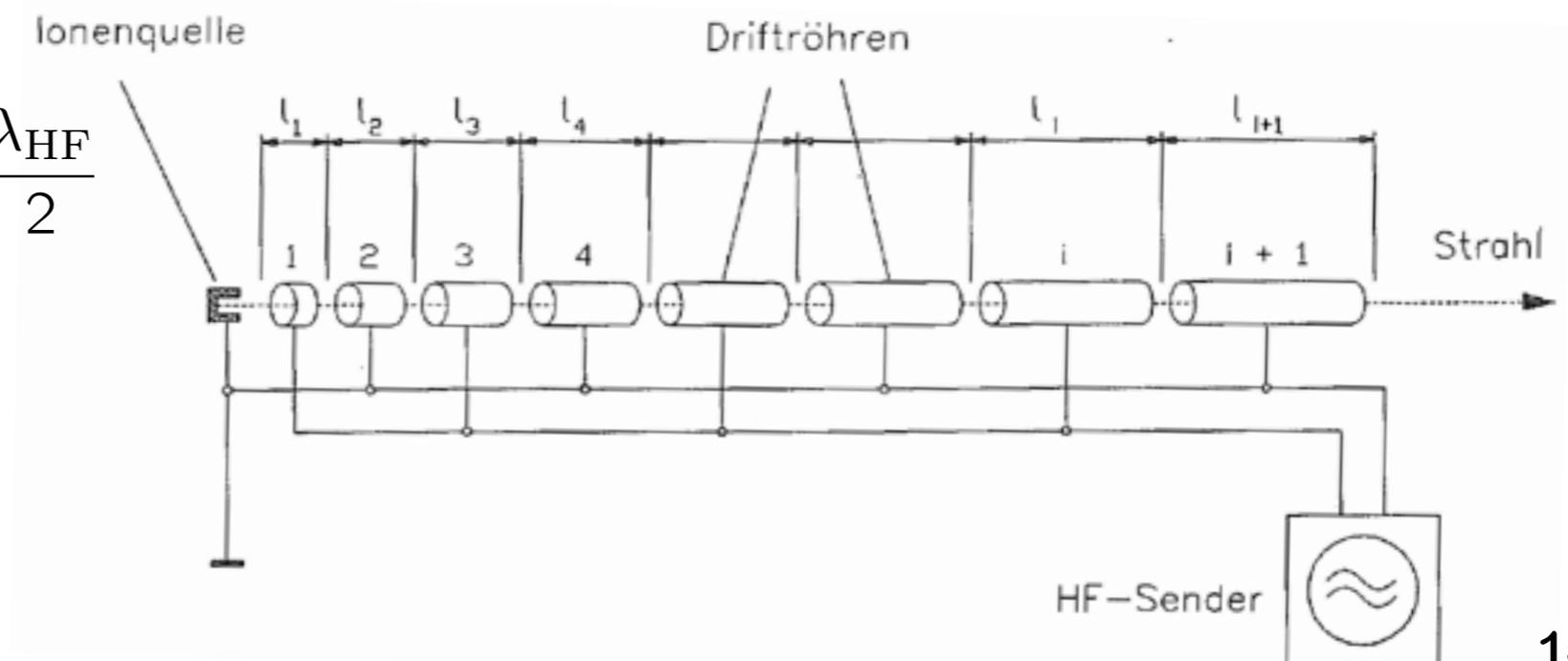
HF-Linearbeschleuniger

Prinzip: mehrfache Nutzung der Beschleunigungsspannung (Ising, 1925)

Erste Realisierung: Wiederöe, 1928

- Driftröhren abwechselnd mit HF-Quelle verbunden; typ. Frequenz $f_{\text{HF}} \sim 10 \text{ MHz}$
- Wechselspannung $U_{\text{HF}}(t) = U_0 \sin(2\pi f_{\text{HF}} t)$; typ. Spannung $U_0 \sim 10\text{-}300 \text{ kV}$
- Beschleunigung zwischen Driftröhren; wenn innerhalb der Röhren \rightarrow Umpolen
- Energiegewinn nach i -ter Röhre: $E_i \sim i e U_0 \sin \phi_s$; optimal für $\phi_s = \pi/2$
- **Prinzipiell können beliebig hohe Energien erreicht werden** (keine Überschläge)
- Beachte: Driftröhren müssen mit zunehmender Energie länger werden (Flugzeit durch Röhre muss $T/2$ sein)

$$l_i = \frac{v_i T_{\text{HF}}}{2} = \frac{v_i}{2f_{\text{HF}}} = \frac{v_i \lambda_{\text{HF}}}{2c} = \beta_i \frac{\lambda_{\text{HF}}}{2}$$

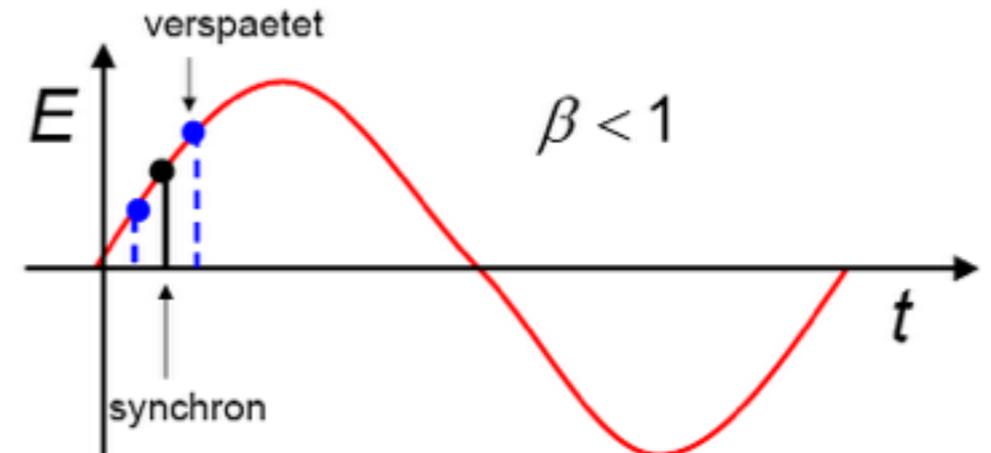


HF-Linearbeschleuniger

Problem: Instabilität von $U_0 \rightarrow$ Phasenschlupf von Bewegung und HF-Spannung (**Verlust der Synchronität**)

Lösung: Phasenfokussierung

- Prinzip: Arbeitspunkt nicht bei $\phi_s = \pi/2$ sondern früher \rightarrow effektive Beschleunigungsspannung $U_s < U_0$



- Nur Teilchen auf Sollbahn sehen die “richtige” Spannung U_s
 - Andere Teilchen werden auf Sollbahn zurück gedrängt:
 - Teilchen mit zu viel Energie trifft früher ein und sieht kleinere Spannung
 - Teilchen mit zu wenig Energie trifft später ein und sieht größere Spannung
- \rightarrow **Teilchen führen Schwingungen um Sollphase ϕ_s aus**
- \rightarrow **Kein kontinuierlicher Teilchenstrahl, sondern Pakete (“Bunches”)**

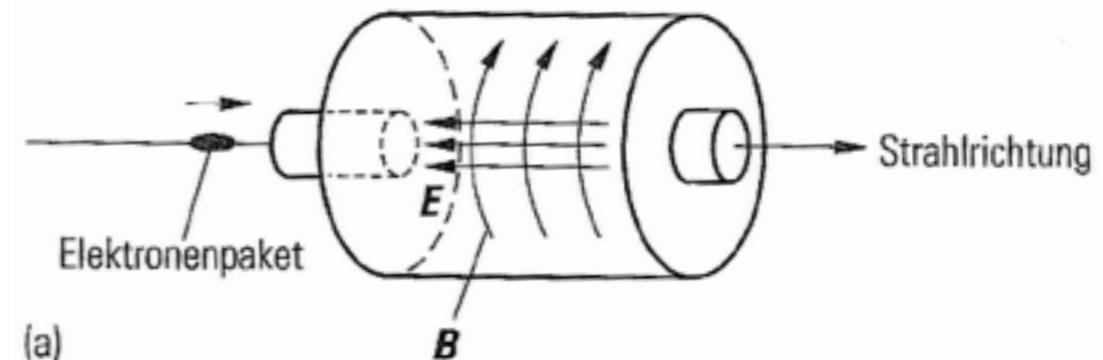
Wanderwellenbeschleuniger

Driftröhren-HF-Beschleuniger begrenzt durch Länge der Driftröhren (z. B. bei $f_{\text{HF}} = 10 \text{ MHz}$ und $v = c \rightarrow l_j \sim 15 \text{ m}$)

Heute: Ausnutzen der Ausbreitung von em-Wellen in Hohl-/Wellenleitern

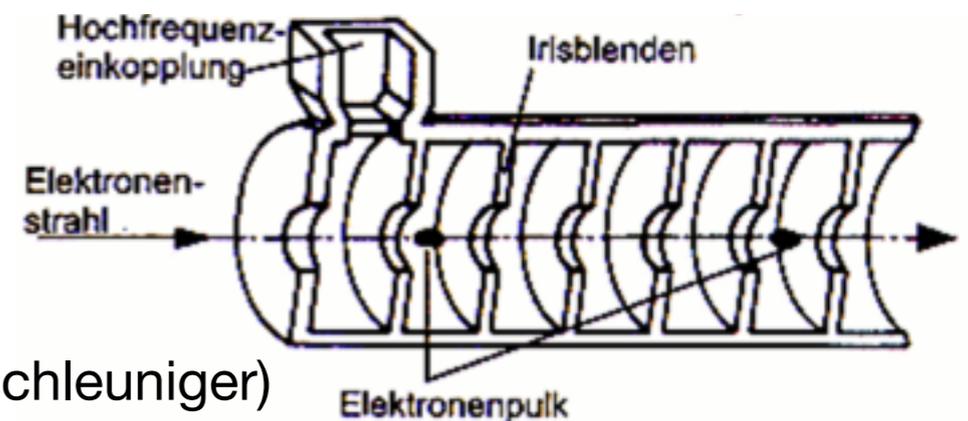
- Longitudinale Wellen möglich: E -Feld parallel (!) zur Ausbreitungsrichtung
- Viele mögliche Moden: hier wichtig TM_{01} (B -Feld transversal, E -Feld longitudinal)

Einfachste Realisierung: metallische Dose



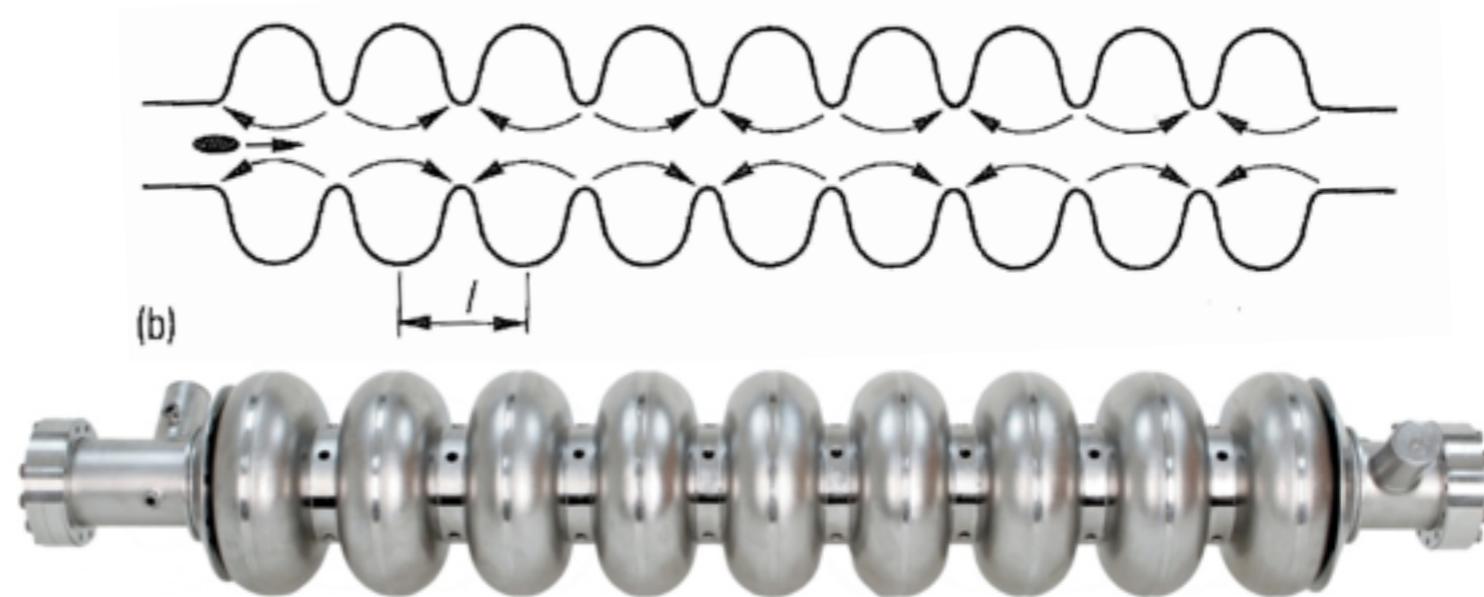
- Einkopplung der Welle mit Induktionsschleife oder „Klystron“ (typisch: $f_{\text{HF}} \sim 500 \text{ MHz}$)
- **Problem:** im Hohlleiter: $v_{\text{phase}} > c$! Teilchen mit c : erst beschleunigt, dann abgebremst
- Lösung durch Runzelröhre

