

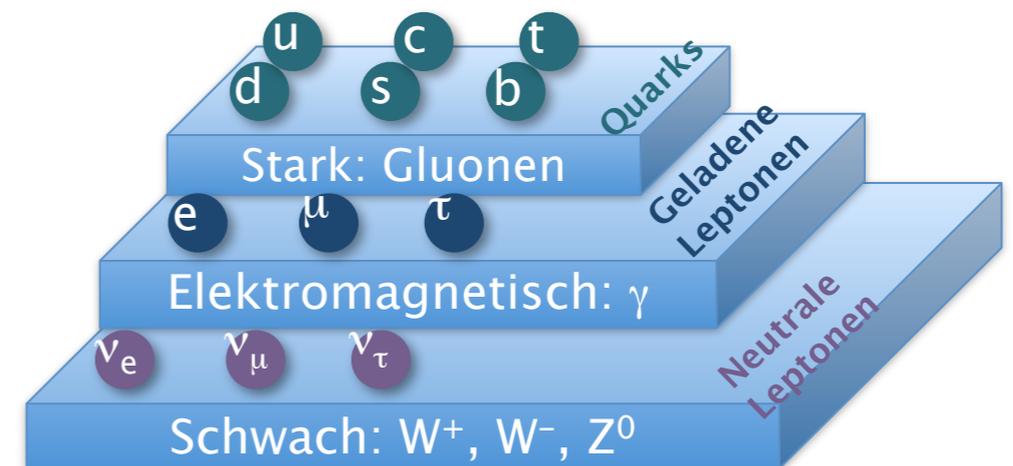
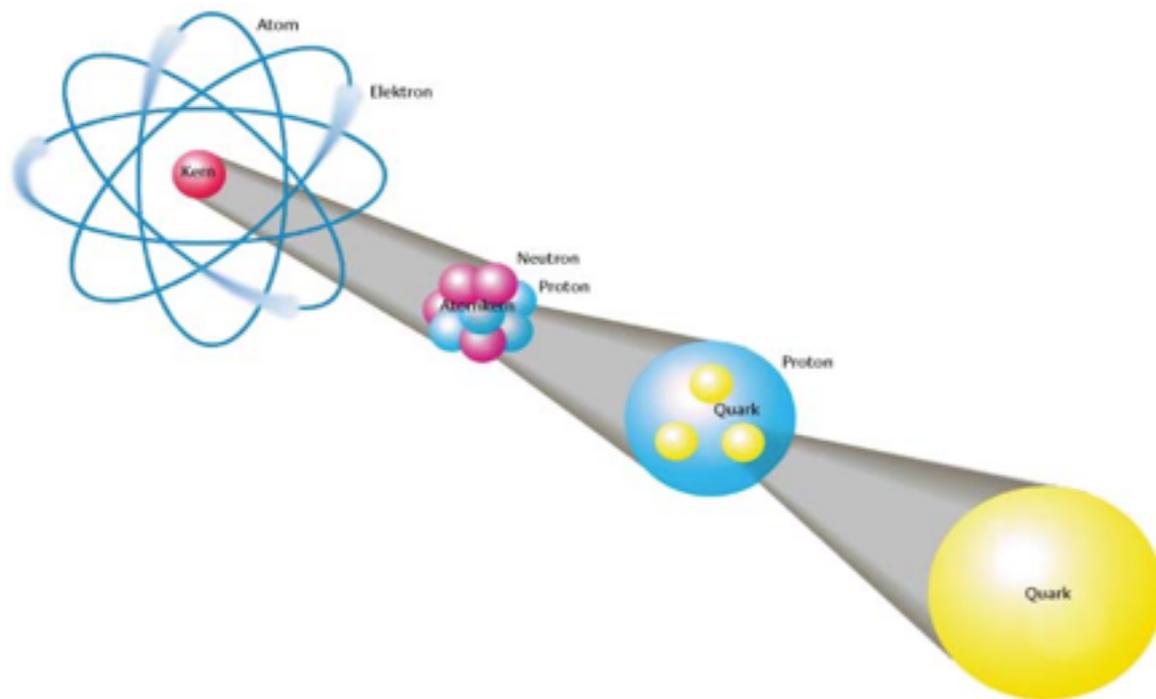


Beschleuniger und Detektoren

european masterclasses 2012

Wozu Teilchenbeschleuniger?

unser Ziel ist die Untersuchung der **Bausteine der Materie**
 und der **elementaren Wechselwirkungen (Kräfte)**



... nur wie?

Beobachtung kleiner Objekte

Auge:

Auflösung $\sim 0.1 \text{ mm}$

10^{-4} m



Lichtmikroskop:

$\sim 0.2 \mu\text{m}$

10^{-7} m



Elektronenmikroskop:

$\sim 1 \text{ nm}$

10^{-9} m

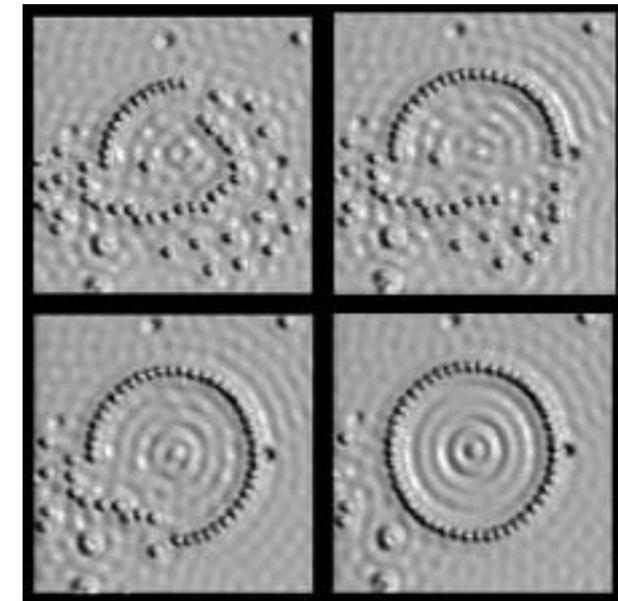


Beobachtung noch kleinerer Objekte

Rastertunnelmikroskop:

~ 0.01 nm (atomare Auflösung!)

10^{-11} m

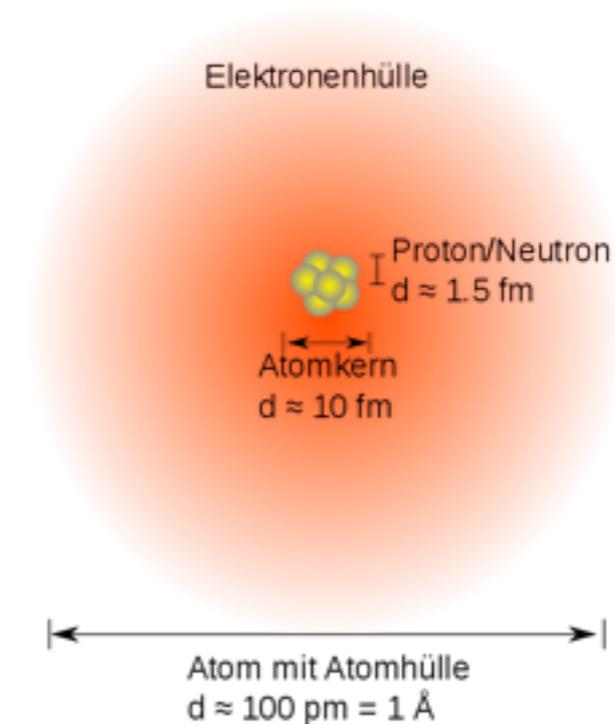


ABER:

der Durchmesser eines Atomkerns

ist $\sim 10^{-15}$ m

... was kann man tun?



Beobachtung kleinster Objekte

Das Auflösungsvermögen hängt von der Wellenlänge der verwendeten Strahlung ab! (vgl. Wasserwellen)

de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

je höher die Energie, desto höher der Impuls

--> **kleinere Wellenlängen bei hohen Energien!**

7 TeV Protonen haben eine Wellenlänge von $\sim 10^{-18} \text{ m}$



um solche hohen Energien zu erreichen brauchen wir Beschleuniger!



Energien

Teilchenphysiker rechnen in “seltsamen” Energieeinheiten

Basiseinheit: 1 eV (Elektronvolt)

1 eV ist die Energie die eine Ladung von 1.602×10^{-19} C beim Durchgang einer Potentialdifferenz von 1 Volt erhält

sichtbares Licht:	~ 1 eV
UV- Licht:	~ 10 eV
Röntgenstrahlung:	~ 10 000 eV
γ -Strahlung:	~ 1 000 000 eV
m_{Proton}:	~ 1 000 000 000 eV
$m_{\text{Z-Boson}}$:	~ 100 000 000 000 eV
LHC:	~ 10 000 000 000 000 eV
10 g Schokolade:	~ 1 000 000 000 000 000 000 000 000 eV

**kein Scherz,
aber wie kann das sein?**

Prinzip von Teilchenbeschleunigern

In Beschleunigern werden nun **sehr hochenergetische Teilchen aufeinandergeschossen!**

--> es ist möglich, immer kleinere Strukturen & Objekte aufzulösen!

Wenn die Energien gross genug sind, geschehen wundersame Dinge!



--> es **können neue, schwerere Teilchen erzeugt** werden!

Einstein's berühmte Formel:

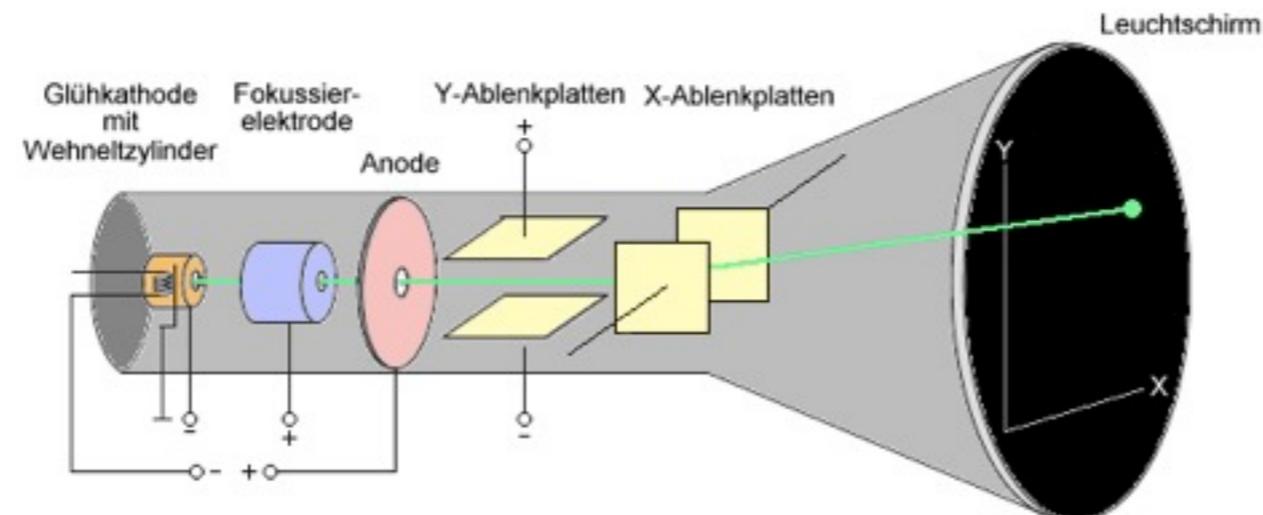
$$E = mc^2$$

Einfacher Teilchenbeschleuniger

Gewöhnlichster Teilchenbeschleuniger:

alte **Fernsehröhre**

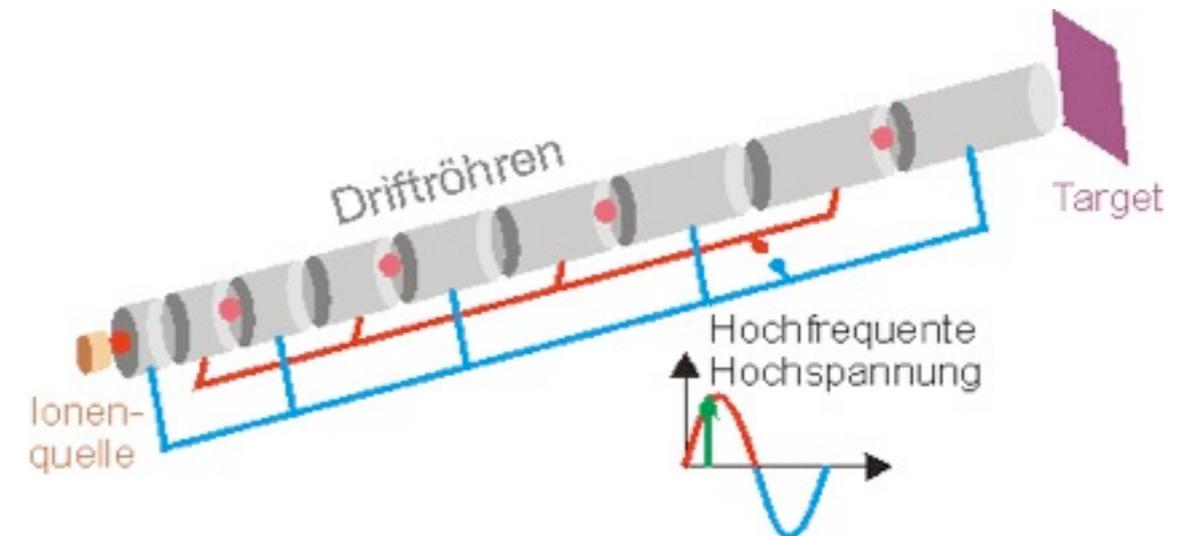
- Erzeugung von **freien Elektronen** in Glühkathode
- **Beschleunigung** durch elektrisches Feld
- Ablenkung durch **magnetisches und/oder elektrisches Feld**



Arten von Beschleunigern

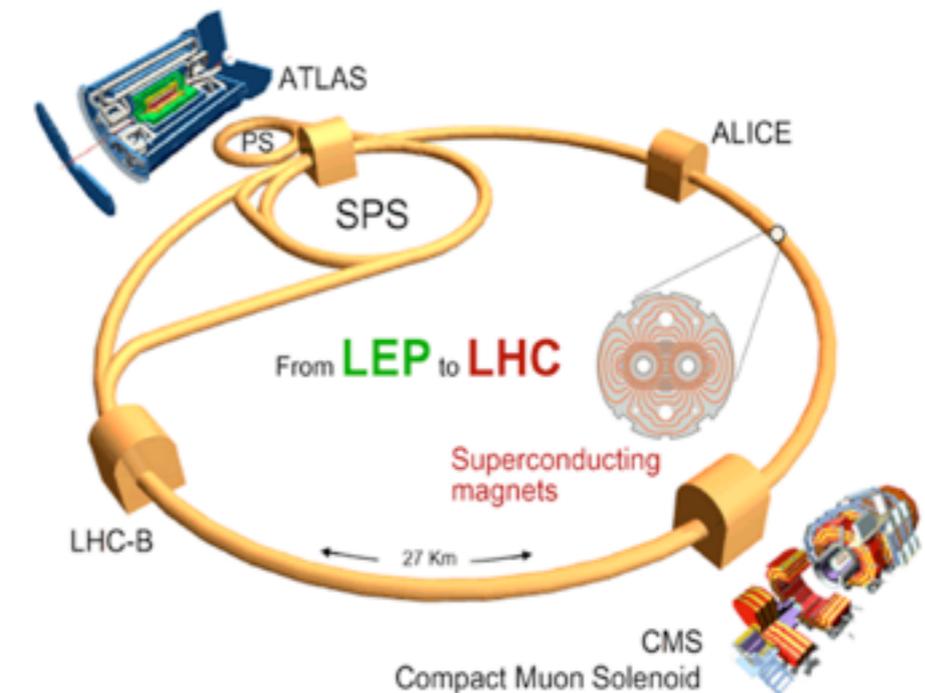
Linearbeschleuniger

- + keine Verluste durch Abstrahlung
 - > **e^+e^- Beschleuniger** gut möglich
- kurze Beschleunigungsstrecken
- “relativ” **kleine Energien**
- Teilchen stehen nur 1x zur Kollision
zur Verfügung



