



# Einblicke in die Elementarteilchenphysik,

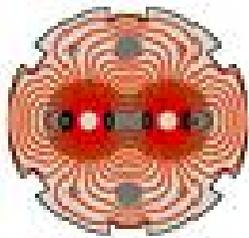
oder eine kurze Reise von



über



...



... ins Innerste der Welt.

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



## Ein Wort zur Klärung vornweg

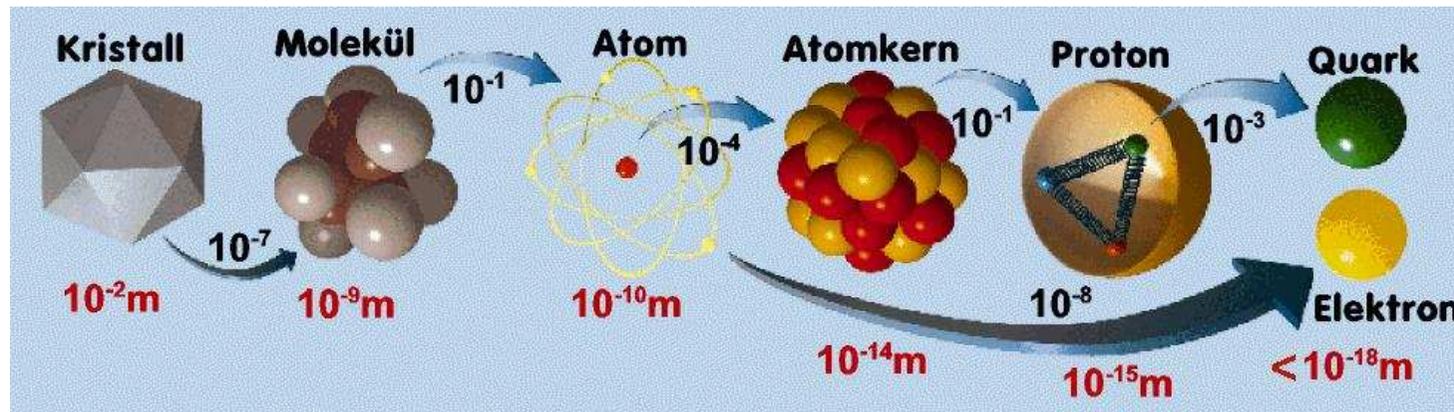
---

- Diese Reise erhebt keinen Anspruch darauf alle Sehenswürdigkeiten zu besuchen!
- Bedenken Sie, dass der Reiseleiter unter mehr als 20 Jahren Schulabstinenz leidet. Also bitte bremsen Sie mich, wann immer die Reise zu schnell oder verwirrend wird.
- Diese Reise ist wie eine Kreuzfahrt. Sie können in Ihrer Luxuskabine unter Deck bleiben und die Sehenswürdigkeiten an sich vorbeiziehen lassen...
- ...oder aber, Sie kommen von Zeit zu Zeit an Deck, schauen genauer hin, und stellen **Fragen, Fragen** und nochmals **Fragen**.
- Denn manchmal sollte sogar Albert Einstein unrecht haben!

**Zahlreich und groß sind die Hörsäle, doch wenig zahlreich die jungen Menschen, die ehrlich nach Wahrheit und Gerechtigkeit dürsten. (A. Einstein)**



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



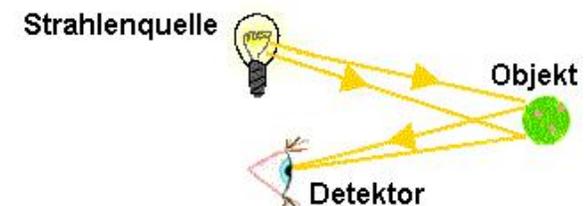
Die zwei Hauptfragen der Elementarteilchenphysik sind:

- 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.**

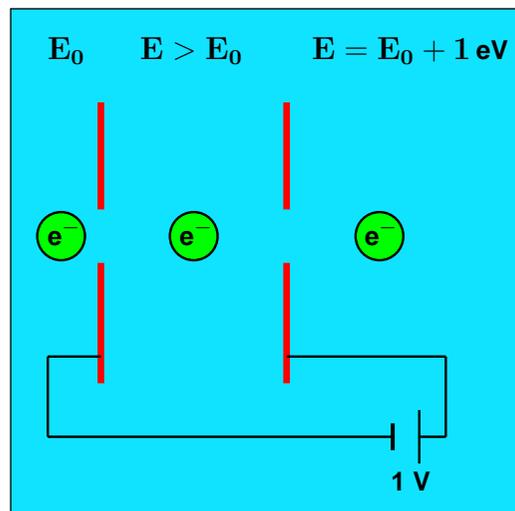
**Wir brauchen einen Ersatz für:**





# 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 = 1 keV = 1000 eV =  $10^3$  eV  
giga eV = 1 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!

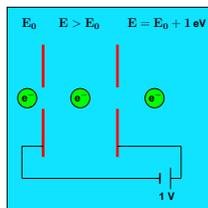
- Die Unbestimmtheitsrelation

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

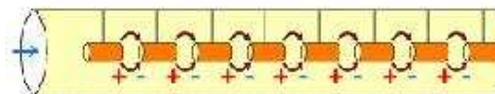
bestimmt das Auflösungsvermögen, mit  $\hbar = 6.582 \cdot 10^{-16}$  eVs dem Planckschen Wirkungsquantum.

- Faustformel:  $\Delta x \Delta E = 0.2 \text{ fm GeV}$ . Mit einem Teilchen der Energie 1 GeV kann man also eine Struktur von der Größe 0.2 fm ( $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ) untersuchen.
- Um diese kleinen Strukturen sehen zu können müssen wir demzufolge

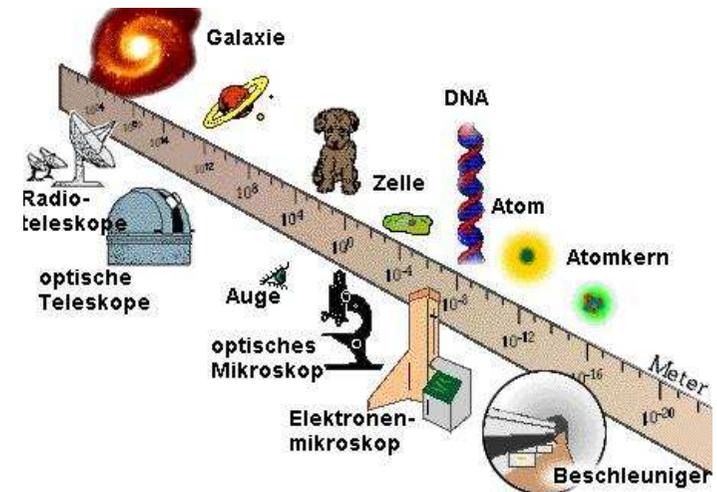
unsere



durch einen



ersetzen.





