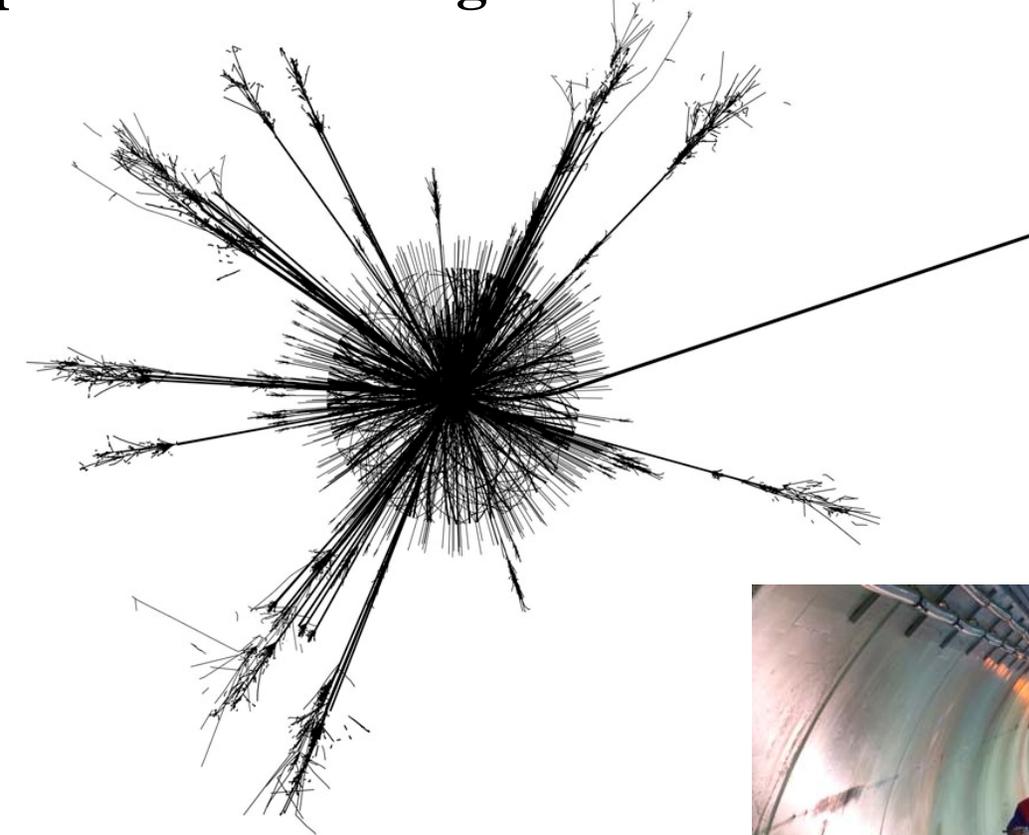
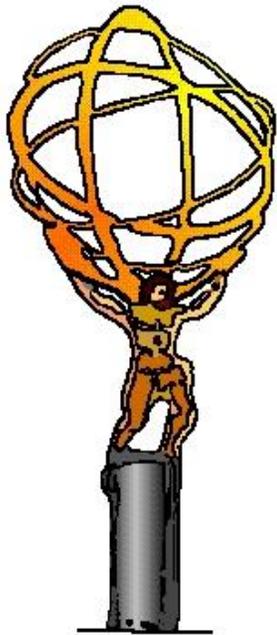


# LHC – das neue Werkzeug der Teilchenphysik

**Das ATLAS-Experiment am Large Hadron Collider am CERN in Genf**



**Lange Nacht der  
Wissenschaften 2007**



# Übersicht

Das Standard-Modell der Teilchenphysik ist bis jetzt sehr erfolgreich!

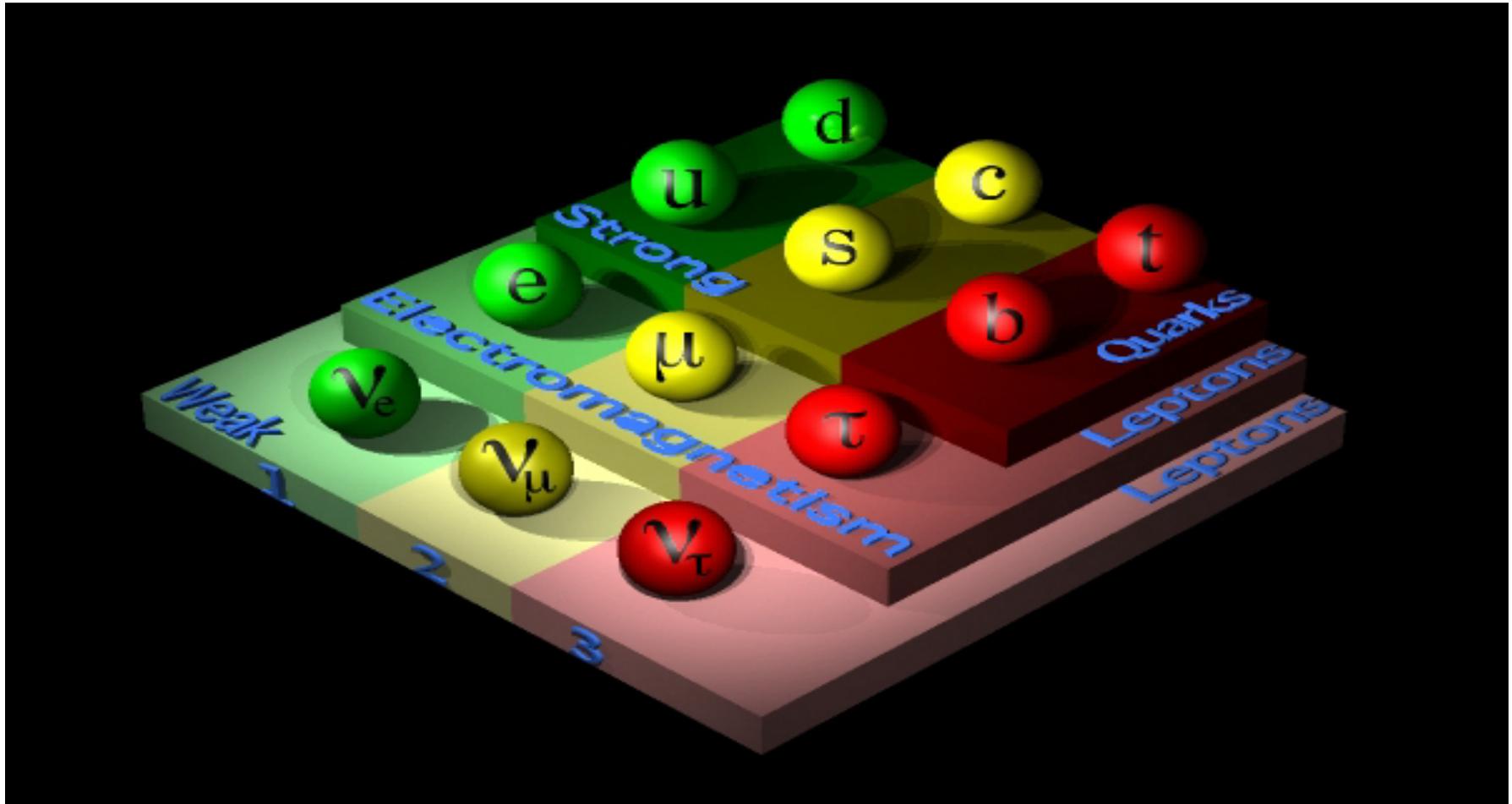
## Dennoch ist vieles unverstanden:

- Woher kommt die Masse (**Higgs-Teilchen**)?
- Gibt es **eine fundamentale Kraft**?
- Welche **Symmetrie** liegt unserer Welt zugrunde?
- Gibt es **zusätzliche Dimensionen**?
- Kennen wir alle Teilchen (**Supersymmetrie**)?

**Um Neues zu entdecken, muss man neue Dinge tun:**

Der **Large Hadron Collider** (Proton-Proton) mit den Experimenten **ATLAS** und **CMS** am Europäischen Forschungszentrum **CERN** in Genf

# Das vollständige Set der elementaren Teilchen



- Das 4er Set der „1. Baustein-Generation“ wiederholt sich genau 2 mal
- **Niemand weiß warum ...**

# Systematik in der Welt der Teilchen

Periodic Table of the Elements

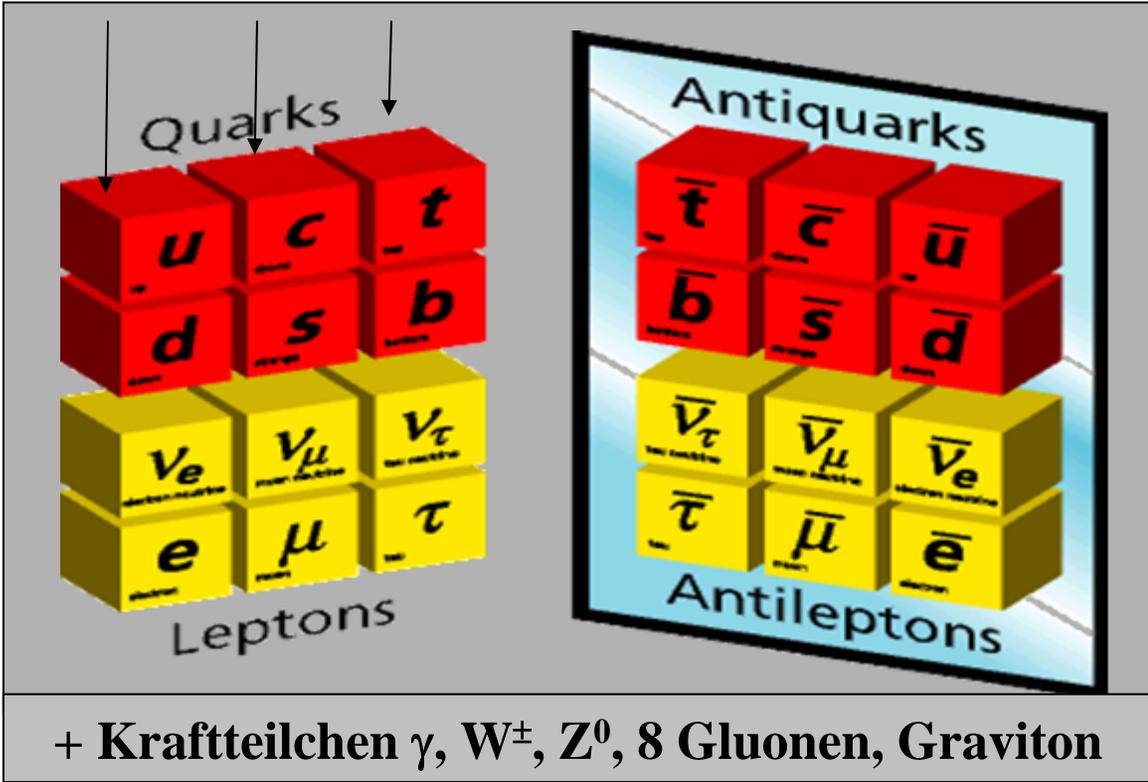
1	2																	10
3	4																	10
11	12																	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112							

Naming conventions of new elements

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Systematik  $\Leftrightarrow$  Symmetrien

3 Familien von Quarks und Leptonen



Brauchen nur 1. Familie für die Atome:  
 Proton= $|uud\rangle$ , Neutron= $|udd\rangle$ ,  
 Elektron

Gibt es noch mehr?

# HIGGS-Teilchen

Die Teilchen in den 3 Familien unterscheiden sich nur in ihrer Masse.

Schöne Symmetrie, wenn alle Teilchen keine Masse hätten.  
Aber: Warum haben die Teilchen Masse?

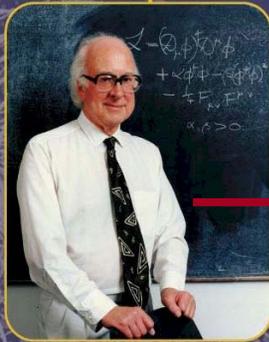
Antwort der Theoretiker: **Higgs-Teilchen** „gibt“ allen Teilchen Masse

Wie kann man das verstehen???

Masse  $\Leftrightarrow$  Trägheit

## WHAT IS MASS?

Massless particles travel at the speed of light. Particles with mass are slowed down. But why? According to the best theory so far particles with mass interact with a Higgs field that fills space. If the Higgs field were switched off then everything would be massless.



Peter Higgs

In the demonstration a non-magnetic 'slug' represents a massless particle. It moves at the same speed through both the one-dimensional universes - the tubes. The magnetic slug represents a massive particle, which is slowed down when passing through the universe with the Higgs field switched on.

Der britische Wissenschaftsminister wollte das auch verstehen, bevor er das Geld für den „**Large Hadron Collider**“ zur Verfügung stellte ...

# Die Vereinigung der Kräfte



Big Bang

$10^{19}$  GeV

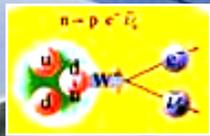
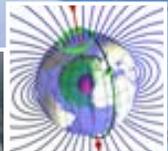
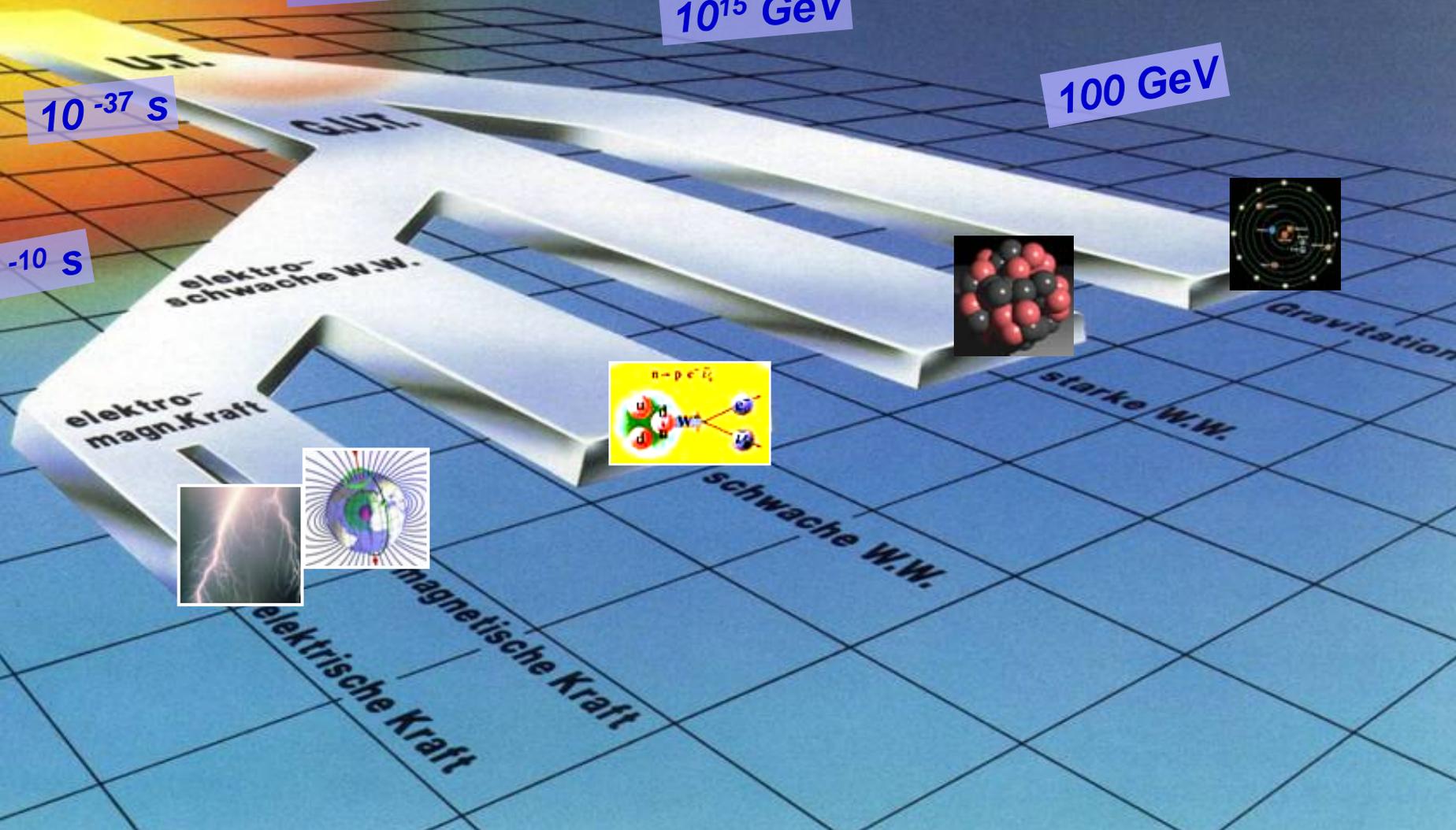
$10^{15}$  GeV