Kreisbeschleuniger

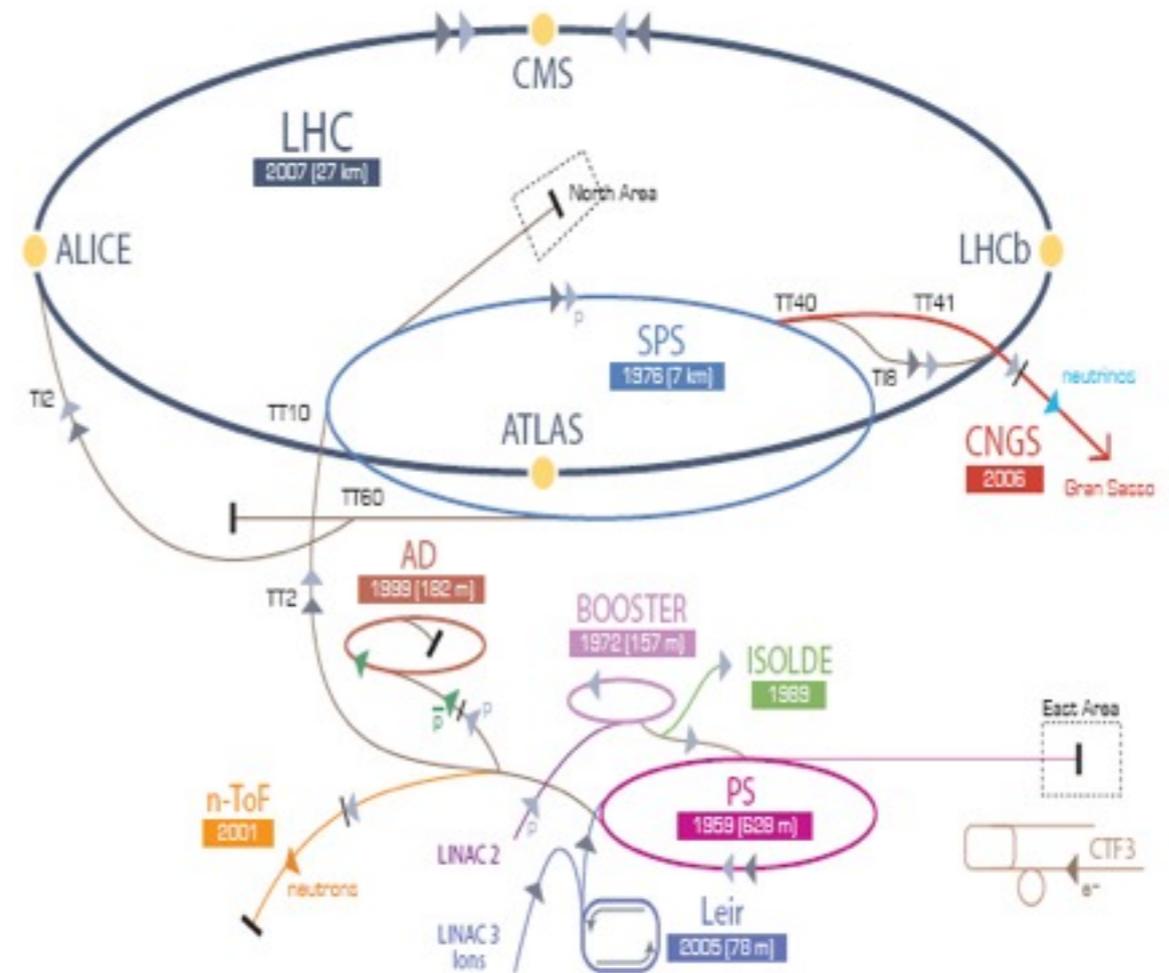
- + Teilchen drehen sich im Kreis
 - > man kann sie **bei jeder Umdrehung**
neu **beschleunigen + kollidieren**
- Abstrahlung bei Umlenkung auf Kreisbahn
 - > **Synchrotronstrahlung**
- viele Komponenten nötig (Magneten)



LHC - Die grösste Maschine der Welt

Kreisbeschleuniger

- > riesiger Beschleunigerring am CERN nahe Genf
- > **Proton-Proton** Kollisionen
- > ca. **27 km langer** Tunnel
- > **~100 m** unter der Erdoberfläche
- > **4 grosse Experimente**
(mehr dazu später)



sehen wir uns anhand des LHC einige Dinge genauer an

Aufbau von Beschleunigern

Was benötigt man zur Beschleunigung von Teilchen?

1) Teilchen

--> z.B. **Protonen** (LHC) oder **Elektronen** (LEP)

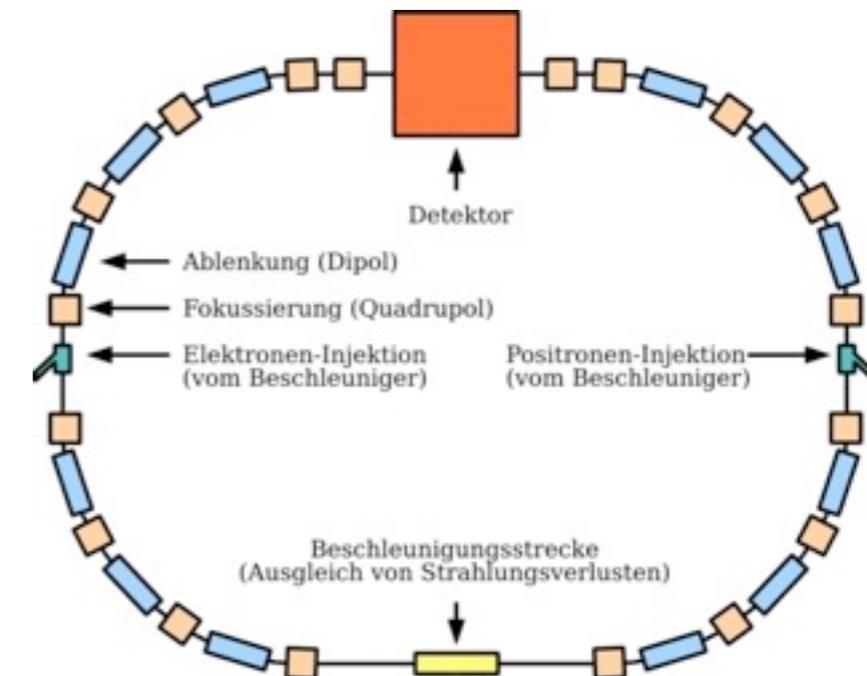
2) Beschleunigungsstrecken

--> geladene Teilchen werden in **elektrischen Feldern** beschleunigt

3) Magneten zum Ablenken bei Kreisbeschleunigern

--> Teilchen müssen abgelenkt werden um auf einer Kreisbahn zu bleiben

So einfach?





Teilchenquellen

Vor allem 2 Quellen wichtig:

Elektronen

--> aus einem Metall herausheizen oder
herausreissen

Protonen

--> Wasserstoffkerne
am CERN gibt es eine Flasche mit Wasserstoff
aus der die Beschleuniger “gefüttert” werden!

Komplizierter wird es mit Positronen und Antiprotonen, diese werden durch z.B.
Kollisionen erzeugt!

Teilchen-”strahlen”

Der LHC wird mit **zwei gegenläufigen Strahlen** gefüllt

Jeder Strahl besteht aus bis zu **2808 Teilchenpaketen!**

Jedes dieser Pakete is mit ca. **10^{11}** (100 Milliarden) **Protonen** gefüllt!

Jedes Paket zirkuliert den Ring ca. **11 000 mal pro Sekunde!**

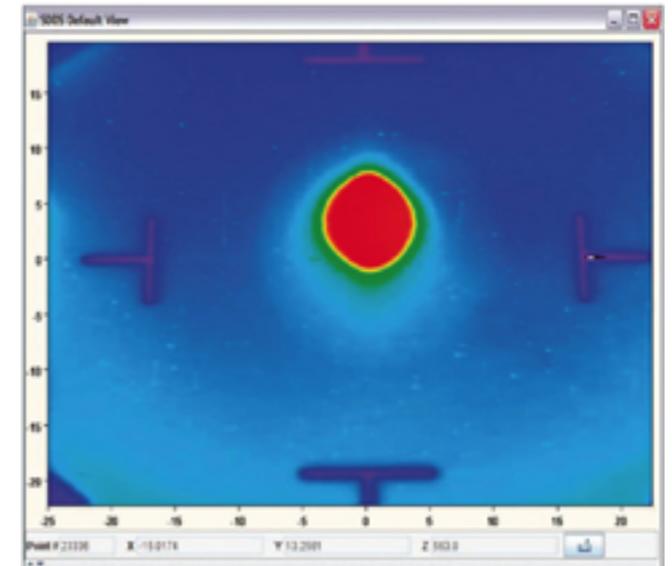
Alle 25 ns treffen sich 2 Pakete bei den Experimenten!

-->pro “Bunch-crossing” ca. 15 p-p Kollisionen

Die gesamte gespeicherte Energie in den Strahlen ist ca. **1000 MJ!**

≈ **kinetische Energie eines TGV (385 t) mit 180 km/h**

≈ **starker Blitzeinschlag**



Beschleunigungsstrecken

Geladene Teilchen werden **in elektrischen Feldern beschleunigt**

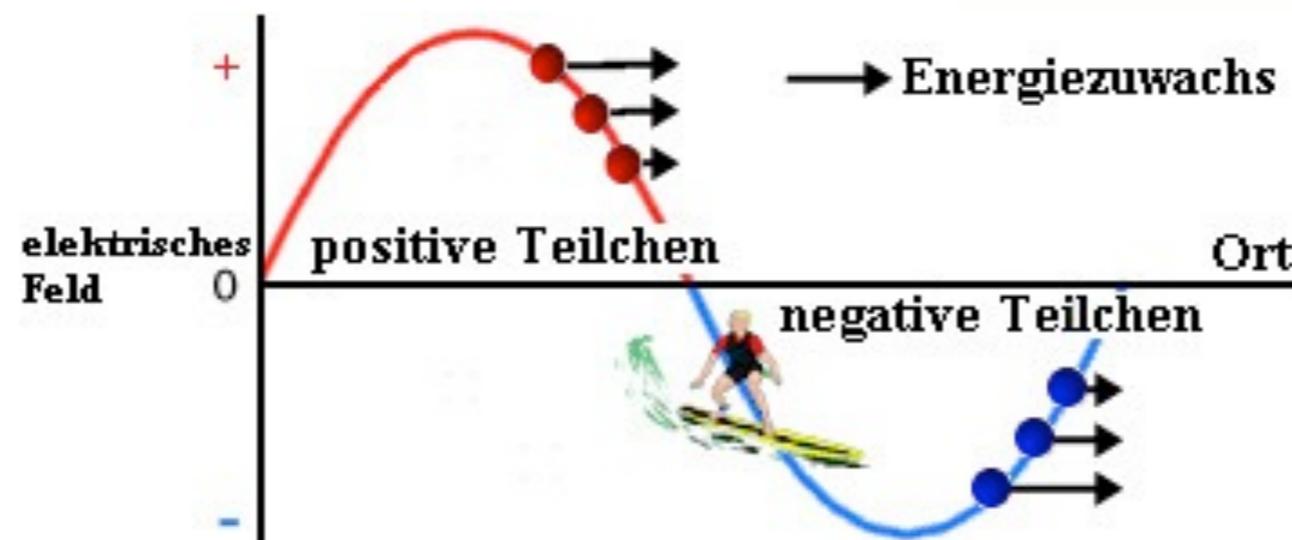
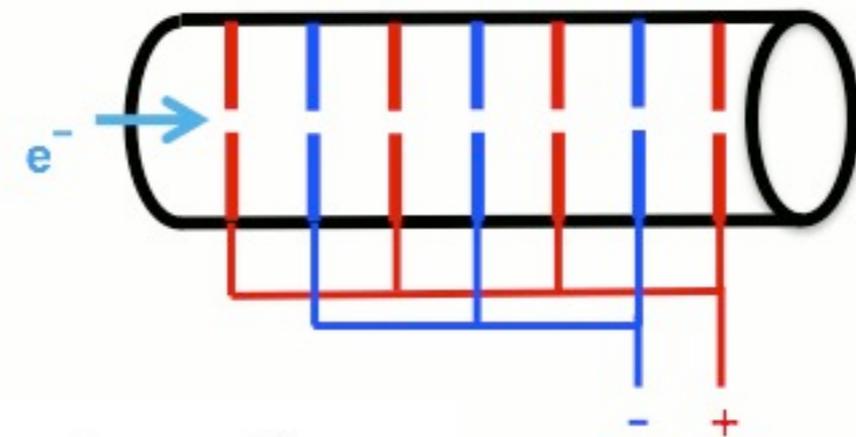
--> **Gleichspannung:**

- Generatoren können bis zu einige **100 kV** erreichen!

--> grössere Energiegewinne durch **Wechselspannung:**

- bis zu **35 MV pro Meter**

- mehrere Platten, sodass die Teilchen
immer in eine Richtung beschleunigt
werden



Synchrotronstrahlung

Wenn geladene Teilchen auf eine Kreisbahn “gezwungen” werden, strahlen sie **Synchrotronstrahlung** ab

--> diese Verluste sind **proportional zu m^{-4}** !

--> **je kleiner die Masse, um so grösser die Abstrahlung**

Der Verlust durch Synchrotronstrahlung ist **10^{13} (!) mal geringer für Protonen als für Elektronen** - bei selber Energie der Teilchen

--> LEP war (vermutlich) der letzte e^+e^- Kreisbeschleuniger

Dieses Problem gibt es bei linearen Beschleuniger nicht!

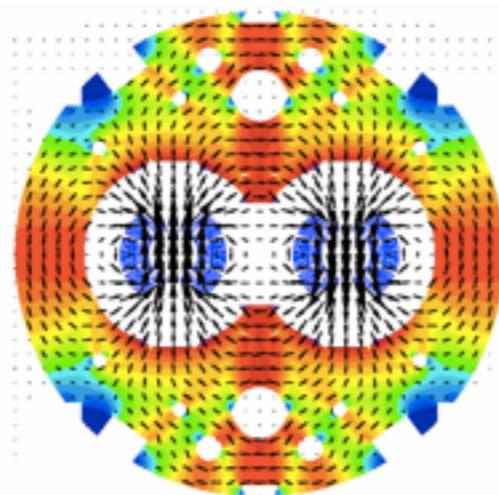
Ablenkmagneten

Ablenkmagneten: klingt einfach, ist es aber nicht!

