

Tests des Standardmodells bei LEP

Markus Elsing
CERN

Dresden 23/03/00



Inhalt

- Präzisionsmessungen auf der Z-Resonanz

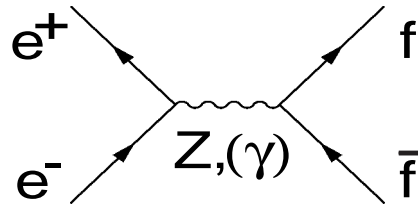
- Resultate zu SM-Prozessen bei LEP-2
 - Fermion-Paarproduktion oberhalb des Z
 - Produktion von neutralen Bosonpaaren
 - Eigenschaften des W-Bosons

- Interpretation der Daten im Rahmen des Standardmodells und Einschränkungen an die Masse des Higgs-Bosons

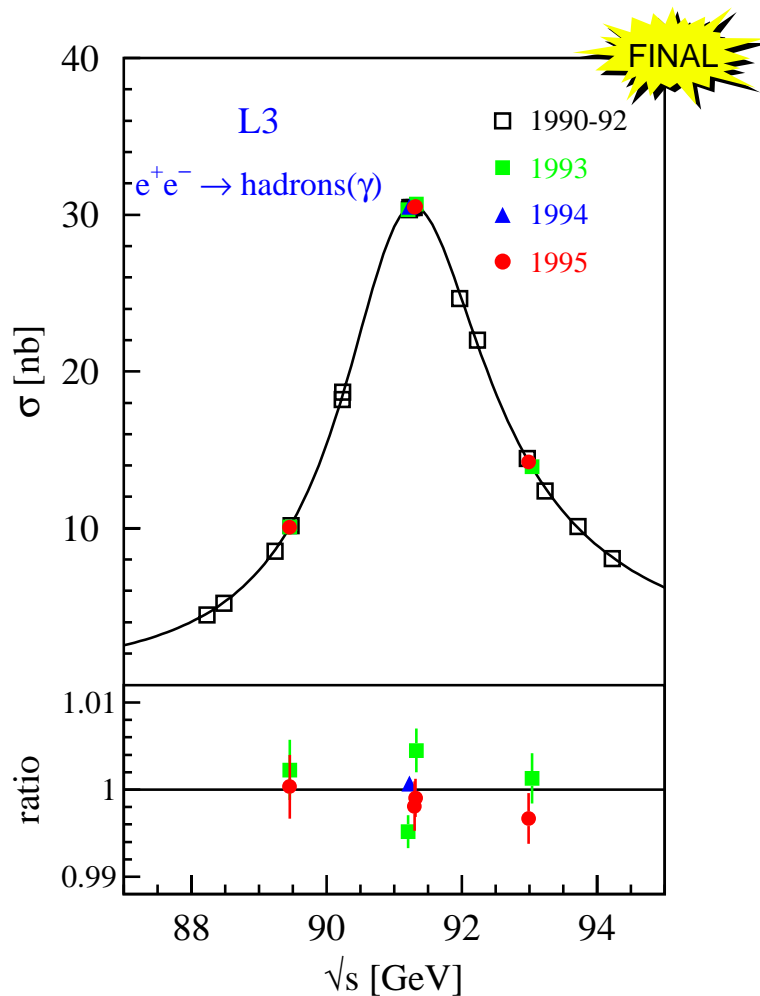
Die meisten Resultate sind vorläufig ! (Winter 2000)



Z-Resonanzparameter und Lepton-Asymmetrien



→ LEP kombiniert :
(5 Parameter-Fit)



Parameter	Mittelwert
m_Z (GeV)	91.1871 ± 0.0021
Γ_Z (GeV)	2.4944 ± 0.0024
σ_h^0 (nb)	41.544 ± 0.037
R_l	20.768 ± 0.024
$A_{FB}^{0,l}$	0.01701 ± 0.00095

→ abgeleitete Größen :

● Anzahl der leichten Neutrino-Familien

$$N_\nu = 2.9835 \pm 0.0083 \quad (\sim 2 \sigma)$$

● α_s aus σ_{ll}^0

$$\alpha_s = 0.1187 \pm 0.0030 \pm 0.0026(m_H)$$

(aus einer rein leptonischen Größe !!!)

Auf dem Weg zum endgültigen Parametersatz



→ 3 von 4 Ergebnissen publiziert,
OPAL (leider noch) vorläufig

→ Unsicherheit der Mittelung auf
Parameter-Niveau :
< 10% des kombinierten Fehlers

→ Verbesserungen in der Theorie :
(neu berücksichtigt seit Winter 99)

A.Arbusov, S.Jadach et al.,
G.Degrassi et al., B.Kniehl,
J.Kühn et al., G.Montagna et al.

● sekundäre Fermion-Paarproduktion
⇒ +0.5 MeV für m_Z und Γ_Z fehlt noch
A.Arbusov

→ Abschätzung der verbleibenden
Unsicherheiten : (G.Quast et al.)

● Unsicherheit der QED-Korrektur

$$\Delta m_Z = \pm 0.3 \text{ MeV}$$

$$\Delta \Gamma_Z = \pm 0.2 \text{ MeV}$$

$$\Delta \sigma_{\text{had}}^0 / \sigma_{\text{had}}^0 = \pm 0.2 \times 10^{-3}$$

● Übereinstimmung ZFITTER/TOPAZ0
nur $\Delta R_1 \sim 0.004$ ($\sim 0.2\sigma$)

● Unsicherheit der SM-Parameter

$$\Delta m_Z = 0.23 \text{ MeV} \times \log_{10}(M_H/\text{GeV})$$

● rel. Unsicherheit der Luminosität
 $0.54\text{-}0.61 \times 10^{-3}$

endgültige Zahlen ~ Sommer 2000



τ -Polarisation

Backup

→ τ -Polarisation aus Energie- und Zerfallswinkelverteilung

→ unabhängige Messung von A_e und A_τ

$$P_\tau(\cos \theta) = \frac{A_\tau(1 + \cos^2 \theta) + 2A_e \cos \theta}{1 + \cos^2 \theta + 2A_\tau A_e \cos \theta}$$

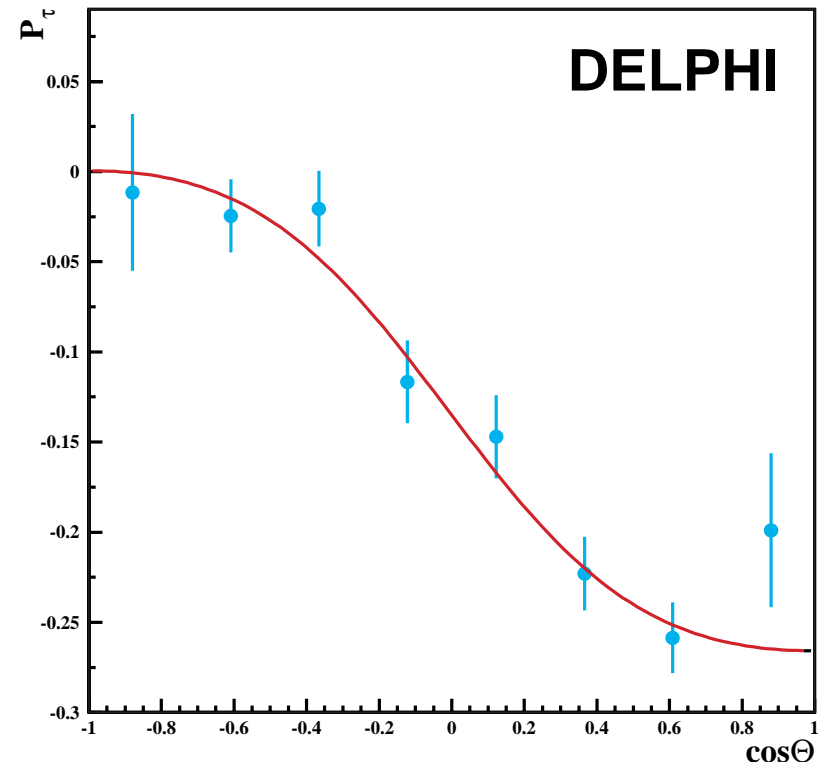
→ kombinierte LEP-Ergebnisse :

$$A_e = 0.1483 \pm 0.0051$$

$$A_\tau = 0.1425 \pm 0.0044$$

$$\Rightarrow A_1 = 0.1450 \pm 0.0033$$

unverändert seit
Tampere '99



Messung von A_{LR} bei SLC

→ Zählexperiment :

$$A_{LR} = \frac{\sigma_L - \sigma_R}{\sigma_L + \sigma_R} \frac{1}{P} = A_e$$

$P \sim e^-$ -Polarisation

$\sigma_{L,R} \sim$ Wirkungsquerschnitt für links-/rechtshändige e^-

→ genaueste Einzelmessung des effektiven Mischungswinkels

→ 550 Tausend Z-Zerfälle bis 1998

$$A_{LR} = 0.15138 \pm 0.00216$$



→ links-rechts Vor.-Rück.-Asymmetrien

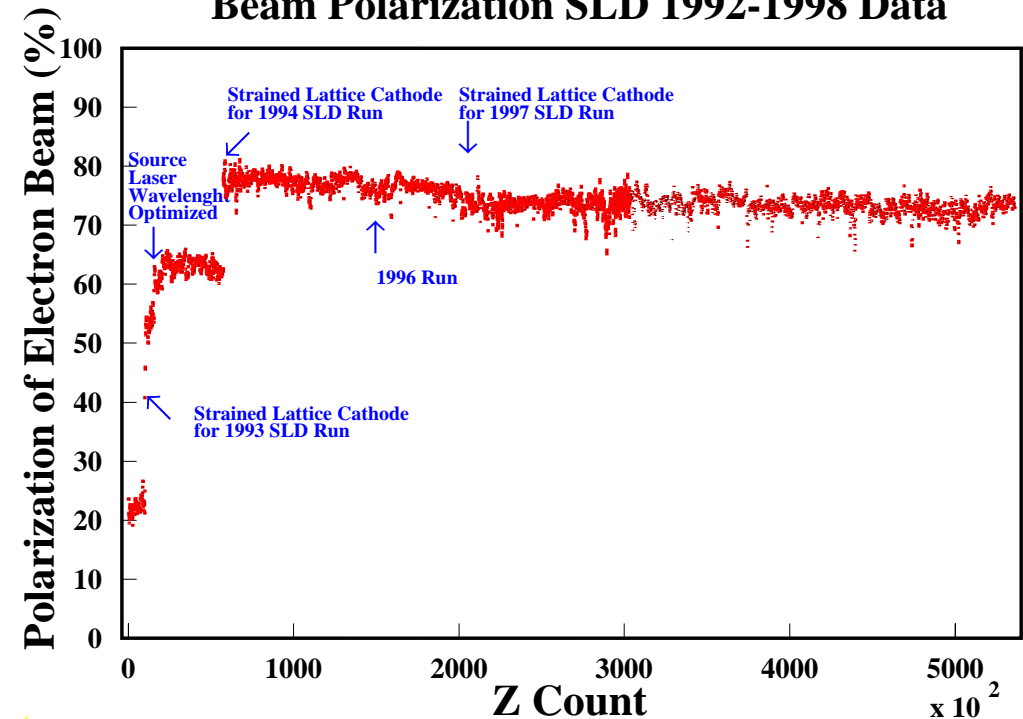
$$A_e = 0.1548 \pm 0.0058$$

$$A_\mu = 0.1421 \pm 0.0149$$

$$A_\tau = 0.1405 \pm 0.0155$$



Beam Polarization SLD 1992-1998 Data



→ SLD kombiniert :

$$A_1 = 0.15142 \pm 0.00207$$

$$\Rightarrow \sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lept}} = 0.23096 \pm 0.00026$$

Lepton-Kopplungen

→ zur Erinnerung :

$$\Gamma_l \propto (\bar{g}_{VI})^2 + (\bar{g}_{AI})^2$$

$$A_l \propto \frac{\bar{g}_{VI}}{\bar{g}_{AI}}$$

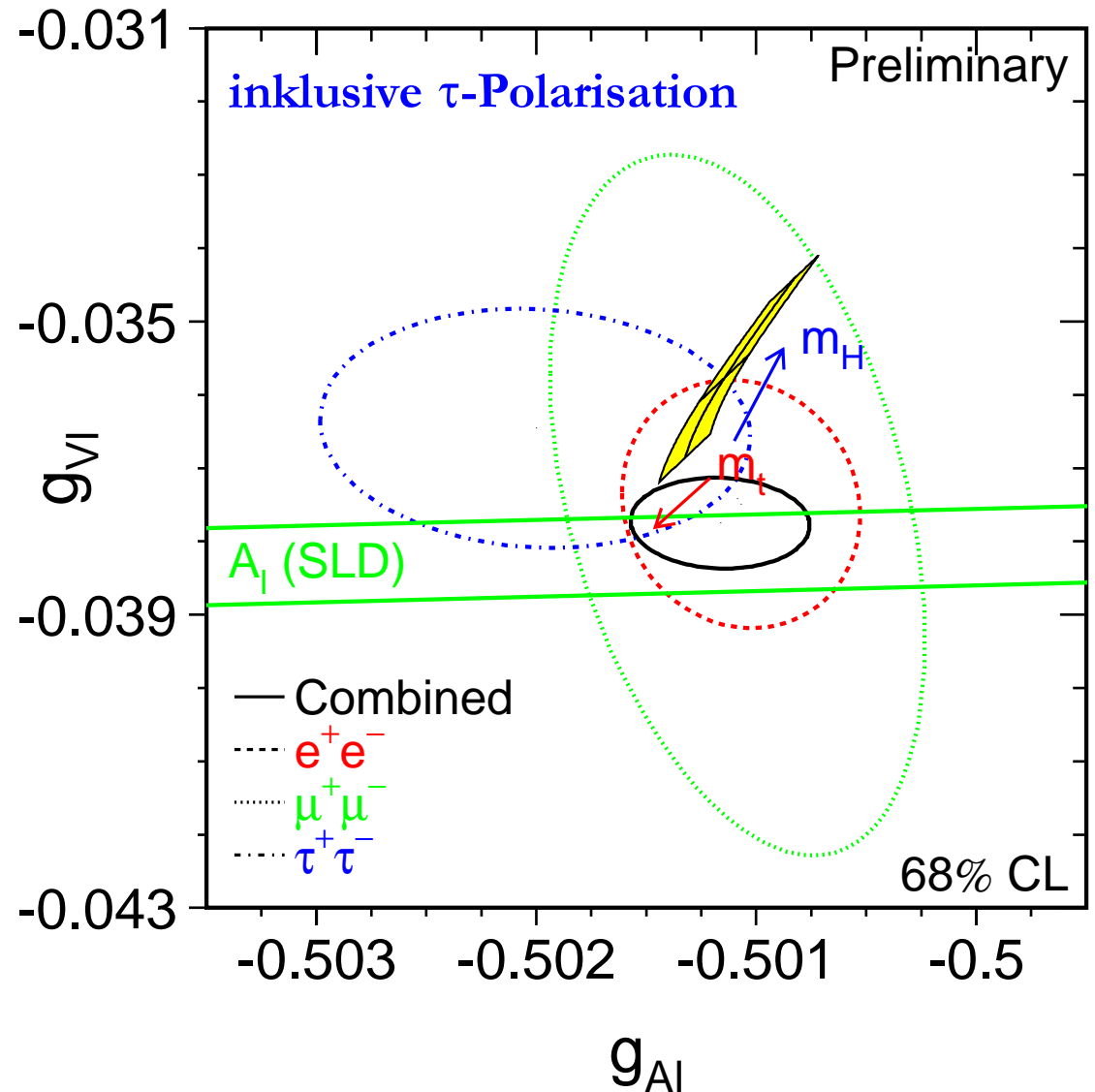
→ Test der Lepton-Universalität

→ LEP+SLD stimmen überein

→ kombinierte Ergebnisse :

