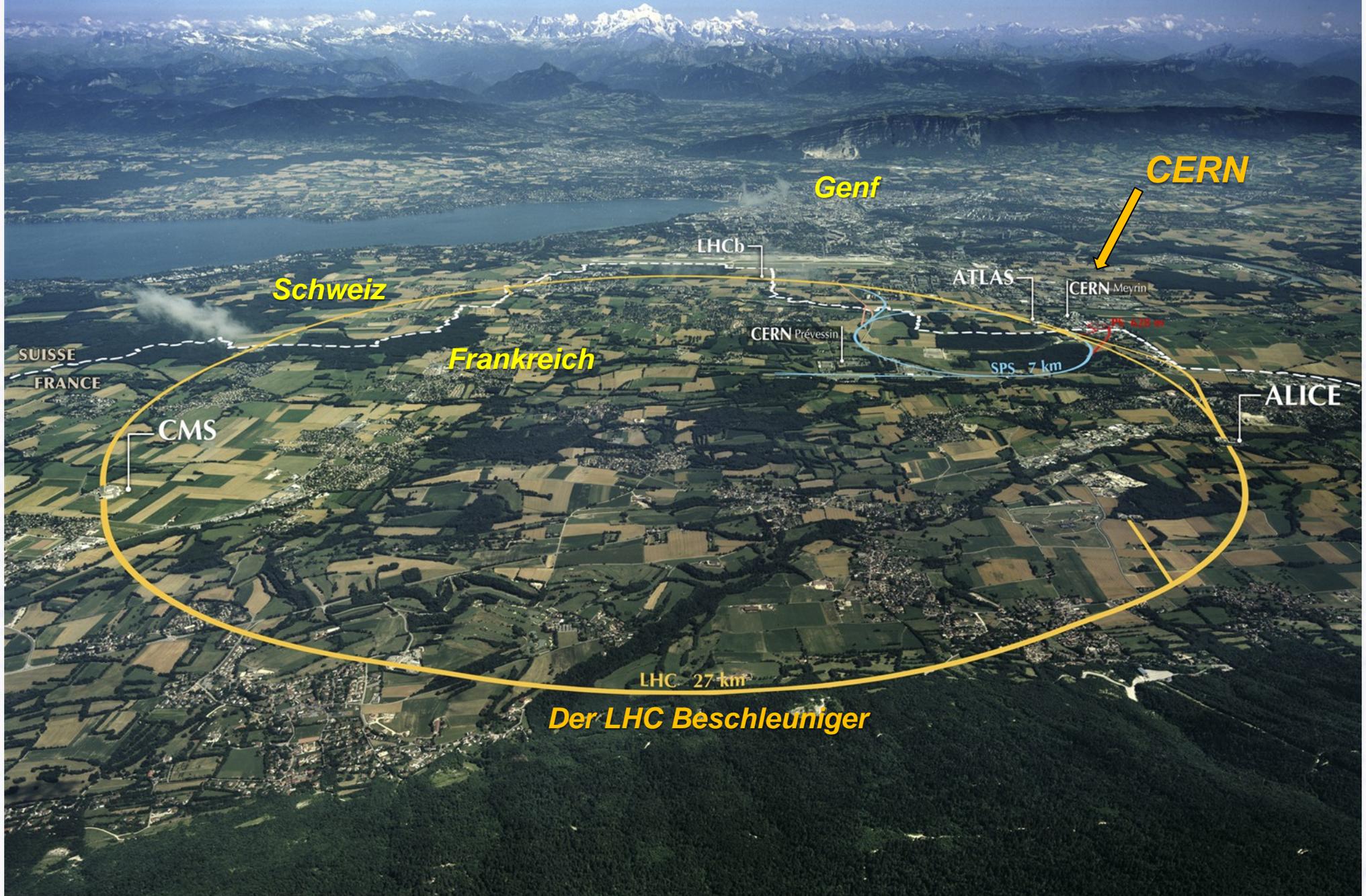


# Beschleuniger + Detektoren



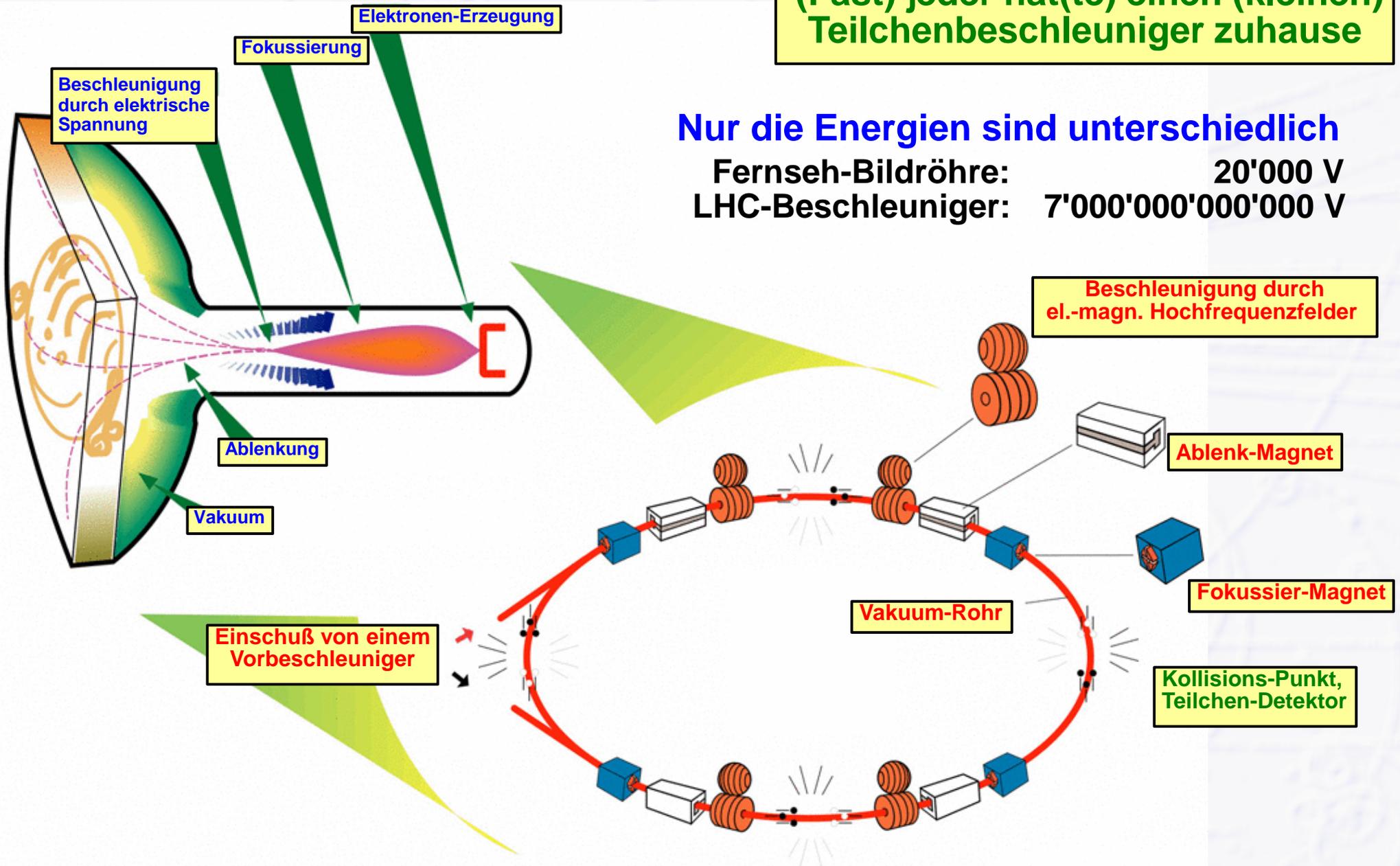
# Wie funktioniert ein Beschleuniger?

(Fast) jeder hat(te) einen (kleinen) Teilchenbeschleuniger zuhause

Nur die Energien sind unterschiedlich

Fernseh-Bildröhre: 20'000 V

LHC-Beschleuniger: 7'000'000'000'000 V

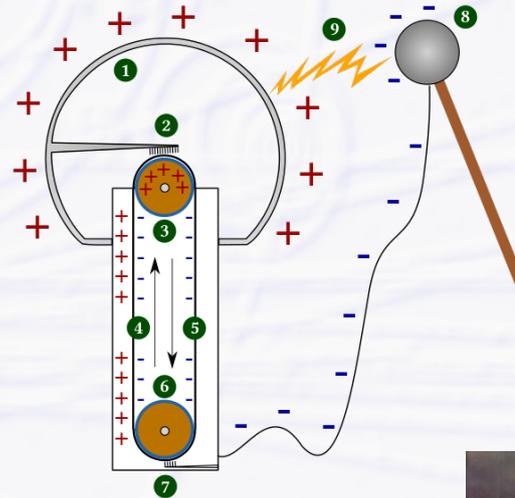


# Erzeugung hoher elektrischer Felder I

## Statische E-Felder (mit immer höherer Spannung...)

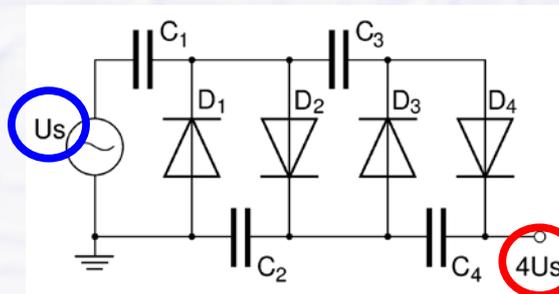
### → Van de Graaff Bandgenerator (Robert J. Van de Graaff, 1929)

- höchste jemals erreichte Spannung:  
25.5 MV (Oak Ridge)



### → Cockcroft-Walton Generator (John D. Cockcroft und Ernest T. S. Walton, 1932), Nobelpreis 1951

- **Spannungsvervielfacher**
  - wandelt niedrige Wechselspannung in hohe Gleichspannung durch Netzwerk aus Dioden und Kondensatoren



**CERN LINAC2  
Vorbeschleuniger,  
750 kV, 1976**

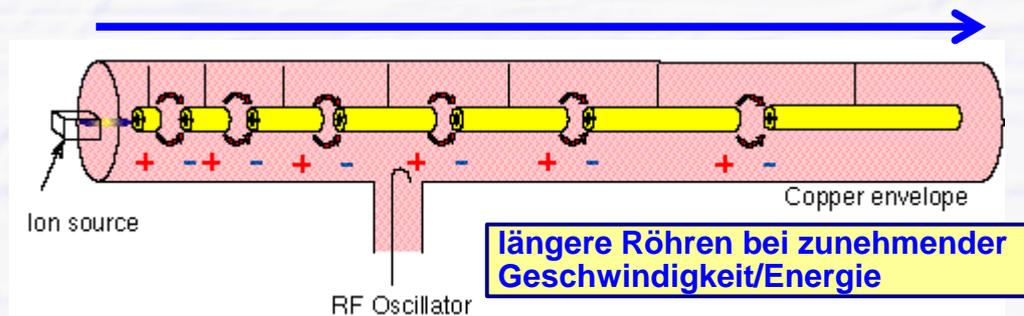
# Erzeugung hoher elektrischer Felder II

→ statische Felder sind beschränkt auf wenige 10 MV → zu wenig

● **Besser: zeitlich variable Felder, mehrfach ausnutzbar!**

→ erster Vorschlag von Rolf Wideröe 1929

- Lineare Struktur mit “Driftröhren”  
+ HF Oszillator (erster LINAC)



→ je länger die Gesamtstrecke, je höher die Energie

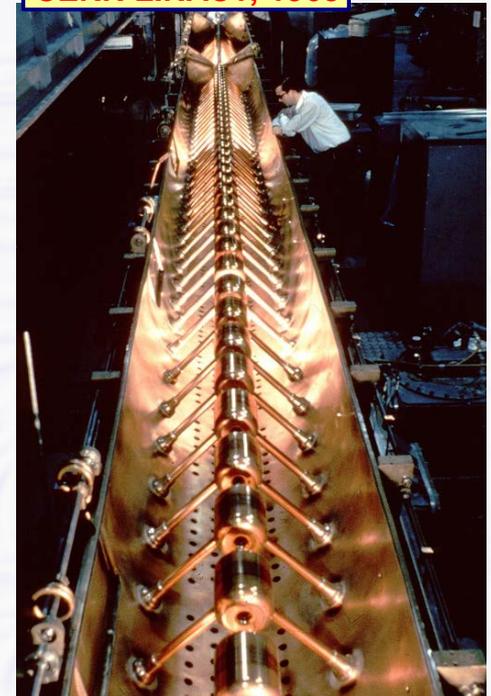


...aber man dachte, daß Linearbeschleuniger unrealistisch lang werden bei höherer Energie...

→ **Lösung:**

- führe die Teilchen im Kreis herum durch Ablenkung mit starken Magnetfeldern

CERN LINAC1, 1968

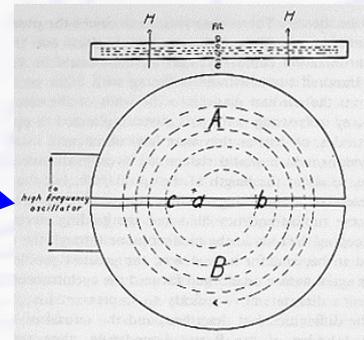
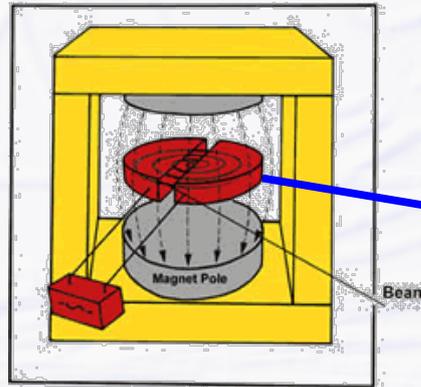


# Das Zyklotron

angeregt durch Wideröe's Veröffentlichung über die Verwendung von zeitlich variablen Feldern

## ● Zyklotron (Ernest O. Lawrence 1931, Nobelpreis 1939)

→ erster Kreisbeschleuniger



Ernest O. Lawrence

- erster Prototyp zur Machbarkeit (Kosten: 25 \$):  
13 cm (4-inch) Durchmesser, 80 keV Energie (HF: 10 W, 2 kV)

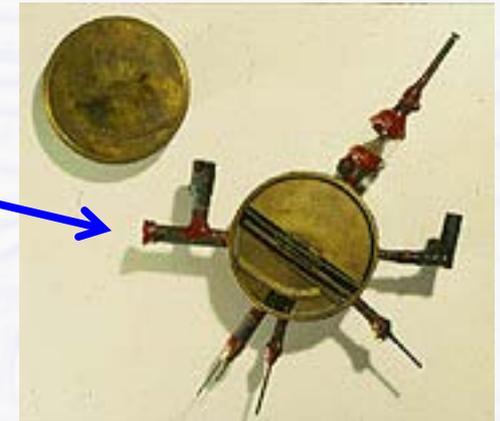
→ größere Maschinen in schneller Folge

- nicht-relativistisch: 11-inch, 27-inch, 60-inch (16 MeV)
- relativistisch: 184-inch Synchro-Cyclotron (CERN, 350 MeV)

← variable HF Frequenz

→ aber: Energie beschränkt durch Magnetgröße

- konstantes Magnetfeld, variabler Radius der Teilchenbahnen



Transport von Teilen des Synchrozyklotrons zum CERN (1956)

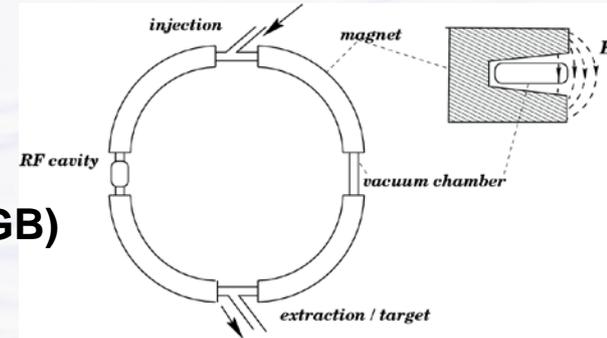
# Das Synchrotron

→ **konstanter Radius**, **Magnetfeld muß mit Energie ansteigen**

- (fast) alle Beschleuniger für hohe Energien  $> 1$  GeV sind Synchrotrons

## ● Erster Vorschlag 1943 von Mark Oliphant und später von Edwin M. McMillan (LBL)

- 1946 erster Test des Konzepts am Malvern Research Lab (GB)
- sehr bald Synchrotrons mit immer höherer Energie



## ● 1953 Cosmotron (3.3 GeV, BNL)

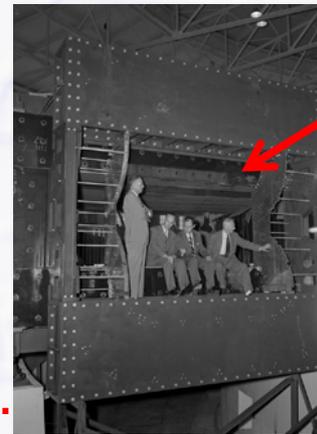
## ● 1954 Bevatron (6.3 GeV, LBL)

- "Beva" für Billion eV (Milliarde eV)
- Antiproton Entdeckung 1955

→ riesige Magnete

- Gewicht  $\sim 10'000$  t, **grosse Magnetöffnung...**

## ● (Kreis-)Beschleuniger erfordern Fokussierungsmechanismus!



**Lawrence et al. in der Magnetöffnung sitzend**



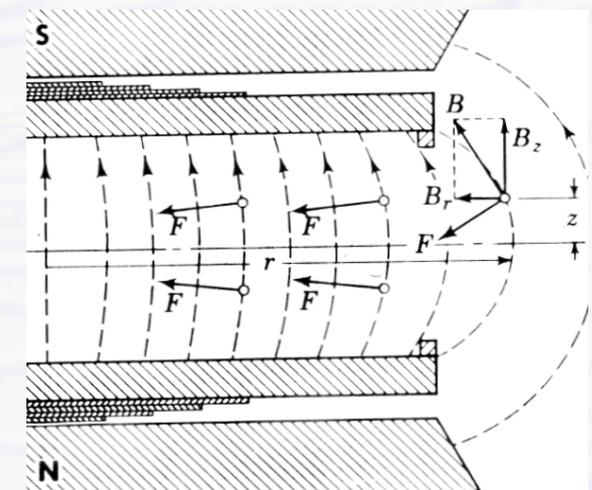
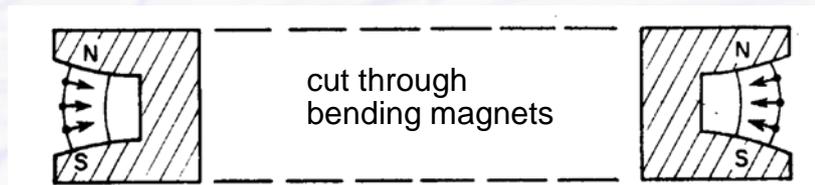
**Das Bevatron**

# Schwache Fokussierung

➔ Magnetische Fokussierung treibt Teilchen zurück, die vom zentralen Orbit abweichen

● Nur “Schwache” Fokussierung in frühen 1950ern (Cosmotron, Bevatron)

