



Einblicke in die Teilchenphysik

1. Einführung
2. Beschleuniger
3. Detektoren
4. Bewegungsgleichungen und Symmetrien
5. Das Quark-Modell und die CKM-Matrix
6. CP-Verletzung im Standardmodell
7. Proton- und Photonstrukturfunktionen
8. Elektroschwache Präzisionsmessungen
- 9. Das Higgs-Boson**
10. Neutrino-Massen und Neutrino-Oszillationen



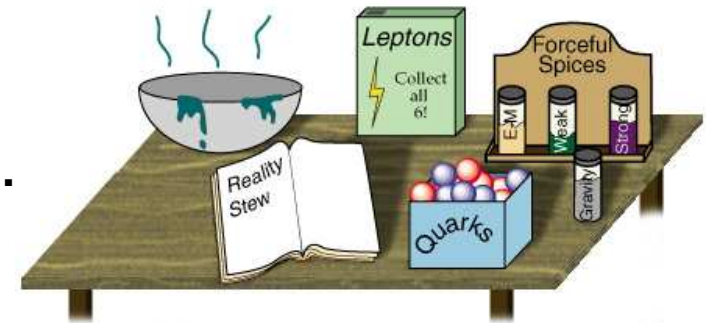
Was wir heraus gefunden haben

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

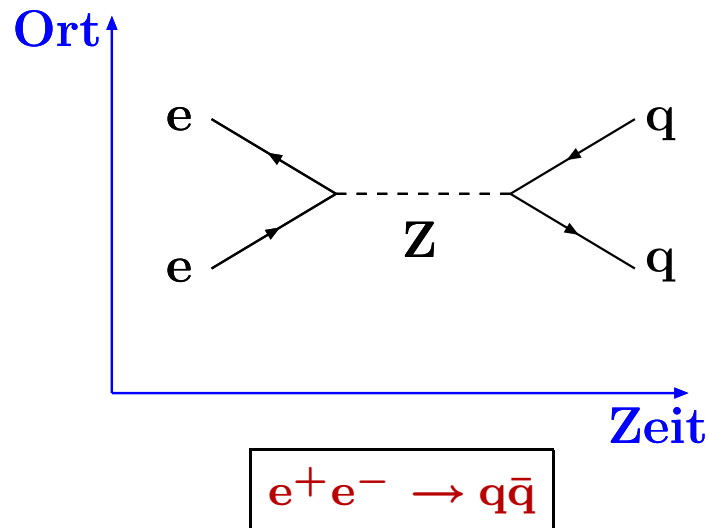
Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
	I II III		
Leptons	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
	I II III		

- 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.

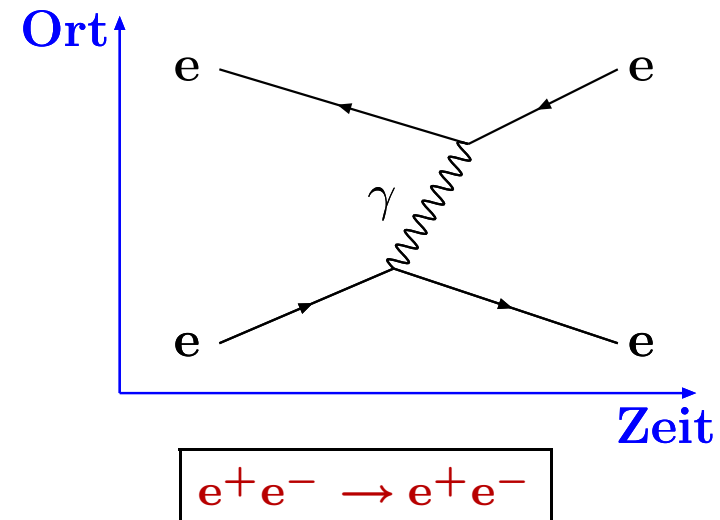


Wechselwirkungen im Standardmodell

Paarvernichtung und Paarerzeugung



Emission und Absorption



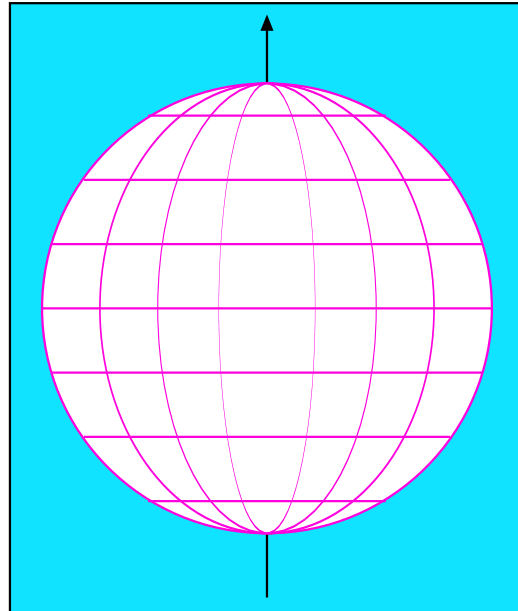
Das mathematische Konzept

- 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^\pm (elektroschwach) und Gluonen (stark).

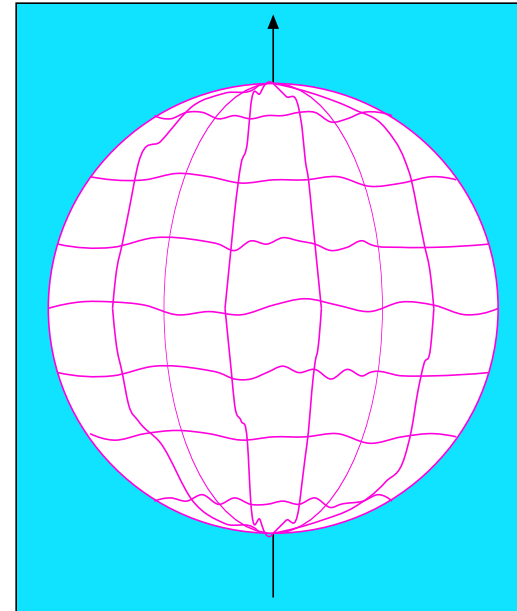


Eichtransformationen freier Felder

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



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



Invarianz \Rightarrow

Ladungserhaltung

Wechselwirkung mit Photonfeld

Die Forderung nach lokaler Eichinvarianz erzwingt ein masseloses Eichboson.



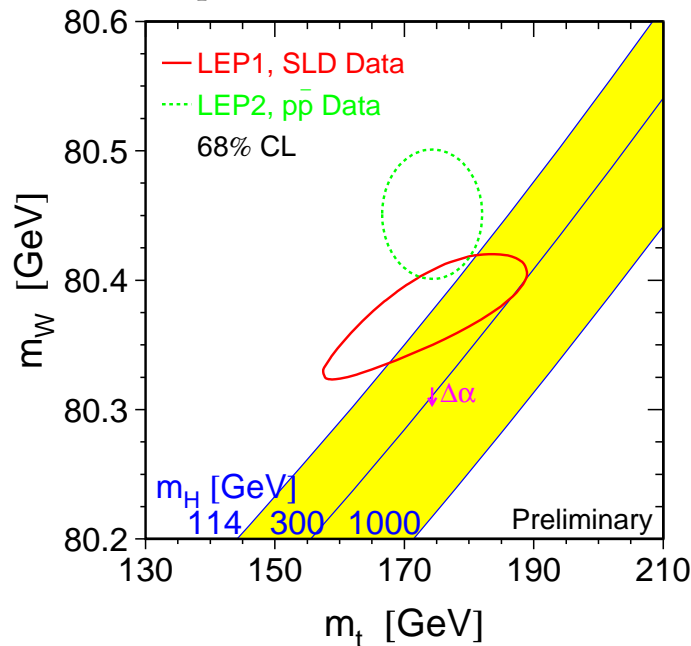
Das Standardmodell...

