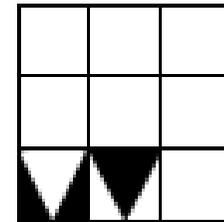




---

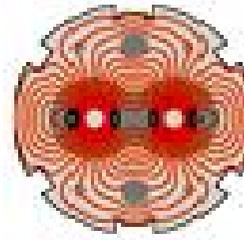
# Elementarteilchenphysik am MPI für Physik,

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))

---



# Die Organisation der Max-Planck-Gesellschaft

---

- Die Max-Planck-Gesellschaft (MPG) zur Förderung der Wissenschaften e.V. ist eine unabhängige gemeinnützige Forschungsorganisation. Sie fördert die Forschung vorrangig in eigenen Instituten, den MPIs.
- Die MPG unterhält derzeit 80 Forschungsinstitute, in denen mehr als 12.000 Mitarbeiter sowie 9.100 Doktoranden, Postdoktoranden, Gastwissenschaftler und studentische Hilfskräfte tätig sind.
- Die Forschungsgebiete der MPG sind in drei Bereiche aufgeteilt: Die **Biologisch-Medizinische**, die **Chemisch-Physikalisch-Technische** und die **Geisteswissenschaftliche** Sektion.
- In der CPT Sektion sind 5 Institute in München und Umgebung angesiedelt. Dies sind die MPIs für Astrophysik, extraterrestrische Physik, Plasmaphysik, und Quantenoptik in Garching, und in München das **MPI für Physik (Werner-Heisenberg-Institut)**.





# Das MPI für Physik - Aufgabe und Geschichte

---

## Die Aufgabe

Das MPI betreibt sowohl theoretische als auch experimentelle Grundlagenforschung auf den Gebieten der Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik.

## Die Geschichte

1917 Gründung als **Kaiser-Wilhelm Institut für Physik** in Berlin.

Vorsitzender des Direktoriums war Albert Einstein.

1946 Wiedergegründet als **MPI für Physik** in Göttingen.

Der Direktor war Werner Heisenberg.

1958 Umzug von Göttingen zum heutigen Standort in München.

1960 Ausgliederung des Tochterinstituts für Plasmaphysik (IPP) in Garching.

1991 Ausgliederung der Tochterinstitute für extraterrestrische Physik (MPE) und für Astrophysik (MPA) in Garching.

## Einige Mitarbeiter

Peter Debye, Albert Einstein, Werner Heisenberg, Max v. Laue, Gerhart Lüders, Carl Friedrich v. Weizsäcker, ...



# Das MPI für Physik - Personal und Forschung

---

## Die Mitarbeiter

- Das MPI beschäftigt ca. 210 Mitarbeiter, und zwar 65 Wissenschaftler, 115 Personen im technischen Dienst und 30 Personen in der Verwaltung.
- Zusätzlich forschen ca. 30 Gastwissenschaftler am MPI.
- Es befinden sich ca. 35 Doktoranden, 10 Diplomanden und 12 Lehrlinge in der Ausbildung.

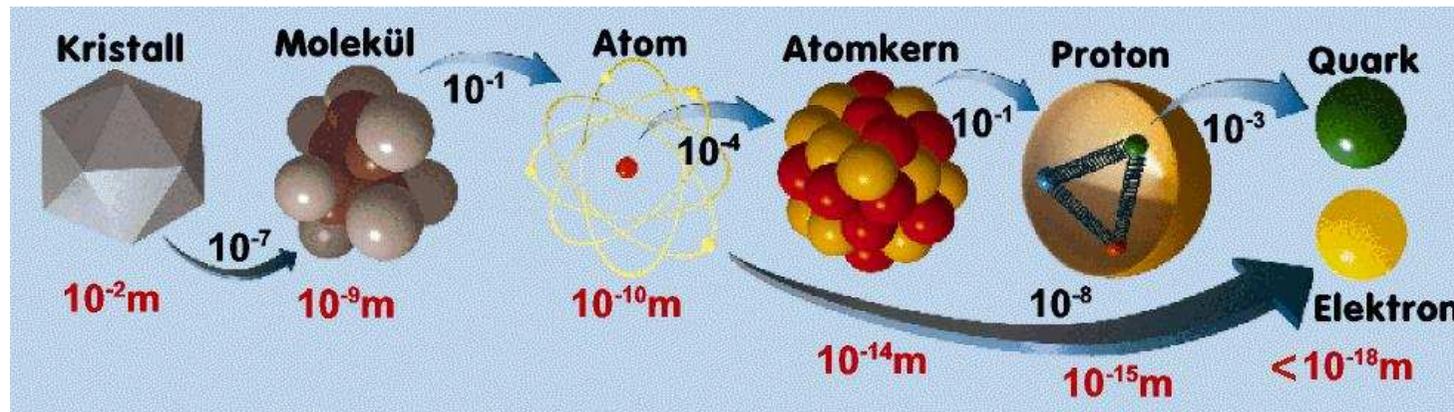
## Die Forschungsschwerpunkte

- Die Forschungsprojekte umfassen theoretische Arbeiten zur Teilchen- und Astroteilchenphysik, **Experimente** an den **Beschleunigern LEP (ALEPH, OPAL), HERA (H1), LHC (ATLAS) und RHIC (STAR)**, sowie die nicht-Beschleuniger Experimente **MAGIC** und **CREST**.
- Zusätzlich betreibt das Institut eine Halbleiterlabor zur Entwicklung innovativer Nachweisgeräte in Neuperlach.

**Das MPI hat ein breites Forschungsspektrum an der Grenze des technisch Machbaren.**



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



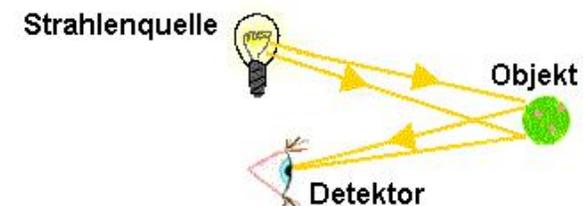
Die zwei Hauptfragen der Elementarteilchenphysik sind:

- 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.**

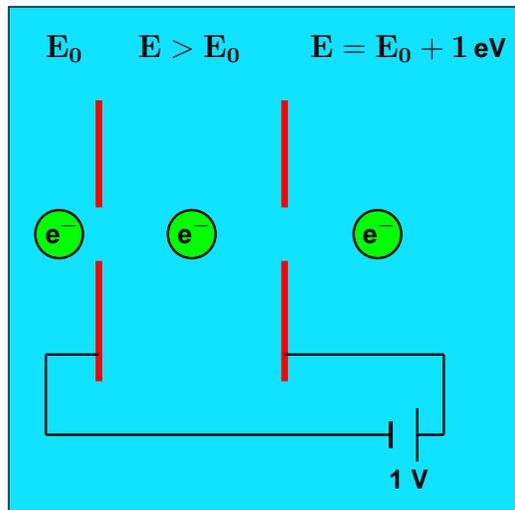
**Wir brauchen einen Ersatz für:**





# 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.

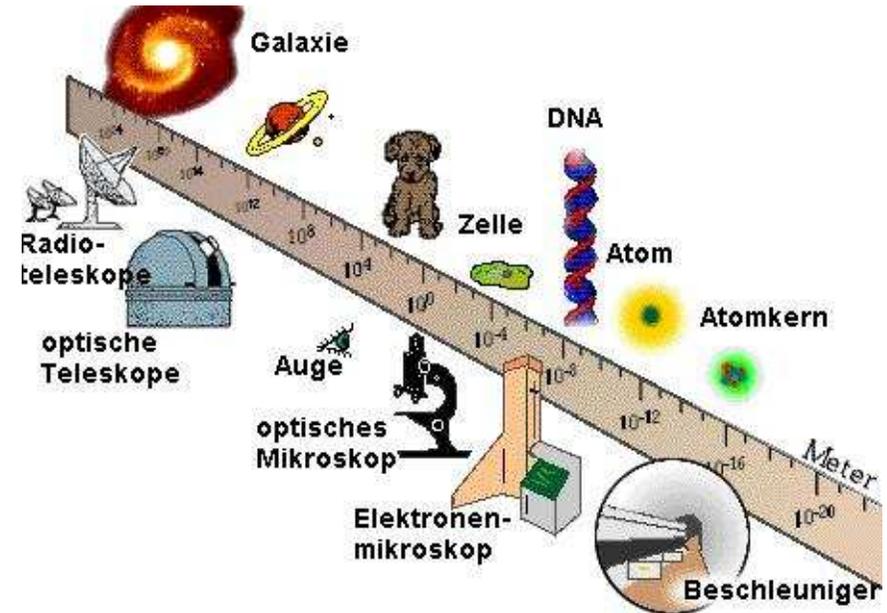
# Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation

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

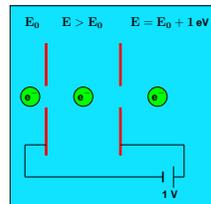
$$\Delta x \Delta p \approx \hbar$$

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

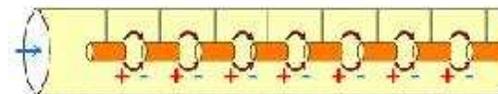
- Faustformel:  $\Delta x \Delta p = 0.2 \text{ fm GeV}$ . Ein Teilchen mit Impuls 1 GeV kann also eine Struktur der Größe 0.2 fm auflösen (1 fm =  $10^{-15}$  m).
- Um diese kleinen Strukturen sehen zu können müssen wir demzufolge



unsere



durch einen



ersetzen.



