

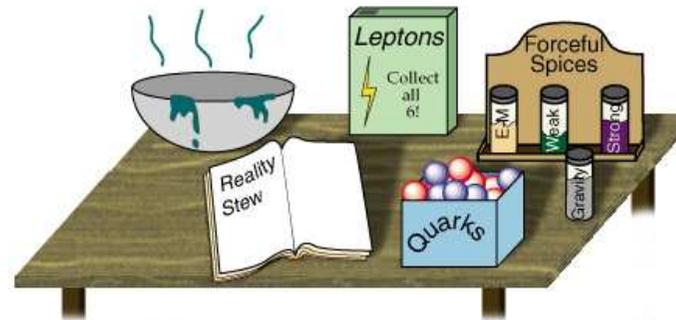


-
-
1. Einführung
 2. Beschleuniger
 3. Detektoren
 4. Bewegungsgleichungen und Symmetrien
 5. Das Quark-Modell und die CKM-Matrix
 6. CP-Verletzung im Standardmodell
 7. Proton- und Photonstruktur
 8. Elektroschwache Präzisionsmessungen
 - 9. Das Higgs-Boson**
 10. Neutrino-Massen und Neutrino-Oszillationen



Der Stand der Dinge

– Unser heutiges Bild der Rezeptur



der Natur, ist:

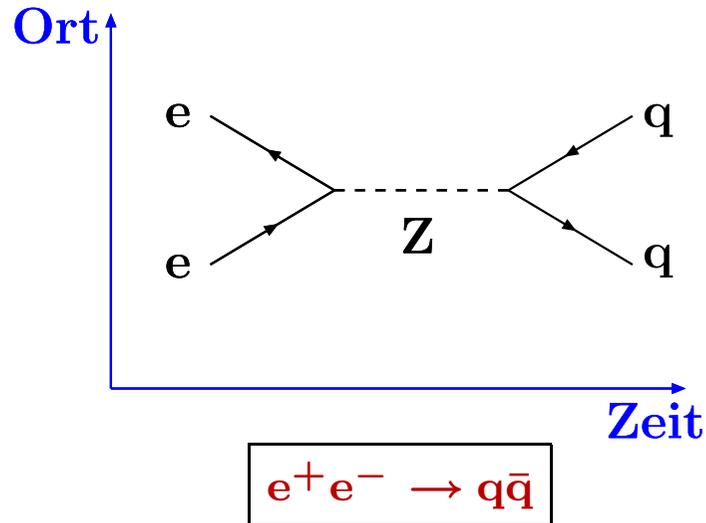
Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
	I	II	III

- Es gibt drei Familien von Leptonen und Quarks.
- Sie sind Fermionen (Spin = 1/2), und nur die erste Familie bildet stabile Materie, $p = uud$ und $n = udd$.
- Zu jedem 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 weniger als 1 eV für das ν_e bis zu 175 GeV (Masse eines Gold-Atom) für das top Quark.
- Die Wechselwirkungen der Fermionen werden durch den Austausch von Bosonen (Spin = 1,2) beschrieben.

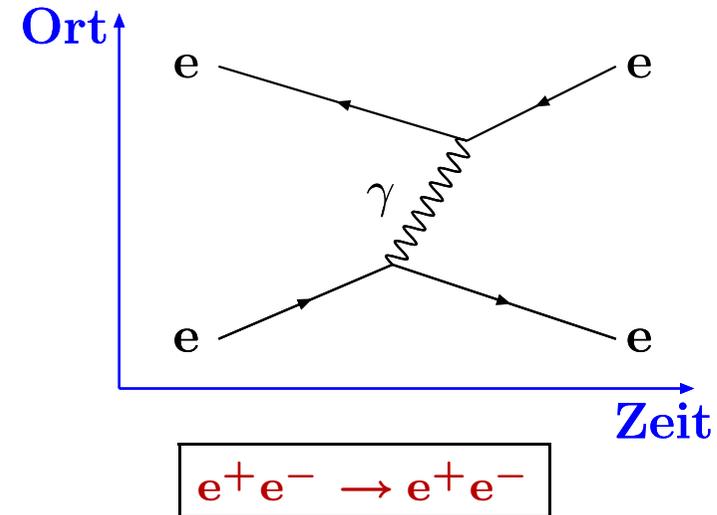


Wechselwirkungen im Standardmodell

Paarvernichtung und Paarerzeugung



Emission und Absorption



Das mathematische Konzept

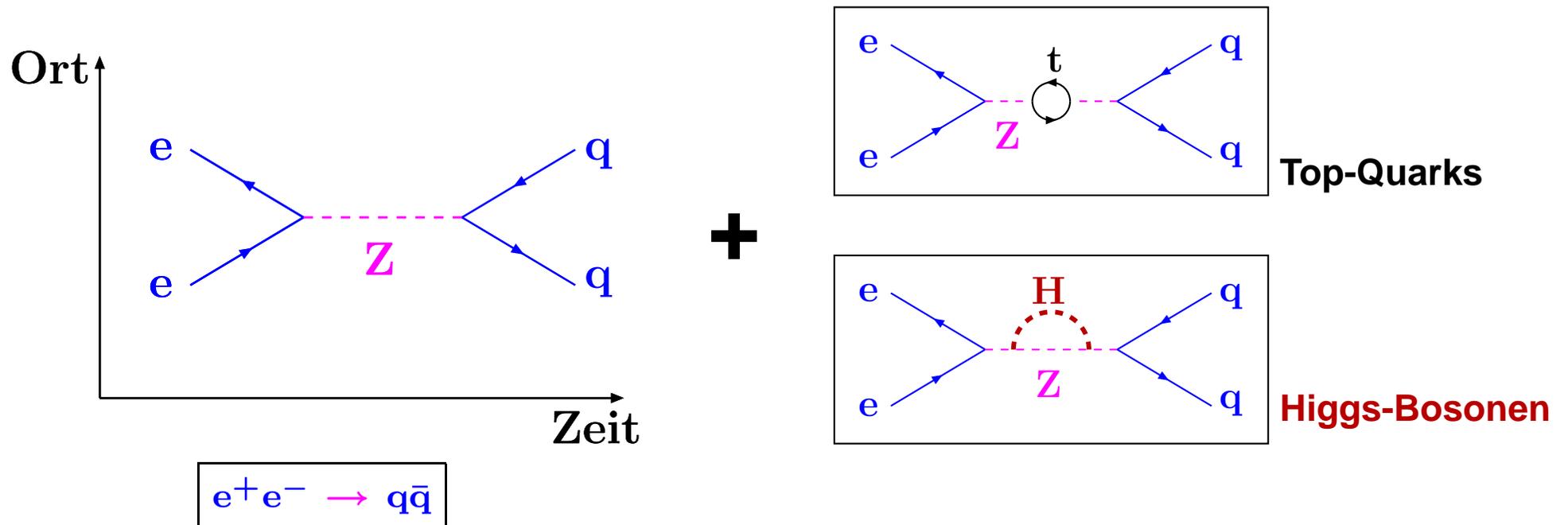
- Eine Kombination von Eichgruppen: $U(1)_Y \times SU(2)_L \times SU(3)_C$ mit lokaler Eichinvarianz, und drei Kopplungskonstanten: $\alpha_1 = \frac{5}{3} \left(\frac{e}{\cos \theta_W} \right)^2$, $\alpha_2 = \left(\frac{e}{\sin \theta_W} \right)^2$ und $\alpha_3 = \alpha_s$.

Zur Beschreibung der Wechselwirkungen genügen vier fundamentale Vertizes.



Wichtige Korrekturen zur Z-Produktion

- Die Grundreaktion bei LEP1 und Beispiele von Korrekturen.



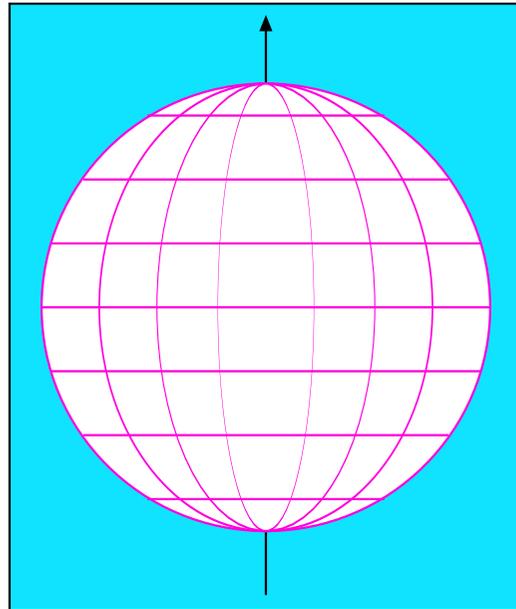
- Das Auftreten der Korrekturen ändert die Häufigkeit und Eigenschaften der Ereignisse.

Wir können dadurch etwas über die Teilchen lernen, die wir nicht direkt produzieren.

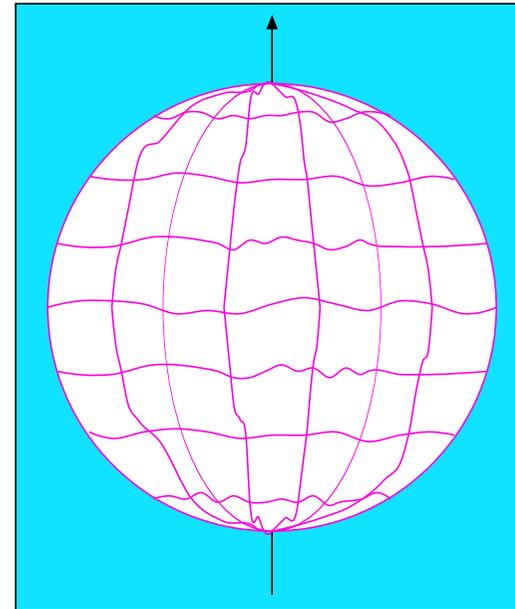


Eichtransformationen freier Felder

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.



