

BESCHLEUNIGER:

Mikroskope der Quantenwelt

Thomas Hebbeker
Humboldt-Universität Berlin

Urania 04.04.2000

ÜBERSICHT

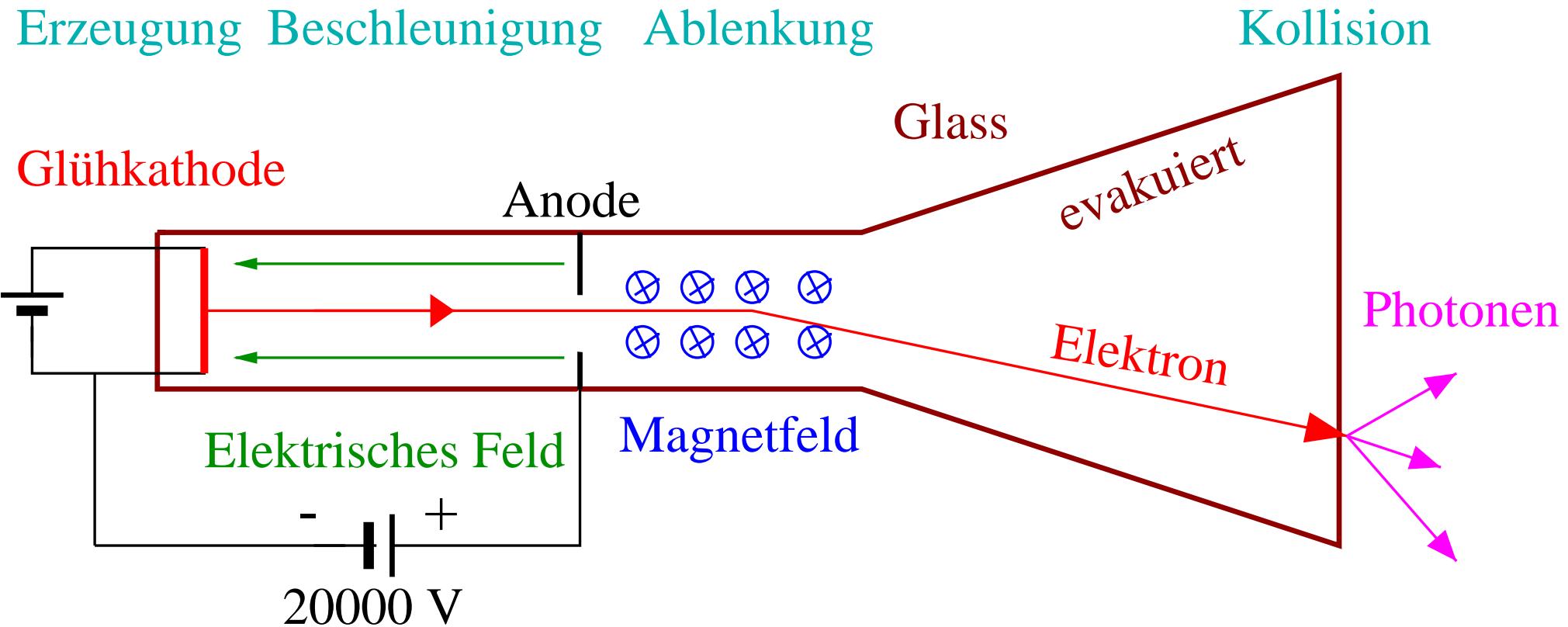
- **Was** macht ein Teilchenbeschleuniger ?
- **Wozu** benutzt man Beschleuniger ?
- **Wie** funktionieren Beschleuniger ?
- **Wie** weist man die Teilchen nach ?



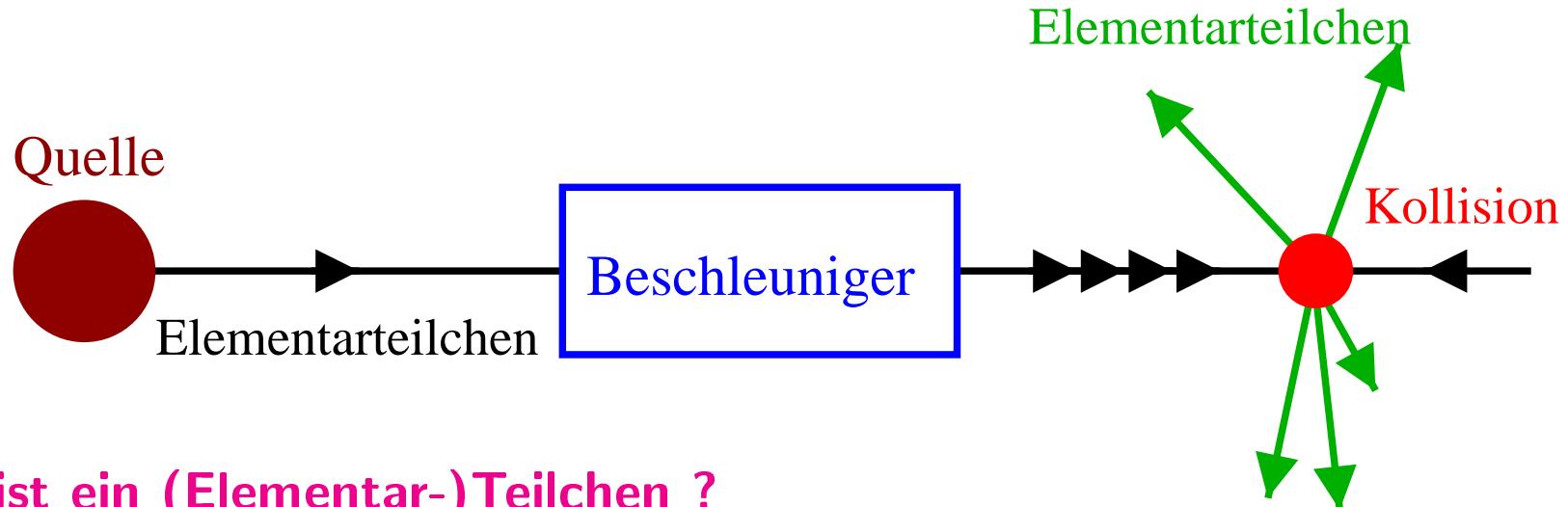
- Die Beschleunigerzentren **CERN** und **DESY**



Fernsehapparat = Teilchenbeschleuniger



Was macht ein Teilchenbeschleuniger ?



1) Was ist ein (Elementar-)Teilchen ?

Neutrino ν , Proton p , Elektron e^- , Quark q , Photon $\gamma \dots$
Antineutrino $\bar{\nu}$, Antiproton \bar{p} , Positron e^+ , Antiquark \bar{q} , Photon $\gamma \dots$

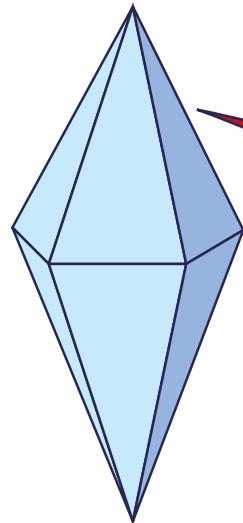
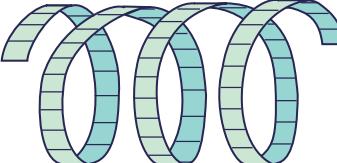
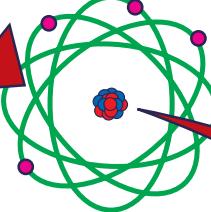
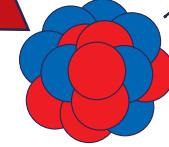
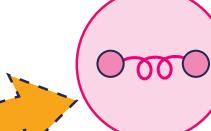
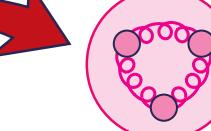
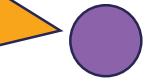
Beschleunigt werden können geladene stabile Teilchen:

Proton p , Elektron e^- , Antiproton \bar{p} , Positron e^+ , schwere Kerne

2) Man wiederholt das Experiment sehr häufig! Warum?

Quantentheorie! Selbst bei gleichen Anfangsbedingungen ist der Endzustand immer ein anderer ...

→ Wahrscheinlichkeitsverteilungen

| Kristall Molekuel | Atom | Atom- Kern | Elementar- teilchen | |
|---|---|--|--|---|
|   |  |  Kerne |  Hadronen  Mesonen  Baryonen  Proton Neutron |  Leptonen $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ punktoerig  Quarks u, c, d, s, b, t |

1 cm

10^{-8} cm

10^{-12} cm

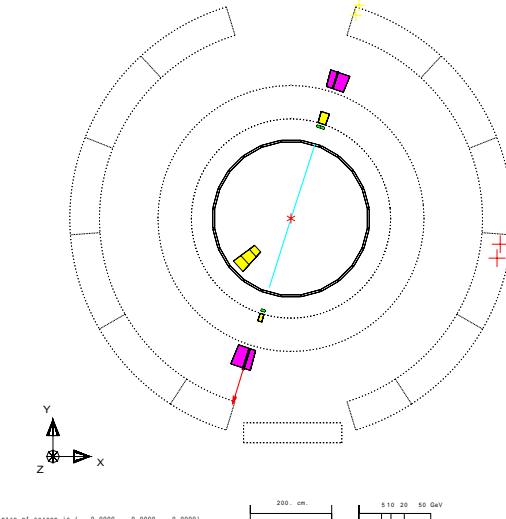
10^{-13} cm

?