Die Magneten des LHC:

- **15 m** lang
- **30 t** schwer
- **supraleitend** (130 t flüssiges Helium bei $T = 1.9 \text{ K}$)
--> **-271.25 °C** !
- Magnetfeld bis zu **8.33 T**

und es gibt **1232 Stück** davon!!



marc dünser



Betrieb

Erster Betrieb **10. September 2008!**

Grosser Tag für die Teilchenphysik...



...Liveübertragung BBC etc.

“Zwischenfall” 9 Tage später

Ursache:

ein kleiner elektrischer Widerstand ($\sim 200 \text{ n}\Omega$)

Wirkung:

--> Hitzeentwicklung durch riesigen Strom

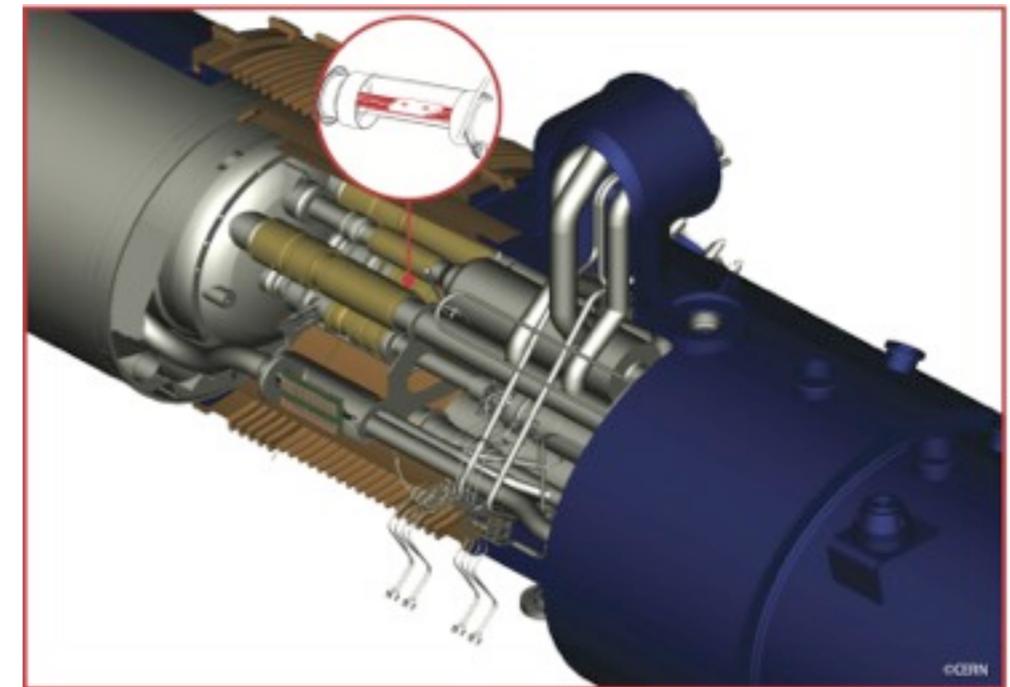
--> Verdampfen des flüssigen Heliums

--> Expansion (**Faktor 750!!**)

--> mechanische Schäden

Neustart erst ca. ein Jahr später

seither jedoch relativ Problemfrei!

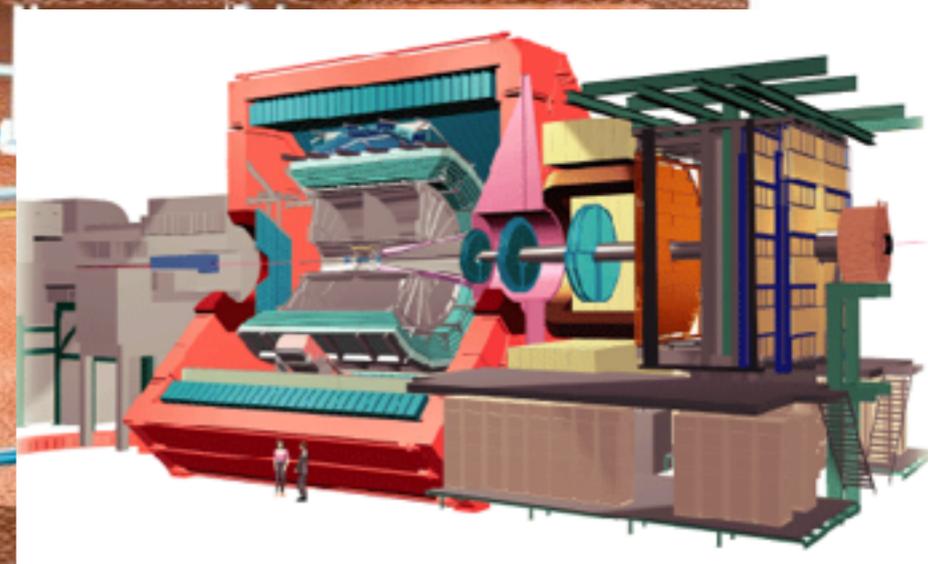
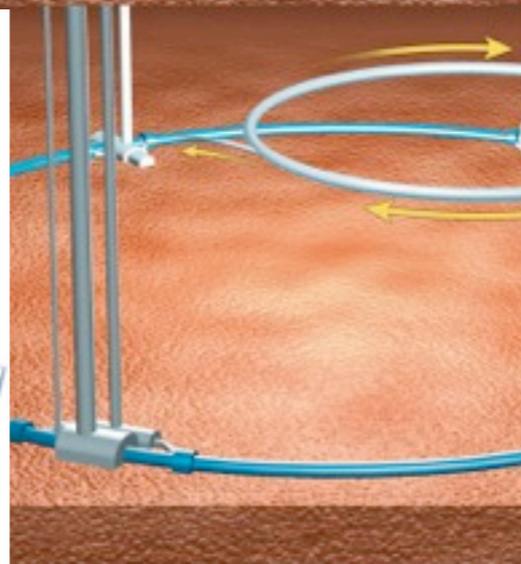
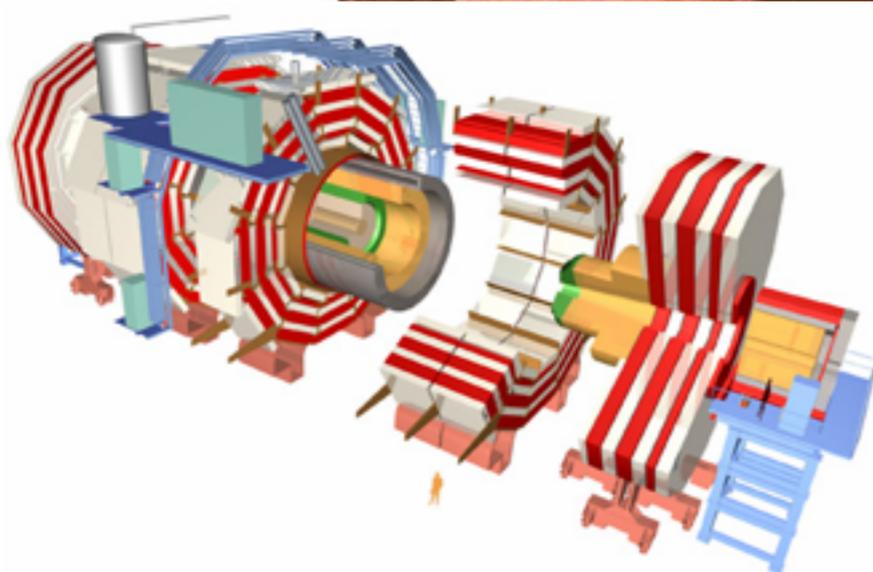
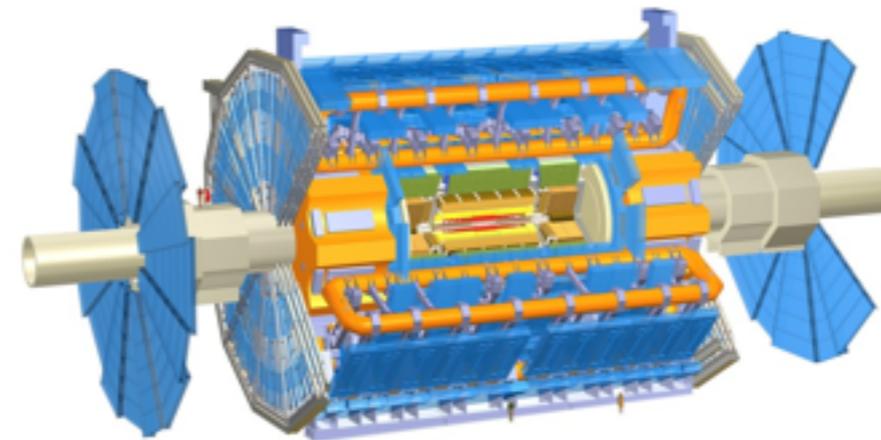


Detektoren

Um die vielen Teilchenkollisionen aufzuzeic

oren

Am L





Messungen

Um auf alle Eigenschaften eines Teilchens rückschliessen zu können, muss man folgende Grössen kennen:

Impuls (Vektorielle Grösse)

Energie

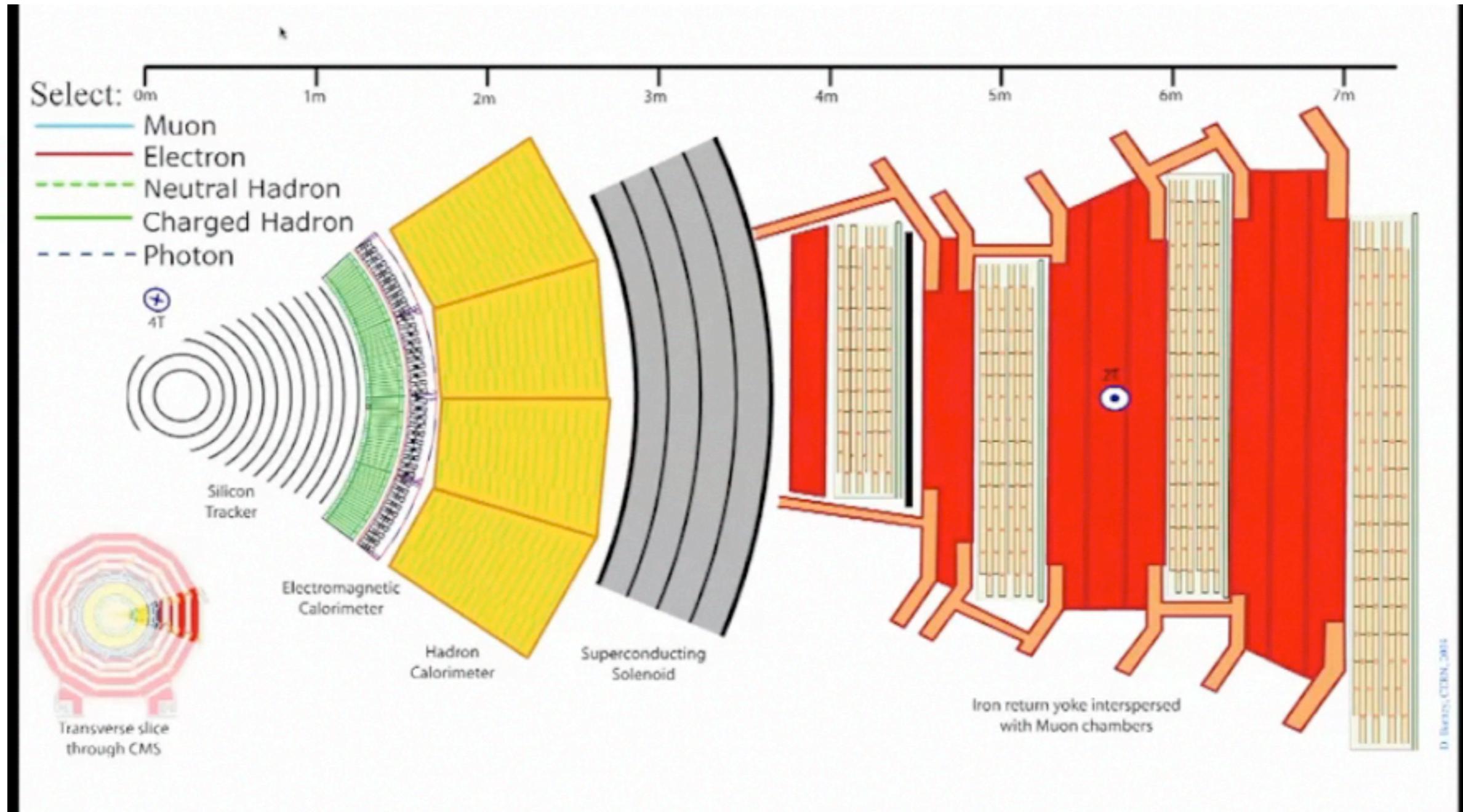
Daraus kann man auf die **Masse**, den **Typ**, die **Ladung** und die **Geschwindigkeit** schliessen!

Aufbau eines Teilchendetektors

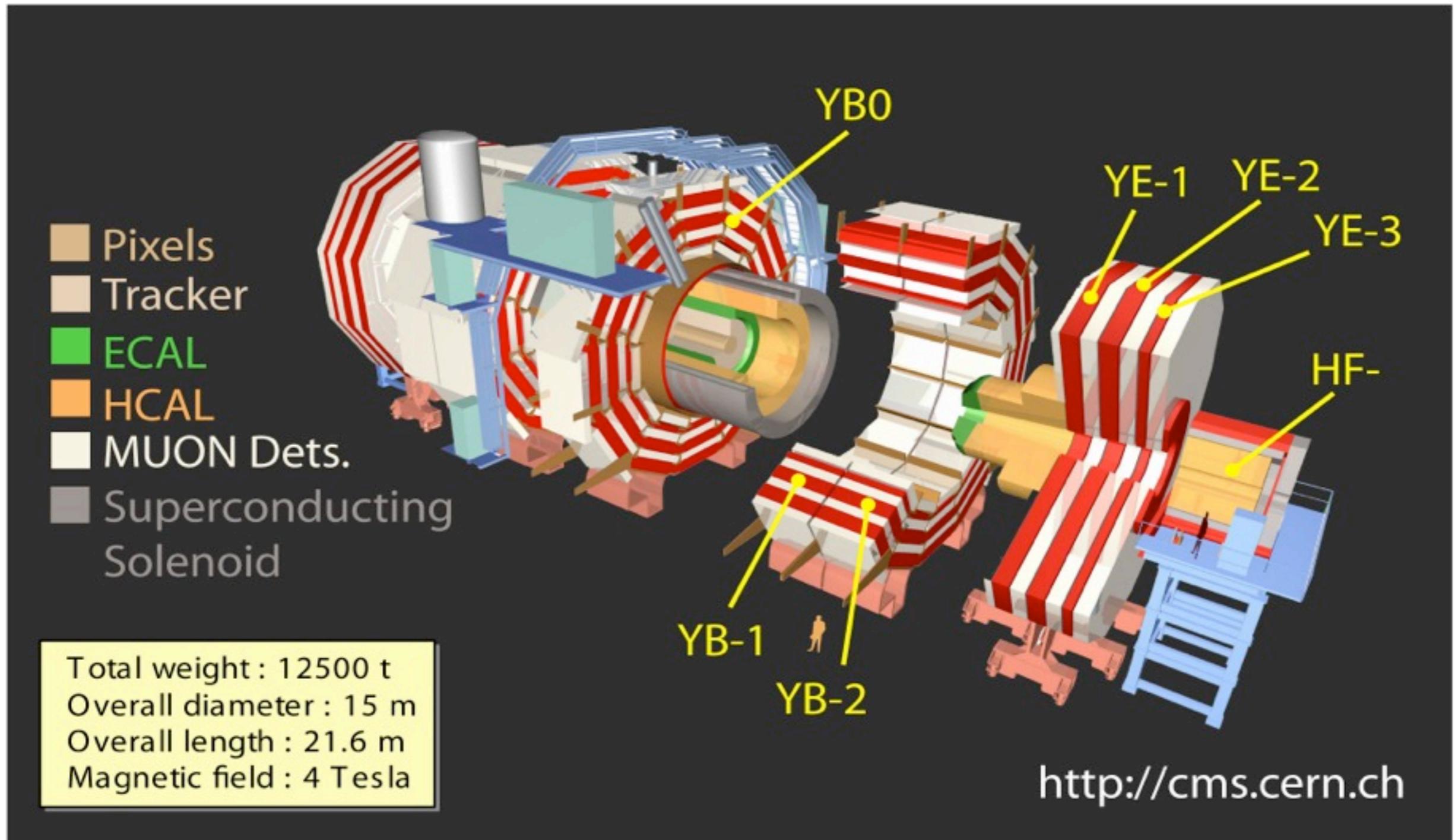
Mit sehr wenigen Ausnahmen, haben grosse Teilchenexperimente immer denselben zwiebelförmigen Aufbau (von innen nach aussen):