...ist präzise getestet worden, ...

– Beispiele:

$$M_W = (80.412 \pm 0.042) \text{ GeV}$$

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



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^\pm -Bosonen divergiert für hohe Energien.

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

- Wir verstehen nicht, was die Massen der Elementarteilchen erzeugt, und warum sie so verschieden schwer sind.

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.

Die Konsequenz

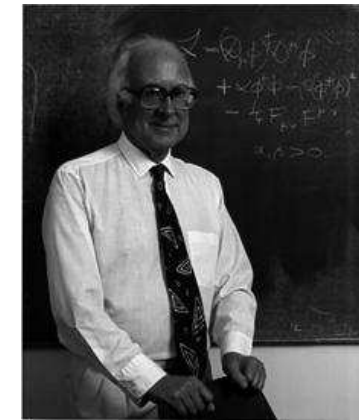
- Die Existenz des skalaren Higgs-Bosons als Anregung des Higgsfeldes.

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.

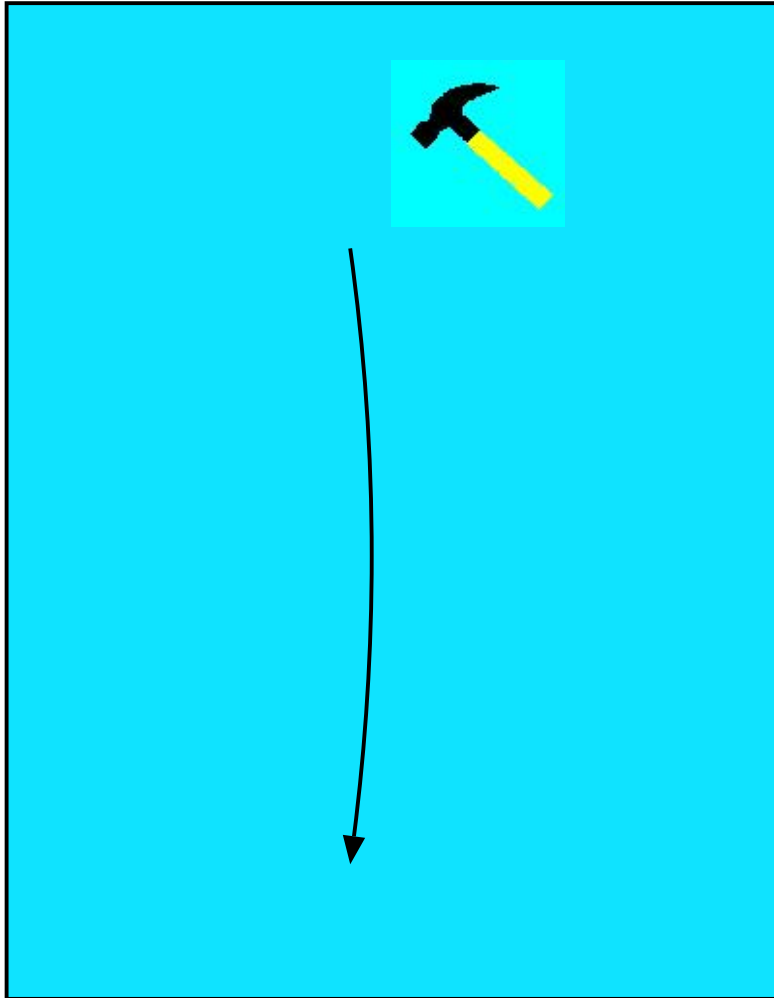
Der Vater des Gedankens



Peter Higgs



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.'

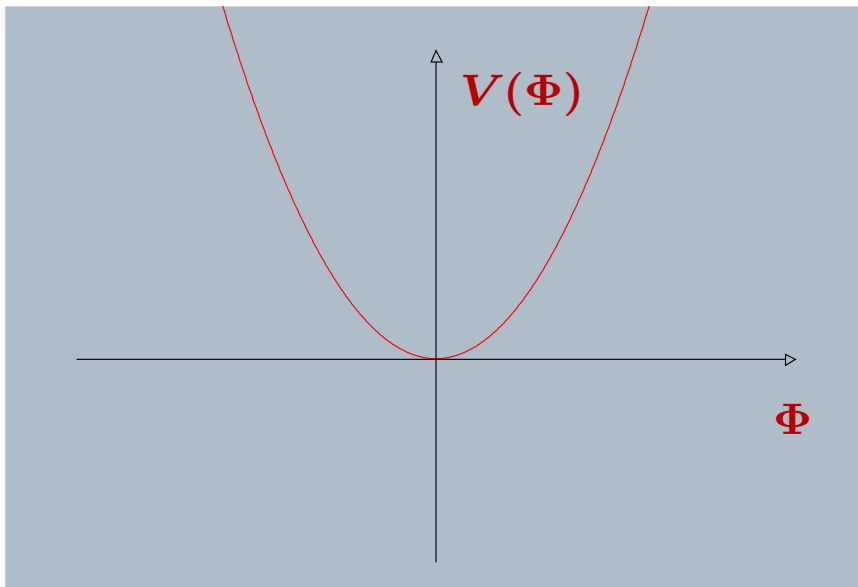


Symmetriebrechung und Higgs Potential

$$V(\Phi) = -\frac{1}{2}|\mu^2|\Phi^2 + \frac{1}{4}|\lambda|\Phi^4$$

Symmetrie

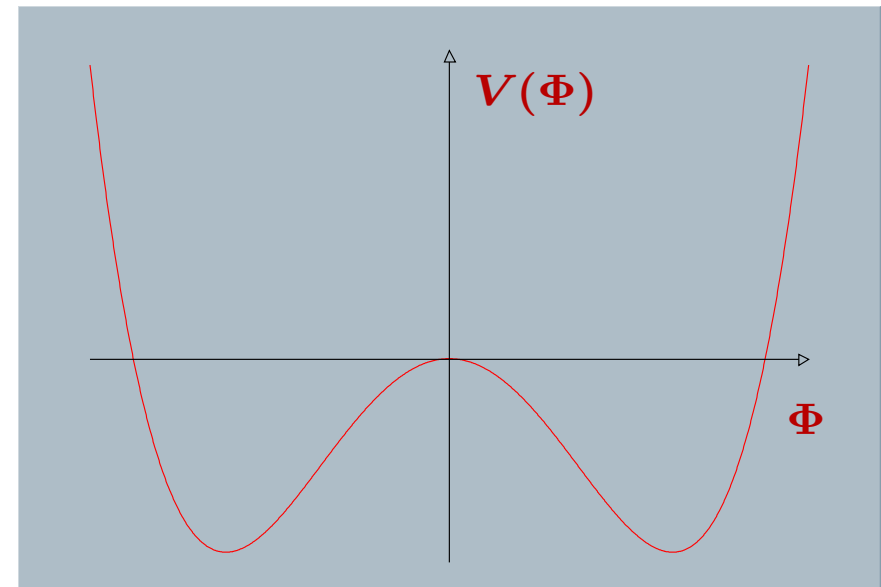
$$|\mu^2| = -M_H^2, \lambda = 0$$



$$V_{\min}(\Phi) = V(0) = 0$$

Symmetriebrechung

$$\mu^2 = M_H^2/2, \lambda = \frac{M_H^2}{v^2}$$



$$V_{\min}(\Phi) = V\left(\frac{v}{\sqrt{2}}\right) = \frac{-M_H^2}{16v^2}$$

Die Störungstheorie ist eine Entwicklung um das Minimum des Potentials.



