

Vier-Fermion Produktion bei LEP

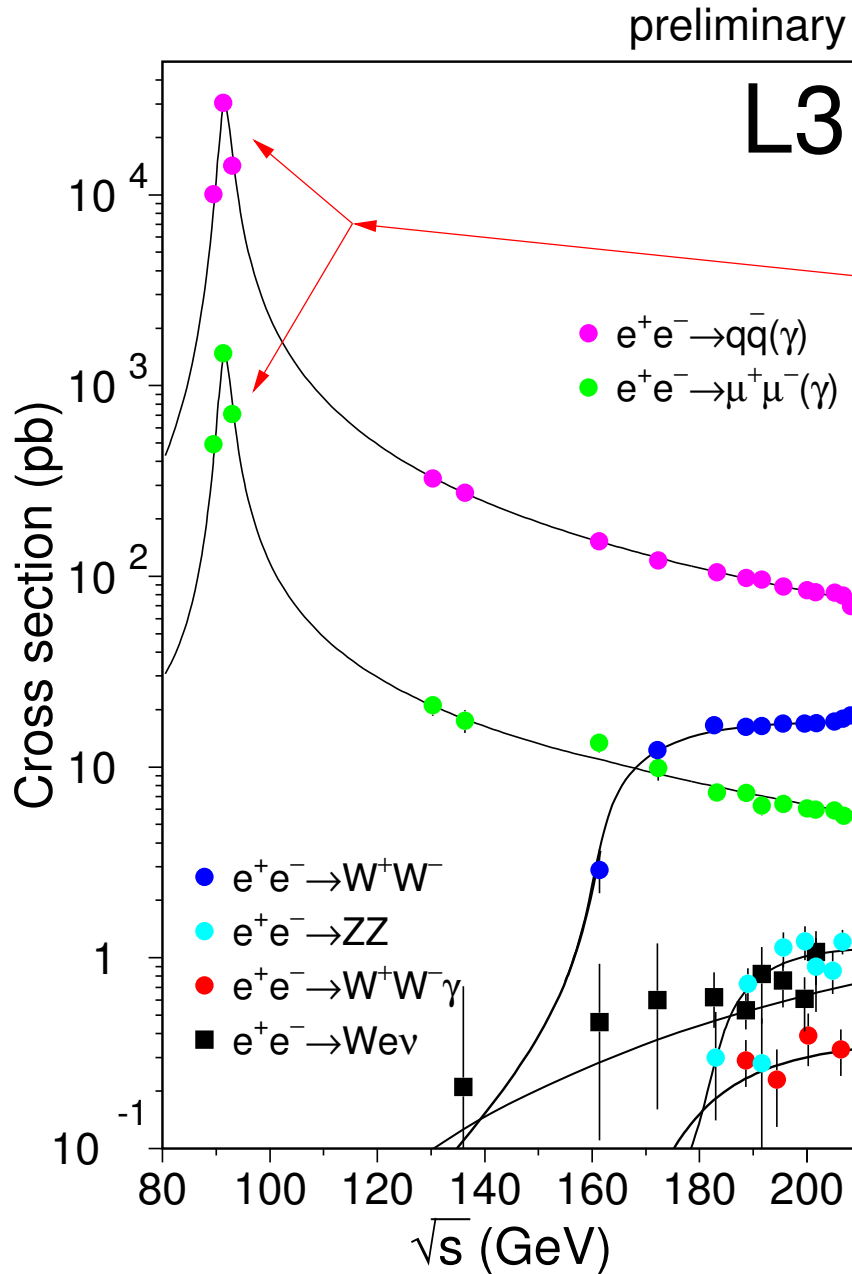
und

anomale Kopplungen

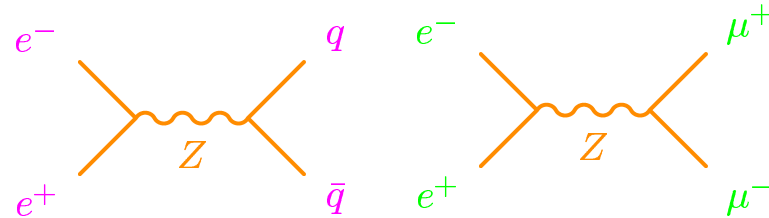
Martin Weber

III. Physikalisches Institut, RWTH Aachen

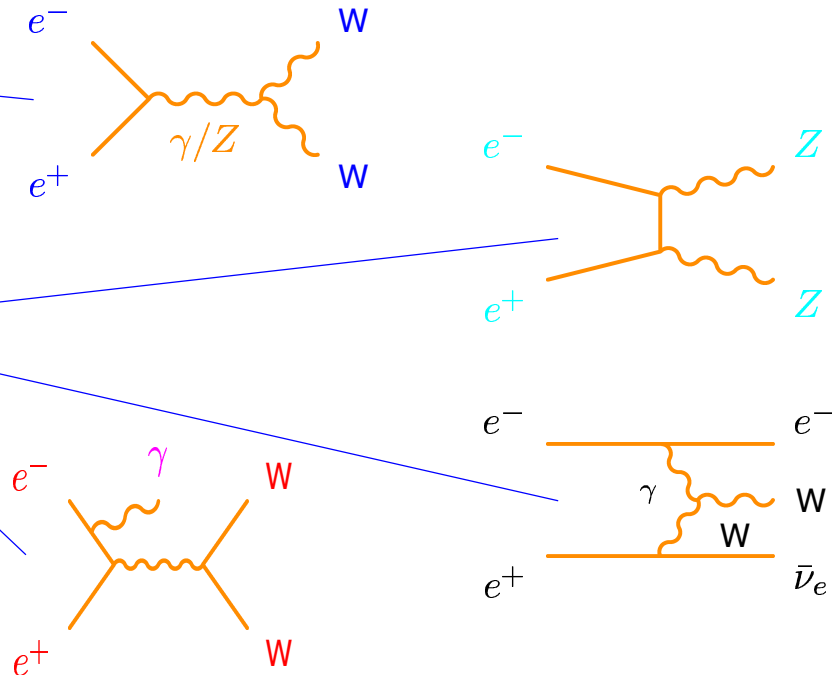
Bad Honnef 2002



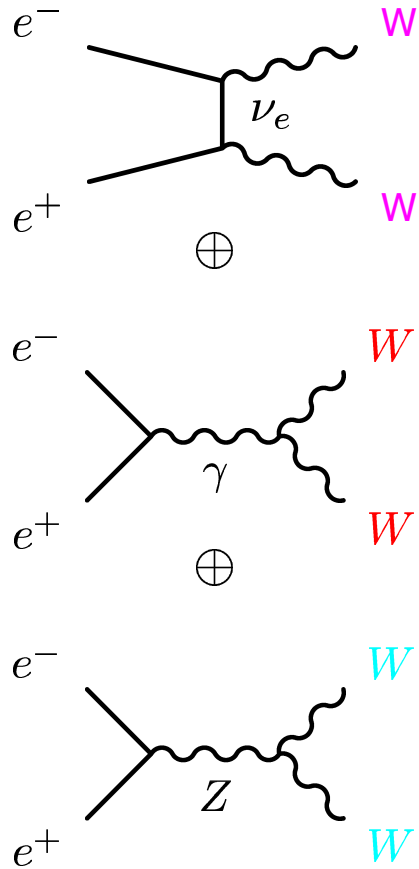
LEP I: Untersuchung des Z-Bosons und seiner Kopplungen



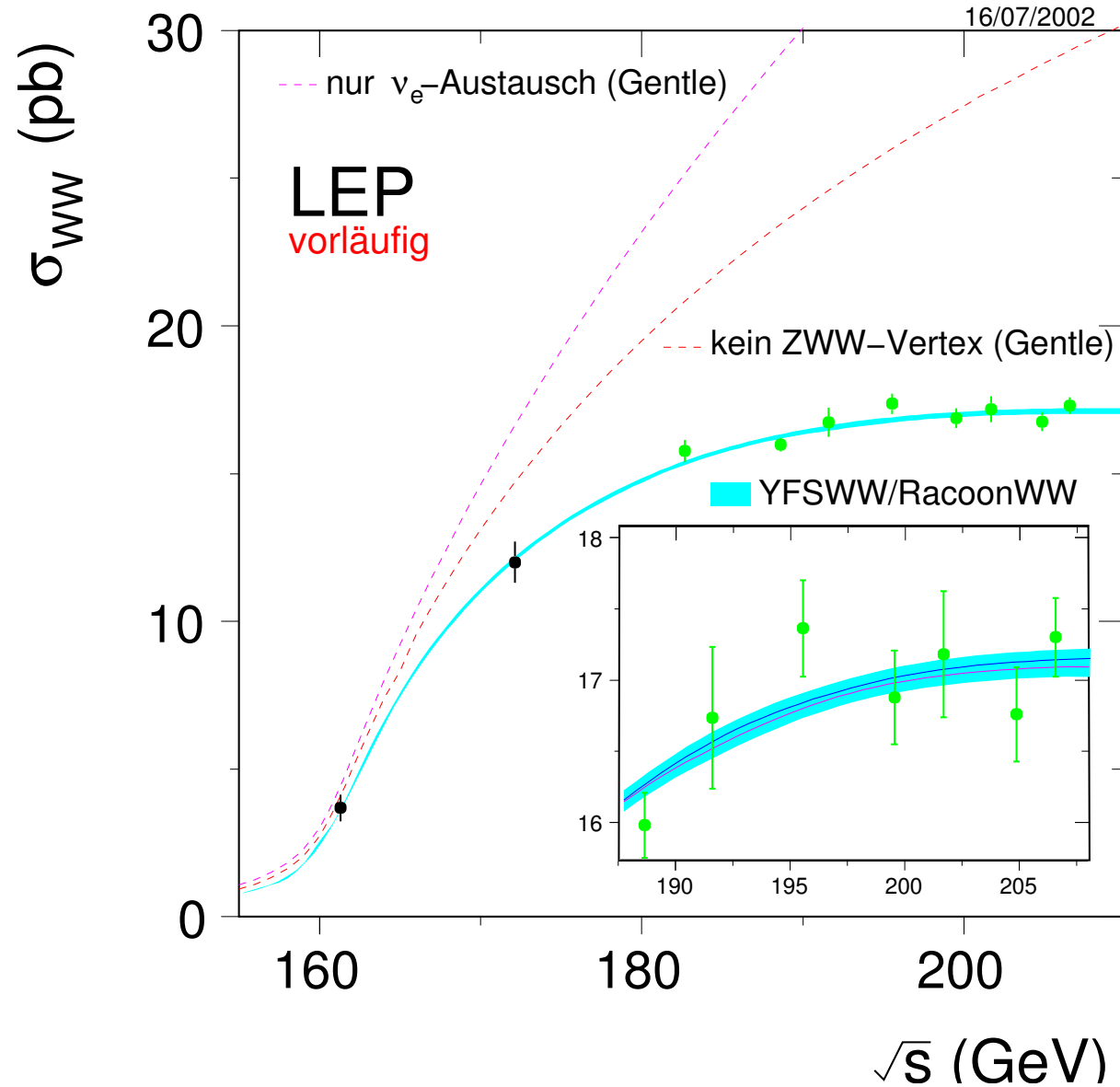
LEP 200: Bosonen in Paaren, Kopplungen mehrerer Bosonen