# Vom Hausbeschleuniger zum Kreisbeschleuniger



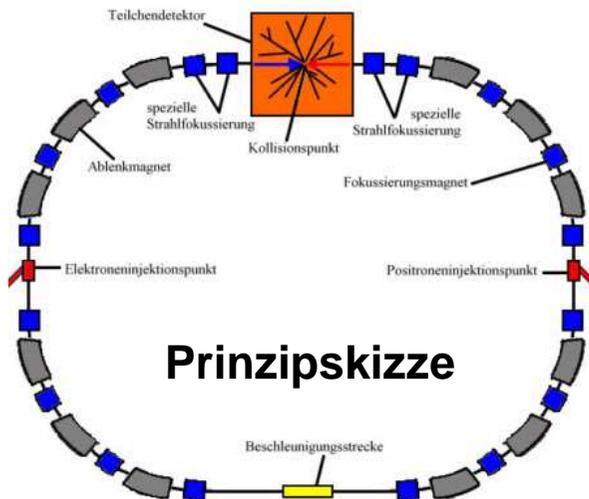
## Funktionsprinzip

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

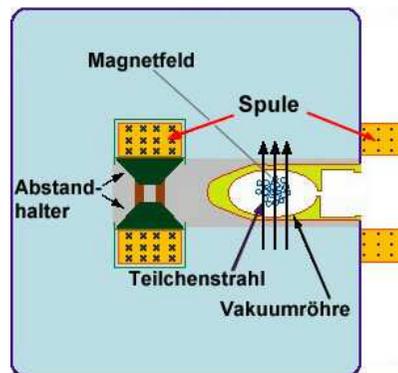
## Leistungsmerkmale

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

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



## Ablenkung

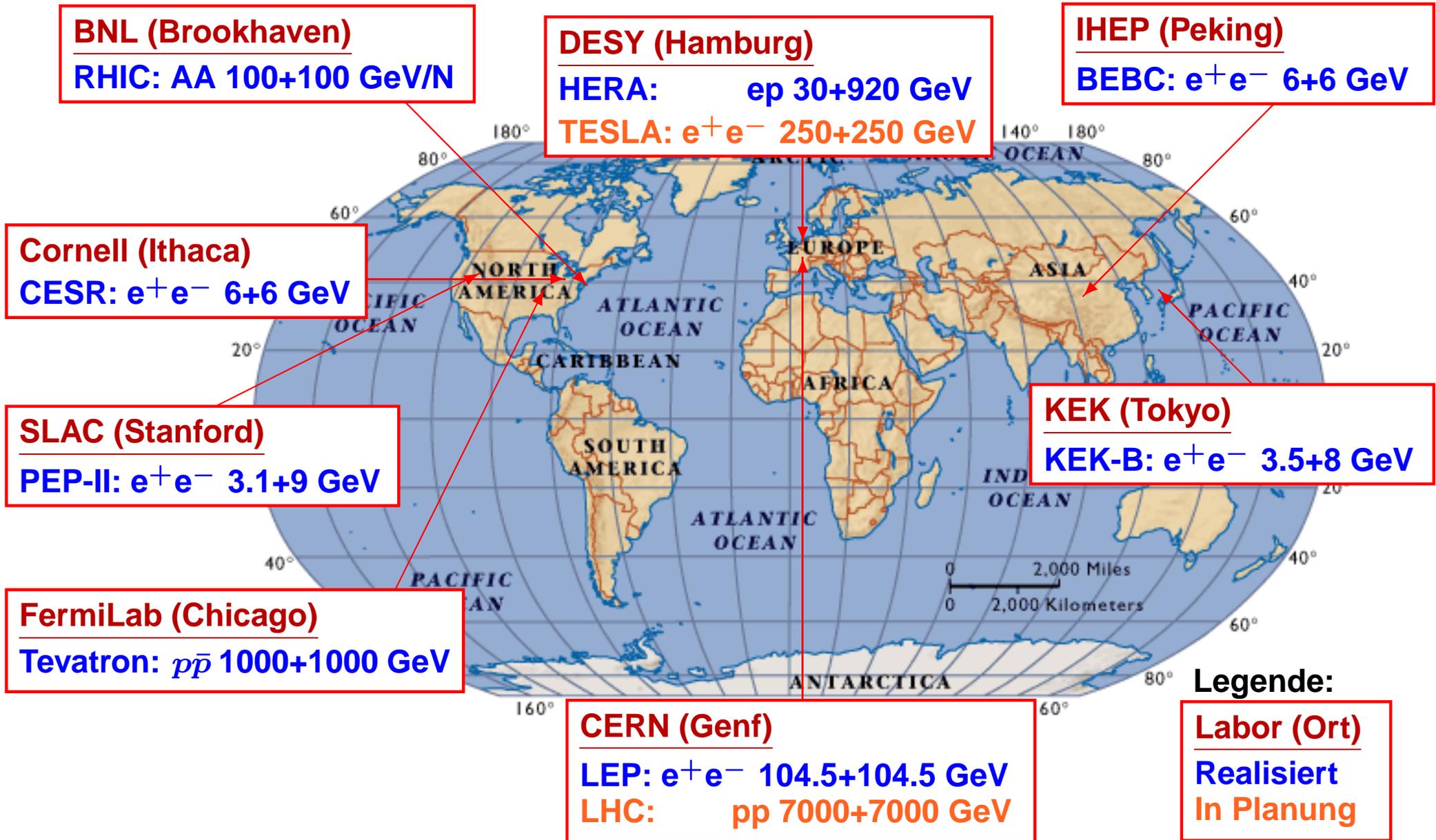


## Beschleunigung





# Auszug aus der Welt der Beschleuniger





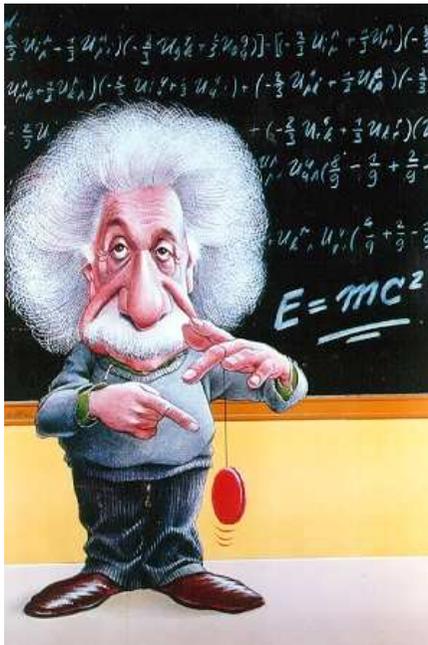
# Der Energiebegriff

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  $eV/c^2$  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

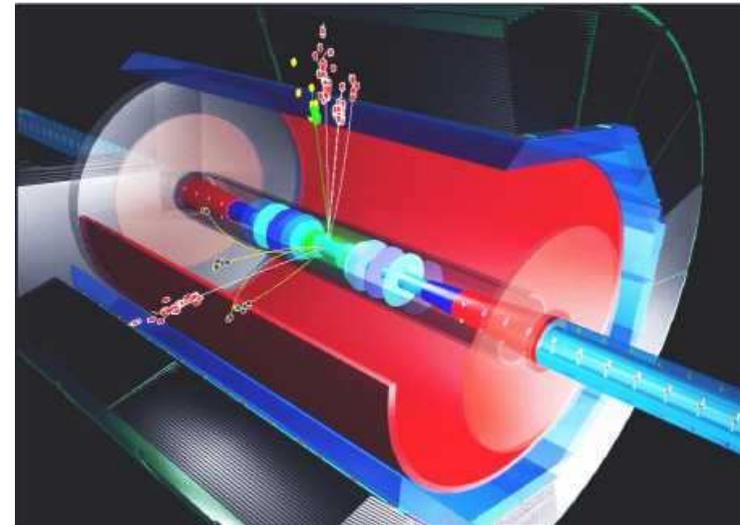


und

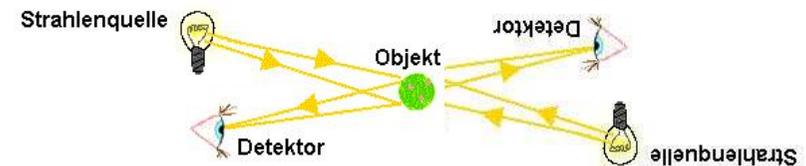


## Ein Colliding-Beam Detektor

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



Das Prinzip bleibt gleich

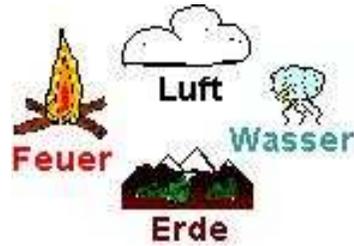


**Erst die Rekonstruktion aller Reaktionsprodukte gibt Aufschluß über die Reaktion.**



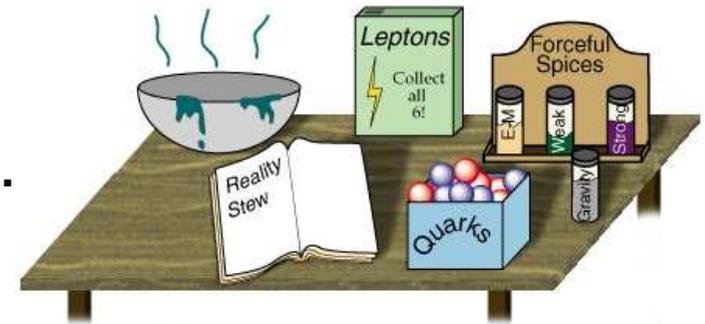
# Was wir heraus gefunden haben

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
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.
- 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.