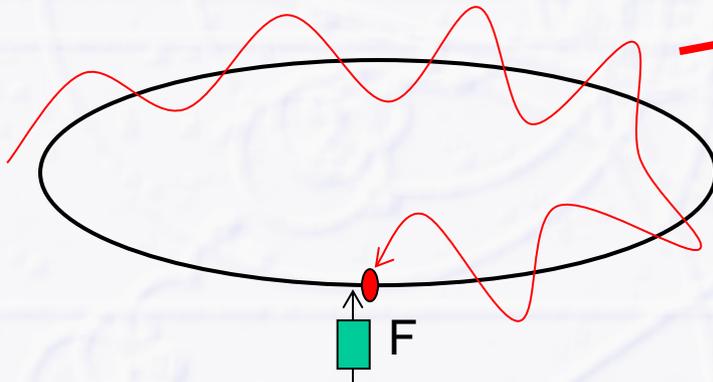
➔ Ablenkmagnetfelder sind NICHT homogen



➔ Vertikale, rücktreibende Kraft bei Abweichung vom zentralen Orbit

➔ Oszillationen um den zentralen Orbit

**“Betatron” Oszillationen**



➔ Amplitude  $\beta$  abhängig von Fokussierungsstärke

- schwache Fokussierung = große Amplitude
- große Vakuumkammern und riesige Magnete

# Starke Fokussierung

## ● Maximale Energie bei schwacher Fokussierung ist beschränkt

→ “10x Bevatron” Beschleuniger würde ~ 200'000 t Eisen erfordern

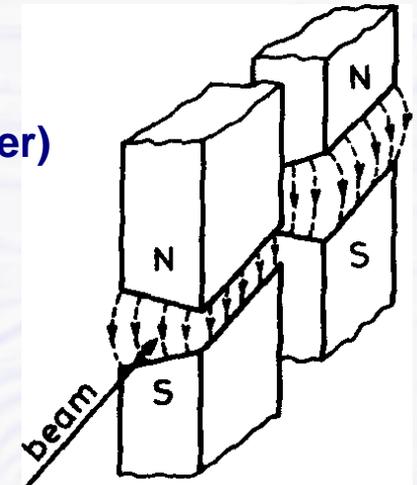
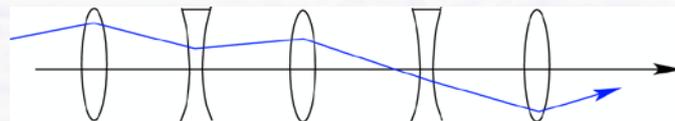
- Fokussierung kann nicht stärker werden
- größerer Feldgradient = stärkere (vertikale) Fokussierung, aber:  
zu inhomogenes Feld in horizontaler Ebene (keine horizontale Fokussierung mehr)

## ● 1952 neue Art von starker Fokussierung

(Ernest D. Courant, Milton Stanley Livingston und Hartland S. Snyder)

→ Alternating Gradient (AG) Synchrotron

- = wechselnde Abfolge von **fokussierenden** und **defokussierenden Magneten** in vertikaler/horizontaler Ebene
- **im Mittel(!) fokussierende Kraft stärker** als **defokussierende**



“Combined function” Magnete  
= ablenkend + (de)fokussierend

## ● 1954 erstes AG Synchrotron (Cornell, 1.5 GeV, e<sup>-</sup>)

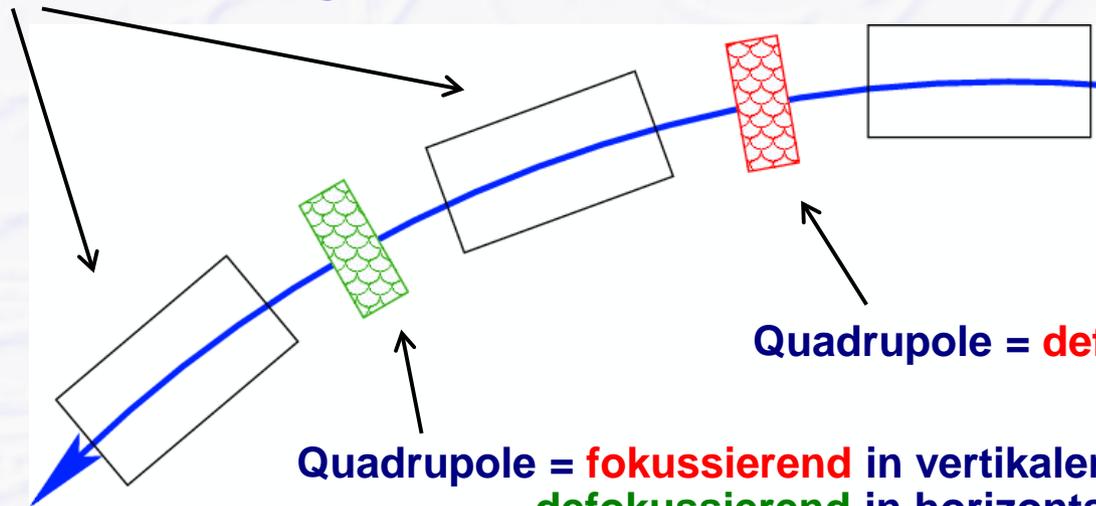
1958 erstes deutsches 500 MeV e<sup>-</sup> AG synchrotron in Bonn (Wolfgang Paul)

## ● 1959 CERN PS, 28 GeV Protonen (noch immer benutzt...)

# Typischer Hochenergie Beschleuniger

## ● Getrennte ablenkende + (de)fokussierende Magnete

Dipole = Ablenkung in horizontaler Ebene



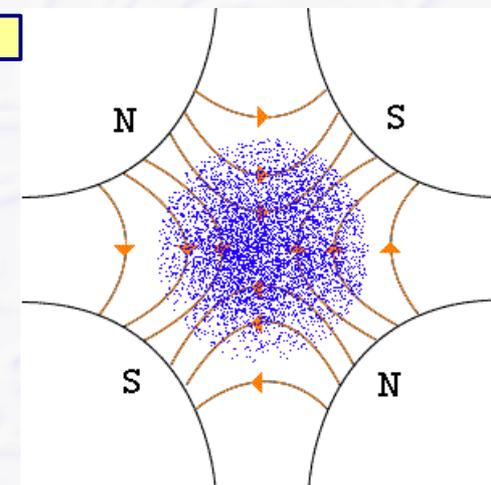
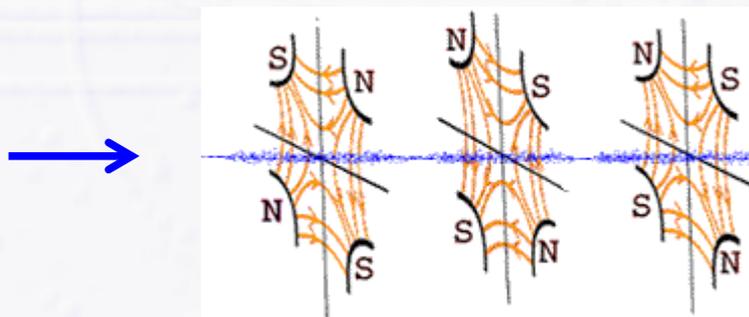
+ einige **Sextupole**:  
Korrektur der **chromatischen**  
Aberation



Quadrupole = **defokussierend** in vertikaler Ebene  
**fokussierend** in horizontaler Ebene

Quadrupole = **fokussierend** in vertikaler Ebene  
**defokussierend** in horizontaler Ebene

**Kräfte in Quadrupolen linear proportional zum Abstand von zentralem Orbit**



# Collider

## Der allererste collider ( $e^+e^-$ )

→ **ADA** (Anello di Accumulazione) in INFN Frascati

- 1961 – 1964, 2 x 250 MeV,  $r = 65$  cm(!)
- ca.  $10^7$  gespeicherte Teilchen

→ viele andere folgten...

- ADONE, SPEAR, DORIS, PEP, PETRA, SLC, LEP

→ **ISR** (Intersecting Storage Rings) 1971 – 1984

## (Anti-)Protonen

→ Proton – Antiproton: SpS, Tevatron

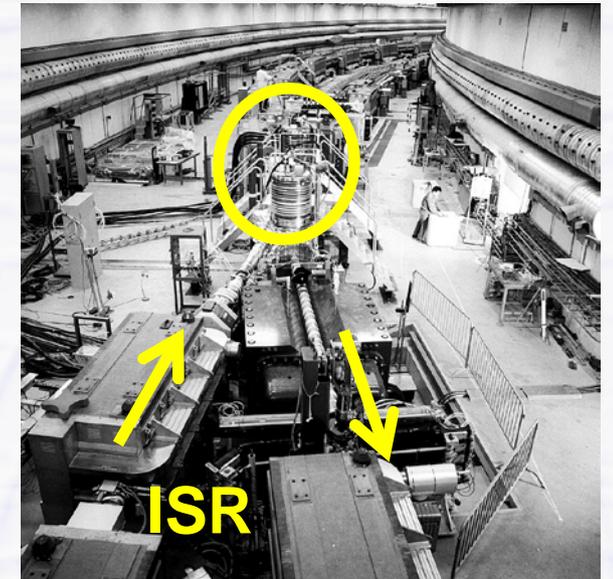
→ Proton – Proton: LHC

## weltweit ca. 17'000 Beschleuniger

→ mehr als die Hälfte für medizinische Zwecke (Diagnostik, Therapie)

→ 42 für Synchrotronstrahlung, angewandte Forschung (weitere ~30 im Bau)

→ ~130 für **Grundlagenforschung** (CERN, DESY,...)



# Luminosität

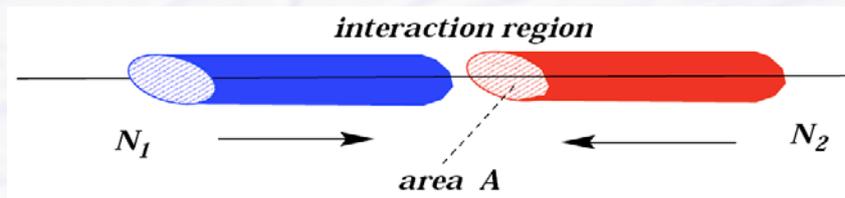
- Bei "fixed target" Experimenten  
gewöhnlich ausreichende Teilchenrate



→ Kollisionsrate R beim collider?



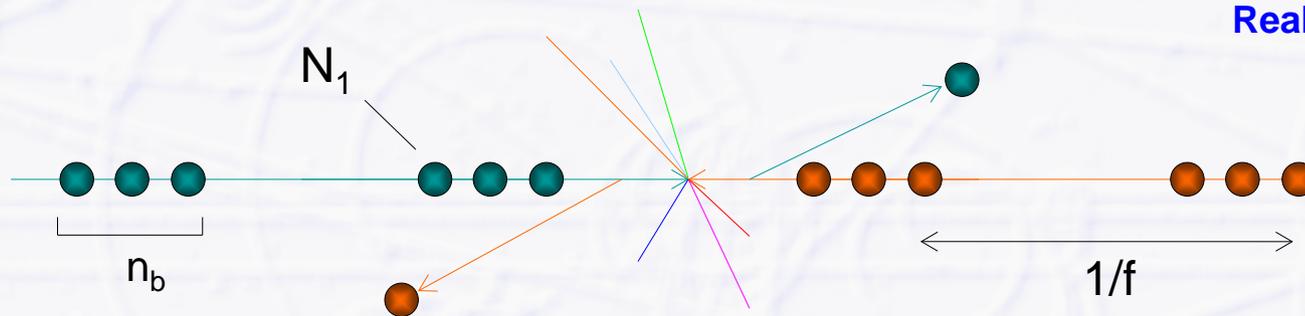
Kollision von 2 Teilchenbündeln (bunches)



$$R = \sigma_{interaction} \cdot L$$

**L = Luminosität**

“Wirkungsquerschnitt” der Reaktion



Kollision von  $n_b$  Bündeln,  
jeweils  $N_1$  und  $N_2$  Teilchen,  
Strahldurchmesser  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$   
und Kollisionsfrequenz  $f$

$$L = f \cdot n_b \cdot \frac{N_1 N_2}{4\pi \sigma_1 \sigma_2}$$

Trefferfläche unter Annahme  
gaussischer Strahlprofile

# Der LHC: ~30 Jahre... und länger...

**1984:** Erste Ideen zum LHC (2 x 5.9 TeV) und SSC (2 x 20 TeV), LEP Tunnelbau beginnt

Idee 1984: LHC über existierenden LEP Beschleuniger

1984

**1988:** SSC genehmigt (Waxahachie, Texas)

**1989:** Erste Kollisionen bei LEP und SLC, F&E für LHC Detektoren beginnt

**1993:** SSC Bau gestoppt!!!

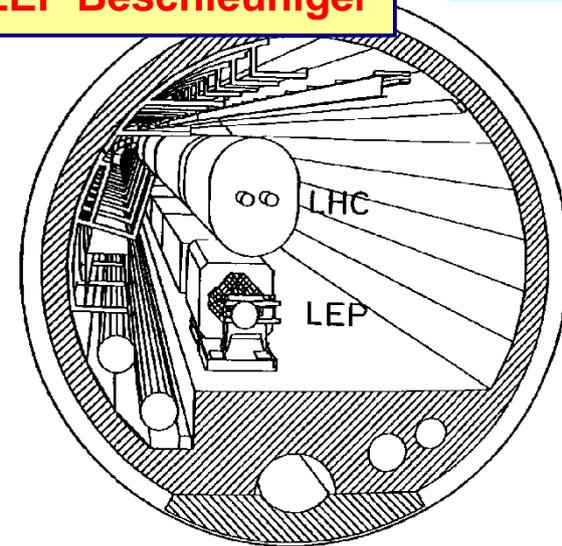
**1994:** LHC genehmigt (geplanter Start 2005)

**1995:** Entdeckung des top Quark am Fermilab durch CDF (und D0), ATLAS und CMS genehmigt

**1998:** Beginn des LHC Baus

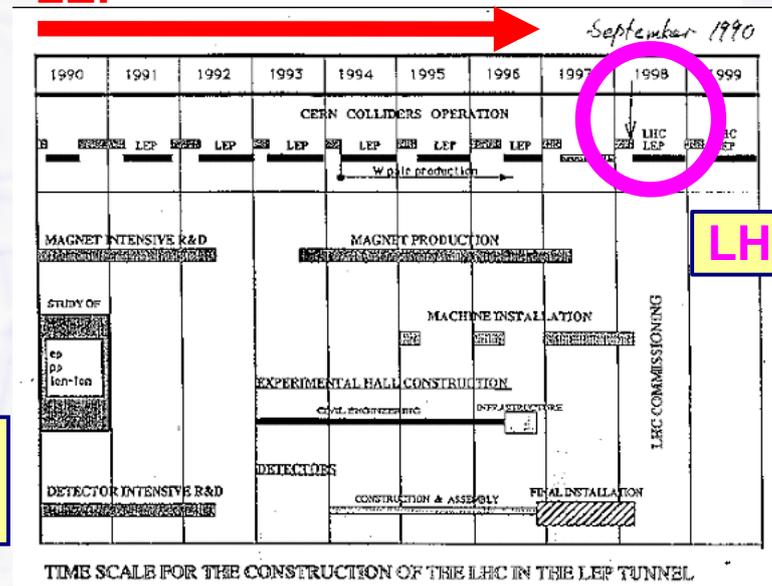
**2000:** Ende von LEP, kein Higgs gefunden...

**2008:** LHC Start



LARGE HADRON COLLIDER IN THE LEP TUNNEL

LEP



Plan 1990:  
LHC Start 1998...

# LHC Parameter

- Energie = 7 x Tevatron, Luminosität = ~ 50 - 100 x Tevatron

	LHC (2008)	Tevatron (1987)	SppS (1981)
max. Energie (TeV)	7	1	0.450
Umfang (km)	26.7	6.3	6.9
Luminosität ( $10^{30}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-2}$ )	10000	210	6
Zeit zwischen Kollisionen ( $\mu\text{s}$ )	0.025	0.396	3.8
Kreuzungswinkel ( $\mu\text{rad}$ )	300	0	0
p/Strahlbündel ( $10^{10}$ )	11	27/7.5	15/8
Anzahl Strahlbündel	2808	36	6
Strahldurchmesser ( $\mu\text{m}$ )	16	34/29	36/27
Füllzeit (min)	7.5	30	0.5
Beschleunigung (s)	1200	86	10

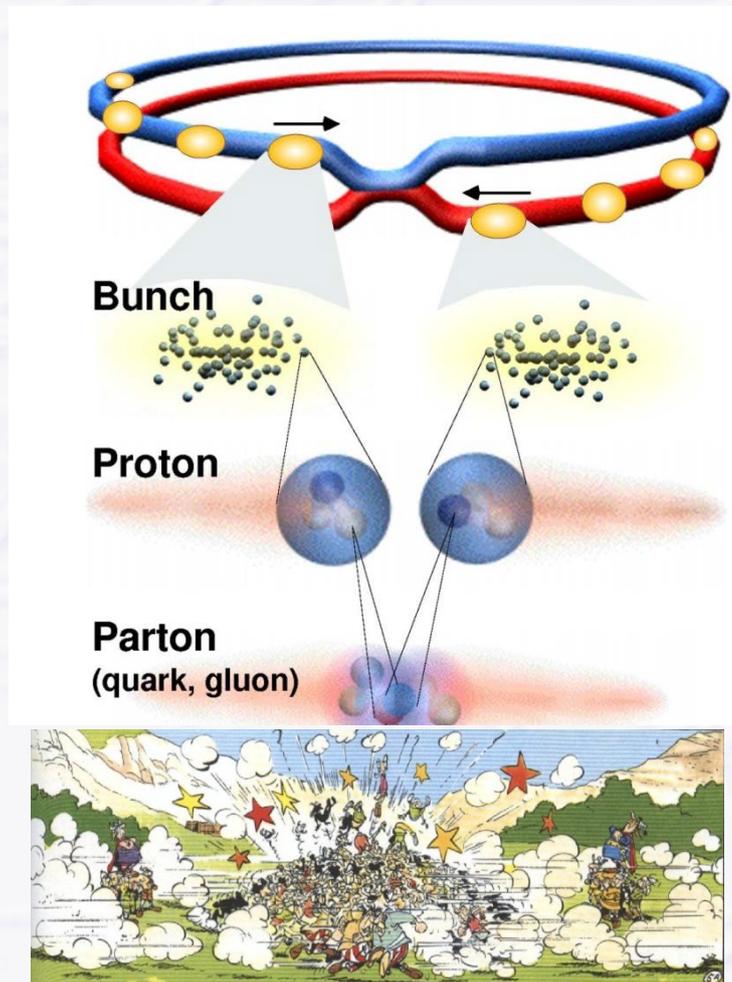
# LHC in Zahlen

- **1232 Dipole, 8.33 Tesla @ 7 TeV bei 11850 A**
  - + 392 Quadrupole
  - + 3700 Multipol-Korrektur-Magnete + 2500 andere Korrektur-Magnete
  - 1200 Tonnen NbTi supraleitendes Kabel mit 7600 km Länge
  - gespeicherte Energie im Magnetfeld 10 GJ (  $\frac{1}{2} LI^2$  )
- **gesamte Kaltmasse: 30'000 Tonnen**
  - 120 Tonnen suprafluides Helium (1.9 K) zur Kühlung
  - Energie für Quench: 0.5 - 20 mJ/cm<sup>3</sup> = 10<sup>7</sup> Protonen bei 7 TeV
- **Anzahl der Stromverbindungen zwischen Magneten**
  - 10'000 supraleitende Verbindungen zwischen Dipolen
  - 50'000 Verbindungen für Korrektur-Magnete
- **Vakuum: 10<sup>-10</sup> mbar = 3 Millionen Moleküle pro cm<sup>3</sup>**

# Proton – Proton Kollisionen<sup>(\*)</sup> im LHC

- <sup>(\*)</sup>LHC kann auch schwere Bleikerne (Schwerionen) beschleunigen und kollidieren lassen