- **Pixel- & Streifendetektor** zur Spurenvermessung ← *Ort & Impulsinformation*
- verschiedene **Kalorimeter** zur Energiemessung ← *Energie*
- **Muonenkammern** zur präzisen Vermessung von Muonen ← *Ort & Impulsinformation*
- irgendwo dazwischen oder aussen: **starke Magnete(n)** zur Ablenkung geladener Teilchen

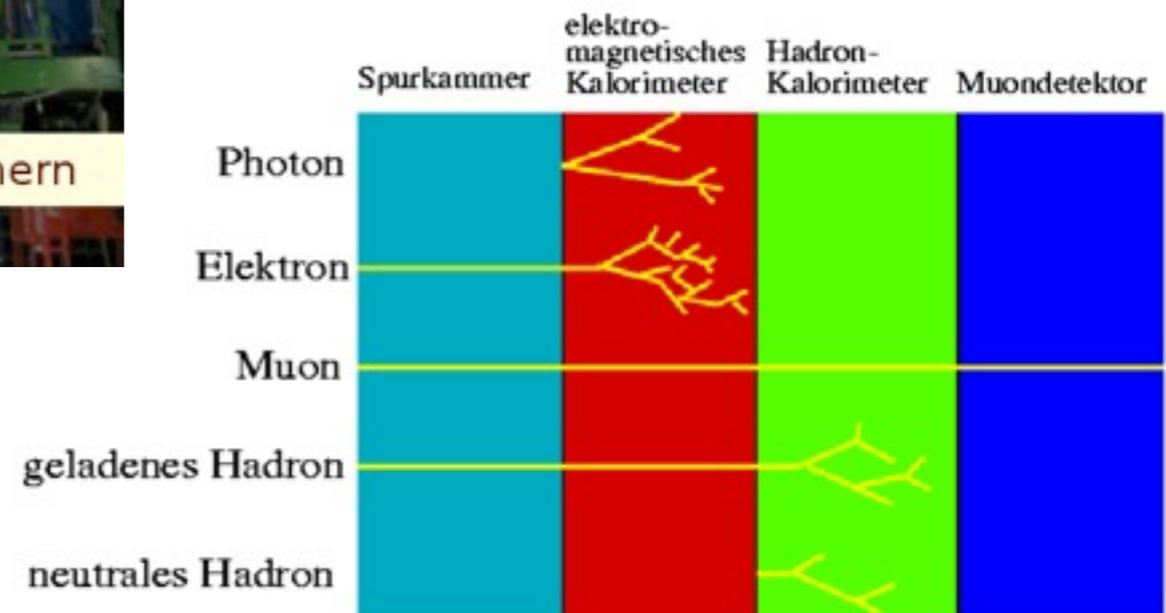
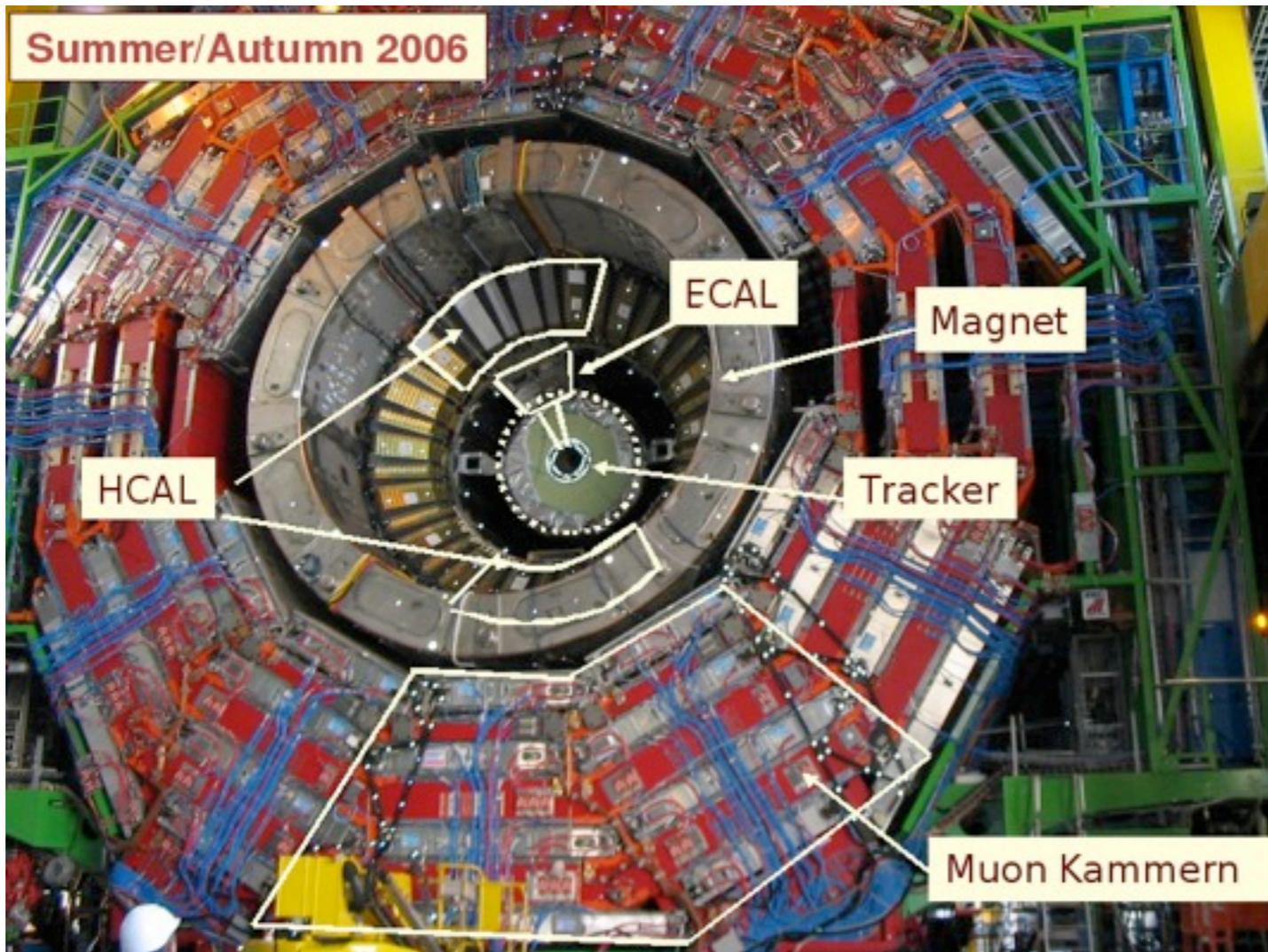
Schematischer Aufbau - CMS



Schematischer Aufbau - CMS



Schematischer Aufbau - CMS



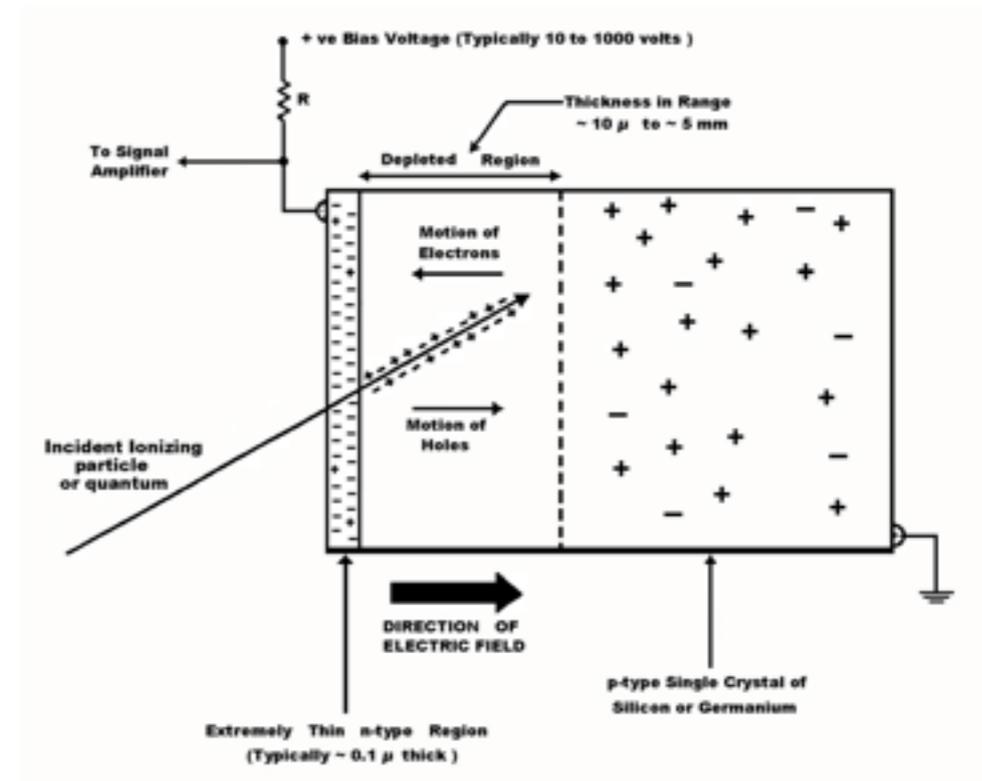
Spurendetektor - Prinzip

geladene Teilchen ionisieren Materie beim Durchfliegen

--> Ionisation: “trennen” von Elektronen und Atomkernen

Halbleiter (Silizium) eignen sich hervorragend zur Messung dieser Ladungen

--> p-n dotierte Siliziumschicht in Sperrichtung

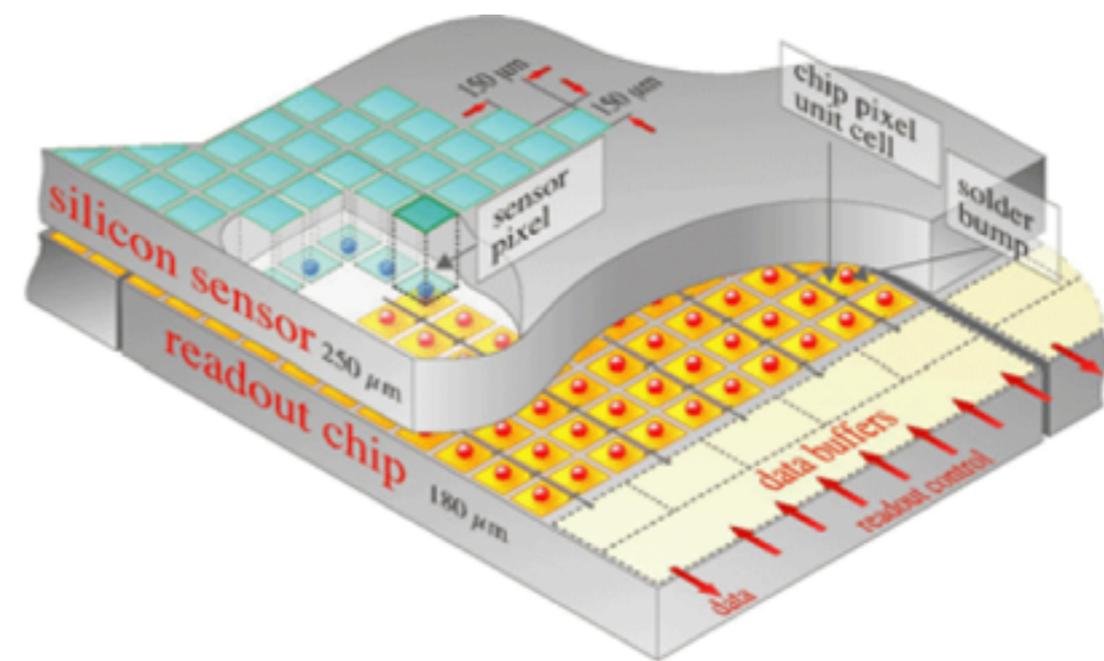
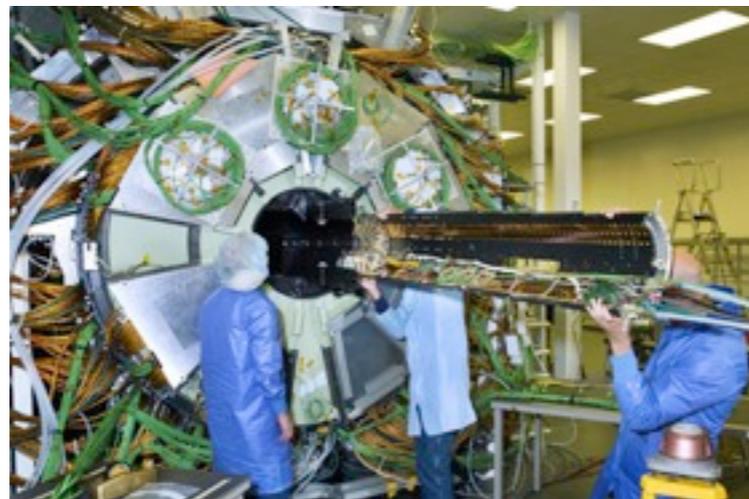


Funktionsprinzip sehr **ähnlich** dem **einer Digitalkamera**, aber...

Spurendetektor - Pixel

CMS Pixel Detektor hat:

- > **3 Lagen** bei 4.3, 7.2, 11 cm Abstand vom Strahl
- > **~1 m² aktive Fläche**
- > Pixelgrösse von **100 x 150 μm²**
- > ca. **66 Millionen einzelne Pixel!**
- > kann **alle 25 ns** ausgelesen werden!



--> entspricht einer **66 Megapixel Kamera** mit der man **40 Millionen Bilder pro Sekunde** machen kann!!