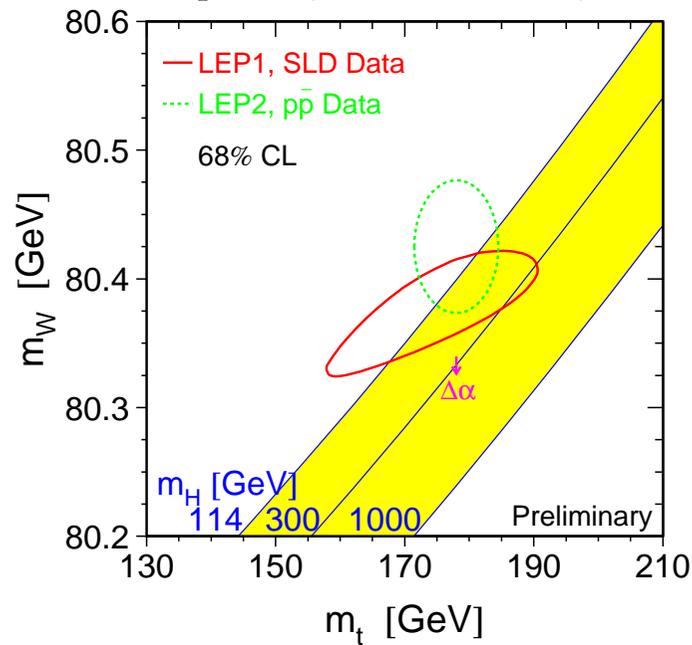
Das Standardmodell ...

... 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.

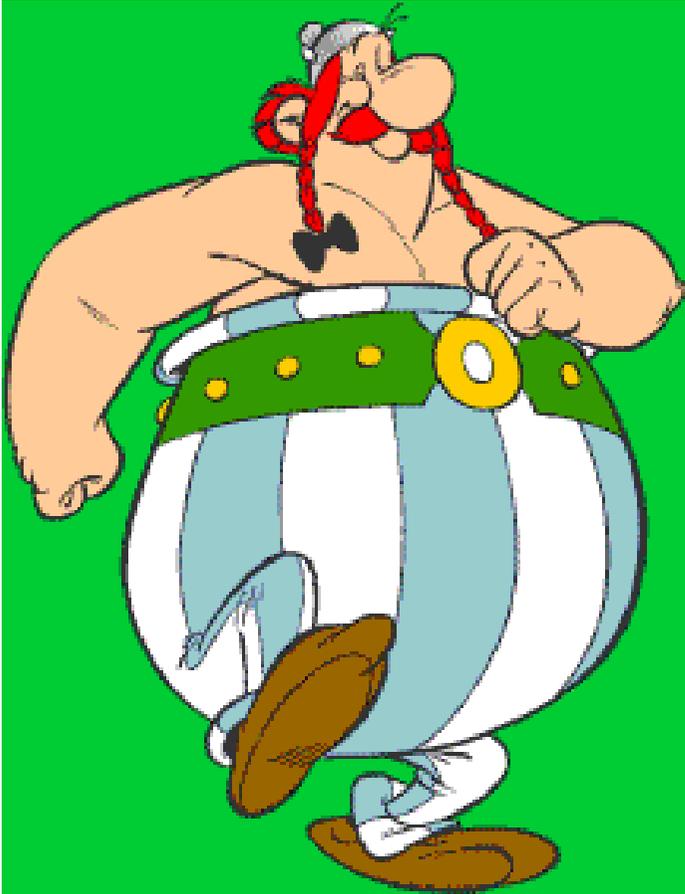
$$\sigma \left(\begin{array}{c} W_L^+ \\ W_L^- \end{array} \rightarrow \begin{array}{c} W_L^+ \\ W_L^- \end{array} \right) + \begin{array}{c} W_L^- \\ W_L^+ \end{array} \rightarrow \begin{array}{c} W_L^- \\ W_L^+ \end{array} \left(Z/\gamma \right) \sim S$$

- 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.



Probleme mit der Masse?



- Wieso habe ich eine so grosse Masse? **Wildschweine?**
- Klar, Wildschweine haben innere Struktur, sie bestehen z.B. aus **Fleisch**. Fleisch hat eine Masse, also haben Wildschweine eine Masse. Aber wieso hat Fleisch eine Masse?
- Klar, Fleisch besteht aus **Eiweißen**.
Eiweiße haben eine Masse, also.... Aber wieso ... ?
- Klar, Eiweiße bestehen aus **Molekülen**.
Moleküle haben eine Masse, also Aber wieso ... ?
- Klar, Moleküle bestehen aus **Atomen**.
Atome haben eine Masse, also Aber wieso ... ?
- Klar, Atome bestehen aus **Protonen** und **Neutronen**.
P und n haben eine Masse, also Aber wieso ... ?
- Klar, Protonen und Neutronen bestehen aus **Quarks**.
Aber wieso haben Quarks eine Masse?

Wir brauchen eine andere Erklärung als den Aufbau aus kleineren massiven Bausteinen.

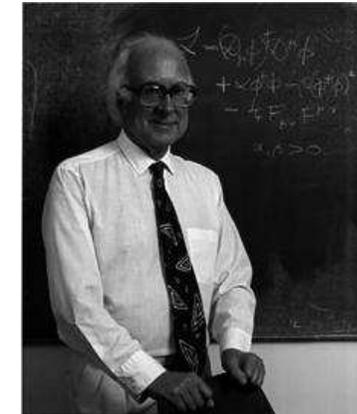


Probleme mit der Masse - eine mögliche Lösung

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 Massen durch spontane Symmetriebrechung und den Higgs-Mechanismus.

Der Vater des Gedankens



Peter Higgs

Die Konsequenz

- Die Existenz des (Spin = 0) **Higgs-Bosons** als Anregung des **Higgsfeldes**.

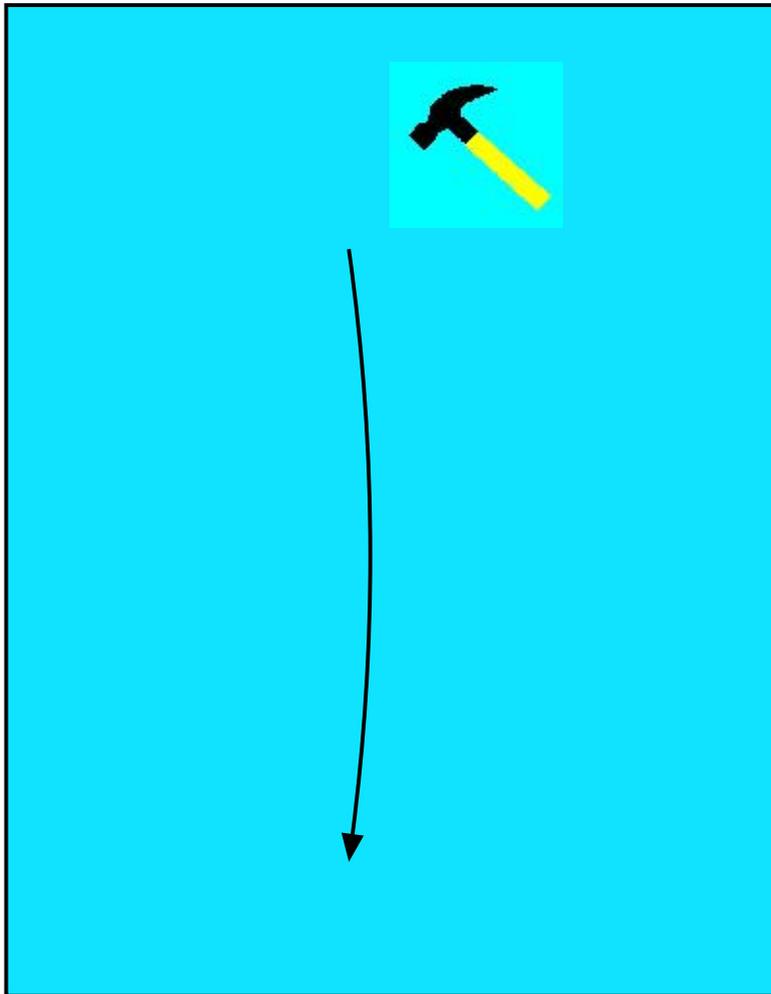
Die Vorhersagen des Standardmodells

- Die Kopplungen des **Higgs-Bosons** an alle Teilchen sind vorhergesagt, und damit liegen die Zerfalls-Kanäle und -Raten des **Higgs-Bosons** bei gegebener Masse 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.'