→ Spezialexperiment für Schwerionenphysik: ALICE



**Proton – Proton**  
(Design Parameter)

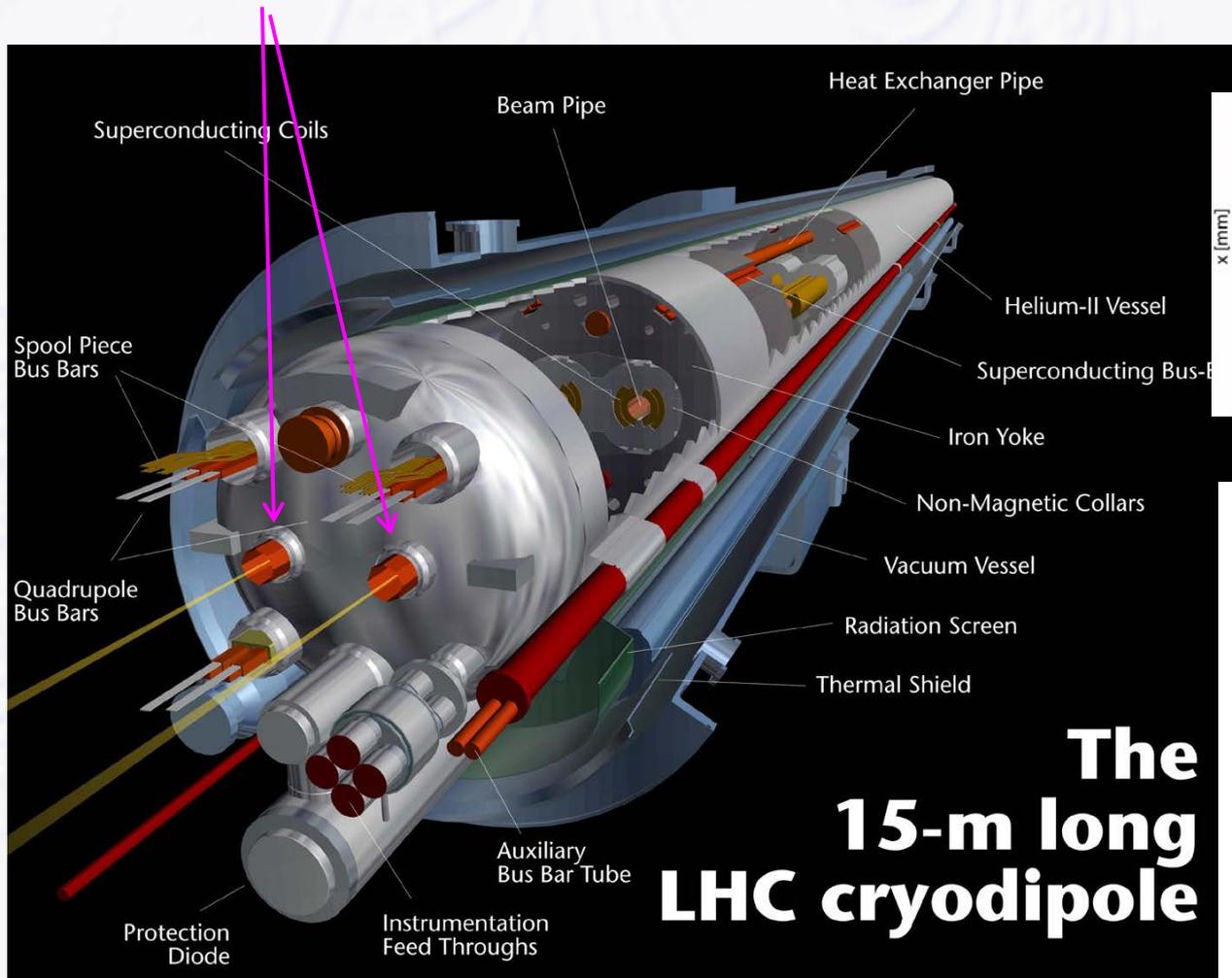
2808 x 2808 Protonenbündel (bunches)  
mit 7.5 m Abstand (25 ns zeitlich)  
 $1.1 \times 10^{11}$  Protonen/Bündel

$\sim 10^9$  pp Kollisionen/s  
= Überlagerung von  $\sim 20 \dots 30$  pp-Kollisionen  
pro Strahlkreuzung: **pile-up**

$\sim 1600$  geladene Teilchen im Detektor  
pro Strahlkreuzung

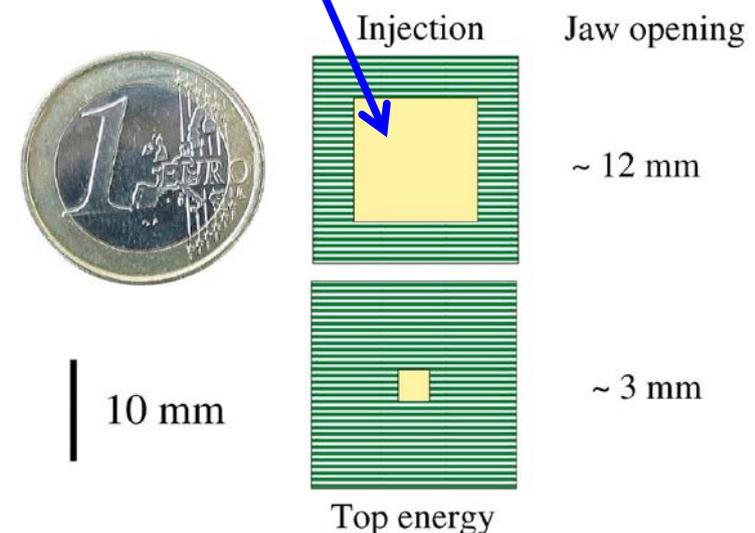
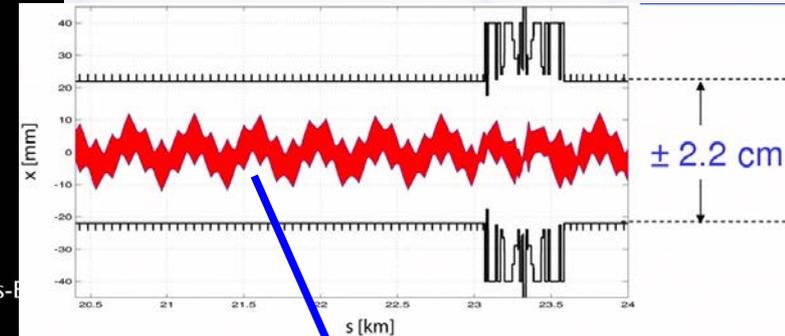
# LHC Dipole

## 2 kleine Strahlen in einem Magnet



**The  
15-m long  
LHC cryodipole**

**Größe der Vakuumkammer  
und Strahlgröße**



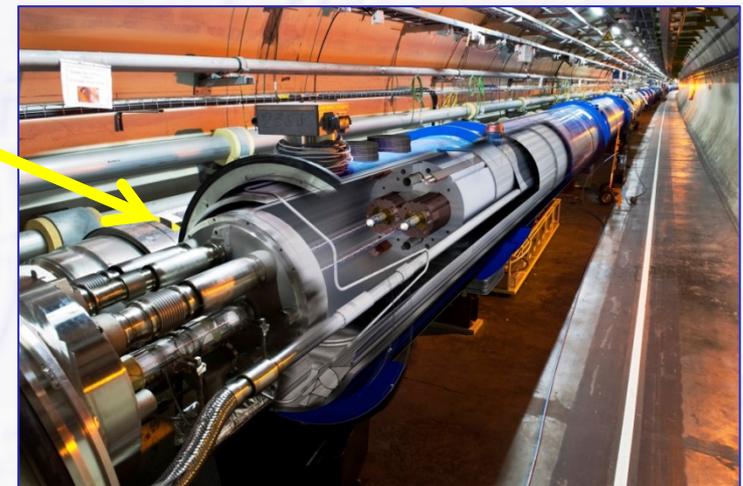
**sehr kleine Öffnung (kleine Vakuumkammer)  
= kompakter Magnet = geringere Kaltmasse**

# LHC Tunnel

- Umfang: 27 km
- Durchmesser: 3.8 m

## Umfangreiche Spitzentechnologien

- Supraleitung
- Magnete
- Vakuum
- Hochfrequenz
- Strahlkontrolle
- Sicherheit



# gespeicherte LHC Strahlenergie

→ 2808 Teilchenbündel,  $1.1 \times 10^{11}$  Protonen/Bündel @ 7 TeV

● 350 MJ gespeicherte Energie pro Protonstrahl

Airbus A320 (78 t) bei 340 km/h



ICE 3 Zug (420 t) bei 147 km/h



Queen Mary 2 (150'000 t) bei 4.2 Knoten (7.8 km/h)



Foto: Santiago Mena Sáez.

**Größtes Problem bei LHC ist die Kontrolle der gespeicherten Energie**

# Der LHC Beam Dump

- 350 MJ Beamenergie müssen in  $\sim 250 \mu\text{s}$  abgebaut werden (3 Umläufe)

→ instantane Strahlleistung auf dump = 1.4 TW

- Strahl Absorber aus Graphit

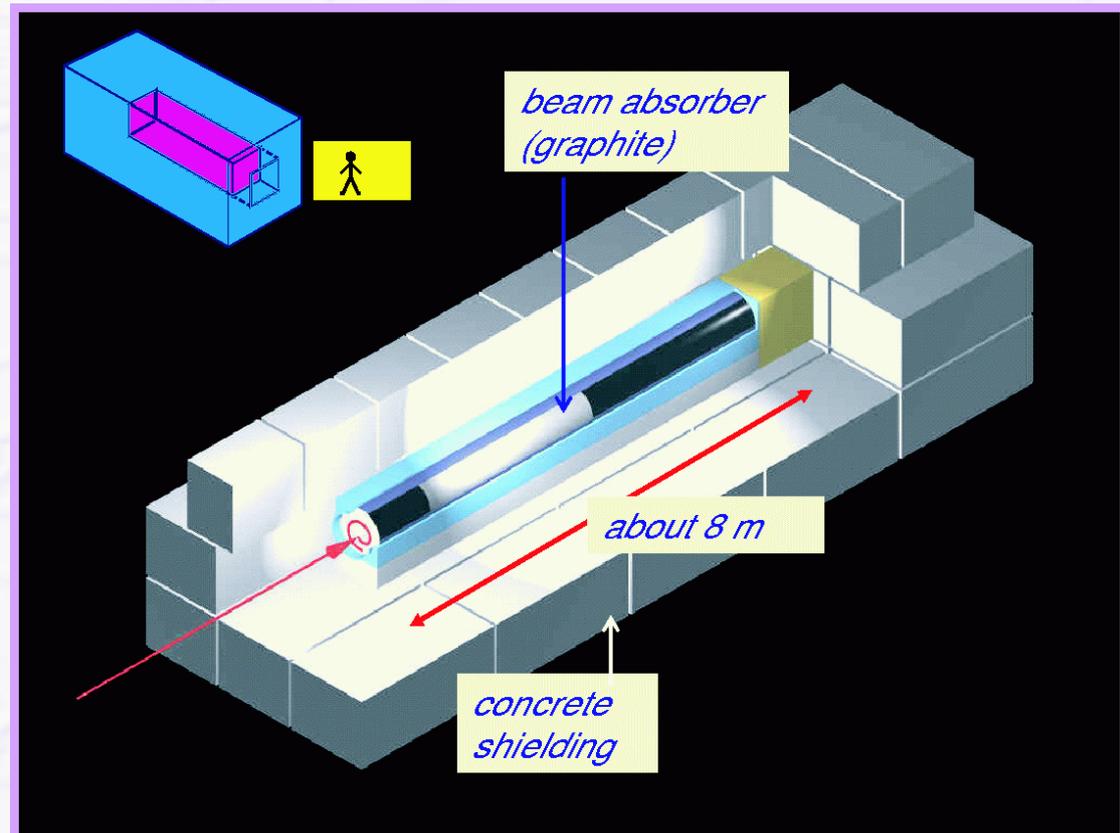
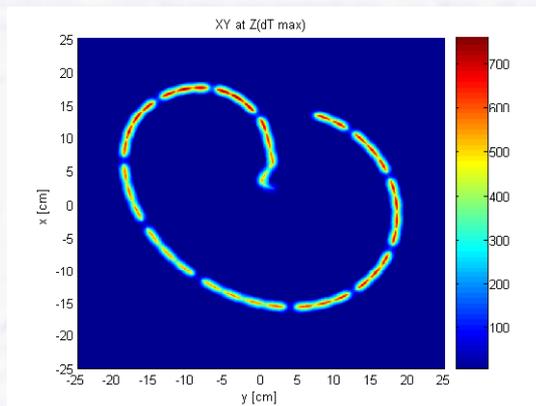
→ Schmelzpunkt  $\sim 3700 \text{ }^\circ\text{C}$

→ Aufheizung bis  $\sim 1250 \text{ }^\circ\text{C}$

- Auch notwendig

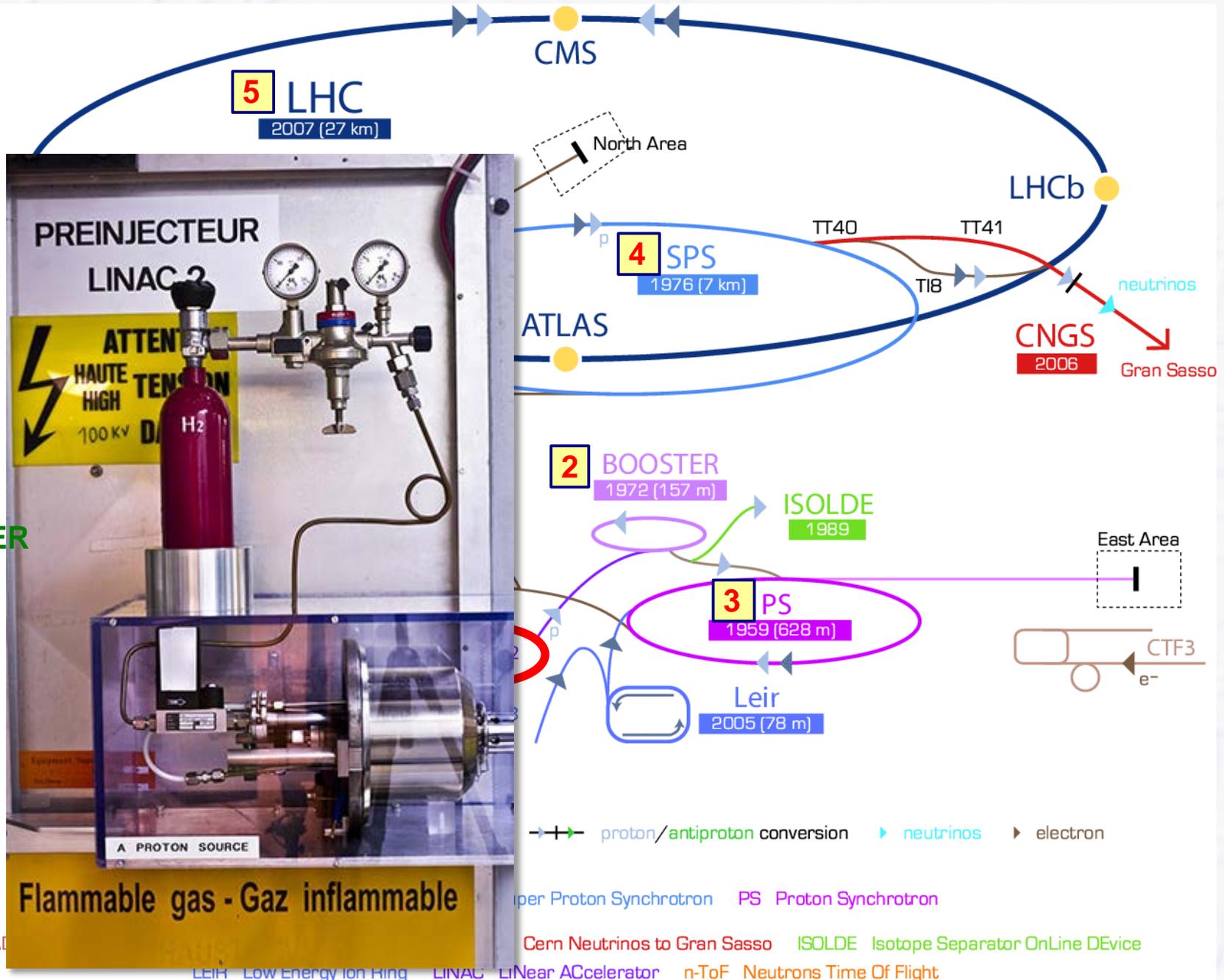
→ “dilution kicker”

