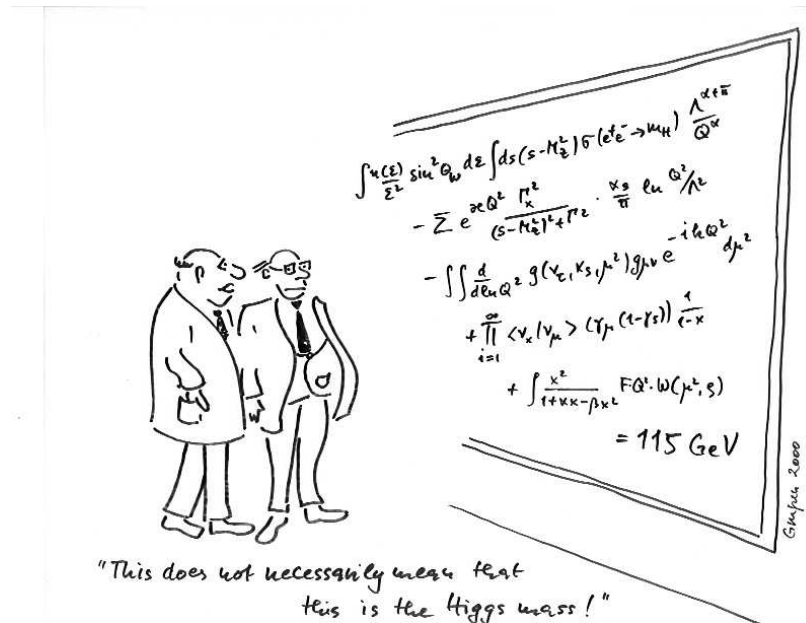




Das Higgs-Boson - ein Konzept zur Massenerzeugung

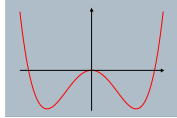


Richard Nisius
MPI München
nisius@mppmu.mpg.de



Was Sie in der nächsten knappen Stunde erwartet

Einleitung



Das Higgs-Boson im Standardmodell (SM)



Die Higgs-Suche bis heute

- 1) Die Suche bei LEP
- 2) Die Suche am Tevatron



Die Higgs-'Messungen' in der Zukunft

- 1) Was können wir vom Run II am Tevatron erwarten?
- 2) Das Entdeckungspotential des Large Hadron Colliders (LHC)
- 3) Was bringt ein zukünftiger Linearbeschleuniger (LC)?



Zusammenfassung und Ausblick



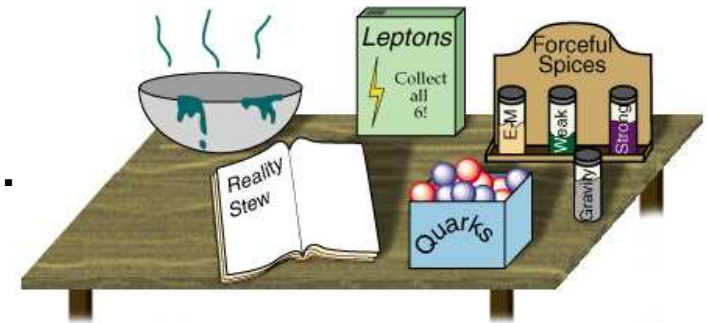
Was wir heraus gefunden haben

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

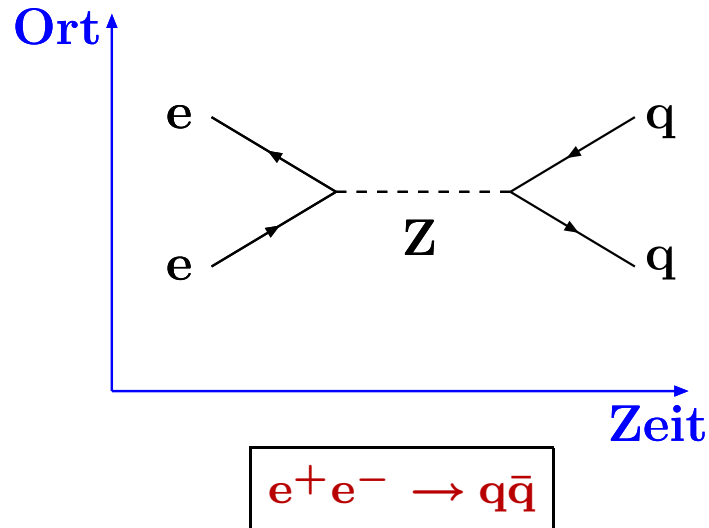
Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
Leptons	e electron	μ muon	τ tau
	I	II	III

- 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.

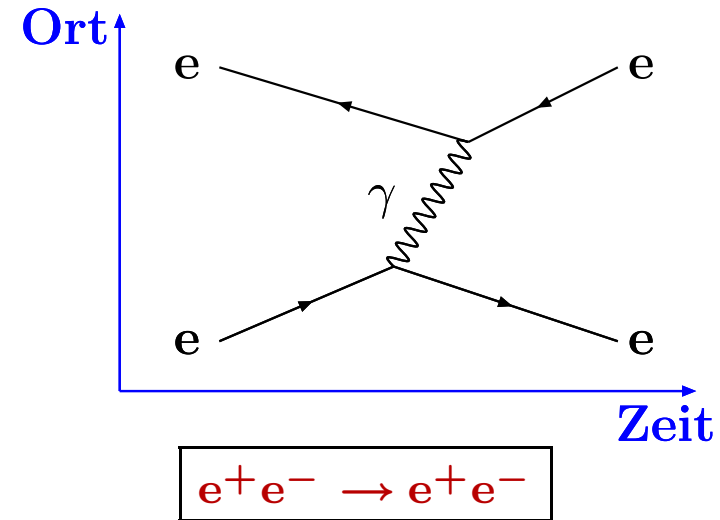


Wechselwirkungen im Standardmodell

Paarvernichtung und Paarerzeugung



Emission und Absorption



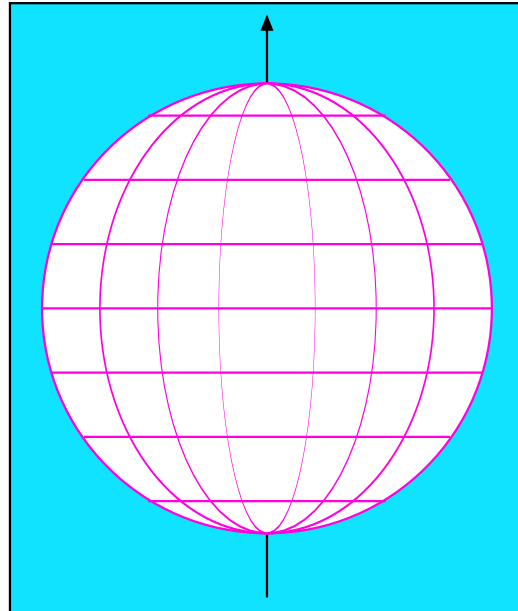
Das mathematische Konzept

- Eichgruppe: $U(1)_Y \times SU(2)_L \times SU(3)_C$ mit lokaler Eichinvarianz.
- Eichbosonen: γ , Z , W^\pm (elektroschwach) und Gluonen (stark).
- Ladungen: elektrische Ladung, schwacher Isospin und Farbe.
- Die Bosonen, die Ladungen tragen, haben Selbstwechselwirkungen: Z, W (elektroschwach) und Gluonen (stark).

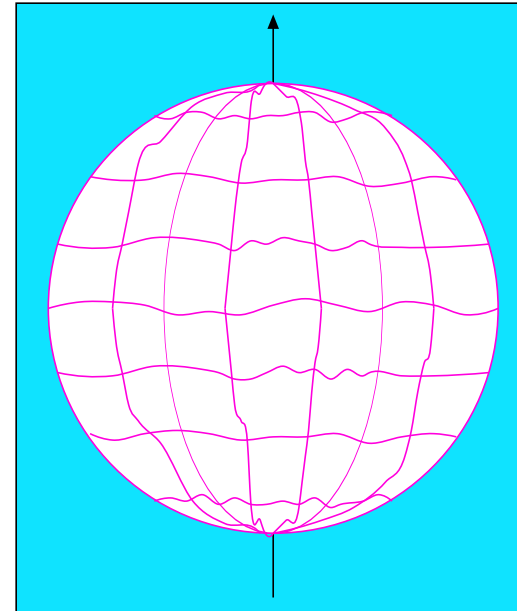


Eichtransformationen freier Felder

Global: $\Phi' = e^{i\alpha} \Phi$



Lokal: $\Phi' = e^{i\alpha(x)} \Phi$



Invarianz \Rightarrow

Ladungserhaltung

Wechselwirkung mit Photonfeld

Die Forderung nach lokaler Eichinvarianz erzwingt ein masseloses Eichboson.



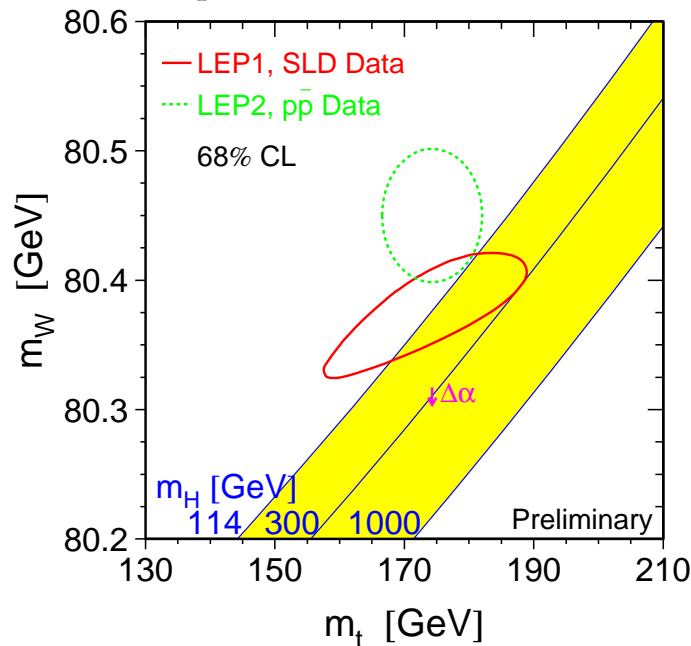
Das Standardmodell...

...ist präzise getestet worden, ...

● **Beispiele:**

$$M_W = (80.449 \pm 0.034) \text{ GeV}$$

$$M_{\text{top}} = (174.3 \pm 5.1) \text{ GeV}$$



Gute Übereinstimmung von direkten und indirekten Messungen.

...aber es gibt einige fundamentale Probleme

- Die lokale Eichinvarianz funktioniert nur für masselose Eichbosonen, also nur für Photonen und Gluonen, aber nicht für W und Z-Bosonen!
- Der Wirkungsquerschnitt longitudinaler W-Bosonen divergiert für hohe Energien.

$$\sigma \left(\begin{array}{c} W_L^+ \\ W_L^- \end{array} \rightarrow \begin{array}{c} W_L^+ \\ W_L^- \end{array} \text{ via } Z/\gamma + \begin{array}{c} W_L^- \\ W_L^+ \end{array} \rightarrow \begin{array}{c} W_L^- \\ W_L^+ \end{array} \text{ via } Z/\gamma \right) \sim S$$

- Wir wollen verstehen, was die Massen der Elementarteilchen erzeugt.

Wir brauchen eine Lösung für diese Schwächen des Standardmodells.

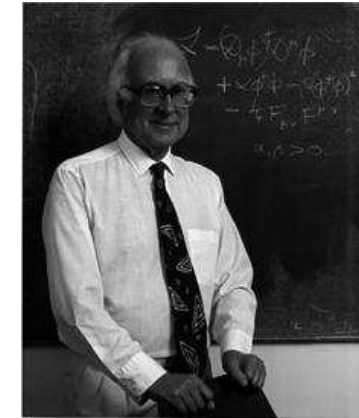


Eine Lösung - das Higgs-Boson

Die Vermutung (1965)

- Fundamentale Teilchen, sowohl Fermionen als auch Bosonen, sind an sich masselos.
- Massen werden erst durch Wechselwirkungen mit einem Hintergrundfeld, dem Higgsfeld, erzeugt.
- Je stärker die Kopplung um so größer die Masse.
- Die Eichbosonen erhalten ihre longitudinalen Anteile durch spontane Symmetriebrechung.