$$g_{VI} = -0.03775 \pm 0.00041$$

$$g_{AI} = -0.50116 \pm 0.00027$$



Z-Kopplungen an schwere Quarks

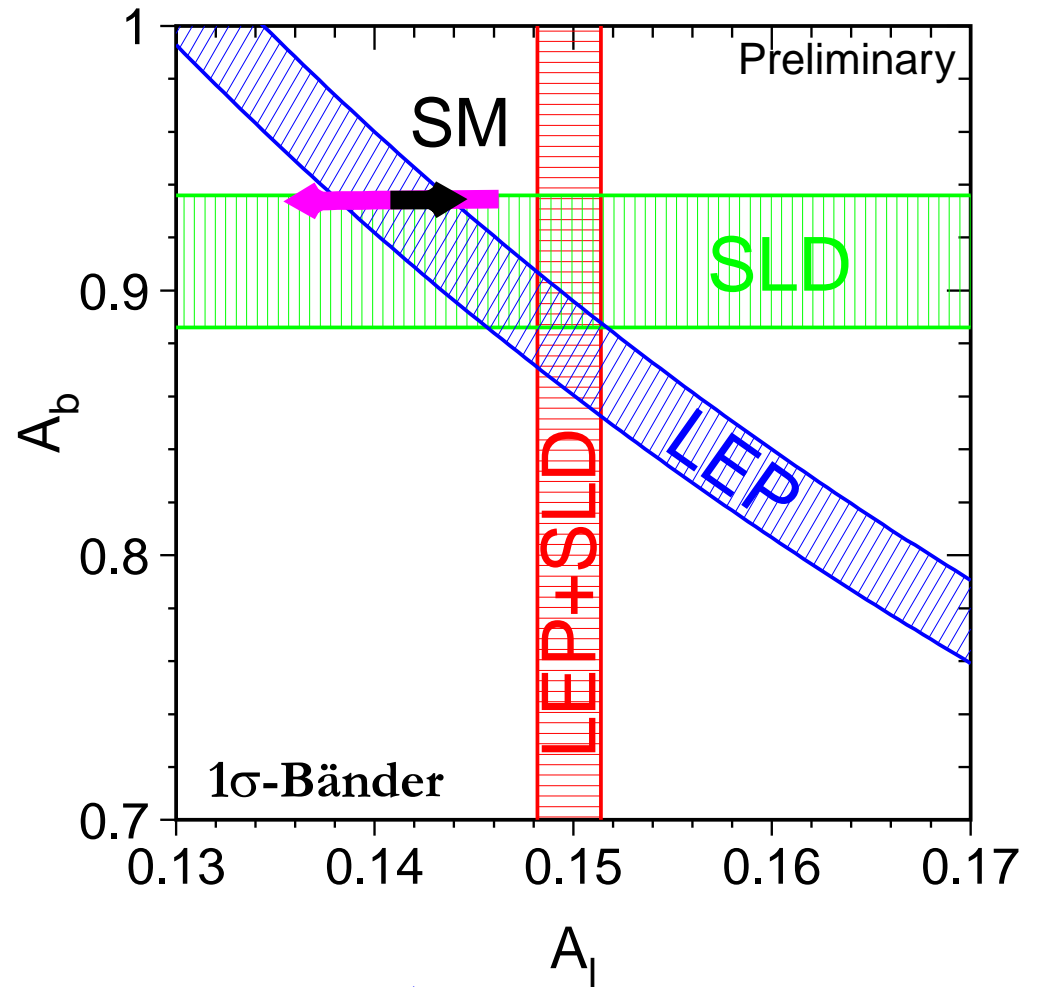
→ interessante Größen:

- partielle Breiten $\sim R_q = \Gamma_q / \Gamma_{had}$
- Vorw.-Rückw.-Asymmetrien
- links-rechts Vor.-Rück.-Asymmetrien

→ LEP+SLD-Resultate:

$$\begin{aligned}
 R_b^0 &= 0.21642 \pm 0.00073 \\
 R_c^0 &= 0.1674 \pm 0.0038 \\
 A_{FB}^{0,b} &= 0.0988 \pm 0.0020 \\
 A_{FB}^{0,c} &= 0.0692 \pm 0.0037 \\
 A_b &= 0.911 \pm 0.025 \\
 A_c &= 0.630 \pm 0.026
 \end{aligned}$$

unverändert seit
Tampere '99



$$A_{FB}^{0,b} = \frac{3}{4} A_e A_b \quad A_{LR,FB}^b = \frac{3}{4} A_b$$

$$A_1 \sim (A_{LR}, A_{FB}^{0,1}, \tau\text{-Pol.})$$

Background

→ Vergleich von :

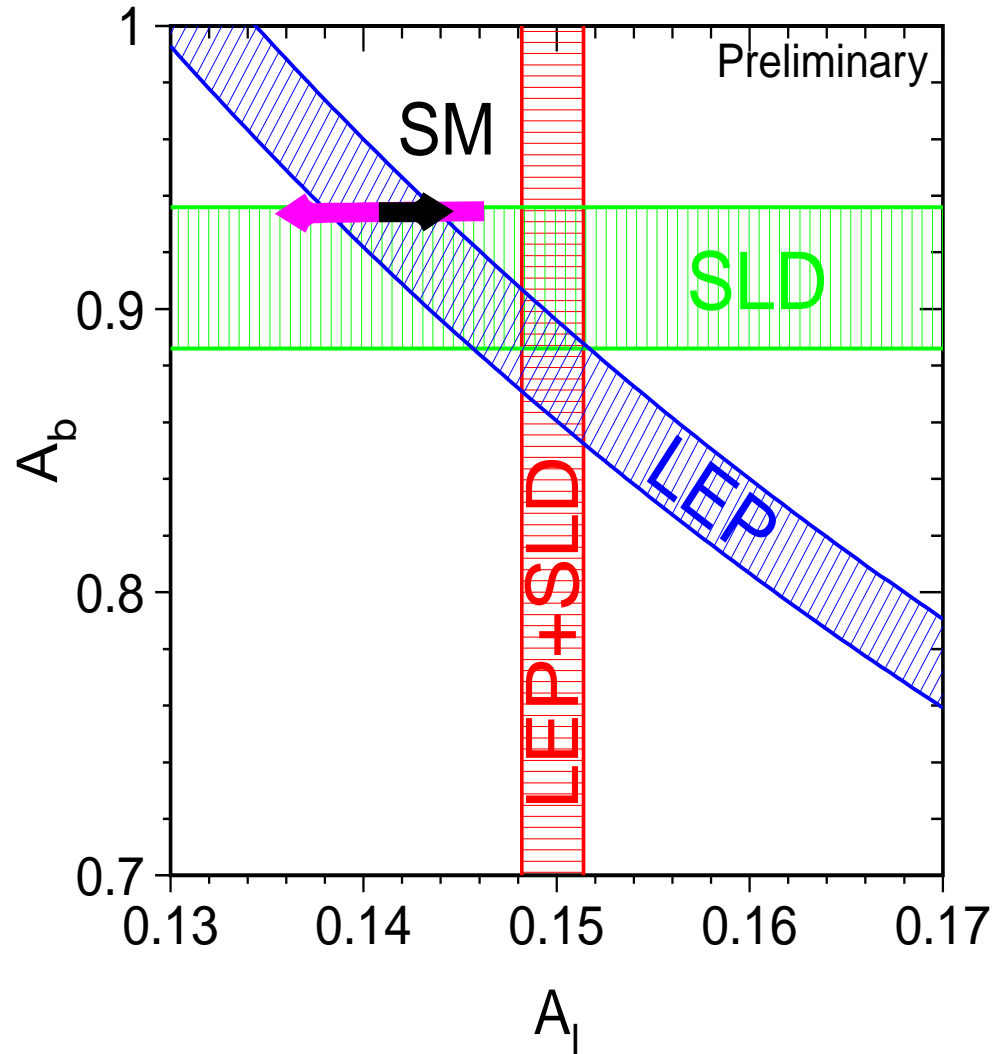
● A_b (aus links-rechts V.-R.-Asym.)

● A_1 (A_{LR} , $A_{FB}^{0,1}$, τ -Polarisation)

● $A_{FB}^{0,b} = \frac{3}{4} A_e A_b$

● Standardmodell (m_H , m_t)

→ Kombination veranschaulicht
Abweichung in A_{LR} und $A_{FB}^{0,b}$



	LEP ($A_1 = 0.1471 \pm 0.0026$)	SLD	LEP+SLD ($A_1 = 0.1493 \pm 0.0015$)
A_b	0.896 ± 0.024	0.911 ± 0.025	0.892 ± 0.016
A_c	0.625 ± 0.035	0.630 ± 0.026	0.624 ± 0.021

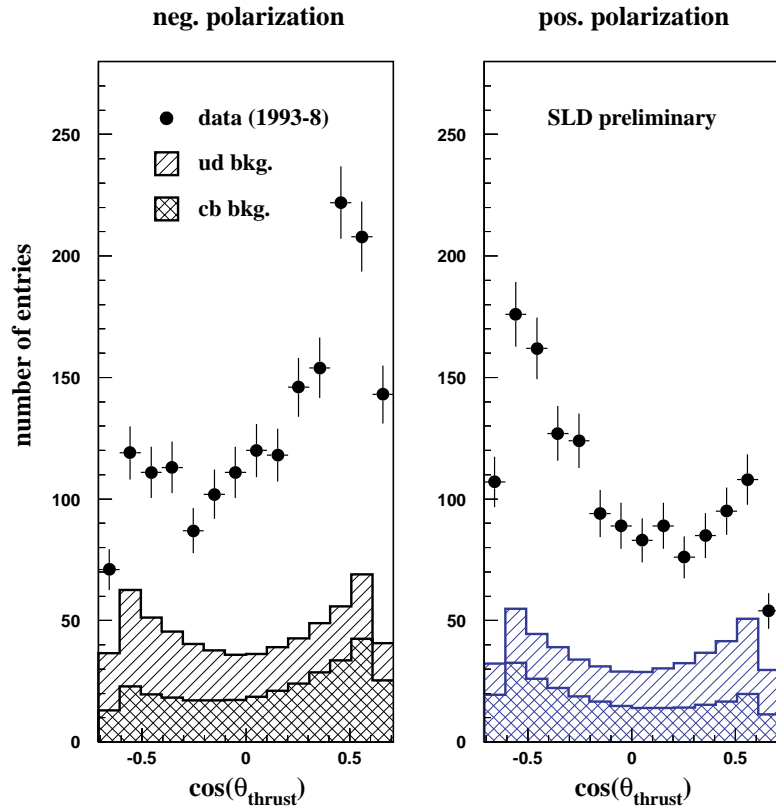
SM :
0.935
0.668



Z-Kopplungen an Strange-Quarks

Backup

→ identifiziere $e^+e^- \rightarrow s \bar{s}$ durch schnelle K^\pm, K_s^0 oder Λ^0 in hadr. Ereignissen

