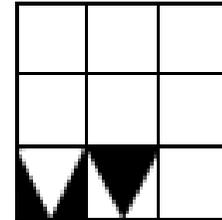




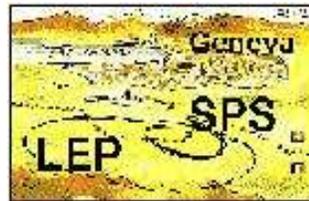
# Einblicke in die Elementarteilchenphysik,

oder eine kurze Reise von der

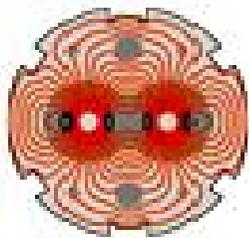


Münchner  
Volkshochschule

über



...

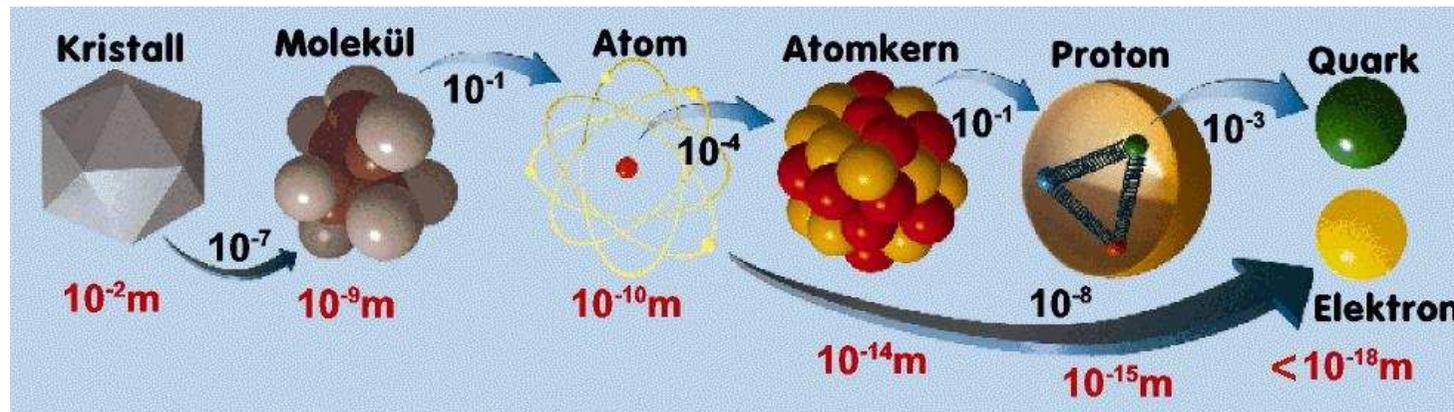


... ins Innerste der Welt.

Reiseleiter: Richard Nisius ([nisius@mppmu.mpg.de](mailto:nisius@mppmu.mpg.de))



# Dass ich erkenne, was die Welt, im Innersten zusammenhält



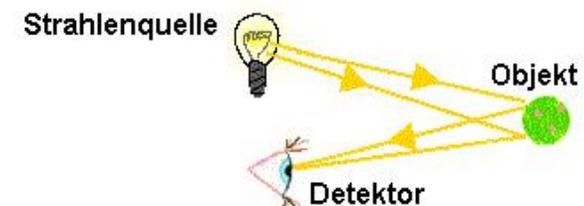
Die zwei Hauptfragen der Elementarteilchenphysik sind:

- 1) **Welches sind die kleinsten Bausteine der Natur, und was sind ihre Eigenschaften?**
- 2) **Was sind die fundamentalen Wechselwirkungen dieser Bausteine?**

Daraus ergibt sich die Frage:

- **Wie kann man kleinste Strukturen und ihre Wechselwirkungen sehen, d.h. in irgendeiner Form messen.**

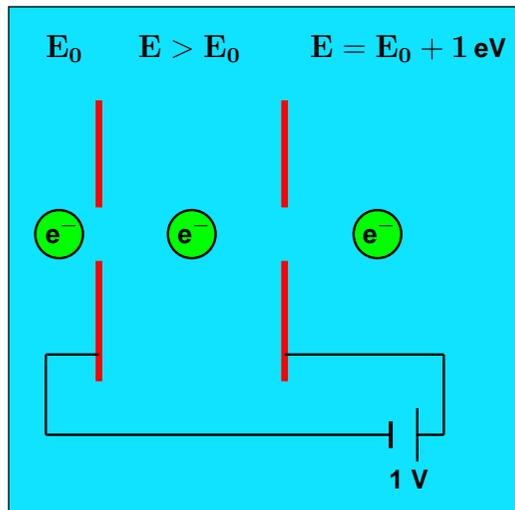
**Wir brauchen einen Ersatz für:**





# Die Elementarladung

- Die Elementarladung  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Coulomb ist die elektrische Ladung  $Q$  eines Elektrons ( $Q_{\text{Elektron}} = -Q_{\text{proton}}$  ein ungelöstes Rätsel!).
- Ein Elektron, das eine Spannung von einem Volt durchläuft, erhält eine Energie von  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .



## Gebräuchliche Einheiten:

kilo eV = keV = 1000 eV =  $10^3$  eV  
mega eV = MeV = 1000 000 eV =  $10^6$  eV  
giga eV = GeV = 1000 000 000 eV =  $10^9$  eV

- Die Energie von 1 GeV ist viel für ein einzelnes Elektron, aber makroskopisch ist sie winzig. Sie reicht gerade mal um eine Taschenlampe (1.6 Watt) für 0.000 000 000 1 s zum Leuchten zu bringen.



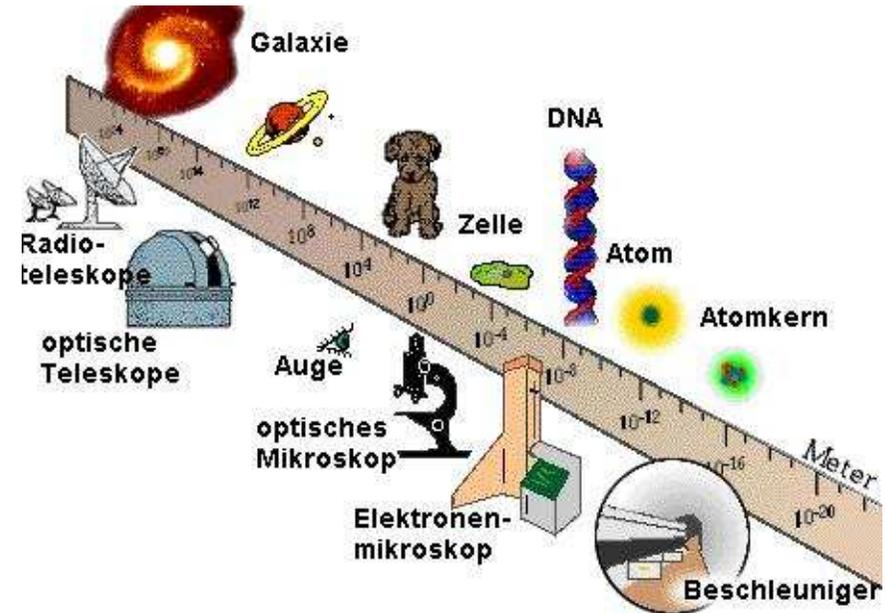
# Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation

- Die Quantenmechanik macht nur Wahrscheinlichkeitsaussagen, d.h. Aussagen über das mittlere Ergebnis vieler Ereignisse. Das Einzelereignis jedoch ist unbestimmt!
- Die Unbestimmtheitsrelation

$$\Delta x \Delta p \approx \hbar$$

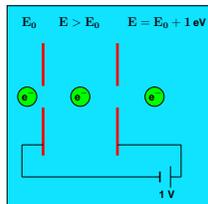
bestimmt das Auflösungsvermögen. Dabei ist  $\hbar = 6.582 \cdot 10^{-16}$  eVs das Plancksche Wirkungsquantum.

- Faustformel:  $\Delta x \Delta p = 0.2 \text{ fm GeV}$ . Ein Teilchen mit Impuls 1 GeV kann also eine Struktur der Größe 0.2 fm auflösen (1 fm =  $10^{-15}$  m).

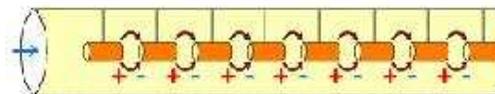


- Um diese kleinen Strukturen sehen zu können müssen wir demzufolge

unsere



durch einen



ersetzen.