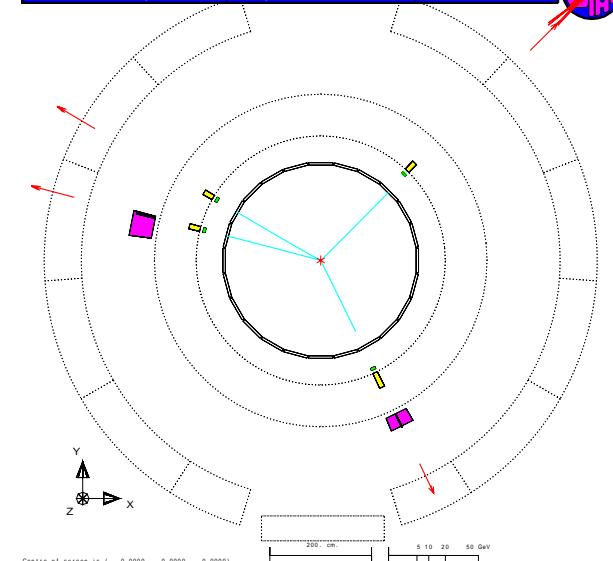
(Woher wissen wir dies ? aus Beschleunigerexperimenten . . .)

LEP: $e^+e^- \rightarrow \dots$

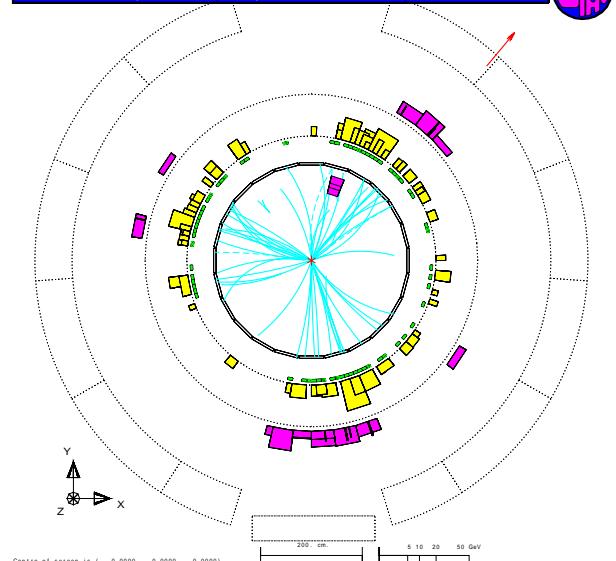
Run.event 4093 - 1042 Date 930327 Time 20214 Circ(N= 2) Ecal(N= 8 SumE= 0.0) Hcal(N= 4 SumE= 1.9)
 Ebeam 45 858 Evis 101 0 Emis - 0.00 0.00 0.36 Muon(N= 3) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
 Blt=4 350 Thrust=0 9945 Apidity=0.0000 Chit=0 0.004 Spher=0.0015



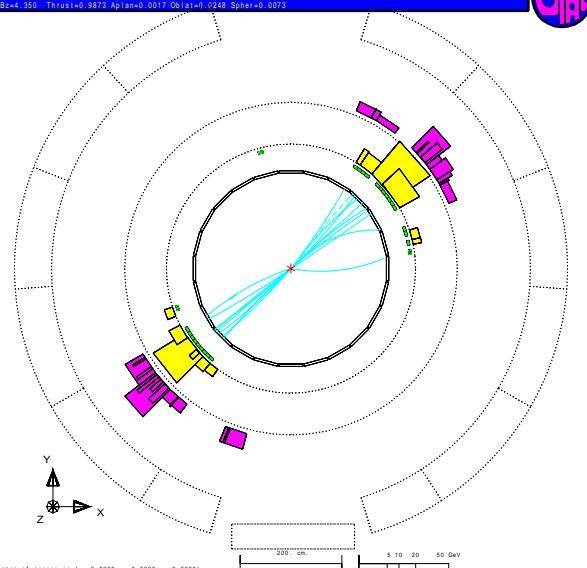
Run.event 2523 - 7984 Date 930308 Time 10055 Circ(N= 4) Ecal(N= 6 SumE= 4.0) Hcal(N= 4 SumE= 1.9)
 Ebeam 45 853 Evis 86 2 Emis - 0.03 0.00 0.44 Muon(N= 11) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
 Blt=4 350 Thrust=0 9343 Apidity=0.0009 Chit=0 2971 Spher=0.3148



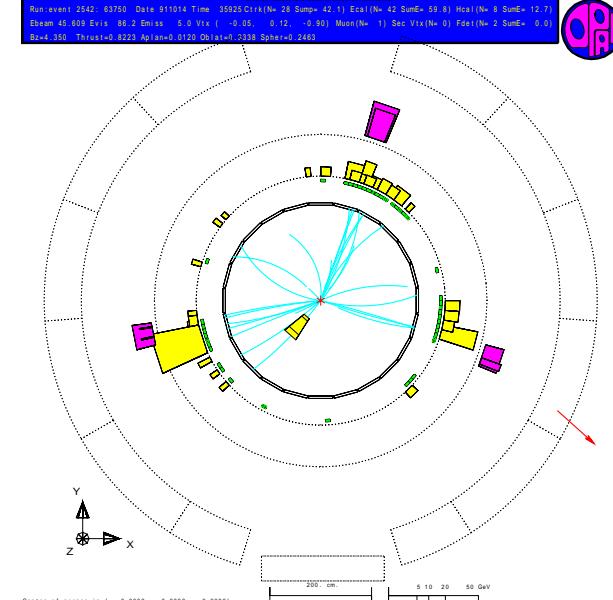
Run.event 1922 - 53888 Date 930308 Time 104223 Circ(N= 7) Ecal(N= 76 SumE= 65.1) Hcal(N=23 SumE= 11.9)
 Ebeam 45 137 Evis 104 4 Emis - 0.03 0.18 -0.49 Muon(N= 1) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
 Blt=4 350 Thrust=0 7387 Apidity=0.0017 Chit=0 2896 Spher=0.4732



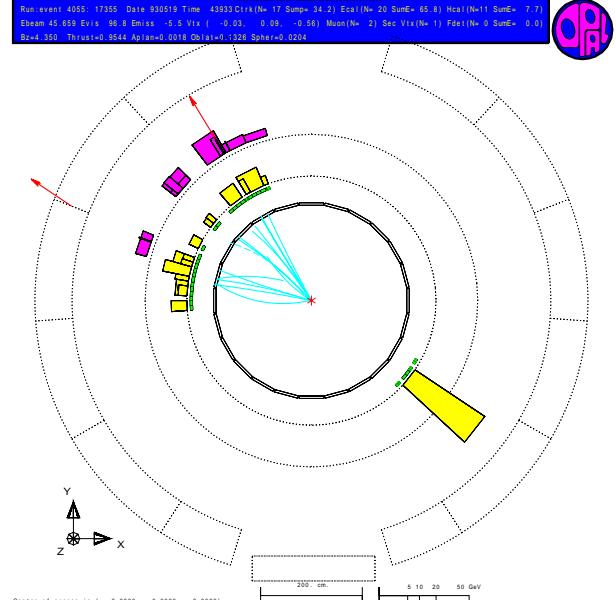
Run.event 4093 - 1000 Date 930327 Time 20716 Circ(N= 38 SumE= 73.3) Ecal(N= 25 SumE= 32.6) Hcal(N=22 SumE= 22.7)
 Ebeam 45 858 Evis 99 8 Emis - 0.07 -0.08 -0.80 Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 3) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
 Blt=4 350 Thrust=0 8733 Apidity=0.0019 Chit=0 0.004 Spher=0.0073



Run.event 2542 - 83750 Date 931014 Time 3582 Circ(N= 28 SumE= 42.1) Ecal(N= 42 SumE= 39.8) Hcal(N= 8 SumE= 12.7)
 Ebeam 45 859 Evis 86 2 Emis - 0.05 0.12 -0.80 Muon(N= 1) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 2 SumE= 0.0)
 Blt=4 350 Thrust=0 8223 Apidity=0.0020 Chit=0 0.004 Spher=0.2483



Run.event 4055 - 77355 Date 930310 Time 49932 Circ(N= 17 SumE= 24.2) Ecal(N= 20 SumE= 18.8) Hcal(N=11 SumE= 7.7)
 Ebeam 45 859 Evis 96 8 Emis - 0.03 0.05 -0.56 Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 1) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
 Blt=4 350 Thrust=0 8514 Apidity=0.0018 Chit=0 0.004 Spher=0.3204



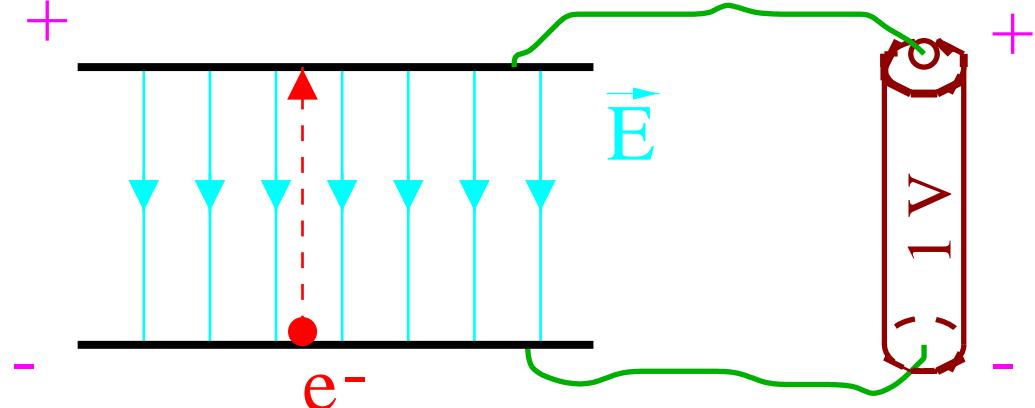
Energien und Massen

Energie-Einheit 'Elektronenvolt':

1 eV = kinetische Energie eines Elektrons e^- nach Durchfliegen einer Spannung von 1 Volt.