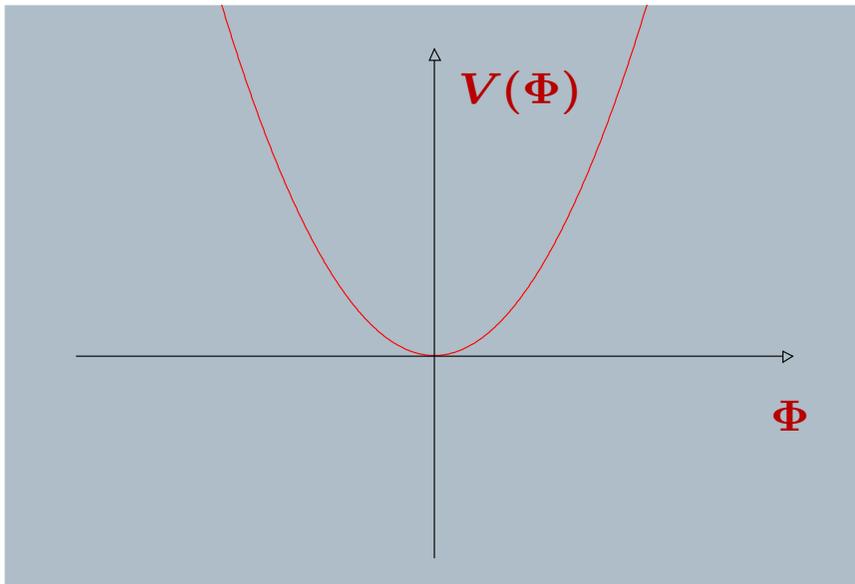


Symmetriebrechung und Higgs Potential

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

Symmetrie

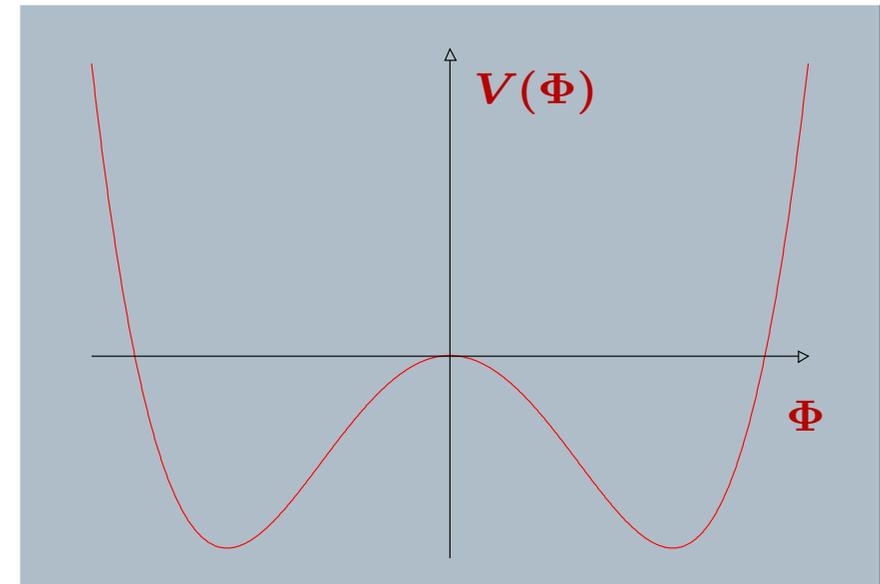
$$|\mu^2| = -M_H^2, \lambda = 0$$



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

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.



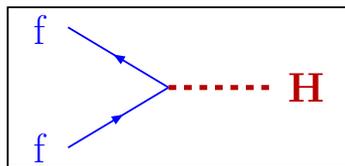
Das Higgs-Boson im Standardmodell

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.

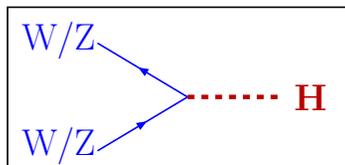
Die Kopplungen des Higgs-Bosons

- 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:



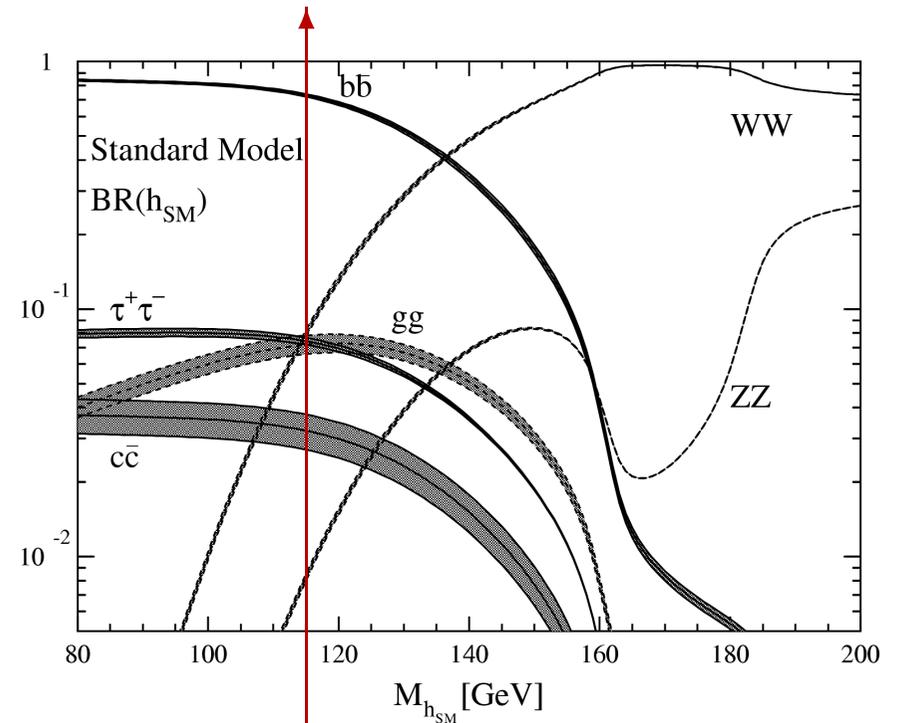
$$c_{HWW} = \frac{i}{2} (e \sin \theta_W)^2 v g_{\mu\nu}$$

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

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

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:

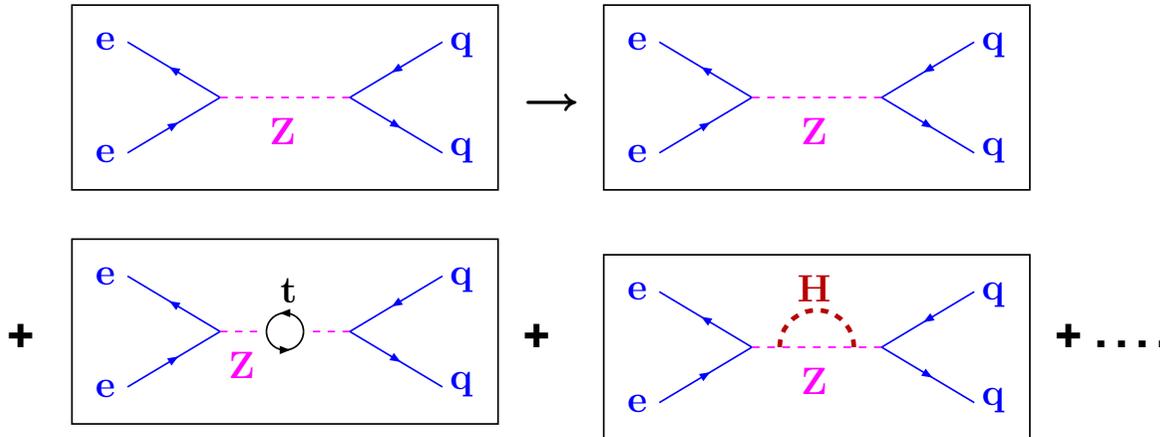
$M_h > 91$ GeV, $M_A > 91.9$ GeV und $\tan \beta \notin (-0.5, 2.4)$ aus $e^+e^- \rightarrow Z/A h$.
 $M_{H^\pm} > 78.6$ GeV aus $e^+e^- \rightarrow H^+H^-$ mit $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau, cs$.

In dieser Vorlesung wird das MSSM nicht im Detail behandelt.

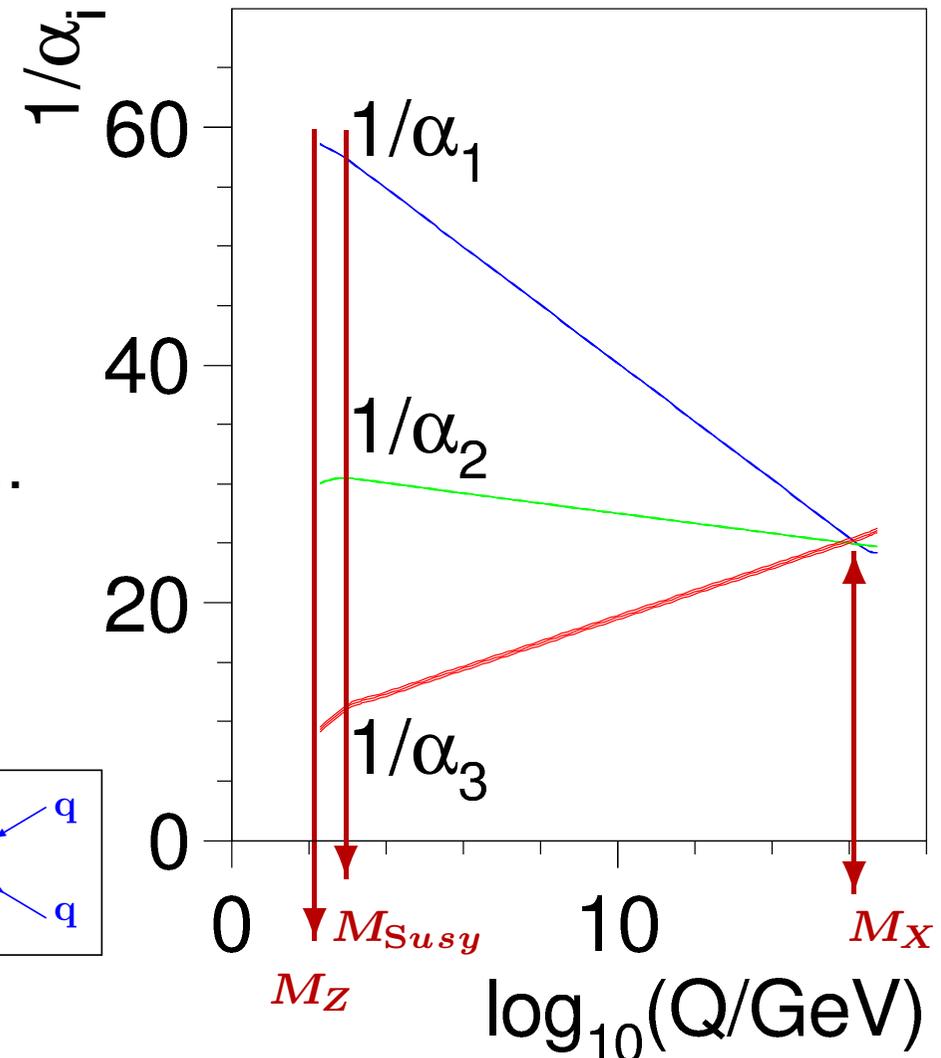
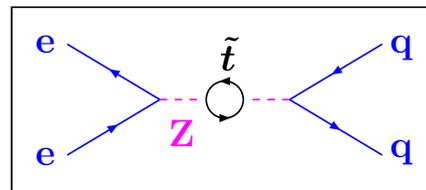


Schleifendiagramme und laufende Kopplungen

- Die Kopplungen α_i werden die durch Schleifendiagramme energieabhängig, z.B.:



- Das Spektrum der SM Teilchen reicht nicht aus um die Kopplungen zu vereinigen.
- Durch Einführung der Supersymmetrie gibt es neue Beiträge, z.B. von Stop-Quarks, und die Kopplungen treffen sich.