100 GeV

$10^{-43}$  s

$10^{-37}$  s

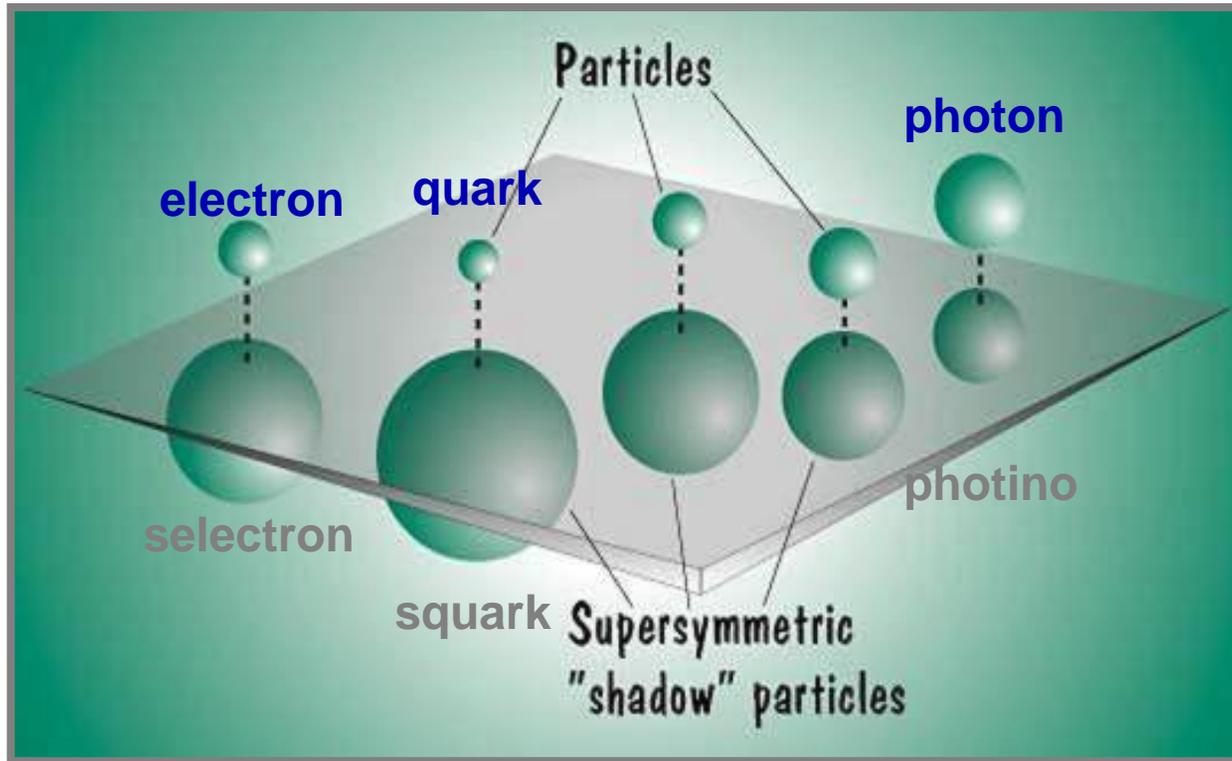
$10^{-10}$  s



# Super-Symmetrie

**Fermion**

**Boson**



**Boson**

**Fermion**

# Super-Symmetrie

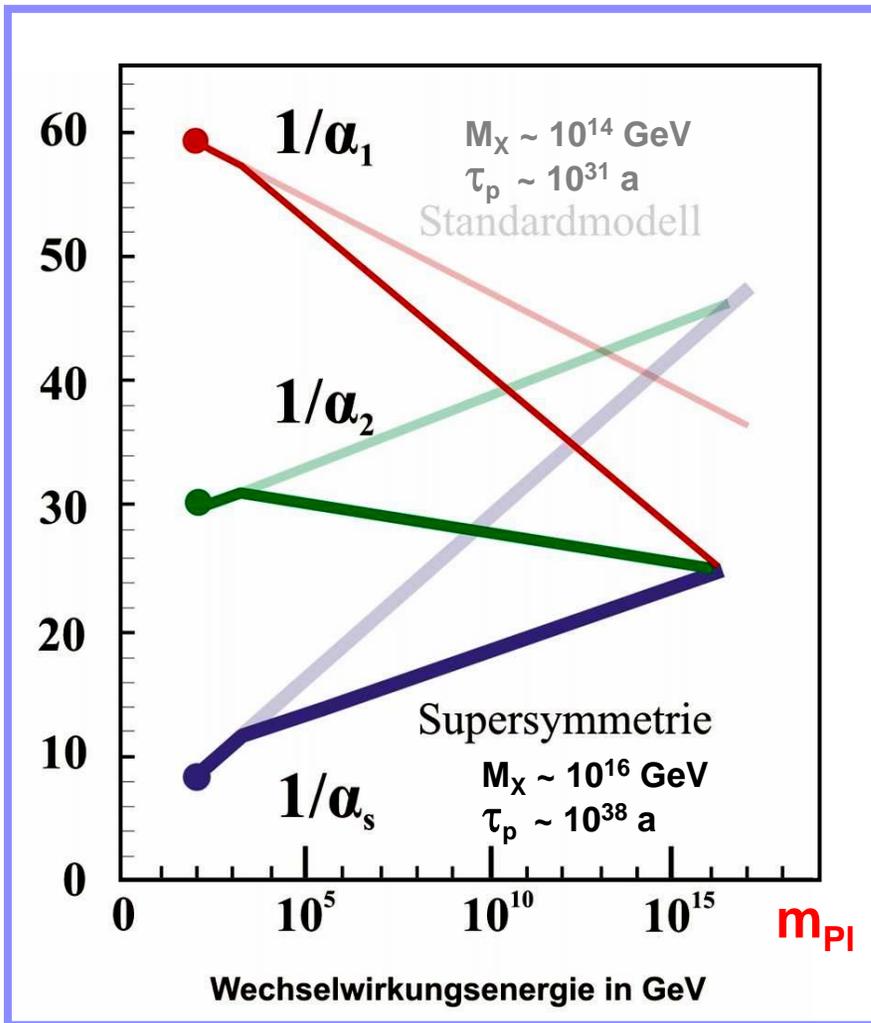
vereinigt

**Bosonen mit Fermionen**

**Kraft mit Materie**

# SUper-SYmmetrie

vereinigt Kräfte und liefert

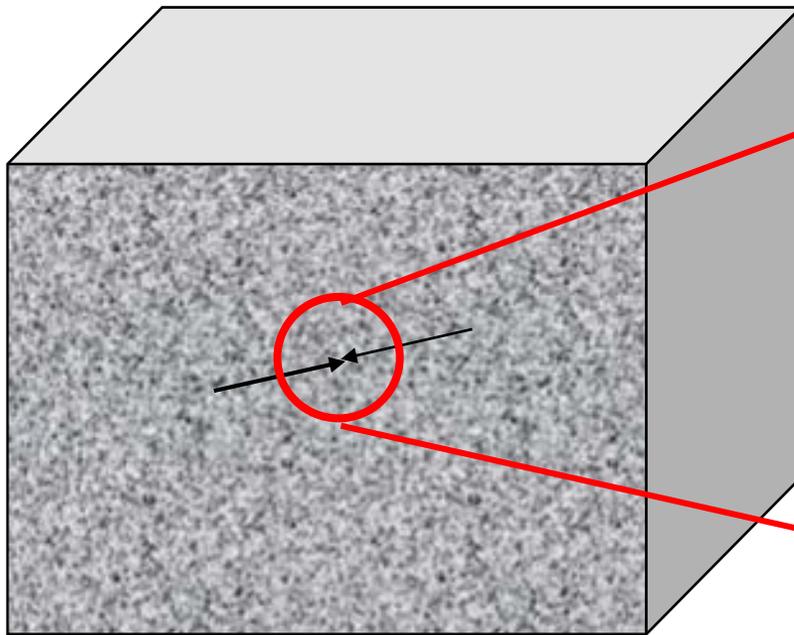


- einen Vereinigungs-Punkt bei  $M_X = 2 \cdot 10^{16}$  GeV !
- Proton-Lebensdauer  $>$  expt. Grenze
- leichtestes SUSY-Teilchen  
Dunkle Materie im Universum !
- beseitigt mathemat. Inkonsistenzen in der Theorie

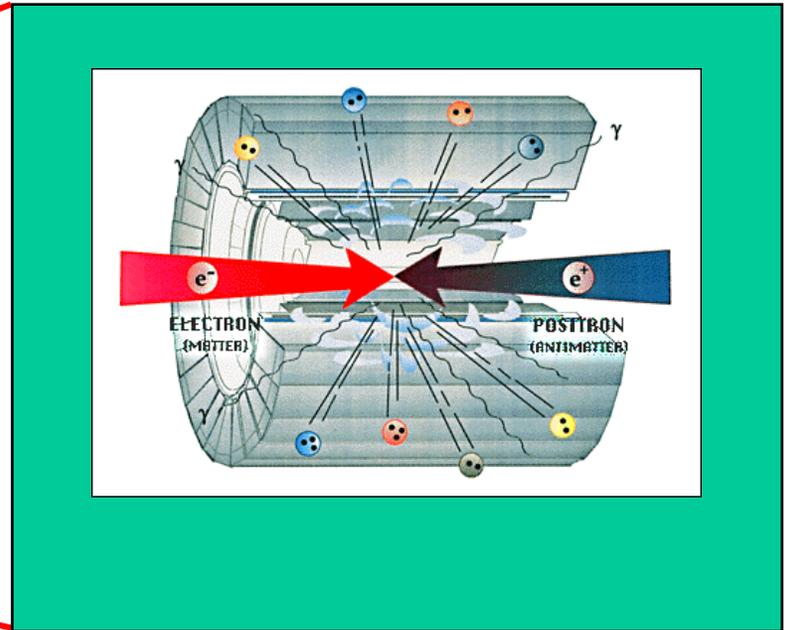
# Zusammenhang Kosmologie - Teilchenphysik

frühes Universum: Temperatur  $10^{15}$  K →  
Bewegungsenergie der Teilchen: 100 GeV

Teilchenbeschleuniger: →  
Bewegungsenergie der Teilchen: 100 GeV



alle Teilchen  
kollidieren unkontrolliert

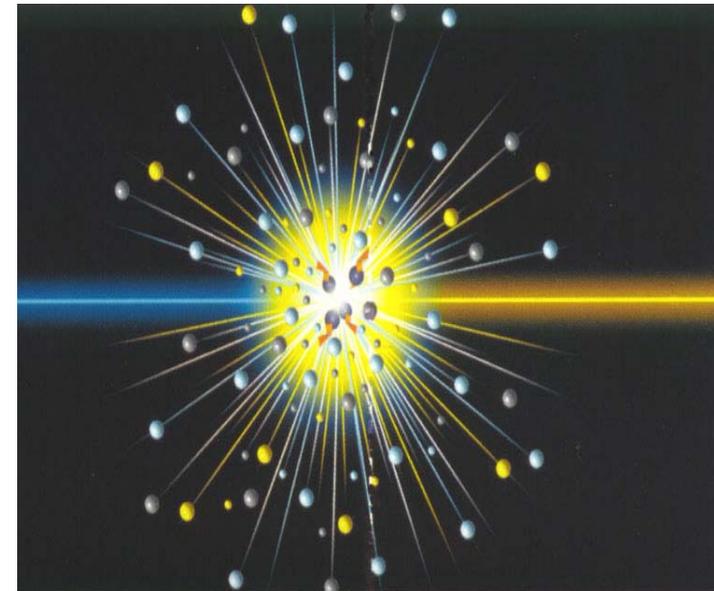
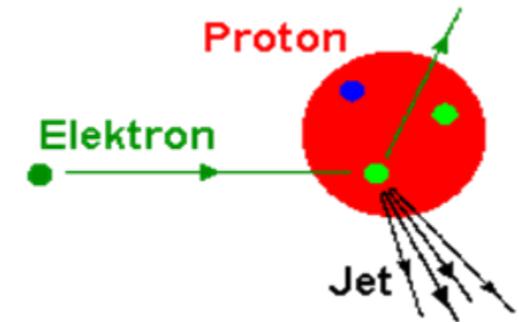


gezielte, kontrollierte  
einzelne Kollisionen  
und deren Aufzeichnung

# Teilchenphysik = Hochenergiephysik

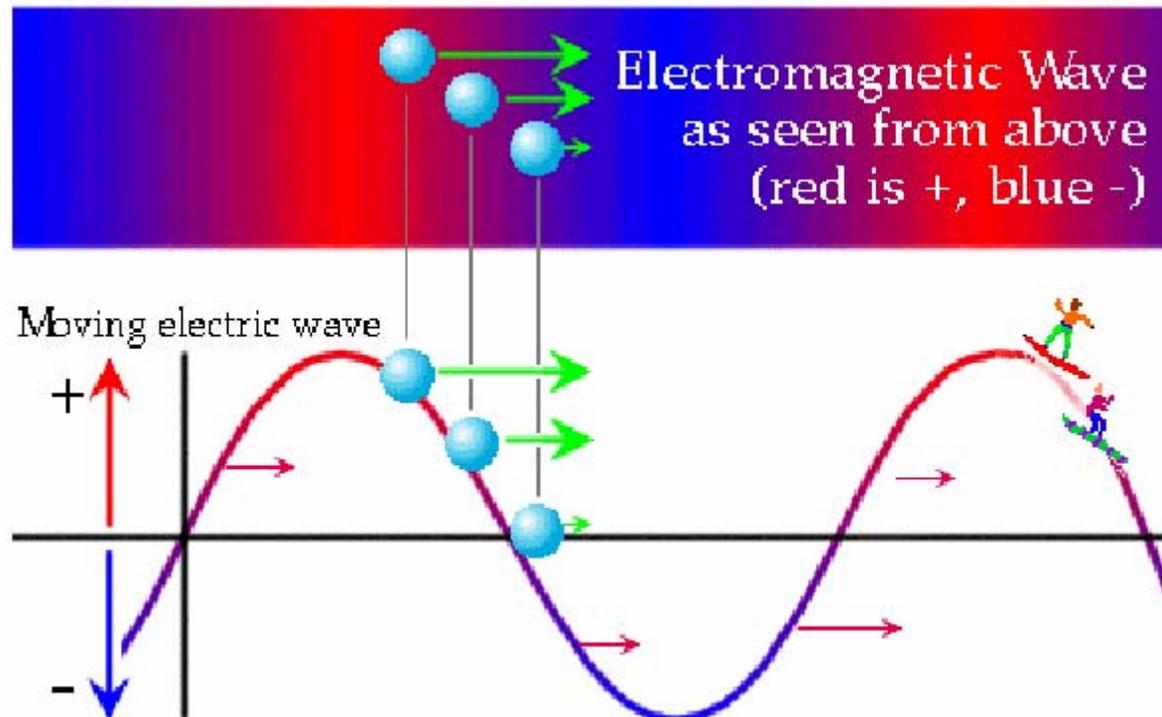
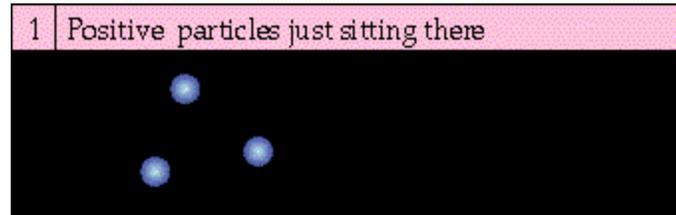
Forscher nutzen Teilchenstrahlen höchster Energie, denn mit steigender Energie  $E$  (Impuls  $p$ ) der Projektile steigt

- die Fähigkeit,  
**kleine Strukturen  $\Delta x$  zu erkennen**  
 $\Delta x \Delta p = \hbar$  (**Heisenberg**)
- die Fähigkeit,  
**neue schwere Teilchen zu erzeugen**  
 $E = mc^2$  (**Einstein**)



# Wie beschleunigt man ein Teilchen?

Mit einem elektrischen Feld!

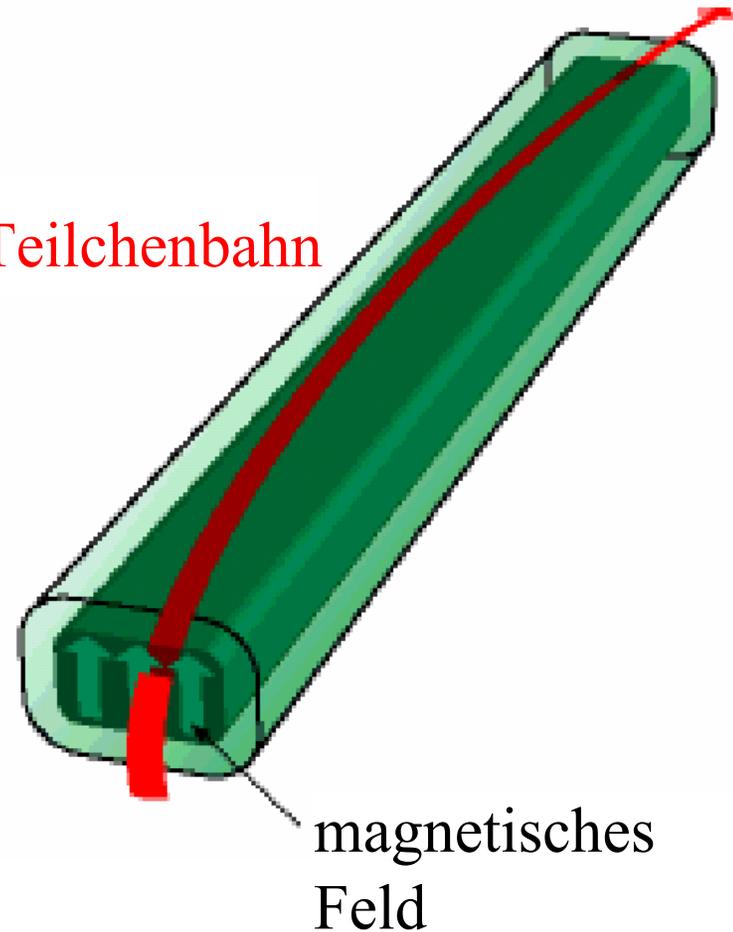


Dies ist nur möglich mit **elektrisch geladenen** Teilchen!