→ Strahl trifft spiral-förmig auf

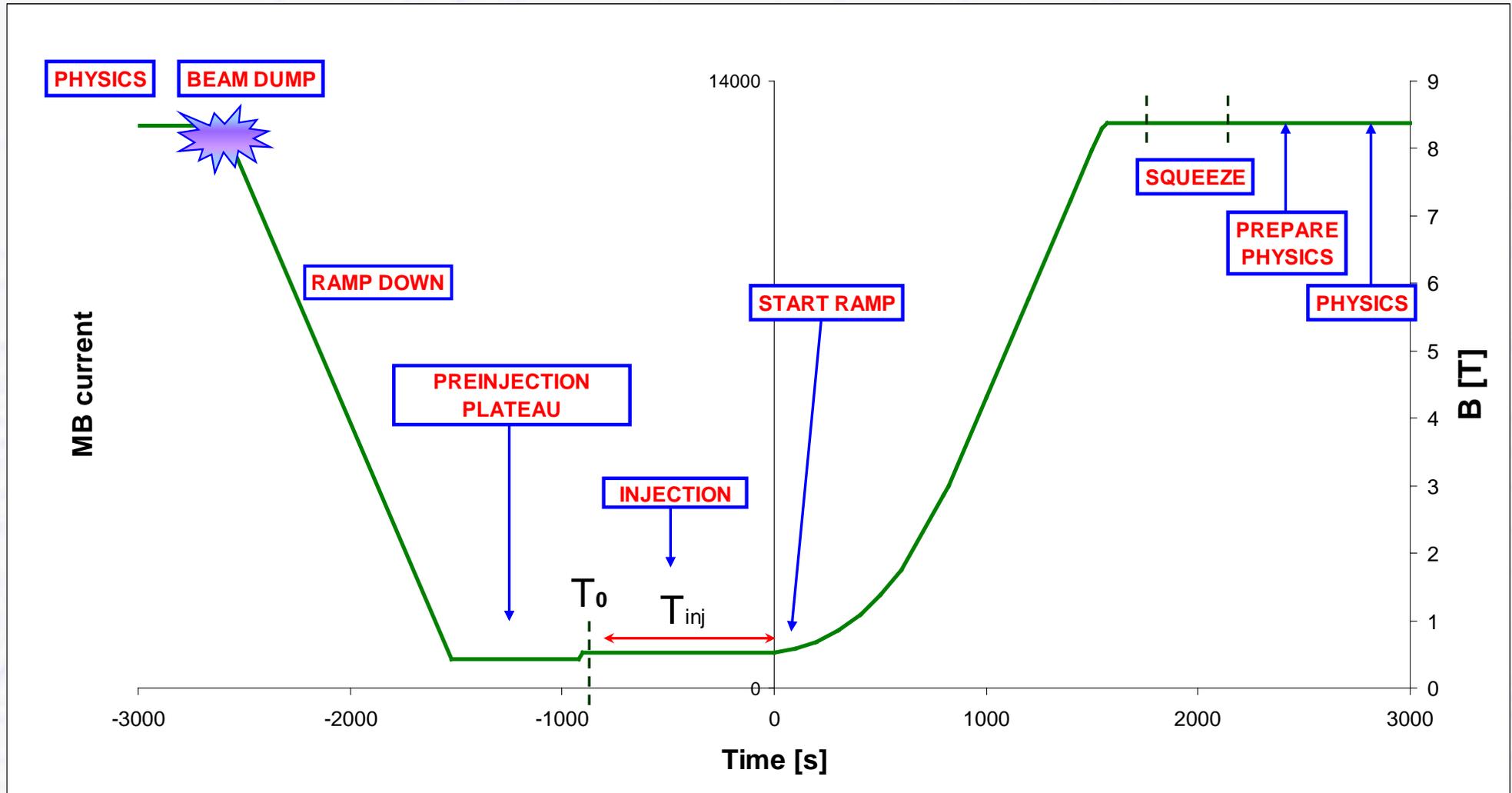


# CERN Beschleuniger Komplex

- 7 TeV
- 5 ↑ LHC
- 450 GeV
- 4 ↑ SPS
- 26 GeV
- 3 ↑ PS
- 1.4 GeV
- 2 ↑ BOOSTER
- 50 MeV
- 1 ↑ LINAC2



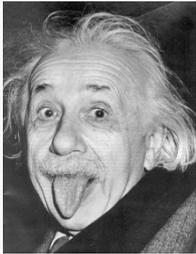
# LHC Betriebsmodus



minimale Zeit von Ende eines Kollisionsruns bis Beginn des nächsten: 1.5 Stunden

- dann Datennahme mit Kollisionen über ~10 Stunden oder mehr

# Methoden der Teilchenphysik

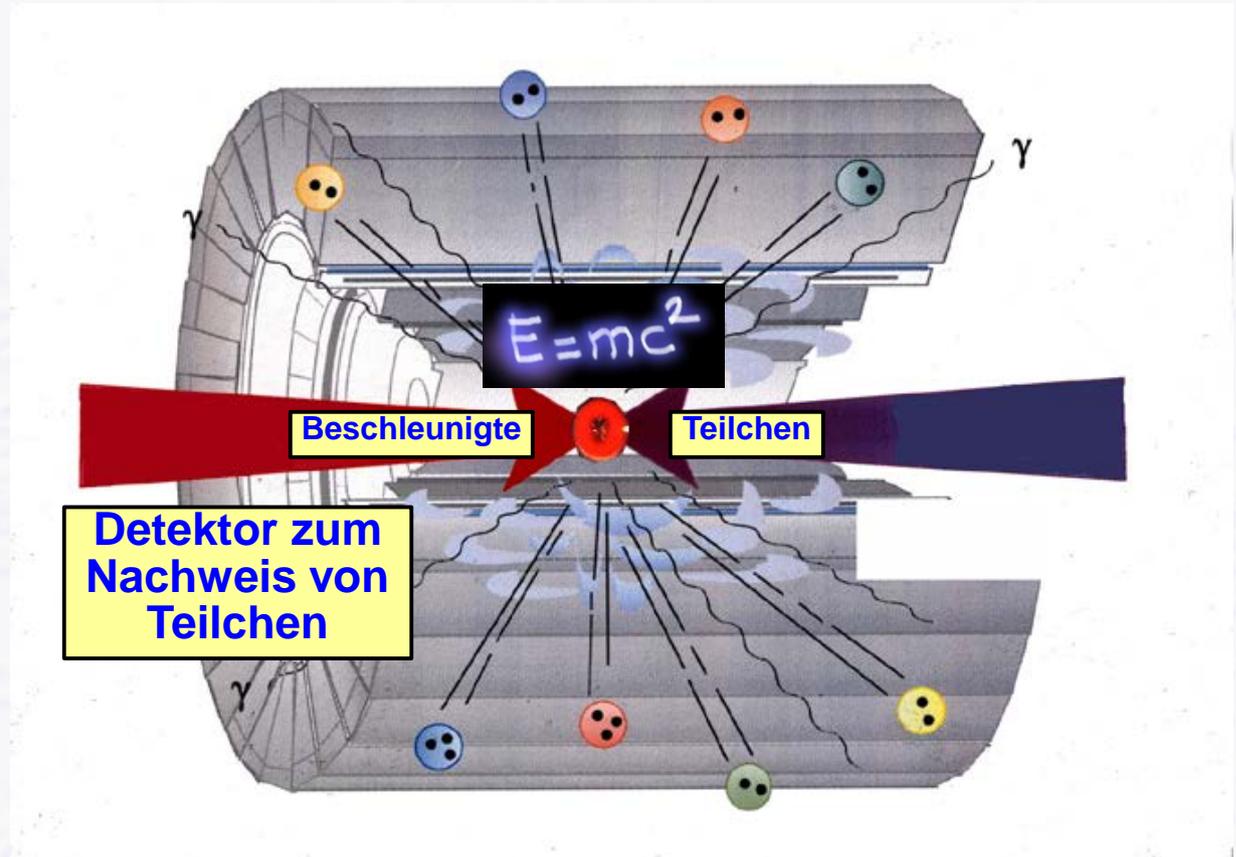


**Einstein  
(1905):**

**Materie ist  
konzentrierte Energie!**

**Materie lässt sich in  
Energie umwandeln  
und umgekehrt!**

$$E = m c^2$$



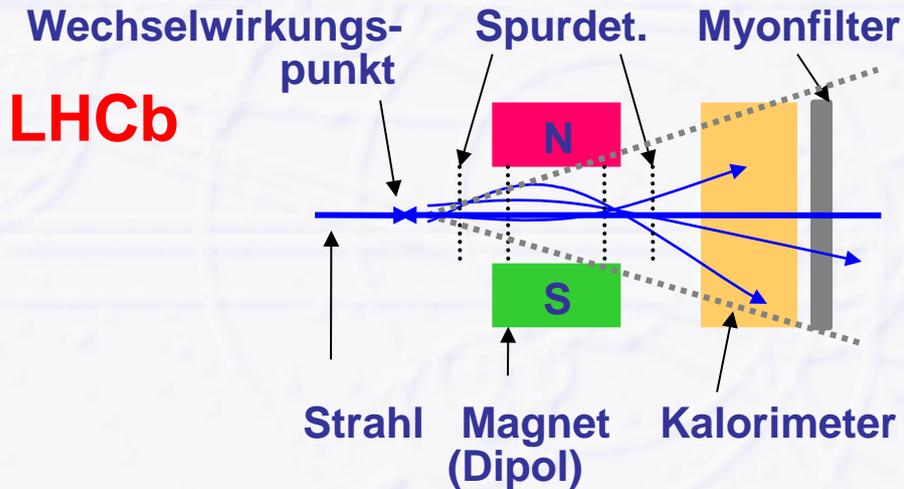
- Dies nutzen wir bei einem Teilchenbeschleuniger
  - Protonen werden beschleunigt ⇒ **Energie**
  - **Umwandlung der Energie** bei der Kollision in **Materie**
  - **Neue Teilchen entstehen** (neue Materie) und müssen **vermessen** werden

# Der perfekte Detektor...

- ...sollte Teilchenwechselwirkungen jeder Art mit 100% Effizienz und beliebiger Genauigkeit aufzeichnen  
= **Messung von Impuls + Energie aller Teilchen**
- aber beschränkte Effizienz, Impuls- + Energieauflösung bei echtem Det.
- nicht alle Teilchen werden nachgewiesen, einige verlassen den Detektor ohne Signal (Neutrinos), einige verschwinden durch nicht-sensitive Teile (Raum für z.B. Kühlung, Gasrohre, Kabel, Elektronik, Mechanik usw.)

## “fixed target” Geometrie

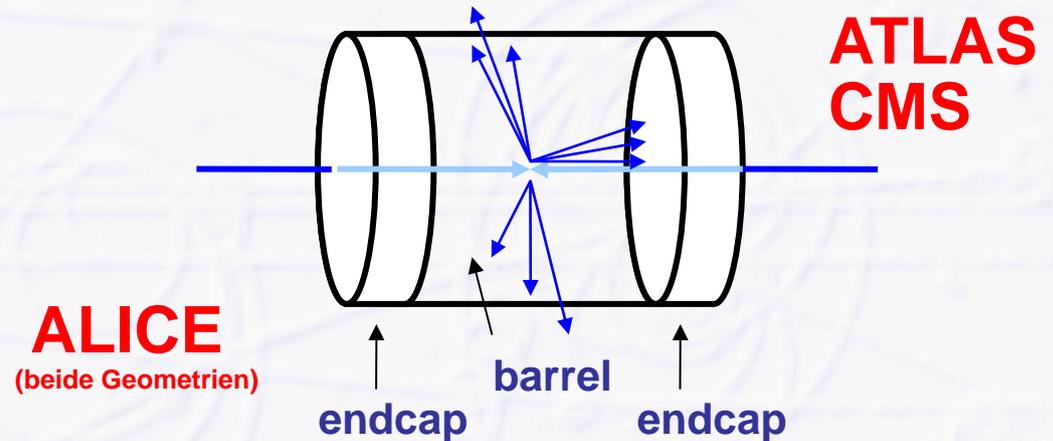
### “Magnetspektrometer”



- begrenzter Raumwinkel  $d\Omega$
- einfacher Zugang (Wartung)

## “Collider” Geometrie

### “4 $\pi$ Vielzweckdetektor”



- “voller” Raumwinkel  $d\Omega$
- beschränkter Zugang

# Aufgabe von Teilchendetektoren

## ● Impulsmessung: Spurdetektor (Tracker)

→ nah am Kollisionspunkt: Vertexdetektor (meist Silizium-Pixeldetektoren)

- bestimmen **Kollisionspunkt** (Primärvertex) und **sekundäre Vertices** von Zerfällen

→ Hauptspurdetektor

- **Impulsmessung** über Krümmung im Magnetfeld
- 2 Technologien: Silizium-Streifendetektoren (CMS) oder Gas-basierte Detektoren

## ● Energiemessung: Kalorimeter

→ Elektro-magnetische Kalorimeter

- **Energiemessung von leichten Teilchen** (Elektronen, Positronen, Photonen) durch Erzeugung und Nachweis eines elektro-magnetischen Schauers
- 2 Konzepte: homogenes (CMS) oder “sampling” Kalorimeter (ATLAS)

→ Hadronkalorimeter

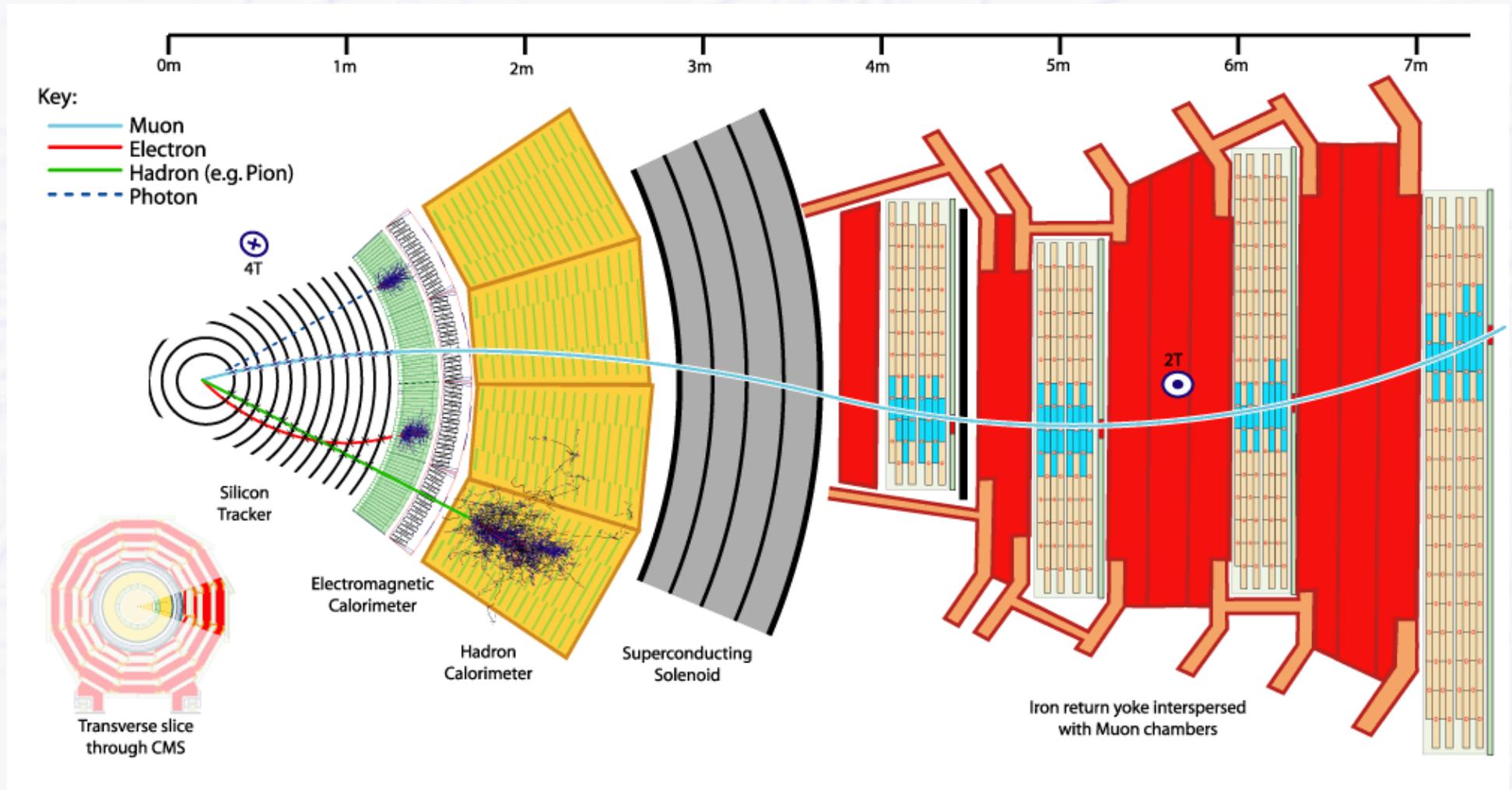
- **Energiemessung von schweren Teilchen** (Hadronen = Pionen, Kaonen, Protonen, Neutronen) durch Erzeugung eines Schauers ausgelöst durch starke Wechselwirkung

## ● Myon-Identifizierung Impulsmessung

→ äußere Detektorlagen, **Spurdetektor** mit Magnetfeld

# Ein typischer Teilchendetektor

## ● Schnitt durch den CMS Detektor



Spurdet. Kalorimeter  
p E

Spule

Myon-Detektor und Eisenrückflußjoch  
Myon-Identifizierung/-impulsmessung

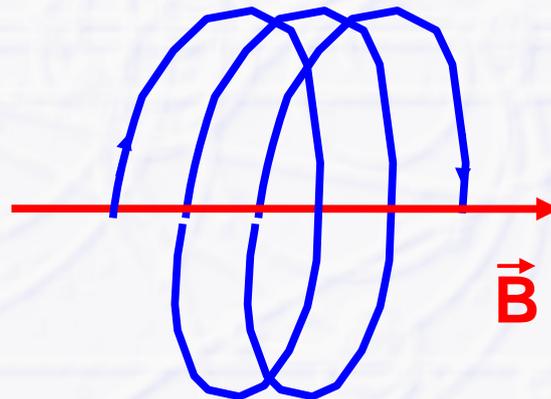
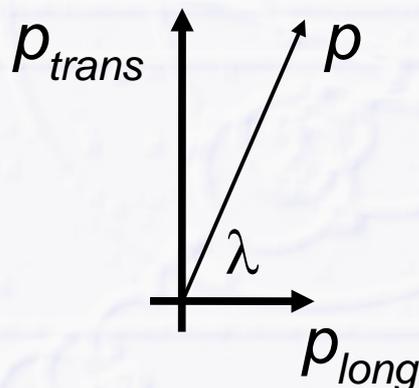
# Impulsmessung

- **Geladene Teilchen werden durch Magnetfelder abgelenkt**
  - homogenes B-Feld  $\perp$  Teilchen bewegt sich auf einem Kreis mit Radius  $r$

$$p_t [\text{GeV} / c] = 0.3 \cdot B [\text{T}] \cdot r [\text{m}]$$

Messung von  $p_t$  über  
Messung des Radius

- **Transversalimpuls  $p_t$**  = Impulskomponente  $\perp$  zum Magnetfeld
  - keine Ablenkung  $\parallel$  zum Magnetfeld
- mit **longitudinaler Impulskomponente**
  - Teilchenspur ist eine **Helix**



Gesamtimpuls  $p$  über  $p_t$   
und Messung des Winkels  $\lambda$

$$p = \frac{p_t}{\sin \lambda}$$

# Spurdetektoren

→ hauptsächlich 3 verschiedene Technologien

## ● gas-basierte Detektoren

→ Ionisation im Gas

- typisch  $\sim 100 \text{ e}^-/\text{cm}$   
nicht ausreichend für genügend große Signalhöhe über Verstärkerrauschen

→ erfordert Gasverstärkung  $\sim 10^4$  für ausreichende Signalhöhe

## ● Halbleiterdetektoren (Siliziumdetektoren)

→ Erzeugung von Elektron – Loch Paaren im Halbleiter

- typisch  $\sim 100 \text{ e}^- - \text{Loch Paare}/\mu\text{m}$

→ 300  $\mu\text{m}$  dicker Halbleiter genügend für ausreichendes Signal ohne Gasverstärkung, 20'000 – 30'000 Elektronen

## ● Glasfaserdetektoren

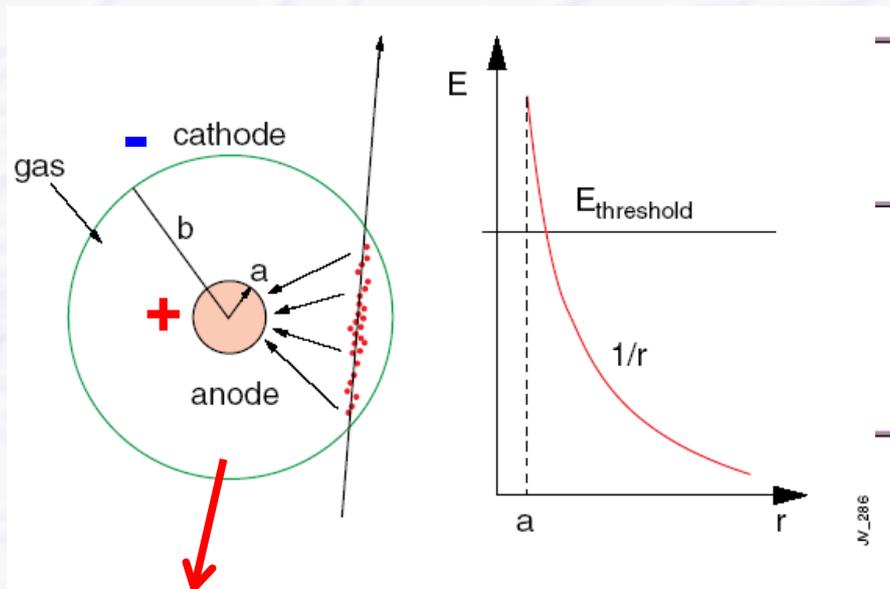
→ Fasern aus Plastikszintillatormaterial

- Nachweis des Szintillationslicht mit Photodetektor (empfindlich auf Einzelelektronen)

# Geiger-Müller Zählrohr

## ● Erfunden durch Hans Geiger und Walther Müller 1928

- Rohr mit Edelgasfüllung (He, Ne, Ar) + Zusatzgas (z.B. Methan)
- Dünner Draht im Zentrum ( $20 - 50 \mu\text{m} \varnothing$ ), Hochspannung (einige 100 Volt) zwischen Draht und Rohrwandung