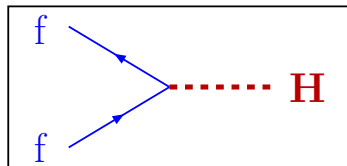
Das Higgs-Boson im Standardmodell

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.

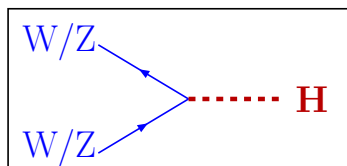
Die Kopplungen des Higgs-Bosons

- 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:



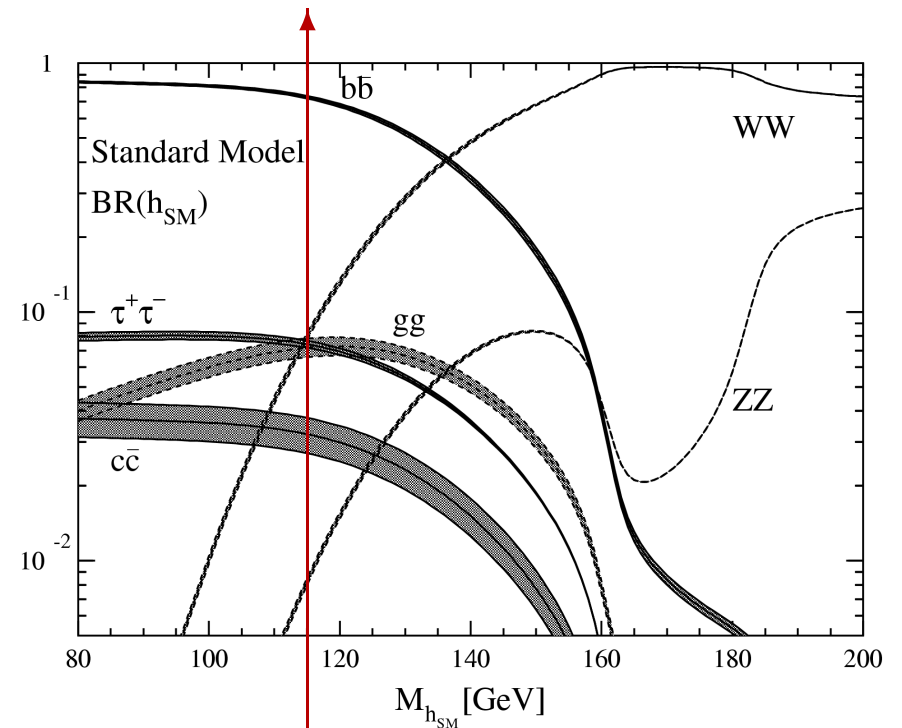
$$c_{HWW} = \frac{i}{2} (e \sin \theta_W)^2 v g_{\mu\nu}$$

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

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

Die Zerfallsbreiten

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



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



Das Higgs im MSSM

Die minimale Erweiterung des Standardmodells

- Es gibt zwei skalare komplexe Dubletts.
- Drei der acht Freiheitsgrade ergeben die longitudinalen Freiheitsgrade der W^\pm und Z-Bosonen. Die restlichen fünf Freiheitsgrade liefern fünf Higgs-Bosonen. Davon sind zwei CP-even (h, H), eines CP-odd (A) und zwei geladen (H^\pm).
- Die zwei Parameter der Theorie sind $\tan \beta = v_1/v_2$ und M_A .
- Das MSSM macht mehr Vorhersagen, z.B. $M_{H^\pm}^2 = M_A^2 + M_W^2$ (LO) und $M_h < 130$ GeV (HO).
- Die Phänomenologie von SM und MSSM ist sehr ähnlich.
- Die experimentellen Grenzen von LEP mit 95% CL sind:

$M_h > 91$ GeV, $M_A > 91.9$ GeV und $\tan \beta \notin (-0.5, 2.4)$ aus $e^+e^- \rightarrow Z/A h$.
 $M_{H^\pm} > 78.6$ GeV aus $e^+e^- \rightarrow H^+H^-$ mit $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau, cs$.

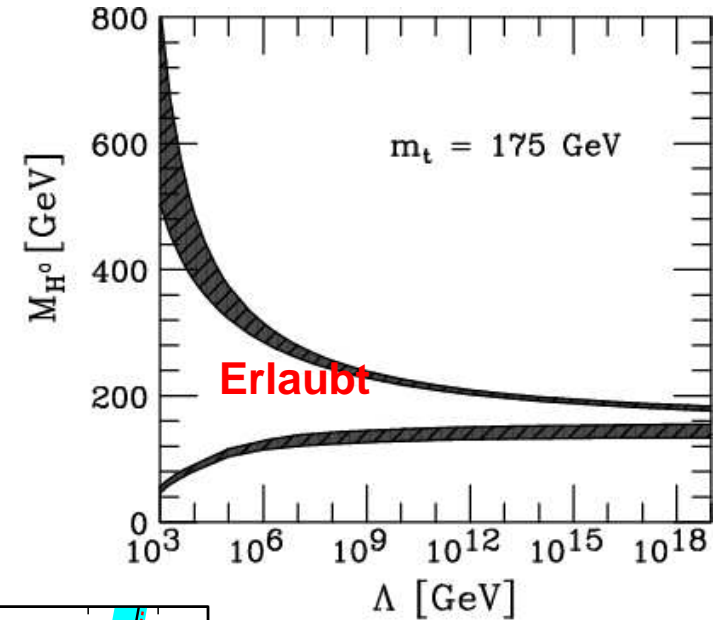
In dieser Vorlesung wird das MSSM nicht weiter behandelt.



