

Eigenschaften der W und Z Bosonen

30. Juni 1999

G. Duckeck

LMU München

LS Prof. D. Schaile

Einführung

Z^0 Physik bei LEP1 und SLD

W Paare bei LEP2

Interpretation

Standardmodell der elektroschwachen Wechselwirkung

Materie besteht aus Spin-1/2 Fermionen:

$$\begin{array}{ccc} 1 & 2 & 3 \\ \left(\begin{array}{c} \nu_e \\ e \\ u \\ d \end{array} \right) & \left(\begin{array}{c} \nu_\mu \\ \mu \\ c \\ s \end{array} \right) & \left(\begin{array}{c} \nu_\tau \\ \tau \\ t \\ b \end{array} \right) \end{array}$$

Wechselwirkungen durch Spin-1 Bosonen:

$$\gamma, Z^0, W^+, W^-, (\text{Gluonen})$$

Beschrieben durch Eichtheorie der elektroschwachen Wechselwirkung (Glashow–Salam–Weinberg).

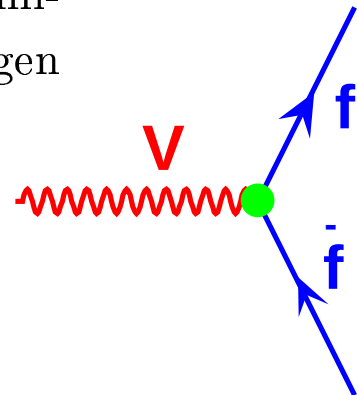
Higgs Boson für massive Vektorbosonen W, Z .

Auf Born-Niveau und für masselose Fermionen sind elektroschwache Wechselwirkungen vollständig bestimmt mit

$$\alpha \quad (0.04 \text{ ppm})$$

$$G_\mu \quad (10 \text{ ppm})$$

$$m_Z \quad (\rightarrow \text{LEP}).$$

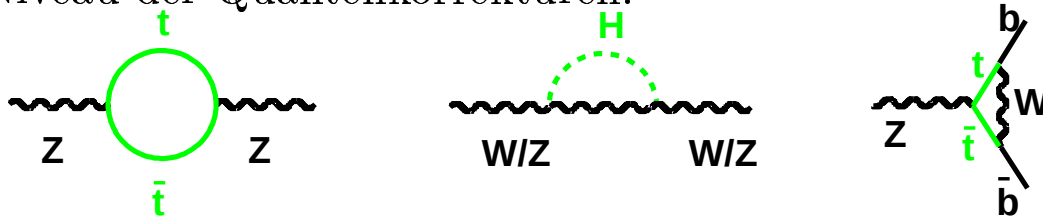


LEP/SLC e^+e^- Beschleuniger gebaut um Z^0, W präzise zu untersuchen.

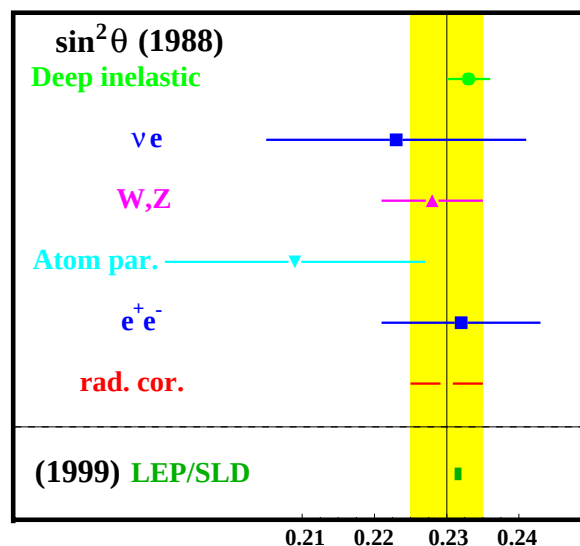
Strahlungskorrekturen

Quantenfluktuationen beeinflussen die vorhergesagten Massen und Kopplungen.

- Präzisionsmessungen erlauben Tests der Theorie auf Niveau der Quantenkorrekturen.



- Elektroschwache Wechselwirkung $\neq$ QED:
Schwere Teilchen wie top quark, Higgs Boson haben Effekte bei Energie $\ll m_t, m_H$.
→ $m_t^2, \log(m_H)$ Abhängigkeit vieler Observablen, $\mathcal{L}(\alpha, G_\mu, m_Z, m_t, m_H, \alpha_s)$.
- Analog Beiträge neuer Teilchen mit $m_X \gg E_{CM}$ über Strahlungskorrekturen.
→ Fenster zu Physik jenseits des Standardmodell.



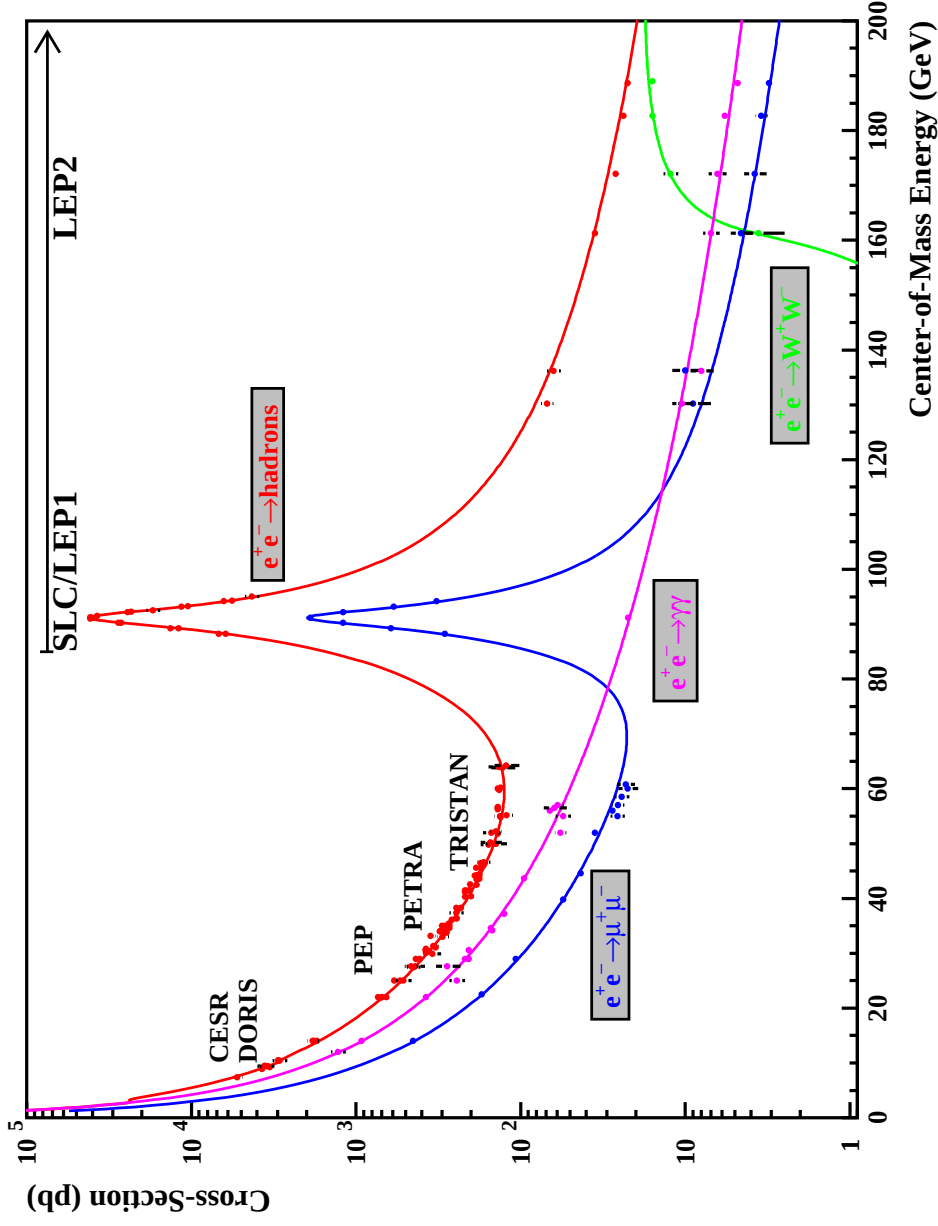
LEP und SLC

SLC/SLD: 1989–98
 91 GeV , polarisierter e^- Strahl
 $0.5 \cdot 10^6 \text{ Z}^0$

LEP Experimente:
 $\text{ALEPH, DELPHI, L3, OPAL}$

LEP1: 1989–95
 $91 \pm 3 \text{ GeV}$
 $4 \times 4 \cdot 10^6 \text{ Z}^0$

LEP2: Seit 1996
 $161 - 200 \text{ GeV}$
 $4 \times 3000 \text{ W}^+ \text{W}^-$



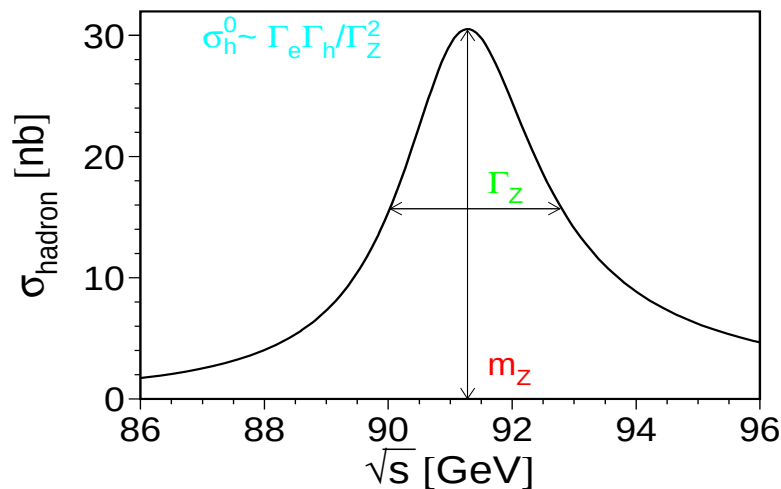
Messungen am Z^0

Z^0 Eigenschaften:

Masse und totale Breite m_Z, Γ_Z

Z^0 -Fermion Kopplungen: g_V^f, g_A^f

$$g_A^f = \sqrt{\rho} I_3^f, \quad g_V^f = \sqrt{\rho} (I_3^f - 2Q_f \kappa \sin^2 \theta_W)$$



Experimentelle Observablen

- Form der Z^0 Resonanz $\rightarrow m_Z, \Gamma_Z$
- Pol-Wirkungsquerschnitt $\rightarrow$ Partialbreiten Γ_f

$$\Gamma_f = \frac{G_\mu m_Z^3 N_c^f}{6\pi\sqrt{2}} \left((g_V^f)^2 + (g_A^f)^2 \right)$$