### → Gasionisation durch Teilchen

- Elektronen driften zum Draht

### → Starkes Anwachsen des E-Feldes in Drahtnähe

- Elektronen erhalten mehr und mehr Energie

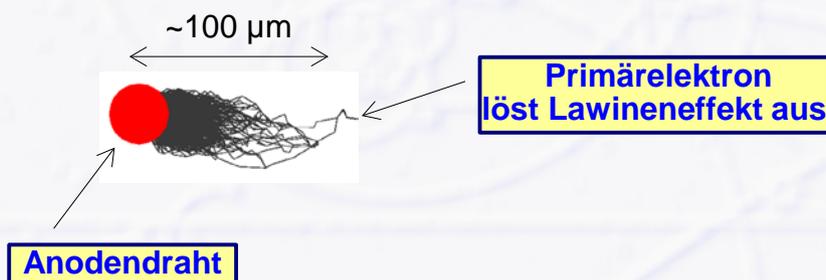
### → oberhalb Schwelle (ca. $>10 \text{ kV/cm}$ )

- Elektronenergie ausreichend für weitere Gasionisation

- neue Elektronen ionisieren ebenfalls

### → Lawineneffekt: exponentielle Zunahme von Elektronen (und Ionen) um $O(10^4)$

- messbares Signal am Draht



# Driftkammer

## ● Geiger-Müller Zählrohre liefern nur Ja/Nein Information

- Teilchenspur durchfliegt das Rohr oder nicht, keine Positionsinformation innerhalb des Rohrs

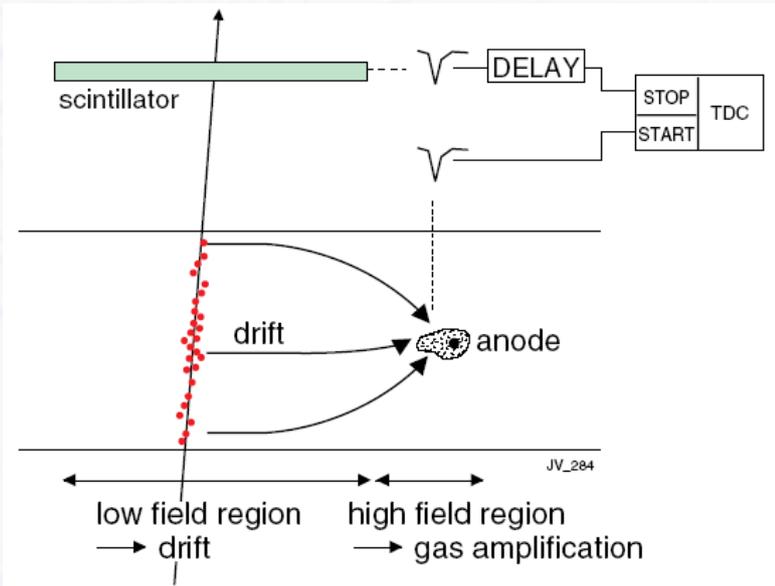
→ **bessere Auflösung** → kleinere Rohre → mehr (und mehr) Drähte...

- größere Spannkraft (schwerer Halterahmen nötig), mehr Material...

## ● Lösung von A. H. Walenta, J. Heintze, B. Schürlein 1971

→ **Positionsinformation aus Driftzeit der Elektronen (weniger Drähte)**

- **Driftzeit = Zeit zwischen Teilchendurchgang und Elektronenankunft am Draht**



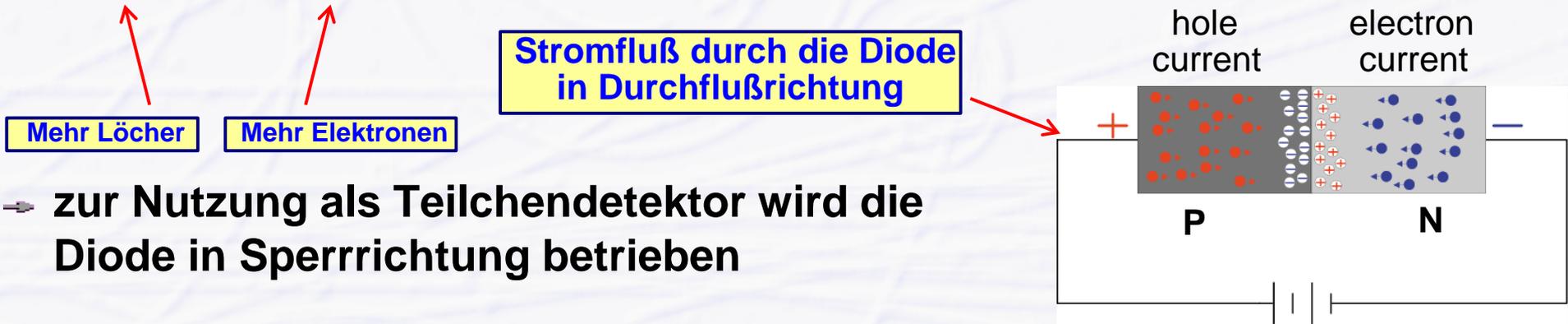
**Startsignal (Teilchendurchgang)**  
aus externer Quelle:  
Szintillator oder Beschleuniger  
Synchronisationssignal

● **Abstand Spur – Draht**  
aus **Driftzeit und Drift-**  
**geschwindigkeit  $v_D$**

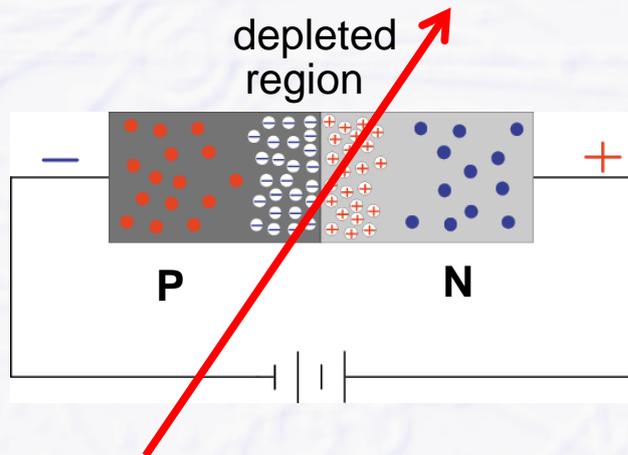
# Halbleiter Spurdetektoren

## ● Grundelement eines Halbleiterdetektors ist... eine Diode

→ p-Typ und n-Typ dotiertes Silizium ist miteinander verbunden



→ zur Nutzung als Teilchendetektor wird die Diode in Sperrrichtung betrieben



## ● Erzeugung einer Verarmungszone um die n/p Verbindung

→ Ladungsträgerfreie Zone

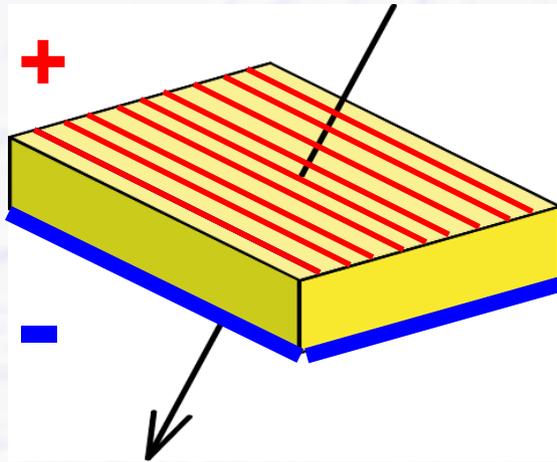
- keine Elektronen, keine Löcher
- Dicke der Verarmungszone abhängig von Spannung und Dotierungskonzentration

geladene Teilchen können neue Elektron/Loch Paare erzeugen, ausreichend für nachfolgende Verstärkung

typisch 20'000 – 30'000 Elektron/Loch Paare in 300  $\mu\text{m}$  dickem Material

# Siliziumstreifendetektor

- Große Siliziumscheibe, z.B. 10 x 10 cm<sup>2</sup>, 300 μm Dicke



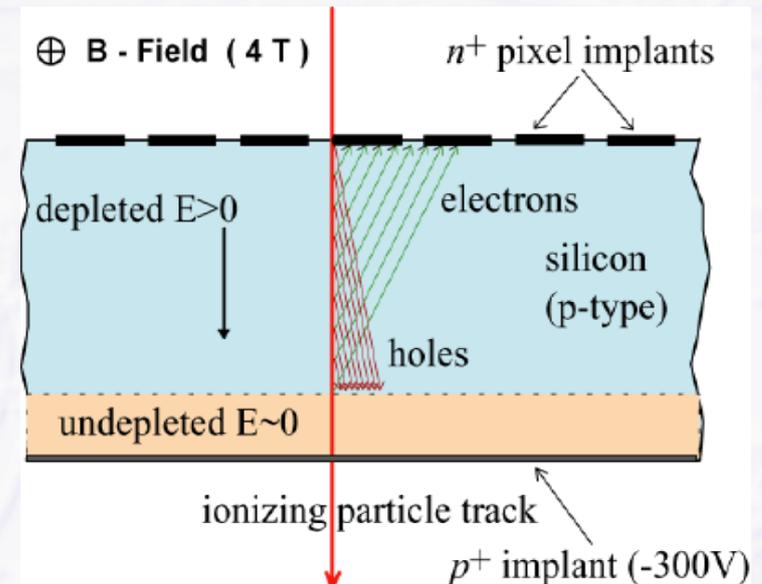
untere Elektrode **p**-typ

obere Elektrode **n**-typ und unterteilt in viele Streifen mit kleinem Abstand

viele Diode nebeneinander  
(ähnlich MWPC bei Drahtkammern)  
mit **Positionsinformation**

- Vorteile gegenüber gas-basierten Drahtdetektoren

- Streifendichte kann sehr viel höher sein (z.B. ~20 μm)
  - hohe Positionsgenauigkeit
  - aber auch viele elektronische Kanäle nötig

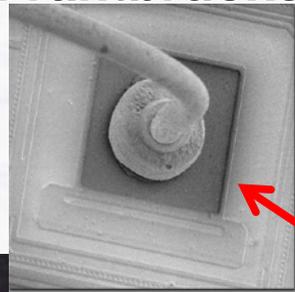


# Si-Det. Elektronik + Si-Pixeldetektor

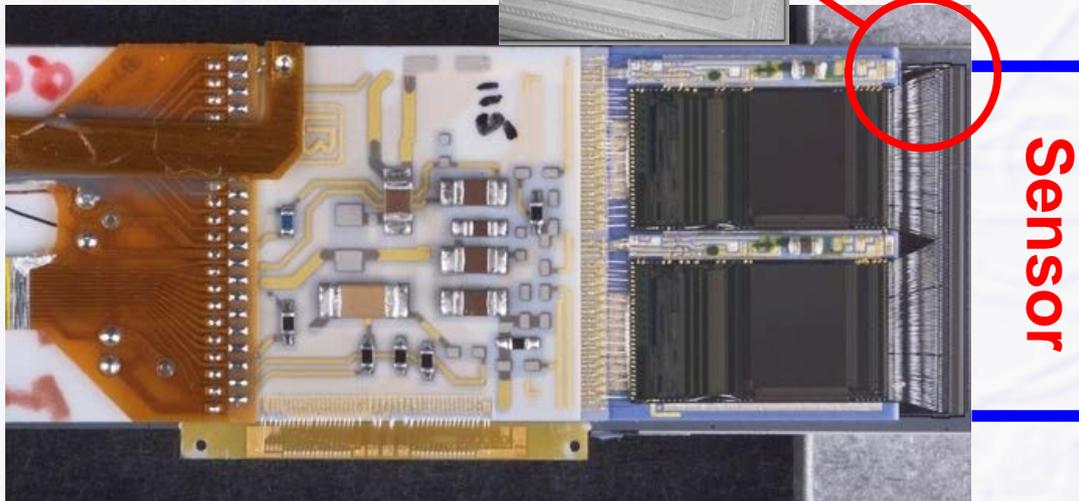
- **Siliziumstreifendetektoren haben seeehr viele elektronische Kanäle, jeweils  $\sim 10^7$  Kanäle bei ATLAS und CMS**

- erfordert hochintegrierte Chips zur Verstärkung, Signalformung, Nullenunterdrückung (nur Streifen mit Signalen werden ausgelesen) und Multiplex-Technik (Streifensignale werden auf nur wenige Kabel verteilt)

➔ **Elektronik ist direkt mit der Sensorfläche (Vielfach-Diode) verbunden über kleine Drahtbrücken (wire bonds)**