W^+W^- Wirkungsquerschnitt



- Behandlung der Korrelationen der syst. Fehler
- Kombination $d\sigma/d\cos\theta_W$ im Gange

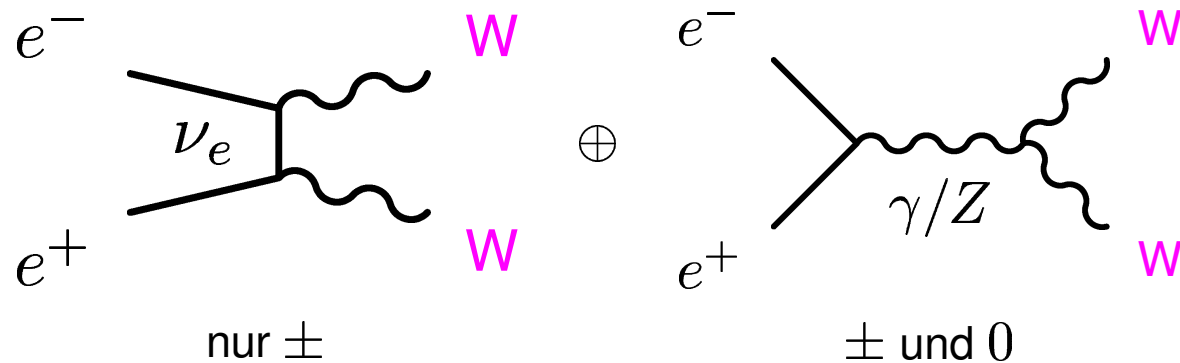


Eindrucksvoller Beweis der nichtabelschen Struktur des Standardmodells!

W-Polarisation

- Higgs-Mechanismus verleiht Bosonen Masse $\rightarrow m_Z, m_W$
- Massive Bosonen: Drei Helizitätszustände $\lambda = -1, 0, +1$
- Helizität 0: longitudinale Bosonen.

Produktion durch nichtabelsche Diagramme:



Die Diagramme haben unterschiedliche \sqrt{s} -Abhängigkeit

\rightarrow Die Polarisation ist auch \sqrt{s} -abhängig: $\sigma_L \equiv \sigma_L(\sqrt{s})$

Für LEP 200 gilt $\sigma_L \approx 24\% \sigma_{tot}$.

Zwei Methoden zur Bestimmung der Polarisation:

- „Spindichtematrix“ ρ (Opal, [Delphi]):

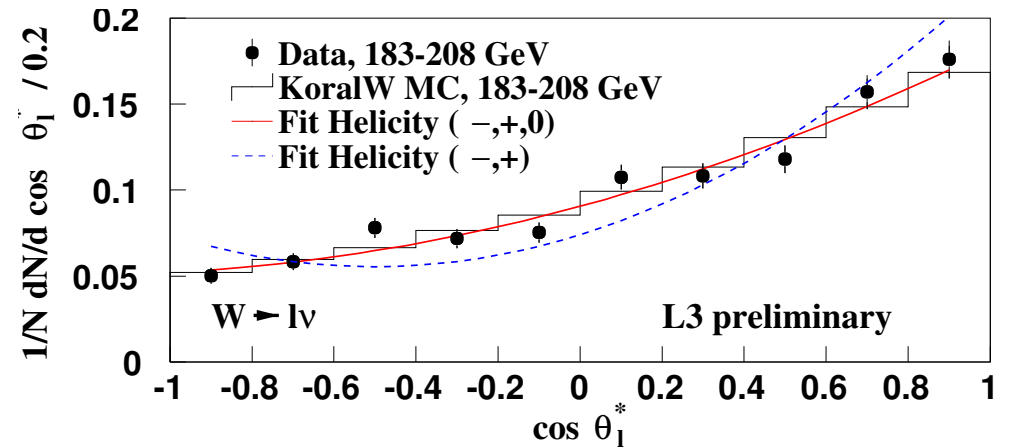
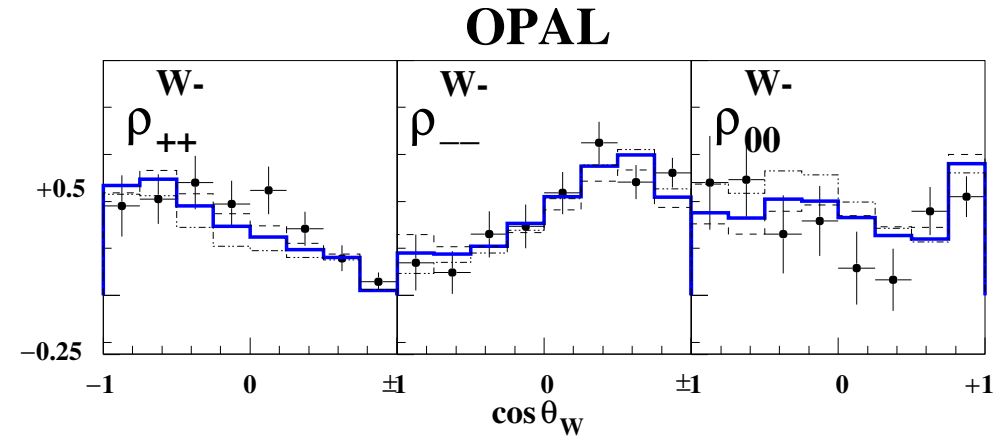
$$\sigma_L = \int \rho_{00} \frac{d\sigma_{tot}}{d\cos\theta} d\cos\theta$$

$$\sigma_T = \int (\rho_{++} + \rho_{--}) \frac{d\sigma_{tot}}{d\cos\theta} d\cos\theta$$

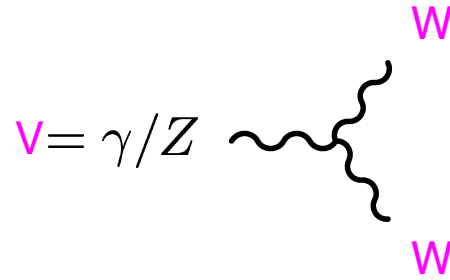
- Entfaltung der Zerfallswinkelverteilung: (L3)

$$\sigma_L/\sigma_{tot} = 0.21 \pm 0.03 \pm 0.02 \text{ (O, SM = 0.26)}$$

$$\sigma_L/\sigma_{tot} = 0.23 \pm 0.03 \pm 0.01 \text{ (L, SM = 0.24)}$$



Kopplungen des W-Bosons an andere Bosonen



Lagrangedichte des VWW-Vertex (nur CP erhaltende Terme niedrigster Dimension (**6 Kopplungen**):

$$i\mathcal{L}^{WWW} / g_{WWV} = g_1^V (W_{\mu\nu}^\dagger W^\mu V^\nu - W_\mu^\dagger V_\nu W^{\mu\nu}) + \kappa_V W_\mu^\dagger W_\nu V^{\mu\nu} + \frac{\lambda_V}{m_W^2} W_{\mu\nu}^\dagger W_\rho^\mu V^{\rho\nu}$$

Verlange $U(1)_{em}$ Eichinvarianz und $SU(2) \times U(1)$ Symmetrie (**fixiere 3 Kopplungen**):

$$g_1^\gamma = 1 \quad (q_W = \pm 1)$$

$$\kappa_Z = g_1^Z - (\kappa_\gamma - 1) \tan^2 \theta_W$$

$$\lambda_Z = \lambda_\gamma$$

Die verbleibenden **3 Kopplungen** werden bestimmt:

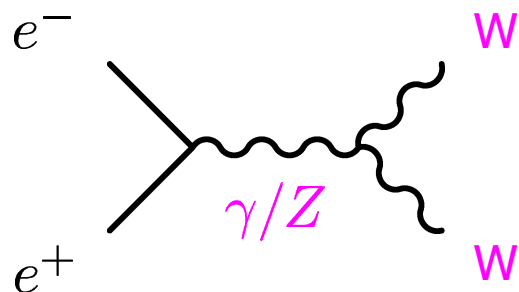
$$g_1^Z \quad (\text{SM} : 1) \quad \Delta g_1^Z = g_1^Z - 1 \quad (\text{SM} : 0)$$

$$\kappa_\gamma \quad (\text{SM} : 1) \quad \rightarrow \quad \Delta \kappa_\gamma = \kappa_\gamma - 1 \quad (\text{SM} : 0)$$

$$\lambda_\gamma \quad (\text{SM} : 0) \quad \lambda_\gamma \quad (\text{SM} : 0)$$