Der Vater des Gedankens



Peter Higgs

Die Konsequenz

- Die Existenz des skalaren Higgs-Bosons als Anregung des Higgsfeldes.

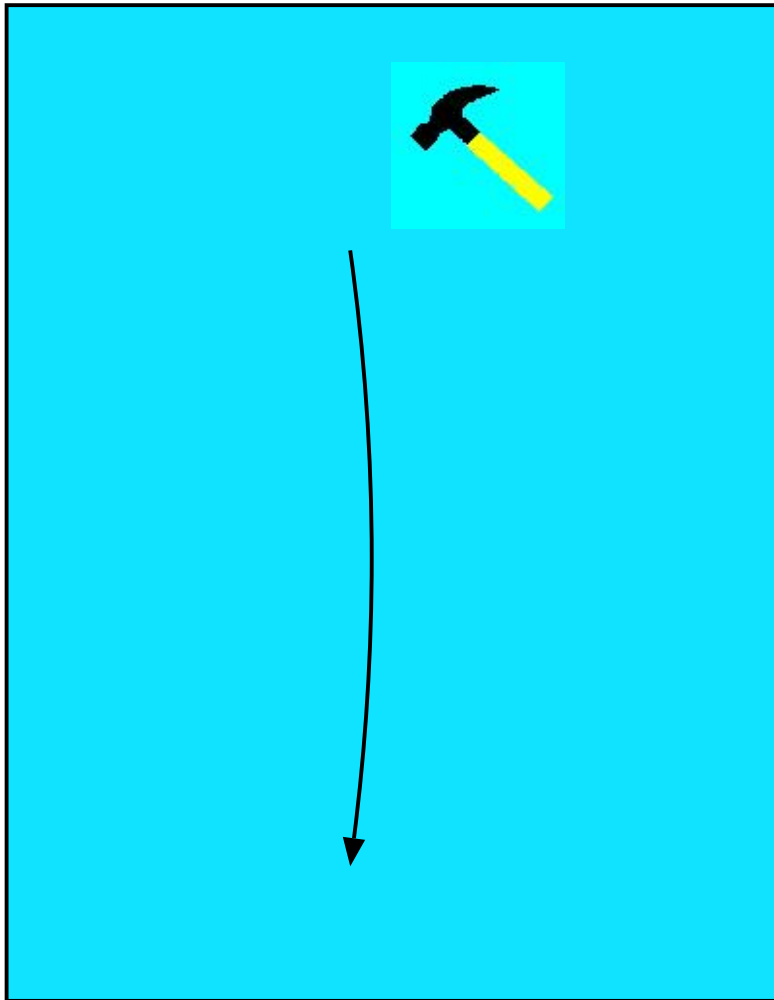
Die Vorhersagen des Standardmodells

- Die Kopplungen des Higgs-Bosons an alle Teilchen sind vorhergesagt.
- Die Zerfalls-Kanäle und Raten des Higgs-Bosons bei gegebener Masse liegen fest.

Die Masse des Higgs-Bosons ist nicht vorhergesagt und muß gemessen werden.



Spontane Symmetriebrechung - ein Beispiel



- Ein rotationssymmetrisches System.
- Ob nun so oder so, der neue Grundzustand hat nicht mehr die Symmetrie des Systems
 \Leftrightarrow **spontane Symmetriebrechung.**
- **Goldstone Theorem:**
Immer wenn eine kontinuierliche Symmetrie eines Systems im Grundzustand nicht realisiert ist, treten masselose skalare Teilchen, die Goldstone-Bosonen, auf.
- **Higgs-Mechanismus:**
Diese masselosen Goldstone-Bosonen können durch eine Eichtransformation in die longitudinalen Freiheitsgrade der Eichbosonen umgewandelt werden. Man sagt dazu auch:
'Das Goldstone Boson wird vom Eichboson gefressen.'



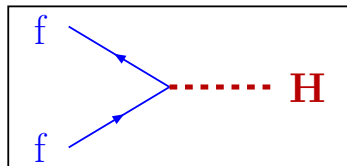
Das Higgs-Boson im Standardmodell

Das Higgs-Feld

- Skalares komplexes Dublett $\begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{pmatrix}$.
- Drei der vier Freiheitsgrade ergeben die longitudinalen Freiheitsgrade der W^\pm und Z-Bosonen, der vierte Freiheitsgrad liefert das skalare Higgs-Boson.

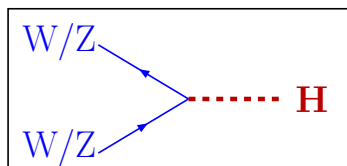
Die Kopplungen des Higgs-Bosons

- Die Yukawa Kopplung an Fermionen:



$$c_{Hff} = i \frac{m_f}{v}, \quad (v^2 = \frac{1}{G_F \sqrt{2}})$$

- Die Kopplung an W/Z - Bosonen:



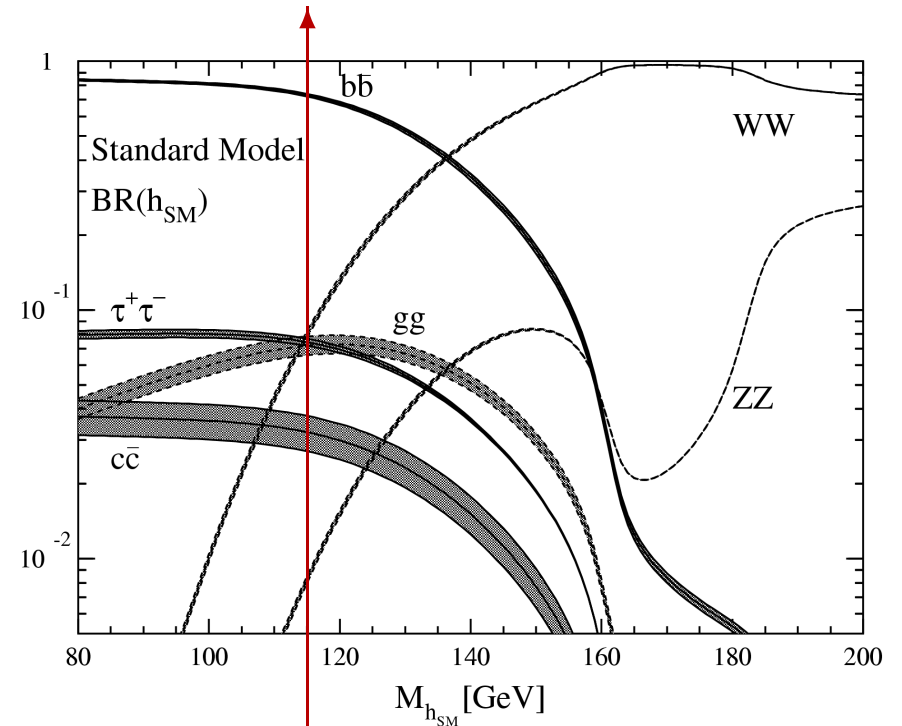
$$c_{HWW} = \frac{i}{2} (e \sin \theta_W)^2 v g_{\mu\nu}$$

$$= ie \sin \theta_W m_W g_{\mu\nu}$$

$$c_{HZZ} = c_{HWW} / (\cos \theta_W)^2$$

Die Zerfallsbreiten

$$M_H = 115 \text{ GeV}$$



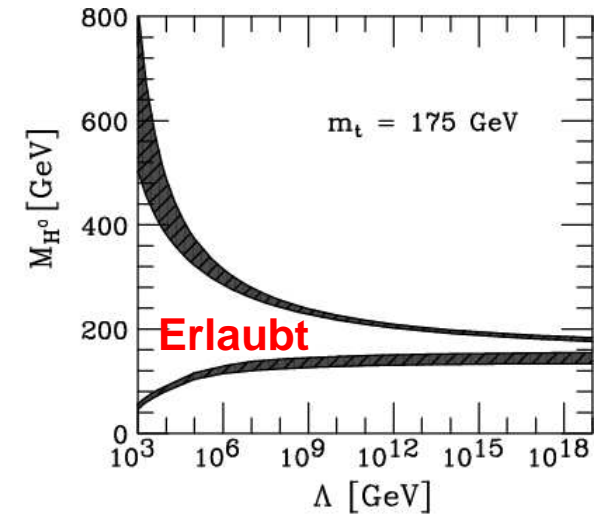
- 74% ($H \rightarrow b\bar{b}$)
- 7% ($H \rightarrow \tau^+ \tau^- , W^+ W^- , gg$)
- 4% ($H \rightarrow c\bar{c}$)



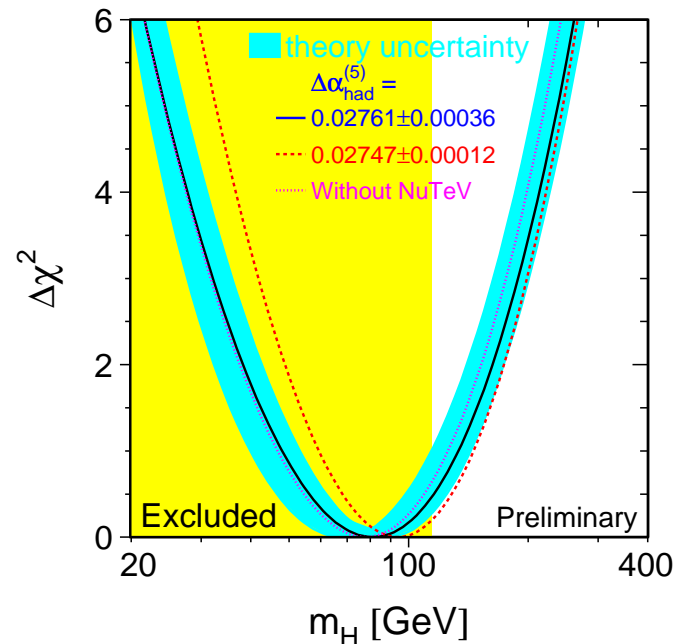
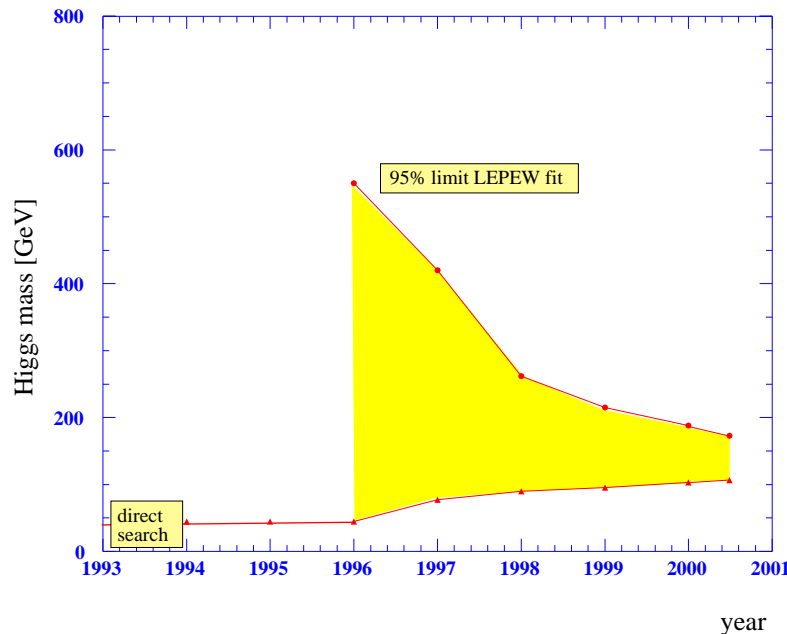
Wo müssen wir nach dem Higgs-Boson suchen?

Das Resultat langer Evolutionen...

- Rechnung für $M_{\text{top}} = 175 \text{ GeV}$, $\alpha_s(m_Z^2) = 0.118$.
- Λ ist die Skala bis zu der das SM gültig bleibt.
- Forderung der Perturbativität \Rightarrow Obere Grenze.
- Stabilität des Vakuums \Rightarrow Untere Grenze.



