

# KAPITEL 10 :

## Elektroschwache Theorie

- 10.1 Der schwache Isospin
- 10.2 Der Weinberg Winkel
- 10.3 Das Verhältnis von  $m_W/m_Z$
- 10.4 Das Weinberg–Salam Modell:  
Theoretische Ergänzungen
- 10.5 Spontane Symmetriebrechung  
und Higgs Mechanismus
- 10.6 SM Higgs Suche am LEP
- 10.7 SM Higgs Suche am LHC

# 10 Die elektroschwache Theorie

1960 - 1970 : verschiedene Aspekte der Theorie der schwachen WW aus experimentellen Daten hergeleitet

1967 / 68 : Theorie der elektroschwachen WW:  
elm + schwache WW: 2 Aspekte einer einzigen WW  
Glashow, Salam, Weinberg (Nobelpreis 1979)

1971: 't Hooft: Beweis für die Renormierbarkeit  
(Nobelpreis 1999)

## 10.1 Der schwache Isospin

- Jede Familie von LH Quarks und Leptonen bilden Isospin-Duplett von Fermionen mit  $T = 1/2, T_3 = \pm 1/2$

RH Fermionen koppeln nicht an  $W^\pm$ :

Isospin-Singlett mit  $T = T_3 = 0$

→  $SU(2)_L$  Gruppe des schwachen Isospins

- Schwache Hyperladung  $Y$ :  $U(1)_Y$  – Gruppe koppelt an LH Dupletts und RH Singletts

Gell-Mann und Nishijima:  $Q = T_3 + \frac{1}{2}Y$

- Elektroschwache WW beschrieben durch:

$$SU(2)_L \times U(1)_Y$$

koppelt nur an  
Dupletts von LH  
Fermionen  
schwacher Isospin

koppelt nur an LH Dupletts  
und RH Singletts  
 $Y$ : es kommen beide  
Chiralitäten vor

# Multipletts der elektroschwachen WW

|          | Fermionmultipletts                                 | $T$           | $T_3$          | $Y$            | $Q$            |
|----------|----------------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| Leptonen | $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$       | $\frac{1}{2}$ | $+\frac{1}{2}$ | $-1$           | $0$            |
|          | $\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$   |               | $-\frac{1}{2}$ |                | $-1$           |
|          | $\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$ |               |                |                |                |
| Quarks   | $e_R$                                              | $0$           | $0$            | $-2$           | $-1$           |
|          | $\mu_R$                                            |               |                |                |                |
|          | $\tau_R$                                           |               |                |                |                |
|          | $\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$          | $\frac{1}{2}$ | $+\frac{1}{2}$ | $+\frac{1}{3}$ | $+\frac{2}{3}$ |
|          | $\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$          |               | $-\frac{1}{2}$ |                | $-\frac{1}{3}$ |
|          | $\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$          |               |                |                |                |
|          | $u_R$                                              | $0$           | $0$            | $+\frac{4}{3}$ | $+\frac{2}{3}$ |
|          | $c_R$                                              |               |                |                |                |
|          | $t_R$                                              |               |                |                |                |
|          | $d_R$                                              | $0$           | $0$            | $-\frac{2}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ |
|          | $s_R$                                              |               |                |                |                |
|          | $b_R$                                              |               |                |                |                |

$d', s', b'$  gehen durch verallgemeinerte Cabibbo Rotation (CKM-Matrix) aus den Massen-Eigenzuständen hervor

Elektrische Ladung der zwei Zustände im Duplett unterscheidet sich jeweils um eine Einheit

Gell-Mann + Nishijima Beziehung:  $Q = T_3 + \frac{1}{2}Y$

## 10.2 Der Weinberg Winkel

- Bei Reaktionen mit geladenen Strömen:  $T_3$  bleibt erhalten

$$\longrightarrow T_3(W^-) = -1$$

$$T_3(W^+) = +1$$

$\Rightarrow$  es sollte 3. Zustand existieren :=  $W^0$  mit  $T = 1$   
 $T_3 = 0$