Meist benutzt man Giga-eV:

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} \approx 10^{-10} \text{ J}$$



Energie und Masse:

Einstiens Relativitätstheorie:

$$E = m \cdot c^2$$

$c = 300000 \text{ km/s} = \text{Lichtgeschwindigkeit}$

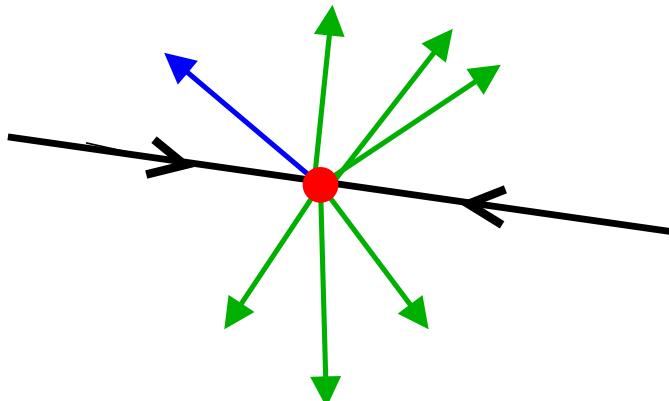
Energie kann in Masse verwandelt werden und umgekehrt!

Ruhendes Teilchen mit Masse m hat die Energie $E \rightarrow$ Masseneinheit = GeV/ c^2

Beispiel Proton: $m = 1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx 1 \text{ GeV}/c^2$

Wozu benutzt man Beschleuniger ?

1) Studium von Teilchen und Kräften bei hohen Energien



a) Hohe kinetische Energien entsprechen hohen Temperaturen: $T = \frac{1}{k} \cdot E$

→ Universum kurz nach dem ‘Big Bang’!

$$100 \text{ GeV} \leftrightarrow 10^{15} \text{ }^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 10^{-11} \text{ s}$$

b) Neue sehr schwere=massive Teilchen können erzeugt werden: $m = \frac{E}{c^2}$

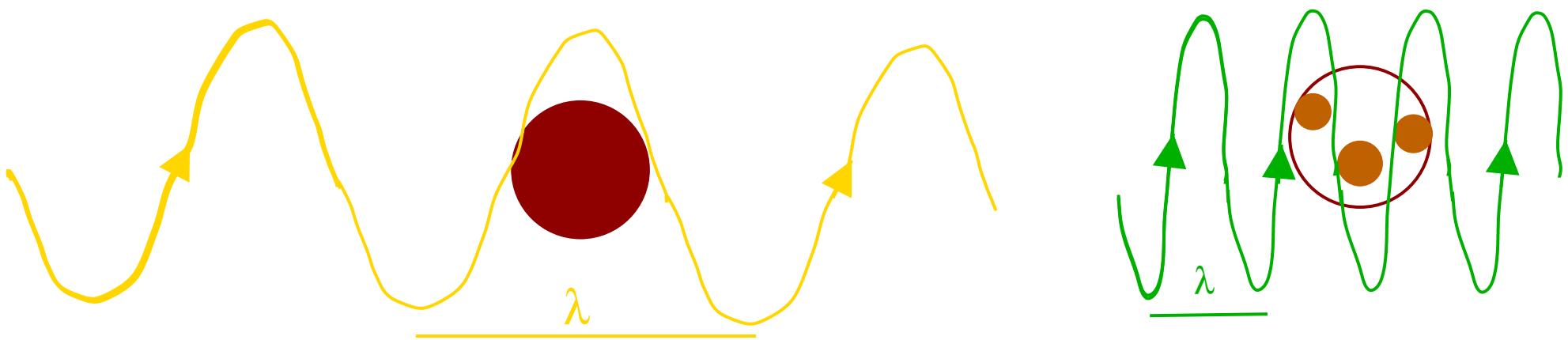
Schwerstes bisher gefundenes Teilchen:

$$\text{Top-Quark} \quad m(\text{Top}) = 175 \text{ GeV}/c^2 = 180 \cdot m(\text{Proton})$$

→ Bausteine und Kräfte der Natur ←

Wozu benutzt man Beschleuniger ?

2) Auflösung sehr kleiner Strukturen



Teilchen haben Welleneigenschaften!

Räumliche Auflösung = Wellenlänge

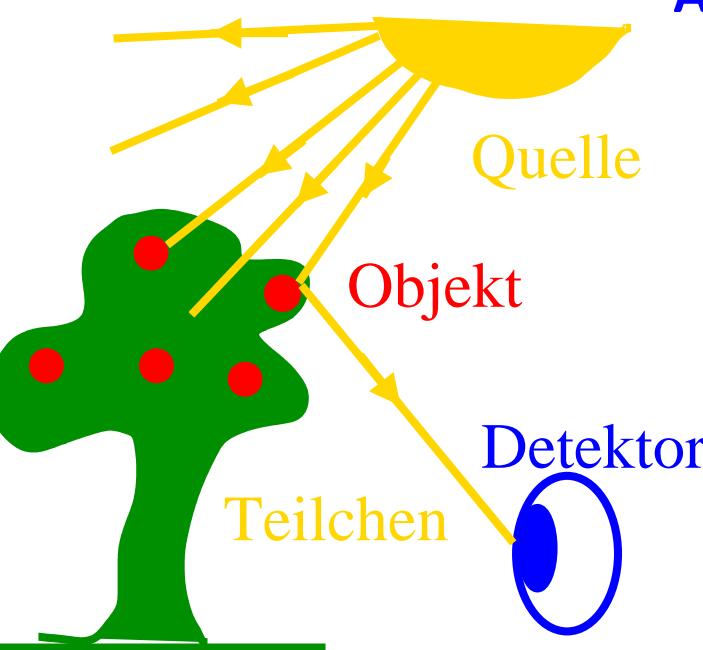
$$\lambda \approx h c \frac{1}{E}$$

Unschärferelation

Je kleiner die Strukturen, desto größer der Beschleuniger!

$$100 \text{ GeV} \rightarrow 10^{-18} \text{ m} = \frac{1}{1000} \text{ Protonendurchmesser}$$

→ Beschleuniger = Super-Mikroskop für Elementarteilchen ←



Auflösung kleiner Strukturen

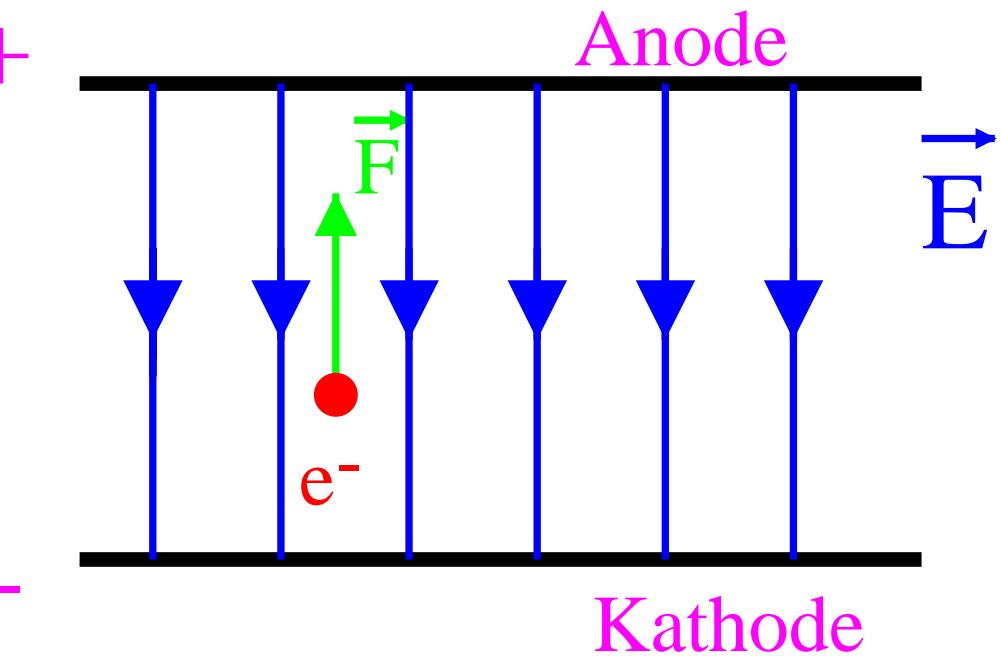
Prinzip: Streuung liefert Information über Objekt

Beispiele

| ‘Teilchen’ | Quelle | Detektor | Wellenlänge | Energie |
|---------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|-----------|
| Schallwellen | Fledermaus-Kehlkopf | Fledermaus-Ohr | 1 cm | |
| Photonen (Licht) | Sonne | Auge | $1 \mu\text{m}$ | 1 eV |
| Elektronen | Elektronen- | mikroskop | 10^{-12} m | 100000 eV |
| Elektronen | Teilchen- beschleuniger | Teilchen- detektor | 10^{-18} m | 100 GeV |

Wie beschleunigt man geladene Teilchen ?