...und langer Bemühungen

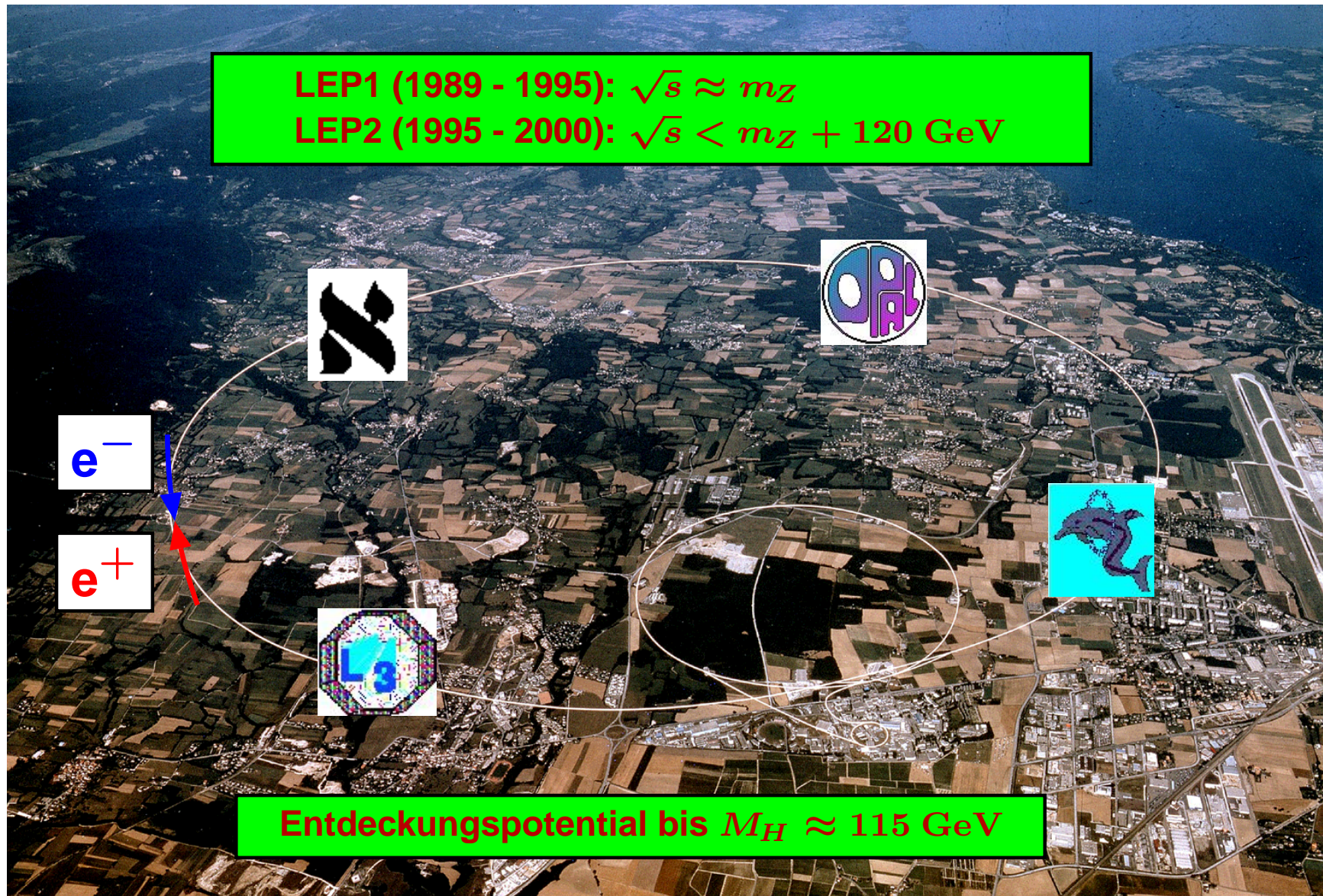


Der beste Fit

- $M_H = 81_{-33}^{+52} \text{ GeV}$
- $M_H < \mathcal{O}(200) \text{ GeV}$ mit 95% CL



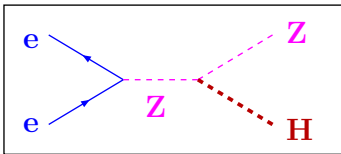
Der Large Electron Positron Beschleuniger (LEP)



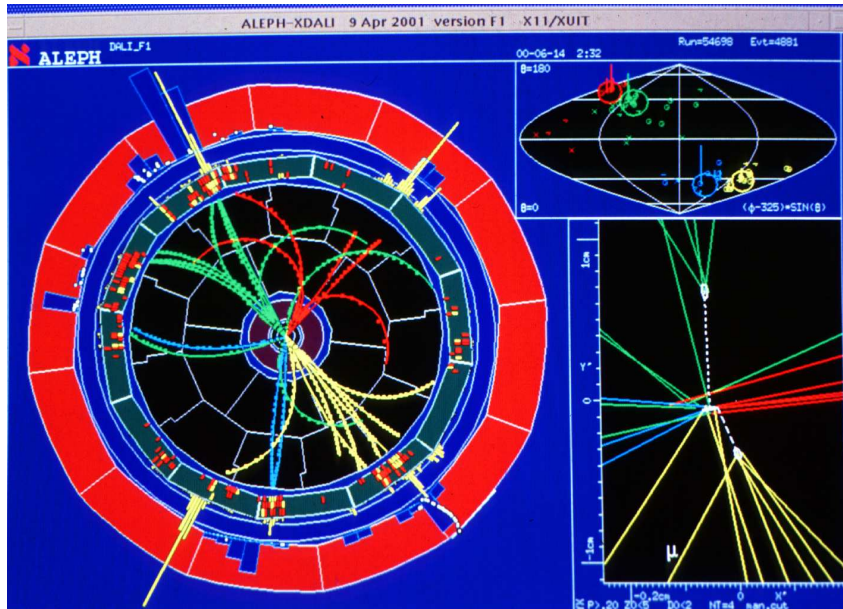


Higgs-Suche bei LEP - eine Evidenz?

Produktion i.w. durch Higgs Strahlung



Ein Kandidat



Die signifikantesten Kandidaten

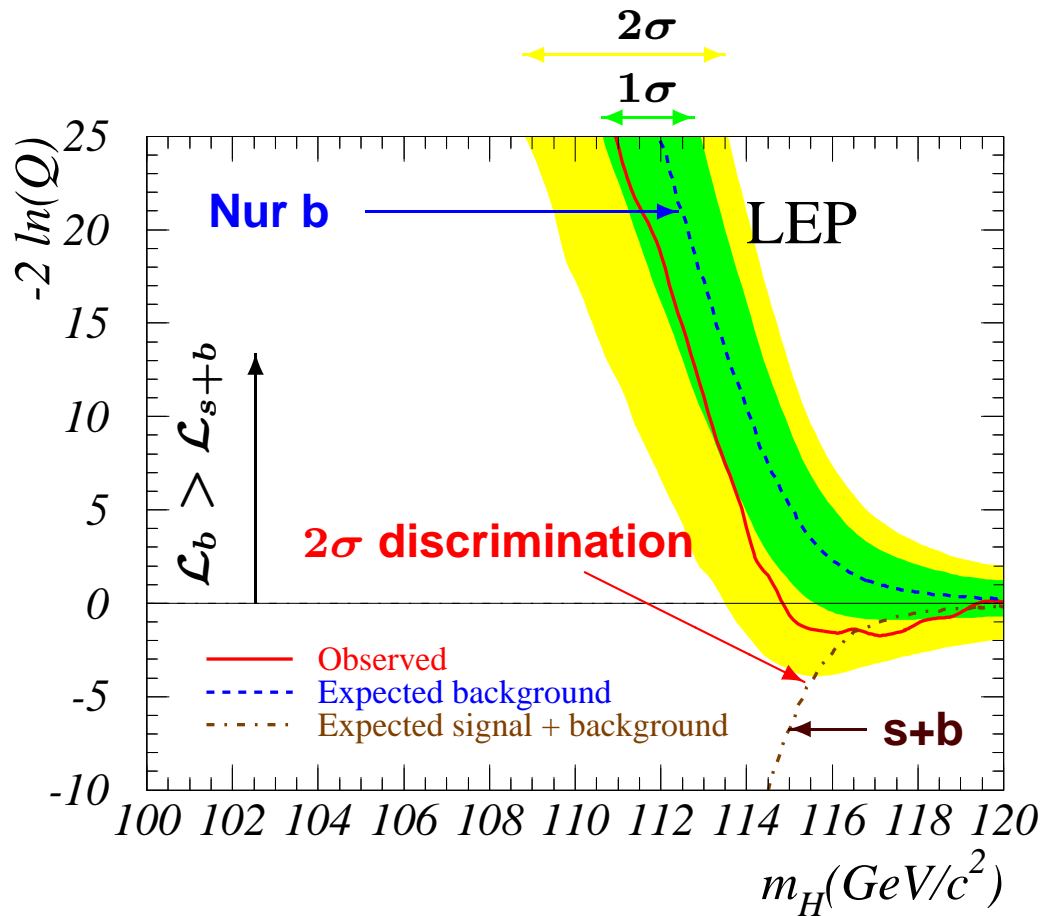
	4-jets	E_{miss}	lepton	tau	
	H, Z bb, qq	H, Z $bb, \nu\nu$	H, Z bb, ee $bb, \mu\mu$	H, Z $bb, \tau\tau$ $\tau\tau, qq$	
A	6	-	1	1	8
D	3	-	-	-	3
L	2	2	-	-	4
O	1	1	-	-	2
	12	3	1	1	17

- Die Erwartung: 8.4 (Signal) + 15.9 (Background).
- Zusätzliche zu den Kandidaten fließen die Effizienz (30-60%) und der Background in die Analyse mit ein.
- Die meisten Kandidaten sind 4-jets.
- Die meisten Kandidaten hat **ALEPH**.

Erst eine komplizierte Kombination aller Kanäle und Experimente liefert das LEP Resultat.



Higgs-Suche bei LEP - das Resultat



Der lange Weg...

- **Die Frage:** Sind die Daten besser verträglich mit Background (b) oder mit Signal = $f(M_H)$ plus Background (s+b).
- **Das Mittel:** Likelihood ratio $Q = \mathcal{L}_{s+b} / \mathcal{L}_b$
- **Die Formel:**

$$-2 \ln Q = 2s_{\text{tot}} - 2 \sum_i n_i \ln [1 + s_i / b_i]$$

...zum vorläufigen amtlichen Endergebnis

- LEP Luminosität $\mathcal{L}_{\text{int}} = 2.5 \text{ fb}^{-1}$
- $M_H > 114.1 \text{ GeV}$ mit **95% CL**.
- Im Bereich $115 \text{ GeV} < M_H < 118 \text{ GeV}$ ist $CL(s + b) = 37\%$ und $CL(b) = 8\%$.

Erst die Zukunft wird die Frage nach dem Higgs beantworten.



Der Proton - Antiproton Beschleuniger Tevatron

Ein paar Details



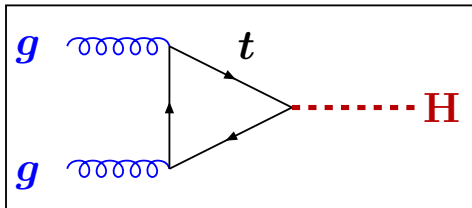
	Run I 1992 - 1996	Run II 2001 - 20xx
Umfang [km]	6.4	6.4
$E_{p,\bar{p}}$ [TeV]	0.9	0.98
Teilchenpakete	6x6	140x103
N_p/Paket [10^{11}]	2.3	2.7
$N_{\bar{p}}/\text{Paket}$ [10^{11}]	0.55	1.0
\mathcal{L}_{int} [fb^{-1}]	0.11	10-30

Das Tevatron wird im RUN II eine wesentlich höhere Ereignisrate liefern.

