

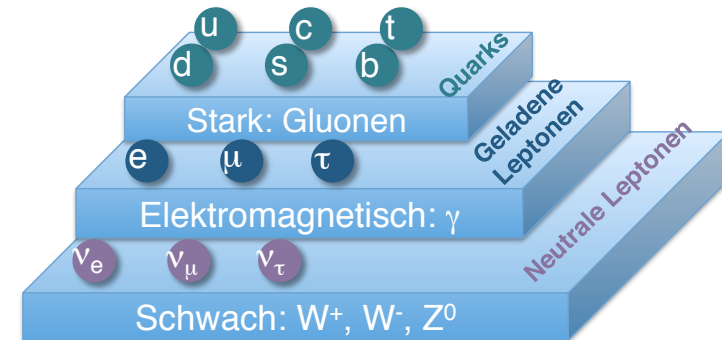
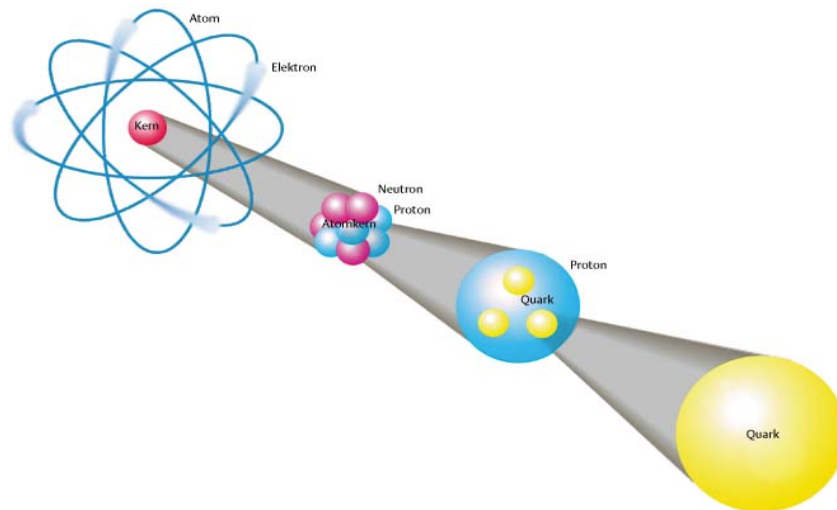
# Beschleuniger und Detektoren

International masterclasses 2015

Christoph Grab

# Wozu Teilchenbeschleuniger?

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



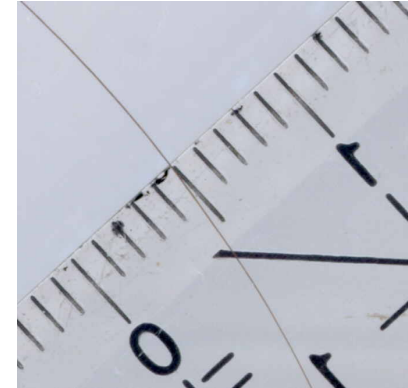
... nur wie?

# Beobachtung kleiner Objekte

**Auge:**

Auflösung  $\sim 0.1 \text{ mm}$

$10^{-4} \text{ m}$



**Lichtmikroskop:**

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

$10^{-7} \text{ m}$



**Elektronenmikroskop:**

$\sim 1 \text{ nm}$

$10^{-9} \text{ m}$

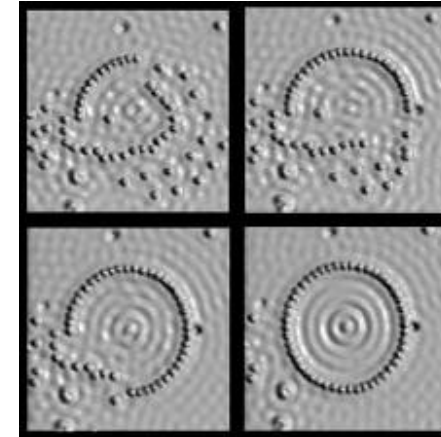


# Beobachtung noch kleinerer Objekte

**Rastertunnelmikroskop:**

~ 0.01 nm (atomare Auflösung!)

$10^{-11}$  m

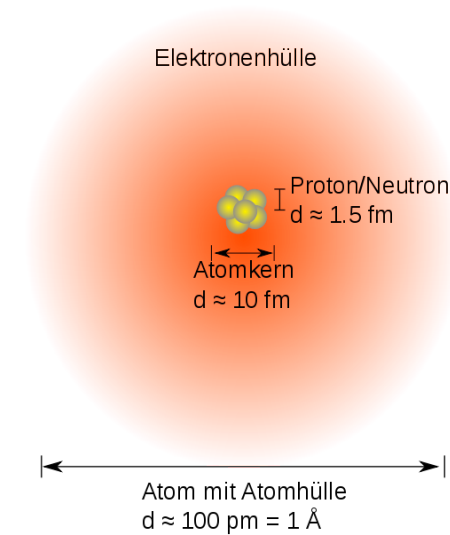


**ABER:**

der Durchmesser eines Atomkerns

ist ~  $10^{-15}$  m

... was kann man tun?



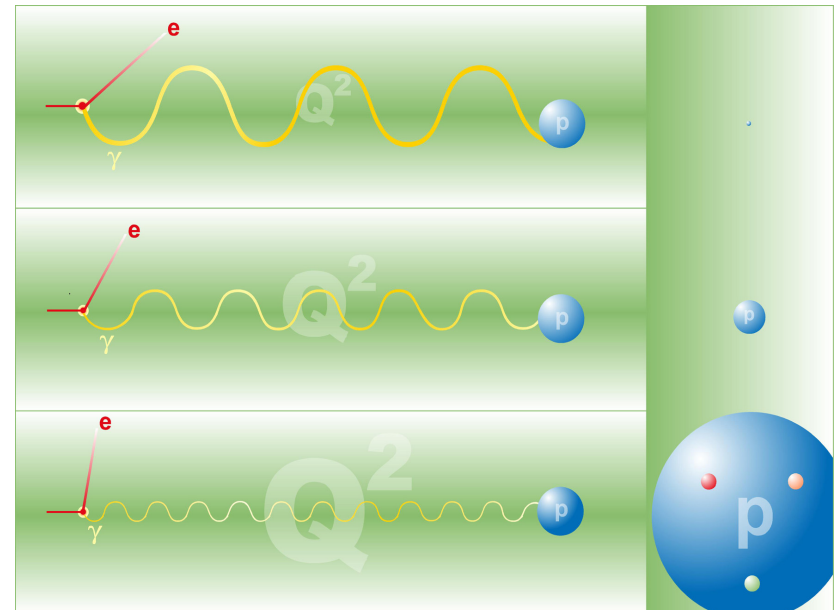
# Beobachtung kleinster Objekte

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  $\sim 10^{-18}$  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  $1.602 \times 10^{-19}$  C (Elektron oder Proton) beim Durchgang einer Potentialdifferenz von 1 Volt erhält**

<b>sichtbares Licht:</b>	<b>~ 1 eV</b>
UV- Licht:	~ 10 eV
Röntgenstrahlung:	~ 10 000 eV
$\gamma$ -Strahlung:	~ 1 000 000 eV
<b><math>m_{\text{Proton}}</math>:</b>	<b>~ 1 000 000 000 eV (~ 1 GeV)</b>
$m_{\text{Z-Boson}}$ :	~ 100 000 000 000 eV
<b>LHC:</b>	<b>~ 10 000 000 000 000 eV (~10 TeV)</b>
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!

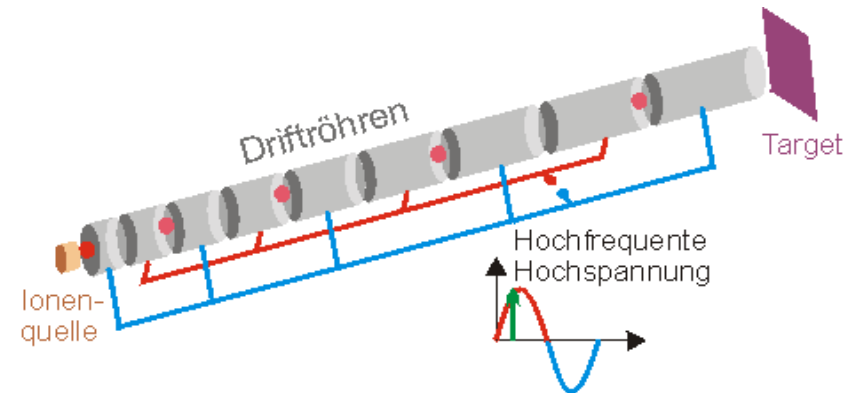
Einstein's berühmte Formel:

$$E = mc^2$$

# Arten von Beschleunigern

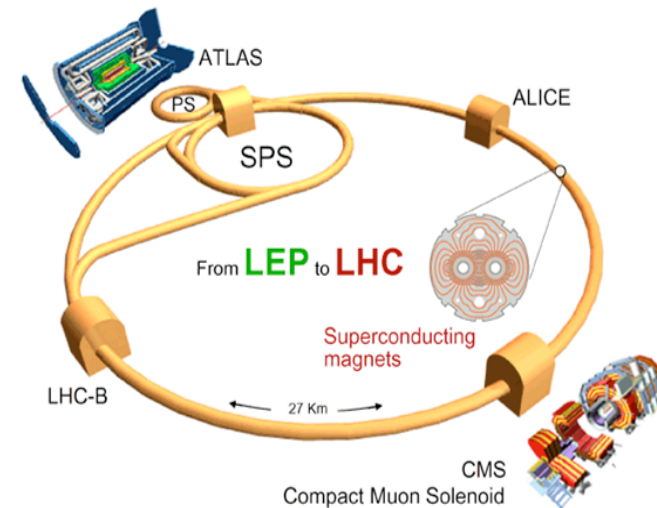
## Linearbeschleuniger

- + 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

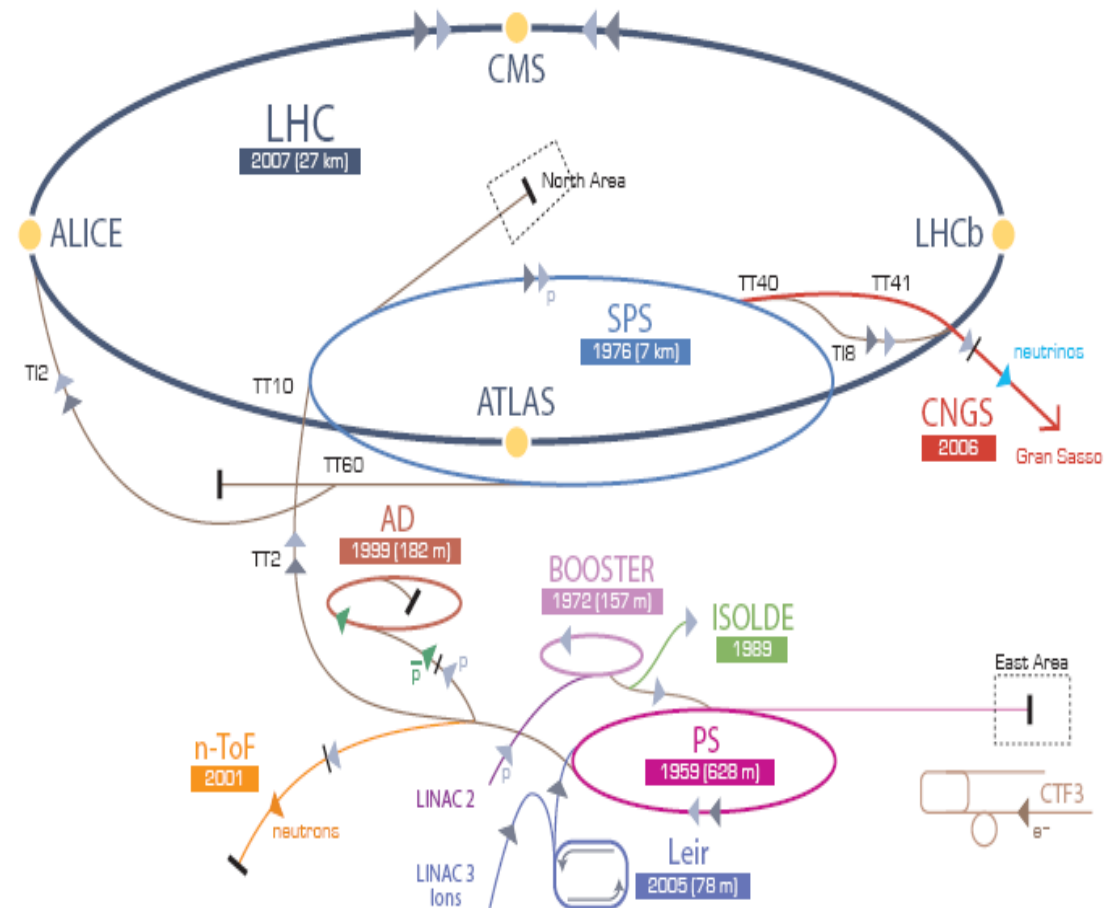
--> riesiger Beschleunigerring  
am CERN nahe Genf

--> **Proton-Proton** Kollisionen

--> ca. **27 km langer** Tunnel

--> **~100 m** unter der Erdoberfläche

--> **4 (sehr) 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

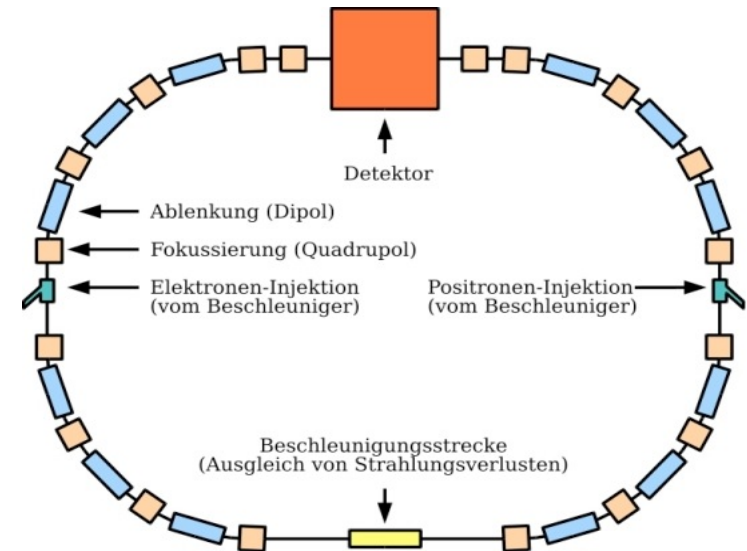
--> geladene Teilchen werden in **elektrischen Feldern** beschleunigt

## 3) Magneten zum Ablenken bei Kreisbeschleunigern

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

-> Magnete zum Fokussieren der Strahlen

**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!**

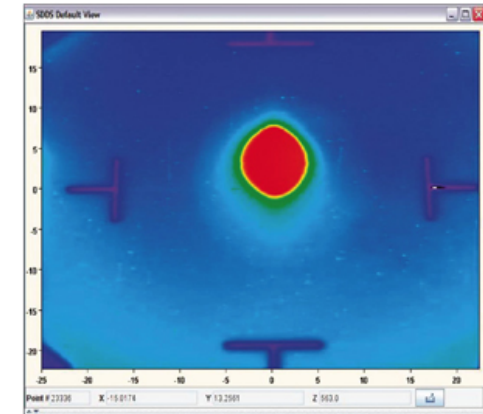
Jedes dieser Pakete ist mit ca.  **$10^{11}$**  (100 Milliarden) **Protonen** gefüllt!

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

**Alle 25 ns (!)** treffen sich 2 Pakete bei den Experimenten!

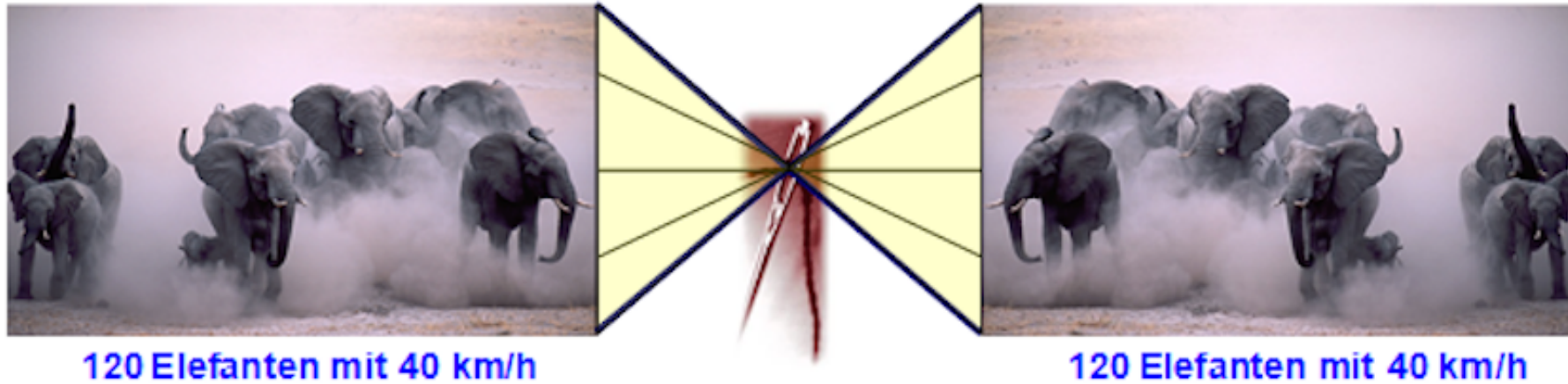
--> pro “Bunch-crossing” ca. 15-20 einzelne p-p Kollisionen

Die gesamte gespeicherte Energie in den Strahlen ist ca. **750 MJ!**



# Was sind 750 MJ ?

**Wie 240 Elefanten auf Kollisionskurs**



Die Energie eines  
einzelnen Protons  
entspricht der einer  
Mücke im Anflug ( $1 \mu\text{J}$ )

Nadelöhr:  
0.3 mm Durchmesser

Protonstrahlen am Kollisionspunkt:  
0.03 mm Durchmesser

# Beschleunigungsstrecken

Geladene Teilchen werden **in elektrischen Feldern beschleunigt**

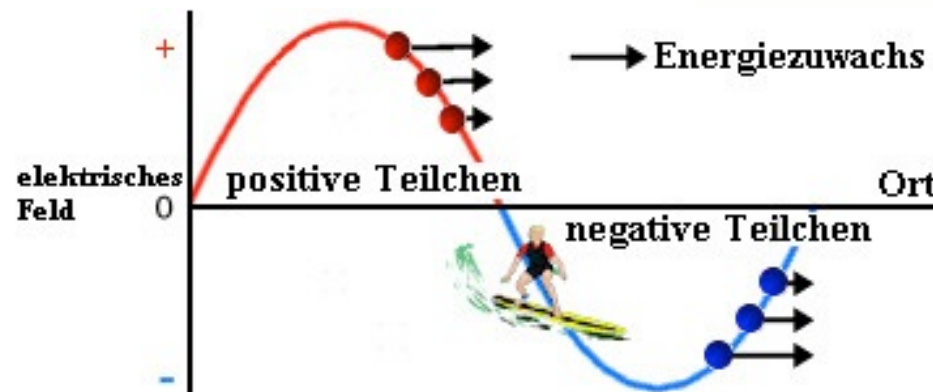
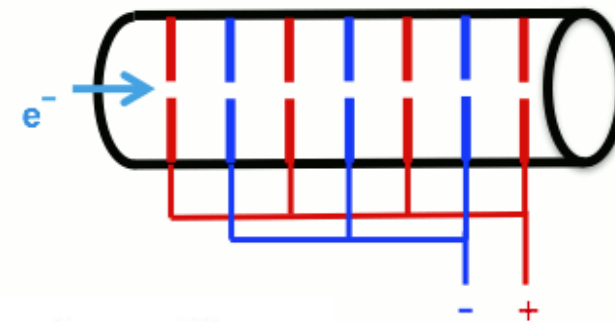
--> **Gleichspannung:**

