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:

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

Wechselwirkungen durch Spin–1 Bosonen:

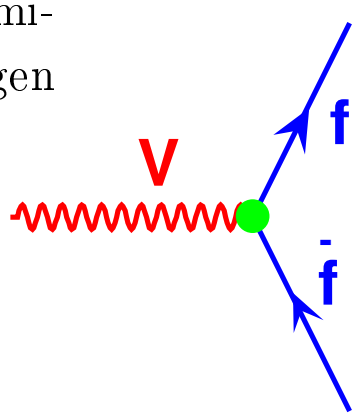
γ, Z^0, W^+, W^-, (Gluonen)

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

α (0.04 ppm)
G_μ (10 ppm)
m_Z ($\rightarrow$ LEP).

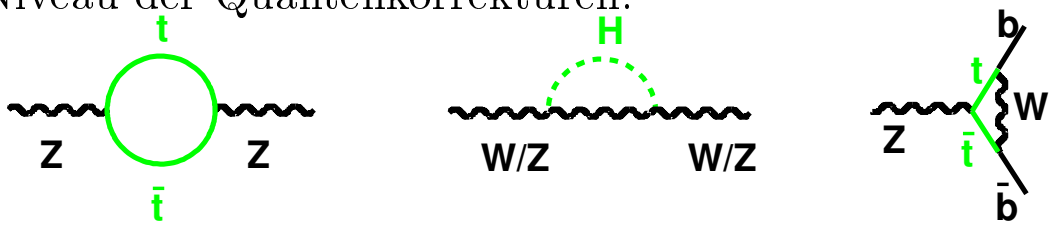


LEP/SLC e^+e^- Beschleuniger gebaut um Z^0, W präzise zu untersuchen.

Strahlungskorrekturen

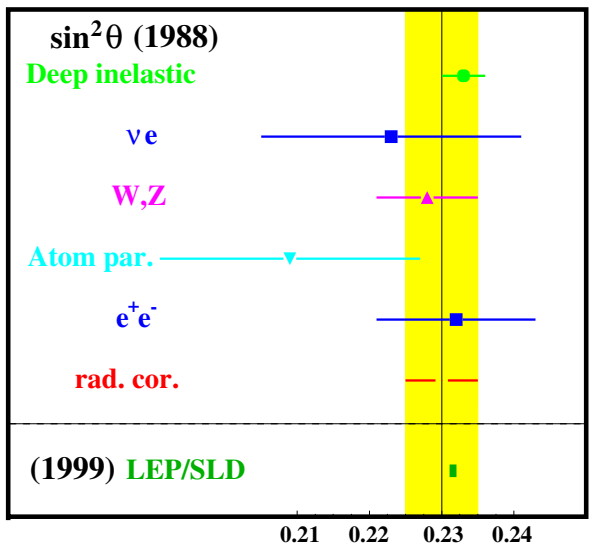
Quantenfluktuationen beeinflussen die vorhergesagten Massen und Kopplungen.

- Präzisionsmessungen erlauben Tests der Theorie auf Niveau der Quantenkorrekturen.



- Elektroschwache Wechselwirkung $\neq$ QED:
  Schwere Teilchen wie top quark, Higgs Boson haben Effekte bei Energie $\ll m_t\ , m_H$.
  $\rightarrow m_t^2$, $\log(m_H)$ 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.
  $\rightarrow$ Fenster zu Physik jenseits des Standardmodell.



LEP und SLC

SLC/SLD: 1989–98

91 GeV, polarisierter e^- Strahl

$0.5 \cdot 10^6$ Z^0

LEP Experimente:

ALEPH, DELPHI, L3, OPAL

LEP1: 1989–95

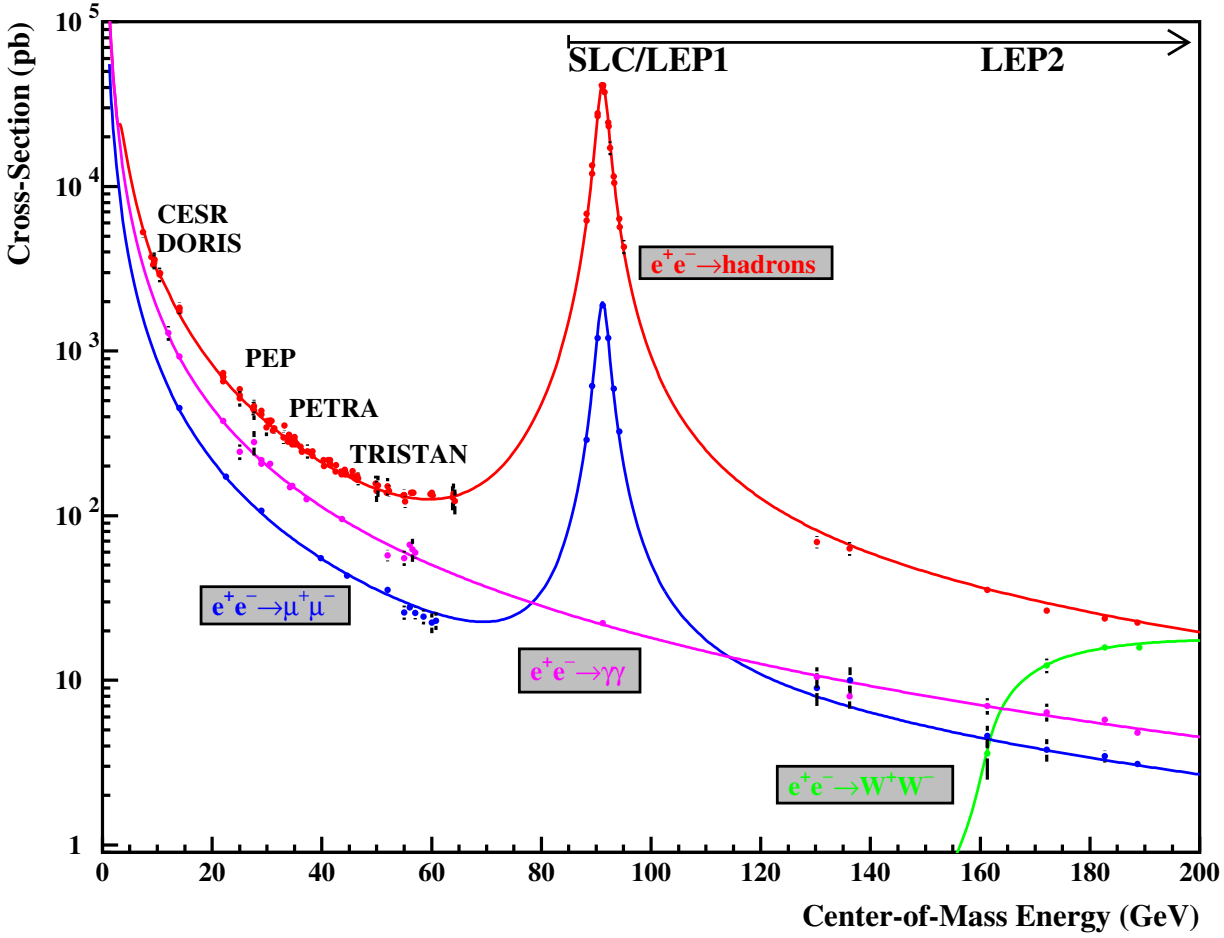
91 ± 3 GeV

$4 \times 4 \cdot 10^6$ Z^0

LEP2: Seit 1996

161 – 200 GeV

4×3000 W^+W^-

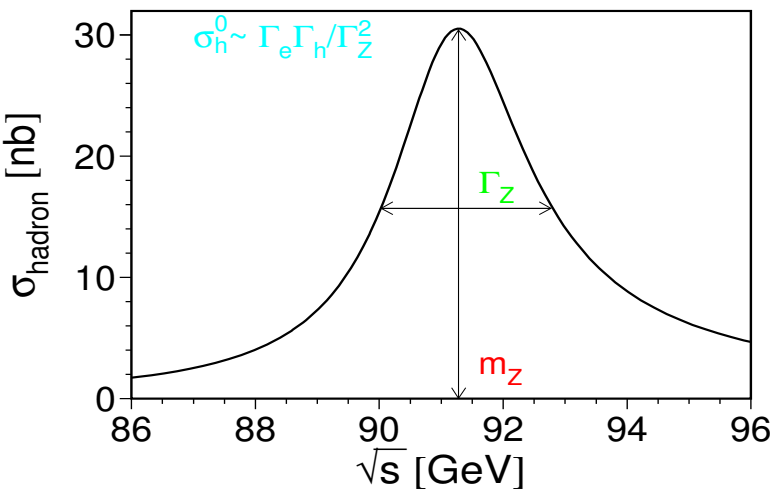


Messungen am Z^0

Z^0 Eigenschaften:

Masse und totale Breite m_Z, Γ_Z
Z^0–Fermion Kopplungen: $g_{\mathrm{V}}^f, g_{\mathrm{A}}^f$

$$g_{\mathrm{A}}^f = \sqrt{\rho} I_3^f \,, \qquad g_{\mathrm{V}}^f = \sqrt{\rho}(I_3^f - 2Q_f \kappa \sin^2\theta_W)$$



Experimentelle Observablen

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

$$\Gamma_f = \frac{G_\mu m_Z^3 N_c^f}{6\pi\sqrt{2}} \left((g_{\mathrm{V}}^f)^2 + (g_{\mathrm{A}}^f)^2 \right)$$

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

$$\mathcal{A}_f = 2\frac{g_{\mathrm{V}}^f / g_{\mathrm{A}}^f}{1 + (g_{\mathrm{V}}^f / g_{\mathrm{A}}^f)^2}$$

Z Physik – Wirkungsquerschnitte

Experimentell:

$$\sigma_f(\sqrt{s}) = \frac{N^f_{\text{sel}} - N_{\text{U}}}{\varepsilon \int \mathcal{L}\,\mathrm{d}t}$$

Drei Messungen

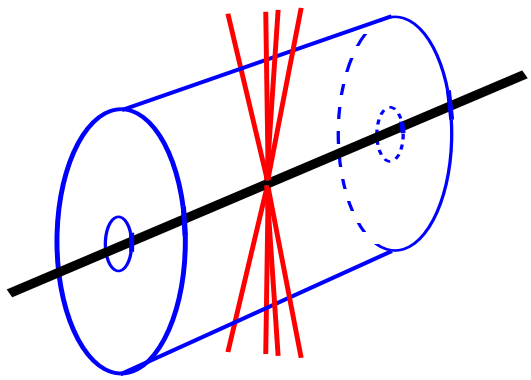
- Selektion N^f_{sel}, N_{U}, ε
- Luminosität $\int \mathcal{L}\,\mathrm{d}t$
- Schwerpunktsenergie $\sqrt{s}$

