



LHC und Österreichs Beteiligung am Compact Muon Solenoid



Claudia-Elisabeth Wulz
Institut für Hochenergiephysik
Österreichische Akademie der Wissenschaften

ÖPG - Tagung, Fachausschuss für Lehrkräfte an Höheren Schulen
Leoben, 25. Sep. 2008

Offene Fragen der Physik

Ursprung und Hierarchie der Teilchenmassen

Gibt es ein Higgs-Teilchen und was ist seine Masse?

Wie muß das Standardmodell erweitert werden?

Supersymmetrie, Grand Unified Theories, ...

Können alle Kräfte vereint werden?

Einbindung der Gravitation?

Gibt es zusätzliche Dimensionen?

Gibt es eine Substruktur von Quarks und Leptonen?

Gibt es mehr als drei Teilchengenerationen?

Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie

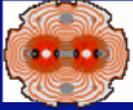
Woraus besteht die dunkle Materie des Kosmos?

Woraus besteht die dunkle Energie?

Ursprung des quantenchromodynamischen Confinement

Quark-Gluon-Plasma

Wie entstand das Universum?

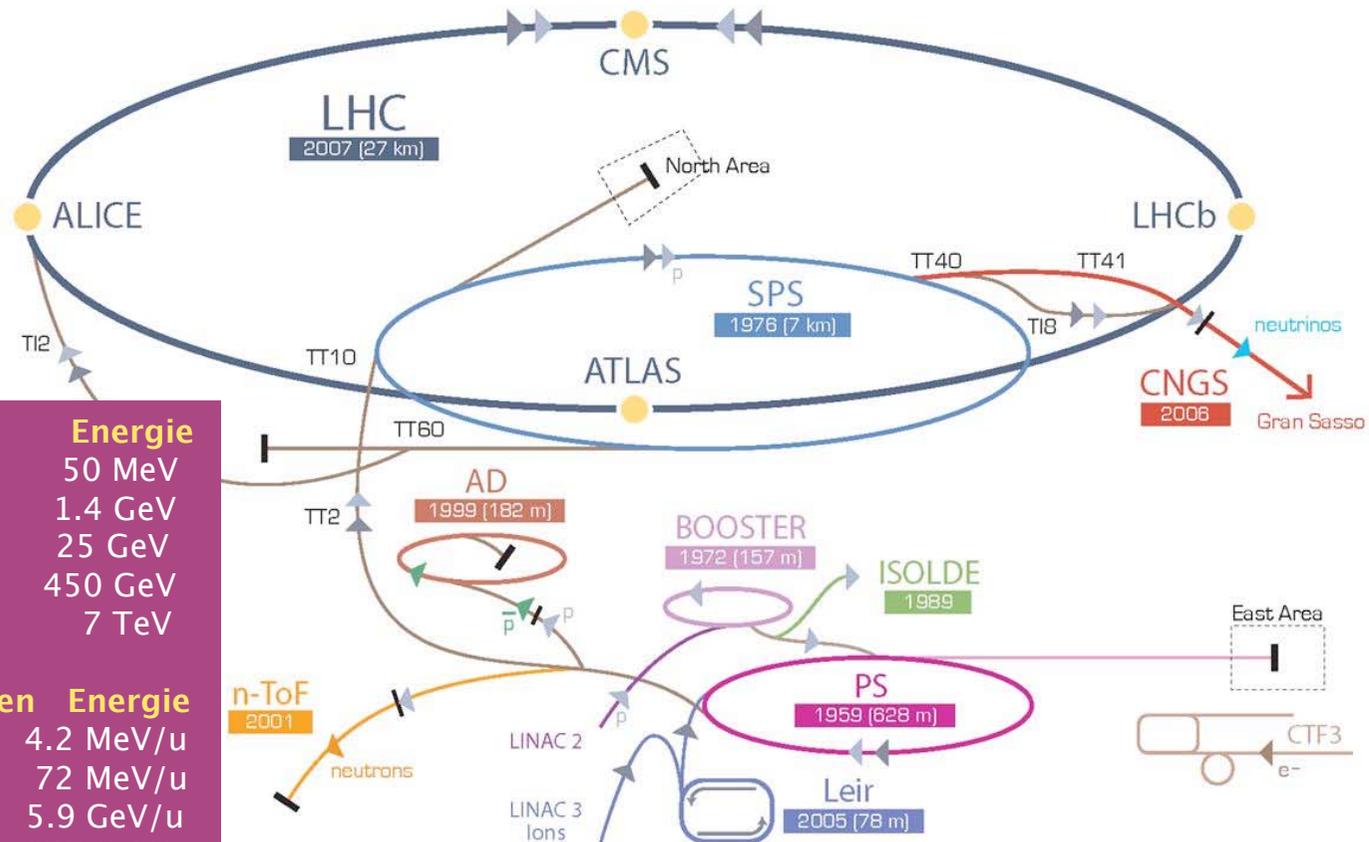


LHC und die Experimente





Beschleunigerkomplex des CERN



p-Maschinen		Energie
LINAC 2:		50 MeV
BOOSTER:		1.4 GeV
PS:		25 GeV
SPS:		450 GeV
LHC:		7 TeV
Ionen-Maschinen		Energie
LINAC 3:		4.2 MeV/u
LEIR:		72 MeV/u
PS:		5.9 GeV/u
SPS:		177 GeV/u
LHC:		2.76 TeV/u

▶ p (proton) ▶ ion ▶ neutrons ▶ \bar{p} (antiproton) \leftrightarrow proton/antiproton conversion ▶ neutrinos ▶ electron

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

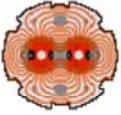
AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice

LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

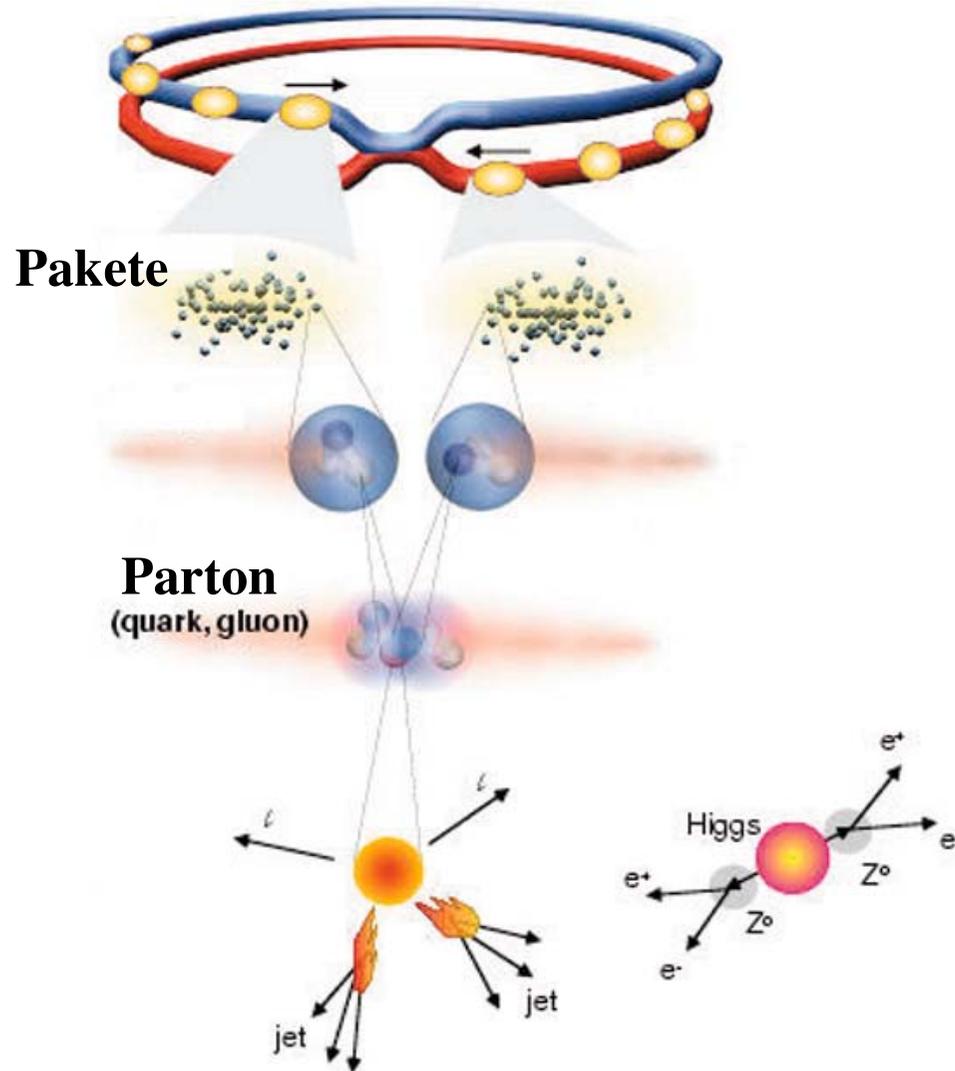


LINAC-2





Parameter des Large Hadron Collider



Umfang: 27 km

Proton - Proton

Teilchenpakete: 2 x 2808 (3564)

Protonen / Paket: 1.15×10^{11}

Strahlenergie: 2 x 7 TeV

Luminosität: $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Strahlkreuzungsintervall: 25 ns

Kollisionsrate: bis zu 10^9 pro Sekunde

Flußdichte der Dipolmagnete: 8.33 T

Anzahl der Dipolmagnete: 1232

Schwerionen (Pb-Pb)

Strahlenergie:

5.5 TeV/Nukleonenpaar

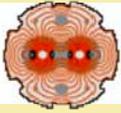
Luminosität: $10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Strahlkreuzungsintervall: 125 ns

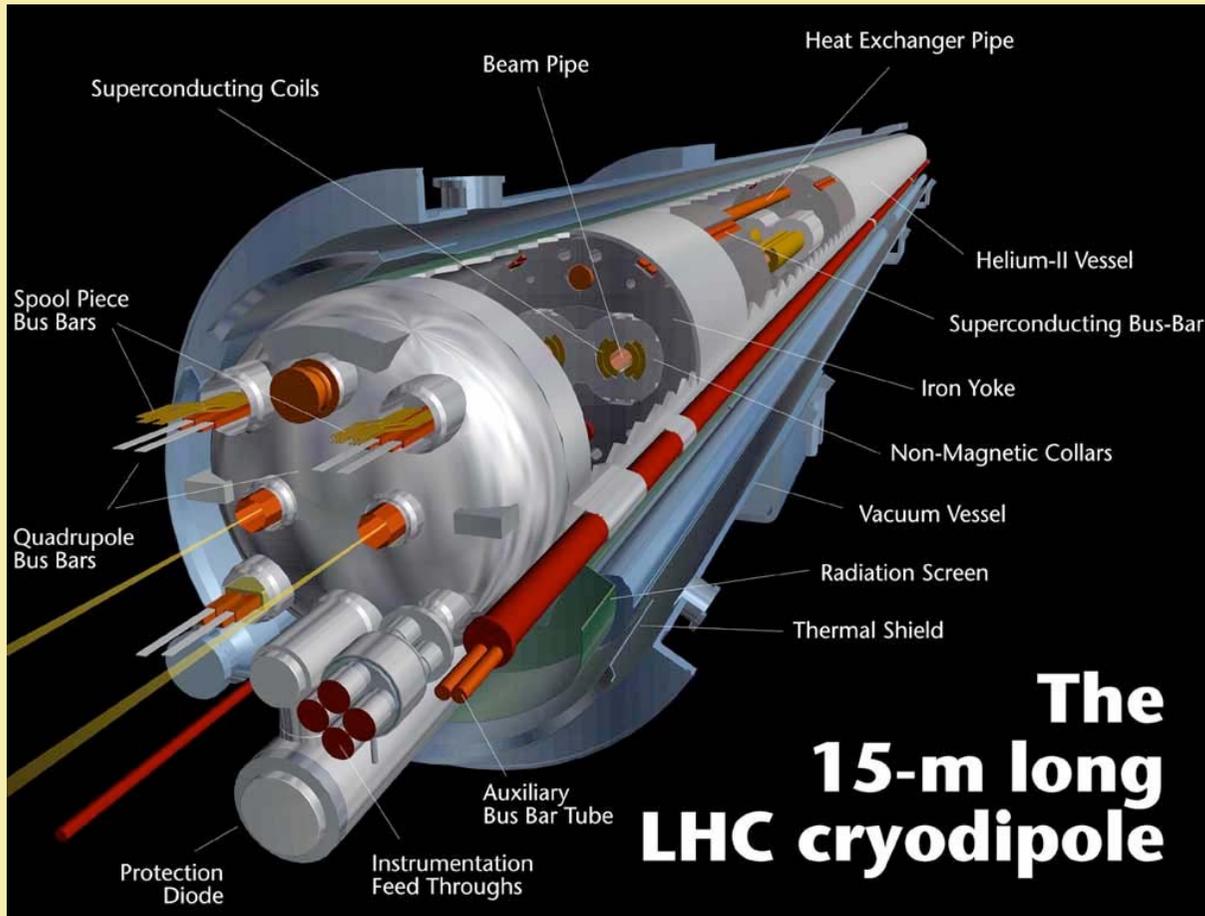


LHC-Hochfrequenzkavität

8 Kavitäten pro Strahl, am Punkt 4 des LHC-Rings, dienen zur Beschleunigung und longitudinalen Fokussierung der Teilchenpakete.



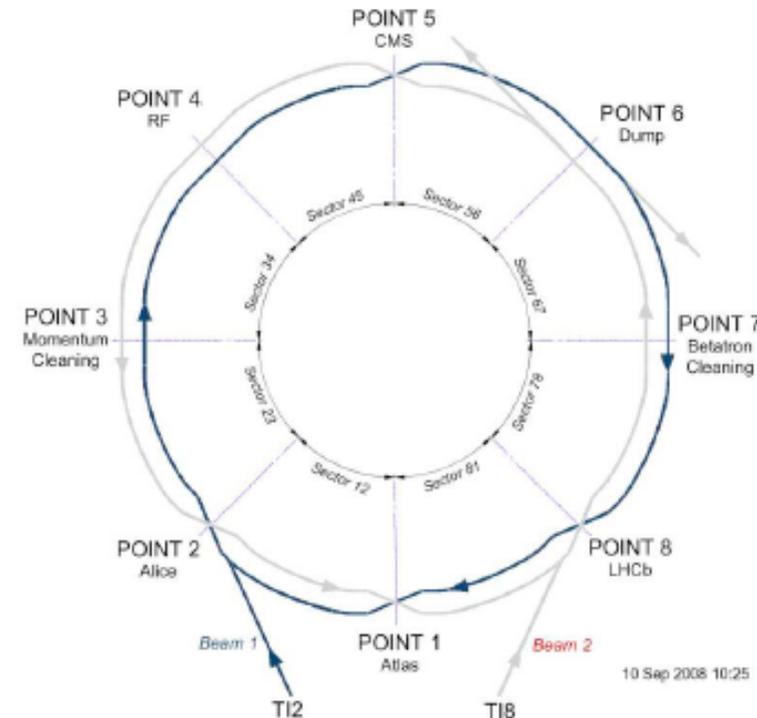
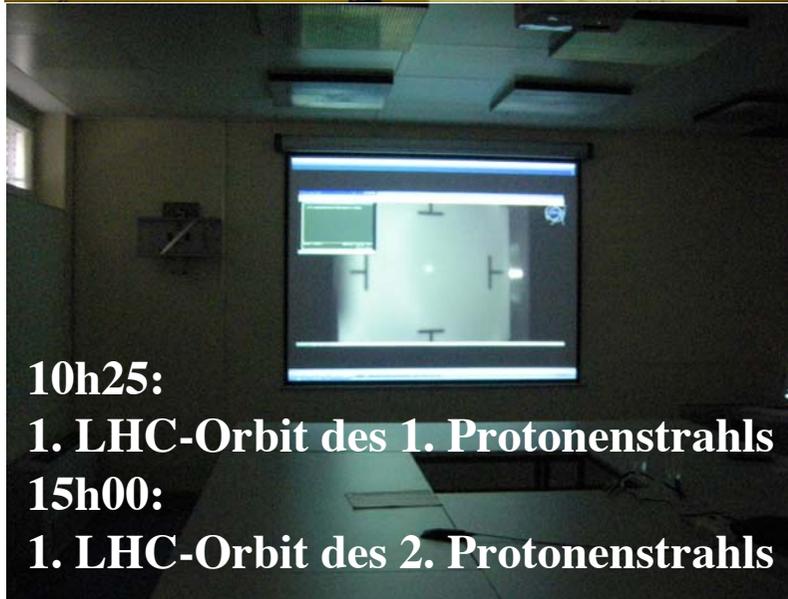
LHC-Dipolmagnete



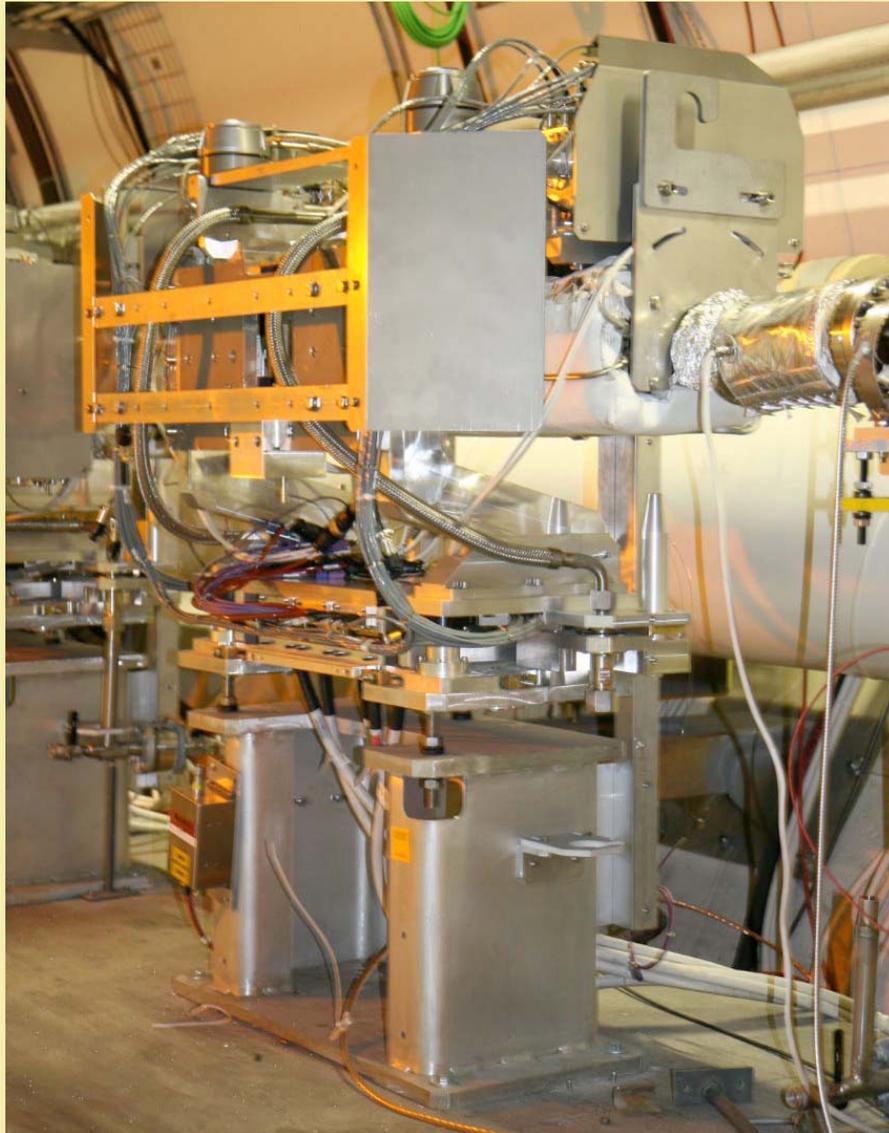
**Installation des letzten
Dipolmagnets April 2007**



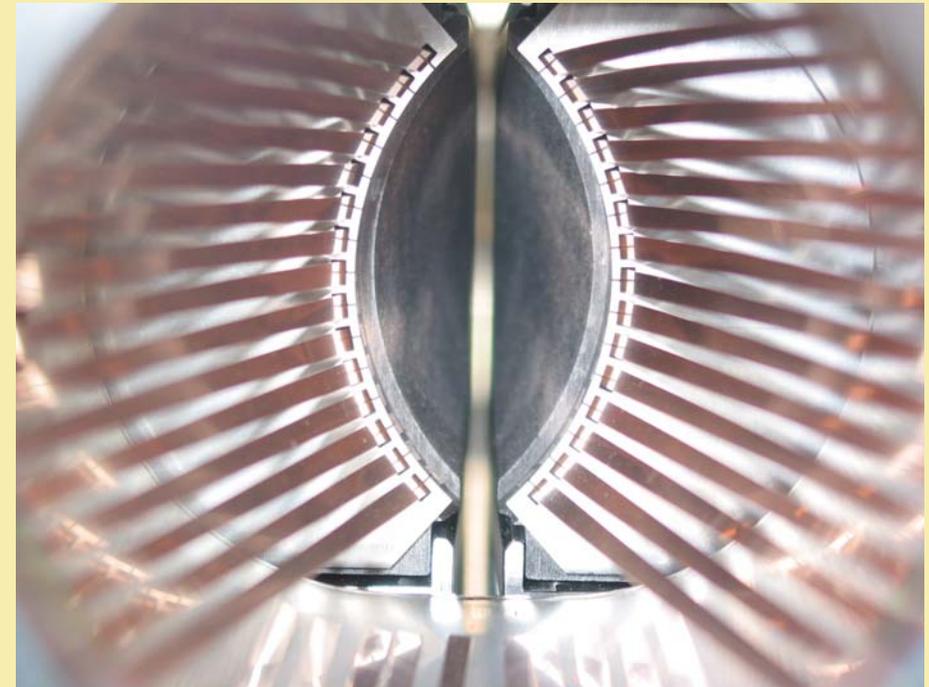
10. September 2008 - First Beam!



