

BESCHLEUNIGER: Mikroskope der Quantenwelt

Thomas Hebbeker
Humboldt-Universität Berlin

Urania 04.04.2000

<http://eeh01.physik.hu-berlin.de/~hebbeker/beschleuniger.html>

ÜBERSICHT

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



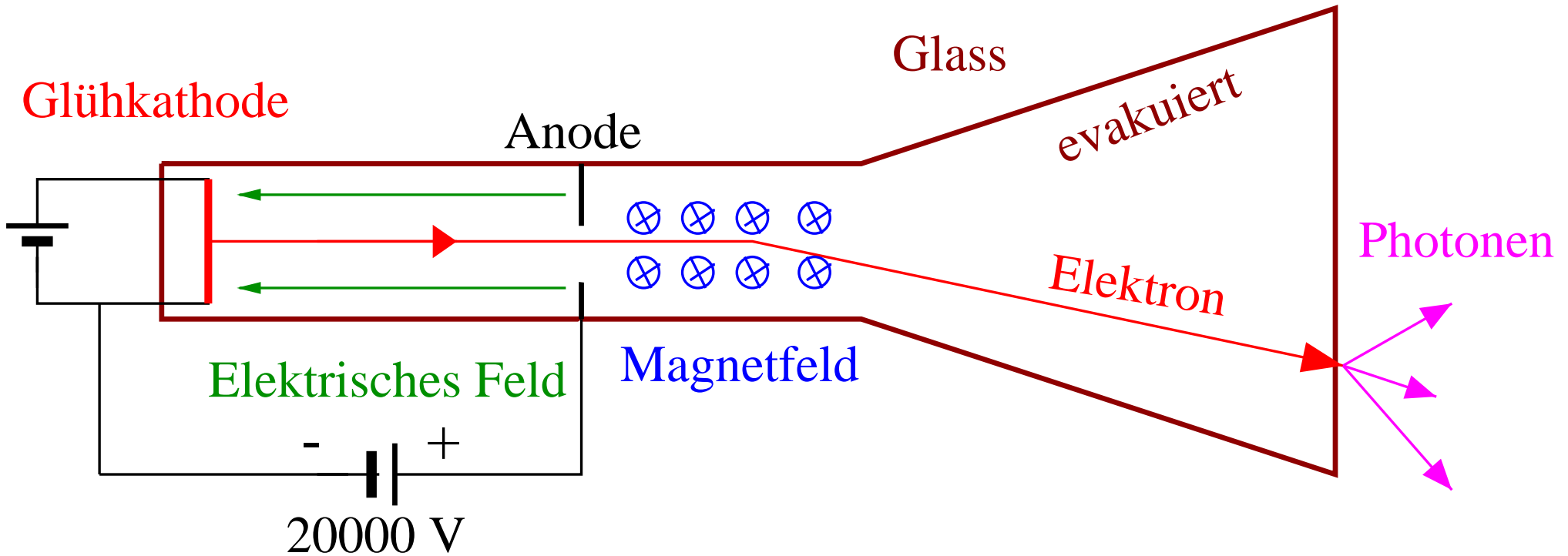
- Die Beschleunigerzentren CERN und DESY



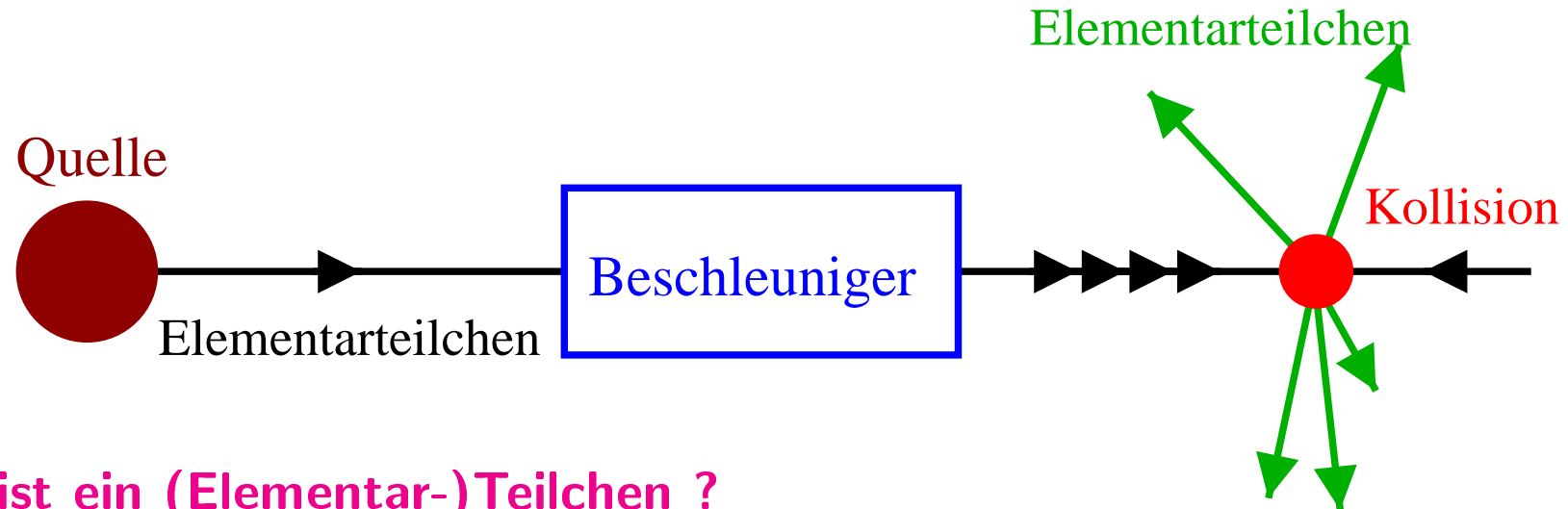
Fernsehapparat = Teilchenbeschleuniger

Erzeugung Beschleunigung Ablenkung

Kollision



Was macht ein Teilchenbeschleuniger ?



1) Was ist ein (Elementar-)Teilchen ?

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

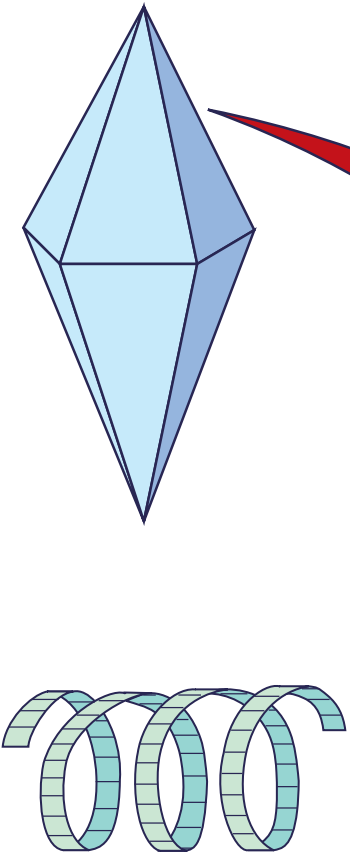
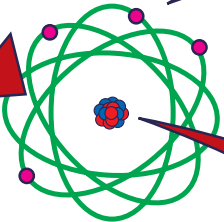
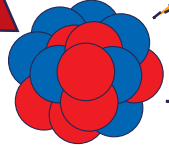
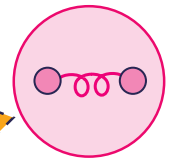
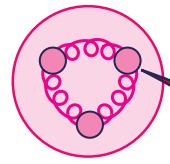

Beschleunigt werden können geladene stabile Teilchen:

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

2) Man wiederholt das Experiment sehr häufig! Warum?

