



Das CMS- Experiment

HS SS 2008 „Schlüsselexperimente der
Teilchenphysik“

Vortrag am 30.05.08
Benjamin Bücking



Inhalt:

1. Der Large Hadron Collider (LHC)
Die Experimente am LHC
2. Ziel der LHC- Experimente
 - 2.1 Quark-Gluon-Plasma
 - 2.2 CP-Verletzung
 - 2.3 Higgs Boson
 - 2.4 Supersymmetrie
3. Der Compact Muon Solenoid (CMS)
 - 3.1 Genereller Aufbau
 - 3.2 Detektoren
4. Ausblick

Der Large Hadron Collider (LHC)

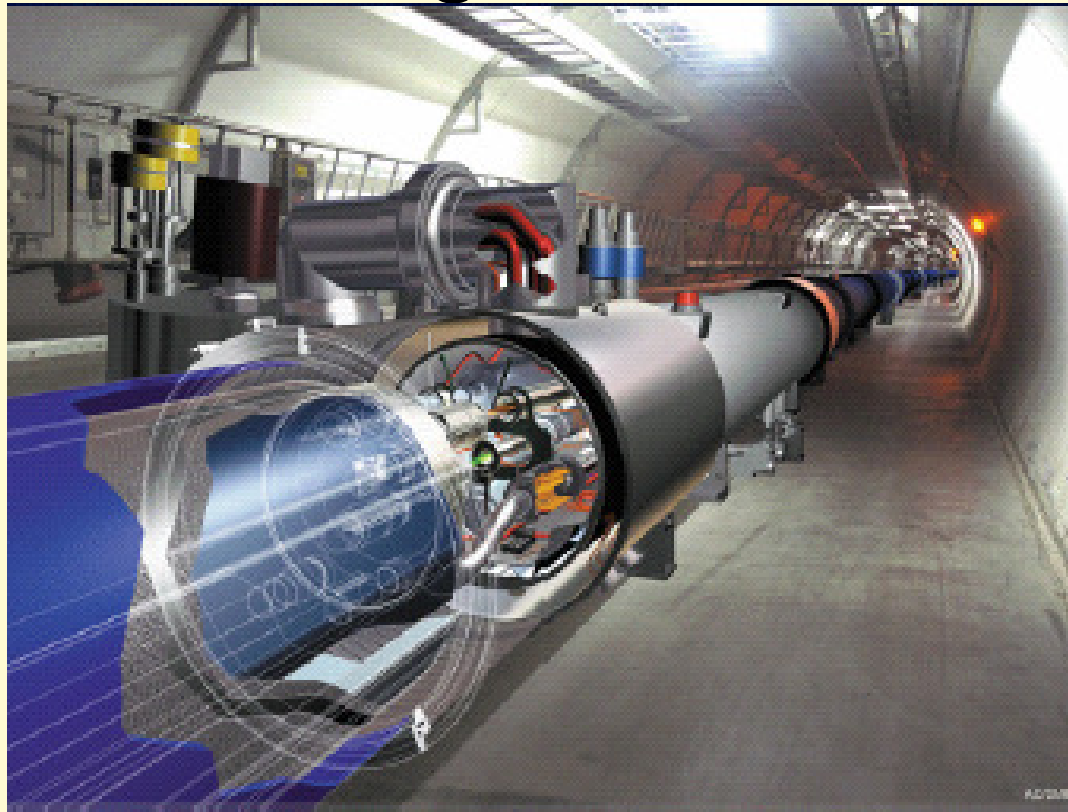


- Standort: CERN, Genf, CH
- 27 km Umfang, 50 – 175 m unter der Erde
- Es arbeiten ca. 7000 Physiker aus über 85 Ländern am LHC
- Projektbeginn 1994
- Lange Bauzeit: 2000 – 2007
- Kosten bis zur Fertigstellung: 5-7 Mrd. Euro

A decorative graphic consisting of a grid of colored squares in shades of blue, yellow, and grey, arranged in a non-uniform pattern.

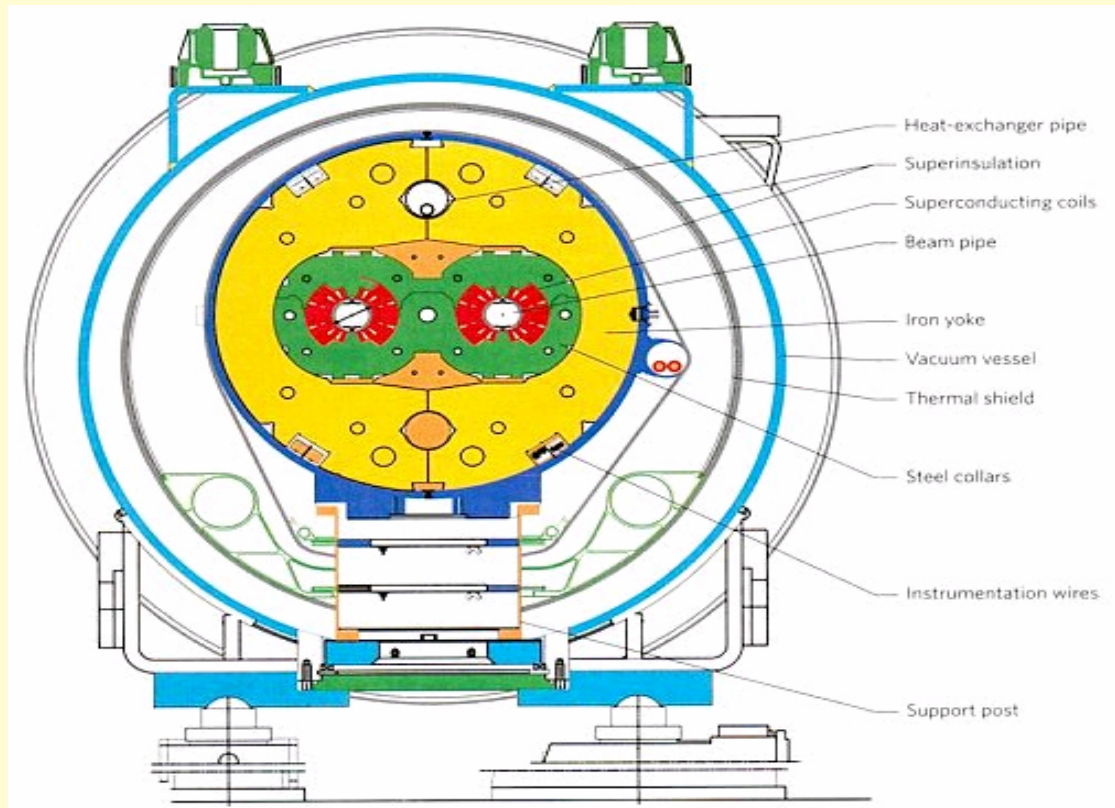
- ❑ Protonenbeschleuniger
- ❑ 7 TeV pro Strahl
- ❑ Schwerpunktsenergie der p-p Kollision: 14 TeV
- ❑ Für die Schwerionenkollisionen: 1150 TeV
- ❑ Hohe Strahlluminosität:
 $L = 10^{33} - 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Beschleunigerrohr



Das Beschleunigerrohr besteht aus supraleitenden Dipolmagneten (insgesamt 1232), arbeitet bei 1,9 K und erzeugt ein Magnetfeld von 8,33T

Beschleunigerrohr



Daten:

Länge: 14,3 m

Gewicht: 35t

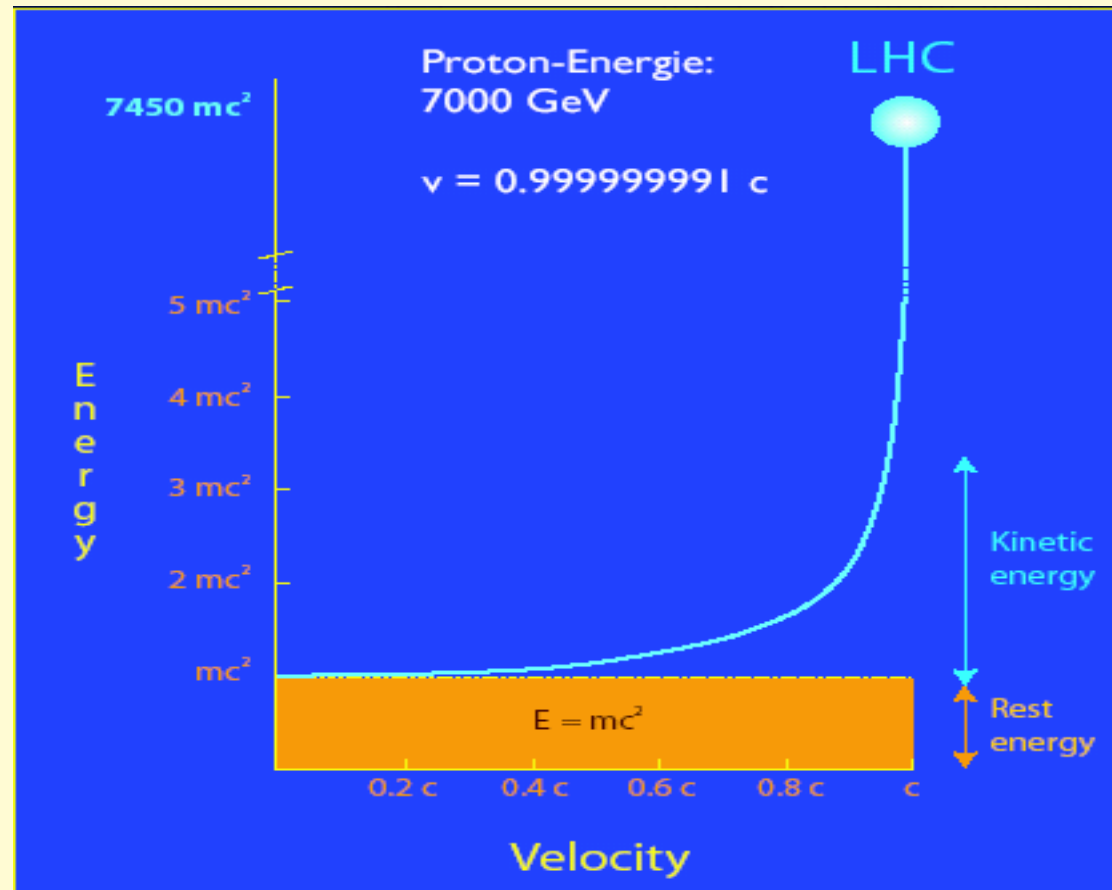
Spulen: Nb- Ti

96t Helium

8 Kühlaggregate (14kW)

Beschleunigungsfeld von 5
MV/m

Energie der beschleunigten Protonen



Produktionsraten am LHC

• Inelastische Proton-Proton Reaktionen	1	Milliarde / sec
• Quark -Quark/Gluon Streuungen mit großen transversalen Impulsen (> 20 GeV)	~ 100	Millionen/ sec
• b-Quark Paare	5	Millionen / sec
• top-Quark Paare	8	/ sec
• $W \rightarrow e \nu$	150	/ sec
• $Z \rightarrow e e$	15	/ sec
• Higgs (150 GeV)	0.2	/ sec
• Gluino, Squarks (1 TeV)	0.03	/ sec

- Interessante Physikprozesse sind selten:
 \Rightarrow hohe Strahlintensität des Beschleunigers,
 extrem gute Detektoren (Unterdrückung des Untergrundes)



Die Experimente am LHC

☐ **ATLAS** (A Torodial LHC ApparatuS)

- ☐ Universaldetektor für den Nachweis des Higgs-Bosons und supersymmetrischer Teilchen

☐ **CMS** (Compact Muon Solenoid)

- ☐ Universaldetektor für den Nachweis des Higgs-Bosons und supersymmetrischer Teilchen

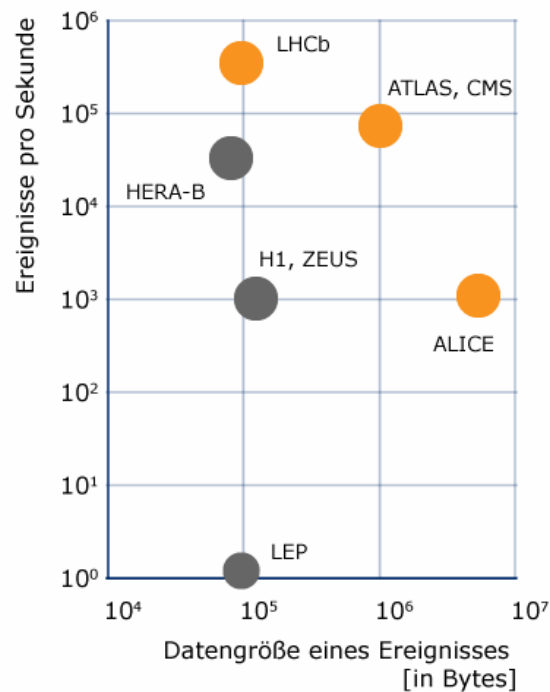
☐ **ALICE** (A Large Collider Experiment)

- ☐ Untersuchung des Quark-Gluon-Plasmas das bei der Kollision von Blei-Ionen entstehen soll

☐ **LHCb** (Large Hadron Collider beauty-Experiment)

- ☐ Untersuchung der CP-Verletzung mit B-Mesonen (Materieteilchen, die aus einem Up- oder Down-Quark und einem Anti-Bottom-Quark bestehen)

Datenmenge

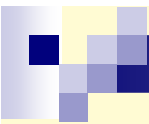


- ❑ Riesen Datenmenge

- ❑ Man benötigt 100.000 Prozessoren bei einem aktuellen Leistungsstand

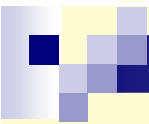
- ❑ Pro Jahr 15 Petabyte an Daten

- ❑ Bewältigung durch Daten-Netzwerke (DataGrids)



Ziele der LHC- Experimente

- 1) Entdeckung des Higgs-Bosons
- 2) Nachweis supersymmetrischer Teilchen
- 3) Untersuchung der CP-Verletzung in B-Mesonensystemen
- 4) Erzeugung eines Quark-Gluon-Plasmas durch die Kollision von Schwerionen
- 5) Entdeckung einer „neuen Physik“ jenseits des Standardmodells



Quark Gluon Plasma

□ Kernbausteine eines Atoms bestehen aus Quarks welche von Gluonen zusammengehalten werden

□ Bei hoher Temperatur und Dichte verlieren Protonen und Neutronen ihre Identität und Quarks werden freigesetzt

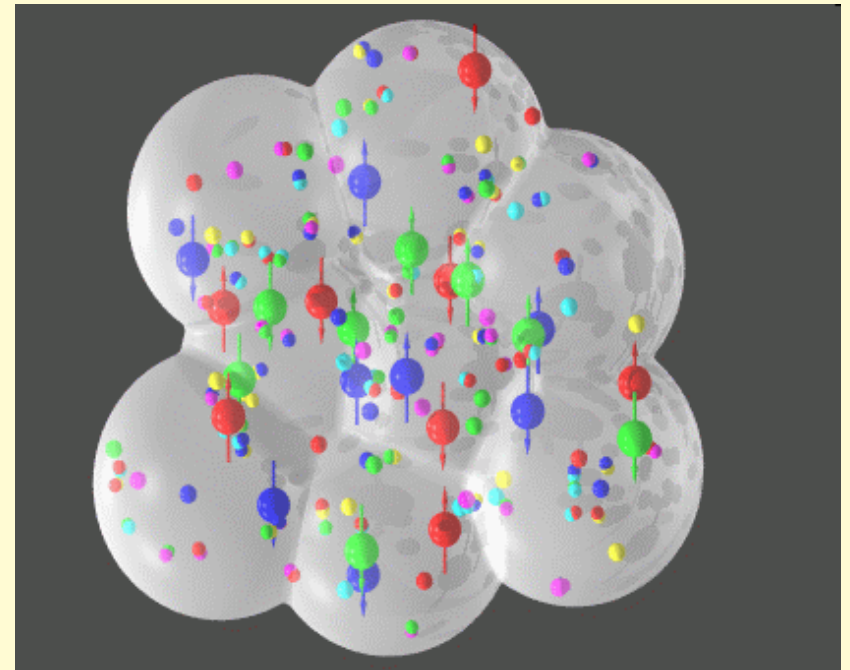
=> $T \sim 10^5$ T Sonne ($\sim 200 \text{ MeV}$)