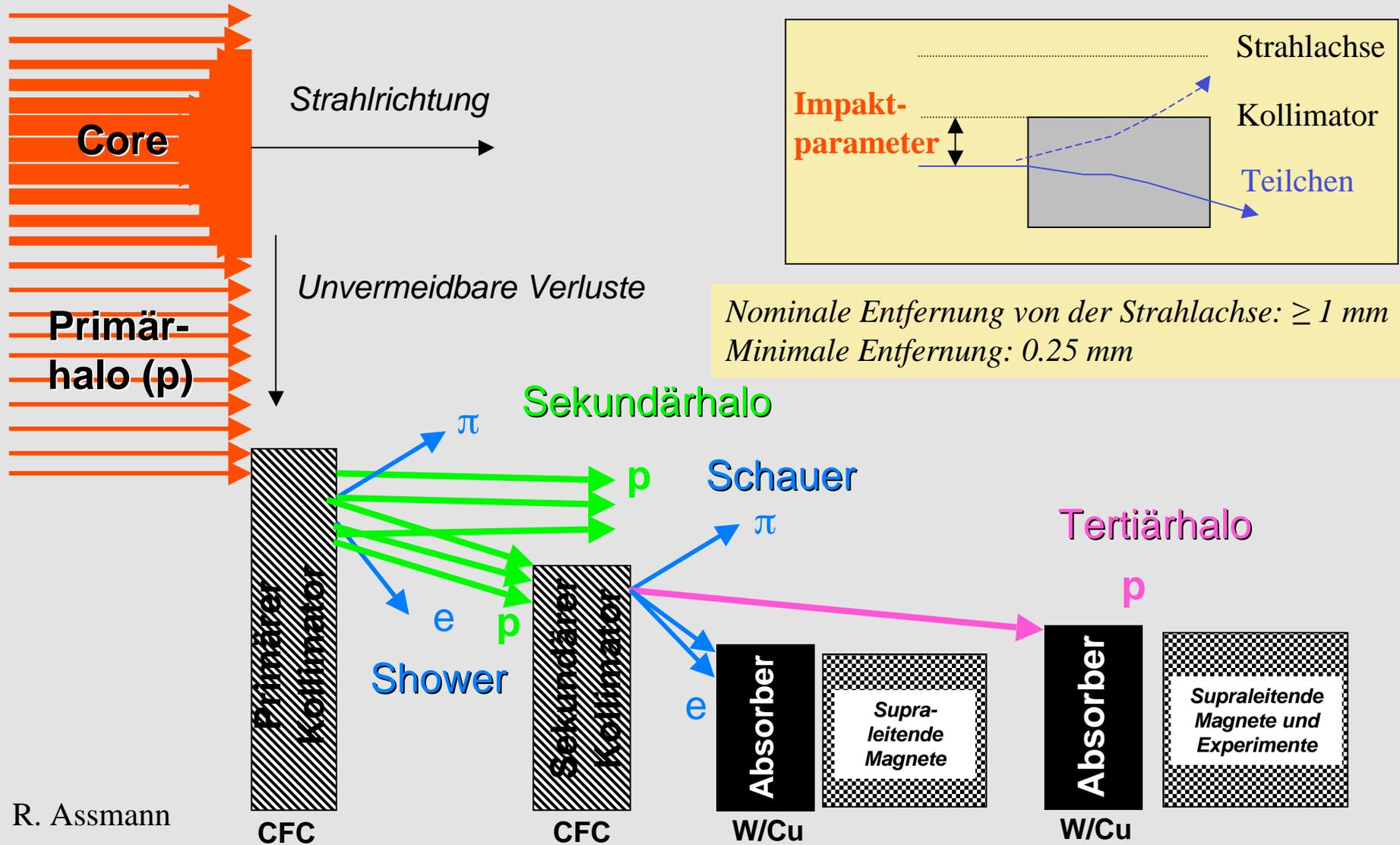
LHC-Kollimatoren



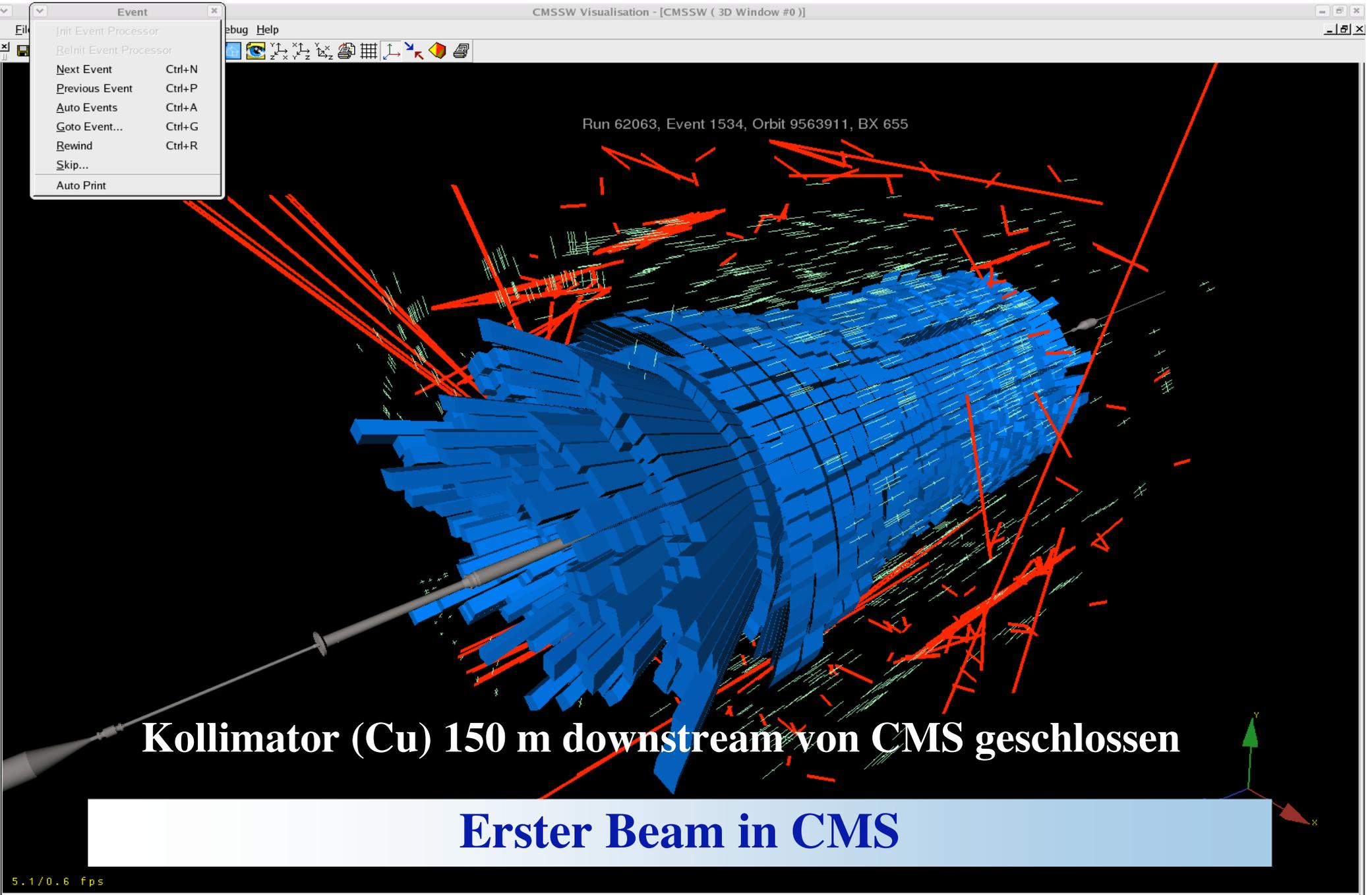
Zweck:
Entfernung von Halo,
Vermeidung von Untergrund
in Detektoren,
Schutz des Beschleunigers



Funktionsweise der Kollimatoren



R. Assmann

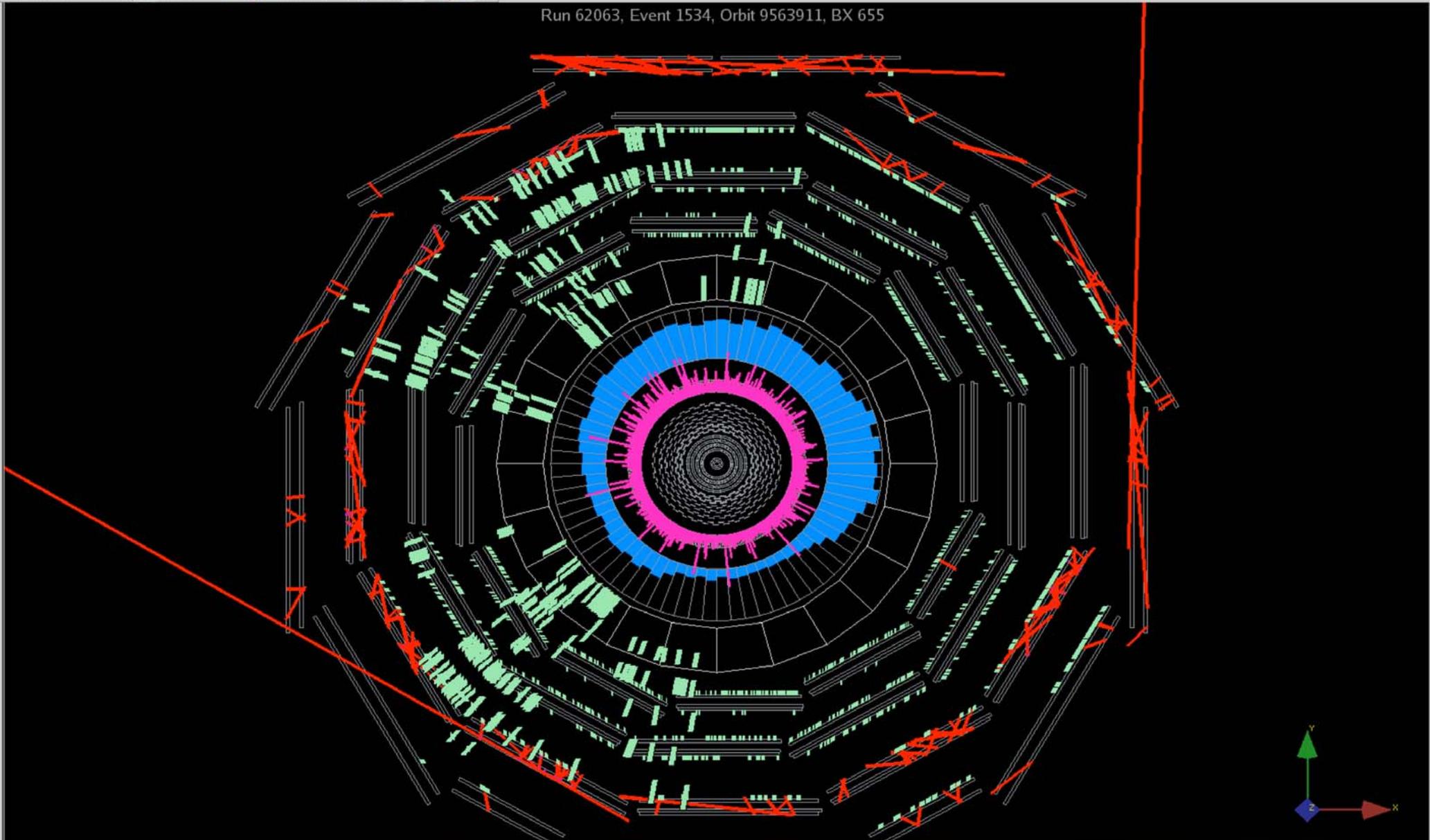


Kollimator (Cu) 150 m downstream von CMS geschlossen

Erster Beam in CMS

Run # 62063, event # 1534

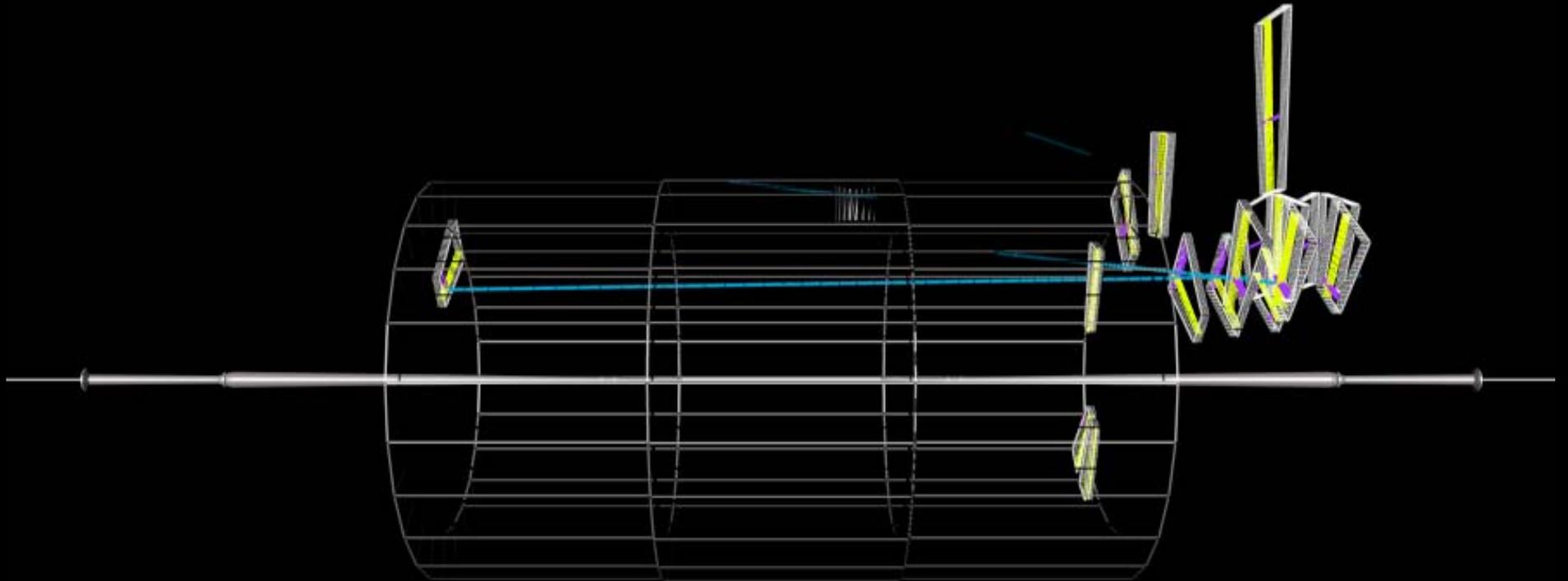
mzanetti@fuwal.C2F11-20: /nfs/home0 CMSSW Visualisation - [CMSSW (3D daqshift@SCX5SCR26:/tmp



Erster Beam in CMS (Transversalansicht)



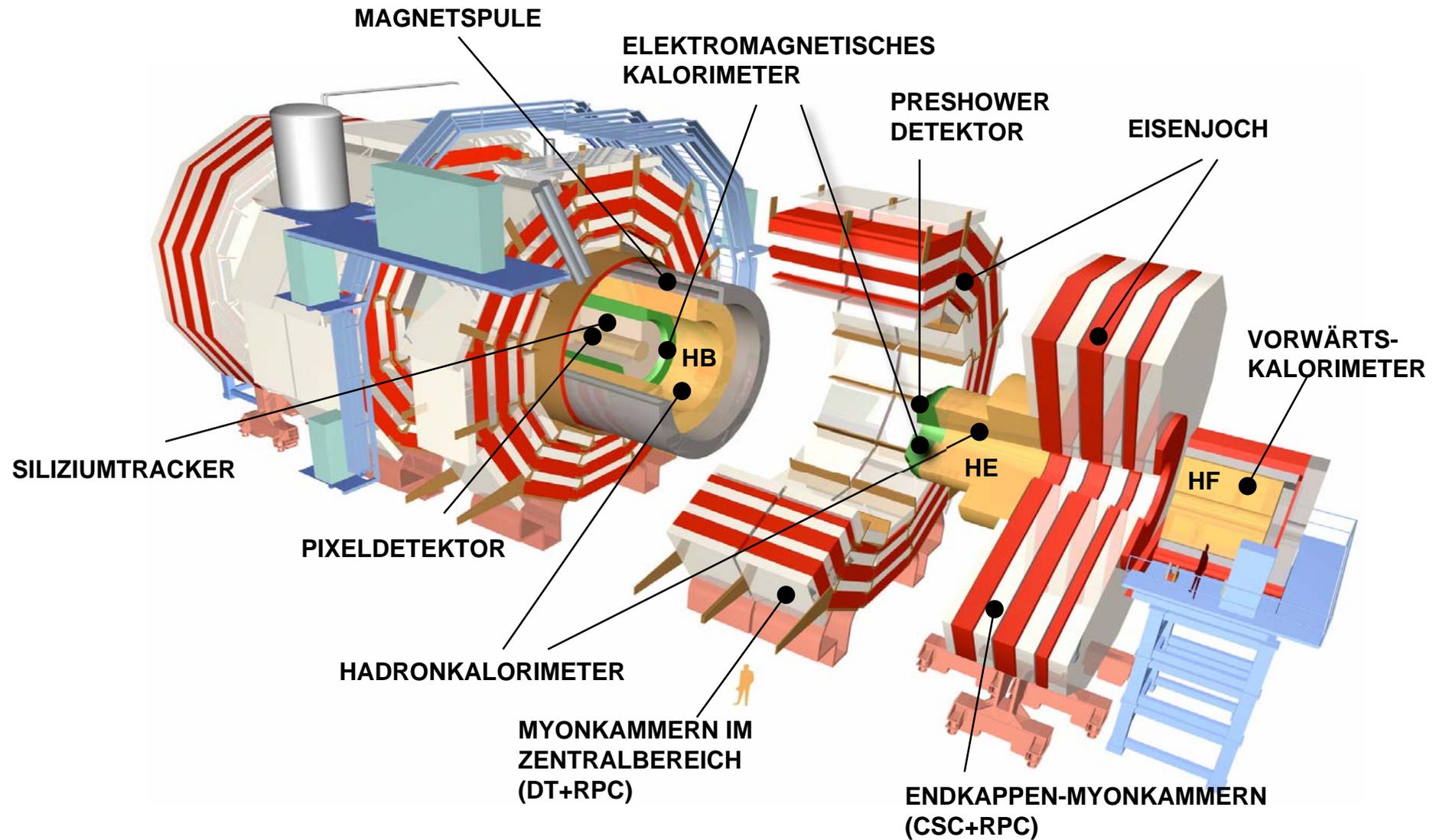
Halomyon in CMS



Kollimator 150 m downstream offen

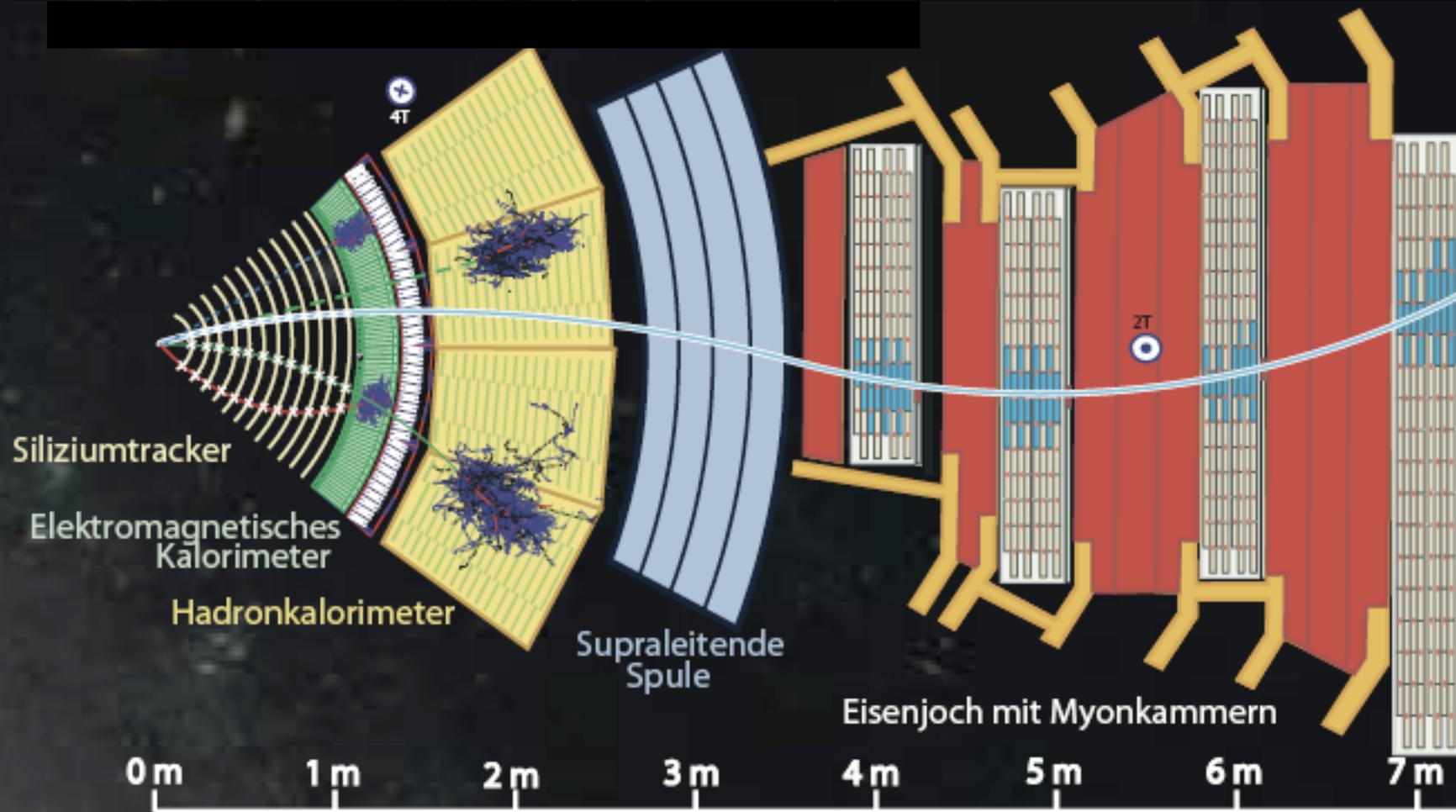


Compact Muon Solenoid (CMS)