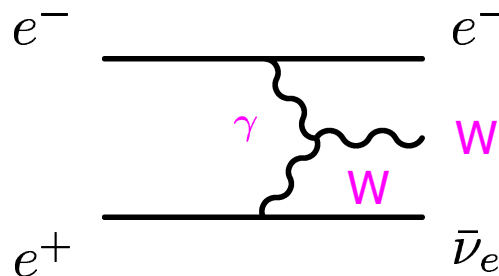
Kopplungen des W-Bosons an andere Bosonen: Beteiligte Prozesse

W-Paarproduktion



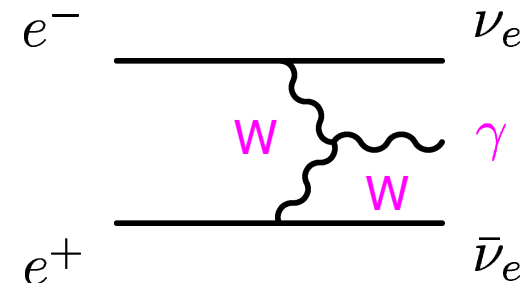
- Beiträge von γ und Z
- Alle drei Kopplungen λ_γ , κ_γ und g_1^Z können bestimmt werden (g_1^Z und λ_γ besonders gut)
- **Sensitivster Kanal**

Einzelne W-Bosonen



- Hauptsächlich nur Kopplung durch Photon
- Sensitivität auf κ_γ etwa vergleichbar mit der W-Paarproduktion
- Geringe Sensitivität auf λ_γ

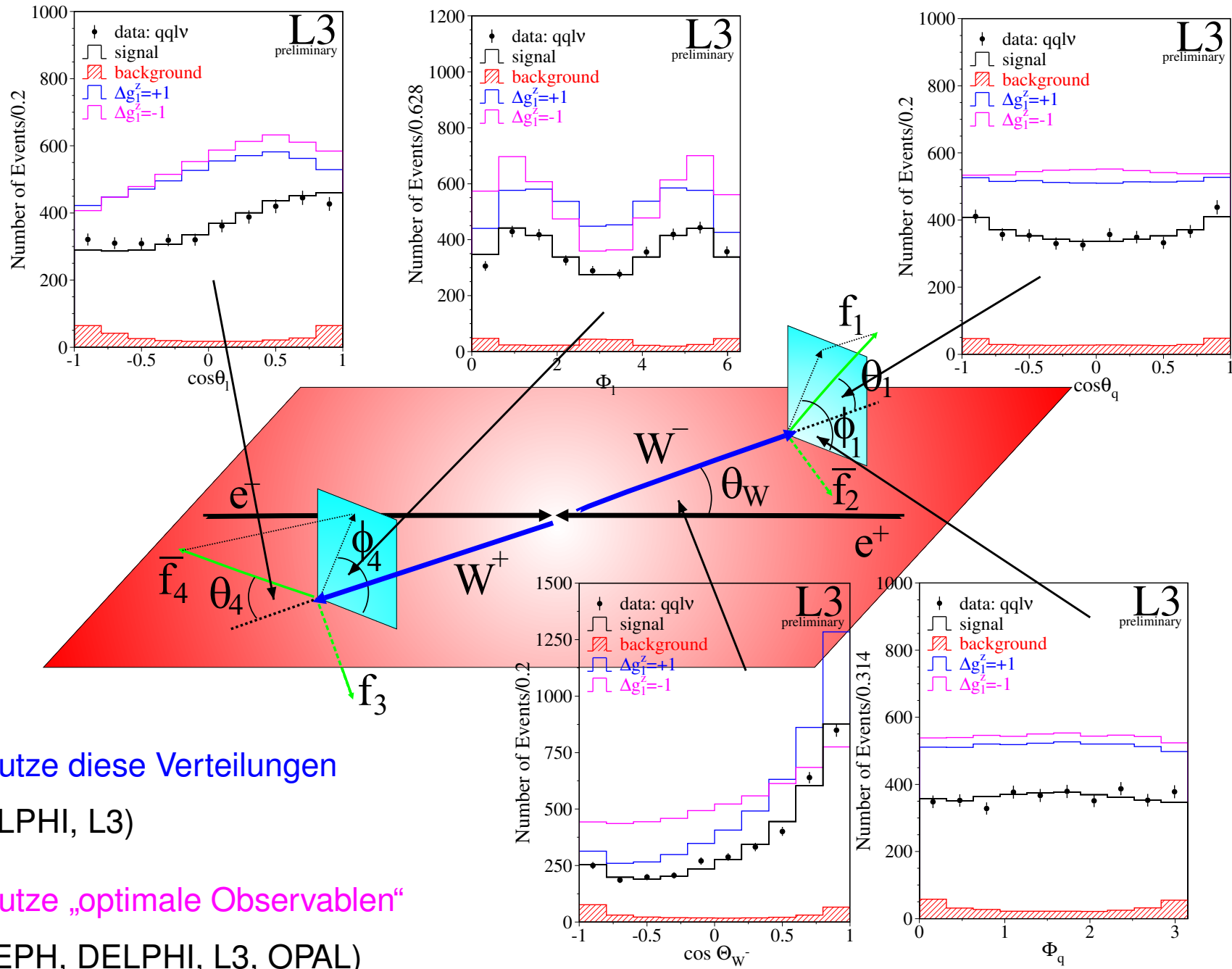
Einzelne Photonen



- Zwei schwere Bosonen müssen abgestrahlt werden
- **Geringe Sensitivität** auf alle Kopplungen

→ Vortrag von Daniela Käfer

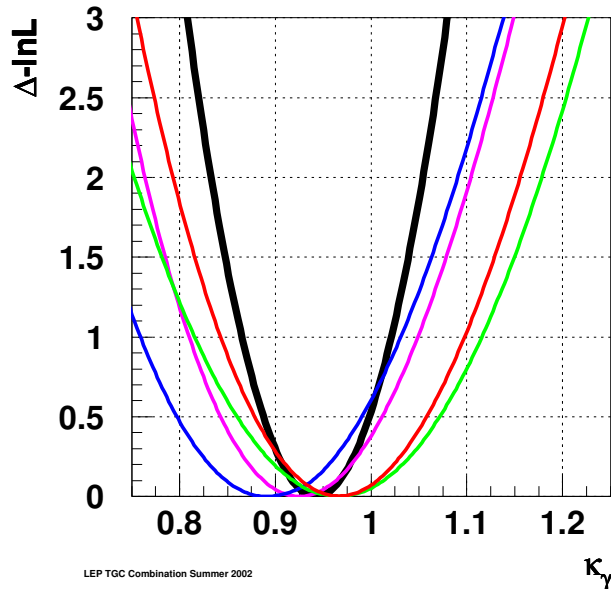
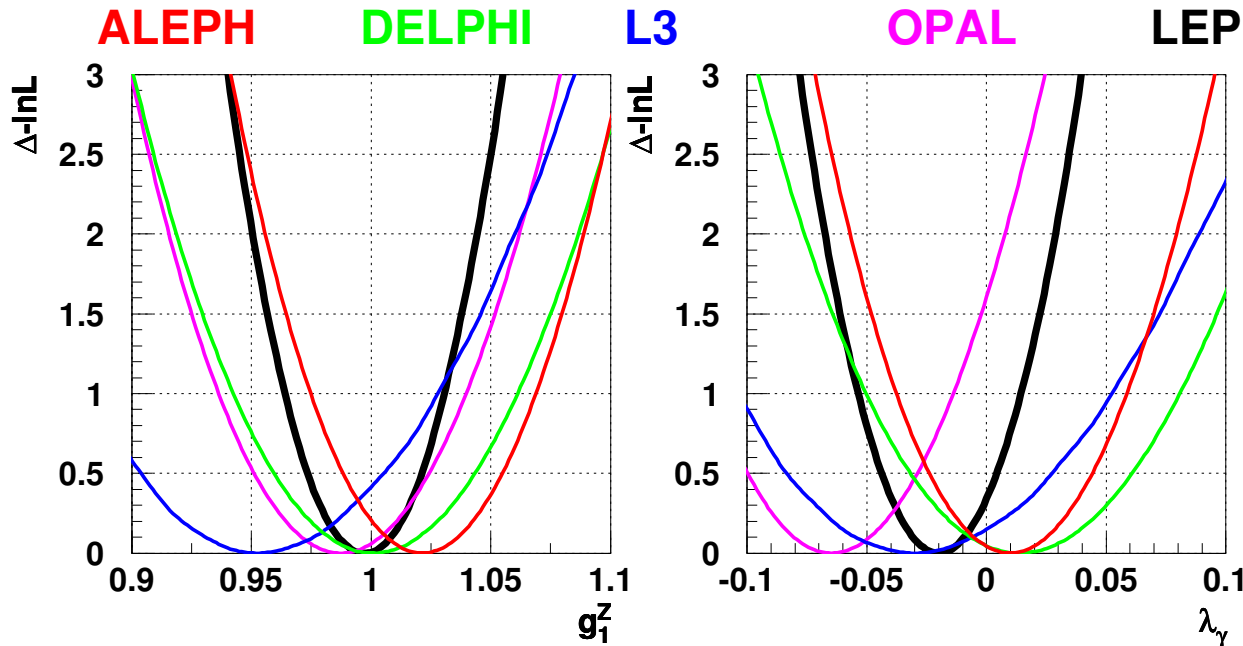
Kopplungen des W-Bosons an andere Bosonen: Messmethode



- Benutze diese Verteilungen
(DELPHI, L3)
- Benutze „optimale Observablen“
(ALEPH, DELPHI, L3, OPAL)

Kopplungen des W-Bosons an andere Bosonen: Ein-Parameter-Fit

Verbesserungen Moriond 2002:

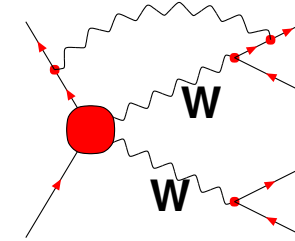


LEP TGC Combination Summer 2002

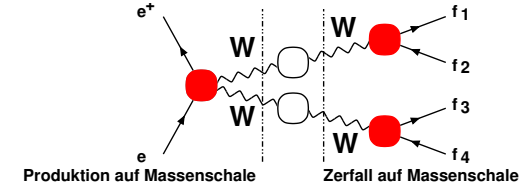
LEP preliminary

$$\begin{aligned} \kappa_\gamma &= 0.943^{+0.055}_{-0.055} \\ \lambda_\gamma &= -0.020^{+0.024}_{-0.024} \\ g_1^Z &= 0.998^{+0.023}_{-0.025} \end{aligned}$$

$\mathcal{O}(\alpha)$ -Korrekturen



DPA

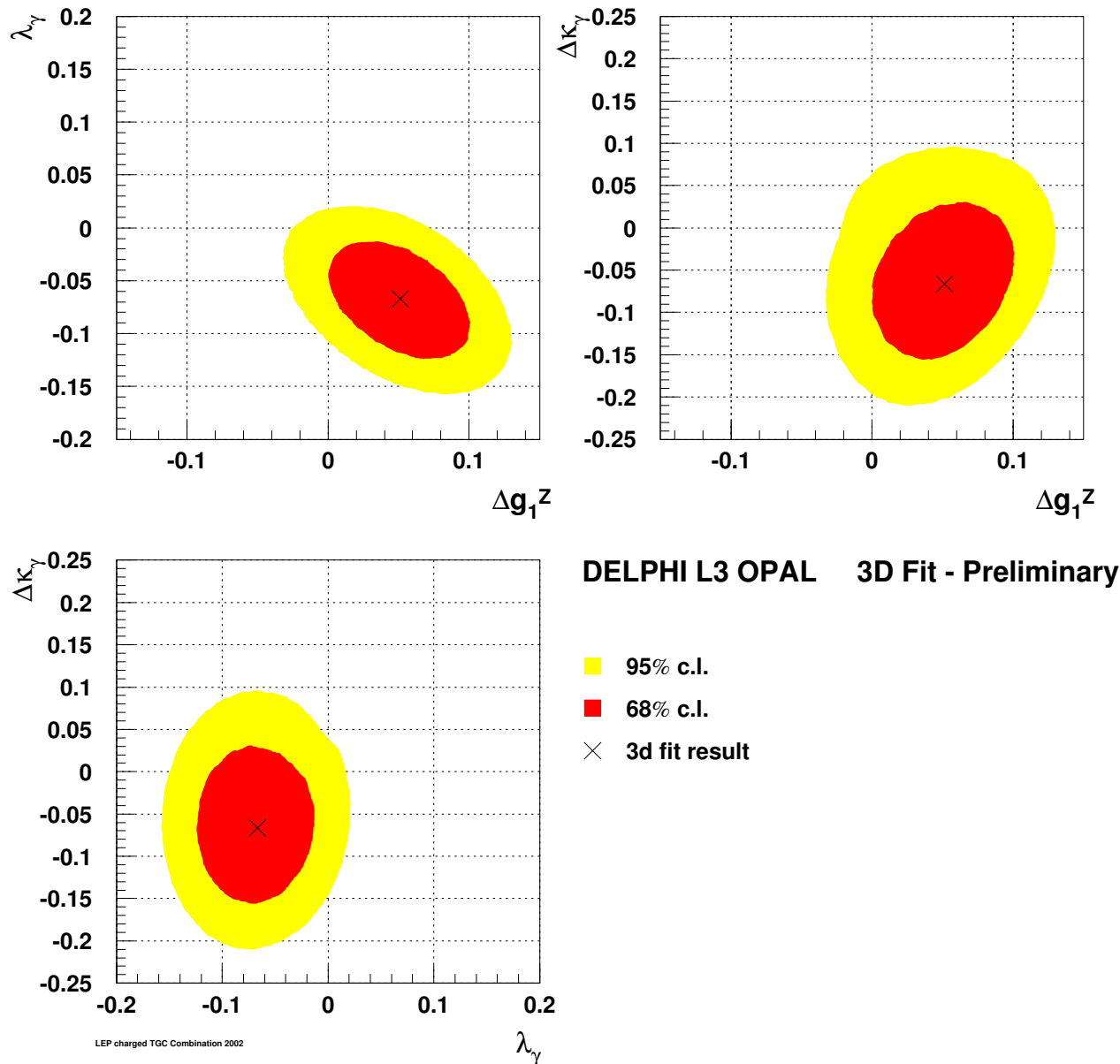


Neu Sommer 2002:

- Neue Resultate von OPAL (Kanäle) und ALEPH (Systematik)
- Größte korrelierte Systematik: $\mathcal{O}(\alpha)$ -Korrekturen

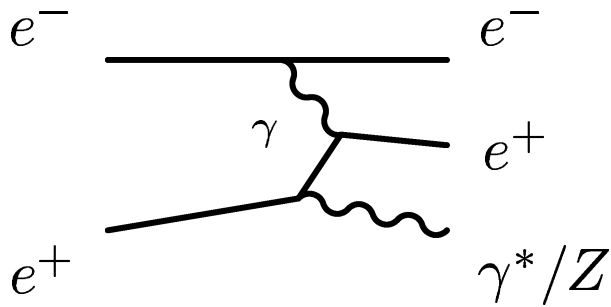
→ Besseres Verständnis des Theoriefehlers

Kopplungen des W-Bosons an andere Bosonen: Mehr-Parameter-Fit

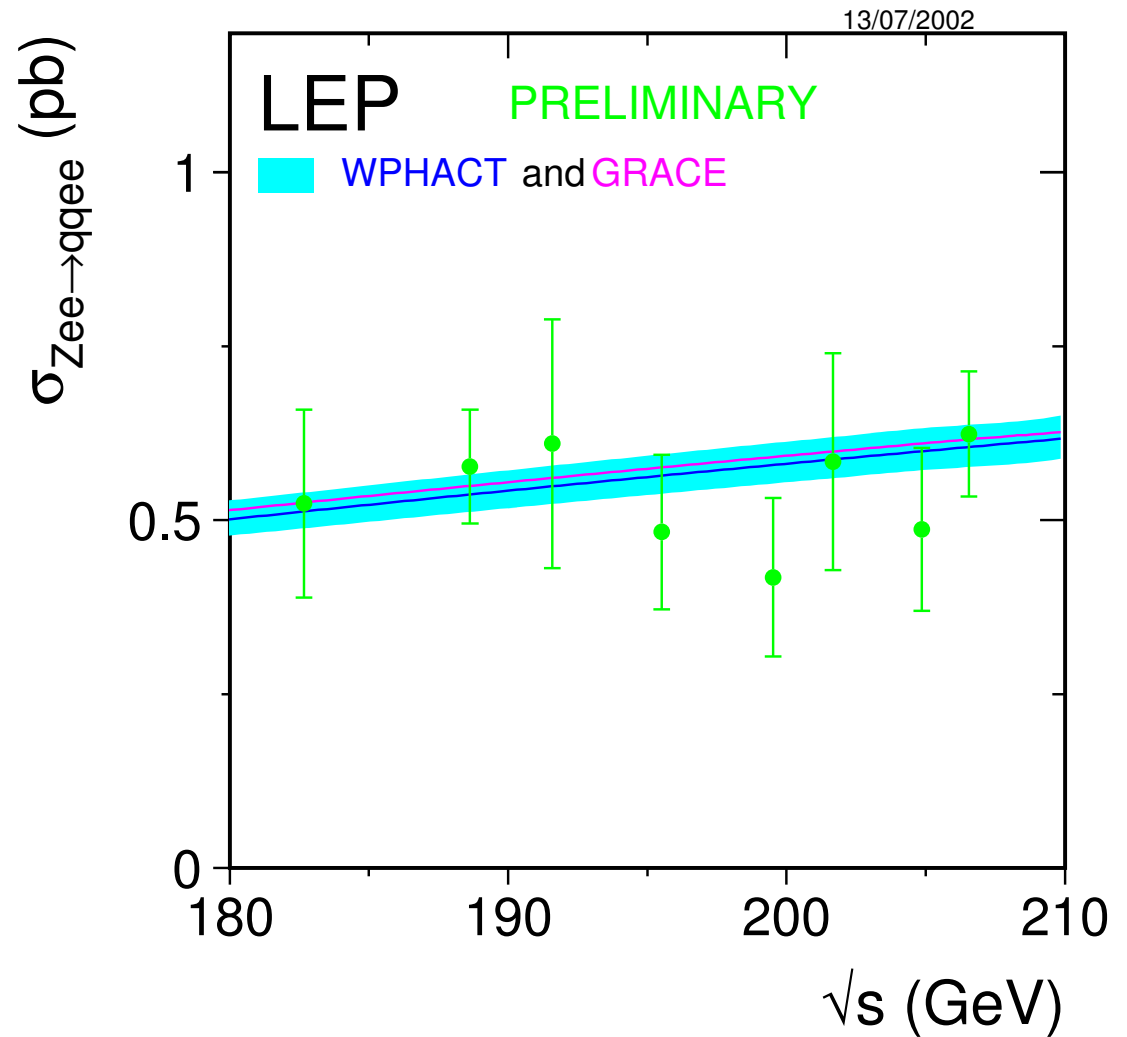


- Erster **Zwei-** (bzw. **Drei-**) Parameter-Fit seit 2000 (DPA)
- Alle drei Kopplungen frei: g_1^Z , κ_γ , λ_γ
- Gezeigte Konturen für **dritten Parameter im Minimum**
- Verbesserte Behandlung der **Systematik**: Bestimmung gleichzeitig **mit statistischer Komponente**