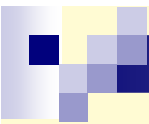
=> Dichte wie im Zentrum eines Neutronensterns ($\sim 30 \text{ GeV/fm}^3$)

=> Quark-Gluon-Plasma

Quark Gluon Plasma

- ❑ Im QGP sind die Quarks und Gluonen quasi-frei
- ❑ Wechselwirkung durch inelastische Stöße bis ein Gleichgewichtszustand eintritt
- ❑ Aufgrund des inneren Drucks expandiert das Plasma und kühlt dabei ab
➔ Hadronisierung
- ❑ Angenommener Zustand Sekundenbruchteile nach dem Urknall (10^{-33}s)





CP- Verletzung

- ❑ C: Ladungskonjugation
- ❑ P: Parität
- ❑ CP- Verletzung: 1964 entdeckt von Cronin und Fitch, beim Zerfall von schweren neutralen K-Mesonen (Kaonen), es kommt in etwa einem Promille aller Fälle zu einer Verletzung
- ❑ Genauere Untersuchung anhand von B-Mesonen
- ❑ CP- Verletzung an X-Bosonen nach dem Urknall ist wahrscheinlich verantwortlich für den Überschuss an Materie gegenüber Antimaterie



Higgs im Standardmodell

- ❑ Die invariante Lagrange Funktion der Gruppentheorie für die elektroschwache Wechselwirkung enthält masselose Eichbosonen und Fermionen
- ❑ Experimente zeigen: W^+ W^- und Z haben Masse
=> Higgs Mechanismus
- ❑ Masse entsteht erst durch die Wechselwirkung mit einem (hypothetischen) Higgs-Feld
- ❑ Durch spontane Symmetriebrechung ist das gesamte Universum von diesem Higgs-Feld durchdrungen

Spontane Symmetriebrechung

Betrachte reelles, selbstwechselwirkendes Skalarfeld Φ mit einer Lagrangefunktion der Form:

$$L = (\partial_\alpha \Phi \partial^\alpha \Phi) + \mu^2 |\Phi|^2 + \lambda |\Phi|^4$$

wobei Terme mit Φ^2 = Masseterm
 Φ^4 = WW-Term

Aus L erhält man ein Potential

$$V = \mu^2 |\Phi|^2 + \lambda |\Phi|^4 \quad \text{Higbspotential}$$

- für $\lambda > 0$ und $\mu^2 < 0$ gibt es zwei mögl.

Grundzustände $\pm v$, mit $v = \frac{-\mu^2}{\lambda} = 247 \text{ GeV}$

\Rightarrow System entscheidet sich für einen

\Rightarrow Symmetrie wird gebrochen!

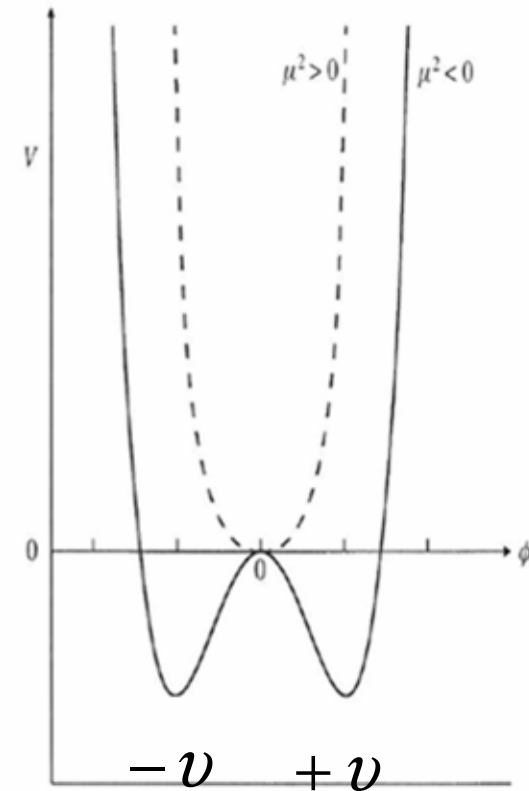


Fig 8.13. Plot of the potential V in (8.48) as a function of a one-dimensional scalar field ϕ for the two cases $\mu^2 > 0$ and $\mu^2 < 0$.

Theoretische Grundlagen

Theoretische Vorstellung für das Skalar-Feld Φ , das für die Teilchenmassen verantwortlich ist.

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi^\dagger \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + H \end{pmatrix}; \quad V(\Phi) = -\lambda v^2 |\Phi^\dagger \Phi| + \lambda (|\Phi^\dagger \Phi|)^2$$

$$\mathcal{L}_\Phi = (D^\mu \Phi)^\dagger (D_\mu \Phi) - g_f (\bar{\psi}_L \Phi \psi_R + \bar{\psi}_R \Phi^\dagger \psi_L) - V(\Phi)$$

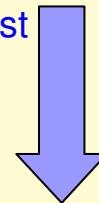
Wechselwirkung mit den Eichbosonen

$$m_{W^\pm} = \frac{gv}{2}, \quad m_Z = \frac{v\sqrt{(g^2 + g'^2)}}{2}$$

Wechselwirkung mit den Fermionen

$$m_f = \frac{g_f v}{\sqrt{2}}$$

Wechselwirkung mit sich selbst



Existenz eines Spin 0 Teilchens, das **Higgs-Boson** mit Masse

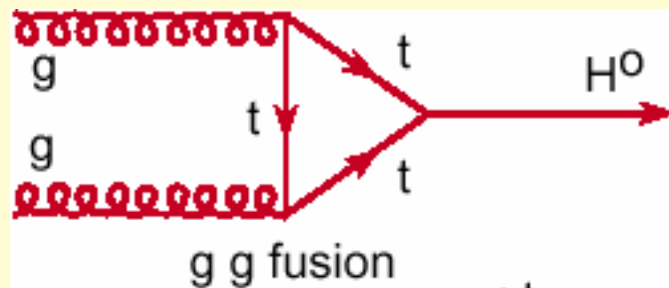
$$m_H = \sqrt{2\lambda} v$$

- Hierbei ist λ unbekannt; Die Higgs-Masse ist einen vom SM nicht vorhergesagter freier Parameter

Higgsproduktion

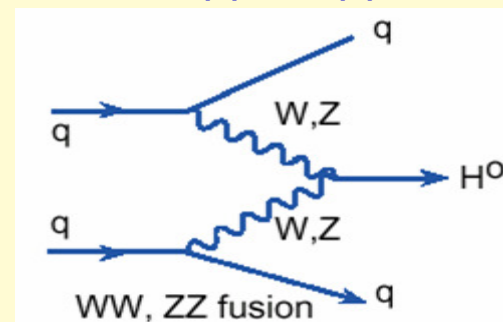
(i) Gluonfusion

$$gg \rightarrow H$$



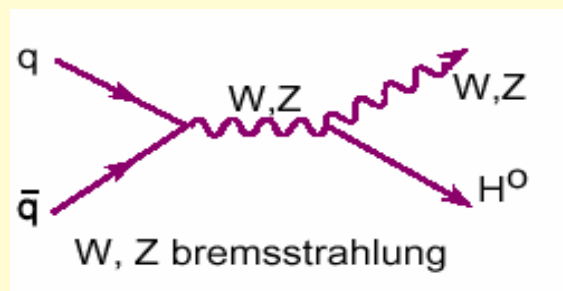
(ii) Vektorbosonfusion

$$qq \rightarrow Hqq$$

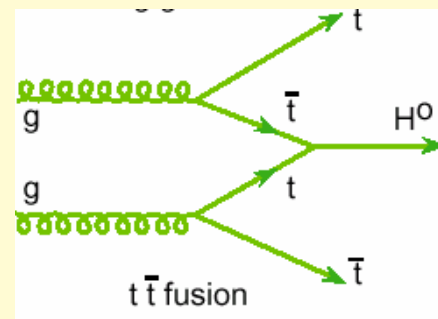


(iii) „begleitende“ Produktion (W/Z, tt)