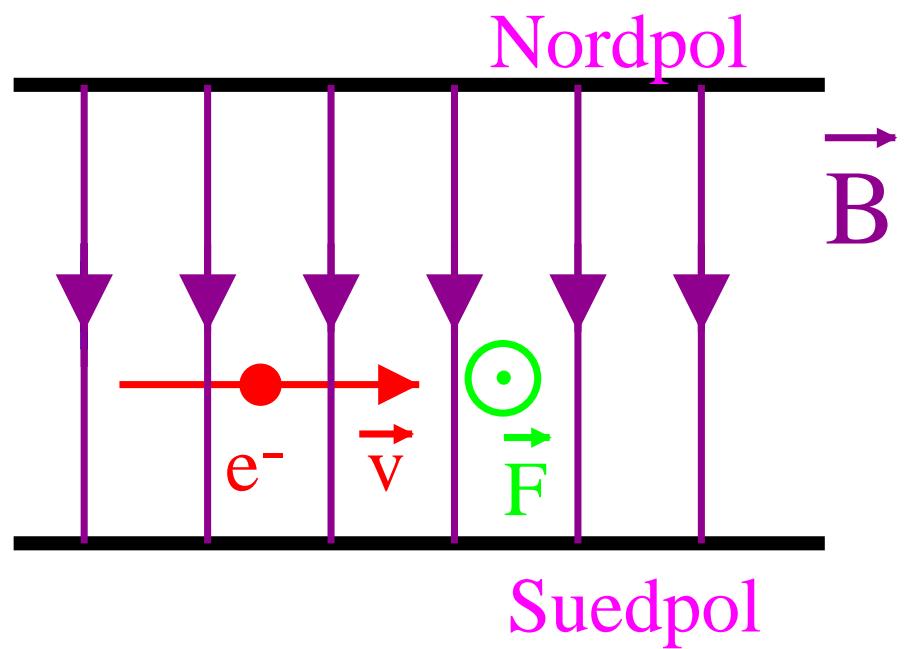
Elektrisches Feld



$$\text{Kraft } \vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

Kraft beschleunigt oder lenkt ab.

Magnetisches Feld



$$\text{Kraft } \vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

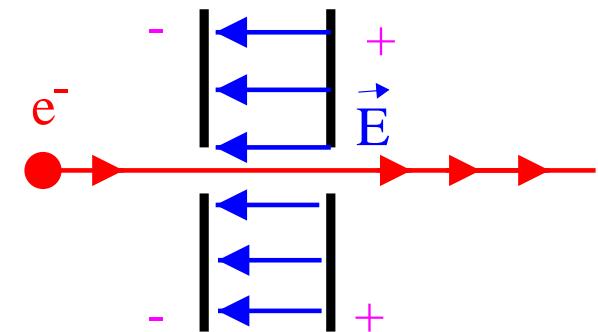
Kraft lenkt (stark) ab.

Wie funktionieren Teilchenbeschleuniger ?

Ziel: Beschleunigung auf hohe Energien ($> 100 \text{ GeV}$)

Prinzip: Durchlaufen eines elektrischen Feldes!

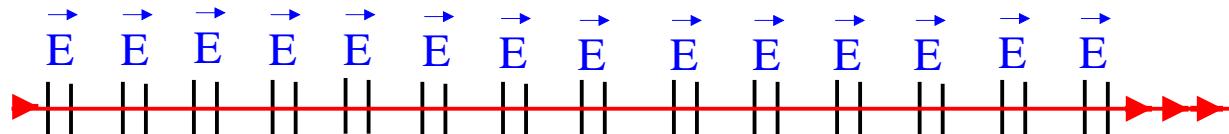
Aber: man benötigt $> 100\,000\,000\,000$ Volt !
funktioniert nicht: Funken, Durchschläge



Ausweg: häufiges Durchlaufen einer 'kleinen' Spannung ($< 10\,000\,000$ Volt/Meter).

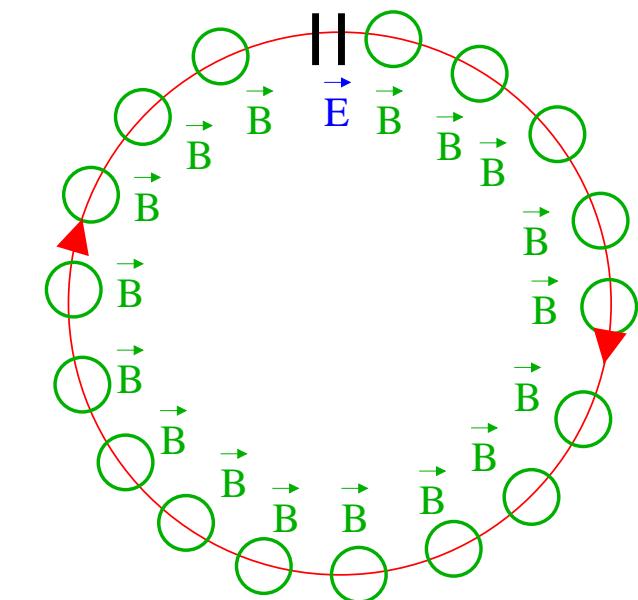
Optionen:

- **Linearbeschleuniger**



- **Kreisbeschleuniger**

→ starke Magnete zur Ablenkung



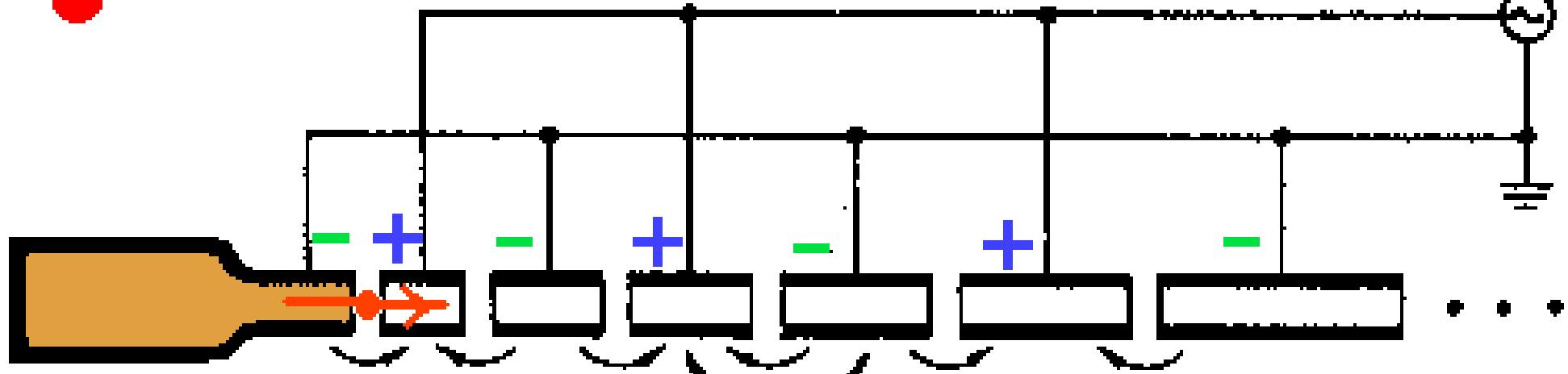
→ Hohe Energien erfordern (mehrere km) große Beschleuniger ! ←

Prinzip des Linearbeschleunigers

Elektron

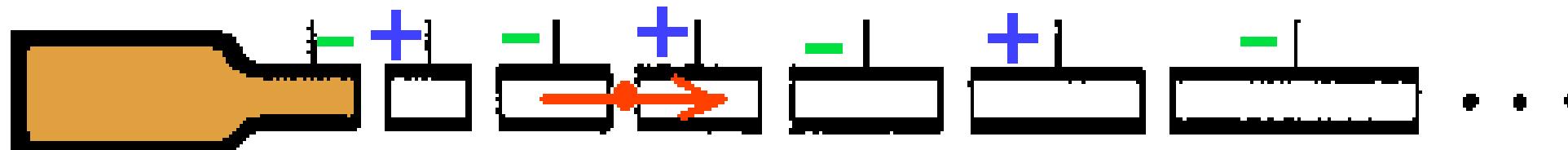
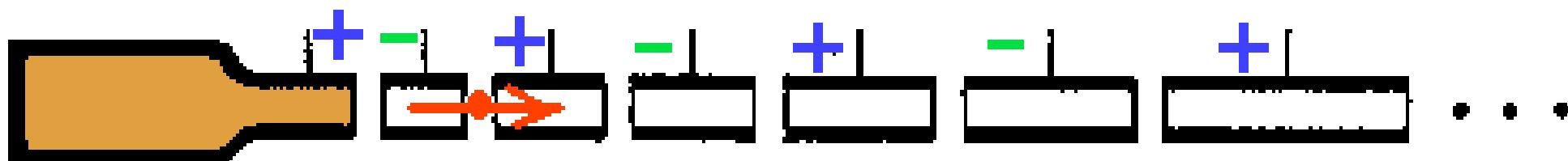