$W^0$  koppelt mit Stärke  $g$  an Fermionen (wie  $W^\pm$ )

$\longrightarrow W^0, W^+, W^-$ : Triplet des schwachen Isospins

Postuliere weiteren Zustand :=  $B^0$  mit  $T = 0, T_3 = 0$

$\longrightarrow B^0$ : Singlett des schwachen Isospins

dazugehörige schwache Ladung:  $g'$

- Grundidee der elektroschwachen Vereinheitlichung:  
 beschreibe  $\gamma$  und  $Z$  als zueinander orthogonale  
 Linearkombinationen von  $B^0$  und  $W^0$ :  
 Mischungswinkel:  $\theta_W$  . . . Weinberg Winkel

$$\begin{aligned} |\gamma\rangle &= \cos\theta_W |B^0\rangle + \sin\theta_W |W^0\rangle \\ |Z\rangle &= -\sin\theta_W |B^0\rangle + \cos\theta_W |W^0\rangle \end{aligned}$$

- Zusammenhang zwischen  $\theta_W, g, g'$ :

$$\tan\theta_W = \frac{g'}{g}, \quad \sin\theta_W = \frac{g'}{\sqrt{g^2 + g'^2}},$$

$$\cos\theta_W = \frac{g}{\sqrt{g^2 + g'^2}}$$

für elektrische Ladung:

$$e = g \sin\theta_W$$

Bemerkung:  $\theta_W$  nicht vom SM vorhersagbar

## Bestimmung des Weinberg Winkels:

- $\nu - e$  Streuung
- $e^+e^-$  Kollisionen
- $\Gamma(Z)$
- $m_W/m_Z$
- $\vdots$

$$\sin^2 \theta_W(Z) = 0.23120 \pm 0.00015$$

Schwache Kopplungskonstante:  $\alpha_{\text{schwach}} \sim g \cdot g$

Elm. Kopplungskonst.:  $\alpha_{\text{elm}} \sim e \cdot e = g \cdot g \cdot \underbrace{\sin^2 \theta_W}_{\sim 1/4}$

$$\longrightarrow \alpha_{\text{schw.}} \approx 4 \cdot \alpha_{\text{elm}}$$

Propagatorterm in  $M_{\text{fi}}$  führt zur geringen effektiven Stärke der schwachen WW bei kleinen Energien

**$W^\pm$** : koppelt universell an Quarks und Leptonen  
koppelt jeweils an einen Chiralitätszustand  
 $\rightarrow$  maximale Paritätsverletzung

**$Z$** : auch elektrische Ladung der Fermionen spielt eine Rolle  
Kopplungsstärke des  $Z$  an Fermionen  $f$ :

$$g_Z(f) = \frac{g}{\cos \theta_W} \hat{g}(f) \quad \text{mit} \quad \hat{g}(f) = T_3 - z_f \sin^2 \theta_W$$

## 10.3 Das Verhältnis von $m_W/m_Z$

Aus elektroschwacher Theorie: Vorhersage von  $m_W, m_Z$   
wenn  $\sin^2 \theta_W$  gemessen

$$\left. \begin{aligned} \frac{G_F}{\sqrt{2}} &= \frac{\pi \alpha}{2} \frac{g^2}{e^2} \frac{(\hbar c)^3}{m_W^2 c^4} \\ e &= g \sin \theta_W \end{aligned} \right\} \longrightarrow m_W$$

Bemerkung:  $\alpha$  und  $\sin^2 \theta_W$  hängen vom betrachteten Energiebereich ab

Zusammenhang  $m_W$  und  $m_Z$ :

$$\frac{m_W}{m_Z} = \cos \theta_W \quad \text{bzw.}$$

$$\sin^2 \theta_W = 1 - \frac{m_W^2}{m_Z^2}$$

## 10.4 Das Weinberg-Salam Modell: theoretische Ergänzungen

Fordern: elektroschwache WW lokal eichinvariant  
unter  $U(1)$  und  $SU(2)$  Transformationen