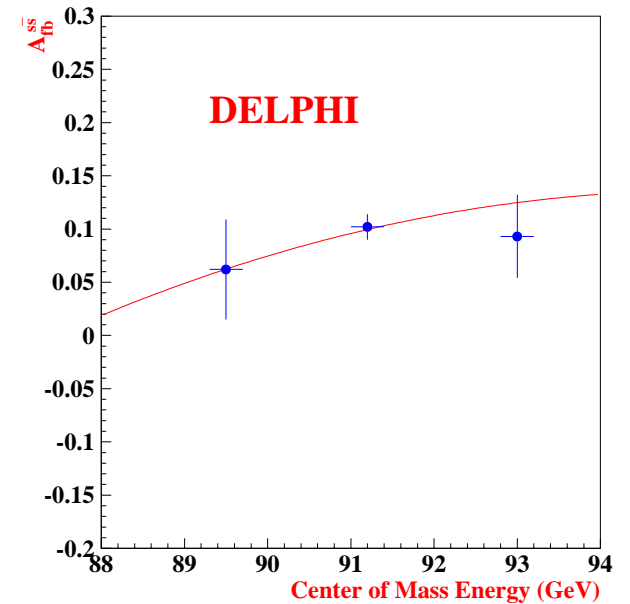
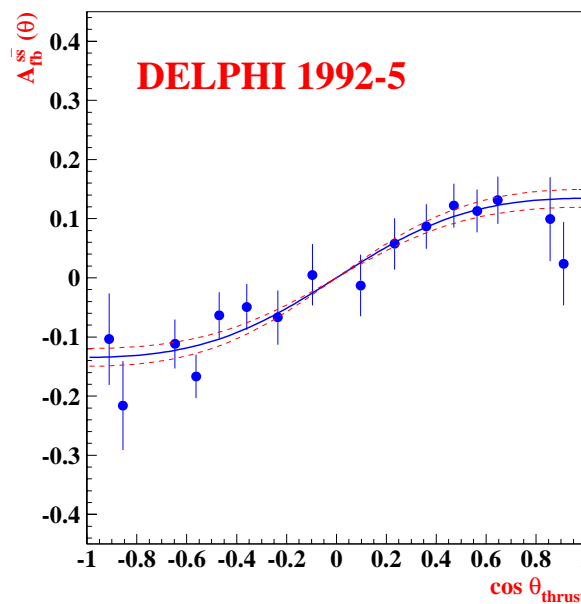


→ SLD :

$$A_s = 0.85 \pm 0.06 \pm 0.07$$

→ DELPHI :

$$A_{FB}^{0,s} = 0.1008 \pm 0.0113 \pm 0.0040$$



Messungen des effektiven Mischungswinkels

Preliminary

→ alle Asymmetrien sensitiv auf

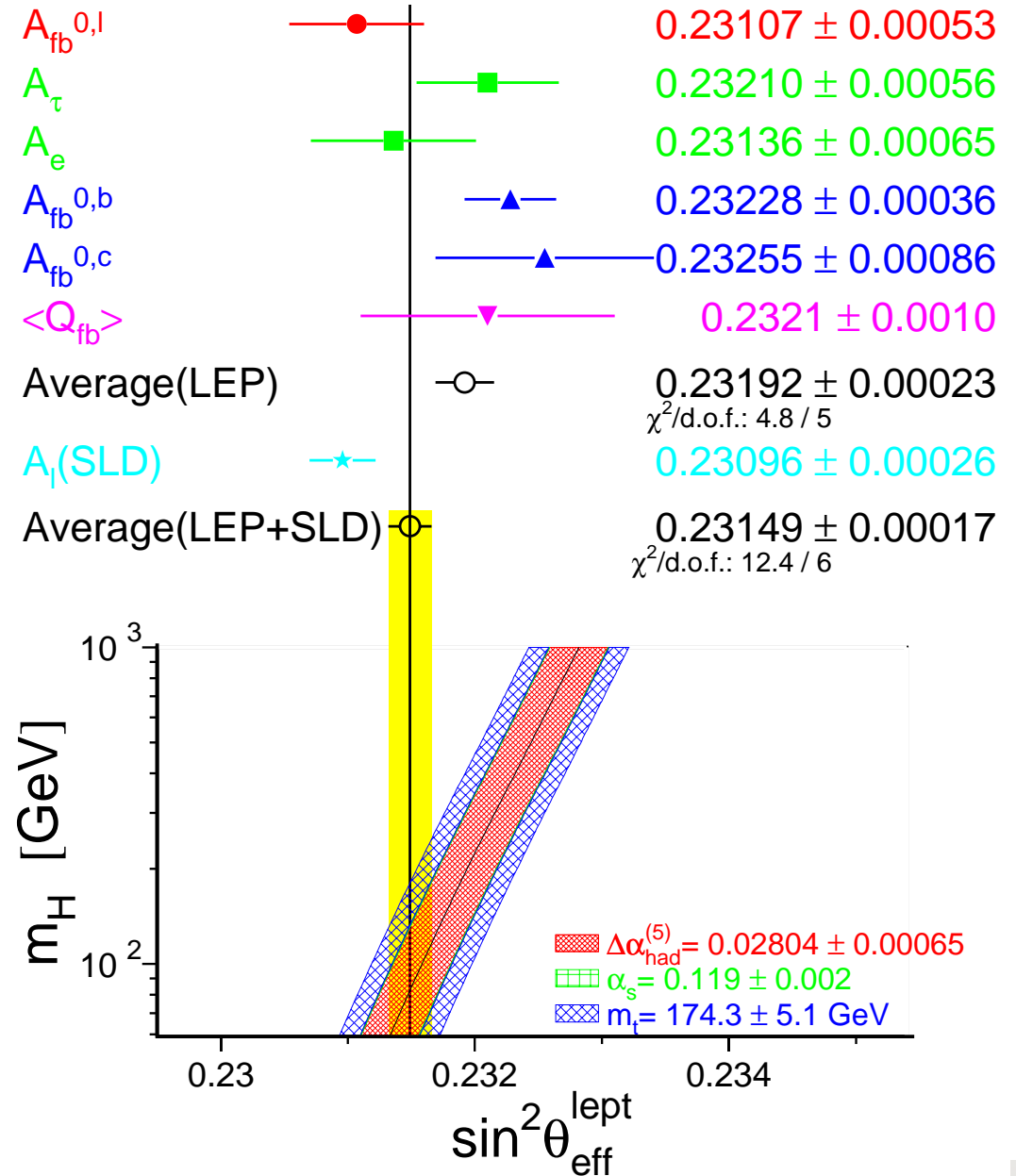
$$\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}$$

→ Unterschied A_1 (SLD) und $A_{\text{FB}}^{0,b}$

$\sim 3 \sigma$

→ alle Ergebnisse :

$\text{prob}(\chi^2) \sim 5 \%$



Z \rightarrow $b\bar{d}, b\bar{s}$ Flavour-ändernde neutrale Ströme (FCNC)

→ Suche nach $e^+e^- \rightarrow b\bar{q}$ ($q=d,s$)

bei einer Skala von m_Z

● definiere : $R'_b + R'_c + R'_1 + R_{bl} = 1$
mit :

$$R_{bl} = \frac{\sum_{q=d,s} \sigma(e^+e^- \rightarrow b\bar{q})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}$$

→ klassifiziere b-,c-,l-Hemisphären :

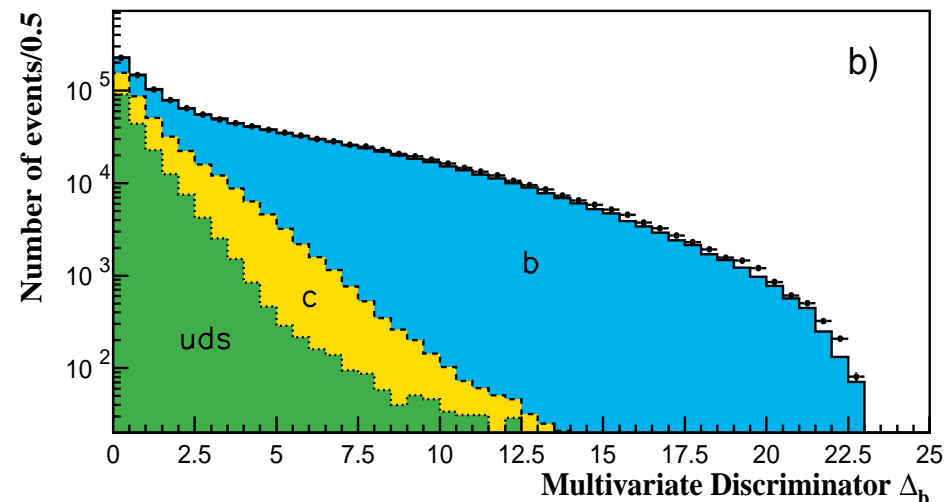
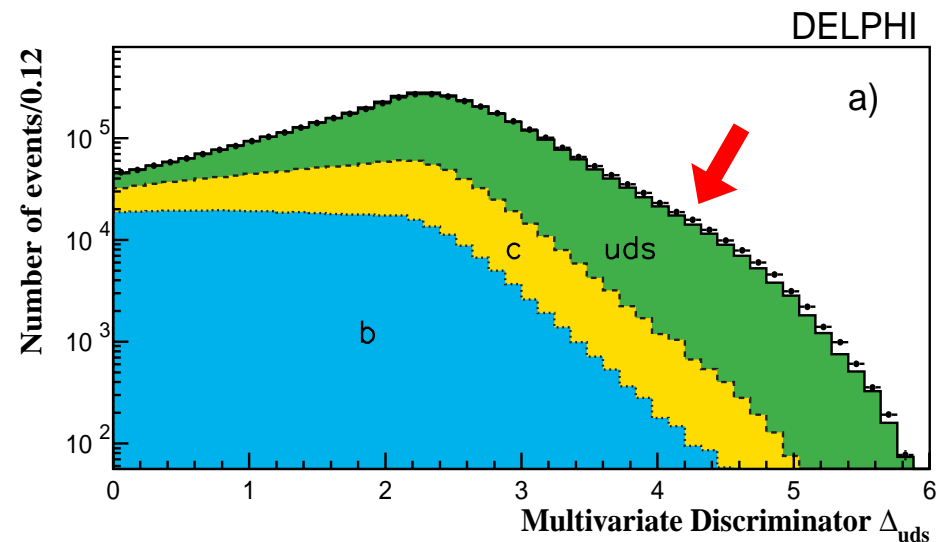
● Impaktparameter, Ereignistopologie...

● Effizienzen aus „Doppel-Tag“-Raten

→ DELPHI : $R_{bl} < 2.6 \times 10^{-3}$ @ 90 % CL
L3 : $R_{bl} < 6.0 \times 10^{-3}$ @ 90 % CL

● SM $\sim 10^{-7}$

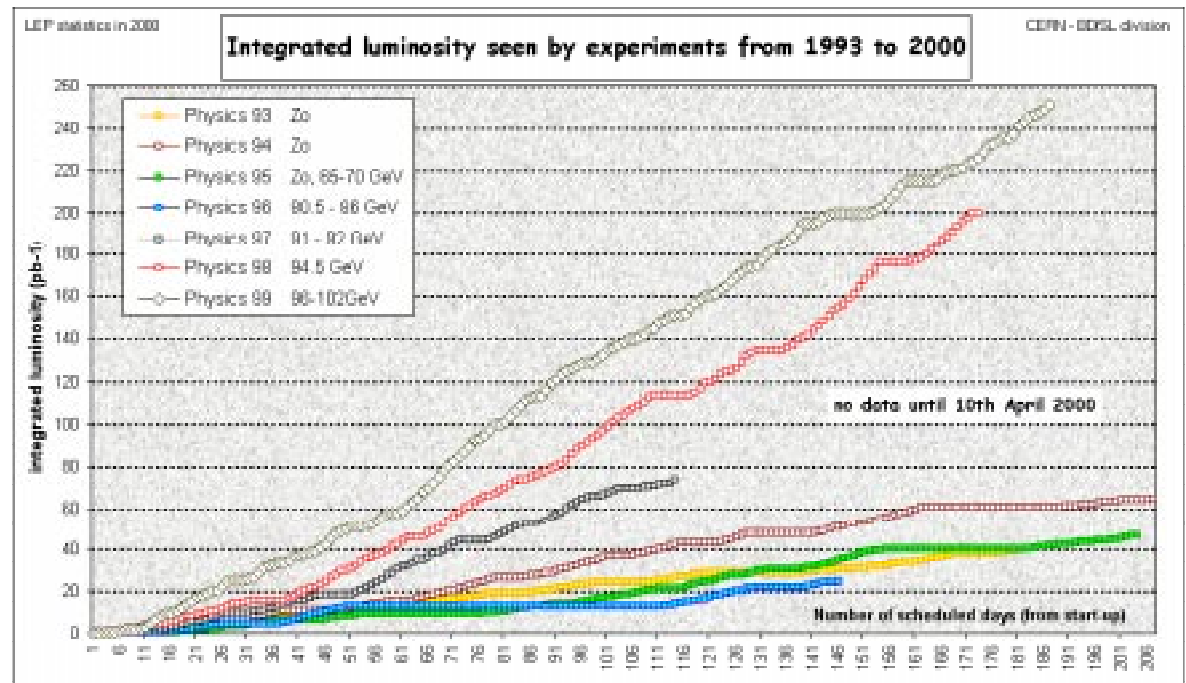
→ CLEO erhält für $b \rightarrow s e^+e^-$ auf Y4S
ein Limit $< 5.7 \times 10^{-5}$ @ 90 % CL



Datennahme oberhalb der Z-Resonanz

→ 1999 wieder hervorragendes Jahr für LEP

Jahr	\sqrt{s}	\mathcal{L}_{int}
1995	130/136	5 pb ⁻¹
1996	161/172	21 pb ⁻¹
1997	183	55 pb ⁻¹
1998	130/136	7 pb ⁻¹
1998	189	180 pb ⁻¹
1999	192	28 pb ⁻¹
	196	80 pb ⁻¹
	200	82 pb ⁻¹
	202	42 pb ⁻¹