- Irisblenden verringern Phasengeschwindigkeit
- Abstand wird an Geschwindigkeit angepasst
- Teilchen können auf Wellenberg reiten (\rightarrow Wanderwellenbeschleuniger)



Hohlraumresonatoren (Cavities)

Wellenleiter "leitend abgeschlossen" → Reflexion
 → Erzeugung von stehenden Wellen bei bestimmten Resonanzfrequenzen



- Fast alle moderne Kavitäten folgen diesem Prinzip
 - LHC: 5 MV/m, 400 MHz (Supraleitung zur Verringerung der Verluste)
 - International **L**inear **C**ollider (ILC): 1.3 GHz
- Erreichbare Strahlenergien bei Linearbeschleunigern

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

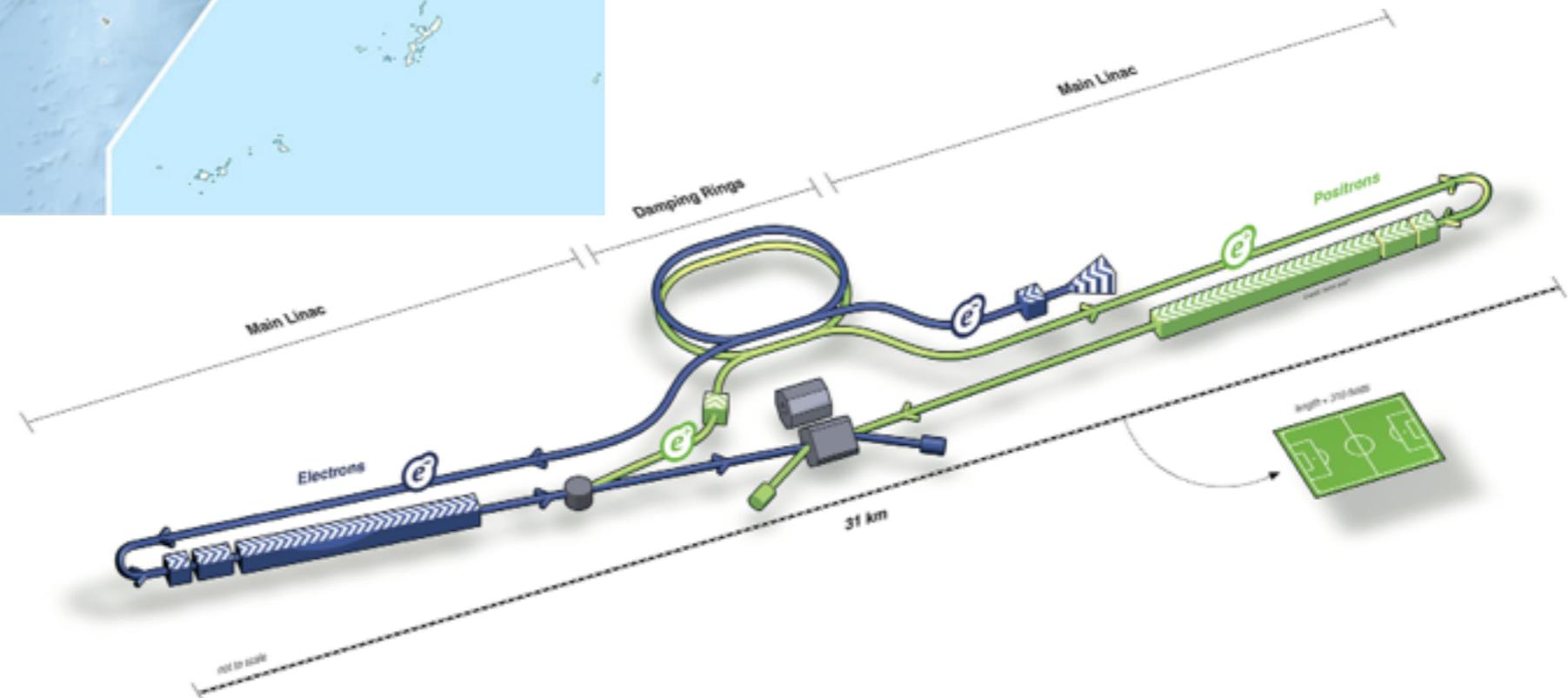


geplanter Ort: IWATE
Tohoku-Distrikt

Sendai

Tokio

Möglicher Baubeginn ~2016
Mögliche Inbetriebnahme ~2026



Linearbeschleuniger: Energie-Erhöhung immer durch Verlängerung möglich, aber sehr teuer und geogr. nicht realisierbar

Zyklotron (1930 / 32)

Kreisbeschleuniger: Mehrfache Nutzung von Cavitäten

Erster Kreisbeschleuniger: Zyklotron von Lawrence & Livingston

- Zwei U-förmige Vakuumkammern (“DEEs”) in senkr. B -Feld
- HF-Spannung zwischen DEEs beschleunigt Ionen aus zentraler Quelle

- Ionen beschreiben Halbkreis

$$\frac{mv^2}{r} = qvB \rightarrow r = \frac{mv}{qB}$$

- Zeit für halben Umlauf unabhängig von r

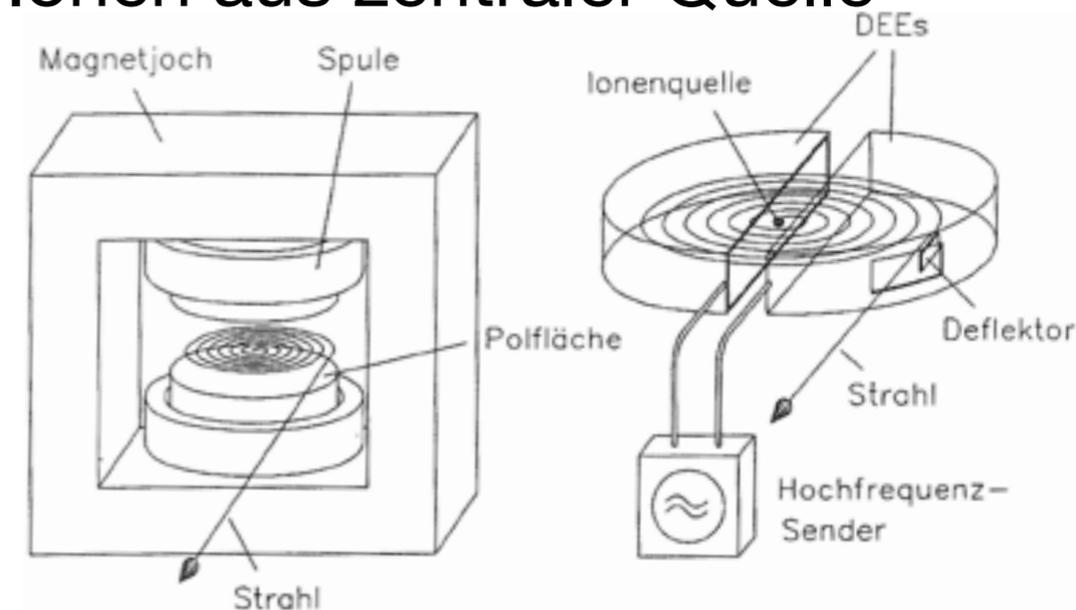
$$\frac{T}{2} = \frac{\pi r}{v} = \frac{\pi m}{qB}$$

- HF kann so gewählt werden, dass Teilchen zwischen DEEs beschleunigt werden \rightarrow “Zyklotronfrequenz” f_{HF}

$$2\pi f_{\text{HF}} = \omega_{\text{HF}} = \frac{q}{m} \cdot B$$

- Spiralbahn nach außen; maximale Energie begrenzt durch Größe / Radius

$$E_{\text{max}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{q^2}{2m} \cdot (R \cdot B)^2$$





Zyklotron

Lawrence, Livingston
(1930/32)



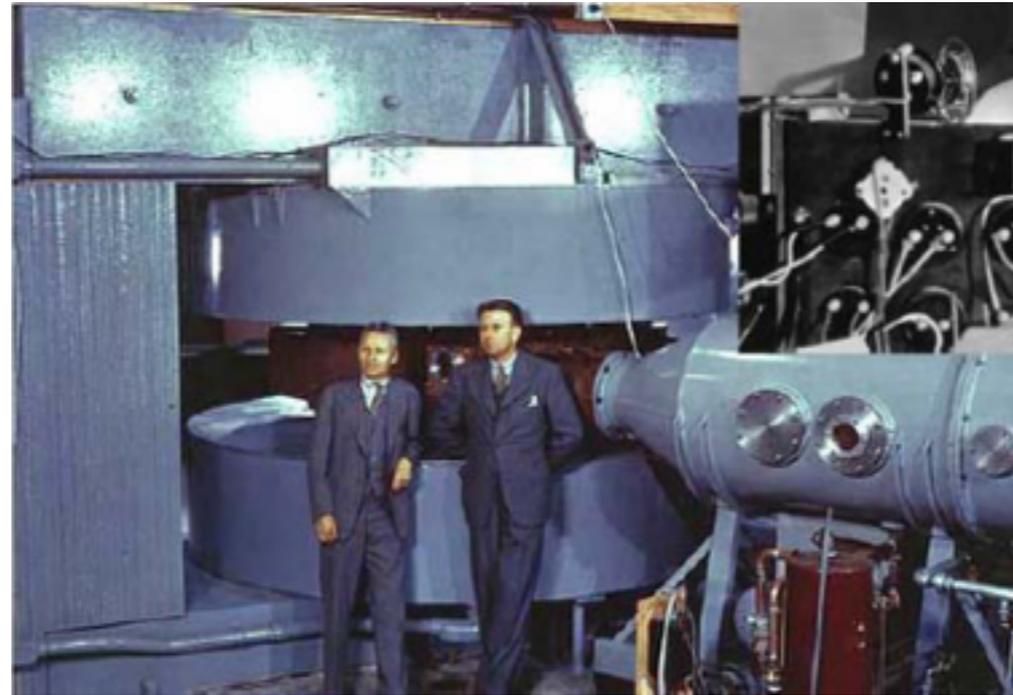
Lawrence (1937)
in Brookhaven

Klassisches Zyklotron:

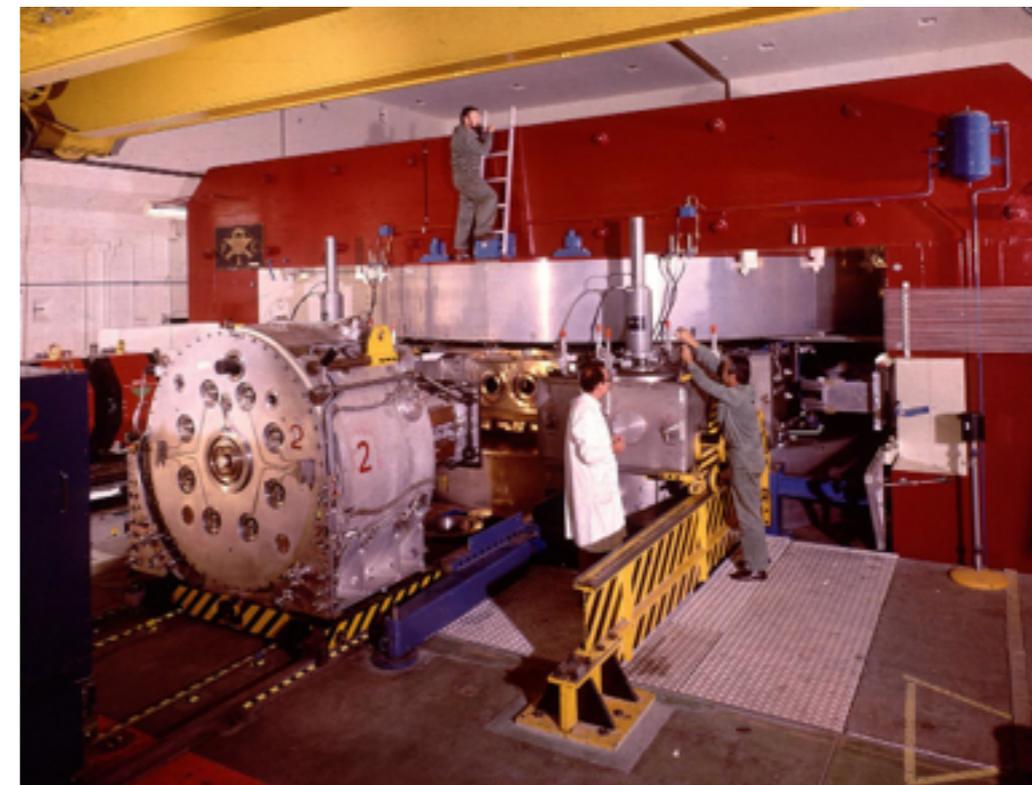
- Festes B -Feld
- Feste HF-Frequenz
- Umlauffrequenz konstant für nicht-relativistische Teilchen
- Beschleunigung von p , d , α auf **maximal ~ 22 MeV / e**
- Hohe Energien: $m' = \gamma m$