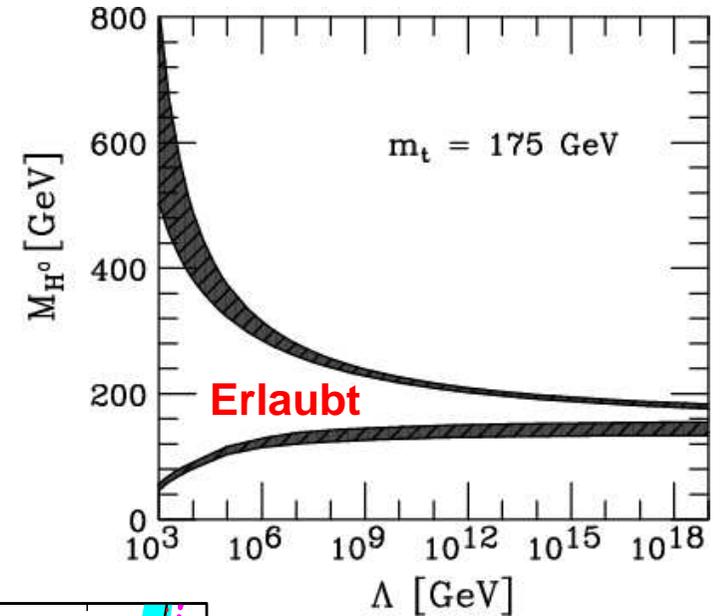
Die Vereinigung der Kopplungen ist ein gutes Argument für Supersymmetrie.



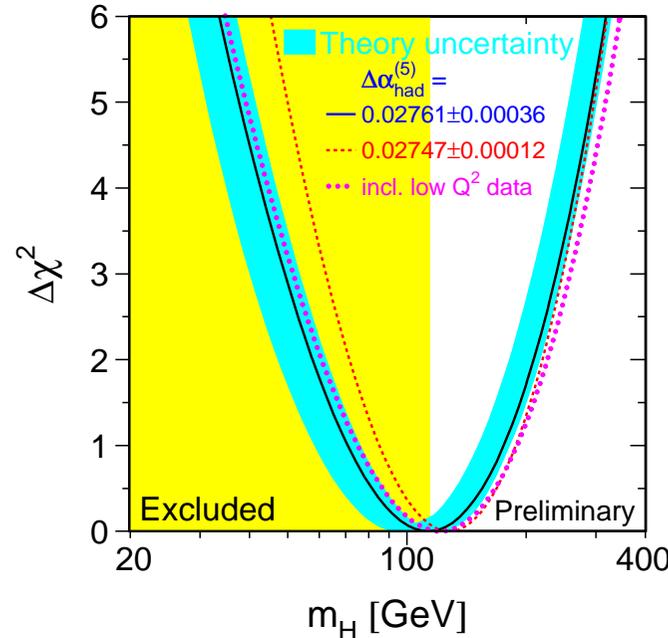
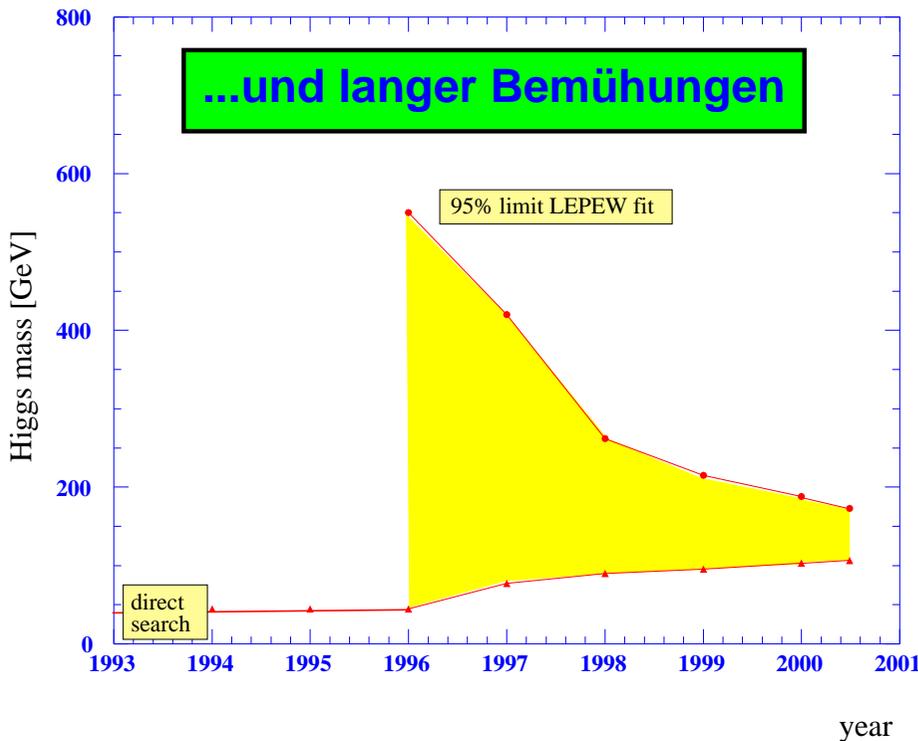
Wo müssen wir nach dem Higgs-Boson suchen?

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

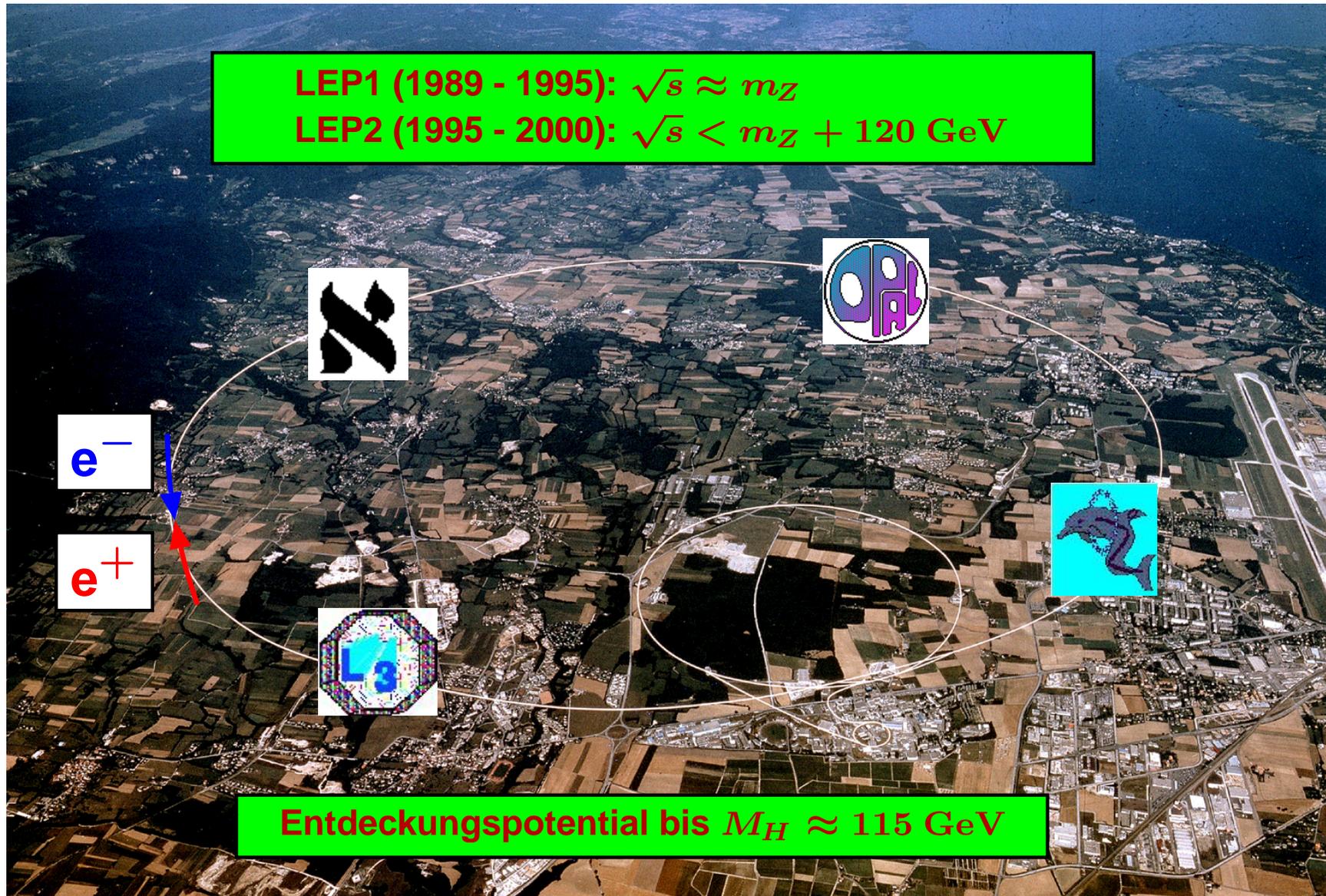


Der beste Fit

- $M_H = 96_{-38}^{+60} \text{ GeV}$
- $M_H < 219 \text{ GeV}$ mit 95% CL



Der Large Electron Positron Beschleuniger (LEP)

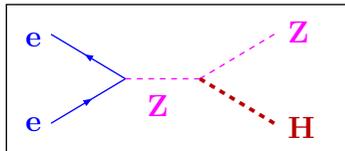




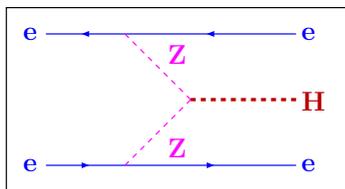
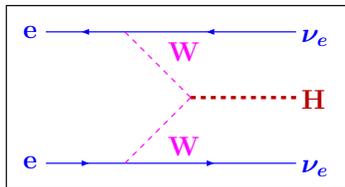
Higgs-Suche bei LEP - generelle Überlegungen

Produktion

– Higgs-Strahlung



– Boson-Fusion



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

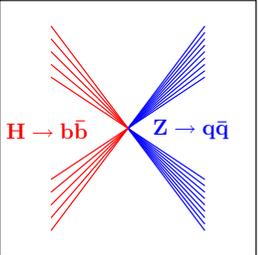
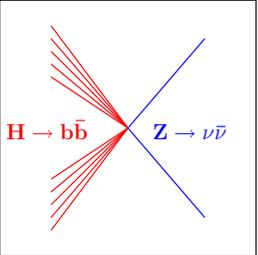
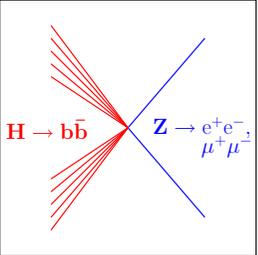
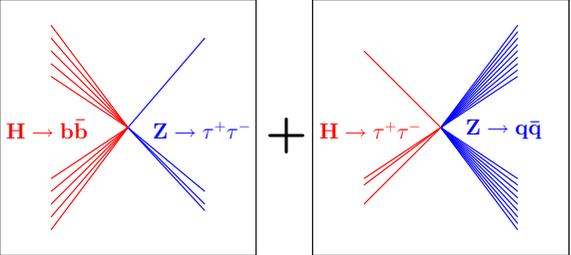
Die Schlüssel zum Erfolg

- 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 von 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.