- 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



# Ablenkmagnete

Ablenkmagneten: klingt einfach, ist es aber nicht!  
(Später mehr zur Physik)

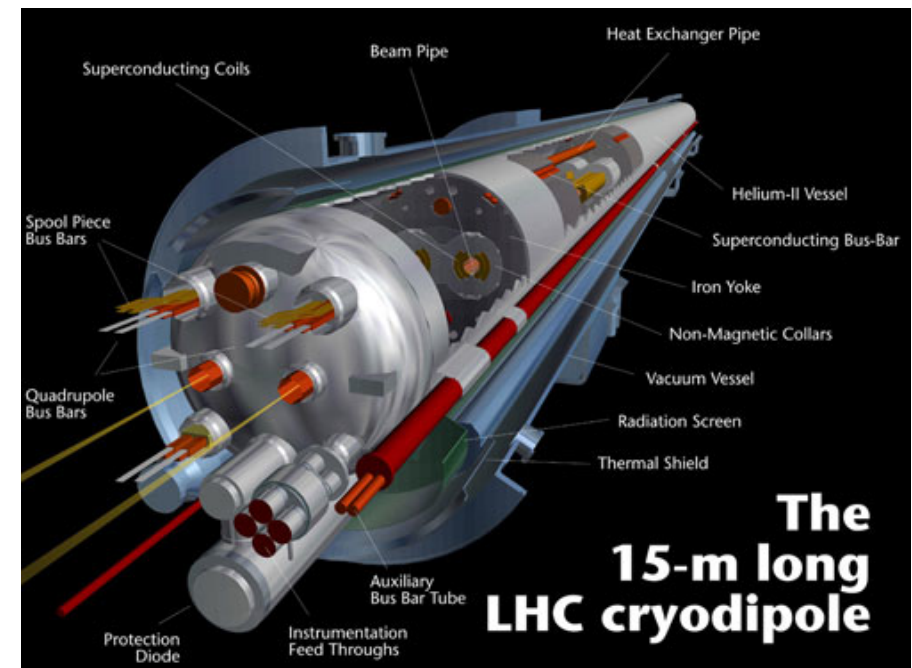
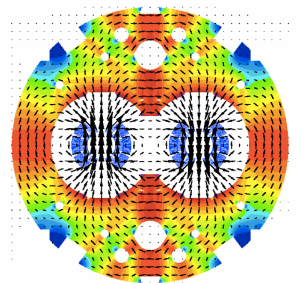
Die Magneten des LHC:

- **15 m** lang
- **30 t** schwer
- **supraleitend** ( $\sim 100$  t flüssiges Helium bei  $T = 1.9$  K)

--> **-271.25 °C !**

- Magnetfeld bis zu **8.33 T**
- **11 GJ (!)** gespeicherte Energie

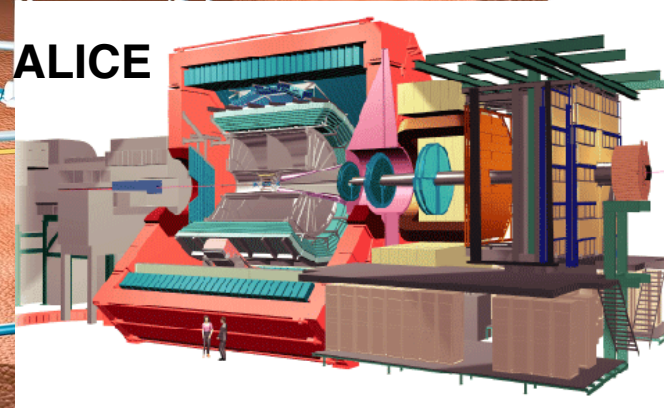
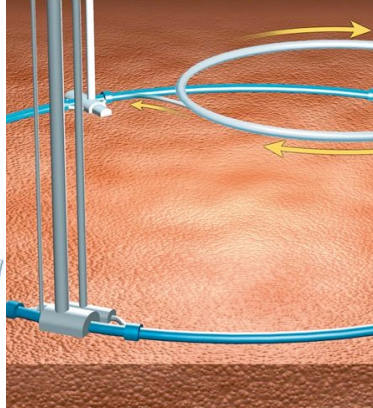
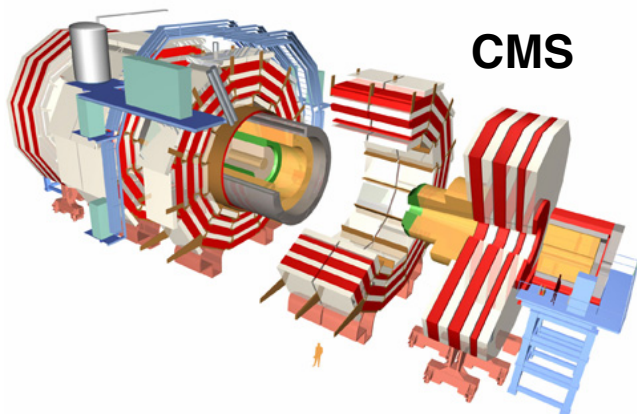
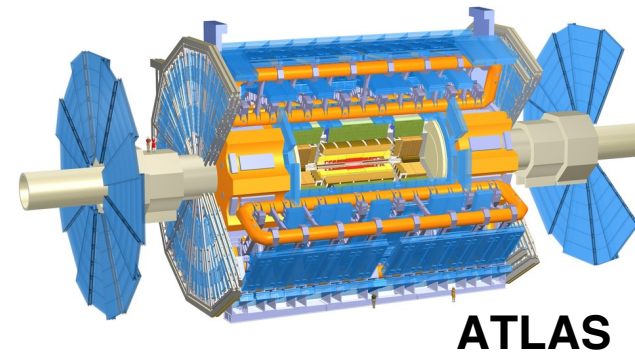
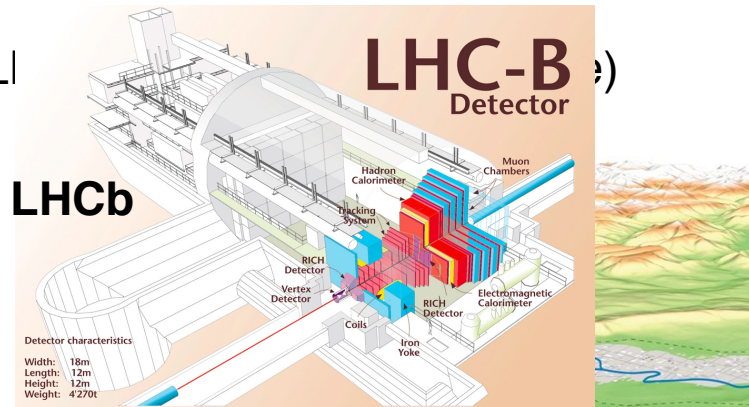
**und es gibt 1232 Stück davon!!**



# Detektoren

Um die vielen Teilchenkollisionen aufzuzeichnen brauchen wir riesige Detektoren

Am LHC





# Messungen

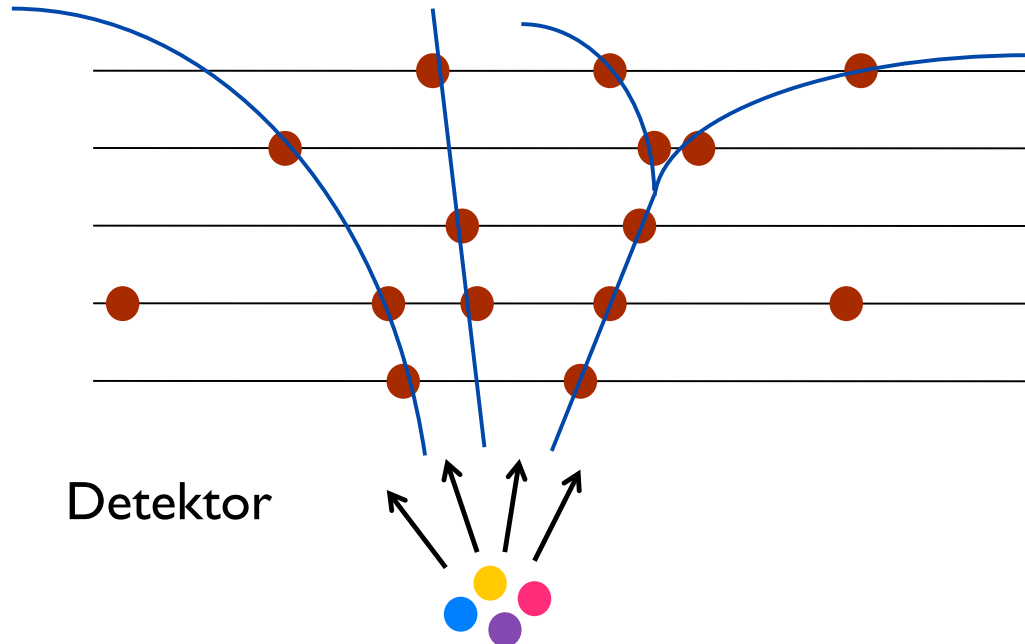
Um auf alle Eigenschaften eines Teilchens rückschliessen zu können, muss man folgende Grössen kennen:

**Impuls (Vektorielle Grösse)**

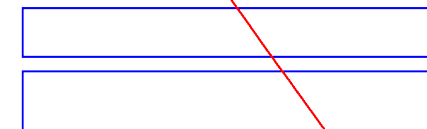
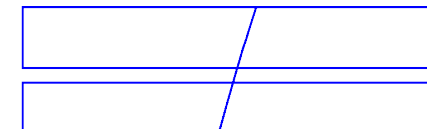
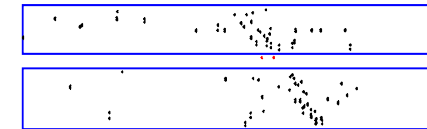
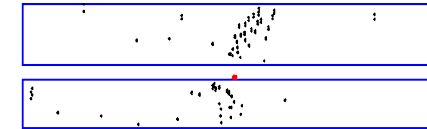
**Energie**

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

# Was heisst eigentlich messen?



- Teilchen fliegen durch Detektor
- erzeugen elektrische Signale (Q, I)
- werden digitalisiert und gespeichert
- Computerprogramme rekonstruieren Spuren
- für Analyse verwendbar

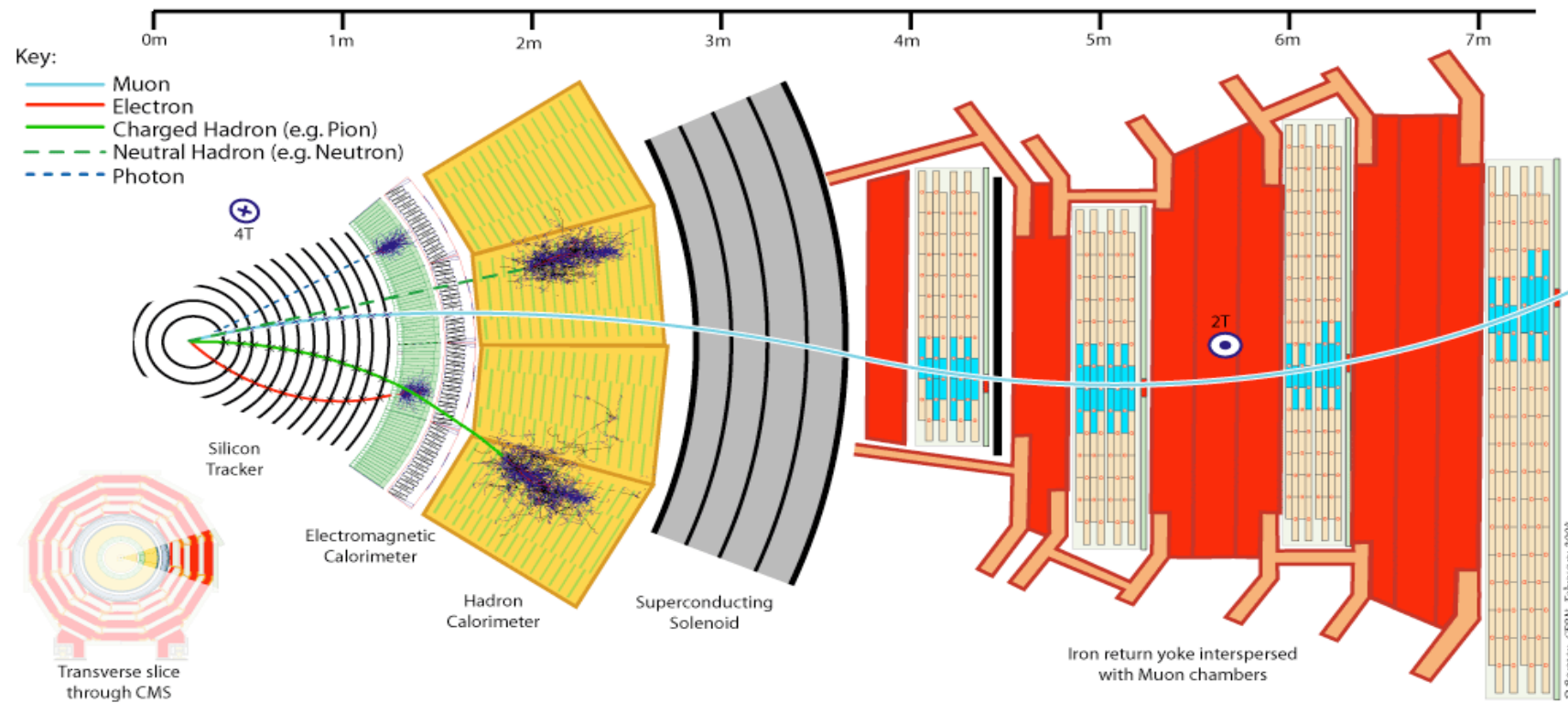


# Aufbau eines Teilchendetektors

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

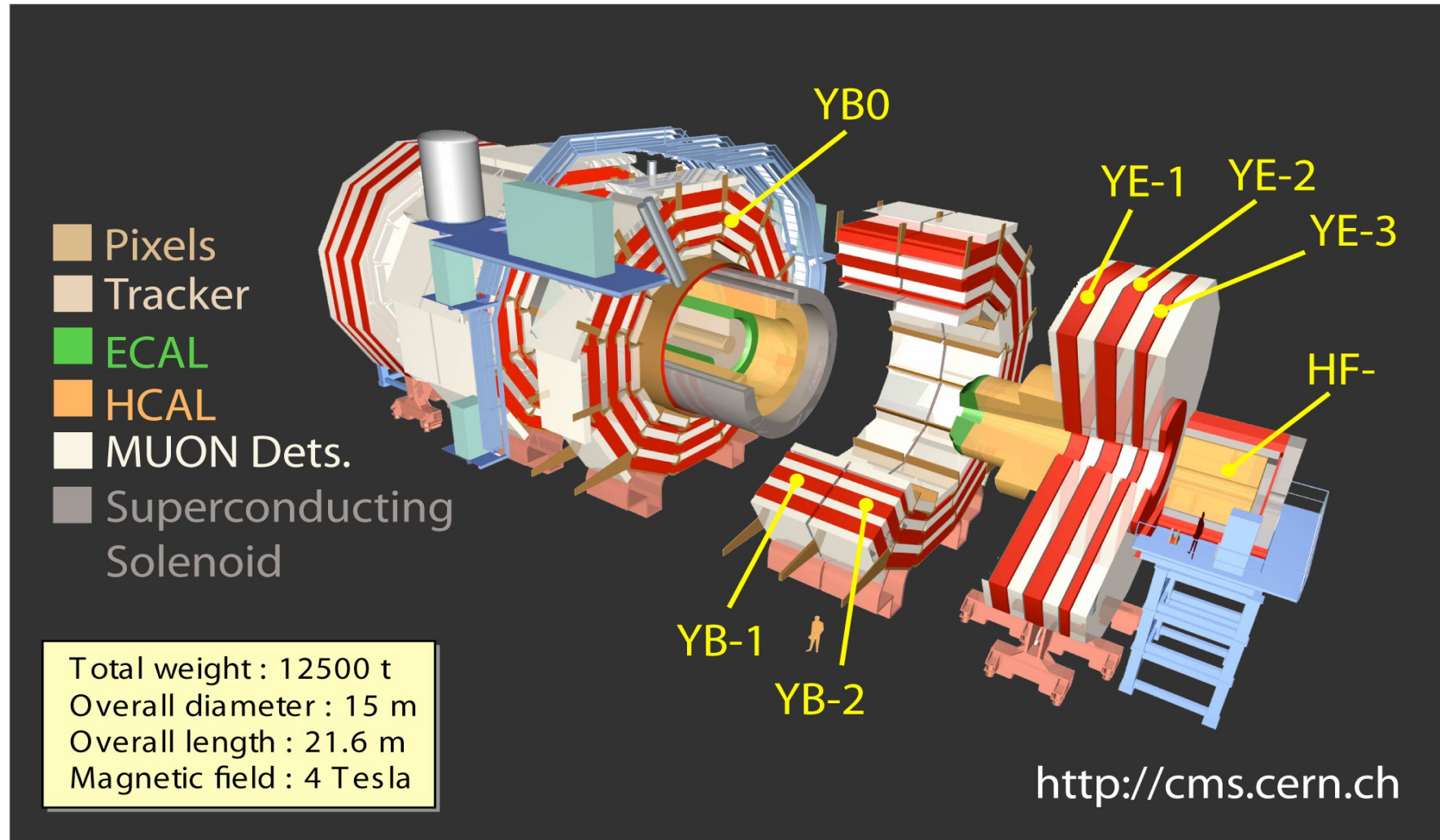
# Schematischer Aufbau - CMS



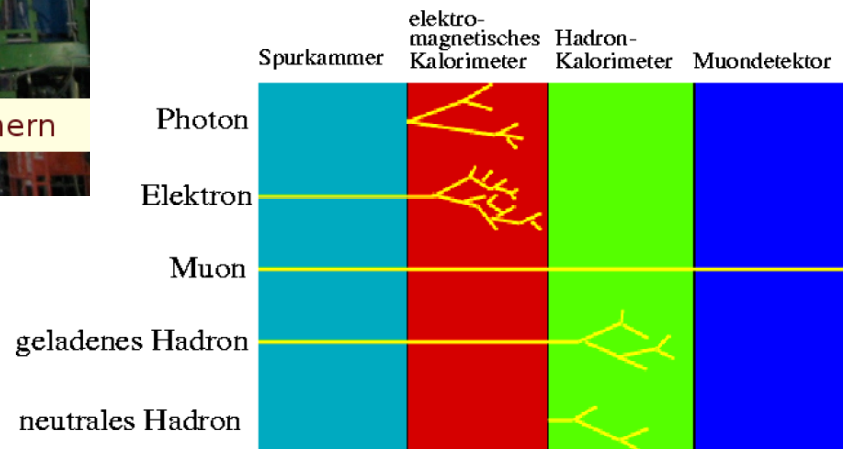
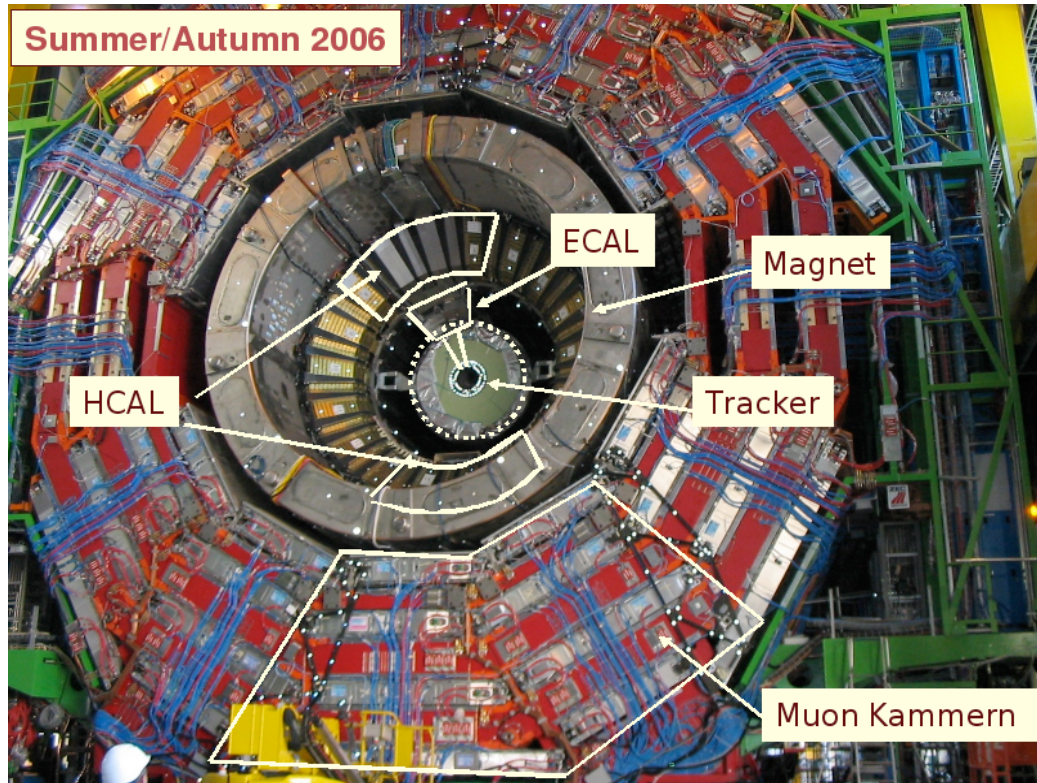
[https://www.i2u2.org/elab/cms/graphics/CMS\\_Slice\\_elab.swf](https://www.i2u2.org/elab/cms/graphics/CMS_Slice_elab.swf)