# Wie lenkt man ein Teilchen?

Mit einem Magnetfeld!

Teilchenbahn



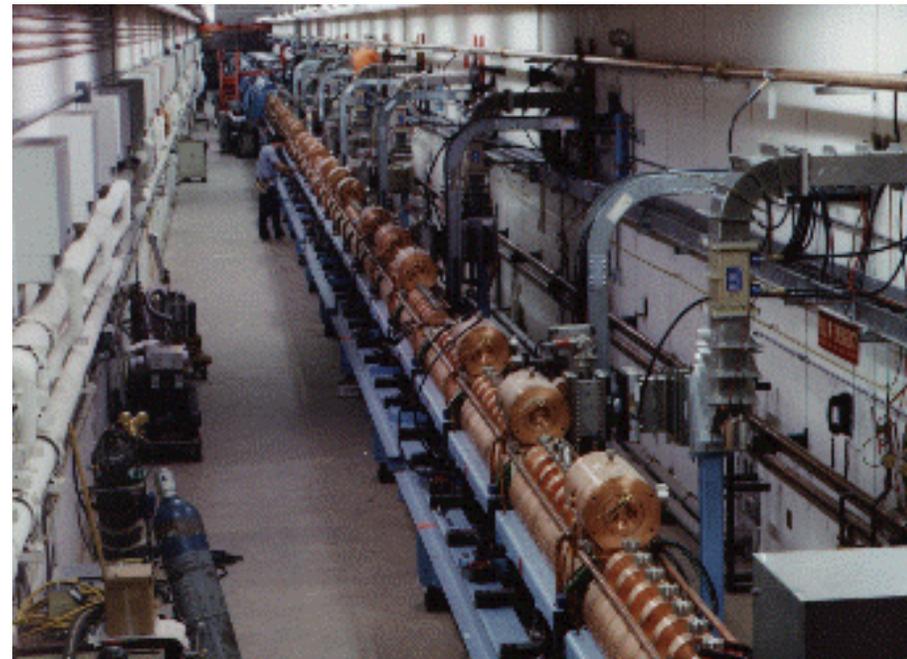
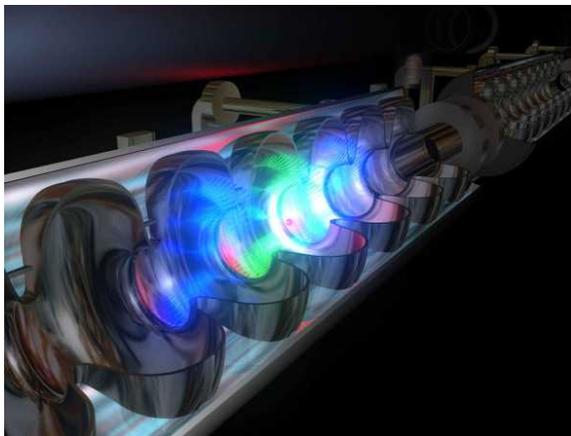
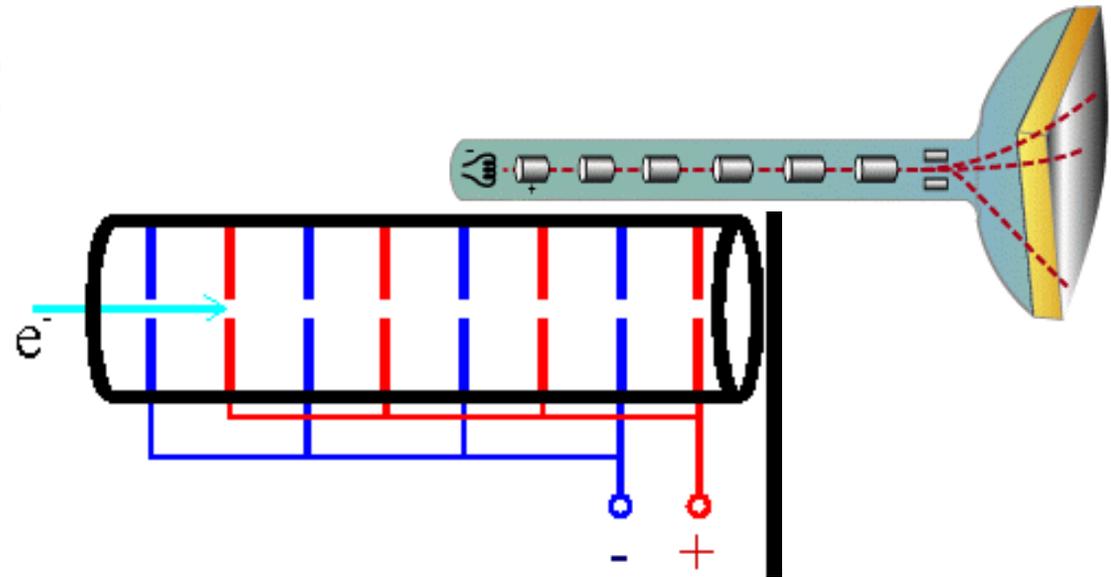
sehr starke Magnetfelder  
notwendig

=> hoher Stromverbrauch

=> Nur möglich mit **supraleitenden** Magneten

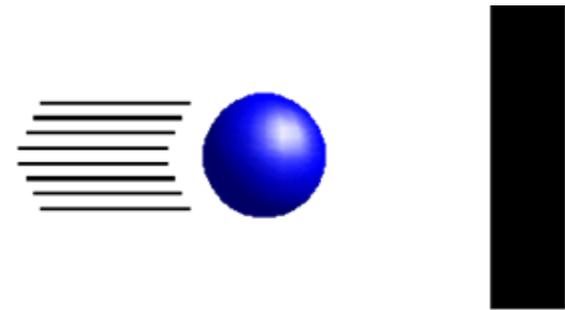
# Die Mikroskope der Teilchenphysik: Beschleuniger

- Haben Sie auch daheim!
- Funktionsprinzip:  
[Simulation](#)
- **Linearbeschleuniger:**
- **Fermilab, Chicago (in Betrieb)**
- **DESY, Hamburg (in Planung)**



# Vom Beschleuniger zum Collider

Ein **Beschleuniger** lenkt einen Strahl von beschleunigten Teilchen auf ein festes Ziel.

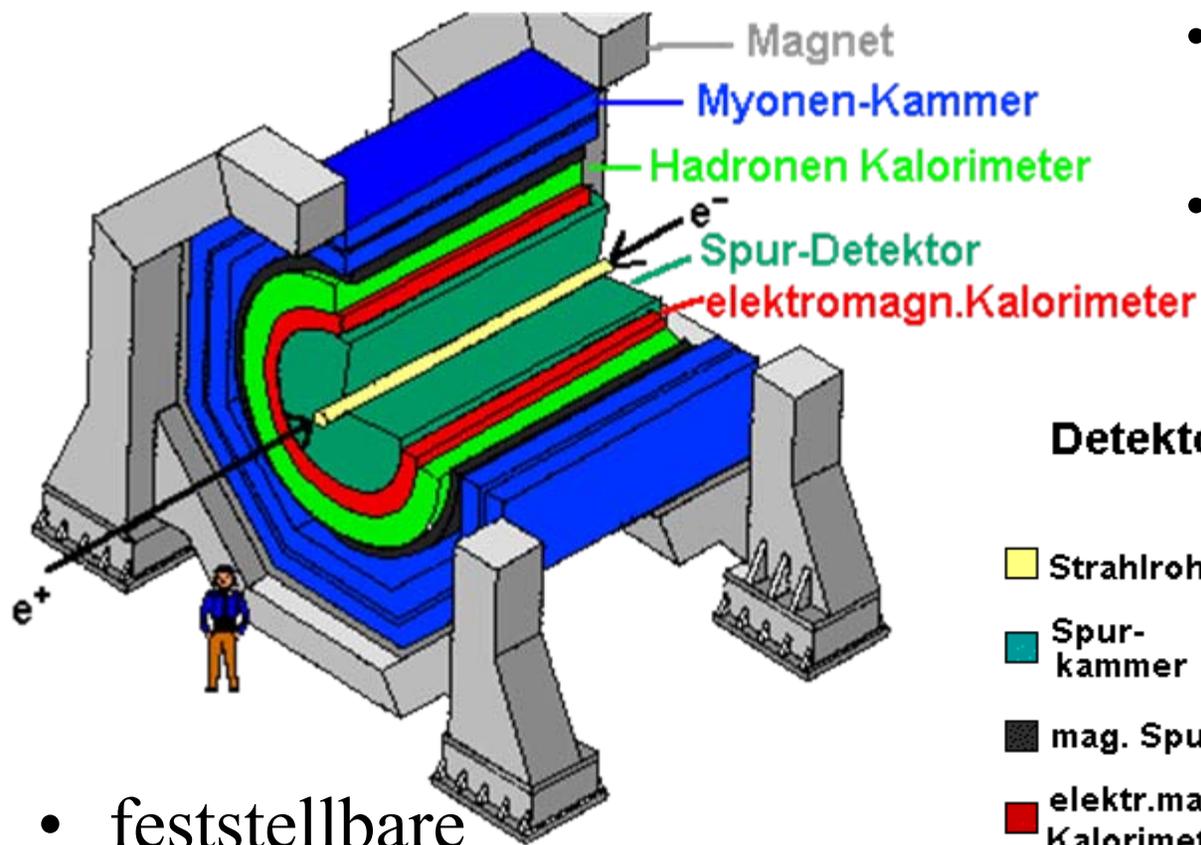


**Collider** – zwei kombinierte Beschleuniger:  
Zwei Teilchenstrahlen werden beschleunigt  
und zur Kollision gebracht.





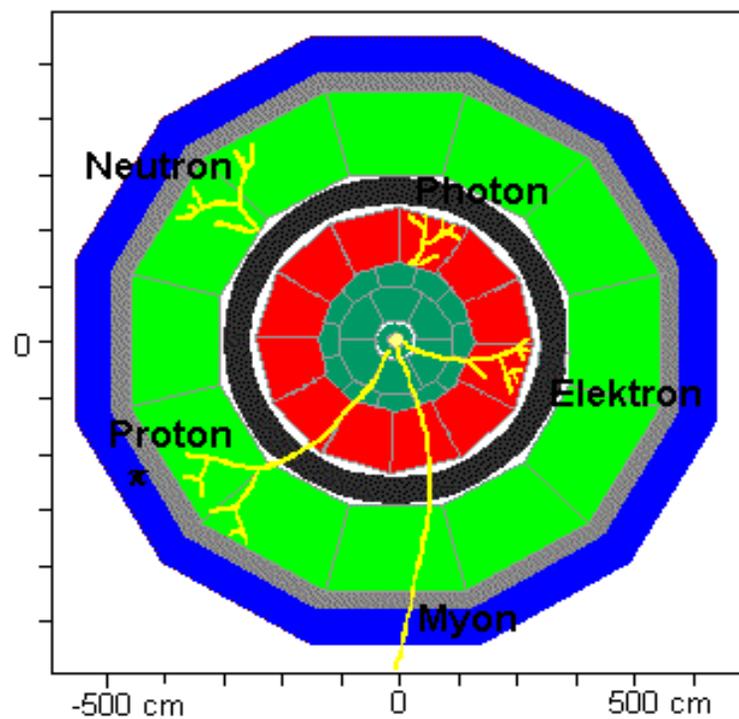
# Teilchenidentifikation ist Detektivarbeit



- Zwiebelschalenartiger Aufbau verschiedener Komponenten
- Jede Teilchenart hinterlässt bestimmte Kombination von Signalen in den Komponenten

Detektorquerschnitt mit Teilchenspuren

- Strahlrohr
- Spur-kammer
- mag. Spule
- elektr. mag. Kalorimeter
- hadron. Kalorimeter
- magnet. Eisen
- Myonen Kammer

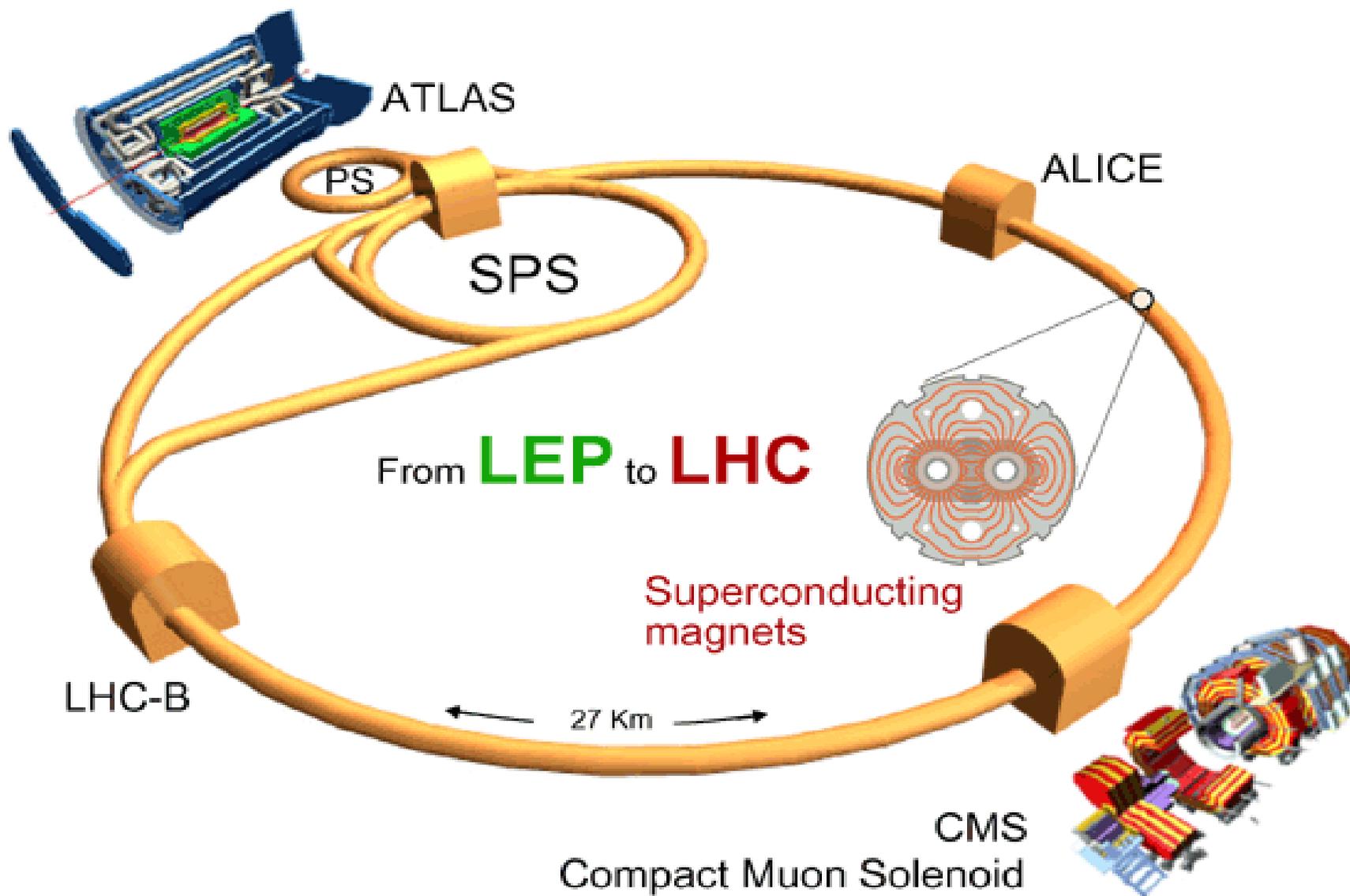


- feststellbare **Teilcheneigenschaften:**
  - aus Quarks („Hadronen“)
  - elektr. geladen / ungeladen
  - leicht / schwer

# Das Forschungszentrum CERN in Genf



# LHC: Das Instrument der Zukunft





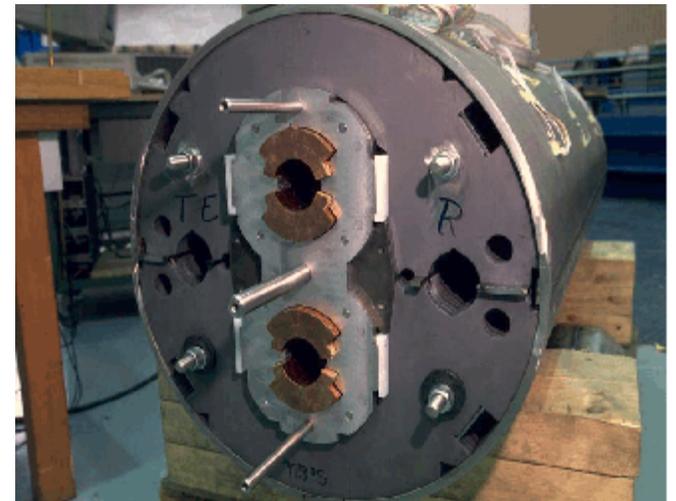
**Der Large Hadron Collider (LHC)  
Ist ein 27 km langer Kollisionsring,  
der sich im 27 km langen Tunnel  
von LEP 100 m unter der Erde bei  
Genf (CERN) befindet.**

# Wozu den LHC?

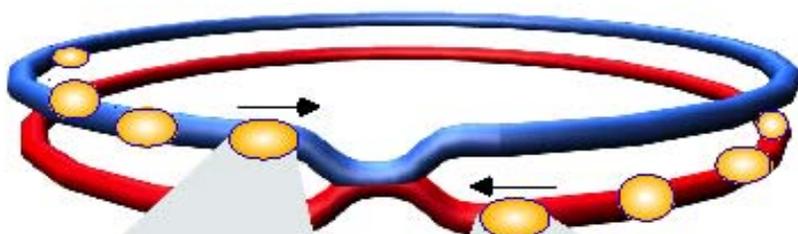
- Steigerung der Schwerpunktsenergie (Energie, die zur Erzeugung neuer Teilchen zur Verfügung steht) von 200 GeV auf 14000 GeV
- erlaubt die Entdeckung neuer Teilchen sowie den Zugang in bislang unerforschte Bereiche:
  - **Higgs**
  - **Supersymmetrische Teilchen**
- Steigerung der Luminosität (ein Maß für die Rate der Teilchenkollisionen) von  $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  auf  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

# Herausforderungen beim LHC

- Strahlen enthalten viele Protonen bei sehr hoher Energie => extrem gute Kontrolle notwendig
- Magnete:
  - sehr große Felder (9 Tesla) notwendig
  - LEP-Tunnel: kompakte Bauweise
  - komplett neues Design!