# Vom Hausbeschleuniger zum Kreisbeschleuniger



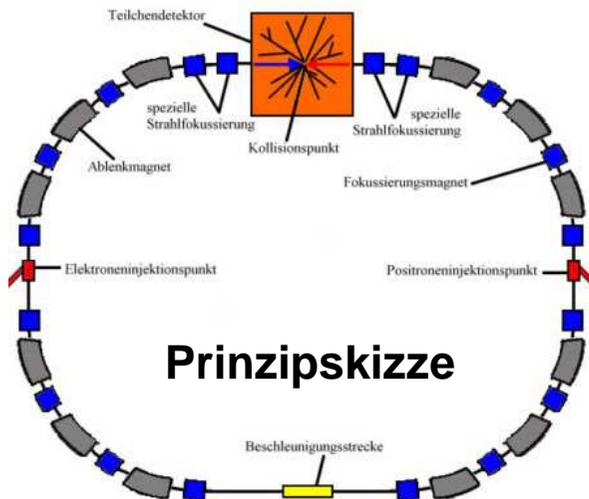
## Funktionsprinzip

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

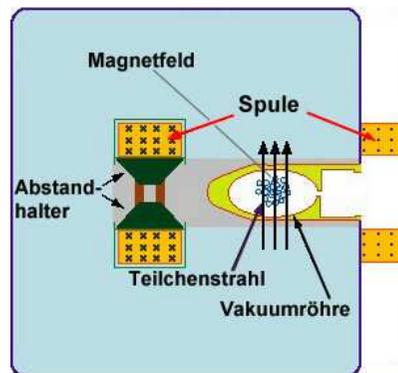
## Leistungsmerkmale

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

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



## Ablenkung

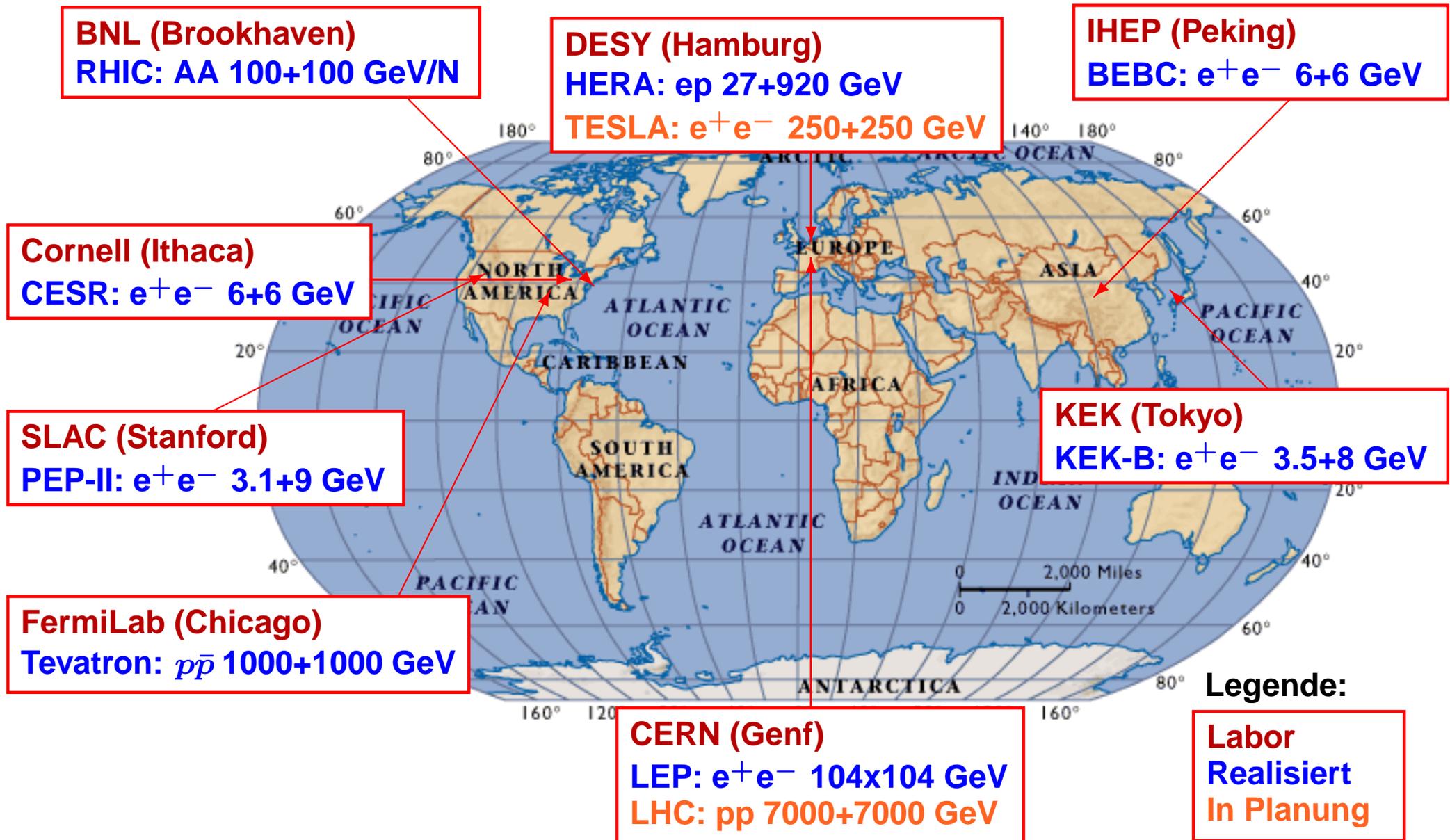


## Beschleunigung





# Auszug aus der Welt der Beschleuniger

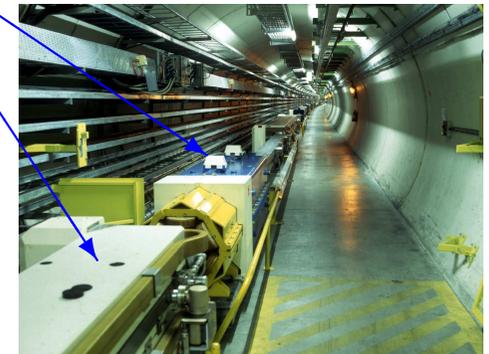
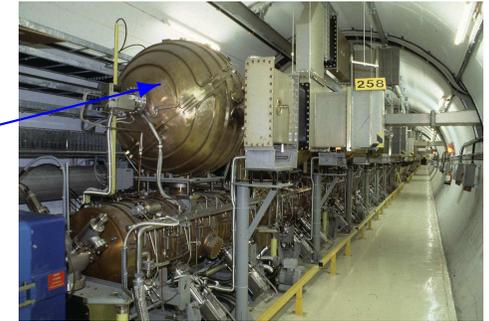
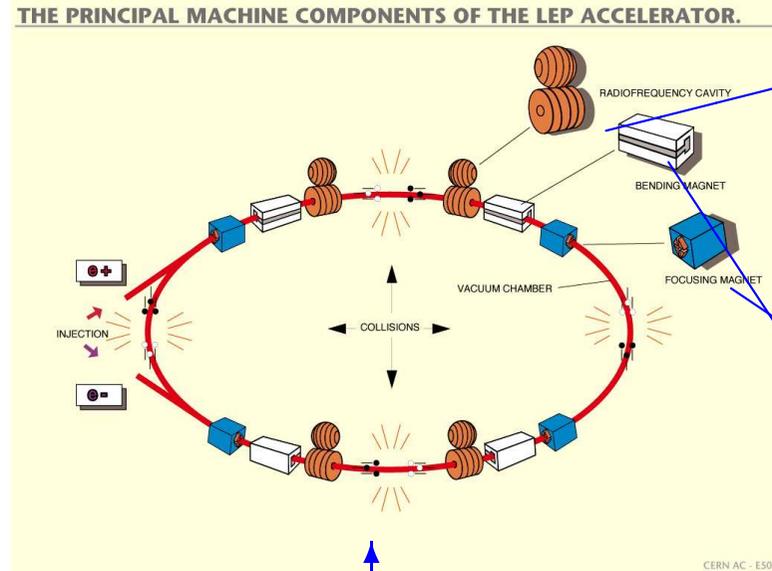




# Ein Beispiel - Der LEP (1989 - 2000<sup>†</sup>) Beschleuniger

## 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.





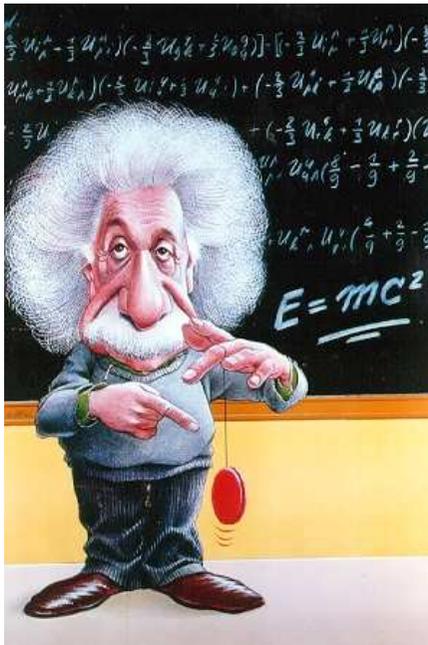
# Der Energiebegriff

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 Brems Scheiben 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

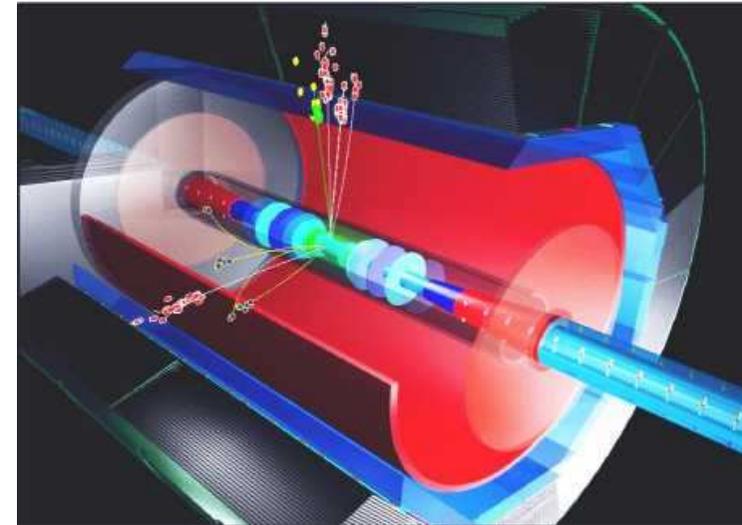


und

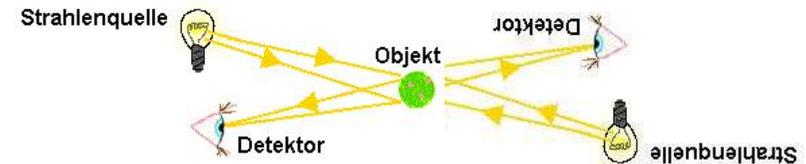


## Ein Colliding-Beam Detektor

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