[file://localhost/Users/grab/txt/figs/lhc-figs/lhc-figs-media/CMS\\_Slice\\_elab.swf](file://localhost/Users/grab/txt/figs/lhc-figs/lhc-figs-media/CMS_Slice_elab.swf)

# Schematischer Aufbau - CMS



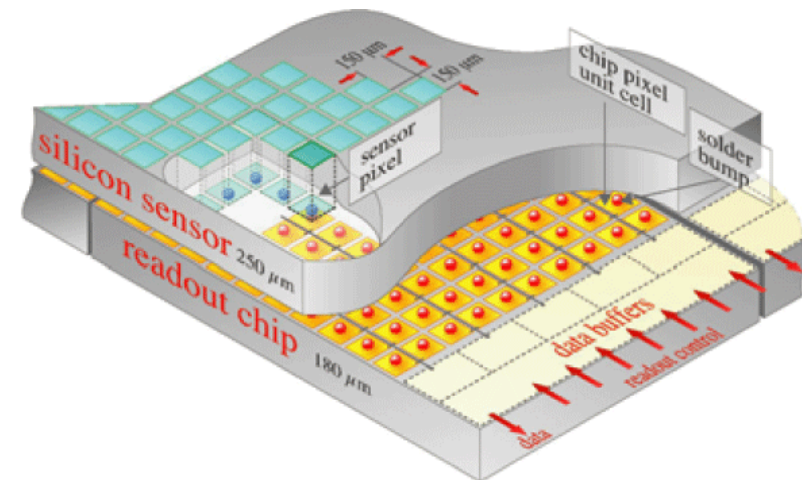
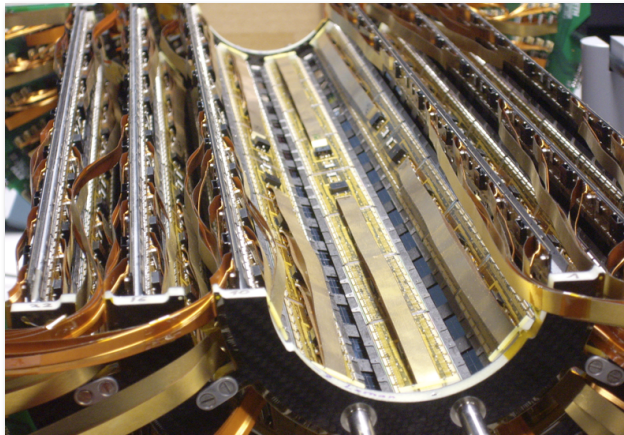
# Schematischer Aufbau - CMS



# Spurendetektor - Pixel

CMS Pixel Detektor hat:

- > **3 Lagen** bei 4.3, 7.2, 11 cm Abstand vom Strahl
- > **~1 m<sup>2</sup> aktive Fläche**
- > Pixelgrösse von **100 x 150  $\mu\text{m}^2$**
- > 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 - Pixel





# Spurendetektor - Streifen

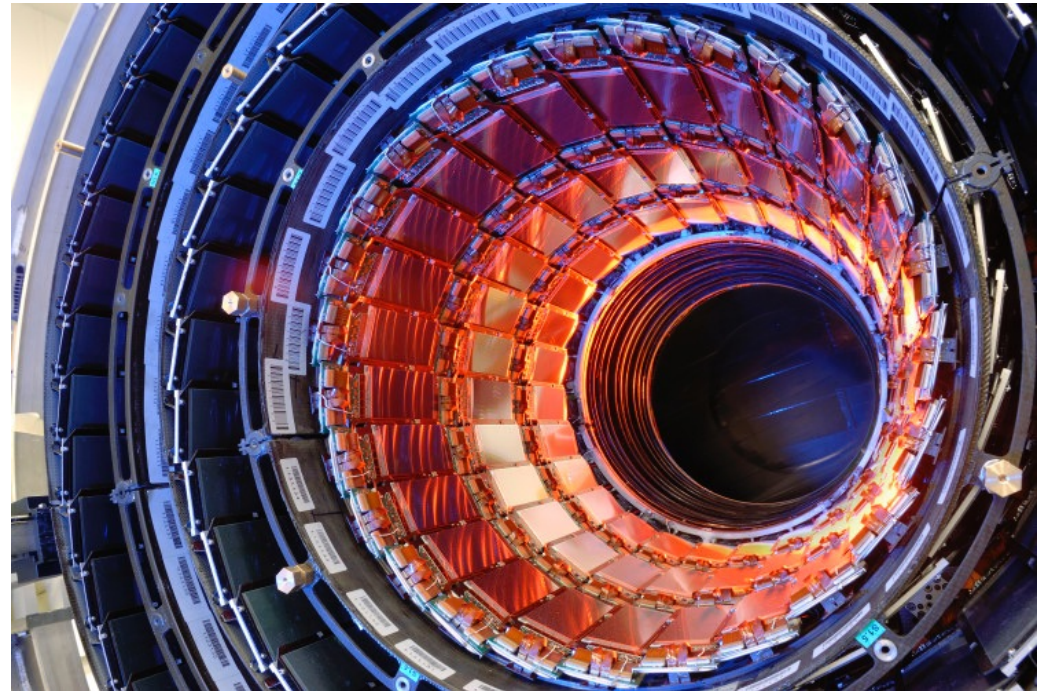
Um Auslesekanäle zu sparen, sind die nächsten  $\sim 10$  Lagen keine Pixel, sondern sogenannte Siliziumstreifendetektoren