Einzelne Z-Bosonen

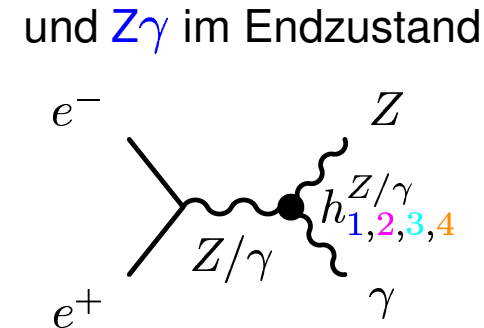
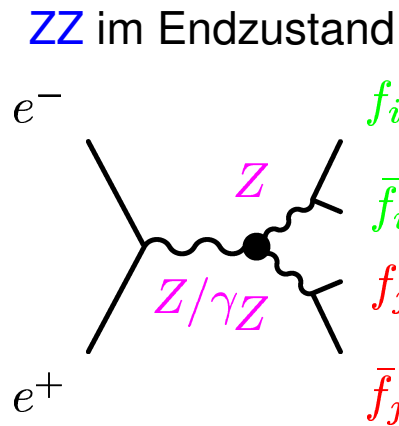


- Erste LEP-Kombination
- Kanäle: $qqee$, $\mu\mu ee$
- Signaldefinition nötig
- DELPHI, L3: $qqee$
- ALEPH, DELPHI: $\mu\mu ee$
- Präzision 8% auf σ_{Zee}/σ_{SM}



Kopplungen dreier neutraler Bosonen

Untersucht wird



- $h_1^{Z/\gamma}$, $h_2^{Z/\gamma}$ und $f_4^{Z/\gamma}$ verletzen CP
- $h_3^{Z/\gamma}$, $h_4^{Z/\gamma}$ und $f_5^{Z/\gamma}$ erhalten CP

→ Alle diese Kopplungen **verschwinden im Standardmodell** auf Baumniveau

Ähnlich wie bei den Kopplungen des W-Bosons, fordert $SU(2) \times U(1)$ -Symmetrie (hep-ph/0111283):

$$f_5^{Z/\gamma} = h_3^{Z/\gamma} \tan \theta_W$$

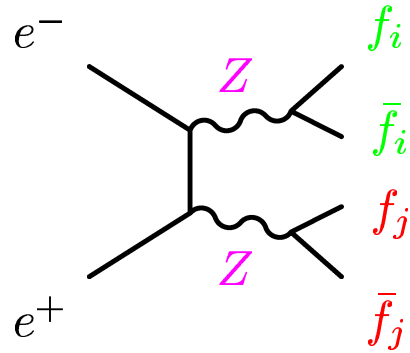
$$f_4^{Z/\gamma} = h_1^{Z/\gamma} \tan \theta_W$$

(wird bisher noch nicht berücksichtigt)

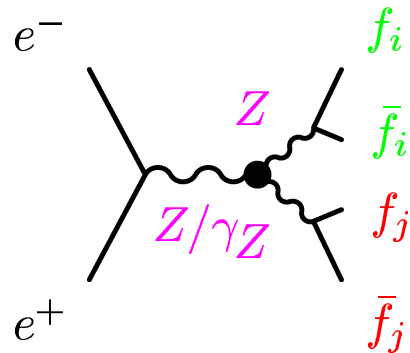
Keine neuen Resultate seit Sommer 2001!

Z-Paarproduktion

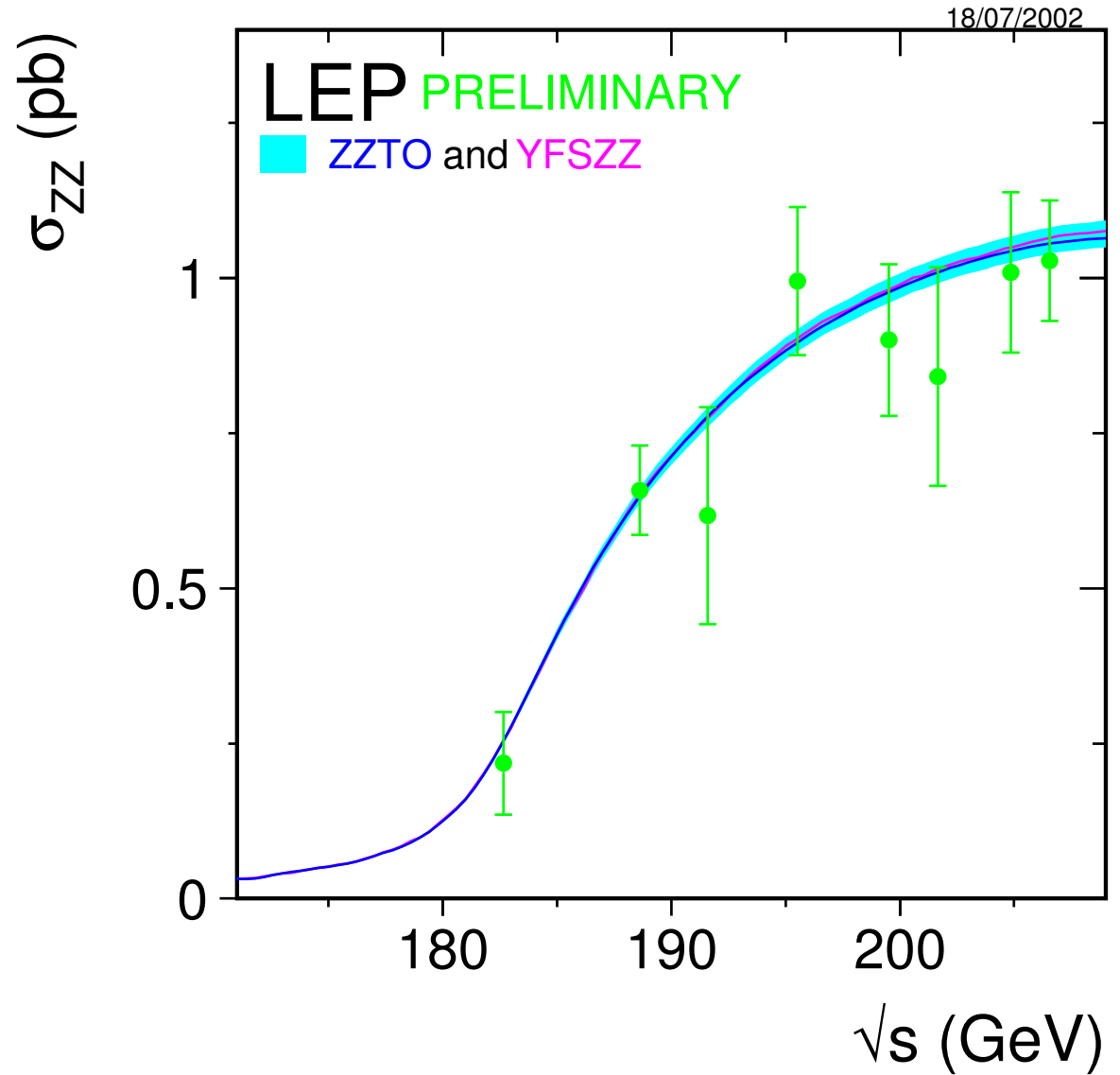
Standard-Modell



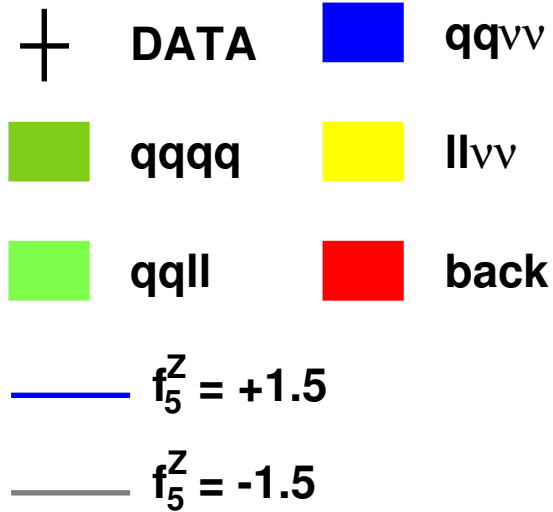
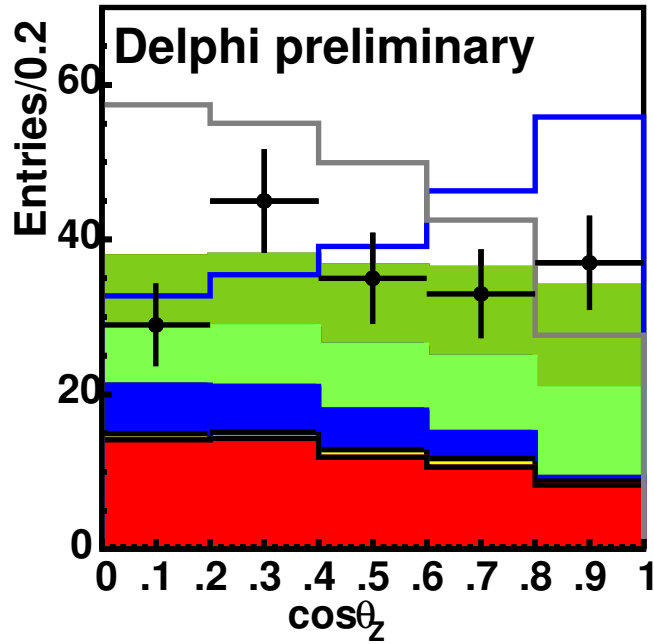
Anomale Kopplungen



- **Neu:** Korrelierte Fehler unterschieden für LEP und Energie
- **Neu:** DELPHI und L3
- Genauigkeit von 5% auf σ_{ZZ}/σ_{SM}