→ total ~ 500 pb⁻¹ oberhalb WW-Schwelle pro Experiment



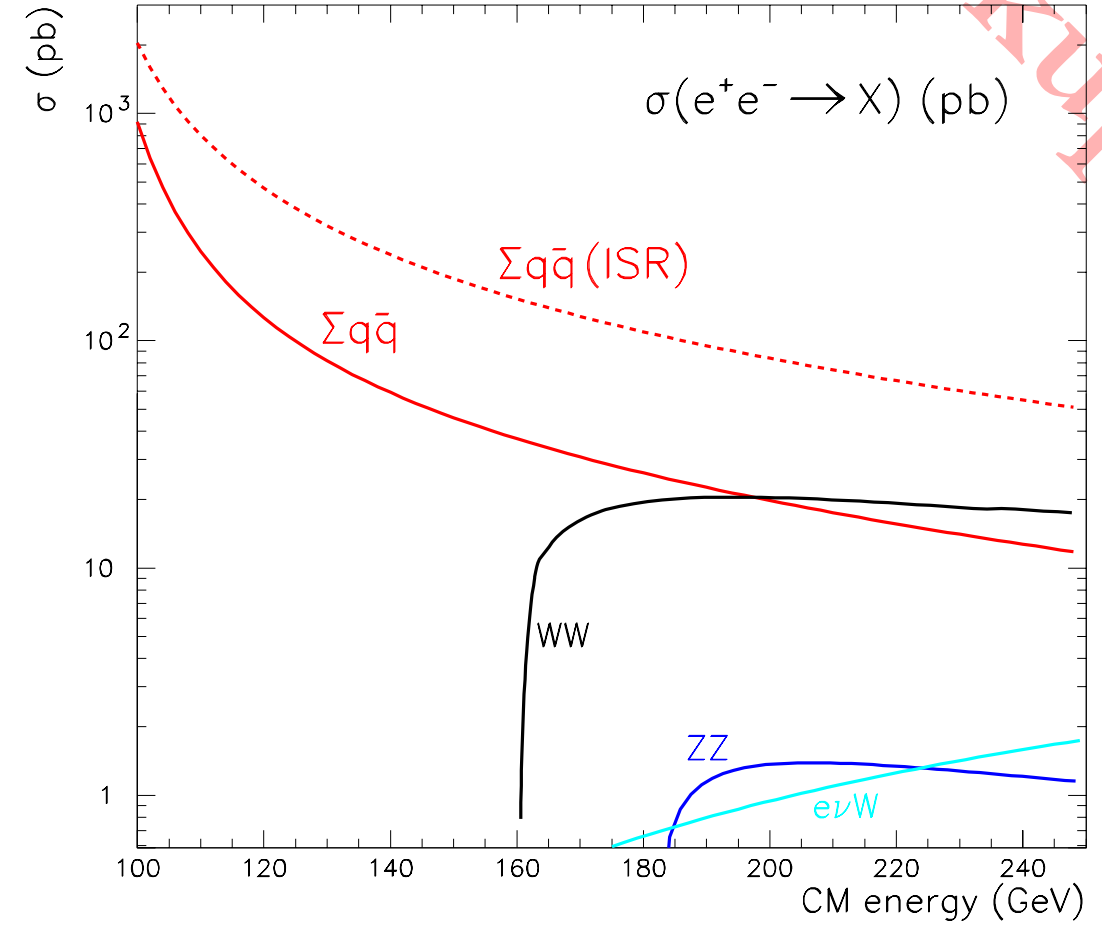
SM-Prozesse bei LEP 2-Energien

Backup

→ typische Wirkungsquerschnitte :

- $f \bar{f}$ -Produktion ~ 100 pb
- W-Paarproduktion ~ 10 pb
- W-Einzelproduktion ~ 1 pb
- Z-Paarproduktion ~ 1 pb

→ viele weitere Prozesse (4f...)

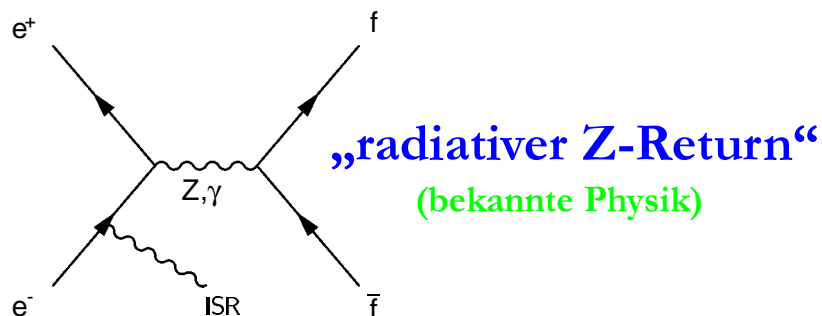


$f\bar{f}$ -Produktion oberhalb der Z-Resonanz

→ physikalisches Interesse :

- Z-Austausch nicht in Resonanz
⇒ Interferenz mit neuer Physik ?
- Z-Austausch, γ -Austausch+Interferenz
von gleicher Größenordnung
⇒ Interferenz messen (S-Matrix Fit)

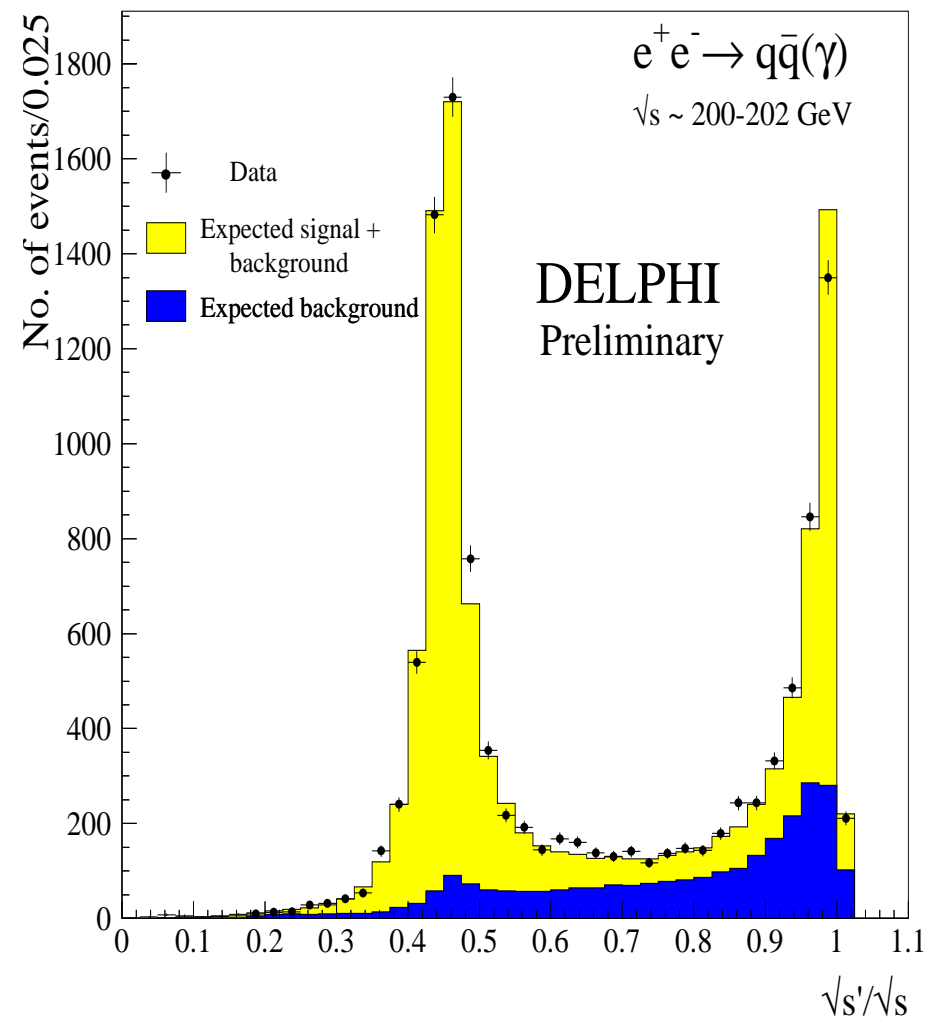
→ wichtiger Beitrag durch ISR :

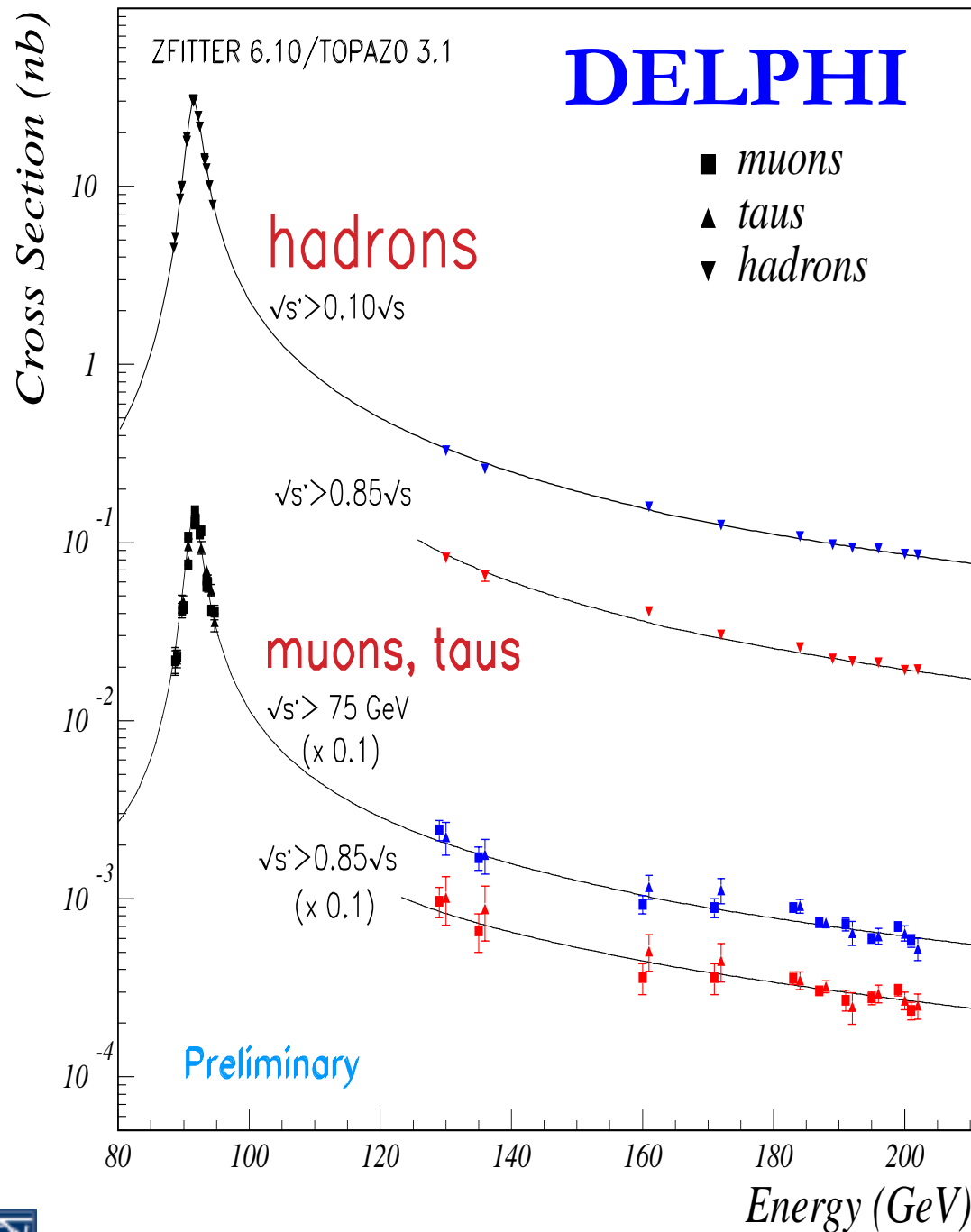


→ messe Wirkungsquerschnitte und Asymmetrien für :

- inklusiven Datensatz
- Hochenergiedaten $\sim \sqrt{s}' > 0.85 \sqrt{s}$

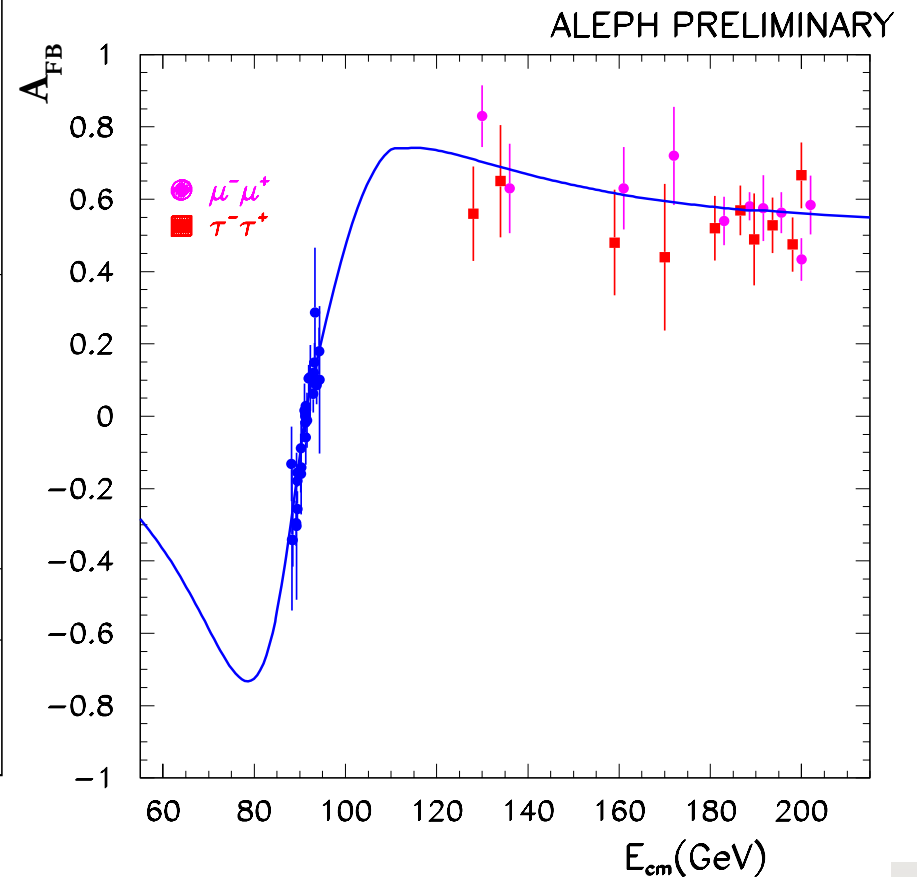
→ effektive Schwerpunktsenergie $\sim \sqrt{s}'$