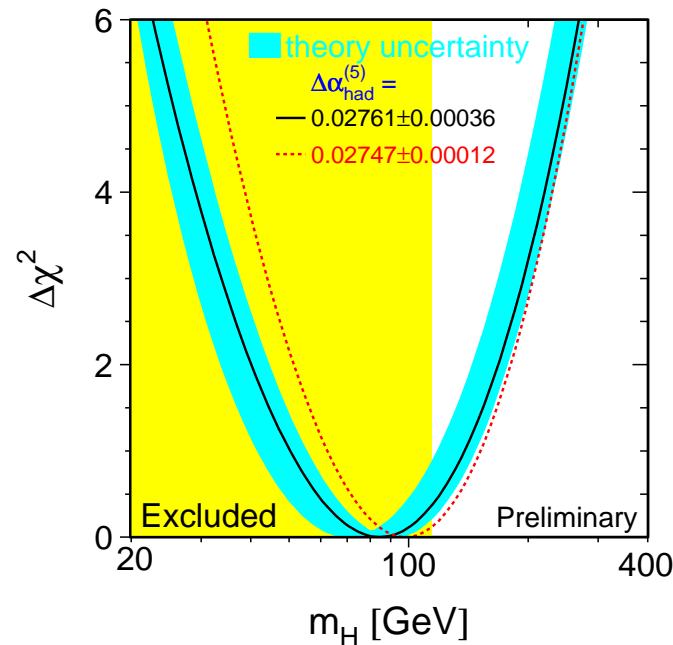
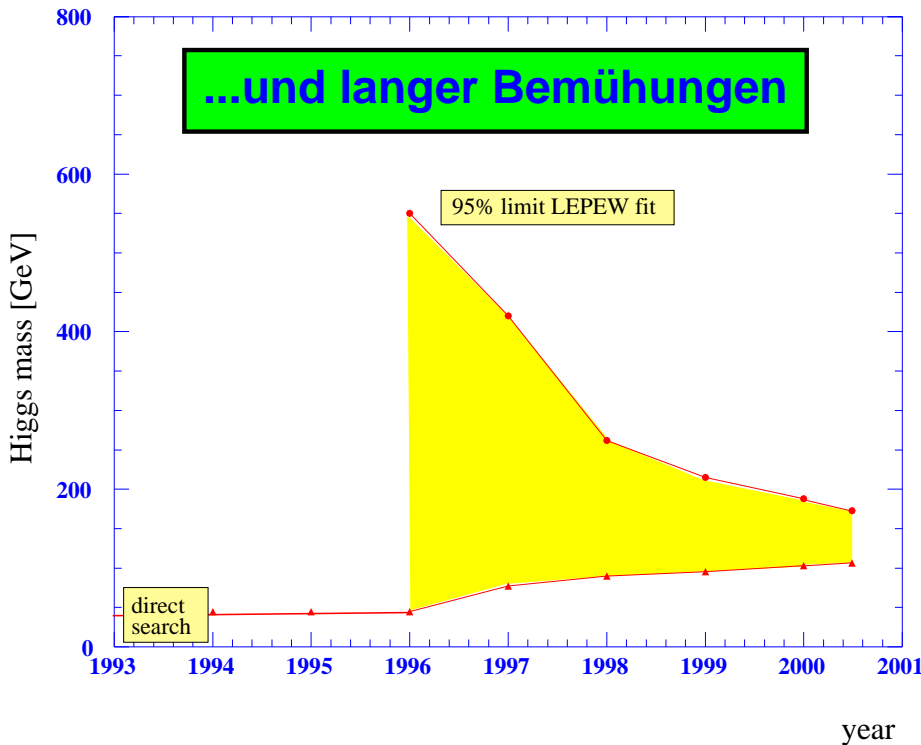
Wo müssen wir nach dem Higgs-Boson suchen?

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

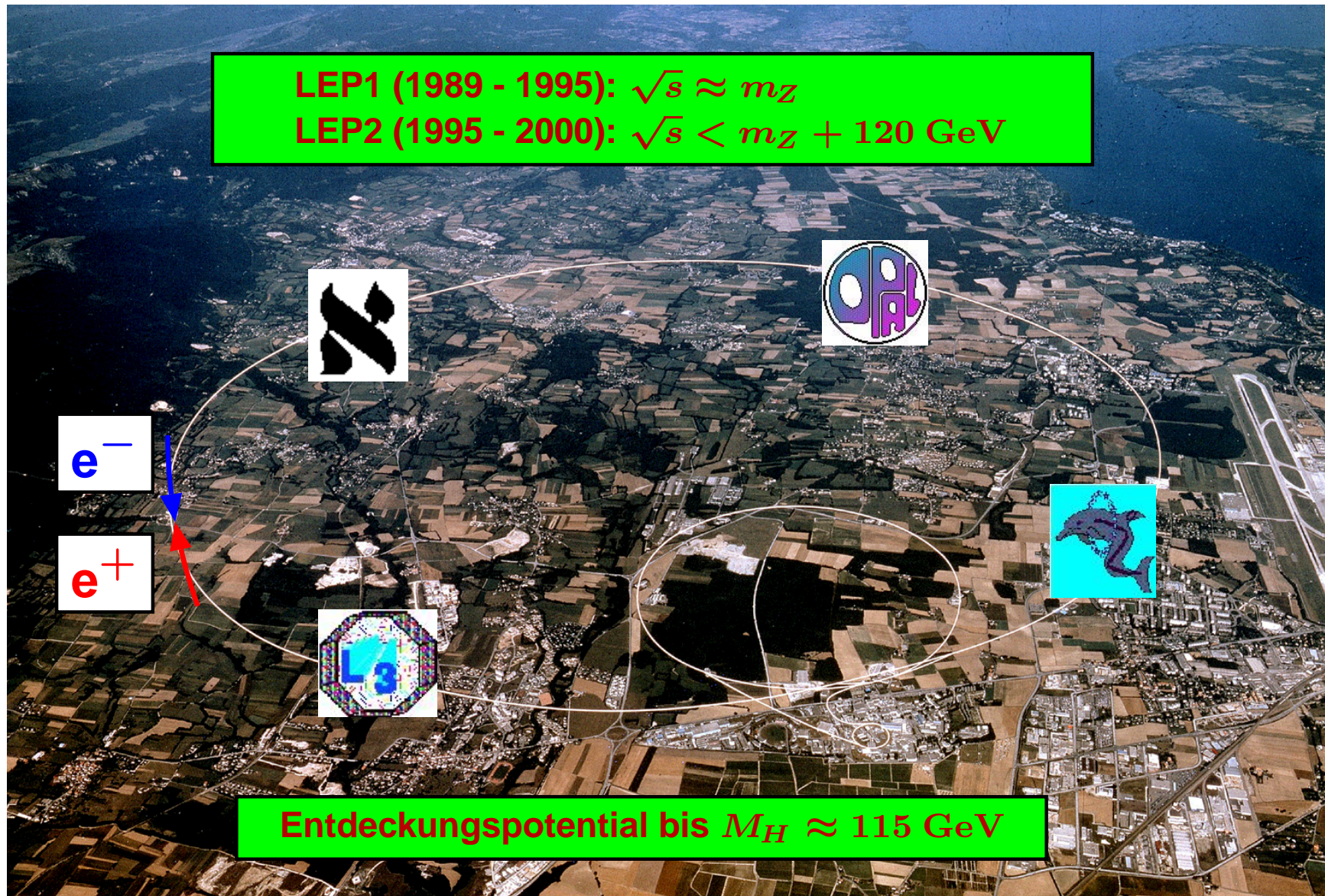


Der beste Fit

- $M_H = 91_{-37}^{+58} \text{ GeV}$
- $M_H < 211 \text{ GeV}$ mit 95% CL



Der Large Electron Positron Beschleuniger (LEP)

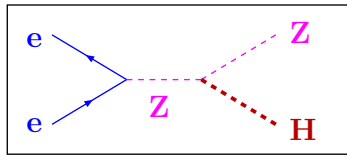




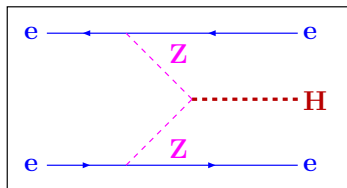
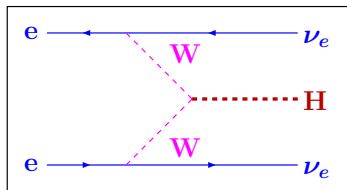
Higgs-Suche bei LEP - generelle Überlegungen

Produktion

– Higgs-Strahlung



– Boson-Fusion



Higgs-Strahlung ist der bei weitem dominierende Prozess bei LEP.

Die Schlüssel zum Erfolg

- Der Wirkungsquerschnitt bei LEP für $M_H = 115$ GeV und $\sqrt{s} = 208$ GeV ist ca. 0.1 pb. Das gibt nur etwa 50 Ereignisse pro Experiment.
- Die dominanten Zerfallskanäle des Higgs für $M_H = 115$ GeV sind $H \rightarrow b\bar{b}$ und $H \rightarrow \tau^+\tau^-$. **Nachweis von b quarks ist sehr wichtig.**
- Alle Zerfälle des Z-Bosons, auch $Z \rightarrow \nu\nu$, müssen analysiert werden. **Hermetizität ist wichtig.**
- Das Verhältnis Signal zu Untergrund bestimmt die Sensitivität. **Genauere Kenntnis eines möglichst kleinen Untergrunds ist wichtig.**

Wegen der geringen Statistik müssen die Resultate aller Kanäle und aller Experimente kombiniert werden.



