Resultate der Experimente zum elektroschwachen Standard modell

DPG '99
Heidelberg
18.05.1999

Oliver Biebel
III. Phys. Inst.
RWTH Aachen

- kurze Einführung
- Higgs - Boson
- W - Boson
- Z - Boson
- Ausblick

Vortrag kann nur eine Auswahl aus einer riesigen Fülle von Themen darstellen

Die meisten Resultate sind noch vorläufig!

↳ Dank an: LEP-EWWG, LEP-Higgs-WG, ...

Einführung

- Standard-Modell d. elektroschwachen Wechselwirkung

Bosonen	Kopplungen
γ	$\alpha_{em} = e^2/4\pi$
$W^\pm$	$g_W = e/\sin\theta_W$
Z	$g_Z = e/\sin\theta_W \cdot \cos\theta_W$
	$m_W = g_W \frac{v}{2} = g_W/2\sqrt{\sqrt{2}\cdot G_F}$
H	$m_Z = m_W/\cos\theta_W$

$\Rightarrow$ 3 Parameter $\longrightarrow$ Kopplungen, Boson-Massen

- Test des Standard-Modells:
  - ► Higgs-Boson ?
  - ► Massen der Bosonen
  - ► Zerfallsbreiten $\longrightarrow$ Kopplungen

  - ► Selbstkonsistenz des Standard-Modells (SM)

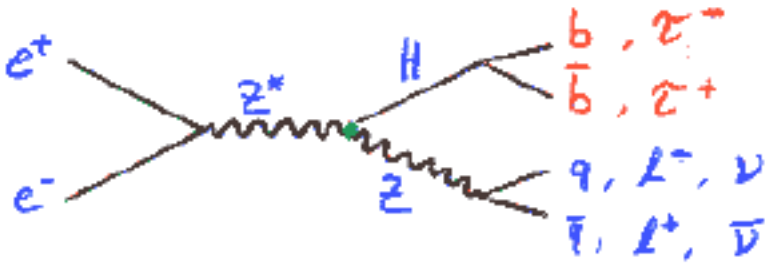
Einführung (II)

Wesentliche Beiträge zum SM-Test in 1998

- TeV : $p\bar{p}$ (Fermilab) } Datenanalyse
  NuTeV/CCFR : $\overset{(-)}{\nu} N$
- HERA : $e^{\pm} p$ (DESY) → Vortrag T5, T2 J. Grosse-Knetter, M. Weber
- BES : e^+e^- (Peking)
  - $R = \frac{\sigma(e^+e^- \to \text{Hadronen})}{\sigma_0(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)}$ $(\sqrt{s} = 3 \ldots 5\ \text{GeV})$
    → hadron. Korrektur zu $\alpha_{em}(M_Z^2)$
- SLC : e^+e^- (SLAC)
  - $\sqrt{s} = 91\ \text{GeV}$
  - 350 000 Z's in 1997/98
  - typ. longitudinale e^--Polarisation > 70%
- LEP II : e^+e^- (CERN)
  - $\sqrt{s} = 189\ \text{GeV}$
  - je Exp. $\int \mathcal{L}\, dt \simeq 175\ \text{pb}^{-1}$ aufgezeichnet

Direkte Suche : Higgs

- LEP II: Higgs-Strahlung



▶ Selektion: b-Zerfallsvertex
τ-Identifikation
Z-Masse
Akoplanarität $(Z \to \nu\bar{\nu})$

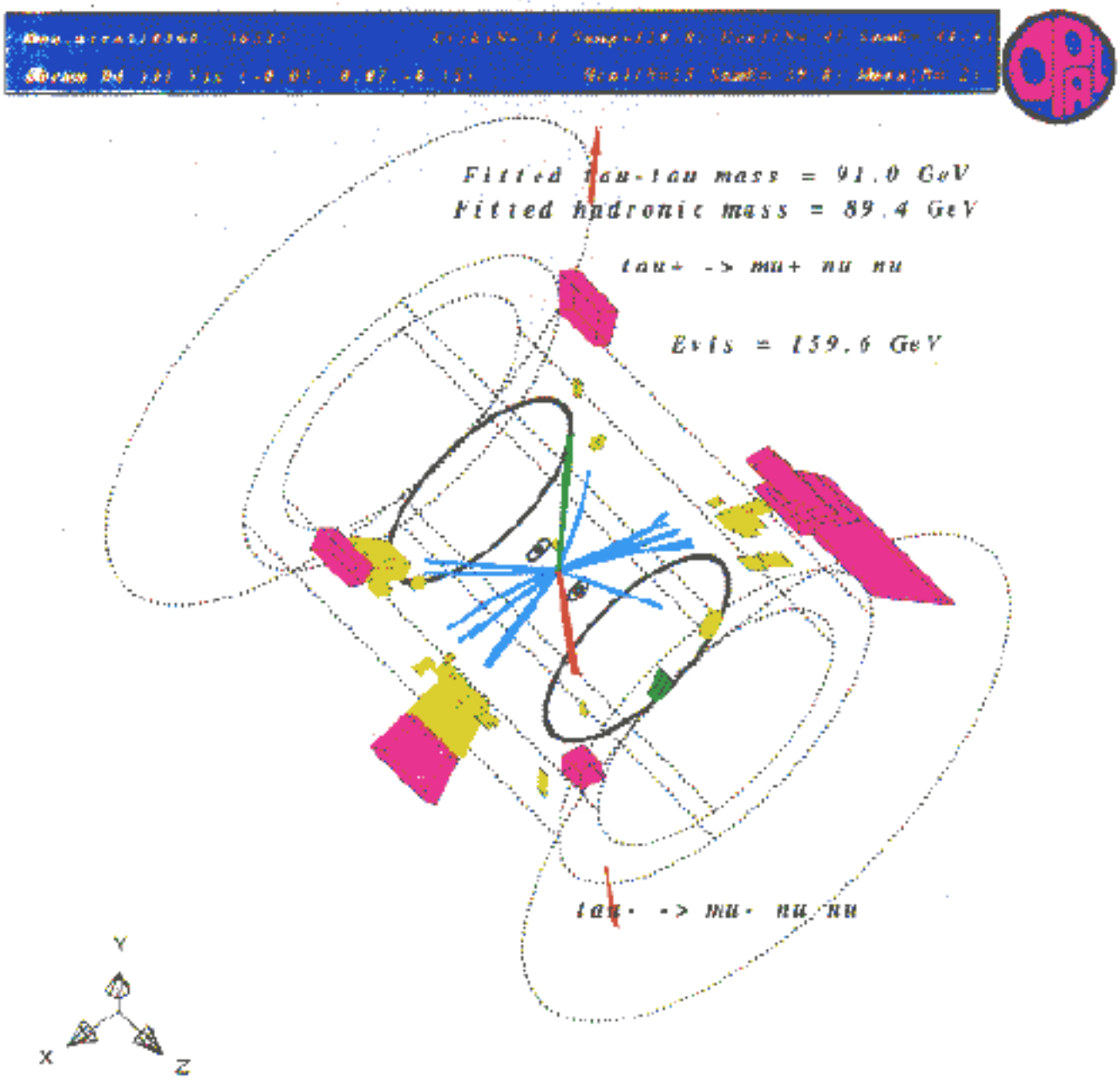
▶ Untergrund: $e^+e^- \to W^+W^- \to q\bar{q}'q''\bar{q}'''$, $l\bar{\nu}l'\nu$

$e^+e^- \to ZZ \to \begin{cases} b\bar{b}\,f\bar{f} \\ \tau^+\tau^-\,f\bar{f} \end{cases}$ $(f = q, l, \nu)$

$e^+e^- \to Z + \gamma$, $Z \to b\bar{b}$ + $E_{miss,\gamma}$

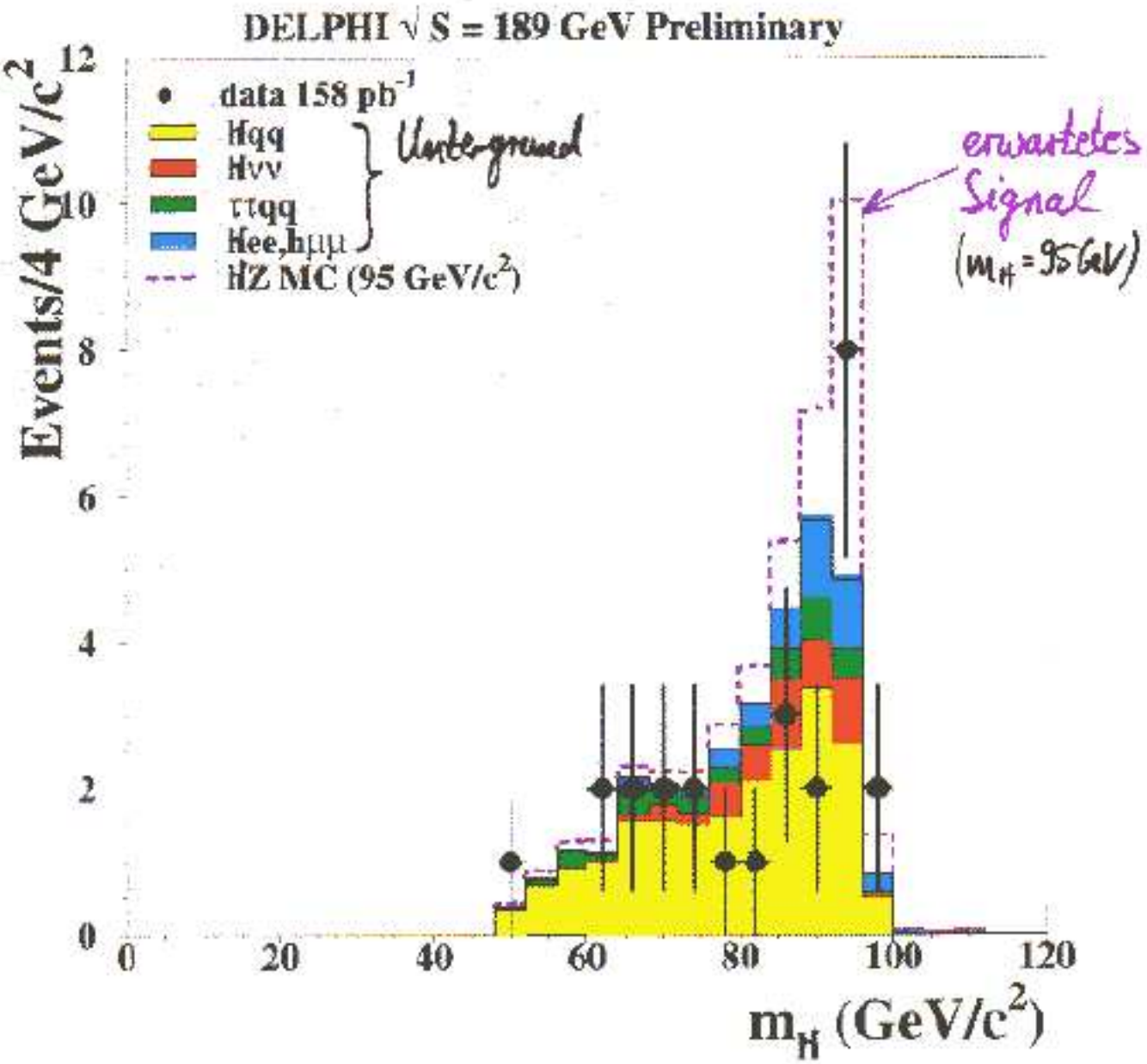
▶ es gibt H-Kandidaten → Bild

Ein Kandidat für : $e^+e^- \rightarrow HZ \rightarrow q\bar{q}\tau^+\tau^-$



Direkte Suche: Higgs

- Massenverteilung der H-Kandidaten bei $\sqrt{s} = 189$ GeV



⇒ beobachtetes Signal ≃ erwarteter Untergrund

⇝ Massengrenze für Higgs

Direkte Suche: Higgs

- Sensitivität mit 189 GeV Daten und LEP kombiniert

$$m_H \gtrsim 97 \text{ GeV} \quad (95\% \text{ CL})$$

- Massengrenzen bei $\sqrt{s} = 189$ GeV

einzelne Exp.: $m_H > 90.2 \,..\, 95.5$ GeV (95% CL (vorläufig))