--> **selbes physikalisches Prinzip**

--> lange, schmale Streifen

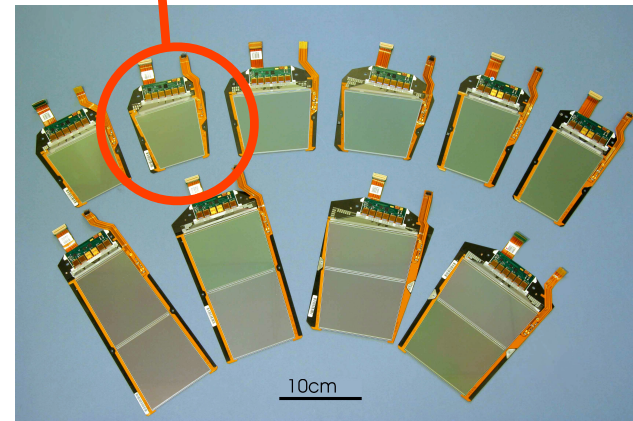
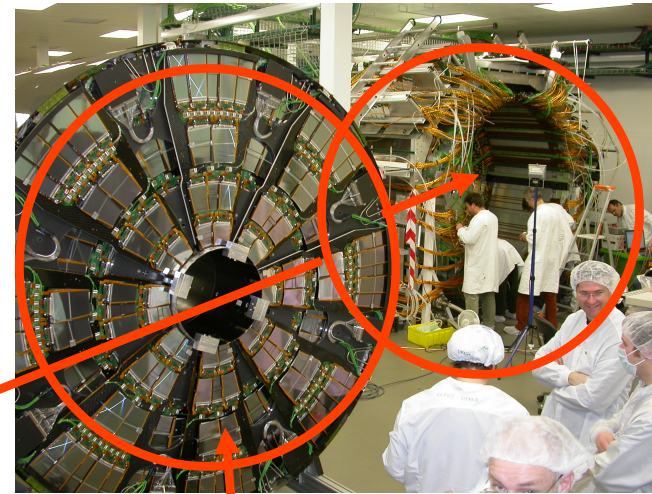
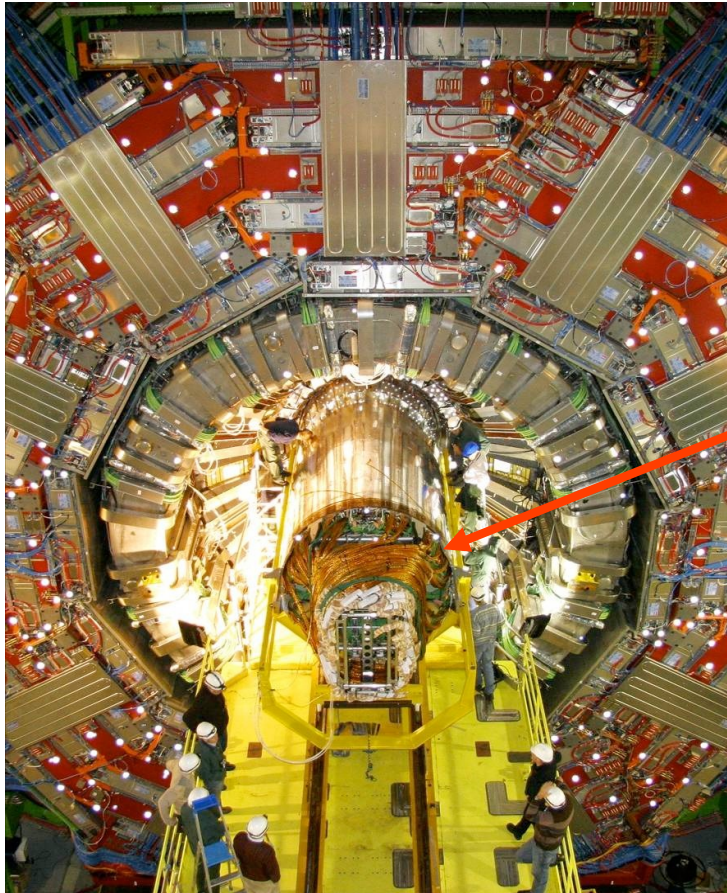
-->  **$80 \mu\text{m}$**  breit

-->  **$\sim 200 \text{ m}^2$  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

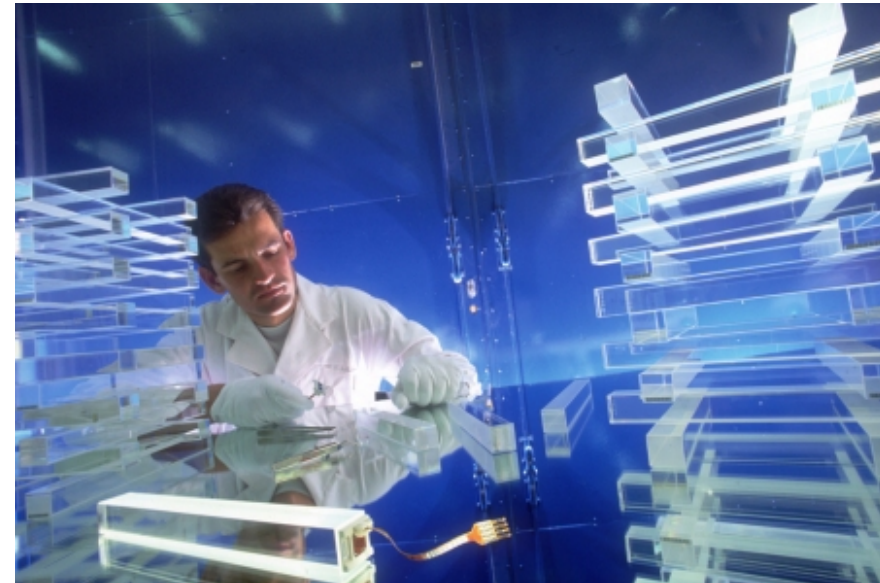
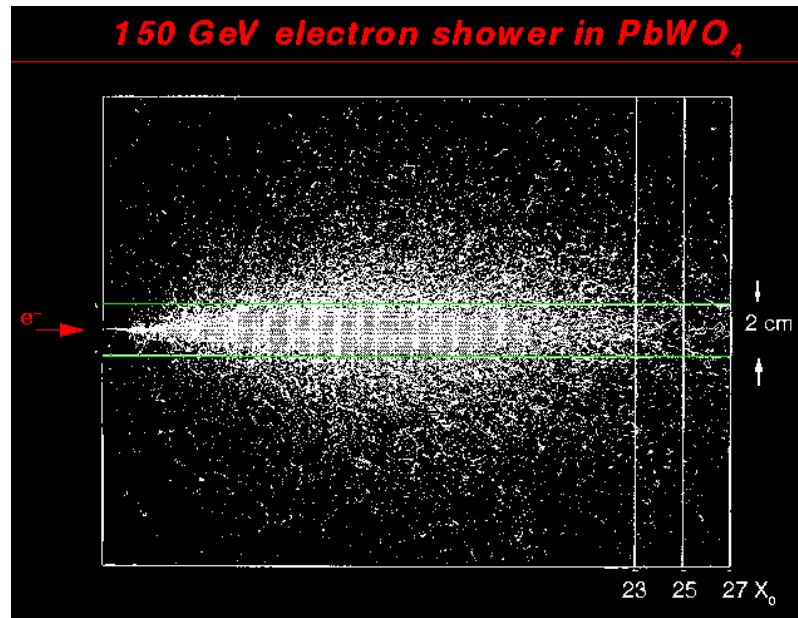
# Kalorimeter - Elektromagnetisch

Kristall:

**Bleiwolframat ( $\text{PbWO}_4$ )**

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

**$\sim 80\%$  Metall - transparent!**



Gewicht  $\sim 25$  Elefanten  
( 125 t )

# 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"



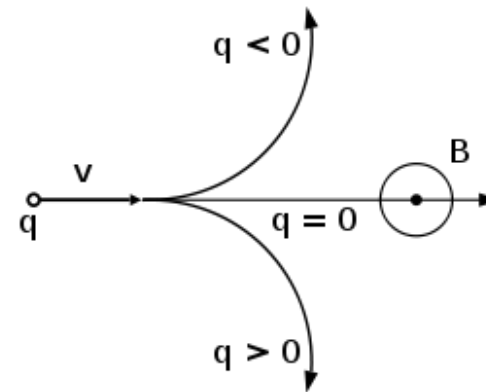
In CMS: ca. 10 5 cm **Messing** - 3 cm **Szintillator Schichten**