# Teilchenkollisionen bei LHC



<b>Proton-Proton</b>	2835 bunch/beam
<b>Protons/bunch</b>	$10^{11}$
<b>Beam energy</b>	7 TeV ( $7 \times 10^{12}$ eV)
<b>Luminosity</b>	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Bunch



Ereignisrate bei ATLAS :

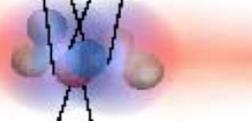
Proton



$N = L \times \sigma \text{ (pp)} \approx 10^9 \text{ Wechselwirkungen pro s}$

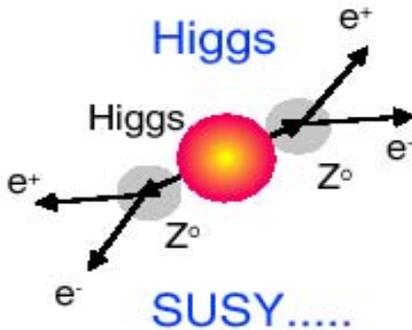
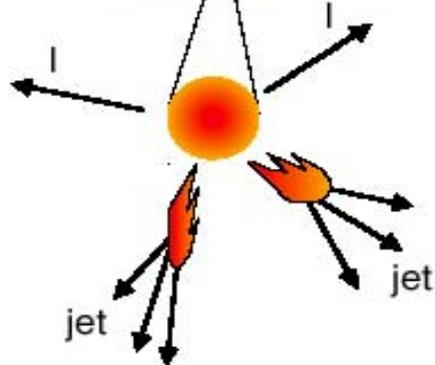
**Aber:** am häufigsten sind Untergrundereignisse

Parton  
(quark, gluon)



Interessante Ereignisse sind sehr selten!

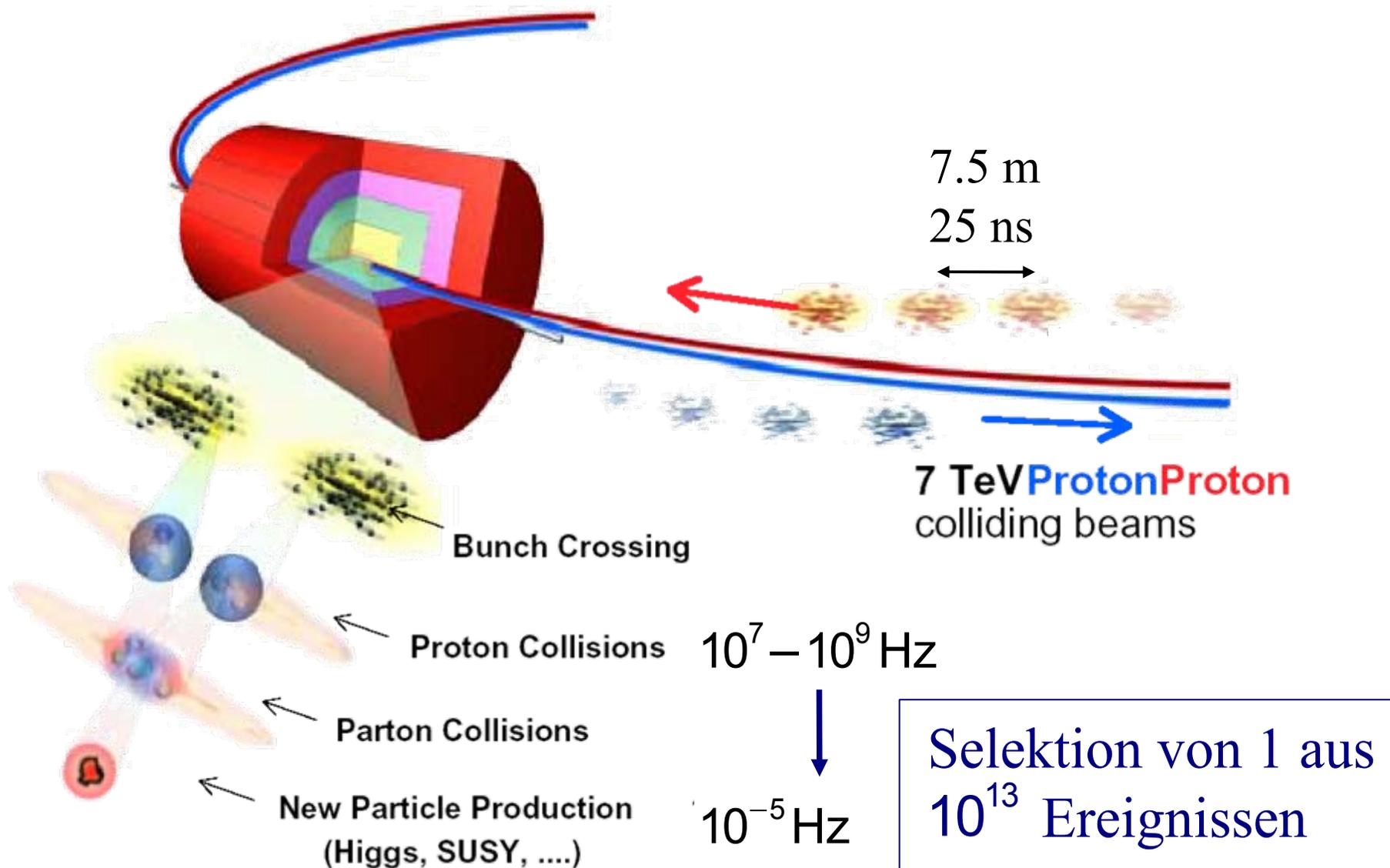
Particle



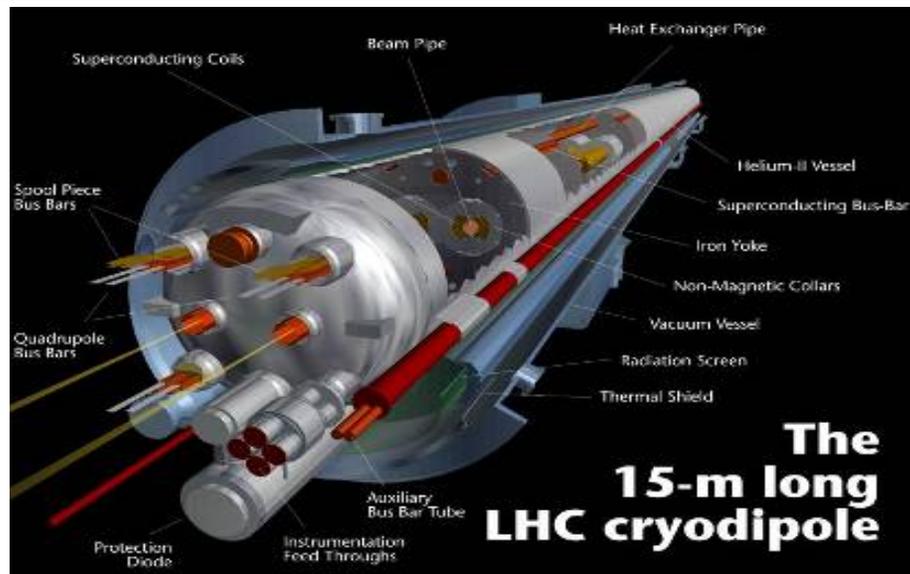
**Selection of 1 in  
10,000,000,000,000**

**→ Extrem guter Detektor und Datenselektion notwendig**

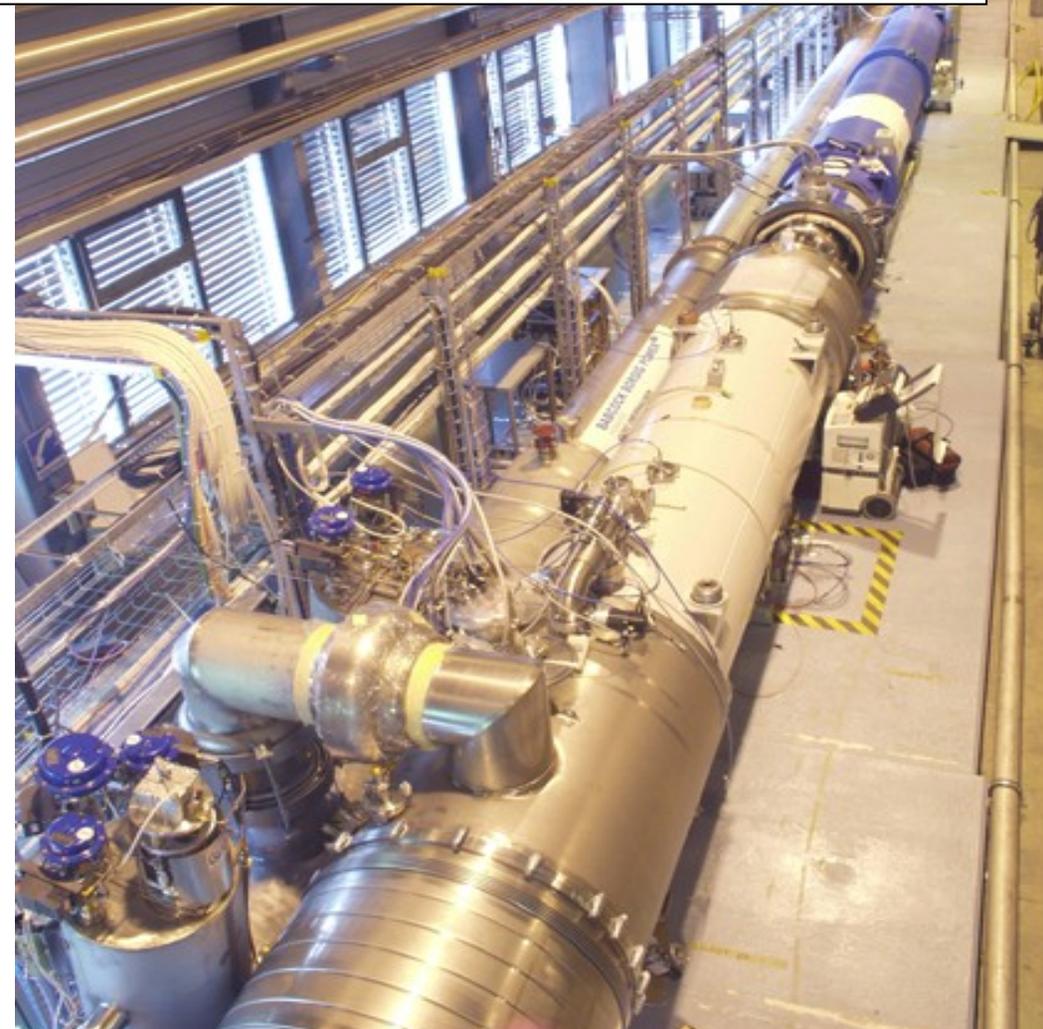
# Was muß ein Trigger können?



# Der LHC - Beschleuniger



Erstes komplettes LHC Element (~ 120 m) :  
6 Diopole + 4 Quadrupole  
Erfolgreicher Test bei voller Leistung (12 kA)





# Instalation im Tunnel

Installationsrate:  
konstant 20-25/Woche )

Erster Abschnitt von 600 m der “Kryoline”  
(QRL) wurde im September 2005  
erfolgreich gekühlt



Dipol-Verbindungen

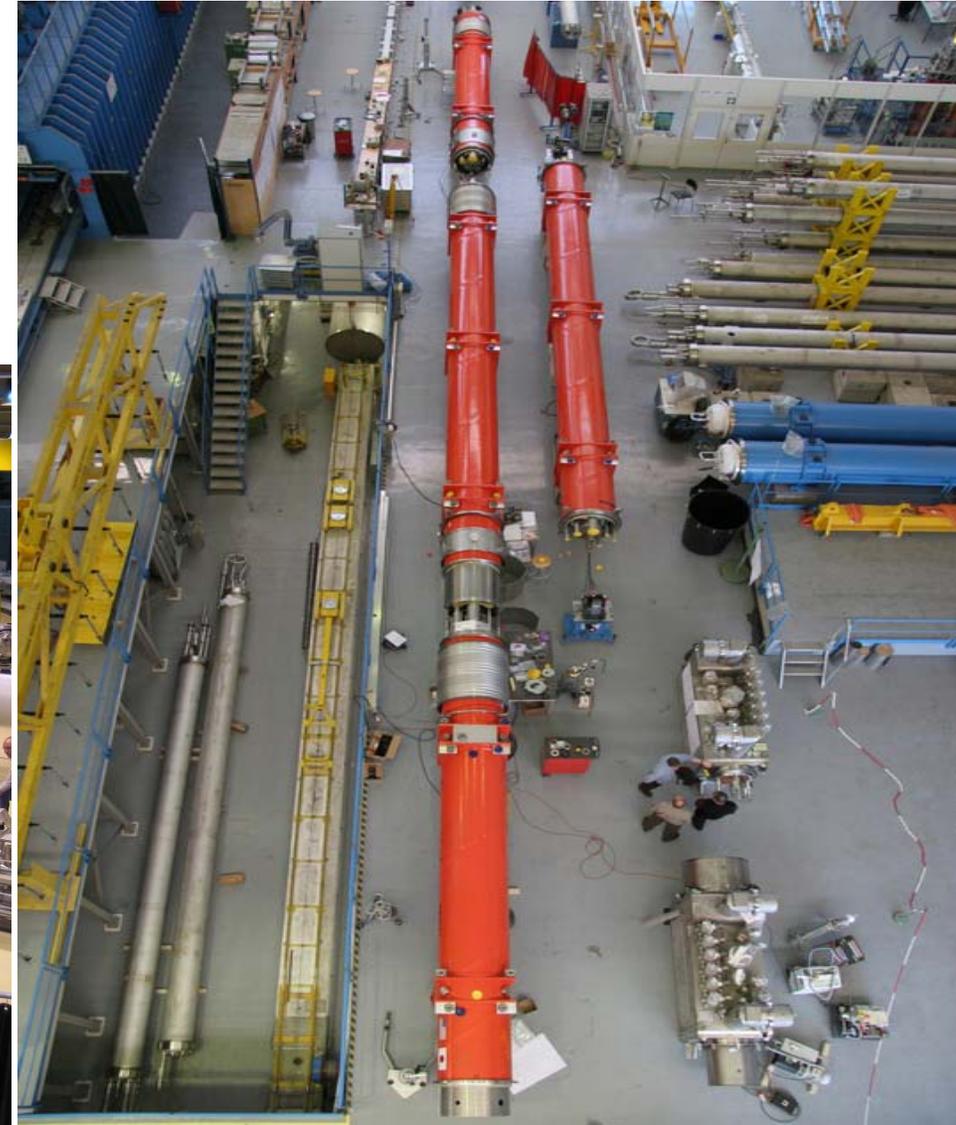


# Aber LHC besteht nicht nur aus Dipolen!

<b>Dipole:</b>	<b>1232</b>
<b>Quadrupole:</b>	<b>400</b>
<b>Sextupole:</b>	<b>2464</b>
<b>Oktupole/Dekapole:</b>	<b>1568</b>
<b>Orbitkorrektoren:</b>	<b>642</b>
<b>Andere:</b>	<b>376</b>
<b>Total</b>	<b>~ 6700</b>