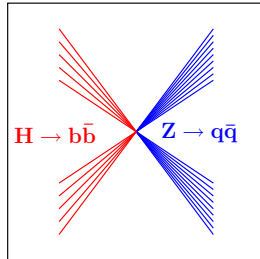
Higgs-Suche bei LEP - die verschiedenen Kanäle

Untersuchte Topologien

Anteil

Wichtigste Untergrundreaktionen

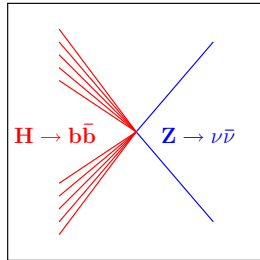
4-jets



51%

$WW \rightarrow qq\bar{q}\bar{q}$, $ZZ \rightarrow bb\bar{q}\bar{q}$
und $e^+e^- \rightarrow 4\text{-jets}$

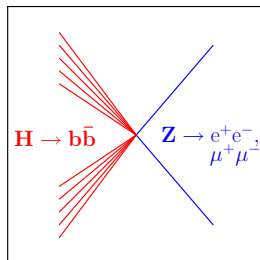
Missing energy



15%

$WW \rightarrow qq\bar{l}\nu$ und $ZZ \rightarrow bb\nu\nu$

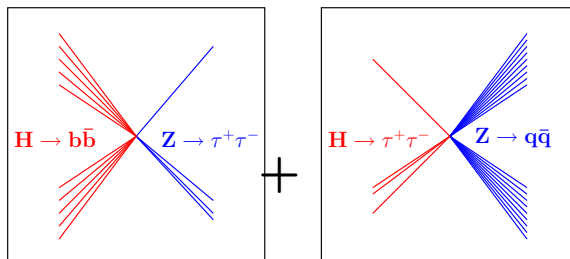
Lepton Kanäle



4.9%

$ZZ \rightarrow bbl\bar{l}$

Tau - Kanäle



4.9 + 5.1%

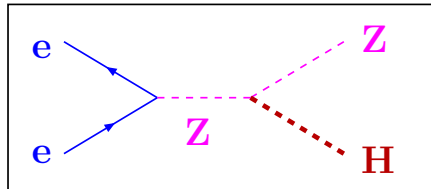
$WW \rightarrow qq\tau\nu$, $ZZ \rightarrow qq\tau\tau$
und $e^+e^- \rightarrow 4\text{-jets}$

Summe $\approx 80\%$

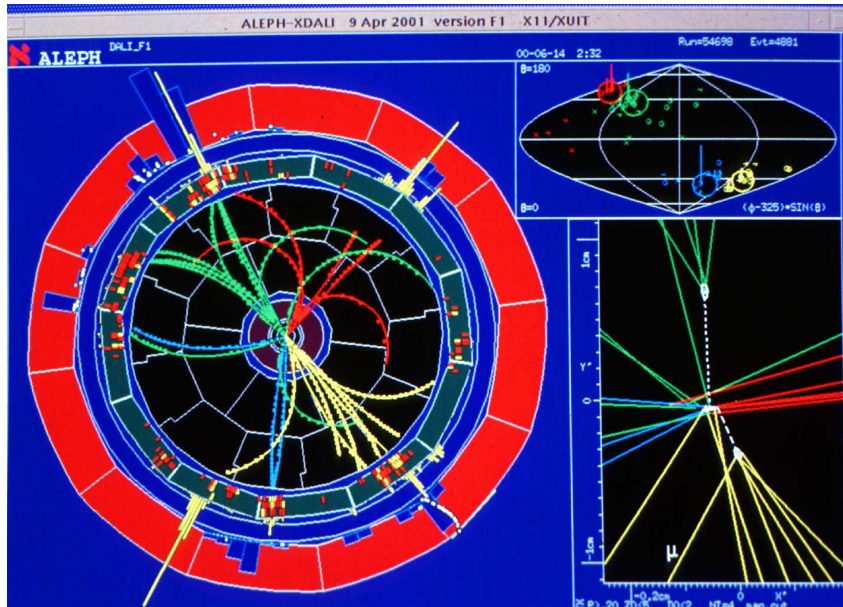


Higgs-Suche bei LEP - eine Evidenz?

Produktion i.w. durch Higgs Strahlung



Ein Kandidat



Die signifikantesten Kandidaten

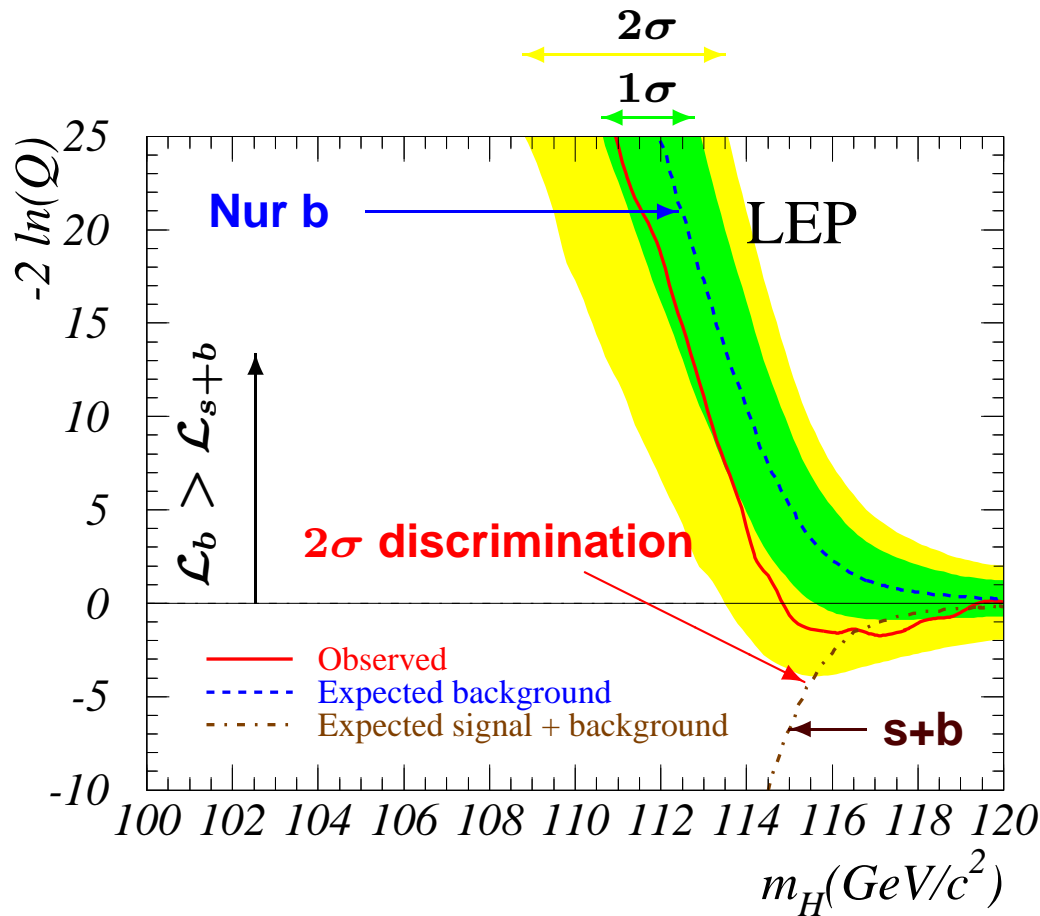
	4-jets	E_{miss}	lepton	tau	
	H, Z bb, qq	H, Z $bb, \nu\nu$	H, Z bb, ee $bb, \mu\mu$	H, Z $bb, \tau\tau$ $\tau\tau, qq$	
A	6	-	1	1	8
D	3	-	-	-	3
L	2	2	-	-	4
O	1	1	-	-	2
	12	3	1	1	17

