

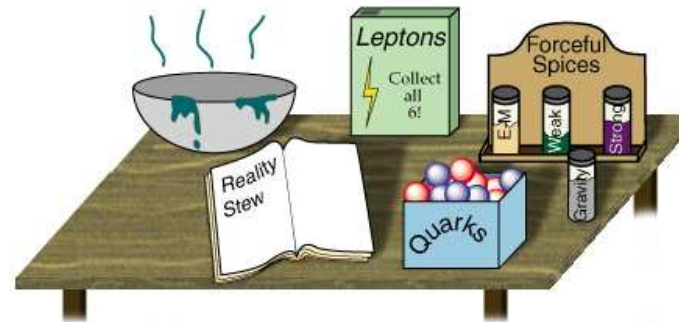


- 
- 
1. Einführung
  2. Beschleuniger
  3. Detektoren
  4. Bewegungsgleichungen und Symmetrien
  5. Das Quark-Modell und die CKM-Matrix
  6. CP-Verletzung im Standardmodell
  7. Proton- und Photonstruktur
  8. Elektroschwache Präzisionsmessungen
  - 9. Das Higgs-Boson**
  10. Neutrino-Massen und Neutrino-Oszillationen



# Der Stand der Dinge

– Unser heutiges Bild der Rezeptur



der Natur, ist:

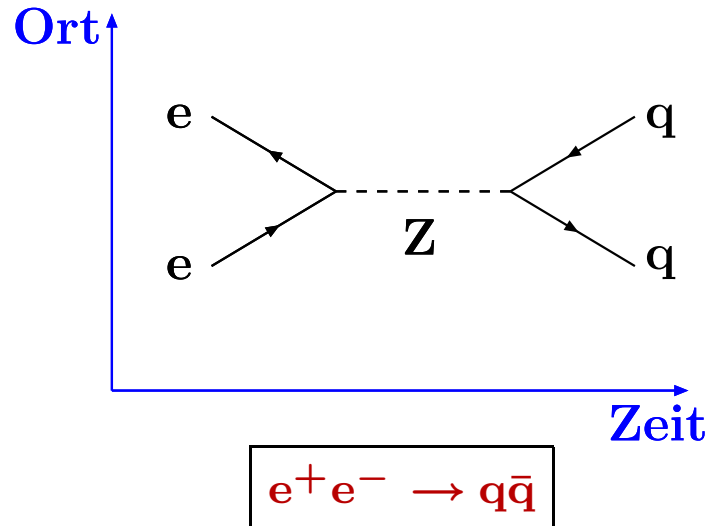
Leptons	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ $\mu$ - Neutrino	$\nu_\tau$ $\tau$ - Neutrino
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom
	I	II	III

- 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  $\nu_e$  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.

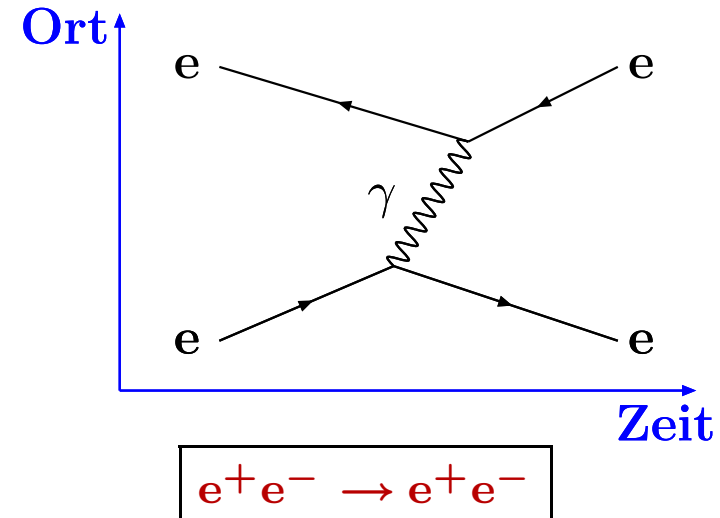


# Wechselwirkungen im Standardmodell

## Paarvernichtung und Paarerzeugung



## Emission und Absorption



## Das mathematische Konzept

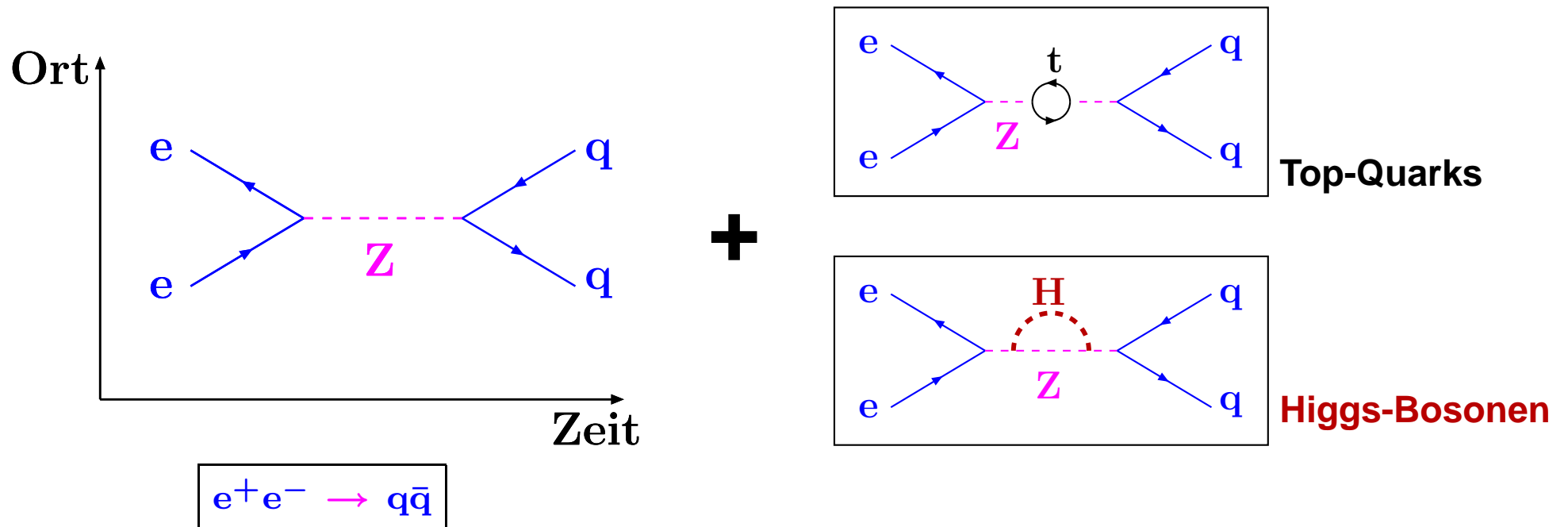
- Eine Kombination von Eichgruppen:  $U(1)_Y \times SU(2)_L \times SU(3)_C$  mit lokaler Eichinvarianz, und drei Kopplungskonstanten:  $\alpha_1 = \frac{5}{3} \left( \frac{e}{\cos \theta_W} \right)^2$ ,  $\alpha_2 = \left( \frac{e}{\sin \theta_W} \right)^2$  und  $\alpha_3 = \alpha_s$ .

**Zur Beschreibung der Wechselwirkungen genügen vier fundamentale Vertizes.**



# Wichtige Korrekturen zur Z-Produktion

- Die Grundreaktion bei LEP1 und Beispiele von Korrekturen.



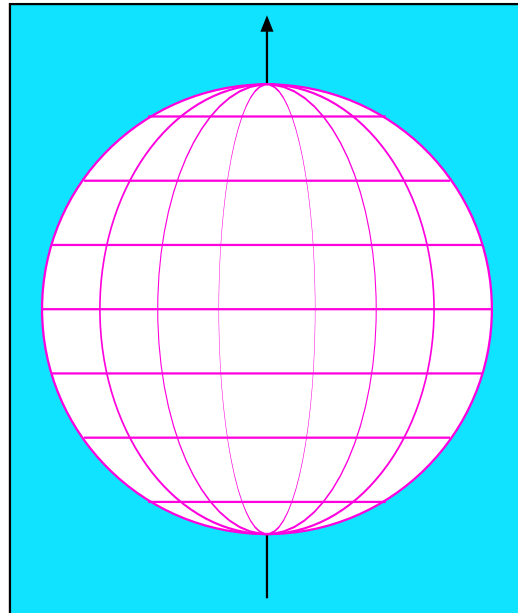
- Das Auftreten der Korrekturen ändert die Häufigkeit und Eigenschaften der Ereignisse.