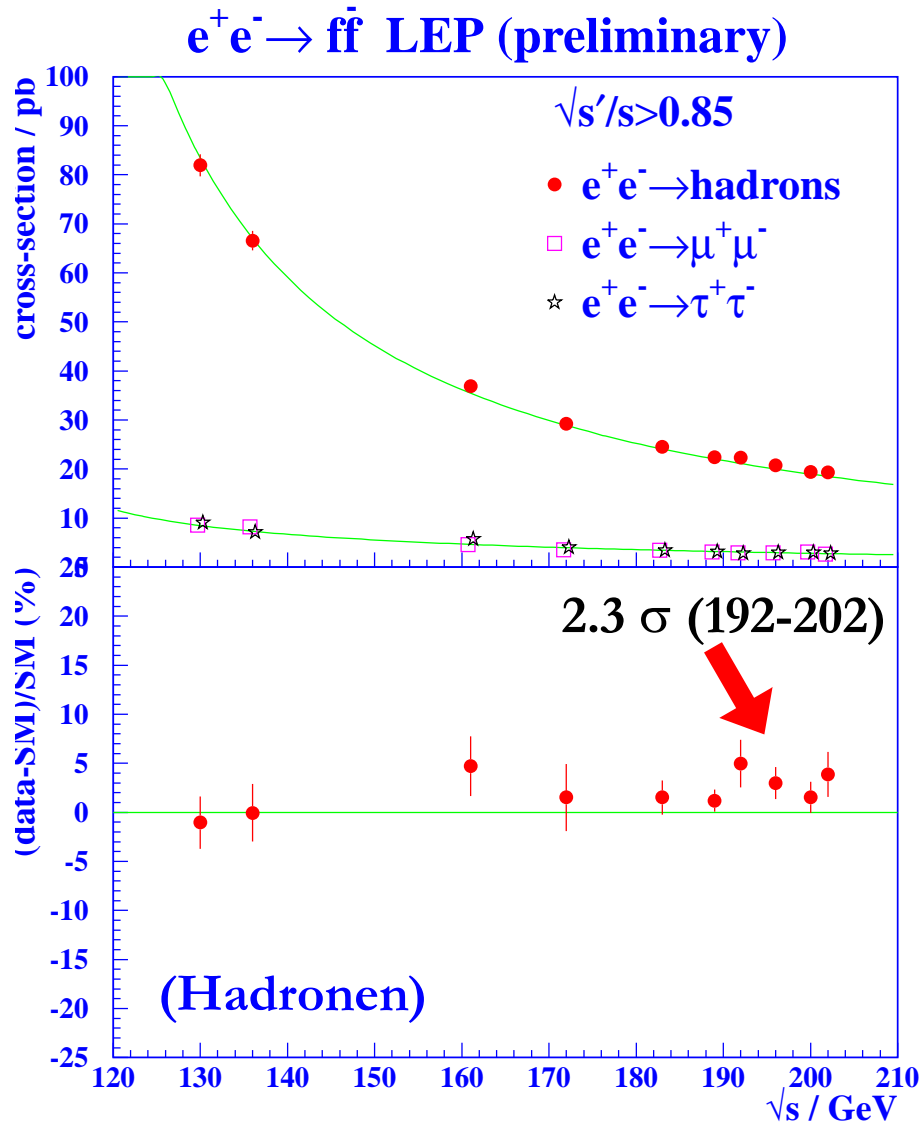


← Wirkungsquerschnitte für $\mu^+\mu^-(\gamma)$ -, $\tau^+\tau^-(\gamma)$ - und $q\bar{q}(\gamma)$ -Produktion bis 202 GeV

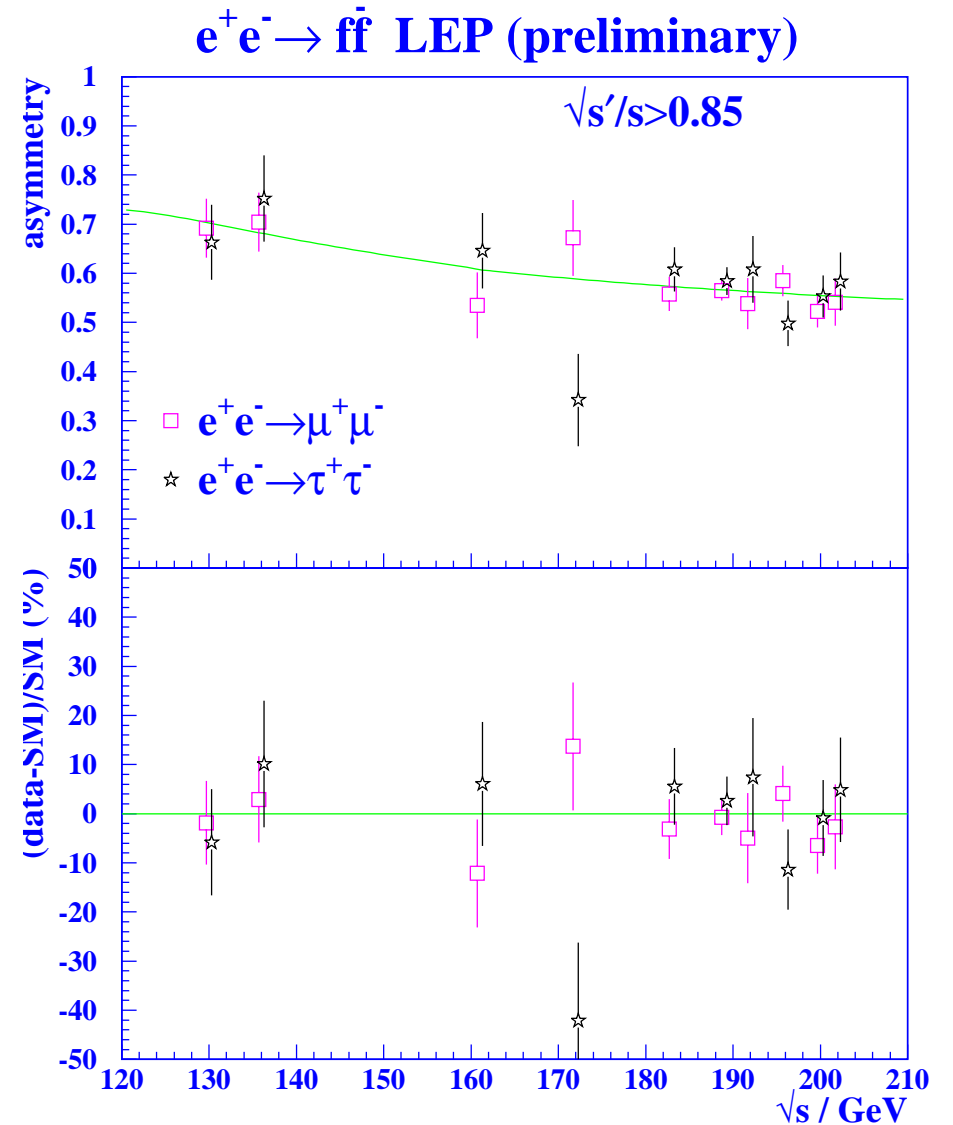
→ Vorw.-Rückw.-Asymmetrien für $\mu^+\mu^-$ und $\tau^+\tau^-$ bei $\sqrt{s'} > 0.9\sqrt{s}$



→ LEP 2 kombinierte Wirkungsquerschnitte und Vorw.-Rückw.-Asymmetrien



~20 % Korrelation für $\sigma(ee \rightarrow qq)$



Fehler teilweise nicht gaußisch

S-Matrix-Fits

→ parametrisiere: $\sigma_{\text{tot}}^{0,f}(s)$ und $A_{\text{fb}}^{0,f}(s)$

● jeweils 4 freie Parameter:

$$r_f^{\text{tot}} / r_f^{\text{fb}} \sim \text{Z-Austausch}$$

$$j_f^{\text{tot}} / j_f^{\text{fb}} \sim \gamma\text{-Z-Interferenz}$$

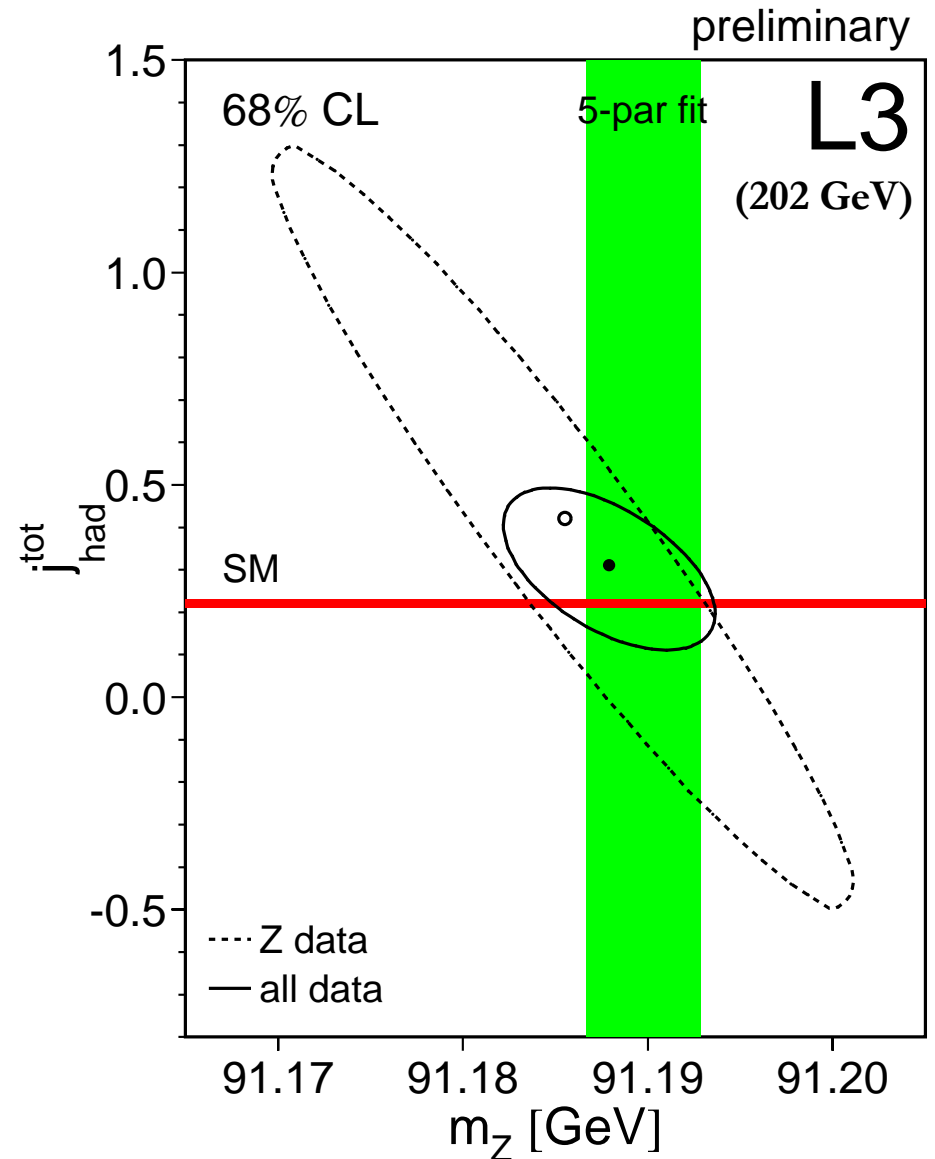
sowie m_Z und Γ_Z (T.Riemann et al.)

● nur γ -Austausch \equiv QED

→ sehr modellunabhängig

→ LEP 2 \sim Interferenzterme

→ $j_{\text{had}}^{\text{tot}}$ gegen m_Z unter Annahme von Lepton-Universalität:



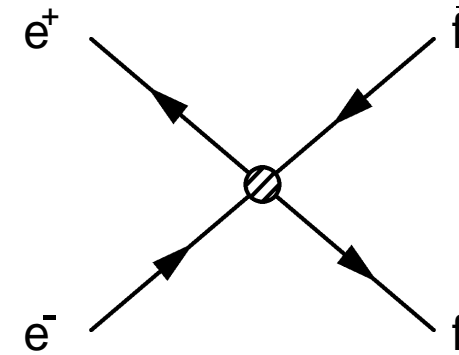
Kontakt-Wechselwirkungen

Backup

→ Beispiel für Sensitivität auf neue Physik

→ effektive Lagrangedichte :

$$L_{\text{eff}} = \frac{4\pi}{\Lambda_{\pm}^2} \sum_{i,j=L,R} \pm 1 (\bar{e}_i \gamma^\mu e_i) (\bar{f}_j \gamma^\mu f_j)$$



→ Kopplungsparameter :