$$q\bar{q} \rightarrow HZ$$



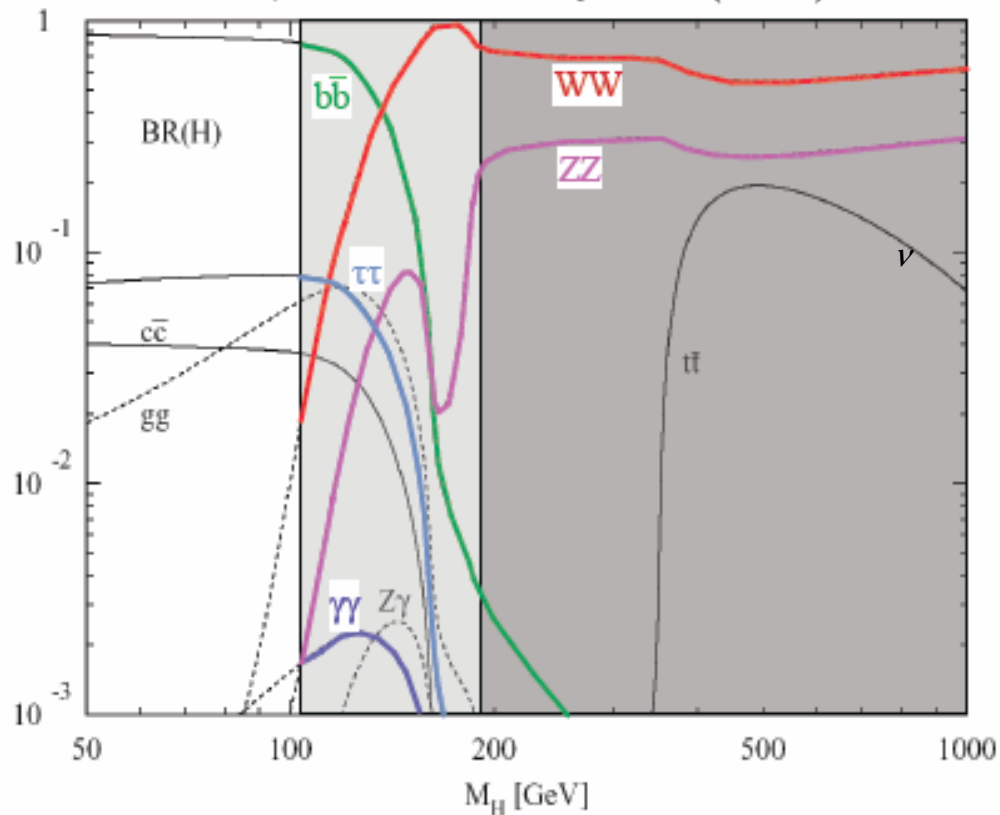
$$gg \rightarrow Ht\bar{t}$$



Zerfallskanäle

- Am LHC stehen mehrere Zerfallskanäle des Higgs-Bosons zur Untersuchung, die komplett von der Higgs-Masse abhängen

M. Spira Fortsch. Phys. 46 (1998)



Geringe Masse $m_H < 2m_Z$

$H \rightarrow b\bar{b}$, $H \rightarrow \gamma\gamma$,
 $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ (via VBF),
 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$,
 $H \rightarrow WW^* \rightarrow 2l2\nu$ (via VBF)

Große Masse $m_H > 180 \text{ GeV}$

- Der Goldene Kanal :

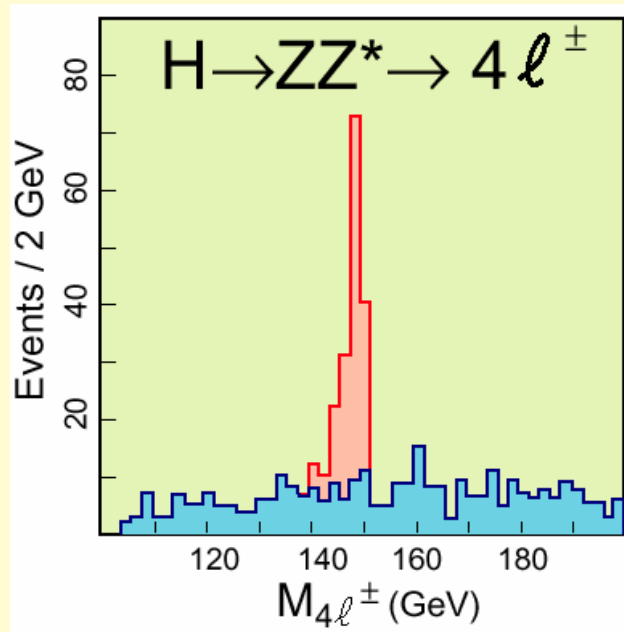
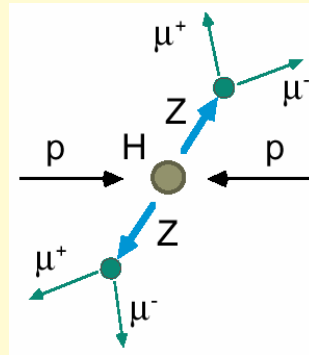
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

- Bei sehr große Masse $m_H \geq 800 \text{ GeV}$

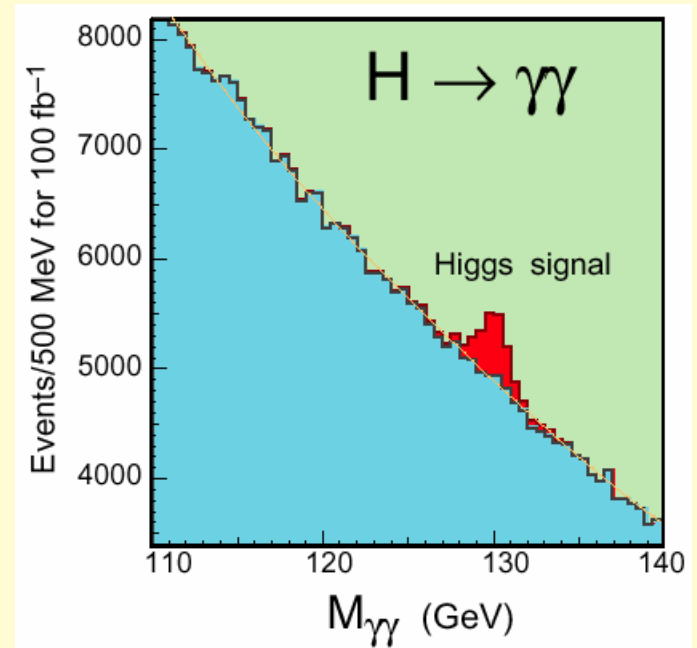
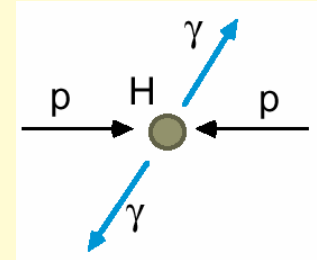
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$

Wichtige Zerfälle zum Nachweis am LHC:

- $H \rightarrow ZZ \rightarrow \lambda\lambda\lambda\lambda$
(der goldene Kanal)



- $H \rightarrow \gamma\gamma$





Strategie für die Higgs-Suche

- Wie wird ein Higgs-Boson in den verschiedenen Kanälen gesucht?
 - Suche Signal mit bestimmten Zerfallsprodukte
 - Welche Untergrundprozesse gleiche Endprodukte ergeben
 - Unterscheiden zw. Signal und Untergrund, Suche nach den richtigen Auswahlkriterien

Supersymmetrie

- Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen
- Werden STeilchen genannt
- Eichbosonen erhalten die Endung -ino
- Zahl der Elementarteilchen verdoppelt sich
- Neue Quantenzahl: R Parität

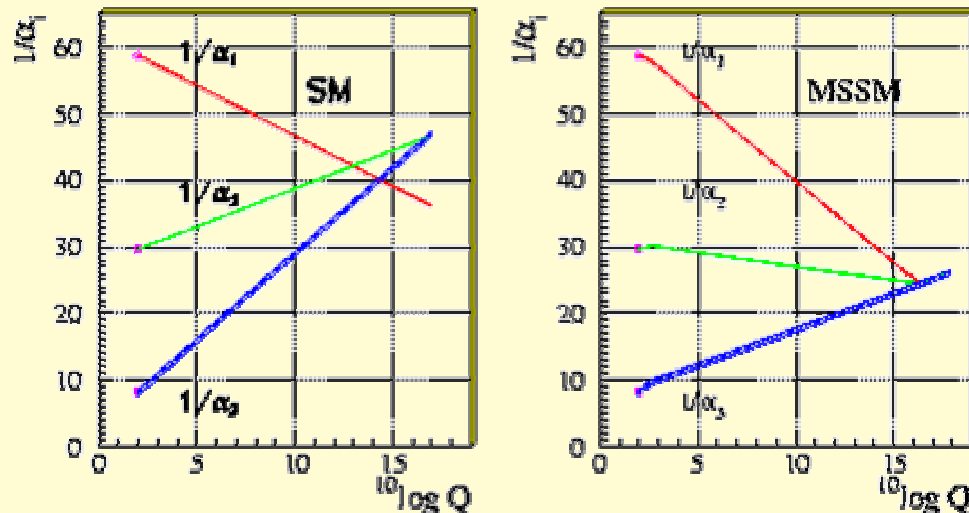
$$R = (-1)^{3B+L+2S}$$

mit B: Baryonenzahl, L: Leptonenzahl, S:Spin

- Für SM Teilchen: $R=+1$
Für ihre Susy-Partner $R=-1$
- Wenn man die R-Paritätserhaltung annimmt zerfallen
Susy-Teilchen nicht in SM Teilchen
=> Das leichteste Susy Teilchen soll stabil sein