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

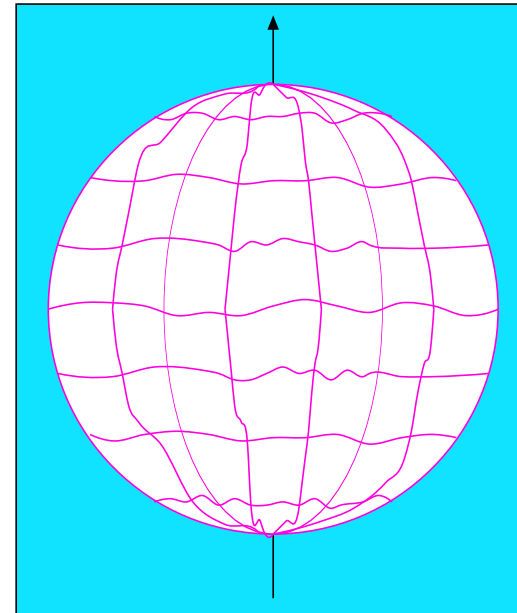


# Eichtransformationen freier Felder

**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.**



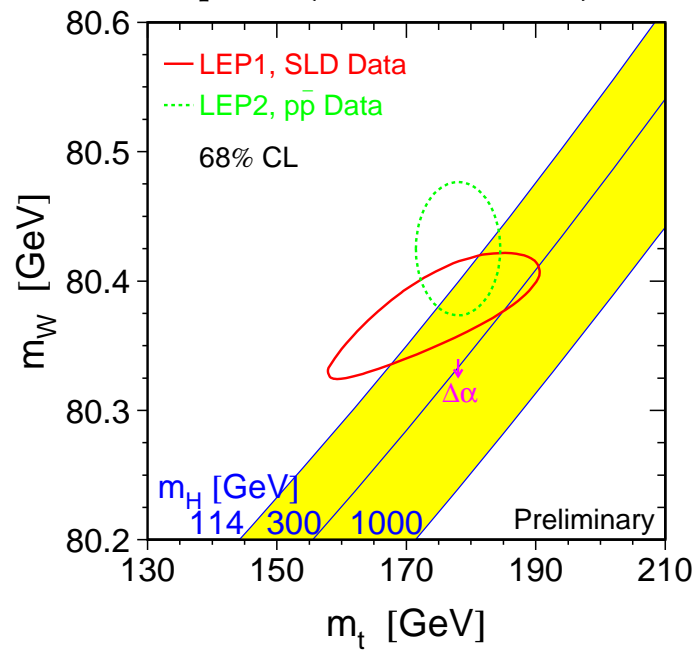
# Das Standardmodell ...

... 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.**

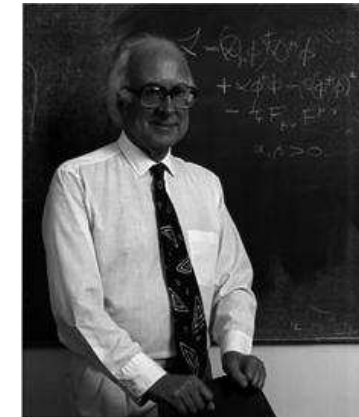


# Probleme mit der Masse - eine mögliche Lösung

## 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

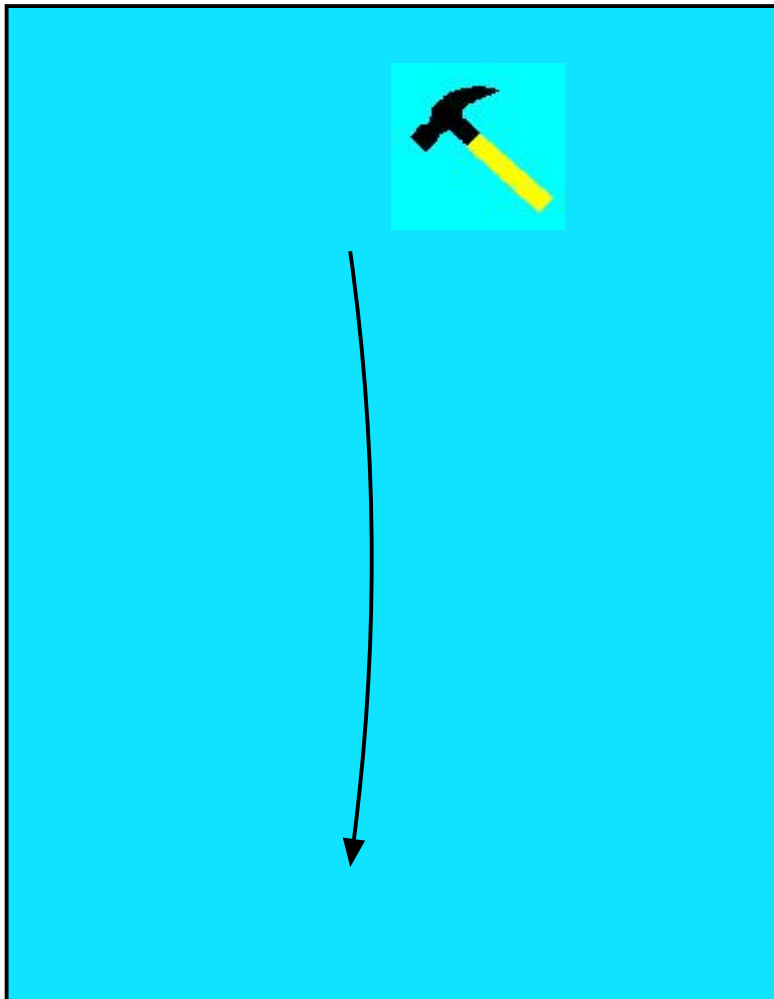
- Die Kopplungen des **Higgs-Bosons** an alle Teilchen sind vorhergesagt, und damit liegen die Zerfalls-Kanäle und -Raten des **Higgs-Bosons** bei gegebener Masse fest.

**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.'*

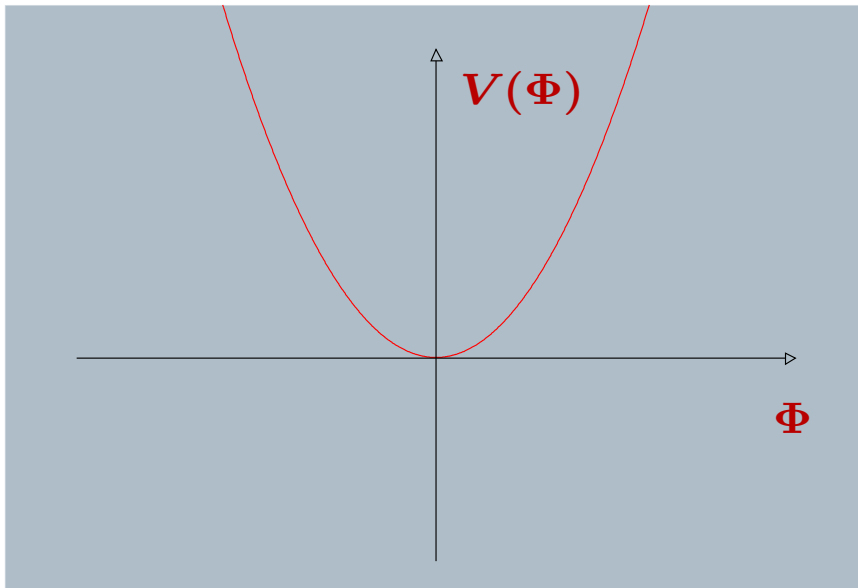


# Symmetriebrechung und Higgs Potential

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

**Symmetrie**

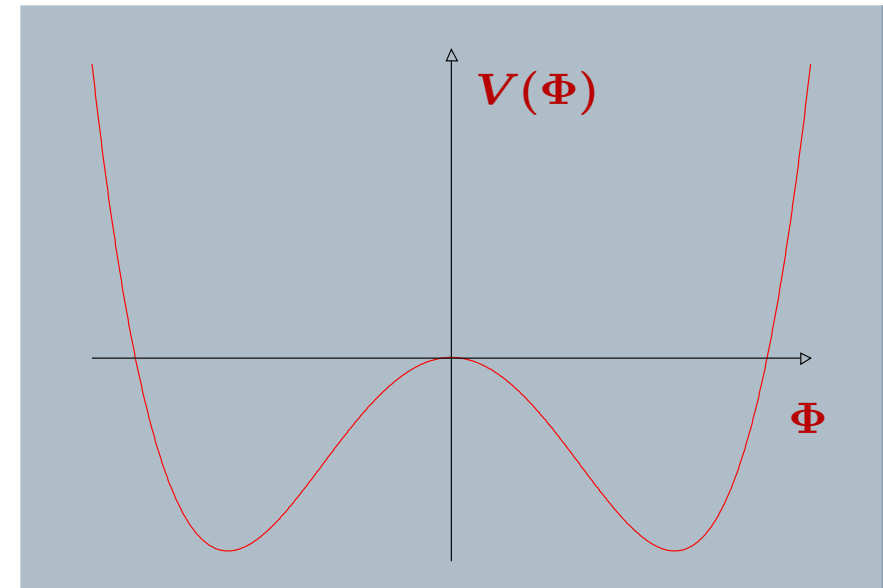
$$|\mu^2| = -M_H^2, \lambda = 0$$



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

**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.**



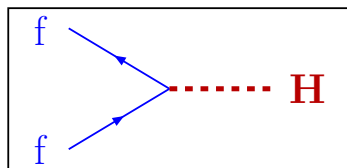
# Das Higgs-Boson im Standardmodell

## 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.

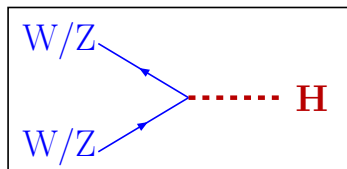
## Die Kopplungen des Higgs-Bosons

- 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:



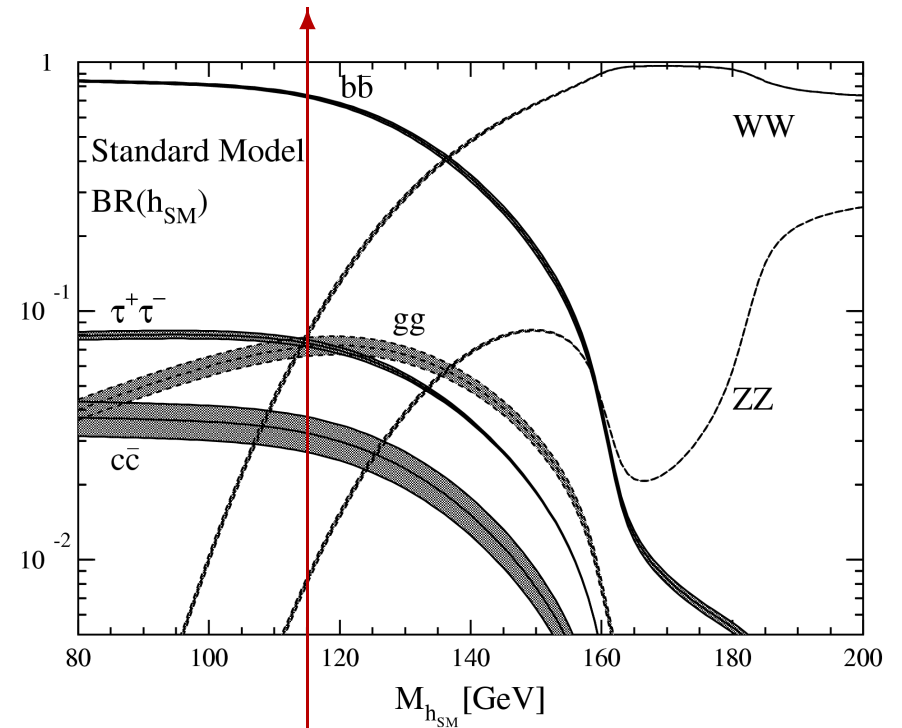
$$c_{HWW} = \frac{i}{2} (e \sin \theta_W)^2 v g_{\mu\nu}$$

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

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

## 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:

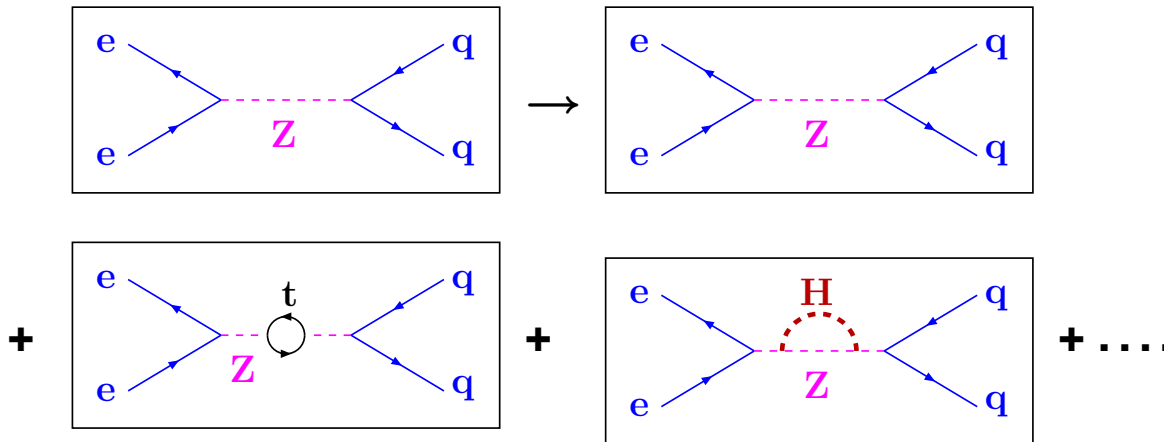
$M_h > 91$  GeV,  $M_A > 91.9$  GeV und  $\tan \beta \notin (-0.5, 2.4)$  aus  $e^+e^- \rightarrow Z/A h$ .  
 $M_{H^\pm} > 78.6$  GeV aus  $e^+e^- \rightarrow H^+H^-$  mit  $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau, cs$ .

**In dieser Vorlesung wird das MSSM nicht im Detail behandelt.**

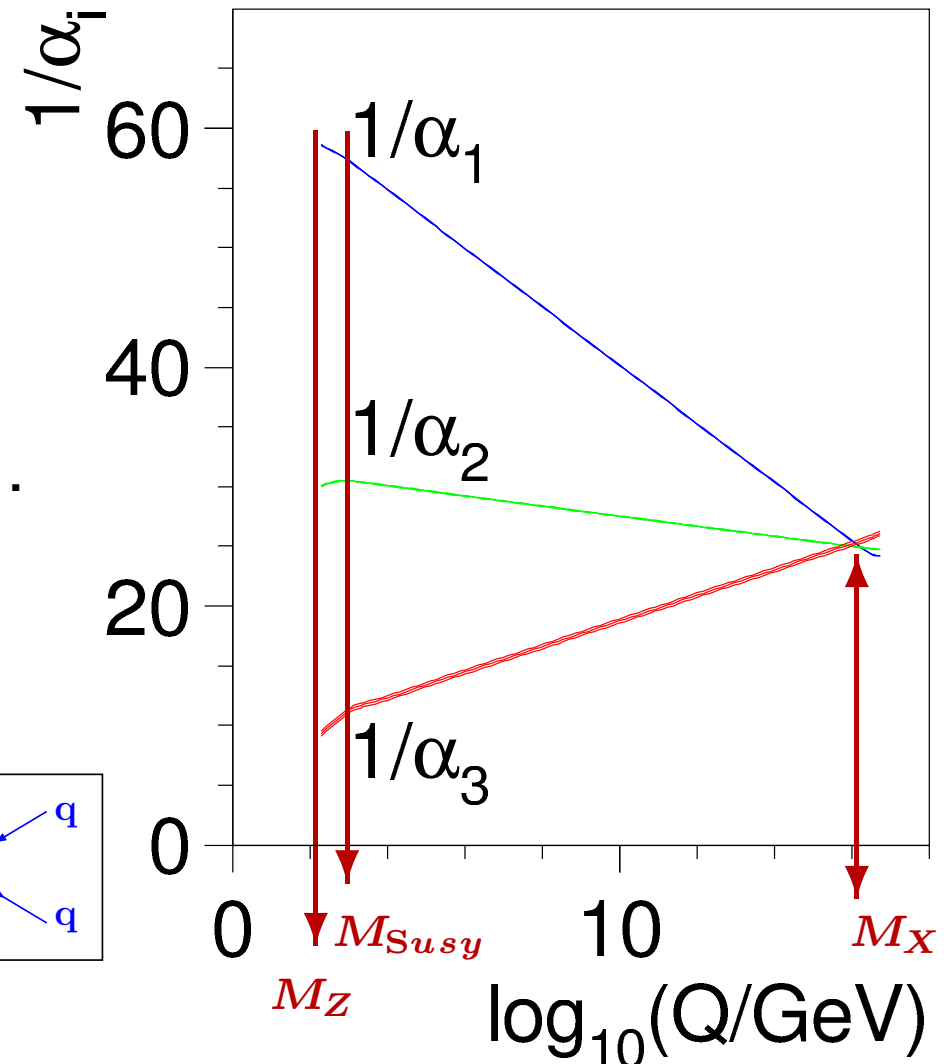
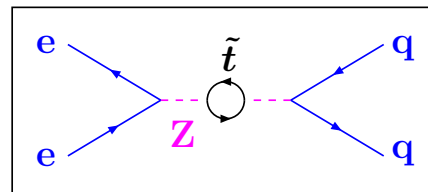


# Schleifendiagramme und laufende Kopplungen

- Die Kopplungen  $\alpha_i$  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.



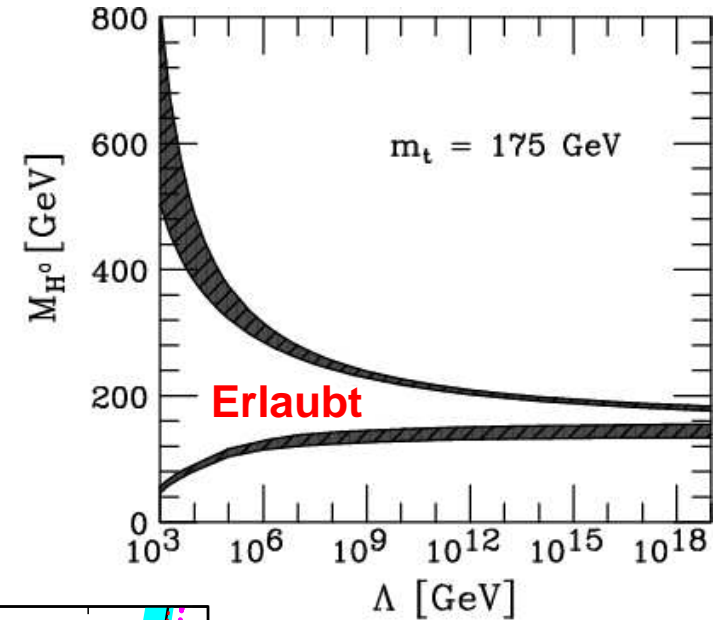
**Die Vereinigung der Kopplungen ist ein gutes Argument für Supersymmetrie.**