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

Ereignisselektion

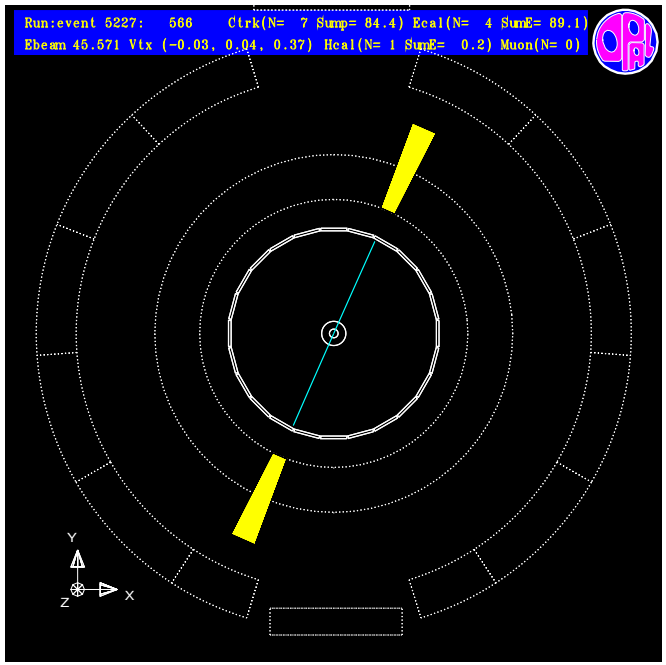
Klare Signaturen für e^+e^-, $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$, $q\overline{q}$.

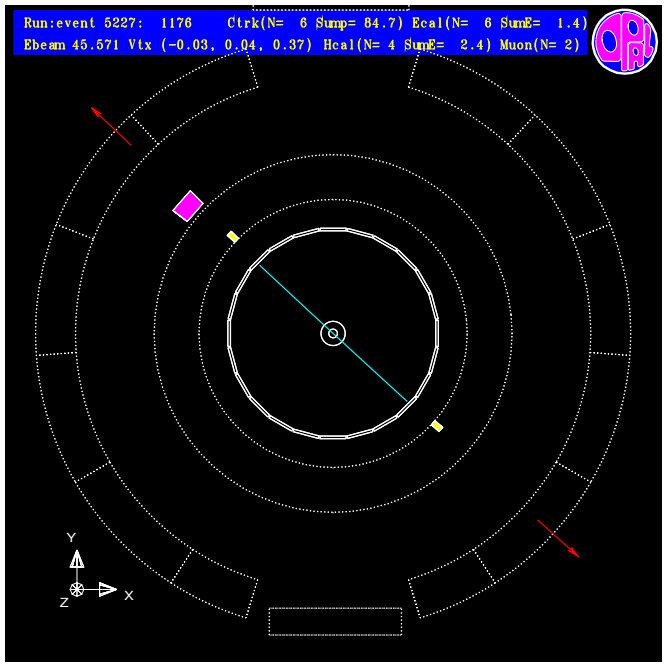
- $\varepsilon \approx 99\,\%$ für $e^+e^- \to q\overline{q}$
- $\varepsilon \approx$ geom. Akzeptanz für $e^+e^- \to e^+e^-, \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-$
- Untergrund $\mathcal{O}(0.1\text{–}1\,\%)$



e^+e^-

(3.3 %)



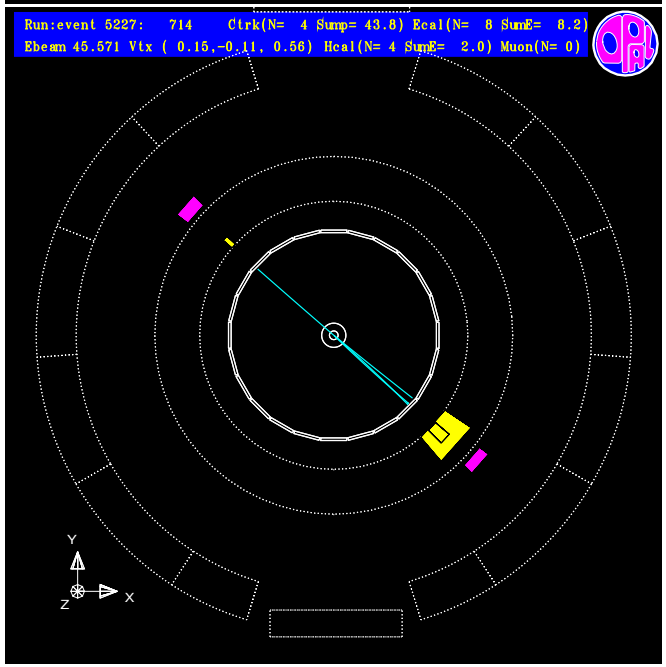


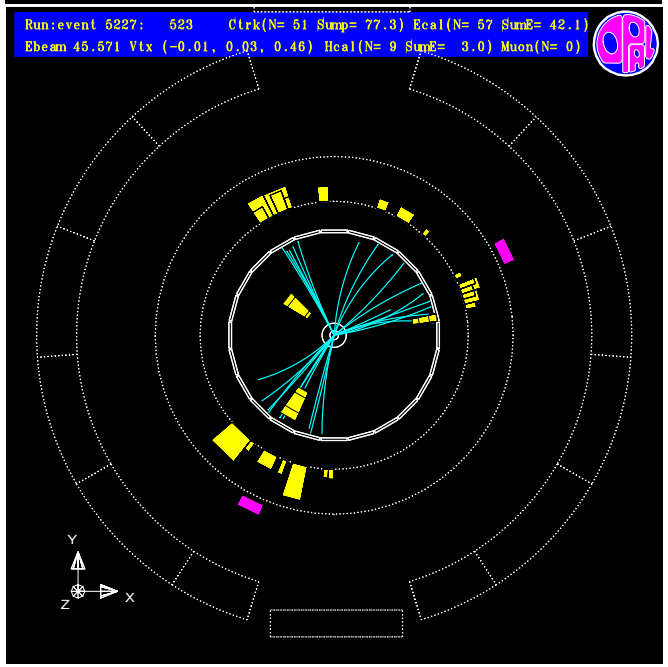
$\mu^+\mu^-$

(3.3 %)

$\tau^+\tau^-$

(3.3 %)





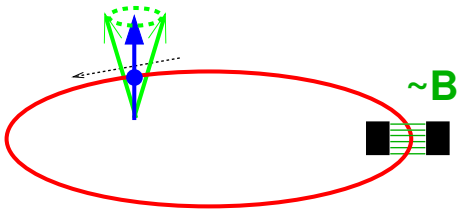
$q\bar{q}$

(70 %)

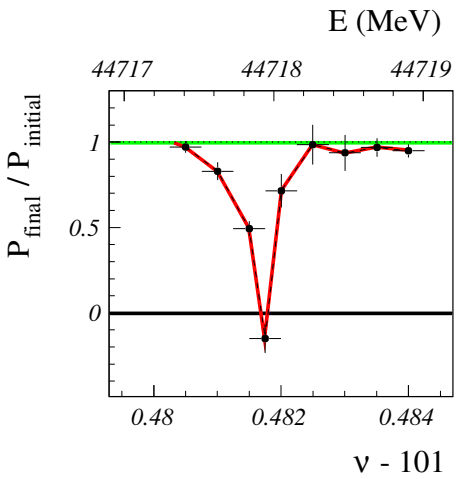
LEP Energiemessung

Im Prinzip $E_{\text{beam}} = \oint B \mathrm{d}l$, aber ca. 3000 Dipolmagnete und 500 Quadrupol– und Sextupolmagnete.

E_{beam} aus $g-2$ Experiment: Synchrotonstrahlung bewirkt transversale Polarisation in e^+e^--Ring. Frequenz der Spinpräzession $\rightarrow$ E_{beam}.
$\nu_s = \frac{1}{2}(g_e - 2)\frac{E_{\text{beam}}}{m_e c^2}$



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



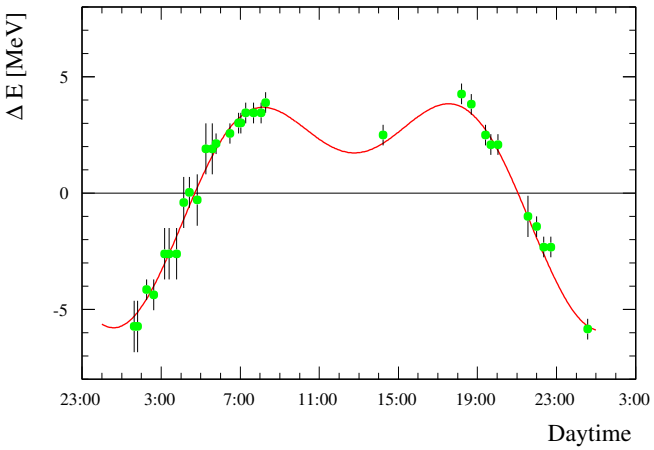
Aber:

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

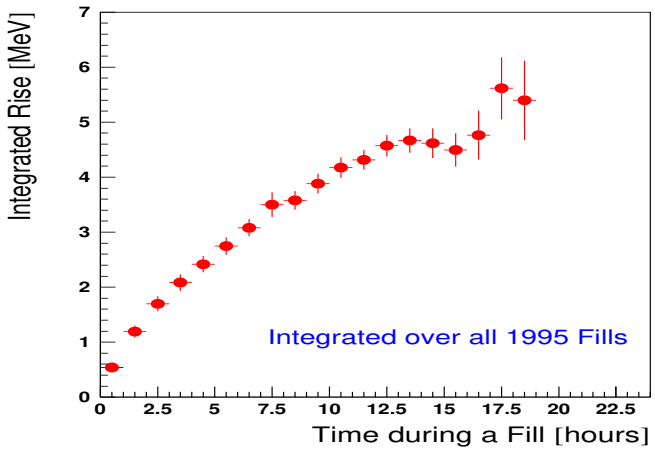
LEP Energiemessung

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

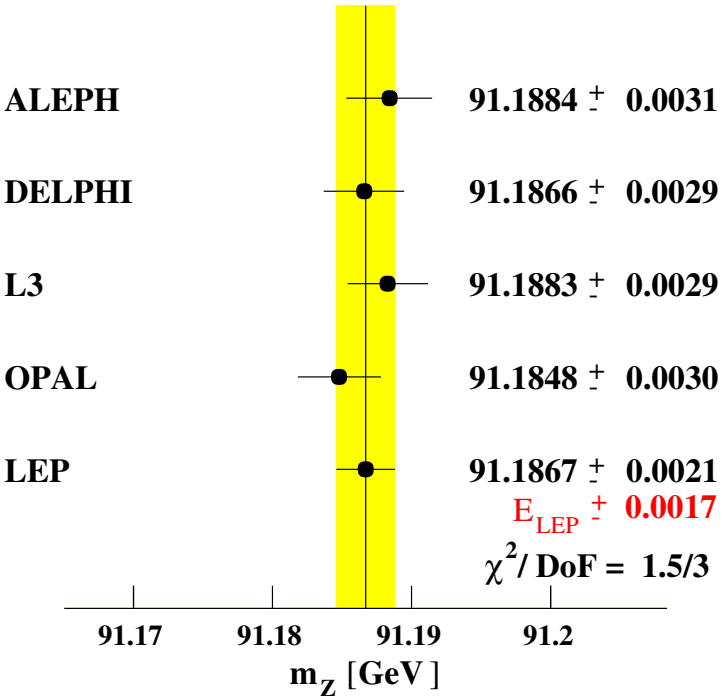
Gezeiten und geologische Effekte führen zu kleinen Deformationen des LEP Ringes.
→ Beiträge von Fokussiermagneten zur Krümmung

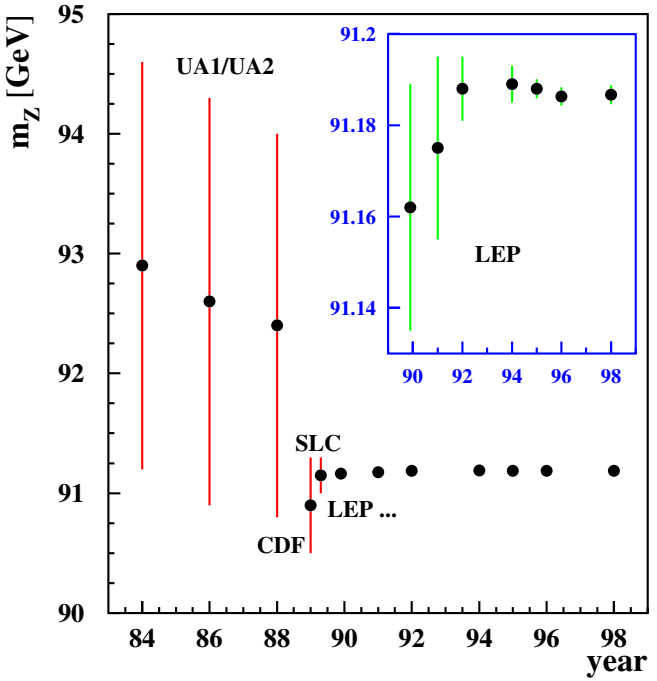


Eisenbahnverkehr bei Genf verursacht Leckströme die durch den LEP Ring zurücklaufen und eine Drift der Dipolfelder bewirken.



Z^0 Masse





m_Z auf 20 ppm genau

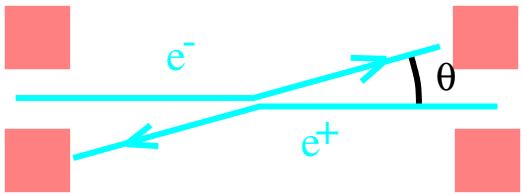
$\rightarrow$ Präzisionskonstante wie α, G_μ

Zur Zeit kein Test beschränkt durch $\triangle m_Z$, aber z.B. e^+e^- linear collider $\triangle m_W$ $\mathcal{O}$(5–10 MeV).

Luminositätsmessung

Kleinwinkel–Bhabha Streuung als Referenz:

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

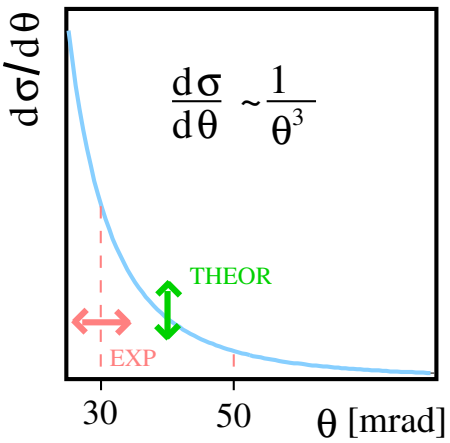


Entscheidend:

Innere Akzeptanzgrenze

$$\triangle R_{\text{in}} = 25\mu m$$

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



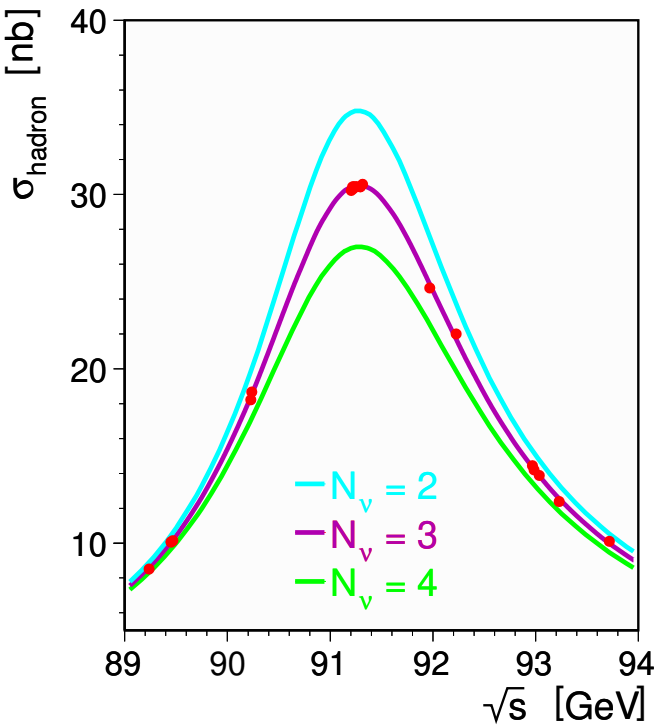
- Design–Spezifikation (1985) der LEP Detektoren $\frac{\Delta L}{L} = 2\,\%$
- In 1992 erreicht $\frac{\Delta L}{L} = 0.5\,\%$
- Neukonstruktion der Luminositätsdetektoren: Sandwich Kalorimeter mit Si Ebenen zur genauen Positionsmessung.
  $\rightarrow \left(\frac{\Delta L}{L}\right)_{\text{exp}} \approx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

Zahl der Neutrinogenerationen

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

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

$$\sigma^0_{\rm had} \propto \frac{\Gamma_\ell}{\Gamma_Z}\frac{\Gamma_{\rm had}}{\Gamma_Z}$$



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

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

Resultat:

$$\begin{aligned} \mathrm{N}_\nu^{\rm LEP} = 2.994 \pm \quad & 0.011(\mathrm{exp}) \quad \pm 0.002(m_t, m_H) \\ & 0.009(\mathrm{lumi}) \quad (\rightarrow 0.005) \end{aligned}$$

- Präzisionsbestimmung der Neutrinokopplungen
- Wichtige Schranken für neue Physik

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

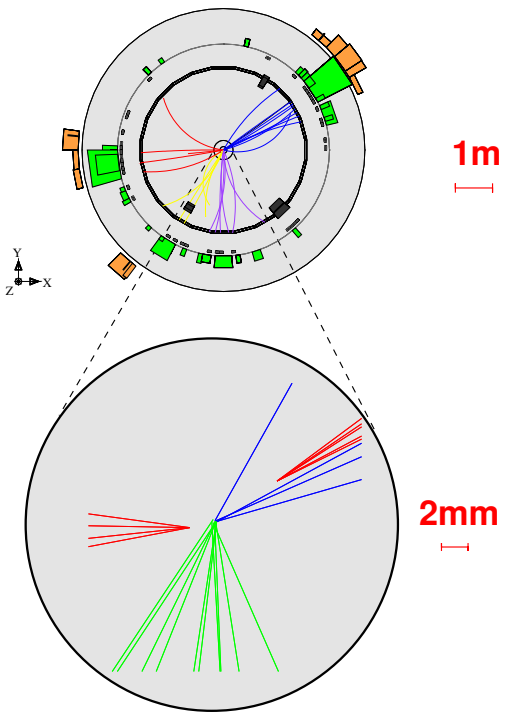
Verhältnis $\mathrm{R}_b = \Gamma_b/\Gamma_{\mathrm{had}}$ besonders interessant

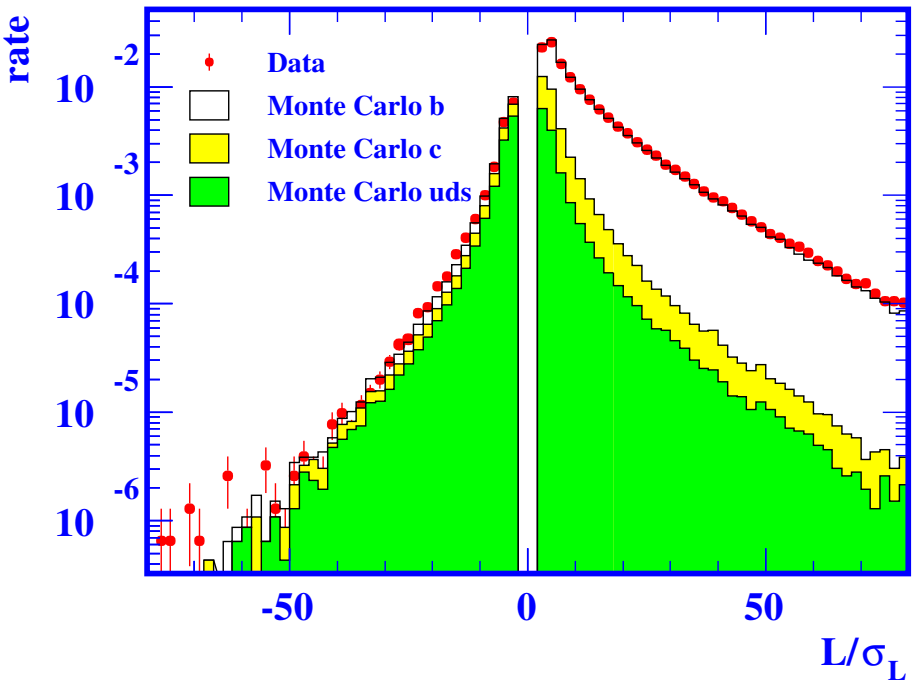
- Spezielle m_t abhängige Vertexkorrekturen
- Verhältnis unabhängig von universellen m_t, m_H Propagatorkorrekturen.