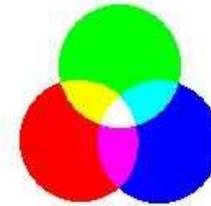
# Der Quark-Baukasten zur Konstruktion von Hadronen

## Welche Bausteine gibt es

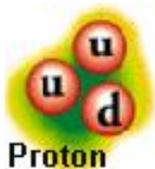
- Quarks,  $q$ , kommen in drei Farben vor **Rot**, **Grün** oder **Blau**.
- Antiquarks,  $\bar{q}$ , haben Antifarbe, Antirot (**cyan**), Antigrün (**Magenta**) oder Antiblau (**gelb**).
- Quarks haben eine elektrische Ladung  $Q$  von  $+2/3$  (u,c,t) oder  $-1/3$  (d,s,b) und  $Q_q = -Q_{\bar{q}}$

## Die Bauregeln

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

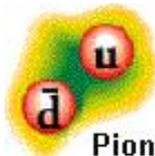


## Einfachste Gebilde



Proton

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



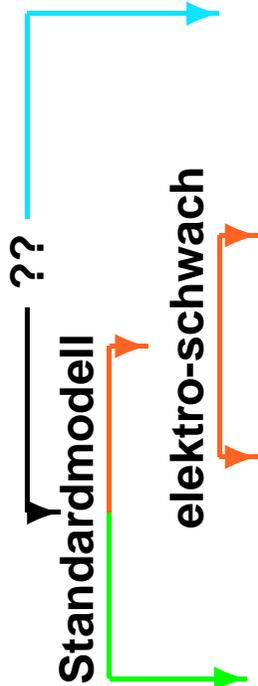
Pion

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



# 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> (∞)
schwach	Neutronzerfall	Z W <sup>±</sup>	91.2 80.4	0 ±1	10 <sup>-5</sup> (10 <sup>-3</sup> fm)
elektromagnetisch	Coulombanziehung	Photon γ	0	0	10 <sup>-2</sup> (∞)
stark	Quark-Confinement	Gluon g	0	0	1 (1 fm)





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

**Alice**

Schwere Kerne, ...

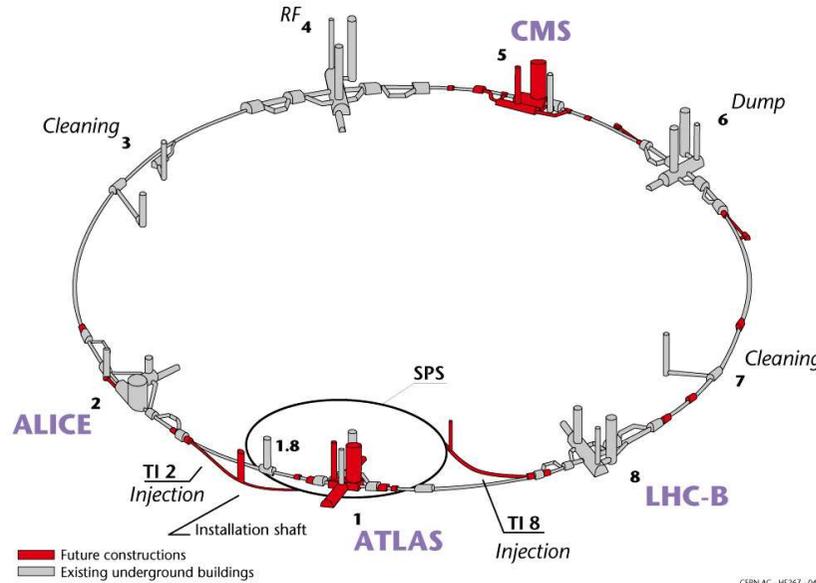
**LHC-B**

Materie ↔ Antimaterie,  
...

**ATLAS / CMS**

Higgs Produktion, ...