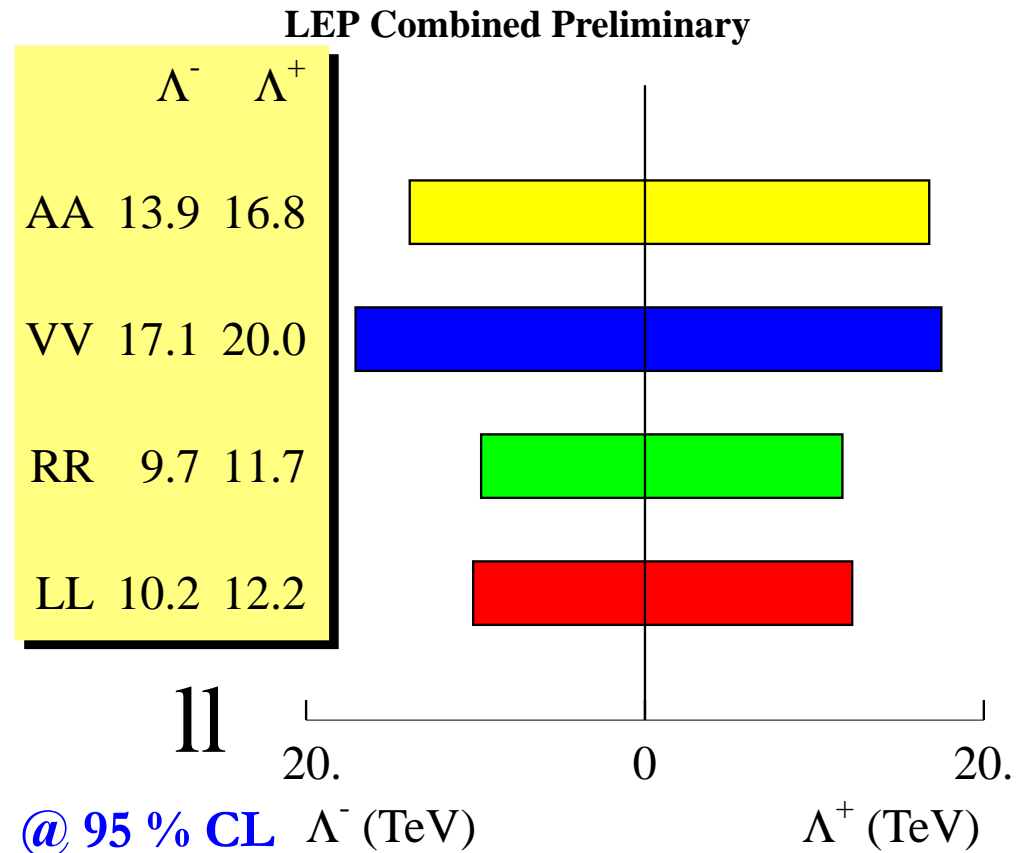
$$\Lambda^2 = 4\pi M^2 / \lambda^2$$

(μ -Zerfall: $\Lambda = (\sqrt{2} G_F)^{-1/2} \sim 250 \text{ GeV}$)

→ kombiniertes LEP-Ergebnis :

● Fit an $ee \rightarrow \mu\mu$ und $ee \rightarrow \tau\tau$

● Wirkungsquerschnitte und Vorw.-Rückw.-Asymmetrien



Z'-Limits

Backup

→ SM \subset GUT-Theorie

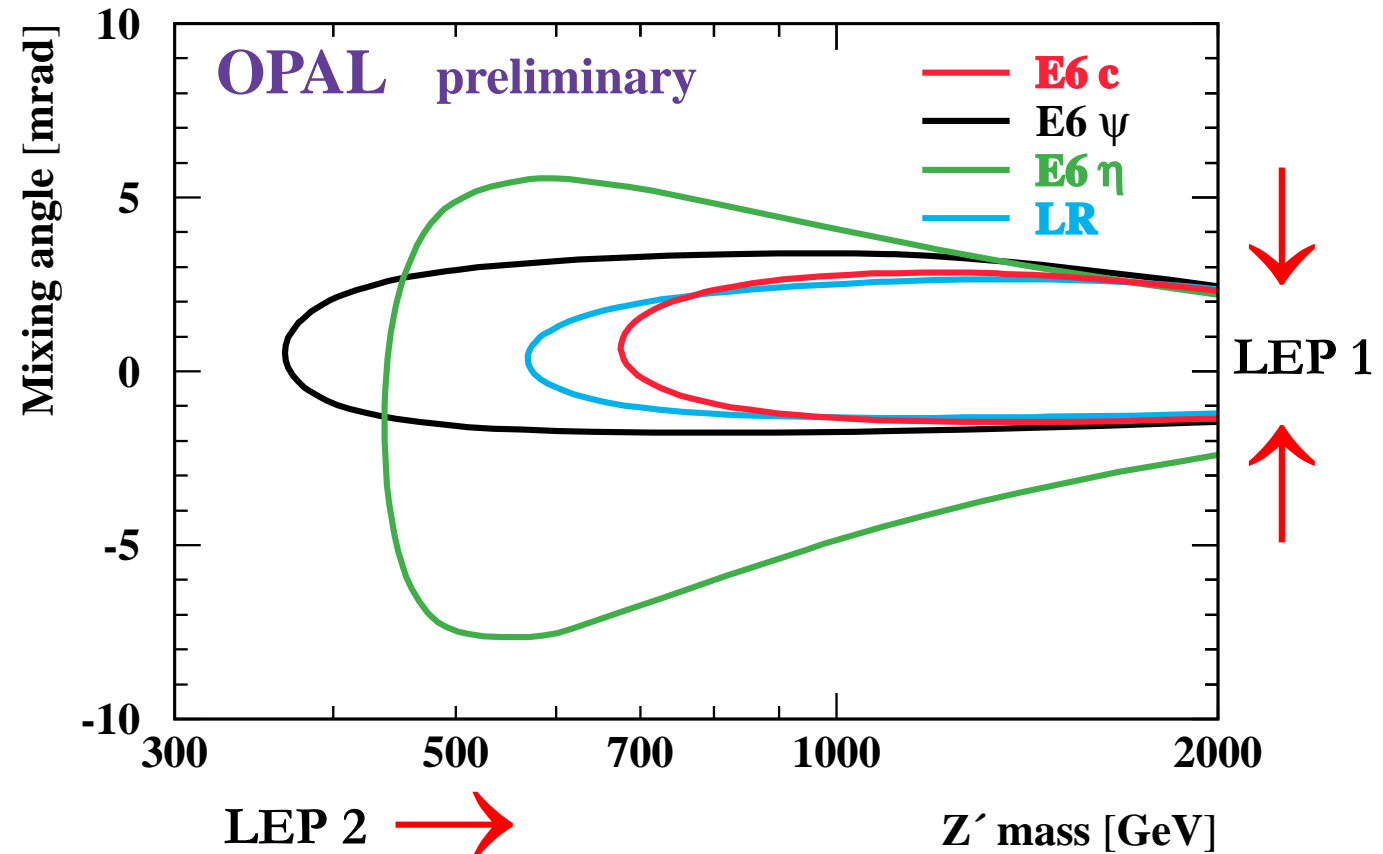
- z.B. : $E_6 \rightarrow SO(10) \times U(1)_\chi$
- $SO(10) \rightarrow SU(5) \times U(1)_\psi$
- $SU(5) \rightarrow SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

→ zusätzliche $SU(2)_R$
 $\sim Z'$ und $W'^{+/-}$
 \sim LR-Modell

→ Mischung zwischen Z und Z'

● χ, ψ und (mix) η -Modelle

→ Beispiel :
 (202 GeV)



Virtueller Graviton-Austausch in n+4 Dimensionen

→ redefiniere Planck-Masse als :

$$M_{\text{Pl}}^2 \sim R^n M_{\text{D}}^{n+2}$$

$M_{\text{D}} \sim$ neue Planck-Skala $\sim \text{O}(\text{TeV})$

$R \sim$ Radius der extra Dim. $\sim \text{O}(\text{mm})$

→ Graviton-Austausch modifiziert diff. Wirkungsquerschnitt :

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = A(\cos\theta) + B(\cos\theta) \left[\frac{\lambda}{M_s^4} \right] + C(\cos\theta) \left[\frac{\lambda}{M_s^4} \right]^2$$

● Fit an $ee \rightarrow \mu\mu$ und $ee \rightarrow \tau\tau$

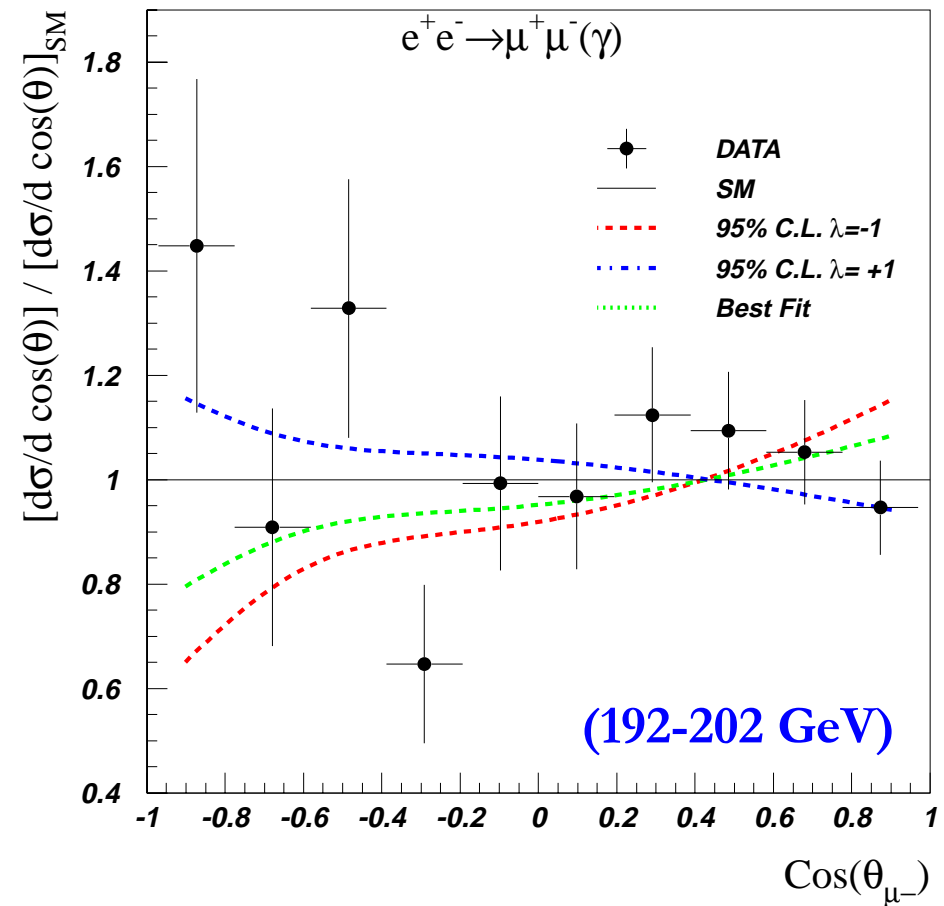
→ typische Limits (202 GeV) :

$$M_s > 0.755 \text{ (0.598) TeV}$$

@ 95% CL, $\lambda = +1$ (-1)

weitere Limits an M_s (\sim eff. String-Skala) aus $ee \rightarrow ee$ und „single- γ “, $\gamma\gamma, ZZ, WW$

DELPHI PRELIMINARY



Produktion von b- und c-Quarks oberhalb der Z-Resonanz

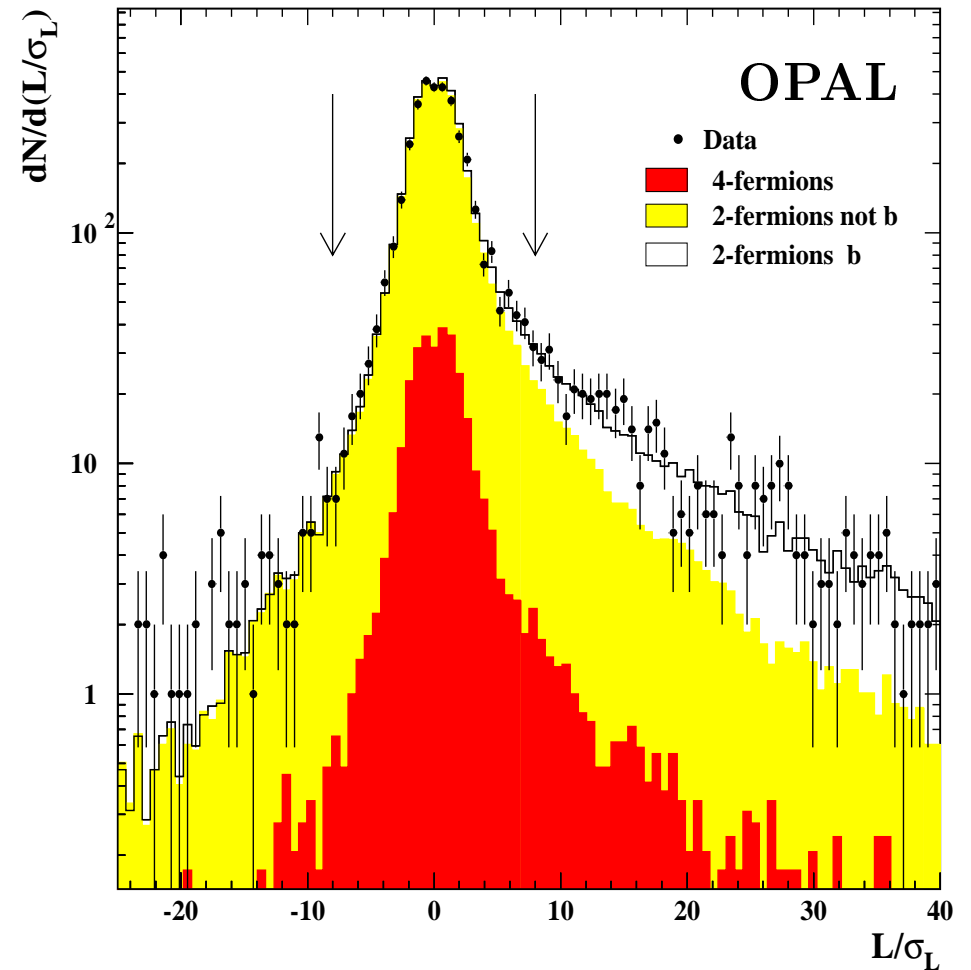
→ schwere Quarks in $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow q\bar{q}$

→ messe :