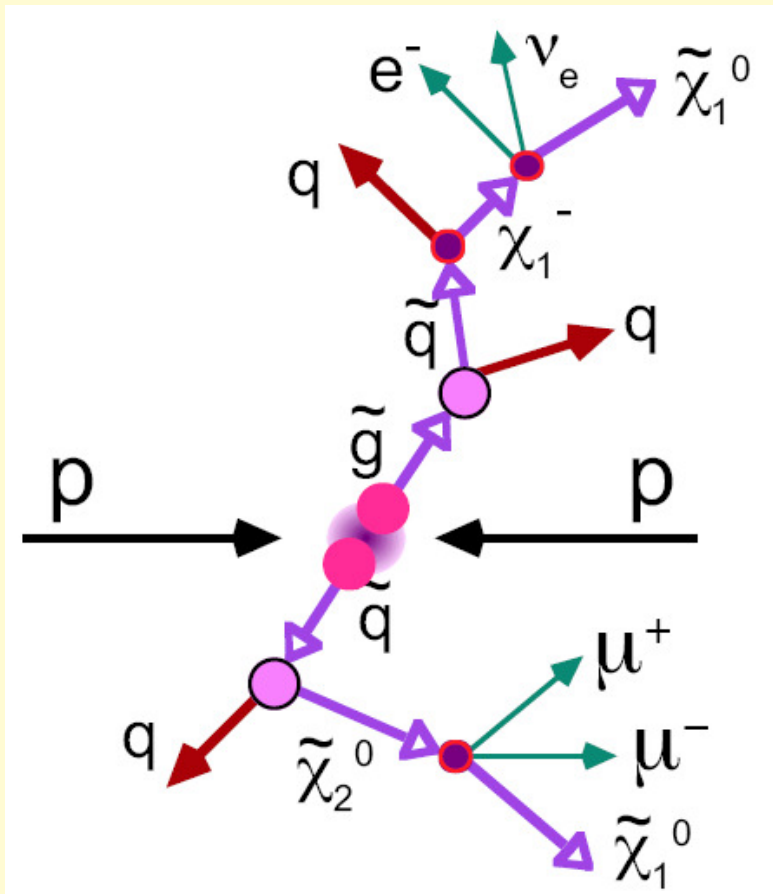
Vereinheitlichung der Grundkräfte

Unification of the Coupling Constants
in the SM and the minimal MSSM



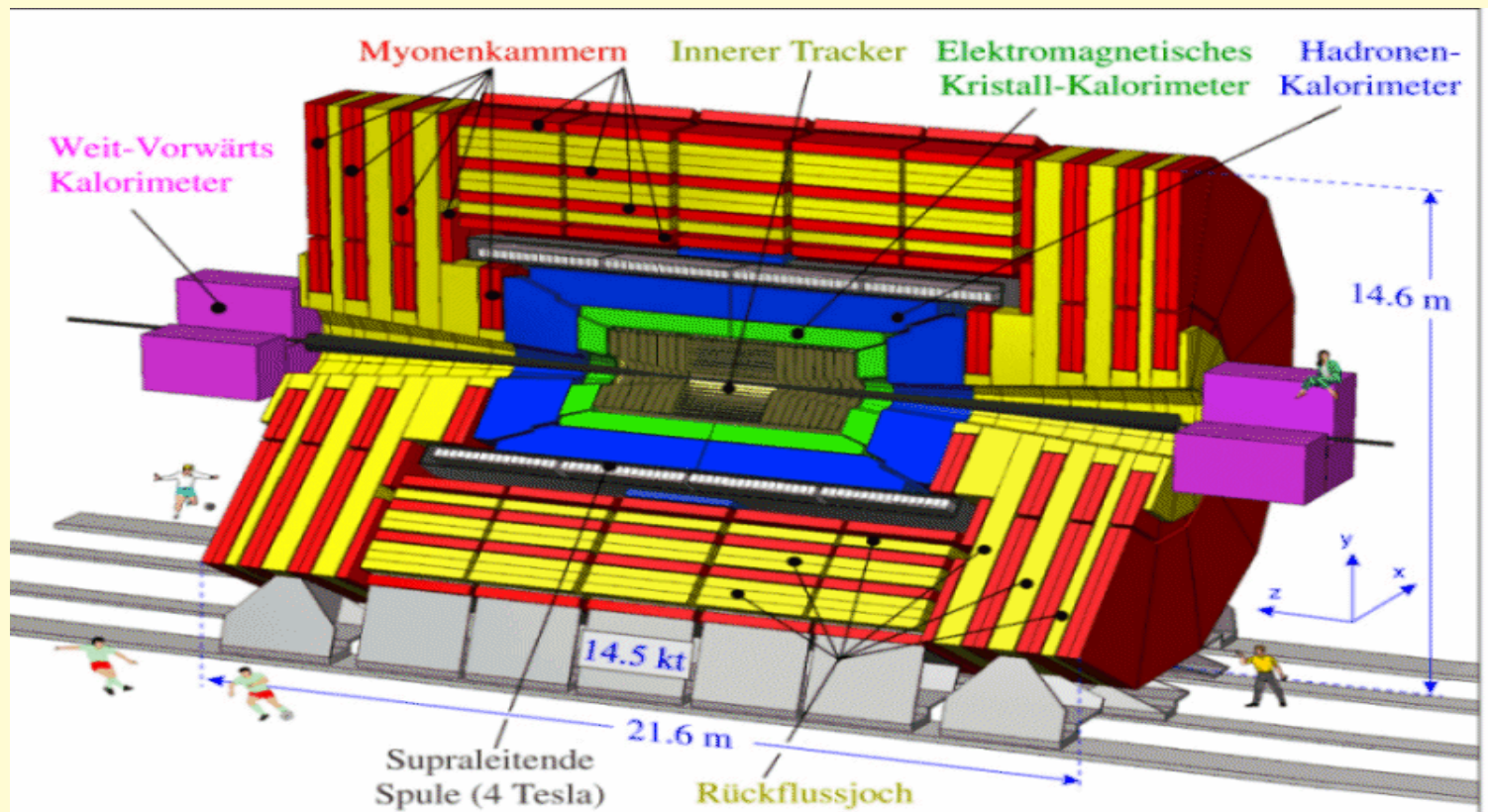
- Für große Energien: Vereinigung der elektromagnetischen, schwachen und starken Wechselwirkung
- Dies ist nur im Rahmen des supersymmetrischen Modells möglich da sich die im Rahmen des Standardmodells extrapolierten Kopplungskonstanten nicht in einem Punkt treffen

Mögliches Ereignis und Nachweis



- Neutralino χ das leichteste supersymmetrische Teilchen d.h. entsteht am Ende der Zerfallskette und entweicht aus dem Detektor da es nicht mit normaler Materie wechselwirkt
- Diese fehlende Transversale Energie die nicht von den Kalorimetern erfasst wird kann zum Nachweis dienen