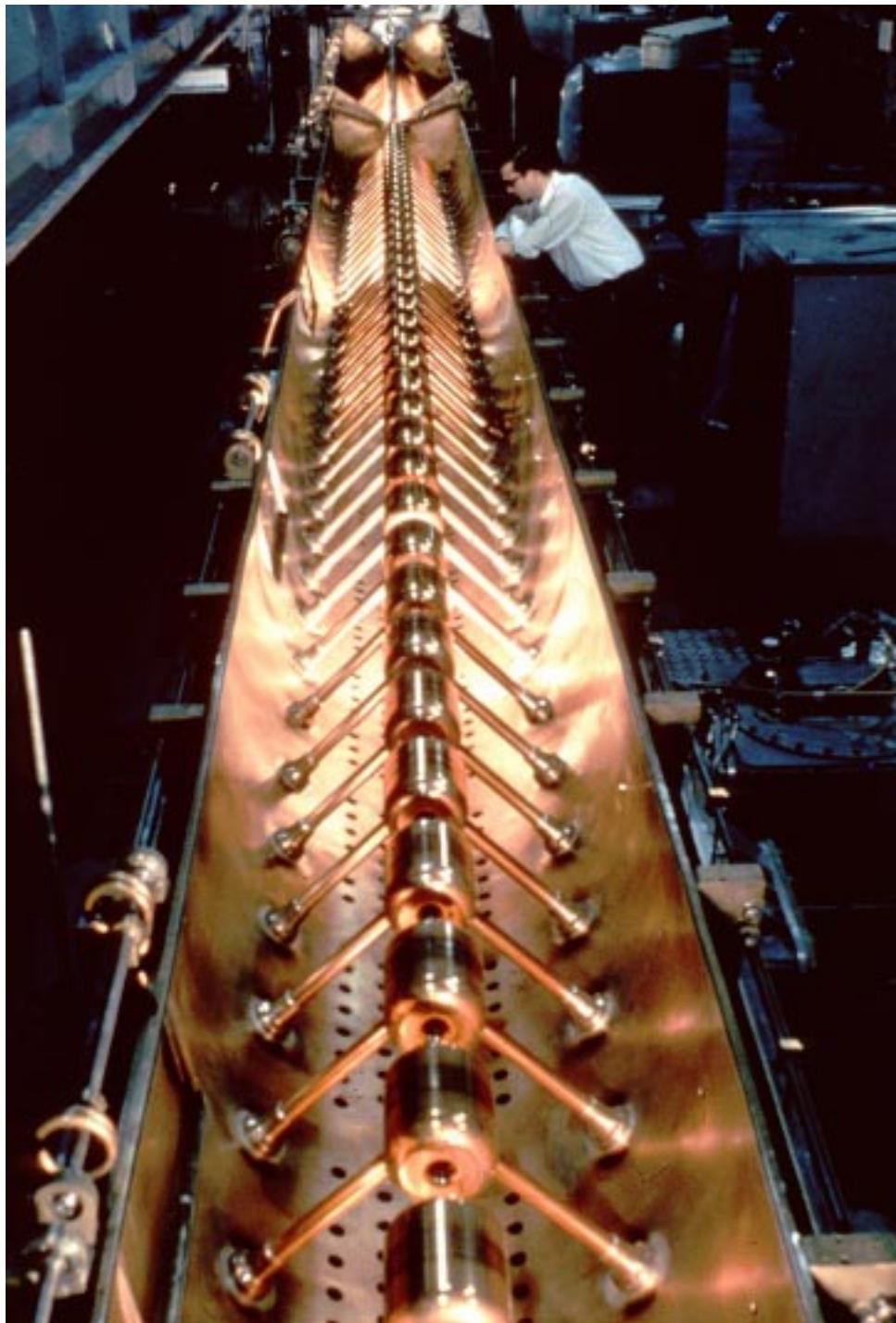
Wechselspannung



Teilchenquelle

Driftröhren

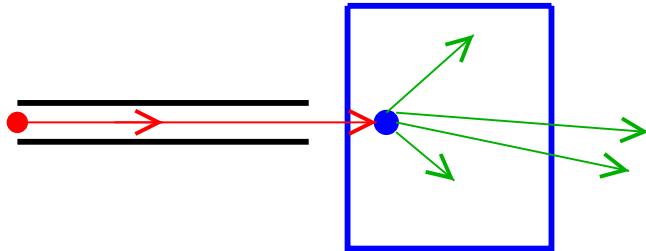




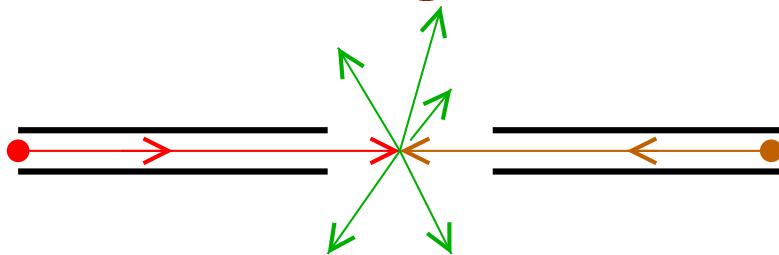
Teilchenkollisionen

Drei Möglichkeiten:

- Teilchen werden auf ruhende Materie geschossen



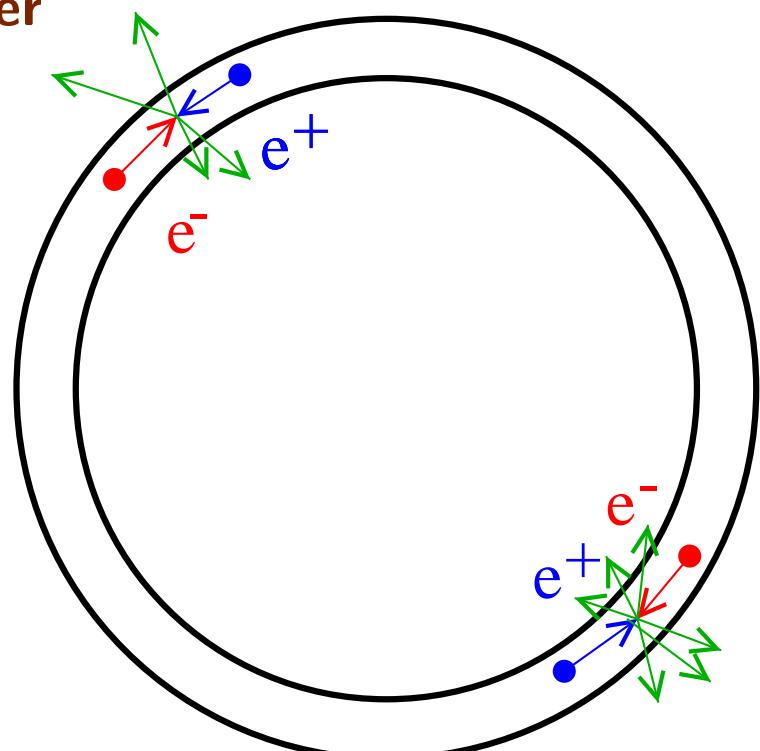
- Zwei Beschleuniger schießen Teilchen aufeinander



Hohe Kollisionsenergie!

- EIN Ring mit entgegenlaufenden Teilchen und Antiteilchen

Hohe Kollisionsenergie! Elegant!