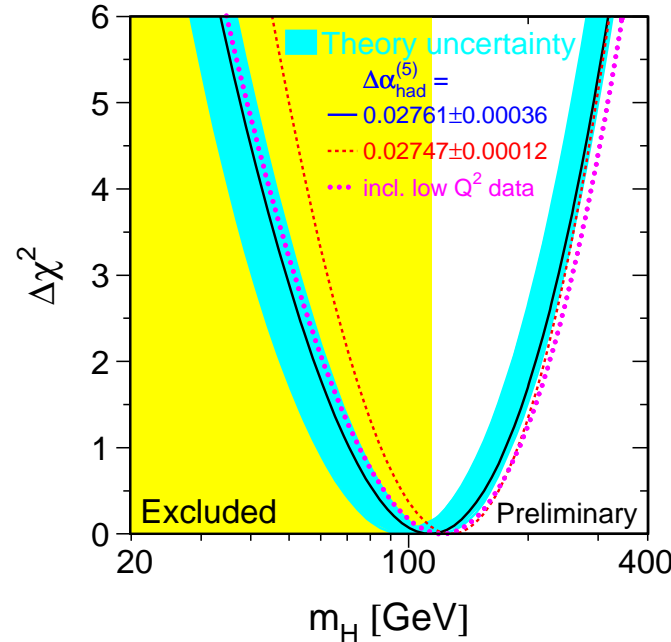
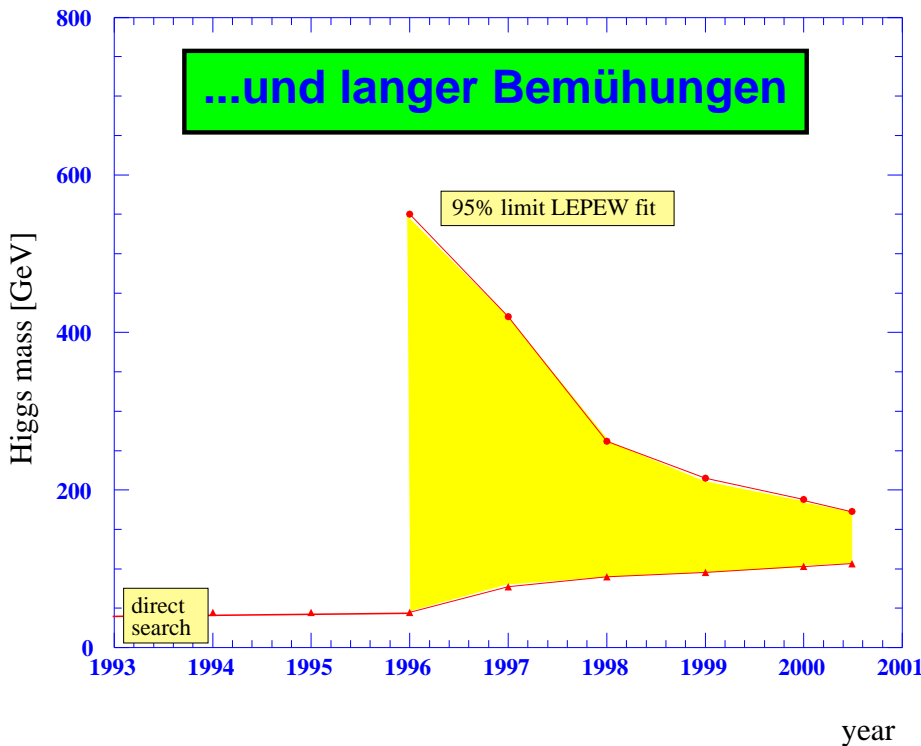
# Wo müssen wir nach dem Higgs-Boson suchen?

## Das Resultat langer Evolutionen...

- Rechnung für  $M_{\text{top}} = 175 \text{ GeV}$ ,  $\alpha_s(m_Z^2) = 0.118$ .
- $\Lambda$  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



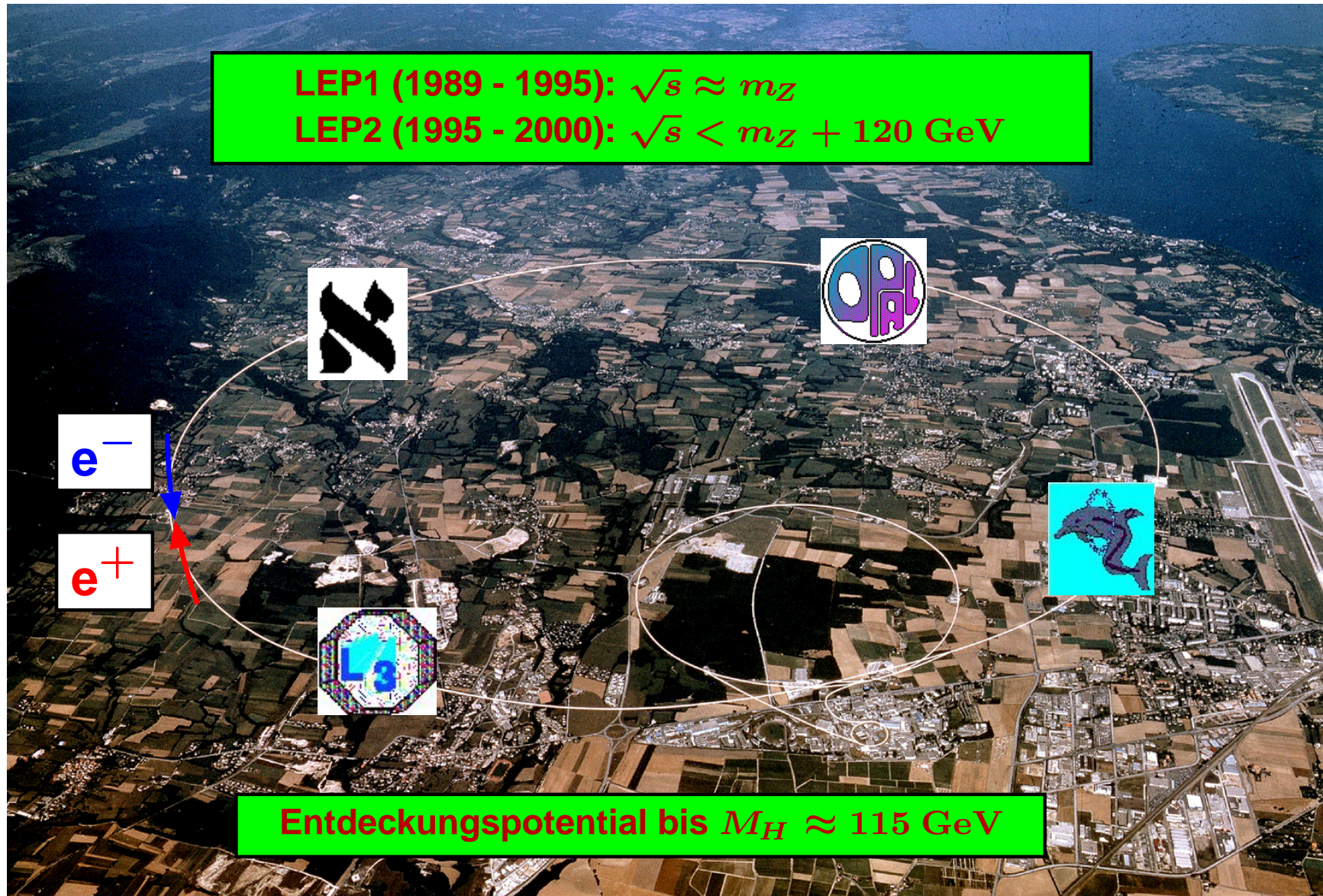
## Der beste Fit

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





# Der Large Electron Positron Beschleuniger (LEP)

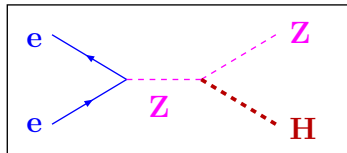




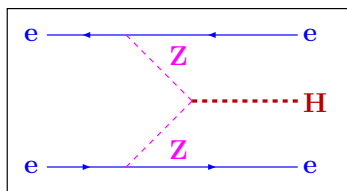
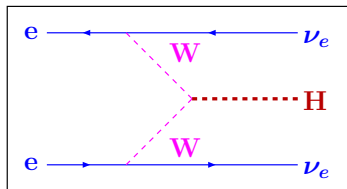
# Higgs-Suche bei LEP - generelle Überlegungen

## Produktion

### – Higgs-Strahlung



### – Boson-Fusion



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

## Die Schlüssel zum Erfolg

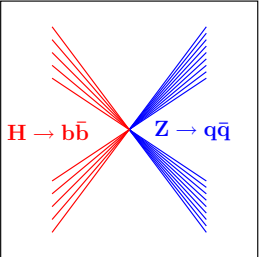
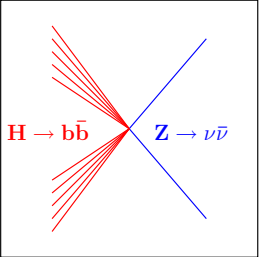
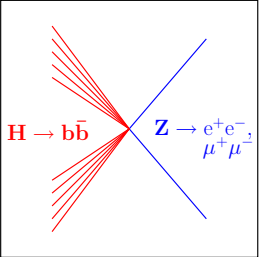
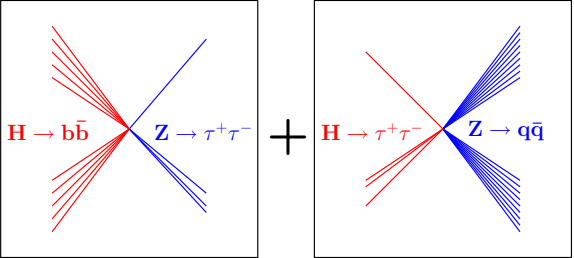
- Der Wirkungsquerschnitt bei LEP für  $M_H = 115$  GeV und  $\sqrt{s} = 208$  GeV ist ca. 0.1 pb. Das gibt nur etwa 50 Ereignisse pro Experiment.
- Die dominanten Zerfallskanäle des Higgs für  $M_H = 115$  GeV sind  $H \rightarrow b\bar{b}$  und  $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ . **Nachweis von b quarks 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.**