Linkshändige Felder  $\psi_L$  nehmen an allen WW teil  
→ Invarianz unter  $SU(2) \times U(1)$  Transformation

$$\psi_L \longrightarrow \psi'_L = e^{i\vec{\alpha}(x)\vec{T} + i\beta(x)Y/2} \psi_L$$

Rechtshändige Felder  $\psi_R$  unterliegen nur  $U(1)$  Invarianz

$$\psi_R \longrightarrow \psi'_R = e^{i\beta(x)Y/2} \psi_R$$

Operatoren:  $\vec{T} \dots$  Generatoren von  $SU(2)$  (schwacher Isospin)

$Y \dots$  Generatoren von  $U(1)$  (Hyperladung)

mit  $Q = T_3 + Y/2$

$$\psi_L = \begin{pmatrix} \psi_{\nu_e} \\ \psi_{e^-} \end{pmatrix}_L \dots \text{Dupletts des schwachen Isospins}$$

$$\psi_R = \psi_{e^-}_R \dots \text{Singletts des schwachen Isospins}$$

Invarianz der  $\mathcal{L}$ -Dichte: Substitution einer kovarianten  
Ableitung

$$i\partial_\mu \longrightarrow i\partial_\mu - c G\phi_\mu$$

$c \dots$  Kopplungskonstante

$G \dots$  Generator der  
Eichgruppe

$\phi_\mu \dots$  Eichfeld

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = -ig \vec{J}_\mu \vec{W}^\mu - i \frac{g'}{2} j_\mu^Y B^\mu$$

$\vec{J}_\mu$  ... schwacher Isospin-Strom der Fermionen

$j_\mu^Y$  ... Hyperladungsstrom der Fermionen

$\vec{W}^\mu, B^\mu$  ... Bosonfelder

$$j_\mu^{\text{em}} = J_\mu^3 + \frac{1}{2} j_\mu^Y$$

Photon koppelt an diese Linearkombination aus 3. Komp. des Isospin-Stroms und dem Hyperladungsstrom

Physikalische Bosonen bestehen aus

geladenen Teilchen:  $W_\mu^\pm$

neutralen Teilchen:  $Z_\mu, \gamma \hat{=} A_\mu$

→ müssen  $W_\mu^3$  und  $B_\mu$  so linear kombinieren,  
dass Photonfeld  $A_\mu$  entsteht  
⇒ Mischungswinkel  $\theta_W$

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = -ig(J_\mu^- W^{-\mu} + J_\mu^+ W^{+\mu}) \quad (1)$$

$$-ie j_\mu^{\text{em}} A^\mu \quad (2)$$

$$- \frac{ie}{\sin \theta_W \cos \theta_W} (J_\mu^3 - \sin^2 \theta_W j_\mu^{\text{em}}) Z^\mu \quad (3)$$

(1) schwacher geladener Strom

(2) elektromag. neutraler Strom

(3) schwacher neutraler Strom

Beachte: bisher sind W, Z und die Fermionen masselos!

## 10.5 Spontane Symmetriebrechung und Higgs Mechanismus

Theorie der elektroschwachen Vereinheitlichung hat ein Problem:

$SU(2)_L \times U(1)_Y \dots$  Eichtheorie  
→ masselose Vektorfelder  
 $m_\gamma = 0$ , jedoch  $m_W = 80 \text{ GeV}/c^2$   
 $m_Z = 91 \text{ GeV}/c^2$

Massen der Vektorbosonen  $W^\pm$ ,  $Z$  durch Konzept der spontanen Symmetriebrechung eingeführt:

→ Duplett von skalaren Teilchen (Higgs), die über ihre Selbstwechselwirkung eine Masse für die  $W$  und  $Z$  Bosonen erzeugen  
→  $m_W \neq 0, m_Z \neq 0$

$m_W, m_Z$ : unabhängig von Ort und Orientierung

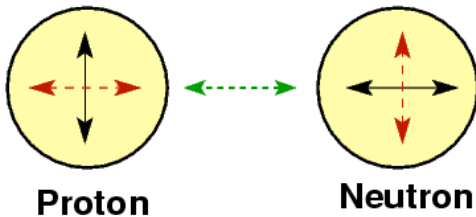
→ Higgs-Feld  $\hat{=}$  Skalar

Existenz des Higgs Feldes ist fundamental für Interpretation der heutigen Teilchenphysik !!