Das Prinzip bleibt gleich

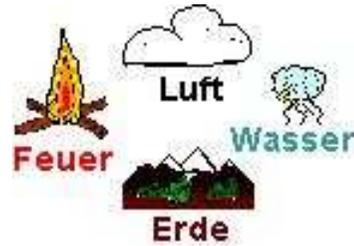


**Erst die Rekonstruktion aller Reaktionsprodukte gibt Aufschluß über die Reaktion.**



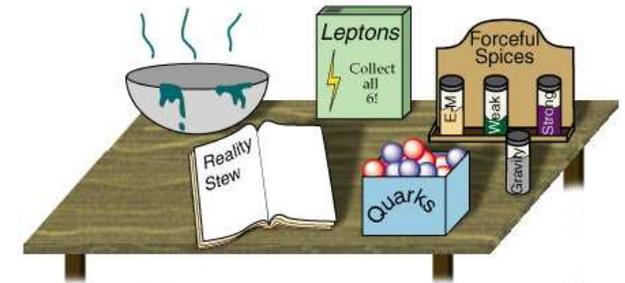
# Was haben wir herausgefunden

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
Leptons	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ $\mu$ - Neutrino	$\nu_\tau$ $\tau$ - Neutrino
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
	I	II	III

- Es gibt drei Familien von Leptonen und Quarks.
- Quarks und Leptonen sind Fermionen (Spin = 1/2).
- Nur die erste Familie bildet stabile Materie.
- Die letzten Bausteine wurden erst kürzlich nachgewiesen. Das top Quark (1994) und das Tau-Neutrino (2000), beide am Fermi Laboratory in Chicago.
- Die Massen sind sehr verschieden und reichen von etwa 0 für Neutrinos bis 175 GeV (Atom mit  $A = 183$ ) für das top Quark.
- Zu jedem dieser Teilchen gibt es ein Antiteilchen mit umgekehrten Ladungen aber sonst identischen Eigenschaften.