Experimentell nachweisbar über Eigenschaften der B Hadronen.

Quantensprung durch Einführung von Halbleiter Mikrovertex–Detektoren.

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





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

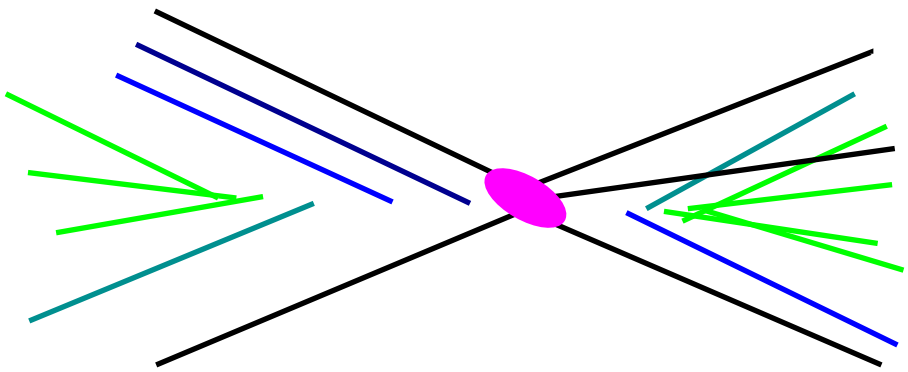
Direkte Selektion von $b\bar{b}$ Ereignissen mittels Lebensdauermessung nur mit großen systematischen Unsicherheiten: Detektorauflösung, Hadronisation und Kenntnis der B-Meson Lebensdauer

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

$$
\begin{aligned}
N_{\mathrm{t}} &= 2N_{\mathrm{had}}\left(\varepsilon_b \mathrm{R}_b + \varepsilon_c \mathrm{R}_c + \varepsilon_{uds}\mathrm{R}_{uds}\right) \\
N_{\mathrm{tt}} &= N_{\mathrm{had}}\left(\left(1+\rho_b\right)\varepsilon_b^2\,\mathrm{R}_b + \left(1+\rho_c\right)\varepsilon_c^2\,\mathrm{R}_c \right. \\
&\quad \left. +\left(1+\rho_{uds}\right)\varepsilon_{uds}^2\,\mathrm{R}_{uds}\right) .
\end{aligned}
$$

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.

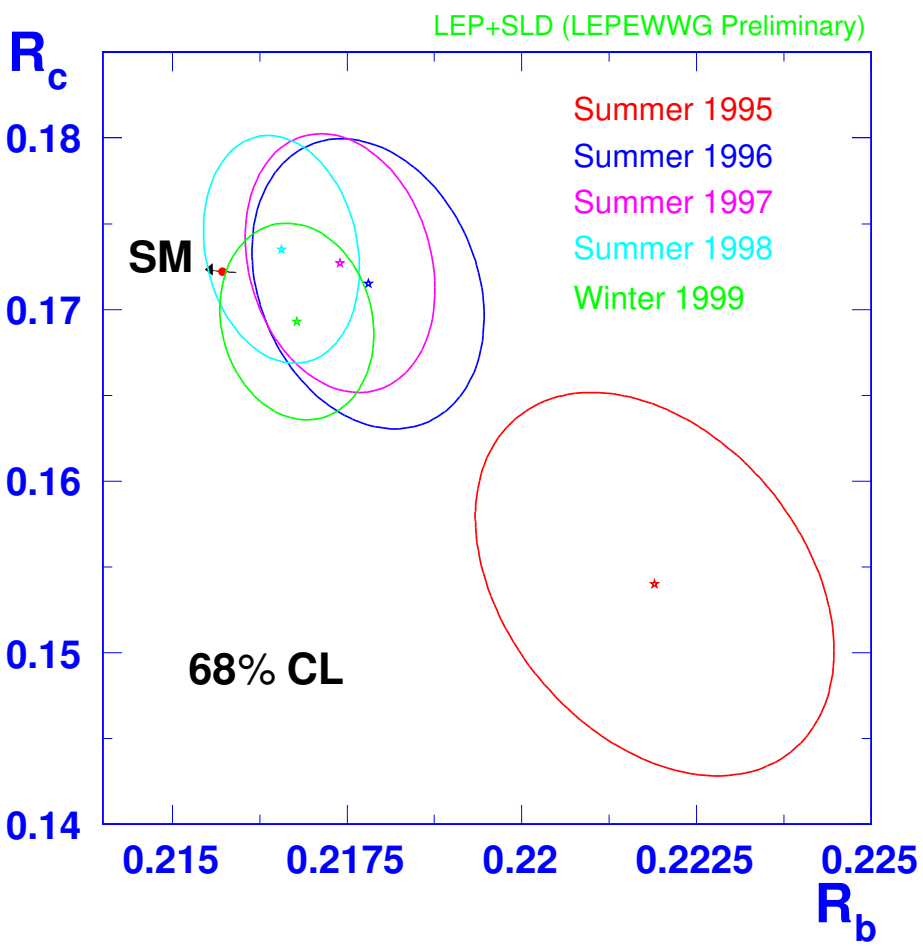


$Z^0 \to b\bar{b}$ Zerfallsbreite

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

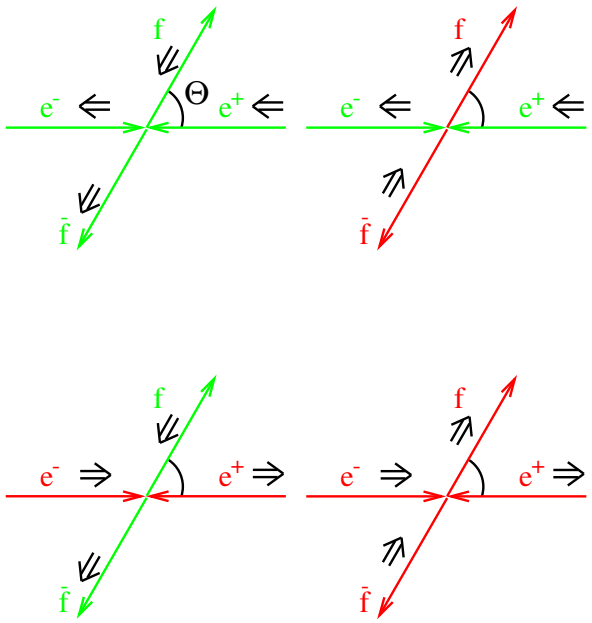
$$\mathrm{R}_b = 0.21680 \pm 0.00073$$

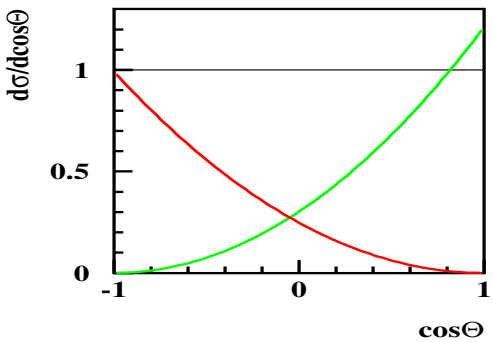
Ergebnis konsistent mit Standardmodell Vorhersage

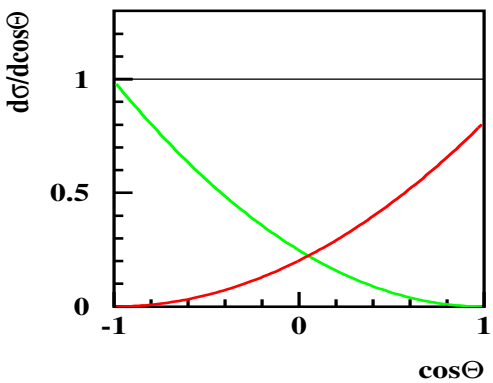


Asymmetrien

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







Asymmetrien quantifizieren Verhältnis $g_{\mathrm{V}}^f / g_{\mathrm{A}}^f$.
Direkt bei Polarisation:

SLAC: Polarisierter Elektronstrahl

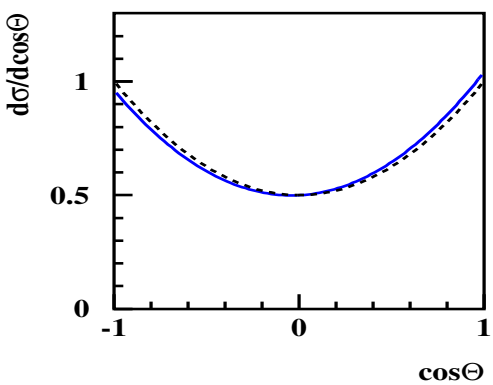
$$A_{\mathrm{LR}} = \frac{N(e_L^-) - N(e_R^-)}{N(e_L^-) + N(e_R^-)} = P_e \, \mathcal{A}_e$$

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:

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

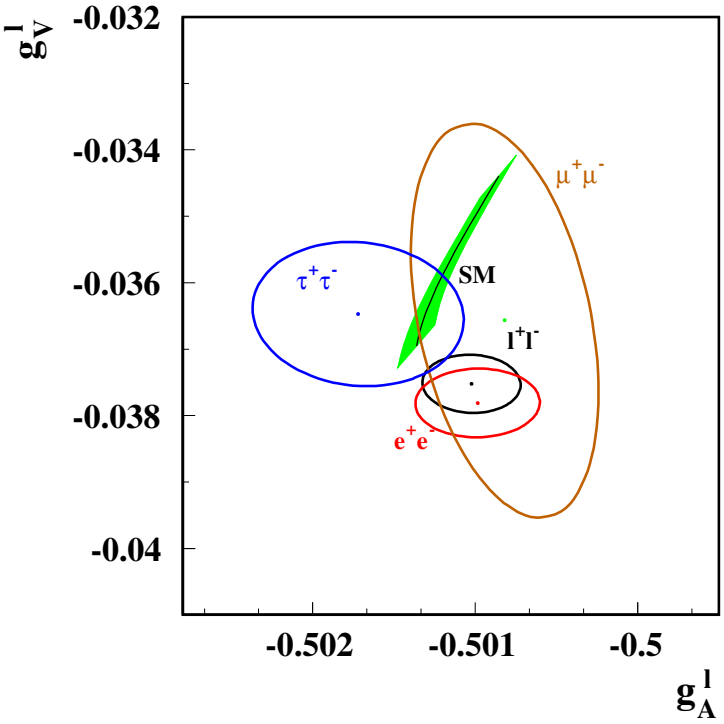


Z^0–Fermion Kopplungen

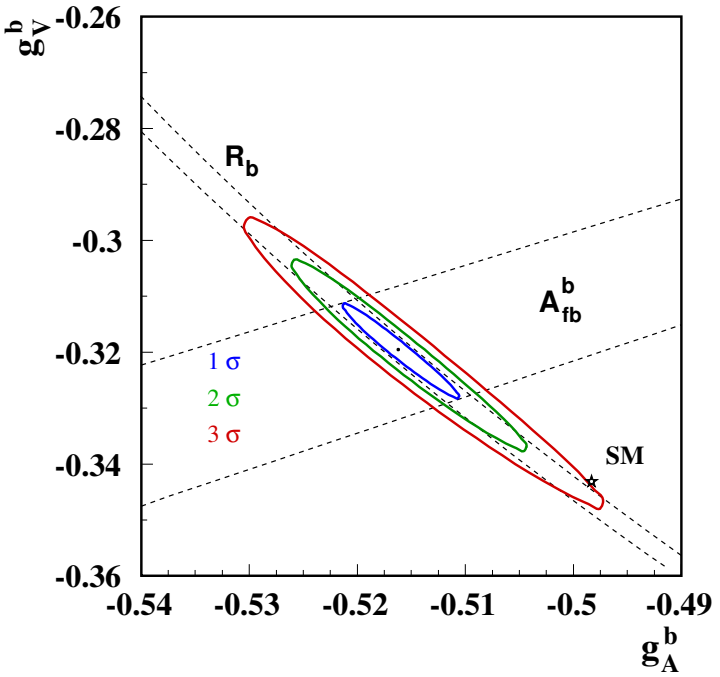
Bestimmung der Kopplungen aus Partialbreiten und Asymmetrien:

$$\Gamma_f \propto \left((g_{\mathrm{V}}^f)^2 + (g_{\mathrm{A}}^f)^2 \right) , \qquad \mathcal{A}_f = 2 \frac{g_{\mathrm{V}}^f / g_{\mathrm{A}}^f}{1 + (g_{\mathrm{V}}^f / g_{\mathrm{A}}^f)^2}$$

Lepton–Kopplungen: Konsistent mit Standardmodell, Leptonuniversalität $g_{\mathrm{A}}^{\ell} \approx 0.2\,\%$ und $g_{\mathrm{V}}^{\ell} \approx 2\text{–}8\,\%$.

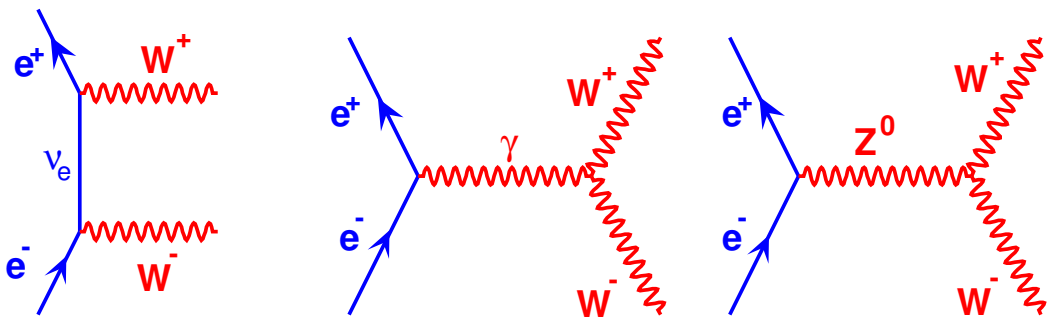


b–Kopplungen:
3–σ Abweichung zu Vorhersage.



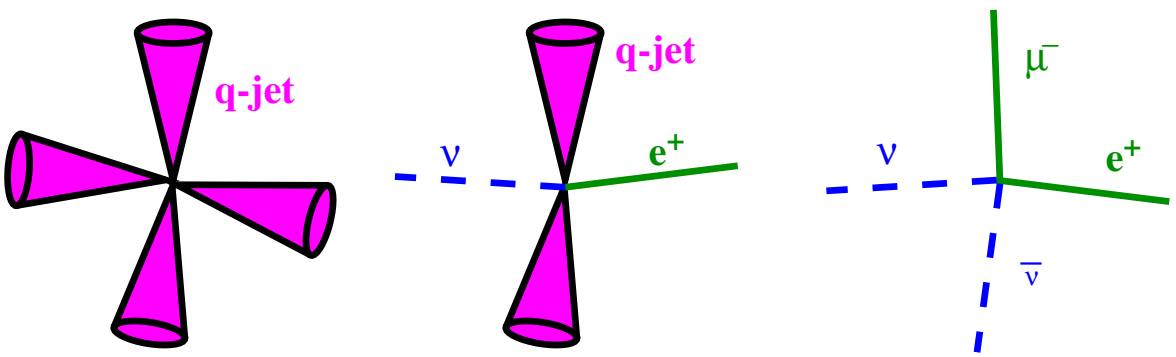
W Bosonen

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



3 grundlegende Ereignistopologien:

$WW \to qqqq$ $WW \to qql\nu$ $WW \to l\nu l\nu$

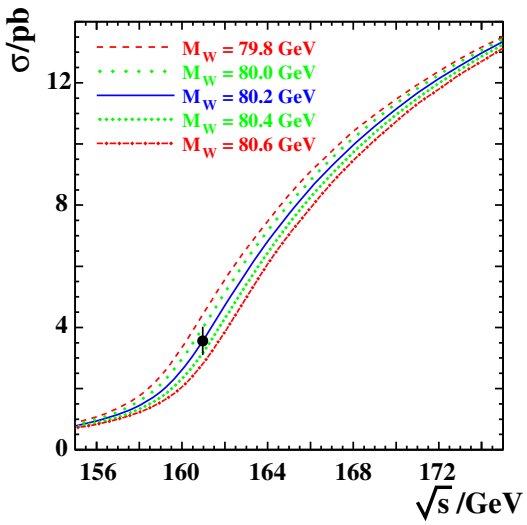


46 % 44 % 10 %

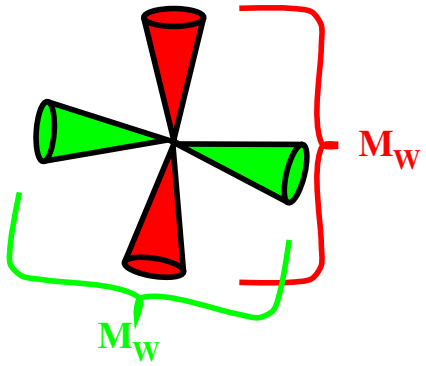
W Masse

Wirkungsquerschnitt σ_{WW} an der Schwelle sensitiv auf m_W.
Systematische Unsicherheit klein, Messung bei LEP2 statistisch limitiert.

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

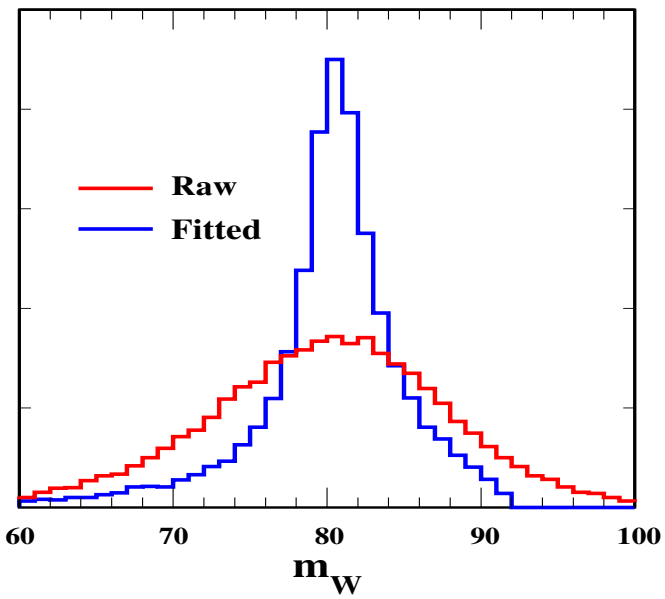


Bei höheren Schwerpunktsenergien direkte Rekonstruktion aus Jets



Gute Auflösung durch Zwangsbedingungen:

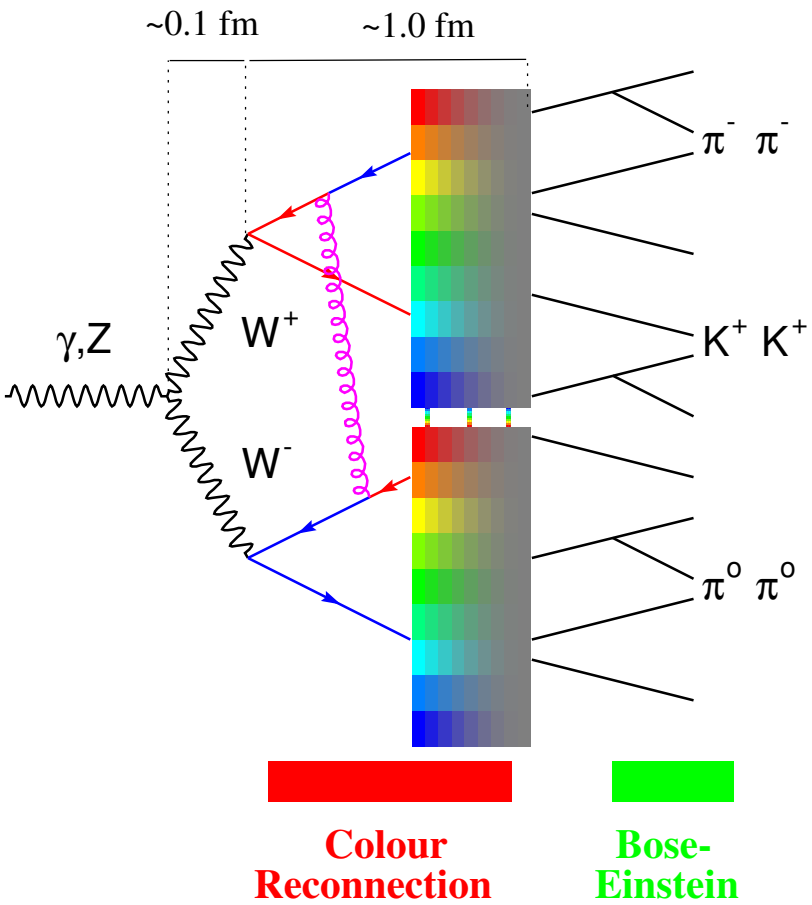
- $\vec{p}$, E Erhaltung
- $m_{W_1} = m_{W_2}$