- 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



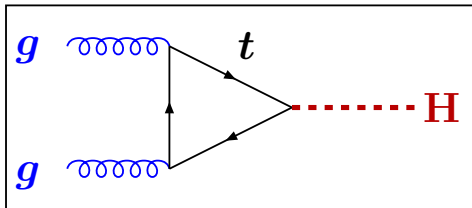
	Run I 1992 - 1996	Run II 2001 - 20xx
Umfang [km]	6.4	6.4
$E_{p,\bar{p}}$ [TeV]	0.9	0.98
Teilchenpakete	6x6	140x103
N_p/Paket [10^{11}]	2.3	2.7
$N_{\bar{p}}/\text{Paket}$ [10^{11}]	0.55	1.0
\mathcal{L}_{int} [fb^{-1}]	0.11	10-30

Das Tevatron ist zur Zeit der Beschleuniger mit der höchsten Schwerpunktsenergie.

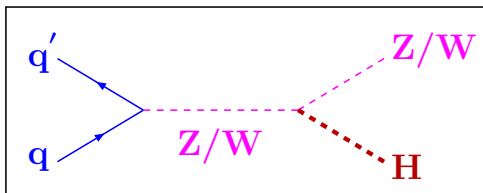


Higgs-Suche am Tevatron - die Vergangenheit

Die Produktionskanäle

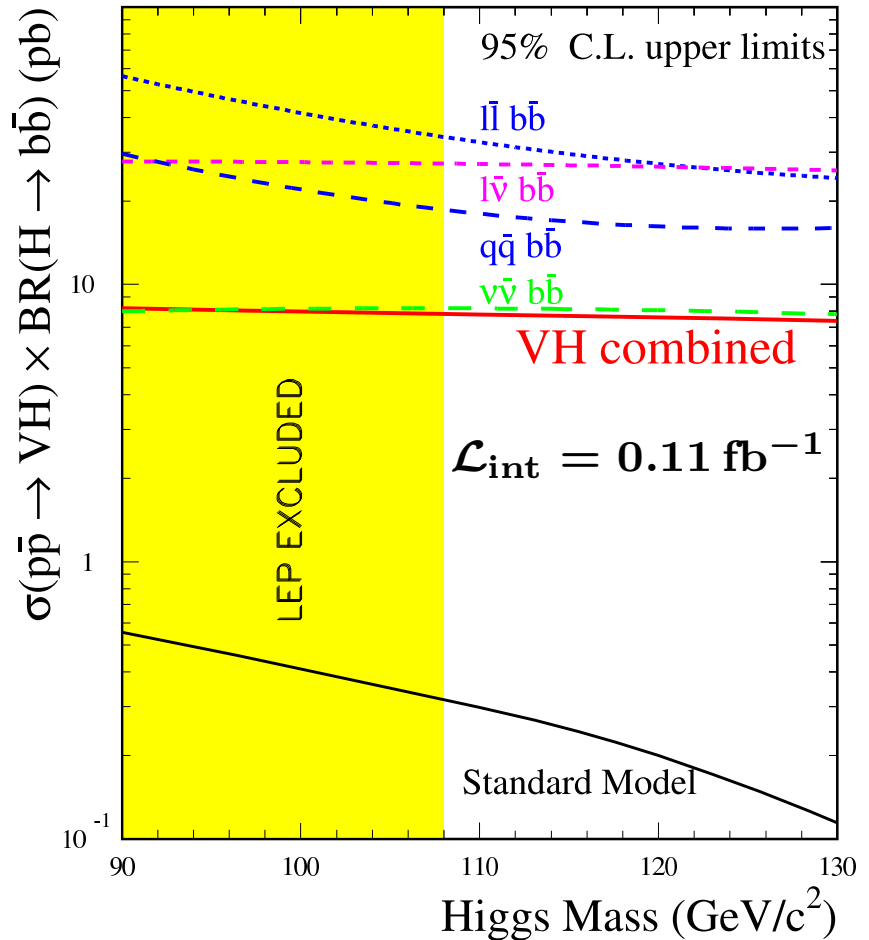


- ⊕ **Größte Rate ca. 1pb.**
- ⊖ **Immenser Untergrund.**



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

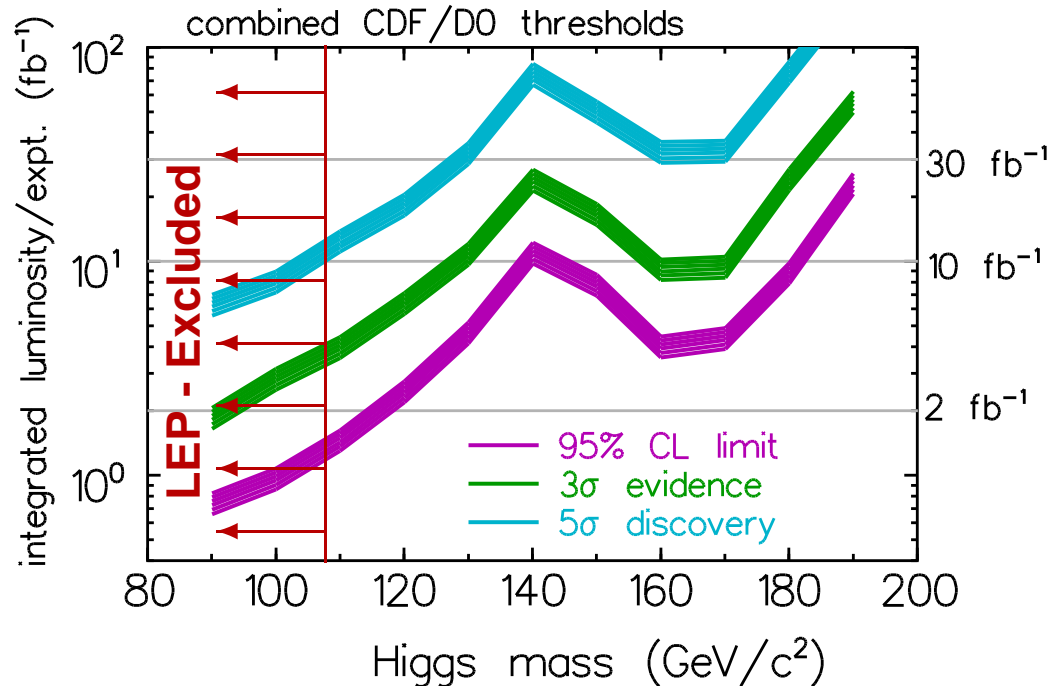
CDF PRELIMINARY Run I



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 ...