Synchro-Zyklotron:

- HF-Frequenz wird während der Beschleunigung synchron heruntergefahren \rightarrow höhere Energien
- **Nur kurze Strahlpulse möglich**



CERN's erster
Beschleuniger:
Synchro-Zyklotron
mit 600 MeV (1957)

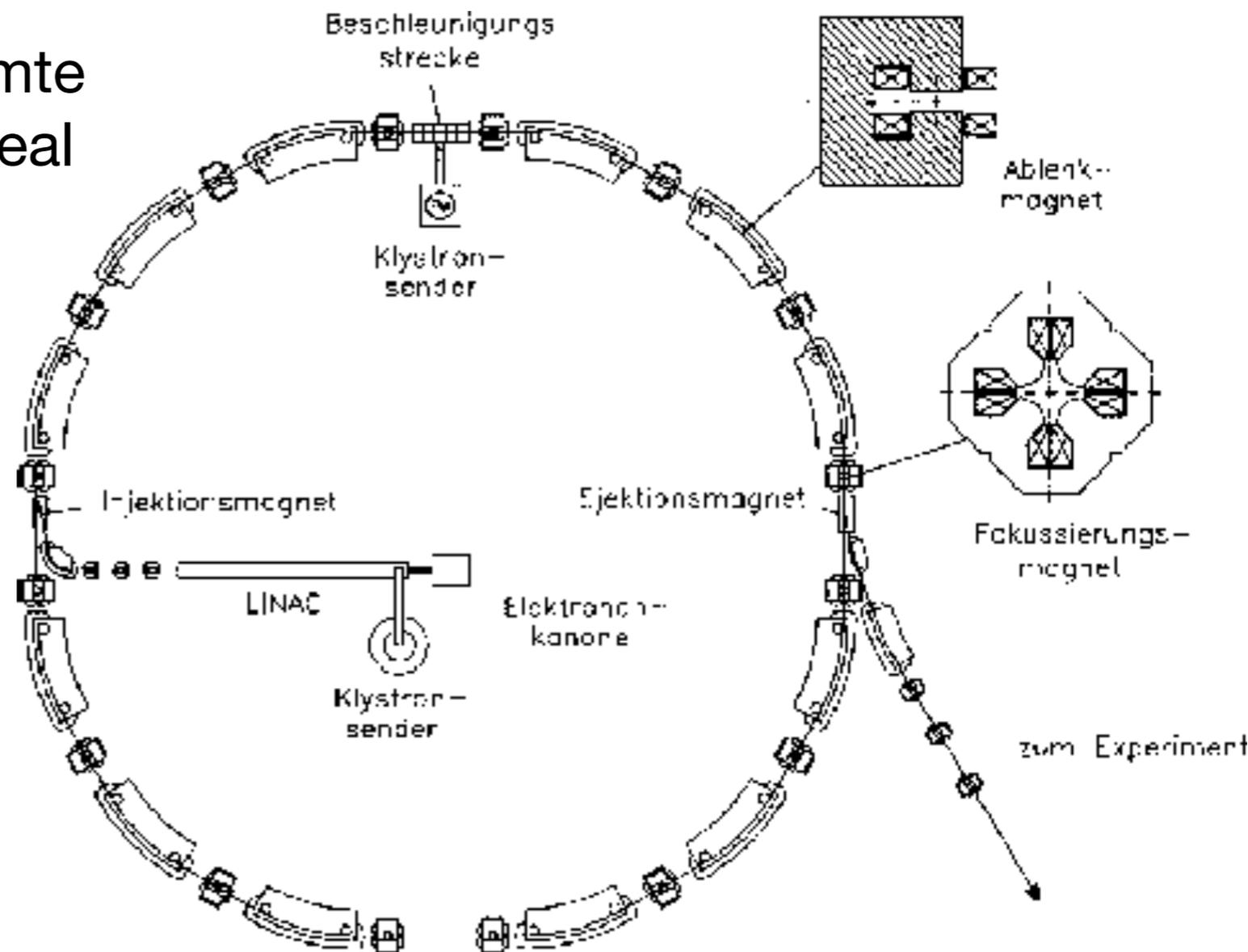


Synchrotron (1945)

- Für relativistische Teilchen im B -Feld gilt: $r = \frac{mv^2 \cdot c^2}{evB \cdot c^2} = \frac{vE}{eBc^2} \stackrel{v \approx c}{=} \frac{E}{eBc}$
- Stärke der Magnetfelder technisch begrenzt ($\sim T$)
→ Radius wächst linear mit Energie
- Außerdem: Magnete die gesamte Fläche abdecken sind nicht ideal

Idee des Synchrotron: Dipol-Magnete nur in engem Bereich um Teilchen-Sollbahn

- Beachte: für konst. Radius muss man das B -Feld „synchron“ mit E hochfahren (“Ramp”)
- Komponenten des Synchrotron: Dipole, Beschleunigungsstrecke(n), Fokussiermagnete (notwendig, weil Teilchen sehr oft umlaufen)



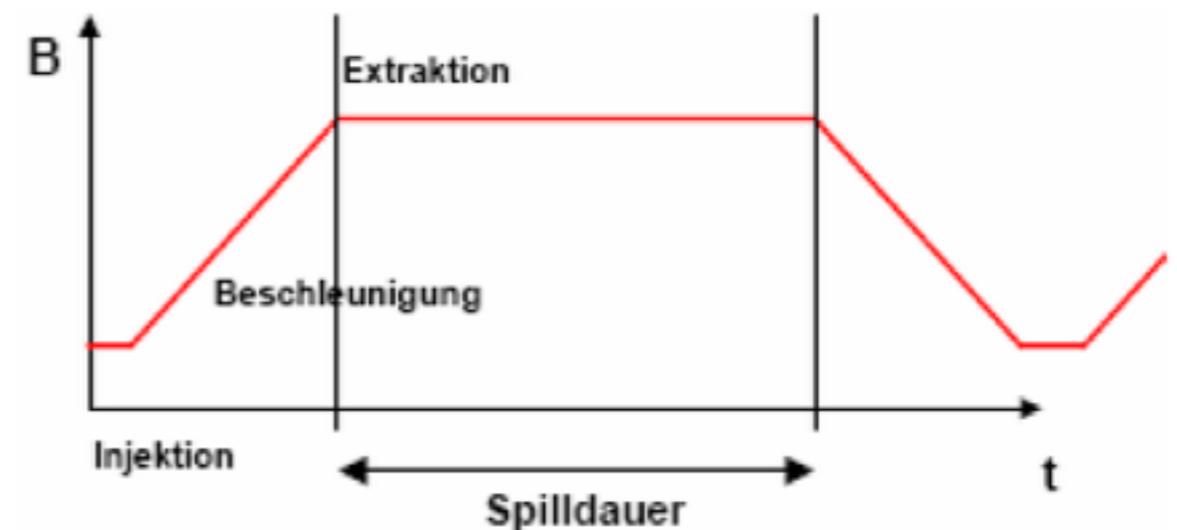
E. M. McMillan, V. Vekser

Synchrotron

- Technische Herausforderung: B -Feld, das bei $B = 0$ beginnt und dann linear hochgefahren wird \rightarrow Synchrotrone können nicht von $E = 0$ an beschleunigen \rightarrow **Vorbeschleuniger** notwendig
 - Einspeisung in Umlaufbahn durch “Kicker”-Magnet
 - wenn E_{ini} noch nicht relativistisch (d. h. $v_{ini} < c$), dann muss auch die HF nachgefahren werden, bis Teilchen hochrelativistisch sind

- **Beispiel:**

Hub-Faktor	10
Einschussenergie	1 GeV
Extraktionsenergie	10 GeV
B -Feld	bis 1 T
Krümmungsradius	33 m
Maschinenradius	40 m
Umfang	250 m
max. Umlauffrequenz	1.2 MHz
Beschleunigungsspannung	1 MV / m
Beschleunigungsstrecke	1 m
Anzahl der Umläufe	9000
Zurückgelegte Wegstrecke	2250 km



In der Realität dauert das “Hochfahren” länger, da auf die Strahlqualität geachtet werden muss

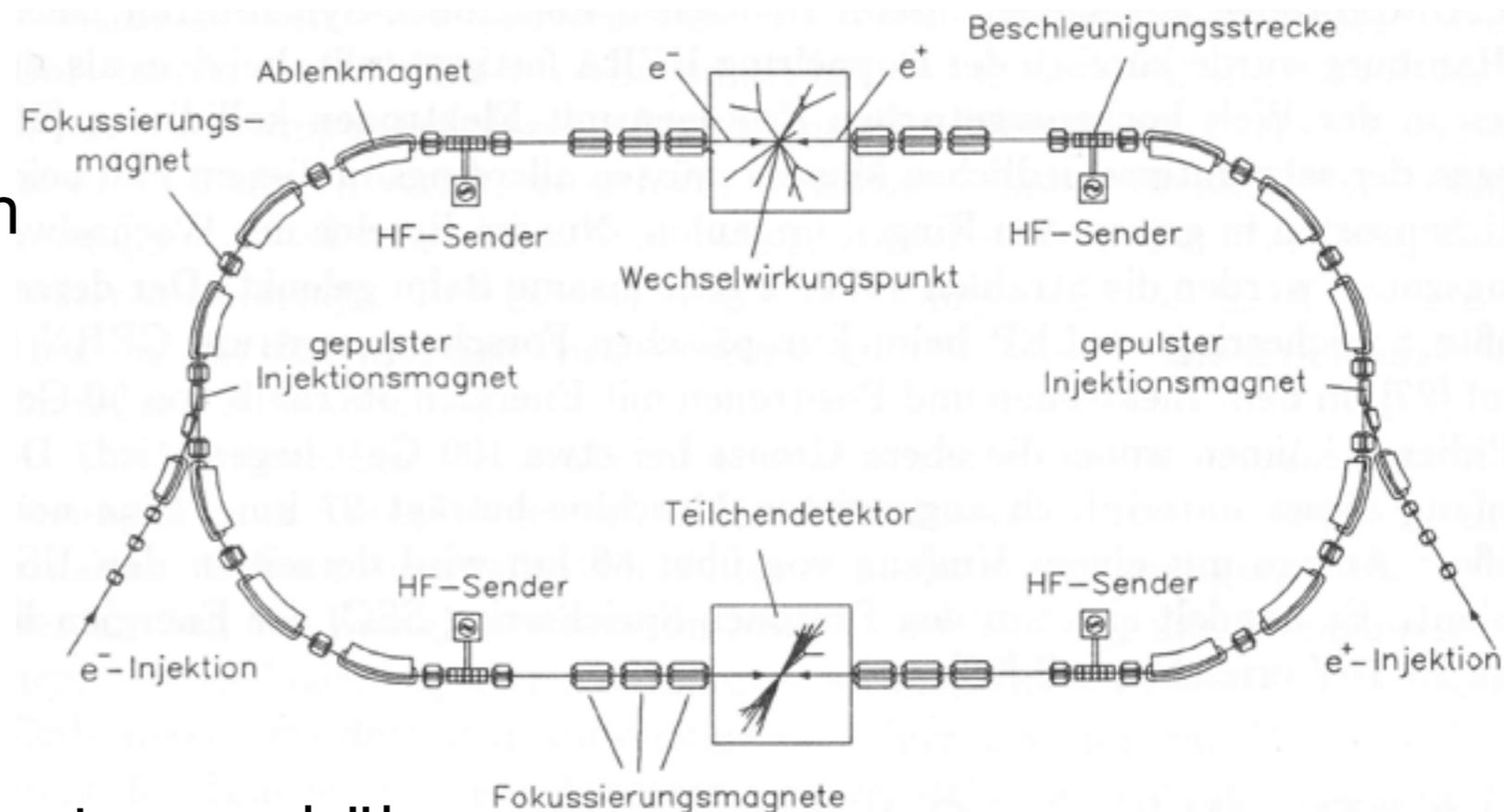
Speicherring

Große Ähnlichkeit zu Synchrotron, aber Speicherung des Strahls bei fester Energie

- Nach “Ramp”: konstantes B-Feld
- Speichern über mehrere Stunden → Hochvakuum (10^{-7} pa)
- Collider → Gegenläufige Strahlen (bei z. B. e^+e^- in gleicher Röhre)

Typischer Betrieb:

- Erst “Ramp” → Synchrotron
- Dann Speicherring
- Evtl. Beschleunigung zum Ausgleich von E -Verlusten durch z. B. Synchrotronstrahlung (siehe später)
- Fokussierung um Reaktionsrate zu erhöhen



Synchrotronstrahlung

Beschleunigte Ladungen sind Quellen von em-Strahlung

Teilchen auf Kreisbahn, z. B. Speicherring

- Im Ruhesystem der Teilchen: Zentrifugalkraft → Dipolstrahlung
- LT ins Laborsystem → “Verzerrung” zu Strahlkegel in Bewegungsrichtung