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



**Technische Daten**

L = 26.7 km

$E_p = 7 \text{ TeV}$

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

**Lumi Erwartungen**

10 fb<sup>-1</sup>/a beim Start

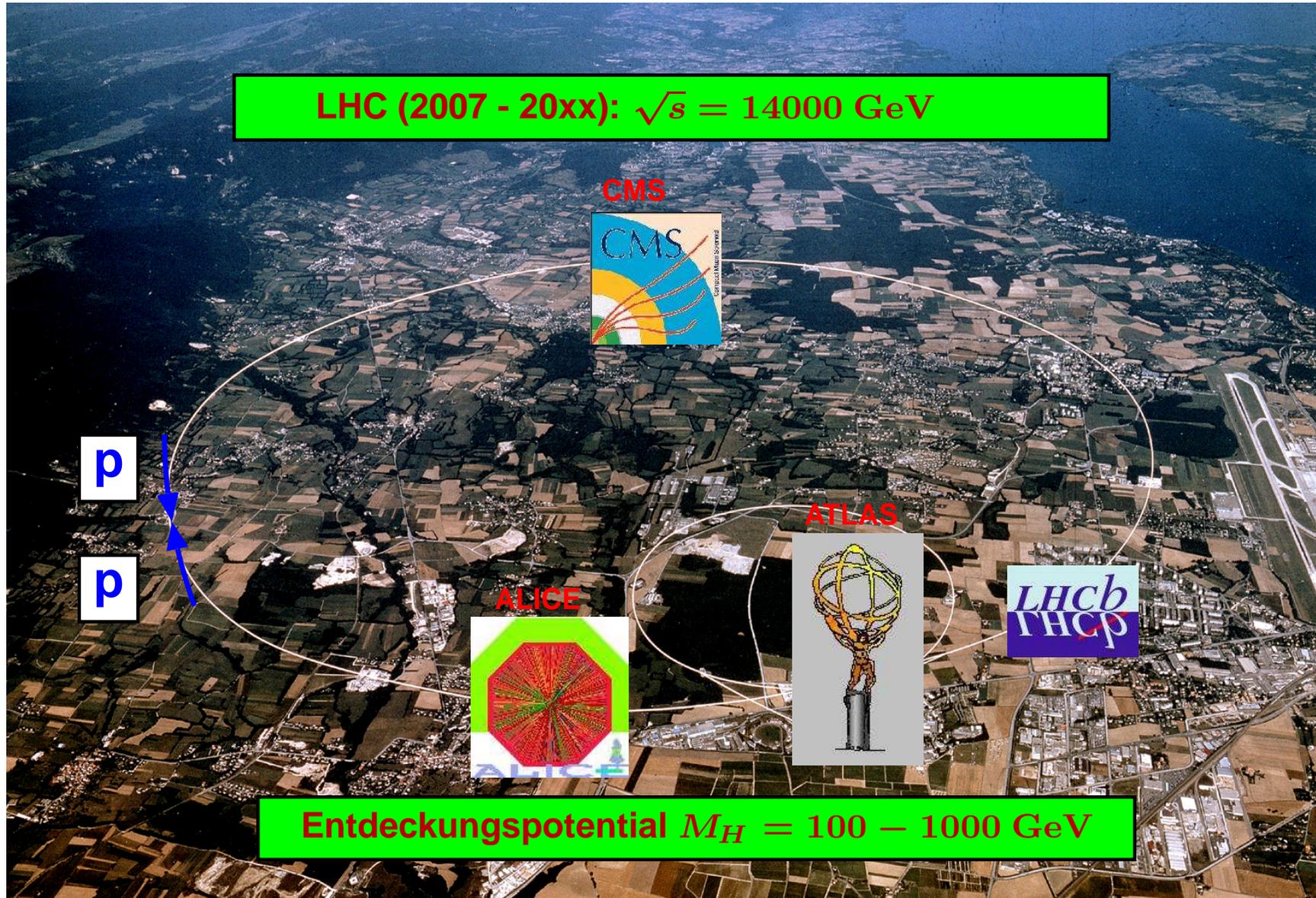
100 fb<sup>-1</sup>/a nominal



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



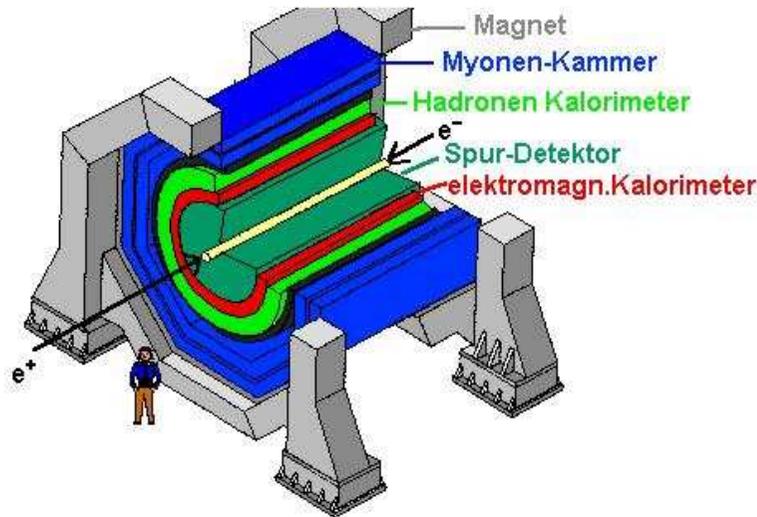
# Von LEP zum LHC - eine Zeitreise



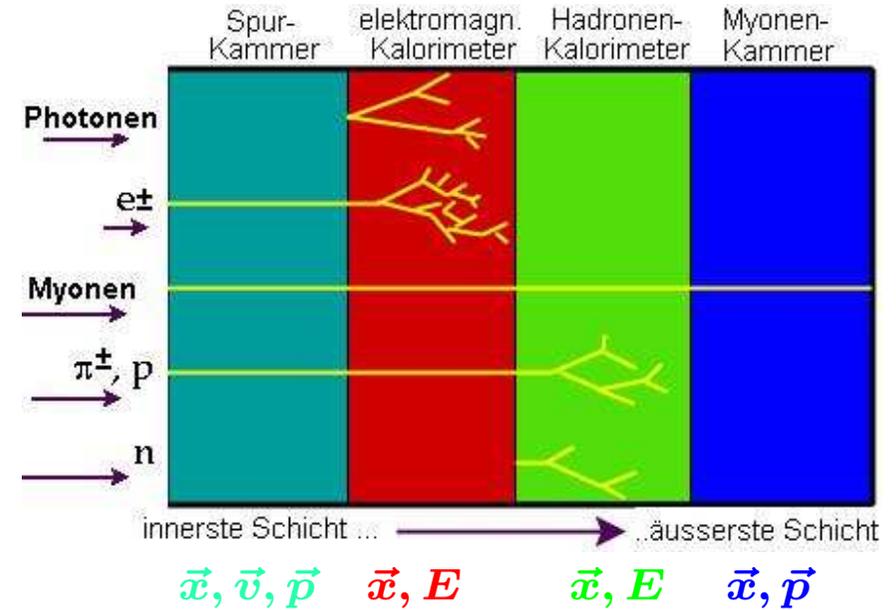


# Das Bauprinzip von Teilchen-Detektoren und ein Beispiel

Mit dem Zwiebelschalenprinzip ...

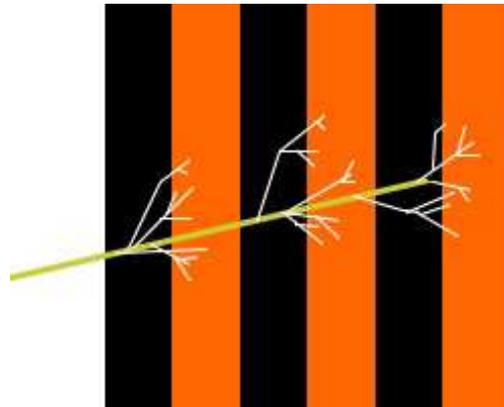


... kriegen wir euch (fast) alle



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.





# Bauarbeiten für ATLAS - die Schächte

Der Bauplan: Man nehme viel Platz,...



## Ein paar Daten

- Durchmesser: 12.6 und 18 m
- Tiefe: 60 m (Turm des Deutschen Museums)
- Baubeginn: 1998, während LEP läuft !
- Fertigstellung: 2002

...grabe zwei tiefe Löcher...





# Bauarbeiten für ATLAS - die Kaverne

...bringe schweres Gerät hinunter...



...und schachte eine Kaverne aus.