- Ladungs- und Polarisations-Asymmetrien
 $\rightarrow$ Kopplungsasymmetrien $\mathcal{A}_f$

$$\mathcal{A}_f = 2 \frac{g_V^f / g_A^f}{1 + (g_V^f / g_A^f)^2}$$

Z Physik – Wirkungsquerschnitte

Experimentell:

$$\sigma_f(\sqrt{s}) = \frac{N_{\text{sel}}^f - N_U}{\varepsilon \int \mathcal{L} dt}$$

Drei Messungen

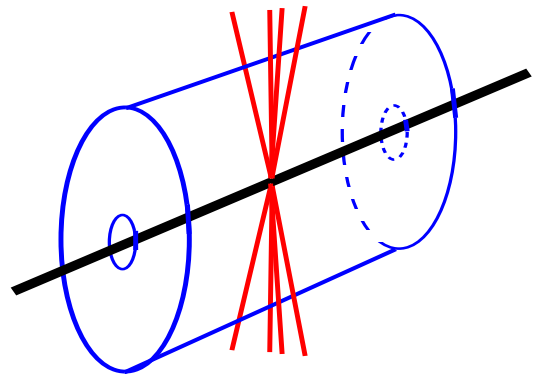
- Selektion N_{sel}^f , N_U , ε
- Luminosität $\int \mathcal{L} dt$
- Schwerpunktsenergie $\sqrt{s}$

Herausforderung: Statistischer Fehler $\frac{\Delta N}{N} = 5 \cdot 10^{-4}$

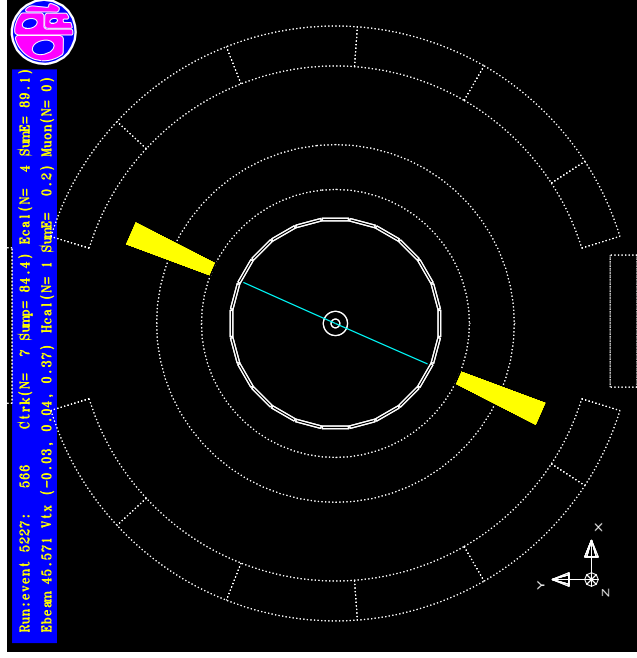
Ereignisselektion

Klare Signaturen für e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$, $q\bar{q}$.

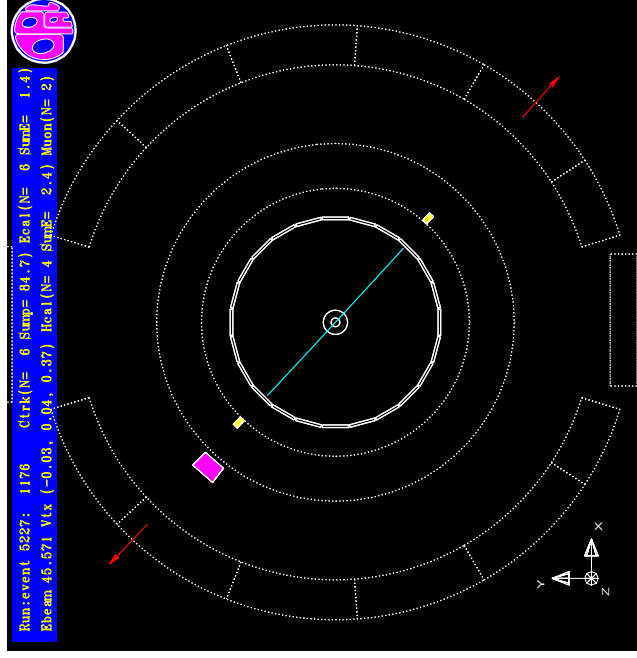
- $\varepsilon \approx 99\%$ für
 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$
- $\varepsilon \approx$ geom. Akzeptanz
für $e^+e^- \rightarrow$
 e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$
- Untergrund $\mathcal{O}(0.1\text{--}1\%)$



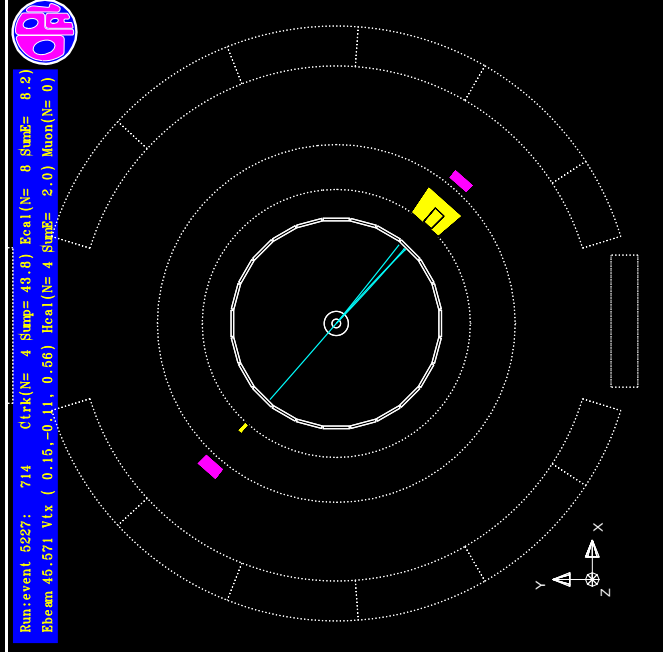
e^+e^-
(3.3 %)



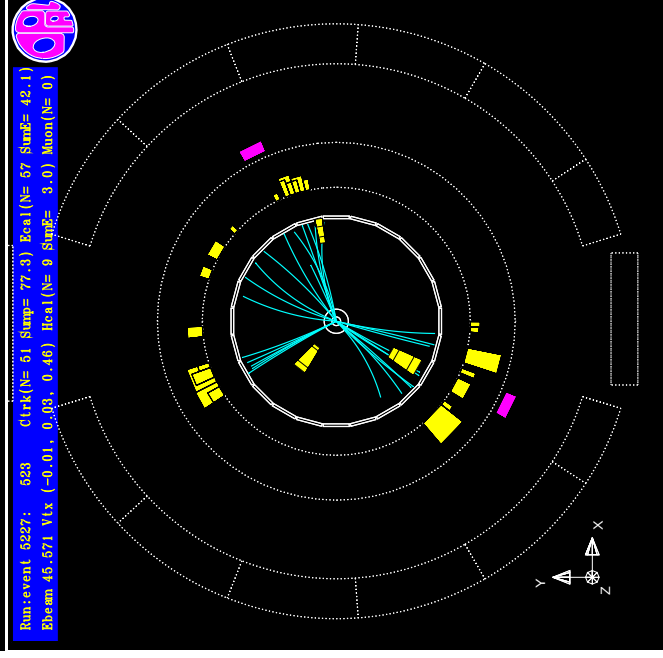
$\mu^+\mu^-$
(3.3 %)



$\tau^+\tau^-$
(3.3 %)



$q\bar{q}$
(70 %)



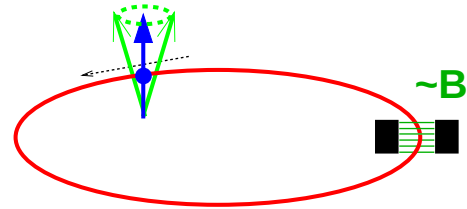
LEP Energiemessung

Im Prinzip $E_{\text{beam}} = \oint B dl$, aber ca. 3000 Dipolmagnete und 500 Quadrupol- und Sextupolmagnete.

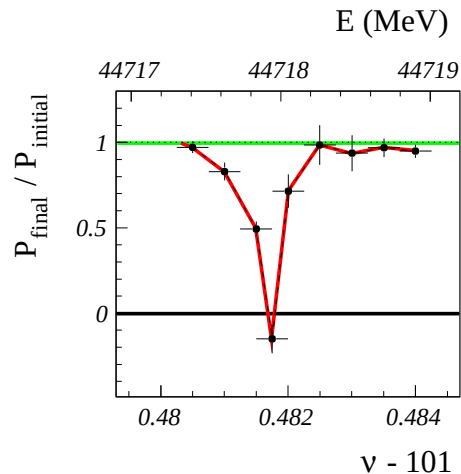
E_{beam} aus $g - 2$ Experiment:

Synchrotronstrahlung bewirkt transversale Polarisierung in e^+e^- -Ring. Frequenz der Spinpräzession $\rightarrow E_{\text{beam}}$.

$$\nu_s = \frac{1}{2}(g_e - 2) \frac{E_{\text{beam}}}{m_e c^2}$$



Resonante Depolarisation mit Störfeld, intrinsische Genauigkeit $\mathcal{O}(0.1 \text{ MeV})$



Aber:

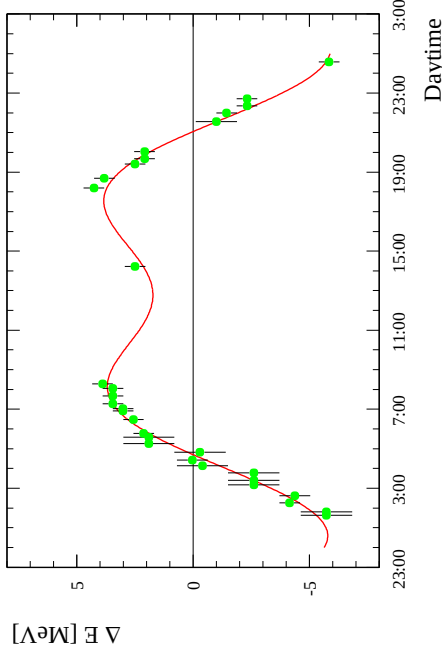
- Spezielle LEP Konfiguration nötig, nicht während Datennahme.
- Zeitliche Stabilität ?
- Resonante Depolarisation mißt mittlere Energie
 $\langle E_{\text{beam}} \rangle = E_{\text{WW}} \quad ?$

LEP Energiemessung

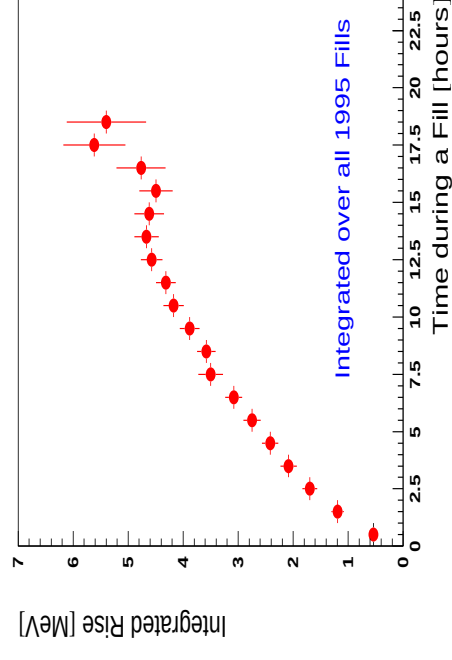
Viele subtile Effekte $\mathcal{O}(1\text{MeV})$ auf E_{beam} .