Spurendetektor - Streifen

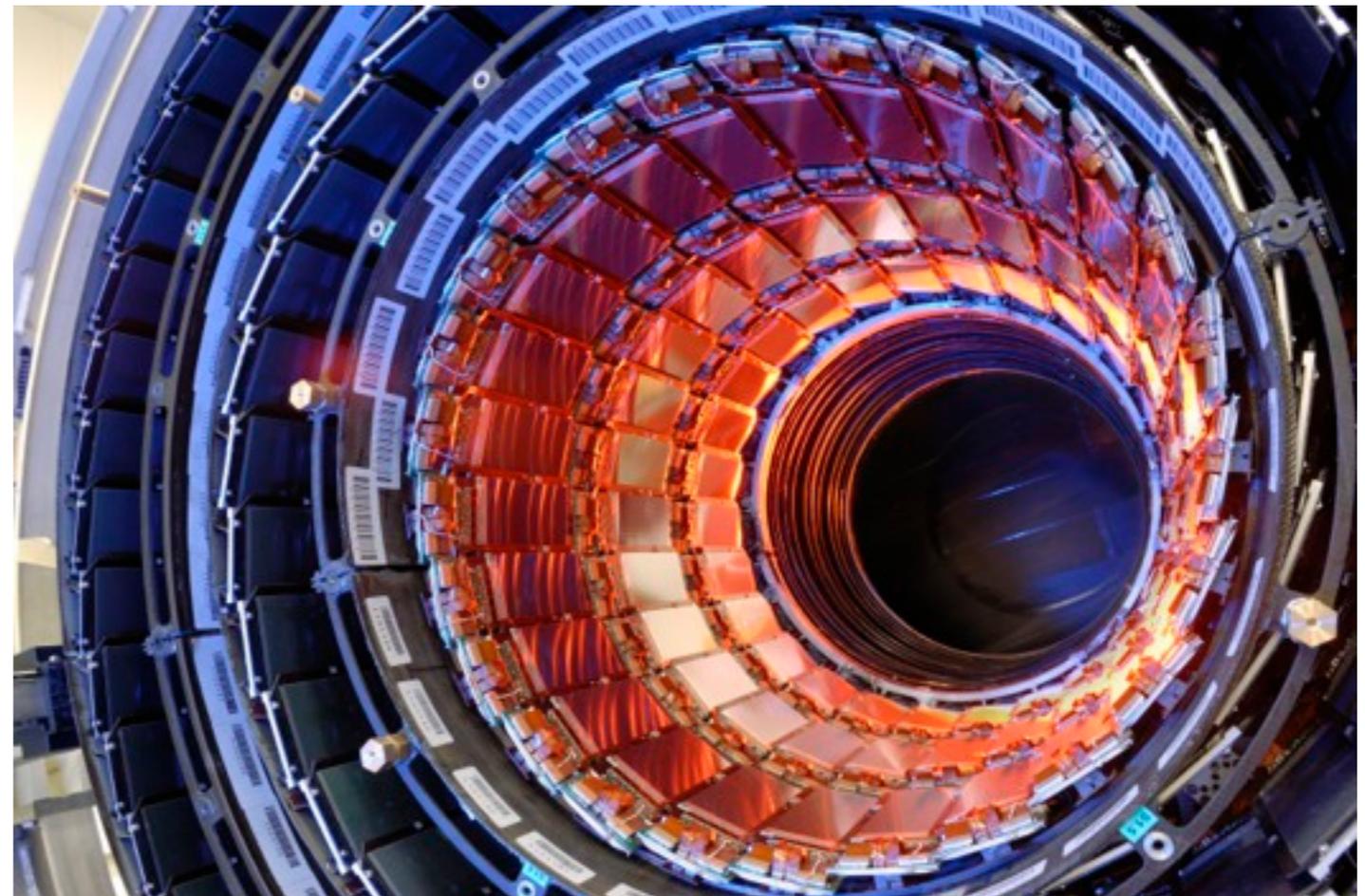
Um Auslesekanäle zu sparen, sind die nächsten ~ 10 Lagen keine Pixel, sondern sogenannte Siliziumstreifendetektoren

--> selbes physikalisches Prinzip

--> lange, schmale Streifen

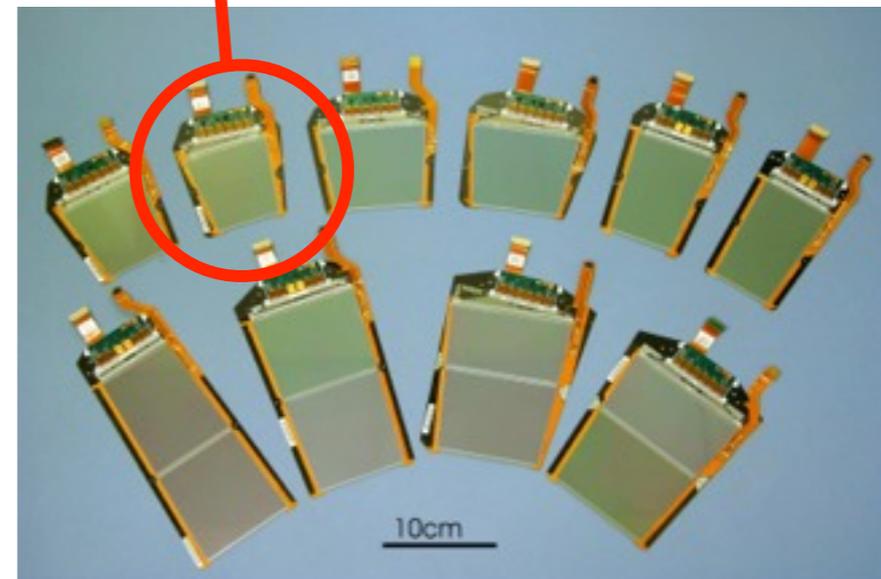
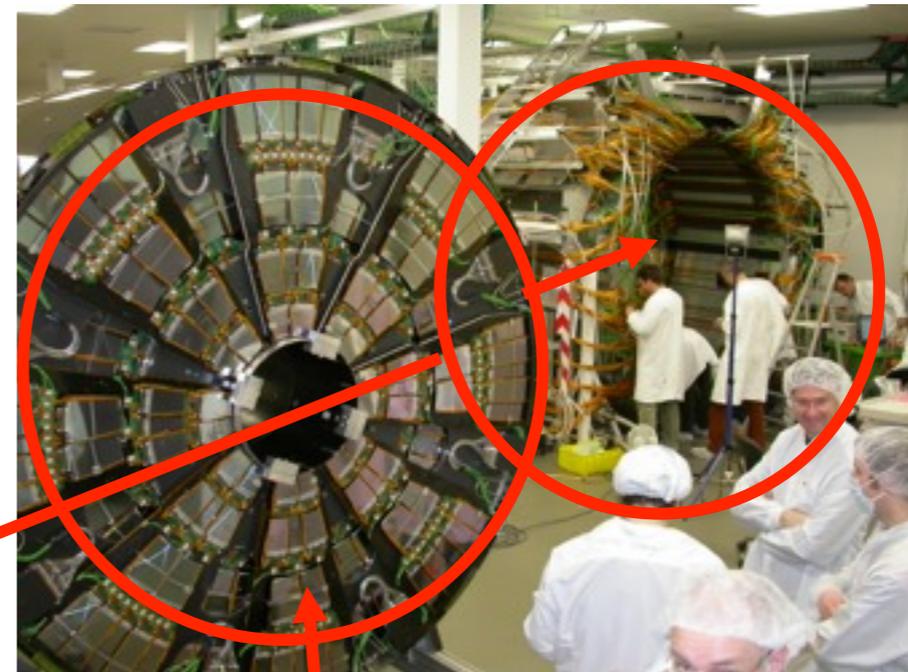
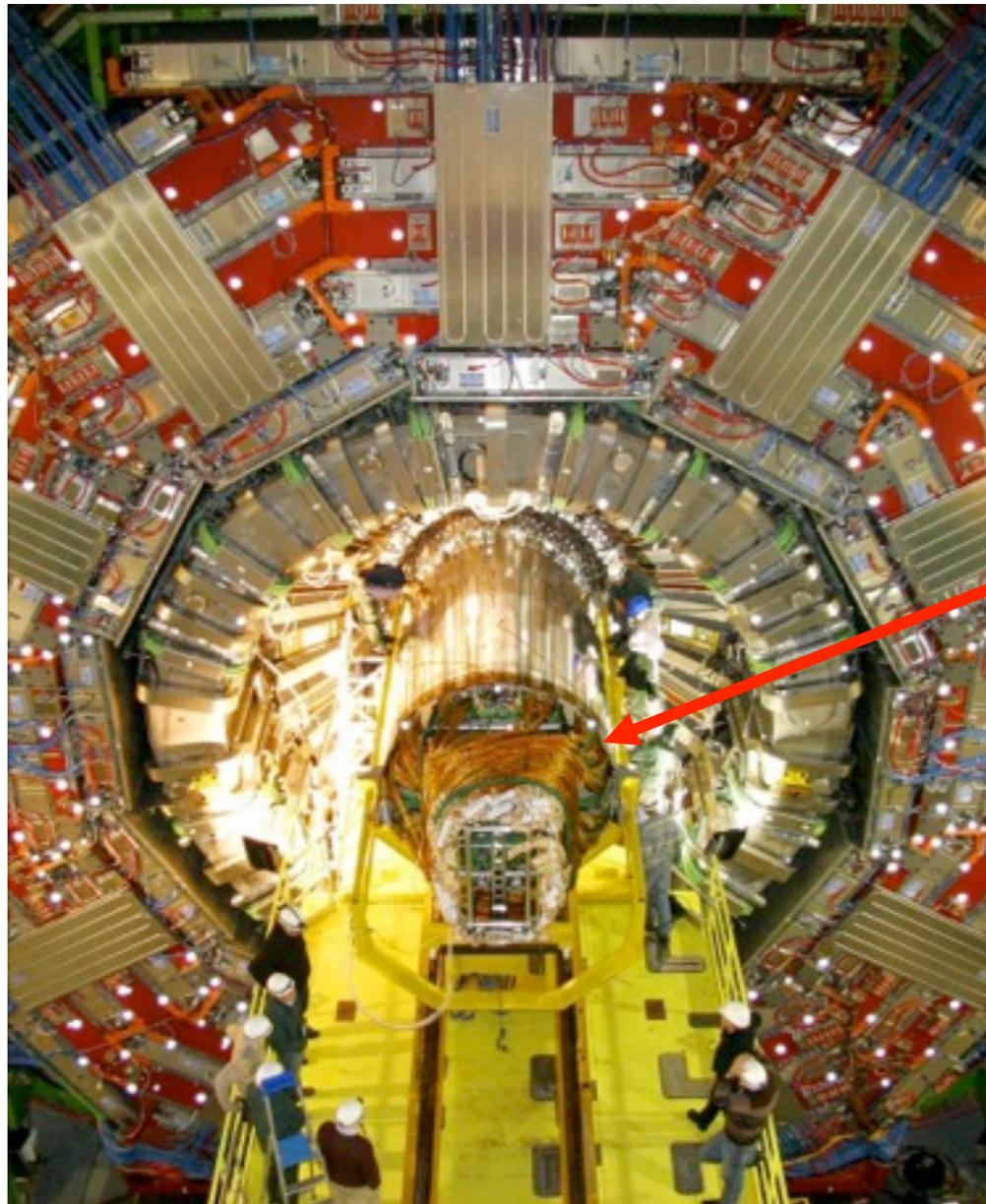
--> $80 \mu\text{m}$ breit

--> $\sim 200 \text{ m}^2$ aktive Fläche
ca. 1 Tennisfeld



Nachteil dieser Detektoren: neutrale Teilchen können nicht gemessen werden!

Spurendetektor - Streifen



Kalorimeter - Elektromagnetisch

Kalorimeter messen die Energie der Teilchen.

2 verschiedene Typen:

--> **elektromagnetisch**

--> **hadronisch**

Das **elektromagnetische Kalorimeter** misst grossteils nur die Energie von **Photonen & Elektronen (Positronen)**

In CMS macht das ein sogenannter **Szintillatorkristall**:

--> der Kristall **emittiert Licht** wenn Teilchen hindurchfliegen

--> die Menge des **Lichts** is **proportional** zur deponierten **Energie**

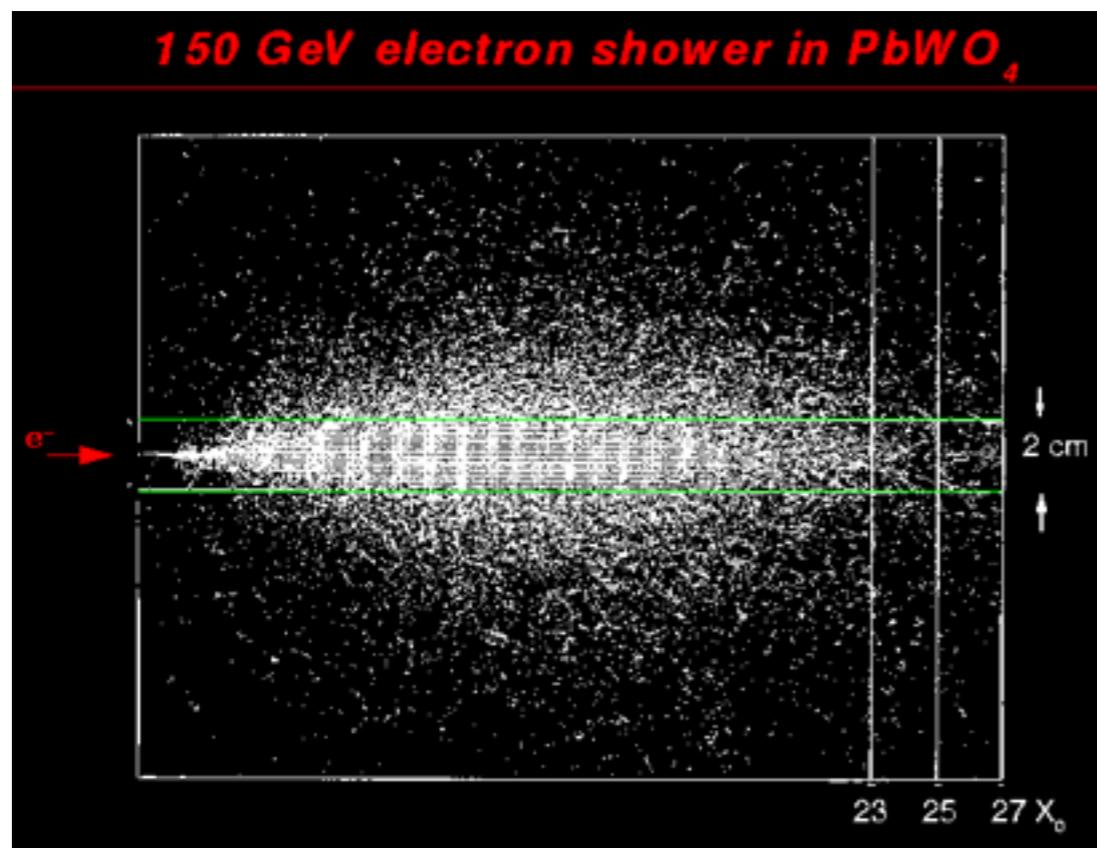
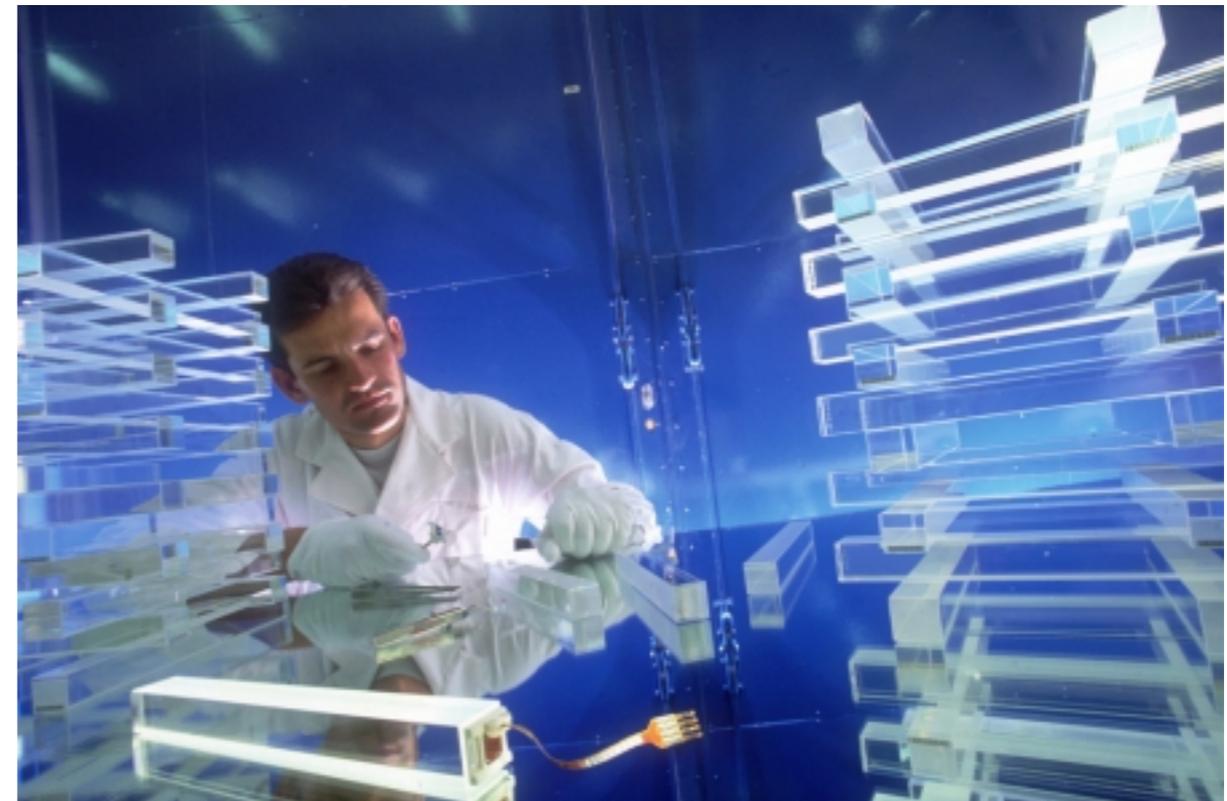
--> wenn man die Teilchen **vollständig abbremst**, kann man auf die gesamte Energie rückschliessen