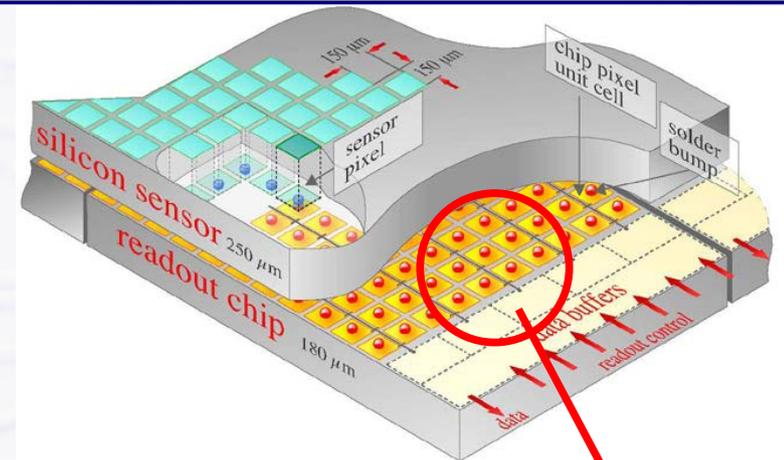


wire bonds

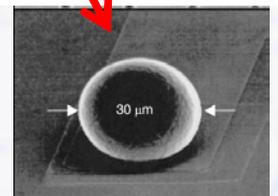


Sensor

**Streifendetektoren liefern nur eine Koordinate, Pixeldetektoren sind 2D-Detektoren**

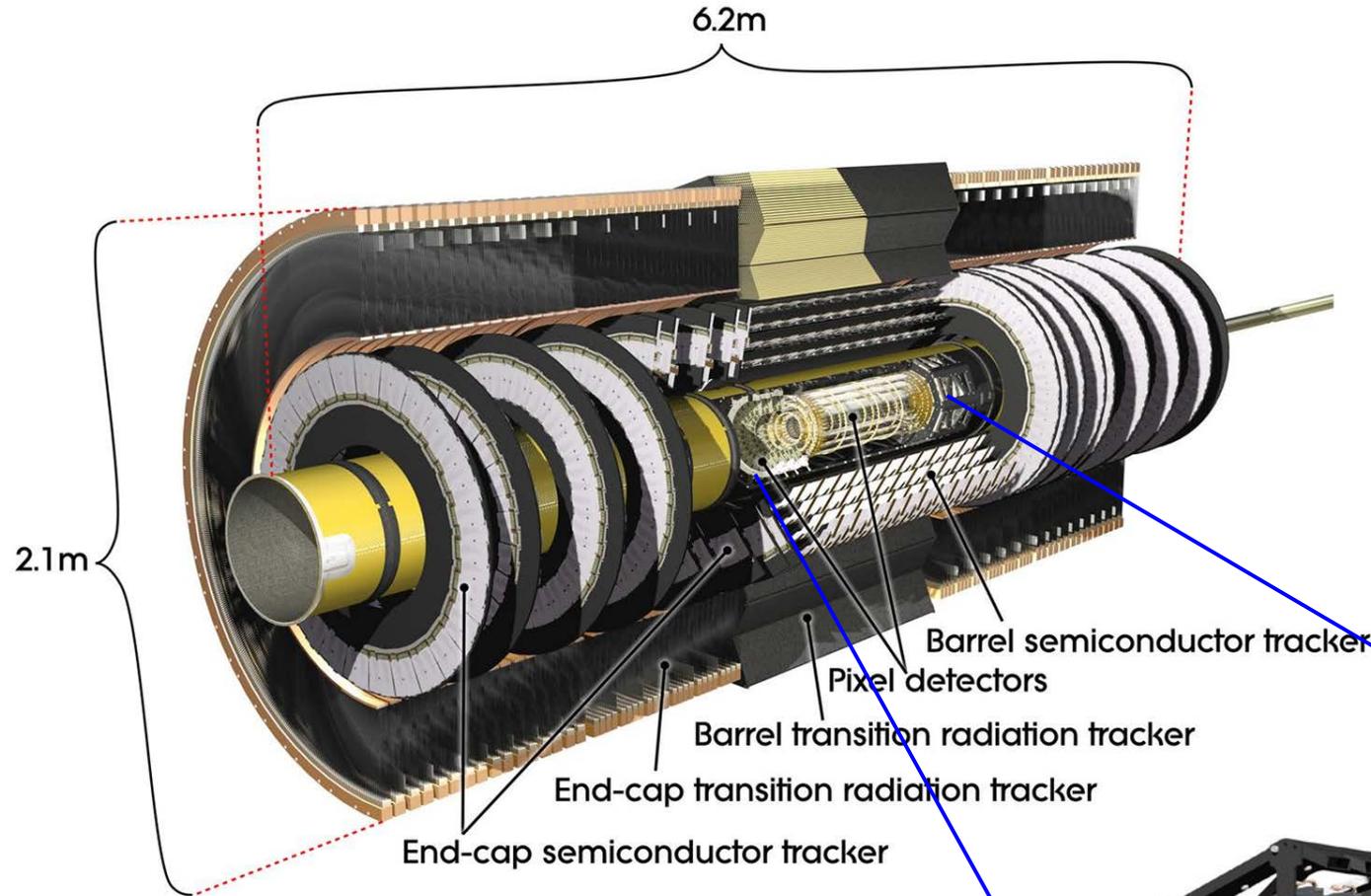


**Pixeldetektoren erfordern "bumpbonding" Technik und haben noch mehr Kanäle,  $\sim 10^8$**

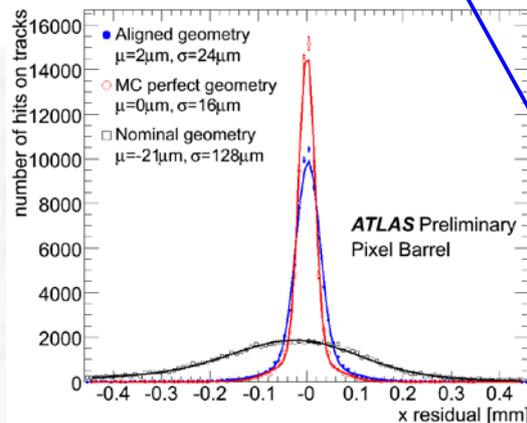


30 µm

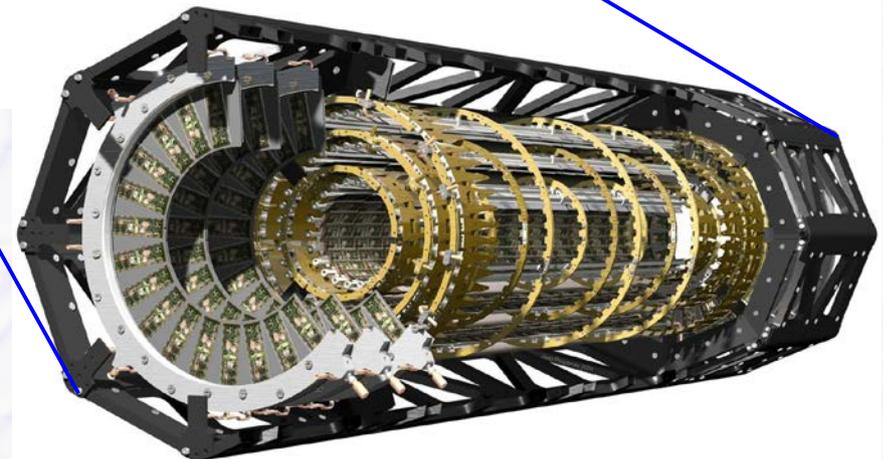
# ATLAS Inner Tracker



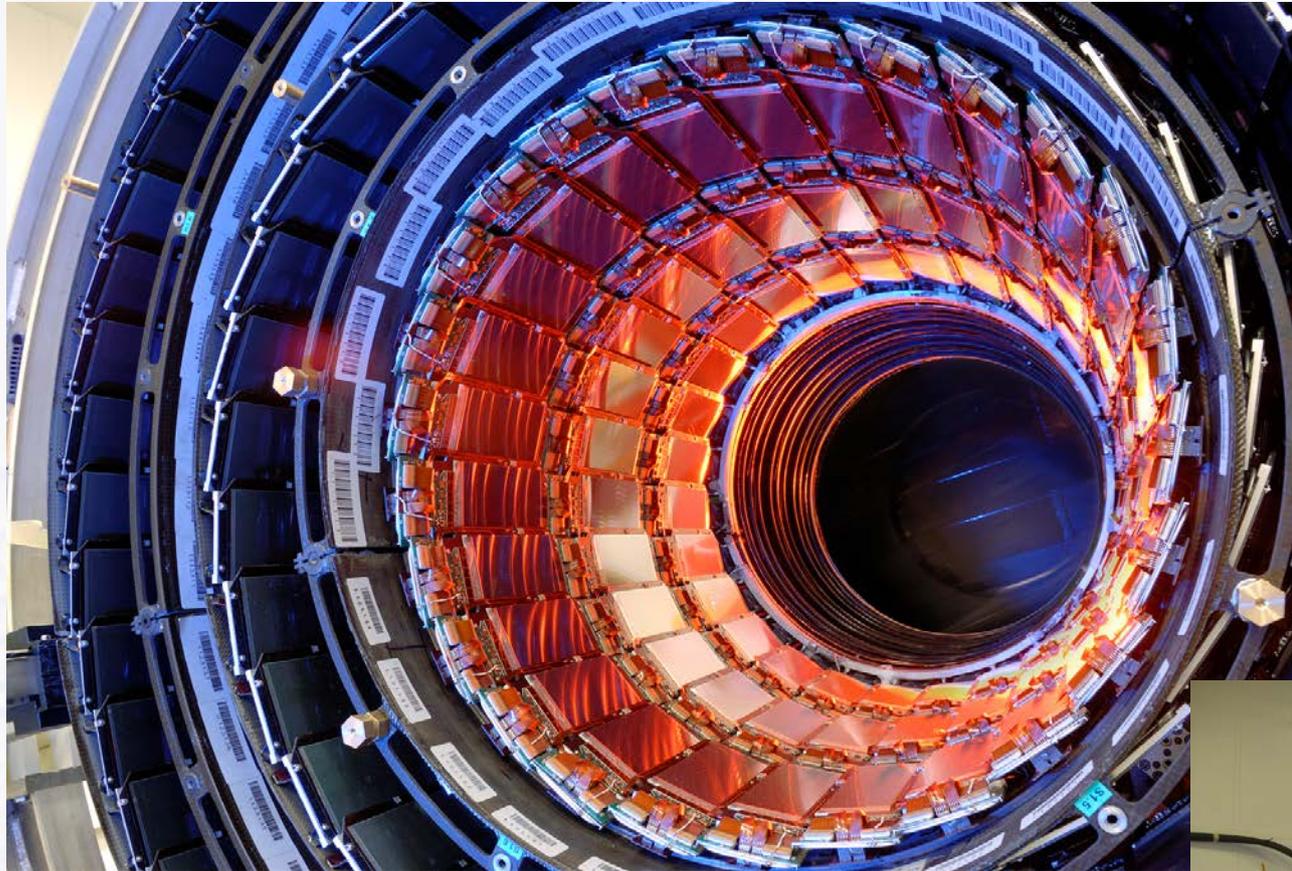
- 3-Lagen Si-Pixel
- 4-Lagen Siliziumstreifen
- Übergangsstrahlungsdetektor (gasbasiert)



**Pixel Alinierung mit Höhenstrahlung 2008**

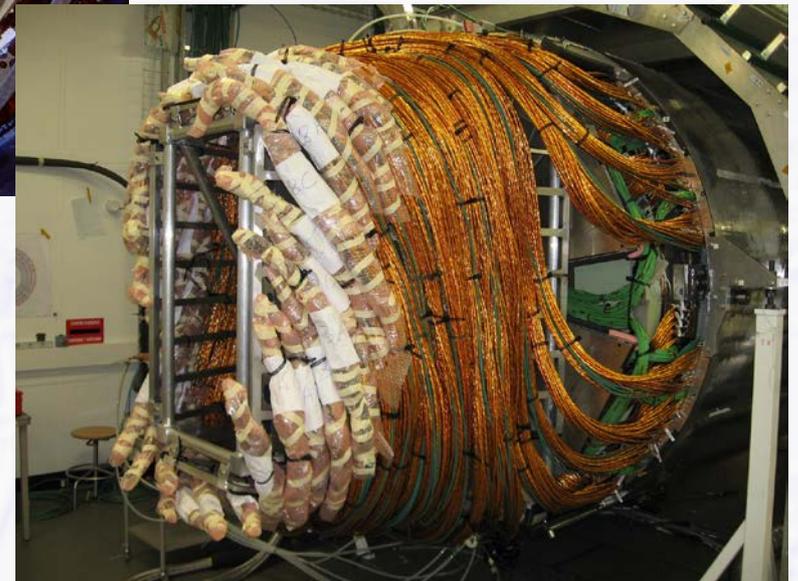


# CMS Siliziumspurdetektor



Tracker Inner Barrel TIB

- 3 Lagen Si-Pixel
  - 10 Lagen Si-Streifen
- 210 m<sup>2</sup>, größter jemals gebauter Si-Detektor



# Myondetektoren

- Myondetektoren sind **Spurdetektoren** (z.B. Drahtkammern)
  - bilden die äußeren Lagen der (LHC) Detektoren
  - sind **nicht ausschliesslich empfindlich für Myonen** (registrieren auch andere geladene Teilchen)!
  - per “Definition”: wenn ein Teilchen den Myondetektor erreicht hat, wird es als Myon betrachtet
    - alle anderen Teilchen sollten im Kalorimeter absorbiert worden sein

## ● Anforderungen an Myondetektoren

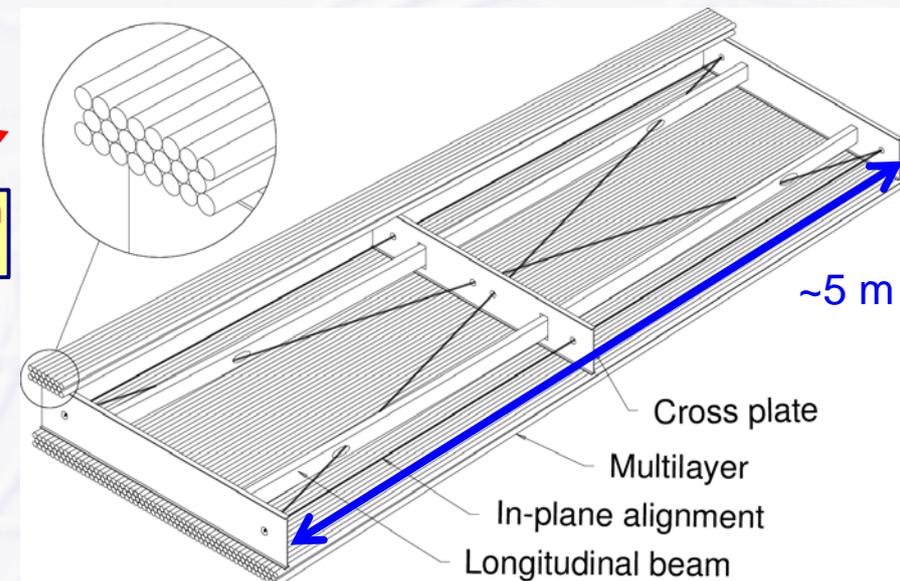
- Abdeckung großer Fläche
- mechanische Stabilität

## ● ATLAS

- 1200 Kammern mit 5500 m<sup>2</sup>
- erfordert präzise Karte des (inhomogenen) Magnetfelds

### ATLAS Myondetektorelement

Aluminiumrohre mit zentralem Draht gefüllt mit 3 bar Gas

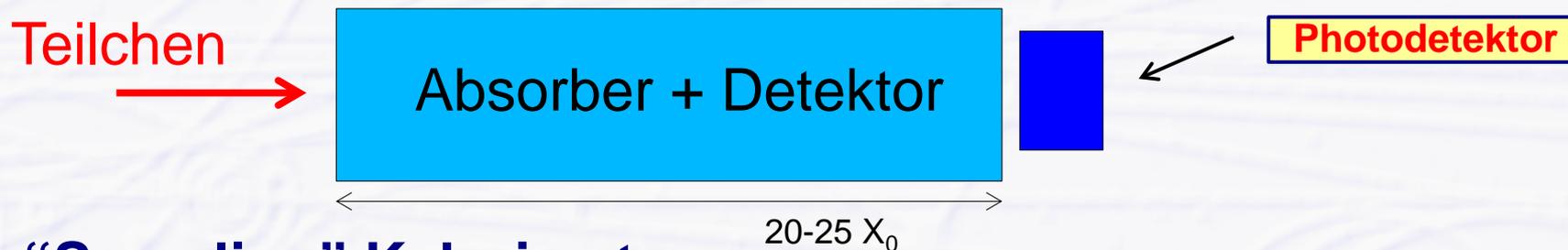


# Kalorimeter Konzepte

## ● Homogenes Kalorimeter

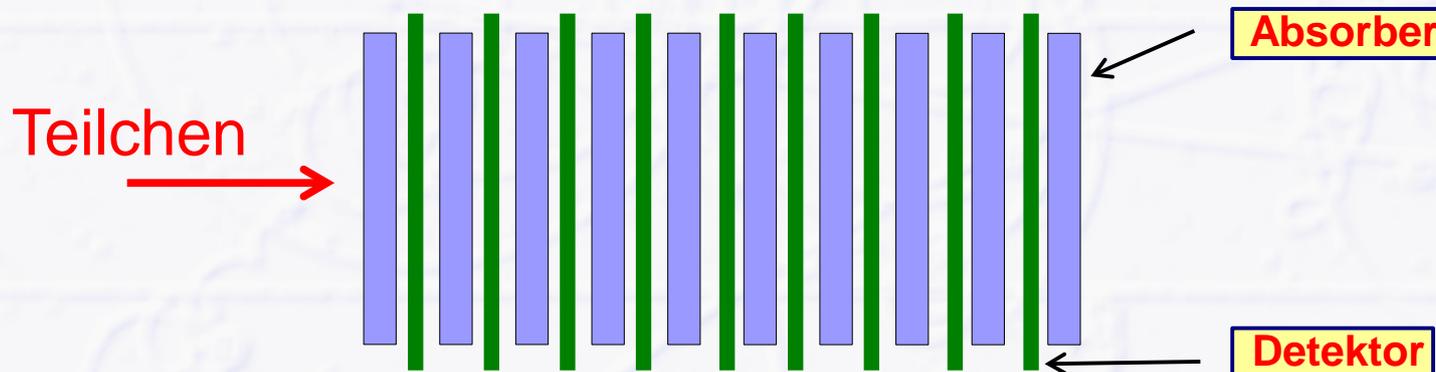
→ Schauerbildung in aktivem Absorbermaterial = Detektor

- Bildung eines elektro-magnetischen Schauers in optisch transparenten Absorber
- Erzeugung von optischen Photonen durch Szintillation oder Čerenkovstrahlung
- Nachweis durch optischen Photodetektor



## ● "Sampling" Kalorimeter

→ Schichten von passivem (schweres) Absorbermaterial (Eisen, Messing, Blei, Wolfram, Uran) mit dazwischen liegenden Detektoren



# Homogenes Kalorimeter

## ● Vorteil: gute Energieauflösung

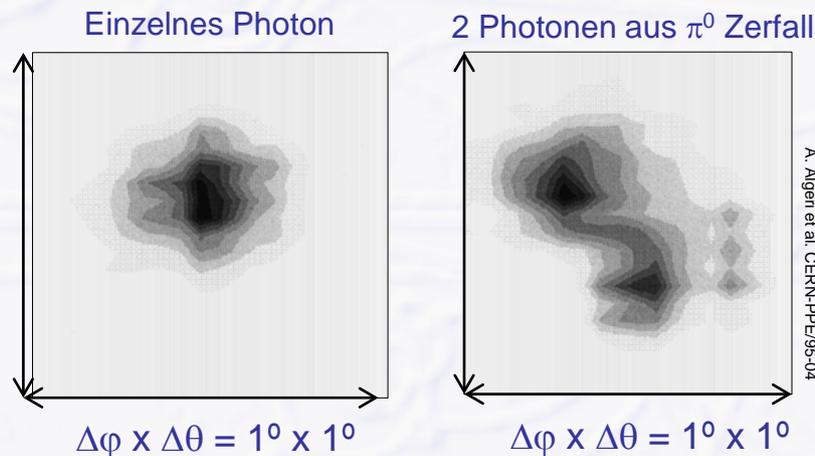
→ gesamter Schauer im aktiven Detektormaterial

- keine Teil des Schauer geht im passiven Absorbermaterial verloren

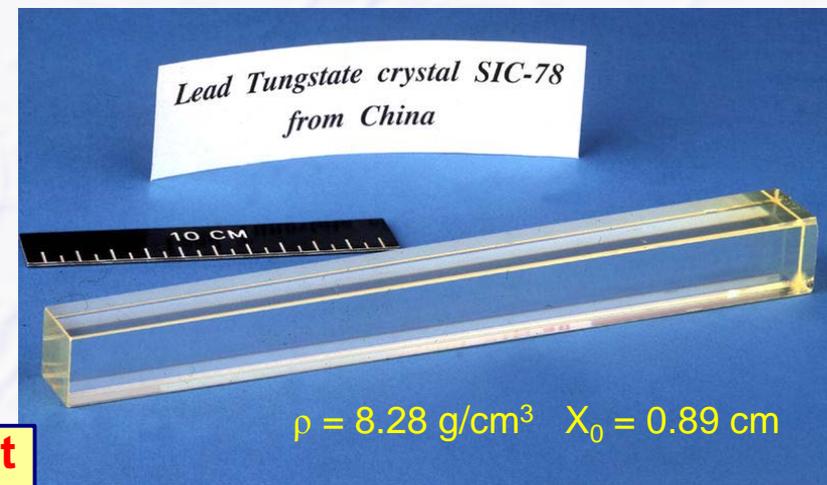
## ● Nachteil

→ beschränkte Granularität, keine Information über Schauerposition und -größe in Längsrichtung

- Positionsinformationen nützlich zur Trennung von eng beieinander liegenden Energieclustern, z.B. 2 Photonen aus  $\pi^0$  Zerfällen



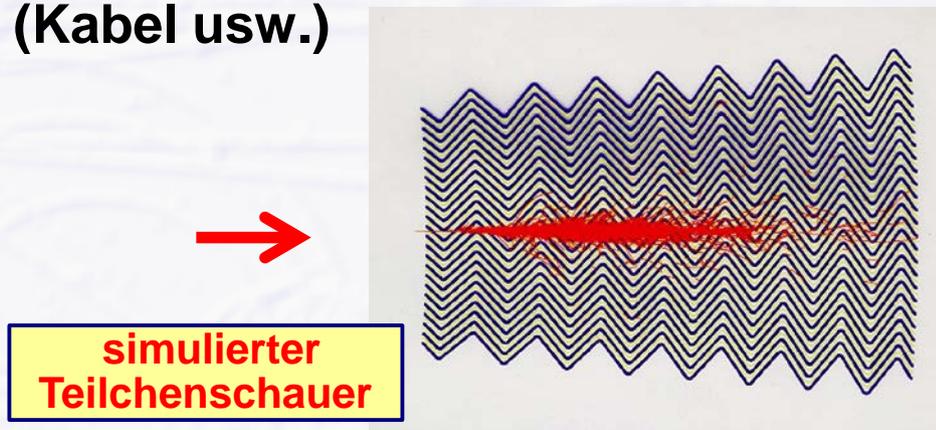
## CMS PbWO<sub>4</sub> Kristall



**Erfordert transparente hochdichte Materialien mit kurzer Strahlungslänge und hoher Lichtausbeute**

# “Sampling” Kalorimeter

- **Typisches Absorbermaterial: Eisen, Blei**
- **Detektortechnologien sehr verschiedenartig**
  - Gasdetektoren (MWPCs), Plastikszintillator, **flüssige Edelgase** (LAr, LKr)
- **ATLAS verwendet LAr mit “Akordeon”-artigen Stahlabsorbern**
  - Akordeonstruktur vermeidet “tote” Zonen (Kabel usw.)