# Vom Hausbeschleuniger zum Kreisbeschleuniger



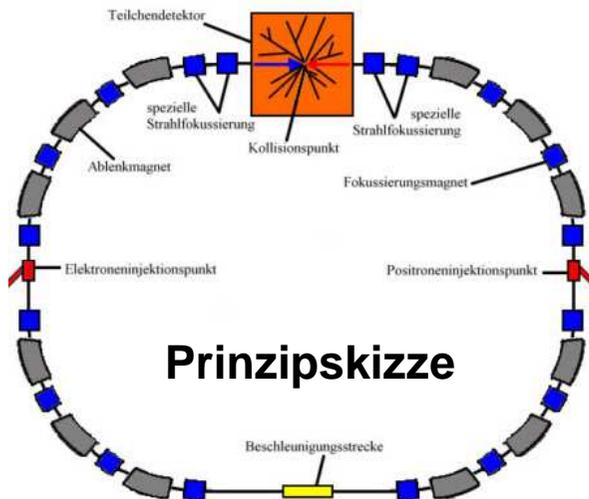
## Funktionsprinzip

Energiezufuhr durch elektrisches Feld und Ablenkung durch Magnetfeld  $\vec{F} = Q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

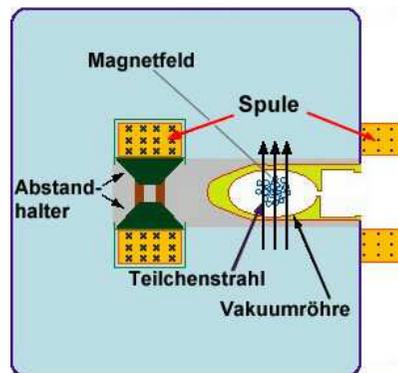
## Leistungsmerkmale

Beschleunigtes Objekt:	Elektron
Spannung:	20 kV
Auflösungsvermögen:	10 000 fm

Im Prinzip nicht schlecht, aber ein bißchen mehr sollte es schon sein!



## Ablenkung

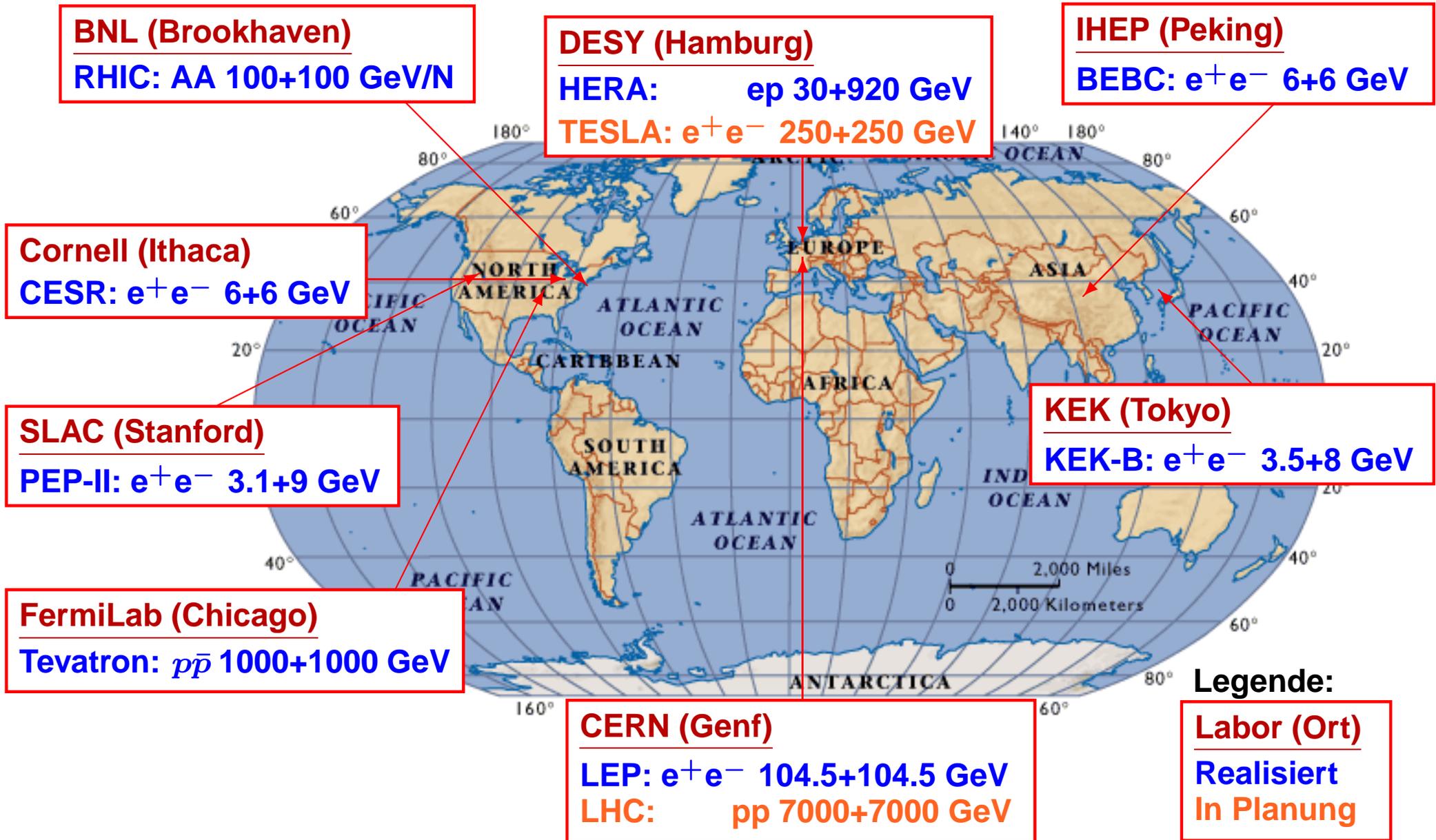


## Beschleunigung





# Auszug aus der Welt der Beschleuniger

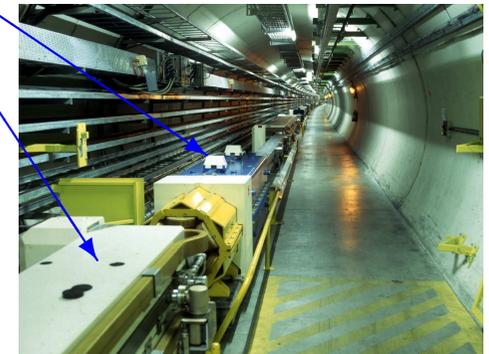
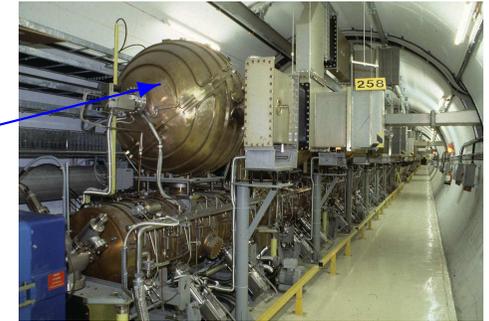
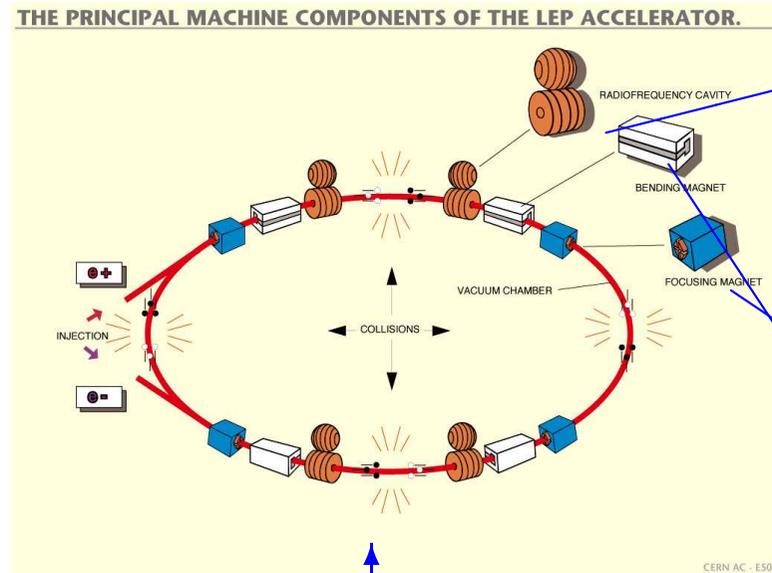




# Ein Beispiel - Der LEP (1989 - 2000<sup>†</sup>) Beschleuniger

## Technische Daten

Länge	26.7 km
Gradient	7.5 MV/m
Energie	104.5 GeV
$N_{e^-}$	$10^{12}$



Der Weg ist manchmal ganz schön lang.