Aufbau des CMS-Experiments



Legende:

— Myon

— Elektron

— Geladenes Hadron (z.B. Pion)

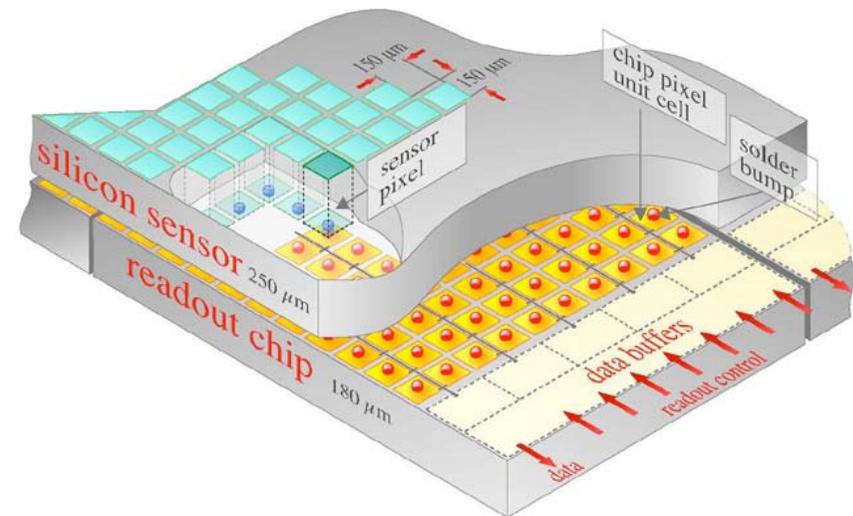
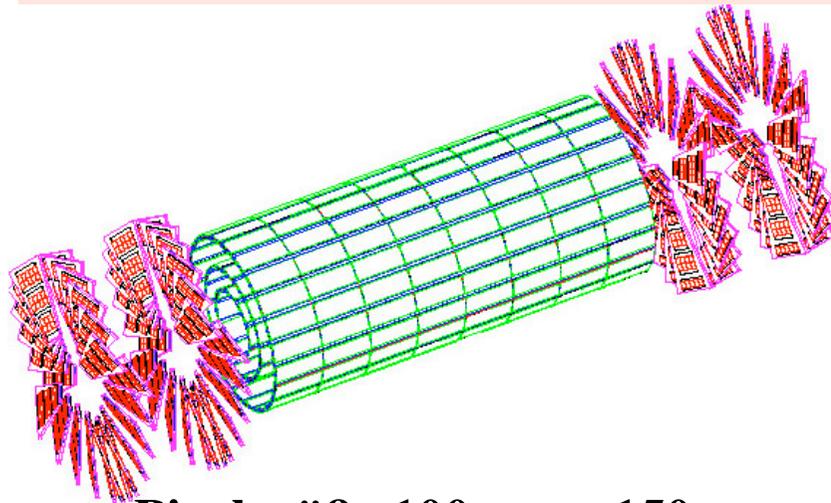
- - - Neutrales Hadron (z.B. Neutron)

- - - Photon



Pixel-Detektor

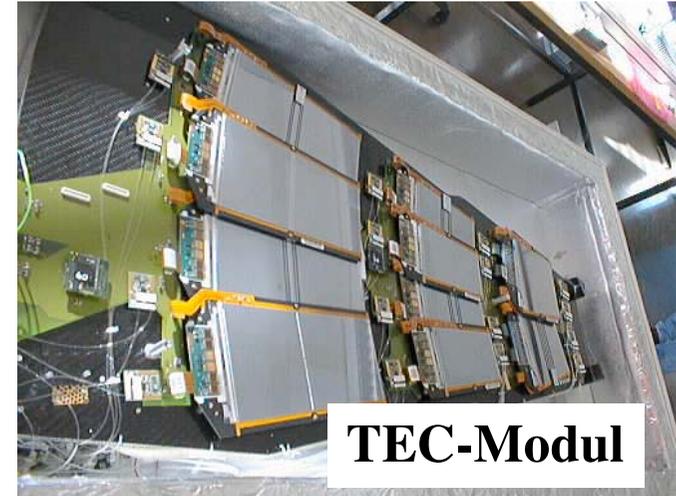
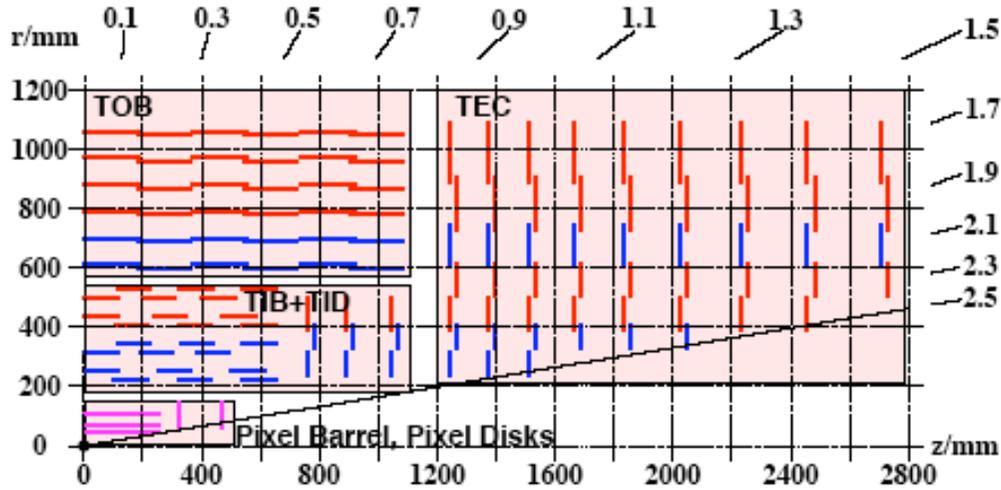
Nahe am Vertex. 3 Lagen im Barrel mit Radien 4, 7 und 11 cm. Endkappen befinden sich bei ± 34 und ± 46 cm vom Vertex. Si-Pixel liefern ein Muster von Raumpunkten. Auflösung: 10 to 20 μm . Sekundärvertices, zum Beispiel von Zerfällen von Teilchen mit Beauty-Quarks, werden identifiziert. Solche Teilchen sind besonders wichtig bei der Suche nach dem Higgsteilchen oder nach Supersymmetrie.



**Pixelgröße 100 μm x 150 μm ;
16000 Readoutchips in 0.25 μm CMOS-Technology, gebondet an die
Silizium-Sensoren;
Strahlungsdosis 100 Mrad in 10 Jahren, deshalb Ersatz der innersten Lage
nach 1 bis 2 Jahren vorgesehen.**

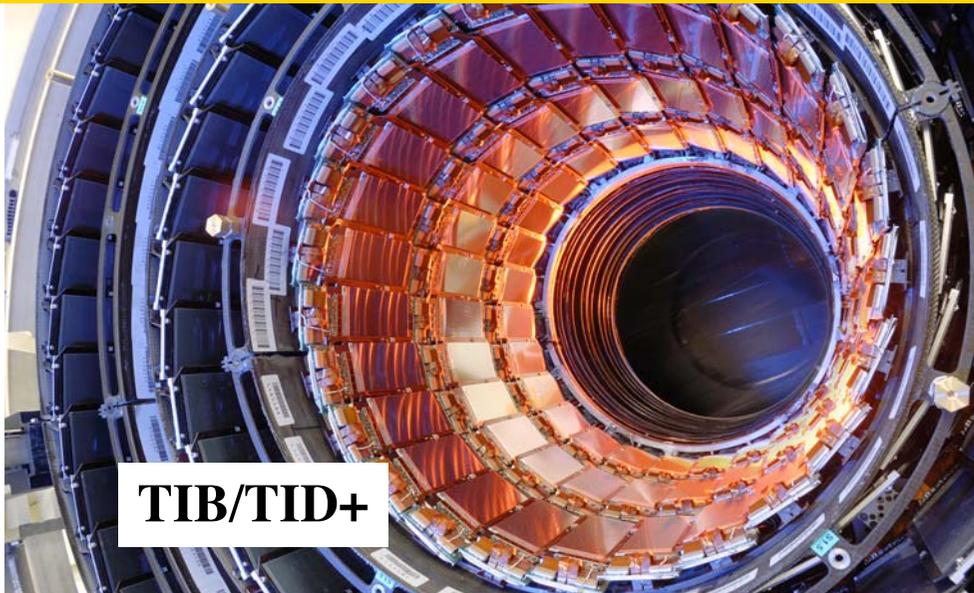


Silizium-Streifen-Tracker

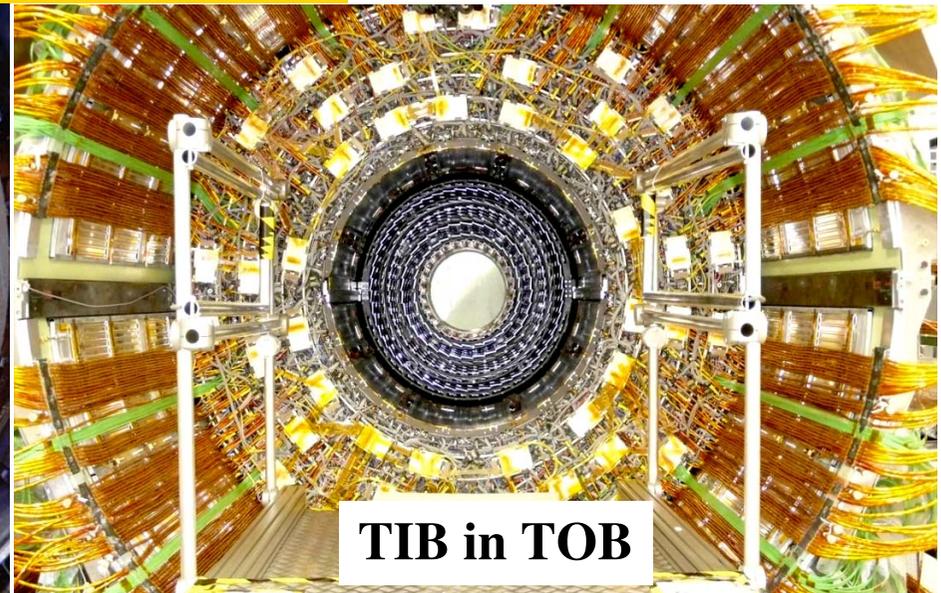


TEC-Modul

220 m² Si-Sensoren, 10.6 Millionen Si-Streifen



TIB/TID+



TIB in TOB

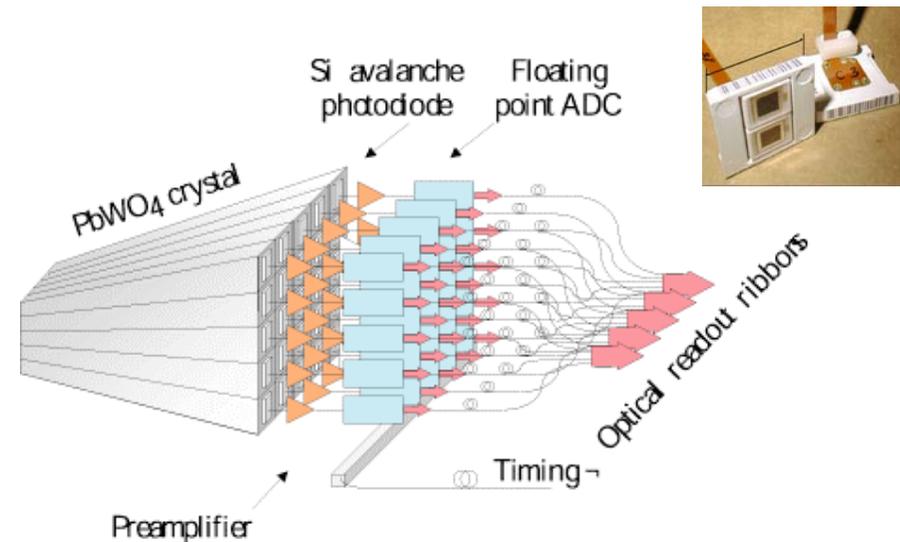
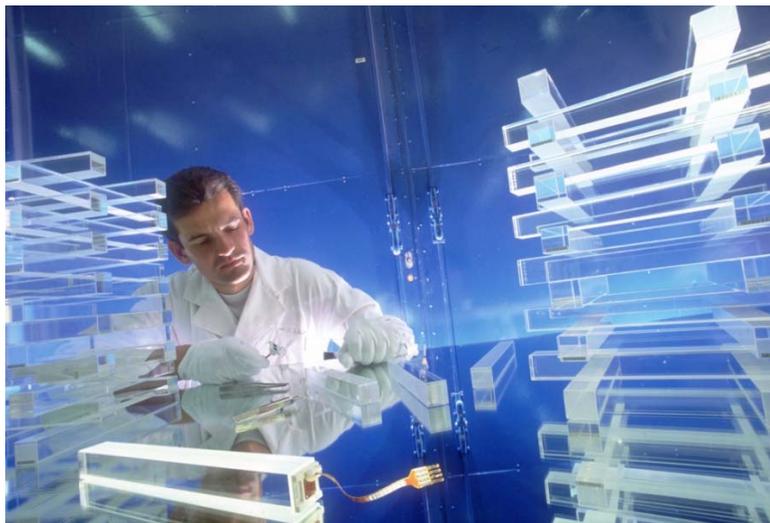


Elektromagnetisches Kalorimeter

Homogenes Kristallkalorimeter (PbWO_4) ausgelesen mit Photodetektoren. Vorteile: ausgezeichnete Energieauflösung, schnell, hohe Granularität, strahlungsfest.

Zentralbereich:

61200 Kristalle, Auslesung durch je 2 Avalanche-Photodioden.



Endkappen:

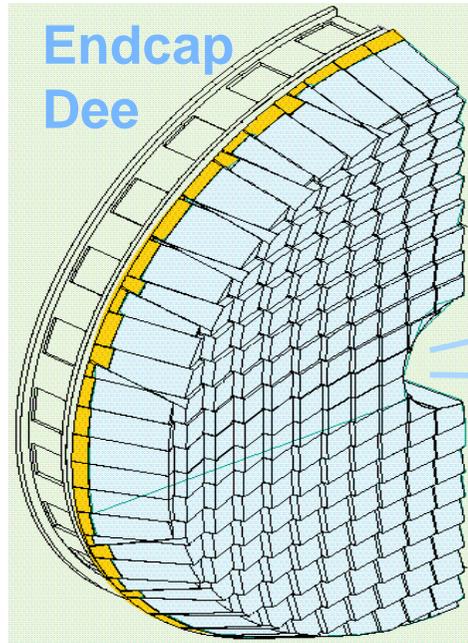
14648 Kristalle, Auslesung durch Vakuumphototrioden.



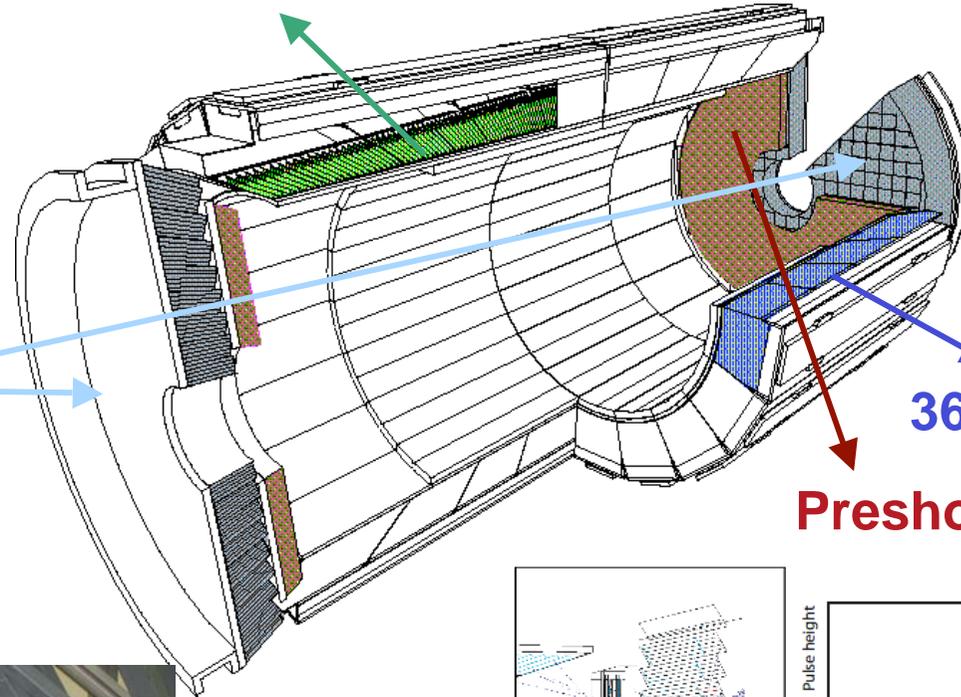


Elektromagnetisches Kalorimeter

PbWO₄ Kristalle



Endcap
Dee

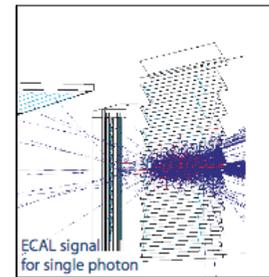


36 Supermodule

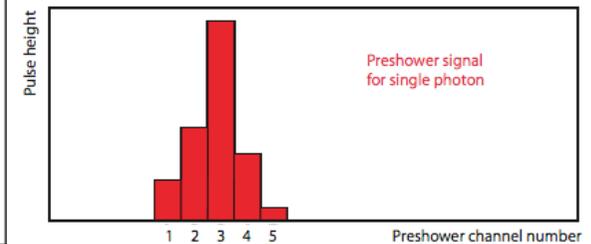
Preshower-Detektor



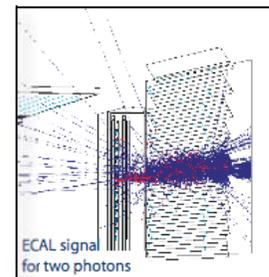
C.-E. Wulz



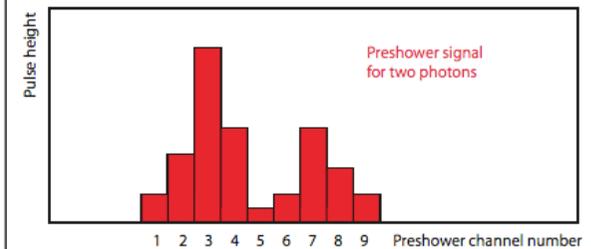
ECAL signal
for single photon



Preshower signal
for single photon



ECAL signal
for two photons

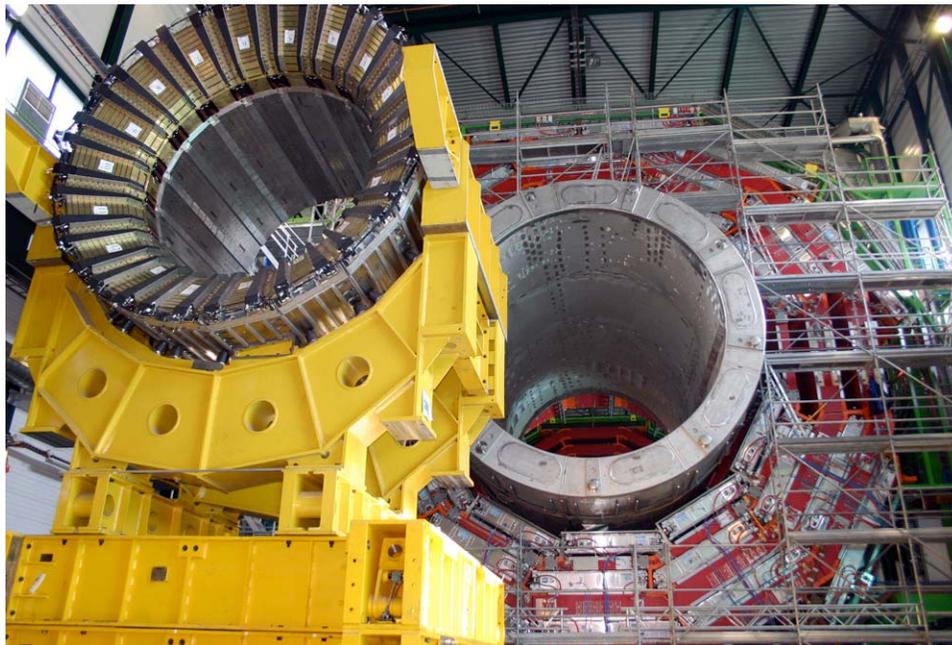


Preshower signal
for two photons

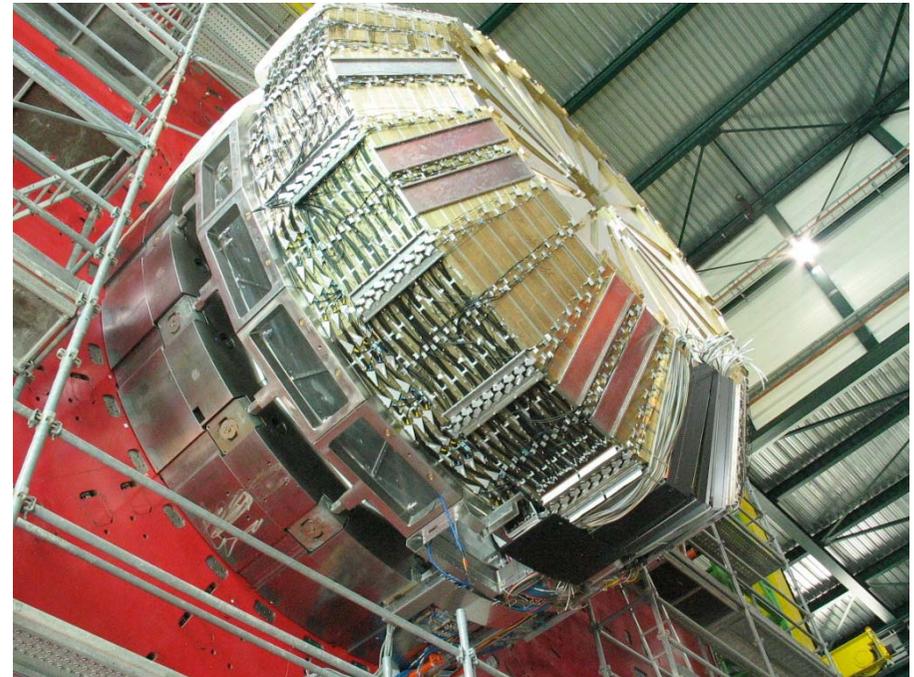


Hadronkalorimeter HB, HE

Aufgabe: Energiemessung von Hadronjets und fehlender Energie. Der innere Teil (HB, HE - Barrel + Endkappen) besteht aus einem Messing-Szintillatorsandwich. Die Auslesung erfolgt durch Photodioden und optische Fasern.