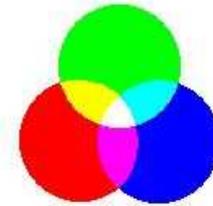
# Der Quark-Baukasten zur Konstruktion von Hadronen

## 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 von  $+2/3$  (u,c,t) oder  $-1/3$  (d,s,b) und  $Q_q = -Q_{\bar{q}}$

## Die Bauregeln

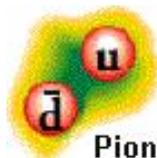
- Es gibt nur farblose Teilchen (drei Farben oder Farbe-Antifarbe).
- Es gibt nur Teilchen mit ganzzahliger elektrischer Ladung.



## Einfachste Gebilde



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



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



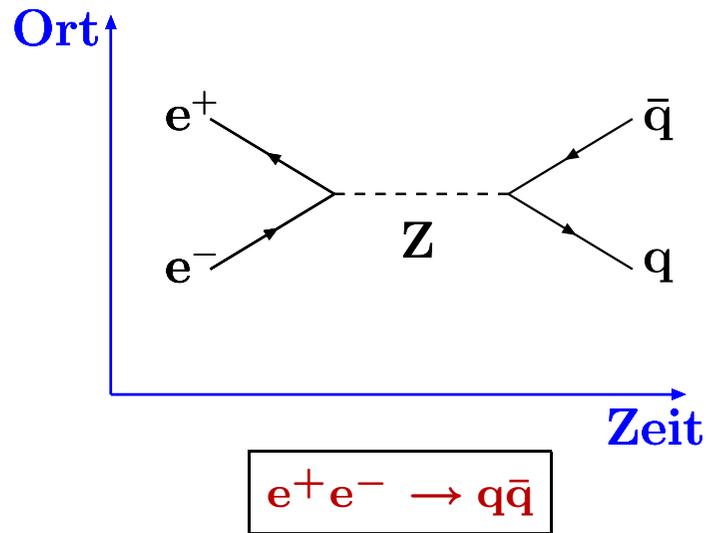
# Die fundamentalen Wechselwirkungen

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)

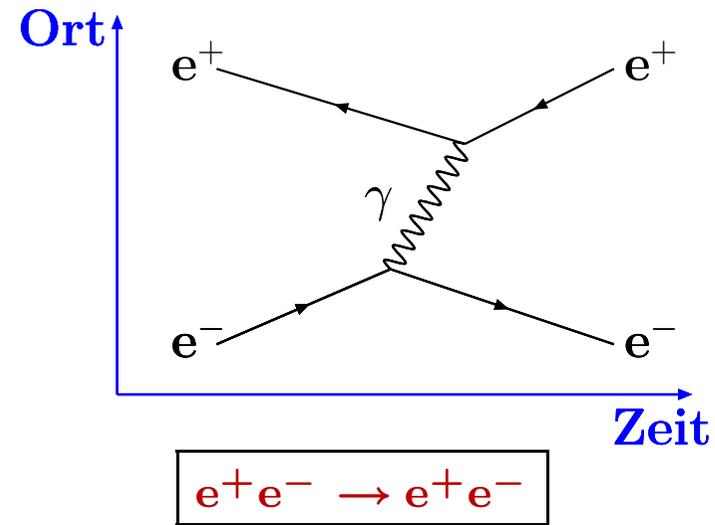


# Feynman Diagramme und die vier fundamentalen Vertizes

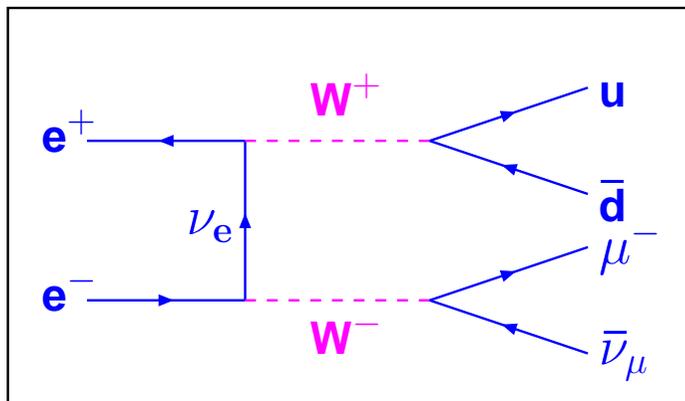
## Paarvernichtung und Paarerzeugung



## Emission und Absorption



## Ein komplizierterer Fall



## Ein Quiz: Wer darf wo mitspielen?

Kraft \ Wer	e μ τ	$\nu_{e,\mu,\tau}$	q
Gravitation	✓	✓	✓
el.mag.	✓	—	✓
schwach	✓	✓	✓
stark	—	—	✓



# Die Gravitation - eine gute alte Bekannte

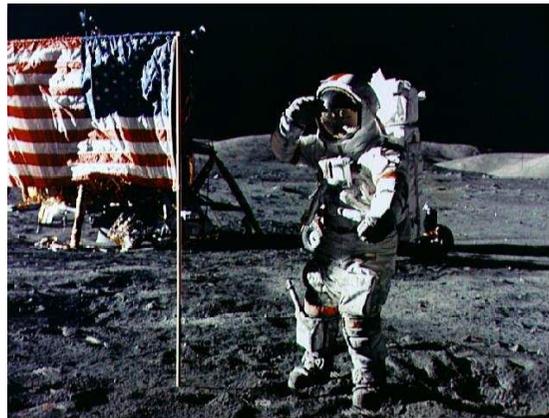
Die Gravitation bestimmt die Umlaufbahnen.



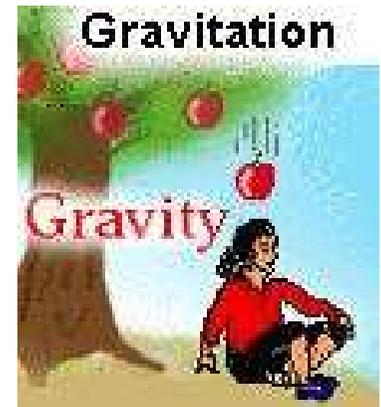
Wir können sie berechnen und kleinere Ausflüge planen.