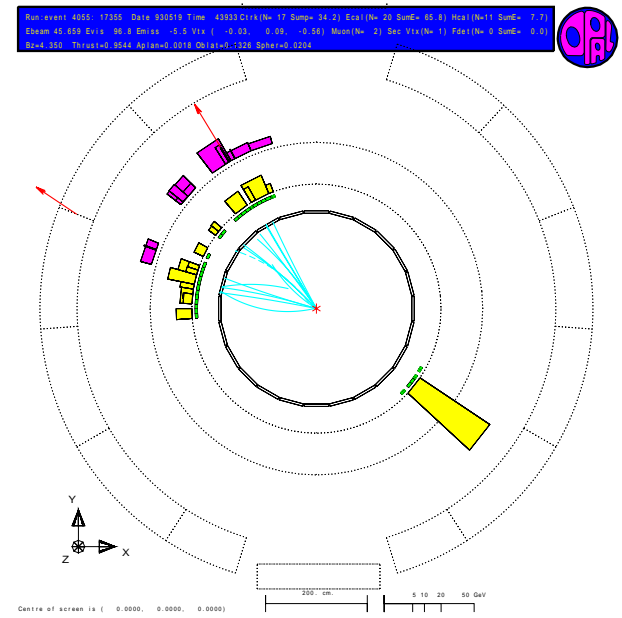
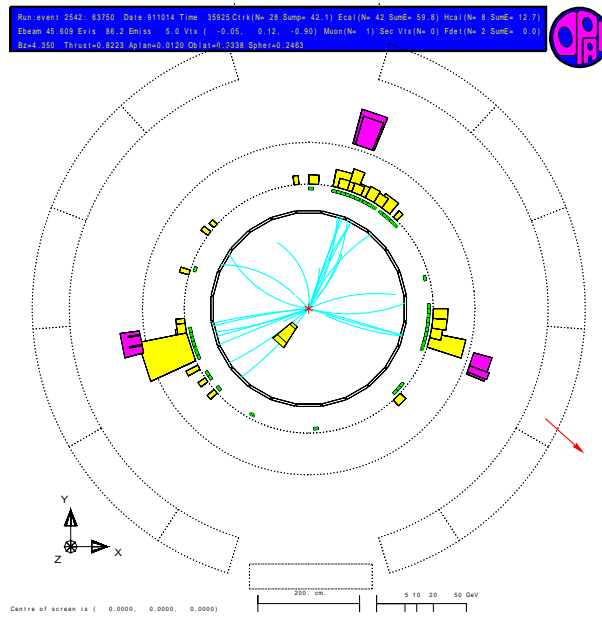
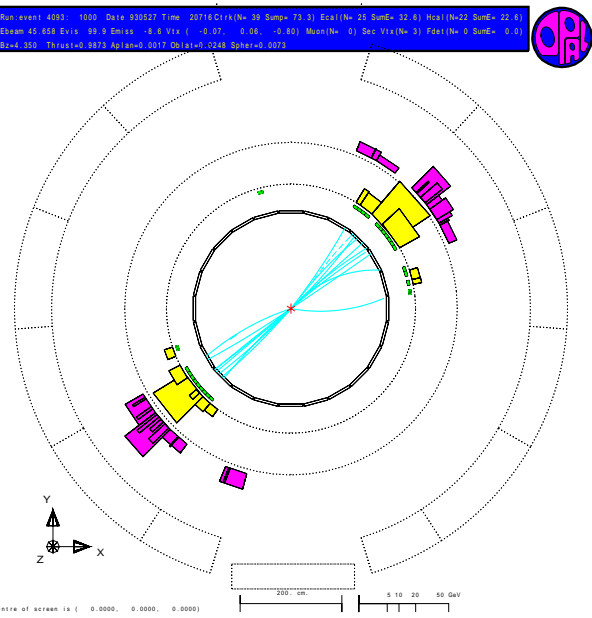
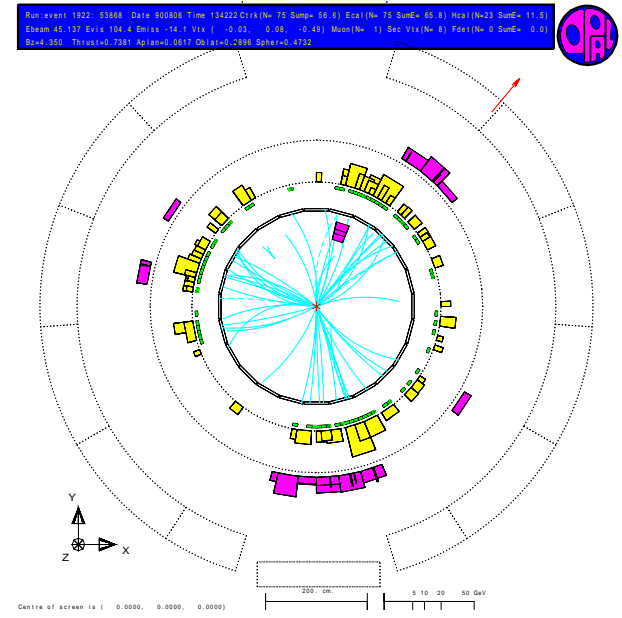
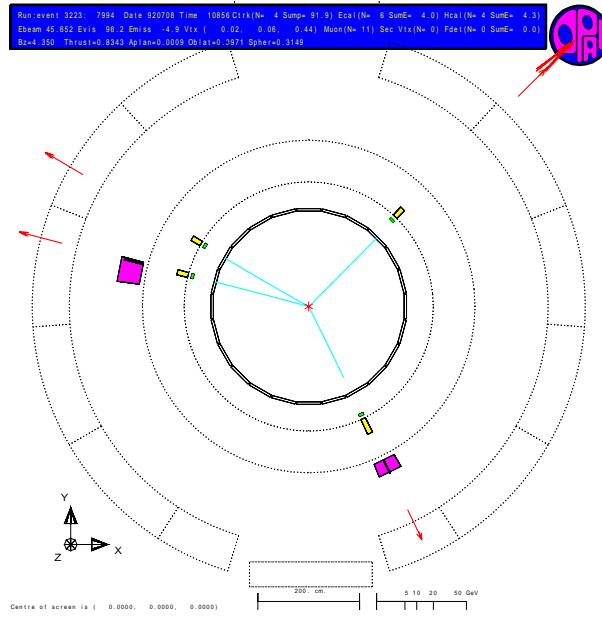
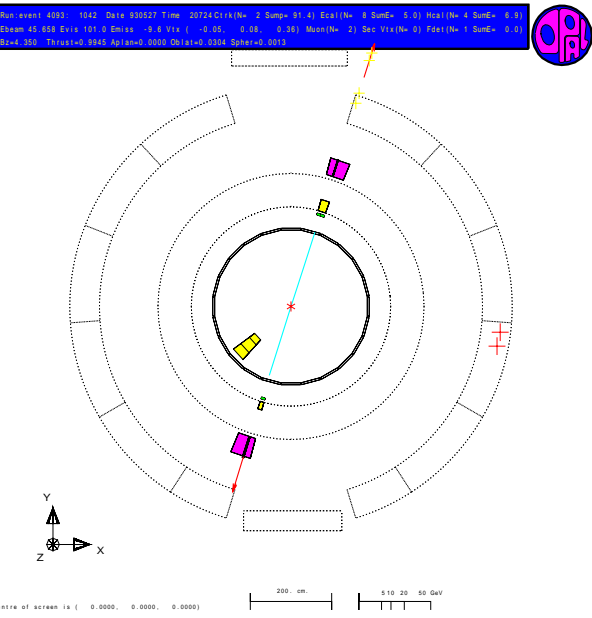
Quantentheorie! Selbst bei gleichen Anfangsbedingungen ist der Endzustand immer ein anderer ...

→ **Wahrscheinlichkeitsverteilungen**

Kristall Molekuel	Atom	Atom-Kern	Elementar- teilchen	
			<p>Hadronen</p> <p>Mesonen</p>  <p>Baryonen</p>  <p>Proton Neutron</p>	<p>Leptonen $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$</p> <p>punktfoermig</p> <p>Quarks u, c, d, s, b, t</p> 
1 cm	10^{-8} cm	10^{-12} cm	10^{-13} cm	?