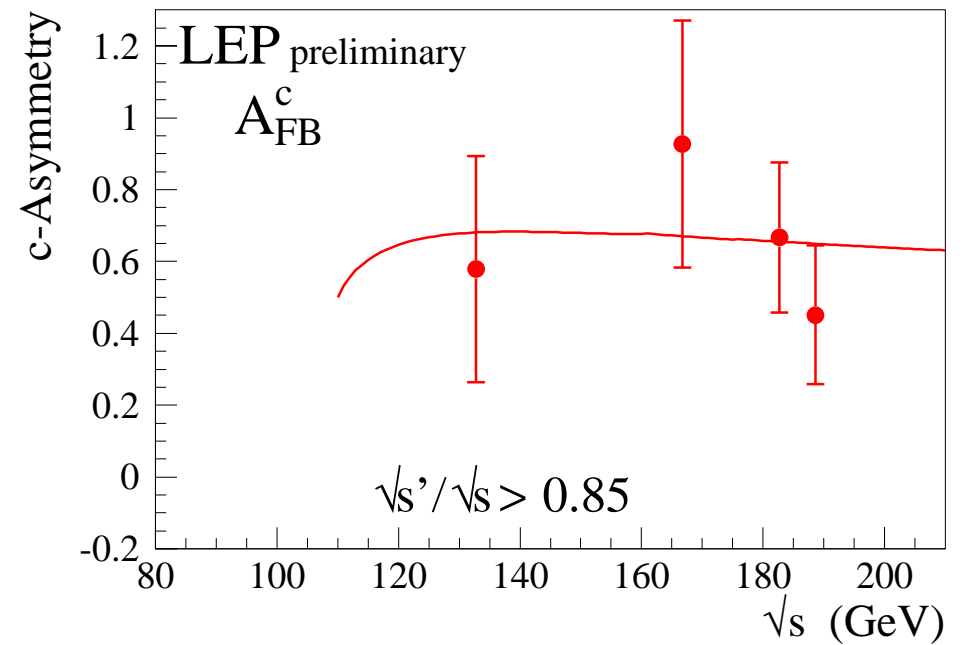
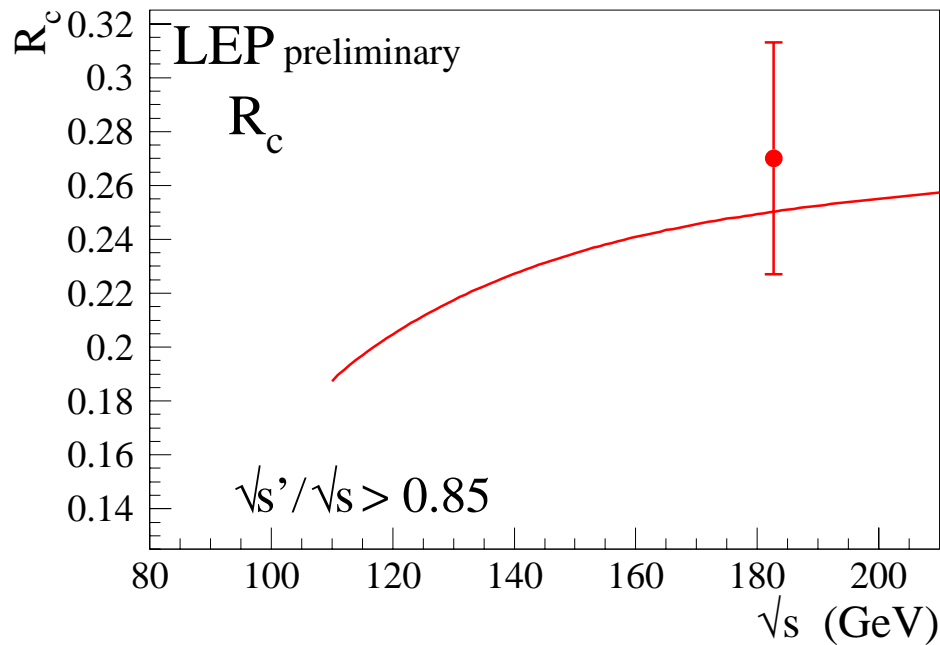
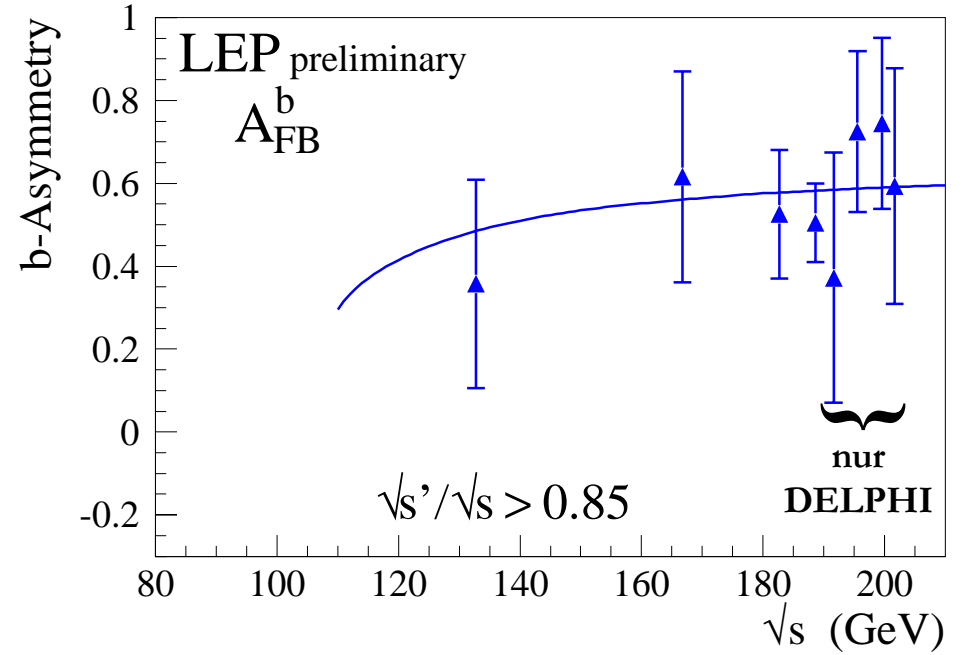
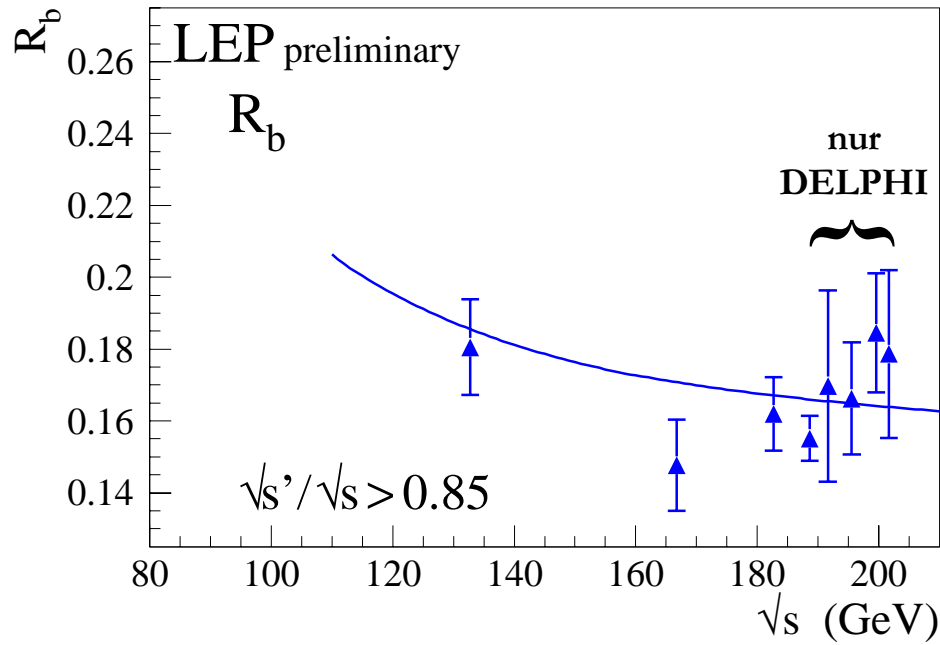
● $R_{b(c)} = \sigma(e^+e^- \rightarrow b\bar{b}(c\bar{c}))/\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q})$

● $A_{FB}^{b(c)}$

→ Hochenergiedaten $\sim \sqrt{s}' > 0.85 \sqrt{s}$



➔ Mittelwerte aller LEP-Experimente :

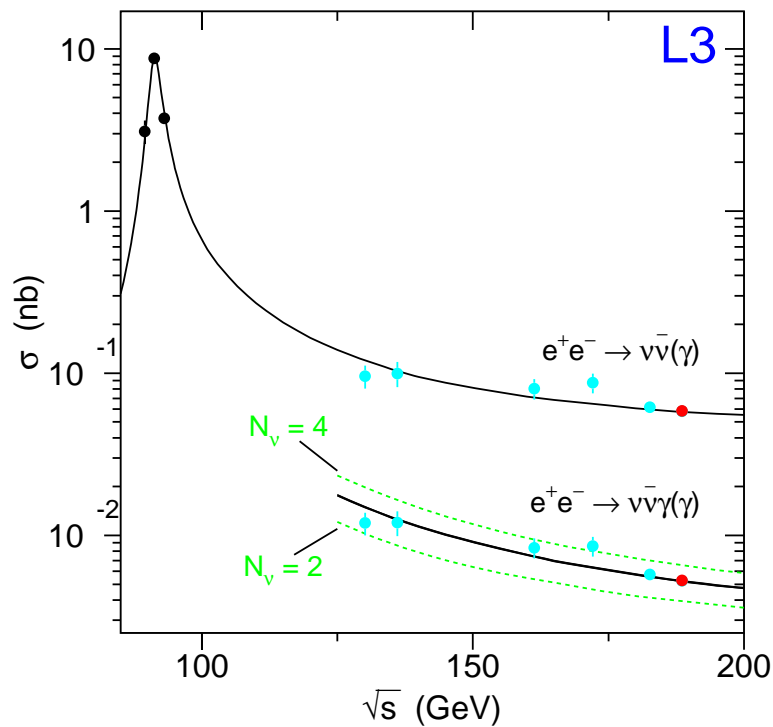
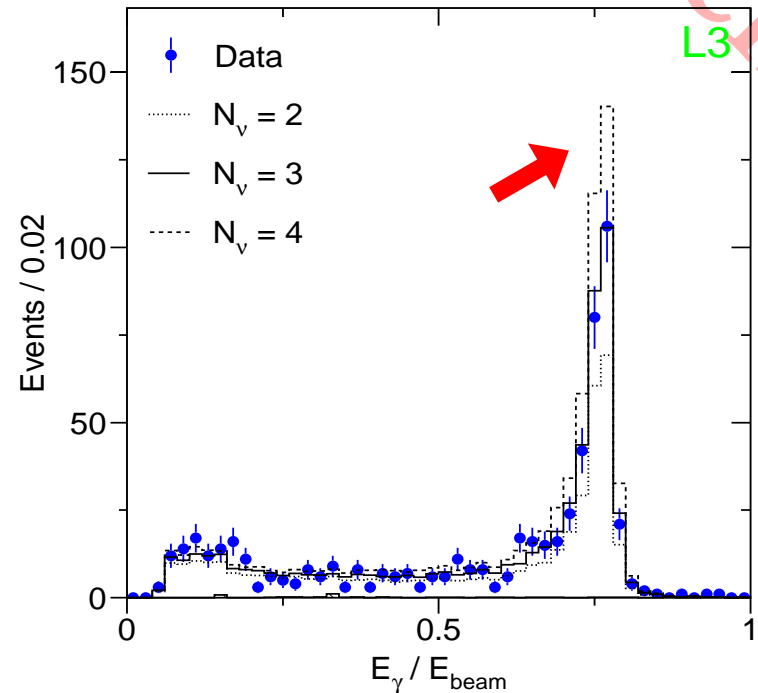


Wirkungsquerschnitt $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$

Backup

- Energie des einzelnen Photons
- Beispiel : ~500 Ereignisse für 189 GeV

	$\sigma^{\text{meas}} / \sigma^{\text{SM}}$
ALEPH	1.017 ± 0.053
DELPHI	0.965 ± 0.088
L3	0.994 ± 0.044
OPAL	0.908 ± 0.053