Kopplungen dreier neutraler Bosonen: ZZ und die f -Kopplungen

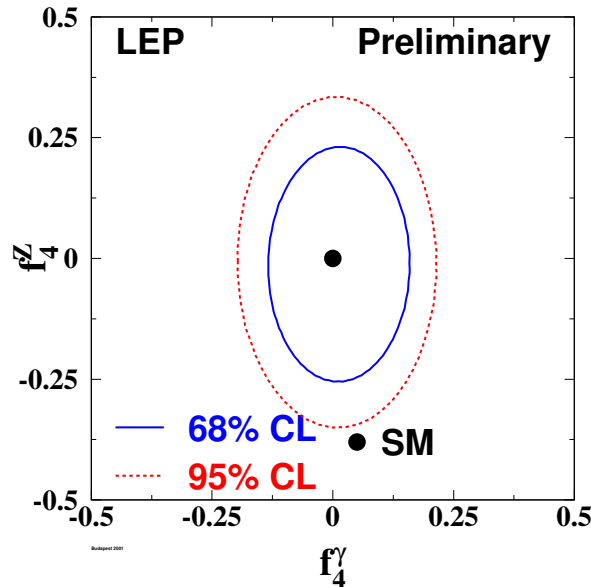
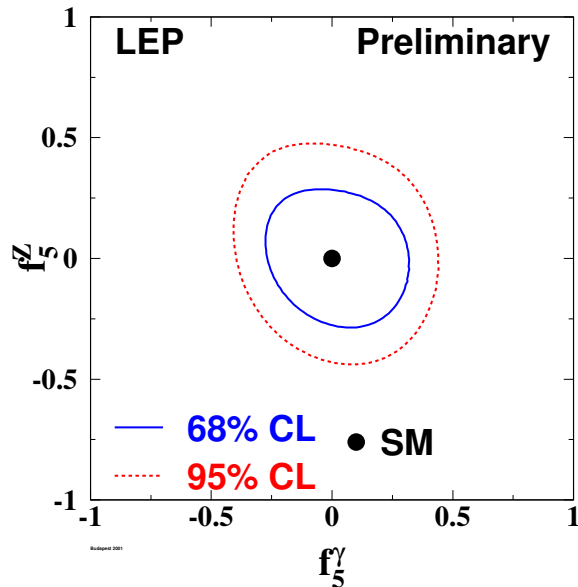


Limits mit 95% CL:

CP

$$f_5^\gamma \quad [-0.36, 0.40]$$

$$f_5^Z \quad [-0.36, 0.39]$$

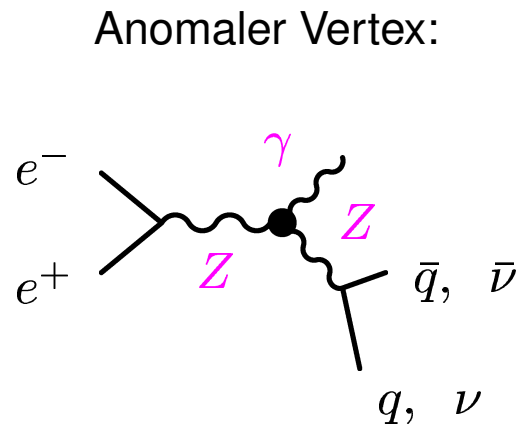
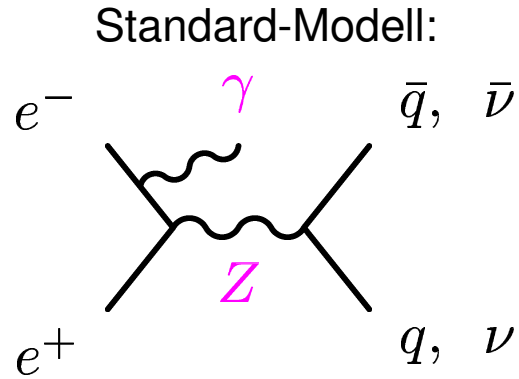