Der Compact Muon Solenoid (CMS) Detektor



Der Compact Muon Solenoid (CMS) Detektor

Supraleitende
Spule, 4 Tesla

Kalorimeter

ECAL

HCAL

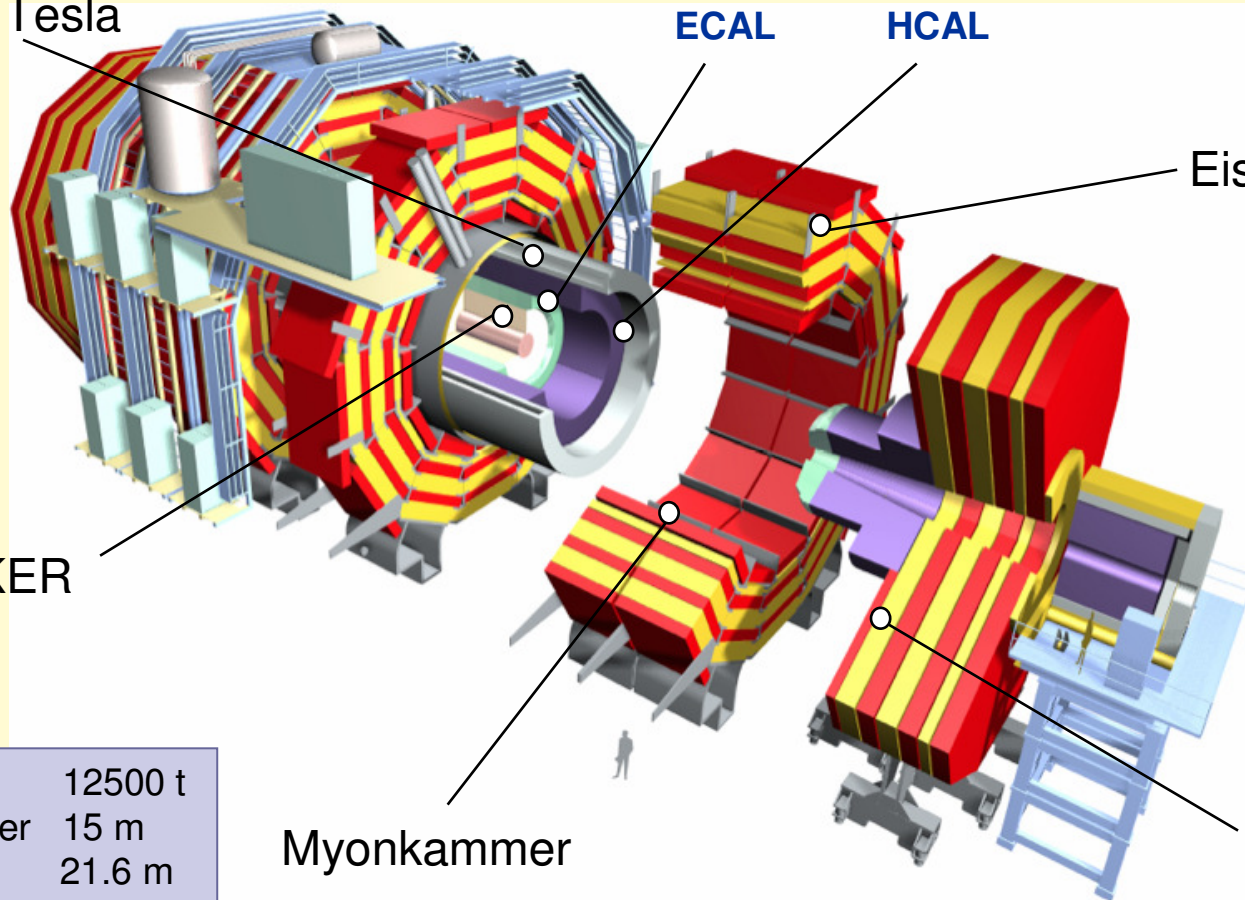
Eisenjoch

TRACKER

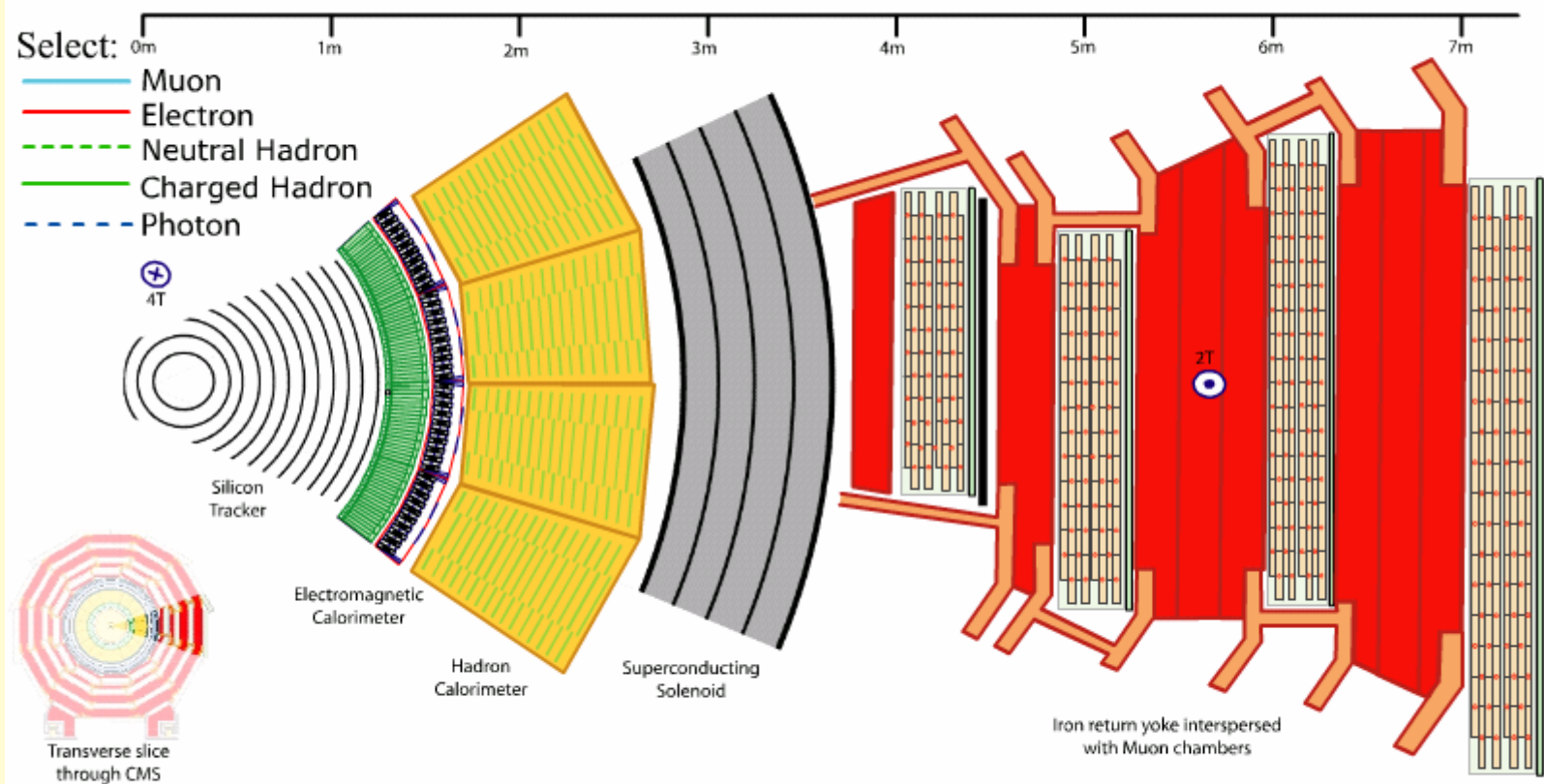
Total weight	12500 t
Overall diameter	15 m
Overall length	21.6 m