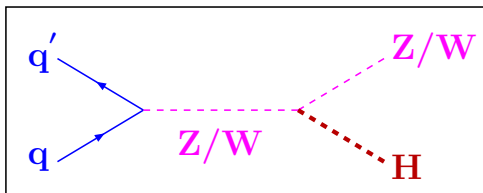


Higgs-Suche am Tevatron - die Vergangenheit

Die Produktionskanäle

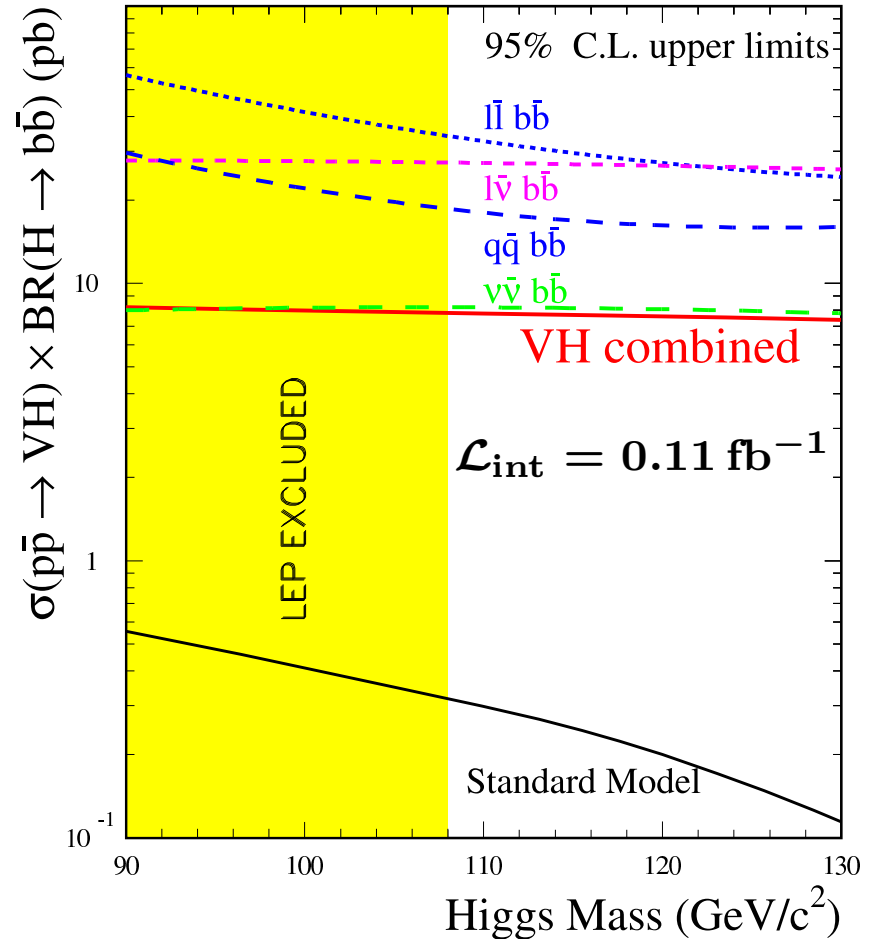


- ⊕ **Größte Rate ca. 1pb.**
- ⊖ **Immenser Untergrund.**



- ⊖ **Faktor 2-5 kleinere Rate.**
- ⊕ **Lepton-Tag hilft den Untergrund zu bekämpfen.**

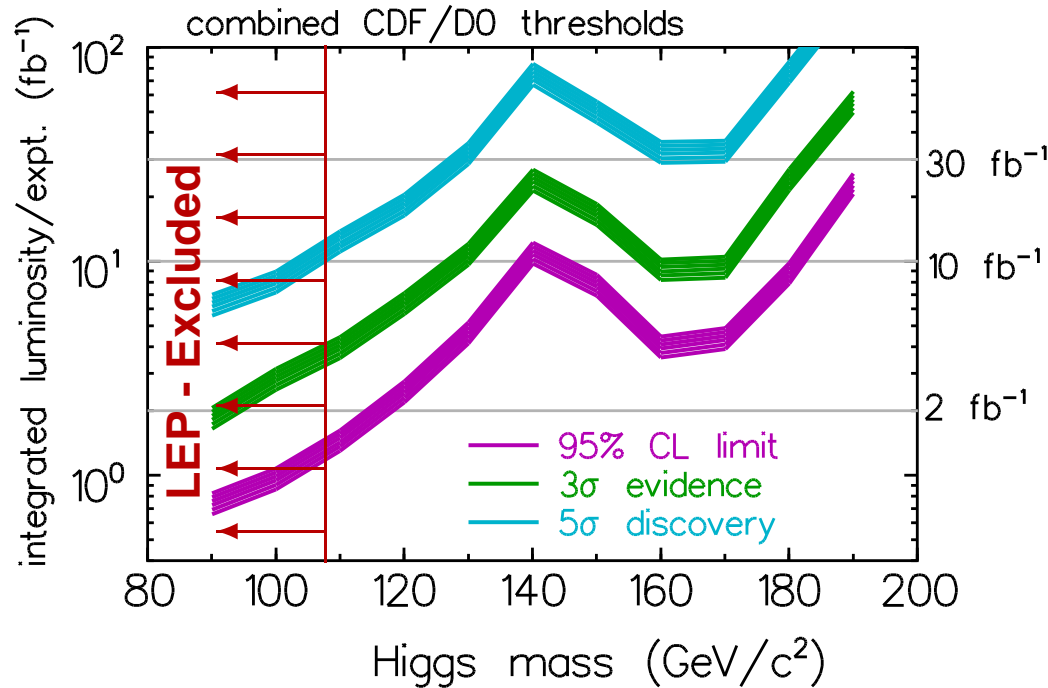
CDF PRELIMINARY Run I



Die Sensitivität von RUN I reichte nicht aus, um das Standardmodell zu testen.



Higgs-Suche am Tevatron - die Zukunft



Lumi Erwartungen

- 0.1 fb^{-1} bis Ende 2002. (✓)
- 2 fb^{-1} bis Ende 2004.
- 10 fb^{-1} bis zum Start von LHC.

Suchkanäle

- $114.1 \text{ GeV} < M_H < 135 \text{ GeV}$
 $qq' \rightarrow Z/W \rightarrow Z/WH$
- $M_H > 135 \text{ GeV}$
 $gg \rightarrow H \rightarrow WW^*$

Die Umfrage: Was kann im RUN II erreicht werden?

Realist: Eine Verbesserung gegenüber LEP ist ab ca. 2 fb^{-1} Luminosität möglich.

Pessimist: Mit 10 fb^{-1} werden Massen bis $M_H = 180 \text{ GeV}$ mit 95% CL ausgeschlossen.

Optimist: Für $M_H = 116 \text{ GeV}$ und 15 fb^{-1} ist eine 5 Sigma Entdeckung möglich.

Alles ist möglich, wir werden warten müssen. Und um sicher zu gehen ...



Der Large Hadron Collider (LHC)





Der LHC - ein Proton-Proton Beschleuniger (2007⁺⁺)

Alice

Schwere Kerne, ...

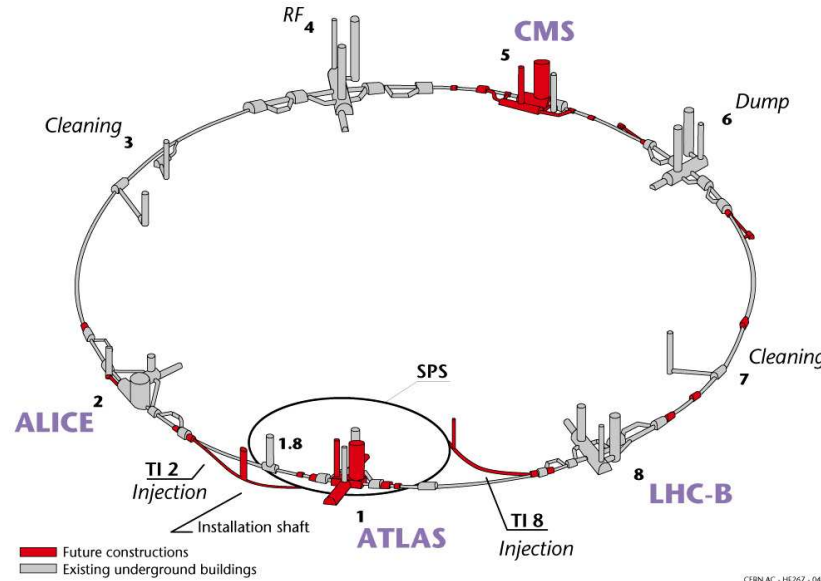
LHC-B

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



Bauarbeiten für ATLAS - die Schächte

Der Bauplan: Man nehme viel Platz,...



...grabe zwei tiefe Löcher...



Ein paar Daten

- Durchmesser: 12.6 und 18 m
- Tiefe: 60 m (Windrad im Windpark Vetschau)
- Baubeginn: 1998, während LEP läuft !
- Fertigstellung: 2002



Bauarbeiten für ATLAS - die Kaverne


...bringe schweres Gerät hinunter...



...und schachte eine Kaverne aus.



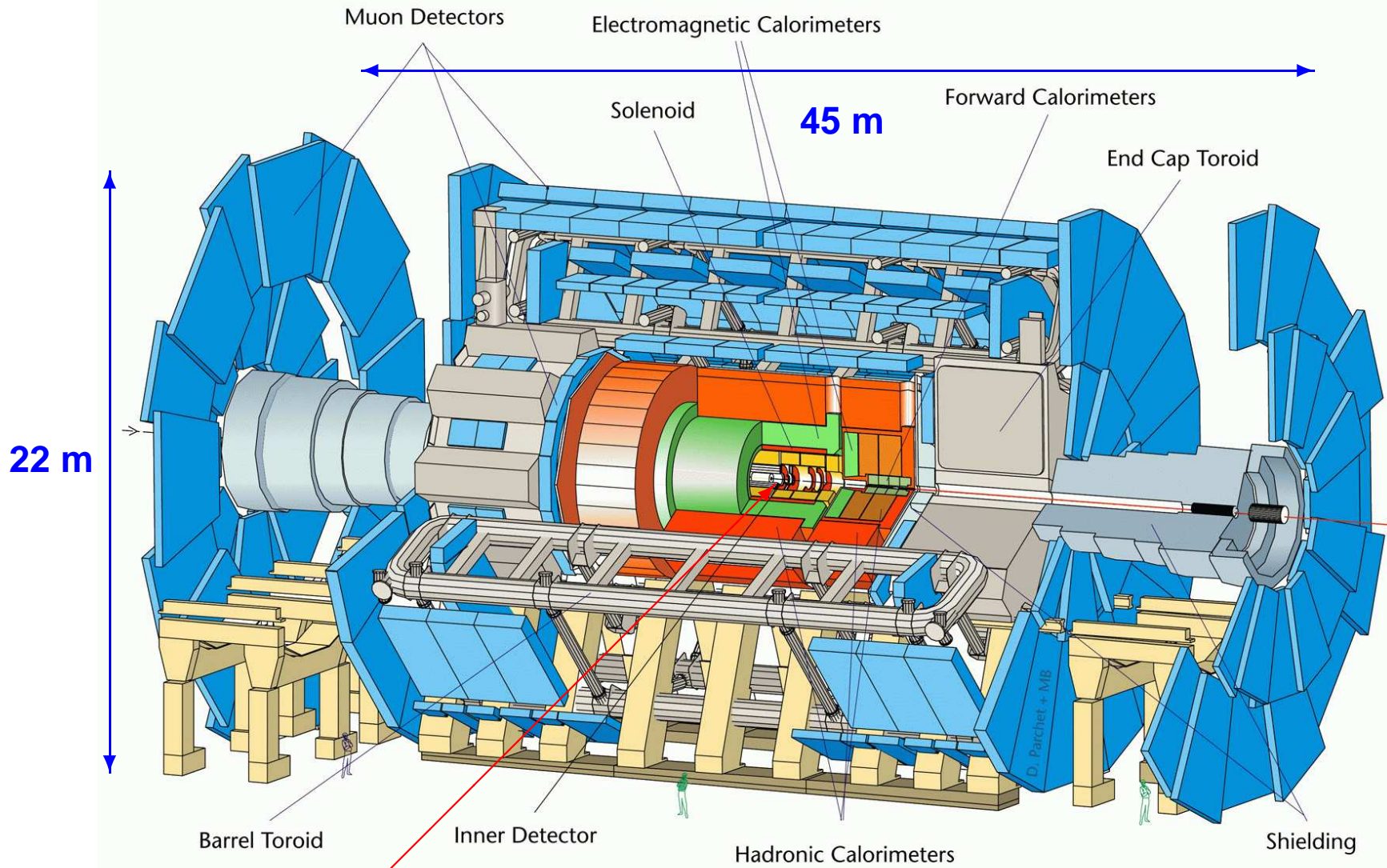
Ein paar Schwierigkeiten auf dem Weg

- 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: $L \times B \times H = 53 \times 30 \times 35 \text{ m}^3$ ($L \times B$ = Doppelturhalle, H = Bohrturm am SUPER C ).