- Abgestrahlte Leistung (E-Dynamik): $P = \frac{2\alpha}{3R^2} \beta^4 \gamma^4 \stackrel{\beta \approx 1}{\approx} \frac{2\alpha}{3R^2} \left(\frac{E}{m}\right)^4$
- ΔE pro Umlauf (für e^-): $\Delta E = \frac{2\pi R}{c} P = \frac{4\pi\alpha}{3cR} \left(\frac{E}{m_e}\right)^4 = 8,85 \cdot 10^{-5} \frac{E^4 [\text{GeV}^4]}{R [\text{km}]} \text{MeV}$

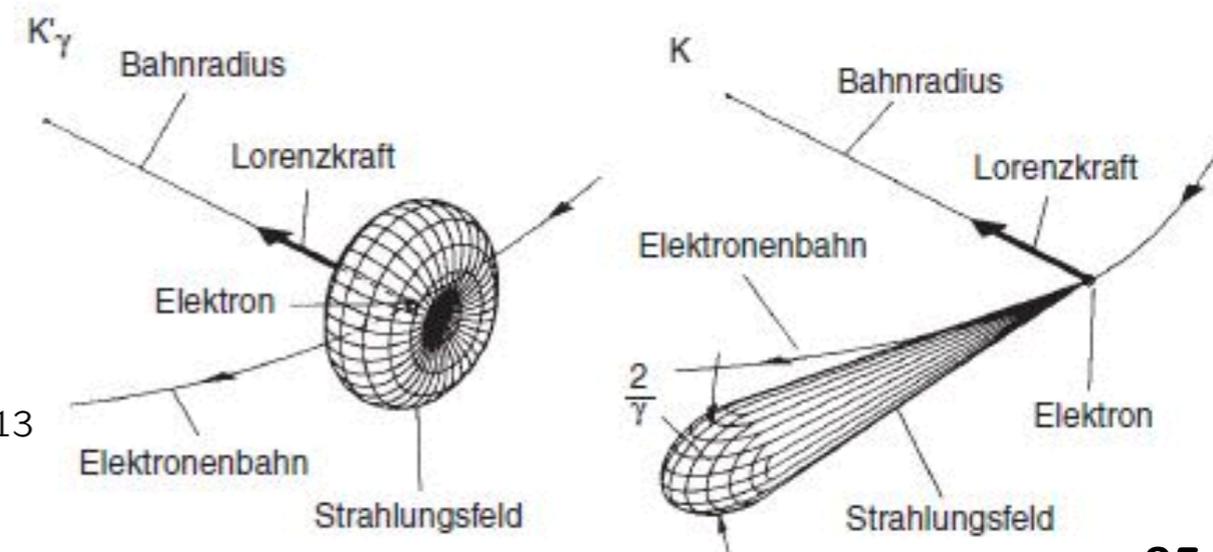
z. B. bei LEP ($E = 104 \text{ GeV}$, $R = 4.3 \text{ km}$) → $\Delta E = 2.4 \text{ GeV}$

- Also: E ist durch R begrenzt

- Ausweg:

- Linearbeschleuniger

- Protonenbeschleuniger: $\frac{\Delta E_e}{\Delta E_p} = \left(\frac{m_p}{m_e}\right)^4 \approx 10^{13}$



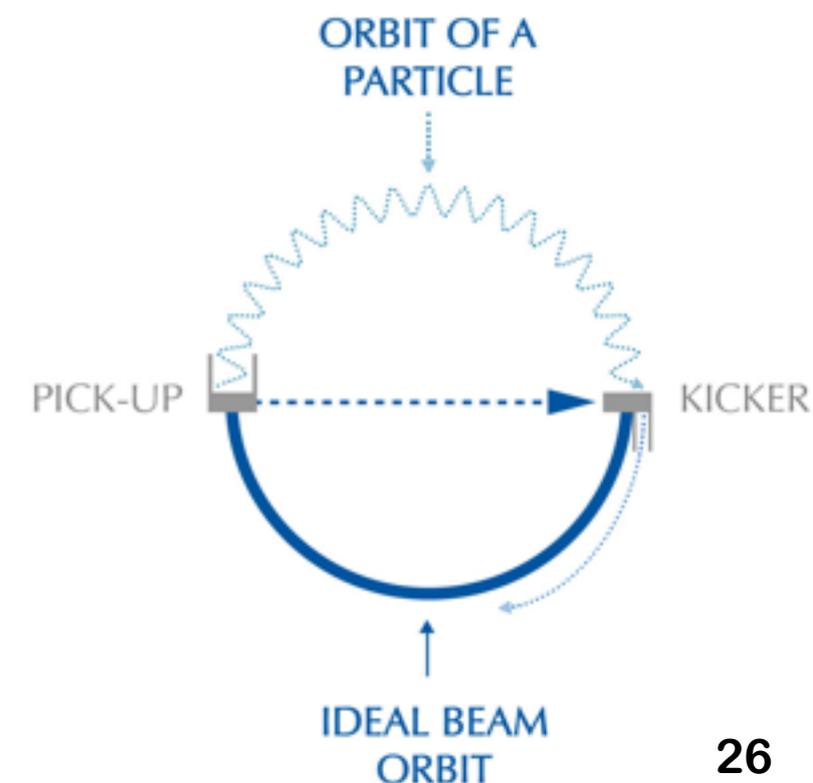
Stochastische Kühlung

Anti-Teilchen werden typisch in “Fixed-Target”-Kollisionen erzeugt → starke Streuung der Impulse

- Pakete nehmen ein großes Volumen V_{PR} im Phasenraum ein
- Satz von Liouville: V_{PR} bei Wirkung von konservativen Kräften ist konstant

Prinzip der stochastischen Kühlung: van der Meere (1968, NP 1984)

- “Pick-Up”-Detektor misst die Position einzelner Teilchen
- “Kicker”-Magnet korrigiert die Bahn einzelner Teilchen auf die Sollbahn (1. Ordnung) → **Kühlung**
- Korrektur durch nicht konservative Kraft
- Kicker-Impulse andere Teilchen heben sich im Mittel auf (Korrekturen 2. Ordnung → **heizen den Strahl auf**)
- Geschickte Wahl der Impulsstärke: Kühlung überwiegt die Erhitzung
- Typische Dauer des Kühlung: Sekunden bis Minuten



Einschub: Wirkungsquerschnitt und Luminosität



Wirkungsquerschnitt

- Die Rate an Ereignissen eines bestimmten Prozesses dN/dt ist proportional zum Wirkungsquerschnitt σ

$$\frac{dN}{dt} \propto \sigma$$

- Wirkungsquerschnitte enthalten die Informationen über die fundamentale Physik des betrachteten Prozesses (Stärke der Wechselwirkung, Kinematik, Dynamik ...)
- Die Berechnung von Wirkungsquerschnitten ist störungstheoretisch möglich (siehe später: Feynman-Diagramme und Feynman-Regeln)
- Anschaulich entspricht der Wirkungsquerschnitt der effektiven Querschnittsfläche bei einem bestimmten Streuprozess
- Einheit 1 barn (eine "Scheune") = 10^{-24} cm^2



Luminosität

- Weiterer Proportionalitätsfaktor: Luminosität L (“Leuchtkraft”) des Experiments

$$\frac{dN}{dt} = L \cdot \sigma$$

- Einheit [$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]
- Typische Beschleuniger: $10^{30} \dots 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Für Speicherring:

$$L = N_b \cdot f \cdot \frac{n_1 n_2}{4\pi\sigma_x\sigma_y} \leftarrow \text{Querschnittsfläche der Strahlpakete}$$

- n_1 / n_2 : Teilchen in kollidierenden Paketen
- N_b : Anzahl der Umlaufenden Pakete
- f : Umlauffrequenz
- σ_x / σ_y : Ausdehnung der Teilchenbündel in x - und y -Richtung



Integrierte Luminosität

- Luminosität L wird oft auch “instantane” Luminosität genannt
- Wichtig für eine längere Laufzeit ist die “integrierte” Luminosität

$$L_{\text{int}} = \int L dt$$

- Mit L_{int} erhält man die erwartete Anzahl von Ereignissen

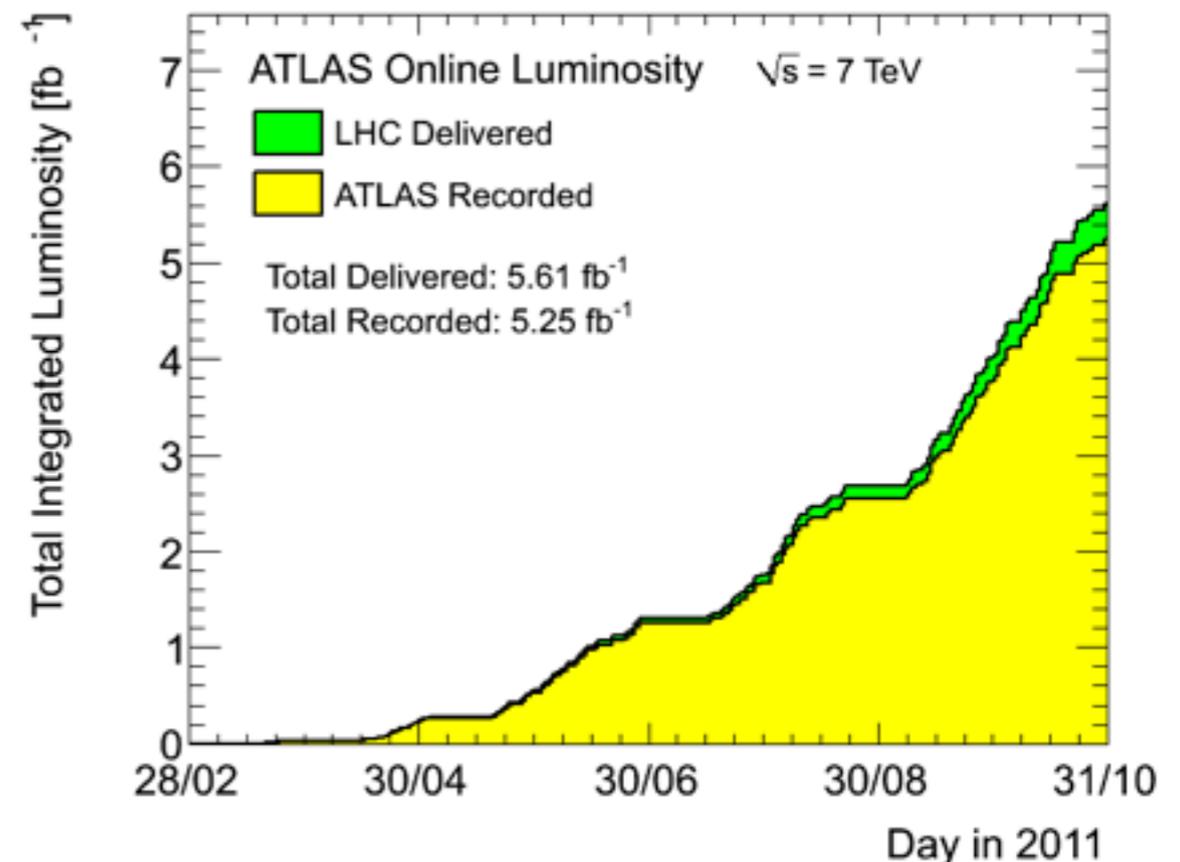
$$N = \sigma \cdot L_{\text{int}}$$

- Einheit [pb^{-1}], [fb^{-1}], [ab^{-1}]
- Um rel. statistischen Fehler zu reduzieren \rightarrow hohe L_{int}

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\Delta N}{N} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

- **Ziel:** Hohe Luminosität und lange Datennahme

L_{int} wächst mit der Zeit



Strahlparameter

- Hohe Luminositäten und lange Laufzeiten werden durch eine gute Strahlqualität und gutes Vakuum erreicht

- Luminosität:
$$L = N_b \cdot f \cdot \frac{n_1 n_2}{4\pi\sigma_x\sigma_y} = N_b \cdot f \cdot \frac{n_1 n_2}{4\epsilon\beta^*}$$

mit **Emittanz ϵ** (Maß für Phasenraumvolumen)

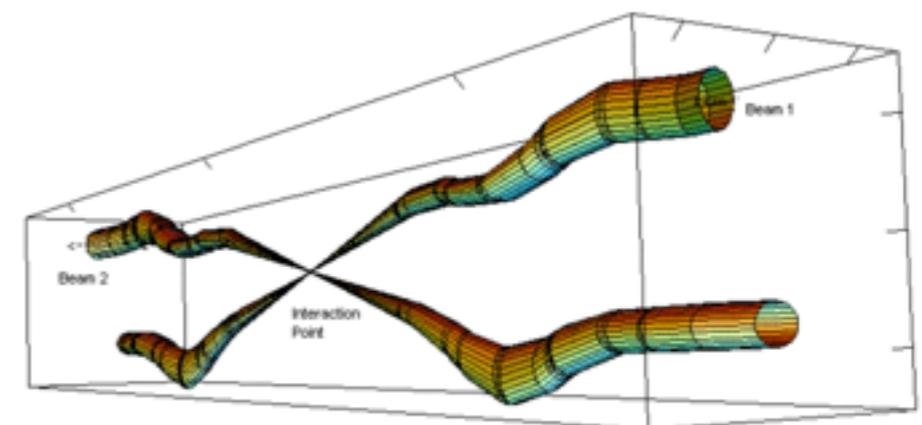
- norm. Emittanz $\epsilon_n = \epsilon\gamma$ ist Erhaltungsgröße wenn nur beschleunigt wird (Liouville)
- ϵ ist limitiert durch Injektor und Vorbeschleunigung

und **β^*** (Maß für die Fokussierung am Wechselwirkungspunkt: Abstand vom IP bei dem Strahl die doppelte Breite hat)

$$\beta^* = \frac{\pi\sigma^2}{\epsilon}$$

- Parameter sind nicht unabhängig voneinander!