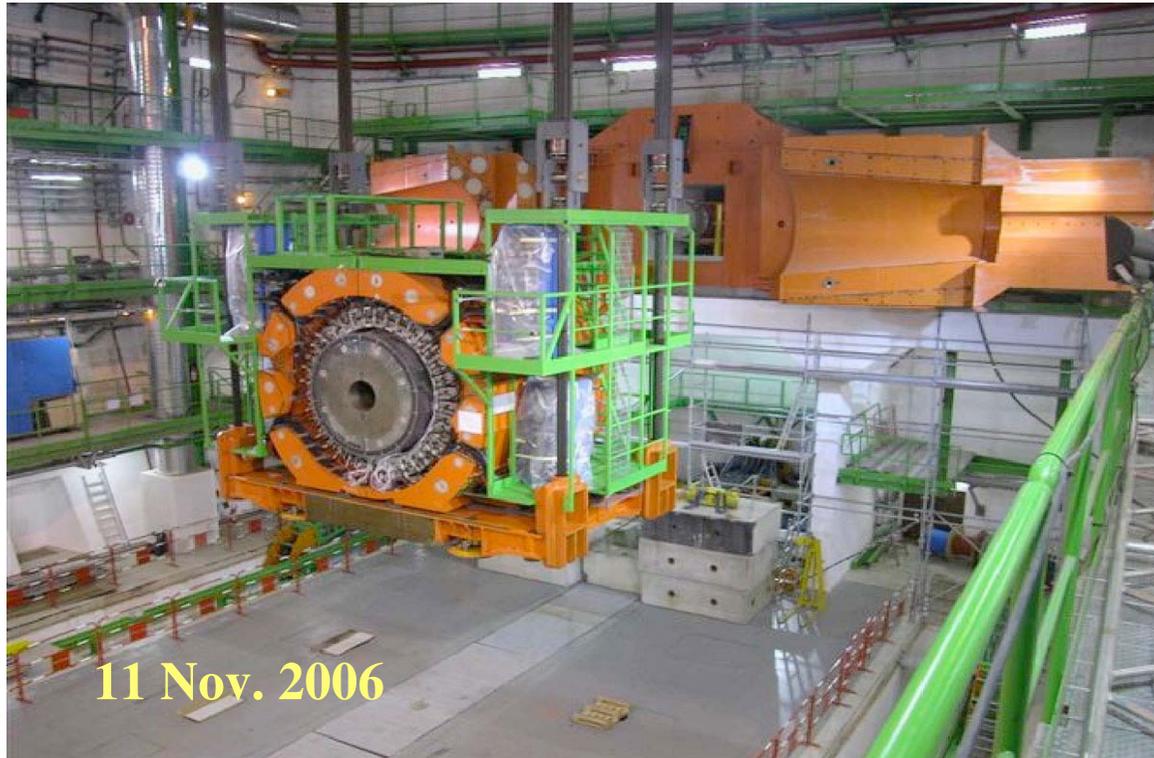
HB



HE



Hadronkalorimeter HF



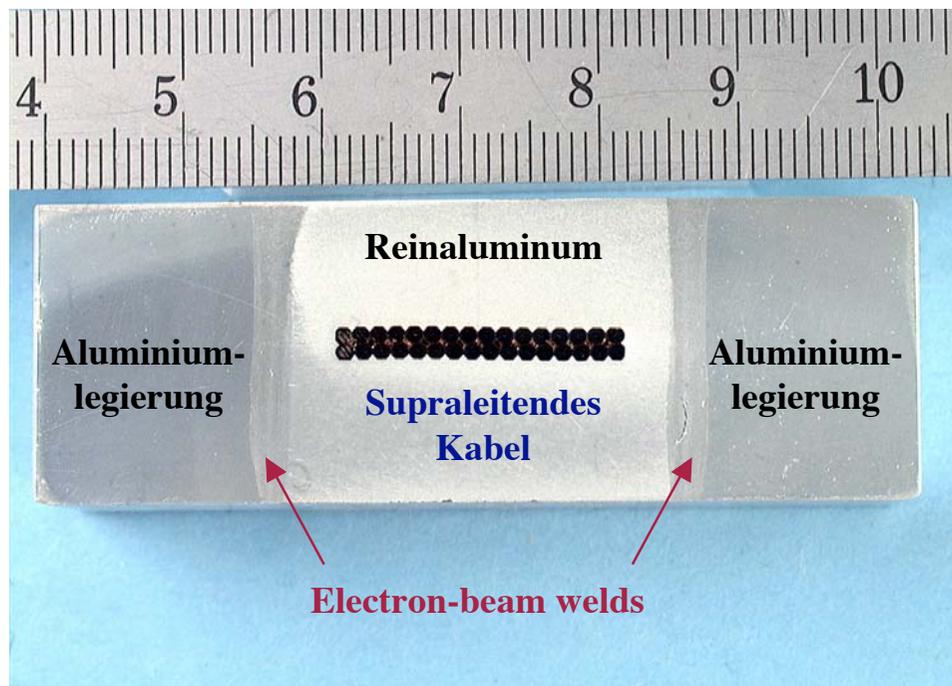
In den beiden Vorwärtsregionen wird die Kalorimetrie durch das Forward HCAL komplettiert. Es besteht aus Absorberplatten aus Stahl und strahlungsresistente Quarzfasern. Die Auslesung erfolgt durch konventionelle Photoelektronenvervielfacher, da die magnetische Flussdichte viel kleiner als im zentralen Bereich ist.



Magnetspule

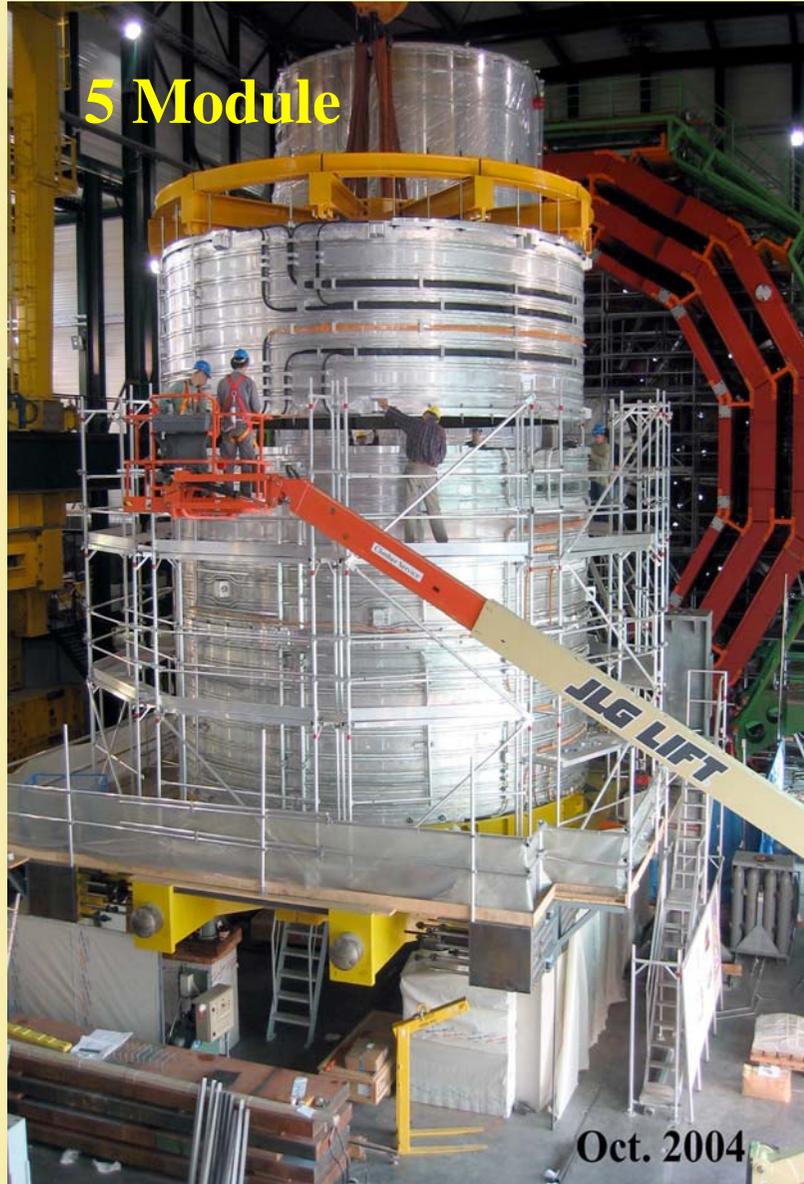
CMS hat ein **supraleitendes Magnetsolenoid**. Es liefert ein **uniformes Magnetfeld mit 3.8 T** bei einer **Betriebstemperatur von 4.5 K**, mit einer **gespeicherten Energie von 2.5 GJ** und einem **Nominalstrom von 19000 A**.

Supraleiter: Al-verstärkte Nb-Ti Einzelleiter in Kupfer.





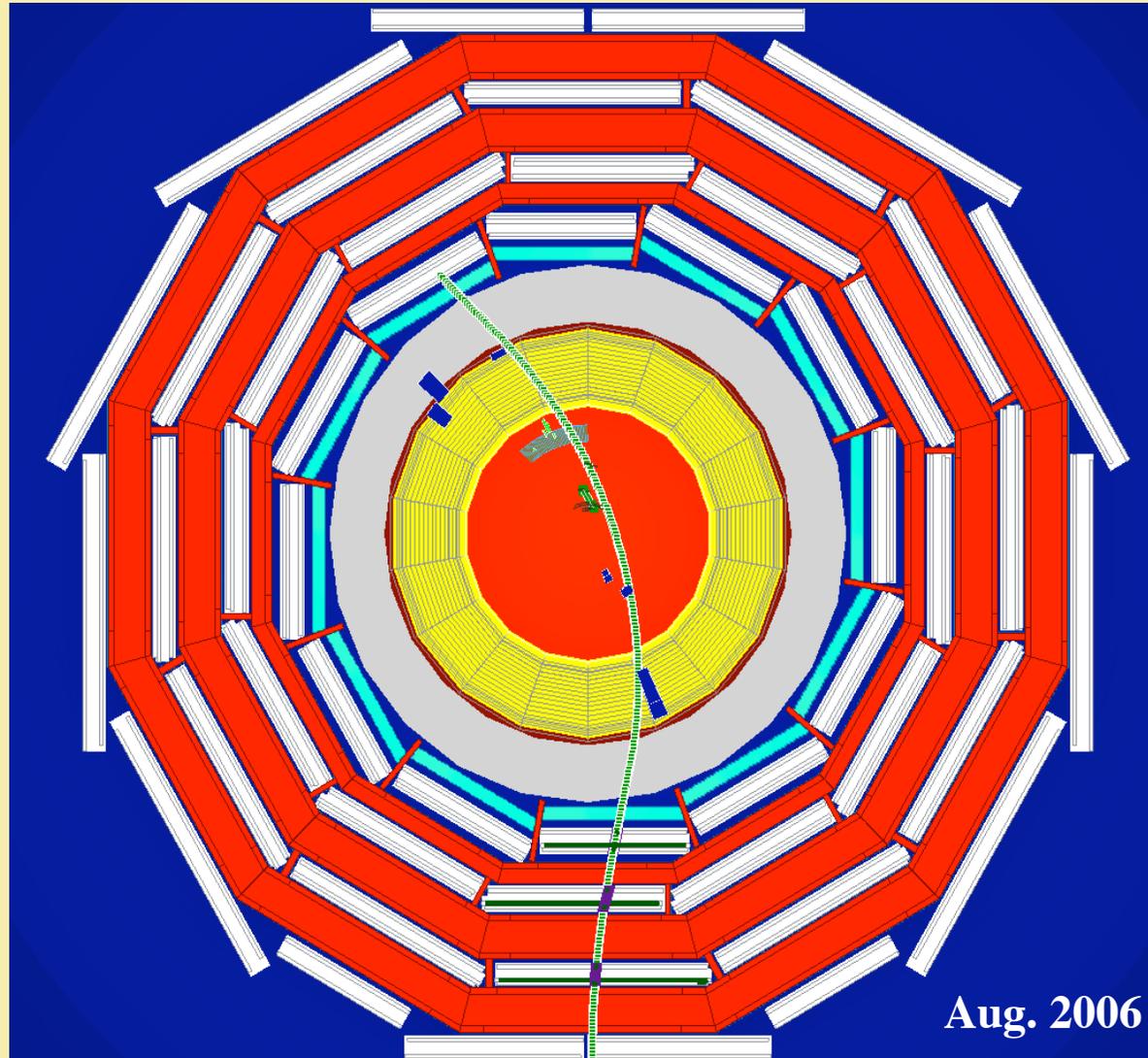
Zusammenbau der Magnetspule





Magnet Test and Cosmic Challenge

In der CMS-Montagehalle an der Oberfläche durchgeführt.

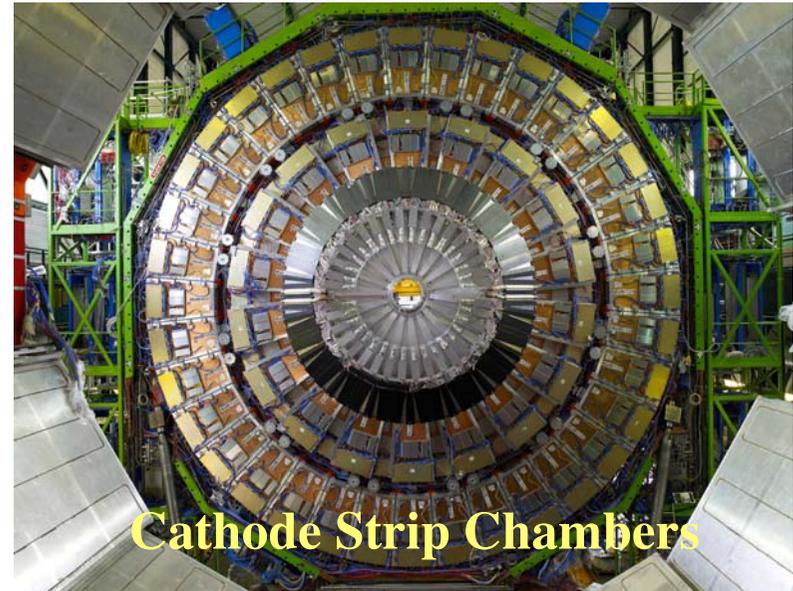


Aug. 2006



Myonsystem

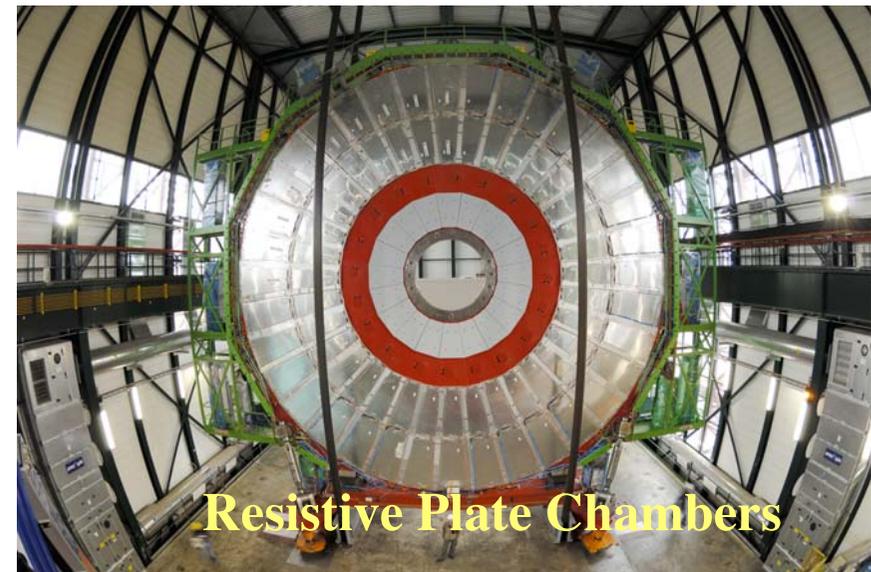
**Drei verschiedene Detektortypen
sowohl für Präzisionsmessungen
(DT, CSC) als auch zum Triggern
(RPC, DT, CSC)**