noch nicht kombiniert

- kombinierte Massengrenze bis $\sqrt{s} = 183$ GeV

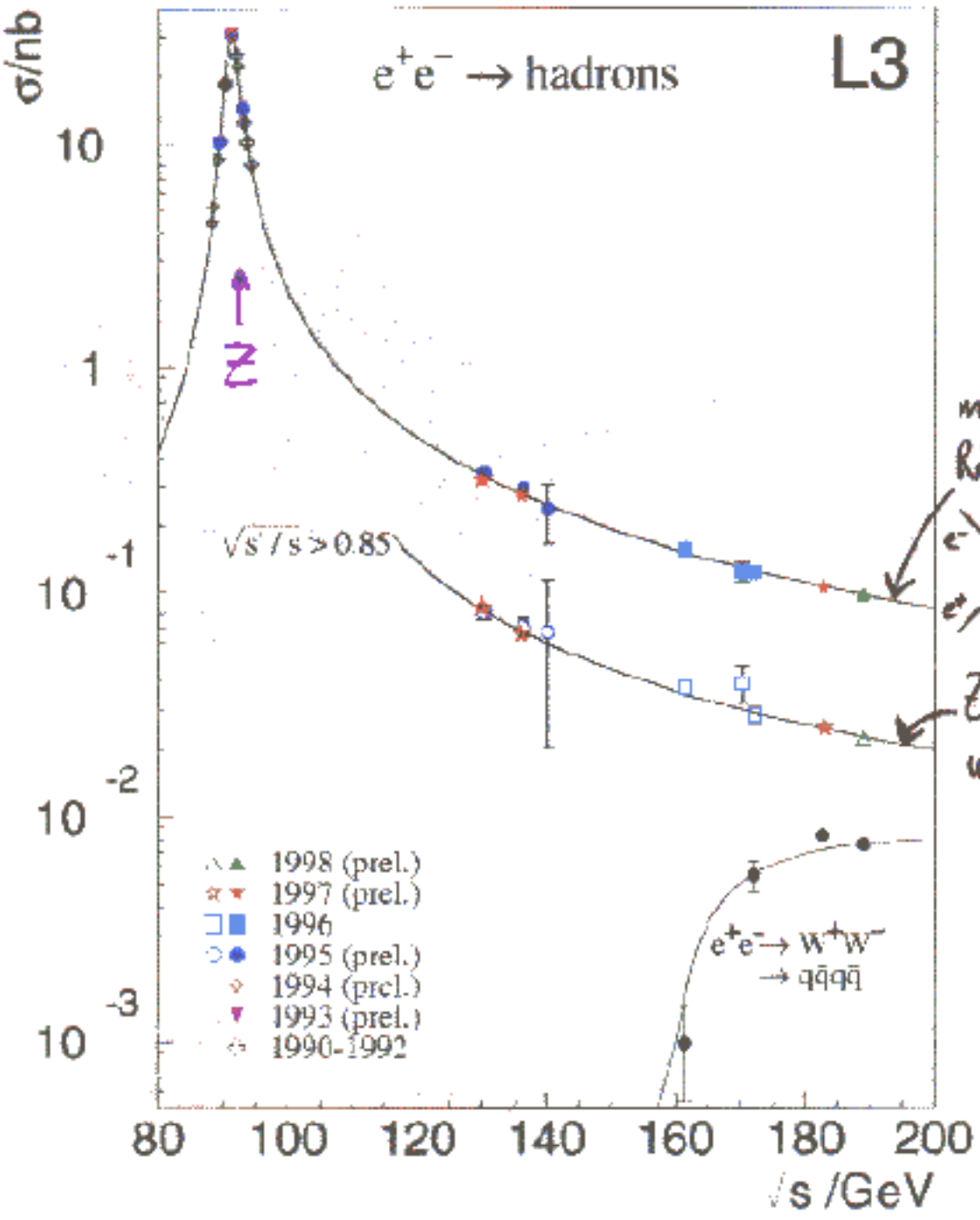
$$\boxed{m_H > 89.8 \text{ GeV}}$$

(vorläufig) (95% CL)

(Quelle: LEP-Higgs-WG 9/98)

$\Rightarrow$ noch kein Higgs-Signal bei LEP II

Messung der SM-Parameter



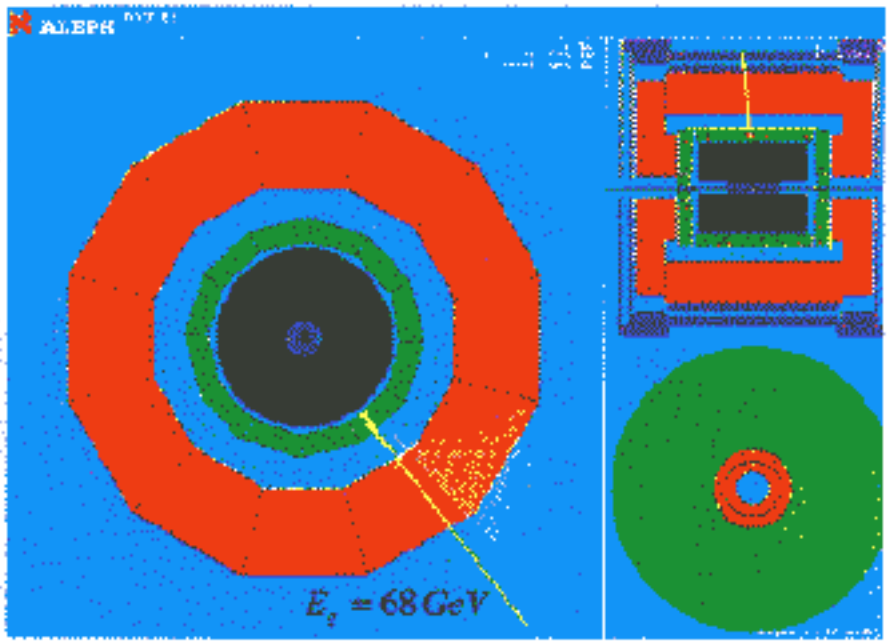
⇒ weiter Energiebereich abgedeckt

⇒ LEP: "Z-Fabrik" ⟶ "WW-Fabrik"

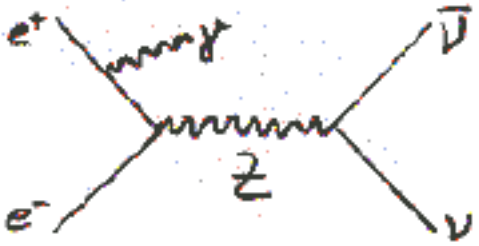
↳ σ_Z, m_Z, Γ_Z ↳ $\sigma_{WW}, m_W, \Gamma_W$

"Nur 1 Photon" - Reaktion

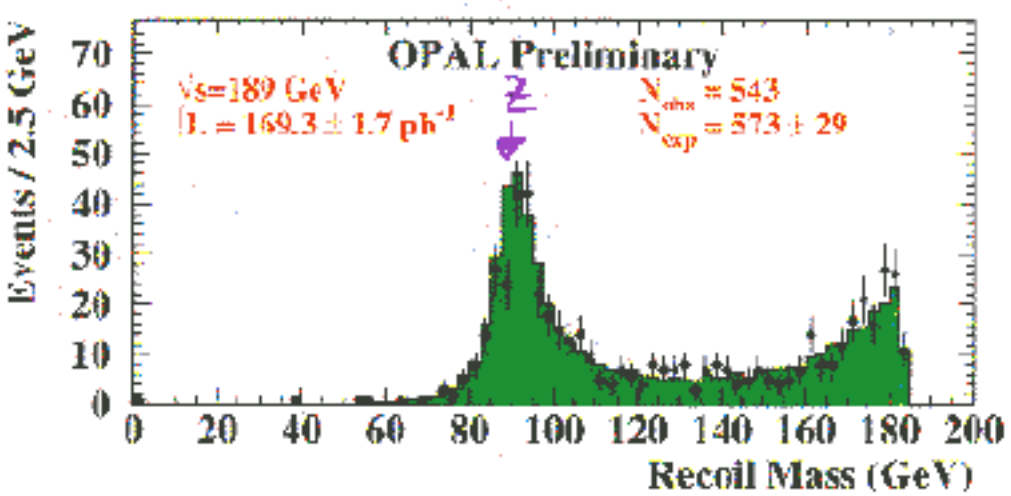
z.B.:



im SM:



Rückstoß-masse:

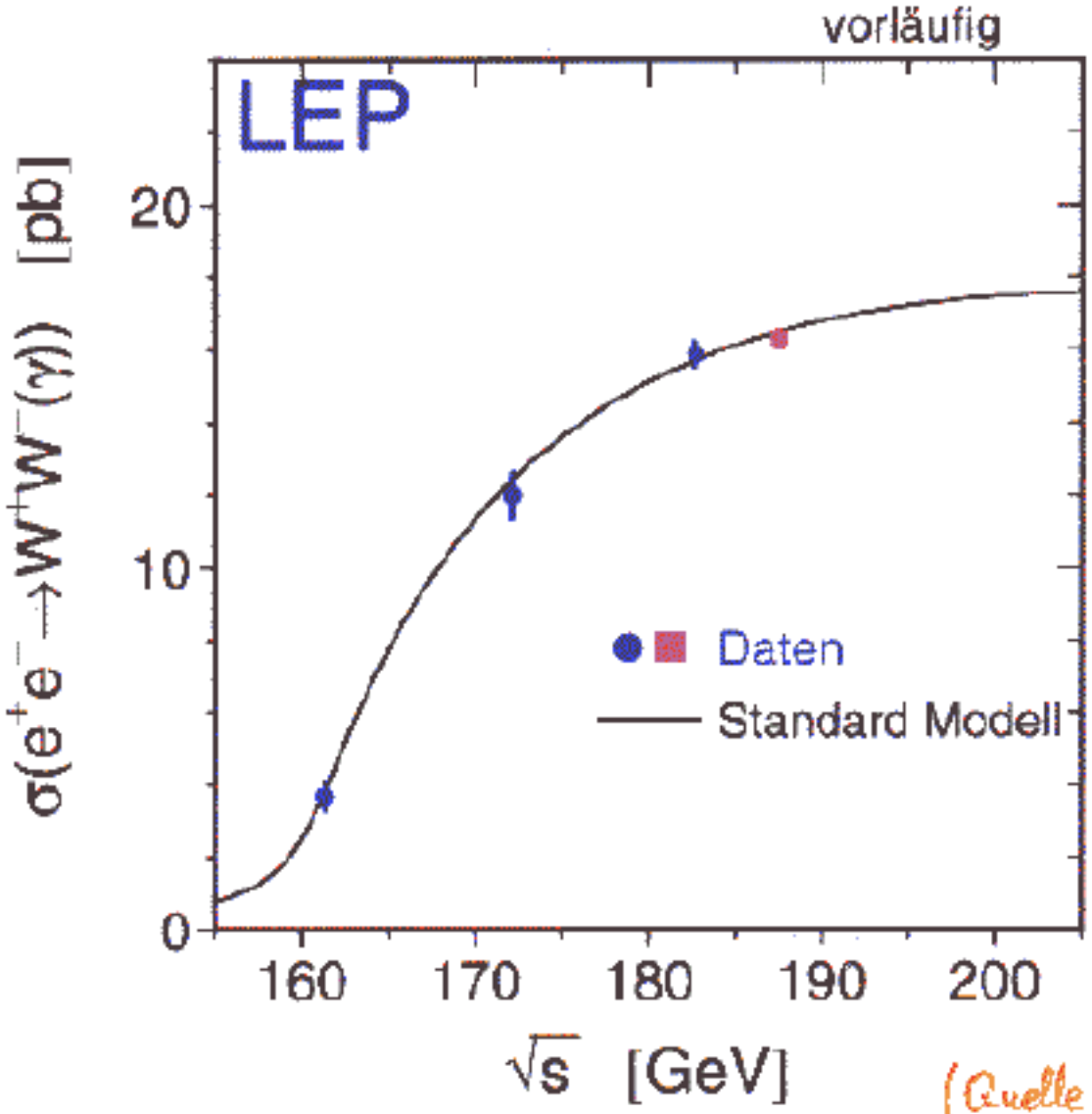


⇒ Man sieht $Z \to \nu\bar{\nu}$!

mit SM ⇝ $N_\nu = 2.92 \pm 0.29$ (DELPHI) vorläufig

LEP II: W-Paarproduktions-Wirkungsquerschnitt

$\int \mathcal{L}\,(189\,\text{GeV})\,dt \longrightarrow$ rund 11000 W-Paare



(Quelle: LEP-EWWG)

$\Rightarrow$ $\boxed{\sigma_{WW}(189\,\text{GeV}) = 16.1 \pm 0.2\ \text{pb}}$ vorläufig