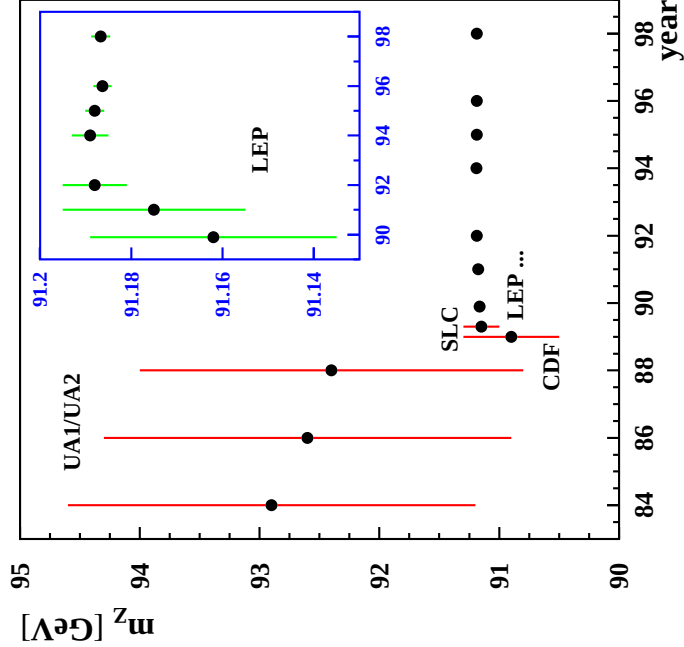
Gezeiten und geologische Effekte
führen zu kleinen Deformationen
des LEP Ringes.
→ Beiträge von Fokussiermag-
neten zur Krümmung



Eisenbahnverkehr bei Genf
verursacht Leckströme die durch
den LEP Ring zurücklaufen
und eine Drift der Dipolfelder
bewirken.



Z⁰ Masse



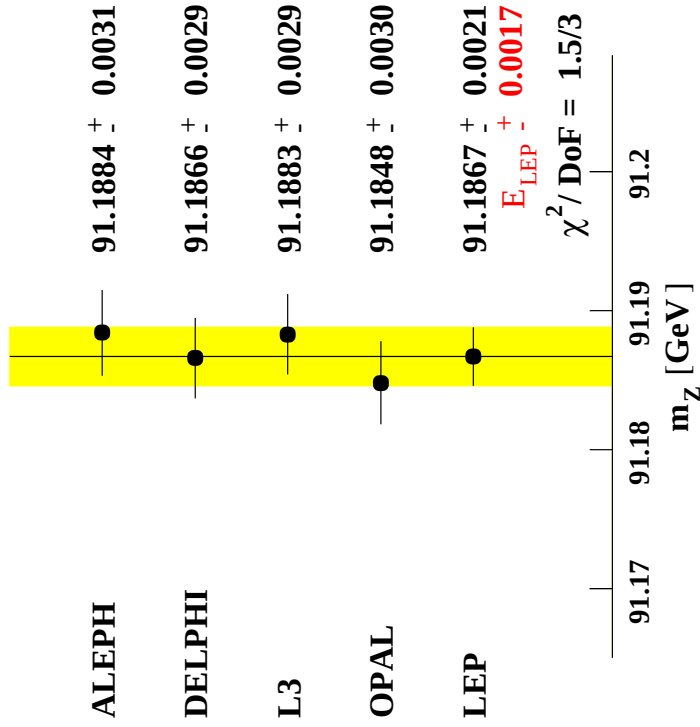
m_Z auf 20 ppm genau

→ Präzisionskonstante wie α , G_μ

Zur Zeit kein Test beschränkt durch

Δm_Z , aber z.B. e^+e^- linear collider

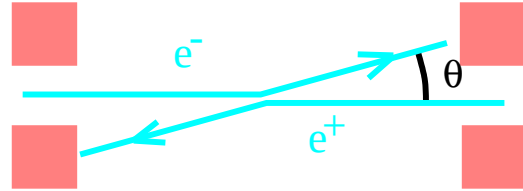
Δm_W $\mathcal{O}(5\text{--}10\text{ MeV})$.



Luminositätsmessung

Kleinwinkel-Bhabha Streuung als Referenz:

- $\mathcal{L} = \frac{N_{bhabha}}{\sigma_{theor}}$
- Genau berechenbar in
QED
- Hohe Statistik

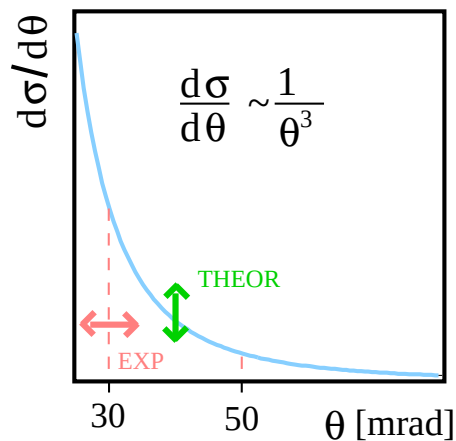


Entscheidend:

Innere Akzeptanzgrenze

$$\Delta R_{in} = 25 \mu m$$

$$\rightarrow \frac{\Delta L}{L} \approx 1 \cdot 10^{-3}$$



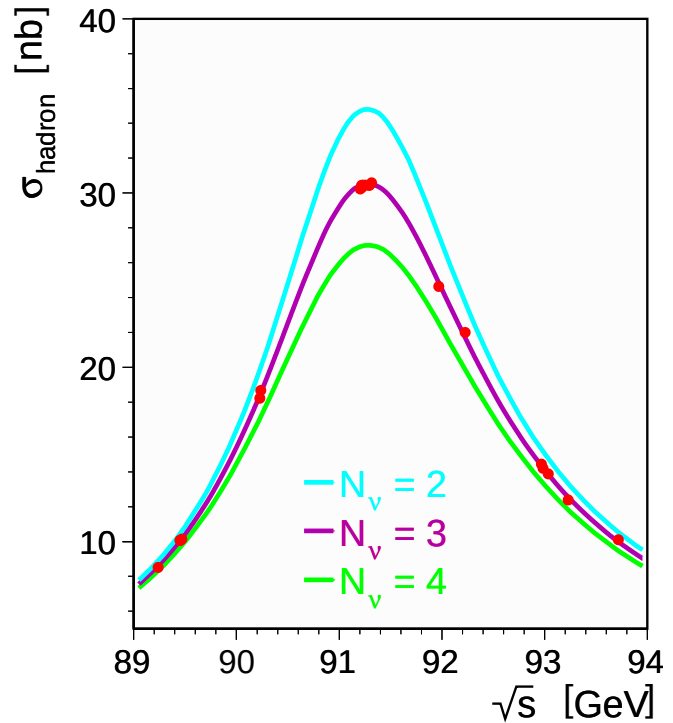
- Design-Spezifikation (1985) der LEP Detektoren
 $\frac{\Delta L}{L} = 2 \%$
- In 1992 erreicht $\frac{\Delta L}{L} = 0.5 \%$
- Neukonstruktion der Luminositätsdetektoren:
Sandwich Kalorimeter mit Si Ebenen zur genauen
Positionsmessung.
 $\rightarrow \left(\frac{\Delta L}{L}\right)_{exp} \approx 0.5 \cdot 10^{-3}$
- Entsprechende Fortschritte in der Theorie
 $\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_{th} = 0.6 \cdot 10^{-3}$

Zahl der Neutrinogenerationen

Z^0 Breite und Polwirkungsquerschnitt sensitive auf $N_\nu \equiv \Gamma_{\text{inv}}/\Gamma_\nu$:

$$\Gamma_Z = \Gamma_{\text{had}} + 3 \cdot \Gamma_\ell + \Gamma_{\text{inv}}$$

$$\sigma_{\text{had}}^0 \propto \frac{\Gamma_\ell}{\Gamma_Z} \frac{\Gamma_{\text{had}}}{\Gamma_Z}$$



Experimentell sind Unsicherheit für Luminosität und $q\bar{q}$ entscheidend:

$$\Delta(N_\nu) \approx \underline{3} \frac{\Delta N_l}{N_l} \oplus \underline{10} \frac{\Delta N_h}{N_h} \oplus \underline{8} \frac{\Delta \mathcal{L}}{\mathcal{L}}$$

Resultat:

$$N_\nu^{\text{LEP}} = 2.994 \pm \begin{matrix} 0.011(\text{exp}) & \pm 0.002(m_t, m_H) \\ 0.009(\text{lumi}) & (\rightarrow 0.005) \end{matrix}$$

- Präzisionsbestimmung der Neutrinokopplungen
- Wichtige Schranken für neue Physik