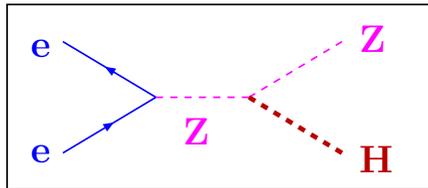
Higgs-Suche bei LEP - die verschiedenen Kanäle

Untersuchte Topologien	Anteil	Wichtigste Untergrundreaktionen
4-jets 	51%	$WW \rightarrow qqqq, ZZ \rightarrow bbqq$ und $e^+e^- \rightarrow 4\text{-jets}$
Missing energy 	15%	$WW \rightarrow qq\ell\nu$ und $ZZ \rightarrow bb\nu\nu$
Lepton Kanäle 	4.9%	$ZZ \rightarrow bbl\ell$
Tau - Kanäle 	4.9 + 5.1%	$WW \rightarrow qq\tau\nu, ZZ \rightarrow qq\tau\tau$ und $e^+e^- \rightarrow 4\text{-jets}$
Summe $\approx 80\%$		

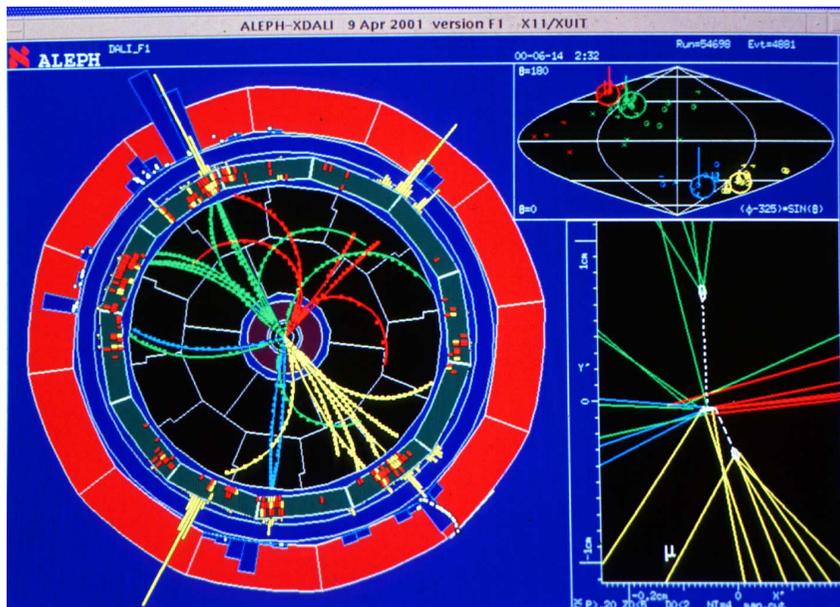


Higgs-Suche bei LEP - eine Evidenz?

Produktion i.w. durch Higgs Strahlung



Ein Kandidat



Die signifikantesten Kandidaten

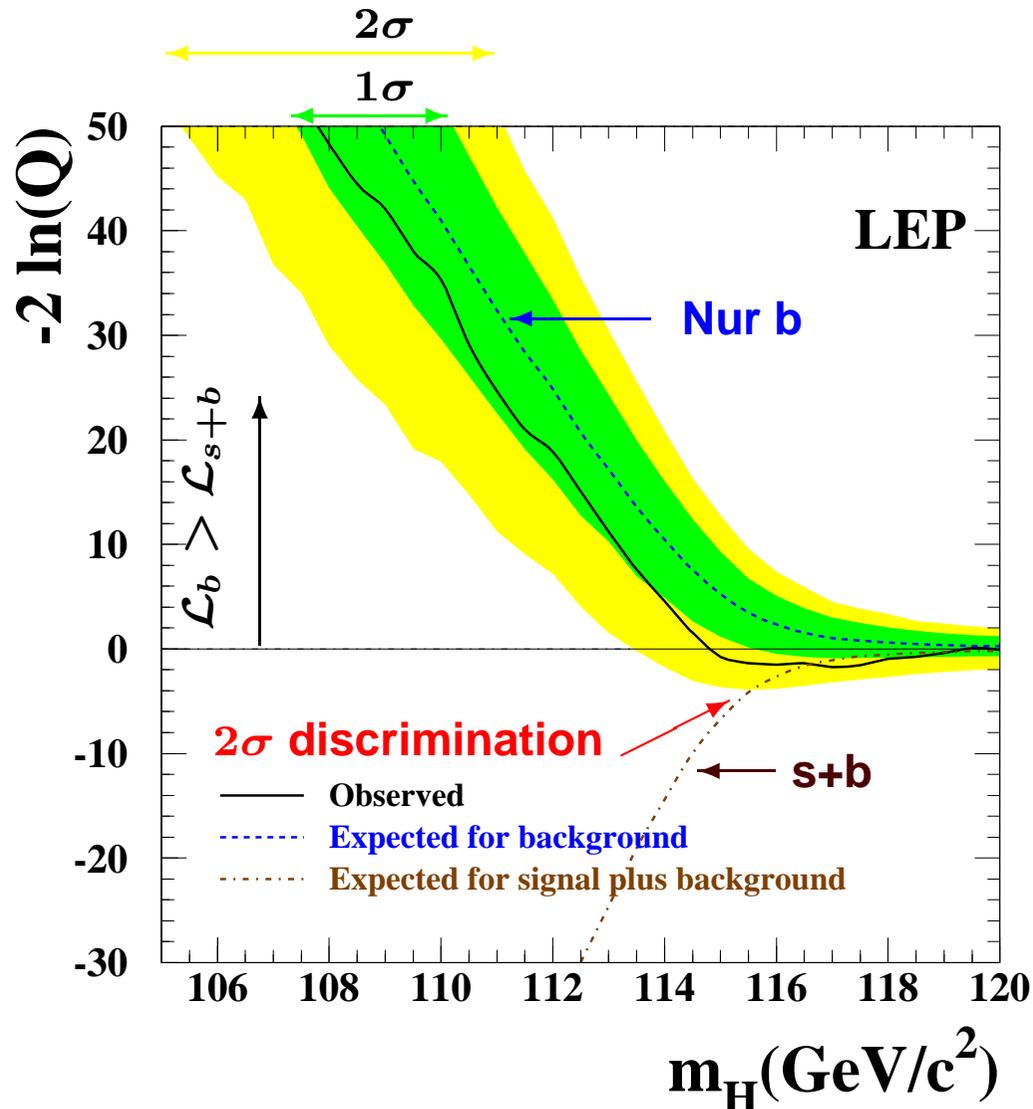
	4-jets	E_{miss}	lepton	tau	
	H, Z bb, qq	H, Z $bb, \nu\nu$	H, Z bb, ee $bb, \mu\mu$	H, Z $bb, \tau\tau$ $\tau\tau, qq$	
A	6	-	1	1	8
D	3	-	-	-	3
L	2	2	-	-	4
O	1	1	-	-	2
	12	3	1	1	17

- 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 amtlichen Endergebnis

- **LEP Luminosität** $\mathcal{L}_{\text{int}} = 2.5 \text{ fb}^{-1}$.
- $M_H > 114.4 \text{ GeV}$ mit **95% CL**.
- **Bei einer Masse von** $M_H = 115 \text{ GeV}$ ist $CL(s + b) = 15\%$ und $CL(b) = 9\%$.

Erst die Zukunft wird die Frage nach dem Higgs beantworten.