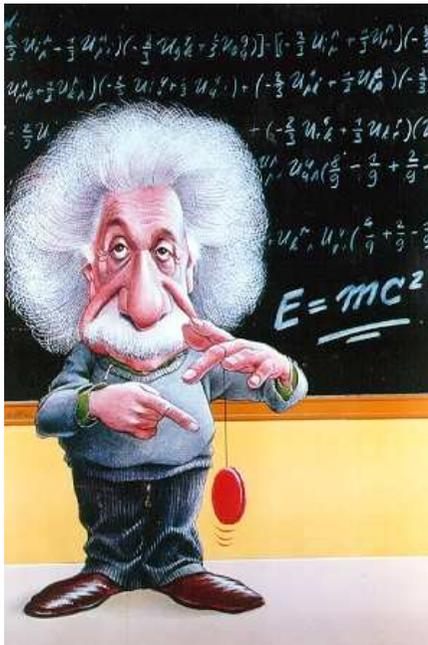
# Der Energiebegriff

Energie hat viele Formen, die ineinander umgewandelt werden können.

Beispiele sind:

- Die Bewegungsenergie (z.B. Wind zum Segeln).
- Die Lage- oder potentielle Energie (z.B. Skilift).
- Die Wärme (z.B. Aufheizen der Bremscheiben beim Abbremsen).

Eine im Alltag nicht so gebräuchliche Form der Energie ist die Masse.



$$E = mc^2$$

$m$  = Masse,  $c$  = Lichtgeschwindigkeit

**Masse und Energie sind äquivalent (proportional)!  
Energie lässt sich in Teilchen / Masse umwandeln  
und umgekehrt!**

Massen von Teilchen werden in  $\text{eV}/c^2$  gemessen,  
z.B.  $m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$  und  $m_p = 0.938 \text{ GeV}/c^2$



# Sehen als Streuprozess

Es gibt zwei Arten von Experimenten

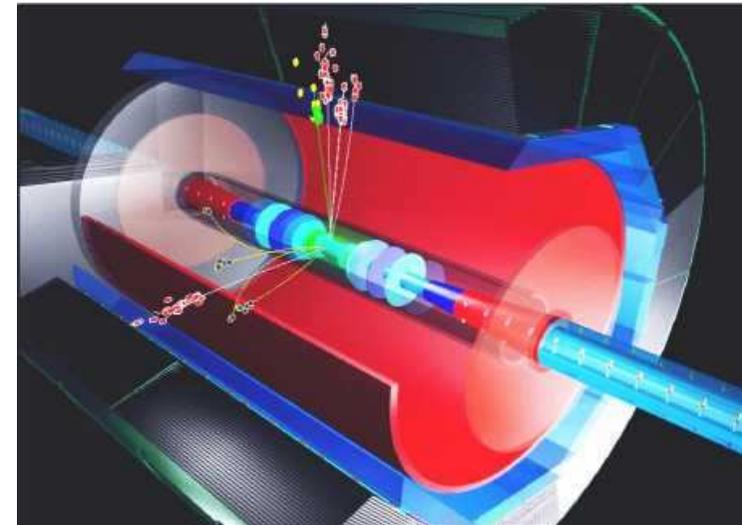


und

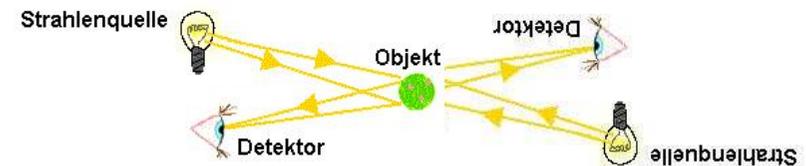


## Ein Colliding-Beam Detektor

Viele Reaktionsprodukte mit unterschiedlichen Eigenschaften.  
⇒ Zwiebelschalentechnik mit verschiedenen Schalen zur Impuls- oder Energie-Messung von geladenen und neutralen Teilchen.



Das Prinzip bleibt gleich

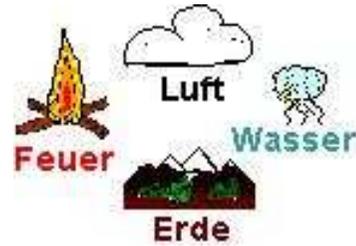


**Erst die Rekonstruktion aller Reaktionsprodukte gibt Aufschluß über die Reaktion.**



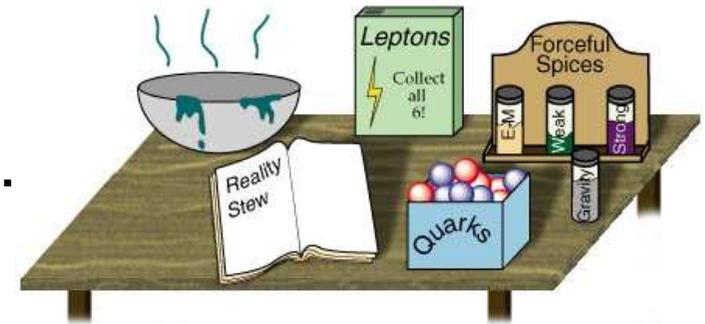
# Was wir heraus gefunden haben

Es war ein langer Weg von den vier Elementen...



400 v.Chr.

...bis zum heutigen (2000++) Bild des...



...Kochrezepts der Natur.

## Der Stand der Dinge

Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom
	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ $\mu$ - Neutrino	$\nu_\tau$ $\tau$ - Neutrino
Leptons	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
	I	II	III

- Es gibt drei Familien von Leptonen und Quarks.
- Sie sind Fermionen (Spin = 1/2), und nur die erste Familie bildet stabile Materie.
- Zu jedem dieser Teilchen gibt es ein Antiteilchen mit umgekehrten Ladungen aber sonst identischen Eigenschaften.
- Die Massen sind sehr verschieden und niemand weiß warum. Die Massen reichen von etwa 0 für Neutrinos bis 175 GeV (Atom mit  $A = 183$ ) für das top Quark.
- Die Wechselwirkungen der Fermionen werden durch den Austausch von Bosonen (Spin = 1,2) beschrieben.



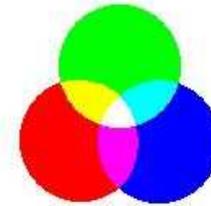
# Der Quark-Baukasten zur Konstruktion von Hadronen

## Welche Bausteine gibt es

- Quarks,  $q$ , kommen in drei Farben vor **Rot**, **Grün** oder **Blau**.
- Antiquarks,  $\bar{q}$ , haben Antifarbe, Antirot (**cyan**), Antigrün (**Magenta**) oder Antiblau (**gelb**).
- Quarks haben eine elektrische Ladung  $Q$  von  $+2/3$  (u,c,t) oder  $-1/3$  (d,s,b) und  $Q_q = -Q_{\bar{q}}$

## Die Bauregeln

- Es gibt nur farblose Teilchen (drei Farben oder Farbe-Antifarbe).
- Es gibt nur Teilchen mit ganzzahliger elektrischer Ladung.

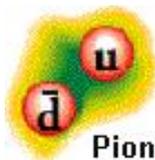


## Einfachste Gebilde



Proton

$$p = uud \quad \text{und} \quad Q = +2/3 + 2/3 - 1/3 = 1.$$



Pion

$$\pi^+ = u\bar{d} \quad \text{und} \quad Q = +2/3 + 1/3 = 1.$$



# Die fundamentalen Wechselwirkungen

Wechselwirkung	Beispiel	Boson	Masse [GeV/c <sup>2</sup> ]	Elektrische Ladung [e]	rel. Stärke (Reichweite)
Gravitation	Erdanziehung	Graviton	0	0	10 <sup>-38</sup> (∞)
elektromagnetisch	Coulomb Anziehung	Photon γ	0	0	10 <sup>-2</sup> (∞)
stark	Quark Confinement	Gluon g	0	0	1 (1 fm)
schwach	Neutron Zerfall	Z W <sup>±</sup>	91.2 80.4	0 ±1	10 <sup>-5</sup> (10 <sup>-3</sup> fm)



# Die Gravitation - eine gute alte Bekannte

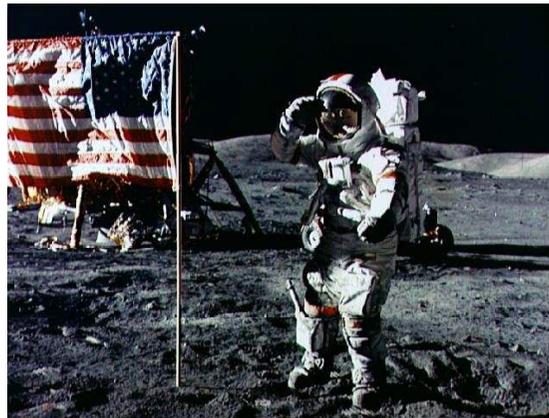
Die Gravitation bestimmt die Umlaufbahnen.