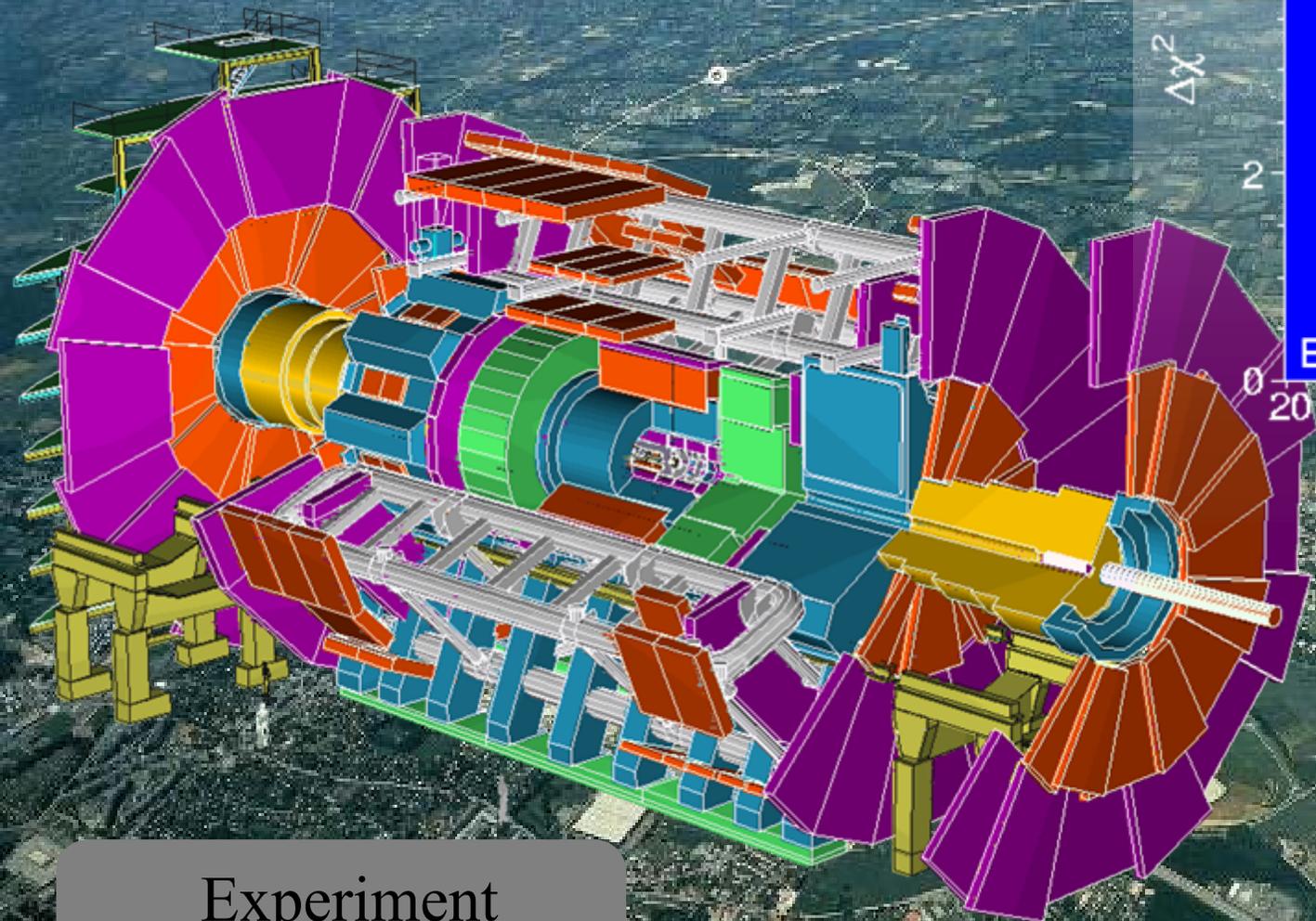
**Weiterer Zusammenbau in der Montagehalle:**

**Montage der Bauteile**

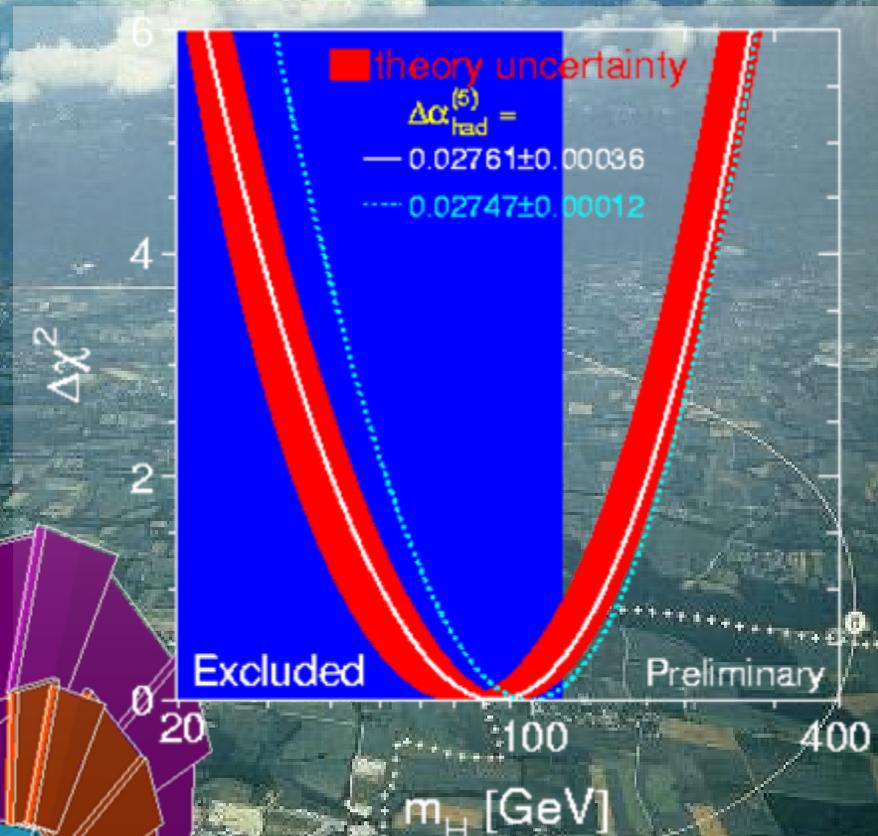


# Aktuelles Projekt: LHC am CERN/Genf

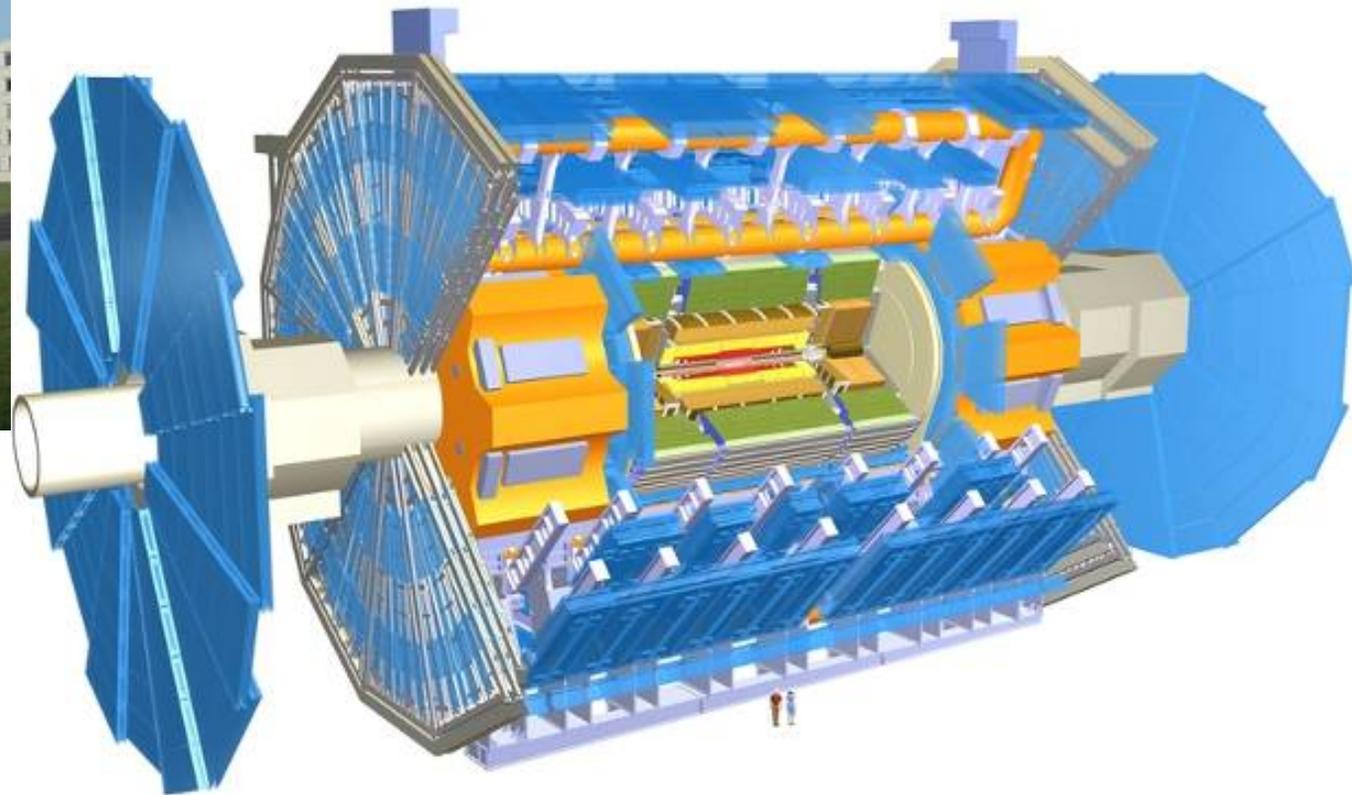
## Start Anfang 2008



Experiment  
ATLAS



# Der Atlas Detektor hat unerreichte Größe.....

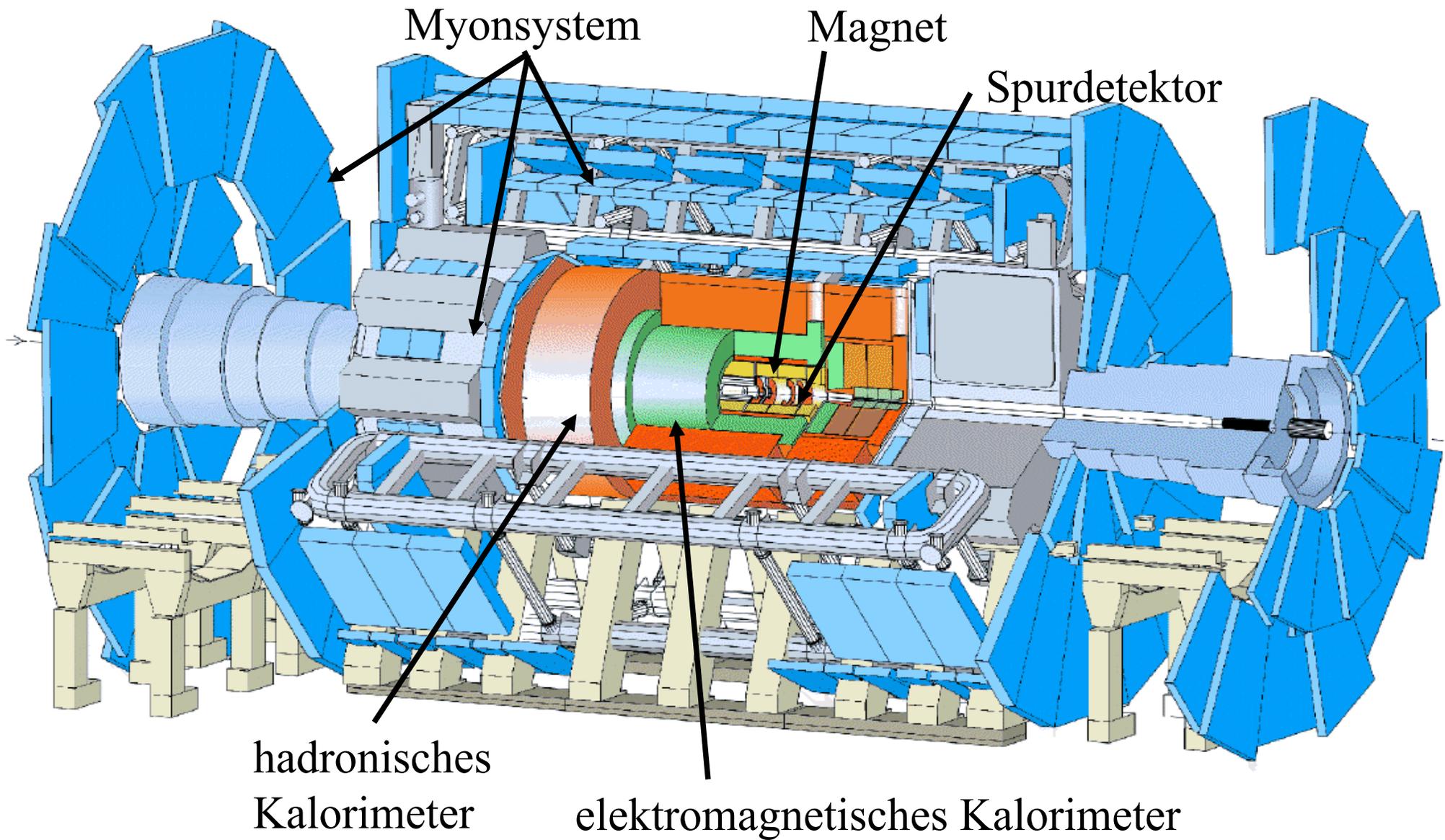


**ATLAS ist höher als das Bürogebäude mit 5 Stockwerken**

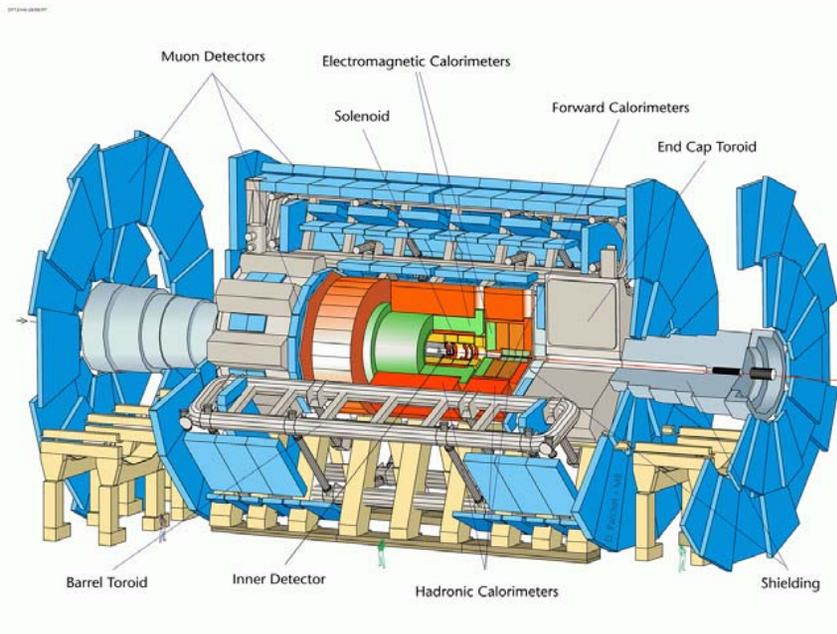
*Durchmesser*  
*Barrel Toroid Länge*  
*Gesamtlänge*  
*Totales Gewicht*