Der Proton-Antiproton Beschleuniger Tevatron

Ein paar Details

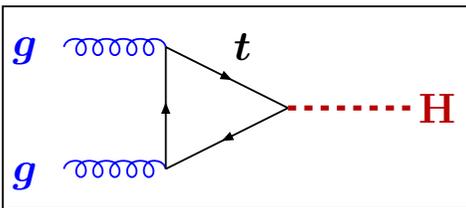
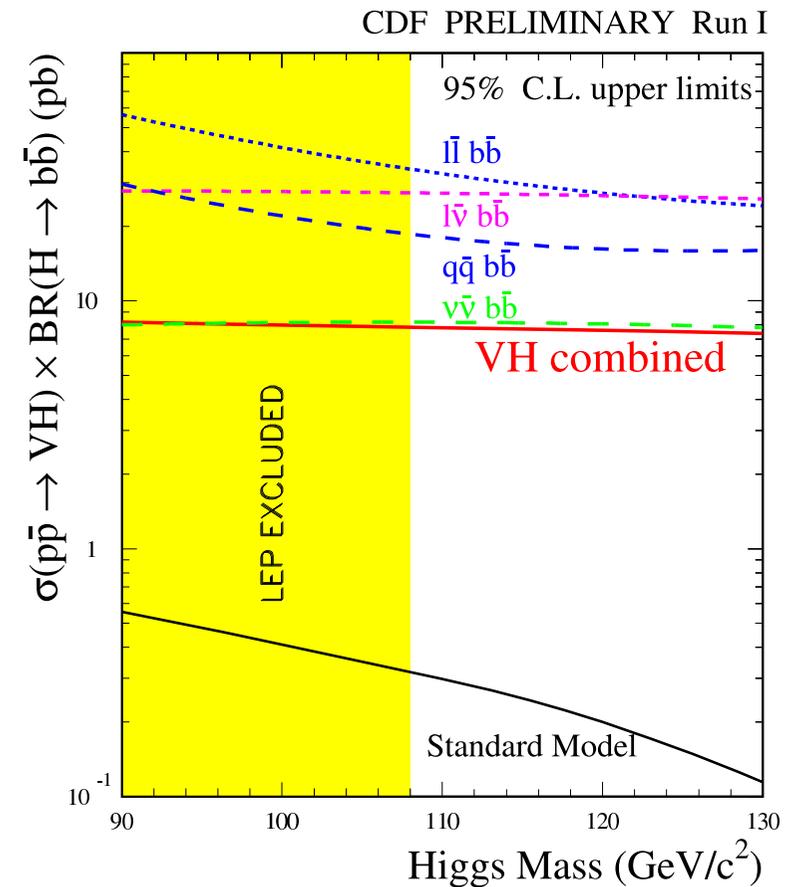
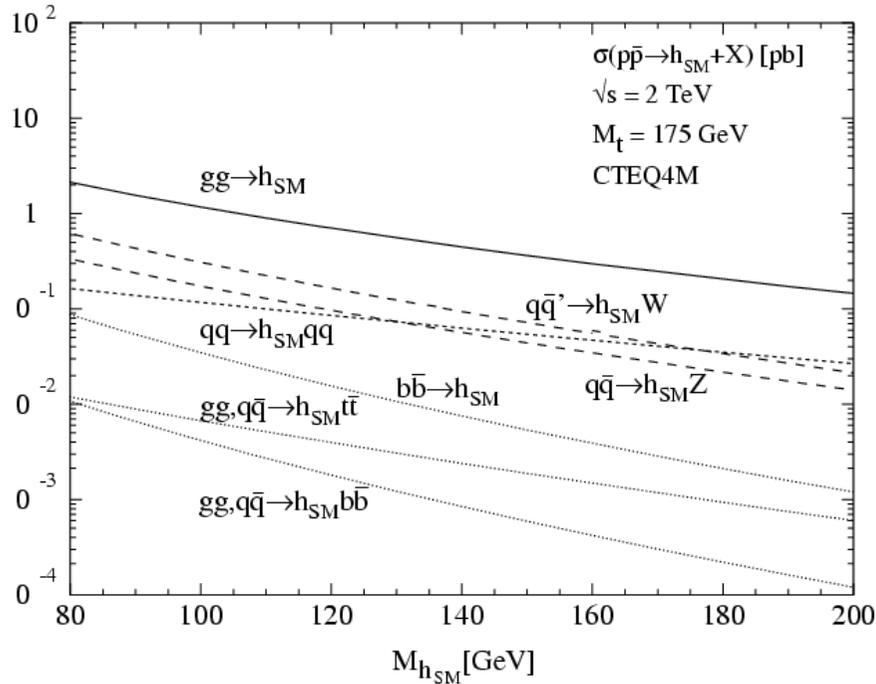


	Run I 1992 - 1996	Run II 2001 - 20xx
Umfang [km]	6.4	6.4
$E_{p,\bar{p}}$ [TeV]	0.9	0.98
Teilchenpakete	6x6	140x103
N_p/Paket [10^{11}]	2.3	2.7
$N_{\bar{p}}/\text{Paket}$ [10^{11}]	0.55	1.0
\mathcal{L}_{int} [fb^{-1}]	0.11	10-30

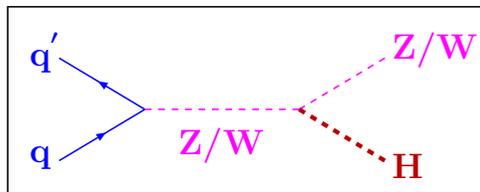
Das Tevatron ist zur Zeit der Beschleuniger mit der höchsten Schwerpunktsenergie.



Higgs-Suche am Tevatron - die Vergangenheit



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



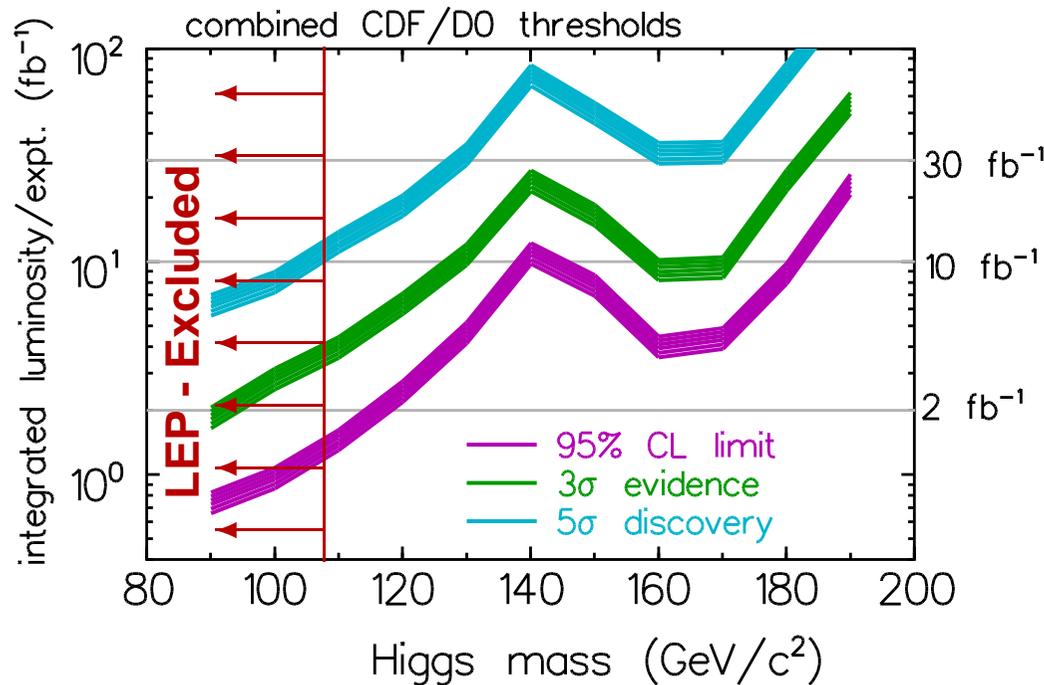
- ⊖ Faktor 2-5 kleinere Rate.
- ⊕ Lepton-Tag hilft den Untergrund zu bekämpfen.

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = 0.11 \text{ fb}^{-1}$$

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

- $M_H < 135$ GeV,
 $qq' \rightarrow Z/W \rightarrow Z/WH$.
- $M_H > 135$ 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.

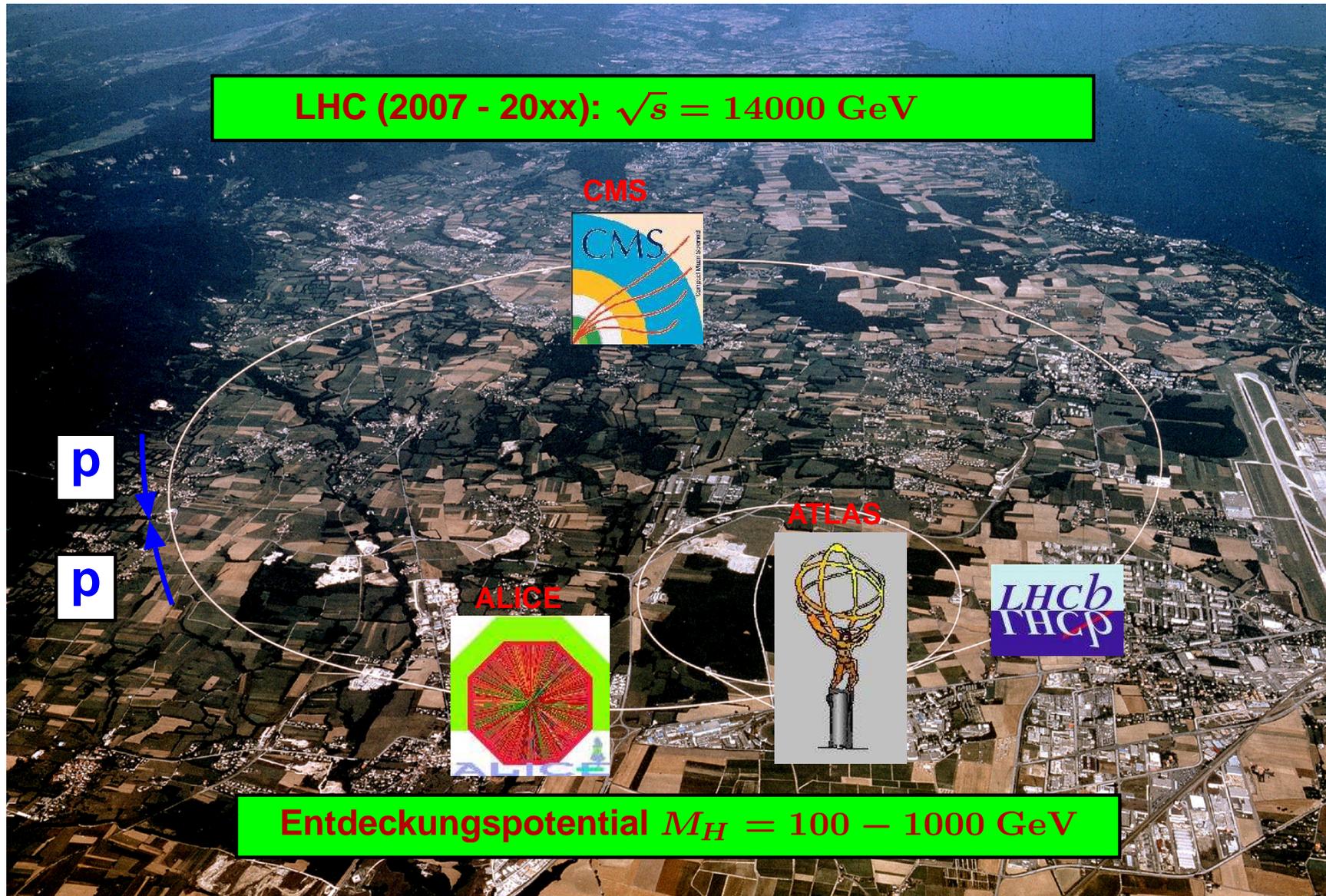
Pessimist: Mit 10 fb⁻¹ werden Massen bis $M_H = 180$ GeV mit 95% CL ausgeschlossen.