Kalorimeter - Elektromagnetisch

Kristall:

Bleiwolframat (PbWO_4)

Dichte: $\sim 9000 \text{ kg m}^{-3}$



Kalorimeter - Hadronisch

Hadronen (Teilchen aus Quarks) interagieren auch durch die starke Wechselwirkung
werden im EM Kalorimeter nicht gestoppt

--> es muss etwas **schwereres** her!

--> im HCAL werden u. a. **Protonen, Neutronen,
Pionen, Kaonen** "absorbiert"



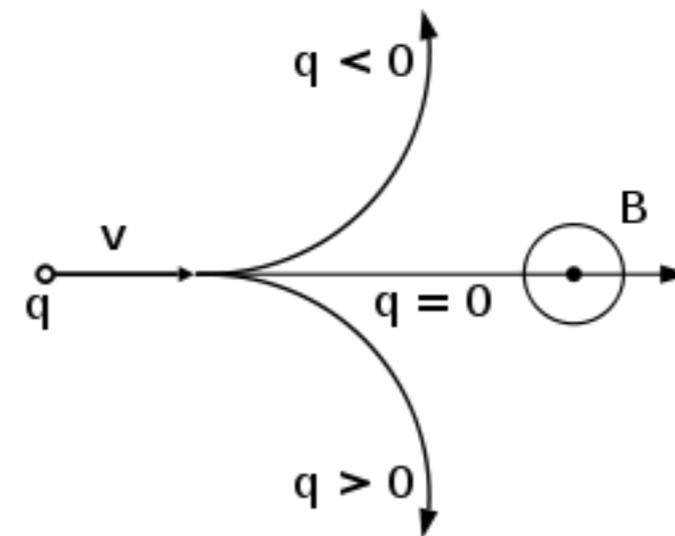
In CMS: ca. 10 **5 cm Messing** - **3 cm Szintillator** Schichten

Supraleitender Magnet

Zur Bestimmung von Impuls und Ladung von geladenen Teilchen, sind alle bisher genannten Detektoren innerhalb eines supraleitenden Magneten untergebracht

Physikalische Grundlage ist die Lorentzkraft:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$



Aus der Krümmung einer Teilchenspur lässt sich der Impuls bestimmen:

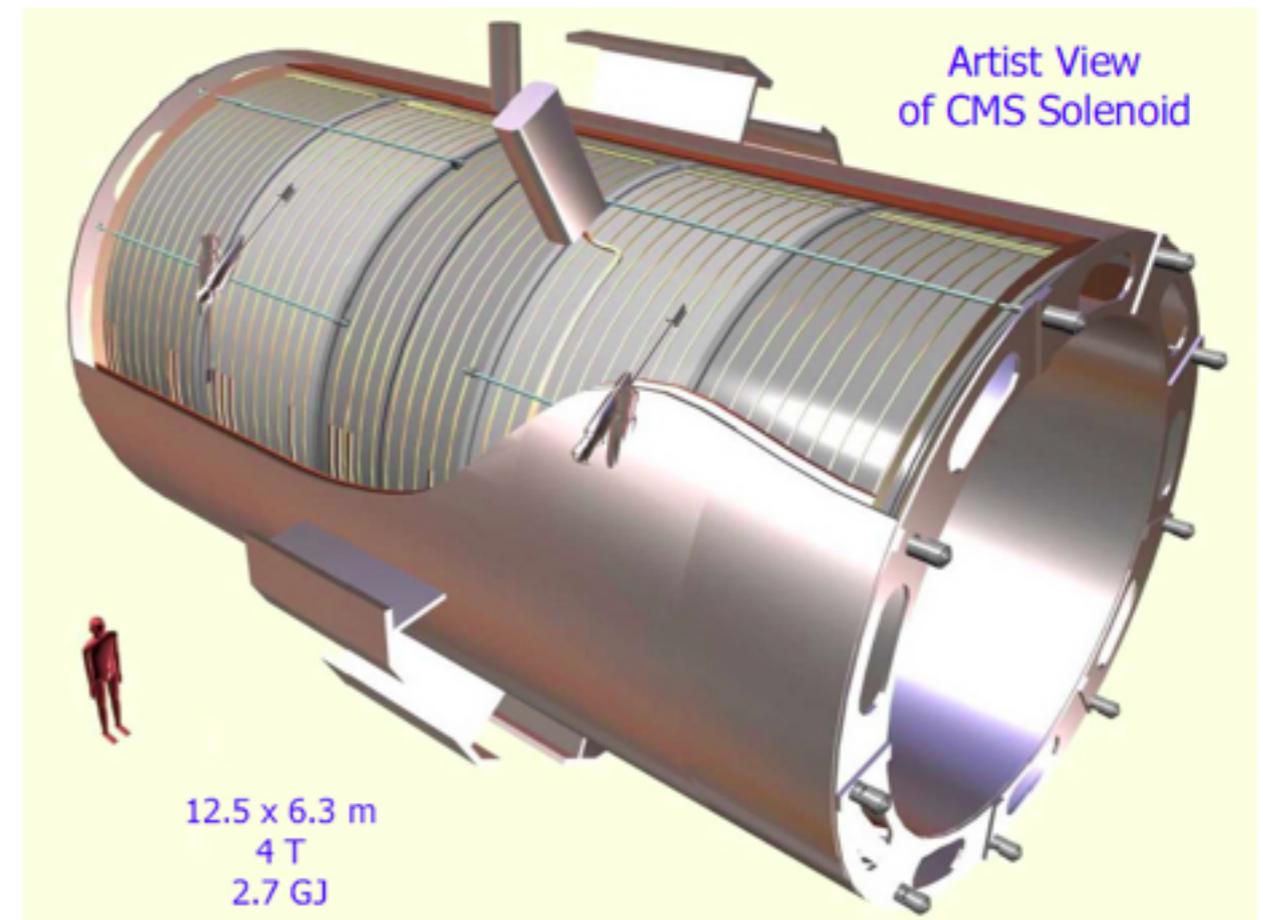
$$r \propto p/qB$$

Supraleitender Magnet

Zur Bestimmung von Impuls und Ladung von geladenen Teilchen, sind alle bisher genannten Detektoren innerhalb eines supraleitenden Magneten untergebracht

Das CMS Solenoid hat:

- > **~6 m Durchmesser!**
- > **3.8 T Magnetfeld** ($\sim 10^5 B_E$)
- > **19 000 Ampere**
- > **2500 MJ** gespeicherte Energie



Der CMS Magnet ist somit der energiereichste Magnet der Welt!

Rückführjoch

Um das Magnetfeld in Form zu halten, gibt es in CMS ein riesiges **Rückführjoch aus massivem Stahl!**

--> schwerster Teil des Detektors

--> ca. **10 000 t**

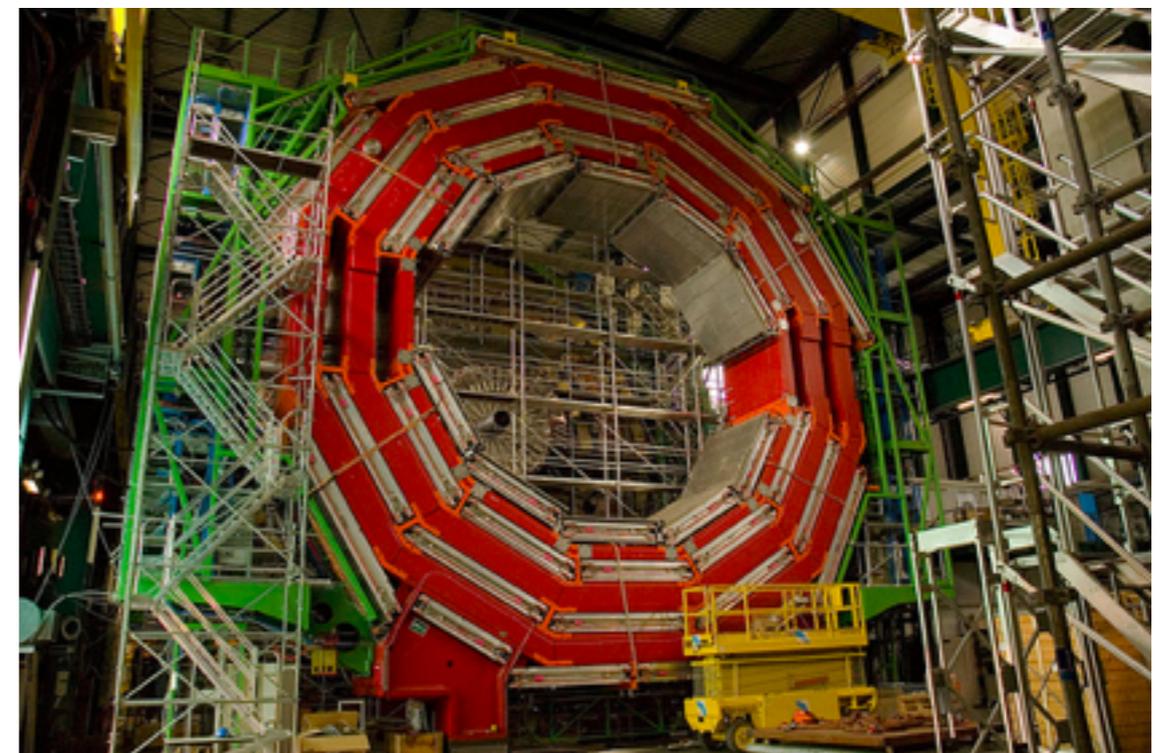
--> alleine etwa so schwer wie der **Eiffelturm!**



Muonkammern

Muonen sind die schweren Brüder der Elektronen und interagieren nur sehr schwach mit Materie!

- > nach dem Magneten die letzten messbaren Teilchen (idealerweise)
- > werden präzise in Muonkammern gemessen
- > innerhalb des Rückführjochs
- > 3 verschiedene Arten von Kammern



Neutrinos

Neutrinos interagieren noch sehr viel weniger mit Materie

--> im Detektor nicht nachweisbar!

--> was tun? Man macht sich die **Impulserhaltung** zu Nutze!

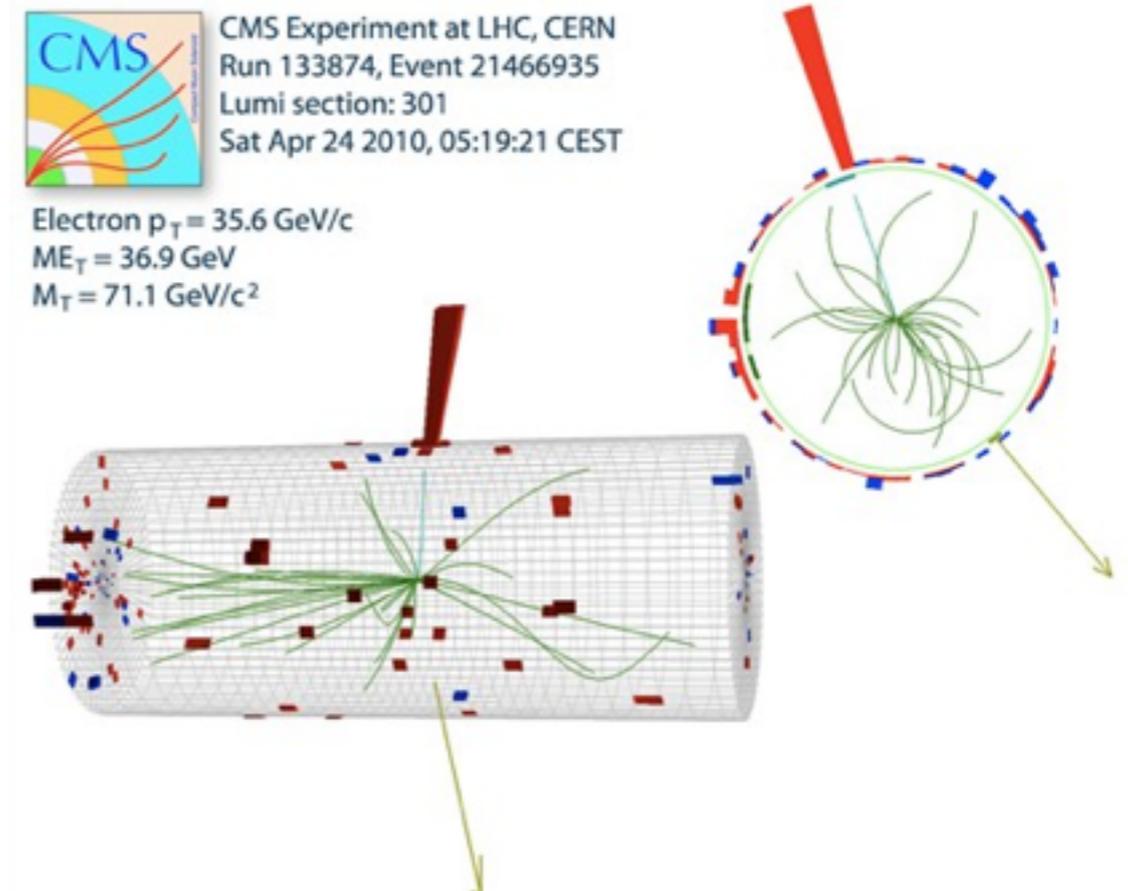
In der Ebene normal zur Strahlrichtung
ist der Anfangsimpuls gleich null!