~~CP~~

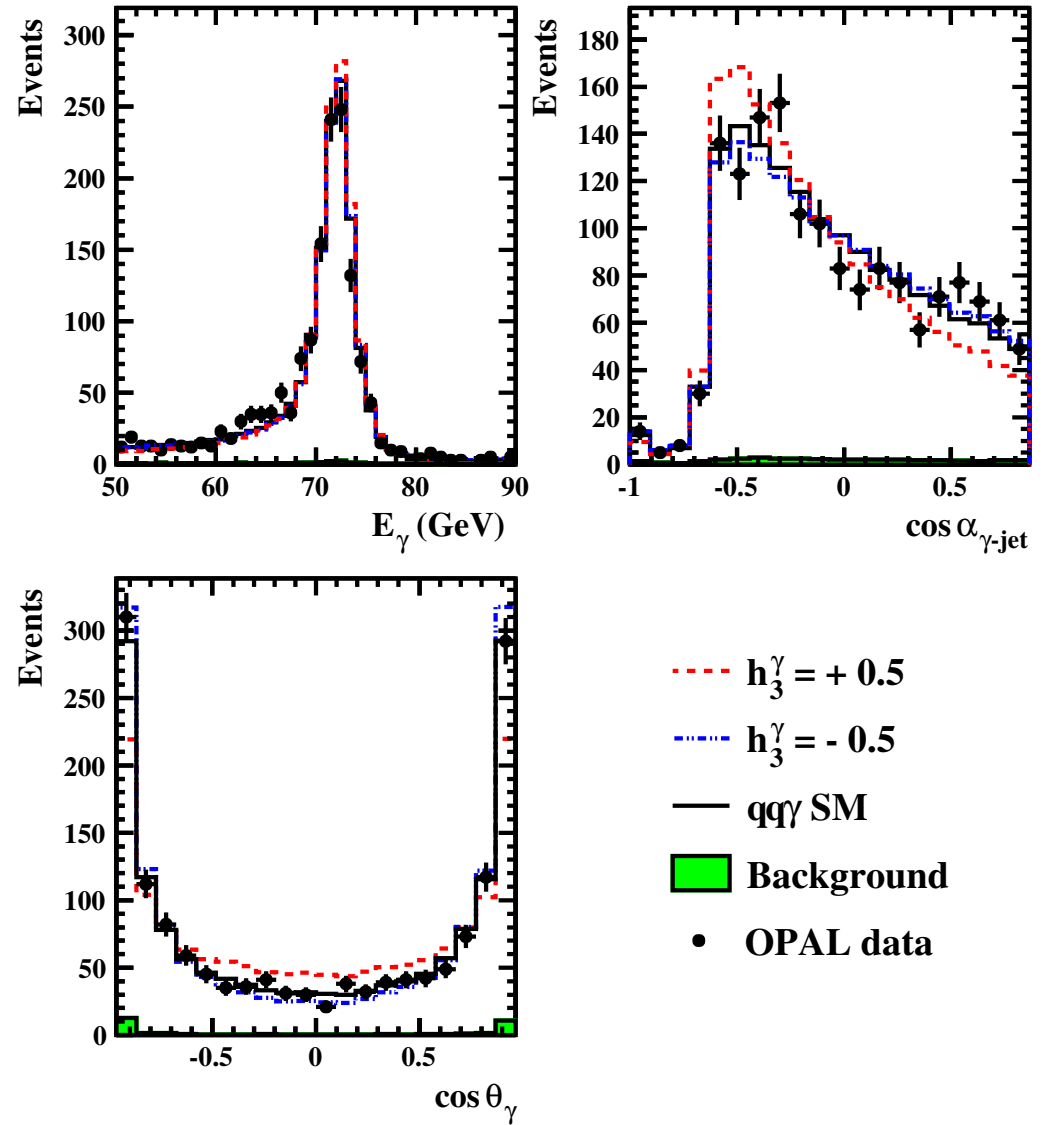
$$f_4^\gamma \quad [-0.17, 0.19]$$

$$f_4^Z \quad [-0.31, 0.28]$$

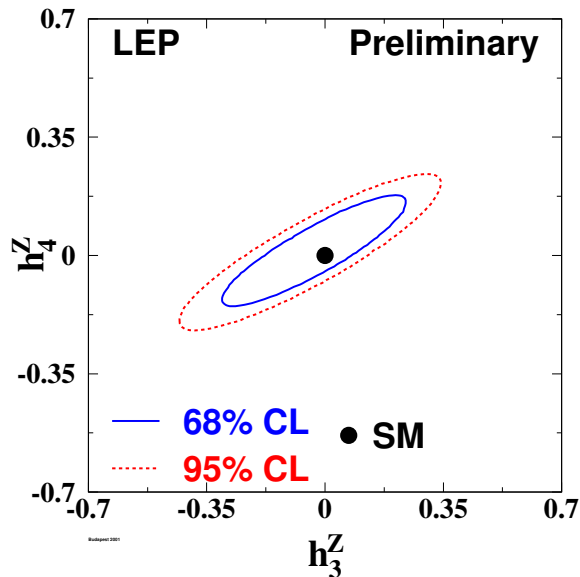
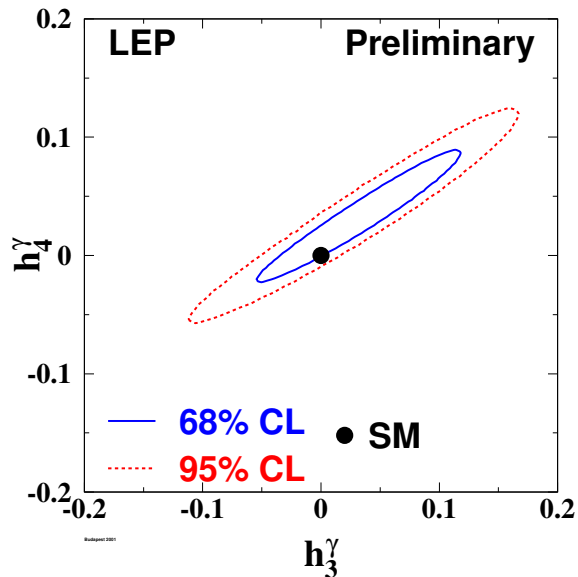
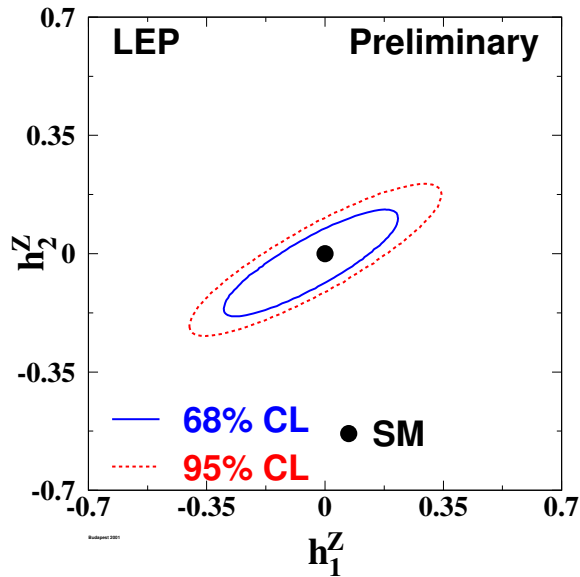
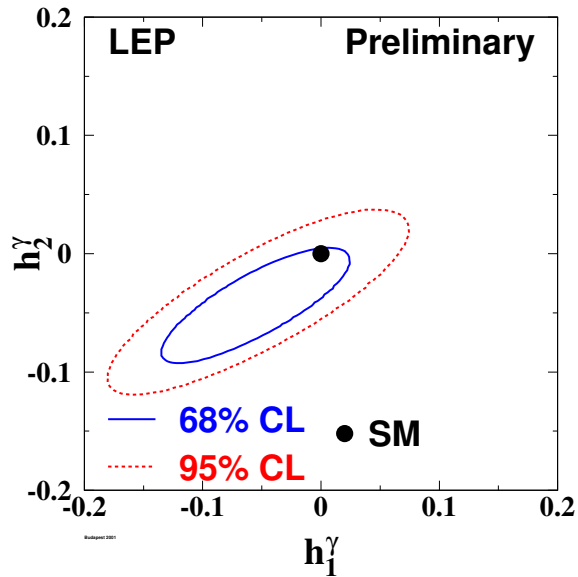
Kopplungen dreier neutraler Bosonen: $Z\gamma$



OPAL 189 GeV



Kopplungen dreier neutraler Bosonen: $Z\gamma$



Grenzen mit
95% CL:

~~*CP*~~

$$h_1^\gamma \quad [-0.056, 0.055]$$

$$h_2^\gamma \quad [-0.045, 0.025]$$

$$h_1^Z \quad [-0.130, 0.130]$$

$$h_2^Z \quad [-0.078, 0.071]$$

CP

$$h_3^\gamma \quad [-0.049, 0.008]$$

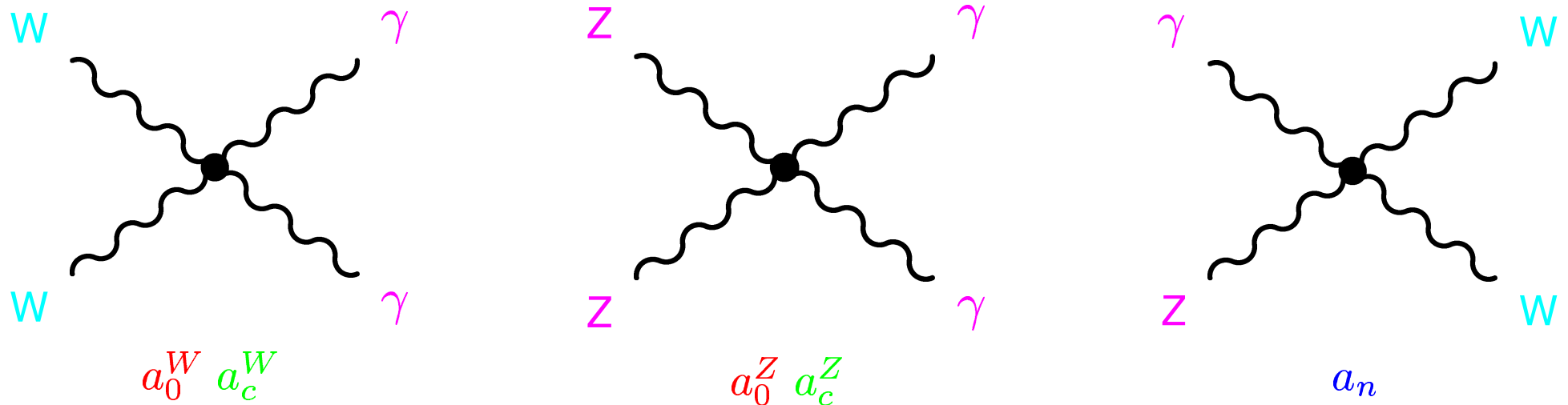
$$h_4^\gamma \quad [-0.002, 0.034]$$

$$h_3^Z \quad [-0.200, 0.070]$$

$$h_4^Z \quad [-0.050, 0.120]$$

Anomale Kopplungen von vier Bosonen

Betrachte die folgenden Vertizes:

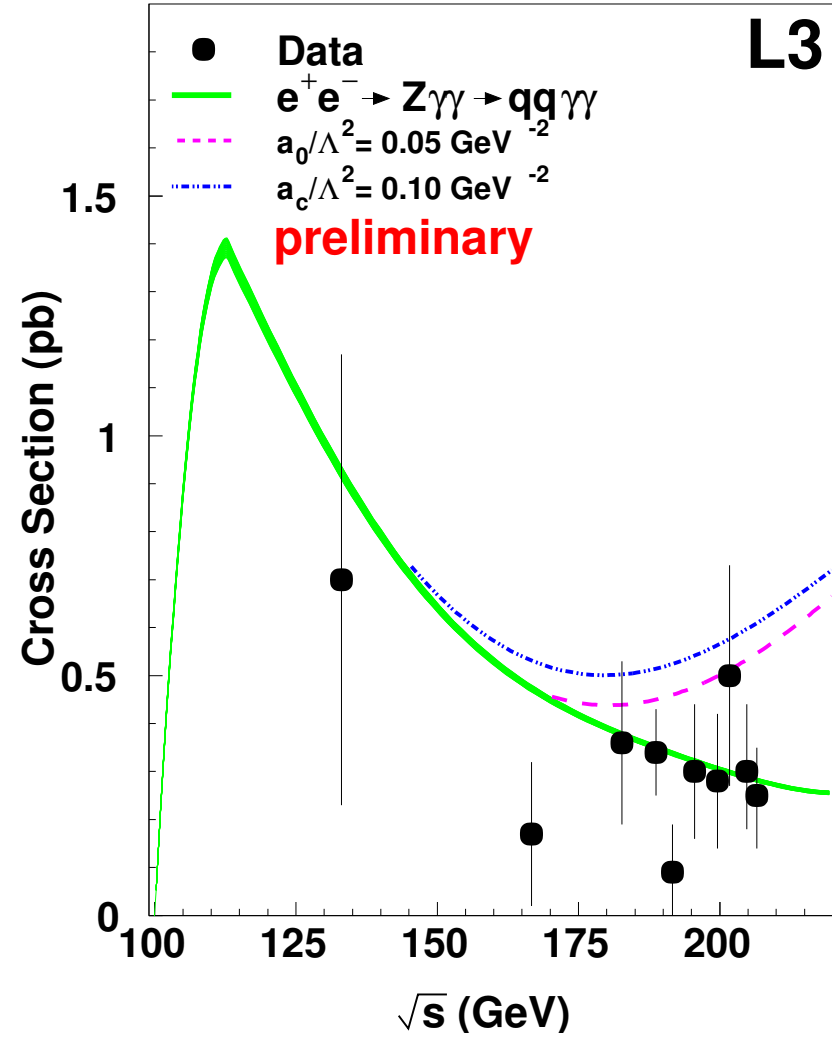
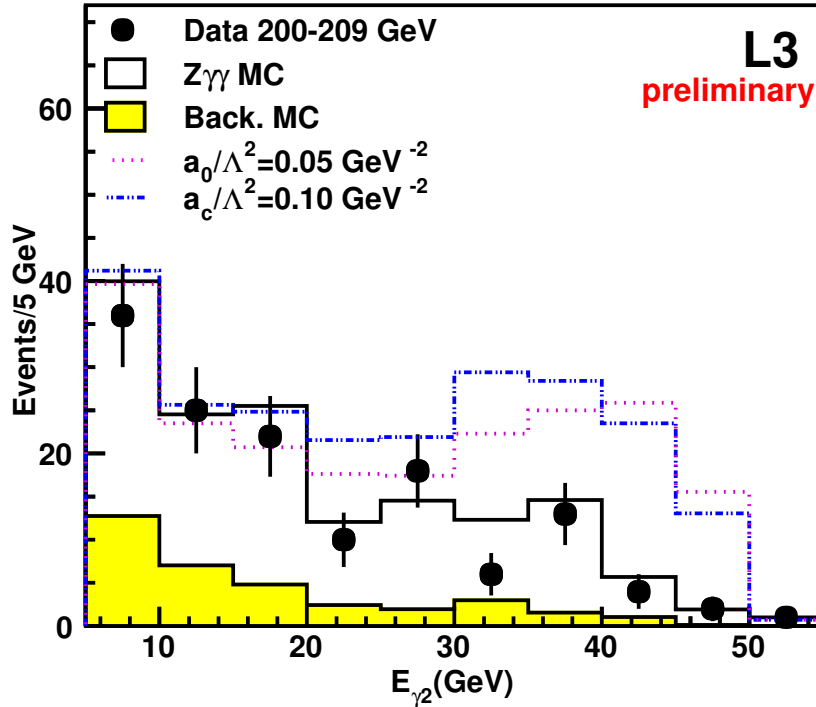
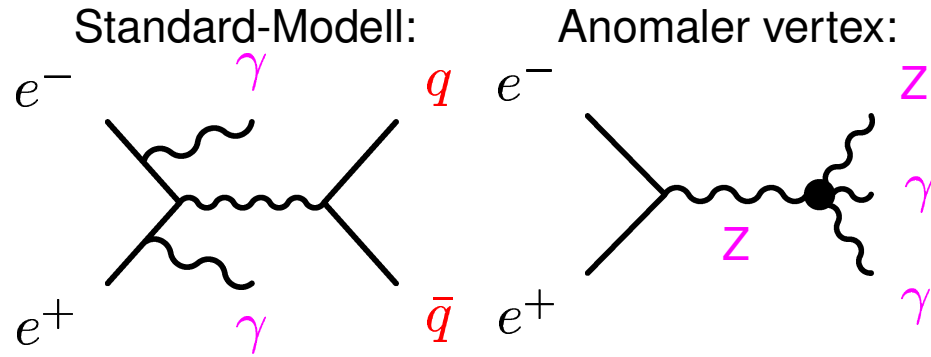