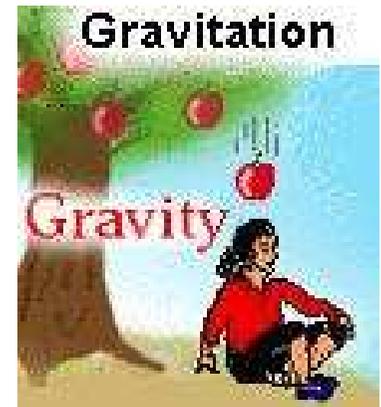
Wir können sie berechnen und kleinere Ausflüge planen.



Sie hilft uns beim Gehen, mal mehr und mal weniger.



Sie ist aber auch verantwortlich für Unfälle.



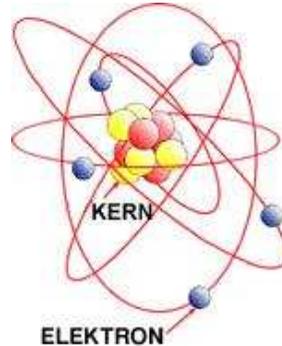
Obwohl wir die Gravitation eigentlich ganz gut beherrschen, ist es uns nicht gelungen, sie in das Wechselwirkungsbild einzupassen. **Das Graviton ist nicht gefunden!**



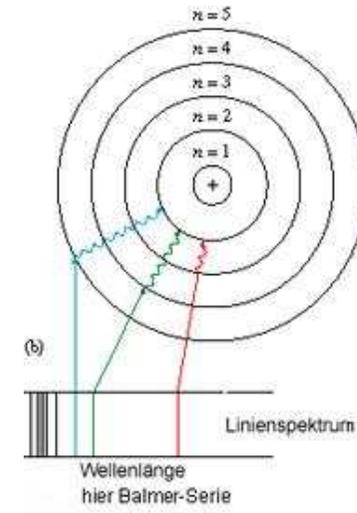
# Die elektromagnetische Wechselwirkung ist überall

## Mikroskopisch

Im Atom, als Bindungskraft zwischen Kern und Elektronen...

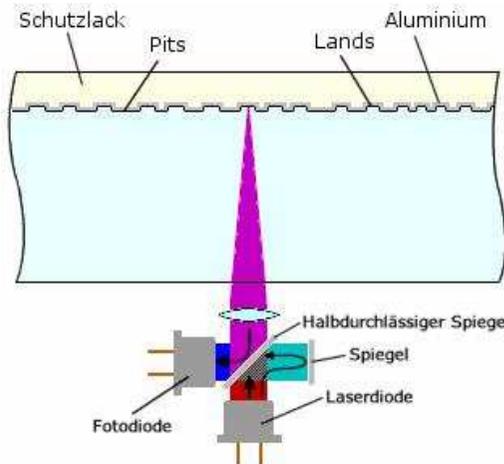


und bei den den Übergängen der Elektronen in der Hülle.

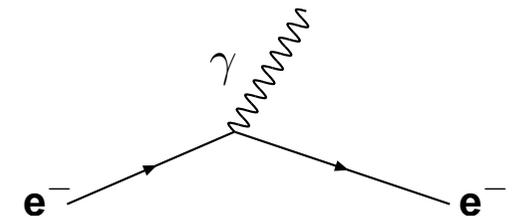


## Makroskopisch

Beim Lesen von  's mit einem Laser.



## Ein Elementar-Ereignis





# Die schwache Wechselwirkung

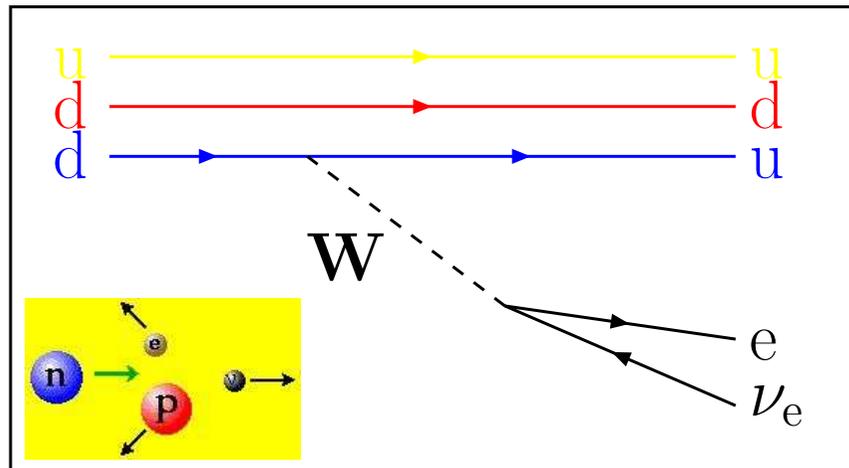


Die

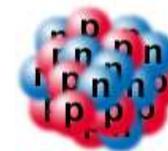
ist zuständig für den



Das einfachste Beispiel ist der Neutron-Zerfall.



Das Umgekehrte  $p \rightarrow n e^+ \nu_e$  ist auch möglich, z.B. bei



Umwandlungen.

**Zum Glück ist  $m_n > m_p$  (wenn auch nur um 1 Promille) and damit das Proton stabil!**



# Die Starke Wechselwirkung



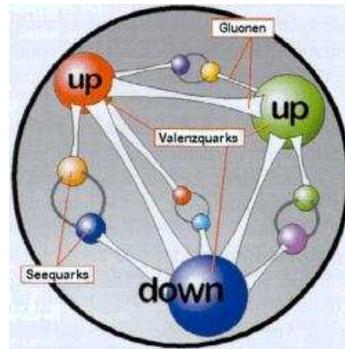
Die

ist zuständig für den

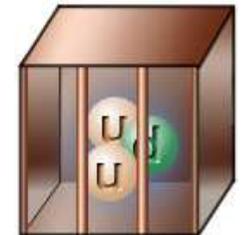


zwischen den Quarks.

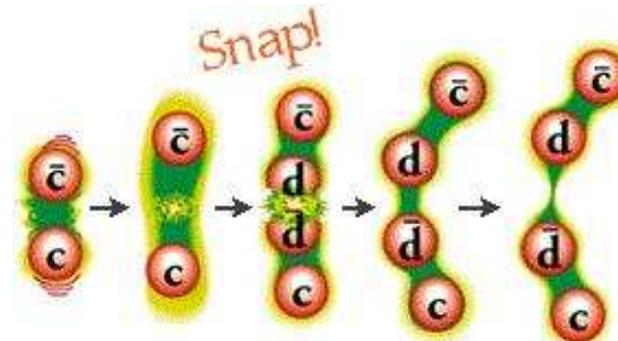
Das Proton wird zu einem recht komplexen Gebilde.



Die Kraft steigt mit dem Abstand (wie beim Gummiband) und die Quarks bleiben eingesperrt.



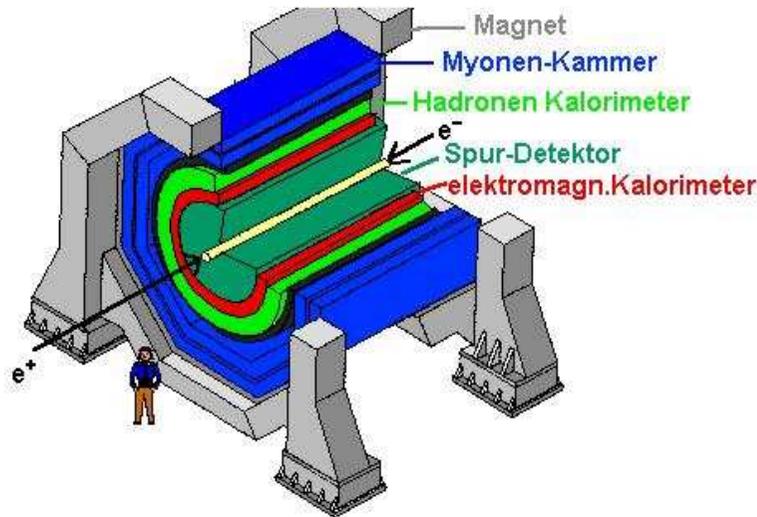
Wenn der Abstand zu groß wird, reicht die Energie um neue Quarks zu erzeugen.