- Strahl nimmt an Intensität ab durch Teilchenkollisionen und Wechselwirkungen mit Gas → **typische Lebensdauern ~40h**



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

Wichtige Beschleuniger- experimente (Auswahl)

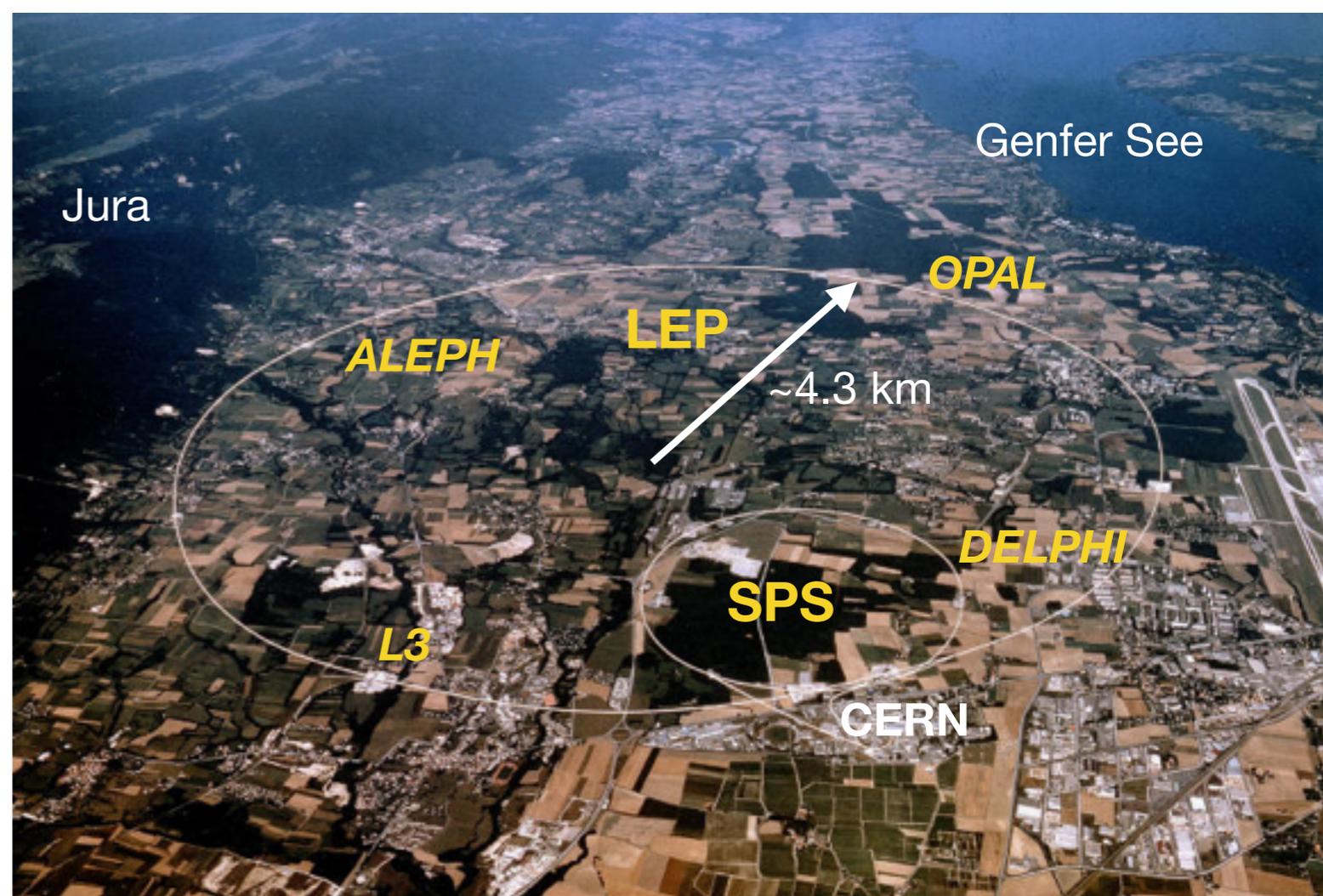


LEP

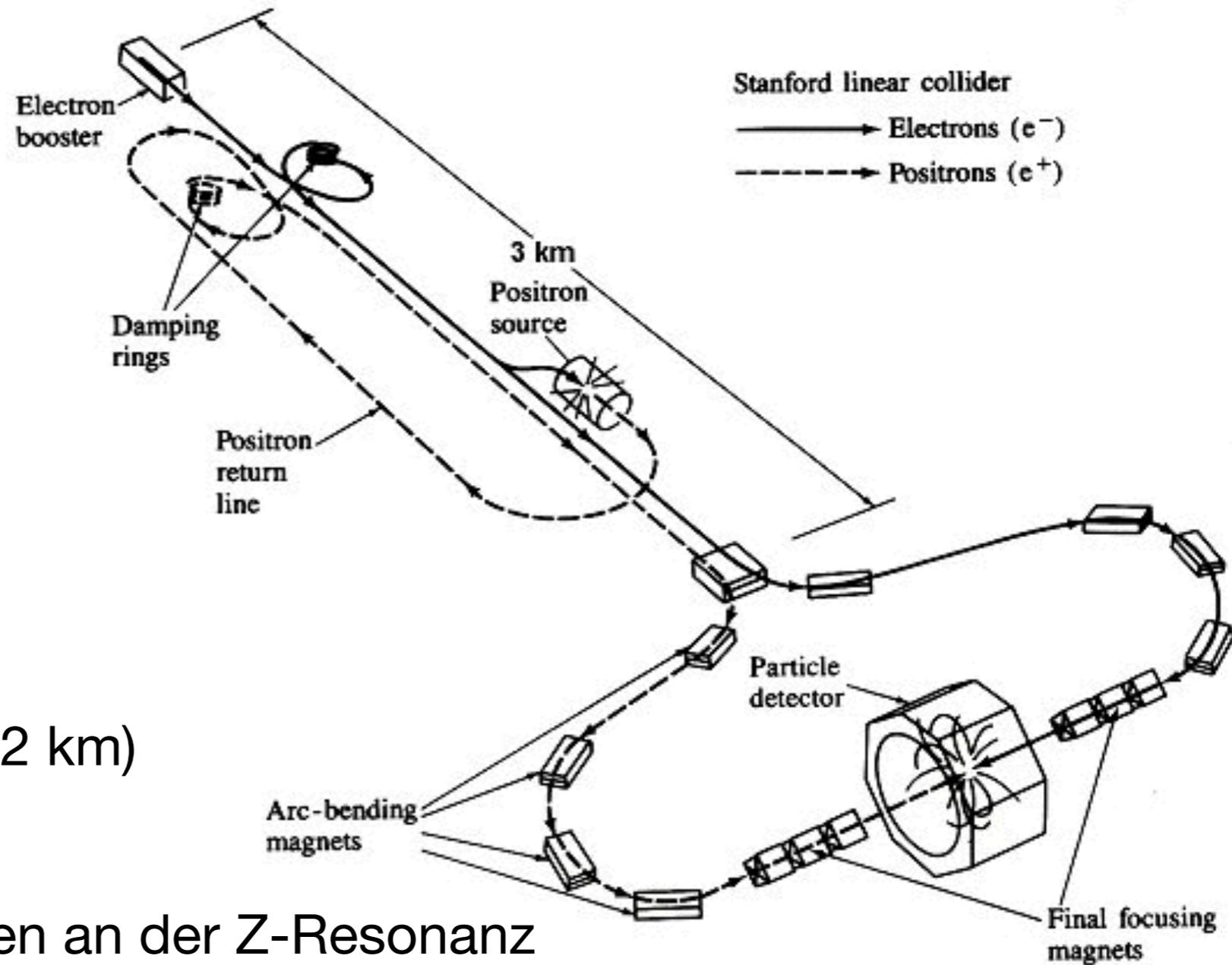


Large Electron Positron Collider

- e^+e^- Speicherring
- $\sqrt{s} = 90 \dots 208 \text{ GeV}$
- Laufzeit: 1992 bis 2000
- Nur eine Strahlröhre
- Vorbeschleuniger u. a. SPS
- Limitiert durch Beschleunigungsleistung zur Kompensation der Synchrotron-Strahlung ($P_{\text{RF}} \sim 30 \text{ MW}$)
- Vier Experimente (ALEPH, OPAL, DELPHI, L3)
- Physik-Ziel: Präzisionsmessungen der elektroschwachen Wechselwirkung; Higgs-Suchen, Suchen nach Neuer Physik ...
- LEP-Tunnel dient heute als LHC-Tunnel



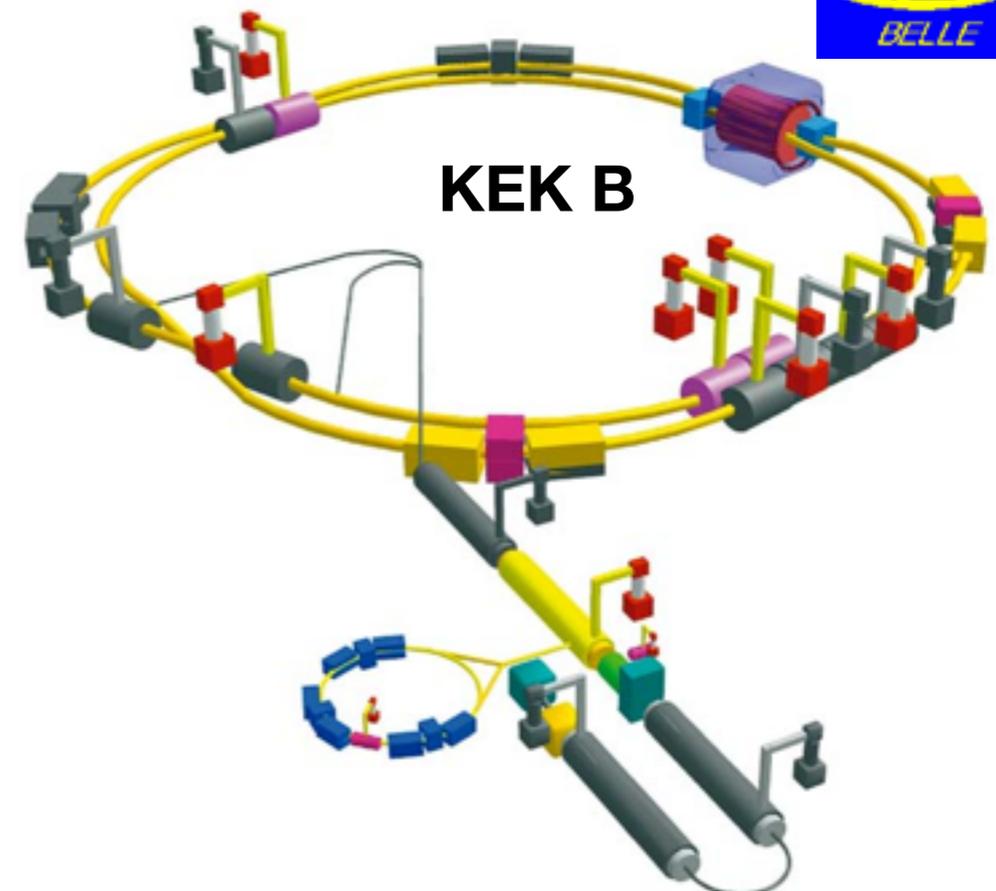
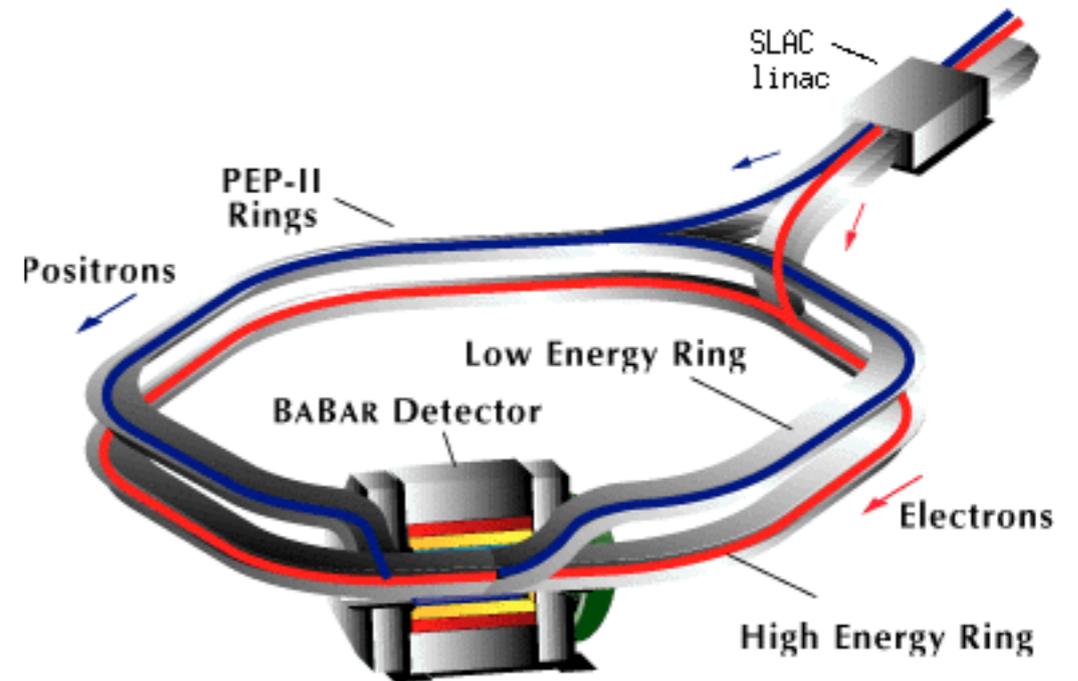
SLAC - Linear Collider