Anomale Beiträge zu diesen Vertizes sind:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_0 &= -\frac{e^2}{16} \frac{a_0^{W,Z}}{\Lambda^2} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} \vec{W}^\alpha \vec{W}_\alpha && WW\gamma\gamma, ZZ\gamma\gamma \\
 \mathcal{L}_c &= -\frac{e^2}{16} \frac{a_c^{W,Z}}{\Lambda^2} F^{\mu\alpha} F_{\mu\beta} \vec{W}^\beta \vec{W}_\alpha && WW\gamma\gamma, ZZ\gamma\gamma \\
 \mathcal{L}_n &= -\frac{e^2}{16} \frac{a_n}{\Lambda^2} \vec{W}_{\mu\alpha} \cdot (\vec{W}_\nu \times \vec{W}^\alpha) F^{\mu\nu} && WWZ\gamma
 \end{aligned}$$

- Λ ist die Skala neuer Physik, bei der diese Phänomene erscheinen
- a_0 und a_c erhalten CP, aber a_n verletzt CP
- LEP-Konvention: Die Kopplungen des Z können von denen des W unterschiedlich sein

Anomale Kopplungen von vier Bosonen: $Z\gamma\gamma$

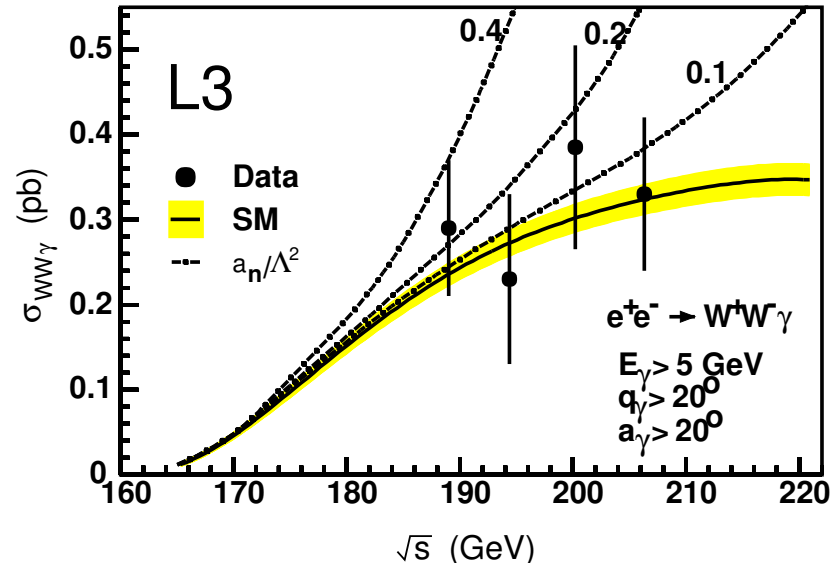
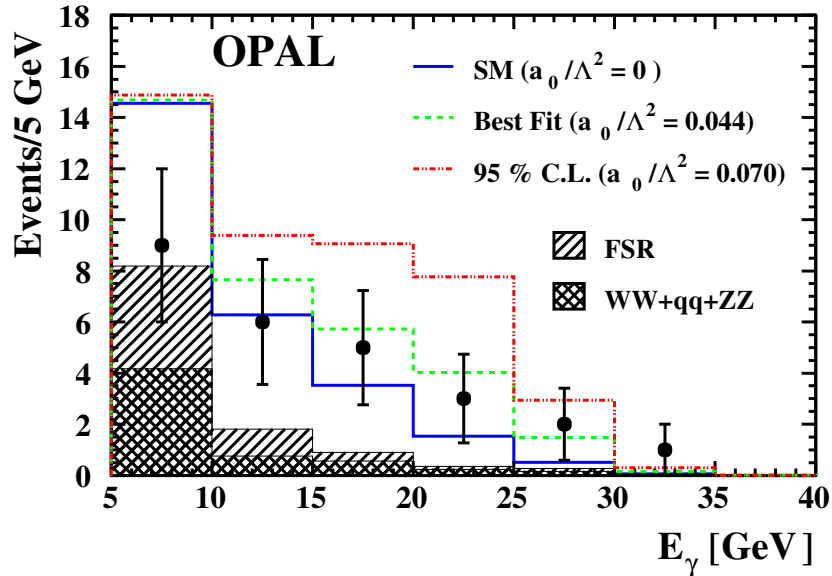
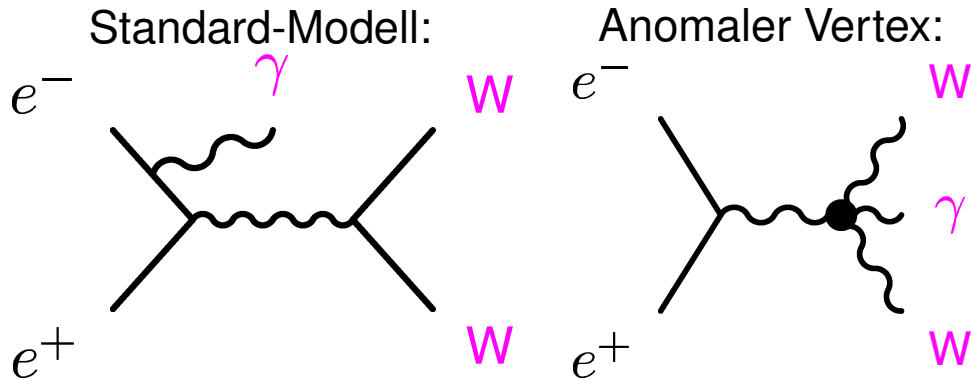


Neu: Kombination L3 $qq\gamma\gamma$, OPAL $\nu\nu\gamma\gamma$

$$-0.009 \leq a_0^Z / \Lambda^2 \times \text{GeV}^2 \leq 0.026$$

$$-0.033 \leq a_c^Z / \Lambda^2 \times \text{GeV}^2 \leq 0.046$$

Anomale Kopplungen von vier Bosonen: $WW\gamma$



L3-Limits mit 95% CL:

$$-0.02 \leq a_0^W / \Lambda^2 \times \text{GeV}^2 \leq 0.02$$

$$-0.05 \leq a_c^W / \Lambda^2 \times \text{GeV}^2 \leq 0.03$$

$$-0.14 \leq a_n / \Lambda^2 \times \text{GeV}^2 \leq 0.13$$

- LEP-Kombination „veraltet“
- Keine neue LEP-Kombination, nur neue L3-Resultate
- Diese würden LEP-Kombination dominieren

- Viele interessante **Vier-Fermion Prozesse** bei LEP
- **Eigenschaften des W-Bosons** können untersucht werden
- **Kopplungen von Bosonen** (normal & anomal) wurden gemessen
- **Keine neue Physik** gefunden
- **Das Standardmodell beschreibt die Natur weiterhin...**

Spindichtematrix

Amplitude für Produktion von W^- mit Helizität $\tau_- = -1, 0, 1$ und W^+ mit Helizität τ_+ ist $F_{\tau_- \tau_+}^{(\lambda)}(s, \cos \theta_W)$, wobei $\lambda = \pm 1/2$ die Helizität des einlaufenden e^- ist. Die Elemente der SDM ρ sind:

$$\rho_{\tau_- \tau'_- \tau_+ \tau'_+}(s, \cos \theta_W) = \frac{\sum_{\lambda} F_{\tau_- \tau_+}^{(\lambda)} (F_{\tau'_- \tau'_+}^{(\lambda)})^*}{\sum_{\lambda \tau_+ \tau_-} |F_{\tau_- \tau_+}^{(\lambda)}|^2}$$

Betrachte Einzelteilchendichte des W^- (begrenzte Statistik!):

$$\rho_{\tau_- \tau'_-}(s, \cos \theta_W) = \sum_{\tau_+} \rho_{\tau_- \tau'_- \tau_+ \tau'_+}(s, \cos \theta_W)$$

Dann, $\frac{d\sigma_L}{d\cos\theta} = \rho_{00} \frac{d\sigma}{d\cos\theta}$ und $\frac{d\sigma_T}{d\cos\theta} = (\rho_{++} + \rho_{--}) \frac{d\sigma}{d\cos\theta}$

Die Messung wird dann folgendermaßen durchgeführt:

$$\underbrace{\frac{d\sigma(e^+ e^- \rightarrow W^+ W^-)}{d\cos\theta_W}}_{\text{messen}} \rho_{\tau\tau'}^{W^-} = \underbrace{\frac{1}{\text{Br}(W \rightarrow \ell\nu)}}_{\text{messen}} \int \underbrace{\frac{d\sigma(e^+ e^- \rightarrow W^+ \ell^- \bar{\nu})}{d\cos\theta_W d\cos\theta^* d\phi^*}}_{\text{messen}} \Lambda_{\tau\tau'}(\theta^*, \phi^*) d\cos\theta^* d\phi^*$$