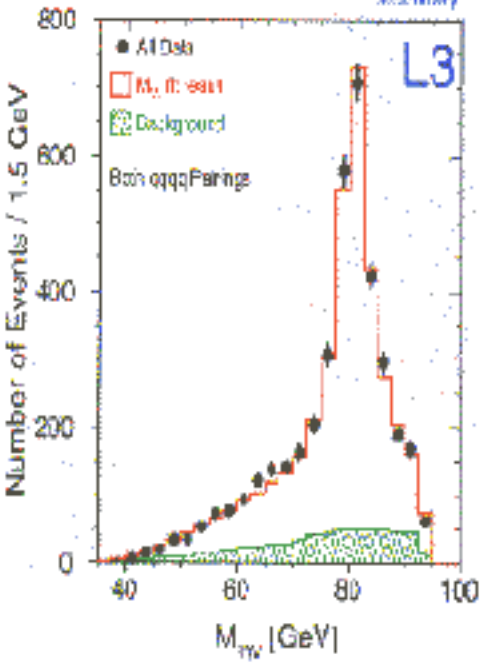
SM: $\sigma_{WW}(189\,\text{GeV}) \approx 16.6 \pm 0.3\,\text{pb}$

$\Rightarrow$ W-Paarproduktion im Einklang mit SM

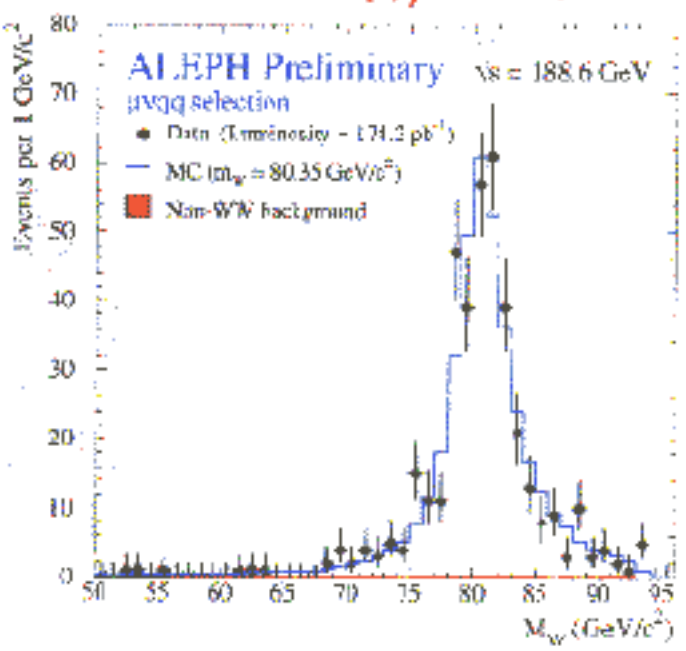
Messung der W-Boson-Masse

- Masse: direkte Rekonstruktion von W's in

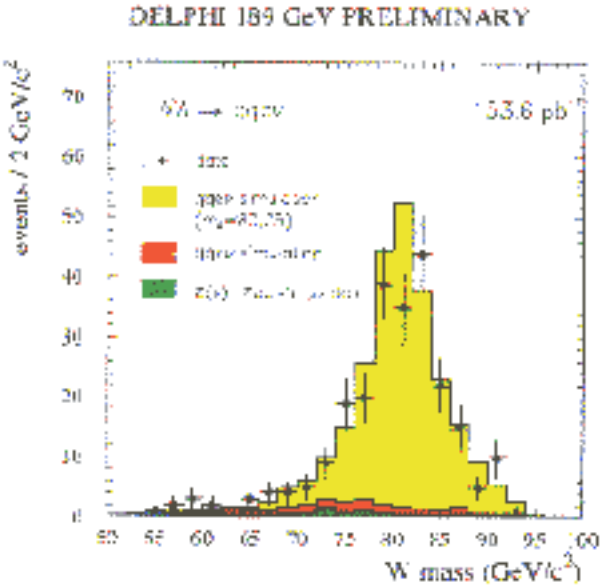
$W^+W^- \to q\bar{q}q\bar{q}$ (BR=46%)



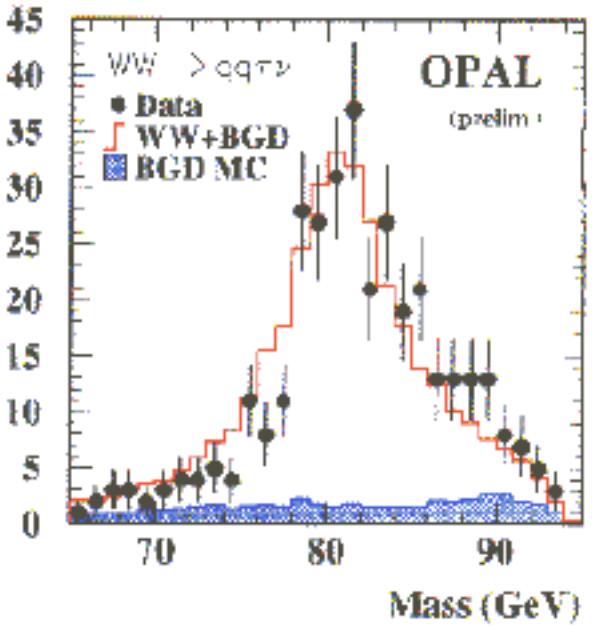
$W^+W^- \to q\bar{q}\mu\nu$ (BR=14.7%)



$W^+W^- \to q\bar{q}e\nu$ (BR=14.7%)



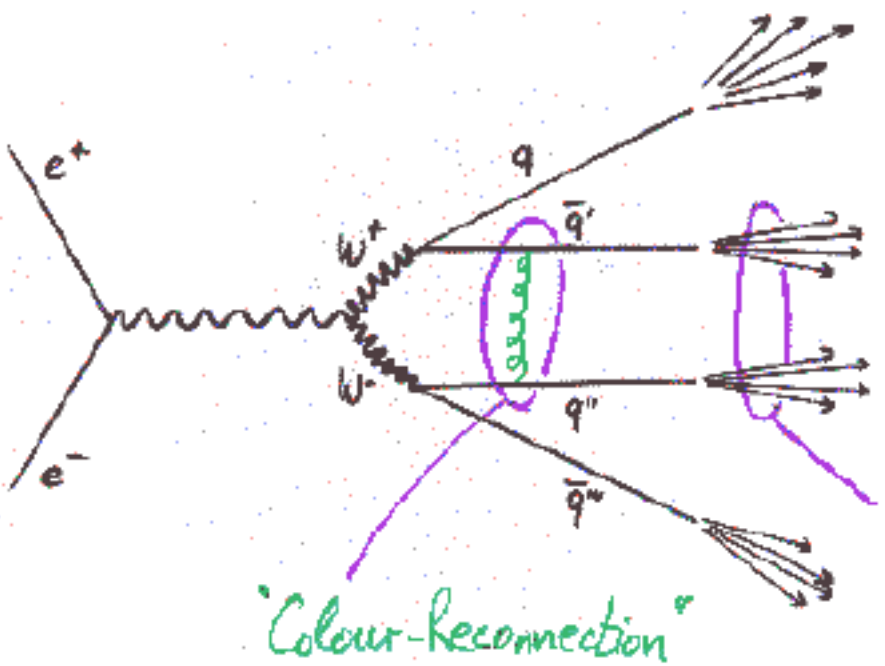
$W^+W^- \to q\bar{q}\tau\nu$ (BR=14.7%)



Wechselwirkung im $q\bar{q}q\bar{q}$-Endzustand

- Zerfall der beiden W's nicht unabhängig:

Zerfallslänge $\simeq 0.1$ fm $\ll$ Hadronisierung $\simeq 1$ fm



$\Rightarrow$ Einfluß auf m_W-Messung ?

Bose-Einstein Korrelationen

Identische Bosonen öfter nah im Phasenraum

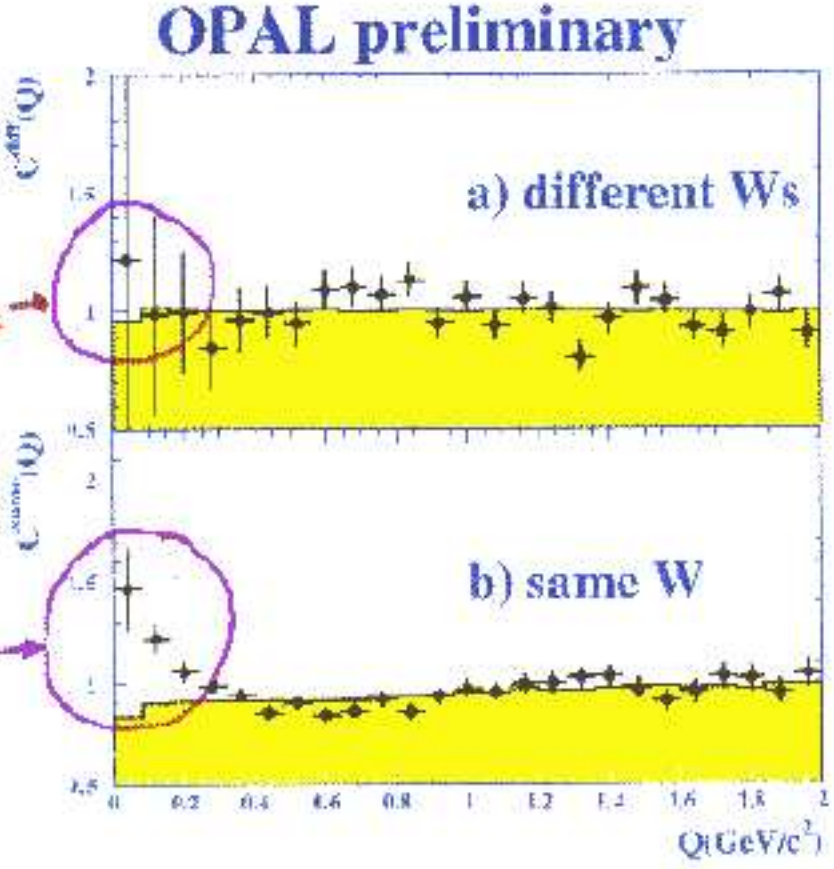
$\Rightarrow$ Vierer-Impulsdiff.: $Q^2 = -(p_1 - p_2)^2 \simeq 0$

Korrelationsfkt.: $C(Q) \sim 1 + \lambda \cdot \exp(-Q^2 \cdot R^2)$

λ: Korrel.-stärke; R: Quellgröße

Teilchen aus verschied. W's: keine Korrelation

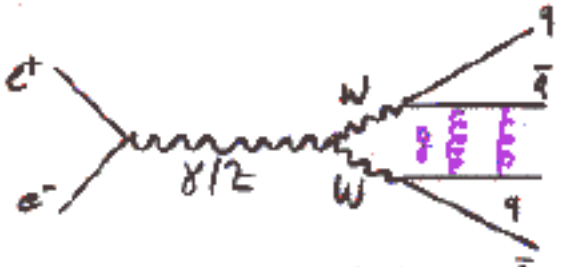
...gleichem W: Korrelation



ALEPH, DELPHI, OPAL: $\lambda^{\text{versch. W}} = -0.15 \pm 0.21$ (vorläufig)

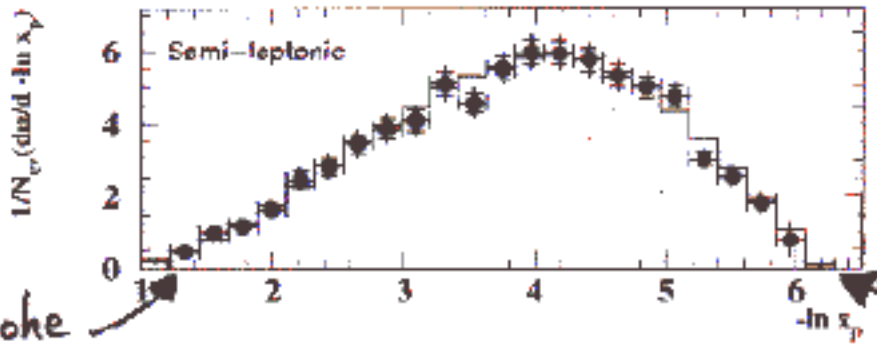
$\Rightarrow$ kein Hinweis auf BE-Korrelationen

Colour-Reconnection (CR)