- e^+e^- Linearbeschleuniger (3.2 km)
- $\sqrt{s} \sim 91 \text{ GeV} (\approx M_Z)$
- Physik: Präzisionsmessungen an der Z-Resonanz
- Datennahme: 1992 bis 1998
- Besonderheit: Kollision polarisierter Elektronen und Positronen
- Ein Detektor: **SLAC Large Detector**

KEKB / PEP-II

- e^+e^- Speicherring
- $\sqrt{s} = 10.6 \text{ GeV}$
 - $\approx Y(4s)$ -Resonanz (aber auch andere Resonanzen)
 - Ziel: Produktion und Untersuchung von B-Hadronen
- PEP-II (SLAC)
 - 1999 bis 2008
 - 9.0 GeV (e^-) und 3.1 GeV (e^+)
→ Asymmetrischer Detektor (BaBar)
- KEKB (Japan)
 - 1998 bis 2009
 - 8.0 GeV (e^-) und 3.5 GeV (e^+)
→ Asymmetrischer Detektor (BELLE)
- Beide Beschleuniger und Detektoren werden derzeit für noch höher Luminositäten optimiert

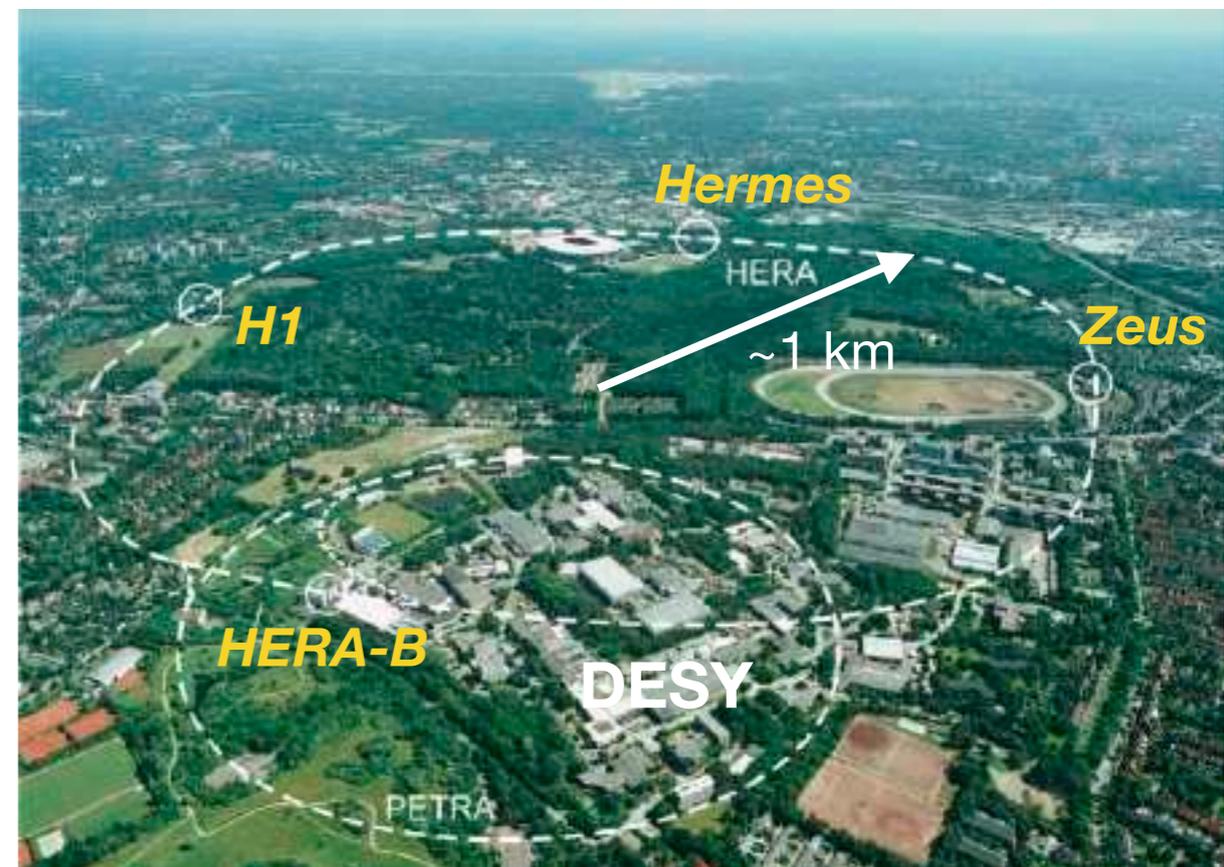




HERA



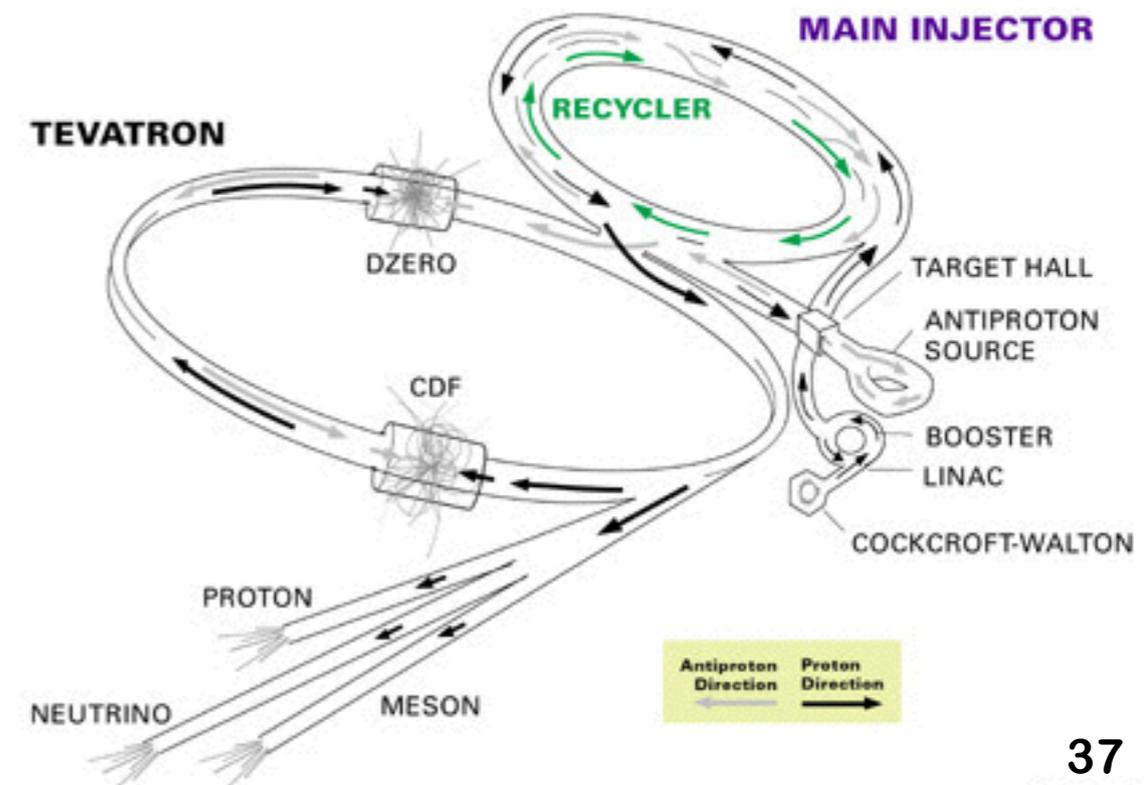
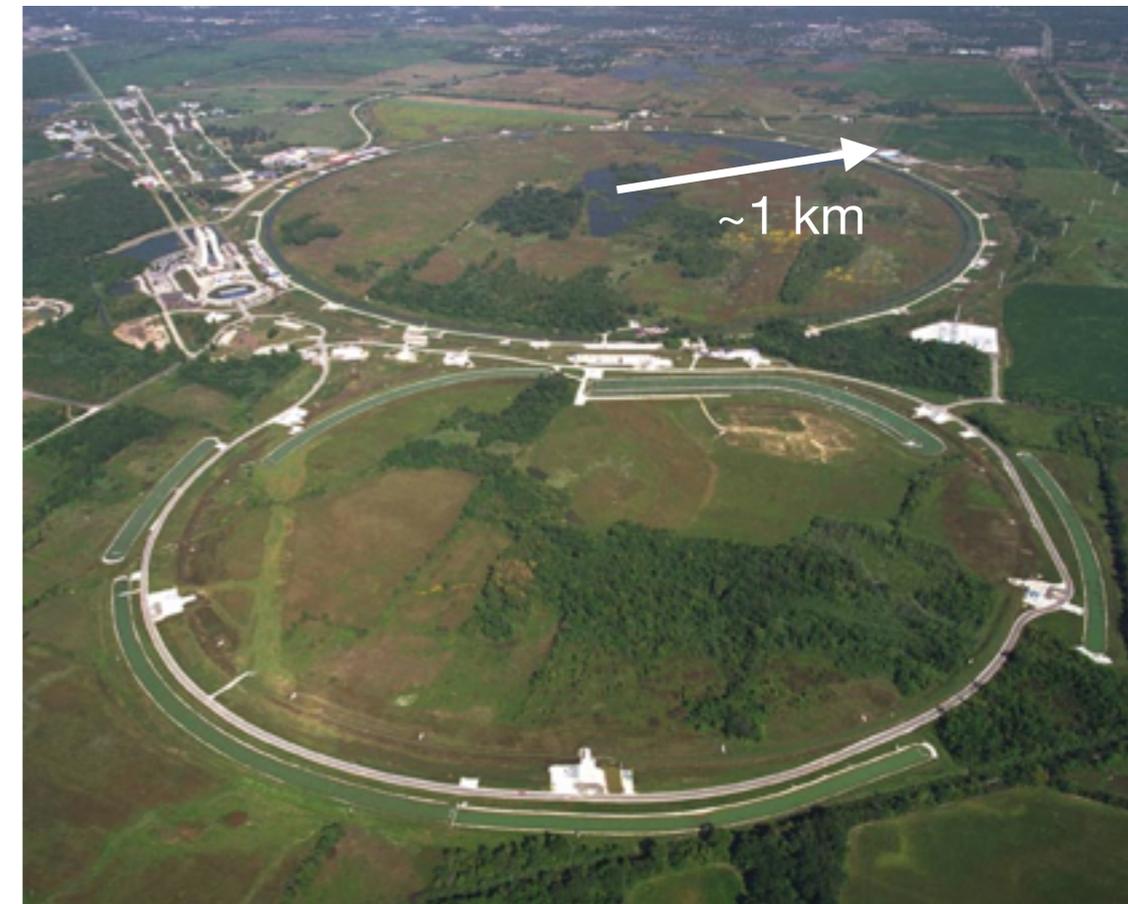
- $e^\pm p$ Speicherringe (2 Strahlröhren)
- $\sqrt{s} = 314 \text{ GeV}$
 - 27 GeV (e^\pm) und 900 GeV (p)
 - Supraleitende Dipol-Magneten im p -Ring (B -Feld der Dipole limitiert die Protonenenergie)
 - Physik-Ziele: Messung der Strukturfunktion des Protons; tief-inelastische Streuung; Suche nach Neuer Physik
 - Laufzeit: 1991 bis 2007
- 4 Detektoren:
 - H1
 - ZEUS
 - (HERMES)
 - (HERA-B)
- Vorbeschleuniger: u. a. PETRA