Cathode Strip Chambers



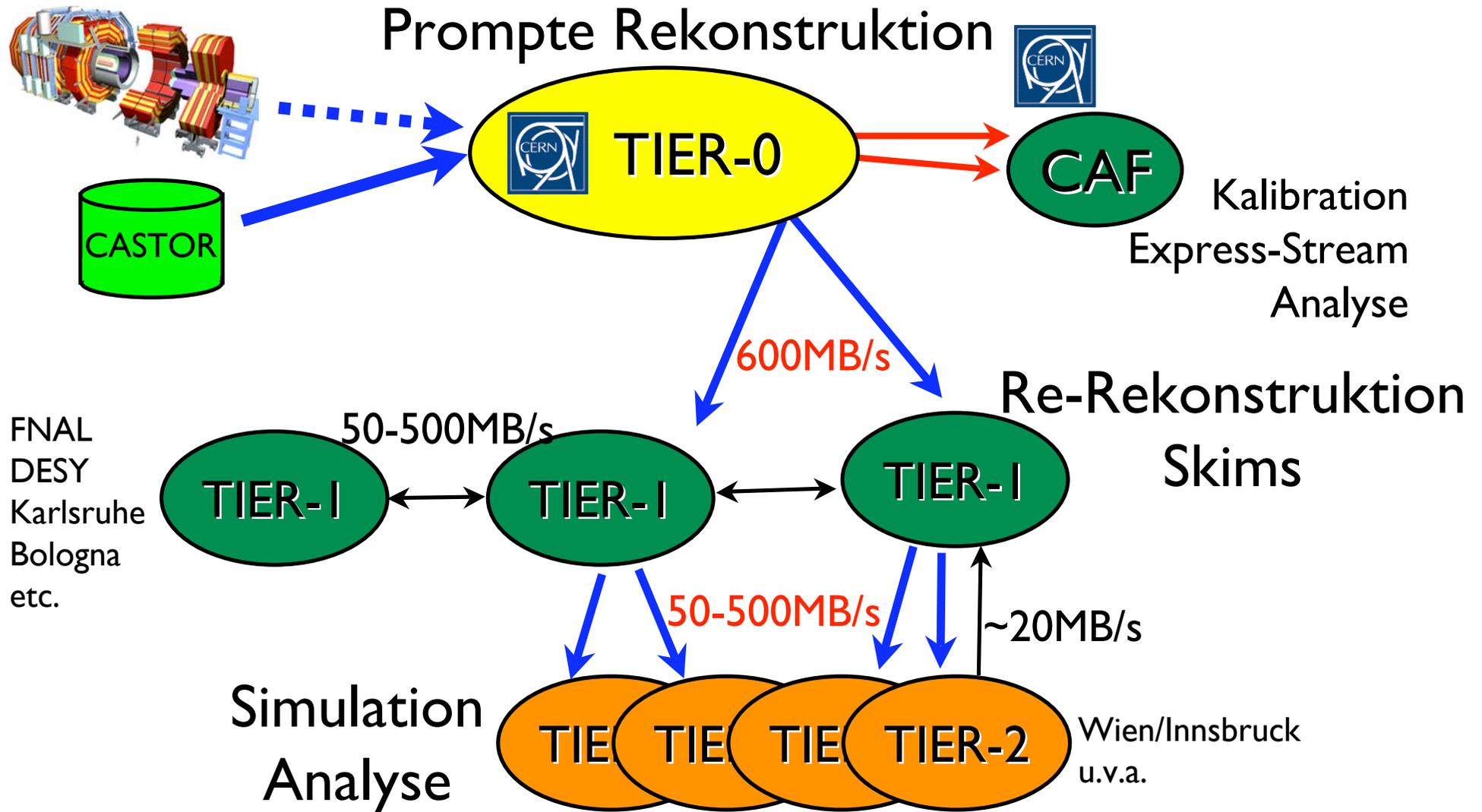
Drift Tube Chambers



Resistive Plate Chambers



Computing



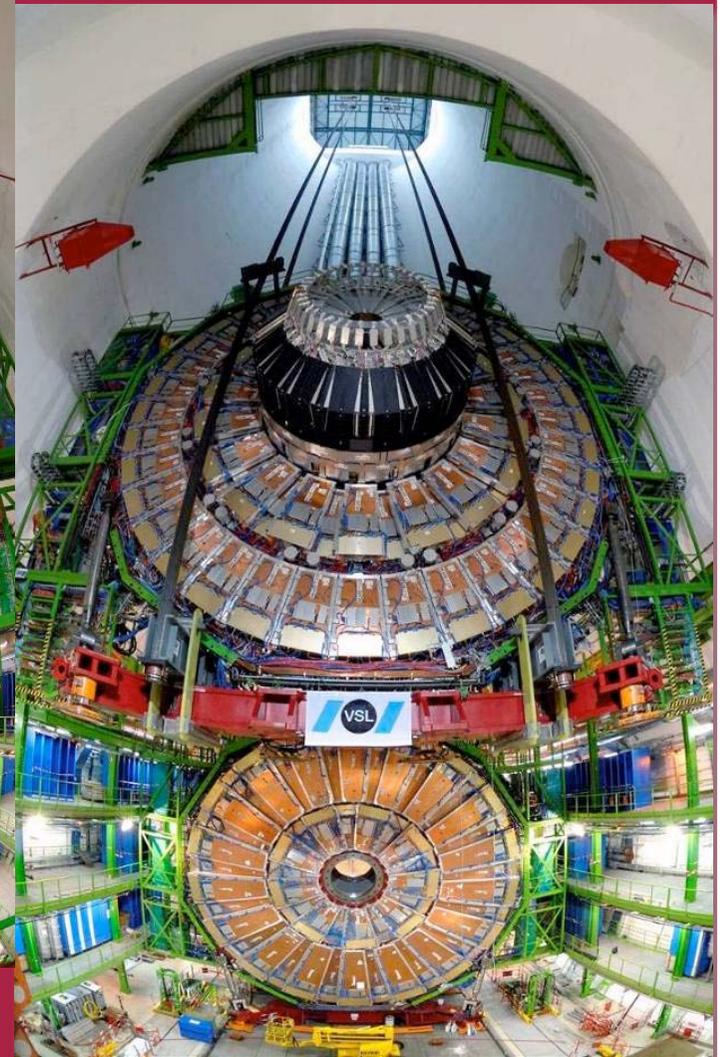


Installation der Endkappen

12. Dez. 2006



9. Jan. 2007

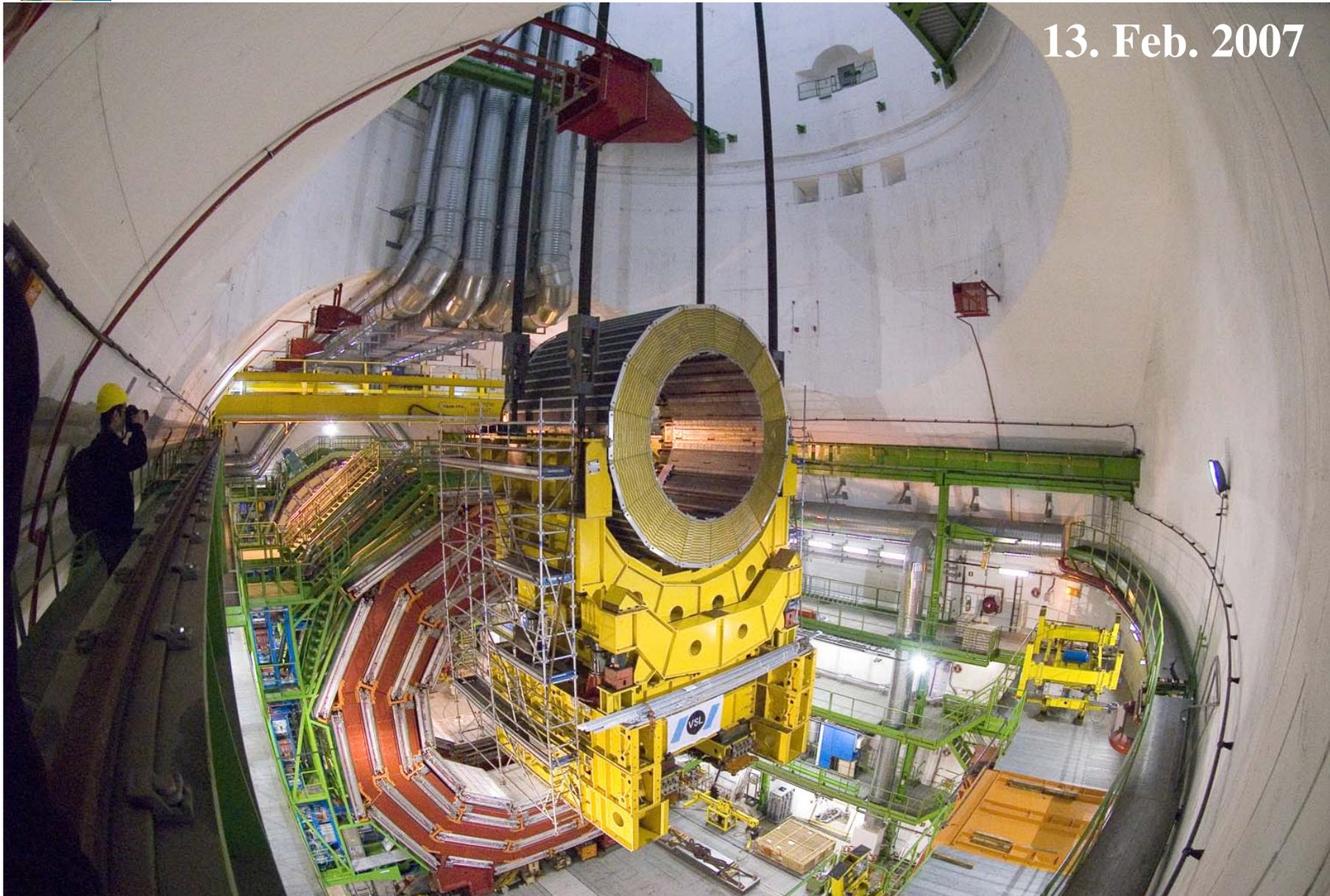


30. Nov. 2006



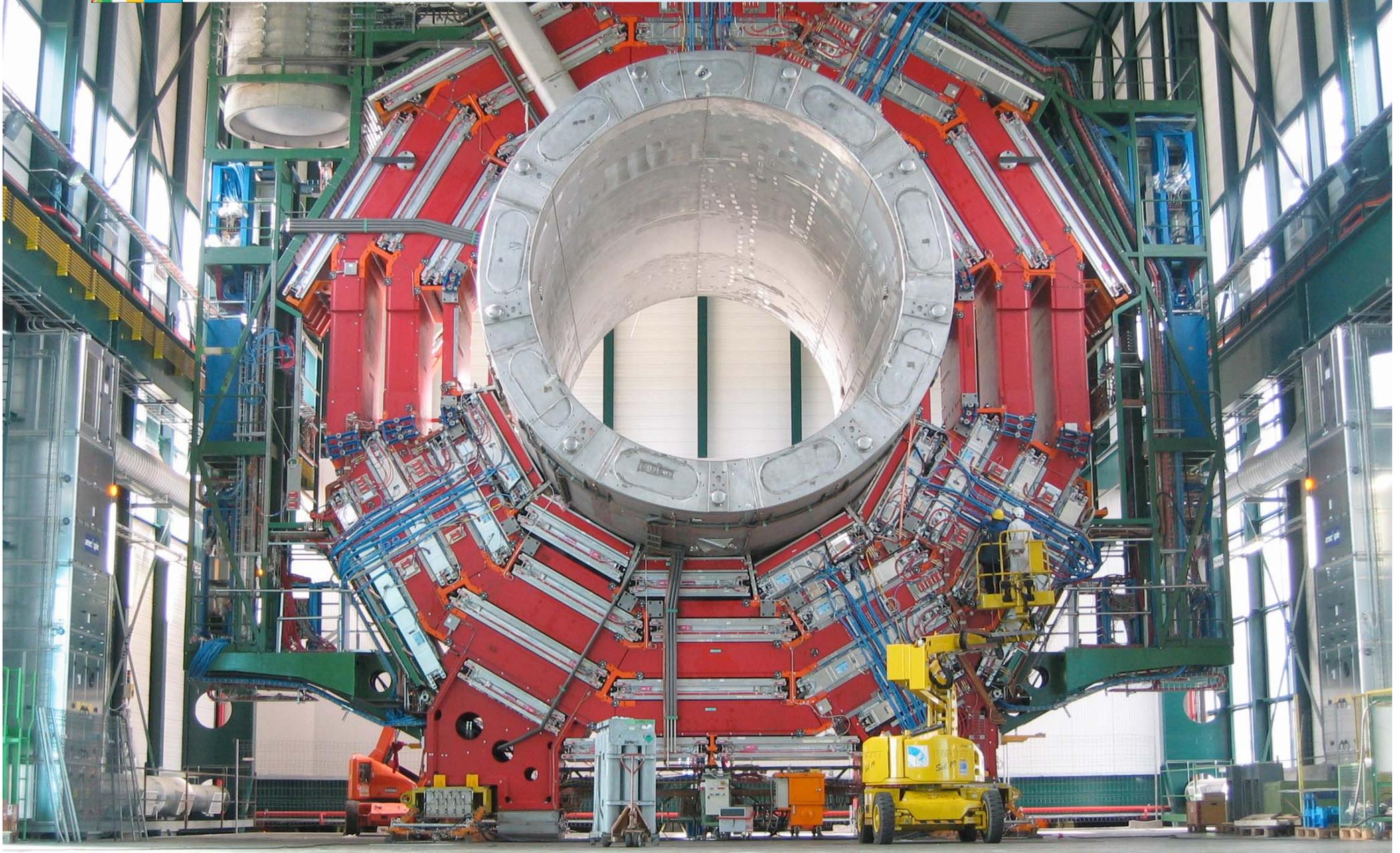
Installation des zentralen Hadronkalorimeters

13. Feb. 2007



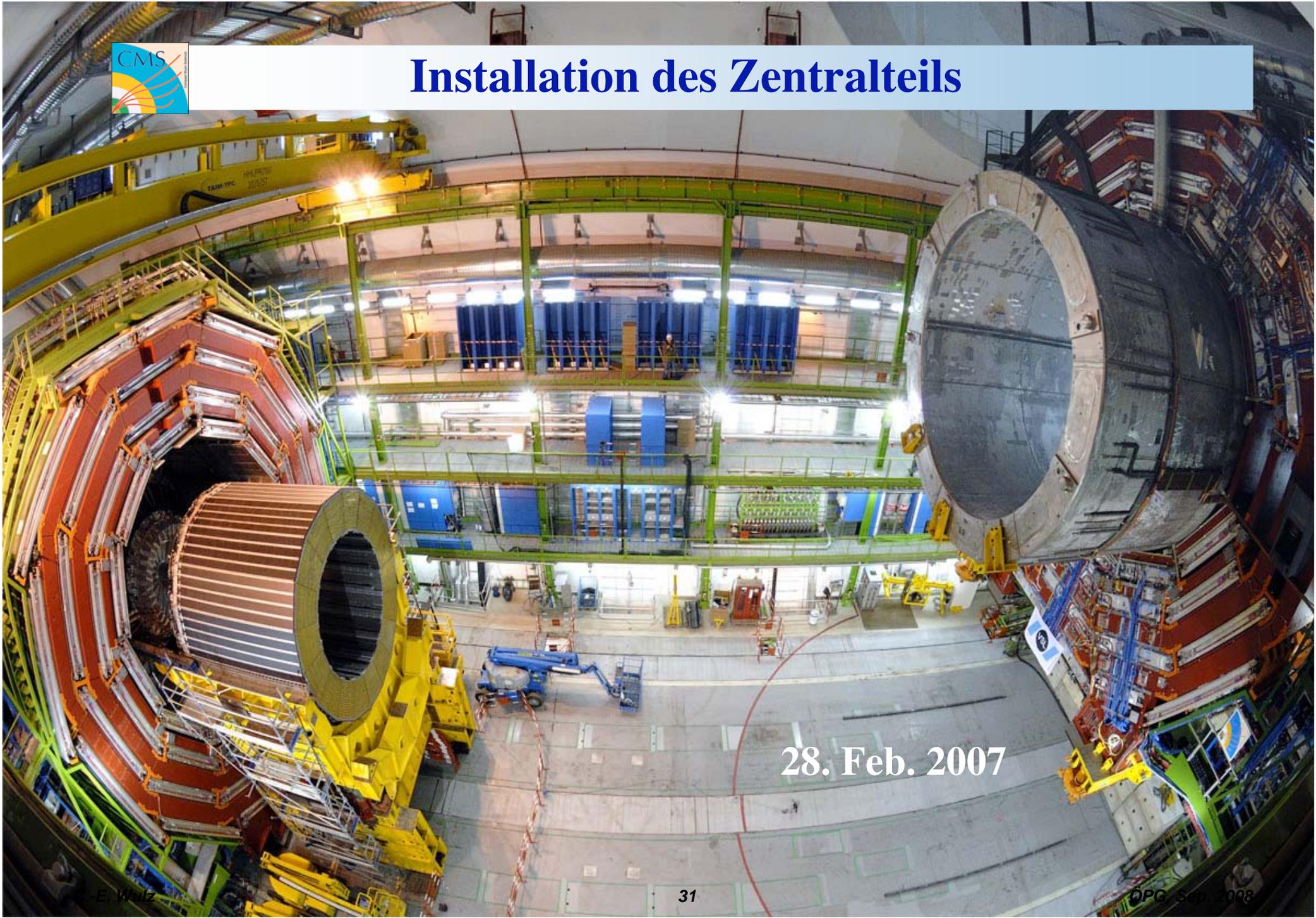


Zentralteil mit Magnetspule





Installation des Zentralteils



28. Feb. 2007



Installation der zentralen elektromagn. Kalorimeters

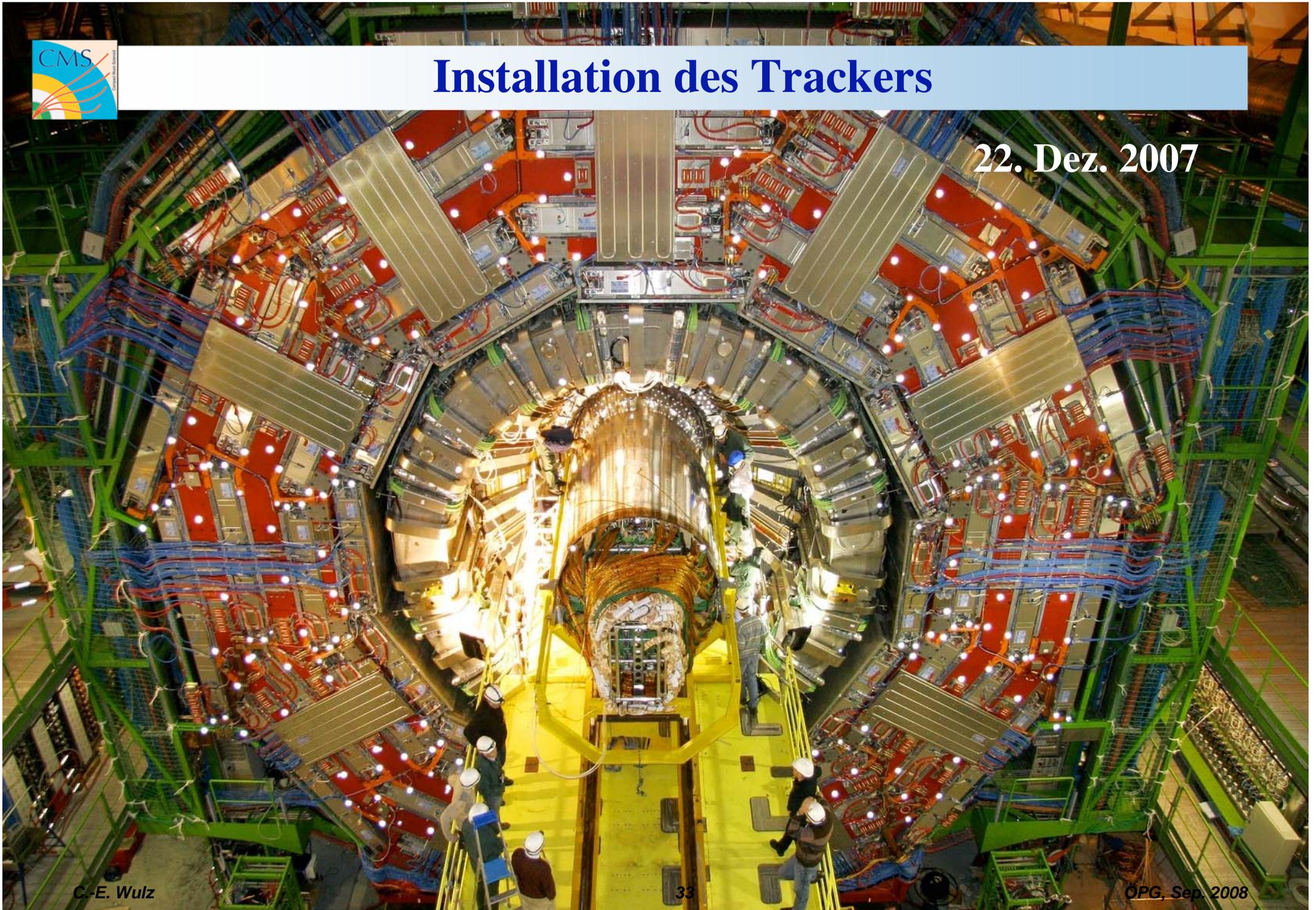
22. Mai 2007





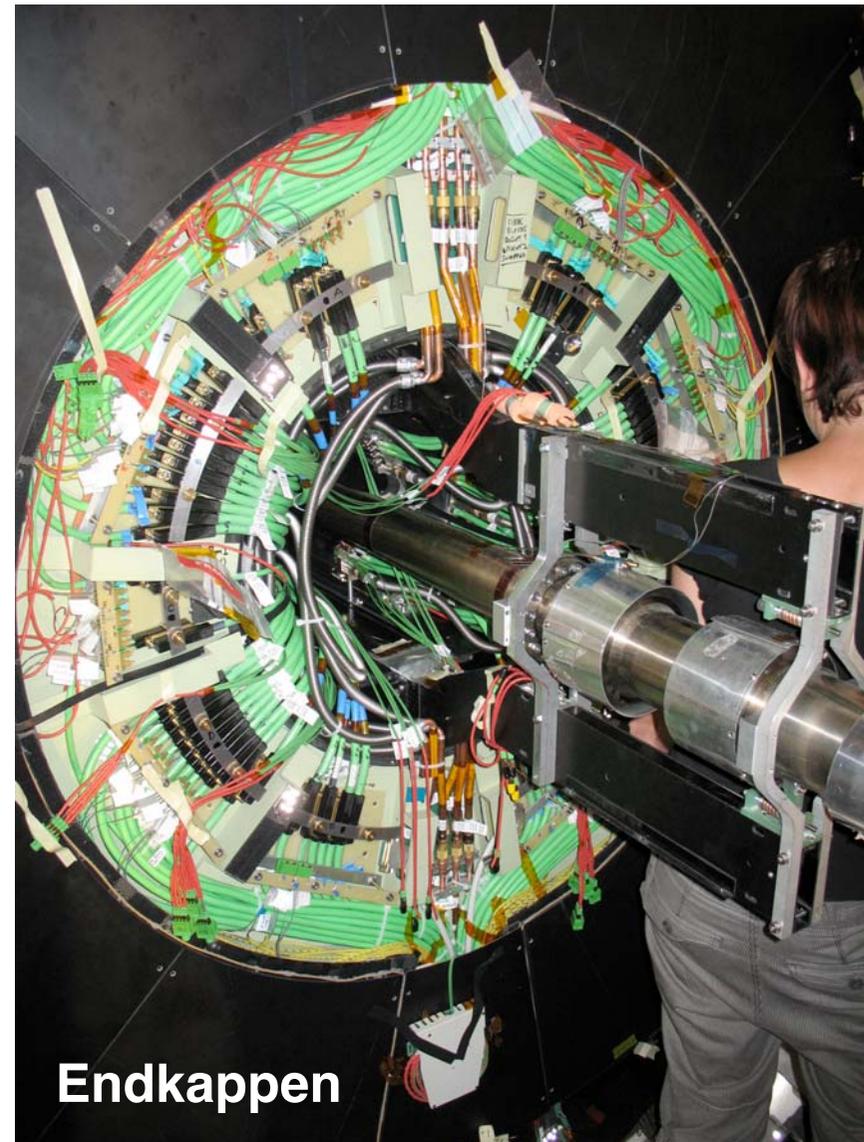
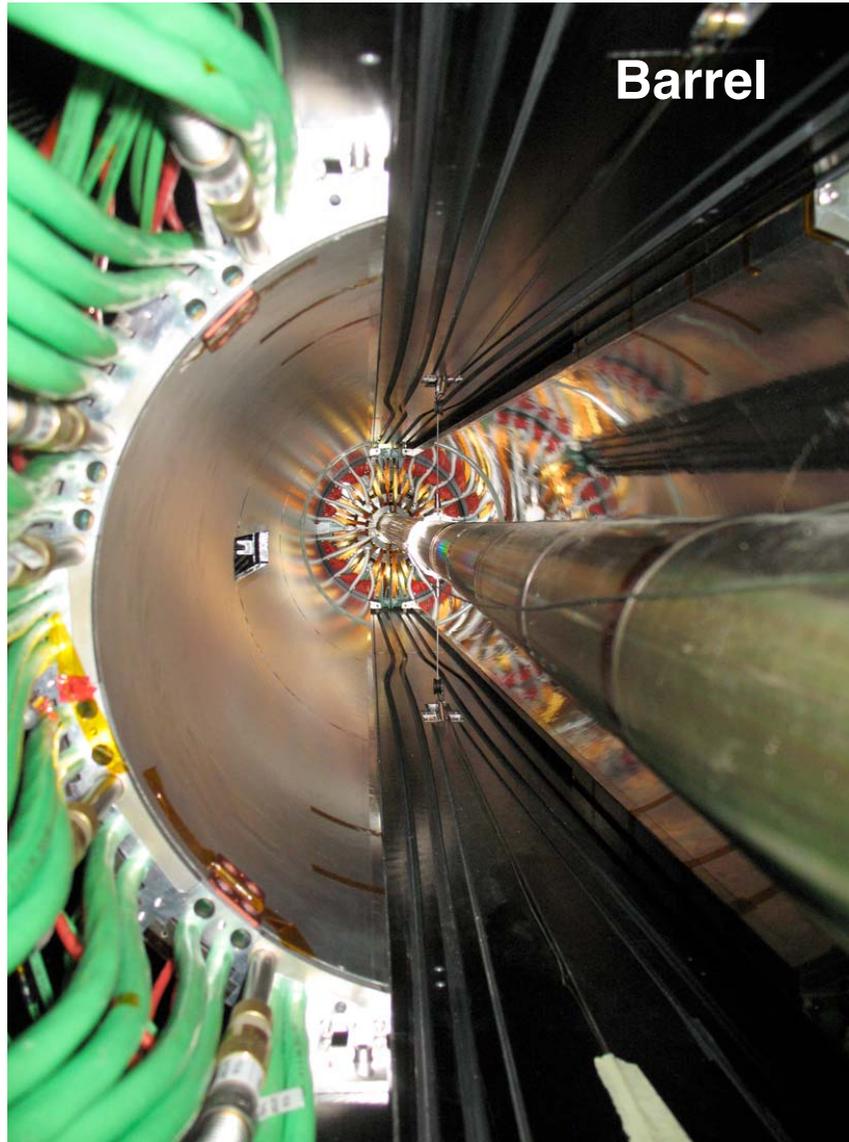
Installation des Trackers