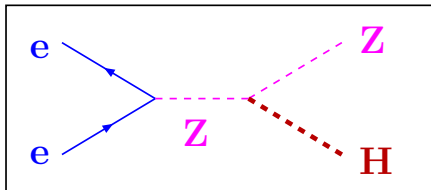
# Higgs-Suche bei LEP - die verschiedenen Kanäle

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

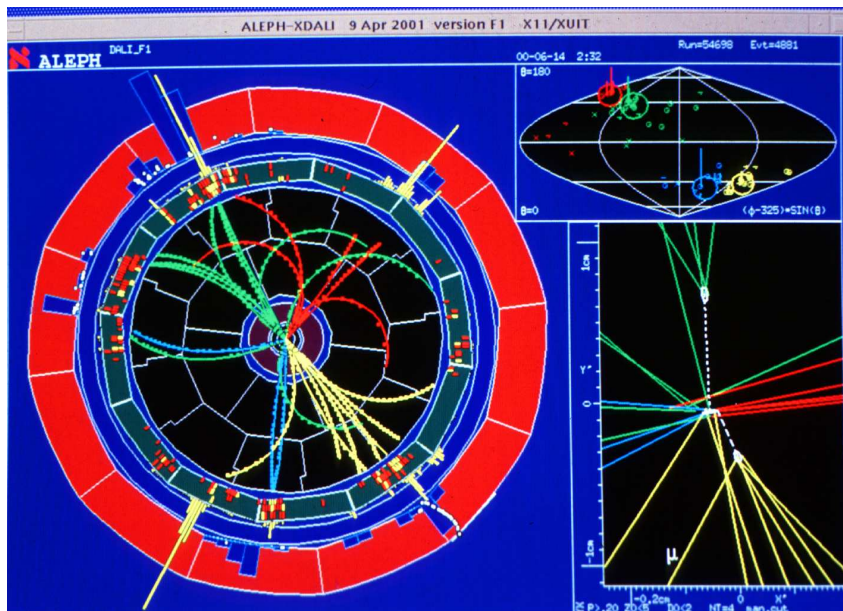


# Higgs-Suche bei LEP - eine Evidenz?

## Produktion i.w. durch Higgs Strahlung



## Ein Kandidat



## Die signifikantesten Kandidaten

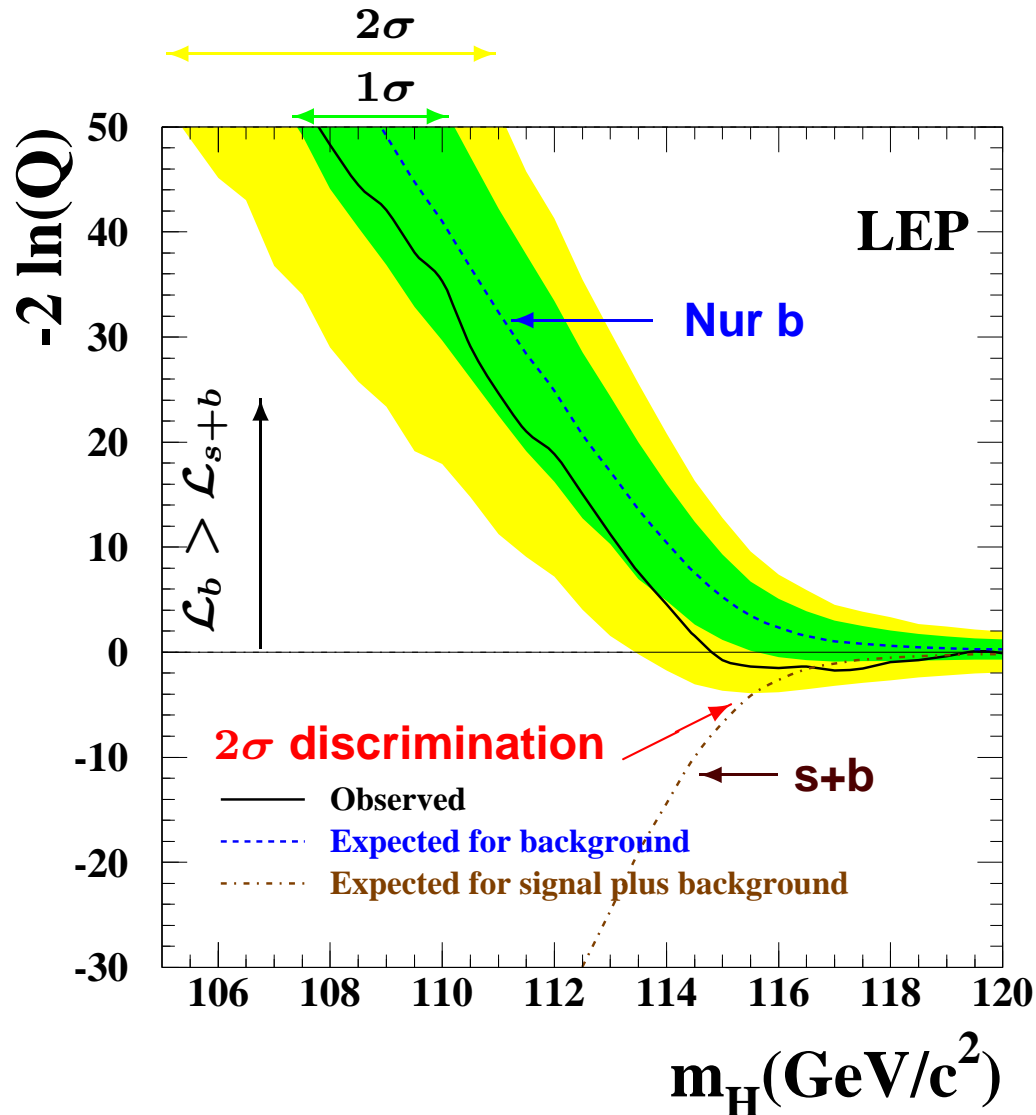
	4-jets	$E_{\text{miss}}$	lepton	tau	
	$H, Z$ $bb, qq$	$H, Z$ $bb, \nu\nu$	$H, Z$ $bb, ee$ $bb, \mu\mu$	$H, Z$ $bb, \tau\tau$ $\tau\tau, qq$	
<b>A</b>	<b>6</b>	-	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>8</b>
<b>D</b>	<b>3</b>	-	-	-	<b>3</b>
<b>L</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	-	-	<b>4</b>
<b>O</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	-	-	<b>2</b>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

- 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

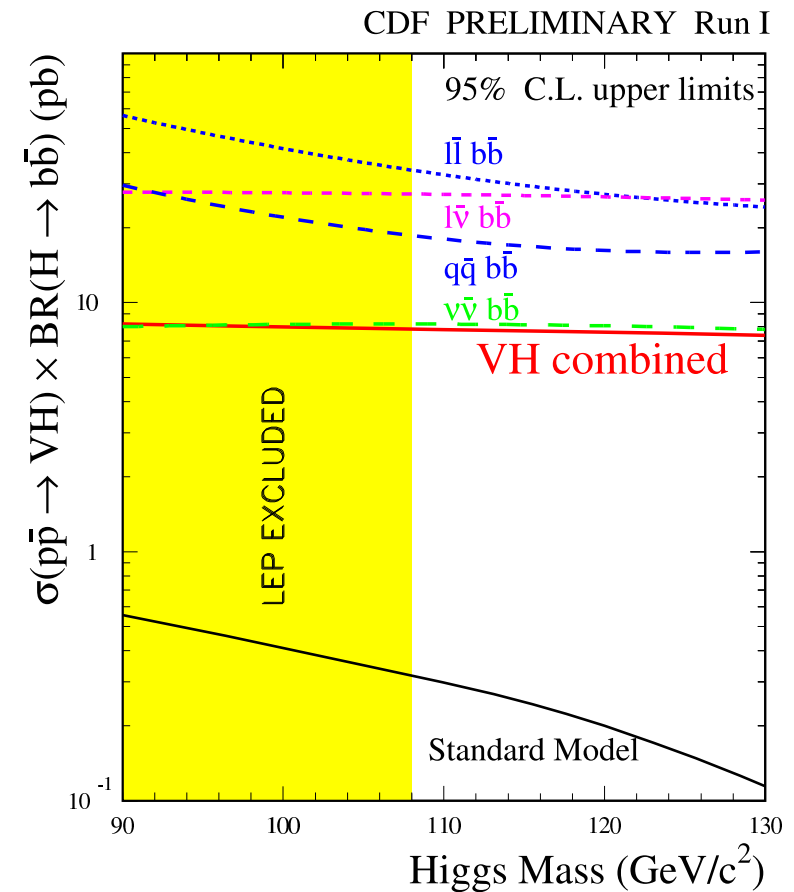
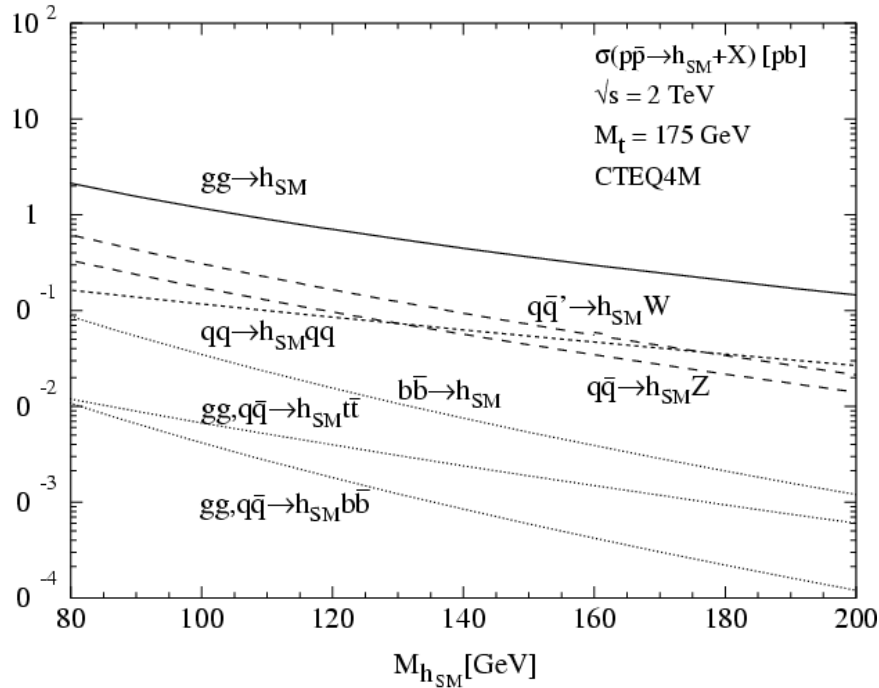