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

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



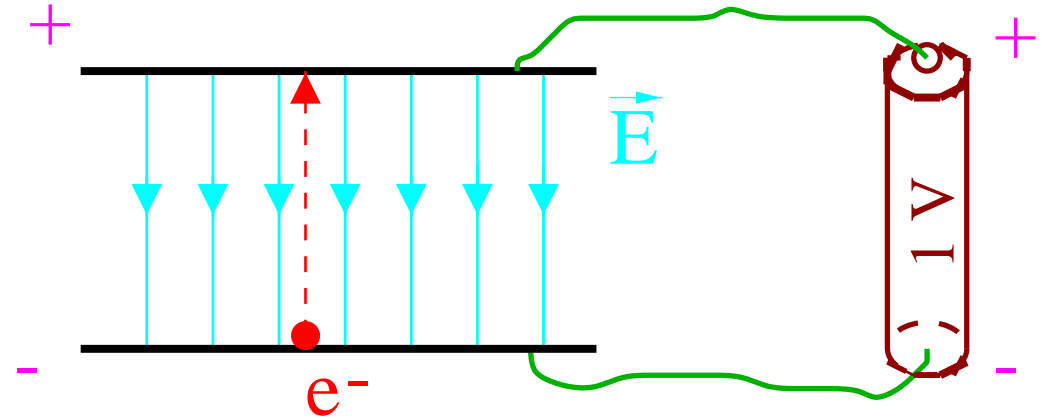
Energien und Massen

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:

Einsteins **Relativitätstheorie:**

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

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

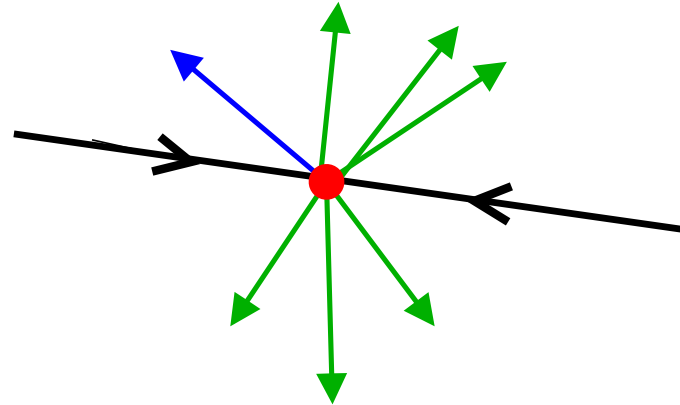
Energie kann in Masse verwandelt werden und umgekehrt!

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: $m = \frac{E}{c^2}$

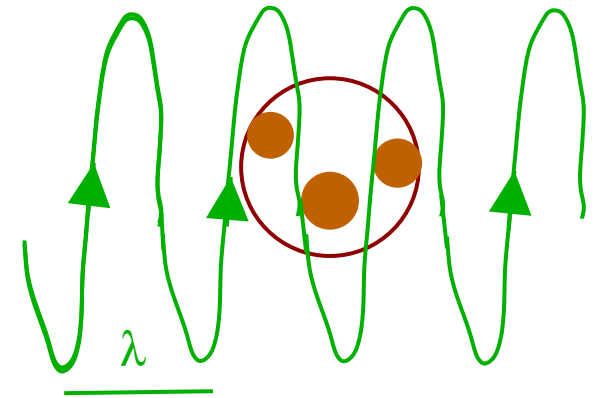
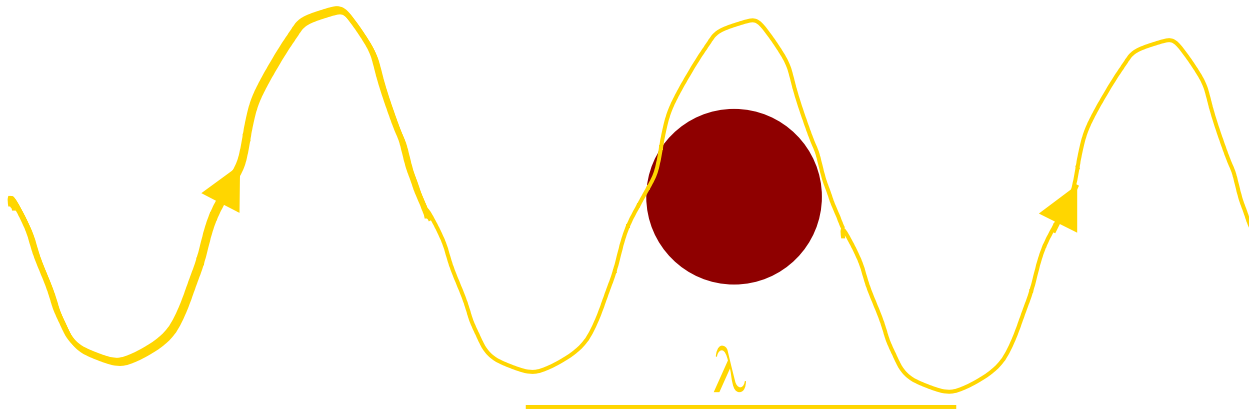
Schwerstes bisher gefundenes Teilchen:

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

→ **Bausteine und Kräfte der Natur** ←

Wozu benutzt man Beschleuniger ?

2) Auflösung sehr kleiner Strukturen



Teilchen haben Welleneigenschaften!

Räumliche Auflösung = Wellenlänge

$$\lambda \approx hc \frac{1}{E}$$

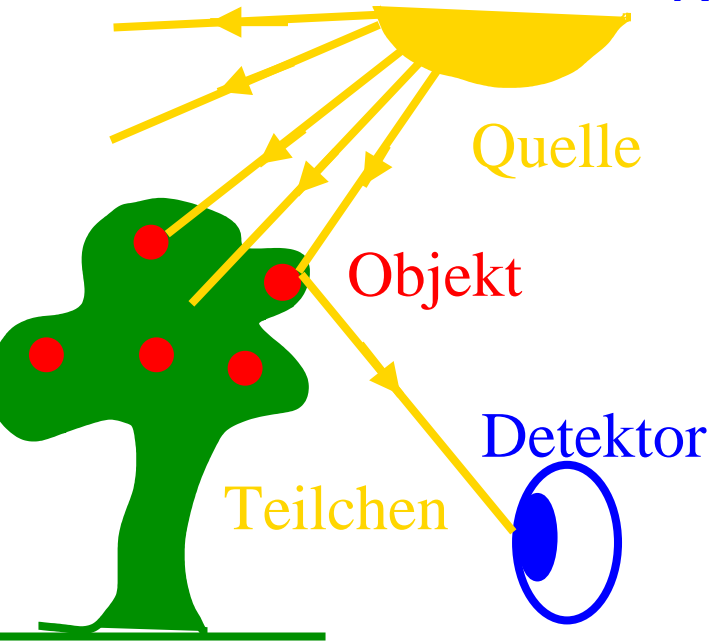
Unschärferelation

Je kleiner die Strukturen, desto größer der Beschleuniger!

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

→ Beschleuniger = Super-Mikroskop für Elementarteilchen ←

Auflösung kleiner Strukturen



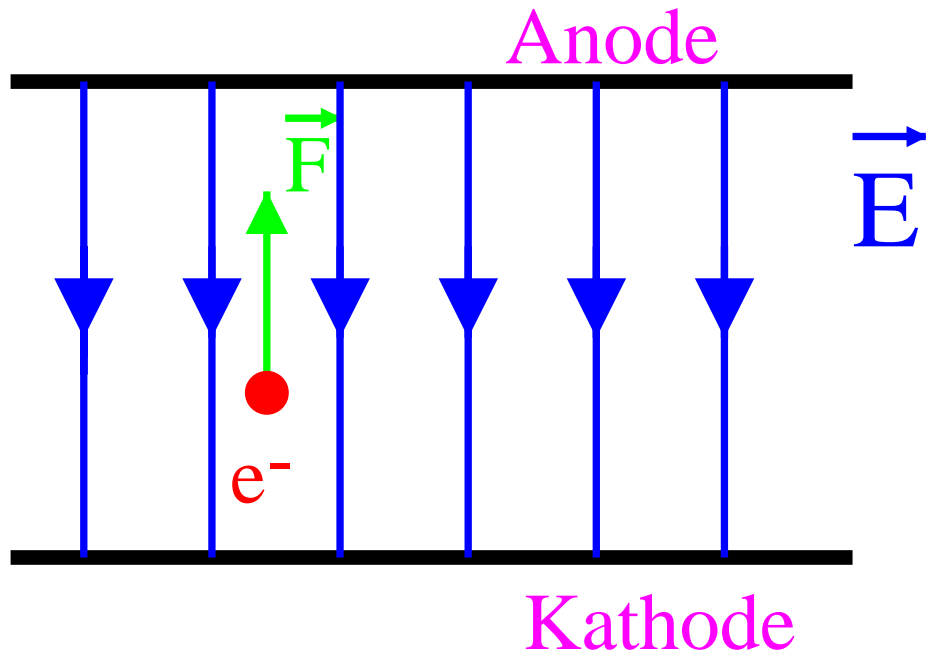
Prinzip: Streuung liefert Information über Objekt

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 ?