22. Dez. 2007



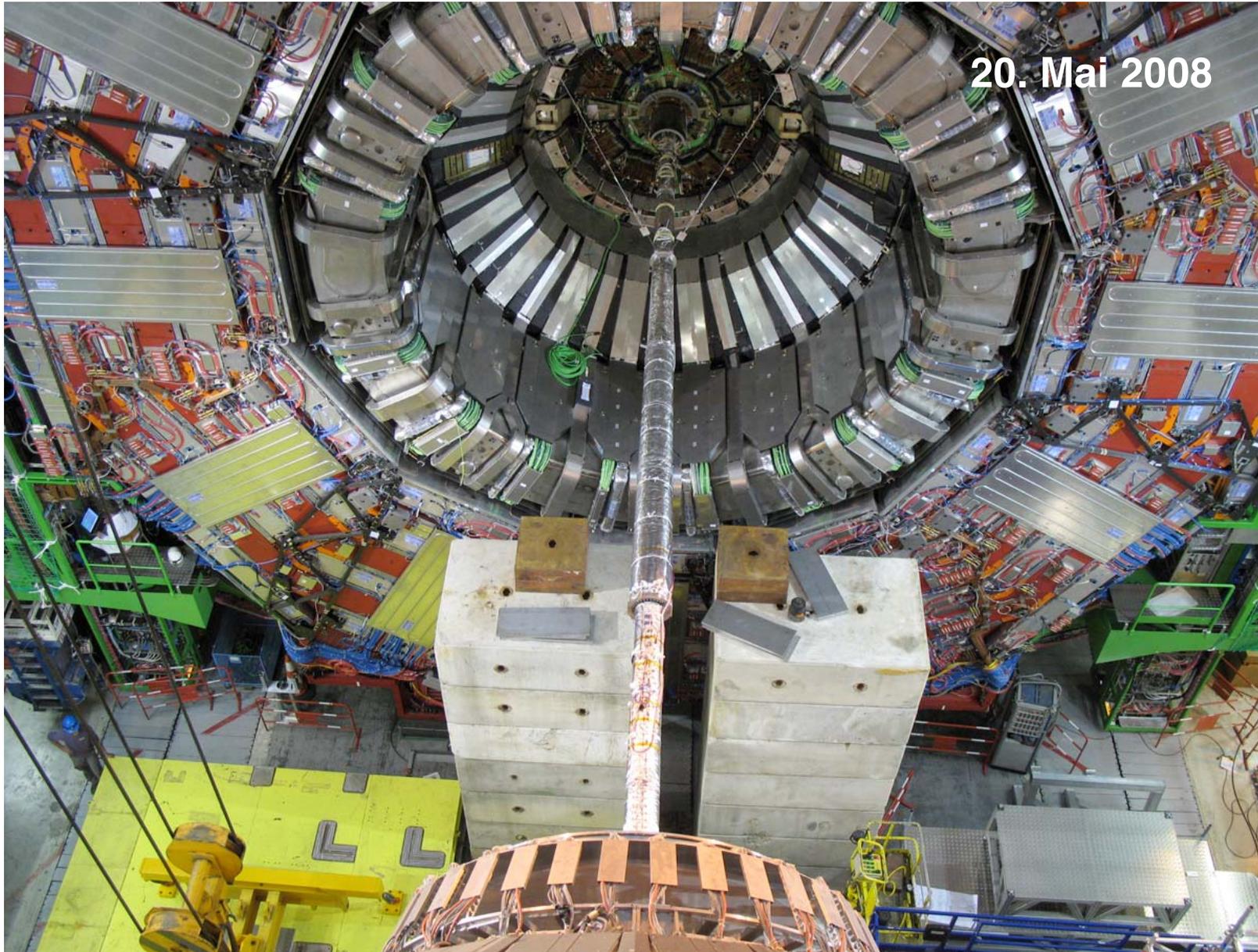


Installation des Pixeldetektors





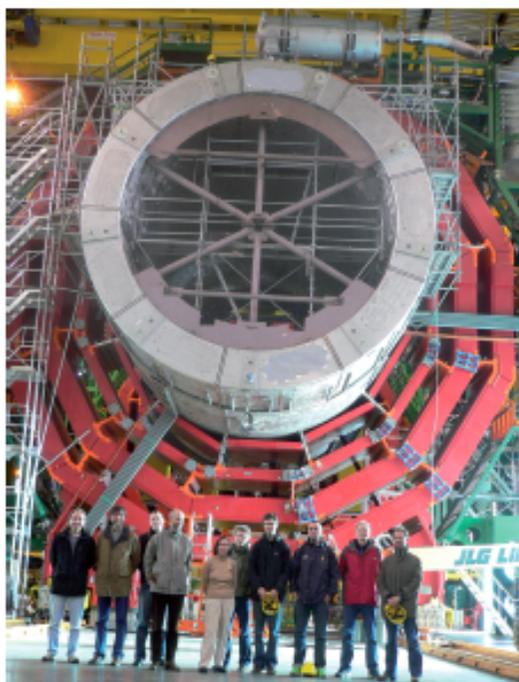
Installation des Strahlrohres



ÖSTERREICH BEI CMS

Das Institut für Hochenergiephysik der Österreichischen Akademie der Wissenschaften gehört zu den Gründungsmitgliedern von CMS.

Die österreichische CMS-Gruppe hat etwa 30 Mitarbeiter und besteht aus Physikern, Ingenieuren, Technikern und Studenten. Ihre Hauptaktivitäten liegen auf den Gebieten des Triggers, des Trackers und der Physikanalyse.



TRIGGER

Im LHC finden pro Sekunde bis zu einer Milliarde Proton-Kollisionen statt. Der Trigger dient dazu, aus diesen mit Hilfe speziell entwickelter schneller, programmierbarer Elektronik und einer Computerfarm nur die interessantesten für die Datenanalyse auszuwählen. Alle anderen Ereignisse werden verworfen.

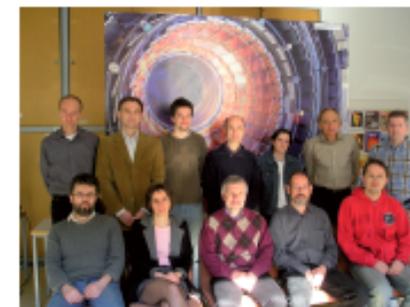


Die Gruppe ist verantwortlich für das Design und den Bau des globalen Triggers, des globalen Myontriggers, der zentralen Triggersteuerung und des zentralen regionalen Myontriggers. Ohne den globalen Trigger könnte CMS kein einziges Ereignis aufzeichnen, und ohne den Myontrigger könnte zum Beispiel kein in Myonen zerfallendes Higgsteilchen gefunden werden! Die Gruppe hat auch die Verantwortung über den Trigger Supervisor, ein Softwaresystem, das die Konfiguration und den Betrieb des gesamten CMS-Triggers koordiniert.



TRACKER

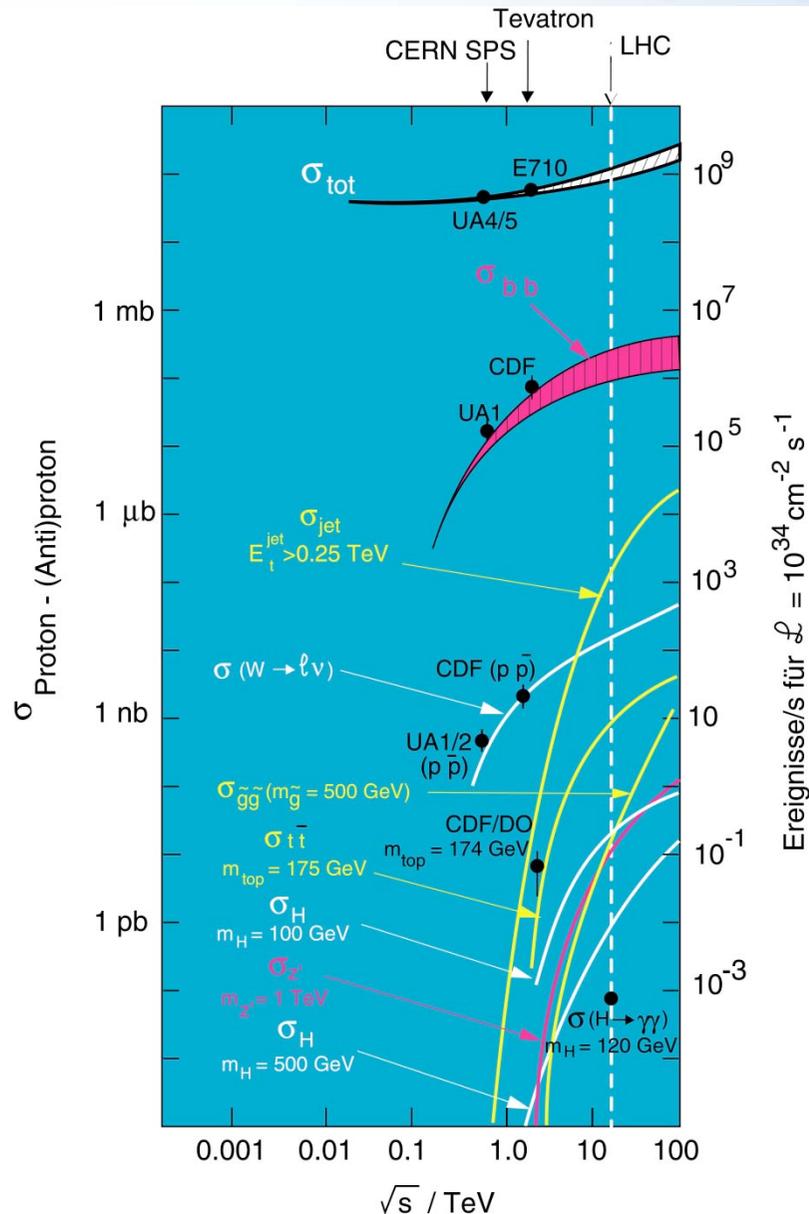
Der Tracker aus Silizium dient zur präzisen Messung der Bahnen und Impulse elektrisch geladener Teilchen. Er ermöglicht die Bestimmung von Spurpunkten mit einer Genauigkeit von einem Hundertstel Millimeter.



Die Gruppe koordiniert die Qualitätskontrolle der Siliziumsensoren und die Produktion der Endkappenmodule. Sie produzierte alle Module eines der Endkappenringe unter Einhaltung engster mechanischer Toleranzen. Fünfhunderttausend elektrische Verbindungen zwischen Sensoren und Ausleseelektronik wurden in Wien hergestellt und geprüft! Für den Pixeldetektor, den innersten Teil des Trackers, wurden von der Gruppe Bauteile für die Datenübertragung und die Ausleseelektronik entwickelt.



Wirkungsquerschnitte und Raten



Wirkungsquerschnitte für verschiedene Prozesse variieren über viele Größenordnungen

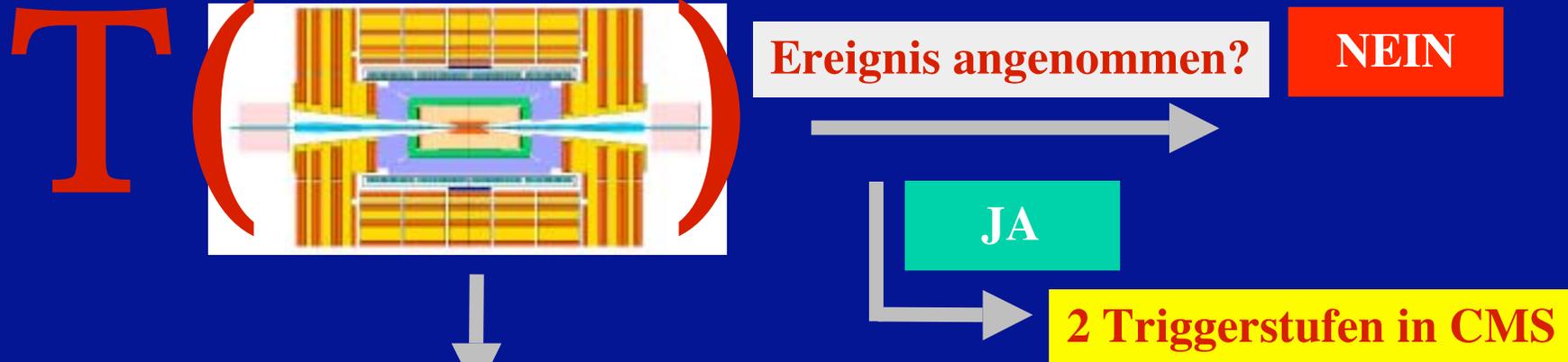
- inelastisch: 10^9 Hz
- $W \rightarrow \ell \nu$: 100 Hz
- $t\bar{t}$: 10 Hz
- Higgs (100 GeV): 0,1 Hz
- Higgs (600 GeV): 0,01 Hz

Erforderliche Selektivität

$1 : 10^{10} - 11$

Trigger

Trigger



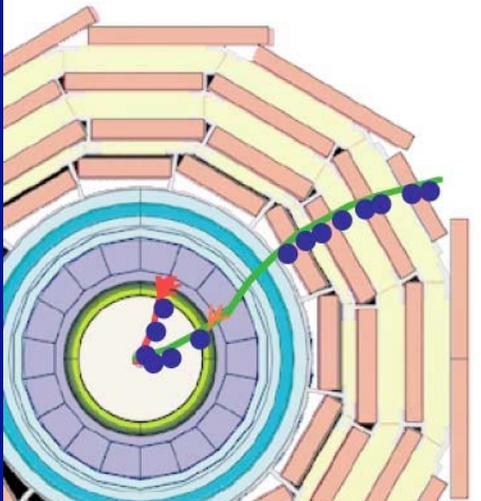
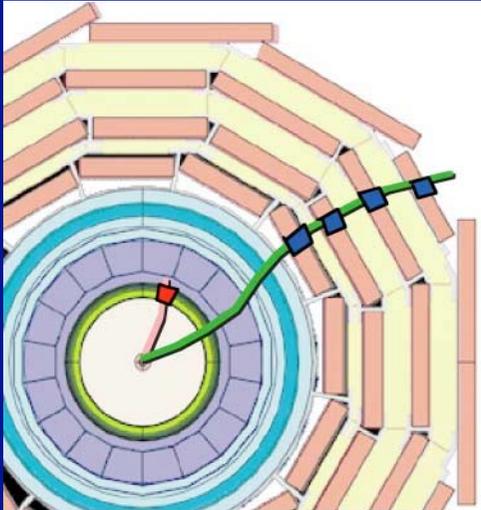
hängt ab von

Art des Ereignisses (Physik, Kalibration etc.)
Eigenschaften der gemessenen Triggerobjekte
Wahl der Triggerbedingungen

Triggerobjekte (Kandidaten): e/γ , μ , Hadronjets, τ -Jets,
fehlende Energie, Gesamtenergie etc.
Triggerbedingungen: gemäß physikalischen und technischen Prioritäten



CMS 2-Stufen-Trigger



Level-1 Trigger

Makrogranulare Information aus Kalorimetern und Müonsystem (e , μ , Jets, E_T^{missing})

Schwellwert- und Topologiebedingungen möglich

Entscheidungszeit: $3,2 \mu\text{s}$

Eingangsrate: 40 MHz

Ausgangsrate: bis zu 100 kHz

Speziell entwickelte Elektronik

High Level Trigger (mehrere Stufen)

Genauere Informationen aus Kalorimetern, Müonsystem und Tracker

Schwellwert-, Topologie-, Massenbedingungen u.a. sowie Vergleiche mit anderen Detektoren möglich

Entscheidungszeit: zwischen 10 ms und 1 s

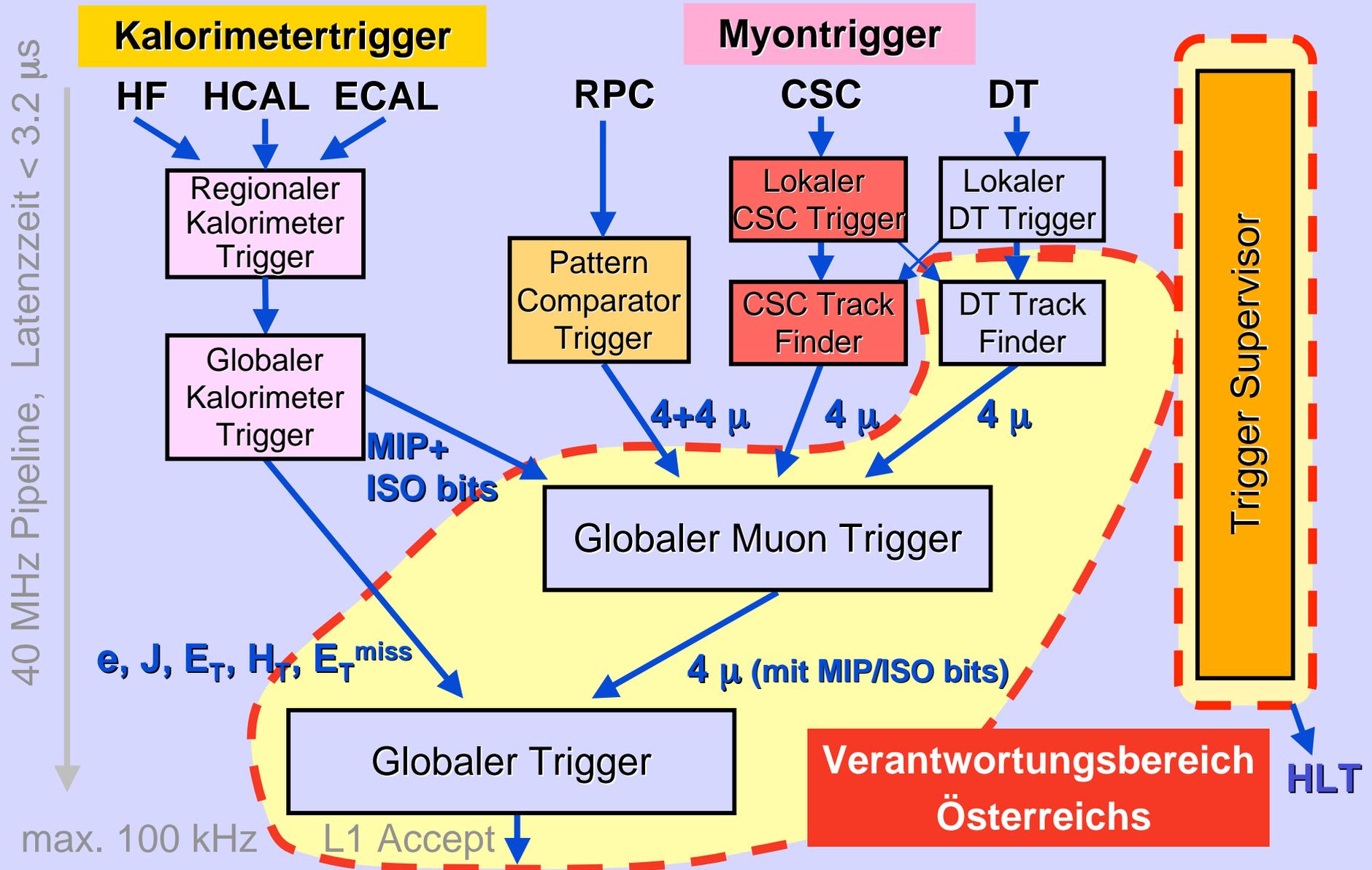
Eingangsrate: bis zu 100 kHz

Ausgangsrate (Datenakquisition): $O(100 \text{ Hz})$

Industrielle Prozessoren und Switching-Netzwerk

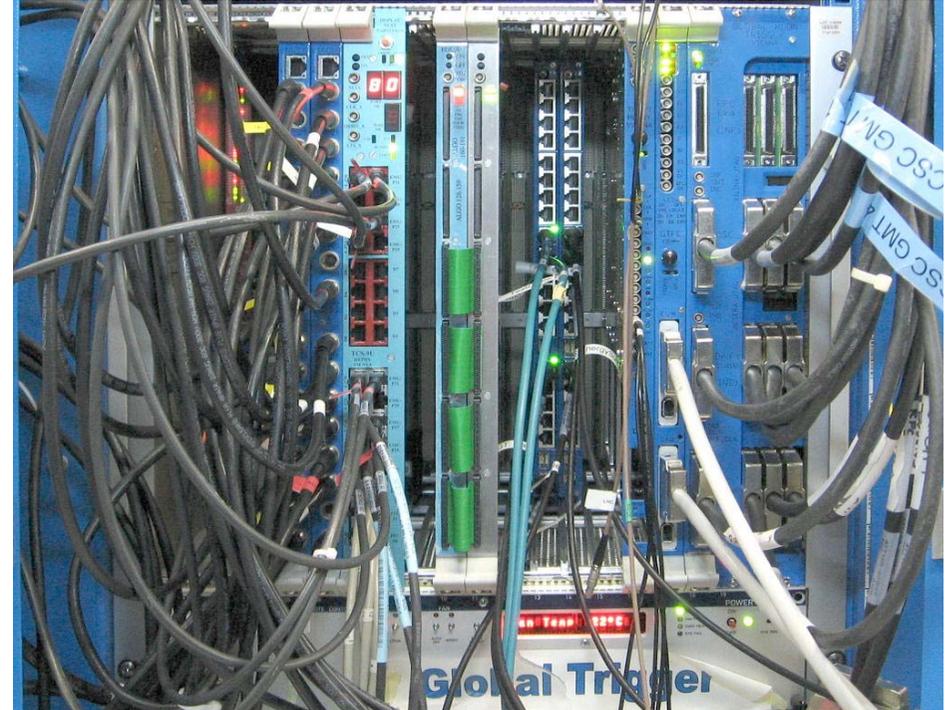
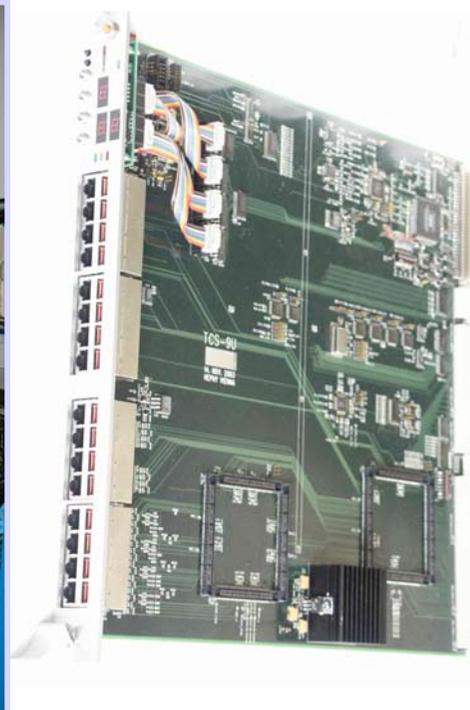


Österreichische Beiträge zum Trigger





Globaler Trigger



Entscheidung (Level-1 Accept):

Analysiert jedes Ereignis, alle 25 ns, und entscheidet, ob es verworfen wird oder zum HLT geschickt wird. Das L1A-Signal wird zu den Subsystemen geschickt.