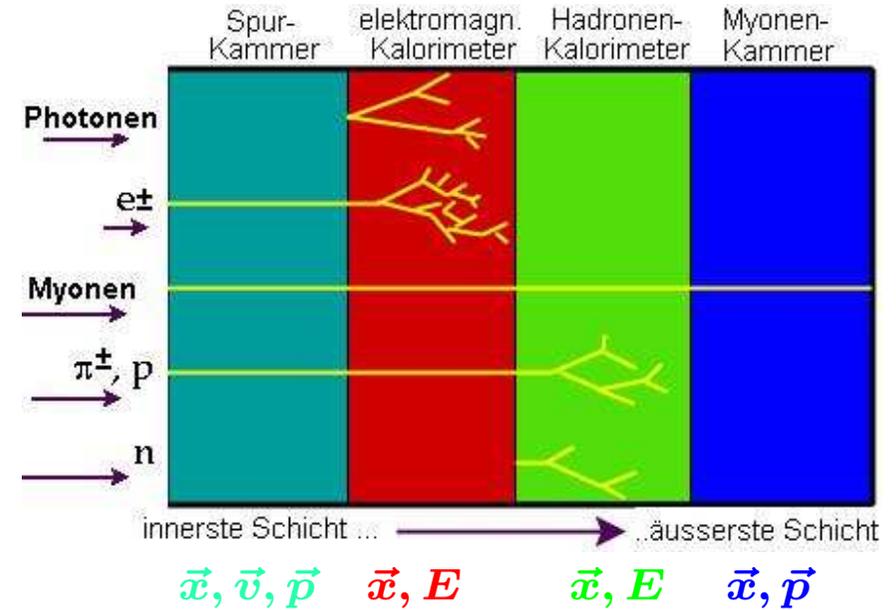


# Das Bauprinzip von Teilchen-Detektoren und ein Beispiel

Mit dem Zwiebelschalenprinzip ...

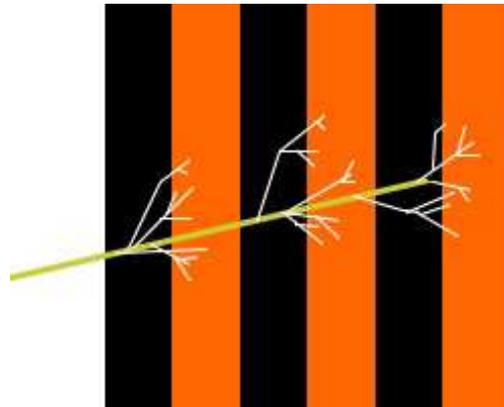


... kriegen wir euch (fast) alle



Elektromagnetisches Kalorimeter ( $e, \gamma$ )

- Aufschauern im Absorber (z.B. Bleiplatten).
- Messen im sensitiven Material (z.B. Licht in einem Szintillator).
- Die Lichtmenge gibt dann Aufschluß über die Teilchenenergie.



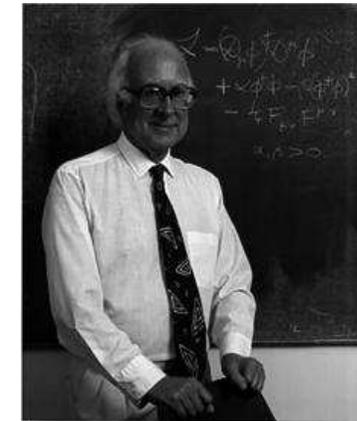


# Das Higgs-Boson - ein Konzept zur Massenerzeugung

## Die Vermutung (1965)

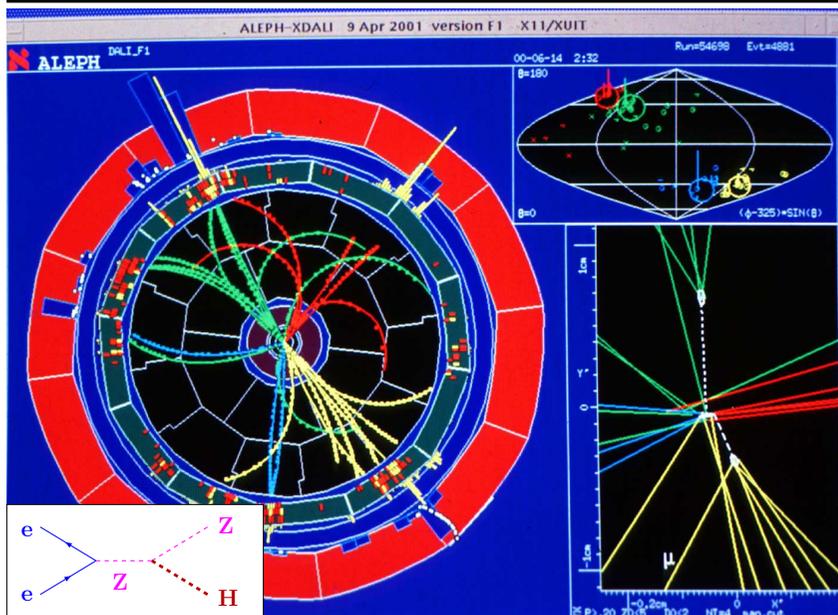
- Massen werden durch Wechselwirkungen mit einem Hintergrundfeld, dem **Higgs**-Feld erzeugt.
- Je stärker die Kopplung um so größer die Masse.
- Die Existenz des **Higgs**-Boson wird vorhergesagt.

## Der Vater des Gedankens



Peter Higgs

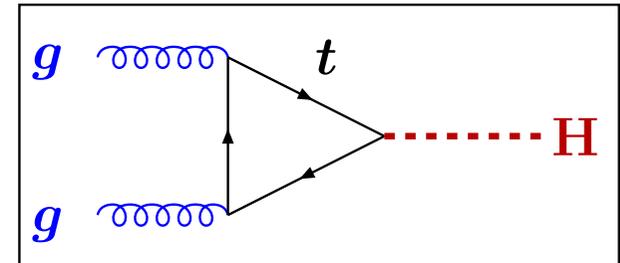
## Higgs Suche bei LEP eine Evidenz ?



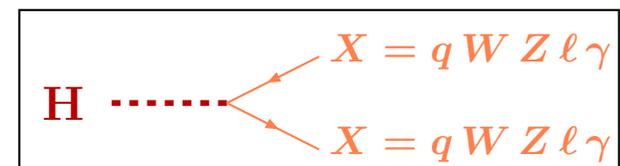
Ein paar Ereignisse sind nicht genug.

## Die Higgs Suche am LHC

Produktion:



Zerfall:





# Der LHC - ein Proton-Proton Beschleuniger (2007<sup>++</sup>)

**Alice**

Schwere Kerne, ...

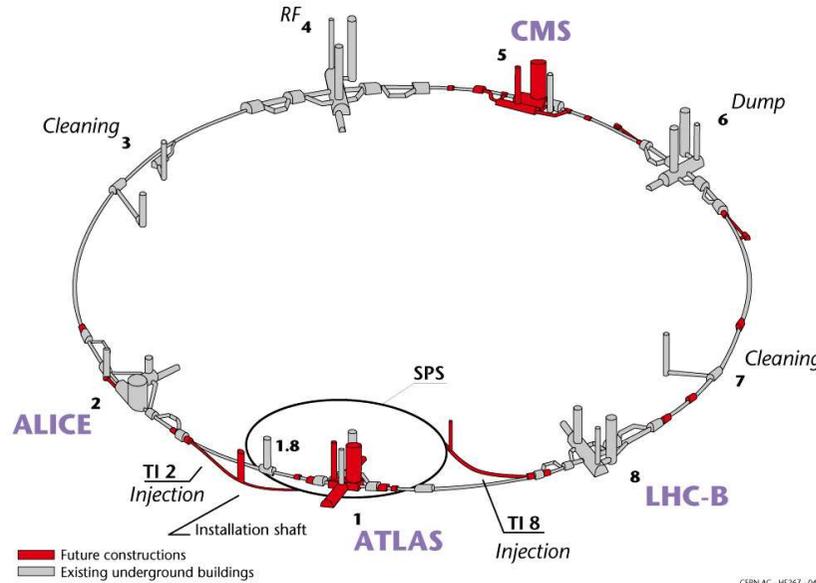
**LHC-B**

Materie ↔ Antimaterie,  
...

**ATLAS / CMS**

Higgs Produktion, ...