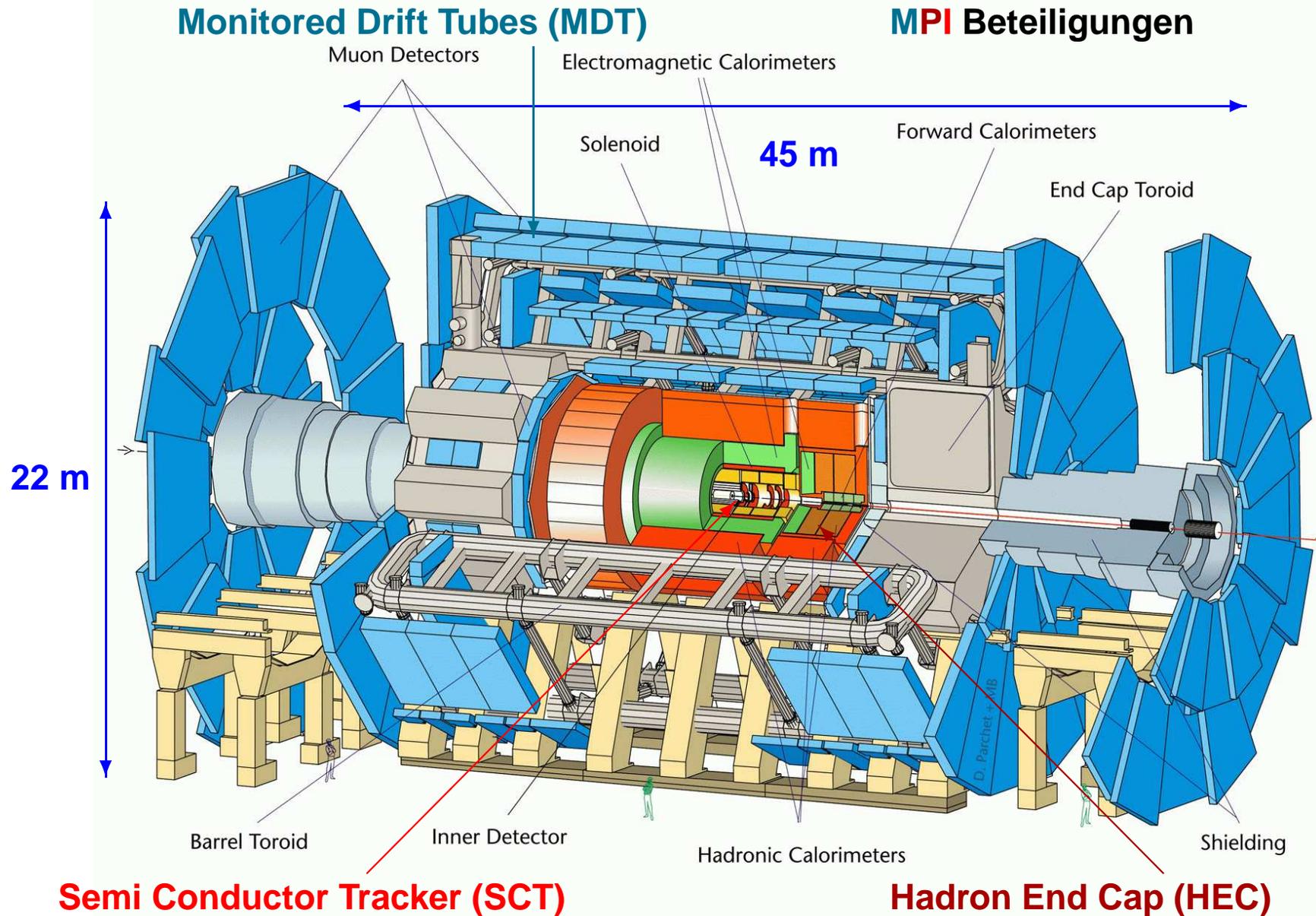
## Ein paar Schwierigkeiten auf dem Weg

- Durch das fehlende Gestein der Schächte hebt sich der LEP-Ring lokal um etwa 4 cm.
- Damit der Beschleunigerring nicht bricht, muß er nachjustiert werden.
- Kaverne:  $L \times B \times H = 53 \times 30 \times 35 \text{ m}^3$  ( $L \times B$  = Doppelturnhalle,  $H$  = Volkssternwarte München).



# Der ATLAS Detektor

0712/mb-26/06/97



**Semi Conductor Tracker (SCT)**

**Hadron End Cap (HEC)**



# 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

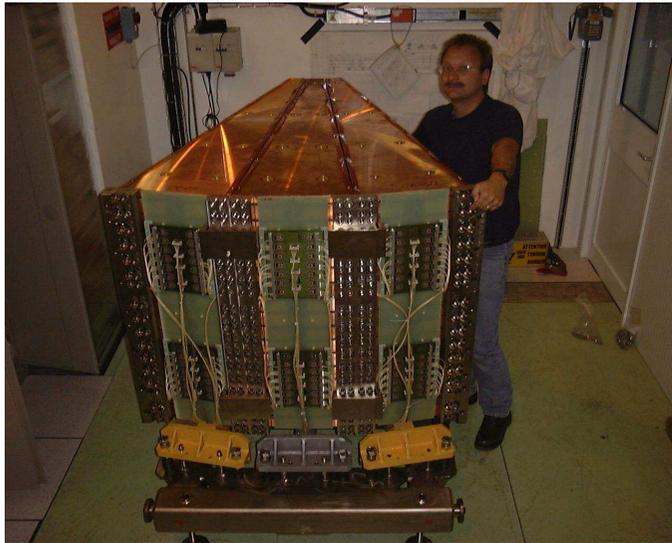
- Die Kammern werden mit kosmischen Myonen getestet.
- Sie werden mehrere Jahre gelagert.
- Der Transport muß sicher sein.