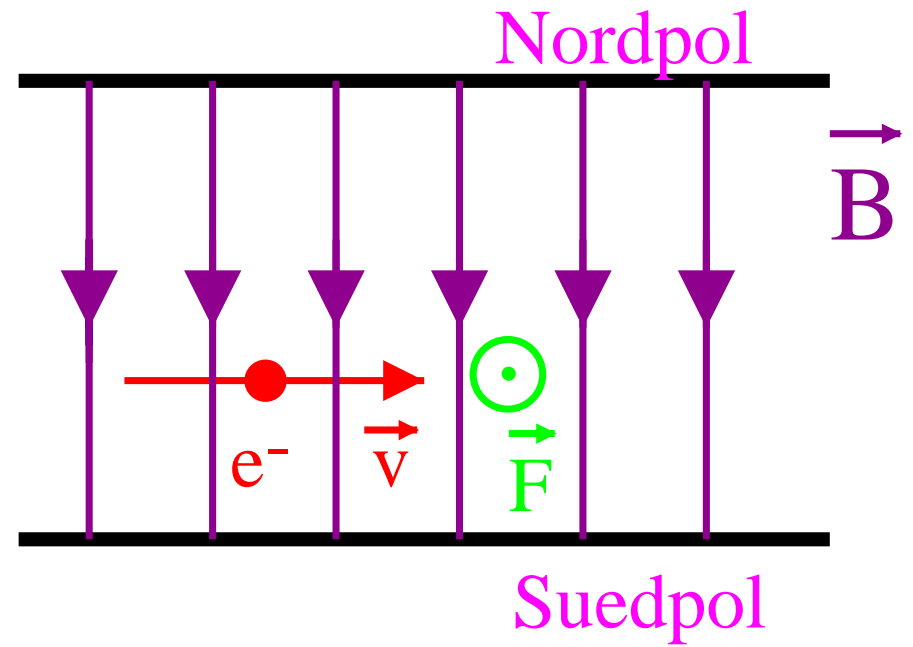
Elektrisches Feld



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

Kraft beschleunigt oder lenkt ab.

Magnetisches Feld



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

Kraft lenkt (stark) ab.

Wie funktionieren Teilchenbeschleuniger ?

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

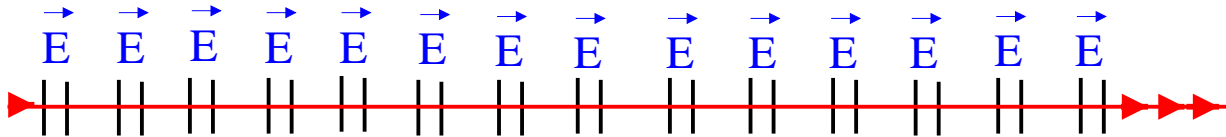
Prinzip: Durchlaufen eines elektrischen Feldes!

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

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

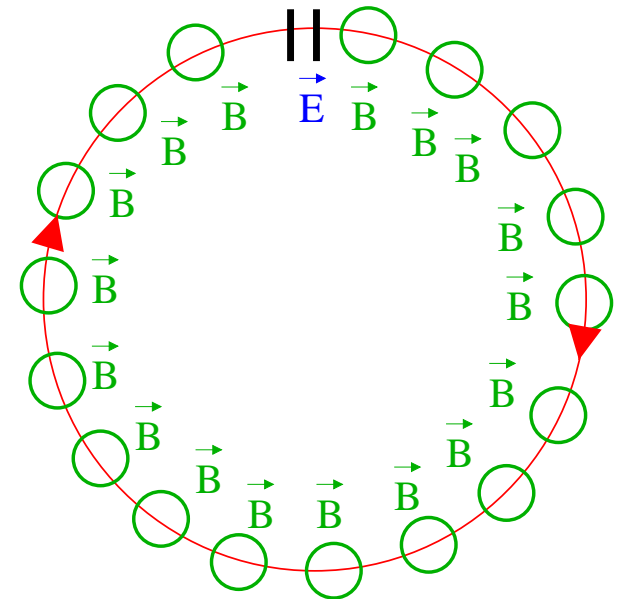
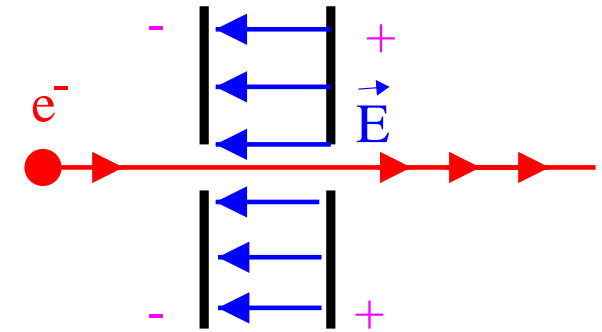
Optionen:

- **Linearbeschleuniger**



- **Kreisbeschleuniger**

→ starke Magnete zur Ablenkung



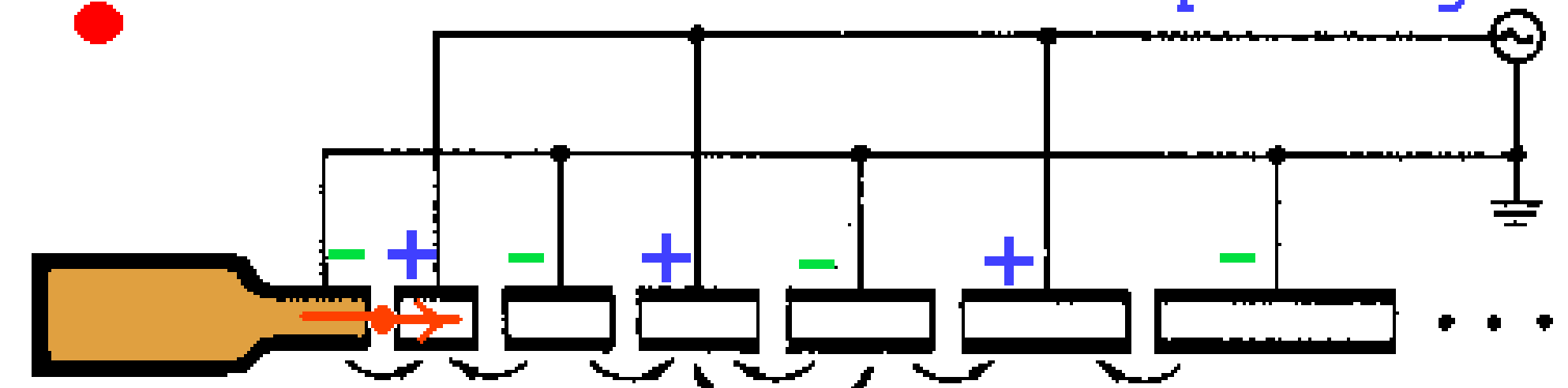
→ **Hohe Energien erfordern (mehrere km) große Beschleuniger !** ←

Prinzip des Linearbeschleunigers

Elektron

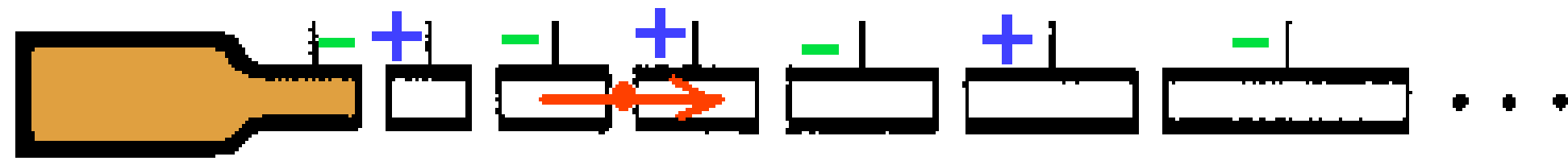
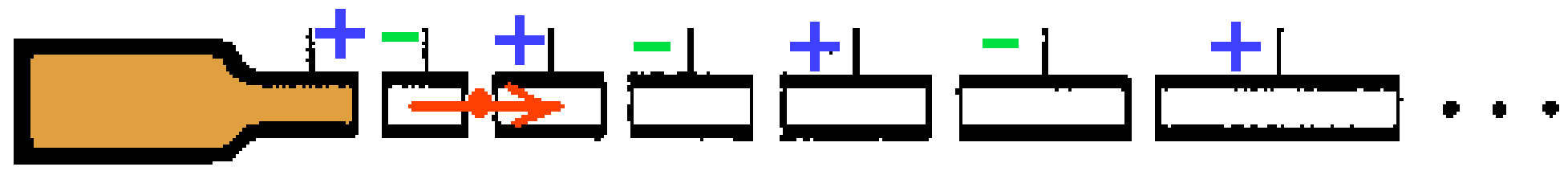