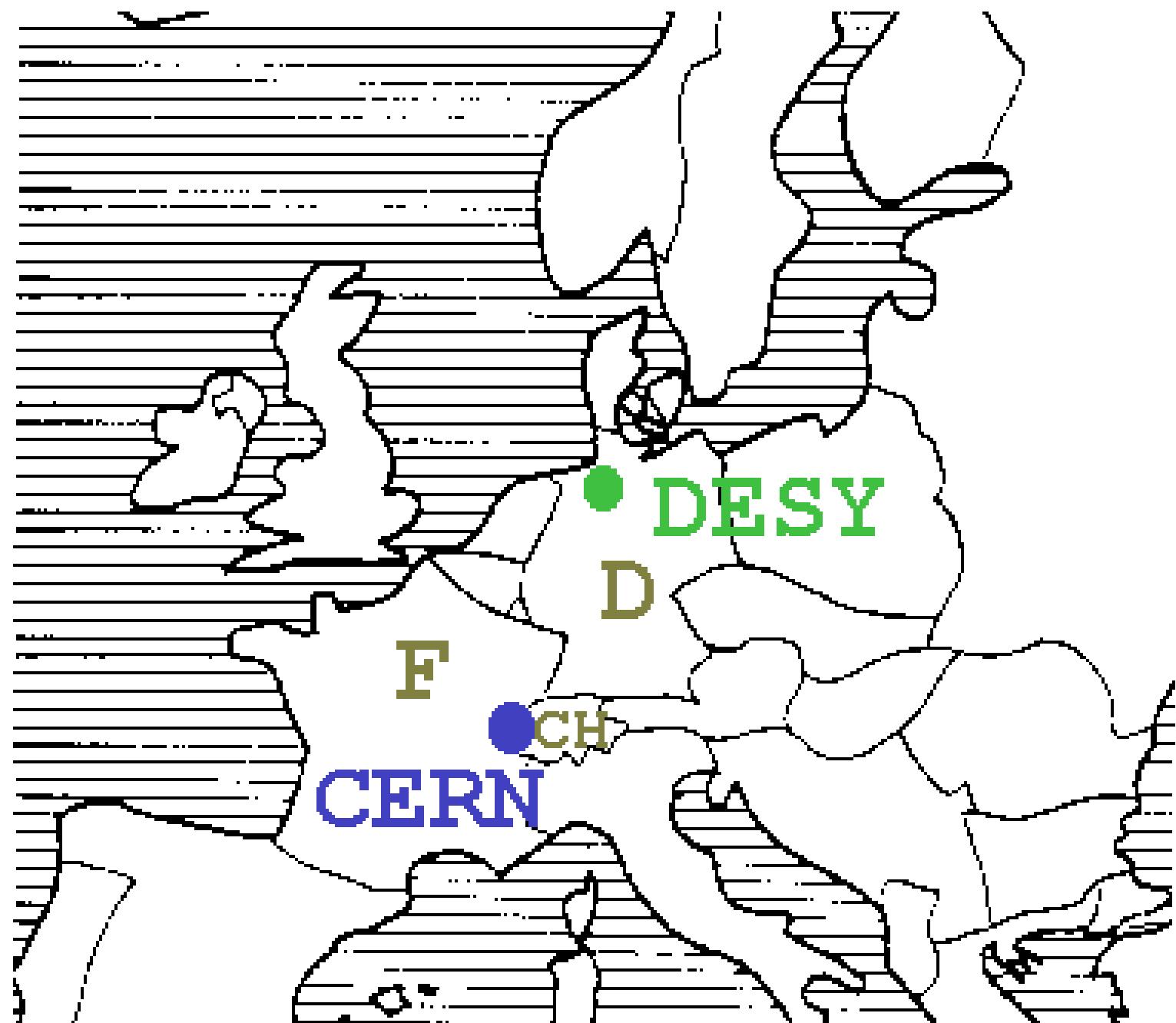
Große Teilchenbeschleuniger-Zentren in Europa

DESY (Hamburg)

=
'Deutsches
Elektronen-
SYnchrotron'

CERN (GENF)

=
'European
laboratory
for
particle physics'







Die größten Beschleuniger bei CERN und DESY

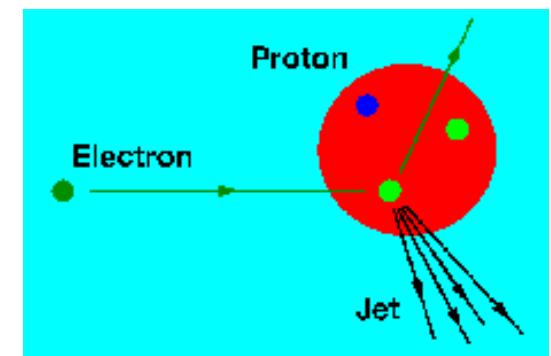
- **CERN** 6000 Physiker/innen

- **SPS = Super-Protonen-Synchrotron**
Protonen (+ Antiprotonen), 500 GeV
Entdeckung der Teilchen W und Z ...
 - **LEP = Large Electron Positron Collider**
Elektronen + Positronen, je 100 GeV
Präzisionsmessungen an Z und W ...
 - **IM BAU: LHC = Large Hadron Collider**
Protonen + Protonen, je 7000 GeV
Suche nach neuen Teilchen (Higgs, ...) ...



- **DESY** 3000 Physiker/innen

- **HERA = Hadron-Elektron-RingAnlage**
Protonen 900 GeV + Elektronen/Positronen 30 GeV
Struktur des Protons ...
 - **GEPLANT: TESLA =Tev-Energie Supraleitender LineArbeschleuniger**
Elektronen + Positronen, je 500 GeV
Präzisionsmessungen am Higgs ...



Wie baut man große Beschleuniger ?

Man benötigt:

- **Großen Tunnel !**
- **Teilchenquellen**
Proton, Elektron,
Antiproton, Positron
- **evakuiertes Strahlrohr**
damit Teilchen nicht mit
Luftmolekülen zusammenstoßen
- **Beschleunigungselemente**
- **Ablenk- und Fokussierungsmagnete**
Ablenkung: Kreisbahn, Injektion, Auslenkung ...
Fokussierung: Bündelung der Teilchenpakete
- **Überwachung und Steuerung**









LEP = Large Electron Positron collider

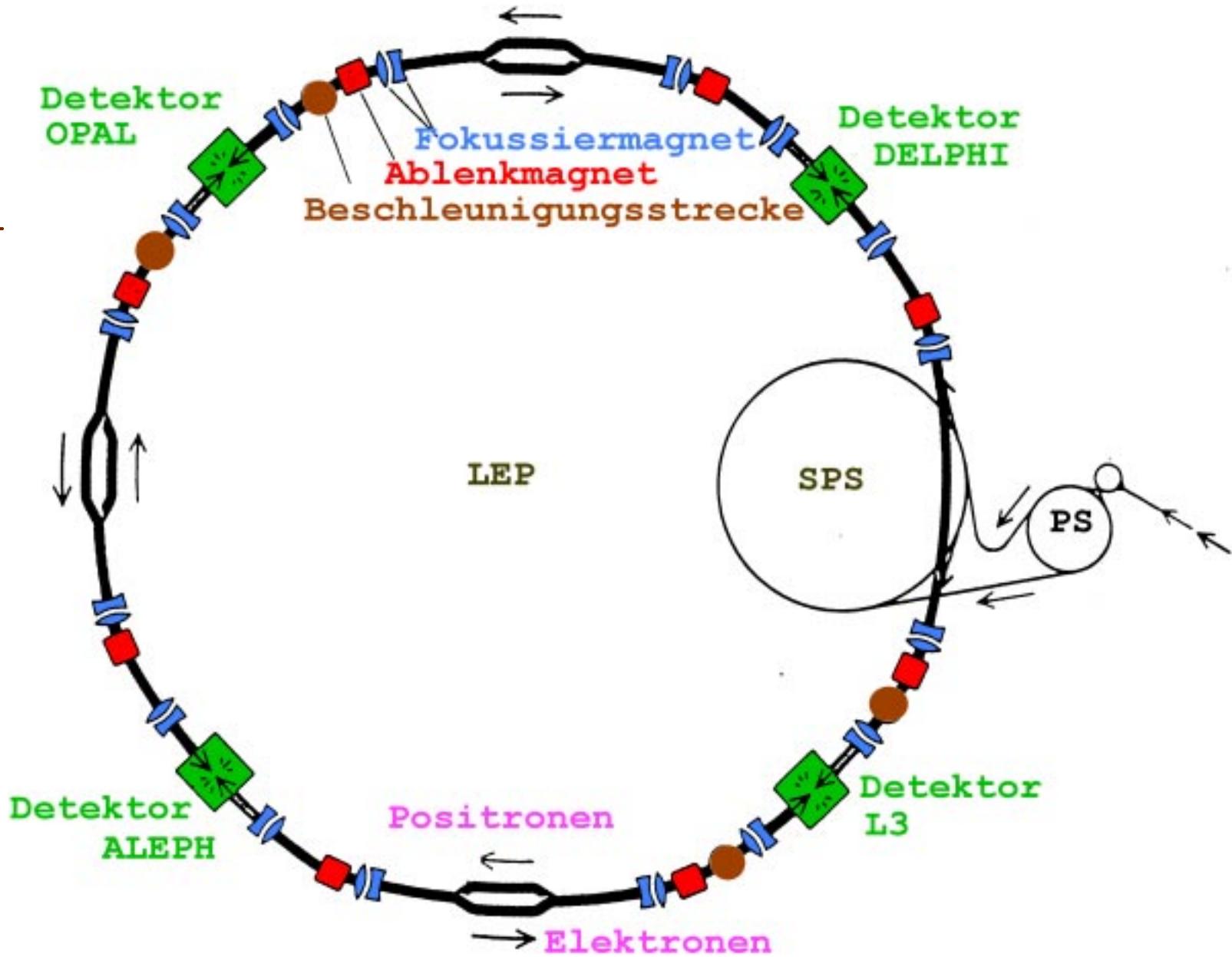
27 km Umfang

300 supraleitende Beschleunigungsstrecken

3000 Dipolmagnete von je 6 m Länge

800 Quadrupolmagnete

4 große Detektoren



Beschleuniger und Relativitätstheorie

Elektron mit $E_{kin} = 100 \text{ GeV}$:

‘Klassische’ Mechanik:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$v \approx 600 \cdot c$$

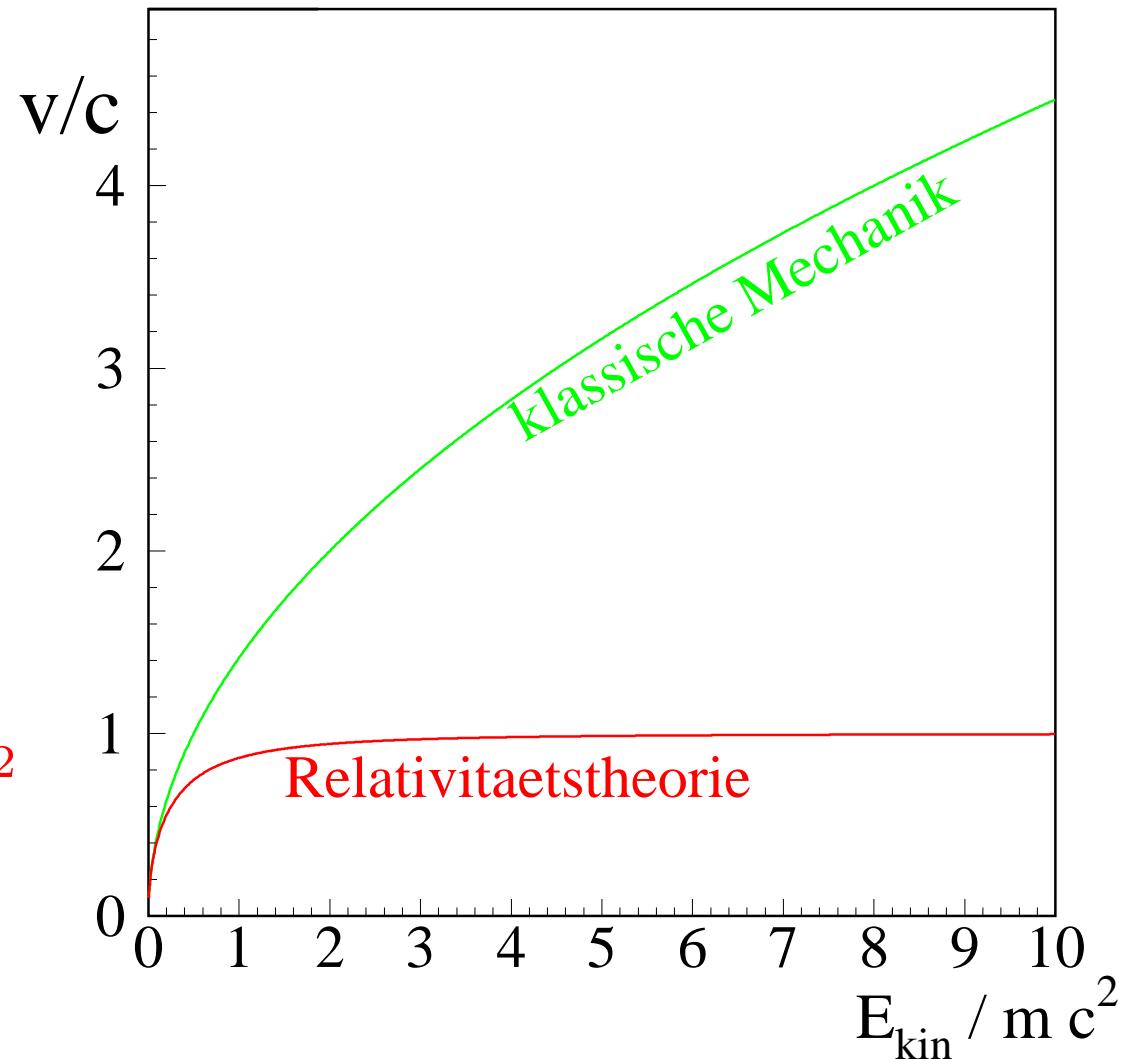
$$\approx 200 \text{ Millionen km/s}$$

Relativitätstheorie:

$$E_{kin} = \left(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right) \cdot m \cdot c^2$$

$$v \approx 0.99999999999 \cdot c$$

$$\approx 300 \text{ Tausend km/s}$$



→ Beschleuniger testen die Relativitätstheorie ←

Beschleunigt ein Beschleuniger ?

Elektronen in LEP:

1) Injektion: $E = 20 \text{ GeV}$

$$v = 299792457.902 \text{ m/s}$$

$\Delta t \approx 15 \text{ min}$ später:

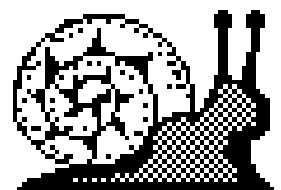
2) $E = 100 \text{ GeV}$

$$v = 299792457.996 \text{ m/s}$$

Beschleunigung:

$$a = 0.0001 \text{ m/s}^2$$

Fast null! (Auto: $\approx 3 \text{ m/s}^2$)



→ Es kommt auf die Energie an, nicht auf Geschwindigkeit/Beschleunigung! ←

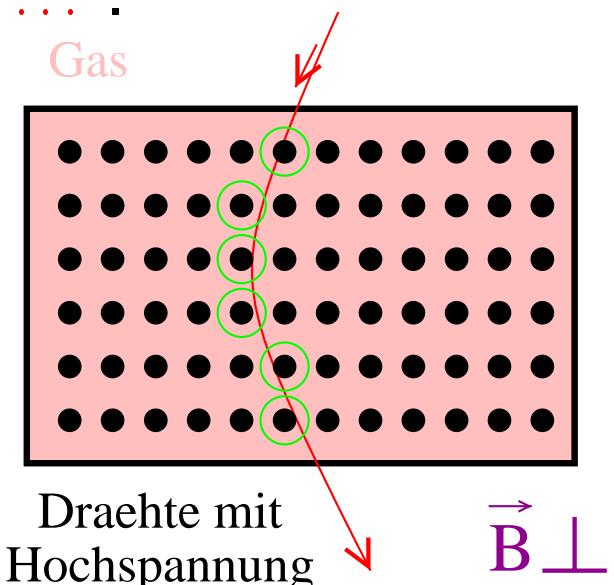
Teilchendetektoren

weisen die bei einer Kollision entstehenden Teilchen nach.

Gemessen werden **Energie/Impuls, Ladung, Flugrichtung** . . .

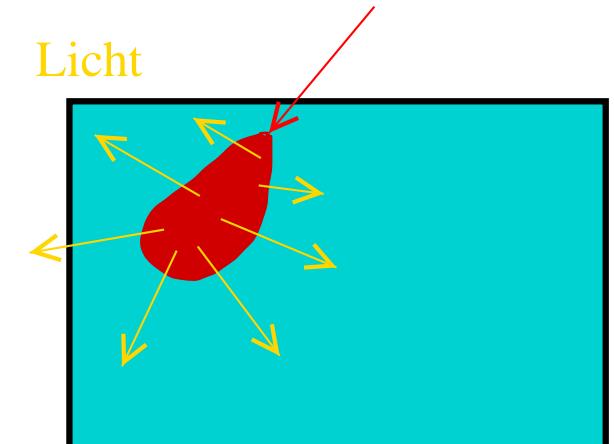
- **Spurdetektoren**

Geladene Teilchen werden im Magnetfeld abgelenkt und ionisieren Gas.
Elektrische Signale ermöglichen Spurrekonstruktion und Impulsmessung