$Z^0 \rightarrow b\bar{b}$ Zerfallsbreite

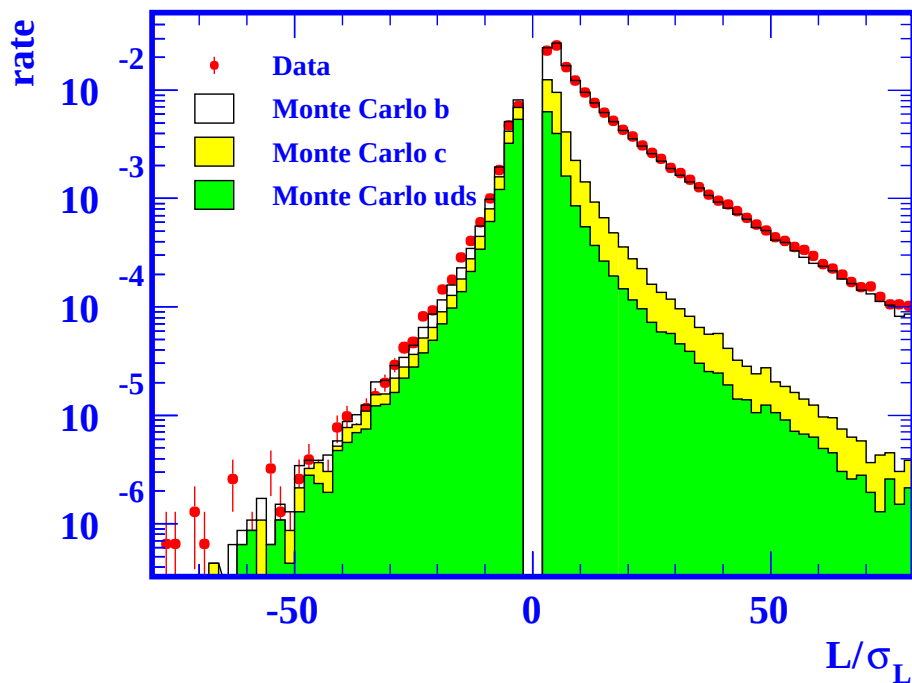
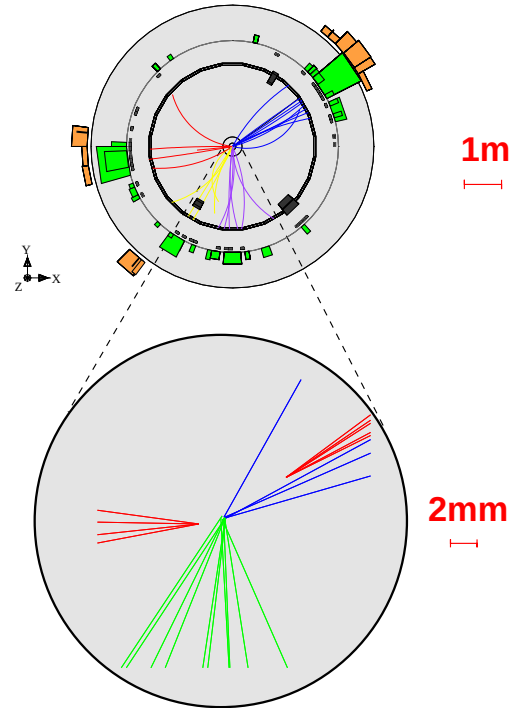
Verhältnis $R_b = \Gamma_b/\Gamma_{\text{had}}$ besonders interessant

- Spezielle m_t abhängige Vertexkorrekturen
- Verhältnis unabhängig von universellen m_t, m_H Propagatorkorrekturen.

Experimentell nachweisbar über Eigenschaften der B Hadronen.

Quantensprung durch Einführung von Halbleiter Mikrovertex-Detektoren.

Lebensdauer ($\mathcal{O}(1 \text{ ps})$) als 'Tag'.



$Z^0 \rightarrow b\bar{b}$ Zerfallsbreite

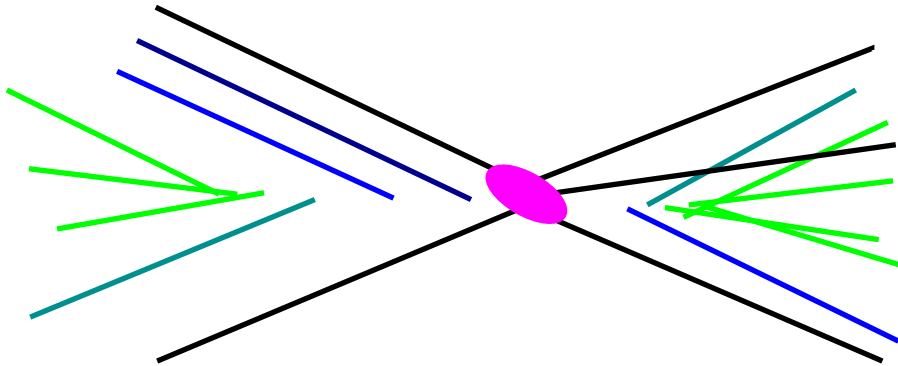
Direkte Selektion von $b\bar{b}$ Ereignissen mittels Lebensdauer-messung nur mit großen systematischen Unsicherheiten:
 Detektorauflösung, Hadronisation und Kenntnis der B-Meson Lebensdauer

‘Double Tagging’ zur Bestimmung von R_b : b tag separat für jede Ereignishemisphäre

$$\begin{aligned}
 N_t &= 2N_{\text{had}}(\varepsilon_b R_b + \varepsilon_c R_c + \varepsilon_{uds} R_{uds}) \\
 N_{\text{tt}} &= N_{\text{had}}((1 + \rho_b) \varepsilon_b^2 R_b + (1 + \rho_c) \varepsilon_c^2 R_c \\
 &\quad + (1 + \rho_{uds}) \varepsilon_{uds}^2 R_{uds}) .
 \end{aligned}$$

Observable R_b und Effizienz ε_b aus Daten bestimmt.
 Korrekturen $R_c, \rho_{b,c,uds}, \varepsilon_{c,uds}$ aus anderen Messungen bzw. Simulation.

Größte Unsicherheiten durch ε_c und ρ_b .

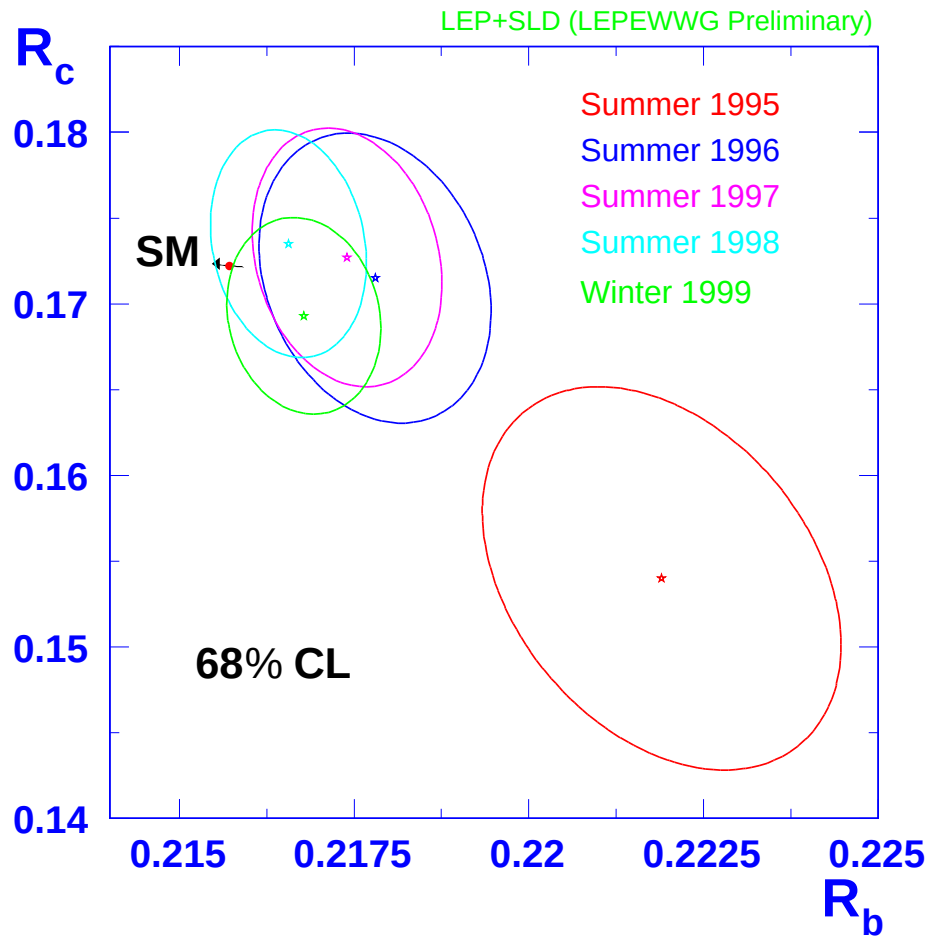


$Z^0 \rightarrow b\bar{b}$ Zerfallsbreite

Hohe Effizienz 25 % und Reinheit 98 % der b Tags erlaubt Präzisionsmessung

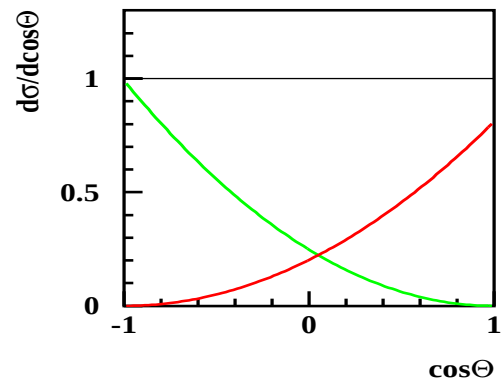
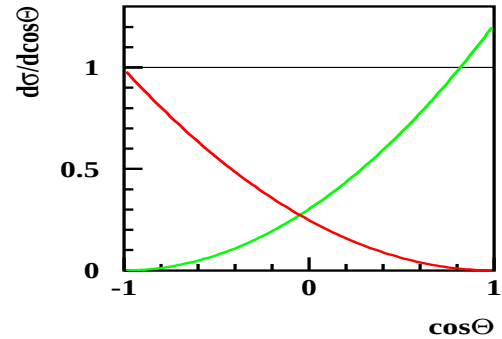
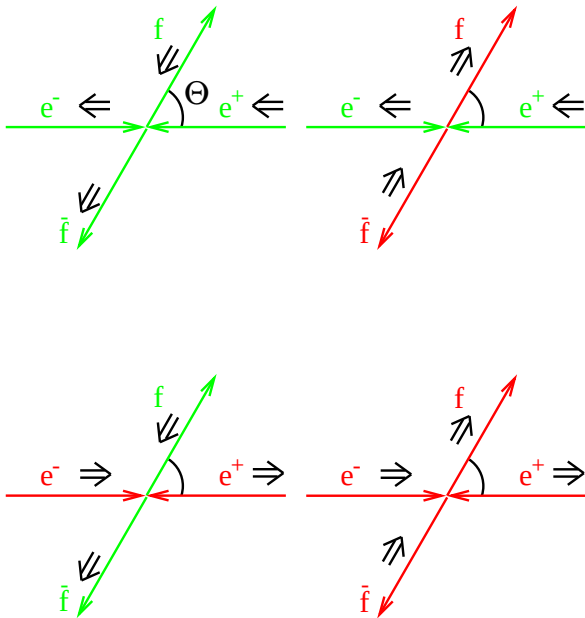
$$R_b = 0.21680 \pm 0.00073$$

Ergebnis konsistent mit Standardmodell Vorhersage



Asymmetrien

$Z^0 - f\bar{f}$ Kombination aus Axial- und Vektor Kopplung
 → Paritätsverletzung, unterschiedliche Kopplung an
 links-/rechtshändige Fermionen.



Asymmetrien quantifizieren Verhältnis g_V^f/g_A^f .