# Symmetrien in der Physik

Symmetrien in Naturgesetzen spielen grosse Rolle bei der Entwicklung physikalischer Theorien

**Globale** Symmetrie: gleichzeitig überall wirkende Transformation  
z.B.: Transformation des Isospins



$p \simeq n$ , ausser Ladung  
Rotaton zur gleichen Zeit um gleichen Winkel  
bei  $90^\circ$ :  $p \rightarrow n, n \rightarrow p$   
starke WW ändert sich nicht:  $p \leftrightarrow n$   
 $p \simeq n$ , ausser Ladung

**Lokale** Symmetrie: Transformation kann an jedem Ort und zu jedem Zeitpunkt anders gewählt werden

⇒ für diese Freiheit muss man einen Preis zahlen

|                   |  |                                                                                                                                                                                                |
|-------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| QED               |  | um die Phase beliebig in jedem Raum-Zeit Punkt zu definieren<br>→ <b>muss <math>\gamma</math> einführen</b> (Vektor Teilchen)<br>Änderung der Phase entspricht Rotation im 1-dim. Raum: $U(1)$ |
| schwacher Isospin |  | um $e^-$ in $\nu_e$ zu verwandeln in jedem Raum-Zeit Punkt<br>→ <b>muss <math>W^-</math> einführen</b> (Vektor Teilchen)<br>Rotation im 2-dim. Raum $SU(2)$                                    |
| QCD               |  | um die $q$ -Farbe in jedem Raum-Zeit Punkt zu ändern: ( $i, j \dots$ Farbindex)<br>→ <b>muss Gluonen einführen</b> (Oktett von bi-farbigen Vektor Bosonen)<br>Rotation im 3-dim. Raum $SU(3)$  |

Unterschied zwischen QED und QCD:

- $\gamma$  trägt keine elektrische Ladung
- $g$  trägt Farbladung ⇒ Ursprung von Quark Confinement: keine freien Quarks

# Der Higgs Mechanismus

Elm und schwache WW beschrieben durch lokale Eichtheorie  
 schwache WW i.b.a. Isospin: globale Symmetrie  
 von global  $\rightarrow$  lokal: 4 Felder eingeführt,  $m = 0$