Triggermenü:

Je 128 Physikalgorithmen und 64 technische Trigger möglich.

Triggersteuerung (Trigger Control System):

Je nach Zustand der Subsysteme oder der Datenakquisition werden Trigger inhibiert bzw. es werden Triggerregeln angewandt.

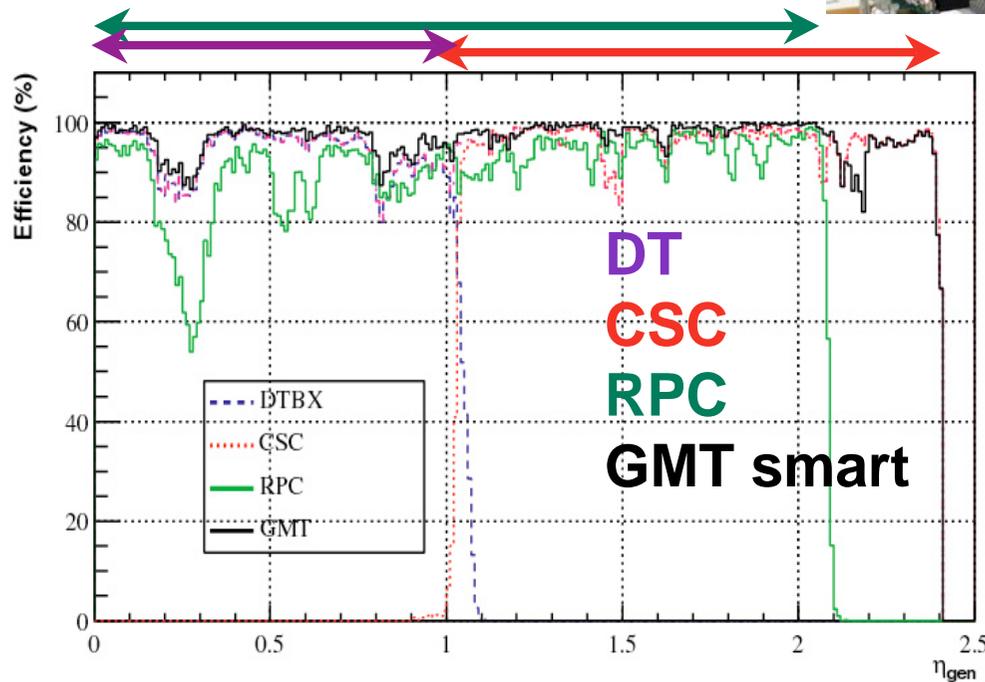
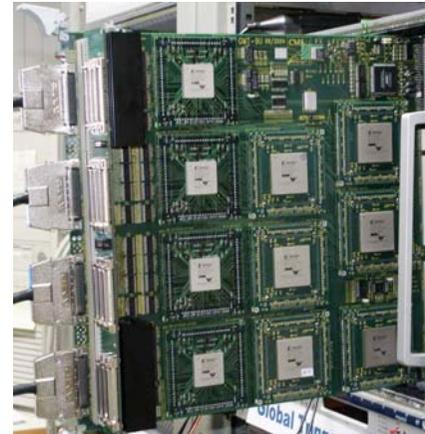


Globaler Myontrigger

DR/CSC/RPC: kombiniert im Globalen Myontrigger

Algorithmen optimiert (kein einfaches AND/OR, sondern auch Geometrie und Qualität der Spuren berücksichtigt) zum Erreichen von :

- hoher Effizienz
- vernünftige Triggerraten
- Unterdrückung von "Geistern"



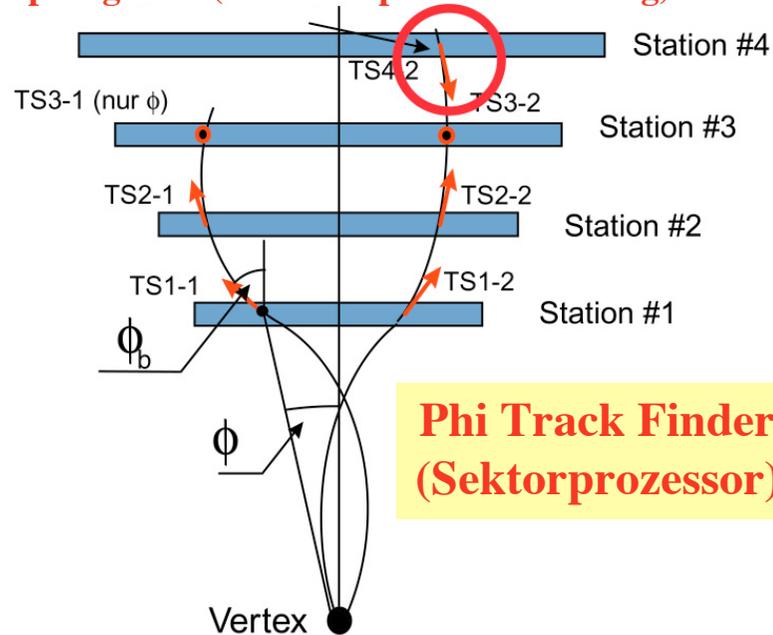
GMT Option	ϵ % $ \eta < 2.1$	Rate kHz für 14 GeV
OR	98.1	5.4
SMART	97.3	2.9
AND	87.4	2.0

Raten für $L=2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Optimalkombination
 hohe Effizienz, kleine Rate

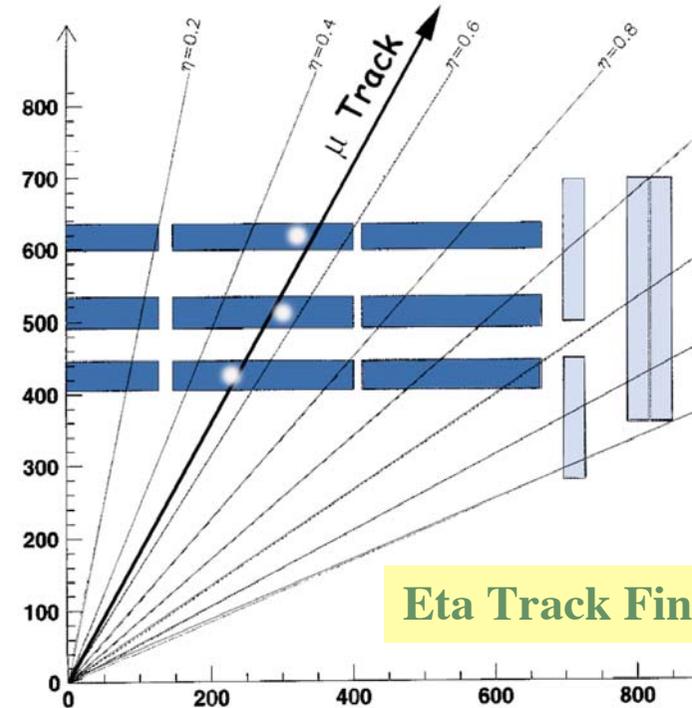


Regionaler Myontrigger (DT Track Finder)

Spuresegment (mit Extrapolationsrichtung)



Phi Track Finder
(Sektorprozessor)



Eta Track Finder

Der Trigger basiert auf Korrelation von kompatiblen Spuresegmenten, die zum Vertex zeigen. Er funktioniert nach einem Extrpolationsalgorithmus.. Maximal 4 Detektorebenen werden für die **azimuthale Projektion** (transversal zur Magnetfeldrichtung) und drei fü die **longitudinale** (entlang der Strahlachse). Wenn möglich, werden Spurkandidaten aus beiden Projektionen zu einer Spur zusammengeführt. Ortskoordinaten und Impulse werden ebenfalls bestimmt.

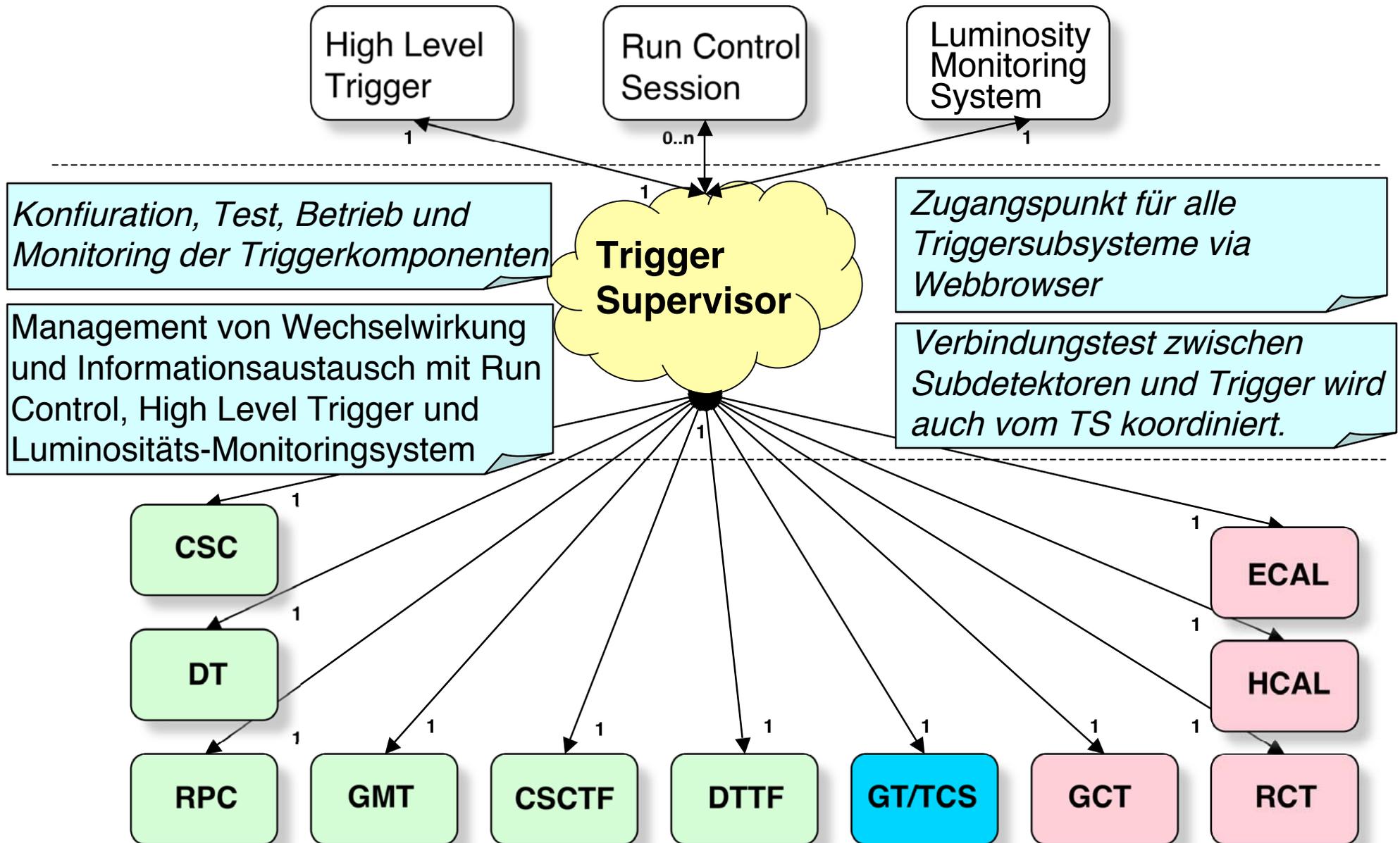


DTTF in der CMS-Elektronikkaverne





Trigger Supervisor





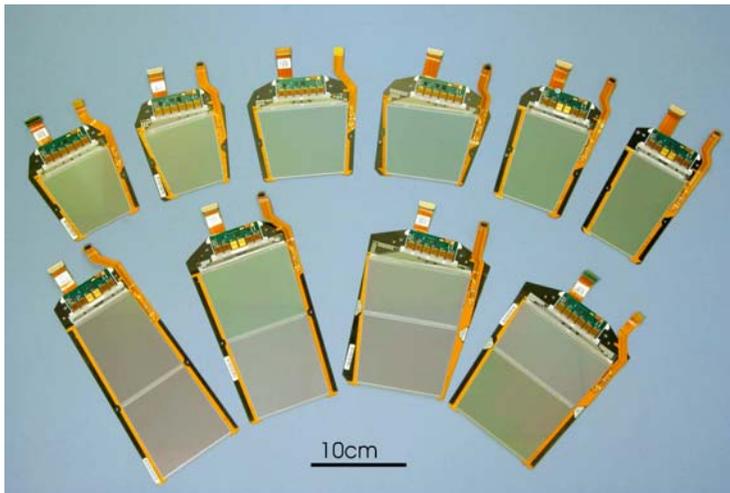
Österreichische Beiträge zum Si-Streifen-Tracker

Trackerkonstruktion:

Koordinations- und Testzentrum für Qualitätskontrolle der Si-Sensoren
Koordination der Modulproduktion für die Tracker Endcaps (TEC)
Produktion und Test von zwei TEC-Ring-Modulen (Bonding, Montage)

Trackerelektronik:

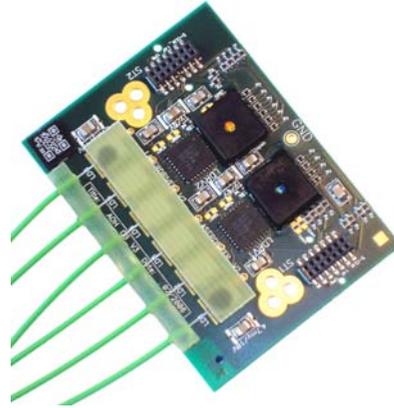
Design und Qualitätskontrolle von 14000 Analog-Optohybriden, produziert bei Kapsch.
Tests von Readoutchips in Teststrahlen am PSI und bei DESY.



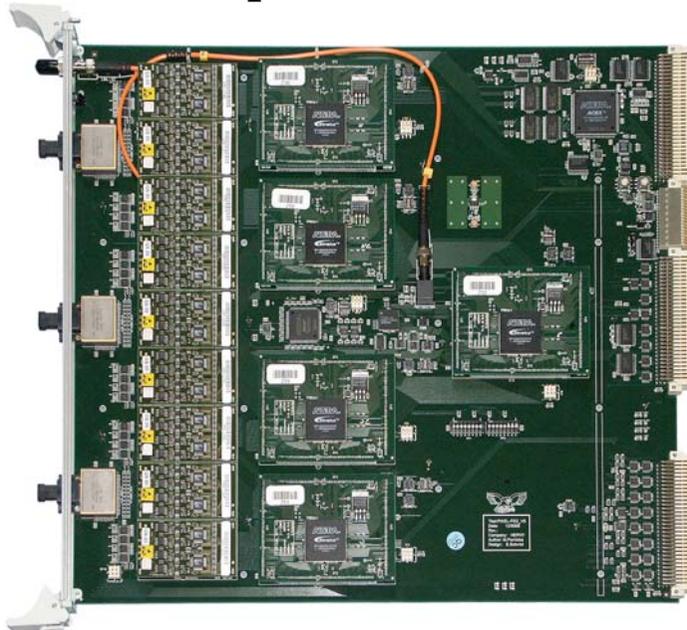


Österreichische Beiträge zum Pixeldetektor

Pixeloptohybride:
Technische Verantwortung



Pixelelektronik:
Design und Produktion von Frontend Drivers -
1.6 Millionen Pixels pro Modul

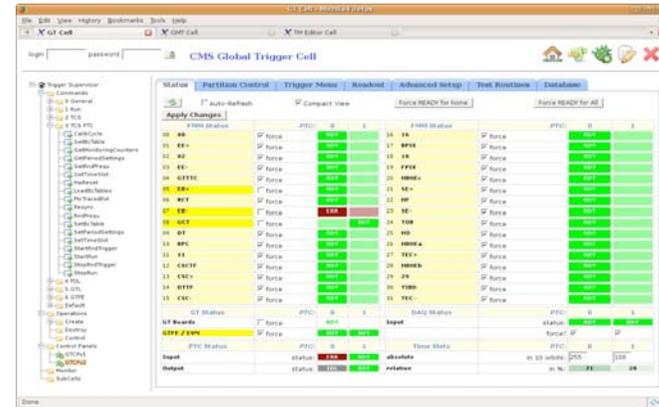




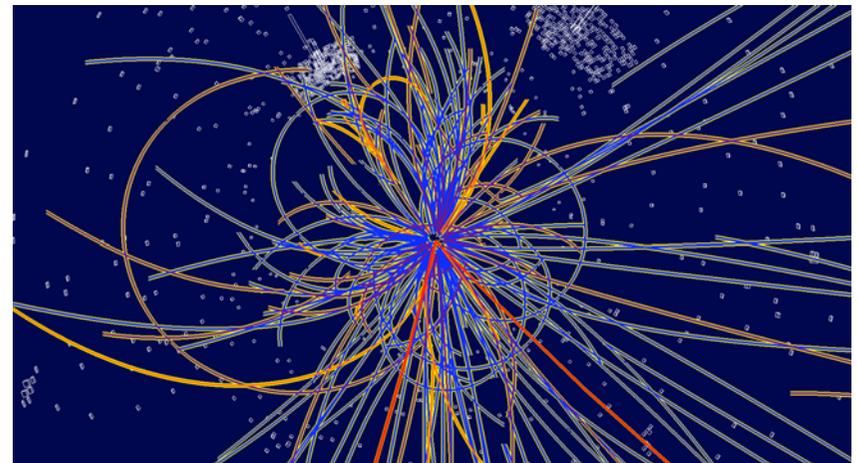
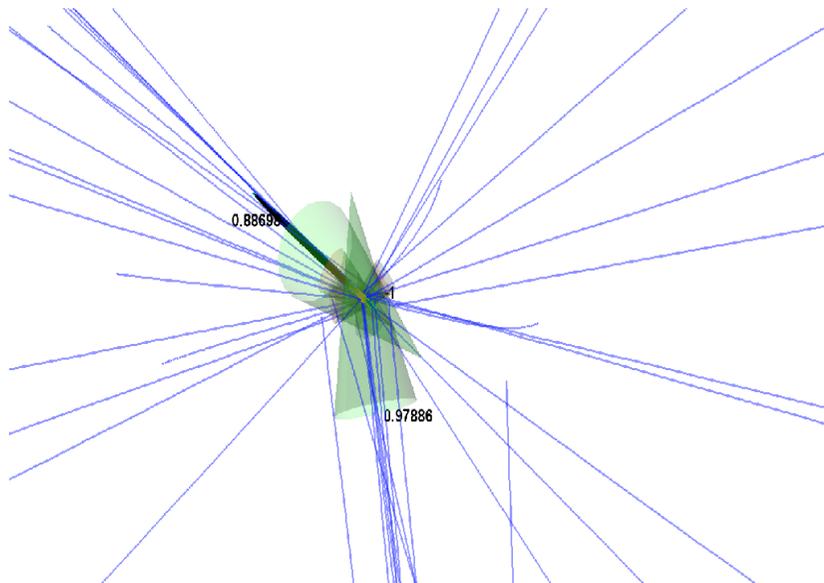
Weitere österreichische Beiträge

Triggersoftware:
Level-1 Trigger Offline- und Online Software
Monitoring-Software

Trackersoftware:
Spur- und Vertexrekonstruktionsalgorithmen
B-tagging-Algorithmus
Alignment



Vorbereitung für Physikanalyse:
Top-Studien
Supersymmetrie
-> **Resultate hoffentlich bald!**



Higgs?