# 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:

$$\mathbf{r} \propto \mathbf{p}/q\mathbf{B}$$

# 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:

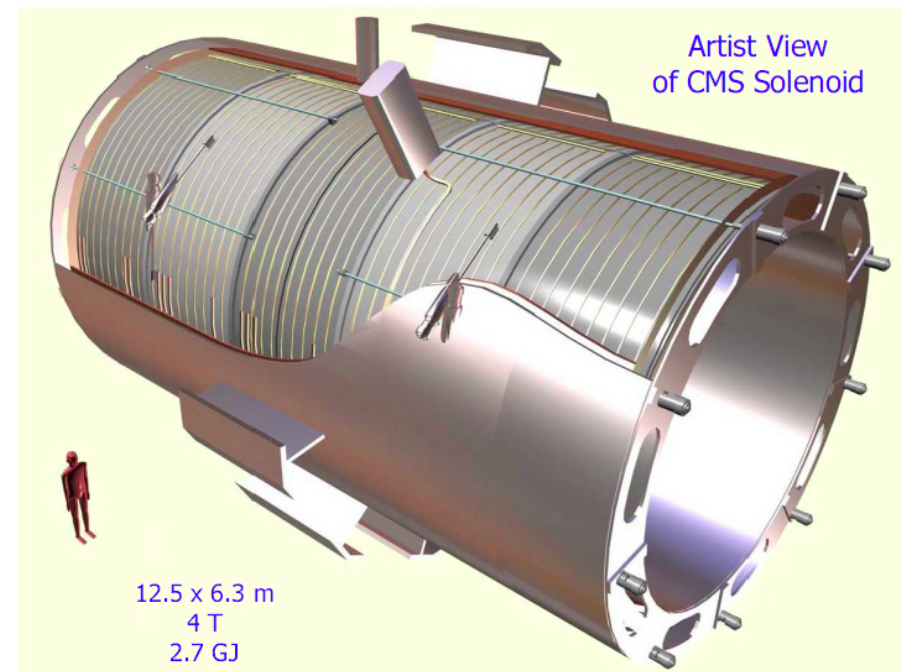
--> **~6 m Durchmesser!**

--> **3.8 T Magnetfeld**

**100 000 x stärker als Erdmagnetfeld**

--> **19 000 Ampere**

--> **2500 MJ** gespeicherte Energie



**Der CMS Magnet ist somit der energiereichste Magnet der Welt!**

# Supraleitender Magnet





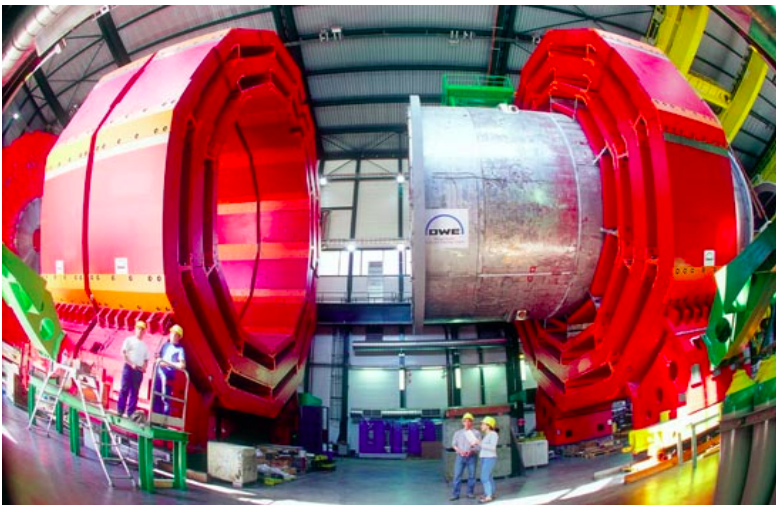
# Rückführjoch

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

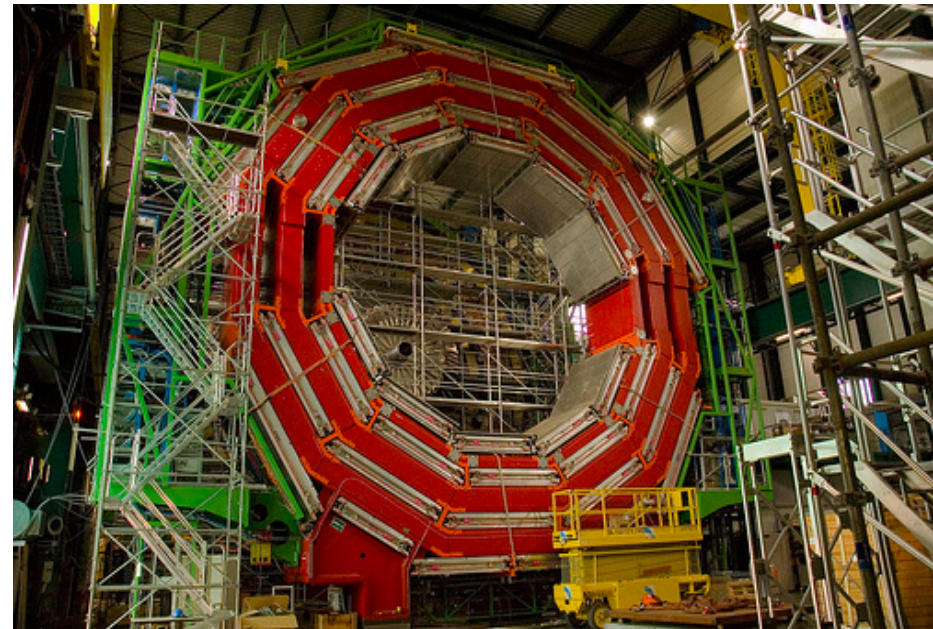
**Muonen sind die schweren Brüder der Elektronen und interagieren nur sehr schwach mit Materie!**

--> 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!

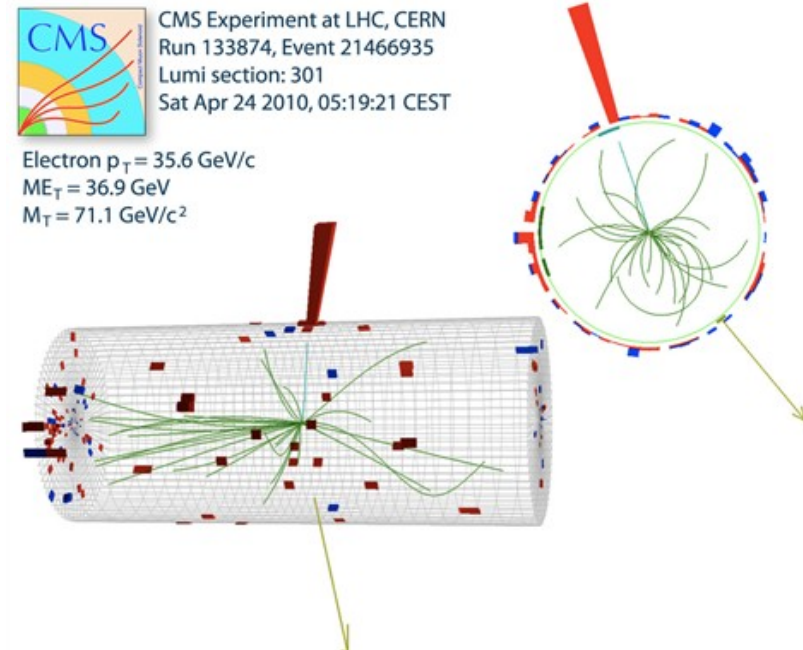
In der Ebene normal zur Strahlrichtung  
ist der Anfangsimpuls gleich null!

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!!**



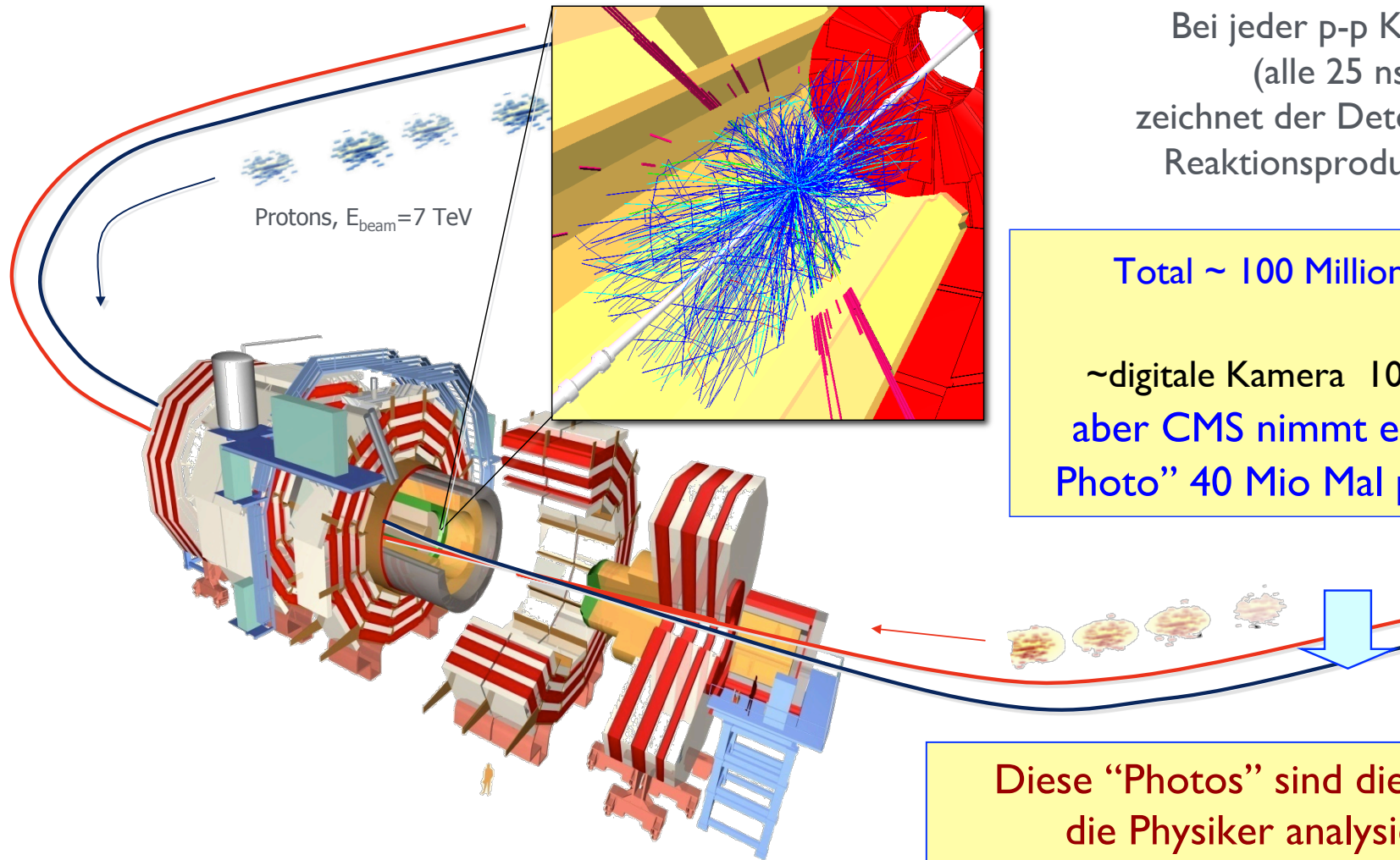
# Daten aus Proton – Proton Kollisionen



Bei jeder p-p Kollision  
(alle 25 ns)  
zeichnet der Detektor die  
Reaktionsprodukte auf.