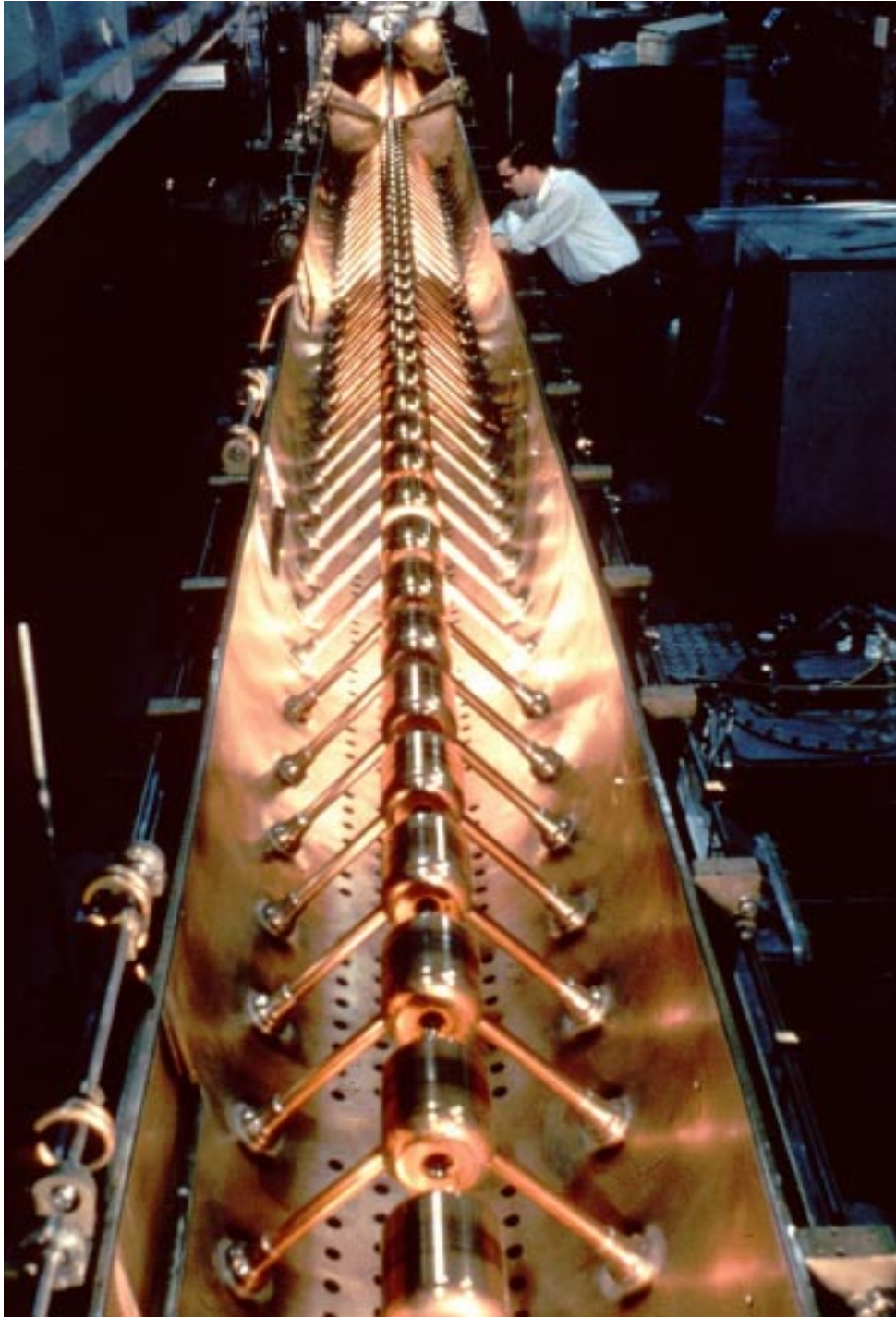
Wechselspannung



Teilchenquelle

Driftröhren

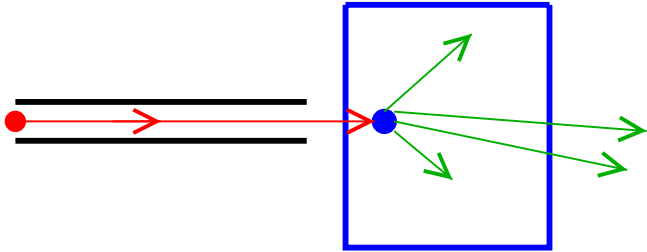




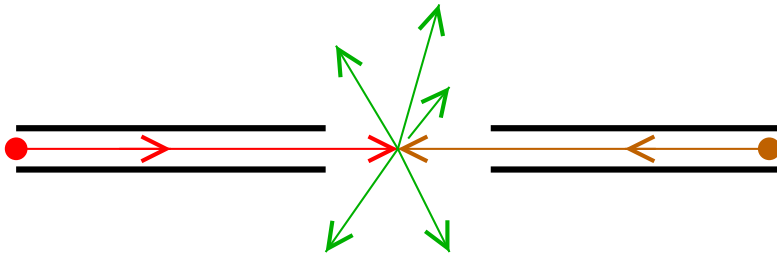
Teilchenkollisionen

Drei Möglichkeiten:

- Teilchen werden auf ruhende Materie geschossen



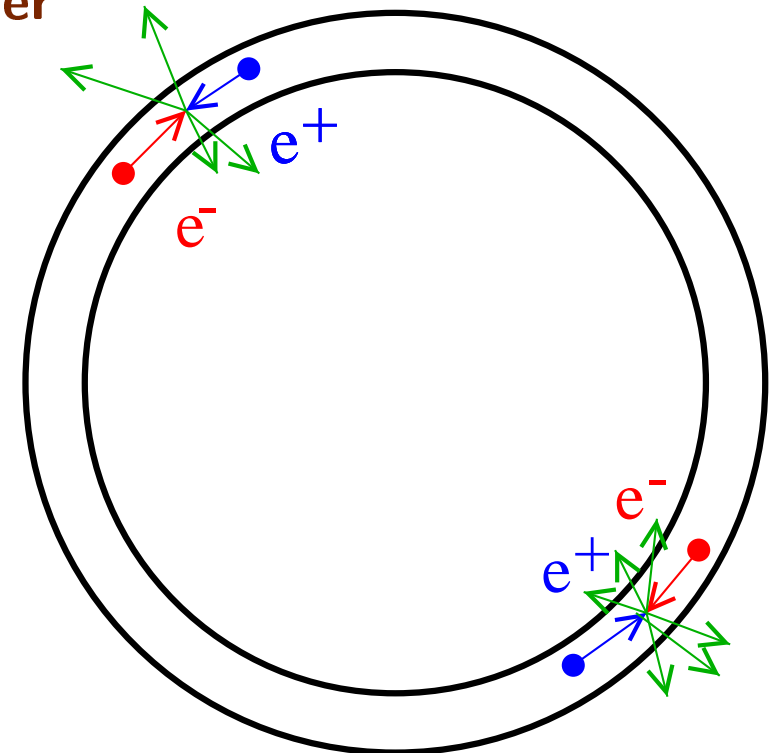
- Zwei Beschleuniger schießen Teilchen aufeinander



Hohe Kollisionsenergie!

- EIN Ring mit entgegelaufenden Teilchen und Antiteilchen

Hohe Kollisionsenergie! Elegant!