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



Sie ist aber auch verantwortlich für Unfälle.



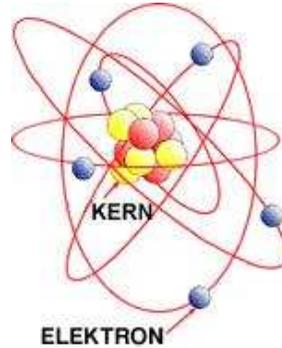
Obwohl wir die Gravitation eigentlich ganz gut beherrschen, ist es uns nicht gelungen, sie in das Wechselwirkungsbild einzupassen. **Das Graviton ist nicht gefunden!**



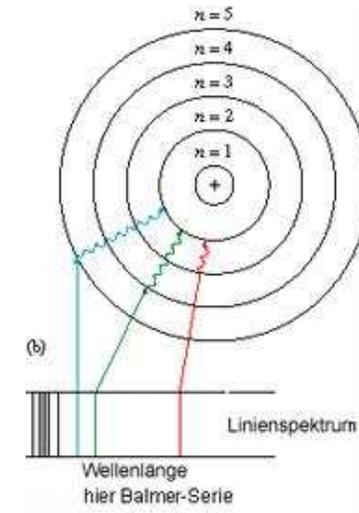
# Die elektromagnetische Wechselwirkung ist überall

## Mikroskopisch

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

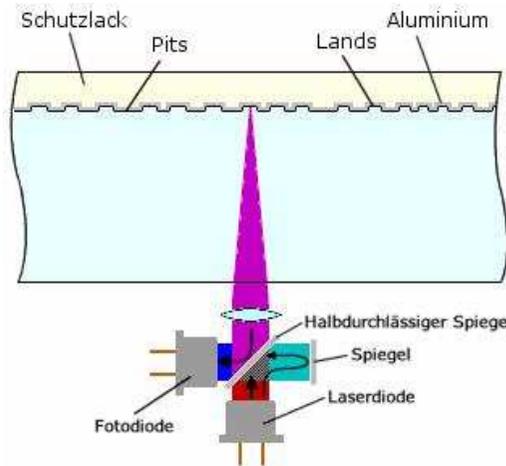


und bei den Übergängen der Elektronen in der Hülle.

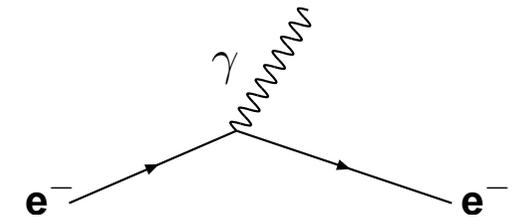


## Makroskopisch

Beim Lesen von s mit einem Laser.



## Ein Elementar-Ereignis





# Die schwache Wechselwirkung

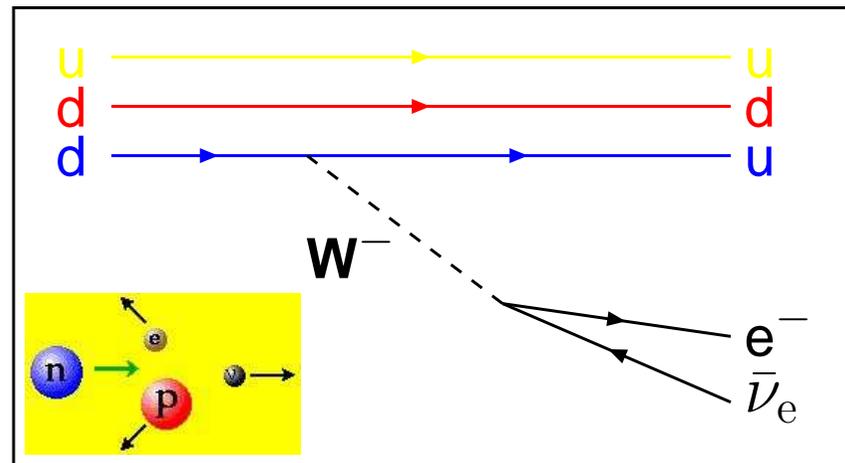


Die

ist zuständig für den



Das einfachste Beispiel ist der Neutron-Zerfall.



In Kernen ist auch  $p \rightarrow n e^+ \nu_e$  möglich, und dies führt zu Kernzerfällen.

**Zum Glück ist  $m_n > m_p$  (wenn auch nur um 1.3 MeV) and damit das Proton stabil!**



# Die Starke Wechselwirkung



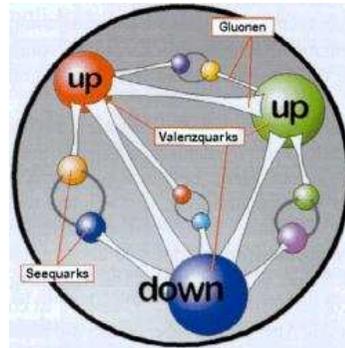
Die

ist zuständig für den

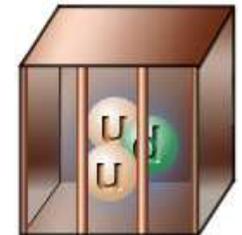


zwischen den Quarks.

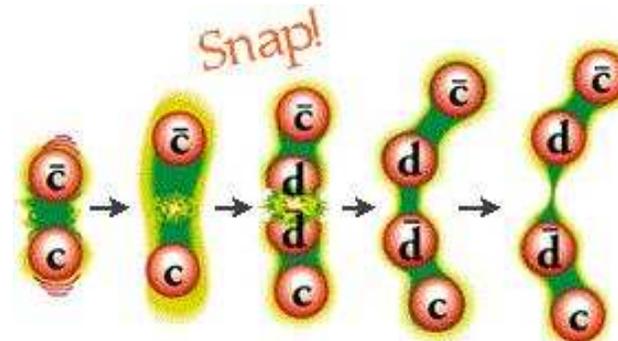
Das Proton wird zu einem recht komplexen Gebilde.