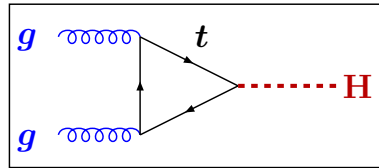
Der Large Hadron Collider (LHC)



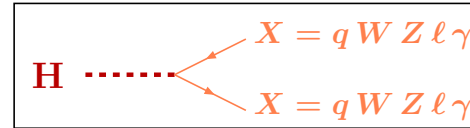


Higgs-Suche am LHC

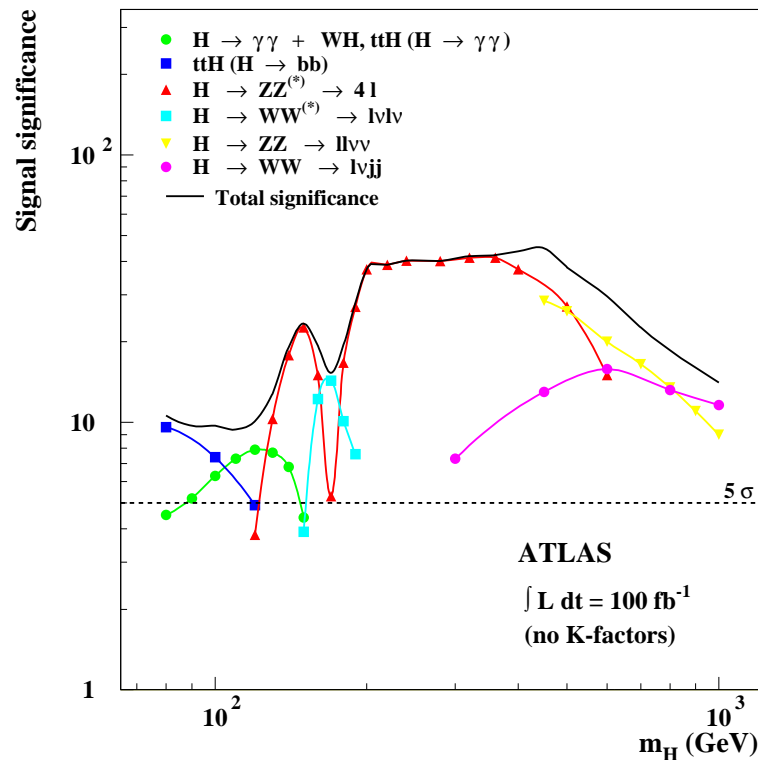
Die dominanten Produktions-



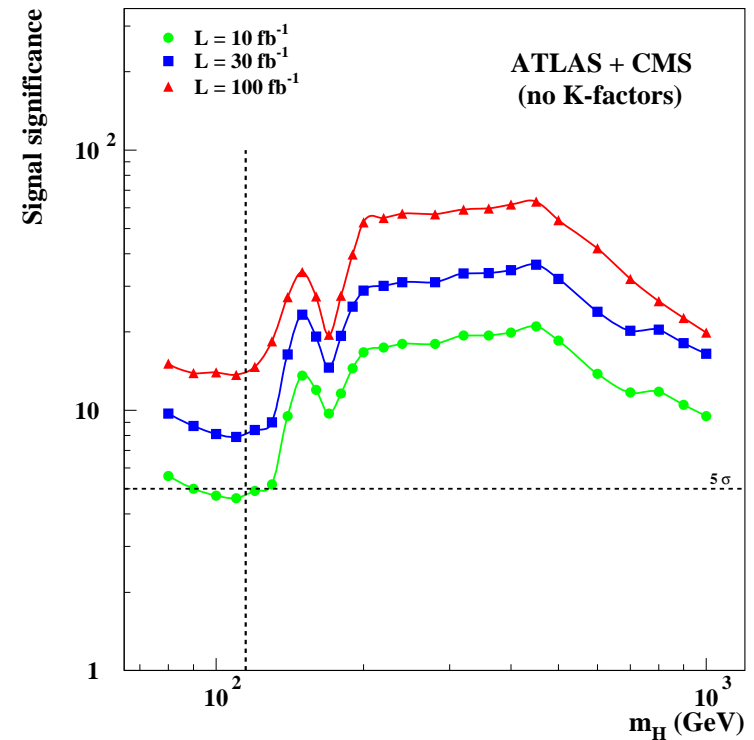
und Zerfallskanäle



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.

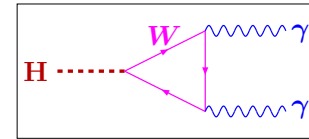


Die kombinierte Sensitivität ist im ganzen Massenbereich besser als 5σ .



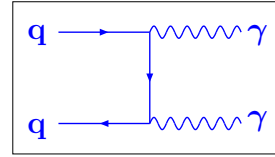
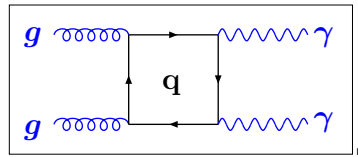
Ein Beispiel - der Kanal $H \rightarrow \gamma\gamma$

Im Bereich $80 \text{ GeV} < M_H < 150 \text{ GeV}$ ist der Kanal

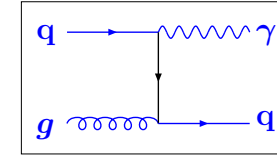


sehr aussichtsreich.

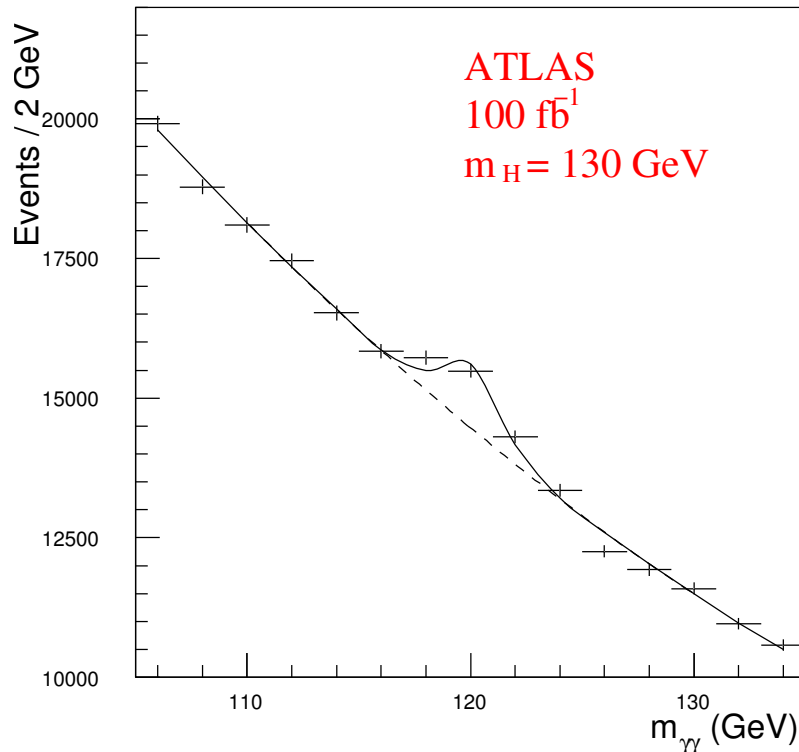
Untergrund sind



und



mit $q \rightarrow \pi^0 \rightarrow 2\gamma$.



Die Aussichten

- Die Rate ist sehr klein aber die Ereignisse sind sehr klar.
- Die Analyse erfordert ein extrem präzises elektromagnetisches Kalorimeter um γ von $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ zu unterscheiden.

Mit einem Jahr nomineller Luminosität ist eine Entdeckung mit 4σ möglich.