Der ATLAS Detektor

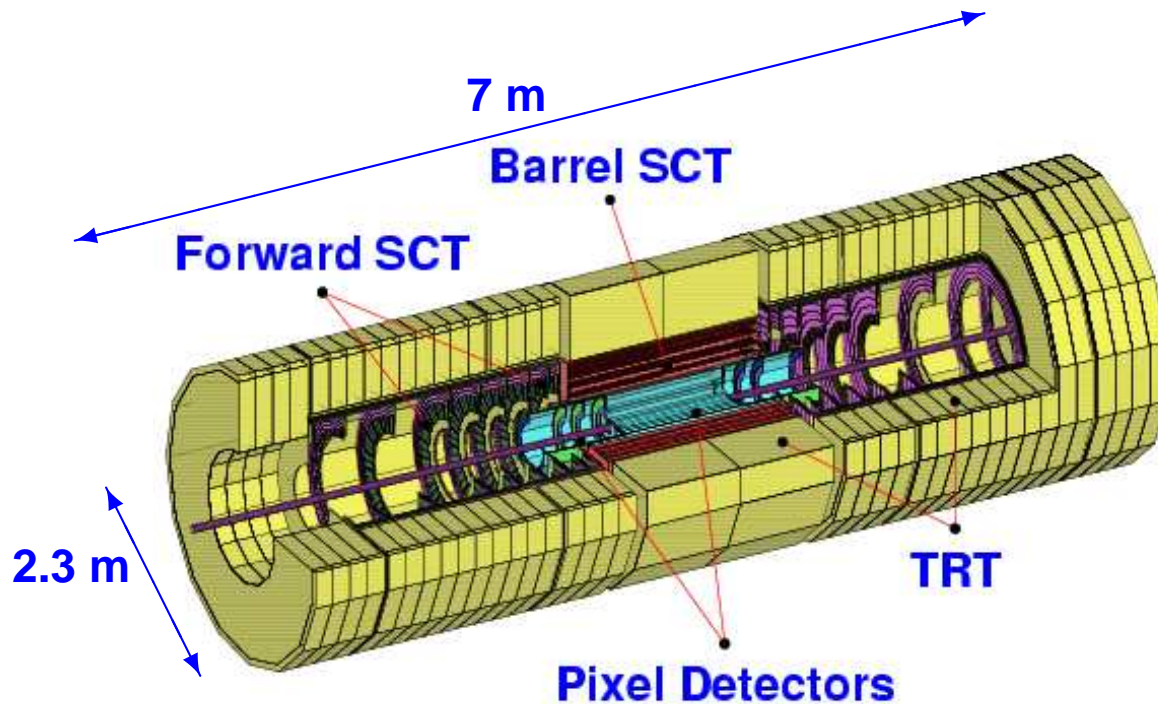
0712/mb-26/06/97



Semi Conductor Tracker (SCT)



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

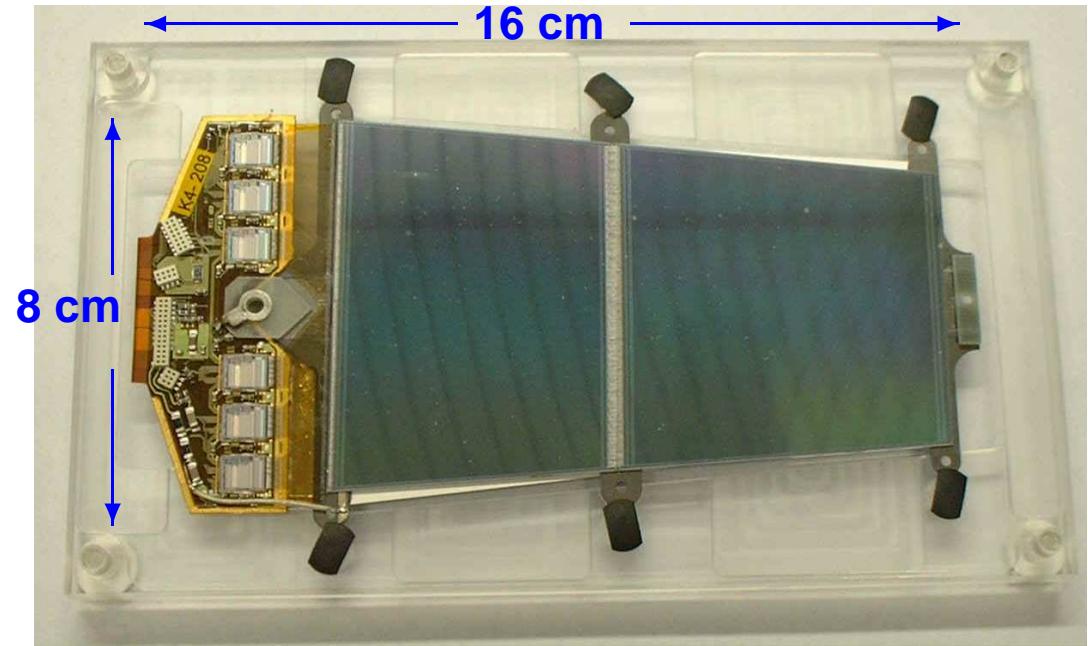
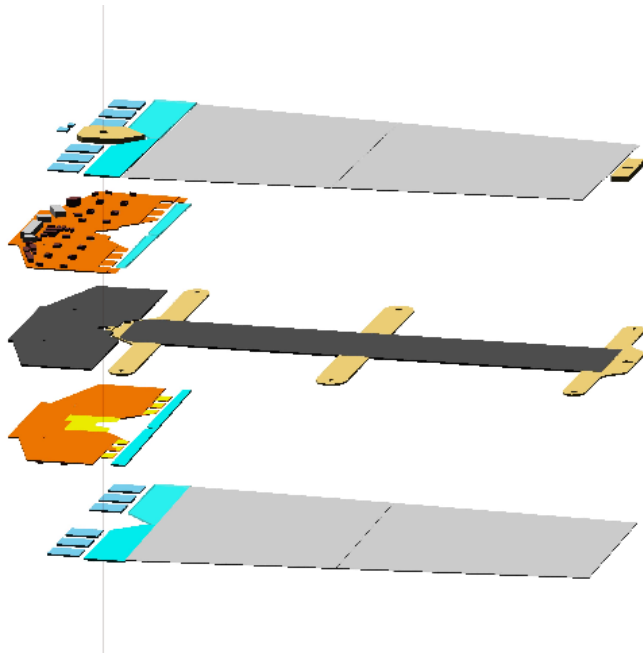
Der SemiConductor Tracker

- Radius 27 – 52 cm
- 4 Lagen, 18 Scheiben
- $6.3 \cdot 10^6$ Auslesekanäle
- 4088 Module, 61 m² Silizium

Am MPI bauen wir 400 Module des SCT Vorwärtsbereichs.

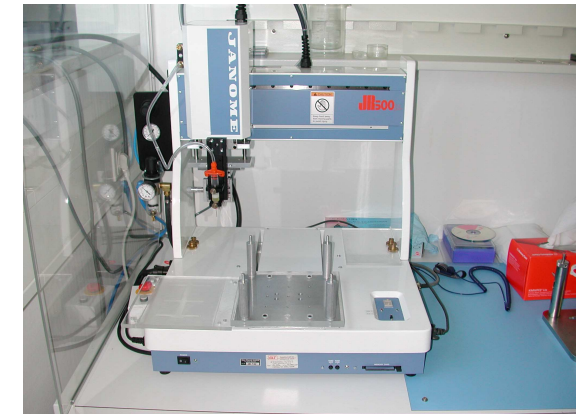
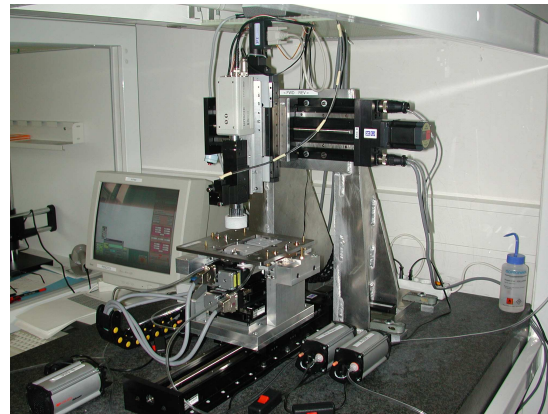


Vom Modell zum Modul ist ein langer Weg



Die wichtigsten Dinge sind

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





Die Modultypen

Hybrid

6-lagige Kupfer-Polyimid
Flex auf Carbon-Substrat

Befestigungspunkte
Genauigkeit 20 μm

Detektoren
ca. $6 \times 6 \times 0.285 \text{ cm}^3$
768 einseitige p Streifen
auf n Substrat mit 50-90 μm
Streifenabstand

Auslesechips

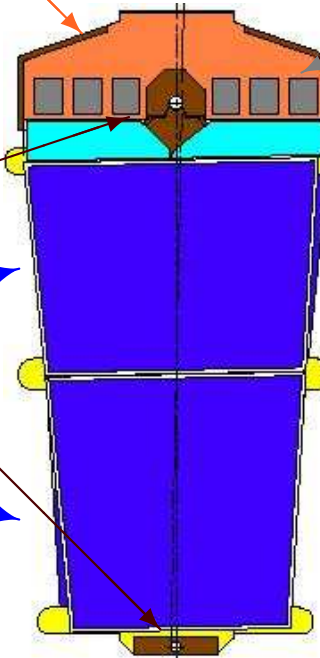
6 ABCD3T Chips pro Seite,
binäre Auslese

Fan-ins

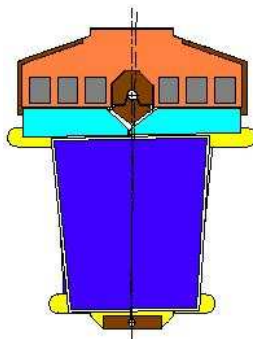
4/Modul, Glas mit Al-Streifen
300 μm dick

Trägerstruktur (Spine)

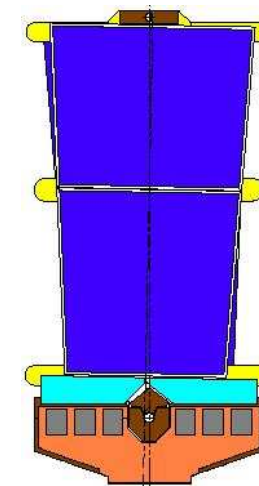
Thermal Pyrolytic Graphite
500 μm dick, 1700 W/m/K