**Das Herzstück des LHC -  
die supraleitenden Magnete**



**Technische Daten**

$L = 26.7 \text{ km}$

$E_p = 7 \text{ TeV}$

$N_p = 1.1 \cdot 10^{11} / \text{Strahl}$

**Lumi Erwartungen**

$10 \text{ fb}^{-1} / \text{a}$  beim Start

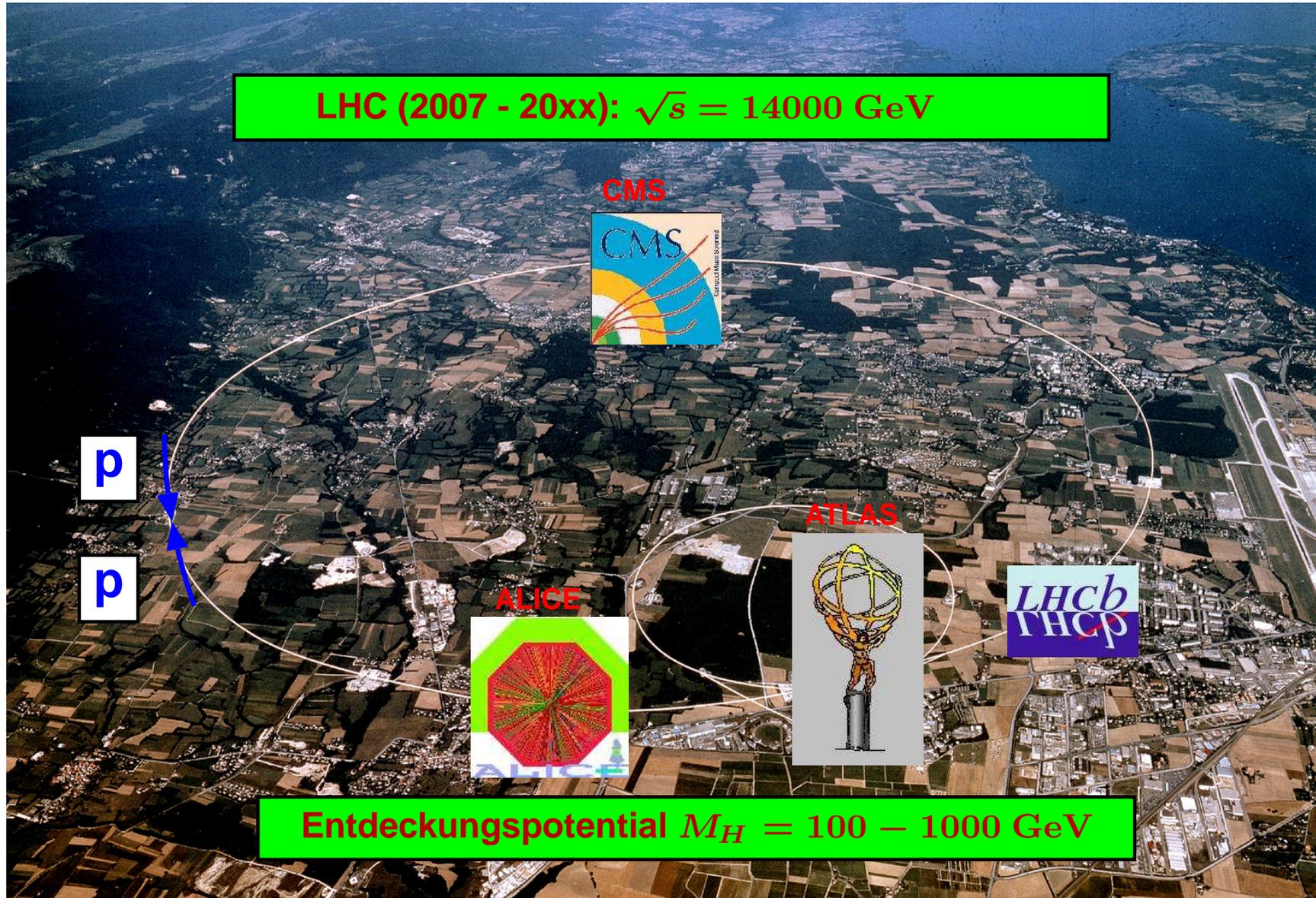
$100 \text{ fb}^{-1} / \text{a}$  nominal



Länge	15 m
Gewicht	23.8 t
B-Feld	8.3 T
Temperatur	1.9 K
Strom	12000 A
Energie	7.1 MJ



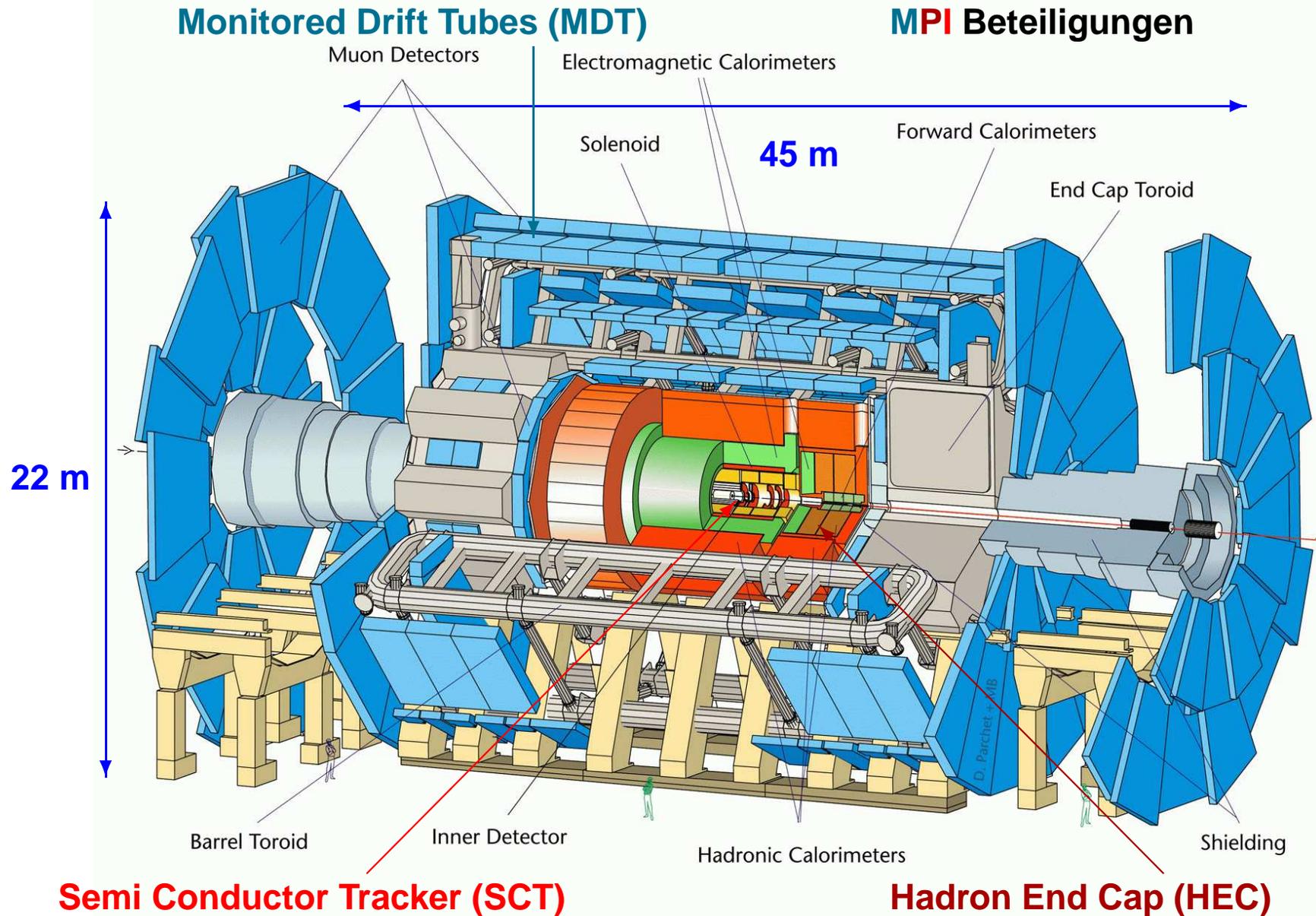
# Von LEP zum LHC - eine Zeitreise





# Der ATLAS Detektor

0712/mb-26/06/97





# Bau einer MDT Kammer



**Beim Bau gibt es einiges zu tun**

- 432 Rohre a 3.8 m Länge montieren.
- Die Präzision: 20  $\mu\text{m}$  (Haardicke).
- 1728 (dichte!) Gasverbindungen.
- Eine Kammer wiegt ca. 350 kg.