Optimist: Für $M_H = 116$ GeV und 15 fb⁻¹ ist eine 5 Sigma Entdeckung möglich.

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



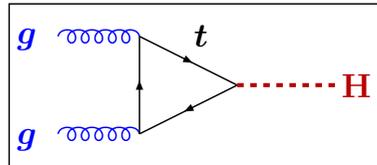
Der Large Hadron Collider (LHC)



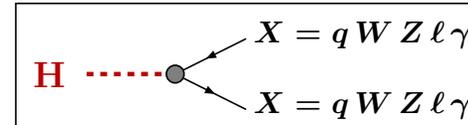


Higgs-Suche am LHC

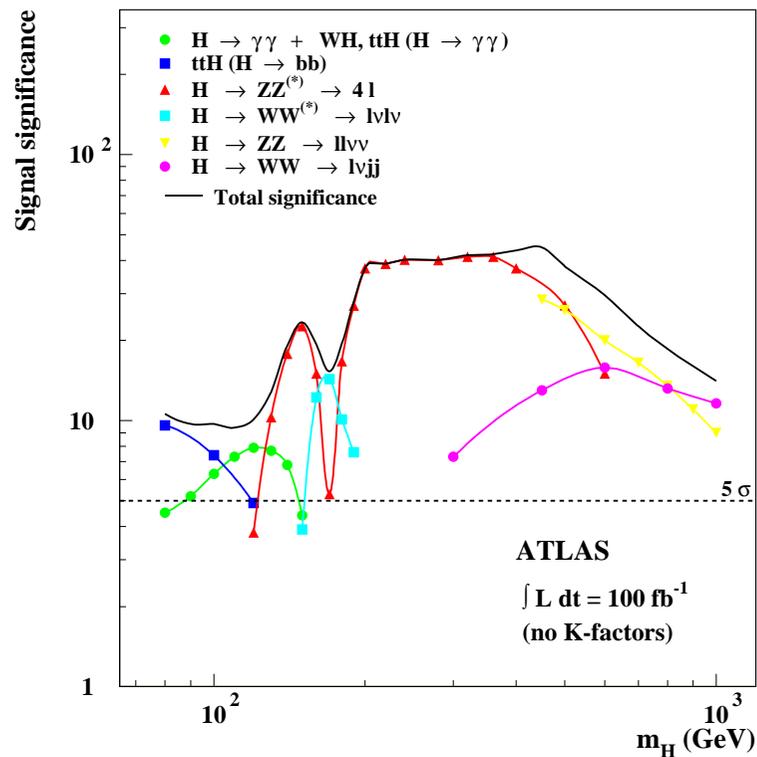
Die dominanten Produktions-



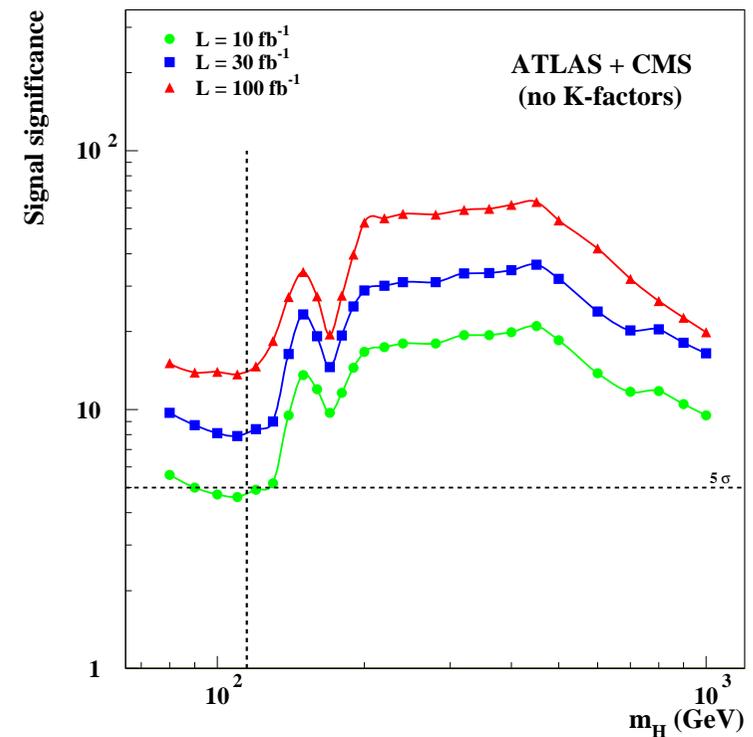
und Zerfallskanäle



am LHC und Tevatron sind gleich.



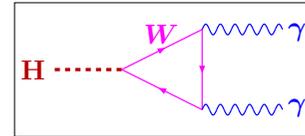
Im favorisierten Massenbereich sind $H \rightarrow b\bar{b}$, $H \rightarrow \gamma\gamma$ und $H \rightarrow \ell\bar{\ell}$ wichtig.



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



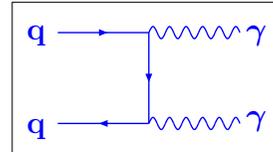
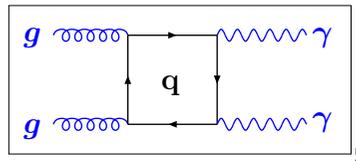
Ein Beispiel - der Kanal $H \rightarrow \gamma\gamma$



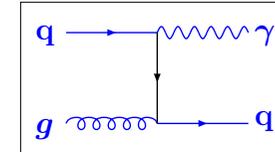
Im Bereich $80 \text{ GeV} < M_H < 150 \text{ GeV}$ ist der Kanal

sehr aussichtsreich.

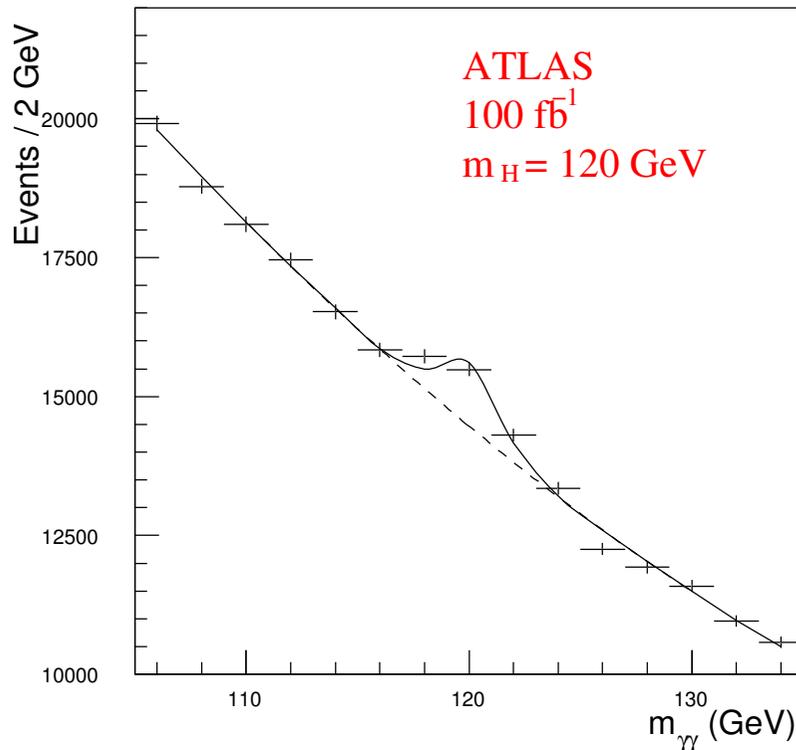
Untergrund sind



und



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



Die Aussichten

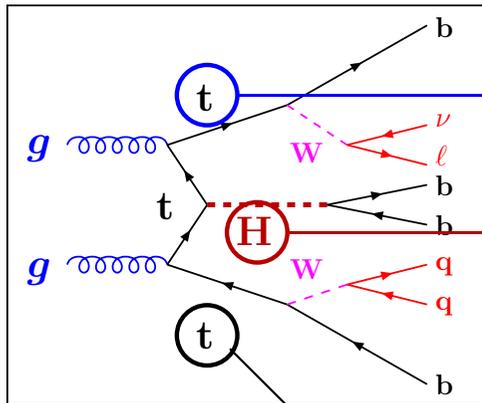
- Die Rate ist sehr klein aber die Ereignisse sind sehr klar.
- Die Analyse erfordert ein extrem präzises elektromagnetisches Kalorimeter um γ von $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ zu unterscheiden.