Große Teilchenbeschleuniger-Zentren in Europa

DESY (Hamburg)

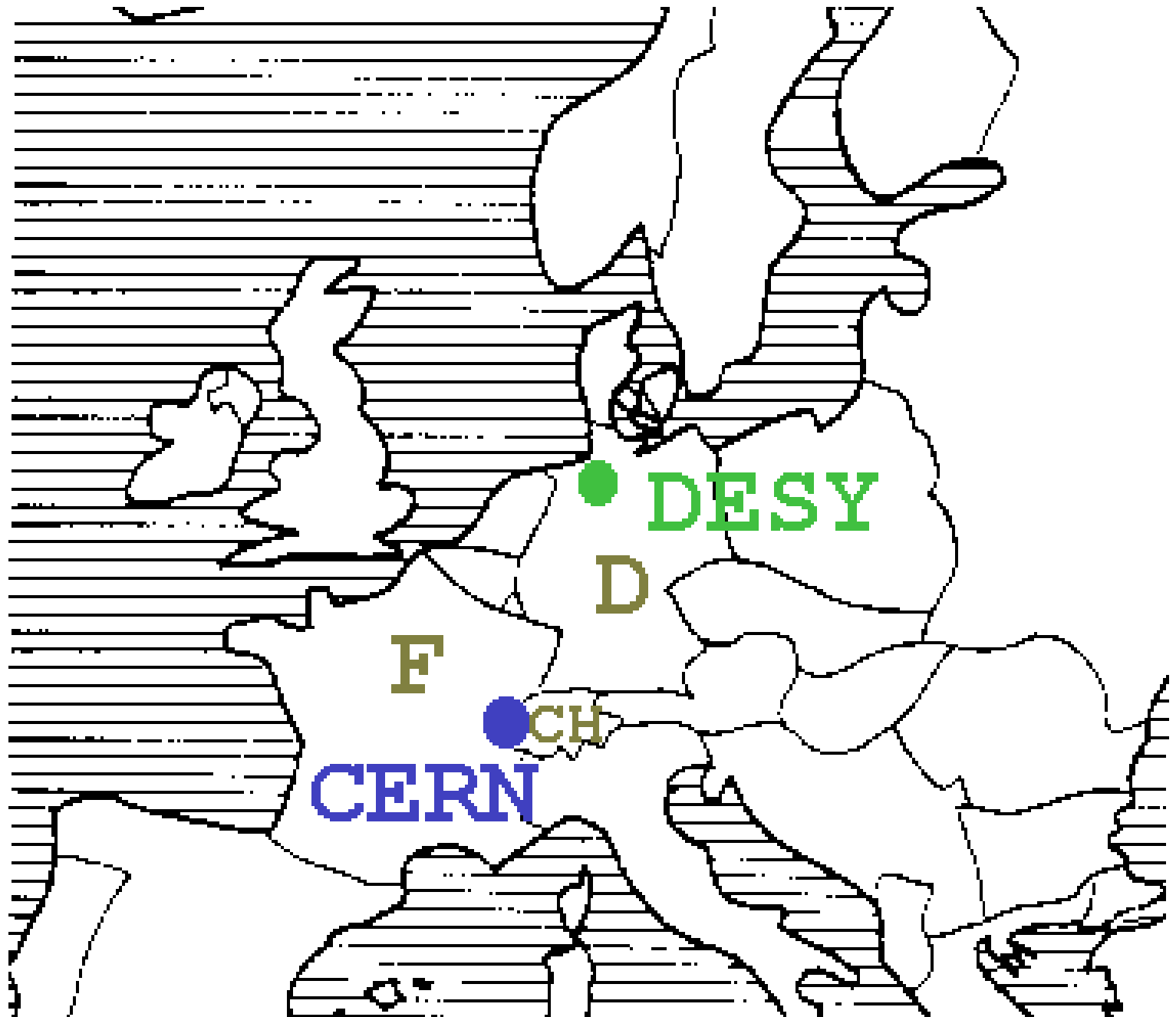
=

'Deutsches
Elektronen-
SYnchrotron'

CERN (GENEVE)

=

'European
laboratory
for
particle physics'







Die größten Beschleuniger bei CERN und DESY

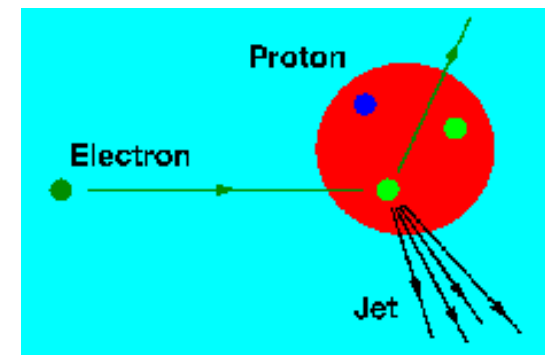
- **CERN** 6000 Physiker/innen

- **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

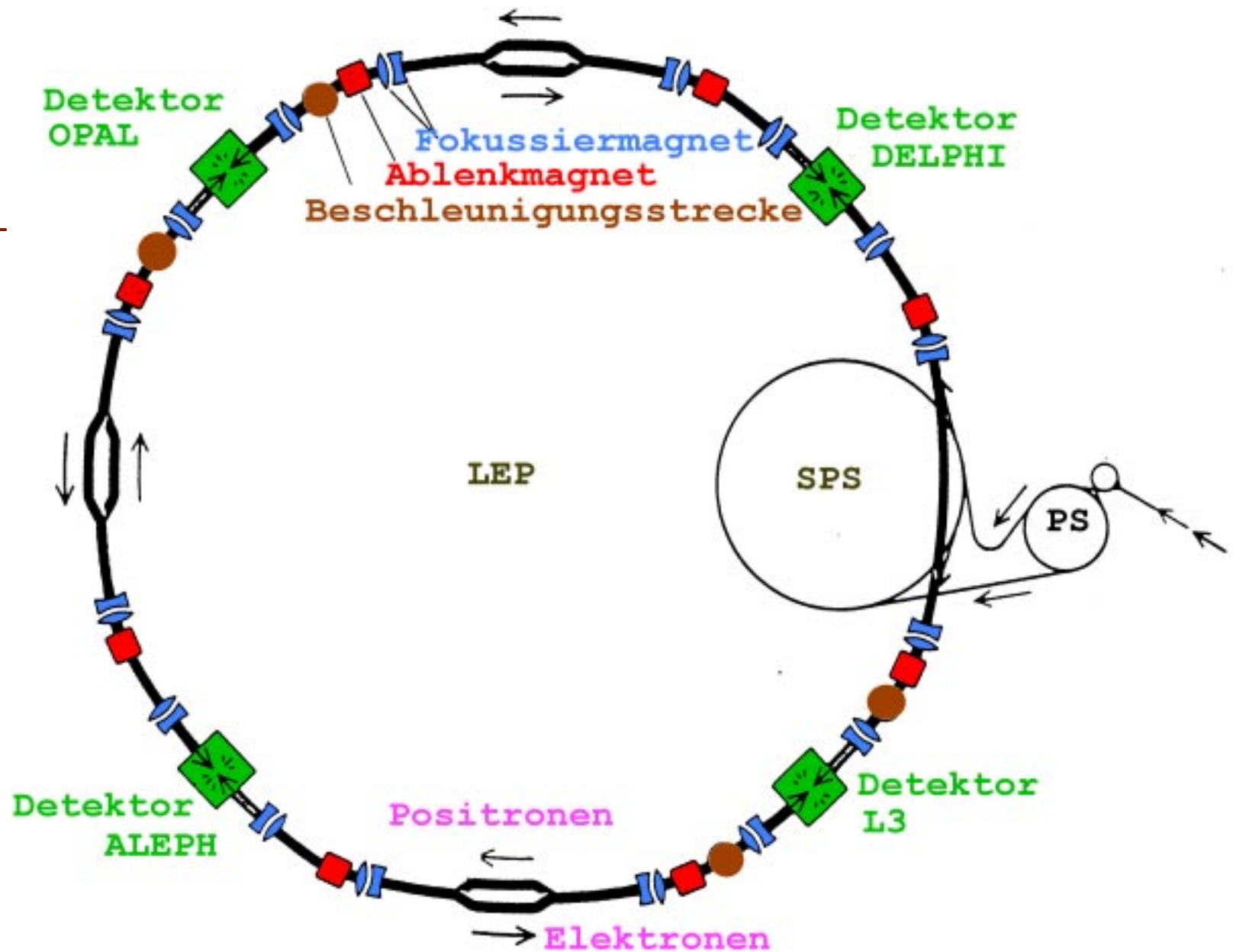
27 km Umfang

300
supraleitende
Beschleunigungs-
strecken

3000
Dipolmagnete
von je 6 m
Länge

800
Quadrupol-
magnete

4 große
Detektoren



Beschleuniger und Relativitätstheorie

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

'Klassische' Mechanik:

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

$$v \approx 600 \cdot c$$

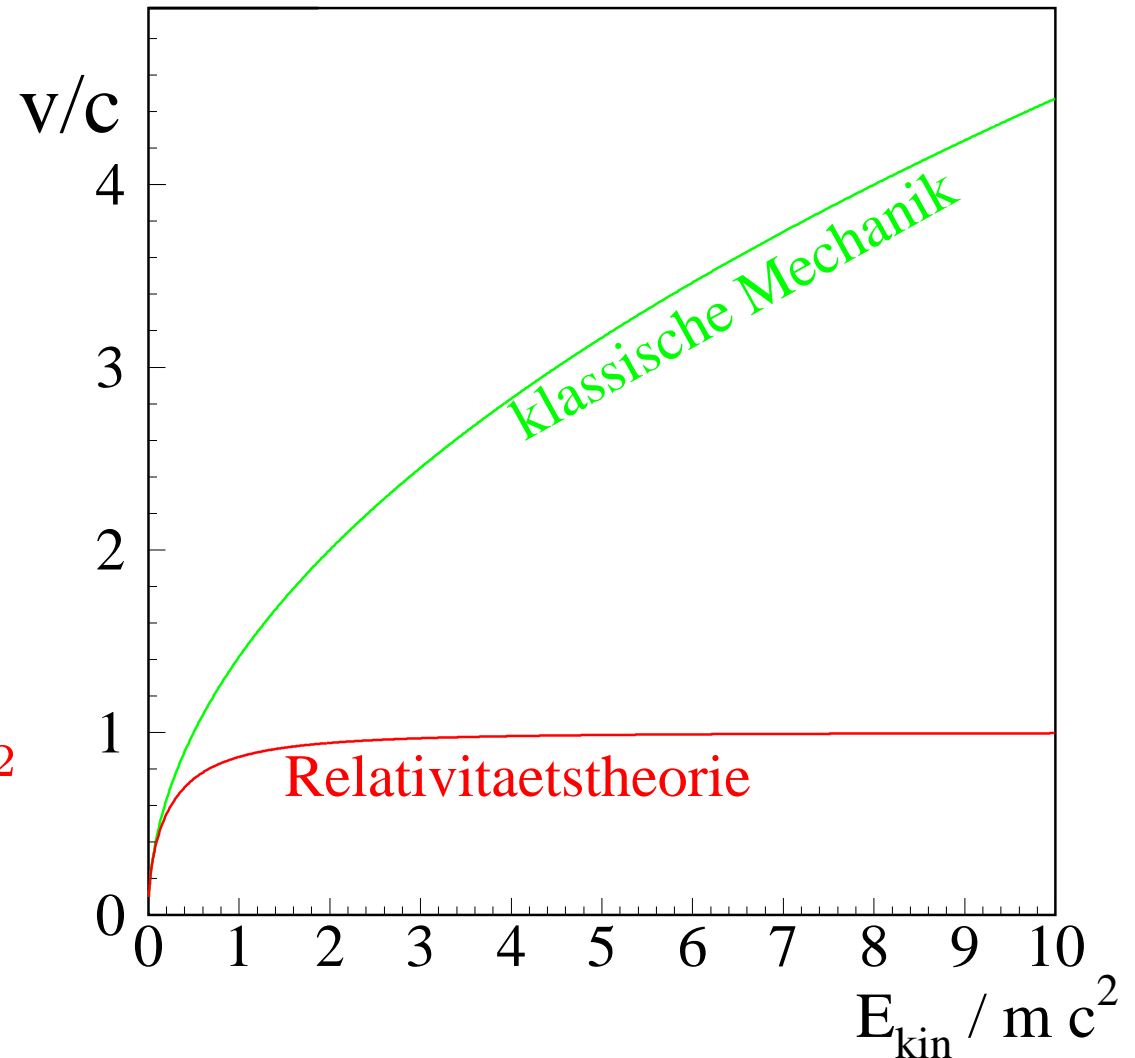
$$\approx 200 \text{ Millionen km/s}$$

Relativitätstheorie:

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

$$v \approx 0.99999999999999 \cdot c$$

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



→ 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:

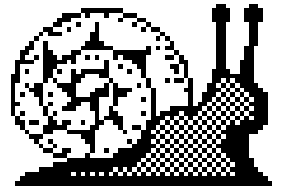
2) $E = 100 \text{ GeV}$

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

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.

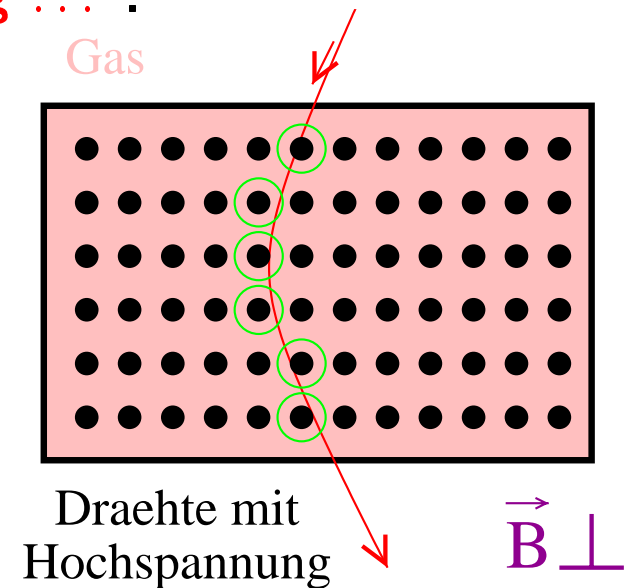
Gemessen werden **Energie/Impuls, Ladung, Flugrichtung ...**

- **Spurdetektoren**

Geladene Teilchen werden im Magnetfeld abgelenkt und ionisieren Gas.