W Masse

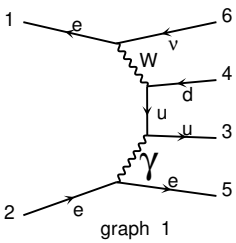
Zwangsbedingungen nur näherungsweise erfüllt:
Keine Photonabstrahlung, gleiche Massen.
$\rightarrow$ 'Kalibration' mit Monte Carlo Simulation.
Subtile Effekte durch Hadronisation, Photonabstrahlung, Interferenz mit anderen $e^+e^- \rightarrow 4f$ Prozessen führen zu systematischen Unsicherheiten $\mathcal{O}(20\,\mathrm{MeV})$

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

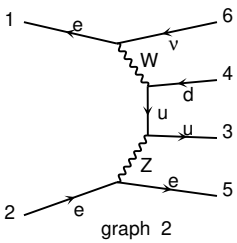


4 Fermion Endzustände

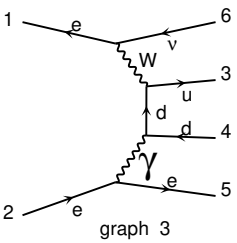
Vielzahl möglicher 4 Fermion Prozesse, z.B. 20 Diagramme niedrigster Ordnung für $e^+e^- \to e\,\nu\,u\,d$



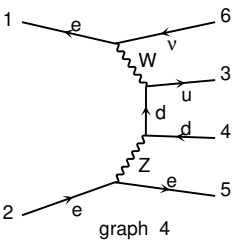
graph 1



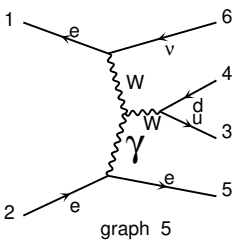
graph 2



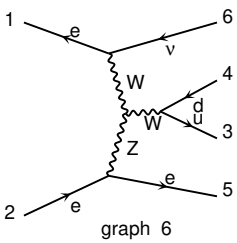
graph 3



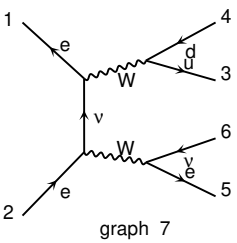
graph 4



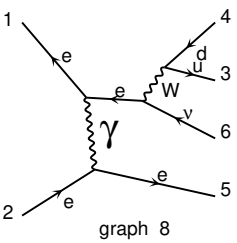
graph 5



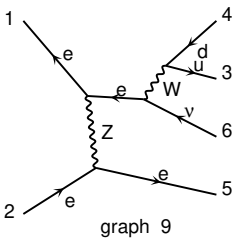
graph 6



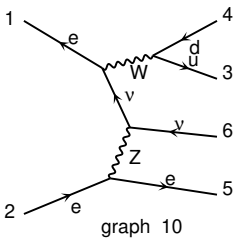
graph 7



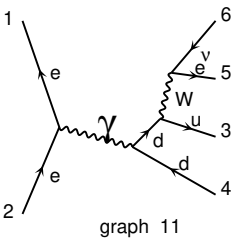
graph 8



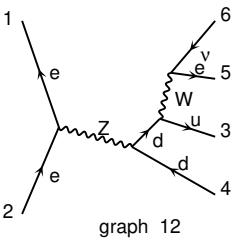
graph 9



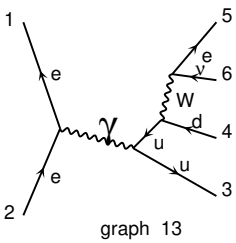
graph 10



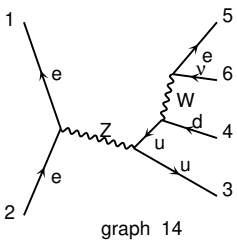
graph 11



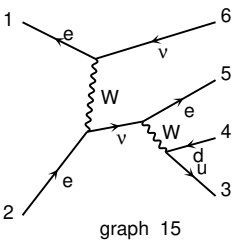
graph 12



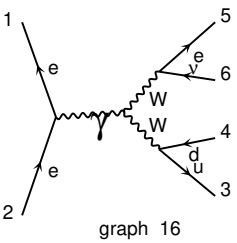
graph 13



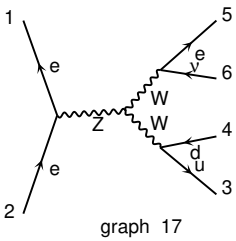
graph 14



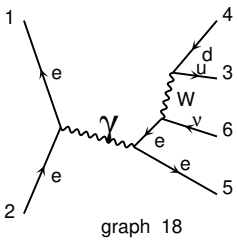
graph 15



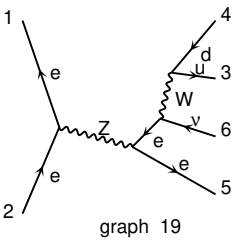
graph 16



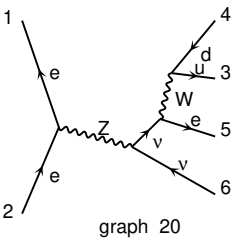
graph 17



graph 18



graph 19



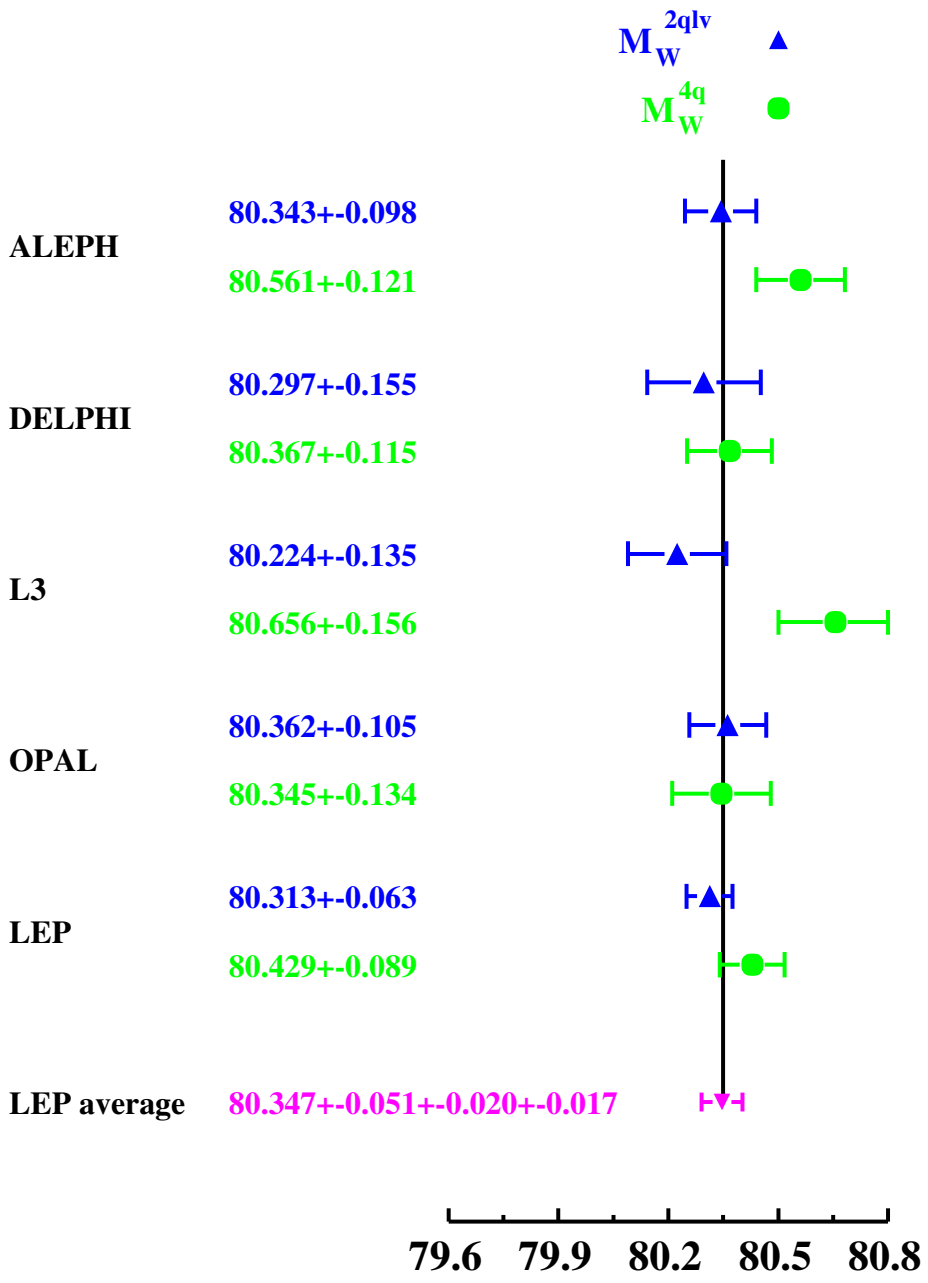
graph 20

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.