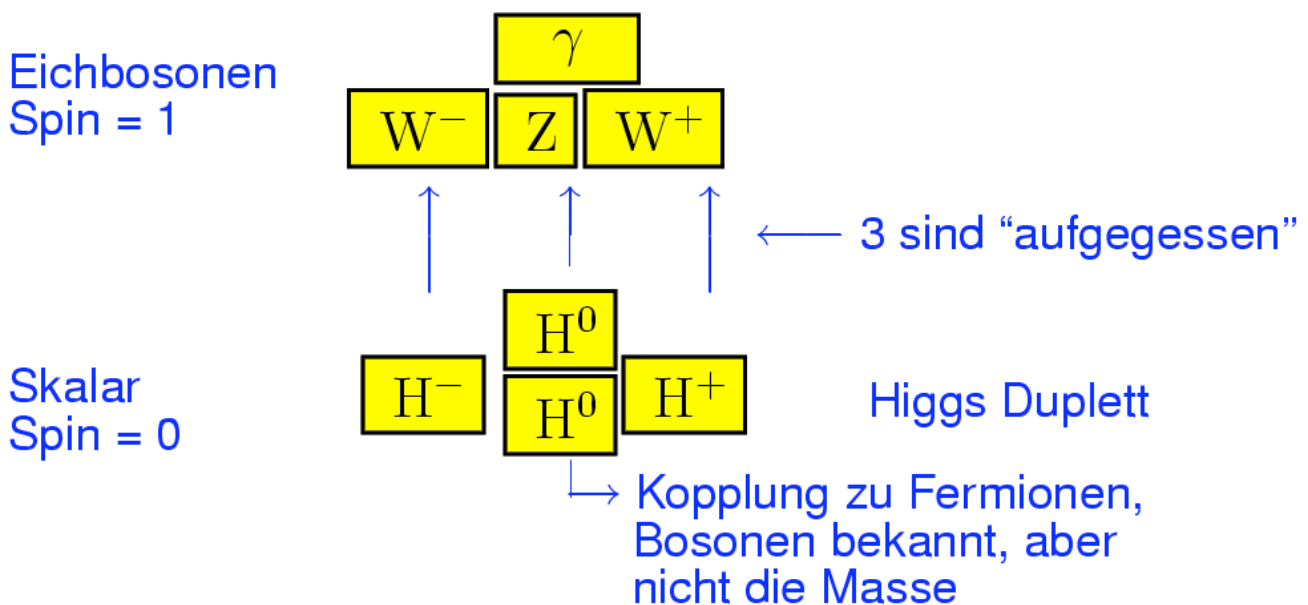
1  $\hat{=}$  Photon

3 erhalten Masse via Higgs Mechanismus  
 $\rightarrow W^+, W^-, Z$

## Higgs Mechanismus:

Higgs Feld erzwingt Orientierung im schwachen Isospin Raum  
 $\rightarrow$  bricht die Symmetrie

die IVB müssen sich dem anpassen: sie erhalten eine Masse



## Analogon zur Supraleitung:

Elektromagnetismus: Freiheit die Phase beliebig zu wählen  
 ausgenommen: etwas externes erzwingt Phase: bricht die Symmetrie  $\rightarrow$  supraleitendes Medium

Cooper-Paare: über makroskopischen Abstand Phase kohärent  
 (N) eingesperrt  $\Rightarrow$  externes Feld muss sich anpassen: (Meissner Effekt)

$$A \sim e^{-\lambda r} \quad \lambda \sim \sqrt{N} \sim "m_\gamma"$$

d.h.: als ob das Photon Masse bekommt  
 denn ein magn. Feld kann nur eine kurze Strecke im Supraleiter zurücklegen

# Spontane Symmetriebrechung

$\mathcal{L}$ —Dichte für freie skalare Felder der Masse  $m$ :

$$\mathcal{L}_{\text{KG}} = \frac{1}{2} (\partial_\mu \phi)^2 - \frac{1}{2} m^2 \phi^2$$

Annahme: skalares Feld der Masse  $\mu$ , welches mit sich selbst WW  $\rightarrow$  zusätzlich Term im Potential

$$\mathcal{L}_\phi = \frac{1}{2} (\partial_\mu \phi)^2 - \left( \frac{1}{2} \mu^2 \phi^2 + \frac{1}{4} \lambda \phi^4 \right)$$

mit  $\mu^2 \dots$  Teilchenmasse

$\lambda \dots$  Kopplungskonstante ( $\lambda > 0$ )

Potentielle Energiedichte  $= \frac{1}{2} \mu^2 \phi^2 + \frac{1}{4} \lambda \phi^4$