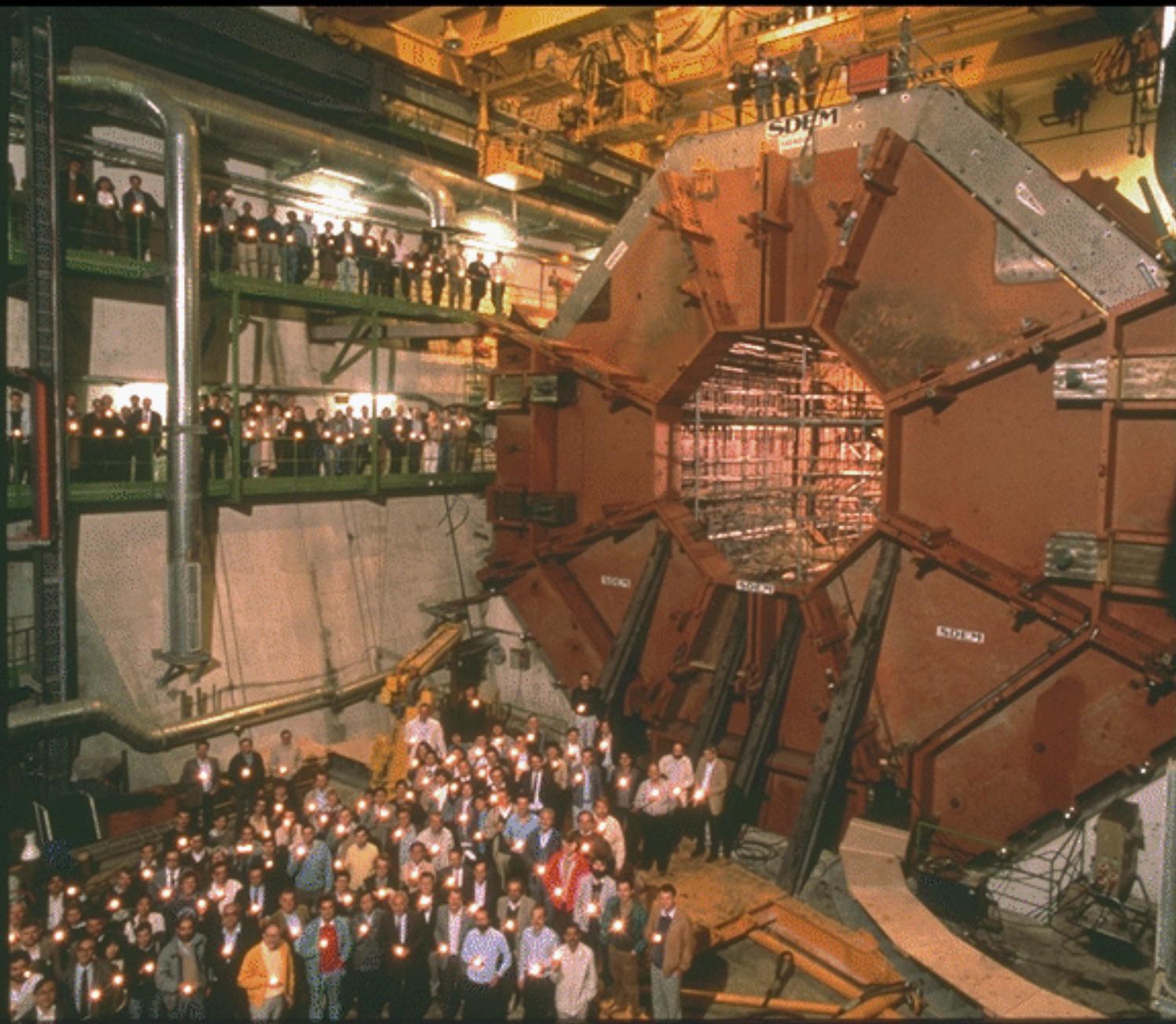


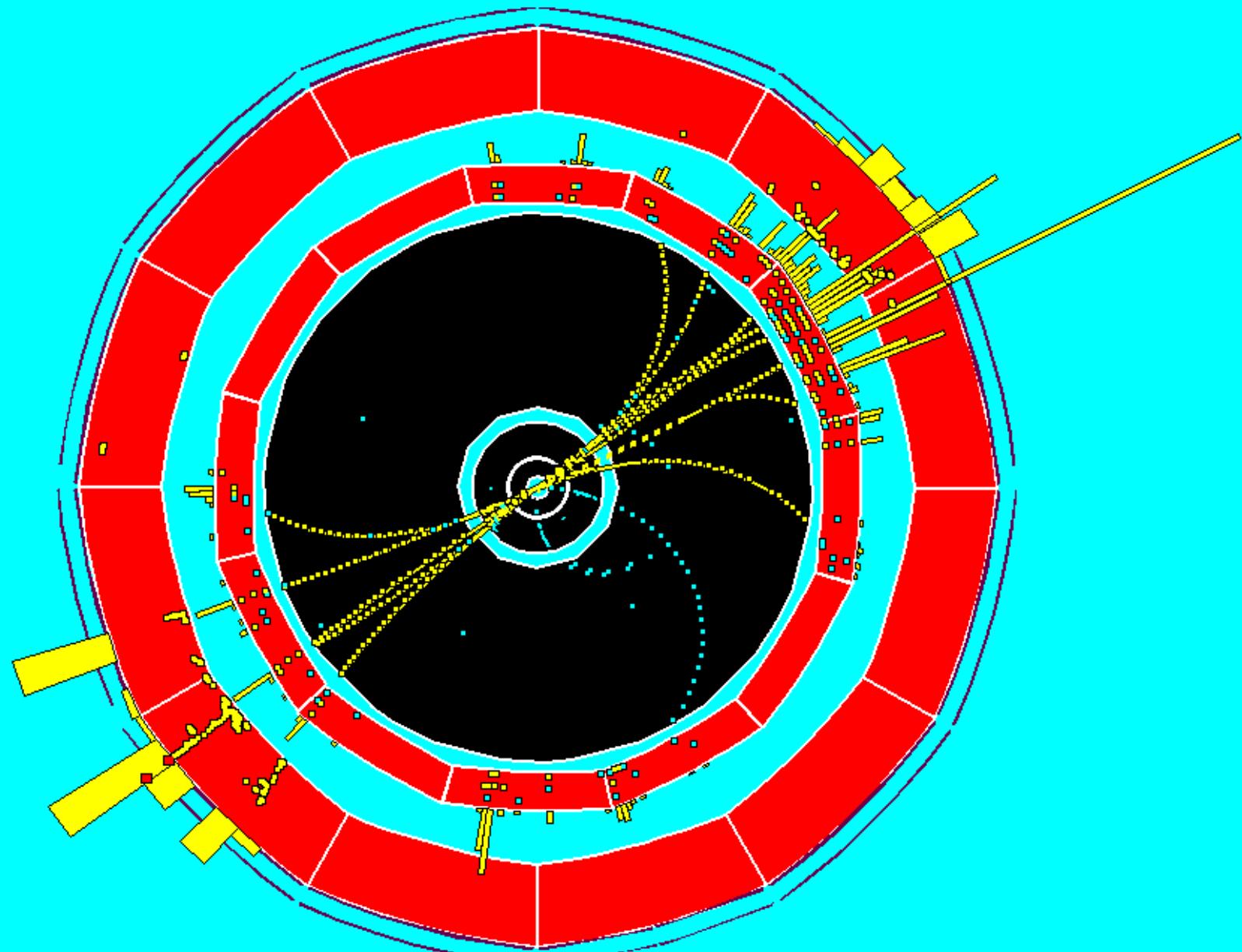
- **Kalorimeter**

Teilchen werden in Materie gestoppt.
Dabei entsteht u.a. Licht,
das man nachweist.



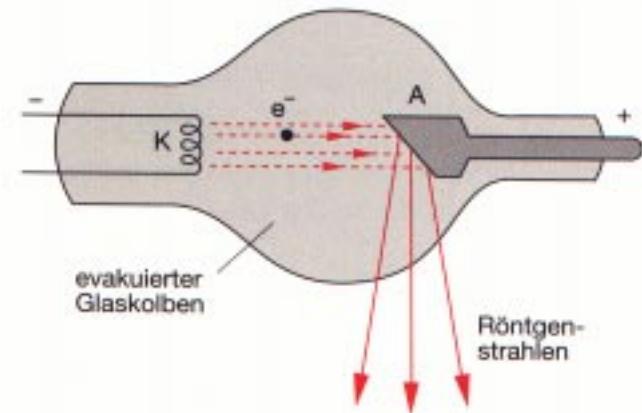
Genaue Messungen erfordern große Detektoren!





‘Spinoff’ der Beschleunigerzentren

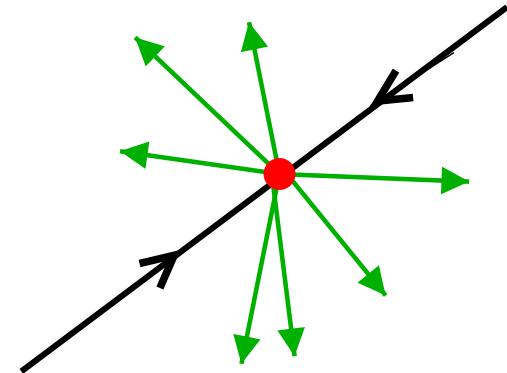
- **Beschleuniger in der Medizin, Biologie ...**
 - **Röntgenröhre**
 - **Synchrotronstrahlung:**
HASYLAB am DESY, BESSY in Berlin ...



- **Supraleitung und Kältetechnik**
 - **HERA: größte Heliumverflüssigungsanlage Europas**
- **Vakuumtechnik**
 - 10^{-14} bar
- **Elektronik und Computer**
 - **Datenproduktion LHC-Detektor:** 10^{16} bit/s > **weltweiter Telefonverkehr**
 - **WWW wurde am CERN erfunden**
- **Internationale Kooperation**

Zusammenfassung

- **Aufgabe von Teilchenbeschleunigern:**
“Verstehen was die Welt im Innersten zusammenhält”
→ Supermikroskope der Quantenwelt
- **Funktionsweise von Teilchenbeschleunigern:**
Elektrische Kräfte beschleunigen geladene Teilchen
→ hohe Energie erfordert große Beschleuniger!
→ Relativitätstheorie !
- **DESY und CERN:**
europäische Forschungszentren mit Großbeschleunigern: LEP, HERA, ...
- **Resultate:**
Entdeckungen von W und Z, Struktur des Protons ...
Zukunft: Entdeckung des Higgs-Teilchens ? Überraschungen ?



BITTE BESUCHEN SIE DIE AUSSTELLUNG!