Mittleres Modul



Inneres Modul

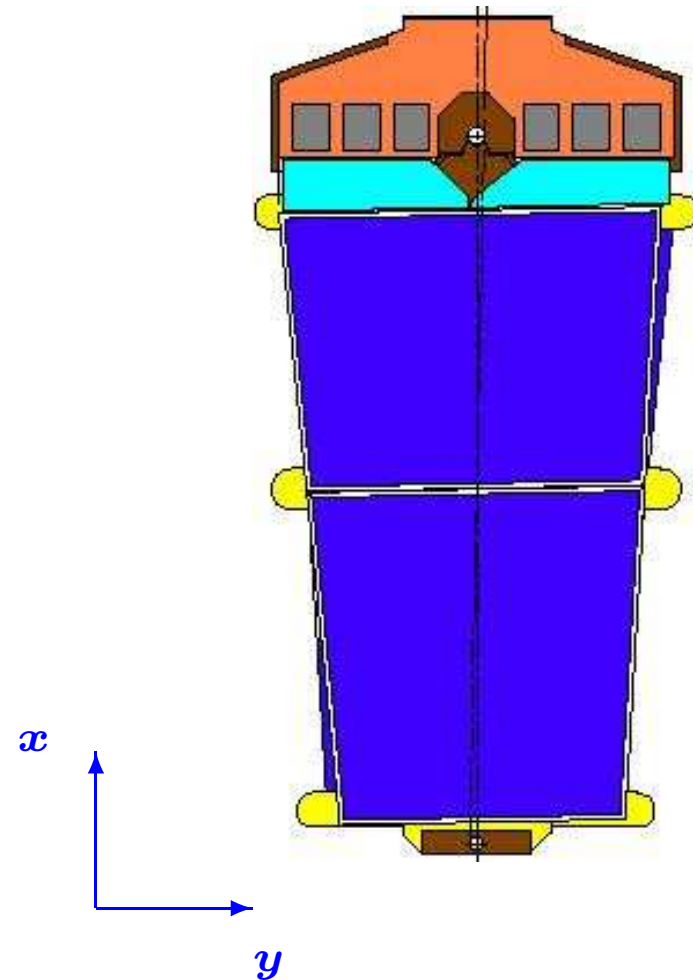
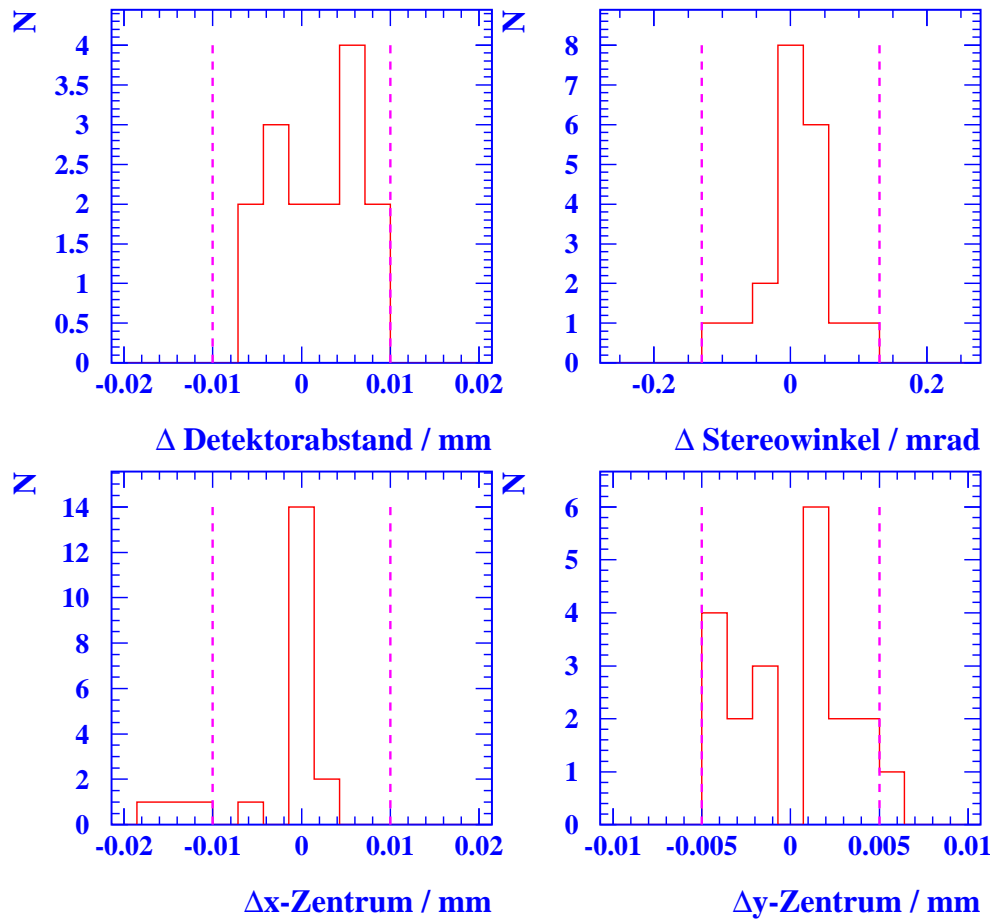


Äußeres Modul



Die Reproduzierbarkeit beim Modulbau

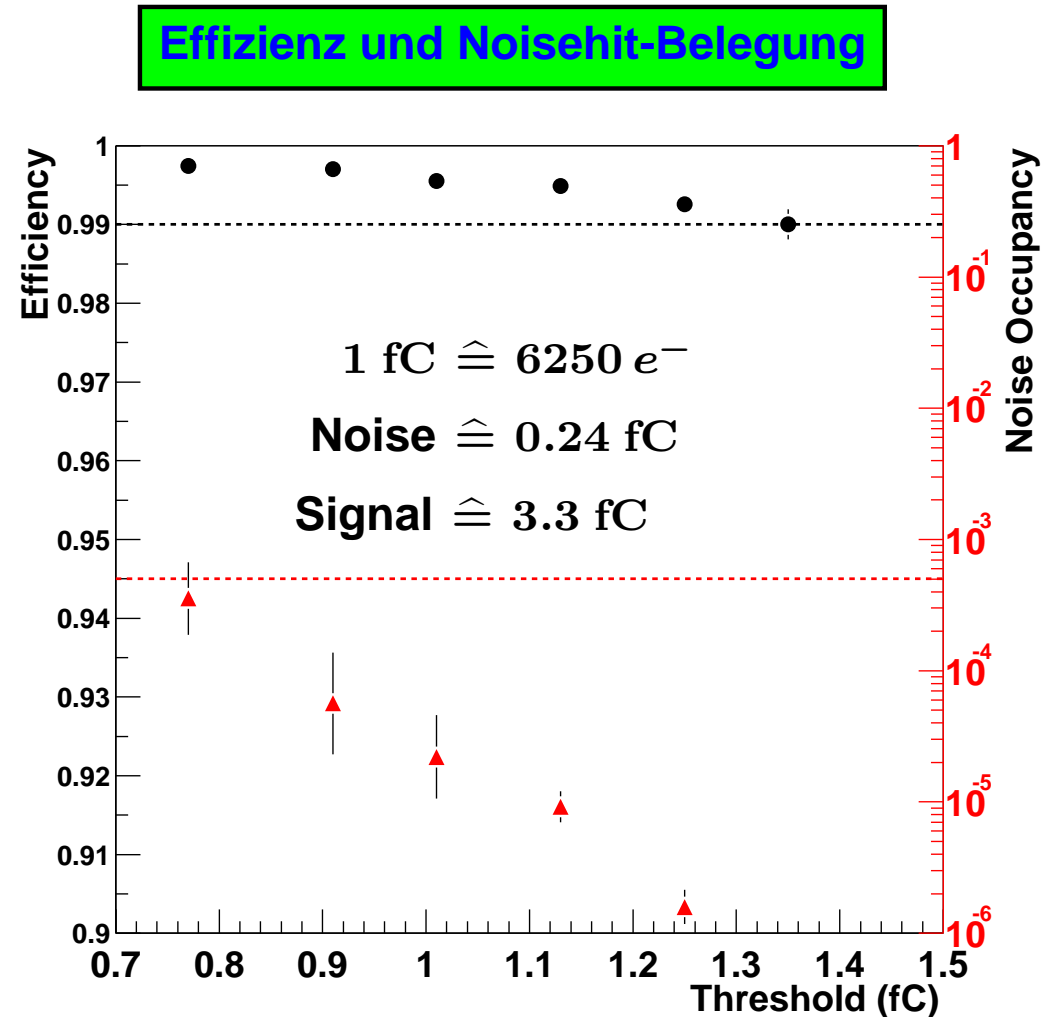
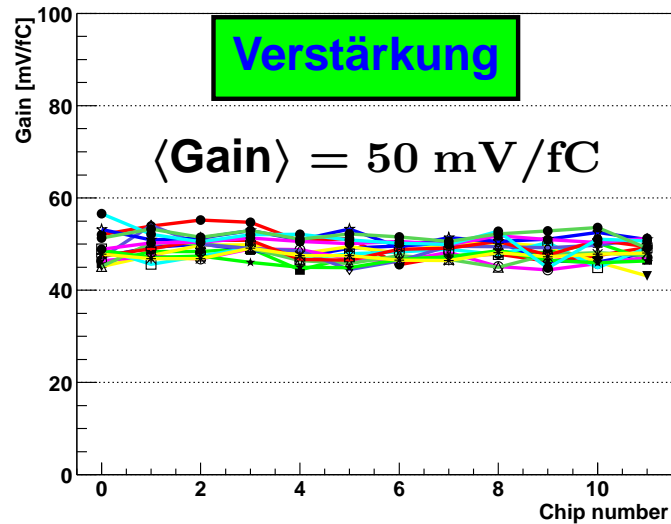
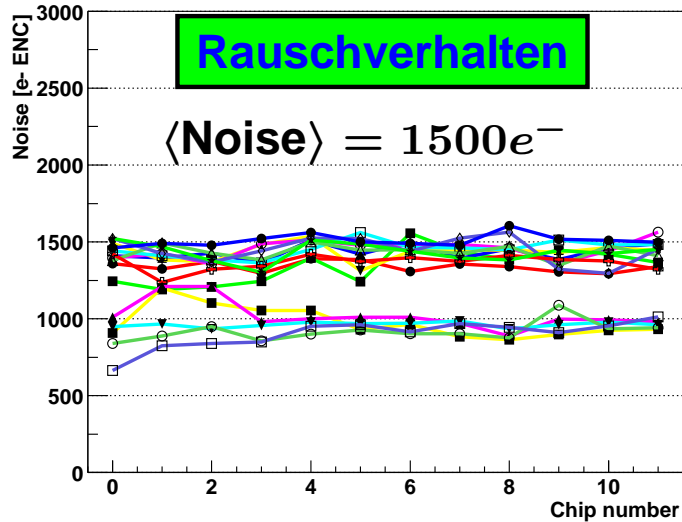
Mechanische Parameter



Fast alle Modul-Prototypen liegen innerhalb der Toleranzen.



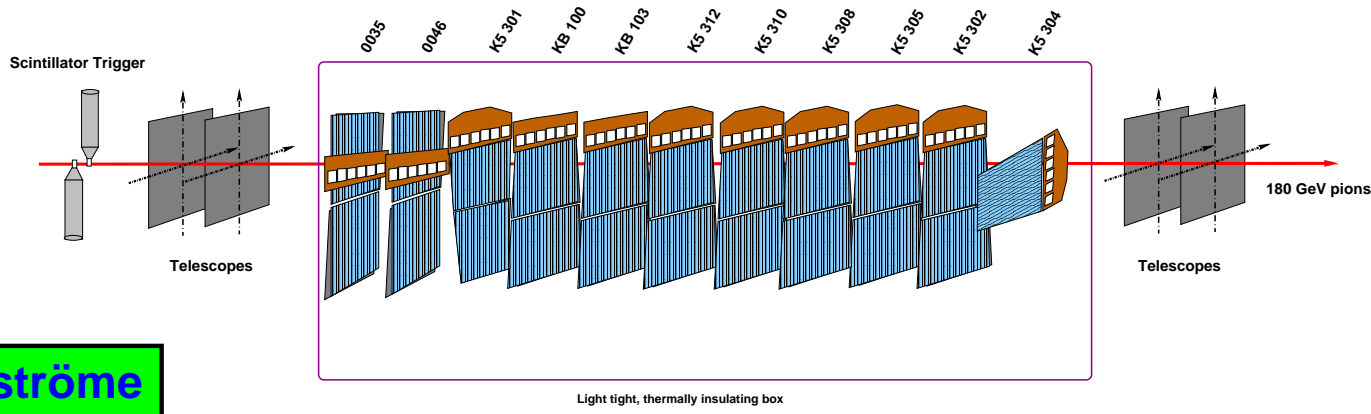
Eigenschaften unbestrahlter Module



Die unbestrahlten Module erfüllen die Designanforderungen.