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



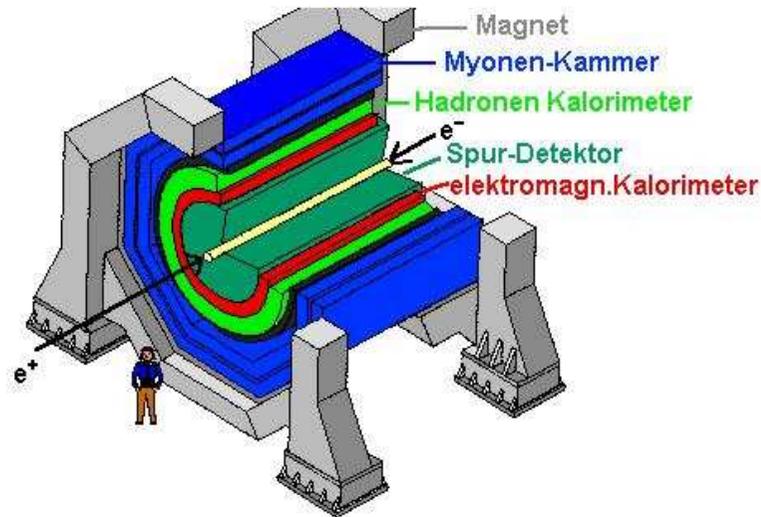
Wenn der Abstand zu groß wird, reicht die Energie um neue Quarks zu erzeugen.



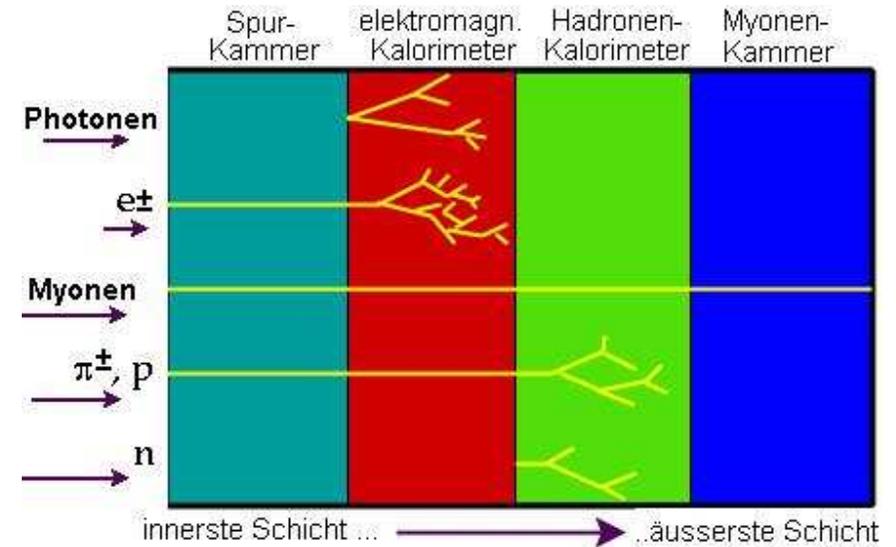


# Das Bauprinzip von Teilchen-Detektoren und ein Beispiel

Mit dem Zwiebelschalenprinzip ...



... kriegen wir euch (fast) alle



Elektromagnetisches Kalorimeter (e, γ)

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



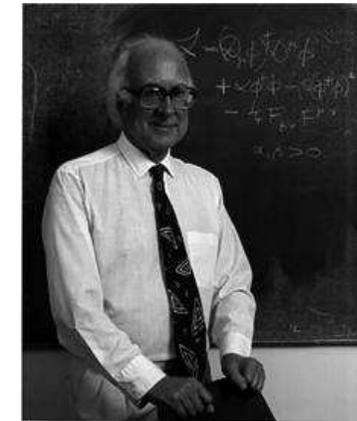


# Das Higgs-Boson - ein Konzept zur Massenerzeugung

## Die Vermutung (1965)

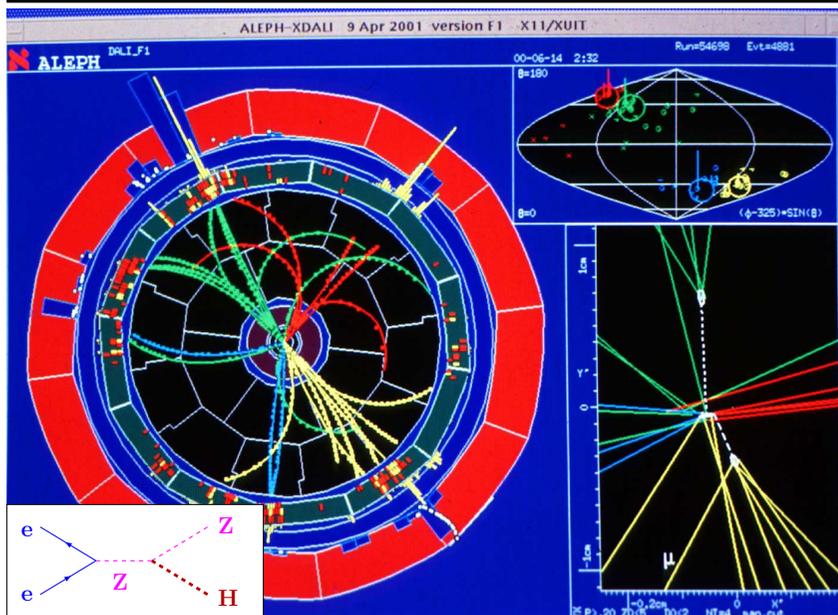
- Massen werden durch Wechselwirkungen mit einem Hintergrundfeld, dem **Higgs**-Feld erzeugt.
- Je stärker die Kopplung um so größer die Masse.
- Die Existenz des **Higgs**-Boson wird vorhergesagt.

## Der Vater des Gedankens



Peter Higgs

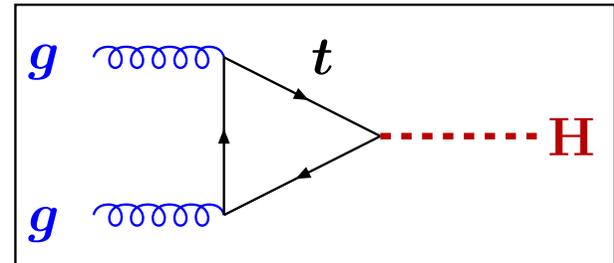
## Higgs Suche bei LEP eine Evidenz ?



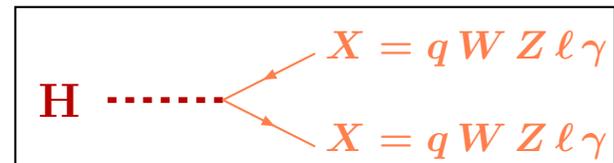
Ein paar Ereignisse sind nicht genug.