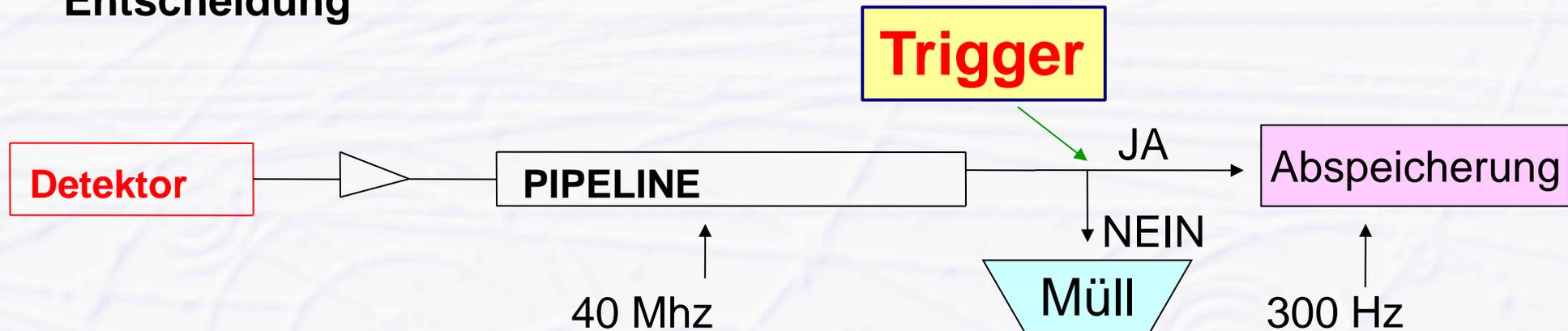


- **LAr wird durch geladene Schauerteilchen ionisiert**
- **Sammlung der Ladung an Pads**
  - Prinzip einer Ionisationskammer, keine weitere Verstärkung
  - Padform nach Wunsch → hohe Granularität



# Selektion interessanter Kollisionen?

- **Kollisionsrate: 40 MHz, mit ~20 Wechselwirkungen ( $10^9$  events/s)**
  - Mögliche Aufzeichnungsrate: ~300 Kollisionen/s (~450 MB/s),
- **Hocheffizienter TRIGGER (schnelle Auswahl) nötig**
  - Rohdaten (1 PB/s) werden in pipeline gespeichert bis Trigger Entscheidung

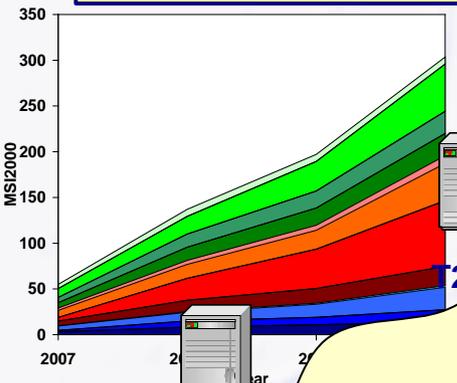


- **ATLAS Trigger in 3 Level (CMS ähnlich in 2 Level)**
  - Level-1: Hardware, ~3  $\mu$ s Entscheidungszeit, 40 MHz  $\rightarrow$  75 kHz
  - Level-2: Software, ~40 ms Entscheidungszeit, 75 kHz  $\rightarrow$  2 kHz
  - Level-3: Software, ~4 s Entscheidungszeit, 2 kHz  $\rightarrow$  300 Hz

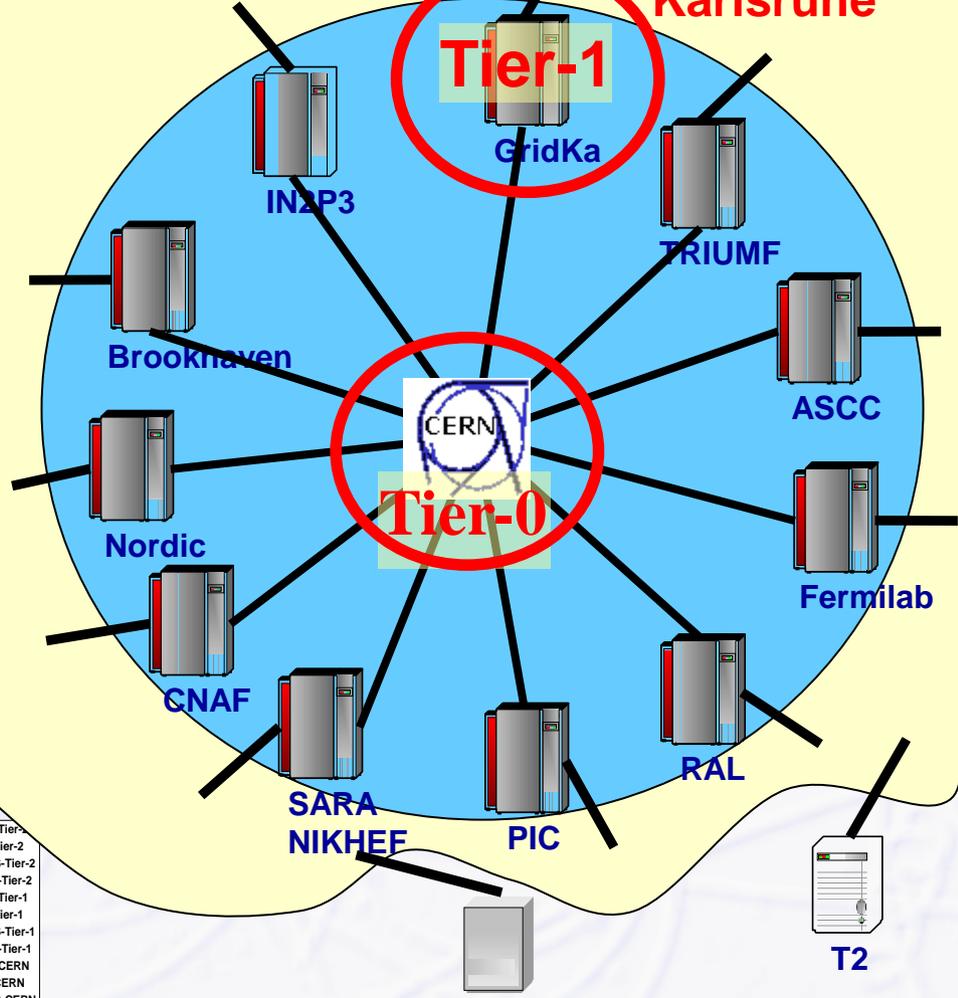
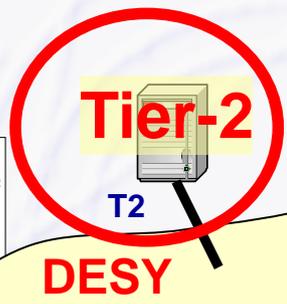
Anstieg ~100 MSI2k/Jahr  
 ~10'000 Intel Core 2 Duo / Jahr

1 Tier-0  
 12 Tier-1  
 ~200 Tier-2

# Das Grid



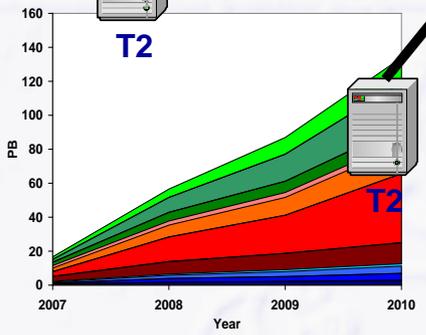
- LHCb-Tier-2
- CMS-Tier-2
- ATLAS-Tier-2
- ALICE-Tier-2
- LHCb-Tier-1
- CMS-Tier-1
- ATLAS-Tier-1
- ALICE-Tier-1
- LHCb-CERN
- CMS-CERN
- ATLAS-CERN
- ALICE-CERN



CPU

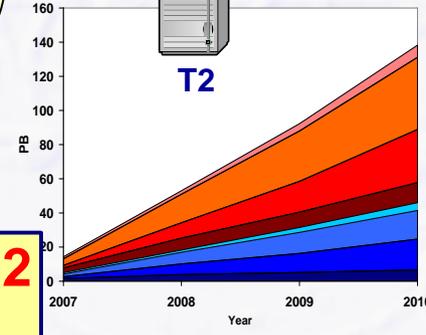
Disk

Tape



- LHCb-Tier-1
- CMS-Tier-1
- ATLAS-Tier-1
- ALICE-Tier-1
- LHCb-CERN
- CMS-CERN
- ATLAS-CERN
- ALICE-CERN

75 PB LHC Daten gespeichert 2010-12  
 (17'000 disks + 52'000 tapes am CERN)



- LHCb-Tier-1
- CMS-Tier-1
- ATLAS-Tier-1
- ALICE-Tier-1
- LHCb-CERN
- CMS-CERN
- ATLAS-CERN
- ALICE-CERN

# **Anforderungen an LHC Detektoren**

## **● Kollisionen bei höchsten Energien**

→ gute Impulsauflösung bis hin zur TeV Skala

## **● Hohe Luminosität (große Kollisionsrate)**

→ Schnelle Detektoren (nur 25 ns zwischen den Kollisionen)

## **● Große Teilchendichte**

→ hohe Granularität, ausreichend kleine Detektorelemente

## **● Hohes Strahlungsniveau (viele stark wechselwirkende Teilchen)**

◦ Strahlung hauptsächlich durch die Kollisionsteilchen, nicht durch LHC Untergrund

→ strahlenharte Detektoren und Elektronik (Lebensdauer ~10+ Jahre)

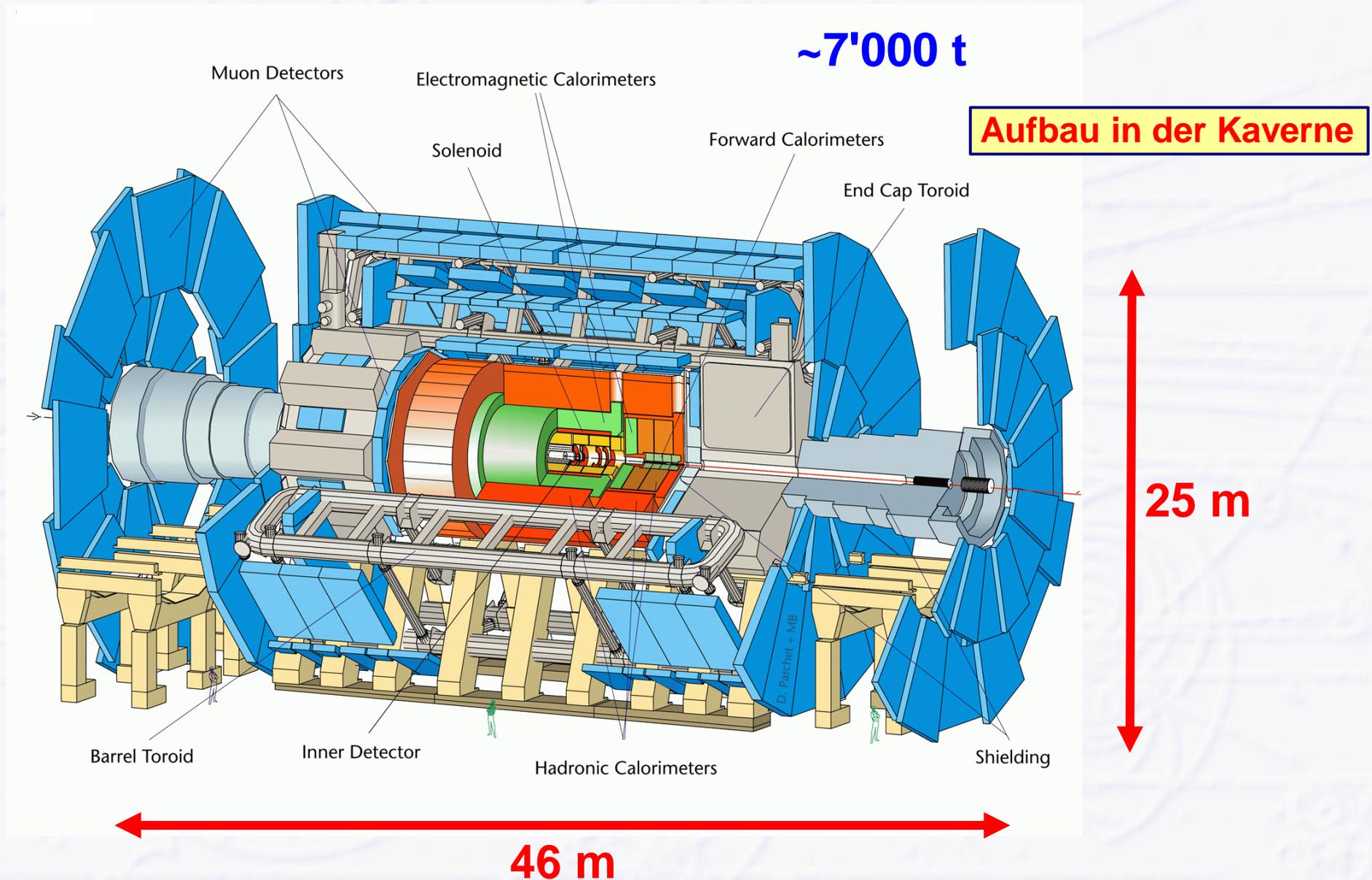
## **● GROßE Kollaborationen!!!**

→ ~O(3000) Physikers jeweils in ATLAS und CMS

→ Kommunikation, soziologische Aspekte

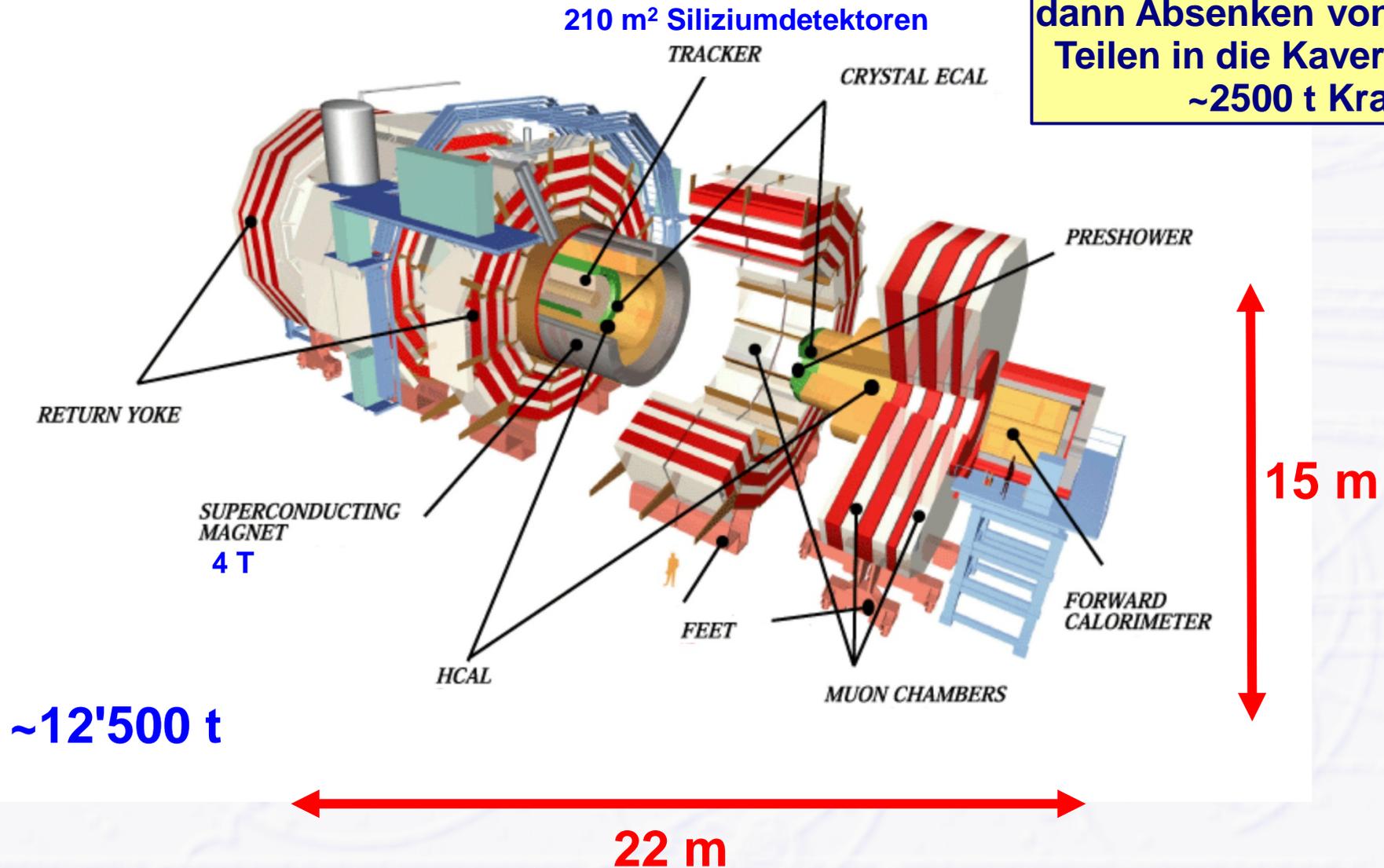
◦ exponentieller Anstieg von Meetings, Telefon + Video Konferenzen...

# ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)



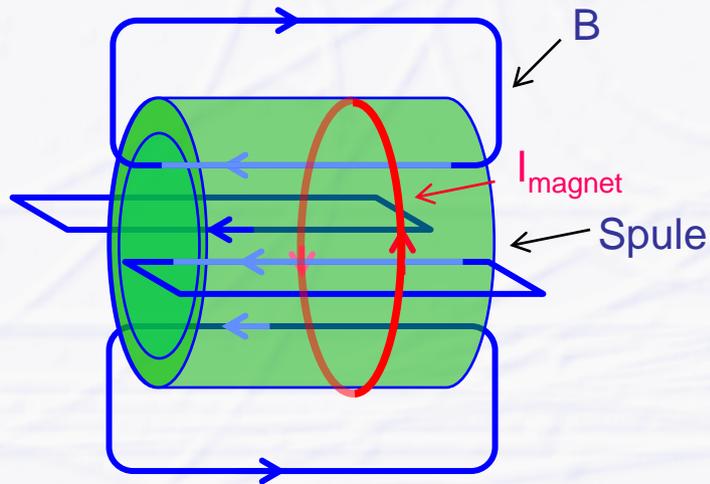
# CMS (Compact Muon Spectrometer)

**Aufbau an der Oberfläche,  
dann Absenken von 5 großen  
Teilen in die Kaverne durch  
~2500 t Kran**



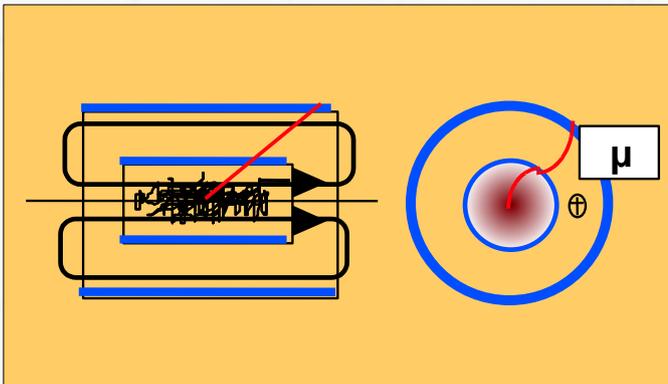
# Magnetkonzepte der LHC Experimente

## Solenoid (mit Magneteisen)

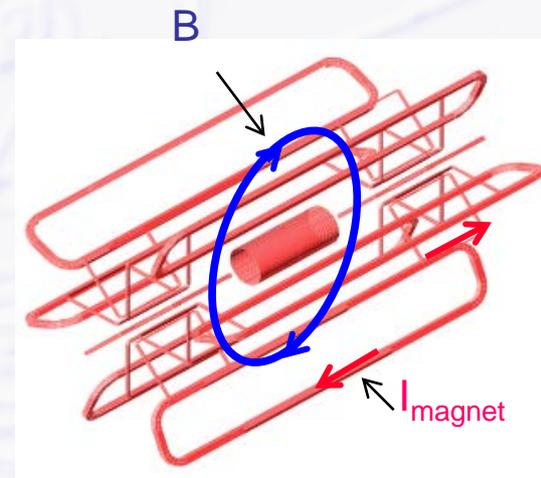


- + großes homogenes Feld innerhalb der Spule
- benötigt Eisenrückflußjoch (magn. Kurzschluß)
- begrenzte Größe (Kosten)
- Spulendicke (Strahlungslängen)