Direkt bei Polarisation:

SLAC: Polarisierter Elektronenstrahl

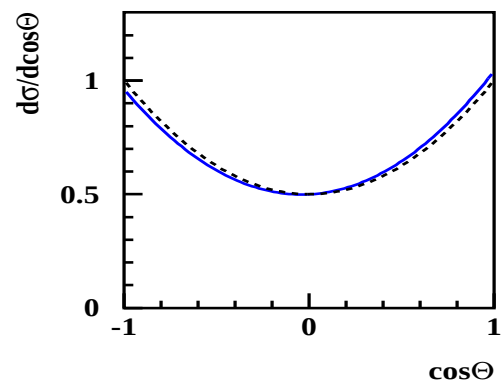
$$A_{LR} = \frac{N(e_L^-) - N(e_R^-)}{N(e_L^-) + N(e_R^-)} = P_e \mathcal{A}_e$$

LEP: Polarisation meßbar bei τ

$$\mathcal{P}_\tau = \frac{N(\tau_L^-) - N(\tau_R^-)}{N(\tau_L^-) + N(\tau_R^-)} = \mathcal{A}_\tau$$

Ladungsasymmetrie bei LEP für
 alle Endzustände:

$$A_{FB} = \frac{N_f - N_b}{N_f + N_b} = \frac{3}{4} \mathcal{A}_e \mathcal{A}_f$$

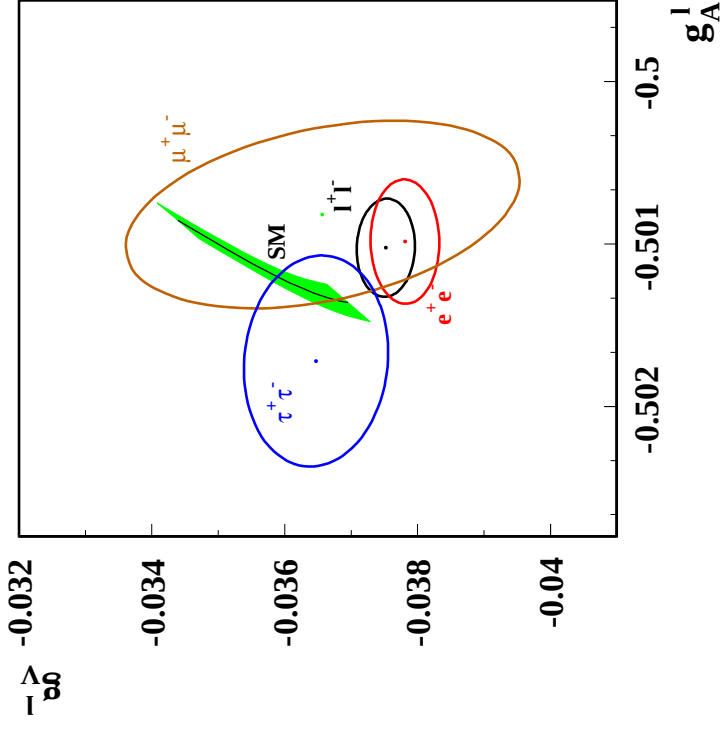


Z⁰–Fermion Kopplungen

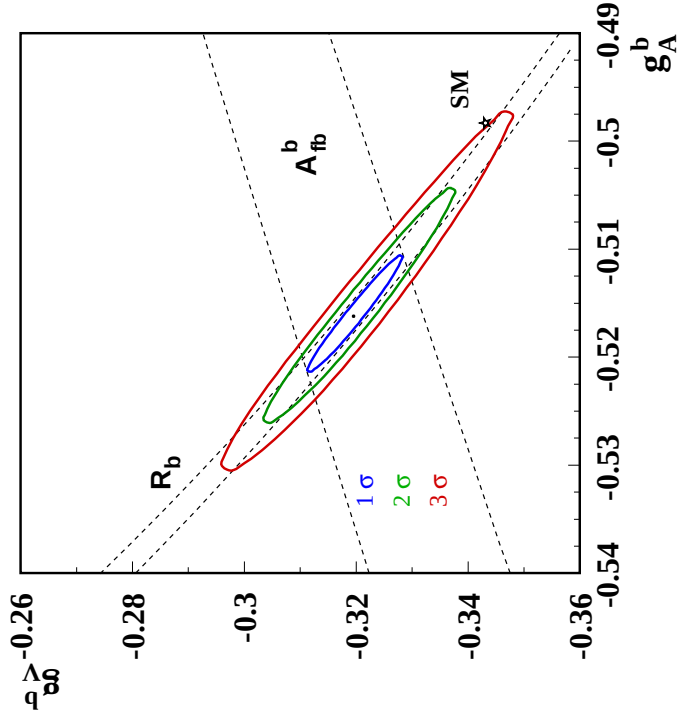
Bestimmung der Kopplungen aus Partialbreiten und Asymmetrien:

$$\Gamma_f \propto \left((g_V^f)^2 + (g_A^f)^2 \right) , \qquad A_f = 2 \frac{g_V^f/g_A^f}{1 + (g_V^f/g_A^f)^2}$$

Lepton–Kopplungen: Konsistent mit Standardmodell, Leptonuniversalität
 $g_A^\ell \approx 0.2\%$ und $g_V^\ell \approx 2\text{--}8\%$.

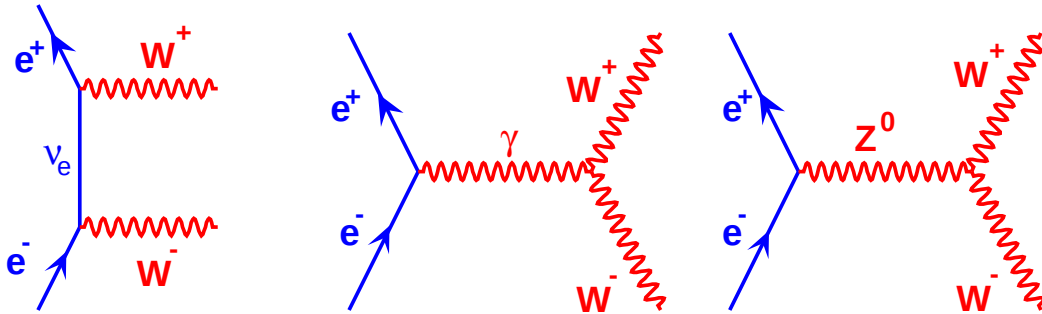


b –Kopplungen:
 $3\text{--}\sigma$ Abweichung zu Vorhersage.



W Bosonen

W^+W^- Paarproduktion bei LEP2 ermöglicht sehr genaue Bestimmung der W-Masse und der Kopplungen.

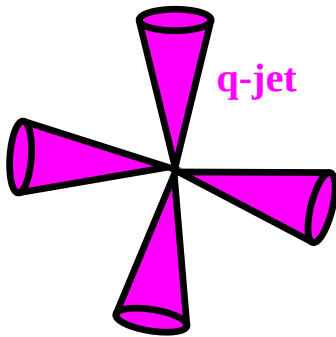


3 grundlegende Ereignistopologien:

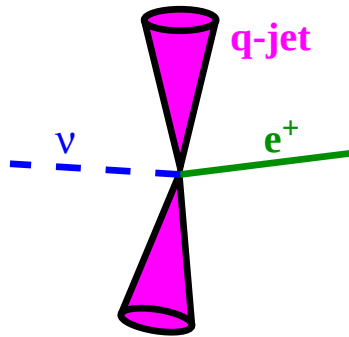
$$WW \rightarrow qqqq$$

$$WW \rightarrow qq l \nu$$

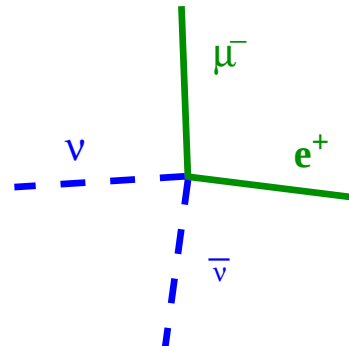
$$WW \rightarrow l \nu l \nu$$



46 %



44 %



10 %

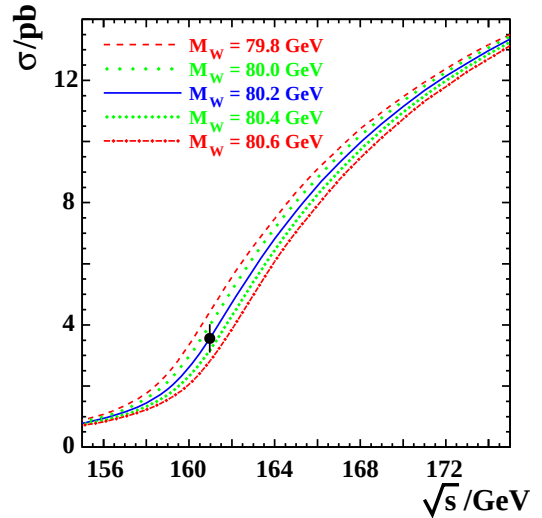
W Masse

Wirkungsquerschnitt

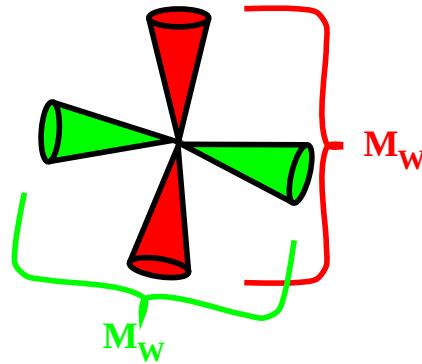
σ_{WW} an der Schwelle
sensitiv auf m_W .

Systematische Unsicherheit
klein, Messung bei
LEP2 statistisch limitiert.

$$m_W = 80.42 \pm 0.22 \text{ GeV}$$



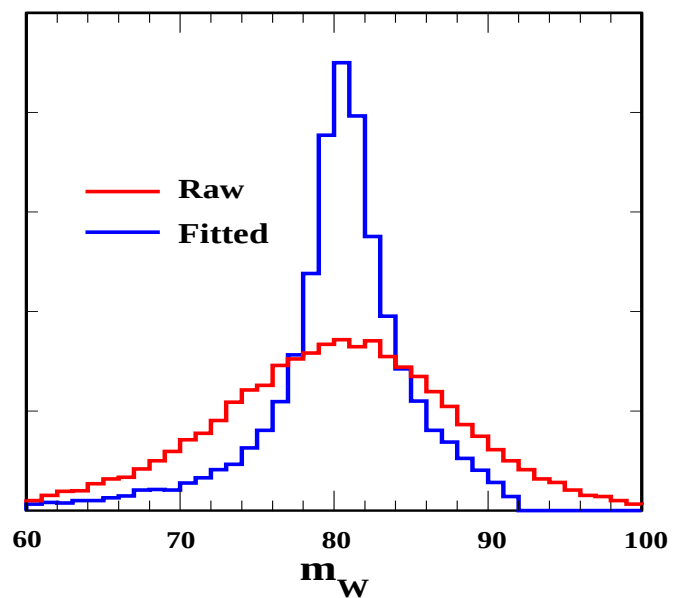
Bei höheren Schwer-
punktsenergien direkte
Rekonstruktion aus Jets



Gute Auflösung durch
Zwangsbedingungen:

$\vec{p}, E$ Erhaltung

$$m_{W_1} = m_{W_2}$$



W Masse

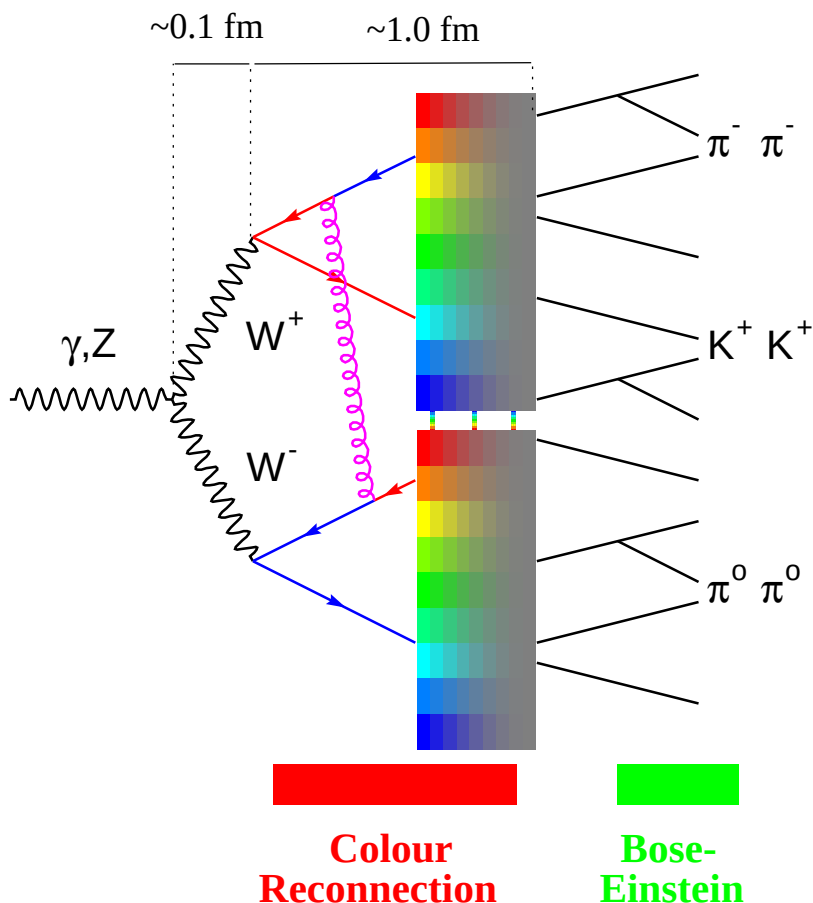
Zwangsbedingungen nur näherungsweise erfüllt:

Keine Photonabstrahlung, gleiche Massen.

→ ‘Kalibration’ mit Monte Carlo Simulation.

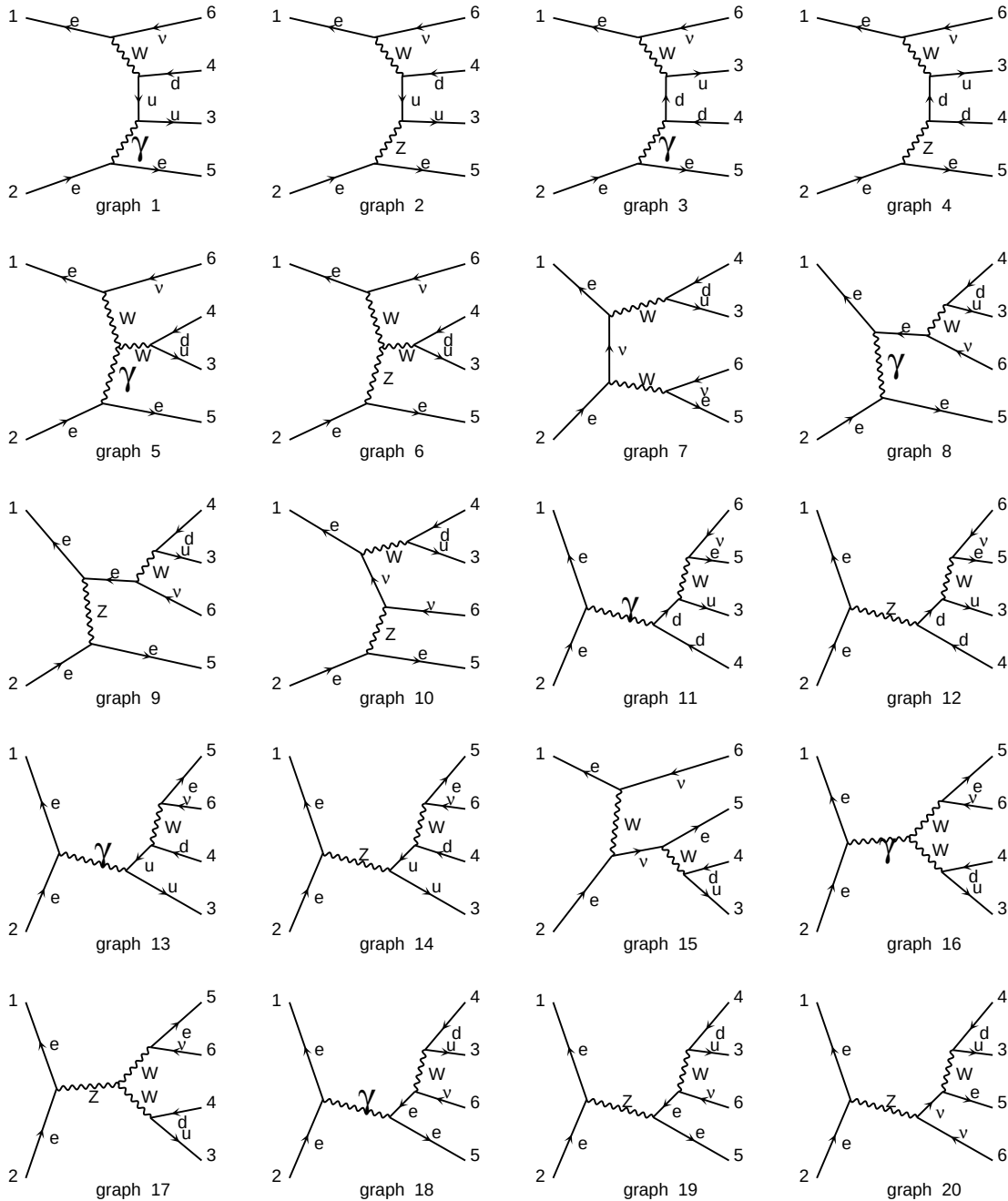
Subtile Effekte durch Hadronisation, Photonabstrahlung, Interferenz mit anderen $e^+e^- \rightarrow 4f$ Prozessen führen zu systematischen Unsicherheiten $\mathcal{O}(20 \text{ MeV})$

Zusätzliche Probleme bei $W^+W^- \rightarrow 4q$ Zerfällen durch mögliche Endzustands-Wechselwirkungen in der Hadronisation. $\Delta m_W \approx 50 \text{ MeV}$.



4 Fermion Endzustände

Vielzahl möglicher 4 Fermion Prozesse, z.B. 20 Diagramme niedrigster Ordnung für $e^+e^- \rightarrow e\nu u d$



W Masse

Auswirkungen von Endzustands–Wechselwirkungen unklar.

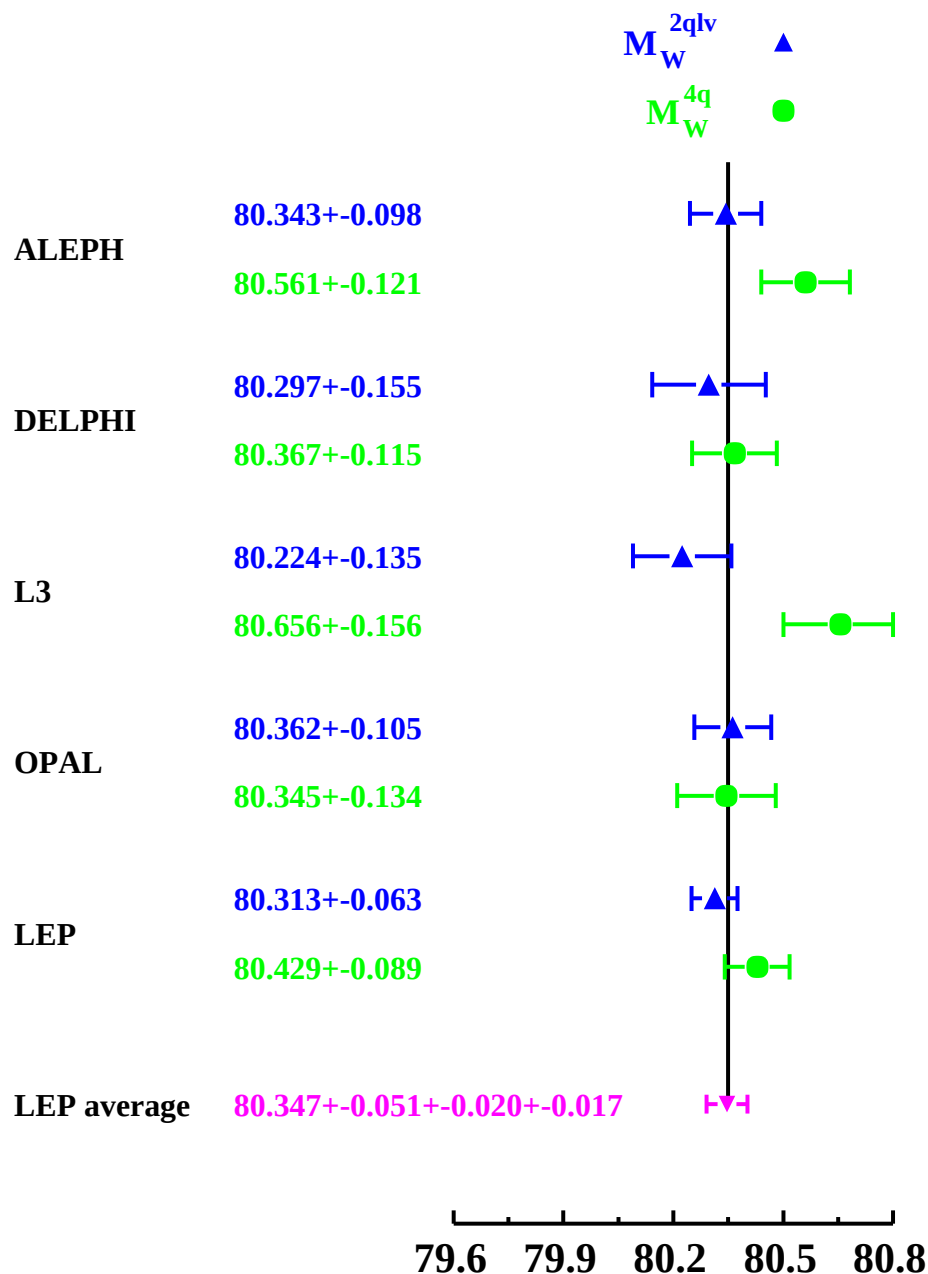
Bisher $m_W(4q)$ und $m_W(2q \ell \nu)$ konsistent.