hat Minimum bei  $\phi = \phi_{\text{min}}$

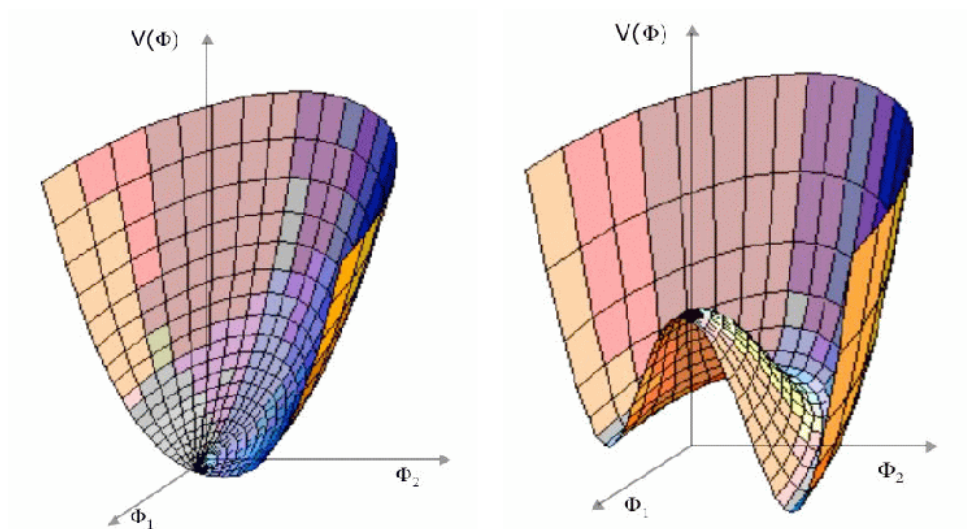
$$\mu^2 > 0$$

Minimum bei  $\phi = 0$

$$\mu^2 < 0$$

Minimum bei

$$\phi = \pm v = \pm \sqrt{\frac{-\mu^2}{\lambda}}$$



Symmetrische Form des Potentials ( $\phi \rightarrow -\phi$ ) für  $\mu^2 > 0$   
und  $\mu^2 < 0$

für  $\mu^2 < 0$ : 2 Minima:  $+v, -v$

Entwickle Störungsreihe um einen Grundzustand: (Vakuum)

Entwickle  $\phi$  um ein Minimum: wähle  $+v$

$$\phi(x) = +v + \eta(x)$$

$$\mathcal{L}_\eta = \frac{1}{2} (\partial_\mu \eta)^2 - \lambda v^2 \eta^2 - \lambda v \eta^3 - \frac{1}{4} \lambda \eta^4 + \text{const}$$

Selbst-WW des  $\eta$ - Feldes

$$m_\eta = \sqrt{2\lambda v^2} = \sqrt{-2\mu^2}$$

entspricht  
Massenterm

Wahl des Grundzustandes unter mehreren,  
zueinander symmetrischen Grundzuständen  
nennt man spontane Symmetriebrechung

oder : Der (zufällig) gewählte Grundzustand  
besitzt nicht diesselbe Symmetrie wie die Lagrangedichte

Kann  $+v$  oder  $-v$  wählen, aber nicht beide gleichzeitig

Wahl bricht Symmetrie des Systems

Symmetriebrechung hat Masse erzeugt

Bemerkung: man sollte eigentlich von "versteckter Symmetrie"  
sprechen, da eine im System vorhandene  
Symmetrie im Grundzustand nicht mehr sichtbar ist

# Das Higgsfeld der Standardtheorie

- Führen Feld  $\phi$  ein:  $\mathcal{L}_H$  muss invariant sein gegen Transformationen aus  $SU(2) \times U(1)$

$$\mathcal{L}_H = \left| \left( i\partial_\mu - g\vec{T}\vec{W}_\mu - g'\frac{Y}{2}B_\mu \right) \phi \right|^2 - \nu(\phi)$$

↳ Higgs Potential

- $\phi$  muss einem Multipllett der Gruppe angehören  
wähle Duplett des schwachen Isospins zur Hyperladung  $Y = 1$

$$\phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} \quad \left. \begin{array}{l} \phi^+ = \frac{1}{\sqrt{2}}(\phi_1 + i\phi_2) \\ \phi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\phi_3 + i\phi_4) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{komplexe} \\ \text{Felder} \end{array}$$

Higgs Potential:  $\nu(\phi) = \mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2$   $\begin{array}{l} \mu^2 < 0 \\ \lambda > 0 \end{array}$

- Spontan wählen wir Vakuumwert  $\phi_0$  für  $\phi(x)$ :

$$\phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix} \quad \text{mit } v^2 = \mu^2 / \lambda$$