	Run I 1992 - 1996	Run II 2001 - 20xx
Umfang [km]	6.4	6.4
$E_{p,\bar{p}}$ [TeV]	0.9	0.98
Teilchenpakete	6x6	140x103
$N_p/\text{Paket}$ [ $10^{11}$ ]	2.3	2.7
$N_{\bar{p}}/\text{Paket}$ [ $10^{11}$ ]	0.55	1.0
$\mathcal{L}_{\text{int}}$ [ $\text{fb}^{-1}$ ]	0.11	10-30

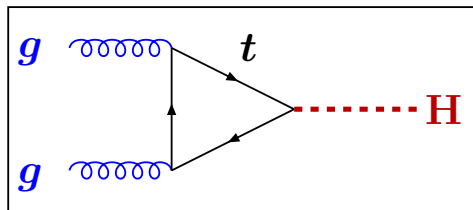
**Das Tevatron ist zur Zeit der Beschleuniger mit der höchsten Schwerpunktsenergie.**



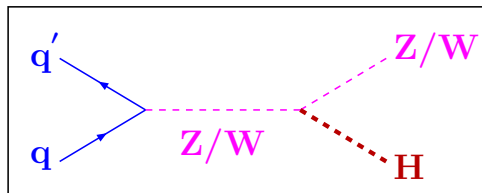
# Higgs-Suche am Tevatron - die Vergangenheit



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



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

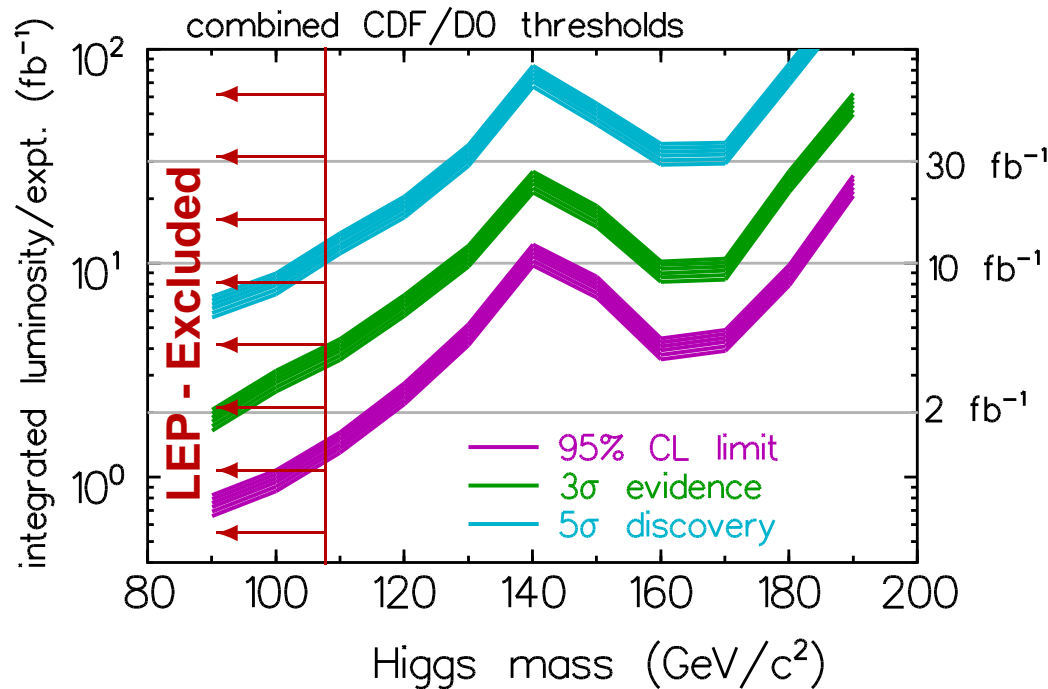


- ⊖ Faktor 2-5 kleinere Rate.
- ⊕ Lepton-Tag hilft den Untergrund zu bekämpfen.

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



# Higgs-Suche am Tevatron - die Zukunft



## Lumi Erwartungen

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

## Suchkanäle

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

## Die Umfrage: Was kann im RUN II erreicht werden?

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

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

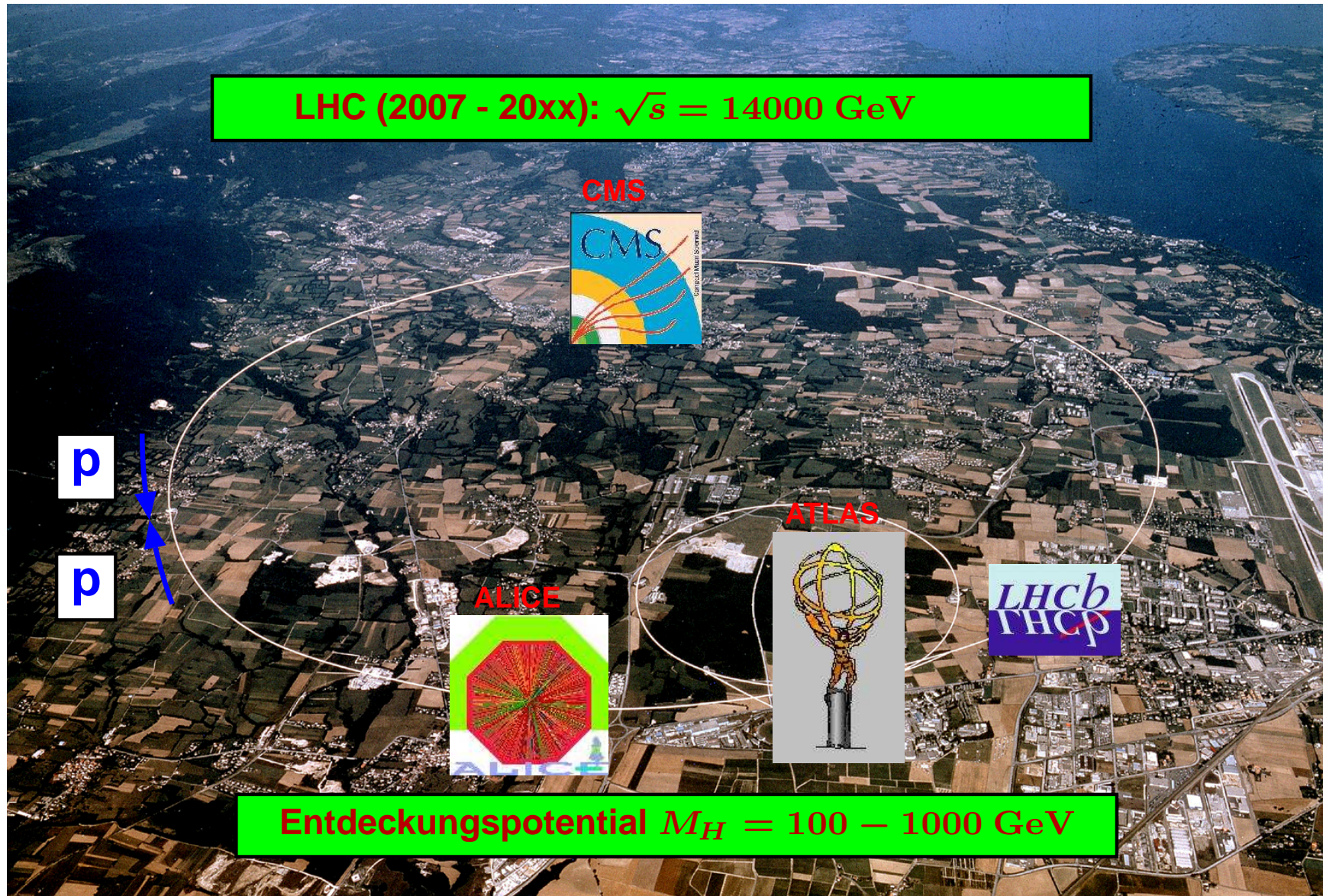
**Optimist:** Für  $M_H = 116 \text{ GeV}$  und  $15 \text{ fb}^{-1}$  ist eine 5 Sigma Entdeckung möglich.