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

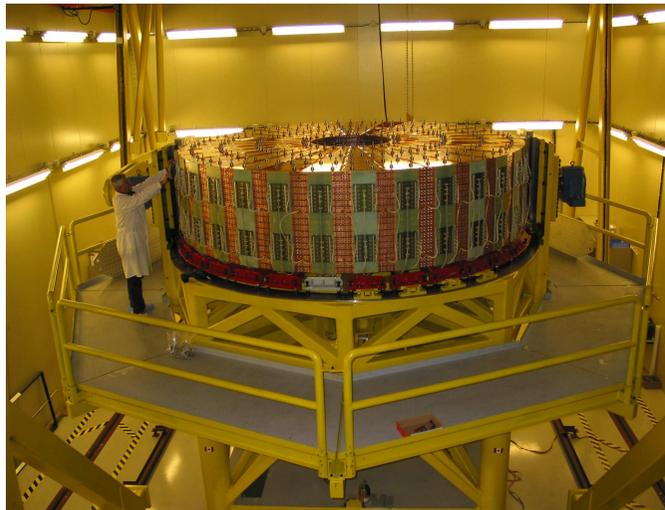




# Das Hadronische Endcap Kalorimeter



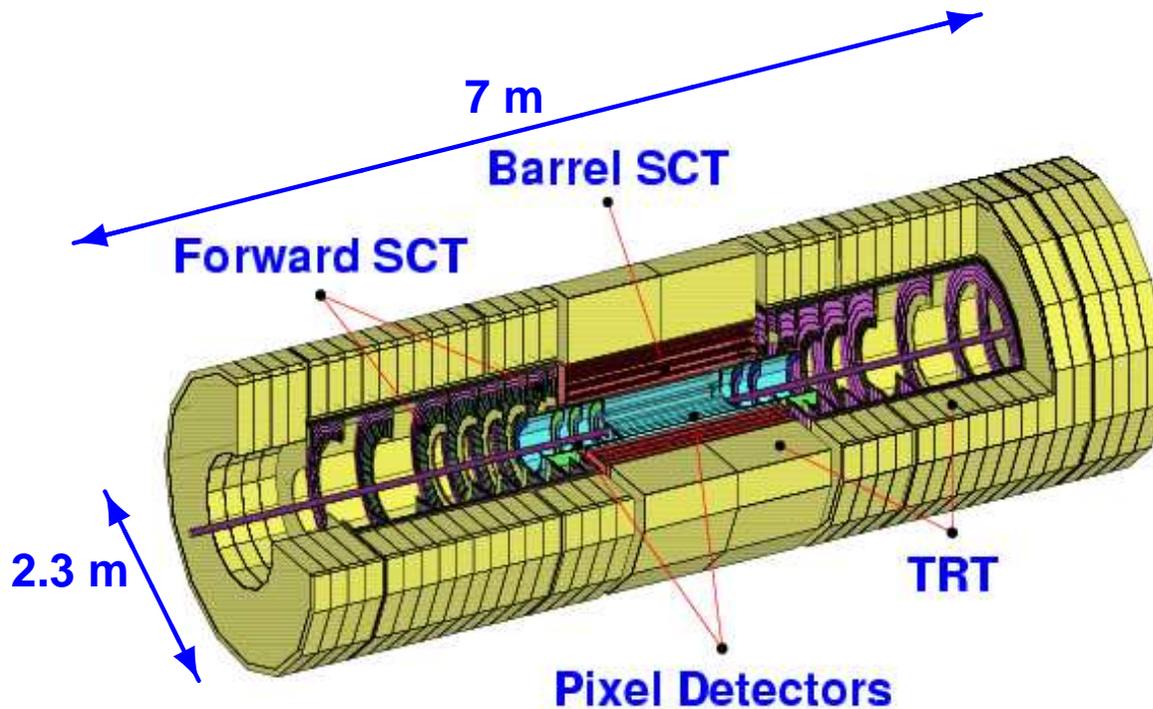
- Die Abschwächung der durch die Hadronen ausgelösten Teilchen-Schauer erfolgt durch 25 mm dicke Kupferplatten. Das sensitive Material ist flüssiges Argon.
- Es müssen je 32 Module zu Rädern zusammengefügt werden. Am MPI werden 27 dieser Module gebaut.
- Insgesamt gibt es 4 Räder. Jedes Rad hat einen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



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

## Der Pixel Detektor

- Radius 4.8 – 16 cm.
- 3 Lagen, 8 Scheiben.
- $1.4 \cdot 10^8$  Auslesekanäle.
- $\sigma$ :  $12 \mu\text{m}$  ( $R\Phi$ ) and  $\approx 70 \mu\text{m}$  ( $z/R$ ).

## Der Semi Conductor Tracker

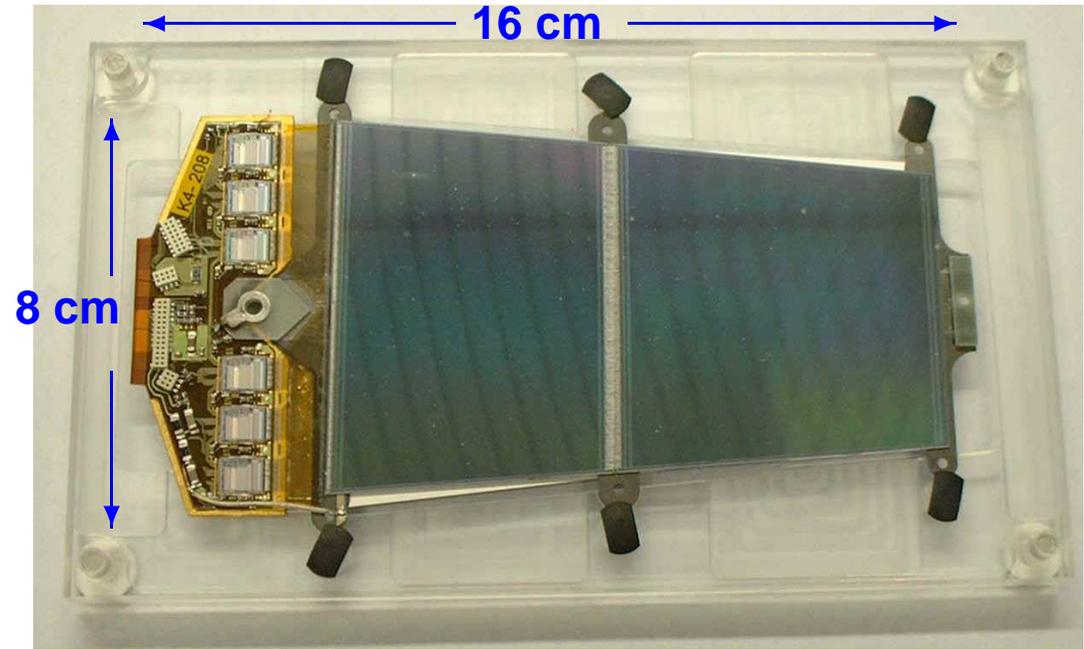
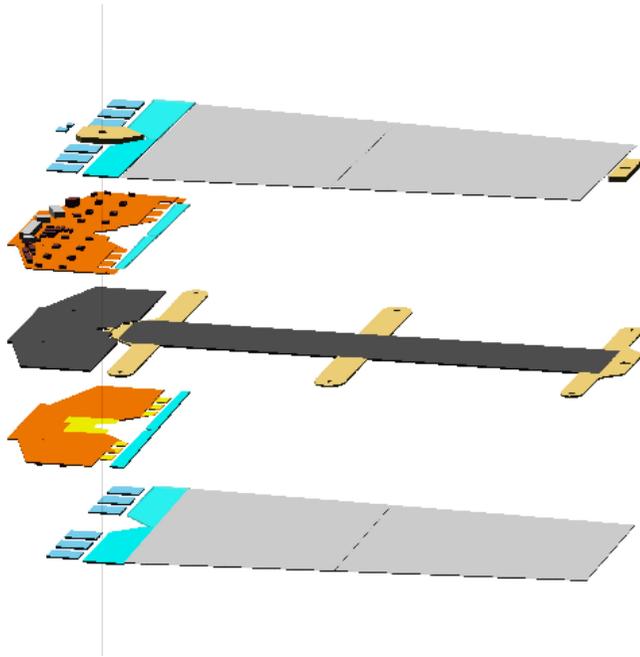
- Radius 27 – 52 cm.
- 4 Lagen, 18 Scheiben
- $6.3 \cdot 10^6$  read-out channels.
- 4088 Module,  $61 \text{ m}^2$  Silizium
- $\sigma$ :  $16 \mu\text{m}$  ( $R\Phi$ ) and  $580 \mu\text{m}$  ( $z/R$ ).