**Sehr präzise Werkzeuge werden benötigt.**



# Massenproduktion der Kammern



## Es gibt jede Menge Kammern

- Für ATLAS werden 1200 MDT Kammern an 13 Instituten produziert.
- Das MPI baut davon 88 Stück.
- Das macht für uns 38016 Rohre und 152064 Gasverbindungen.

## Eine komplexe Logistik ist nötig

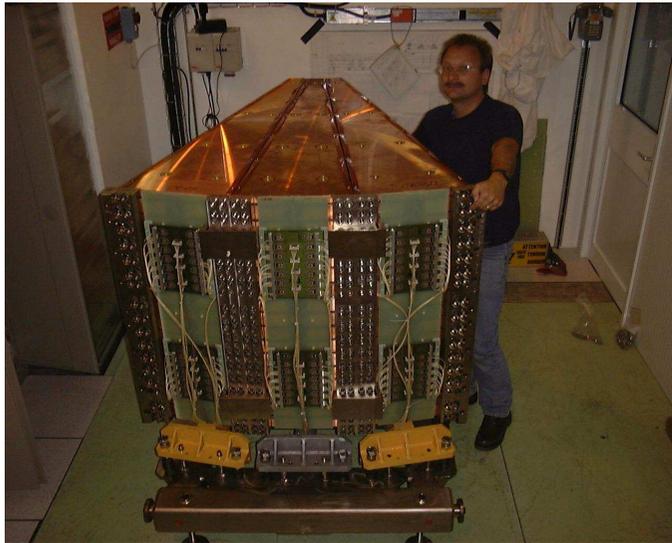
- Die Kammern werden mit kosmischen Myonen getestet.
- Sie werden mehrere Jahre gelagert.
- Der Transport muß sicher sein.

**Die Produktion dauert ca. 6 Jahre.**

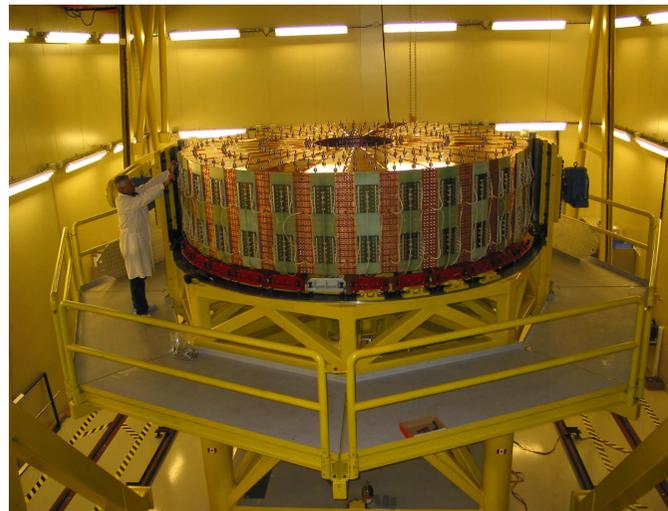




# Das Hadronische Endcap Kalorimeter



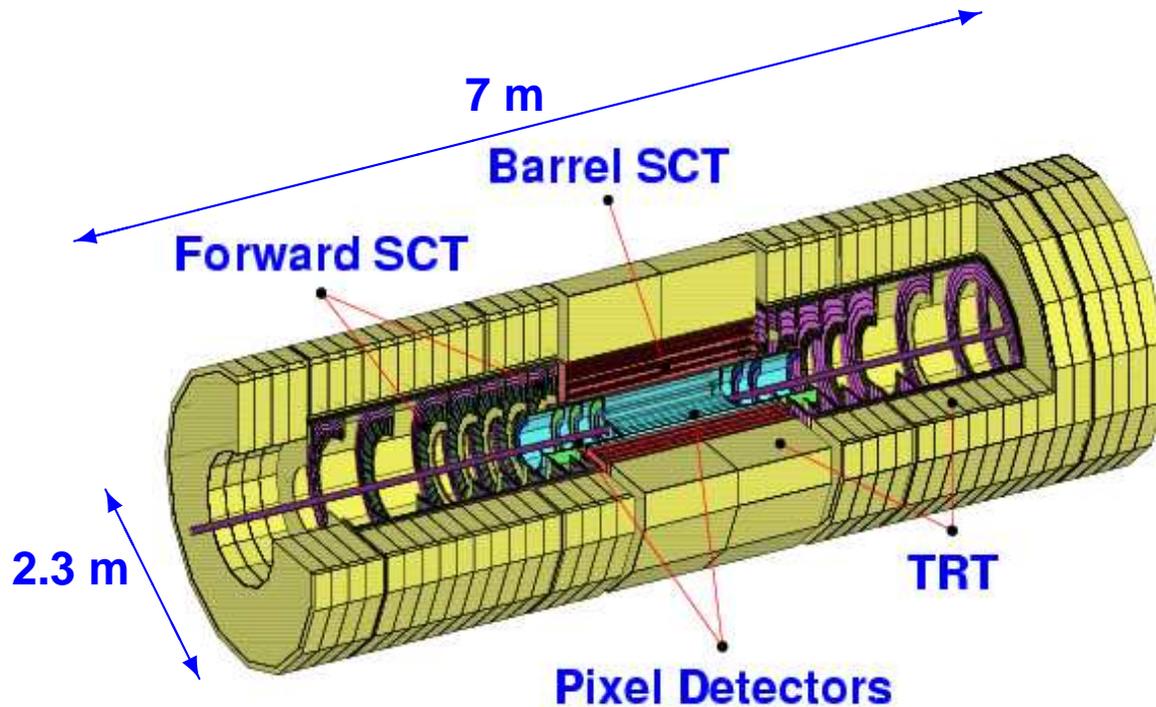
- Die Abschwächung der durch die Hadronen ausgelösten Teilchen-Schauer erfolgt durch 25 mm dicke Kupferplatten. Das sensitive Material ist flüssiges Argon.
- Es müssen je 32 Module zu Rädern zusammengefügt werden. Am MPI werden 27 dieser Module gebaut.
- Insgesamt gibt es 4 Räder. Jedes Rad hat einen Radius von 2.1 m und ein Gewicht von 67 t.



**Das Zusammenfügen der einzelnen Module zu einem kompletten Rad ist Maßarbeit.**



# Der innere Spurdetektor von ATLAS



## Die Silizium Detektoren

### Der Pixel Detektor

- Radius 4.8 – 16 cm
- 3 Lagen, 8 Scheiben
- $1.4 \cdot 10^8$  Auslesekanäle

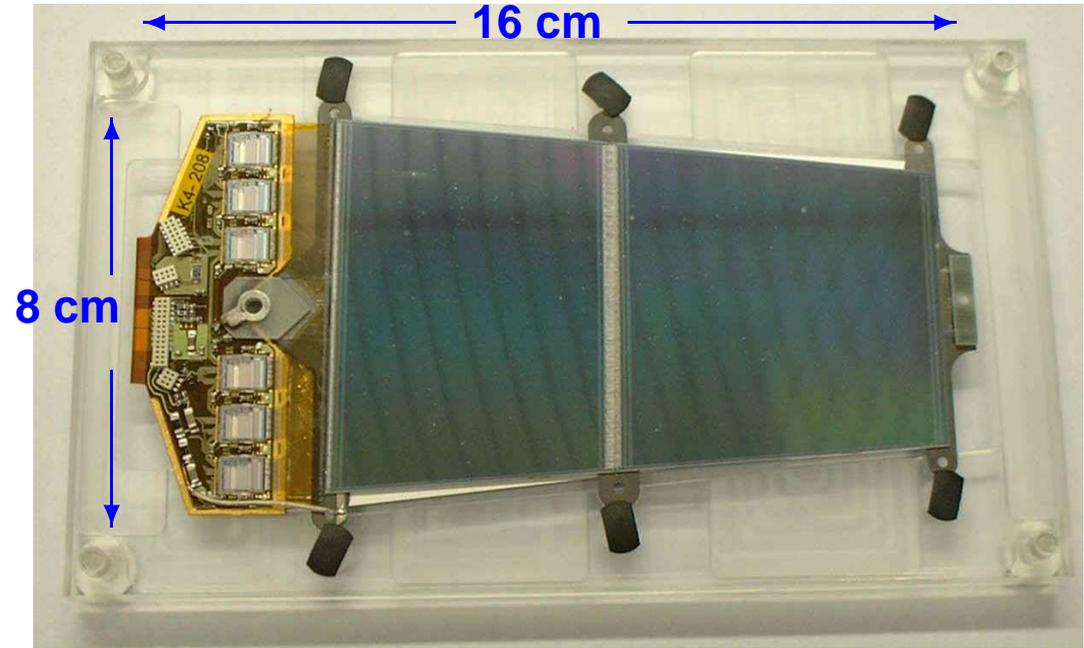
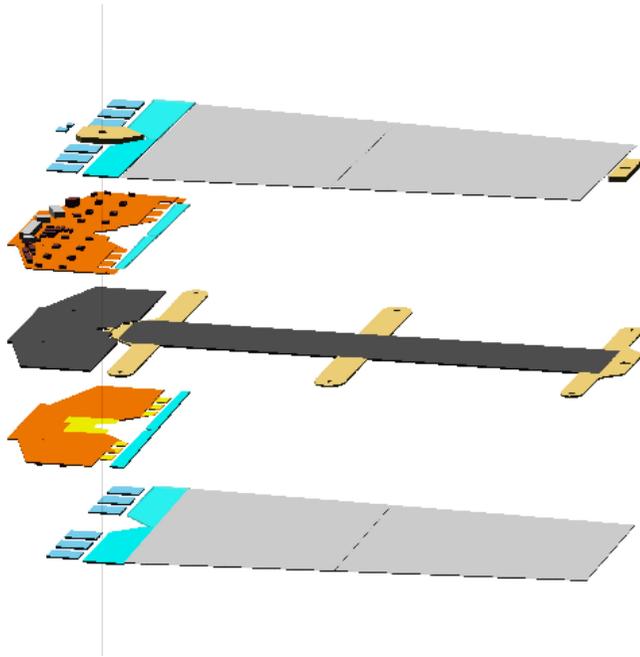
### Der SemiConductor Tracker