$\phi_0$  ist ein Zustand zu  $Y = 1, T = 1/2, T_3 = -1/2$   
 → nicht symmetrisch unter  $SU(2)_T$  und  $U(1)_Y$

- Elektrische Ladung des Feldes:  $Q = T_3 + \frac{Y}{2} = 0$   
 → Zustand ist symmetrisch unter  $U(1)_Q$   
 → elektromagn.  $U(1)_Q$  bleibt ungebrochen und damit wird keine Masse erzeugt für das entsprechende Eichboson:

$$m_\gamma = 0$$

## Das Higgsfeld der Standardtheorie (cont)

- Da  $SU(2)$  und  $U(1)$  Symmetrie gebrochen ist  
 $\Rightarrow W^\pm, Z$  bekommen eine Masse

bestimmen der Masse durch einsetzen von  $\phi_0$  in  $\mathcal{L}_H$

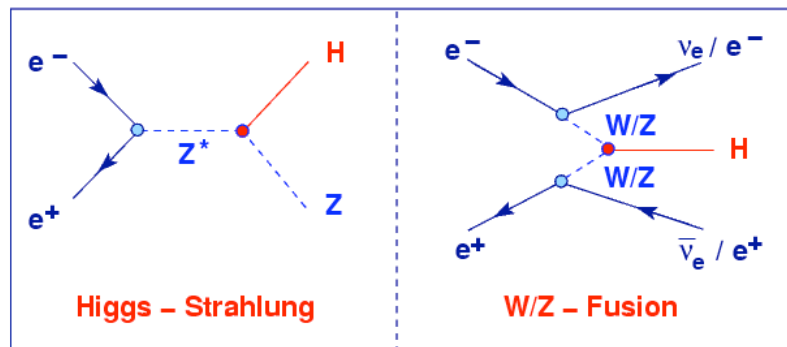
$$\Rightarrow m_W = \frac{1}{2}vg, \frac{m_W}{m_Z} = \cos \theta_W, \tan \theta_W = \frac{g'}{g}$$

- Wesentliche Vorhersage der Theorie:

Verhältnis der Massen von  $W^\pm$  und  $Z$  in Relation gesetzt zum Verhältnis der Kopplungskonstanten von schwachen geladenen und neutralen WW

# 10.6 SM Higgs Suche am LEP

Dominante Feynman-Diagramme:



$$\text{LEP1: } e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow H Z^*$$

$$\text{LEP2: } e^+e^- \rightarrow Z^* \rightarrow H Z$$

Higgs Massenbereich:  $m_H \leq \sqrt{s} - m_Z$

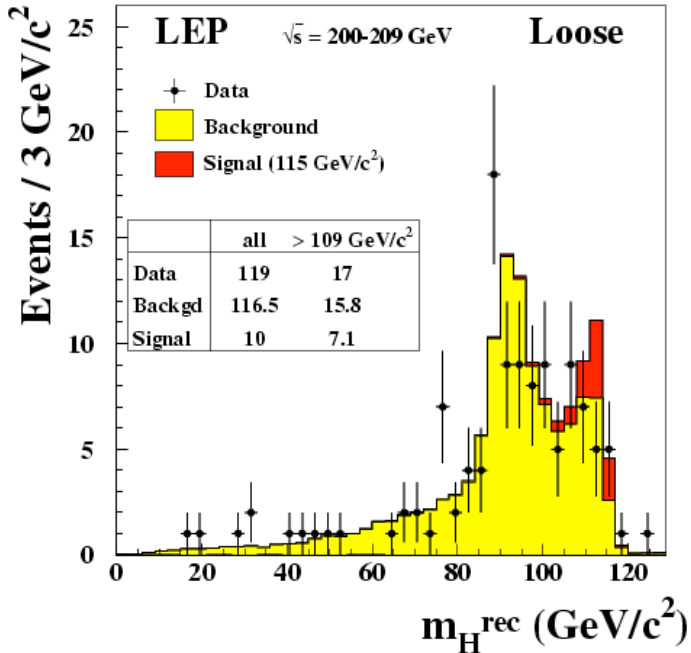
z.B.:  $\sqrt{s} = 209 \text{ GeV} \Rightarrow m_H < 118 \text{ GeV}$

Dominanter Higgszerfall in diesem Massenbereich:  $H \rightarrow b\bar{b}$   
Vertexdetektoren wichtig !!