Tevatron

- $p\bar{p}$ -Speicherring
- \sqrt{s} bis zu 1.96 TeV (512 - 980 GeV Strahlenergie im Laufe der Jahre)
- Datennahme: 1983 bis 2011
- Vorbeschleuniger: "Recycler" mit ~ 150 GeV
- Physik-Ziele:
 - Top-Quark (Entdeckung 1995)
 - Higgs-Suchen
 - Suche nach Neuer Physik
 - ...
- 2 Detektoren: CDF und DZERO



pp -Speicherring; $\sqrt{s} = 14$ TeV (Design)

- 2010 & 2011: $\sqrt{s} = 14$ TeV; 2012: $\sqrt{s} = 8$ TeV; Laufzeit bei 13/14 TeV bis ~2035

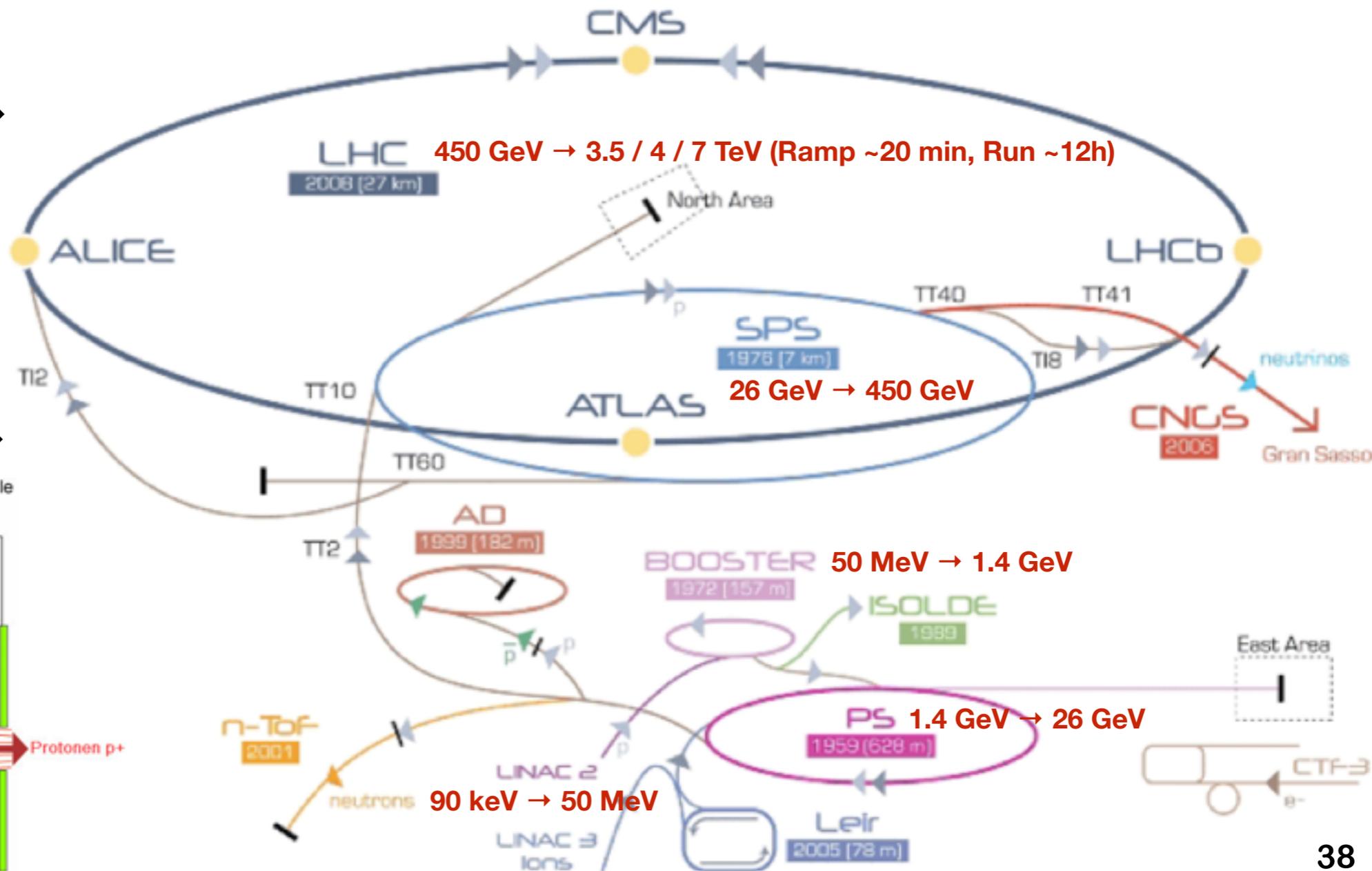
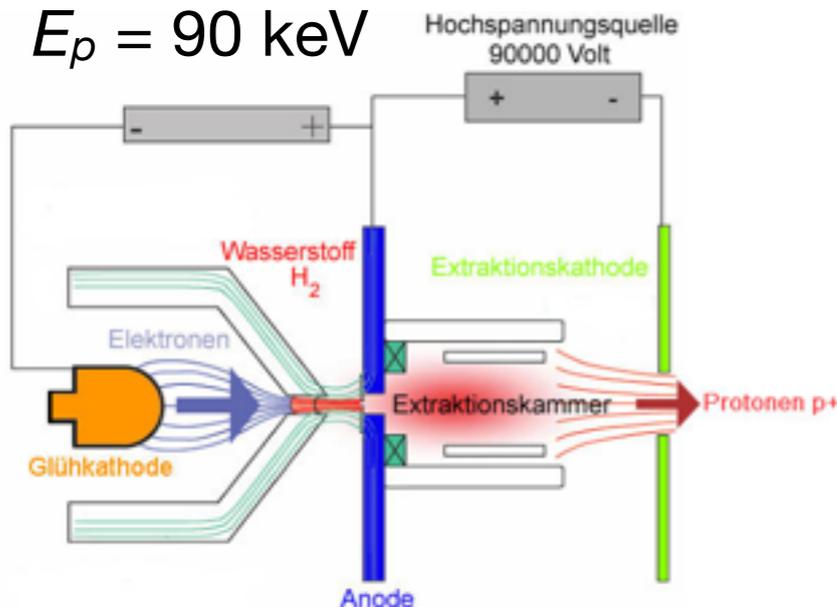
Vier große Experimente: ATLAS, CMS, LHCb und ALICE

Protonenquelle:

e^- aus Glühkathode \rightarrow
Beschleunigung

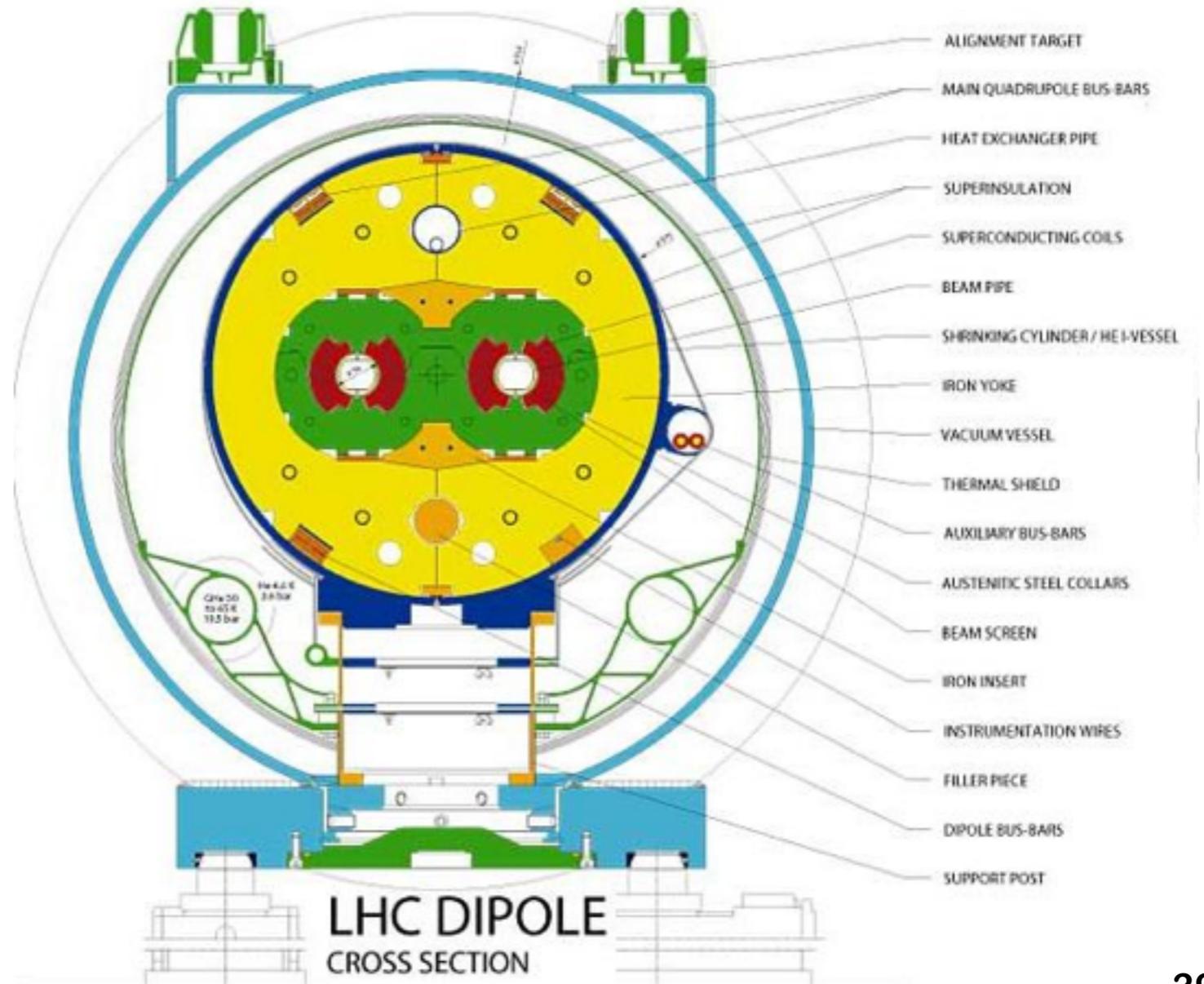
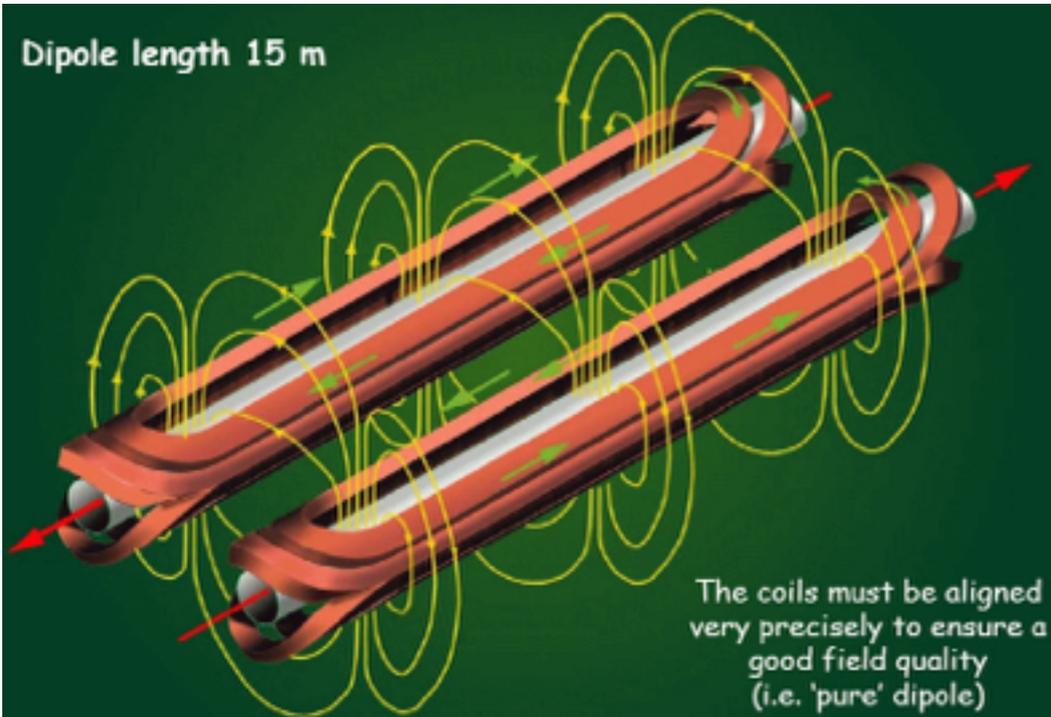
Kollidieren mit $H_2 \rightarrow$
Ionisation $\rightarrow p$