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





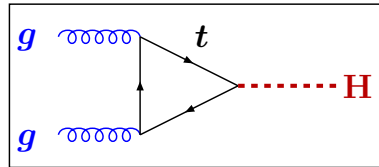
# Der Large Hadron Collider (LHC)



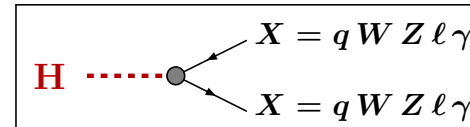


# Higgs-Suche am LHC

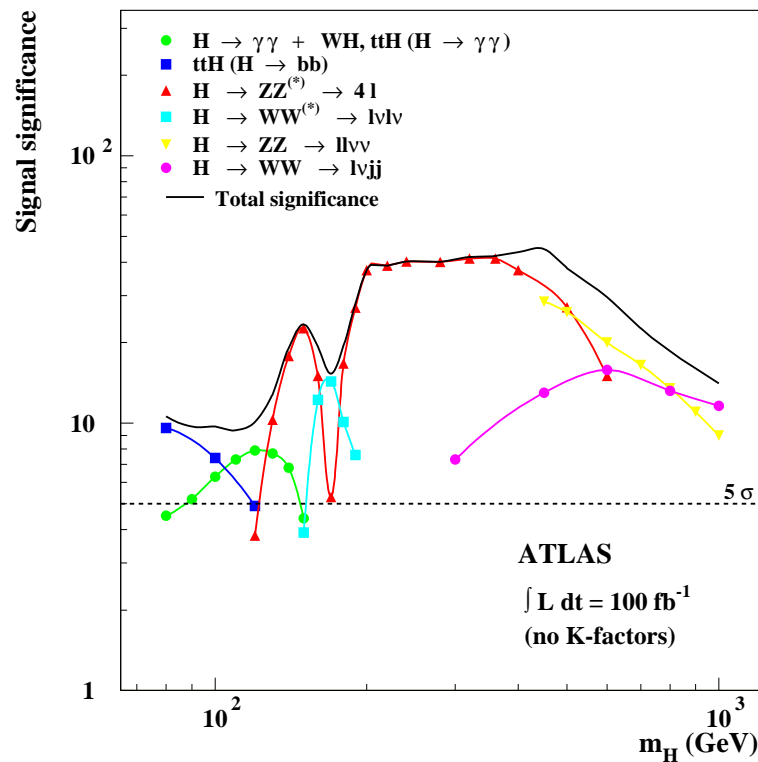
Die dominanten Produktions-



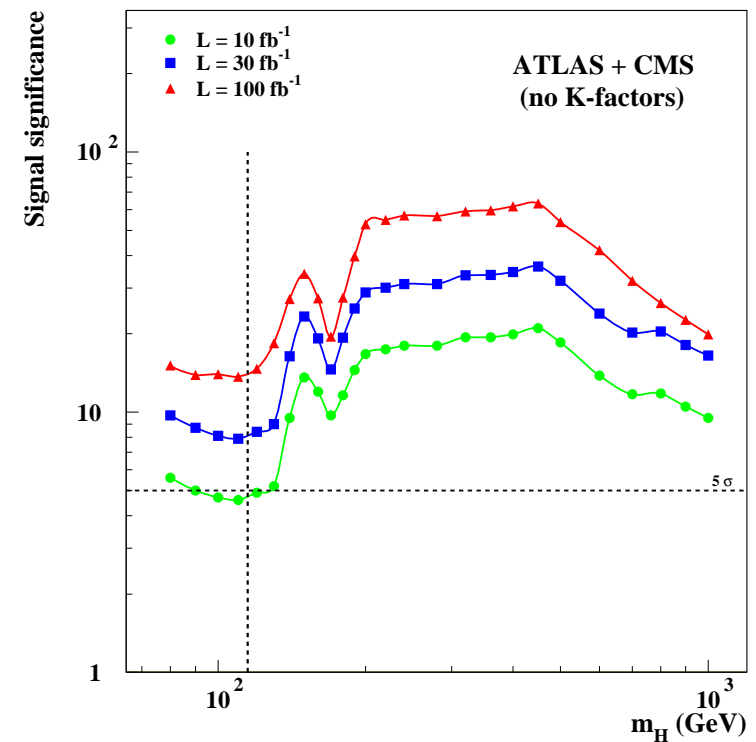
und Zerfallskanäle



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.



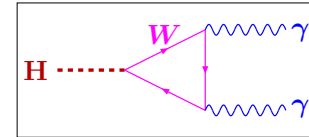
Die kombinierte Sensitivität ist im ganzen Massenbereich besser als  $5\sigma$ .





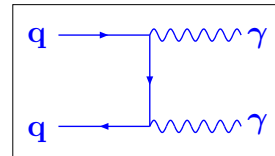
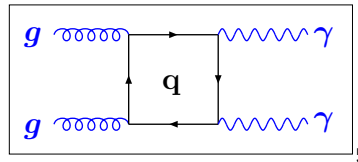
# Ein Beispiel - der Kanal $H \rightarrow \gamma\gamma$

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

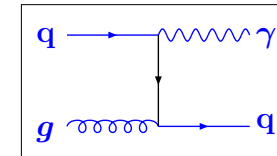


sehr aussichtsreich.

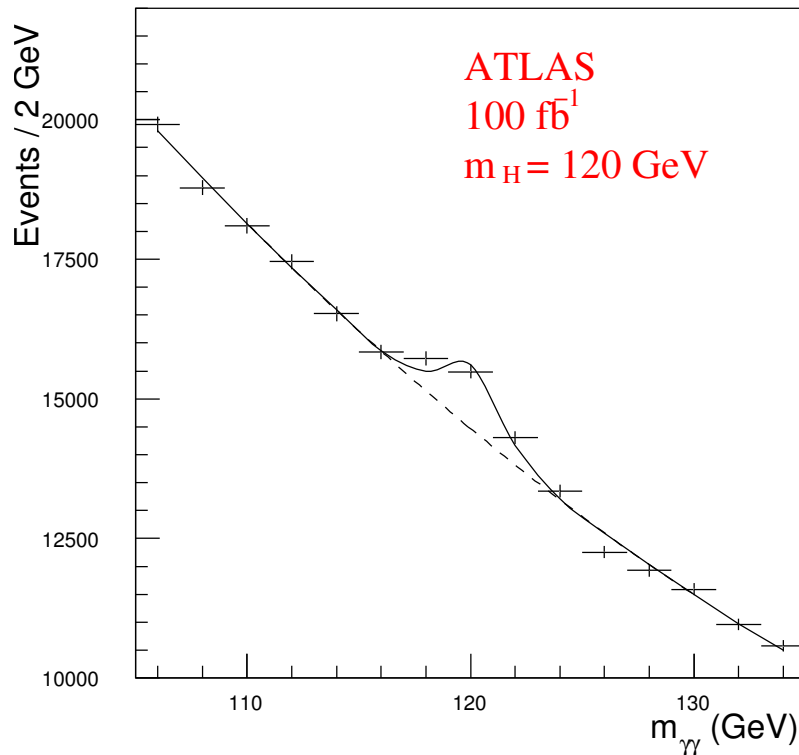
Untergrund sind



und



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



## Die Aussichten

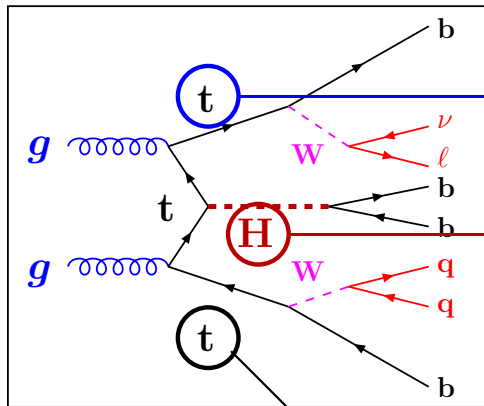
- Die Rate ist sehr klein aber die Ereignisse sind sehr klar.
- Die Analyse erfordert ein extrem präzises elektromagnetisches Kalorimeter um  $\gamma$  von  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  zu unterscheiden.

Mit einem Jahr nomineller Luminosität ist eine Entdeckung mit  $4\sigma$  möglich.



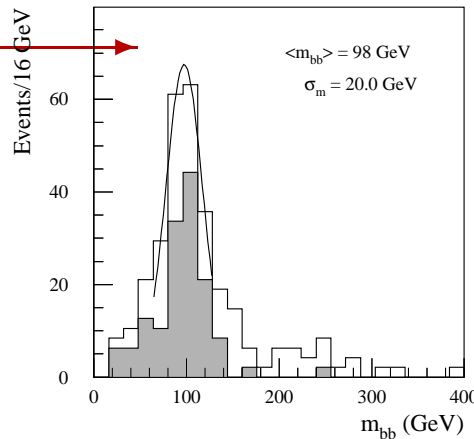
# Ein Beispiel - der Kanal Htt

## Der Prozess

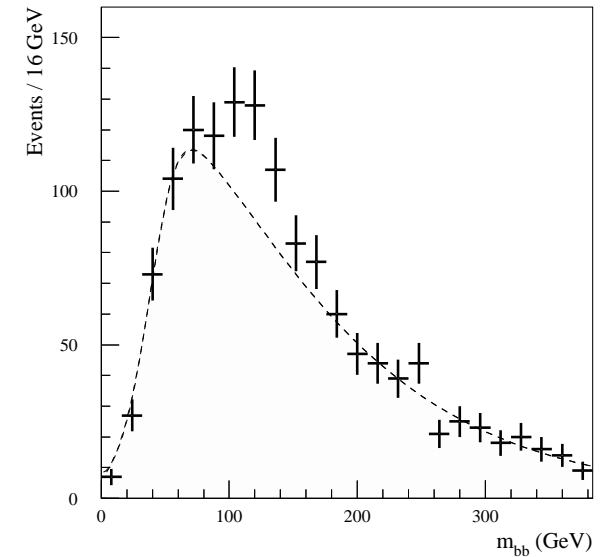


## Rekonstruktion

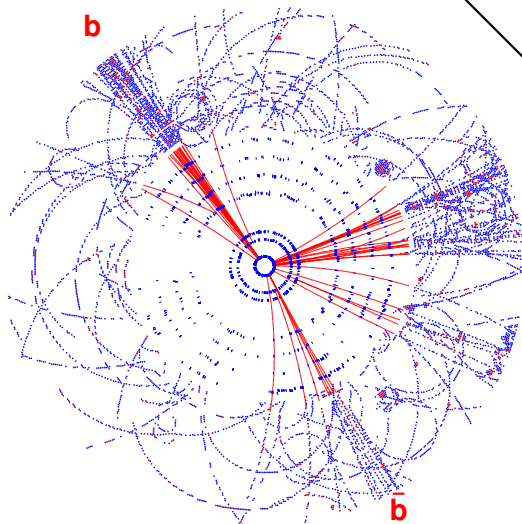
- $t \rightarrow b\ell\nu$   
 $m = (174 \pm 9) \text{ GeV}$