Keine Hinweise in anderen Observablen, z.B.

Teilchenmultiplizität oder Spektren.

Vorläufiges Resultat mit $4 \cdot 3000 W^+ W^-$ Ereignissen bei

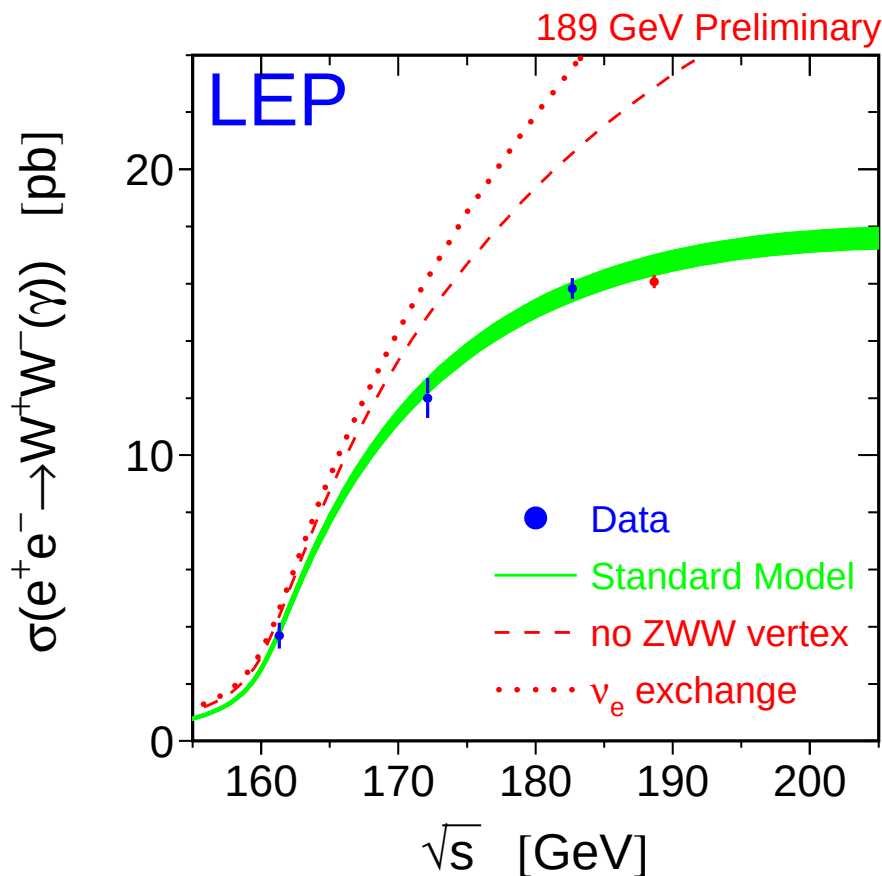
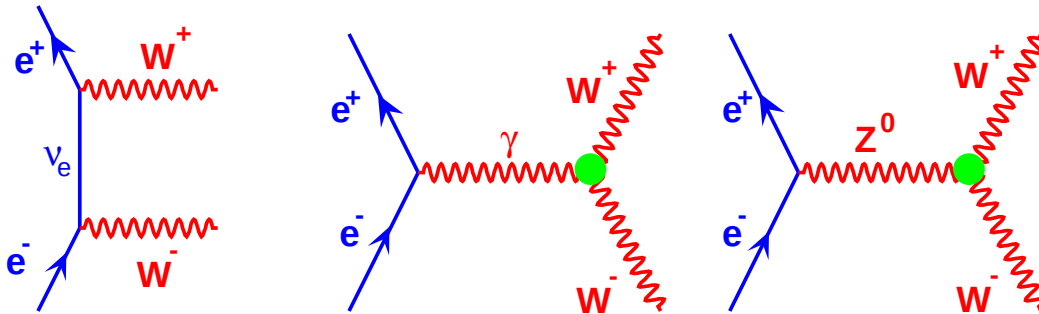
LEP2: $m_W(LEP) = 80.350 \pm 0.056 \text{ GeV}$



Eichboson–Kopplungen

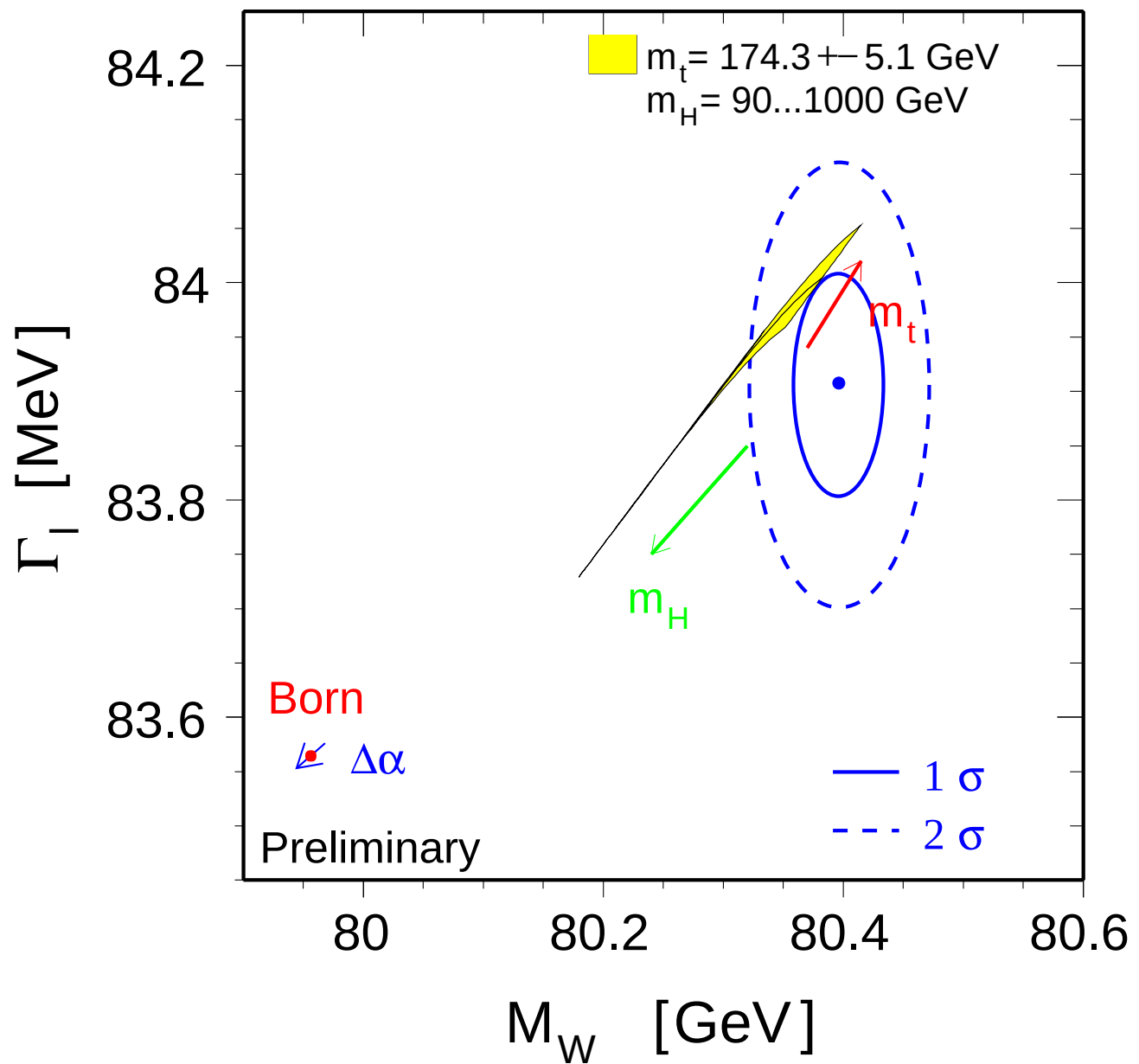
Zentraler Punkt im Standardmodell sind direkte Kopplungen der Eichbosonen γ , Z^0 , W^+ , W^- .

Vor LEP2 nur schwache Tests dieser Kopplungen.

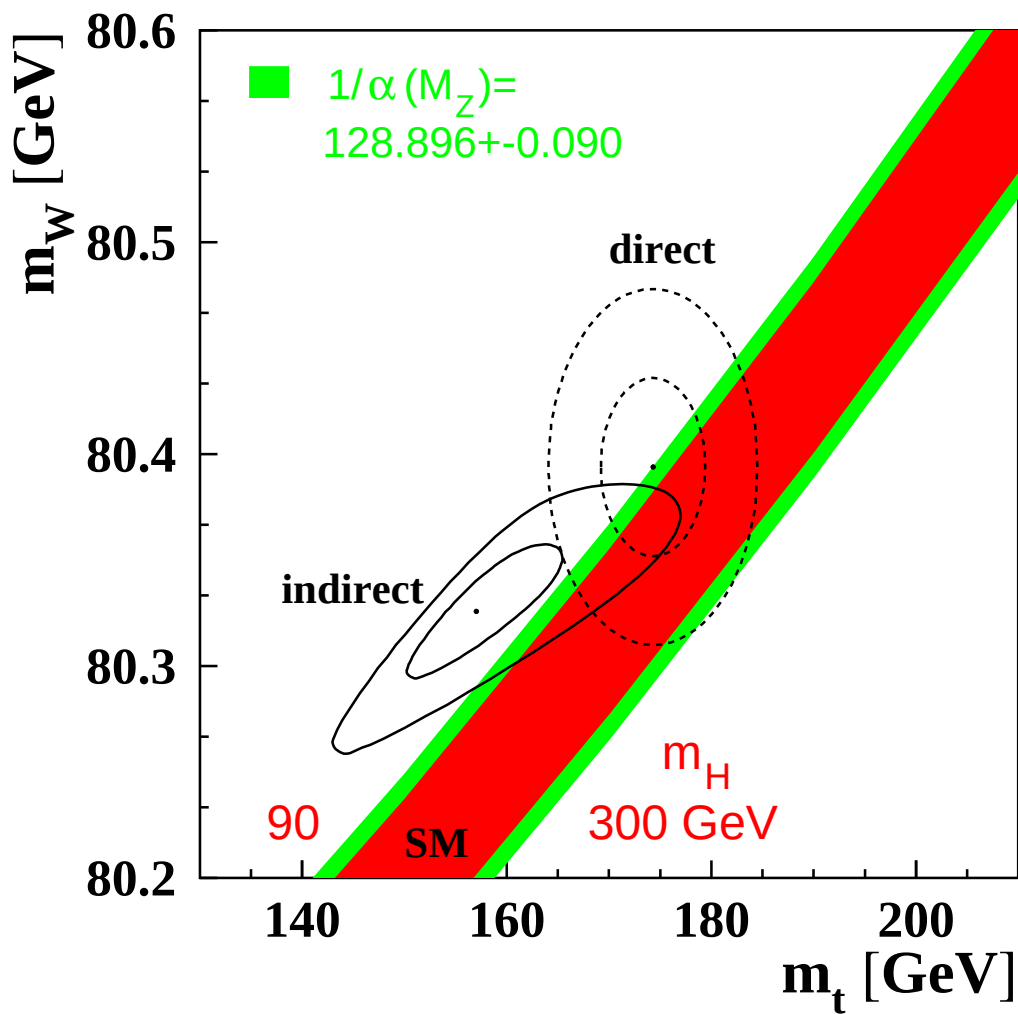


Weitere Untersuchungen zur Struktur Boson–Boson Kopplungen durch genaue Analyse der Winkelverteilung der W^+W^- und ihrer Zerfallsprodukte.