*25 m*  
*26 m*  
*46 m*  
*7000 t*

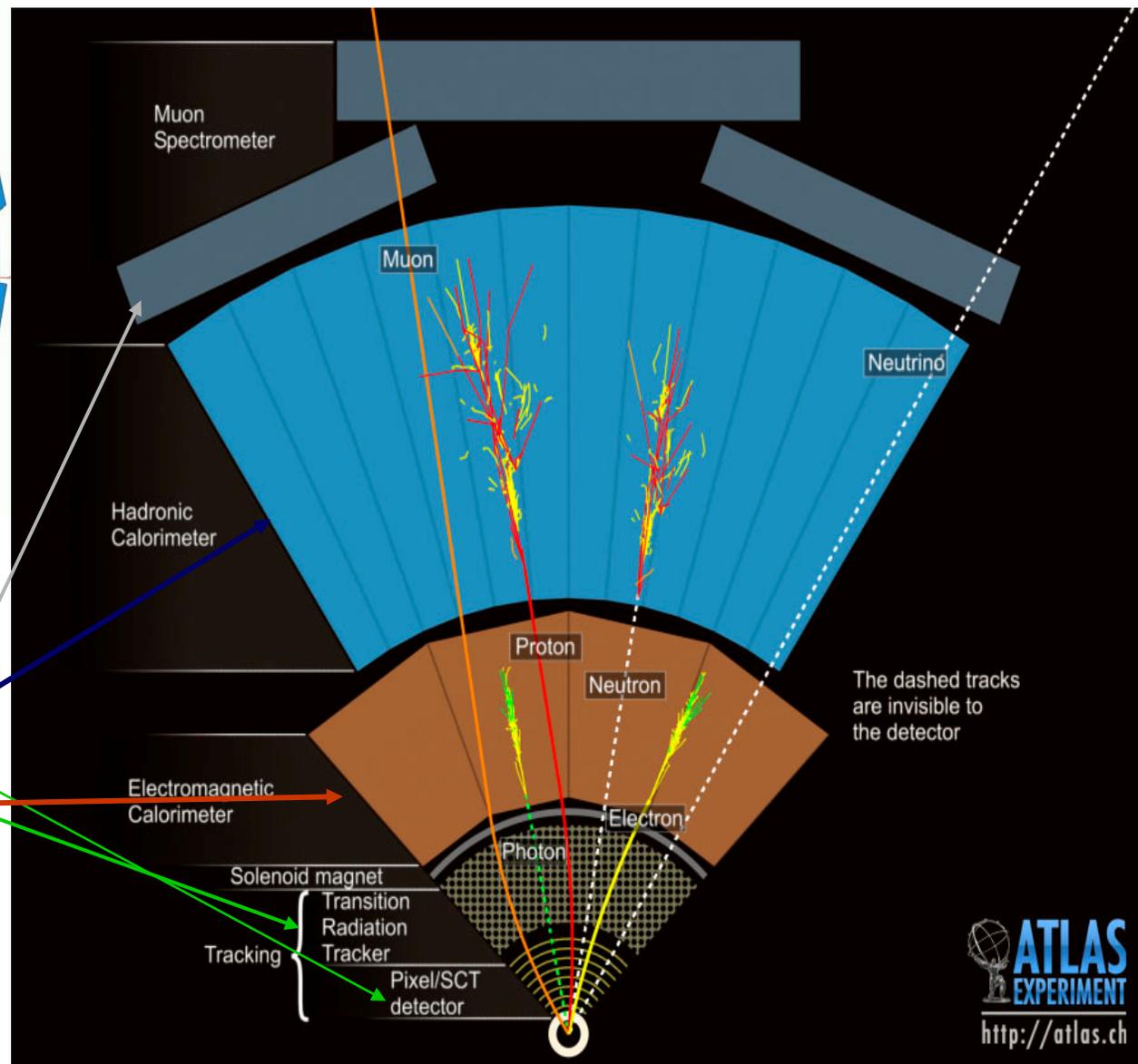
# Der Atlas-Detektor



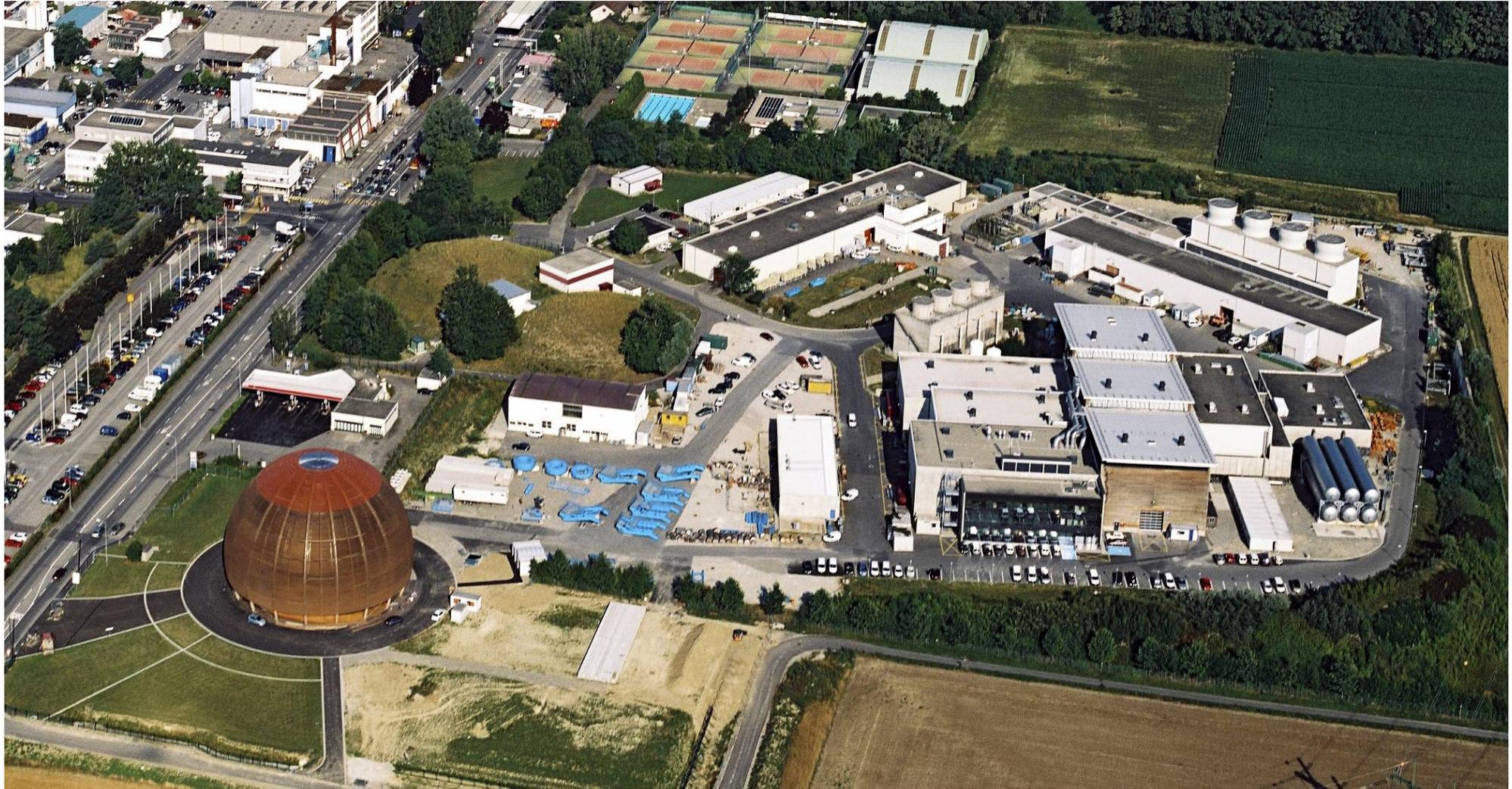
# Teilchen-Erkennung bei ATLAS



- **Spurkammersystem :**
  - hoch auflösender HLT
  - TRT (e/ $\pi$  Trennung)
- **Energie Messung:**
  - EM : Pb-LAr
  - HAD: Fe/Szint. (cent), Cu/W-LAr (fwd)
- **Muon Spektrometer:**  
Toroid mit Muon-Kammern

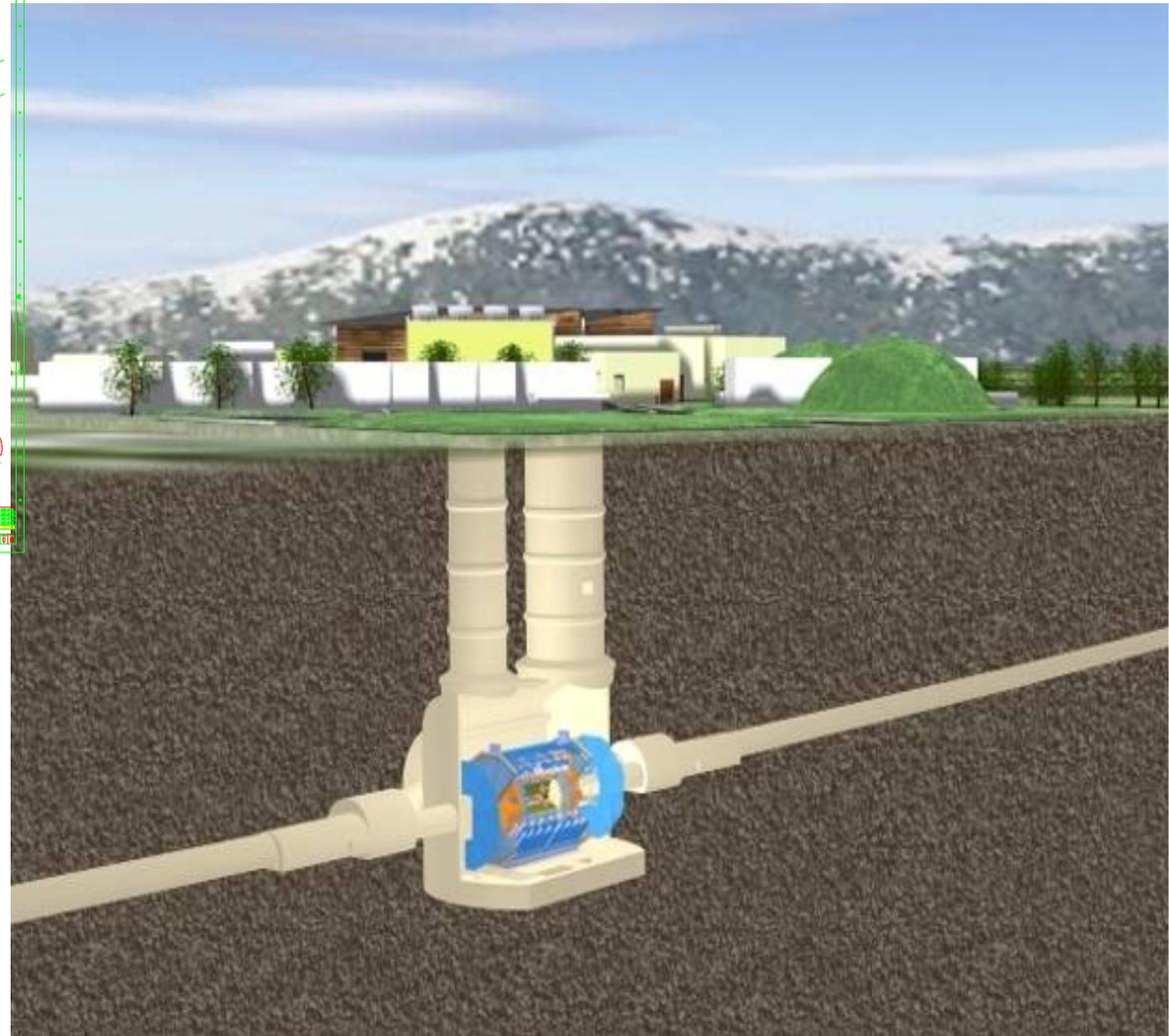
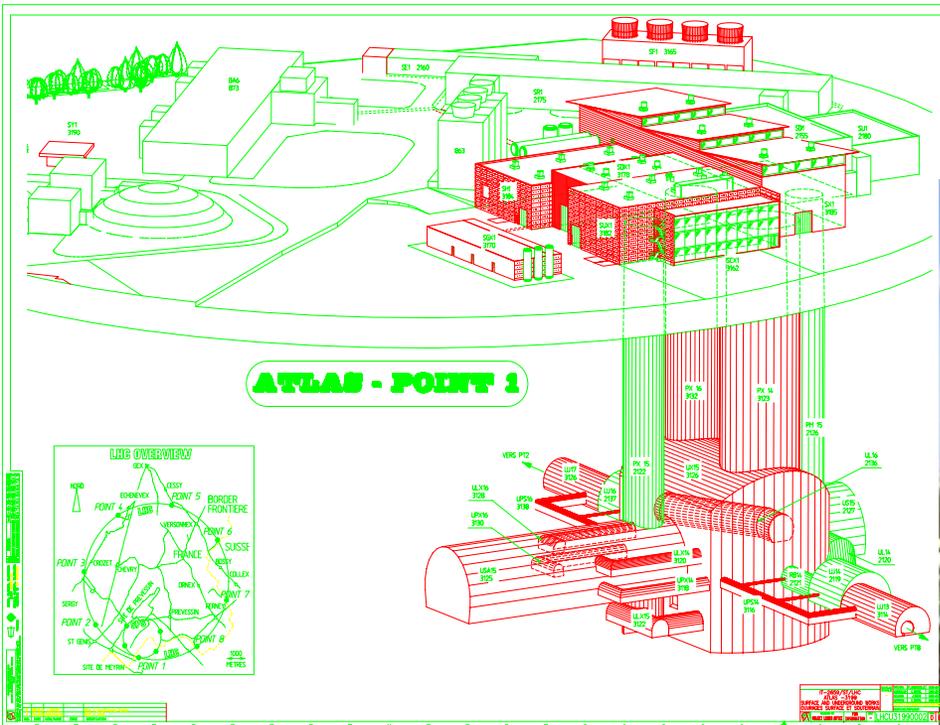


# Das ATLAS-Areal überirdisch gesehen...



**(Auf der anderen Straßenseite des Haupteinganges von CERN)**

# Die unterirdische Kaverne des ATLAS Detektors



Länge = 55 m

Breite = 32 m

Höhe = 35 m

# Transport des Toroidmagneten des Myon-Systemes und Absenkung



# Die ersten Bauteile wurden im Oktober 2004 installiert.

UX15 Jura Thu Nov 18 15:30:02 2004



Abkühlung nach dem Einbau, Fertigstellung im Mai 2006

Die letzte Spule wurde am 25. August 2005 eingebaut.



# ATLAS: weltweite Kollaboration

(Status Oktober 2005)

**34 Länder**

**153 Institute**

**1650 Wissenschaftler**

**(1330 mit PhD)**

**Neue Mitglieder 2005:**

**UN La Plata, U Buenos Aires (Argentina)**

**TU Dresden, U Giessen (Germany)**

**U Oregon, U Oklahoma (USA)**

**Neue Mitglieder 2006:**

**Humboldt-Universität zu Berlin,**

**DESY, SLAC, New York U (USA)**



Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Ancey, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku,

IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, Bern, Birmingham, Bologna, Bonn, Boston, Brandeis, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Bucharest, Cambridge, Carleton,

Casablanca/Rabat, CERN, Chinese Cluster, Chicago, Clermont-Ferrand, Columbia, NBI Copenhagen, Cosenza, INP Cracow, FPNT Cracow, Dortmund, JINR Dubna, Duke, Frascati, Freiburg, Geneva, Genoa, Glasgow, LPSC Grenoble, Technion Haifa, Hampton, Harvard, Heidelberg, Hiroshima, Hiroshima IT, Indiana, Innsbruck, Iowa SU, Irvine UC, Istanbul Bogazici, KEK, Kobe, Kyoto, Kyoto UE, Lancaster, Lecce, Lisbon LIP, Liverpool, Ljubljana,

QMW London, RHBNC London, UC London, Lund, UA Madrid, Mainz, Manchester, Mannheim, CPPM Marseille, Massachusetts, MIT, Melbourne, Michigan, Michigan SU, Milano, Minsk NAS, Minsk NCPHEP, Montreal, McGill Montreal, FIAN Moscow,

IITEP Moscow, MEPH Moscow, MSU Moscow, Munich LMU, MPI Munich, Nagasaki IAS, Naples, Naruto UE, New Mexico, Nijmegen, BINP Novosibirsk, Ohio SU, Okayama, Oklahoma, LAL Orsay, Osaka, Oslo, Oxford, Paris VI and VII, Pavia, Pennsylvania, Pisa, Pittsburgh, CAS Prague, CU Prague, TU Prague, IHEP Protvino, Ritsumeikan, UFRJ Rio de Janeiro, Rochester, Rome I, Rome II, Rome III, Rutherford Appleton Laboratory, DAPNIA Saclay, Santa Cruz UC, Sheffield, Shinshu, Siegen,

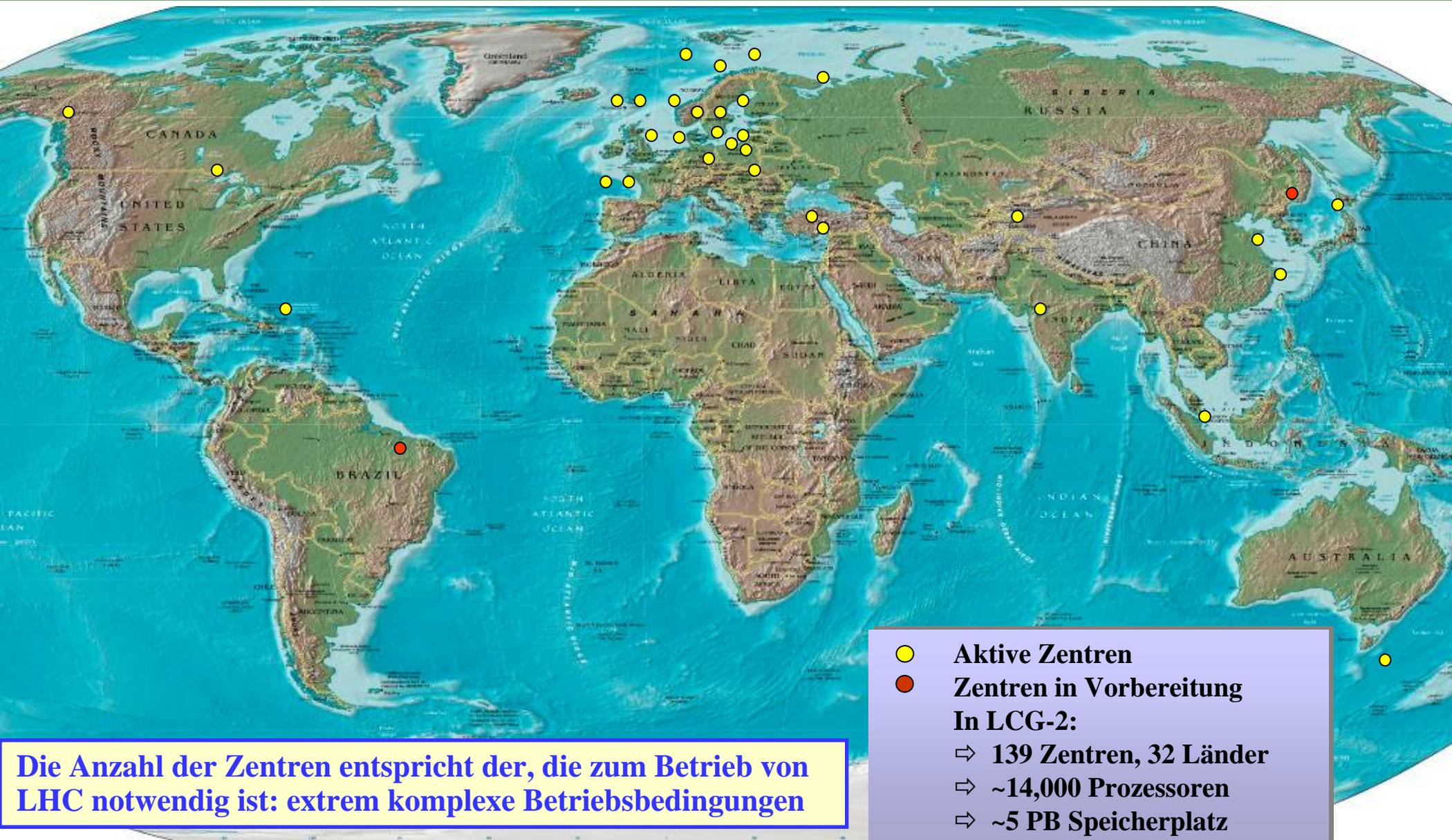
Simon Fraser Burnaby, Southern Methodist Dallas, NPI Petersburg, Stockholm, KTH Stockholm, Stony Brook, Sydney, AS Taipei, Tbilisi, Tel Aviv, Thessaloniki, Tokyo ICEPP, Tokyo MU, Toronto, TRIUMF, Tsukuba, Tufts, Udine, Uppsala, Urbana UI, Valencia,