## Was können wir erreichen



## Ein Ereignis



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

- 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.**

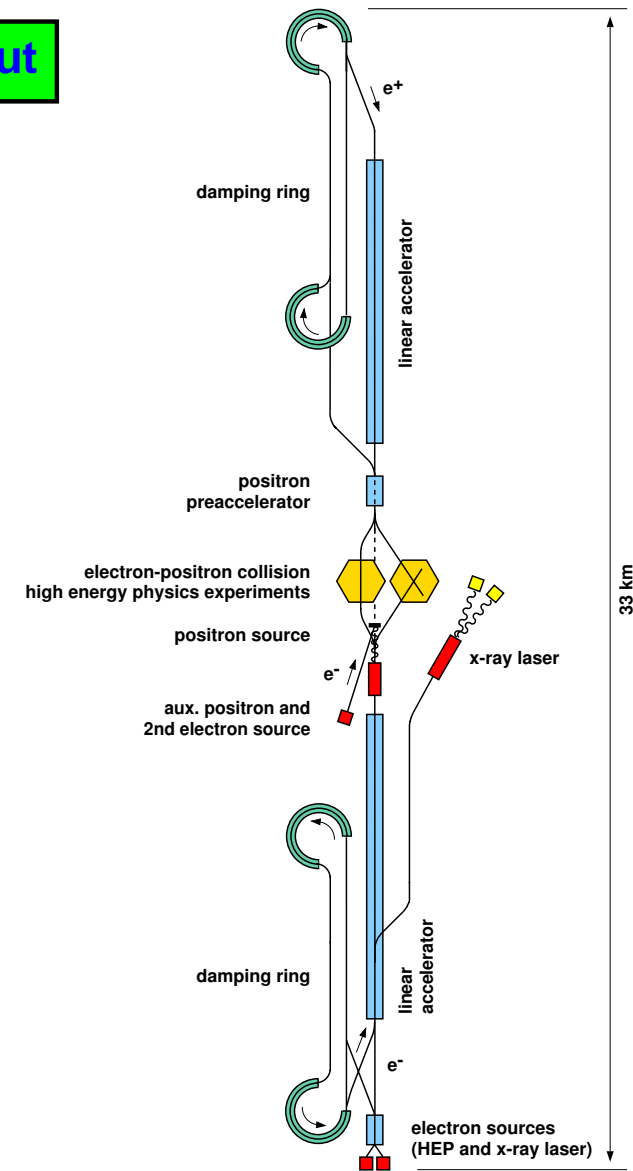


# Das TESLA Projekt - der Plan

## Die Lage



## Das Layout



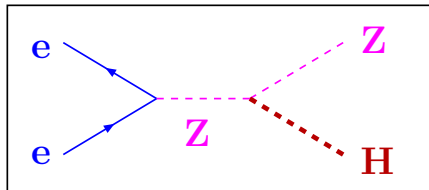
## Technische Daten

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

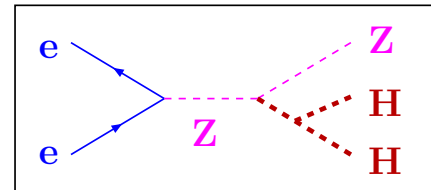


# Beispiele für Messungen am Linearbeschleuniger

## Die Massenbestimmung

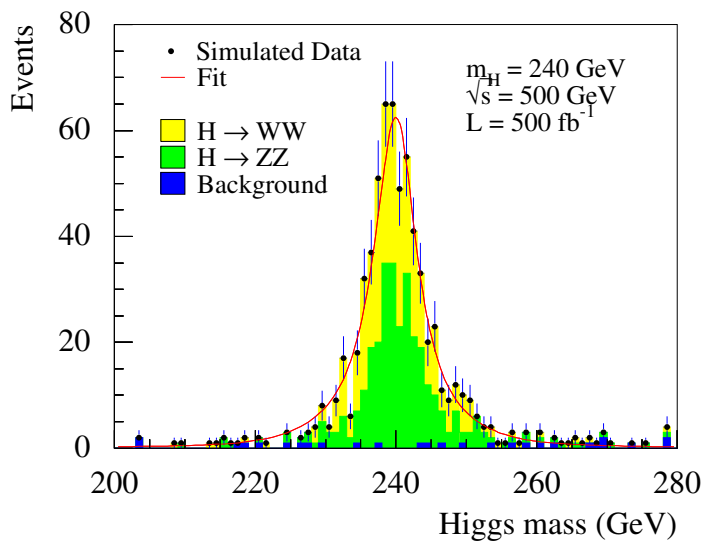


## Die Higgs Selbstwechselwirkung

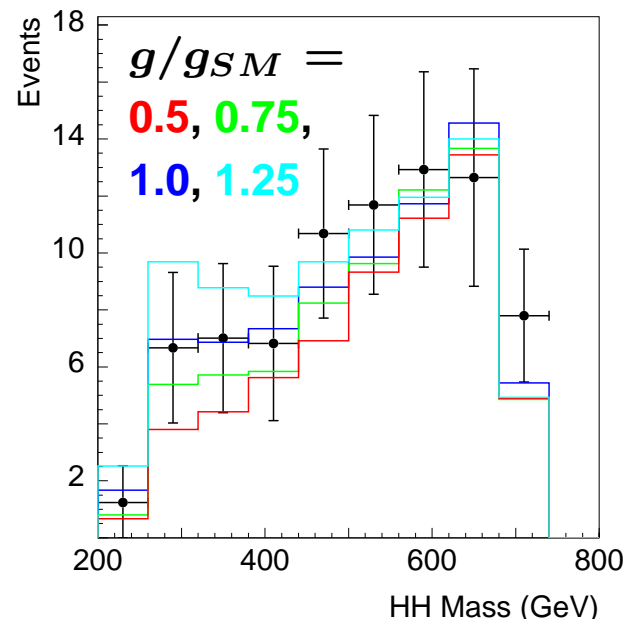


Kopplung:

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



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 ...

---

---

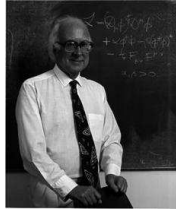
- Das Higgs-Boson ist ein aussichtsreicher Kandidat zur Lösung fundamentaler Probleme des Standardmodells.
- Die bisherigen Suchen nach dem Higgs-Boson waren erfolglos und liefern eine untere Massengrenze von  $M_H > 114.4 \text{ GeV}$  mit 95% CL.
- Theoretische Überlegungen und Einschränkungen durch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

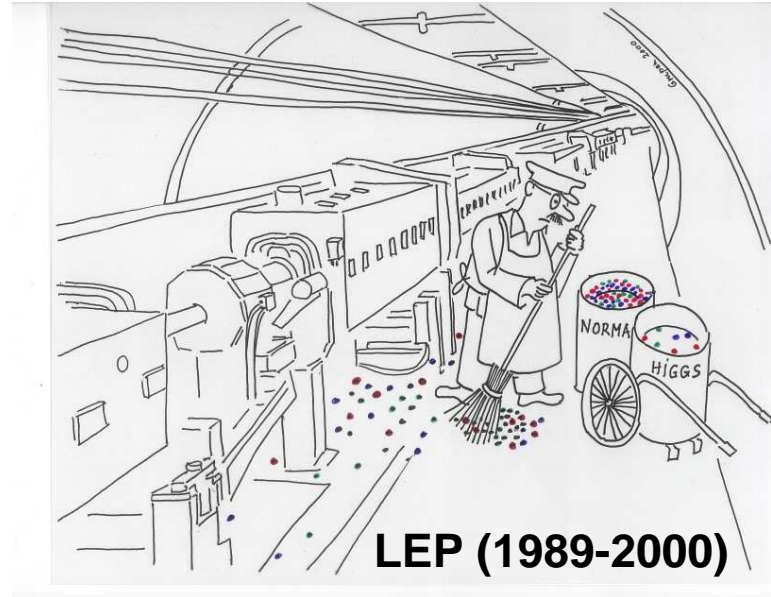


# ... Ausblick

Was so



begann, ...



... nahm so

LEP (1989-2000)

seinen Lauf, und endet ...



...vielleicht so