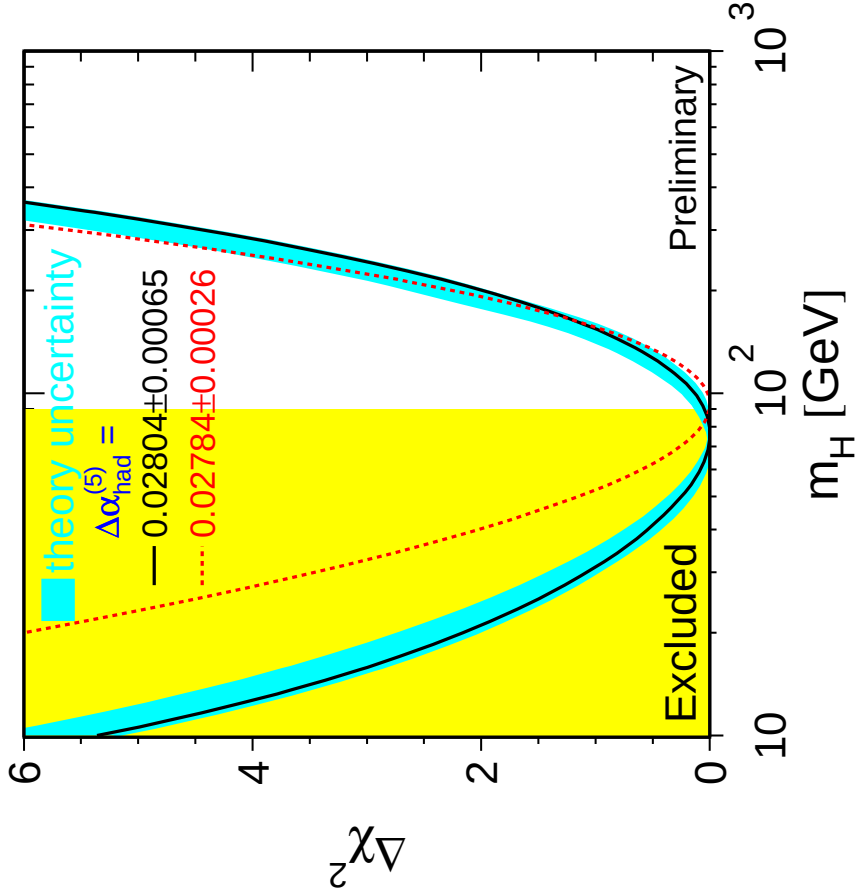
Präzisionsmessungen und Strahlungskorrekturen



Direkte vs indirekte m_W , m_t Messung



Globaler Fit



Moriond 1999			
Measurement	Pull	Pull	
m_Z [GeV]	91.1867 ± 0.0021	.08	
Γ_Z [GeV]	2.4939 ± 0.0024	-.81	
σ_0^{hadr} [nb]	41.491 ± 0.058	.30	
R_e	20.765 ± 0.026	.69	
$A_{\text{fb}}^{0,e}$	0.01683 ± 0.00096	.71	
A_e	0.1479 ± 0.0051	.23	
A_t	0.1431 ± 0.0045	-.81	
$\sin^2\theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}$	0.2321 ± 0.0010	.54	
m_W [GeV]	80.350 ± 0.056	-.43	
R_b	0.21680 ± 0.00073	1.26	
R_c	0.1694 ± 0.0038	-.75	
$A_{\text{fb}}^{0,b}$	0.0991 ± 0.0020	-1.88	
$A_{\text{fb}}^{0,c}$	0.0712 ± 0.0043	-.53	
A_b	0.908 ± 0.027	-.99	
A_c	0.651 ± 0.030	-.56	
$\sin^2\theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}$	0.23109 ± 0.00029	-1.61	
$\sin^2\theta_W$	0.2255 ± 0.0021	1.07	
m_W [GeV]	80.448 ± 0.062	1.20	
m_t [GeV]	174.3 ± 5.1	.54	
$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(m_Z)$	0.02804 ± 0.00065	-.08	

Zusammenfassung

Präzisionsmessungen bei LEP

- Z^0 -Masse: $91.1867 \pm 0.0021 \text{ GeV}$
- W -Masse: $80.350 \pm 0.056 \text{ GeV}$
- 3 Generationen von Fermionen
- Universalität der Z^0 -Lepton Kopplungen

Standardmodell alle Tests glänzend bestanden

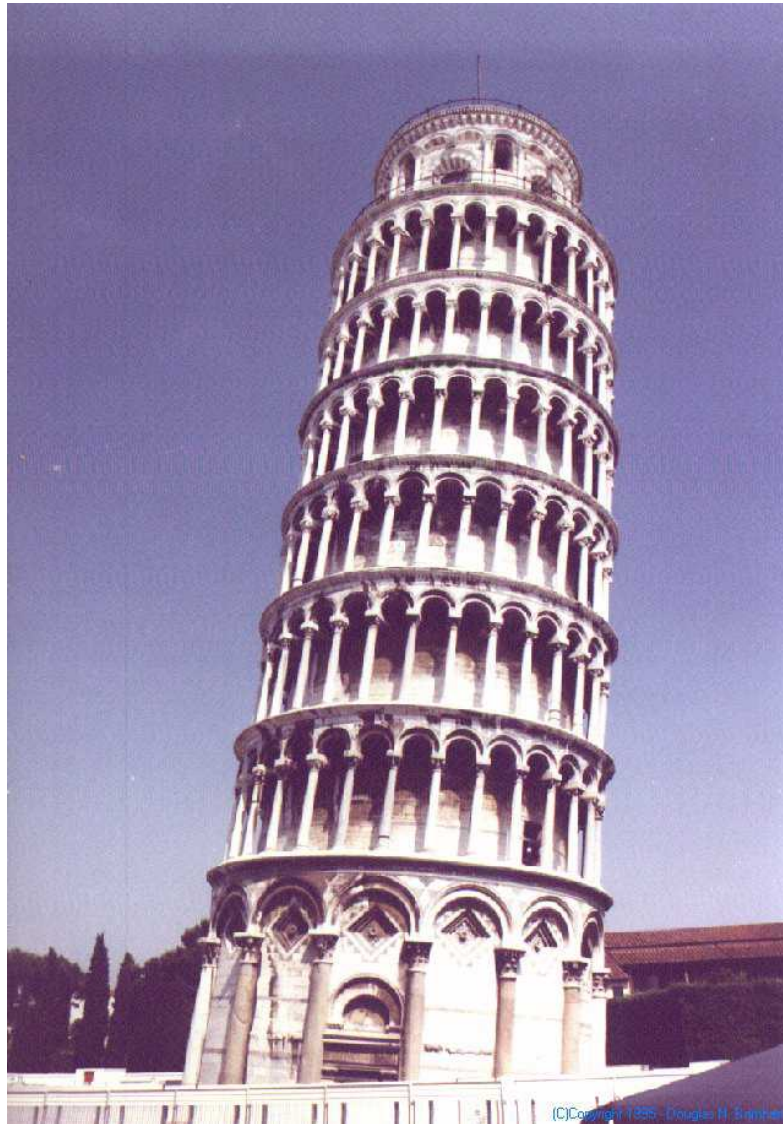
- m_t, m_W indirekt aus Strahlungskorrekturen konsistent mit direkten Messungen
- Higgs-Boson: $95 \text{ GeV} < m_H < 230 \text{ GeV}@95 \% \text{C.L.}$

Ausblick:

LEP2 (bis 2000) $m_H \rightarrow 110 \text{ GeV}$.

Danach TEVATRON, LHC, e^+e^- LC.

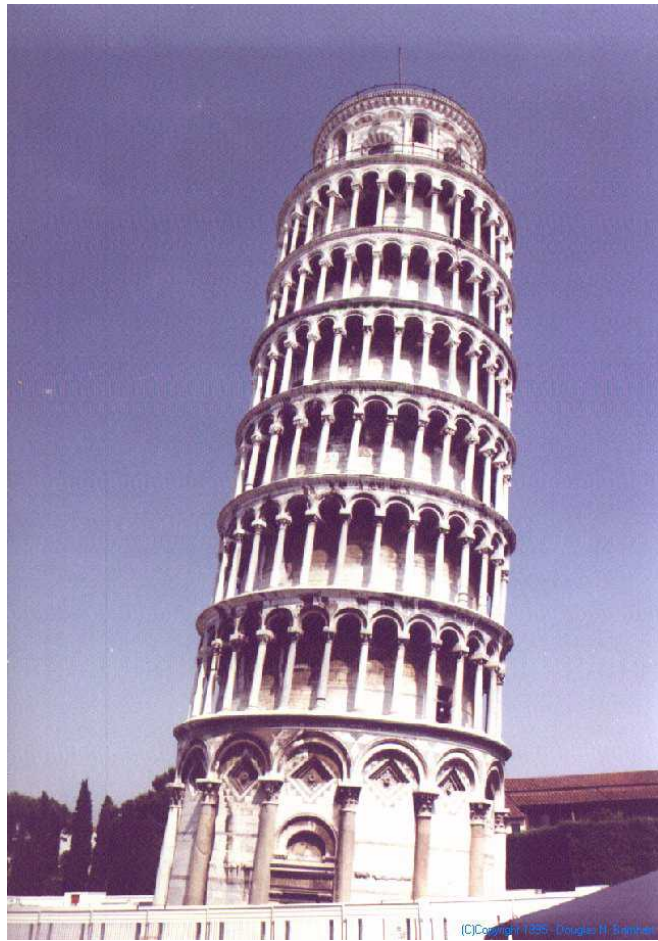
Standardmodell ...



wunderschönes Bauwerk
mit offensichtlichen Macken
aber sehr langlebig
verblüffend, daß es noch steht

Standardmodell ...

wunderschönes Bauwerk
mit offensichtlichen
Macken
aber sehr langlebig
verblüffend, daß es noch
steht



Noch mehr Arbeit nötig ...