$\Rightarrow$ Effekt auf Zahl d. Hadronen mit geringem Impuls

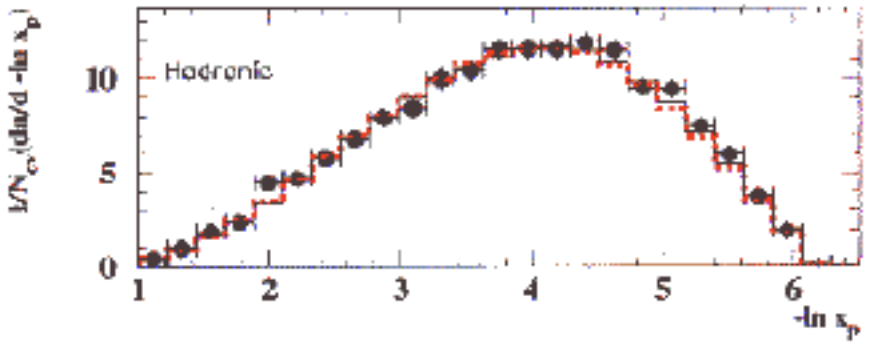
Impuls-spektren: $WW \to q\bar{q}l\nu$



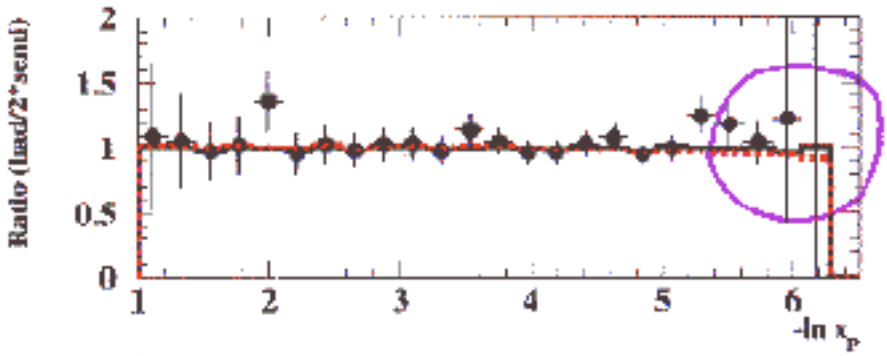
hohe

geringe Impulse

$WW \to q\bar{q}q\bar{q}$



Verhältnis



keine Absenkung

Quantitativ: $\Delta(n_{ch}) = \langle n_{ch}^{q\bar{q}q\bar{q}} \rangle - 2 \langle n_{ch}^{q\bar{q}l\nu} \rangle$

LEP: $\Delta(n_{ch}) = +0.2 \pm 0.5$ (vorläufig)

Modellstudie: $\Delta(n_{ch}) = -0.2 \ldots -0.3$

$\Rightarrow$ keine Anzeichen für CR

Wechselwirkungen im $q\bar{q}q\bar{q}$ - Endzustand (FSI)

LEP II: Daten von $\sqrt{s} = 172 \ldots 189$ GeV:

$m_W(WW \to q\bar{q}q\bar{q}) = 80.49 \pm 0.10$ GeV

(FSI: 65 MeV)

$m_W(WW \to q\bar{q}l\nu) = 80.32 \pm 0.07$ GeV

(Quelle: LEP-EWWG)

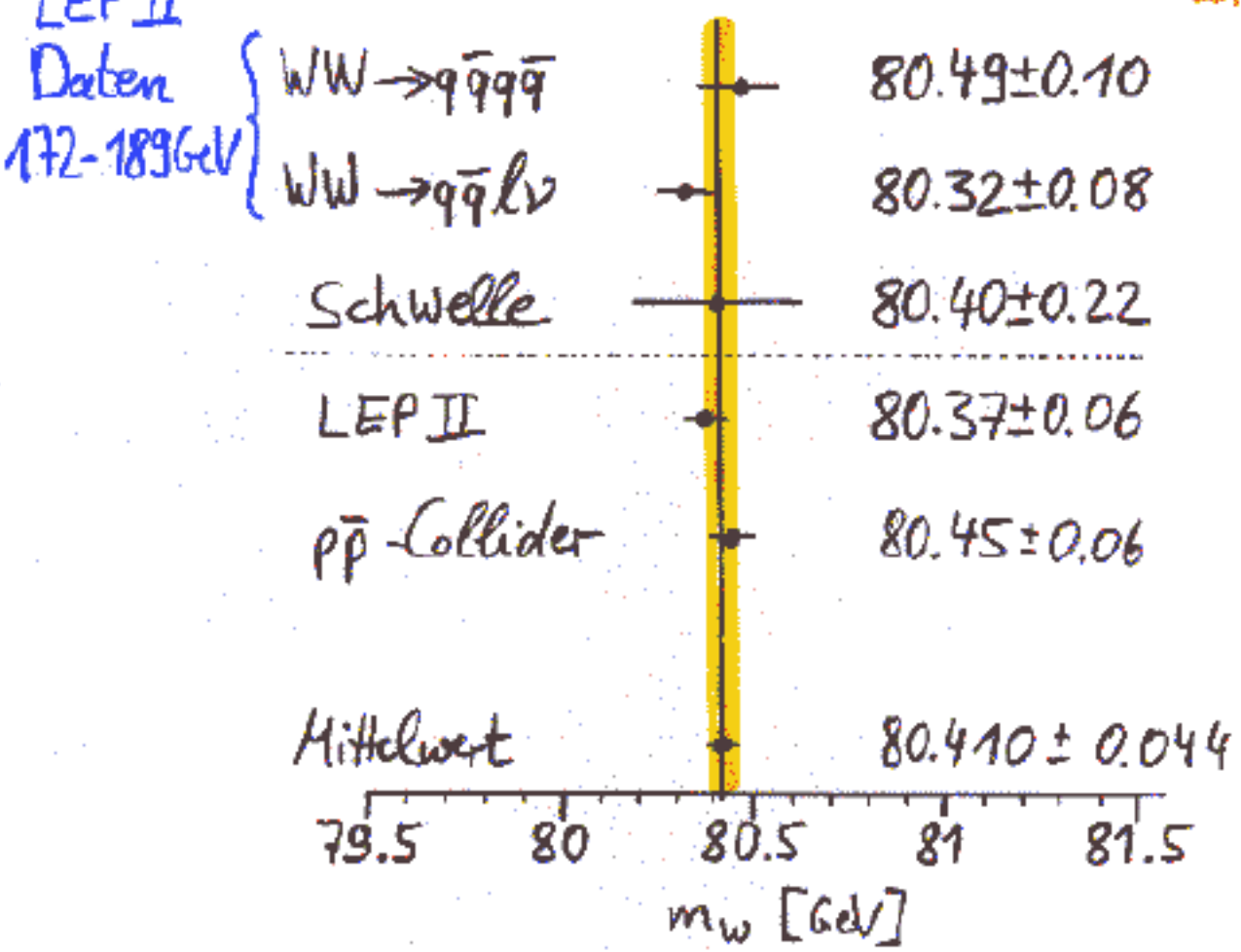
$\Rightarrow$ $\boxed{\Delta(m_W) = 0.17 \pm 0.10 \text{ GeV}}$ (vorläufig)

$\Rightarrow$ Effekte noch nicht signifikant

Zusammenfassung: W-Masse

direkte Bestimmungen:

(Quelle: LEP-EWWG)



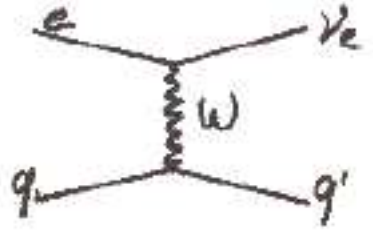
$$\Rightarrow \quad \boxed{m_W = 80.410 \pm 0.044 \text{ GeV}}$$

vorläufig

Gesamtfehler unter 50 MeV ! (0.5‰)

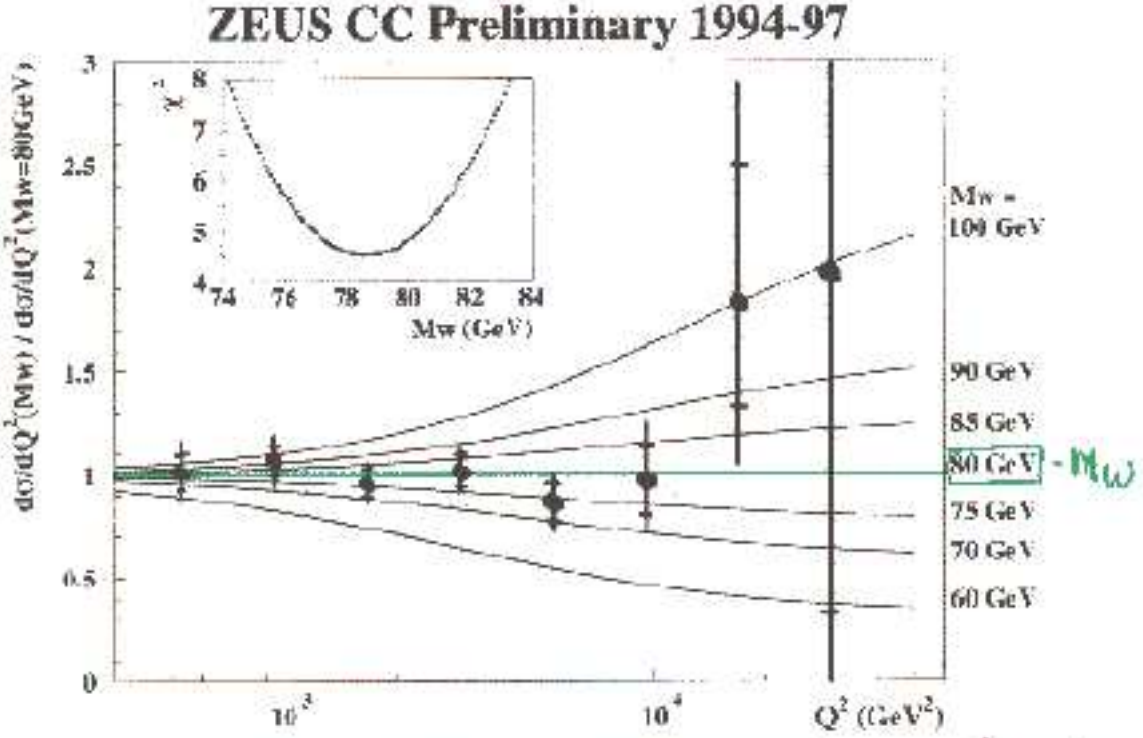
HERA: W Masse

- CC - Reaktion



$$\frac{d\sigma_{CC}}{dQ^2} \sim G_F^2 \cdot \left(\frac{M_W^2}{M_W^2 + Q^2}\right) \cdot \text{Partondichte-funktionen}$$

$Q^2 = -(\text{Vierer-Impulsübertrag})^2$



⇒ ZEUS, 41 : $m_W = 79.5 \pm 3.4$ GeV (vorläufig)

mein Hilfsort PDF: 1.5 GeV gemeinsam

HERA ≙ raumartiger Prozeß ⇒ m_W konsistent!
LEP + TeV ≙ zeitartiger

W - Breite Γ_W

- direkte Bestimmung
  - ▶ LEP II : Fit der m_W-Verteilung

    L3, OPAL $\Rightarrow$ $\Gamma_W = 1.91 \pm 0.29$ GeV

    (SM: $\Gamma_W = 2.08$ GeV)

  - ▶ TeV : Ausläufer der M_T-Verteilung in $W \to e\nu$

    $M_T^2 = 2 E_T^e E_T^\nu \cdot (1 - \cos \vartheta_{e,\nu})$

    CDF $\Rightarrow$ $\Gamma_W = 2.19 \pm 0.19$ GeV (vorläufig)