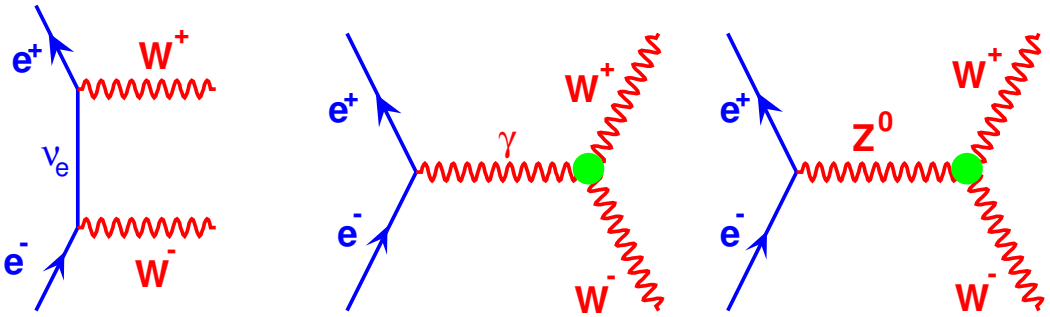
Vorläufiges Resultat mit $4 \cdot 3000\ W^+W^-$ Ereignissen bei LEP2: $m_W(LEP) = 80.350 \pm 0.056\,\text{GeV}$

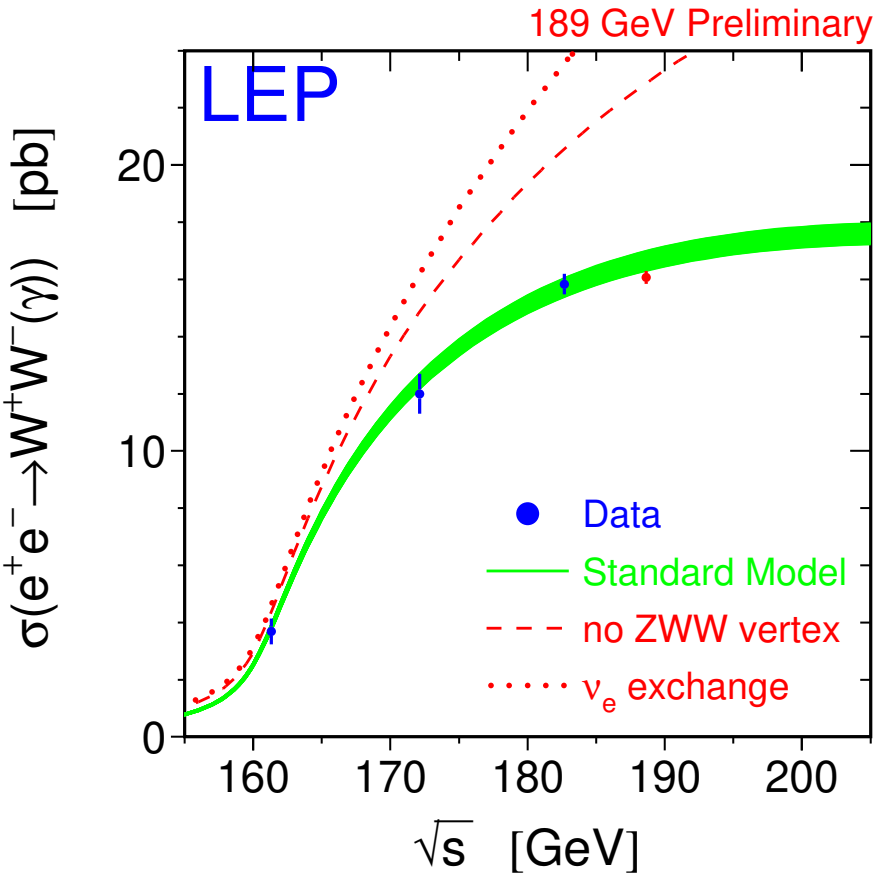


Eichboson–Kopplungen

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

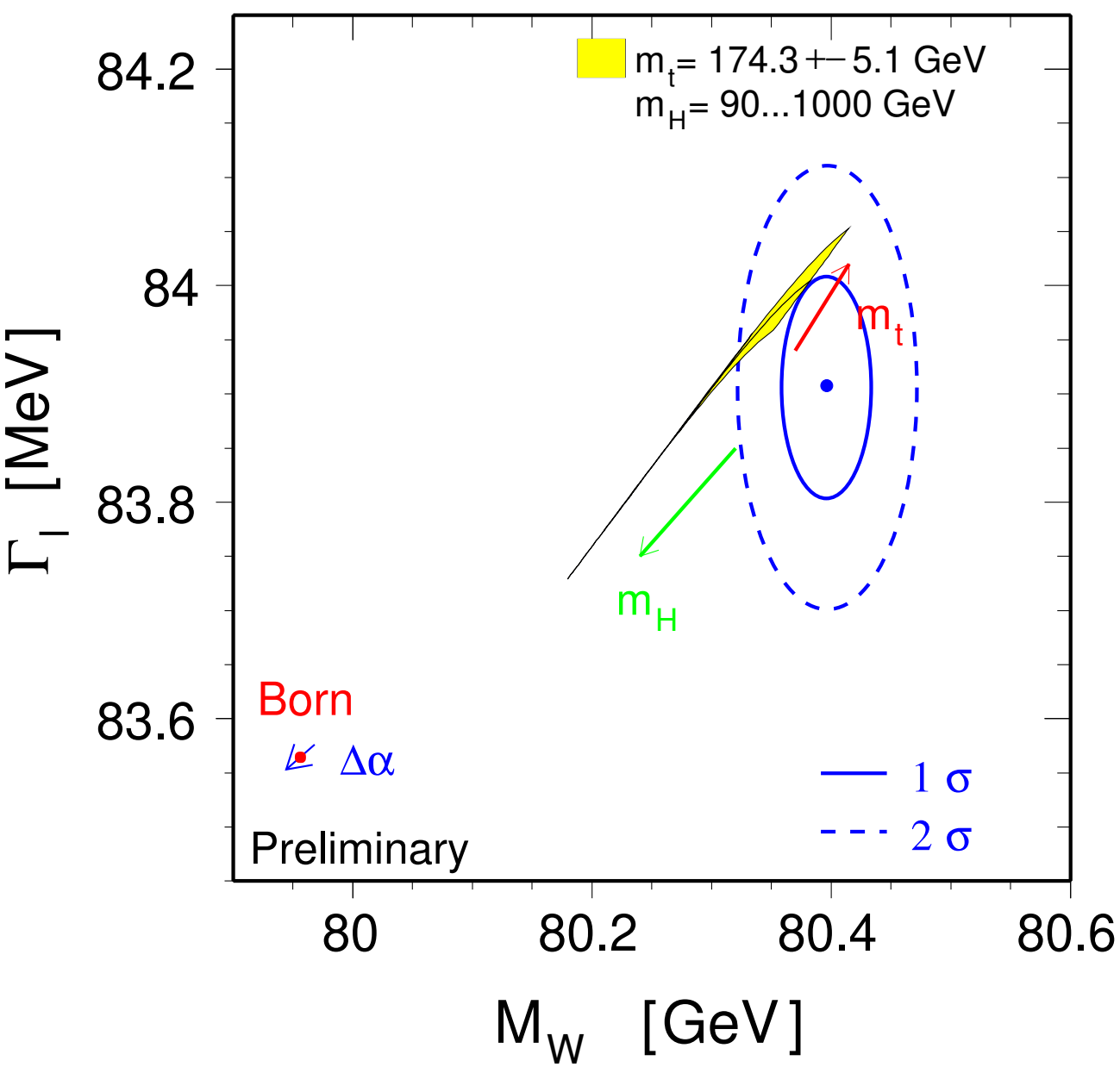
Vor LEP2 nur schwache Tests dieser Kopplungen.



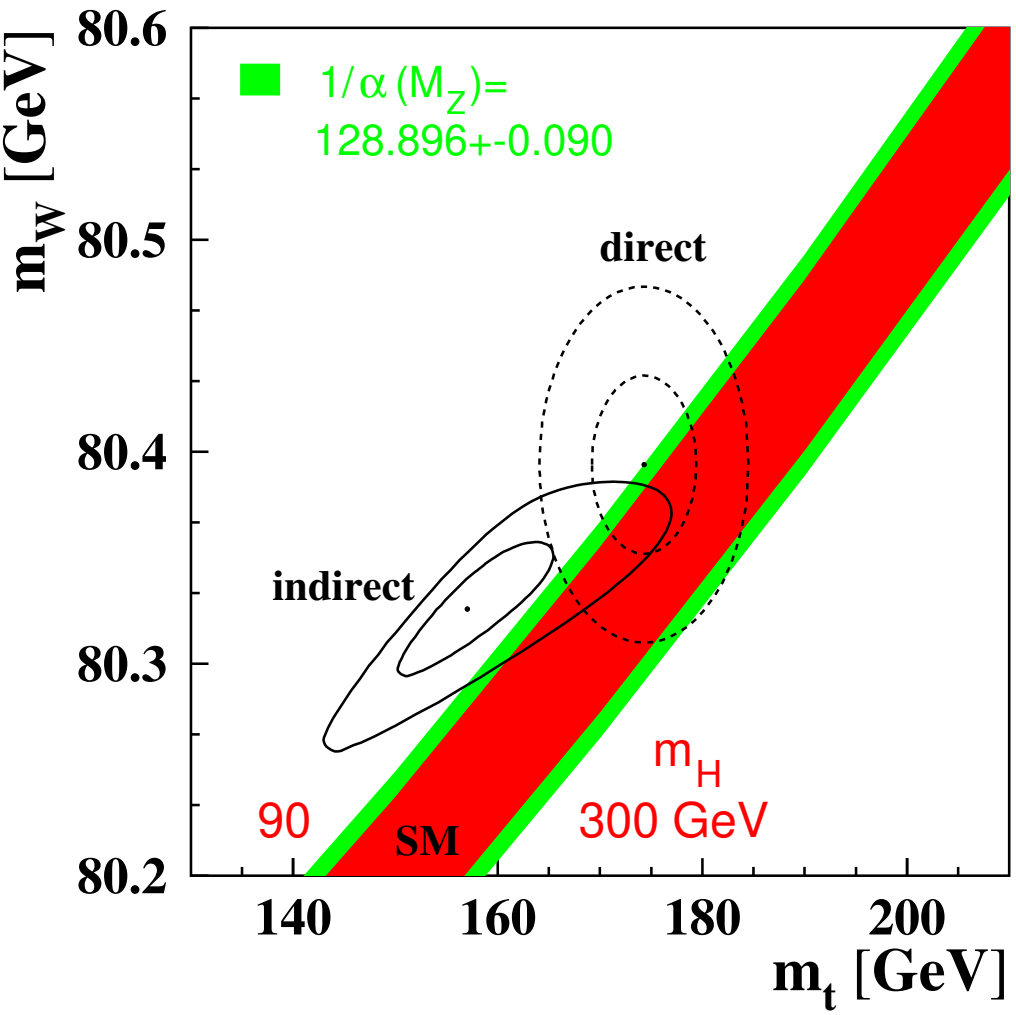


Weitere Untersuchungen zur Struktur Boson–Boson Kopplungen durch genaue Analyse der Winkelverteilung der W^+W^- und ihrer Zerfallsprodukte.