Das bedeutet, dass der Impuls nach der
Kollision auch gleich null sein muss!!

--> durch dieses Prinzip kann man

1) Neutrinos indirekt nachweisen

2) neuartige Teilchen entdecken, die den Detektor verlassen!!





Auslese - Trigger

40 Millionen Kollisionen pro Sekunde sind auch für die besten & grössten Computer zu viel!

--> man muss sich die **interessanten Kollisionen** herauspicken

--> ausgefeilte **Hardware und Software Algorithmen**

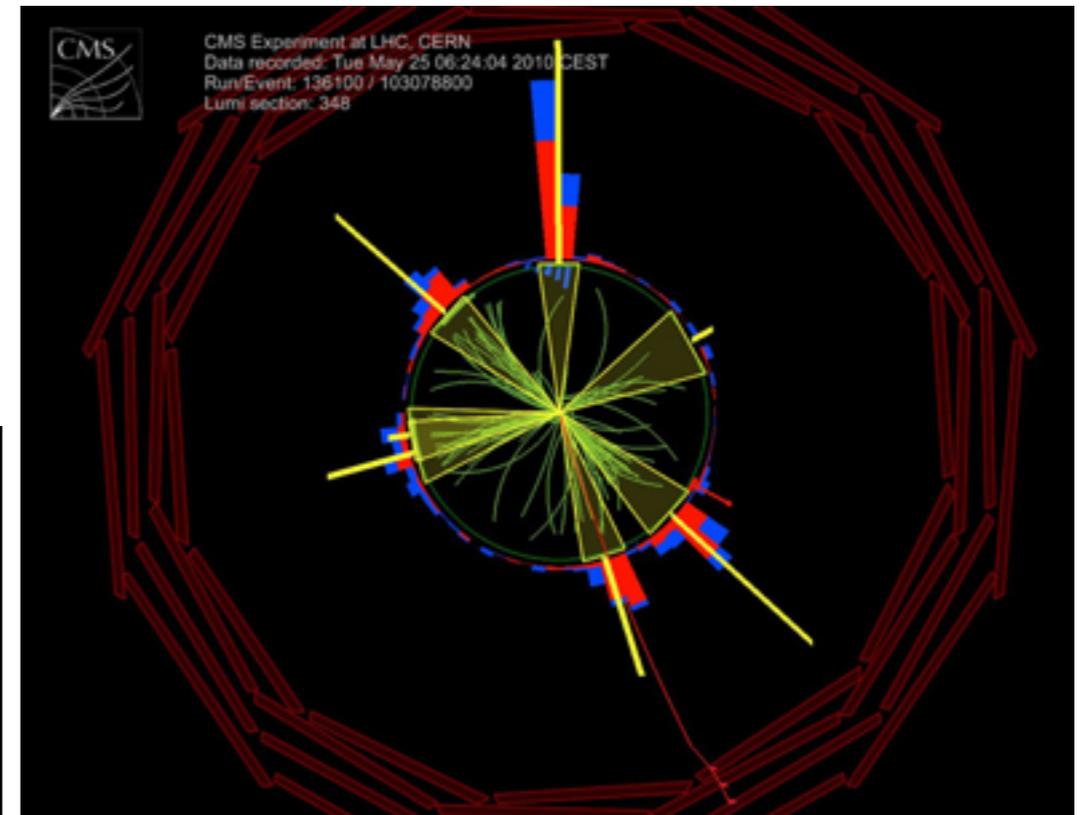
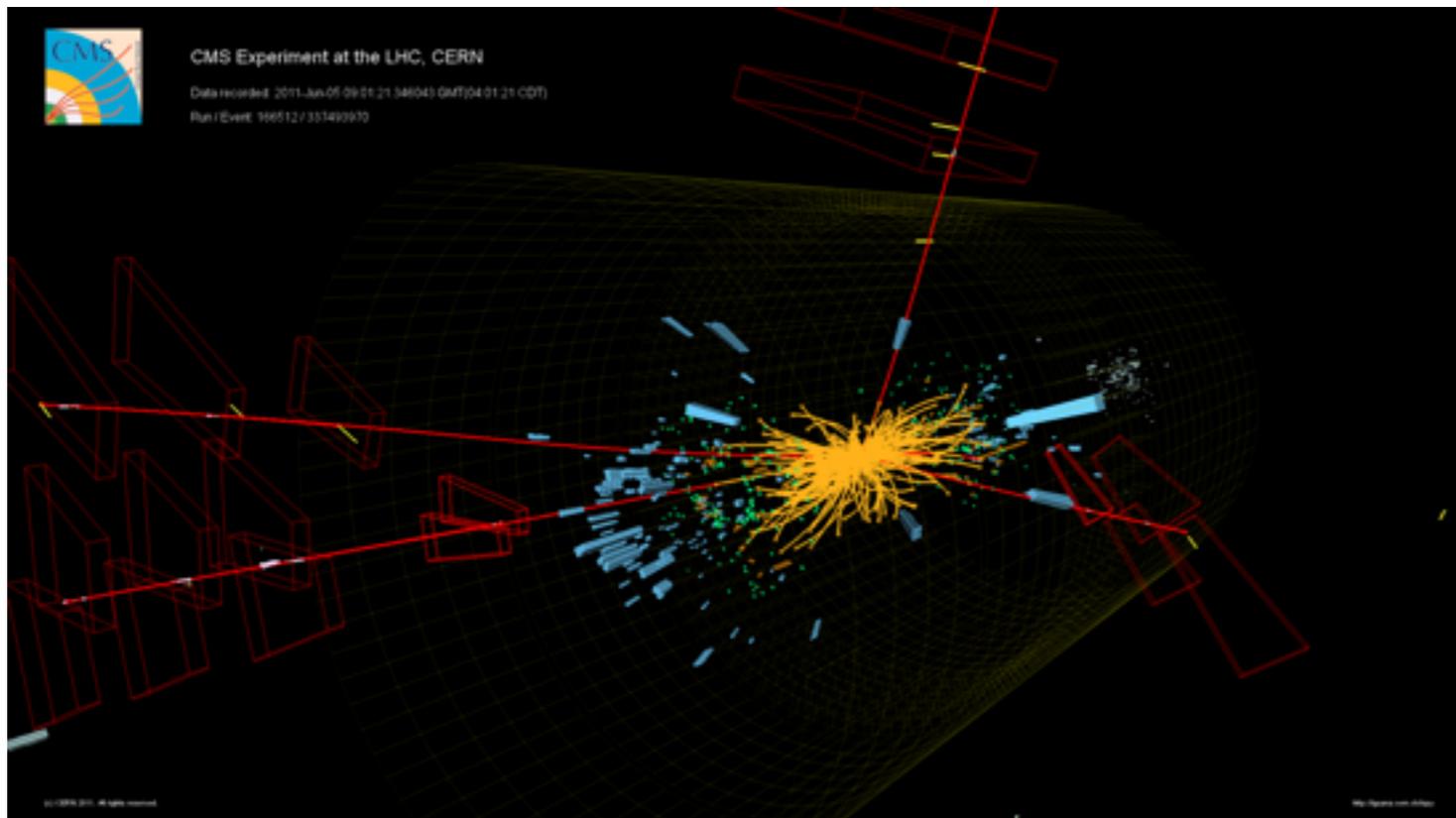
--> am Ende werden **“nur” ca. 500 Kollisionen pro Sekunde gespeichert**

--> **bei ca. 1-2 MB pro “Event” macht das trotzdem ca. 1 GB pro Sekunde!**

Auslese - Rekonstruktion

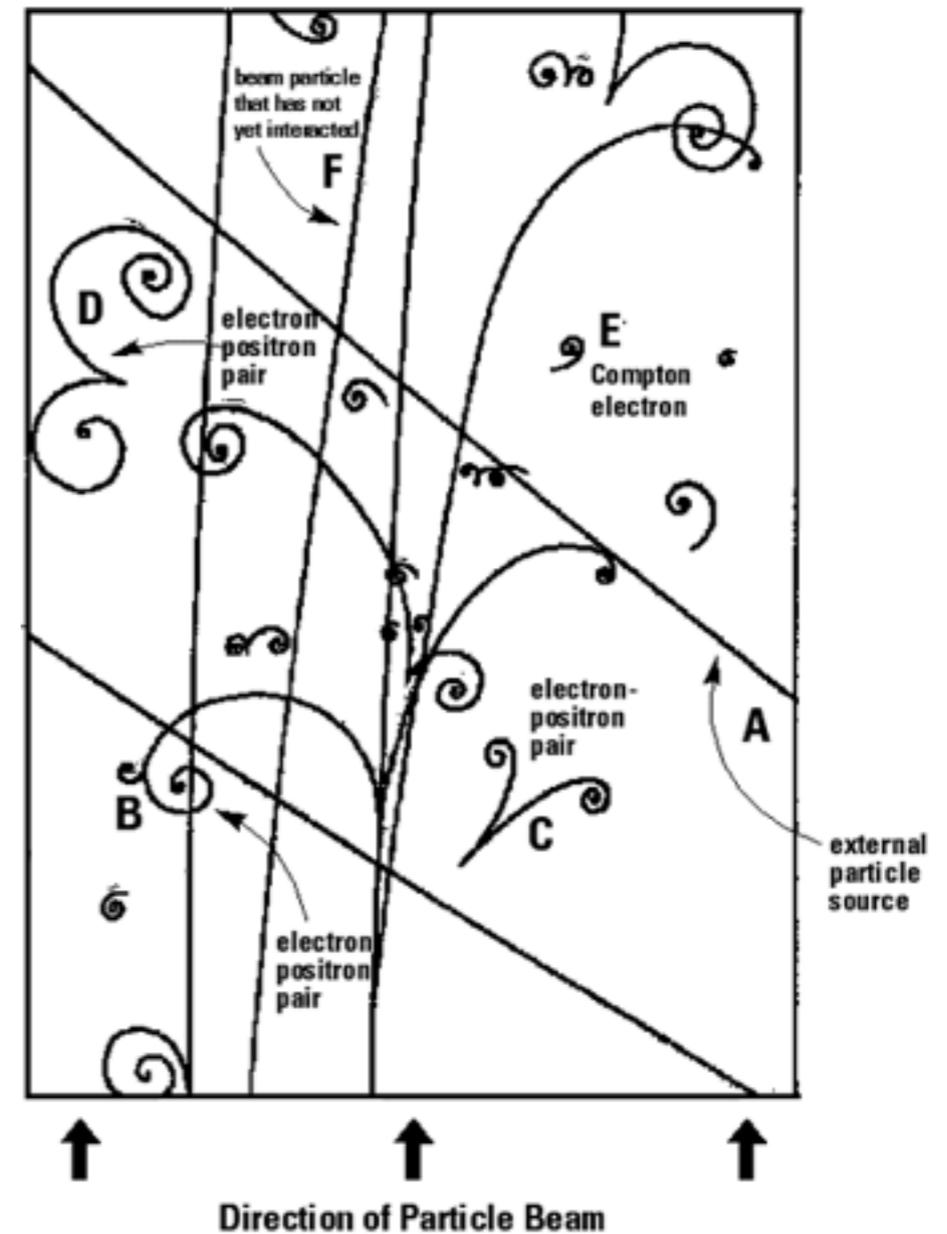
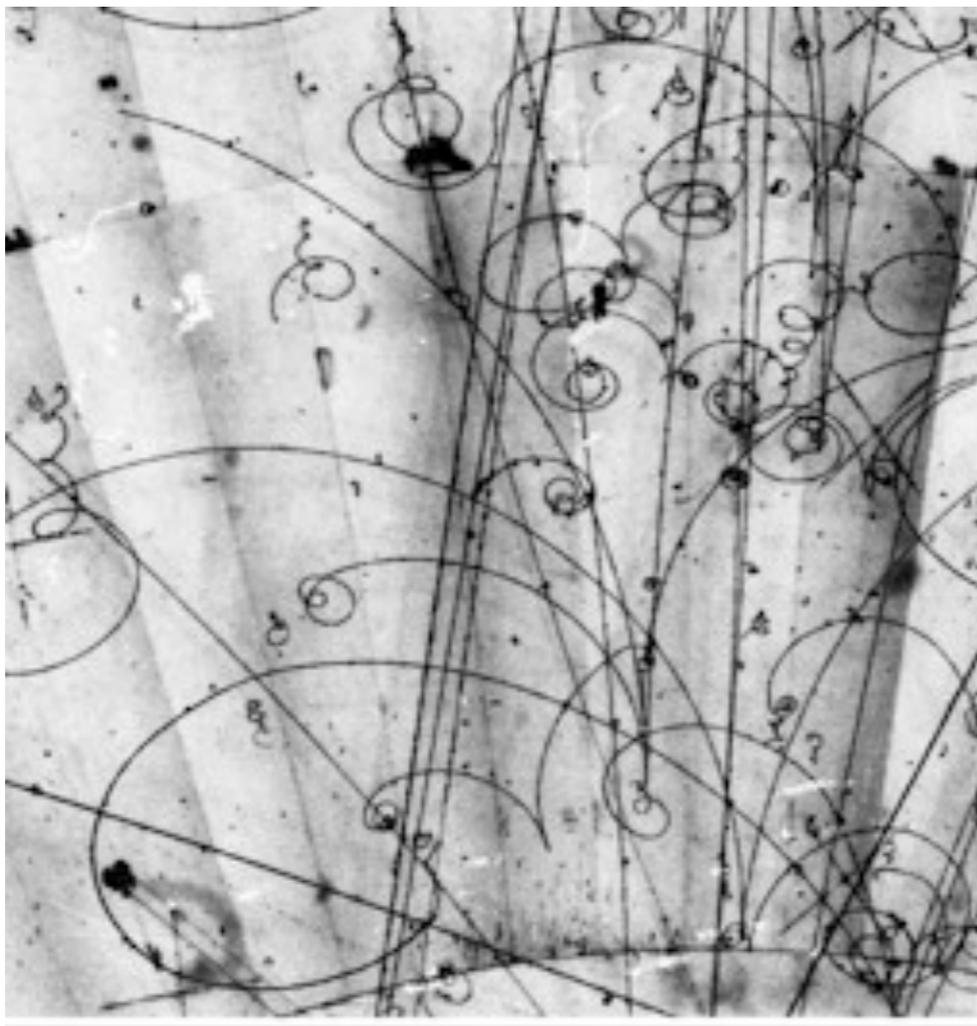
Wenn ein Event den Trigger passiert hat, wird es in einer grossen Computerfarm
komplett rekonstruiert