- indirekt
  - ▶ TeV : $(\sigma \cdot BR)$

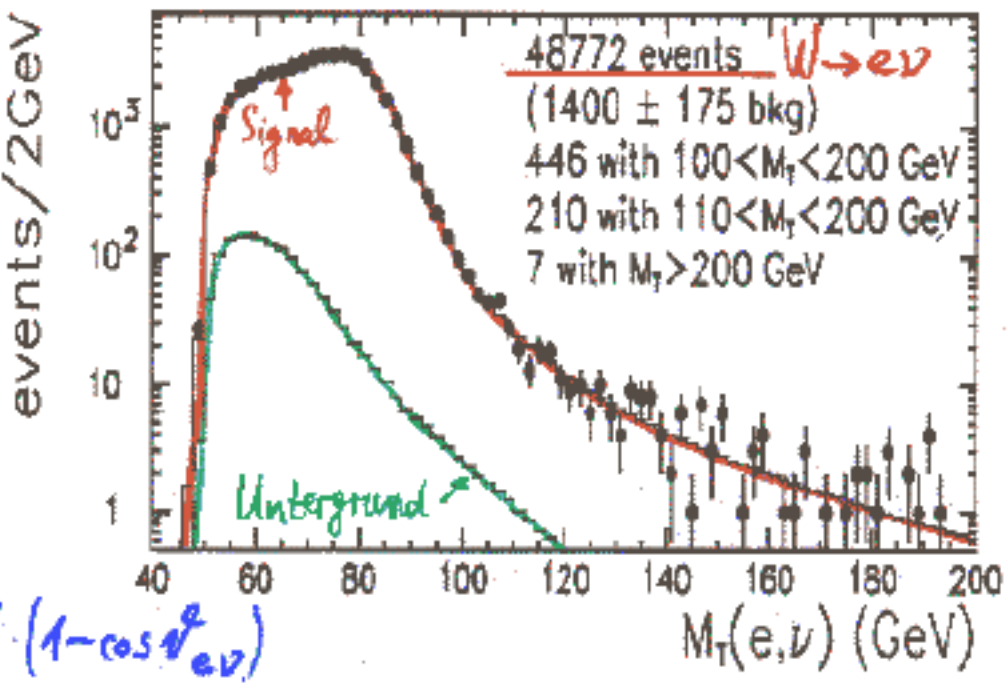
$$R = \frac{(\sigma \cdot BR)(W \to l\nu)}{(\sigma \cdot BR)(Z \to l^+ l^-)} = \left[\frac{\sigma_W}{\sigma_Z}\right]_{th} \cdot \frac{\Gamma(W \to l\nu)_{th}}{BR(Z \to l^+ l^-)_{LEP\ SLC}} \cdot \frac{1}{\Gamma_W}$$

$p\bar{p}$-Collider $\Rightarrow$ $\Gamma_W = 2.06 \pm 0.06$ GeV

TeV: W-Breite

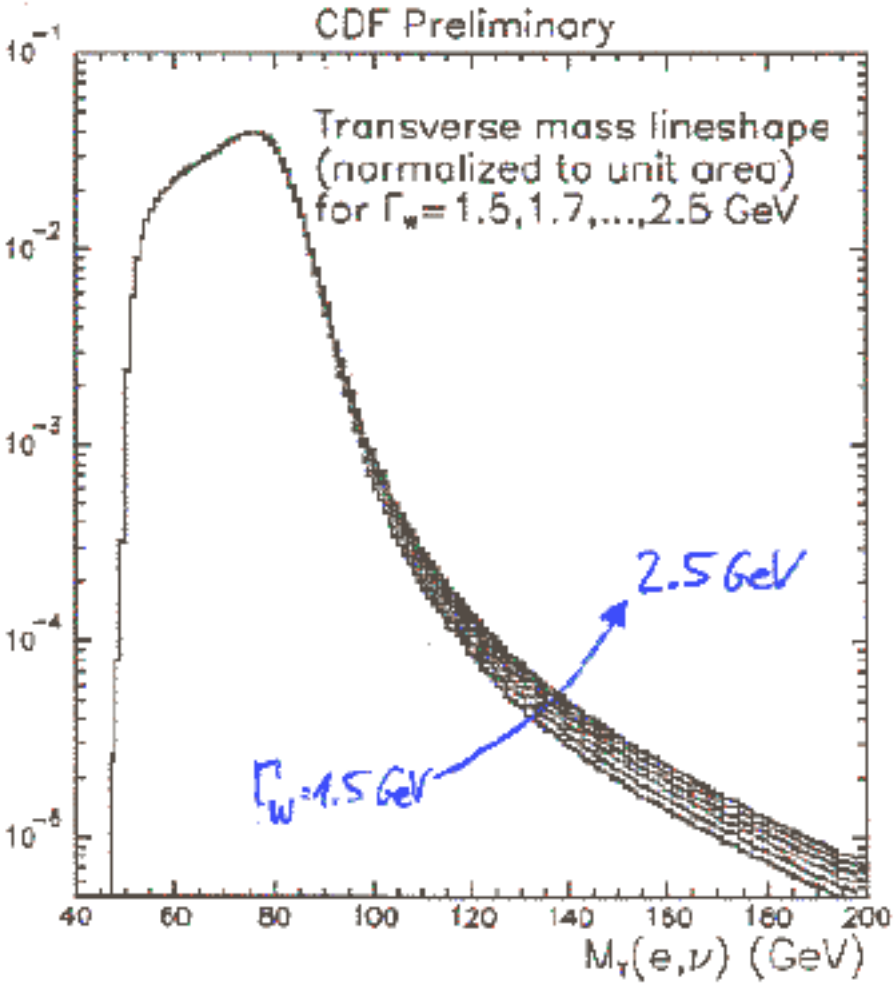
$W \to e\nu$:

- Messung:



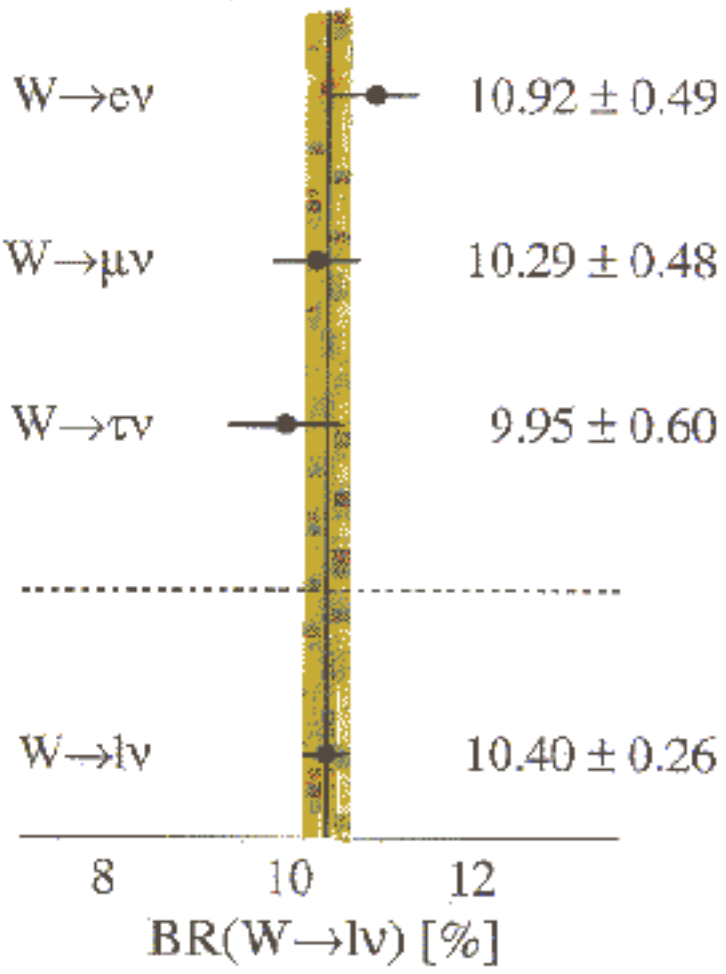
$M_T^2 = 2 E_T^e E_T^\nu (1 - \cos \vartheta_{e\nu})$

- Simulation:



W - Verzweigungsverhältnisse

LEP II : W lept. Verzweigungsverh. (bis $\sqrt{s} = 183\,\text{GeV}$)

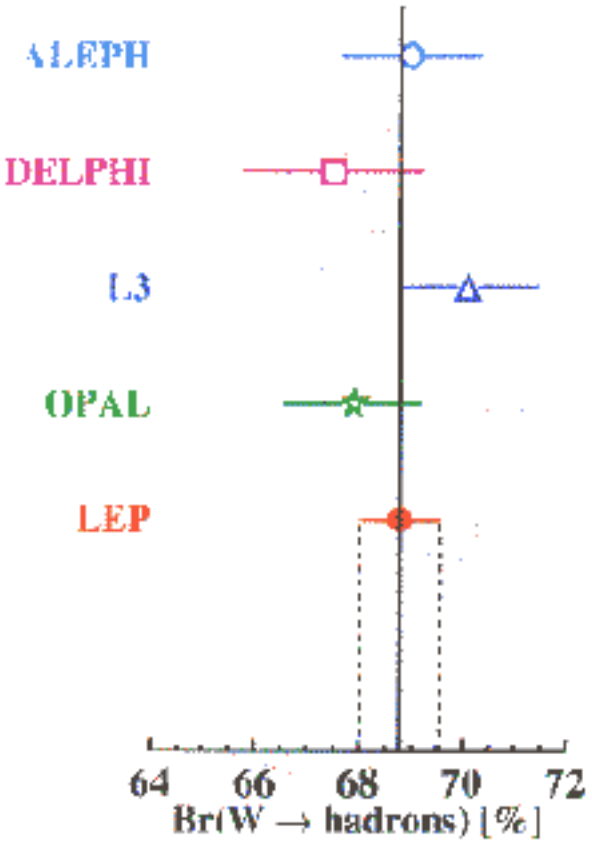


Quelle: LEP-EWWG vorläufig

⇒ Universalität der W-Lepton-Kopplung

W – Verzweigungsverhältnisse

LEP II: W hadron. Verzweigungsverh. (bis $\sqrt{s} = 183\,GeV$)



Quelle: LEP-EWW vorläufig

BR(W → Hadronen) hängt von CKM-Matrix ab

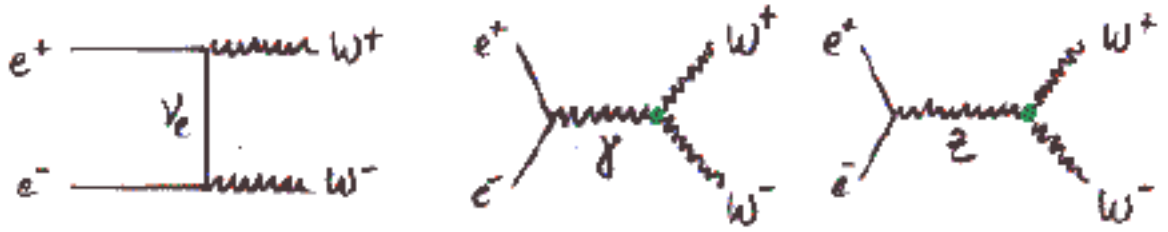
$$\frac{BR(W \to Hadr.)}{BR(W \to Lept.)} = \sum_{\substack{i=u,c \\ j=d,s,b}} |V_{ij}|^2 \cdot \left(1 + \frac{\alpha_s}{\pi}\right)$$

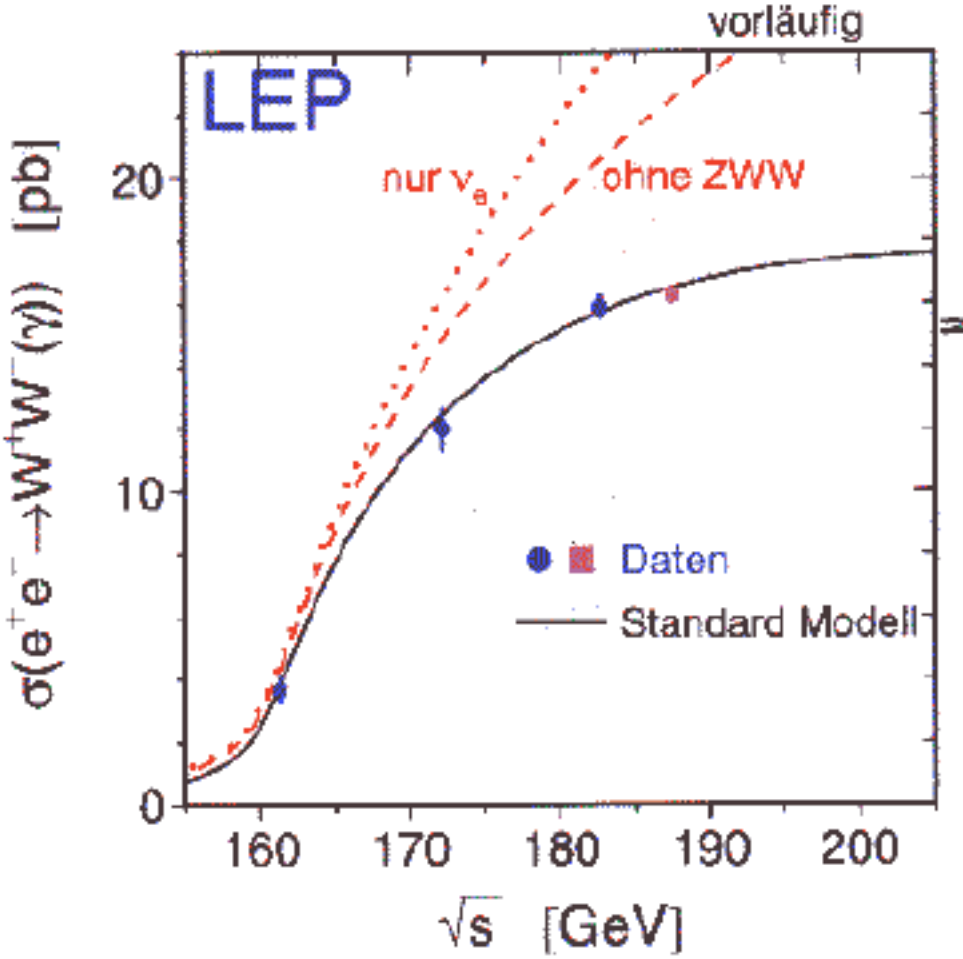
$$\Rightarrow \boxed{|V_{cs}| = 1.04 \pm 0.04} \quad \text{(vorläufig)}$$