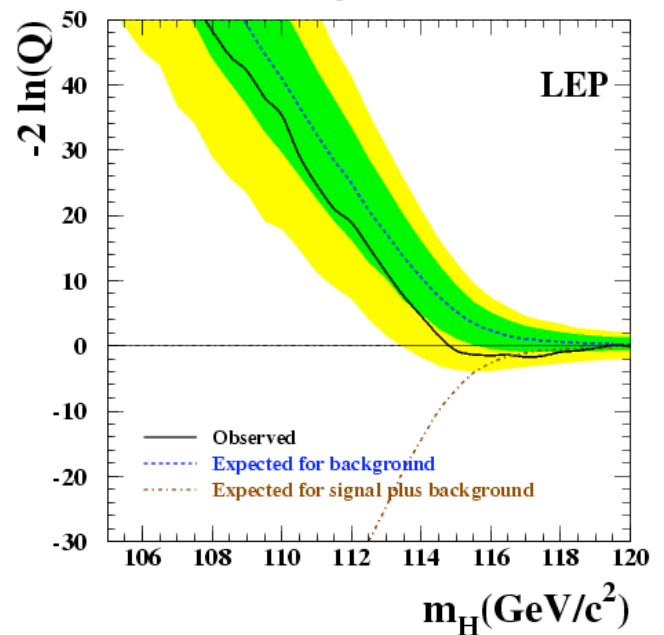
Experimentelle Signaturen:

| Kanal                                 | Topologie | BR     | Beispiel |
|---------------------------------------|-----------|--------|----------|
| Vier Jets                             |           | ~ 64 % |          |
| Zwei Jets<br>+<br>fehlender<br>Impuls |           | ~ 18 % |          |
| Zwei Jets<br>+<br>Lepton-Paar         |           | ~ 9 %  |          |

# The Final LEP Higgs Story



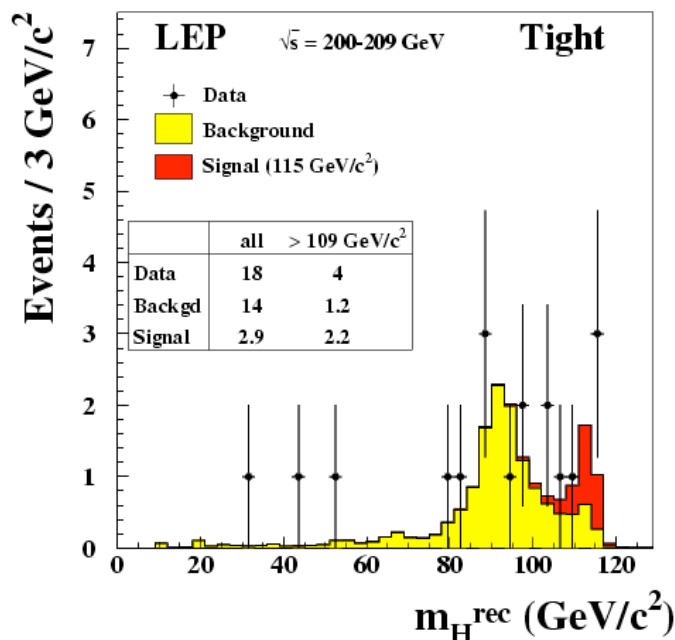
**Results from  
combination of  
4 LEP experiments**



**$m(\text{Higgs}) \sim 115\text{ GeV}$**

**(1.7 sigma effect)**

**$m(\text{Higgs}) > 114.4\text{ GeV}$   
(at 95% CL)**



# 10.7 SM Higgs Suche am LHC