Total ~ 100 Millionen Kanäle

~digitale Kamera 100 Mio Pixel,  
aber CMS nimmt ein “digitales  
Photo” 40 Mio Mal pro Sekunde



Protons,  $E_{\text{beam}} = 7 \text{ TeV}$

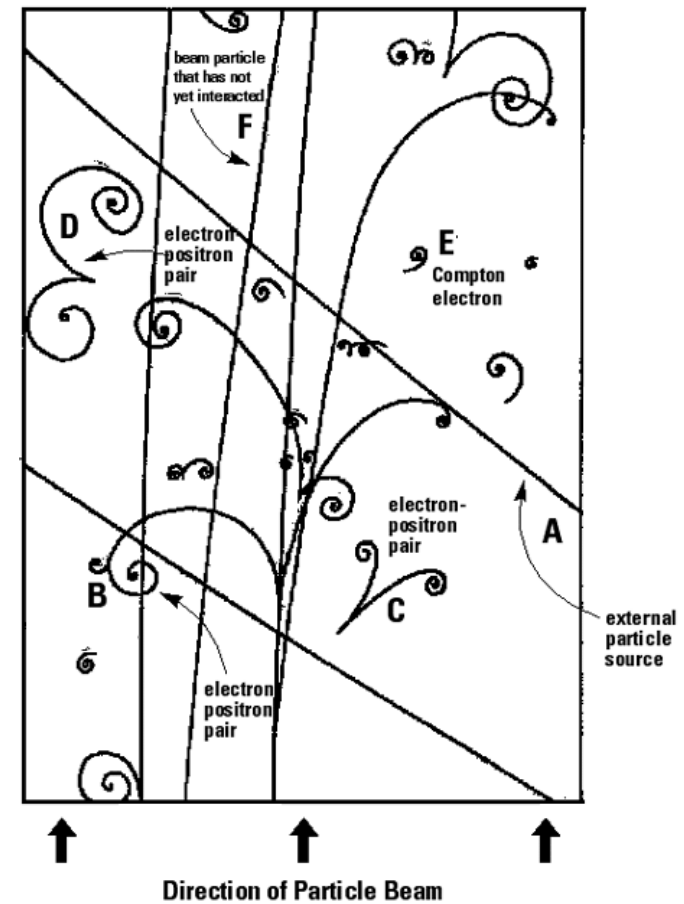
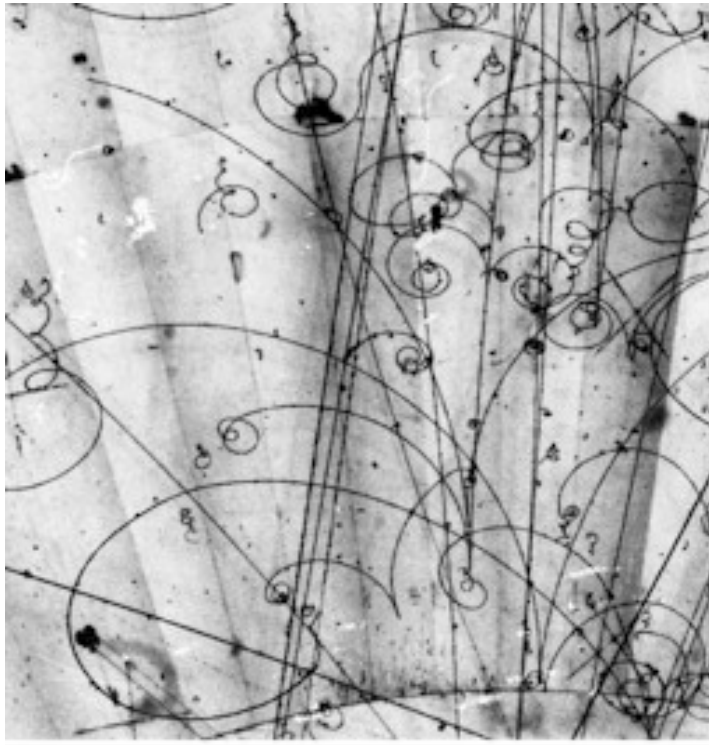
Diese “Photos” sind die Ereignisse,  
die Physiker analysieren

ergibt 4 Petabytes/sec = 4'000' 000'000' 000'000 B/s

*zu viel zum Speichern ...*

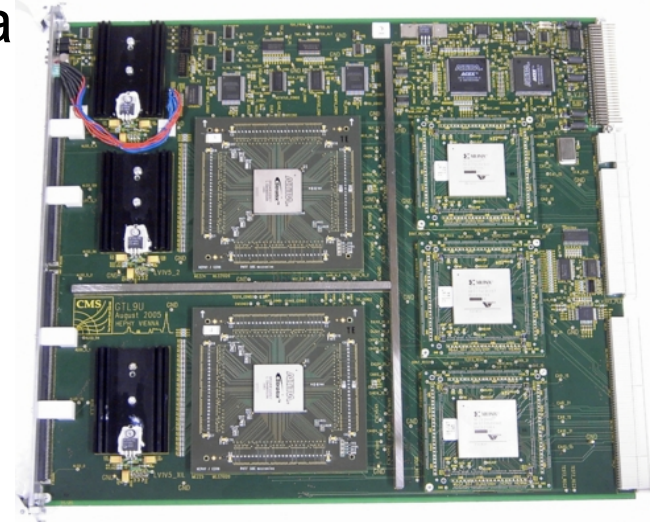
# Auslese - Rekonstruktion

Früher: Photos von Nebelkammern:

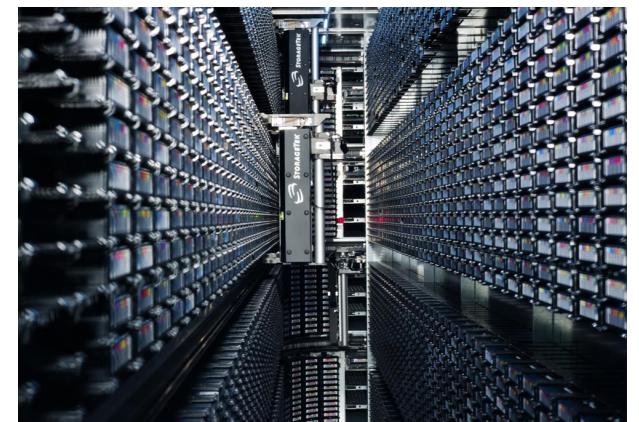


# Daten-reduktion und -verarbeitung

Von diesen vielen Ereignissen ist typisch etwa **EINES** in 1 Million echt “interessant”.



- schnelle Selektion durch intelligente dedizierte Elektronik → “Trigger”
- Diese “guten” Ereignisse werden auf Tape und Disk gespeichert
- **Datenmenge ~ 15 Petabytes pro Jahr pro Experiment speichern**  
(= 15 Mio GigaBytes)
- Auswertung der riesigen Datenmenge durch eigene, komplizierte Algorithmen, braucht spezielle, selbst-geschriebene Software
- Weltweites vernetztes “Computerzentrum” = “**Computing GRID**” ermöglicht Analyse dieser Daten  
Betrieb durch EGI = European Grid Initiative



# Analyse - das GRID

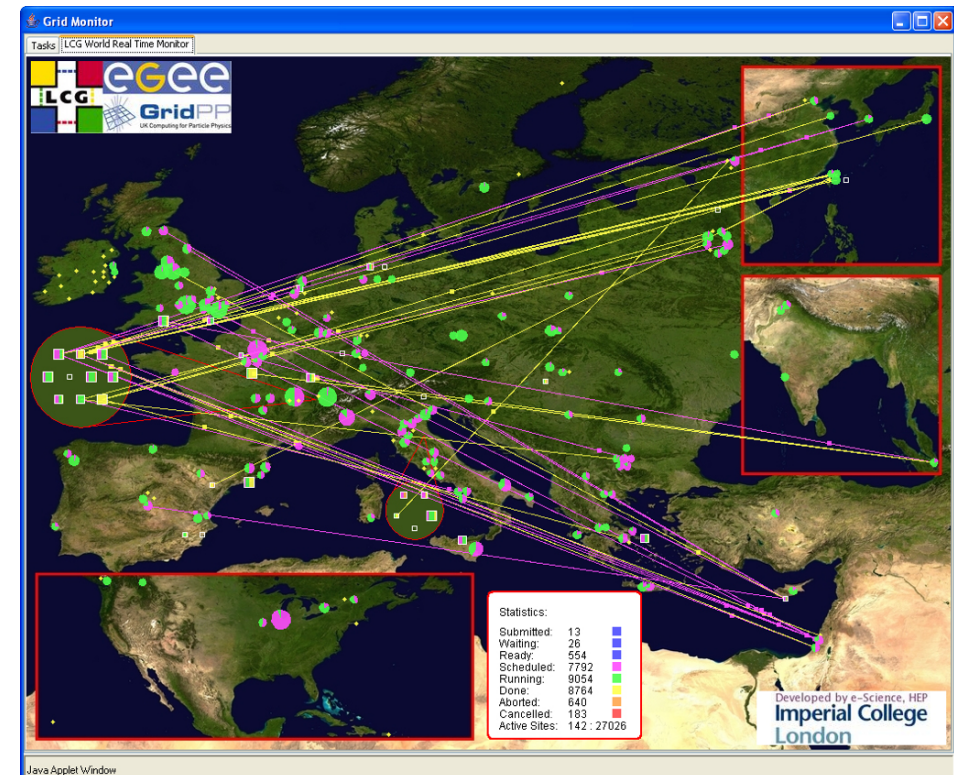
Statt alle Daten zu jedem Physiker zu bringen der sie braucht, bringen wir den Physiker (resp. das Programm) zu “zentral” gespeicherten Datensätzen

- 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 zurückgesendet



# Spin-offs

Am CERN werden immer wieder **neue Dinge entwickelt** - auch für die  
Allgemeinheit

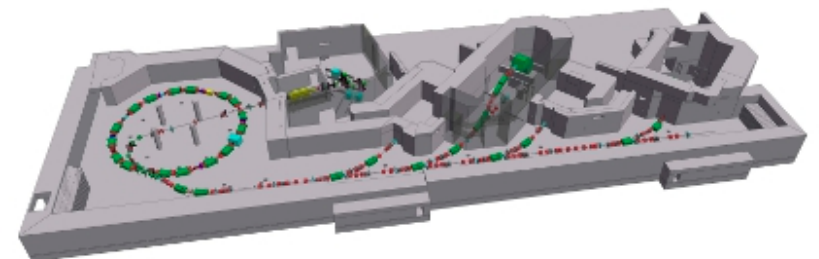
- das **WWW** wurde von Tim Berners-Lee & co. 1990 am CERN erfunden

- einer der ersten **Touchscreens** wurde am CERN in den 1970er  
erfunden

-viel Forschung für die **Krebsbehandlung mit Teilchenstrahlen**  
und Detektoren (PET, Magneten)

- distributed computing - **GRID**

- immenser **Wissensgewinn** für die Menschheit





# Spannende Zeiten

Erneuter Start des LHC steht kurz bevor!

Von 8 TeV zu 13 TeV

→ **Suche nach neuer Physik**

→ **Genauere Vermessung des Higgs Bosons**