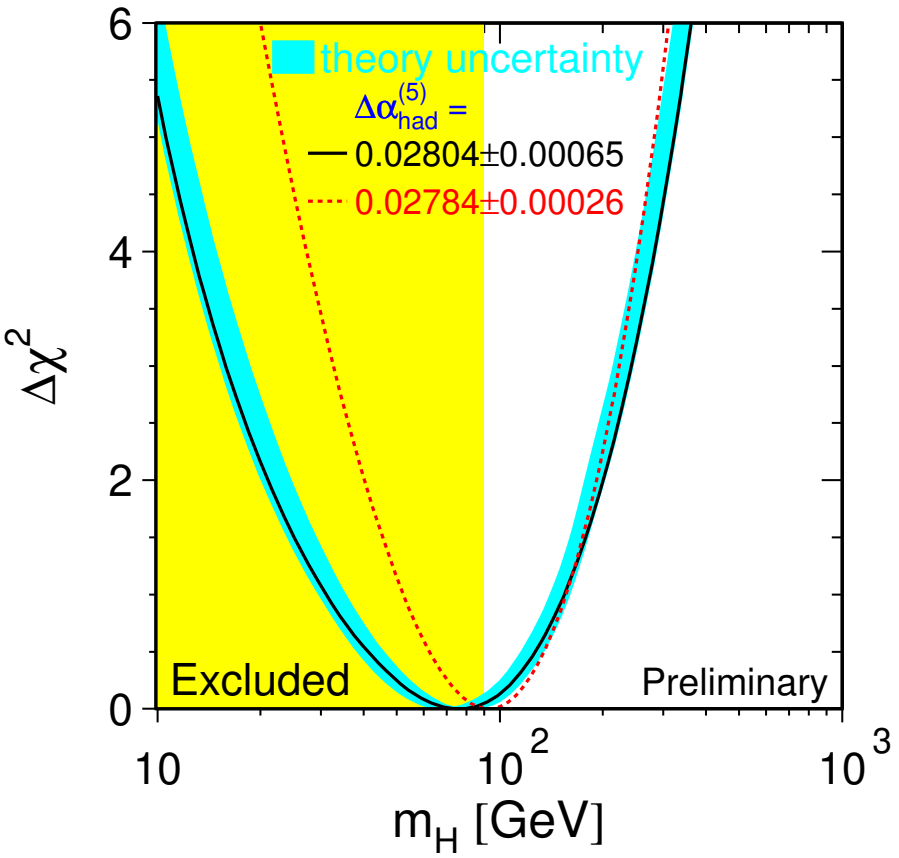
Präzisionsmessungen und Strahlungskorrekturen



Direkte vs indirekte m_W, m_t Messung

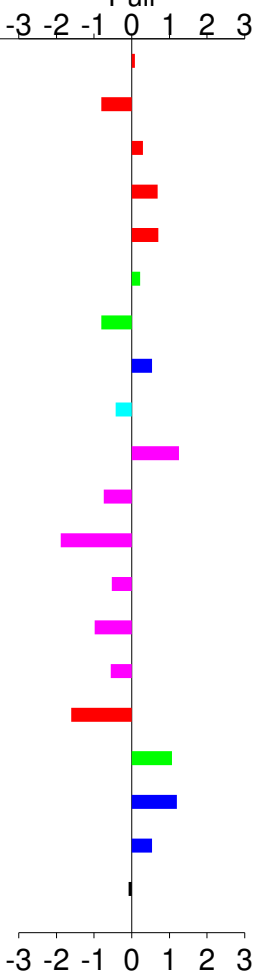


Globaler Fit



Moriond 1999

	Measurement	Pull
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
$A^{0,e}_{fb}$	0.01683 ± 0.00096	.71
A_e	0.1479 ± 0.0051	.23
A_τ	0.1431 ± 0.0045	-.81
$\sin^2\theta^{lept}_{eff}$	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
$A^{0,b}_{fb}$	0.0991 ± 0.0020	-1.88
$A^{0,c}_{fb}$	0.0712 ± 0.0043	-.53
A_b	0.908 ± 0.027	-.99
A_c	0.651 ± 0.030	-.56
$\sin^2\theta^{lept}_{eff}$	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
$\Delta\alpha^{(5)}_{had}(m_Z)$	0.02804 ± 0.00065	-.08



Zusammenfassung

Präzisionsmessungen bei LEP

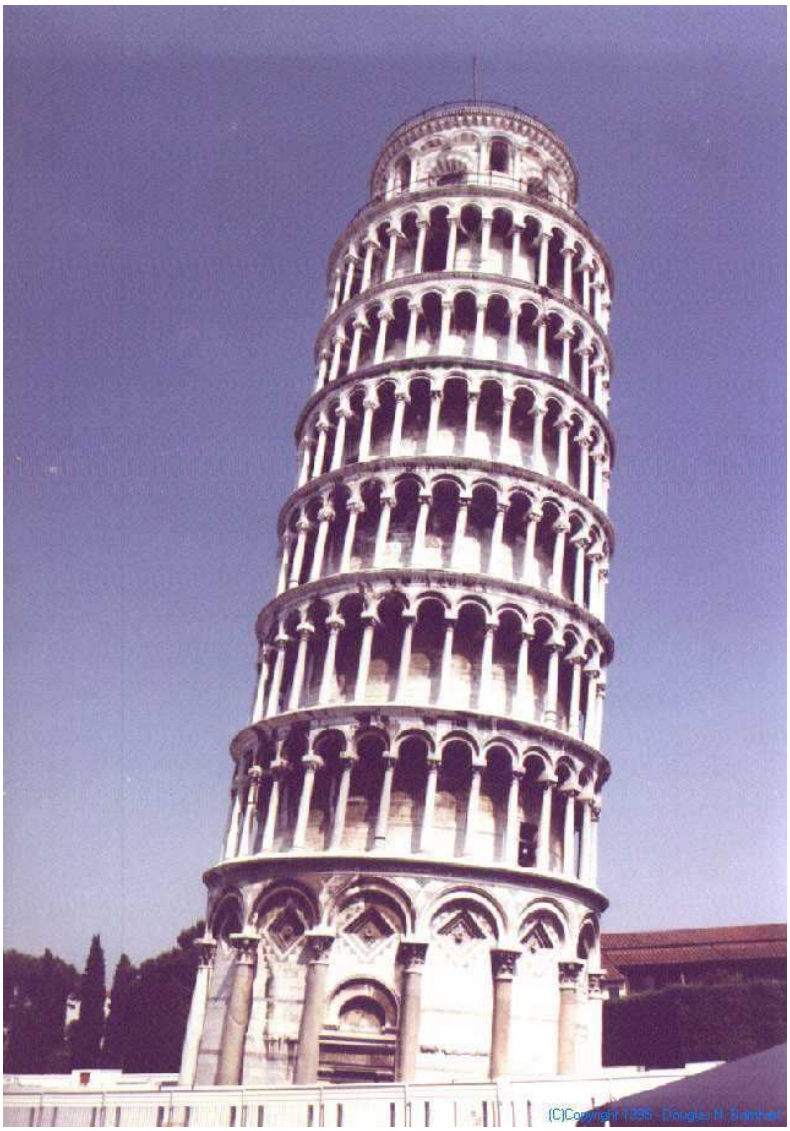
- Z^0–Masse: $91.1867 \pm 0.0021\,\text{GeV}$
- W–Masse: $80.350 \pm 0.056\,\text{GeV}$
- 3 Generationen von Fermionen
- Universalität der Z^0–Lepton Kopplungen

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 %C.L.

Ausblick:
LEP2 (bis 2000) $m_H \to 110\,\text{GeV}$.
Danach TEVATRON, LHC, e^+e^- LC.

Standardmodell ...



wunderschönes Bauwerk

mit offensichtlichen Macken

aber sehr langlebig

verblüffend, daß es noch steht

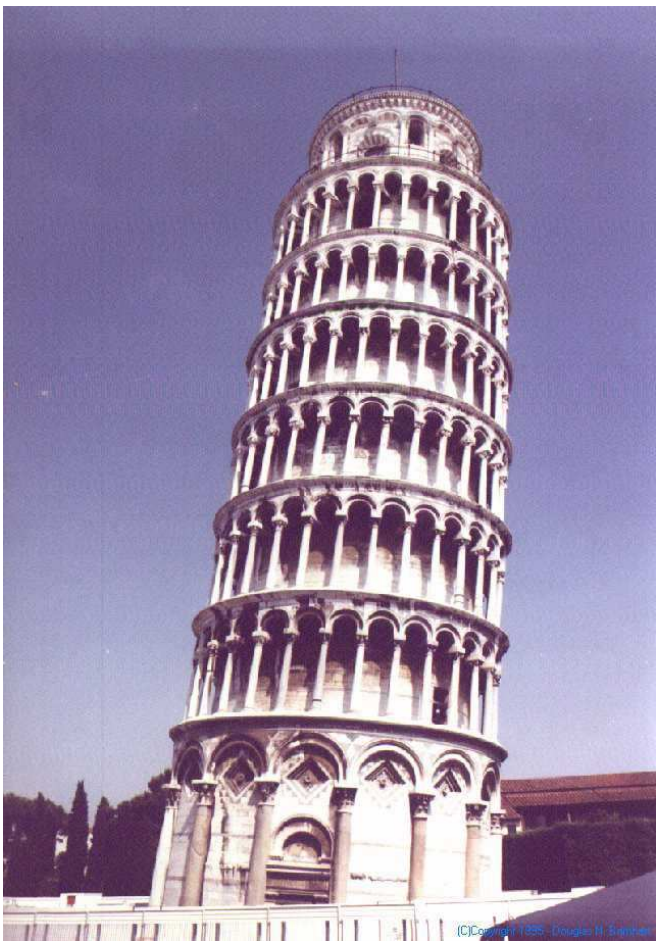
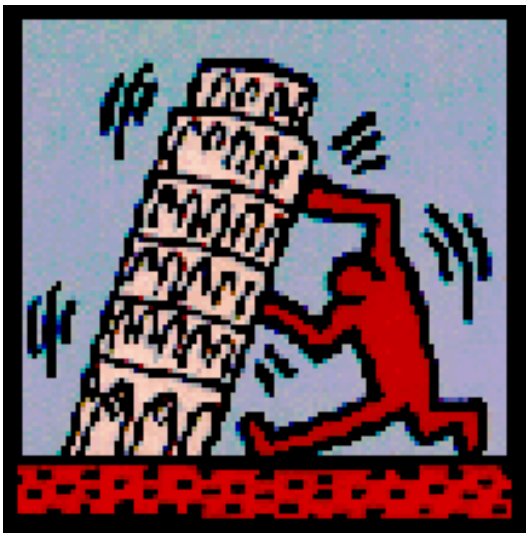
Standardmodell ...

wunderschönes Bauwerk

mit offensichtlichen Macken

aber sehr langlebig

verblüffend, daß es noch steht



Noch mehr Arbeit nötig ...