UBC Vancouver, Victoria, Washington, Weizmann Rehovot, Wisconsin, Wuppertal, Yale, Yerevan

# Die Kollaborateure.....



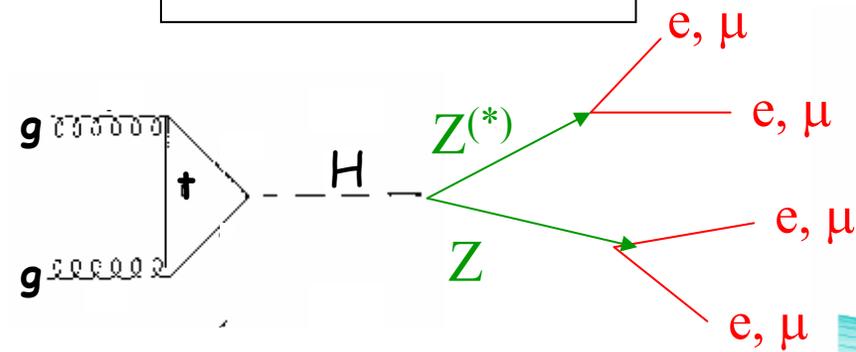
# Weltweite Computer-Vernetzung: GRID



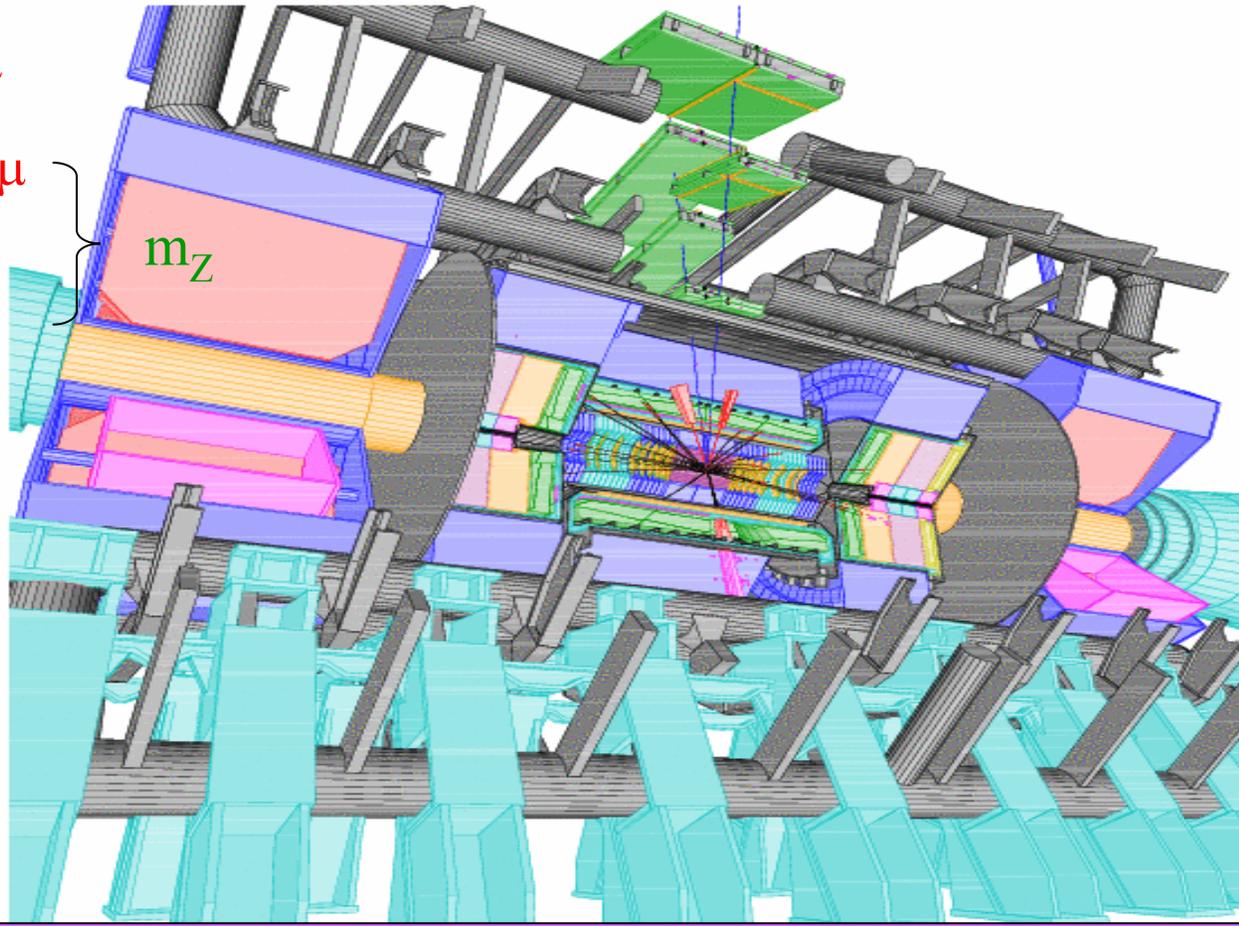
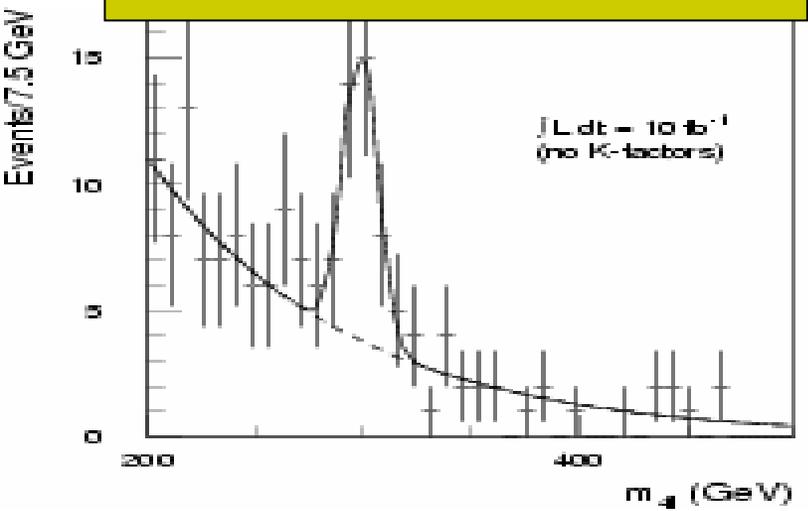
# Physikalisches Beispiel: ein mögliches Higgs-Ereignis

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \ell$$

Optimaler Kanal zur Entdeckung des Higgs-Teilchens bei LHC

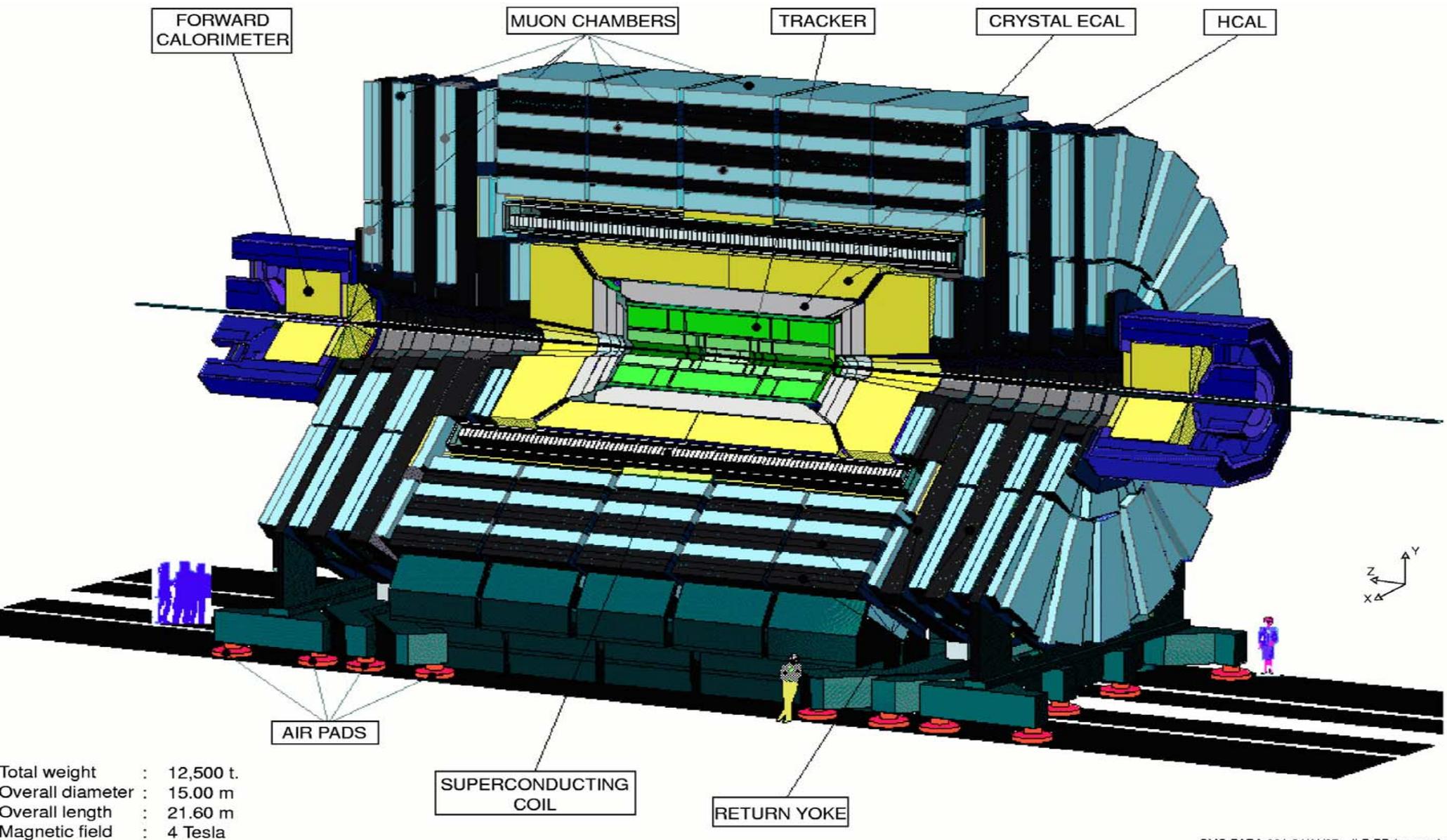


Zu erwartendes Higgs-Signal nach 1 Jahr Messen

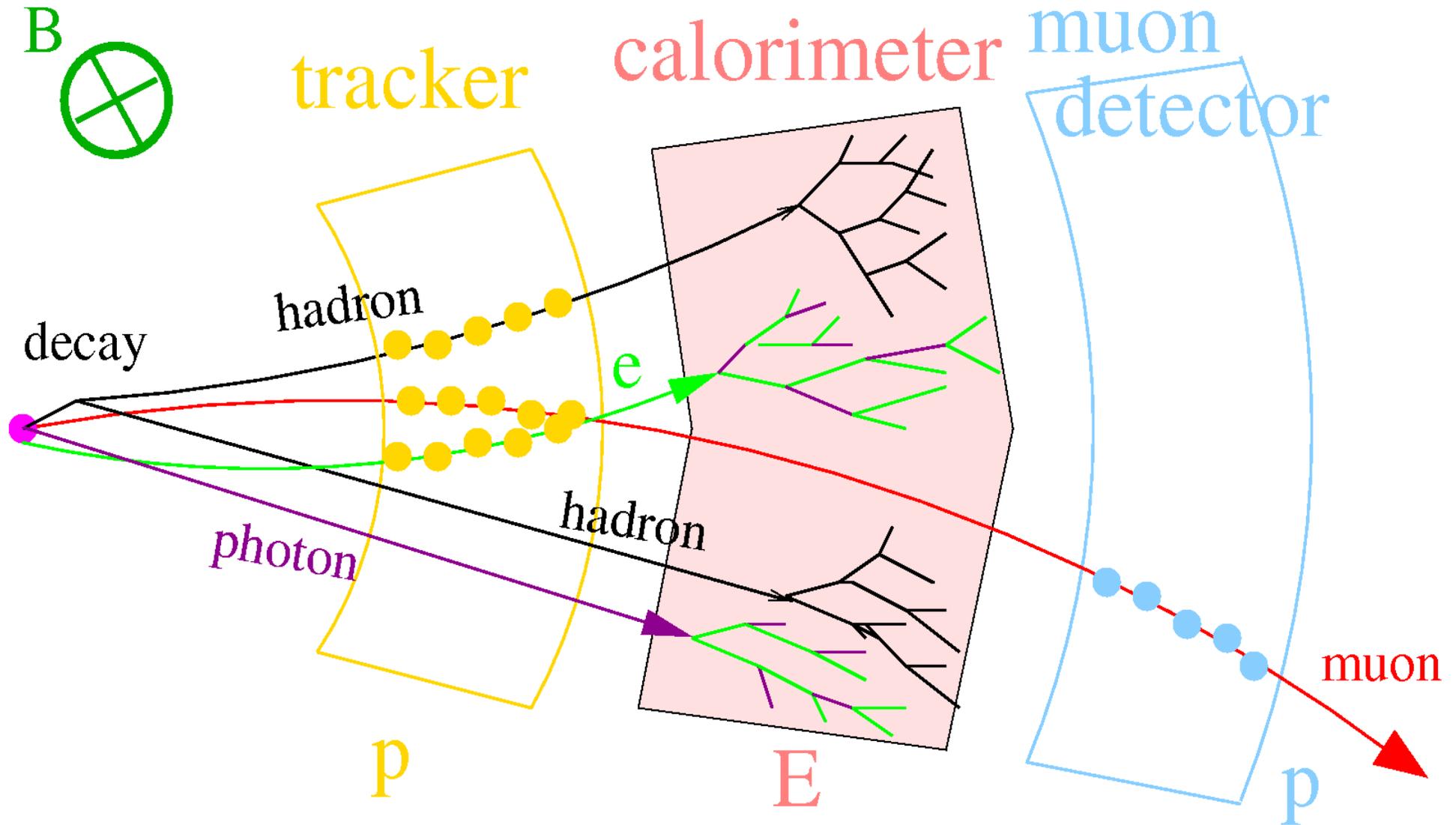


Simulation eines  $H \rightarrow \mu\mu ee$  Ereignisses in ATLAS

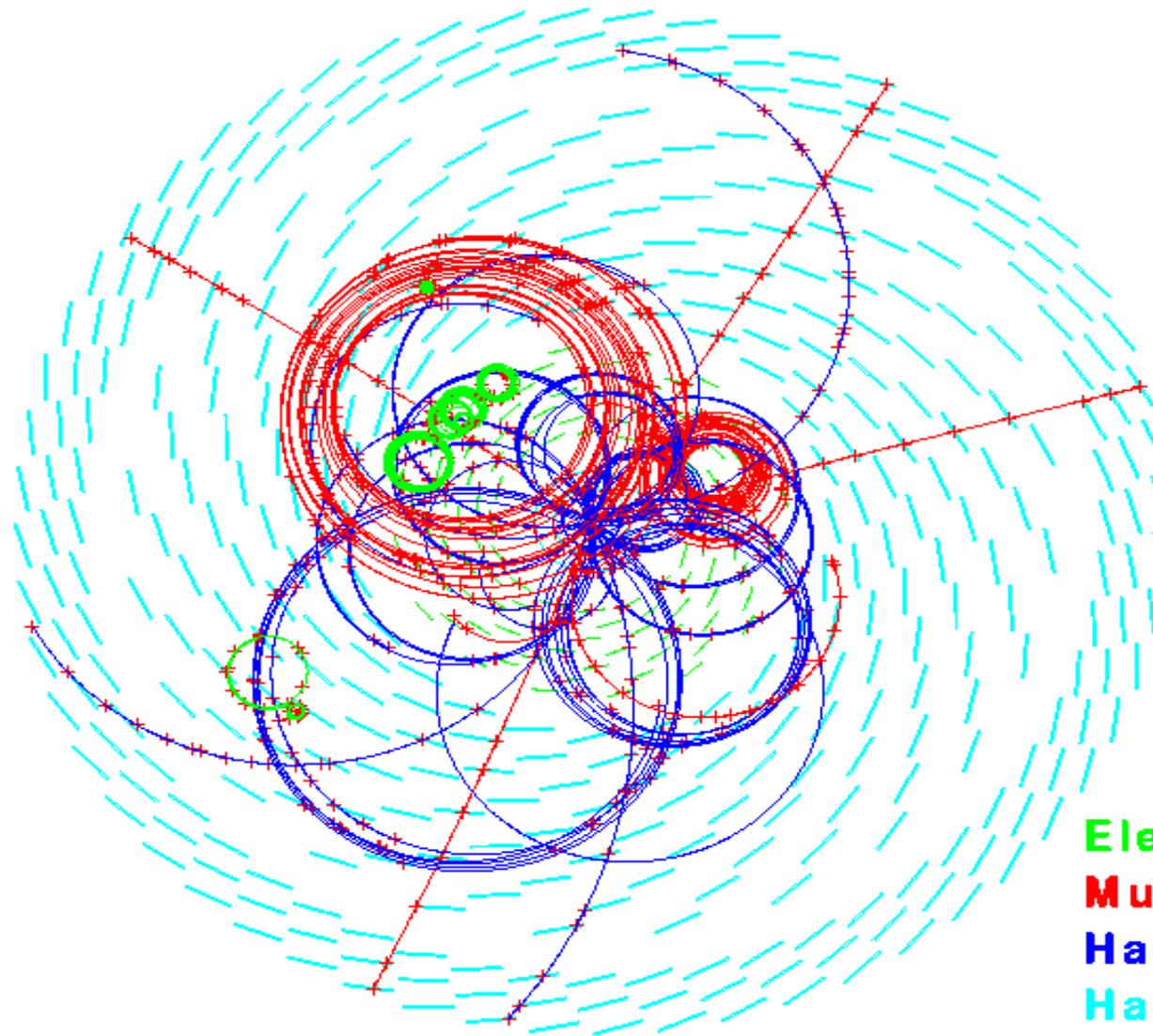
# Die kompakte Schwester: Der CMS Detektor