Myonkammer

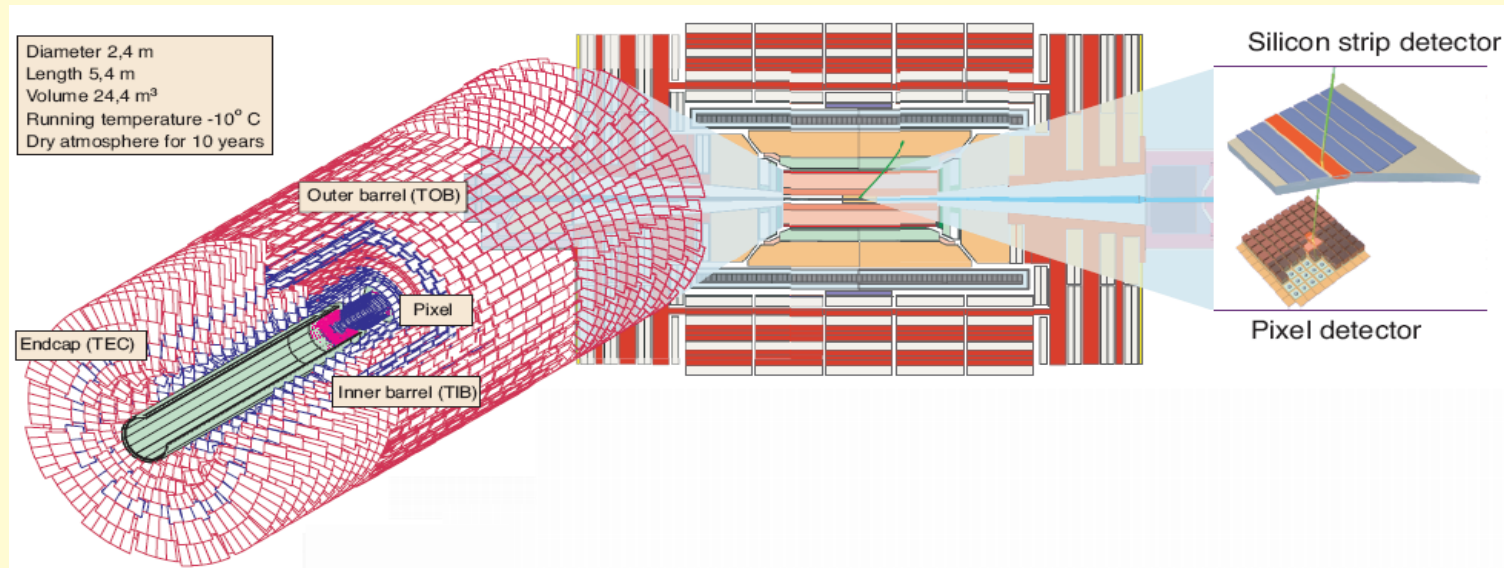
Myon-
endkappen



Querschnitt durch den CMS Detektor

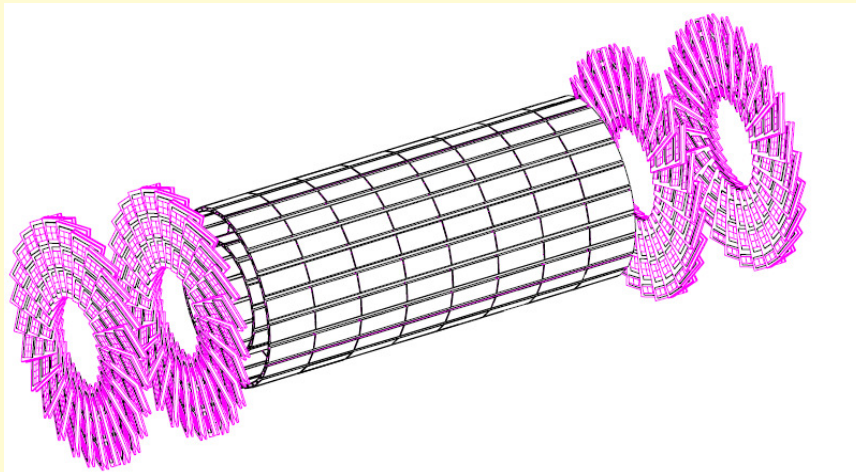


Spurendetektor



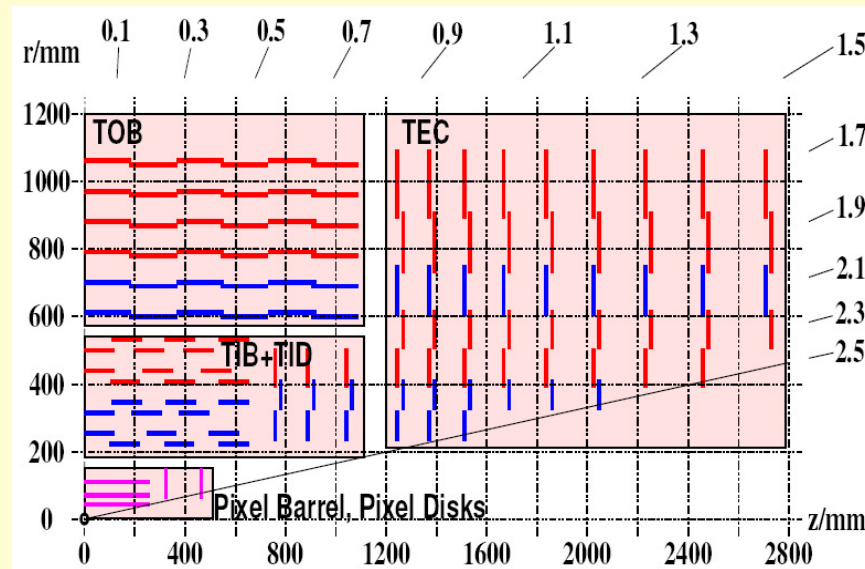
- Der Spurendetektor besteht aus fein segmentierten Sensoren aus Silizium (Streifen- und Pixeldetektoren)
- Ermöglichen die Rekonstruktion von Teilchenspuren und die Bestimmung ihrer Impulse
- Insgesamt verfügt der CMS Tracker über 25000 Silizium Streifen Sensoren auf einer Fläche von 210m²

Pixeldetektor



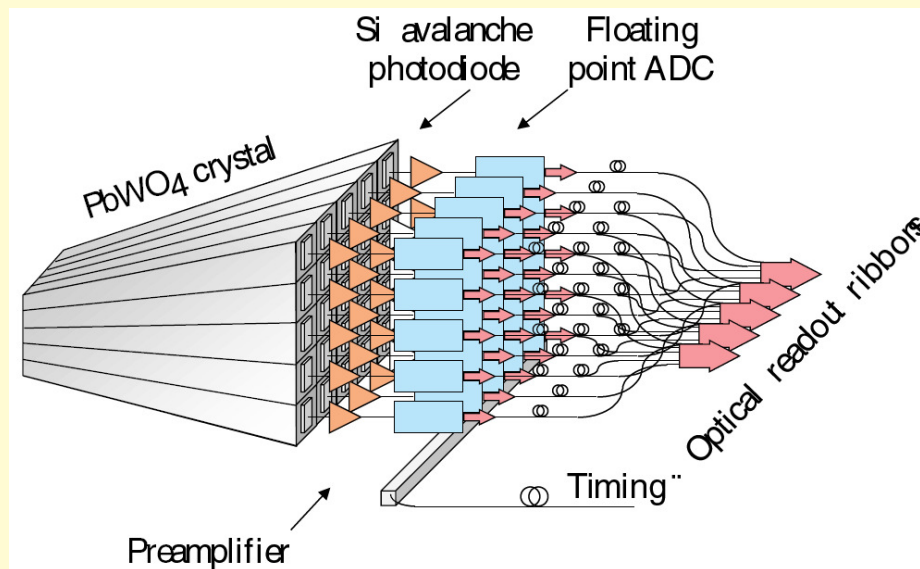
- In 4cm Abstand von der Strahlachse
- Drei konzentrische Lagen aus Silizium Pixel Detektoren + Scheiben für Frontrichtung
=> Spuren bis $|\eta| \leq 2,4$
- Pixel sorgen für hohe Ortsauflösung: $15 \mu\text{m}$
=> genaue Identifizierung von Sekundärvertices

Siliziumstreifen Spurdetektor



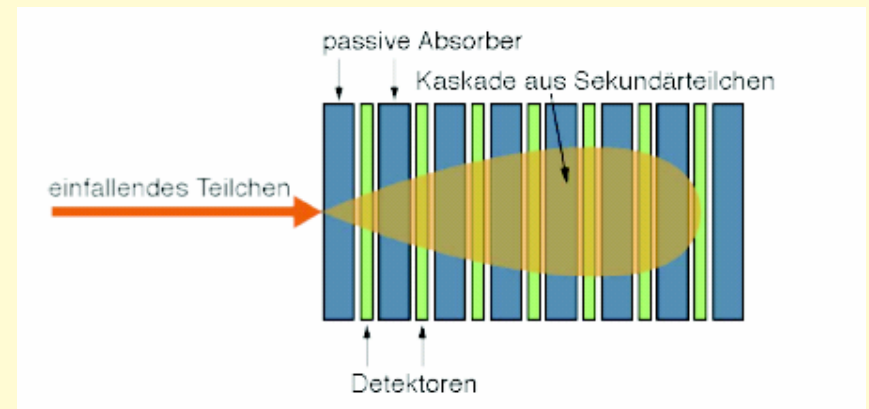
- Im Anschluss an den Pixeldetektor: 15148 Streifendetektormodule
- Streifen haben den Nachteil, dass man z-Komponente nicht bestimmen kann
=> Verwendung von doppelseitigen Modulen deren Streifen gegeneinander gedreht sind (hier blau)
- Der CMS-Spurdetektor ist eine Teilchenkamera mit 10 Millionen Kanälen, welche 40 Millionen Bilder pro Sekunde schießt und dabei eine Auflösung einiger hundertstel Millimeter erreicht