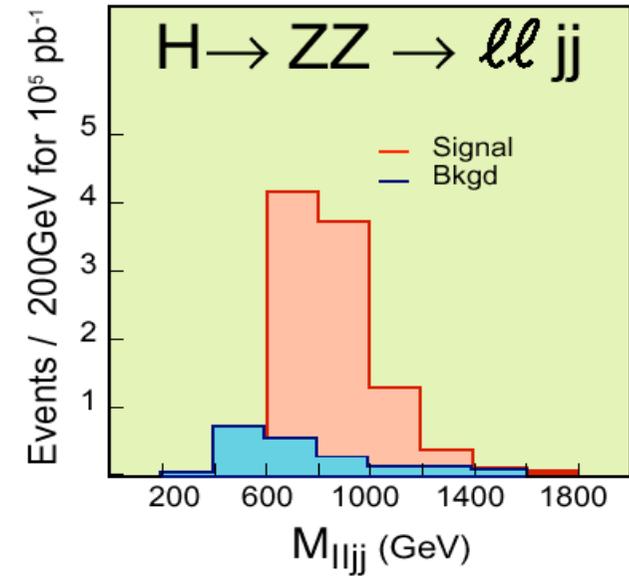
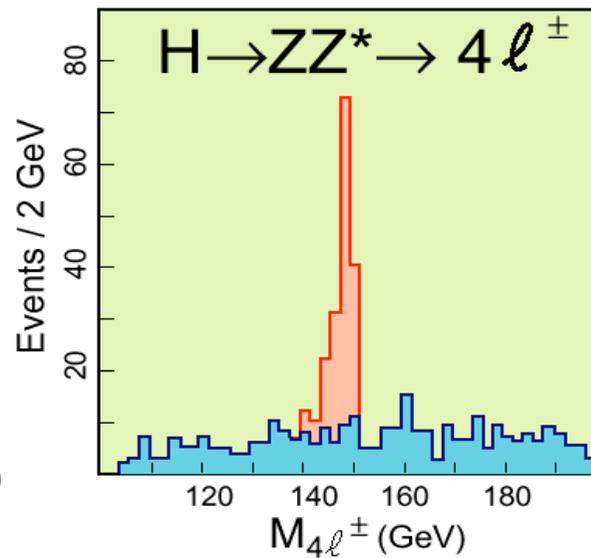
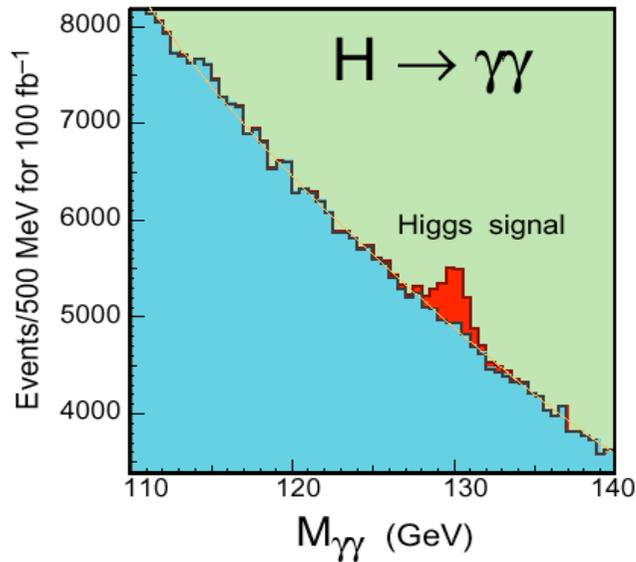
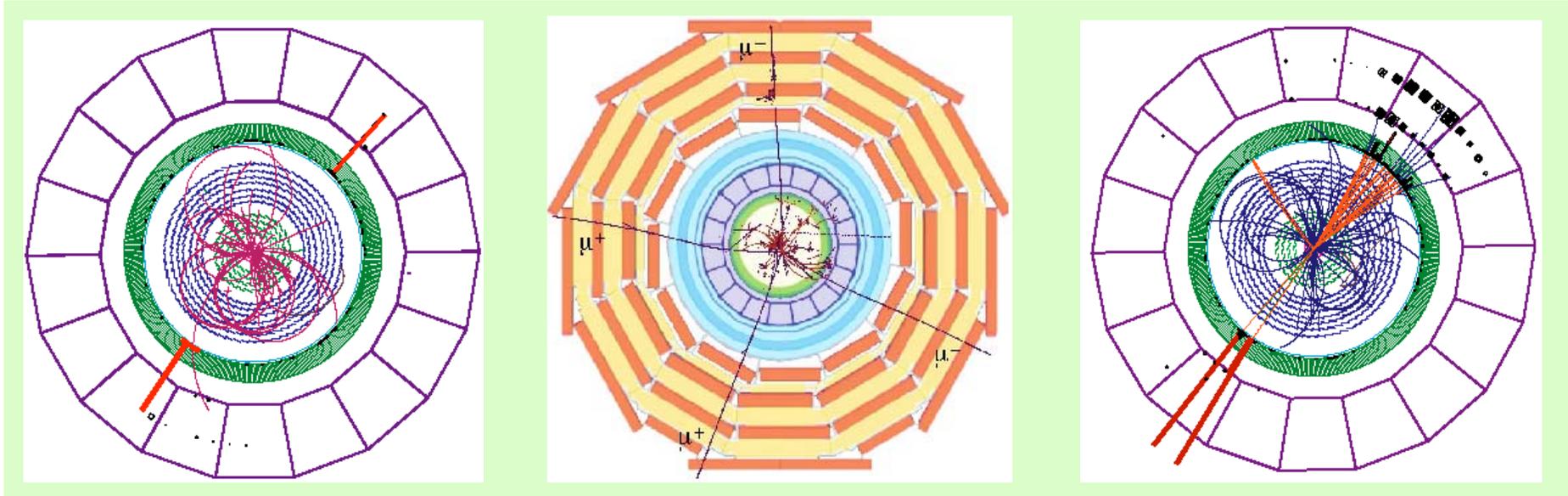
Was kommt nach dem Standardmodell?

Theory of Everything?





Higgs bei CMS





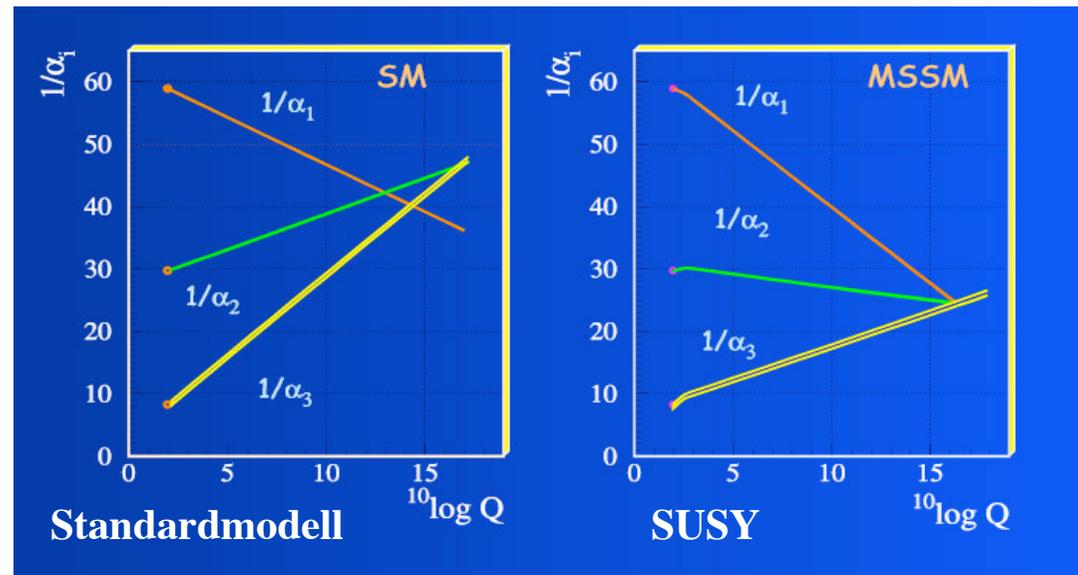
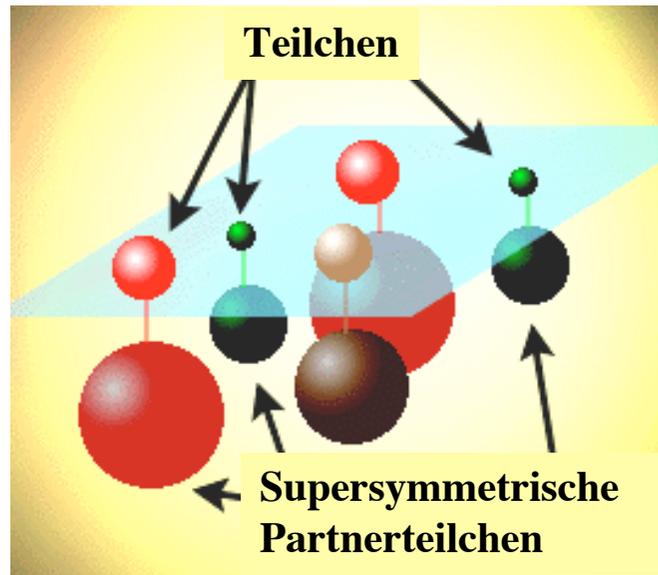
Higgs in CMS





Supersymmetrie

Zu jedem Standardmodell-Teilchen gibt es supersymmetrische Partner.



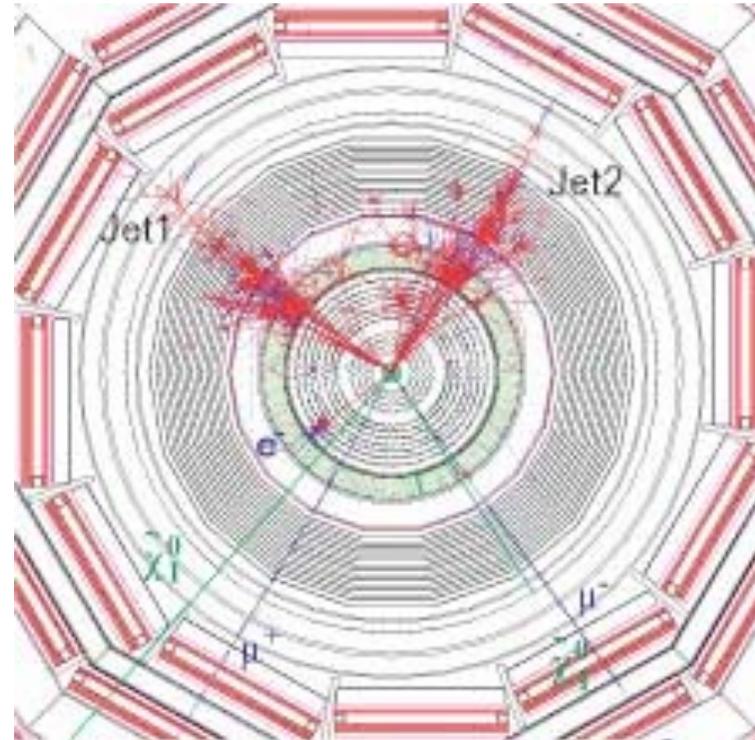
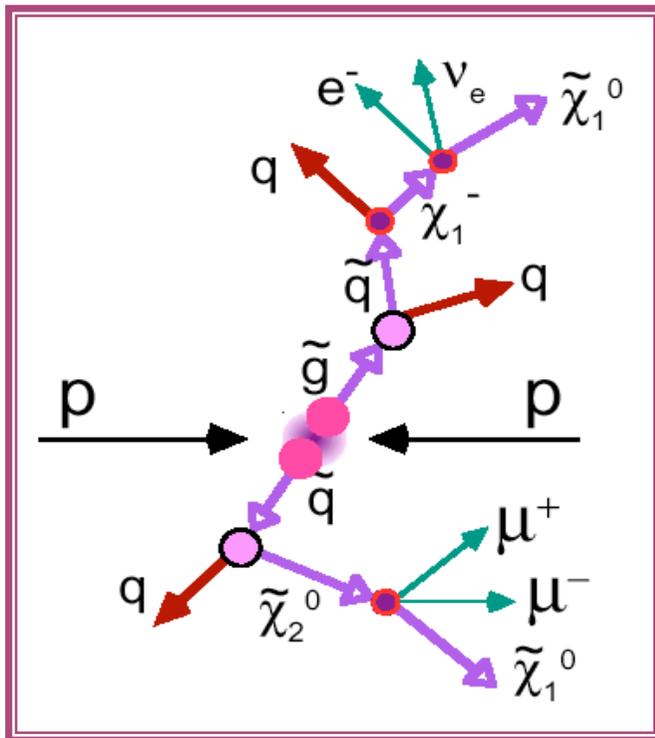
SUSY hat zwei bestechende Eigenschaften:

- Drei Wechselwirkungen können bei hohen Energien **vereint** werden, d.h. die Stärken (α) werden gleich.
- Es gibt einen natürlichen Kandidaten für **dunkle Materie**, das **leichteste Neutralino** (χ_1^0).



Supersymmetrisches Ereignis am LHC

Supersymmetrische Teilchen können komplexe Signaturen durch Kaskadenzerfälle aufweisen, die zu Endzuständen mit Leptonen, Jets und fehlender Energie (zum Beispiel durch Neutralinos) führen.

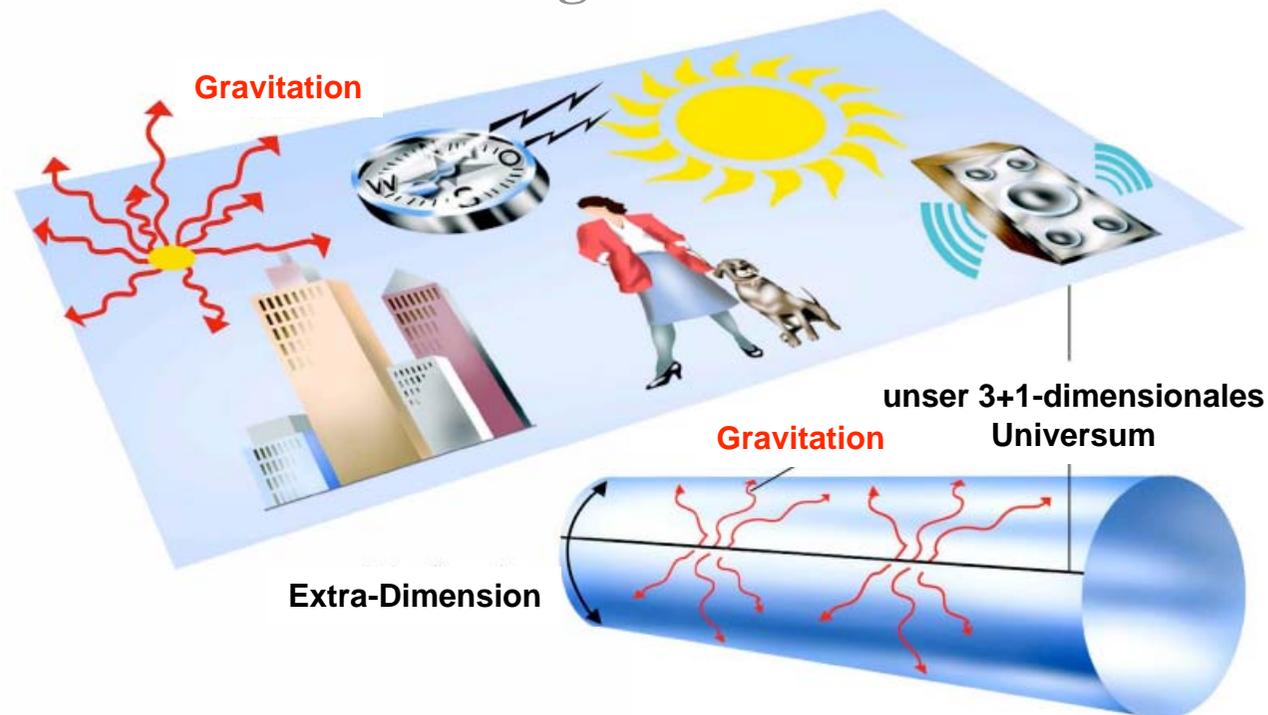


Gravitation und Extra-Dimensionen

Gravitation scheint 10^{-38} mal so schwach im Vergleich zur starken Wechselwirkung -> schwer vereinbar mit anderen Kräften!

Mögliches Modell:

- Bekannte Teilchen leben im 3+1-dimensionalen Universum (Brane)
- **Gravitation lebt in einem höherdimensionalen Universum (Bulk)**
- Extra-Dimensionen sind aufgerollt mit Radius R

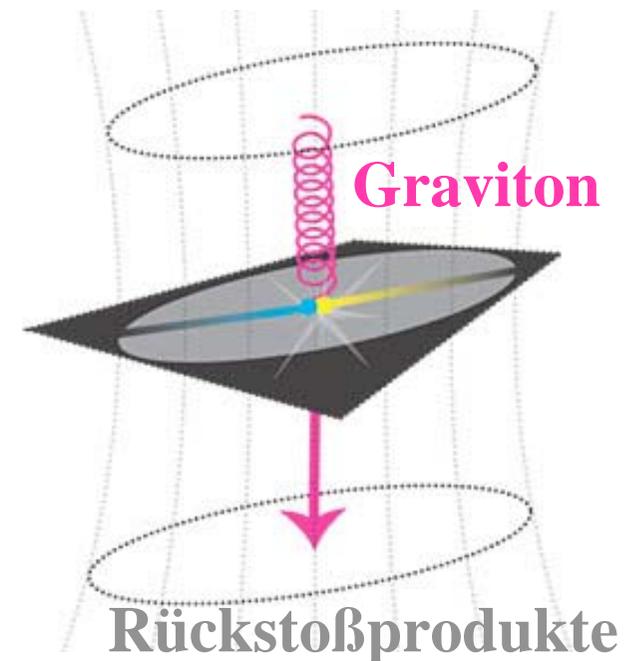


Graviton-Suche am LHC

Gravitonen, die vermutlich die Gravitation zwischen Teilchen mit Masse vermitteln, können sich ungehindert auch in den Extra-Dimensionen ausbreiten.

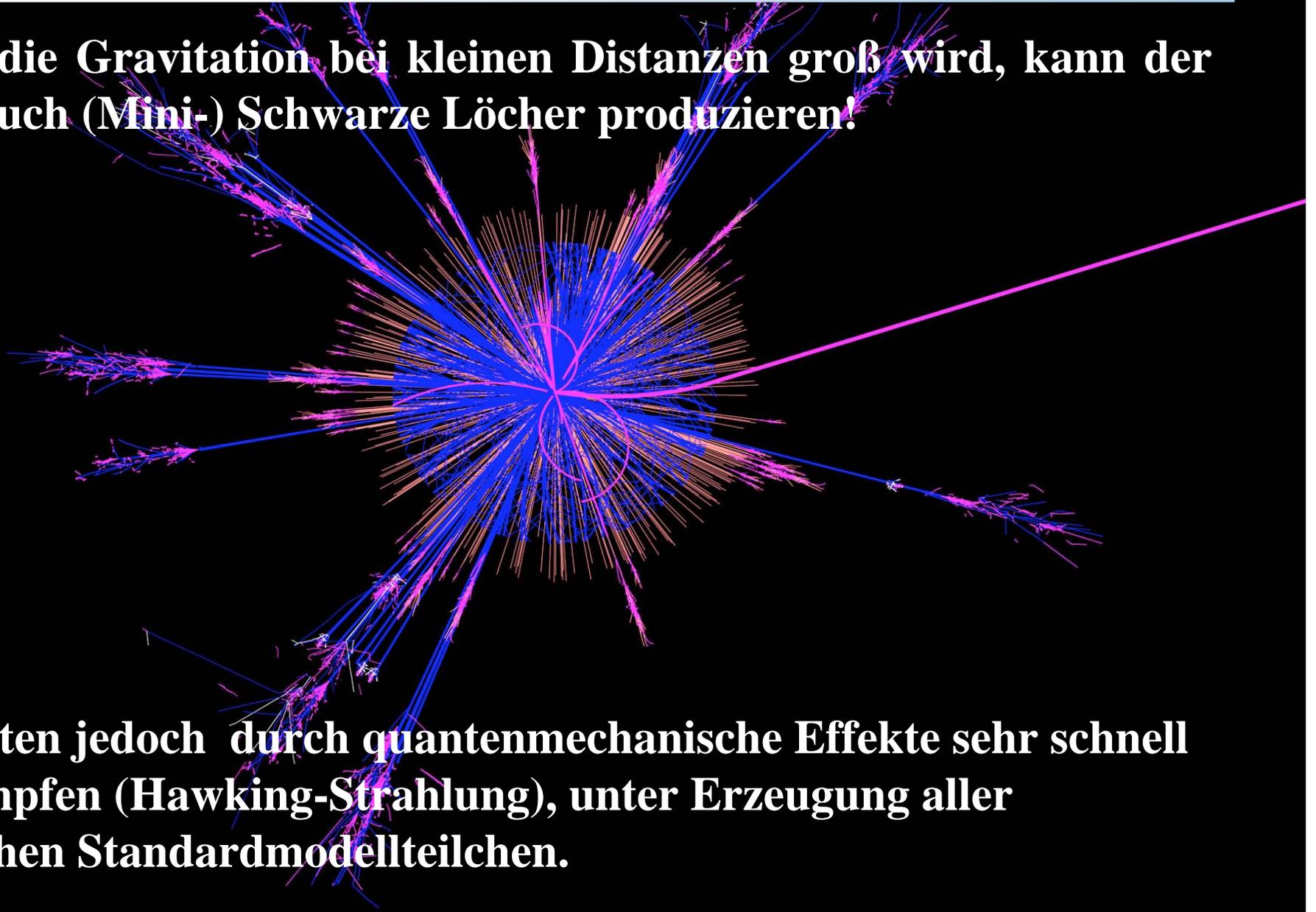
Mit der Energie des LHC sollte es möglich sein, WW von Teilchen in unserer Brane bei Abständen von ca. 10^{-15} m (Protondurchmesser) zu untersuchen. Diese Distanzen liegen vielleicht in der gleichen Größenordnung wie die Radien der aufgerollten Dimensionen.

Signal in den Detektoren: **fehlende Energie!**
Diese kann aber auch von Neutrinos oder Neutralinos stammen, deshalb sind Modellberechnungen nötig.



Schwarze Löcher

Wenn die Gravitation bei kleinen Distanzen groß wird, kann der LHC auch (Mini-) Schwarze Löcher produzieren!



Sie sollten jedoch durch quantenmechanische Effekte sehr schnell verdampfen (Hawking-Strahlung), unter Erzeugung aller möglichen Standardmodellteilchen.

S. Hawking in CMS



Danke