# Teilchennachweis bei LHC (CMS)



# Higgs Ereigniss: Radiale Projektion



# CMS

$H \rightarrow \mu\mu\mu\mu$   
 $m(H) = 150 \text{ GeV}$

Electrons

Muons

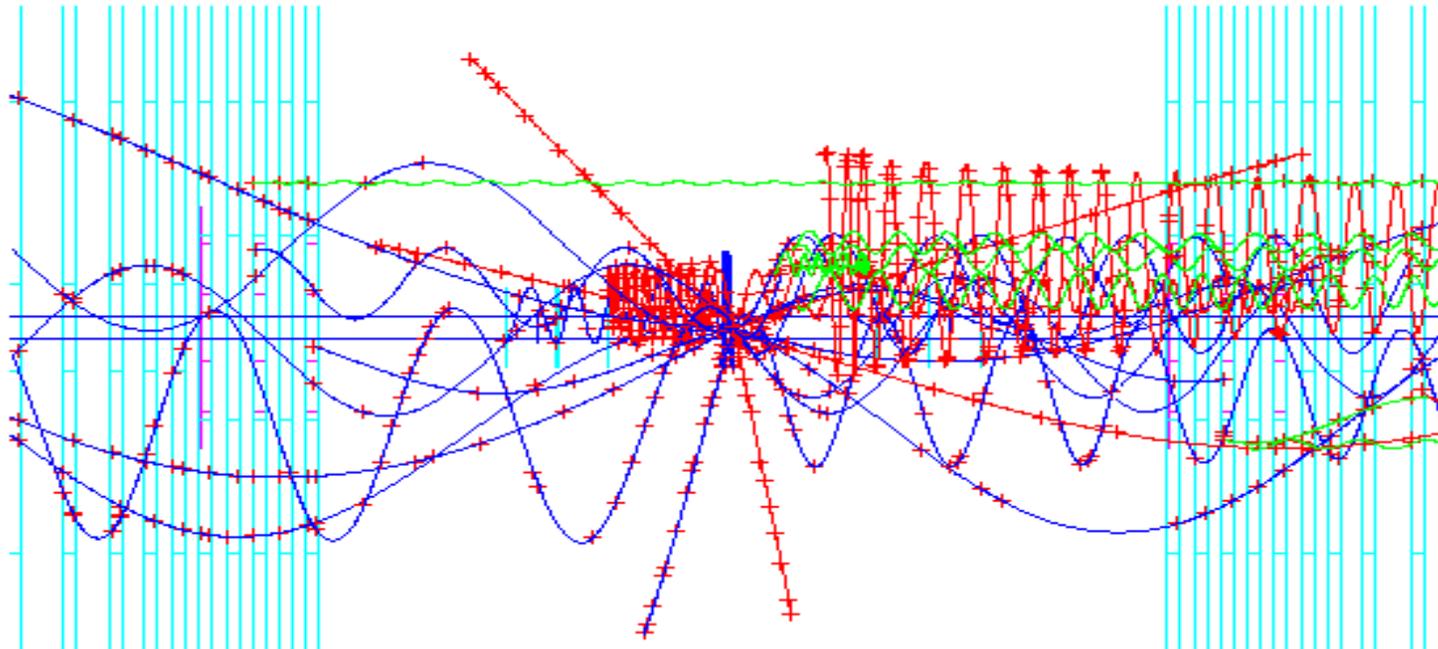
Hadrons  $p_t < 2 \text{ GeV}$

Hadrons  $p_t > 2 \text{ GeV}$

# Higgs Ereigniss: Projektion entlang der Strahlachse

# CMS

$H \rightarrow \mu\mu\mu\mu$   
 $m(H) = 150 \text{ GeV}$



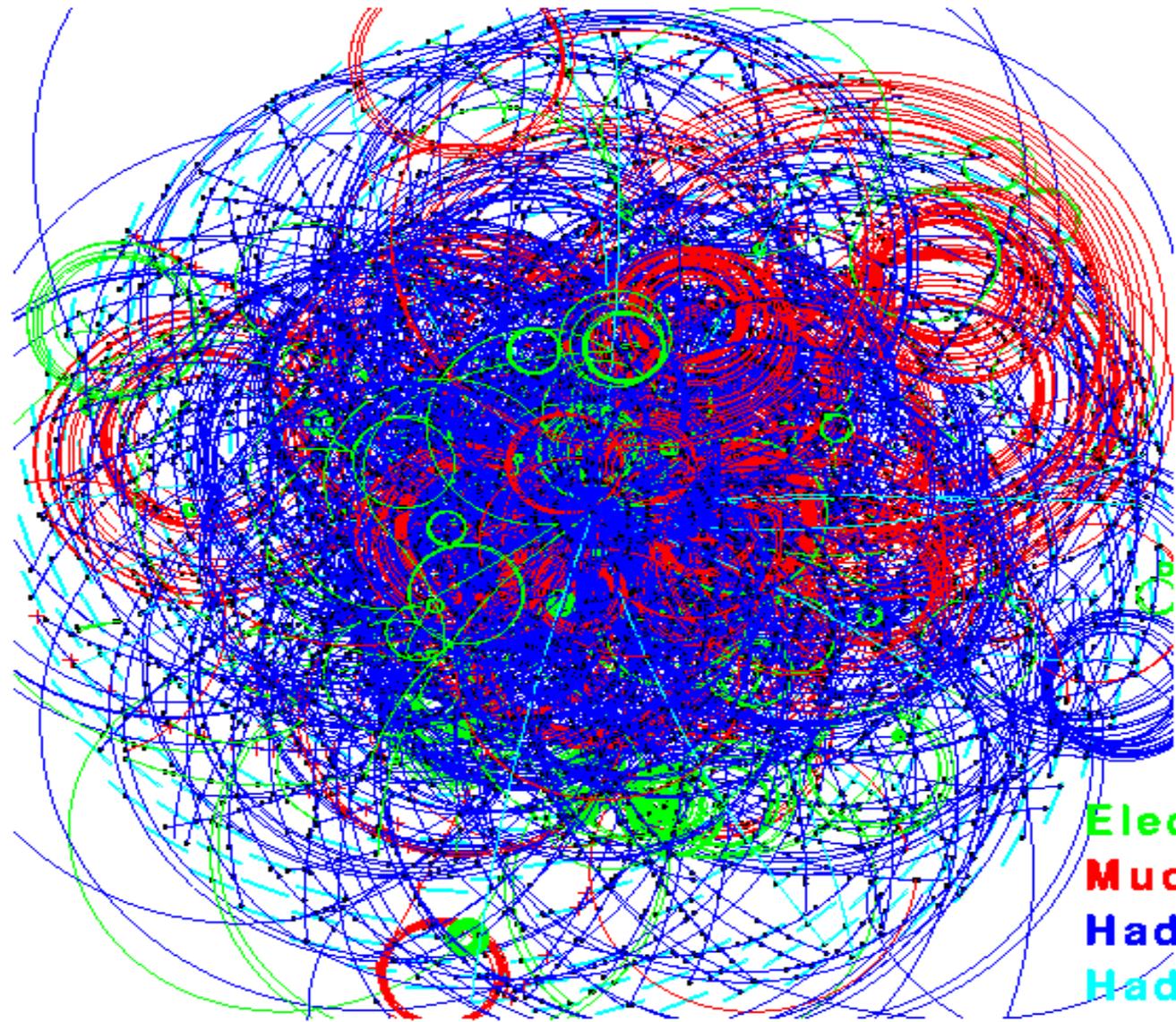
**Electrons**

**Muons**

**Hadrons  $p_t < 2 \text{ GeV}$**

**Hadrons  $p_t > 2 \text{ GeV}$**

# Realistisches Ereignisbild (20 überlagerte Ereignisse)



# CMS

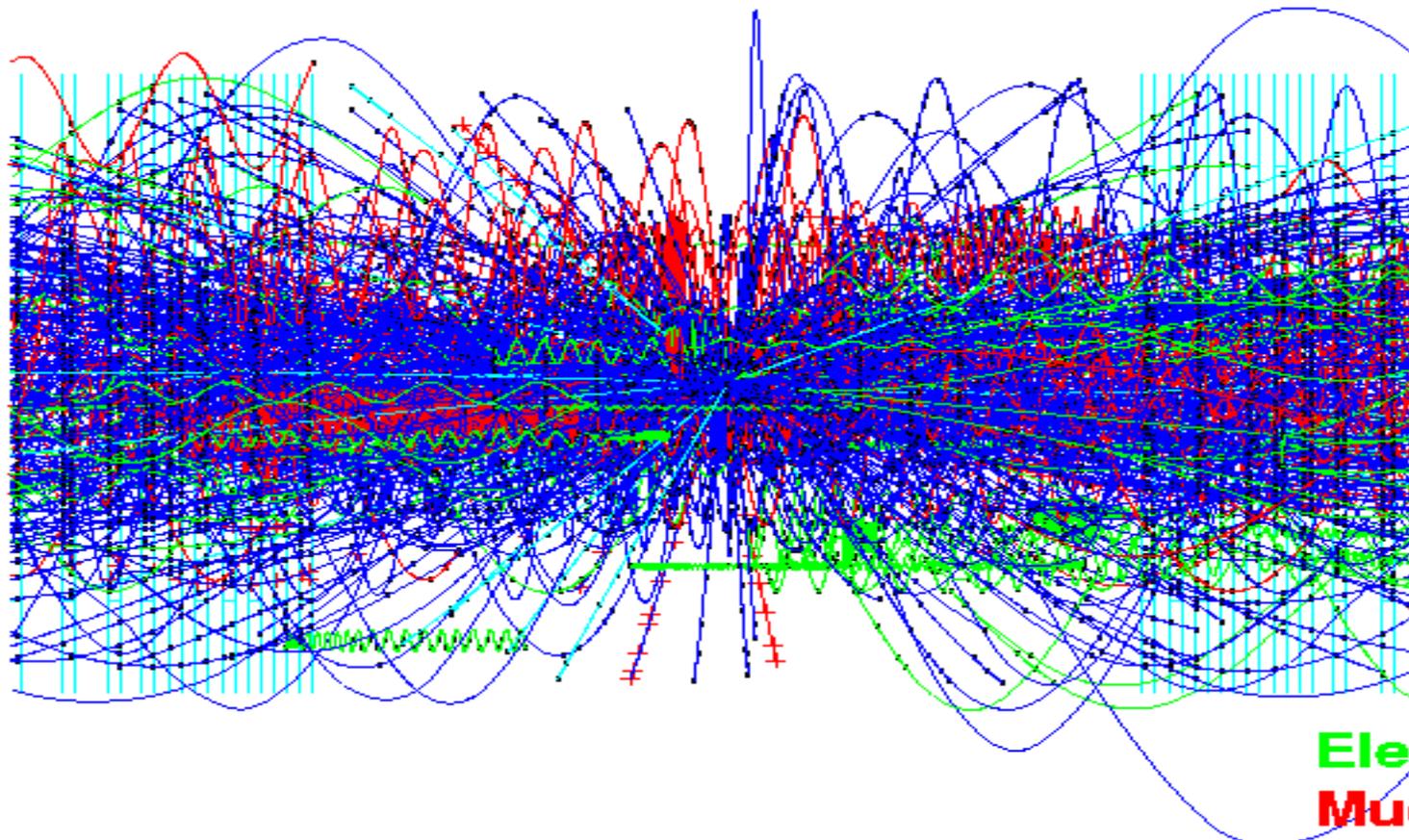
$H \rightarrow \mu\mu\mu\mu$   
 $m(H) = 150 \text{ GeV}$   
+ 20 Min bias

Electrons  
Muons  
Hadrons  $pt < 2 \text{ GeV}$   
Hadrons  $pt > 2 \text{ GeV}$

# Ereignisüberlagerung in z-Richtung

# CMS

$H \rightarrow \mu\mu\mu\mu$   
 $m(H)=150\text{GeV}$   
+ 20 Min bias

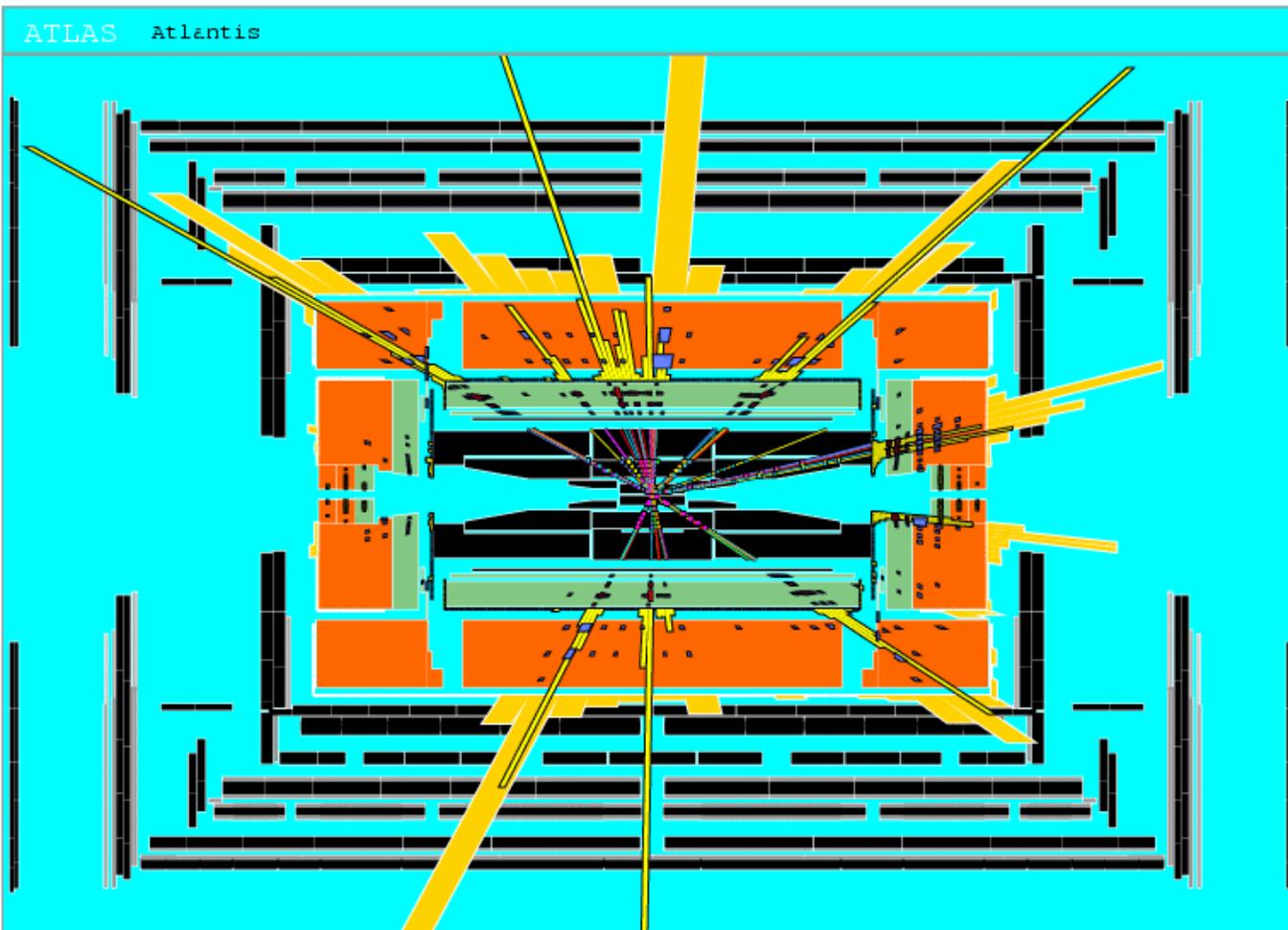


**Electrons**  
**Muons**  
**Hadrons  $pt < 2\text{GeV}$**   
**Hadrons  $pt > 2\text{GeV}$**



# Schwarze Löcher bei LHC

Wenn die Theorien der **Extra-Dimensionen** wahr sind, können **Minimale Schwarze Löcher** bei LHC reichlich produziert und nachgewiesen werden.



Simulation der Evidenz eines  
Schwarzen Lochs mit  
 $M_{\text{BH}} \sim 8 \text{ TeV}$  bei ATLAS

**Aber keine Angst!**  
Sie zerfallen sofort  
→ harmlos ....