- Radius 27 – 52 cm
- 4 Lagen, 18 Scheiben
- $6.3 \cdot 10^6$  Auslesekanäle
- 4088 Module, 61 m<sup>2</sup> Silizium

**Am MPI bauen wir 400 Module des SCT Vorwärtsbereichs.**



# Vom Modell zum Modul ist ein langer Weg



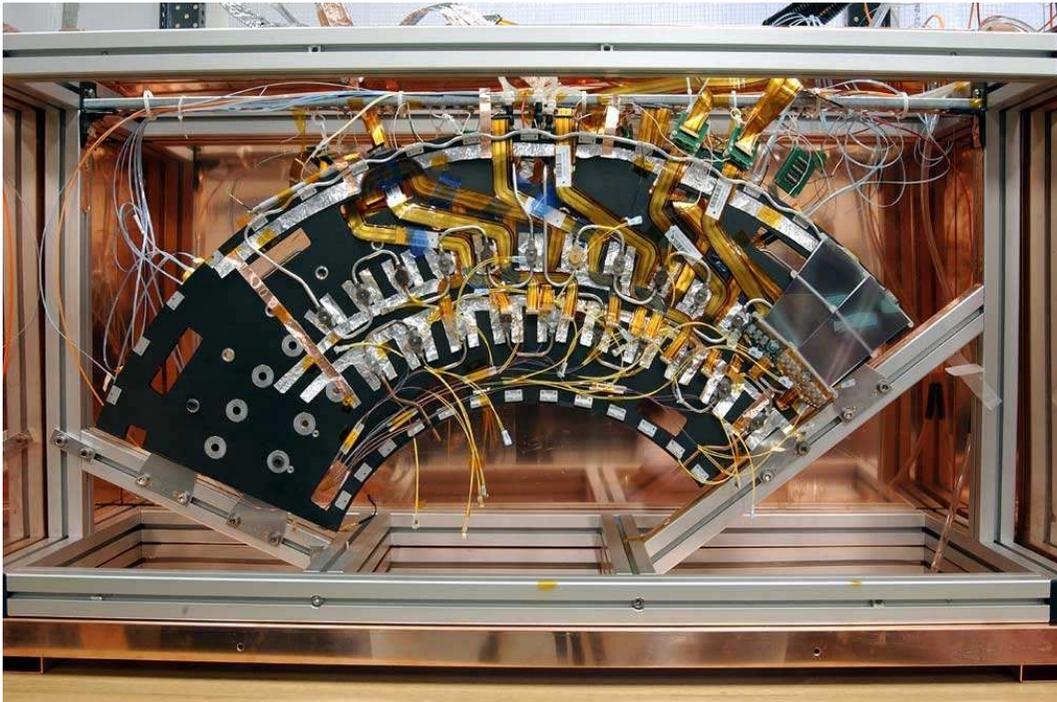
## Die wichtigsten Dinge sind

- ein Roboter zum Ausrichten der Detektoren mit einer Genauigkeit von besser als  $5 \mu\text{m}$ ,
- ein Kleberoboter,
- und viel Ruhe und Geduld, Bauzeit: 1 Tag/Modul.



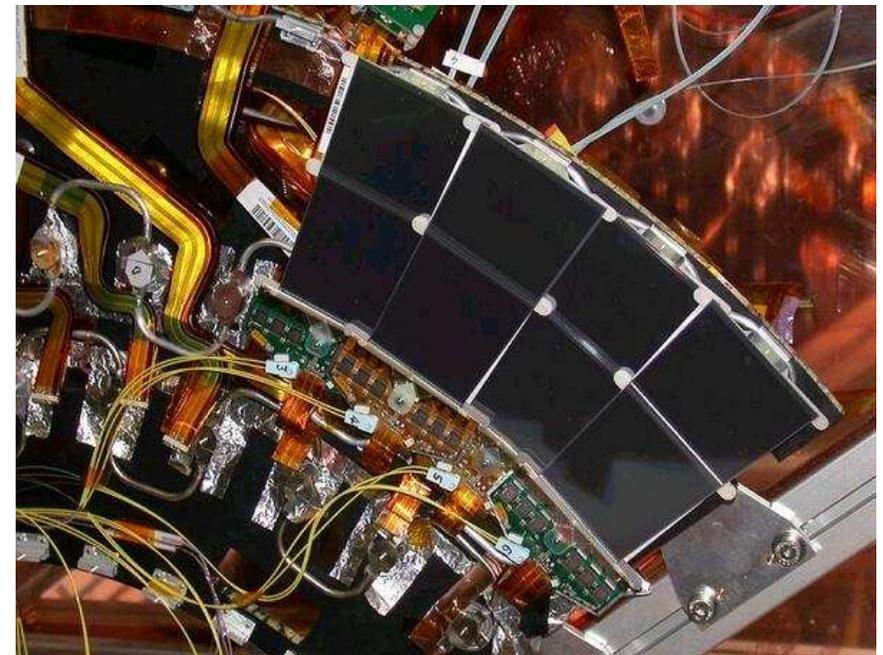


# Der Test eines Teilsystems



**Die Integration der Module ist schwierig**

- Die Module sind sehr empfindlich.
- Eine präzise Vermessung ist nötig (X-Ray).
- Elektronisches Rauschen ist zu vermeiden.
- Es ist nicht viel Platz, die Module überlappen.



**Beim Zusammenspiel aller Kräfte ist sehr viel Abstimmung nötig.**



# Warum es auch in Zukunft spannend bleibt

---

**Wir suchen immer noch nach Antworten auf eine Reihe von Fragen.**

- Sind Quarks und Leptonen wirklich elementar, oder haben sie Sub-Struktur?
- Warum haben die Teilchen so verschiedene Massen?
- Gibt es das Higgs Teilchen wirklich? Wenn nicht, was sonst ist zuständig für die Massenerzeugung?
- Ist die Supersymmetrie in der Natur verwirklicht?
- Woraus besteht die Dunkle Materie?
- Was erklärt das Fehlen der Antimaterie im Universum?
- Wie passt die Gravitation in unser Wechselwirkungsbild?
- ...

**Es gibt viel zu entdecken - Schauen mer mal**

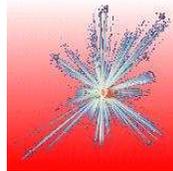


# Eine kleine Auswahl interessanter Links

---

## Die Startseite der deutschen Teilchenphysik

Die kompakteste Seite  
mit vielen weiteren Links



<http://www.teilchenphysik.info>

## Zum Durcharbeiten

Ein Lernprogramm der Uni Erlangen aus  
dem ich viele Bilder entnommen habe



<http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de>

## Zum Erholen

Eine Sammlung von Portraits



und Cartoons



<http://www.th.physik.uni-frankfurt.de/~jr>



# Reflektionen am Ende einer kurzen Reise

Vor der Reise?

Danach!



**THE END**

Ich hoffe Sie hatten ein wenig Spaß.