## Der Transition Radiation Tracker

- Radius 56 – 107 cm.
- 420 k Auslesekanäle.
- Xe Strahler zum Elektronnachweis.
- $\sigma$ :  $170 \mu\text{m}$  / pro Röhrchen.



# Vom Modell zum Modul ist ein langer Weg



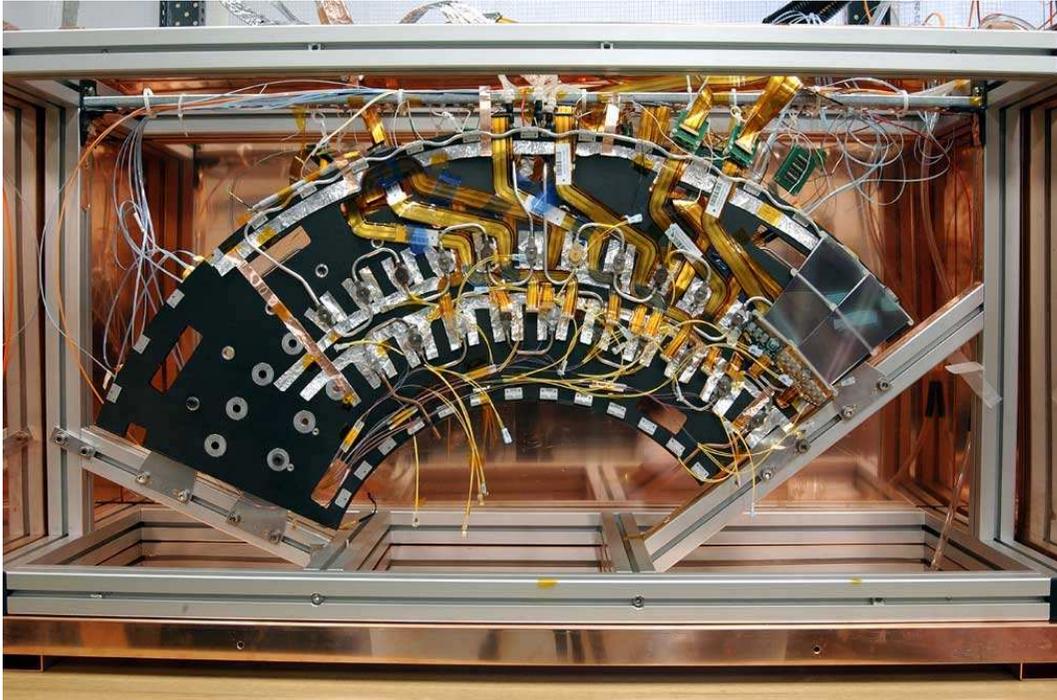
## Die wichtigsten Dinge sind

- 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.



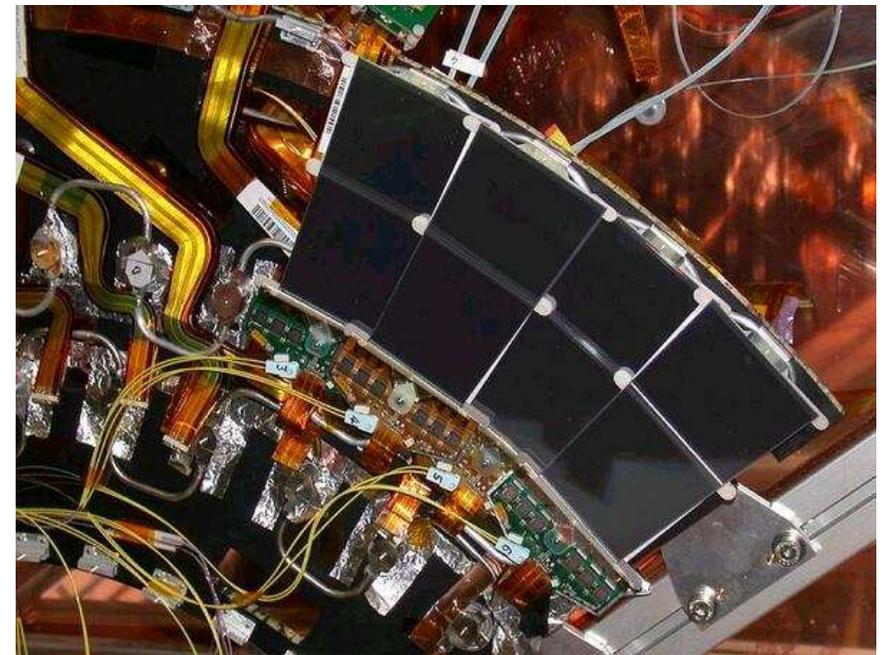


# Der Test eines Teilsystems



**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

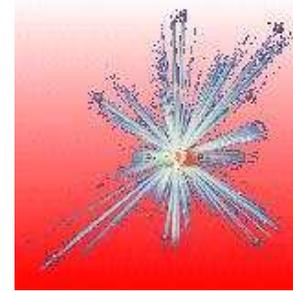
## Dieser Vortrag



<http://www.mppmu.mpg.de/~nisius/welcomeaux/lehre.html>

## Die Startseite der deutschen Teilchenphysik

Eine kompakte 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.