## Die Higgs Suche am LHC

Produktion:



Zerfall:





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

**Alice**

Schwere Kerne

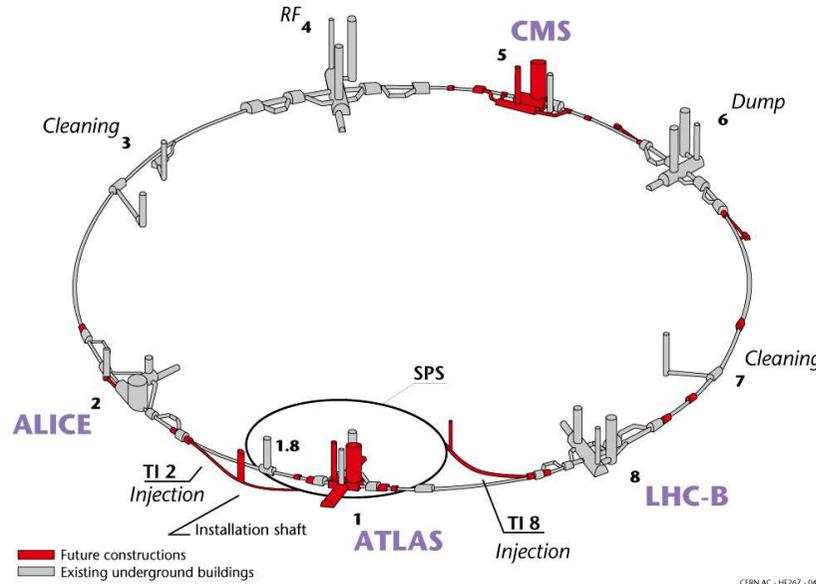
**LHC-B**

Materie ↔ Antimaterie

**ATLAS / CMS**

Higgs Produktion

**Das Herzstück des LHC  
die supraleitenden Magnete**



**Technische Daten**

$L = 26.7 \text{ km}$

$E_p = 7 \text{ TeV}$

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

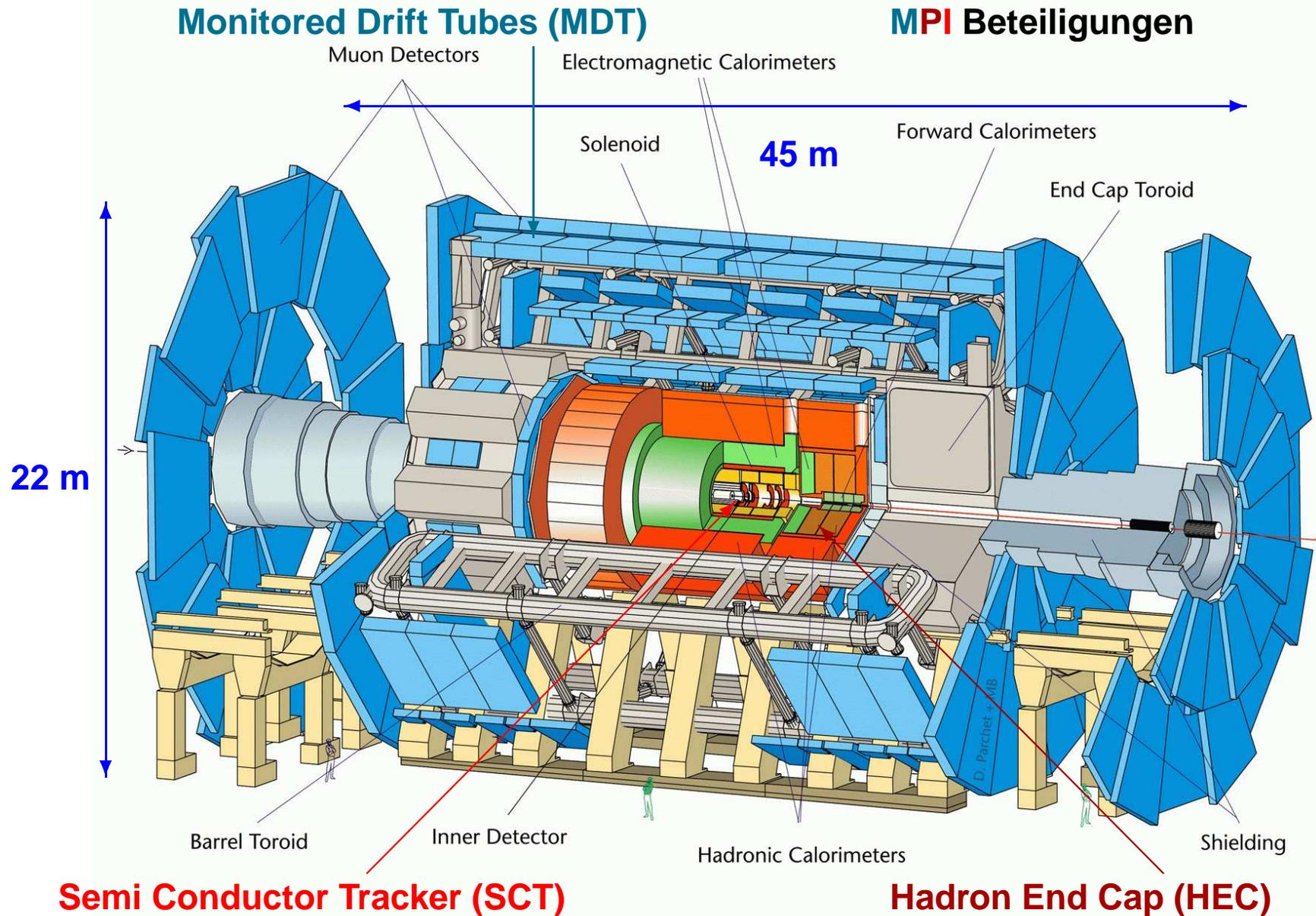


Länge	15 m
Gewicht	23.8 t
B-Feld	8.3 T
Temperatur	1.9 K
Strom	12000 A
Energie	7.1 MJ