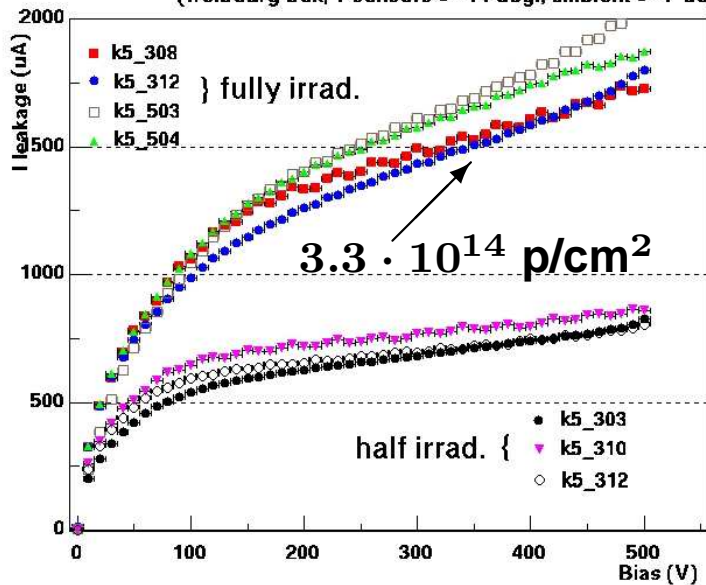


Messungen bestrahlter Module an einem Pion-Teststrahl

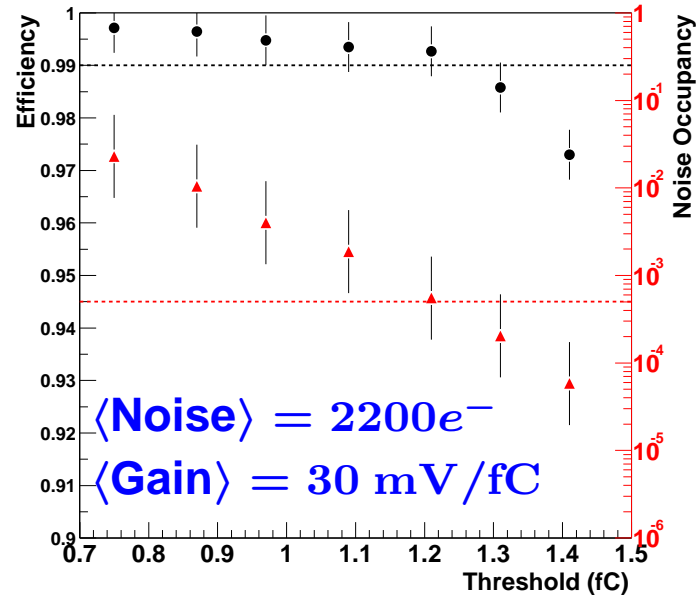


Dunkelströme

IV scan (LVOFF) T therm = -14 deg.
(freibourg box, T sensors = -14 deg., ambient = -7 deg.)



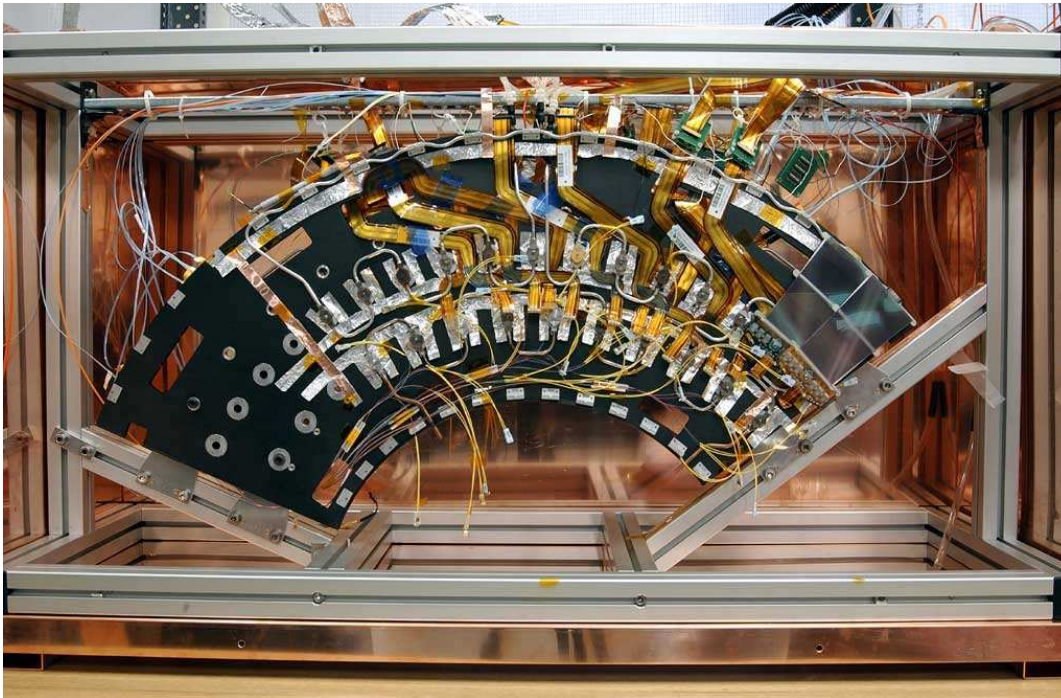
Maximaldosis



Mit geänderten Betriebsparametern werden die Anforderungen knapp erreicht.

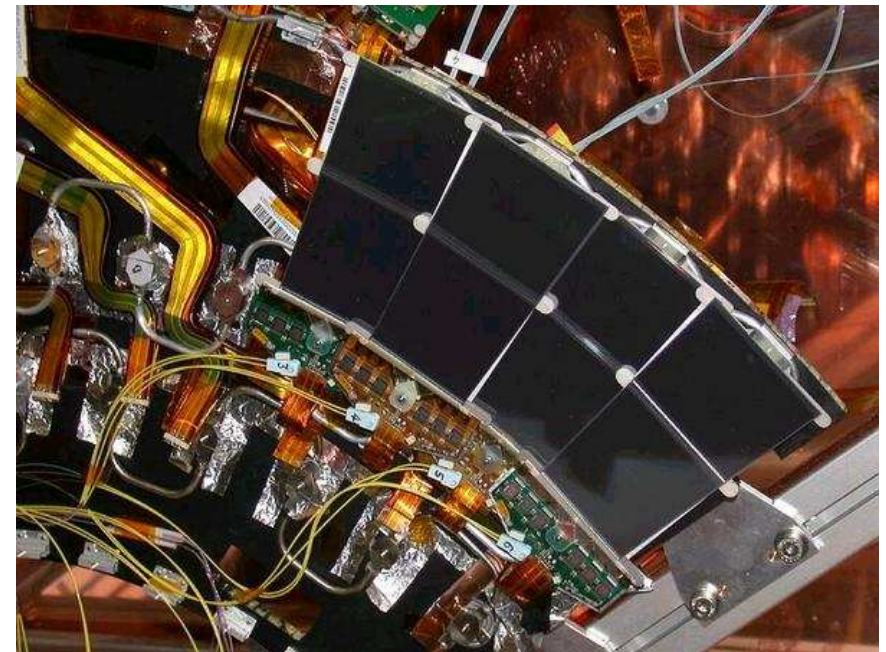


Der Test eines Teilsystems



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.

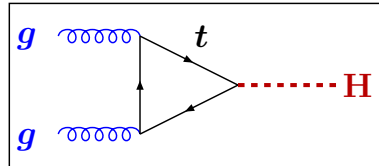


Beim Zusammenspiel aller Kräfte ist sehr viel Abstimmung nötig.

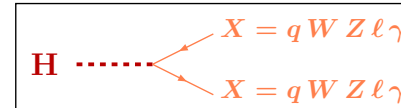


Higgs-Suche am LHC

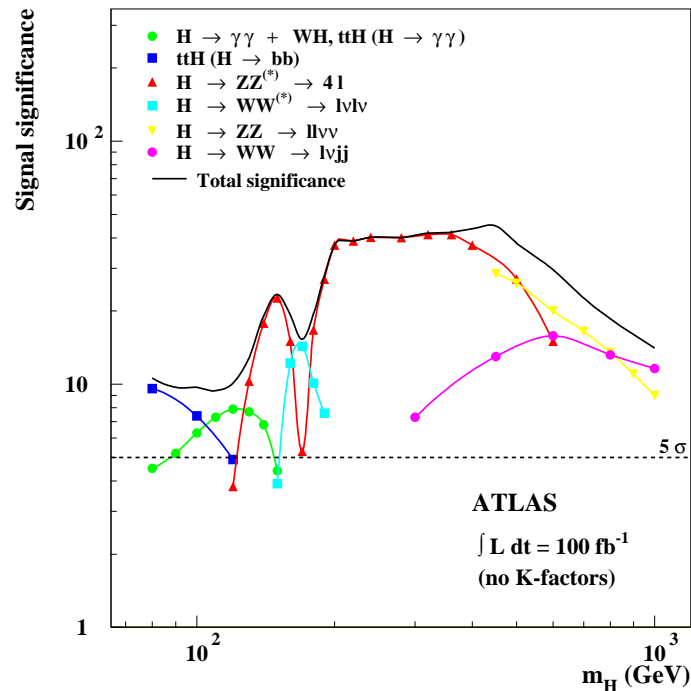
Die dominanten Produktions-



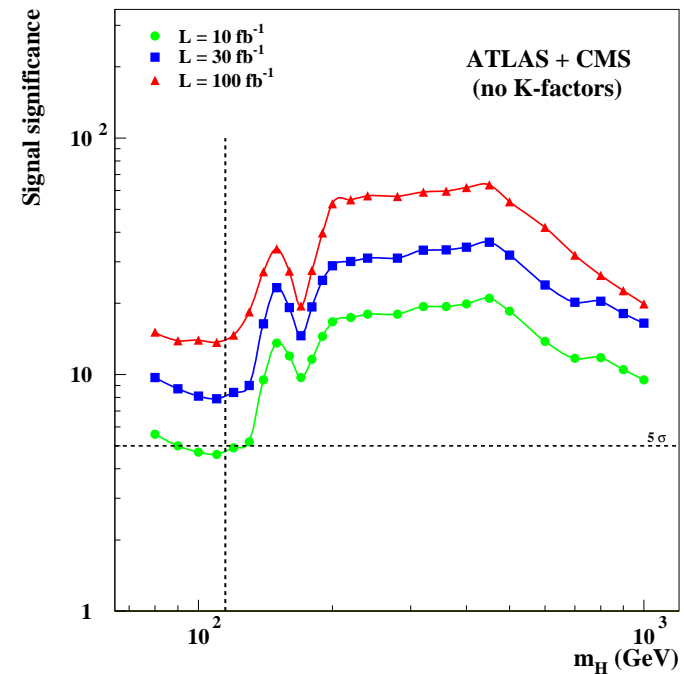
und Zerfallskanäle



am LHC und Tevatron sind gleich.



Im favorisierten Massenbereich sind $H \rightarrow b\bar{b}$, $H \rightarrow \gamma\gamma$ und $H \rightarrow \ell\bar{\ell}$ wichtig.



Die kombinierte Sensitivität ist im ganzen Massenbereich besser als 5σ .

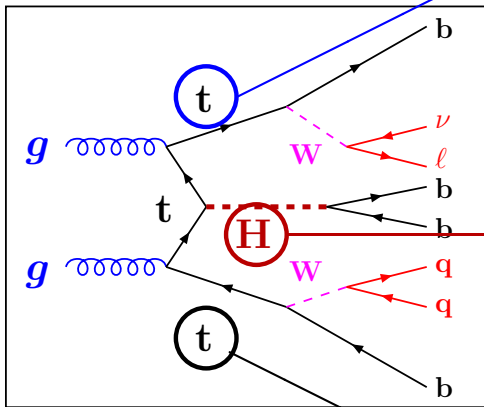


Ein Beispiel - der Kanal Htt

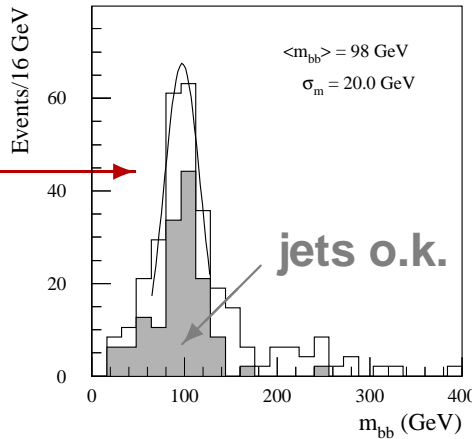
Was wir erreichen können

Rekonstruktion

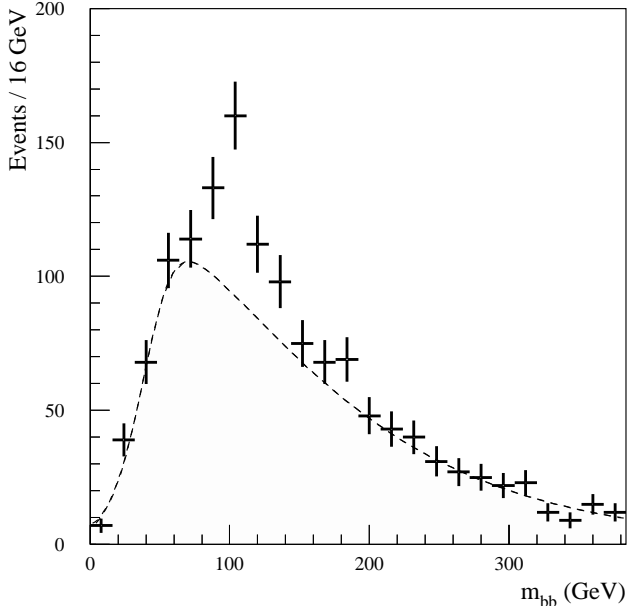
Der Prozess



- $t \rightarrow bl\nu$
 $m = (174 \pm 9) \text{ GeV}$



- $t \rightarrow bqq$
 $m = (174 \pm 12) \text{ GeV}$



- Für $M_H = 100 \text{ GeV}$ und $\mathcal{L}_{\text{int}} = 100 \text{ fb}^{-1}$ kann das Higgs mit einer Signifikanz von etwa 6.4σ gefunden werden.