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



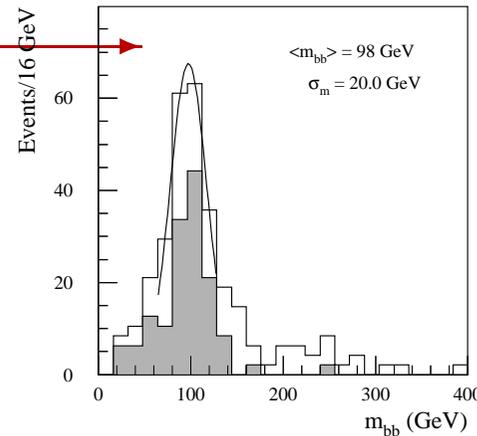
Ein Beispiel - der Kanal Htt

Der Prozess

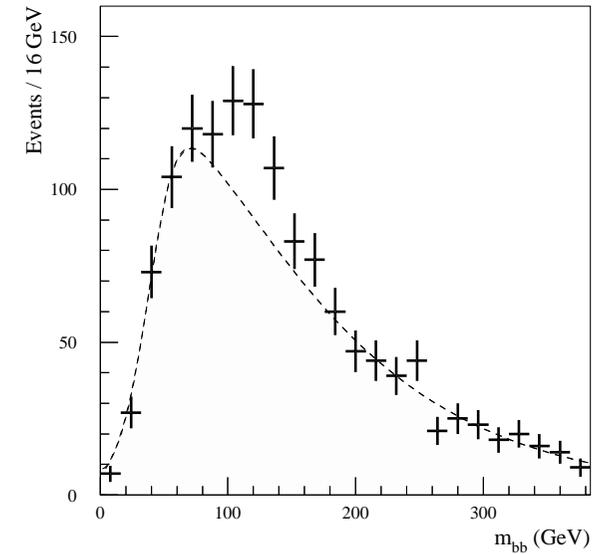


Rekonstrukion

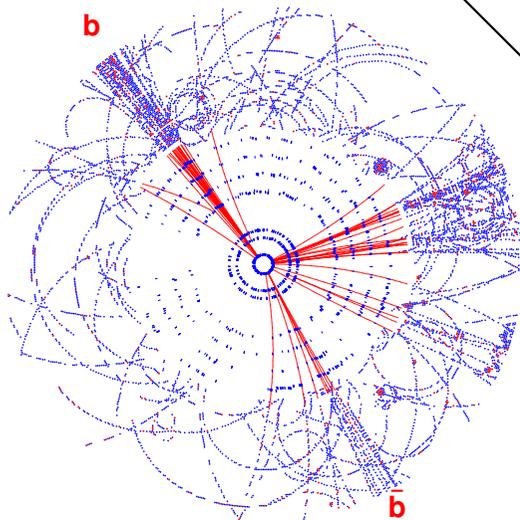
- $t \rightarrow b\ell\nu$
 $m = (174 \pm 9) \text{ GeV}$



Was können wir erreichen



Ein Ereignis



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

- Für $M_H = 120 \text{ GeV}$ und $\mathcal{L}_{\text{int}} = 100 \text{ fb}^{-1}$ kann die top-Higgs Kopplung mit einer Genauigkeit von etwa 15% bestimmt werden.

Ein viel versprechender Kanal für leichte Higgs-Bosonen.

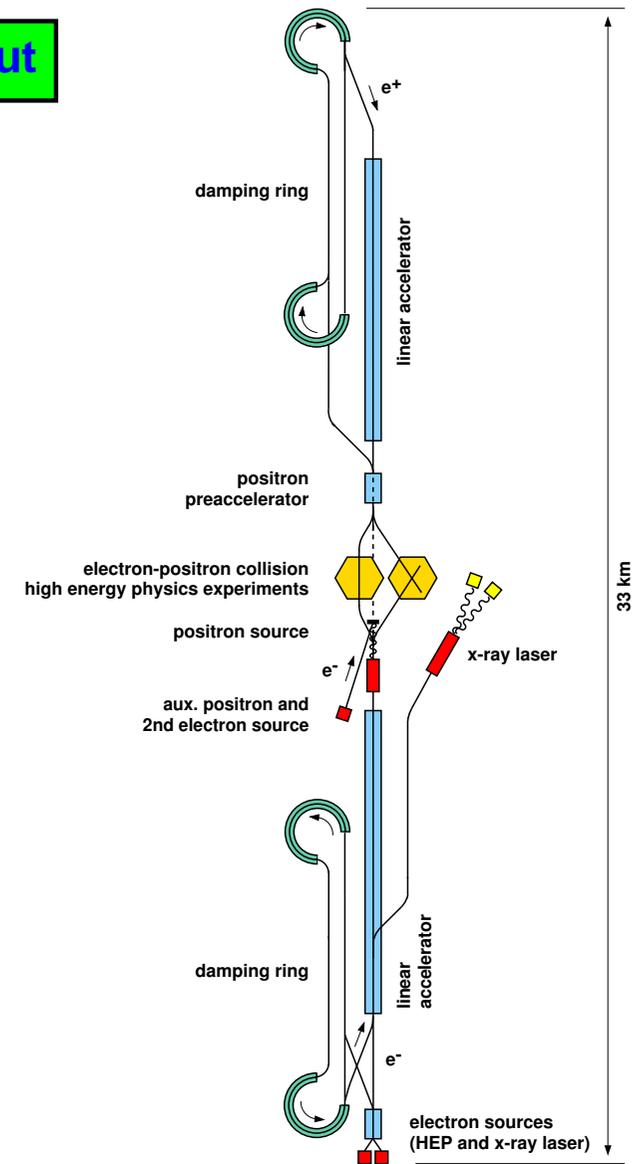


Das TESLA Projekt - der Plan

Die Lage



Das Layout



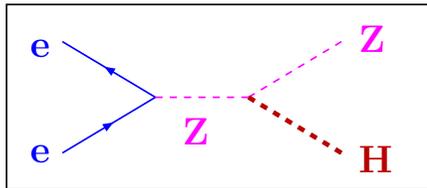
Technische Daten

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

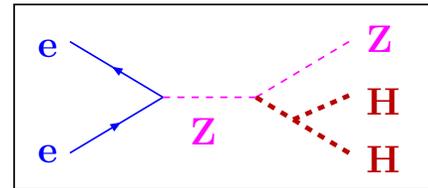


Beispiele für Messungen am Linearbeschleuniger

Die Massenbestimmung

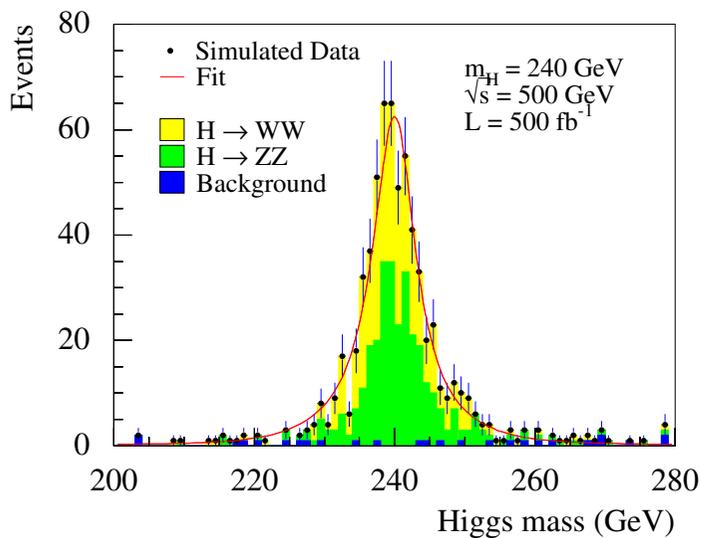


Die Higgs Selbstwechselwirkung

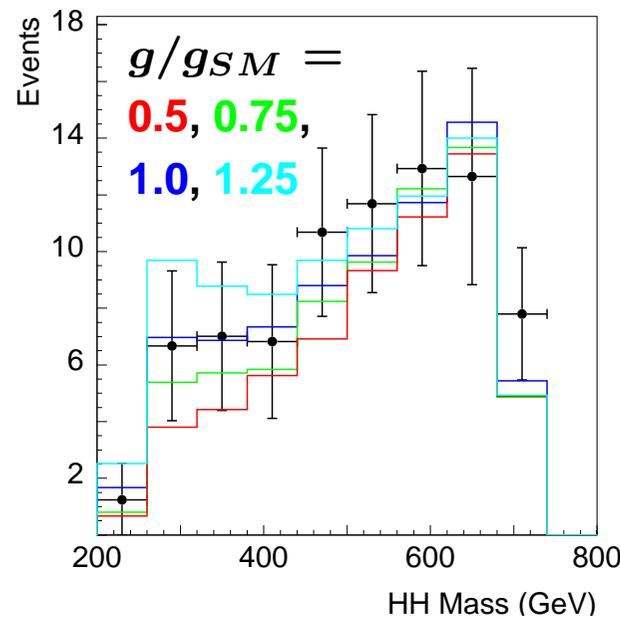


Kopplung:

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



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 ...

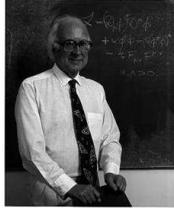
- Das Higgs-Boson ist ein aussichtsreicher Kandidat zur Lösung fundamentaler Probleme des Standardmodells.
- Die bisherigen Suchen nach dem Higgs-Boson waren erfolglos und liefern eine untere Massengrenze von $M_H > 114.4 \text{ GeV}$ mit 95% CL.
- Theoretische Überlegungen und Einschränkungen durch 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 4-6 Jahren wissen, was für die Massenerzeugung verantwortlich ist.

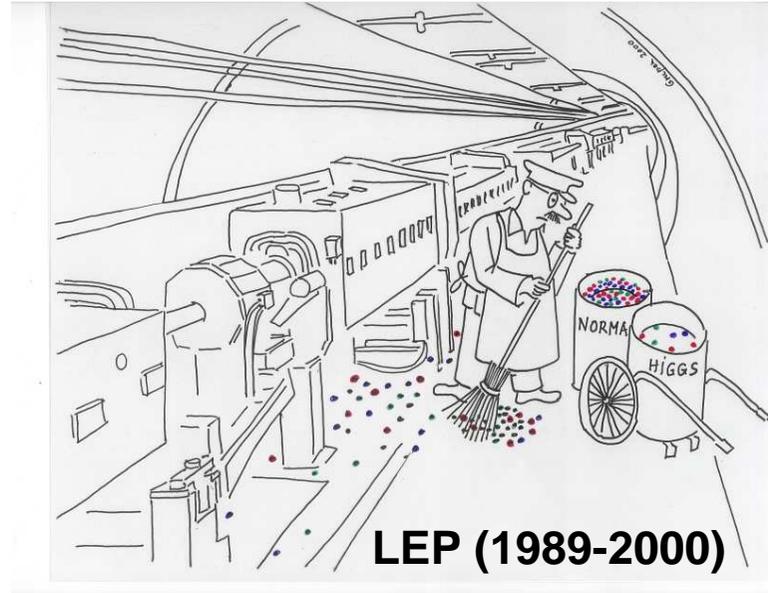


... Ausblick

Was so



begann, ...



... nahm so

LEP (1989-2000)

seinen Lauf, und endet ...



...vielleicht so