CMS, ALICE, LEP Detektoren

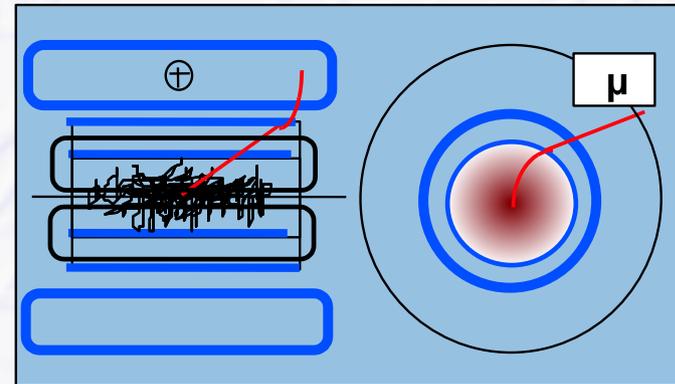


## Toroid (Luftspule)

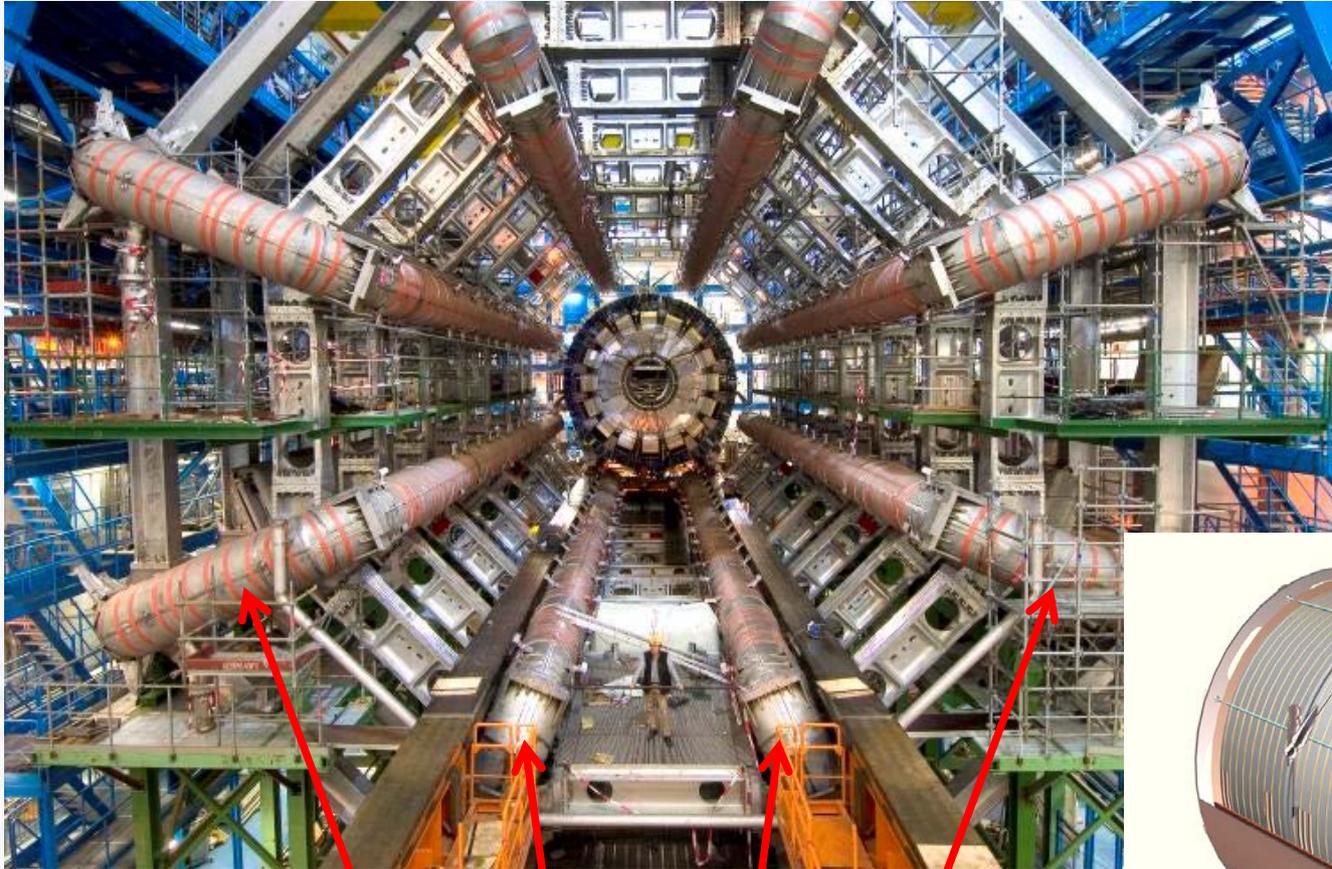


- + kann großes Volumen abdecken
- + Luftspule, keine Eisen, wenig Material
- benötigt weiteren kleinen Solenoid für Hauptspurdetektor
- kein homogenes Feld
- sehr komplexer Aufbau

ATLAS



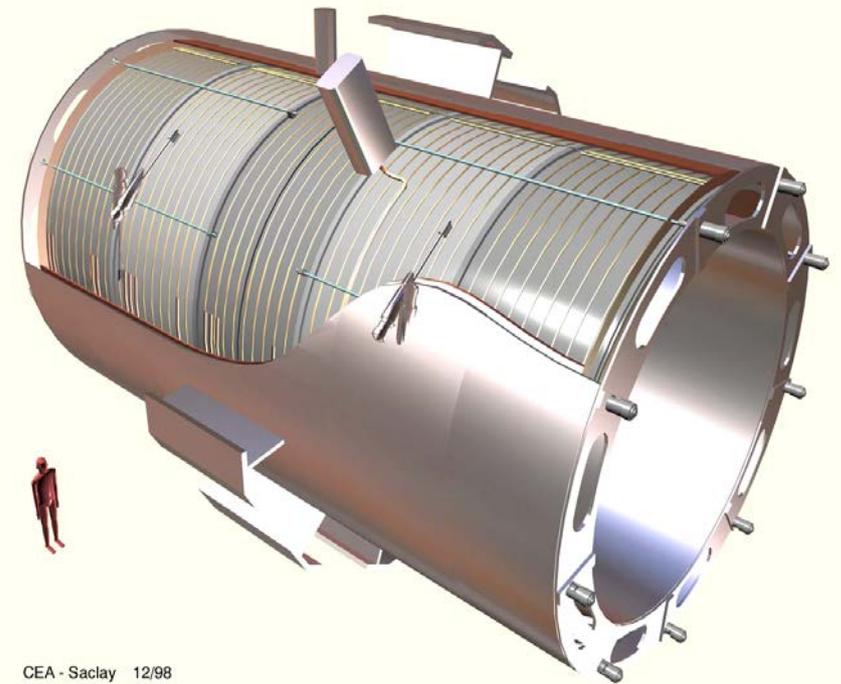
# ATLAS und CMS Spulen



**ATLAS Barrel Toroid Spulen**

Herbst 2005

**CMS Solenoid  
(5 Segmente)**



CEA - Saclay 12/98  
DSM DAPNIA STCM  
K 0000 004

CMS Solenoide

# Vergleich ATLAS – CMS

## ● Unterschiedliche Detektorkonzepte der beiden großen LHC Detektoren (beabsichtigt bei Genehmigung)

### → ATLAS

- kleiner Hauptspurdetektor mit mittelgroßem Magnetfeld (kleiner 2 T Solenoid)
- Elektron-Identifizierung mittels Übergangsstrahlungsdetektor
- sampling Kalorimeter mit hoher Granularität ausserhalb des Solenoid
- Toroidspulen (Luftspulen) für gute Myon Impulsmessung

**Betonung auf granulares Kalorimeter und gute Myonmessung**

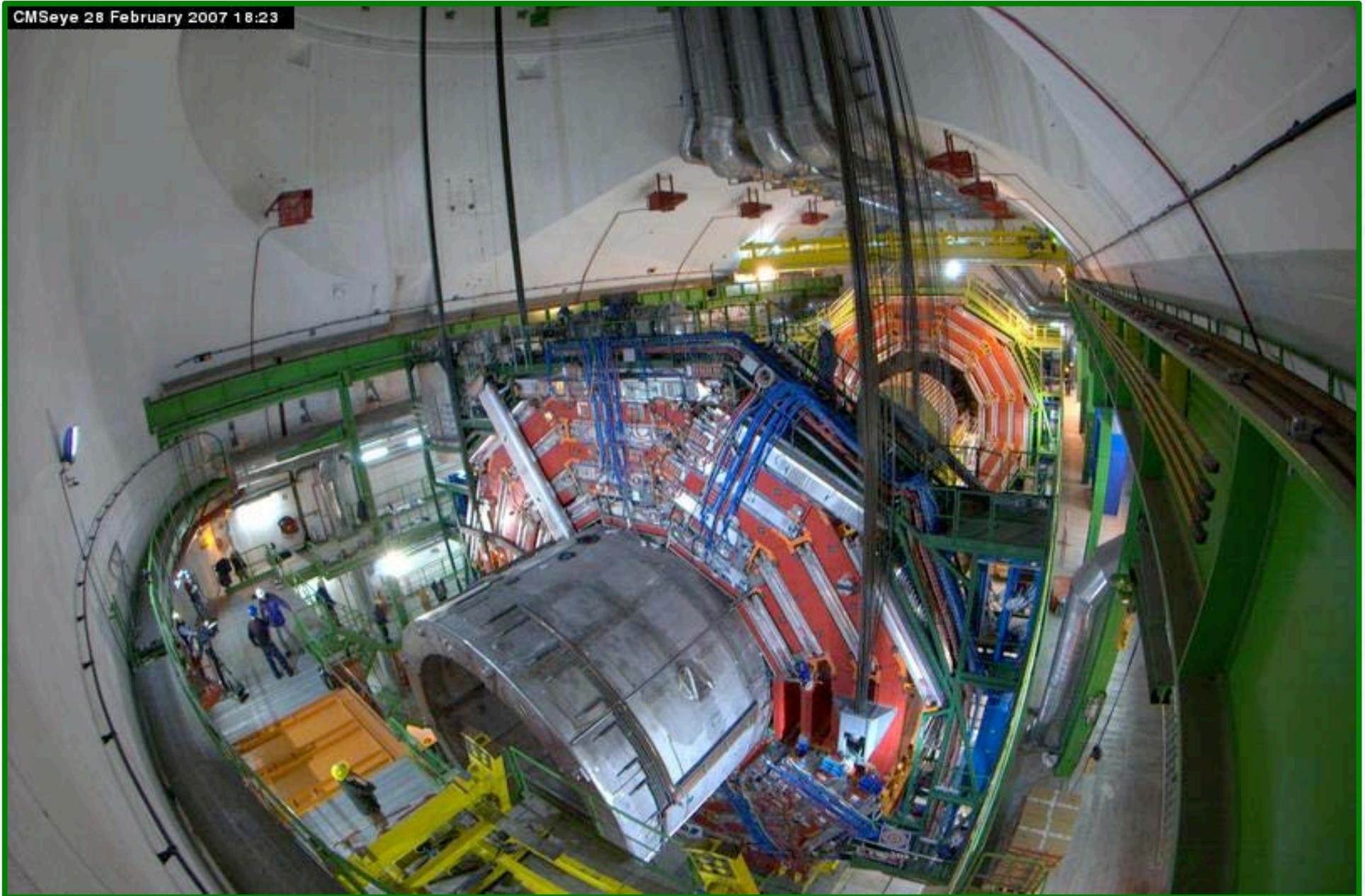
### → CMS

- großer Hauptspurdetektor mit hohem Magnetfeld (großer 4 T Solenoid)
- kein Spezialdetektor für Elektron-Identifizierung
- homogenes Kristallkalorimeter mit guter Energieauflösung immerhalb des Solenoid

**Betonung auf gute allgemeine Spurmessung und gute Energieauflösung**

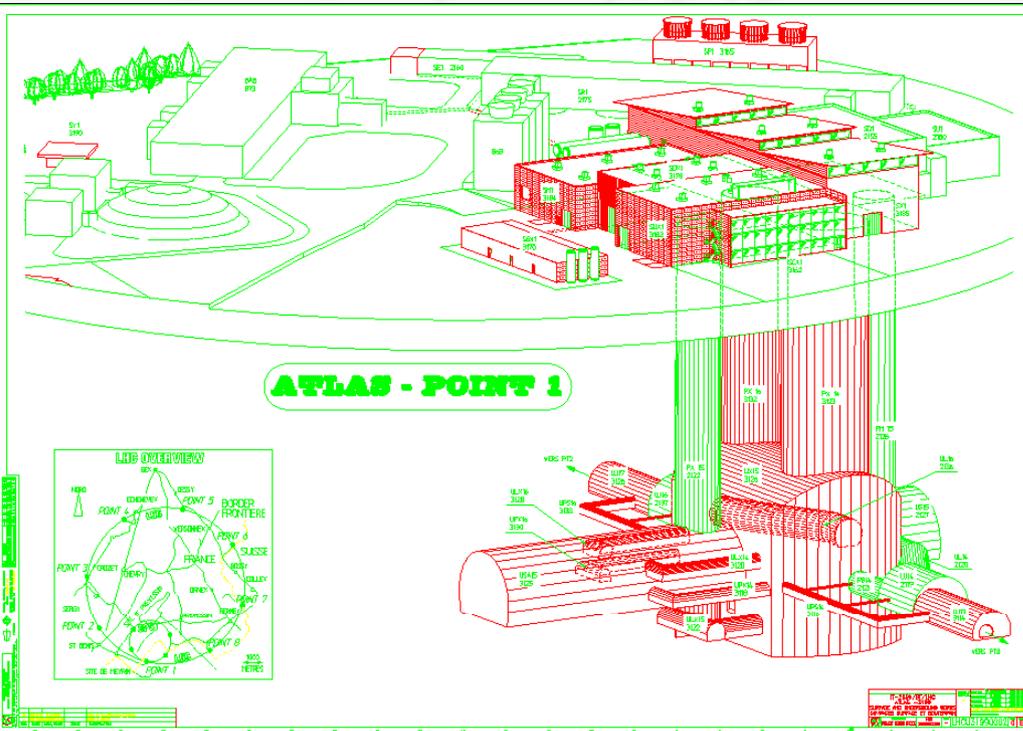
## ● Trotz unterschiedlicher Konzepte vergleichbare Leistungsfähigkeit bei der Physikanalyse

# Abenkung des 2000 t CMS Mittelteils



# ATLAS unterirdische Kaverne

Große Kaverne,  
2 Materialschächte 18m + 12m Ø,  
2 kleine Schächte für Fahrstühle + Treppen



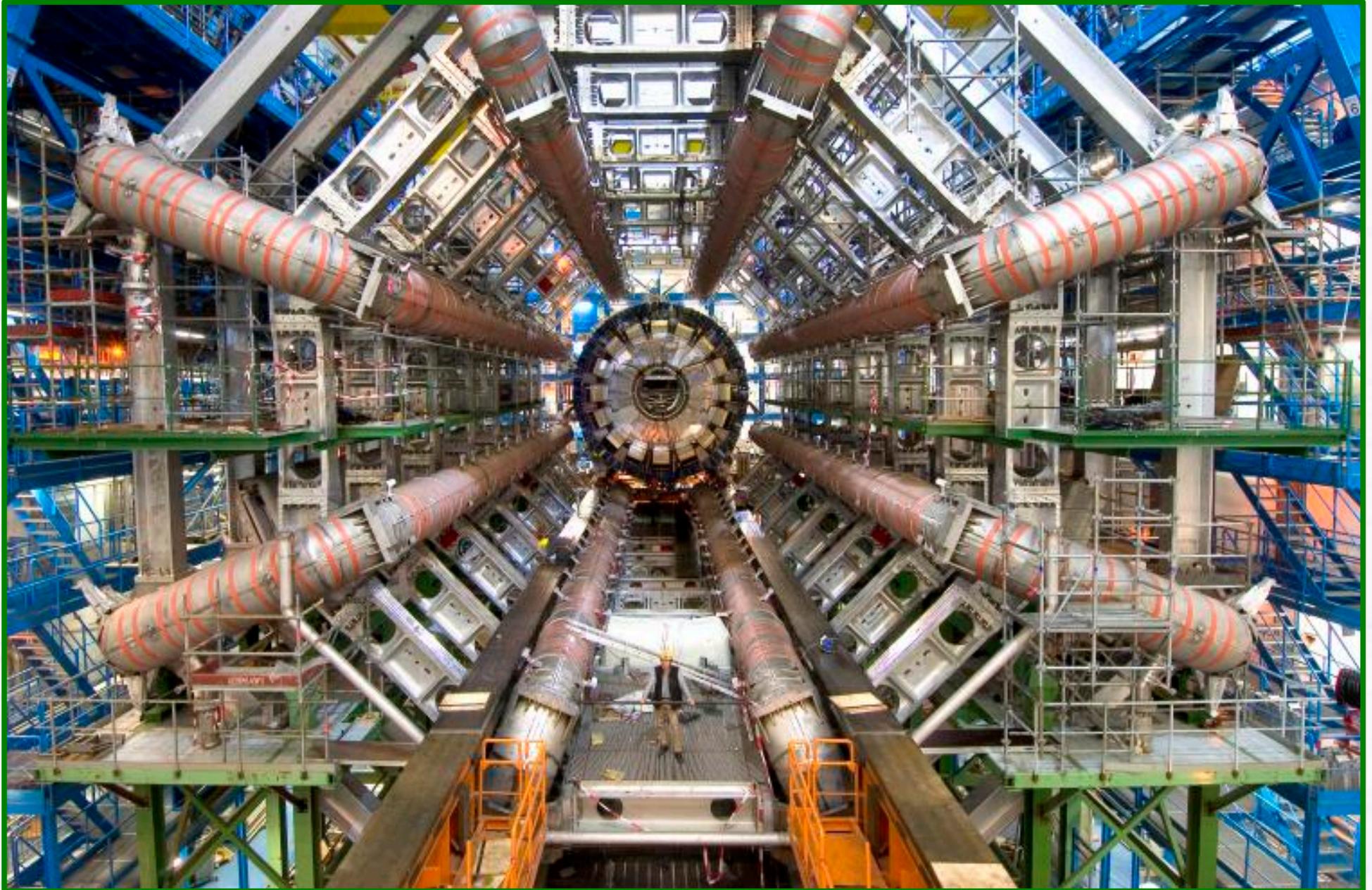
# Beginn des ATLAS Detektoraufbaus



**Transport und Absenkung der ersten supraleitenden Barrel Toroid Spule**



# ***ATLAS Barrel Toroid fertiggestellt*** (Nov 2005)



# Detektortechnologie und Kunst

Bühnenbild der Oper "Les Troyens" in Valencia, Oktober 2009



# Was sollte man wissen?

## ● Beschleunigung von Teilchen erfolgt über elektrische Felder

- = nur elektrisch geladene Teilchen können beschleunigt werden
- Elektro-magnetische Wellen (hochfrequente Radiowellen) werden in eine Beschleunigerstrecke eingespeist. Das elektrische Feld der Radiowellen erzeugt die Beschleunigung.

## ● Bei Ringbeschleunigern lenken Magnetfelder die Teilchen herum und führen sie zurück zur Beschleunigerstrecke

- **Magnetfelder beschleunigen nicht** und erhöhen nicht die Energie der Teilchen
- Hohe Geschwindigkeit bzw. hohe Energie wird erreicht durch **vielfaches, wiederholtes Beschleunigen** in der Beschleunigungsstrecke
- Bei Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit nimmt die Geschwindigkeit nur noch wenig zu, nur **die Energie der Teilchen erhöht sich**
- Teilchen werden relativistisch und erfahren eine Massenzunahme (= höhere Energie), aber keine wesentliche Geschwindigkeitserhöhung
- Die Frage: “Wie nah sind die Teilchen an der Lichtgeschwindigkeit?” stellt sich Teilchenphysikern nicht wirklich, es zählt die Energie der Teilchen

# Was sollte man wissen?

## ● Aufgabe von Teilchendetektoren

- Vermessen einer Teilchenwechselwirkung mit möglichst hoher Effizienz und Vollständigkeit: Impuls + Energie aller Teilchen

## ● Impulsmessung (Spurdetektor)

- innerste Detektorlage, Spurpunkte entlang der Teilchenbahn
- gas-basierte und Silizium-Halbleiterdetektoren
- Impulsmessung über Krümmung im Magnetfeld
- Myondetektoren als äusserte Detektorlage

## ● Energiemessung (Kalorimeter)

- schweres Detektormaterial, Bildung und Nachweis eines Teilchenschauers
- elektro-magnetisches Kalorimeter: leichte Teilchen (Elektronen, Positronen, Photonen)
- Hadronkalorimeter: schwere Hadronen (Pionen, Kaonen, Protonen, Neutronen)
- homogenes Kalorimeter: gute Energieauflösung, “sampling”: Schauerprofil + -Position

## ● LHC Detektoren

- unterschiedliche, komplementäre Detektorkonzepte
- sehr hohe Primärdatenrate, benötigt effizienten Trigger zur Filterung
- Datenspeicherung und Auswertung im Grid