- > sehr komplizierte Software
- > aber hübsche Bilder ;)



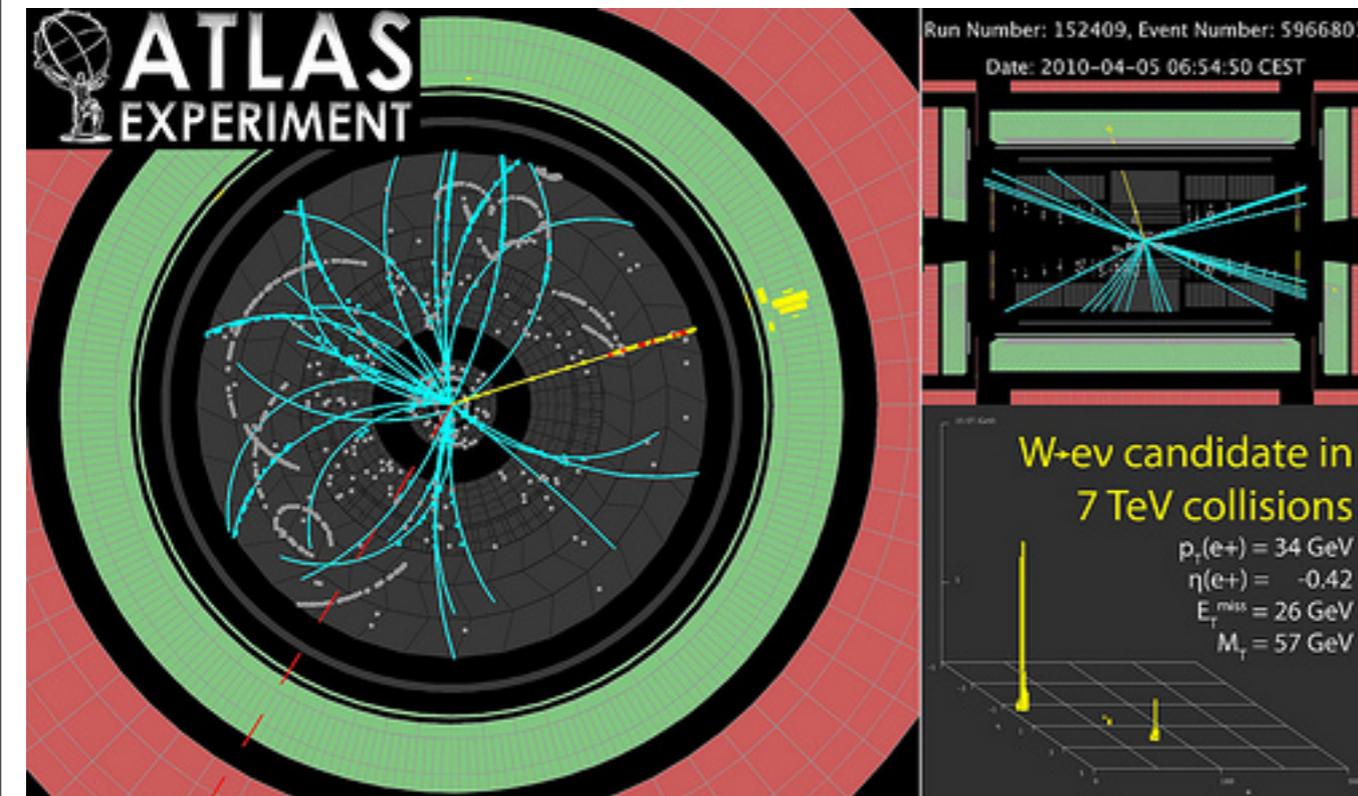
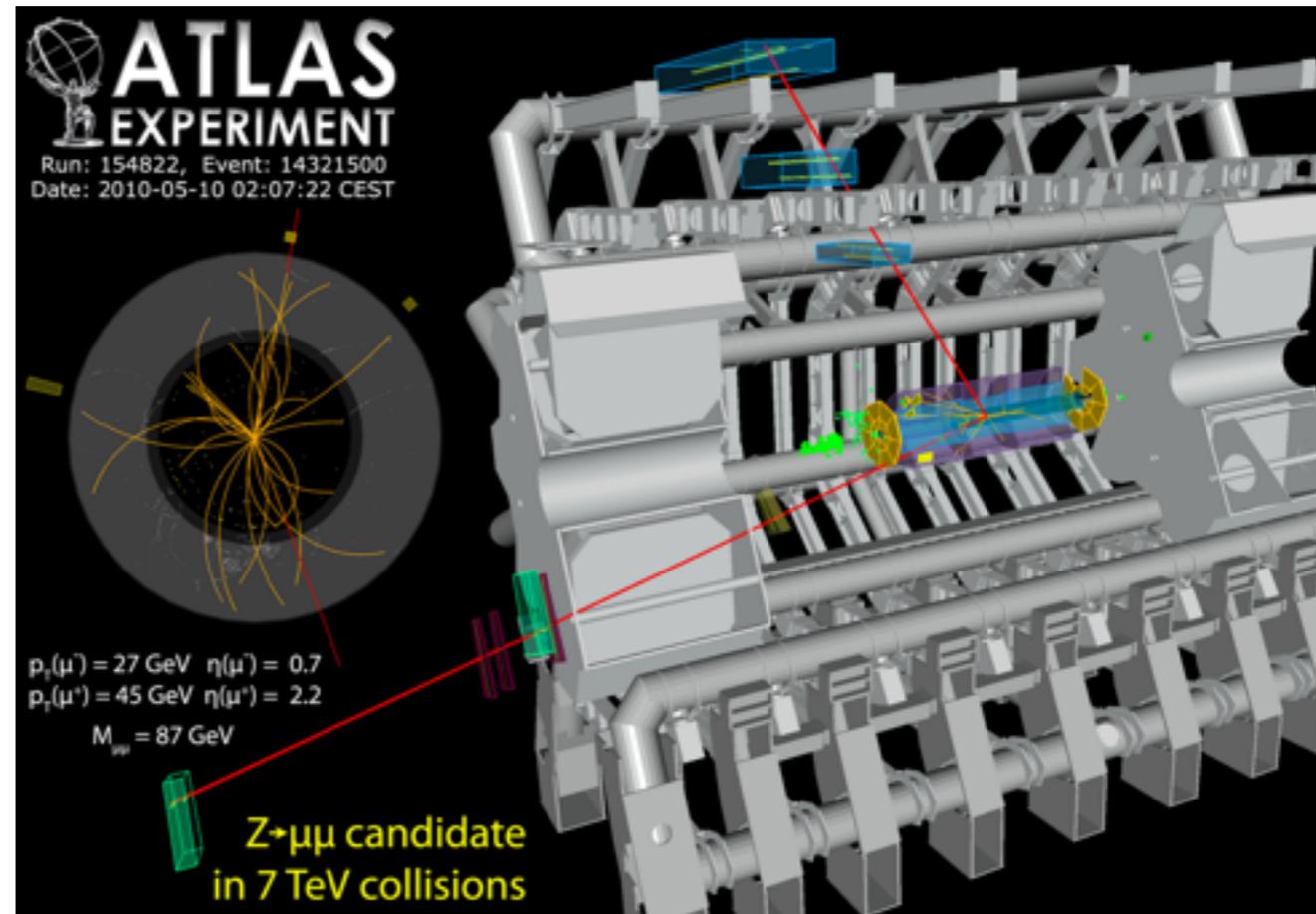
Auslese - Rekonstruktion

Früher: Photos von Nebelkammern:



ATLAS

ATLAS hat auch schöne Bilder



Analyse

Mit **500** aufgezeichneten Kollisionen pro Sekunde und ca. **100 Tage** pro Jahr und ca. **10 std** Operation pro Tag (gute schätzung?) sind das ca. **2 Mrd Kollisionen pro Jahr!**

- die 4 grossen Experimente am LHC haben 2010 ca. **13 PB Daten** generiert!

- unmöglich alle “bei Hand” anzuschauen!

- stattdessen verwenden wir massgeschneiderte **Analyseprogramme**

```
282 void SSDAnalysis::FillAnalysisTree(){
283   fCounter.fill(fCutnames[0]);
284   bool TChiSlepSnu(false);
285   if (!fIsData){
286     fMsugraCount->Fill(fTR->M0, fTR->M12);
287     if (fTR->process > 0 && fTR->process < 11) fProcessCount[fTR->process-1]->Fill(fTR->M0, fTR->M12);
288     for (int i = 0; i < fTR->NGenLeptons; i++) {
289       if ( abs(fTR->GenLeptonID[i]) == 12 || abs(fTR->GenLeptonID[i]) == 14 || abs(fTR->GenLeptonID[i]) == 16) continue;
290       if ( abs(fTR->GenLeptonMID[i]) == 1000024 ) TChiSlepSnu = true;
291     }
292     TChiSlepSnu ? fTChiSlepSnuCount->Fill(fTR->MassGlu, fTR->MassLSP) : fTChiSlepSlepCount->Fill(fTR->MassGlu, fTR->MassLSP);
293   }
294   // initial event selection: good event trigger, good primary vertex...
295   if( !IsGoodEvent() ) return;
296   fCounter.fill(fCutnames[1]);
297   ResetTree();
298
299   // Trigger selection
300   // if(fIsData && FillTriggers(fHLTPaths) == false) return;
301   FillTriggers();
302   fCounter.fill(fCutnames[2]);
303
304   // Do object selections
305   vector<int> selectedMuInd = MuonSelection(      &UserAnalysisBase::IsLooseMu);
306   vector<int> selectedElInd = ElectronSelection( &UserAnalysisBase::IsLooseEl);
307   vector<int> selectedJetInd = PFJetSelection(20., 2.5, &UserAnalysisBase::IsGoodBasicPFJet);
308   fTngmus = std::min( (int)selectedMuInd.size(), fMaxNmus );
309   fTngels = std::min( (int)selectedElInd.size(), fMaxNeles);
310   fTngjets = std::min( (int)selectedJetInd.size(), fMaxNjets);
311
312   // Require at least one loose lepton
313   if( (fTngmus + fTngels) < 1 ) return;
314   fCounter.fill(fCutnames[3]);
315
316   // Event and run info
317   fTRunNumber = fTR->Run;
318   fTEventNumber = fTR->Event;
319   fTLumiSection = fTR->LumiSection;
320
321   if(!fIsData) {
322     fTm0 = fTR->M0;
323     fTm12 = fTR->M12;
324     fTprocess = fTR->process;
325     fTmGlu = fTR->MassGlu;
326     fTmLSP = fTR->MassLSP;
327     TChiSlepSnu ? fTisTChiSlepSnu = 1 : fTisTChiSlepSnu = 0;
328   }
329   else {
330     fTm0 = -1;
331     fTm12 = -1;
332     fTprocess = -1;
333     fTmGlu = -1;
334     fTmLSP = -1;
335     fTisTChiSlepSnu = -1;
336   }
}
```

Analyse - das GRID

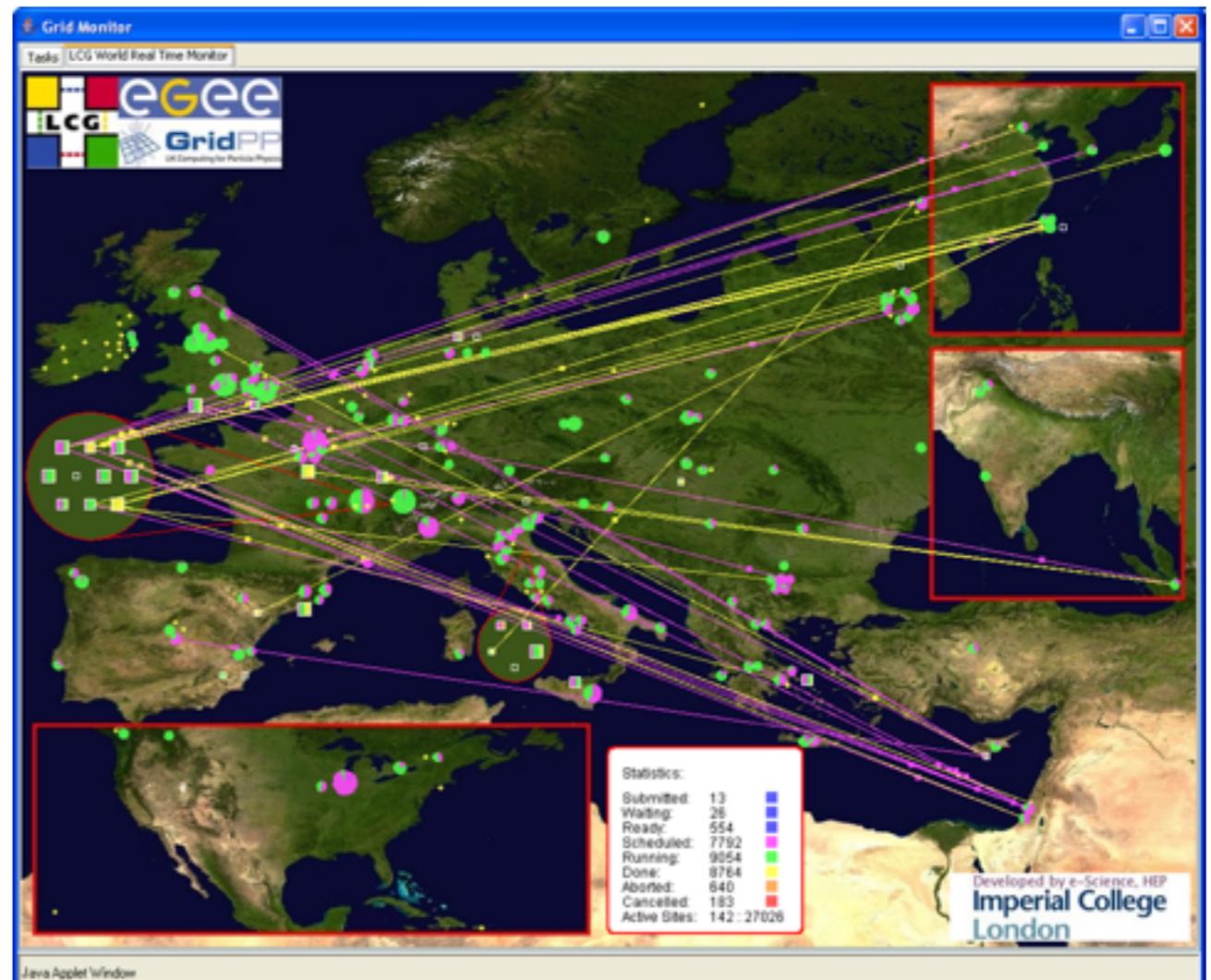
Statt alle Daten zu jedem Physiker zu bringen der sie braucht, bringen wir den Physiker zu “zentral” gespeicherten Datensätzen

- dafür wurde das **LCG - LHC Computing Grid** entwickelt

- Datensätze weltweit gespeichert

- wenn ein Physiker einen Datensatz analysieren will, sendet das System seinen “Job” an die richtige Stelle

- nur das Ergebnis wird zurück-gesendet



FRAGEN?