Ein viel versprechender Kanal für leichte Higgs-Bosonen.

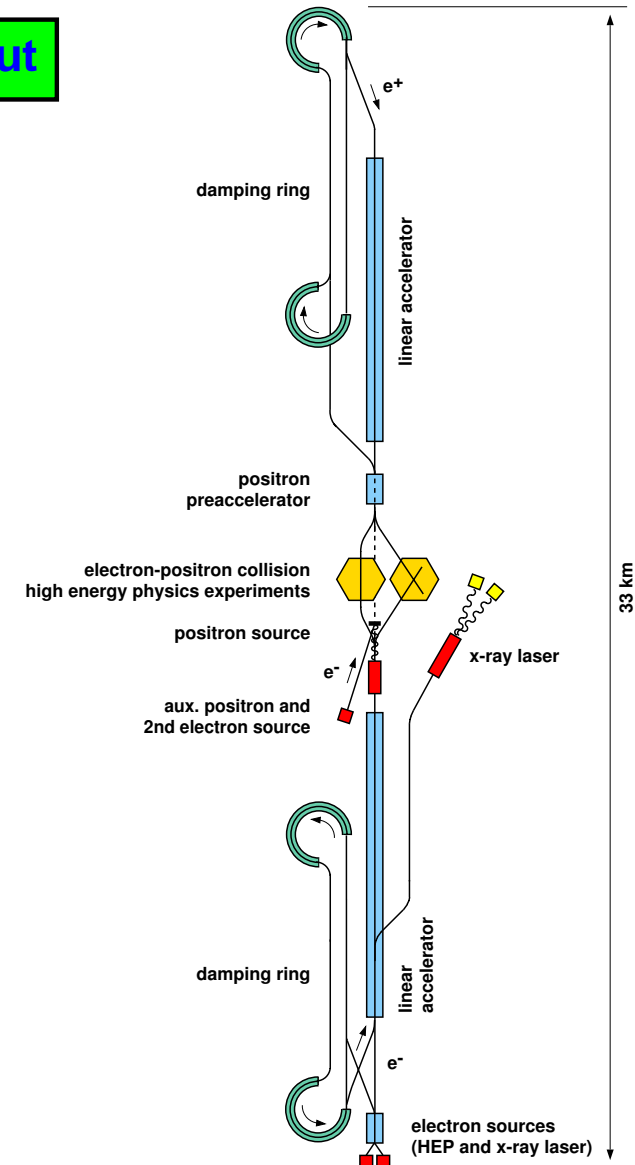


Das TESLA Projekt - der Plan

Die Lage



Das Layout



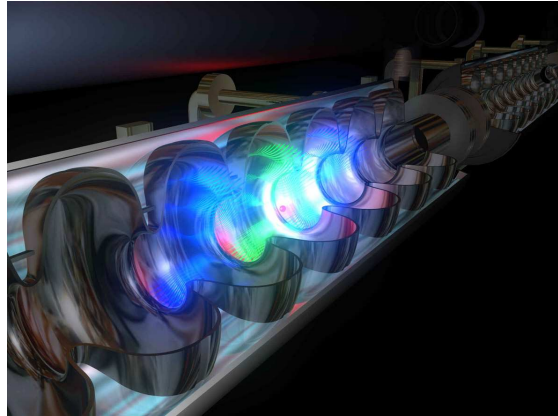
Technische Daten

Länge	33 km
Gradient	23.4 MV/m
E_e	250 GeV
N_e	$2 \cdot 10^{10}$ /Paket
N_{Paket}	2820
Kavitäten	21000
Luminosität	$3.4 \cdot 10^{34}$ /cm ² s

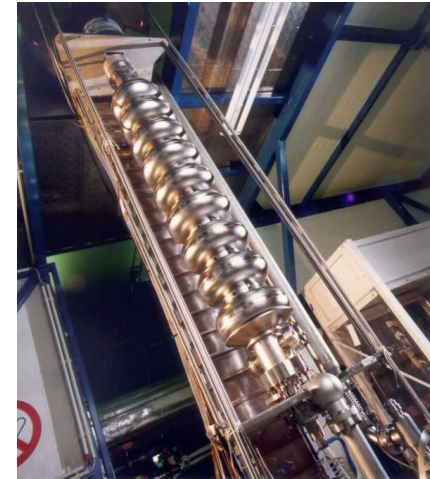


Das TESLA Projekt - die Entwicklungsarbeiten

Es ist ein langer Weg von der Prinzipskizze



über die Kavität



und die Tesla Test Facility



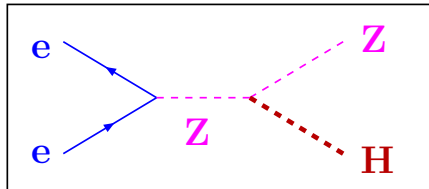
zum engültigen Beschleuniger.

Die Bauzeit, gerechnet ab dem Tag X, beträgt 8 Jahre.

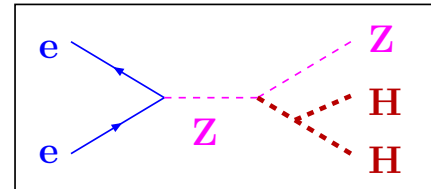


Beispiele für Messungen am Linearbeschleuniger

Die Massenbestimmung

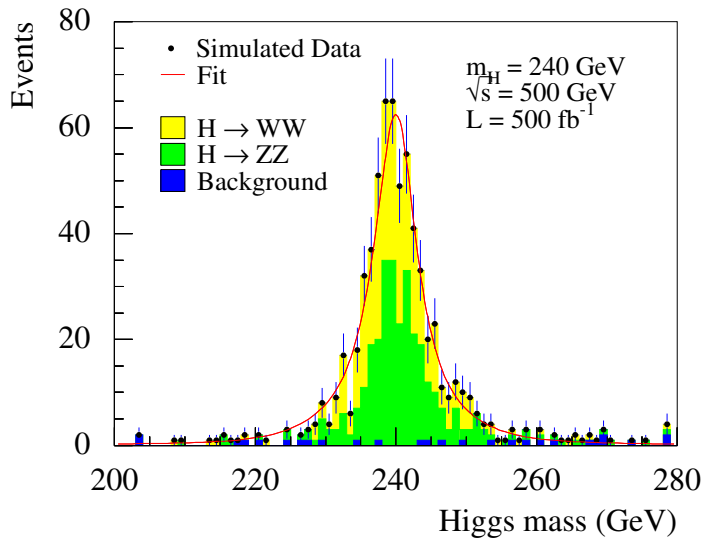


Die Higgs Selbstwechselwirkung

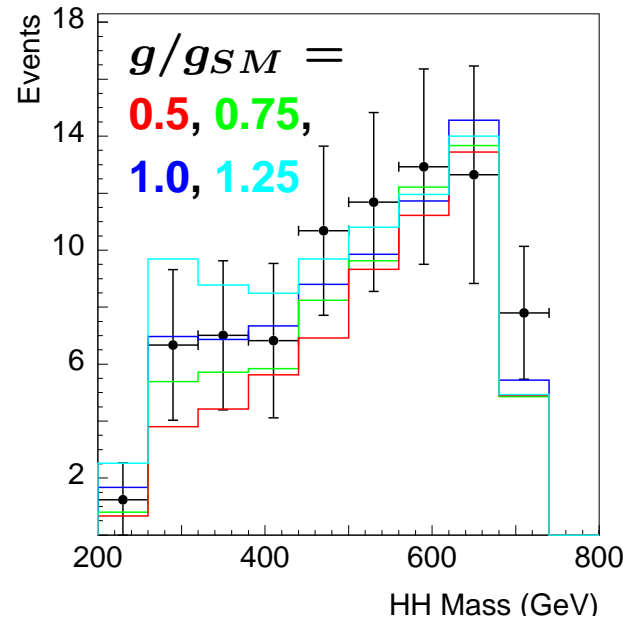


Kopplung:

$$g_{HHH} = \frac{3M_H}{2v}$$



Auflösung: $\frac{\Delta m}{m} = 0.08\%$



$$M_H = 120 \text{ GeV}$$

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = 1000 \text{ fb}^{-1}$$

$$\sqrt{s} = 800 \text{ GeV}$$

↓

$$\frac{\Delta g}{g} = 30\%$$

Am Linearbeschleuniger werden sehr präzise Messungen möglich sein.



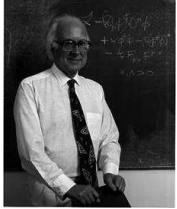
Zusammenfassung und ...

- Das Higgs-Boson ist ein aussichtsreicher Kandidat zur Lösung fundamentaler Probleme des Standardmodells.
- Die bisherigen Suchen nach dem Higgs-Boson waren erfolglos und liefern eine untere Massengrenze von $M_H > 114.1 \text{ GeV}$.
- Theoretische Überlegungen und Einschränkungen durch Präzisionsmessungen des Standardmodells favorisieren ein leichtes Higgs-Boson, $M_H < \mathcal{O}(200) \text{ GeV}$.
- Mit etwas Glück wird das Higgs-Boson am Tevatron gefunden werden.
- Das Entdeckungspotential des LHC ist so groß, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit entweder das Higgs-Boson oder ein anderer Mechanismus zur Massenerzeugung gefunden wird.
- Sollte das Higgs-Boson existieren, wird ein zukünftiger Linearbeschleuniger seine Eigenschaften präzise vermessen.

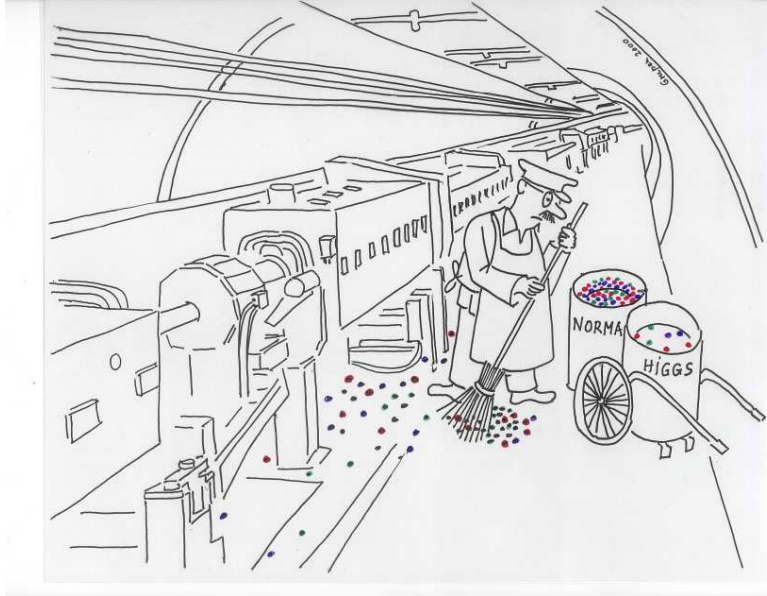
Was immer passieren wird, es ist sehr wahrscheinlich, dass wir in 10-15 Jahren wissen, was für die Massenerzeugung verantwortlich ist.



...Ausblick



Was so begann, ...



... nahm so

seinen Lauf, und endet ...

H⁰ § $J^{PC} = 0^{++}$

Charge = 0

Mass $m = 120.3 \pm 0.1 \text{ GeV} [a]$

Full width $\Gamma = 2.20 \pm 0.18 \text{ MeV} [b]$

H ⁰ DECAY MODES	FRACTION	CL
$b\bar{b}$	$(66.3 \pm 1.9)\%$	95%
WW	$(13.5 \pm 3.4)\%$	95%
$\gamma\gamma$	$(0.21 \pm 0.09)\%$	95%

§ Particle Data Group,
Eur. Phys. J. Cyy, 20xx.



... so.