Absaugen mit
Extraktionskathode \rightarrow
 $E_p = 90$ keV





LHC



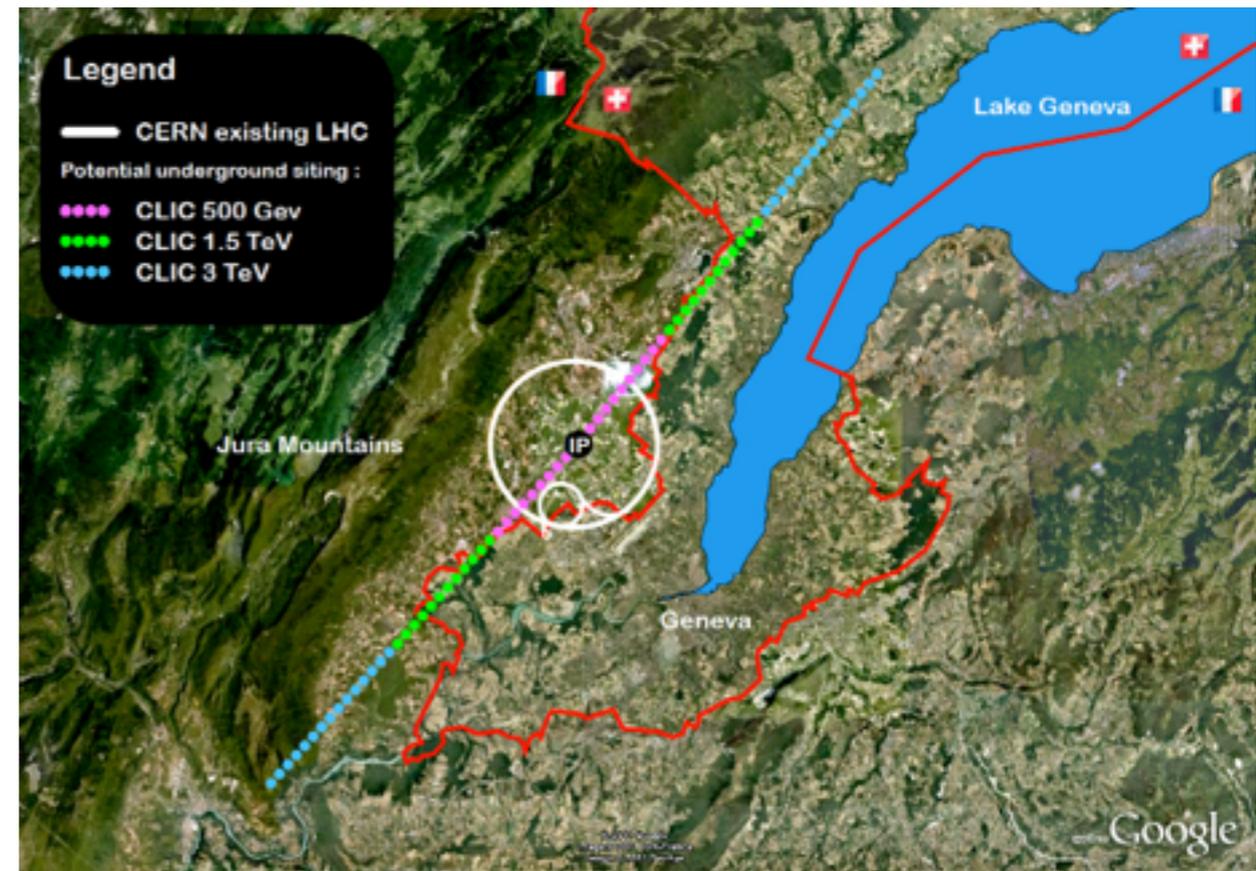


Überblick: Beschleuniger

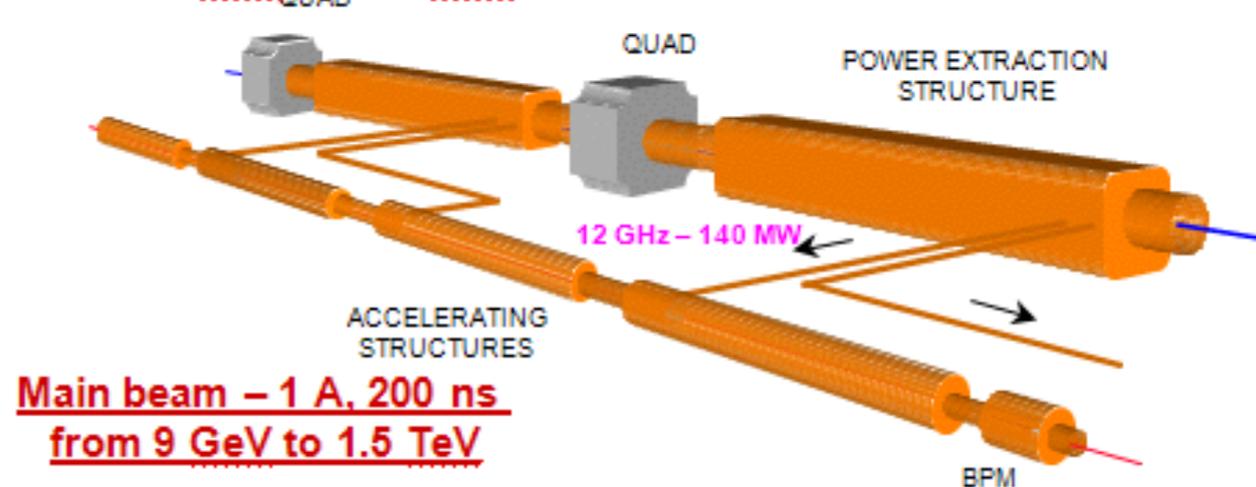
	Energie [GeV]	\sqrt{s} [GeV]	Datennahme	L [10	L	Laboratory
LEP	e-e+: bis 104 × 104	bis 208	1992 bis 2000	~100	~160 (4 Exp.)	CERN
SLAC	e-e+: 45 × 45	~91	1992 bis 1998	~30	~20	SLAC
PEP II	e-e+: 9.0 × 3.1	~10.6	1999 bis 2008	~12000	~450000	SLAC
KEK-B	e-e+: 8.0 × 3.5	~10.6	1998 bis 2009	~17000	~1040000	KEK
HERA	ep: 27 × 900	~320	1991 bis 2007	~50	~600 (2-4 Exp.)	DESY
Tevatron	p-anti-p: 980 × 980	~1960	1983 bis 2011	~200	~10000 (2 Exp.)	Fermilab
LHC	pp: 3500 × 3500 4000 × 4000 6500 × 6500	~7000 ~8000 ~13000	2010 bis 2011 2012 ab 2015	~5000 ~8000 ~20000	10000 (2-4 Exp.) 40000 (2-4 Exp.) —	CERN
ILC	e-e+: 500 × 500	1000	2026 (?)	~20000	—	?

Compact Linear Collider Study

- e^+e^- Linearbeschleuniger
- neuartiges Beschleuniger-Konzept
- Limitierung von supraleitenden Kavitäten: 60 MV/m
- Kavitäten bei Raumtemperatur erlauben höhere Gradient (obwohl weniger Leistungseffizient)
- Keine konventionelle RF-Quelle (12 GHz) kann Leistung für CLIC bereitstellen
- Hochstrom-Niederenergie „Drivebeam“ (DB)
- DB arbeitet als RF-Quelle um Niederstrom-Hochenergie Hauptstrahl zu beschleunigen → „Energietransformator“
- Hauptstrahl bis 1.5 TeV → $\sqrt{s} = 3$ TeV (~50 km)
- Zeitskala: nicht vor 2035 (???)



Drive beam - 95 A, 300 ns
from 2.4 GeV to 240 MeV



Main beam - 1 A, 200 ns
from 9 GeV to 1.5 TeV

LEP3:

- Motiviert durch $m_h = 126 \text{ GeV} \rightarrow e^+ e^-$ Collider im LHC-Tunnel
- Assoziierte Higgs-Produktion: $Z + h$

DLEP (double LEP):

- Neuer Tunnel mit doppeltem LHC-Radius
- geringere Synchrotron-Verluste

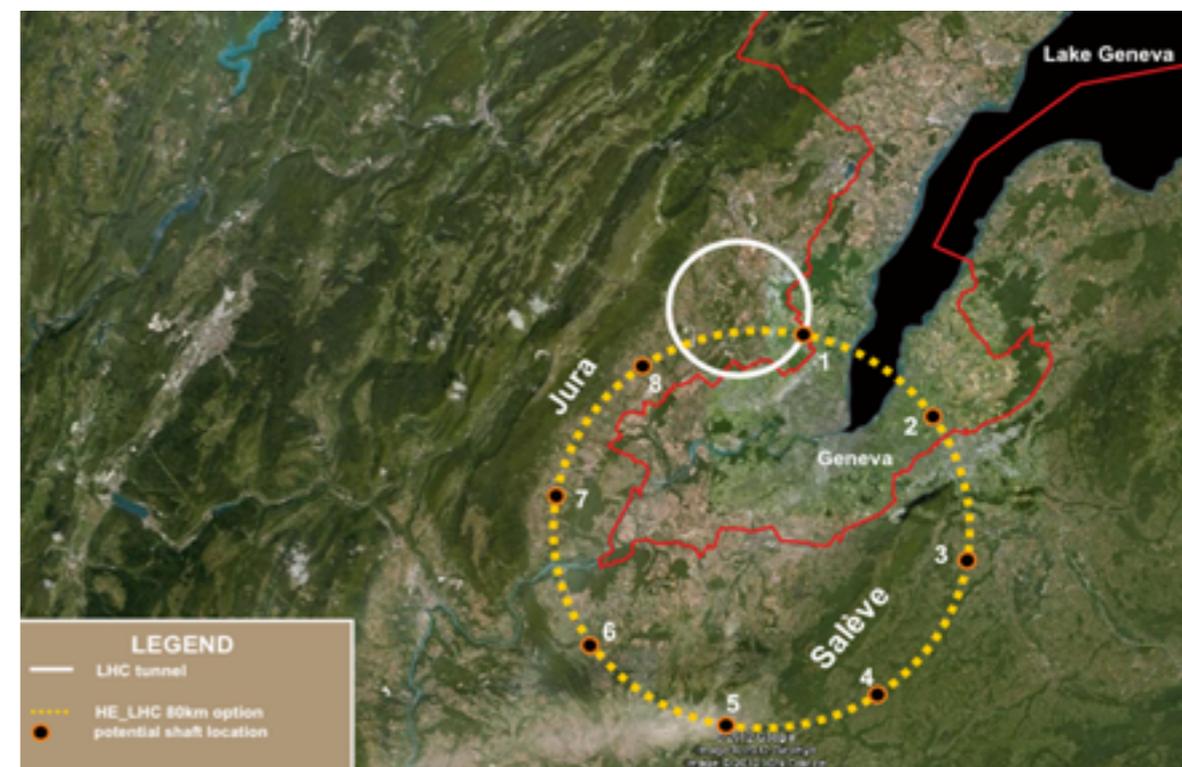
TLEP (triple LEP):

- Neuer Tunnel mit dreifachem LHC-Radius
- noch geringere Synchrotron-Verluste
- \sqrt{s} bis 350 GeV (Top-Anti-Top-Schwelle)

Vorteil Ring- vs. Linearbeschleunigers:

- Mehrere Wechselwirkungs-Punkte
- Höhere L_{int} wegen Wiederverwendung der Strahlen
- Tunnel könnte $\sim 100 \text{ TeV } pp$ -Beschleuniger Platz bieten
- Zeitskala: nicht vor 2035 (???)

	LEP2	LEP3	DLEP	TLEP
\sqrt{s} [GeV]	209	240	240	350
Circumference [km]	26.7	26.7	53.4	80
Beam current [mA]	4	7.2	14.4	5.4
#Bunches/beam	4	4	60	12
#e/beam [10]	2.3	4.0	16.0	9.0
SR power/beam [MW]	11	50	50	50
Inst. Lumi [10]	1.25	107	144	65
#Interaction Points	4	2	2	2



Zusammenfassung

Kosmische Höhenstrahlung

- Entdeckt von V. Hess (1912)
- Direkte und indirekte Messung des Spektrums
 - Starker Abfall bis hin zu $E = 10^{20}$ eV
 - Knie, Knöchel, GRZ-Cutoff

Beschleunigung geladener Teilchen mit E -Feldern

- Elektrostatische Beschleuniger (Van-de-Graaff, Tandem)
 - Begrenzt durch Spannungs-Überschläge
- HF-Wechselspannung in Driftröhren
 - Mehrmalige Nutzung der Spannung U
- Höchste Energien durch longitudinale E -Felder in Wellenleitern
 - Stehende Wellen in Hohlraumresonatoren, Kavitäten

Kreisbeschleuniger nutzen Beschleunigungsstrecke mehrmals

- Zyklotron: festes B -Feld, Umlaufzeit unabhängig von Radius, Zyklotronfrequenz für nicht-rel. Teilchen.
- Synchrotron: B -Feld nur auf Soll-Umlaufbahn (z. B. Vakuumröhre), synchrones Hochfahren des B -Feldes mit der Energie nötig
- Speicherringe: Synchrotrone, die Teilchen bei konstanter Energie über Stunden speichern.
 - Beispiele: LEP, Tevatron, HERA, LHC (läuft gerade)