(am wenigsten bekannt)

3 Eichboson - Kopplungen

- SM: nicht-abelsche Eichtheorie





⇒ indirekter Hinweis auf ZWW-Kopplg

- Test der nicht-abelschen Struktur in ZWW- und γWW-Kopplung

VWW - Kopplungen

▶ Allgemein: $2_{(V=\gamma,Z)} \times 7$ mögliche Lorentz-invariante VWW-Kopplungsterme

▶ Einschränkungen

- elmagn. und $SU(2) \times U(1)$ Eichinvarianz
- Ladungskonjugation und Paritätsinvarianz C, P

$\Rightarrow$ 3 Kopplungsparameter:

$\Delta\kappa_\gamma$, Δg_1^Z, λ (alle = 0 im SM)

▶ Verknüpfung: statische Momente des W^+

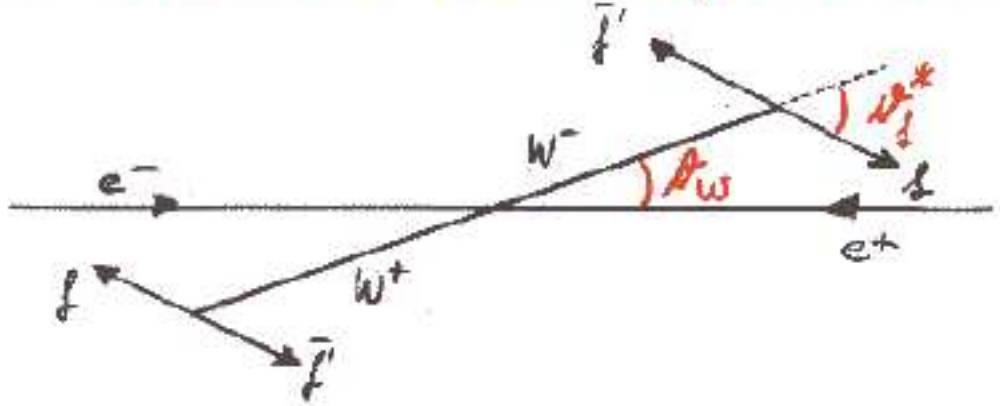
E1 W-Ladung : $Q_W = e \cdot (1 + \Delta g_1^Z)$

M2 magn. Dipolmoment : $\mu_W = \frac{e}{2m_W} \cdot (2 + \Delta\kappa_\gamma + \Delta g_1^Z + \lambda)$

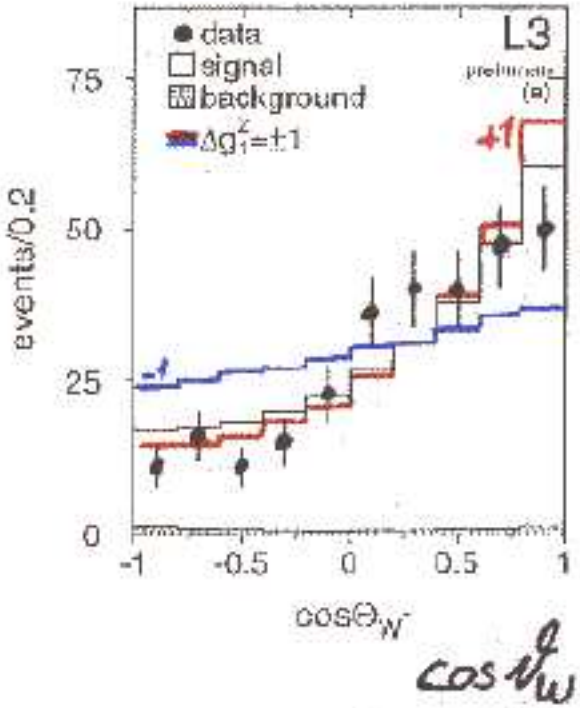
E4 elektr. Quadrupolmom.: $q_W = -\frac{e}{m_W^2} \cdot (1 + \Delta\kappa_\gamma - \lambda)$

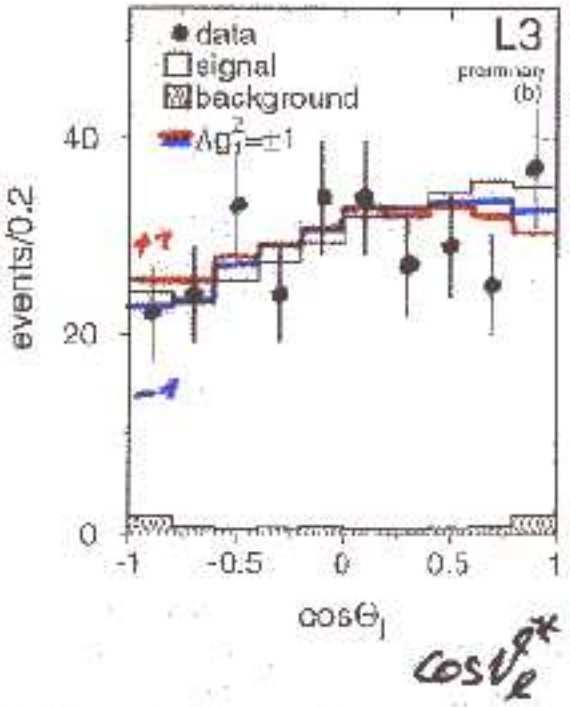
Anomale VWW - Kopplungen

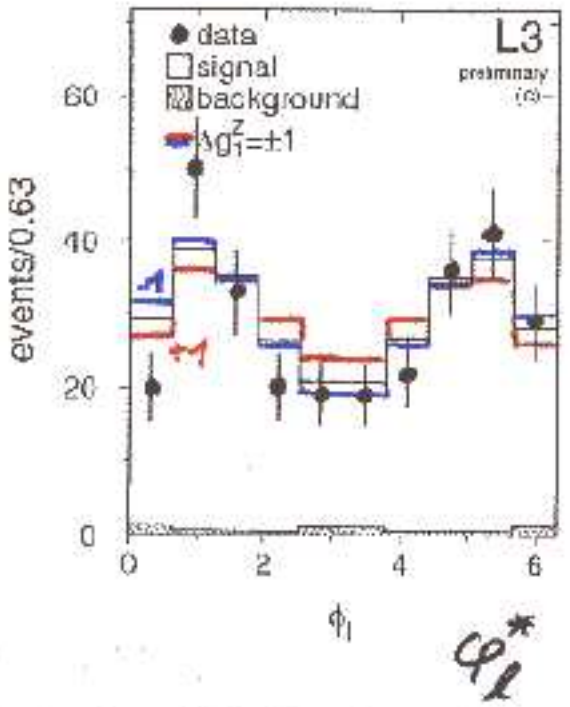
- Veränderung von Produktions- und Zerfallswinkelverteilung



weiterhin:
φ^* außerhalb der Ebene







Anomale VWW-Kopplungen

- LEP II (bis 189 GeV) + DØ

  (zwei anomale Kopplg. = SM, dritte fitten)

(95% CL)

$$-0.11 < \Delta\kappa_\gamma < +0.23$$

$$-0.07 < \Delta g_1^Z < +0.05$$

$$-0.09 < \lambda_\gamma < +0.03$$

(Quelle: LEP-EWWG, vorläufig)

- ZEUS: $\sigma(e^+p \to W^+\bar{\nu} X)$

(95% CL)

$$-7.6 < \Delta\kappa_\gamma < +3.9$$

$$-7.5 < \lambda < +7.5$$

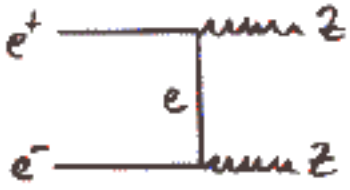
vorläufig

- LEP II: gemeinsame Fits zweier anomaler Kopplg.

$\Longrightarrow$ Konsistenz mit SM (anom. Kopplg. = 0)

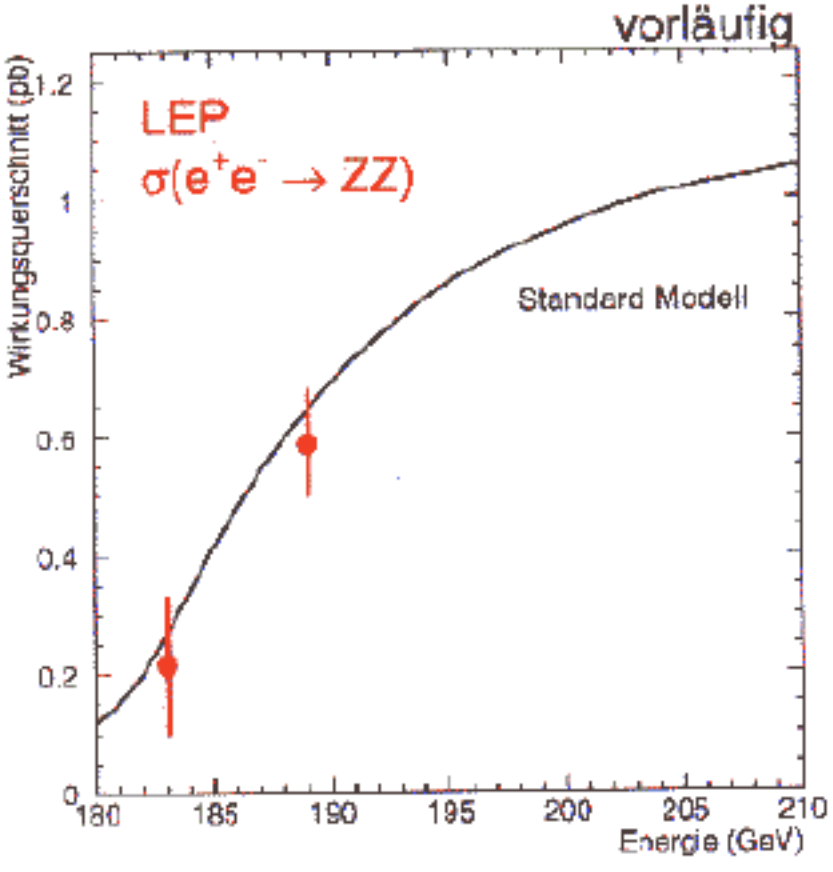
ZZ - Produktion

- LEP II : Bei $\sqrt{s} = 183$ und 189 GeV



$\sqrt{s} = 183$ → ≈ 50 ZZ

189 GeV → ≈ 450 ZZ



ALEPH, L3, OPAL →

$\sigma_{ZZ}(183\,\text{GeV}) = 0.21 \pm 0.12\,\text{pb}$ (SM: 0.25 pb)

$\sigma_{ZZ}(189\,\text{GeV}) = 0.59 \pm 0.09\,\text{pb}$ (SM: 0.65 pb)

(vorläufig)

$\Rightarrow$ in Übereinstimmung mit Erwartung

Präzisionsmessungen des SM am Z-Pol

Schon häufig berichtet!