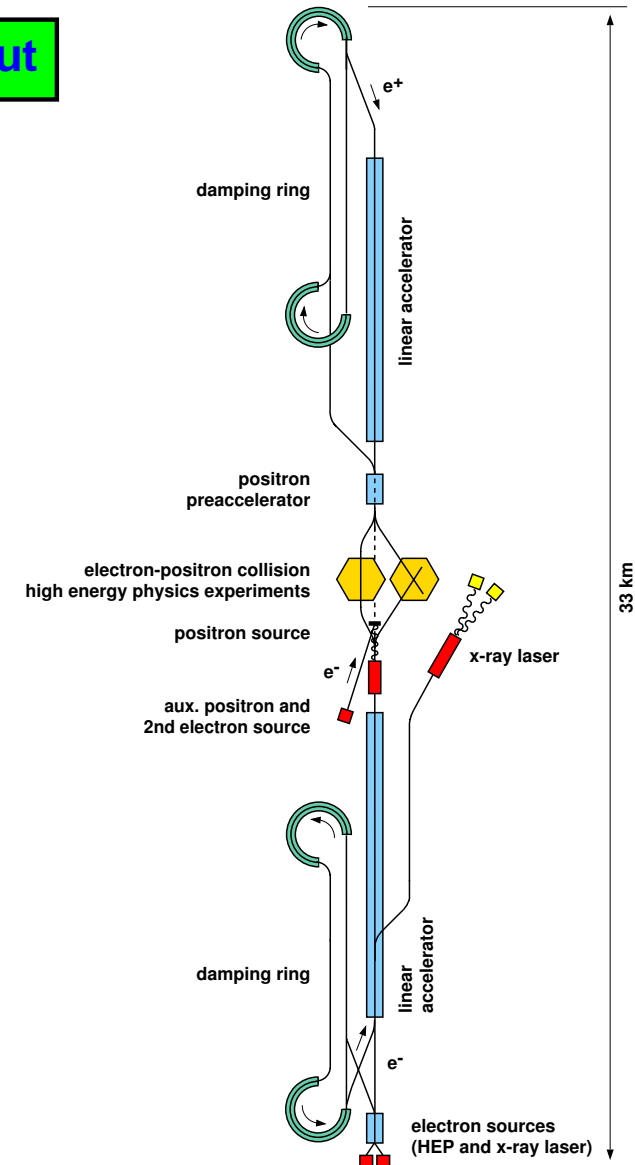


Das TESLA Projekt - der Plan

Die Lage



Das Layout



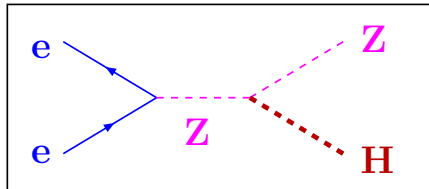
Technische Daten

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

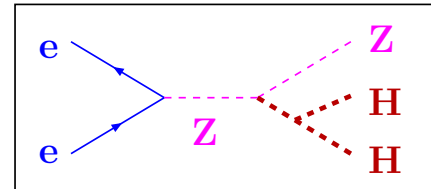


Beispiele für Messungen am Linearbeschleuniger

Die Massenbestimmung

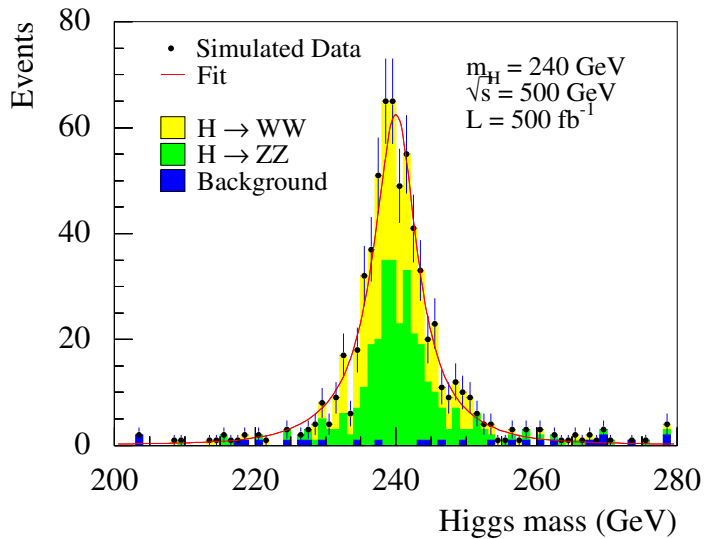


Die Higgs Selbstwechselwirkung

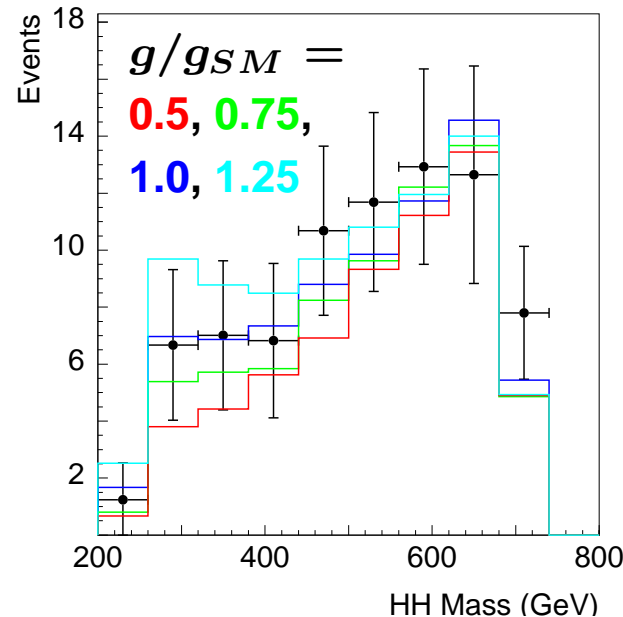


Kopplung:

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



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.



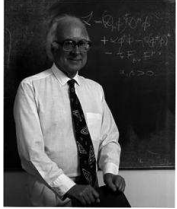
Zusammenfassung und ...

- 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.

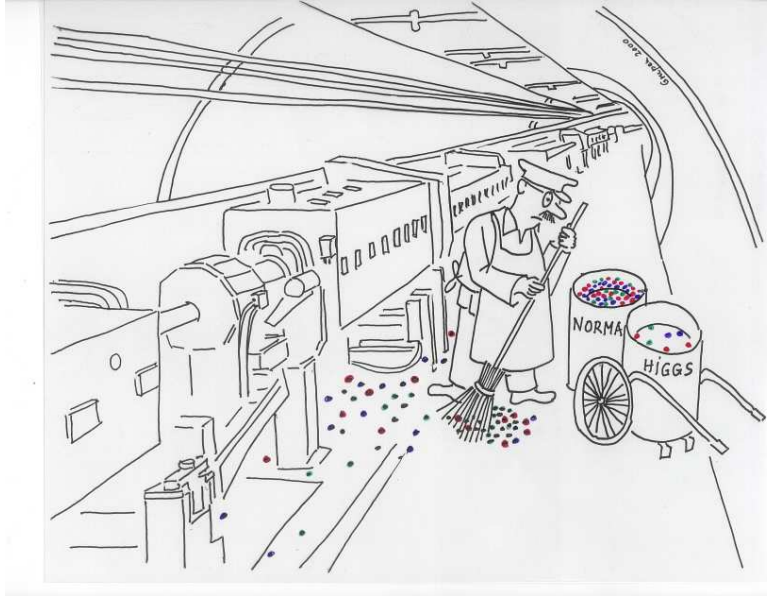
Was immer passieren wird, es ist sehr wahrscheinlich, dass wir in 10-15 Jahren wissen, was für die Massenerzeugung verantwortlich ist.



...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.