Elektrische Signale ermöglichen

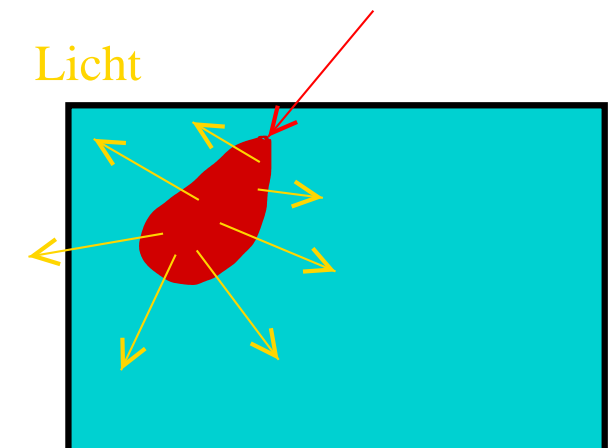
Spurrekonstruktion und Impulsmessung



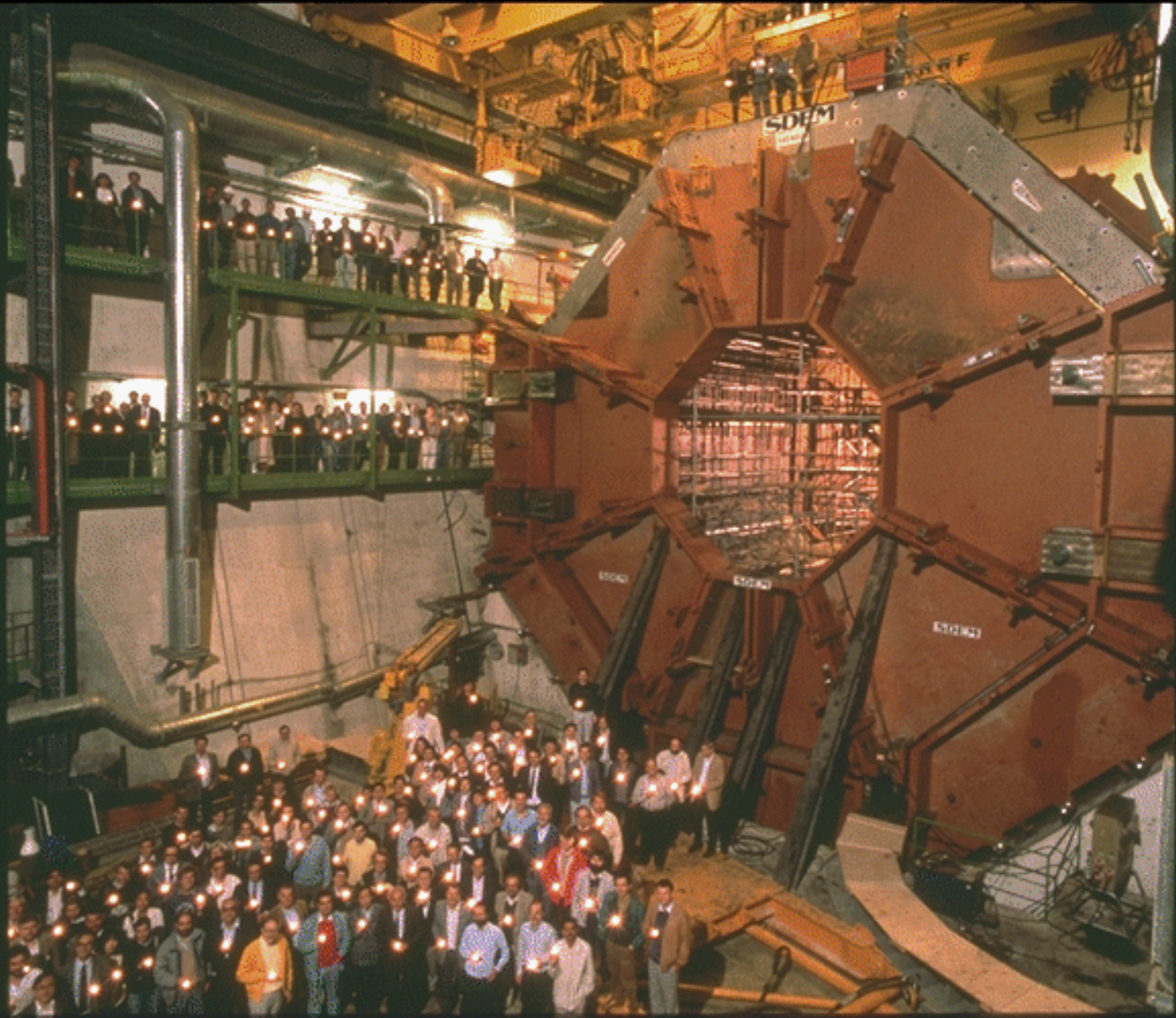
- **Kalorimeter**

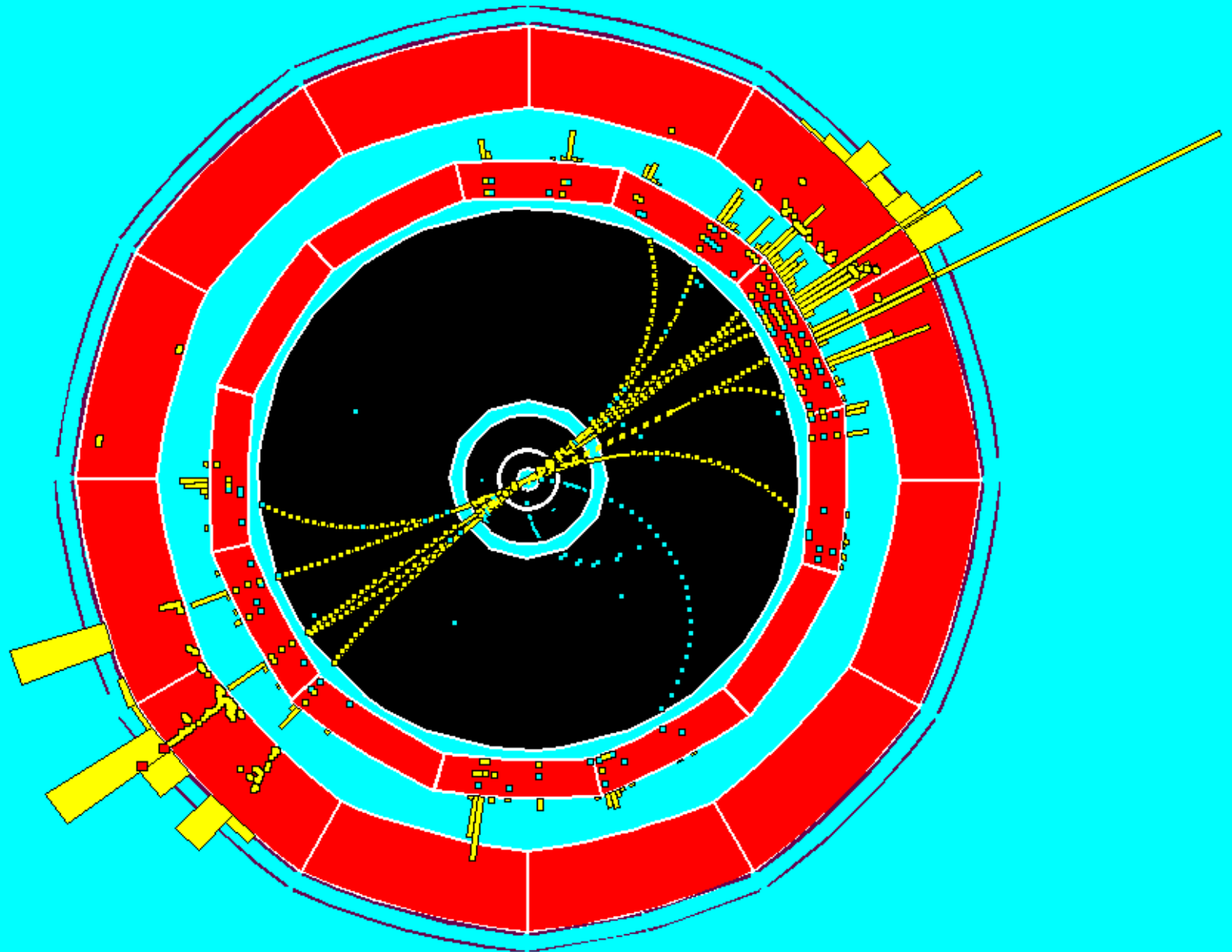
Teilchen werden in Materie gestoppt.

Dabei entsteht u.a. Licht,
das man nachweist.



Genaue Messungen erfordern große Detektoren!



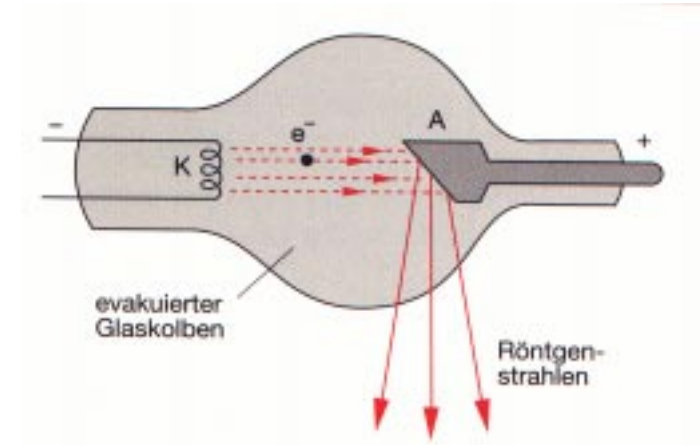


'Spinoff' der Beschleunigerzentren

- **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**

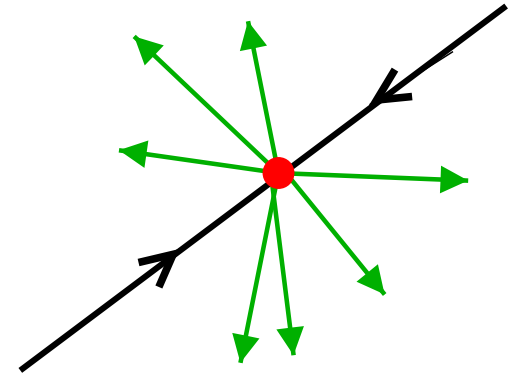
- **Datenproduktion LHC-Detektor: 10^{16} bit/s > weltweiter Telefonverkehr**

- **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!