# 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

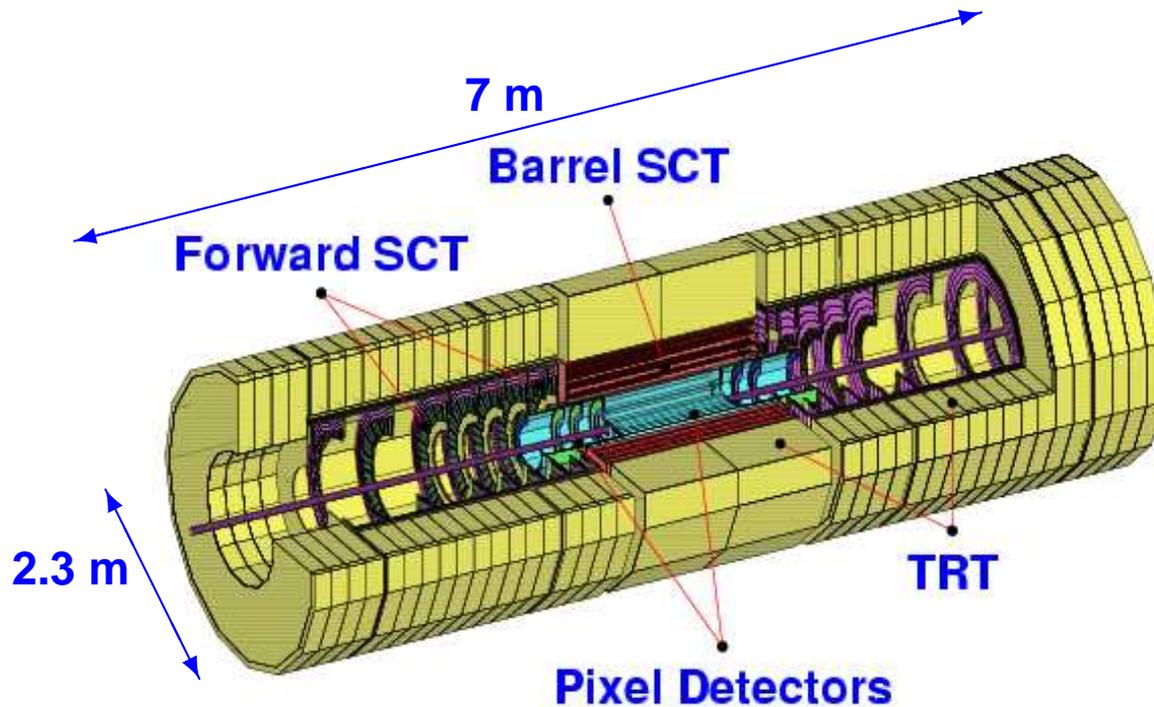
- Die Kammern müssen getestet und sicher gelagert werden. Zum Glück liegt München nicht an der Elbe.
- Der Transport muß sicher sein.

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





# 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

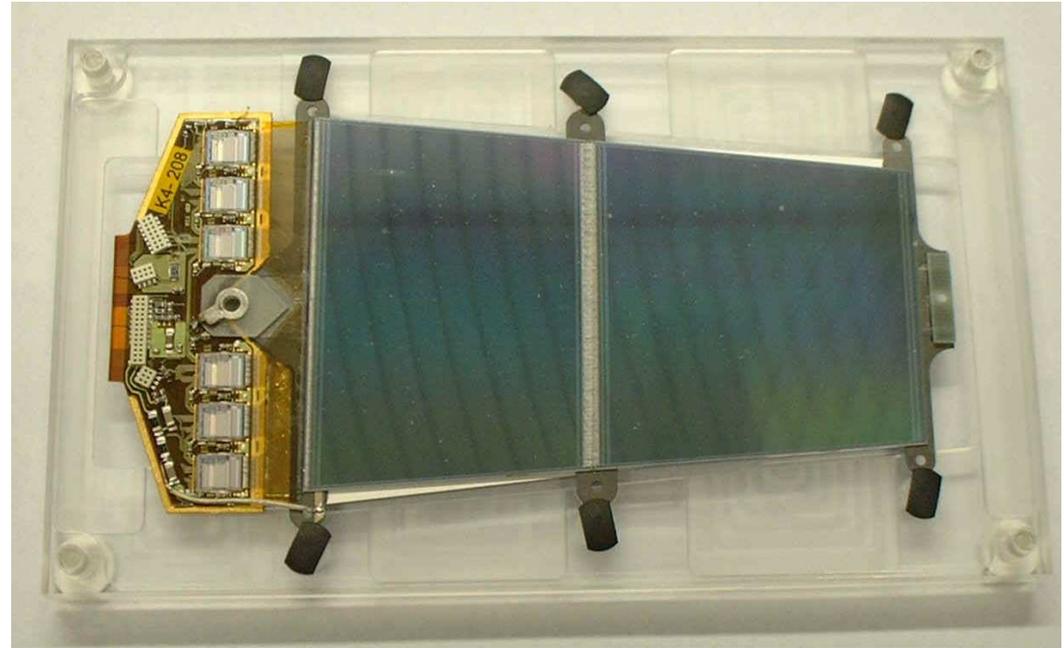
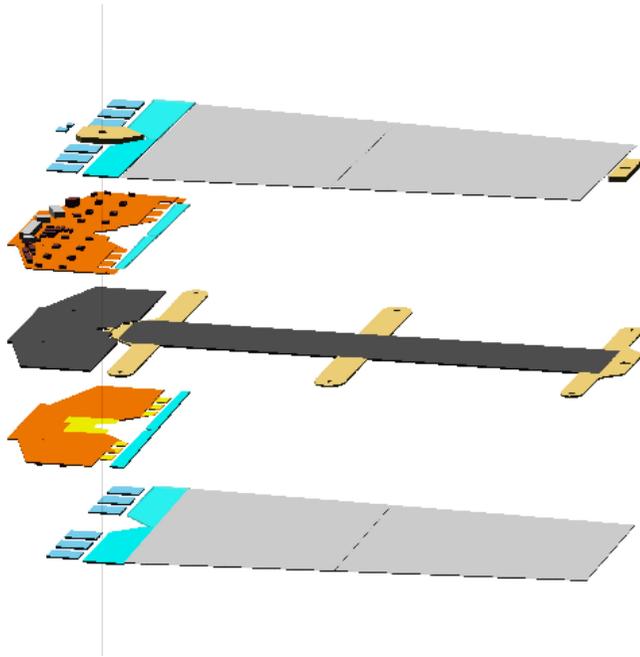
### Der SemiConductor Tracker

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

**Das MPI baut 400 Module des SCT Vorwärtsbereichs.**



# Vom Modell zur Realisation 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.





# 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?



COSMOLOGY MARCHES ON



Danach!



THE END



Ich hoffe Sie hatten ein wenig Spaß und Gute Heimfahrt.