Elektromagnetisches Kalorimeter



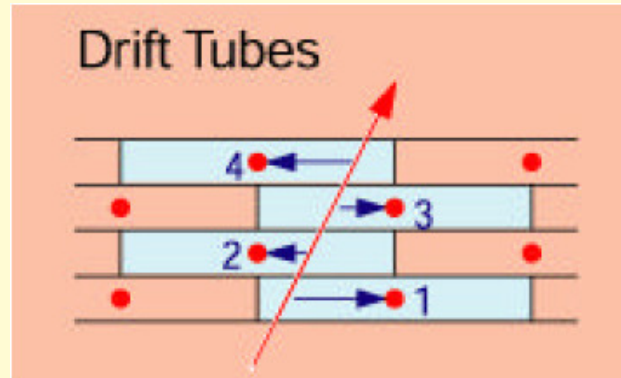
- ❑ homogenes Kalorimeter bestehend aus 61000 PbWO₄ Kristallen, Material hoher Dichte gewählt, welches gleichzeitig als Absorber und als Quelle für das Detektorsignal dient.
- ❑ WW mit den Kristallen über Bremsstrahlung, Photoeffekt, Compton-Effekt, Paarbildung
- ❑ Abwechselnd Paarbildung und Bremsstrahlung => Ausbildung elektromagnetischer Schauer
- ❑ Die Energie des Primärteilchens ist proportional zur Intensität des Szintillationslichts

Hadronisches Kalorimeter



- Sampling- (Inhomogenes) Kalorimeter
Schauermedium: Kupfer bzw. Stahl
Nachweismedium: Plastiksintillator bzw. Quarzfasern
- In Sampling-Kalorimetern wechseln sich Schichten aus passivem Absorbermaterial(= "Konverter") und aktivem Detektormaterial ab
- Schauerbildung komplizierter als im elektromagnetischen Schauer da verschiedene Mesonen entstehen können
- π^0 Zerfall in zwei γ erzeugt elektromagnetische Subschauer
- Intensität des Schauers nimmt wie ab
- λ_{had} ist die hadronische Wechselwirkungslänge
- Durch Forward Kalorimeter Abdeckung bis $|\eta| < 5$

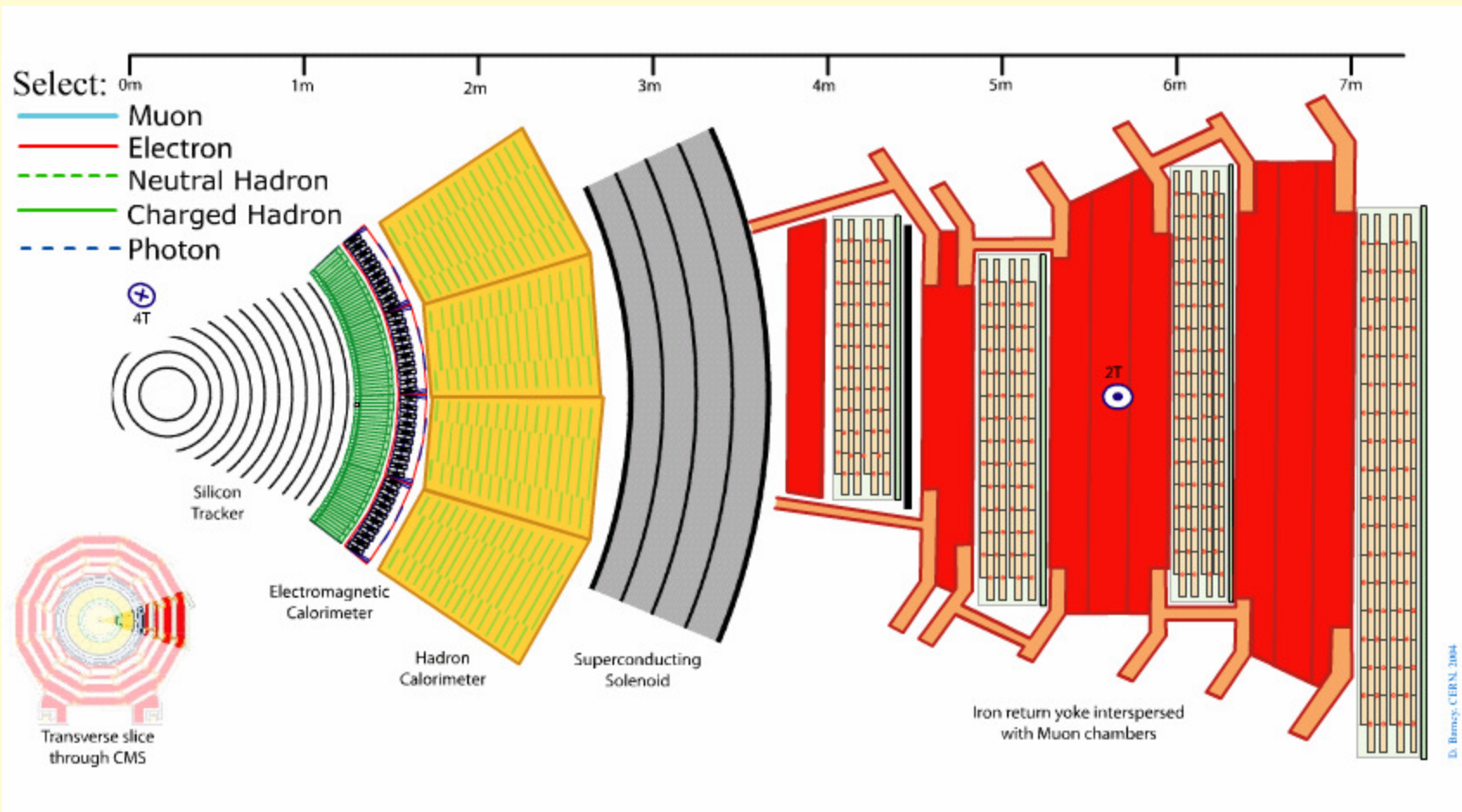
Der Myonendetektor



- Myonendetektor:
Driftkammern gefüllt mit Ar-Co₂ Gasgemisch
- Beim Durchgang eines Myons ionisiert dieses das Gas
- Freigesetzte e⁻ driften zur Anode
- Ort des Durchgangs lässt sich durch Messung der Driftzeit berechnen da Beschleunigung erst nah beim Draht
=> $s = v_{\text{drift}} \cdot \Delta t$

Transverse slice through CMS detector

Click on a particle type to visualise that particle in CMS
Press “escape” to exit





Ausblick

- CMS-Detektor wird momentan am LHC zusammengebaut
- Mittlerweile schon erste Testläufe des Beschleunigerrings (12.11.2007)
- Start wurde auf Sommer 2008 verschoben Beginn des Testlaufs bei noch niedriger Luminosität und mit einer geringeren Zahl an Teilchenpaketen im Strahl
- Beginn der Experimente bei 14 TeV Oktober 2008?



Literatur:

Internet:

- <https://ptweb.desy.de/berichte>
- <http://www.desy.de/f/jb2006/104-108.pdf>
- <http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~mullerth/CMS-LHC-08.pdf>
- <http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~mullerth/FZK-Nachrichten.pdf>
- <http://www.gsi.de/beschleuniger/sis18/pdf/cern.pdf>
- <http://www-linux.gsi.de/~wolle/Schuelerlabor/TALKS/DETEKTOREN/VO-6-Kalorimeter.pdf>
- <http://www.cms.cern.ch>

Vorträge:

- Mikova A.: Suche nach dem Higgs-Boson des Standardmodells
- Wiegand A.: Das CMS-Experiment
- Jakobs K.: Die neuen großen Beschleuniger und ihre Schlüsselrolle