→ Hier nur wesentliche Änderungen

■ Generell:

- LEP I - Energiekalibration ✓
- verfeinerte Analysen ✓
  besseres Verständnis der Systematiken
- Fit-Programme: zusätzliche höhere Ordnungs-Korrekturen ✓

⇒ weitere Verbesserung der Präzision

■ Gelöst:

- τ-Lebensdauer ↔ $BR(\tau \to \mu\nu\bar{\nu})$ ✓
- R_b, R_c ↔ SM-Erwartung ✓

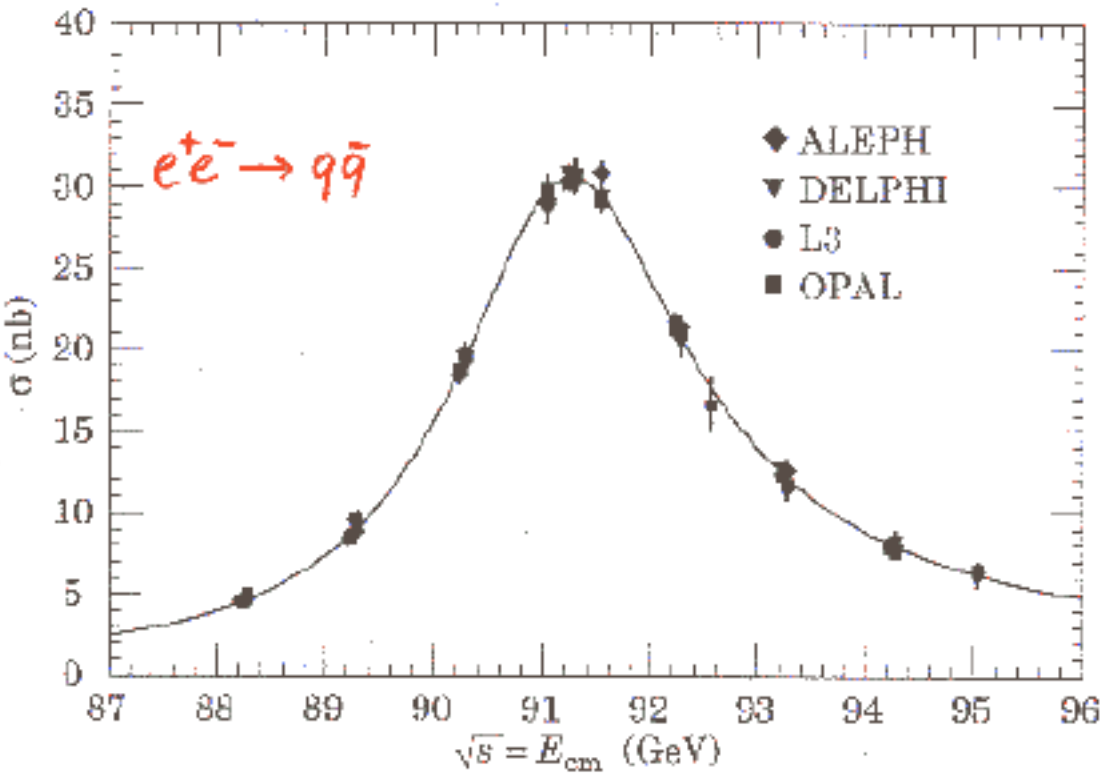
...

■ "Problem"?

- lepton. ↔ hadron. Asymmetrien → $\sin^2\theta^{lept}_{eff}$

Z - Resonanzkurve

$\sigma(e^+e^- \to f\bar{f})$ gegen $\sqrt{s}$



$\Rightarrow$ $m_Z = 91.1867 \pm 0.0021$ GeV

$\Gamma_Z = 2.4939 \pm 0.0024$ GeV

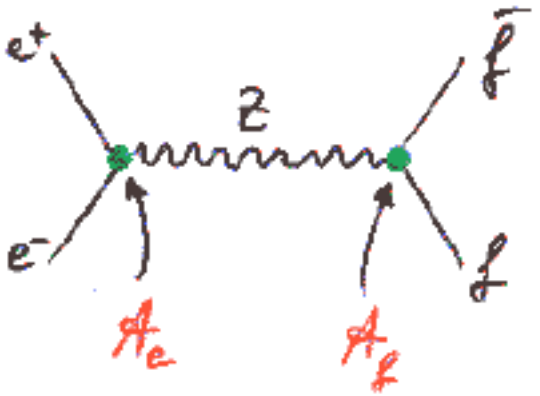
$\sigma_0^{had} = 41.491 \pm 0.058$ nb

$N_\nu = 2.994 \pm 0.011$

$\Rightarrow$ Genauigkeiten: 3‰ (N_ν) bis 20 ppm (m_Z)

Asymmetrien und $\sin^2\theta_{eff}^{lept}$

- $Zf\bar{f}$ - Kopplungen



$$A_f = 2 \cdot (g_{V_f} \cdot g_{A_f}) \Big/ (g_{V_f}^2 + g_{A_f}^2)$$

- Messung mit Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie

$$A_{FB}^{0,f} \equiv \frac{\sigma_F - \sigma_B}{\sigma_F + \sigma_B} = \frac{3}{4} A_e A_f$$

- SLC mit polarisiertem e^--Strahl

$$A_{LR}^{0} \equiv \frac{\sigma_L - \sigma_R}{\sigma_L + \sigma_R} = A_e$$

$$A_{LR\,FB}^{0,f} = \frac{3}{4} A_f$$

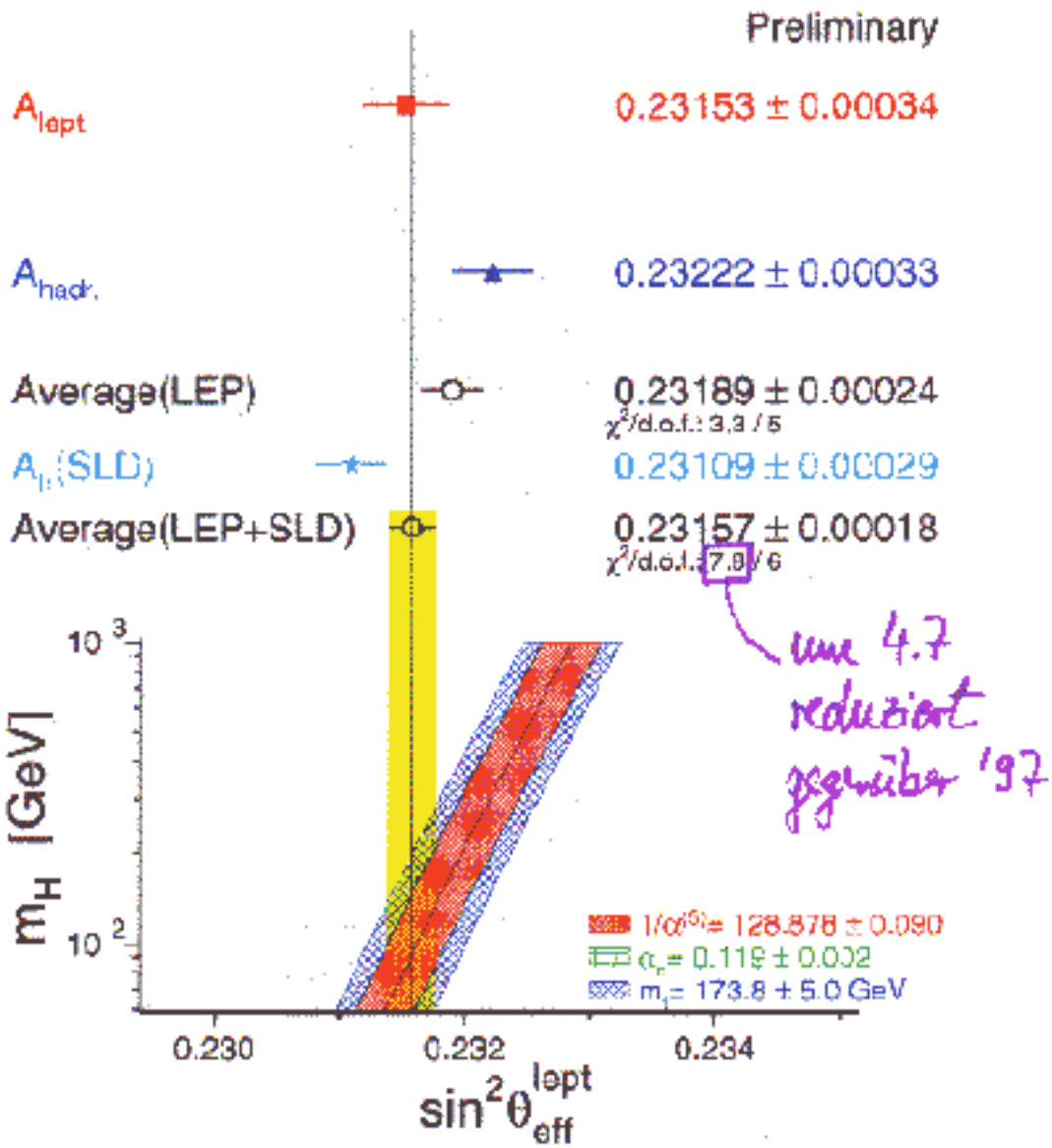
- Polarisation des τ-Leptons in $e^+e^- \to \tau^+\tau^-$

$$P_\tau(\cos\vartheta_{\tau^-e^-}) \longrightarrow A_\tau, A_e \; ; \; \langle P_\tau \rangle = -A_\tau$$

Asymmetrien und $\sin^2\theta_{eff}^{lept}$

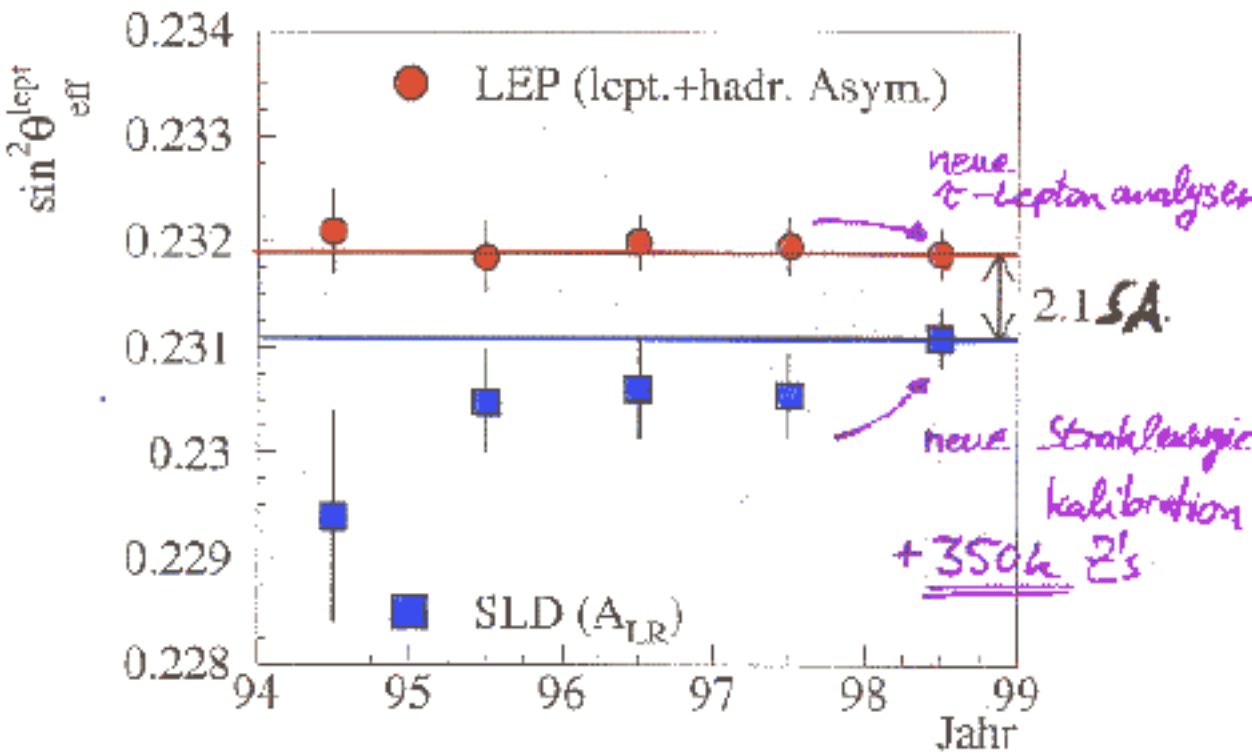
Asymmetrien $\Rightarrow$ $\frac{g_{Ve}}{g_{Ae}} = 1 - 4\cdot|Q_e|\sin^2\theta_{eff}^{lept}$

in:



$\Rightarrow$ statistisch nicht signifikant

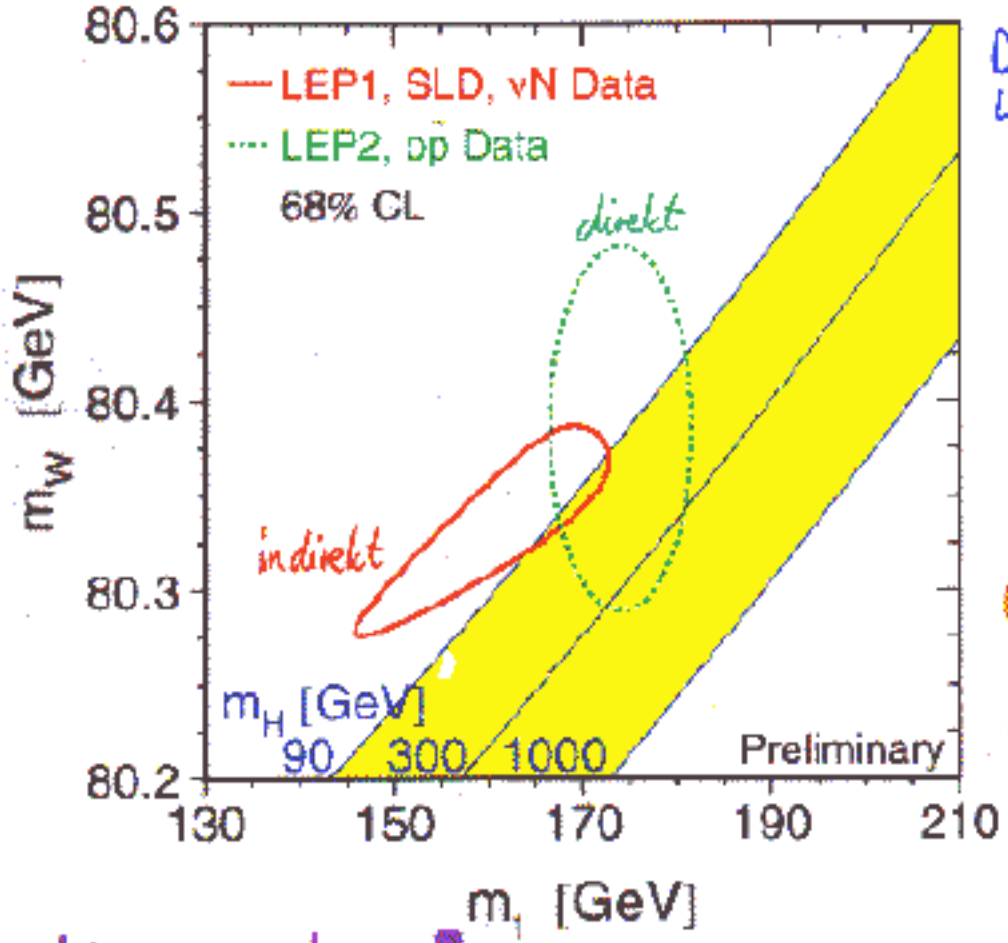
$\sin^2\theta_{eff}^{lept}$ gegen Jahr



Vergleich: indirekte ↔ direkte M_W, M_{top}

- G_F-Relation im SM:

$$m_W = f\left(\underbrace{\alpha_{em}, G_F, m_Z}_{\text{BORN-TERM}};\ \underbrace{m_{top}, m_H, \ldots}_{\text{EL.-SCHWACHE KORREKTUR}}\right)$$



Daten von LEP II bis 189 GeV

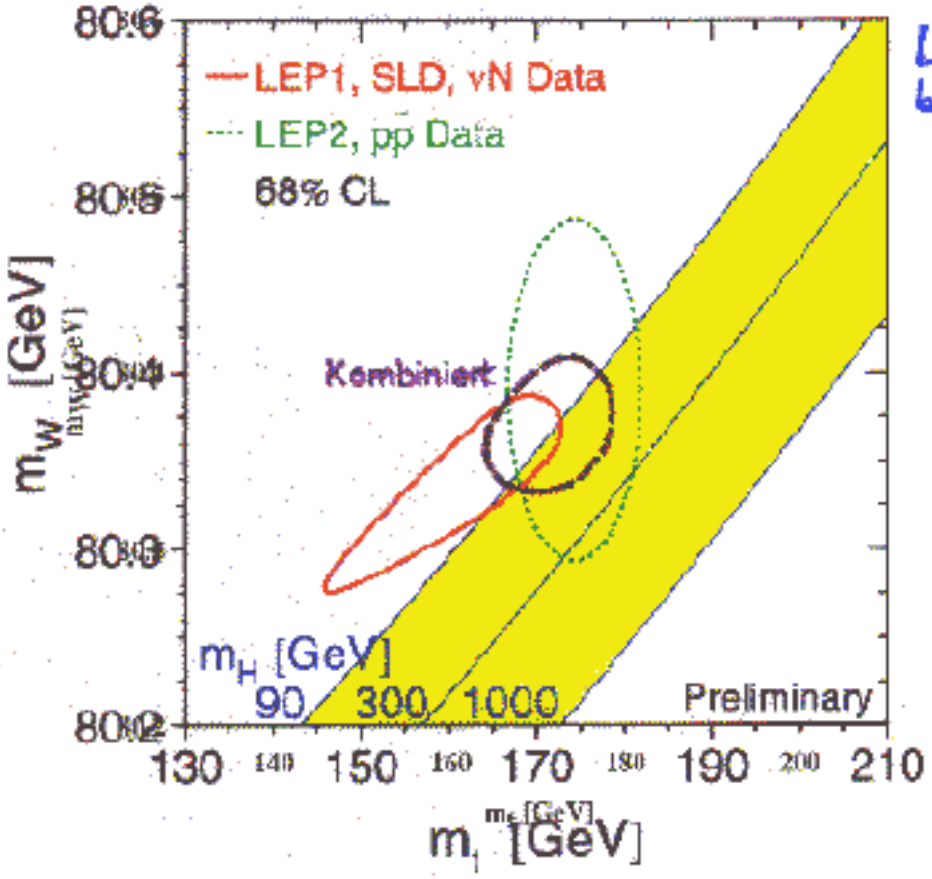
(Quelle: LEP-EWWG) vorläufig

⇒ Konsistenz!

mit 189 GeV Daten	indirekt	direkt
m_W	80.326 ± 0.037 GeV	80.410 ± 0.046 GeV
m_{top}	$158\ ^{+9}_{-8}$ GeV	174.3 ± 5.1 GeV (Okt '98)

Kombination: indirekte & direkte Messungen

Interpretation im SM:



LEP II Daten bis 183 GeV

(Quelle: LEP-EWWG)

(vorläufig)

- Kombination: LEP I, SLD, LEP II, $p\bar{p}$, νN und Fit des SM

$$\Rightarrow \quad m_H = 76 \pm \begin{matrix} 85 \\ 47 \end{matrix} \text{ GeV} < 262 \text{ GeV}$$

(vorläufig) (95% CL)

im SM: Higgs relativ leicht !

Zusammenfassung: Bulletin des SM's

- Genauigkeit weiter verbessert (insb. m_W)
- Messungen im Einklang mit SM-Erwartg.
- Konsistenz indirekter & direkter Messungen
- keine Anzeichen für "neue" Physik
  → Vortrag T10, P. Zerwas
- Higgs-Boson leicht:

$$90\ \text{GeV} \lesssim m_H \lesssim 260\ \text{GeV} \quad (95\%\,\text{CL})$$

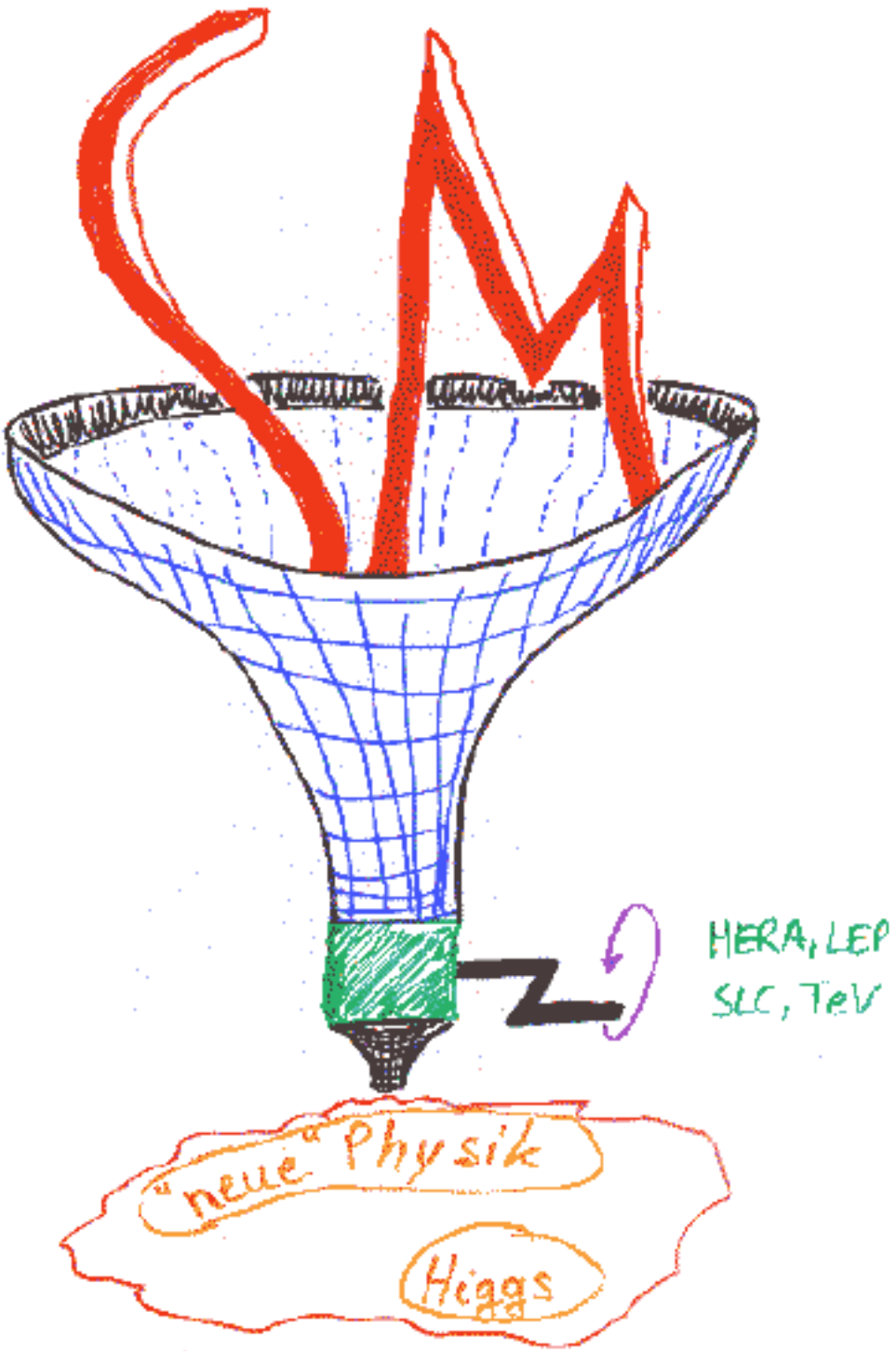
(direkte Suche) (SM-Fit)

Ausblick

- LEP II
  - bis Ende 2000
  - + $\gtrsim 200\ pb^{-1}$ je Exp.
  - $\sqrt{s}$ bis $\simeq 200$ GeV in 1999
  - Spektrometer für Strahlenergie ($\Delta E = 10$ MeV)

  am Ende: $\begin{cases} \Delta m_W \lesssim \pm 50\ \text{MeV} & (WW \to q\bar{q}l\nu) \\ m_H > 109\ \text{GeV} & (\text{Quelle: E. Gross}) \end{cases}$

- LEP I: Exp. Systematiken + $\alpha_{em}(M_Z^2)$ + Theorie
- SLC
  - Fortsetzung bis in 2000 angestrebt
  - 1 Mio Z's $\Rightarrow \Delta \sin^2\Theta_{eff}^{lept} < 0.0002$ (aus A_{LR})
- HERA $\rightarrow$ Vortrag T5, T2,] . Grosse-Knetter, M. Weber
- TeV
  - Run 2 startet in 2000
  - höhere Lumi ($\times 20 \rightarrow \int \mathcal{L}\,dt = 2\ fb^{-1}$), höhere Energie (2 TeV)

  einzelnes Exp.: $\begin{cases} \Delta m_{top} \simeq \pm 3 \ldots 4\ \text{GeV} \\ \Delta m_W \simeq \pm 40 \ldots 50\ \text{MeV} \end{cases}$

auf jeden Fall ...