→ „Z-Return“ sensitiv auf N_ν

L3	3.05 ± 0.12
DELPHI	2.88 ± 0.19
OPAL	2.67 ± 0.17

Mittelwert 2.91 ± 0.11

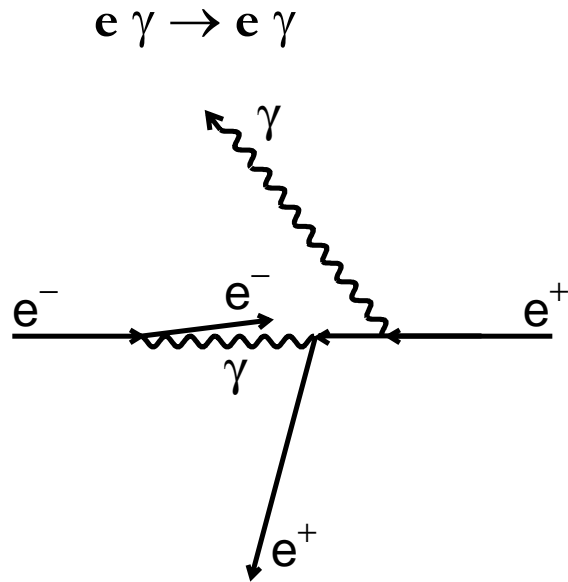
LEP I 3.00 ± 0.08 „ ν -Counting“



Elektron-Boson-Streuung bei LEP

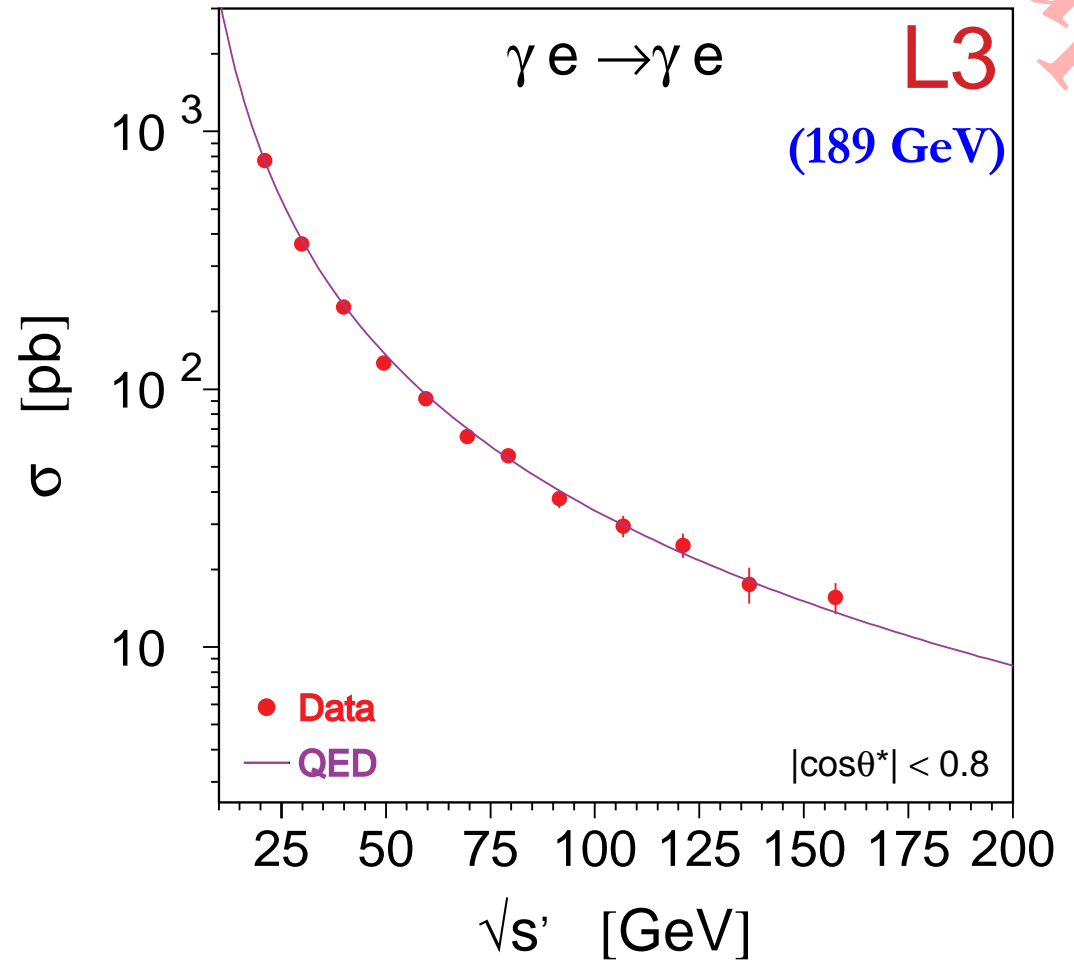
Backup

→ Compton-Streuung an quasi-reellen Photonen :



● QED-Test für $e\gamma$ -Schwerpunktsenergien von 20-160 GeV

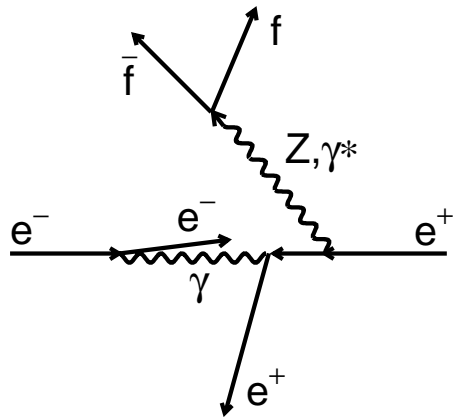
→ keine Abweichung gefunden



„Elektroschwache“-Compton-Streuung

→ entspricht dem QED-Prozeß der Compton-Streuung :

$$e \gamma \rightarrow e Z/\gamma^*$$

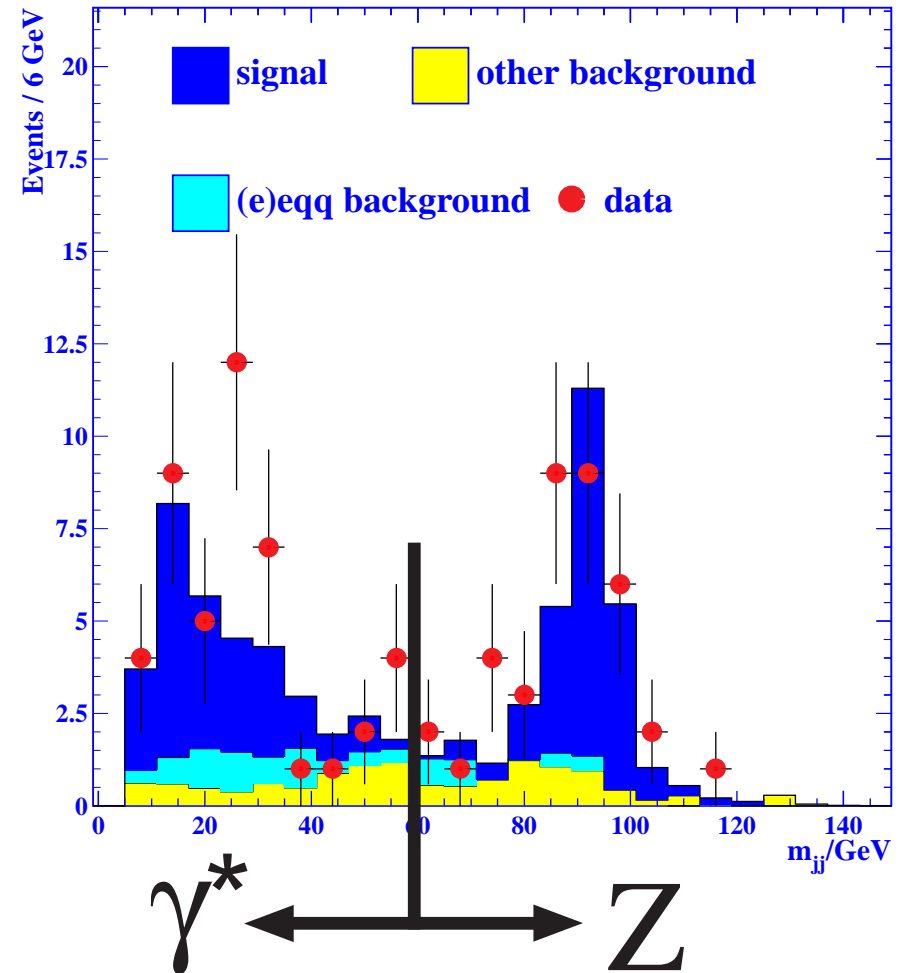


● 2 Jets und isoliertes Elektron

→ Verhältnis zur SM-Vorhersage : (189 GeV)

$\sigma/\sigma^{\text{SM}}$	γ^*e	Ze
OPAL	1.50 ± 0.29	1.26 ± 0.26
DELPHI	0.86 ± 0.27	0.89 ± 0.22
m_{jj} [GeV]	< 60	> 60

OPAL preliminary



QED-Test in $e e \rightarrow \gamma \gamma (\gamma)$

Backup

→ QED Abschneide-Parameter
ändert diff. Wirkungsquerschnitt :

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\Lambda_{\pm}} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Born}} \pm \frac{\alpha^2 s}{2\Lambda_{\pm}^4} (1 + \cos^2 \theta)$$

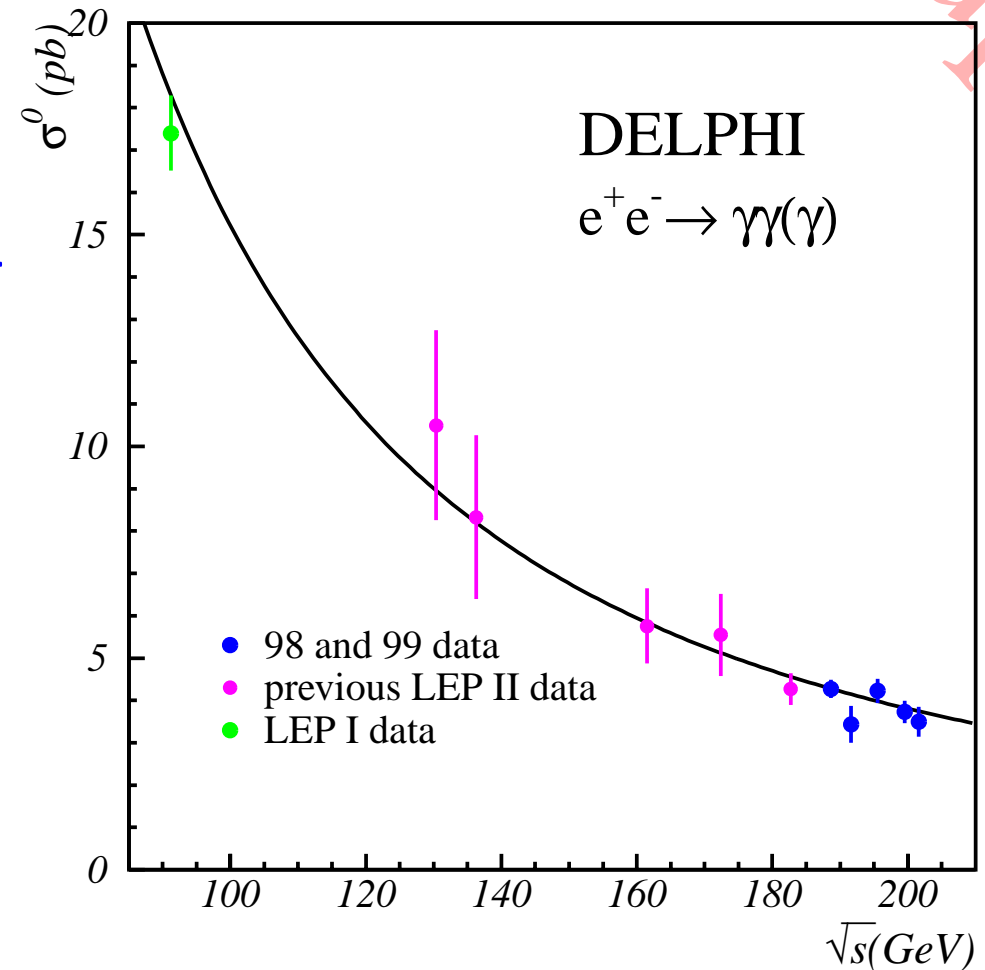
$\Lambda \sim$ Skala, bei der $e\gamma$ -Wechselwirkung
nicht mehr punktförmig

→ möglicher Austausch eines e^*
im t-Kanal

→ Limits @ 95% CL :

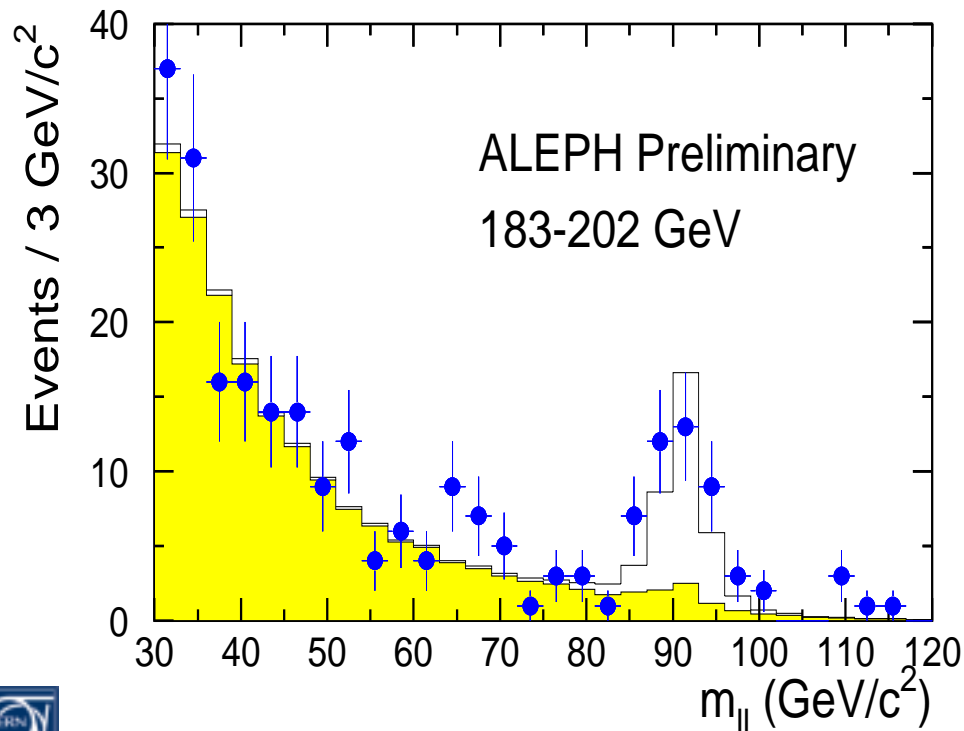
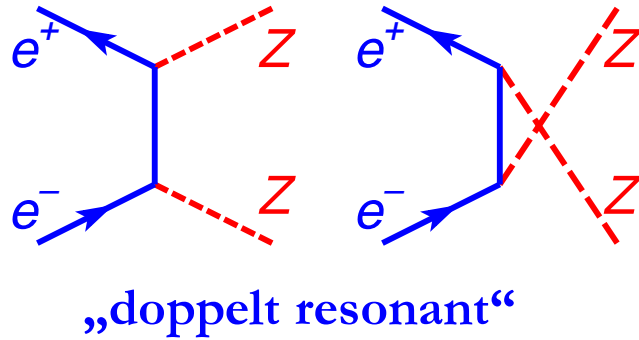
	Λ_+	Λ_-	$m_{e^*}^*$ [GeV]	
ALEPH	319	217	337	(202 GeV)
DELPHI	330	320	311	(202 GeV)
L3	321	282	283	(189 GeV)
OPAL	295	293	303	(202 GeV)

* gleiche Kopplungen für $e^*e\gamma$ und $ee\gamma$

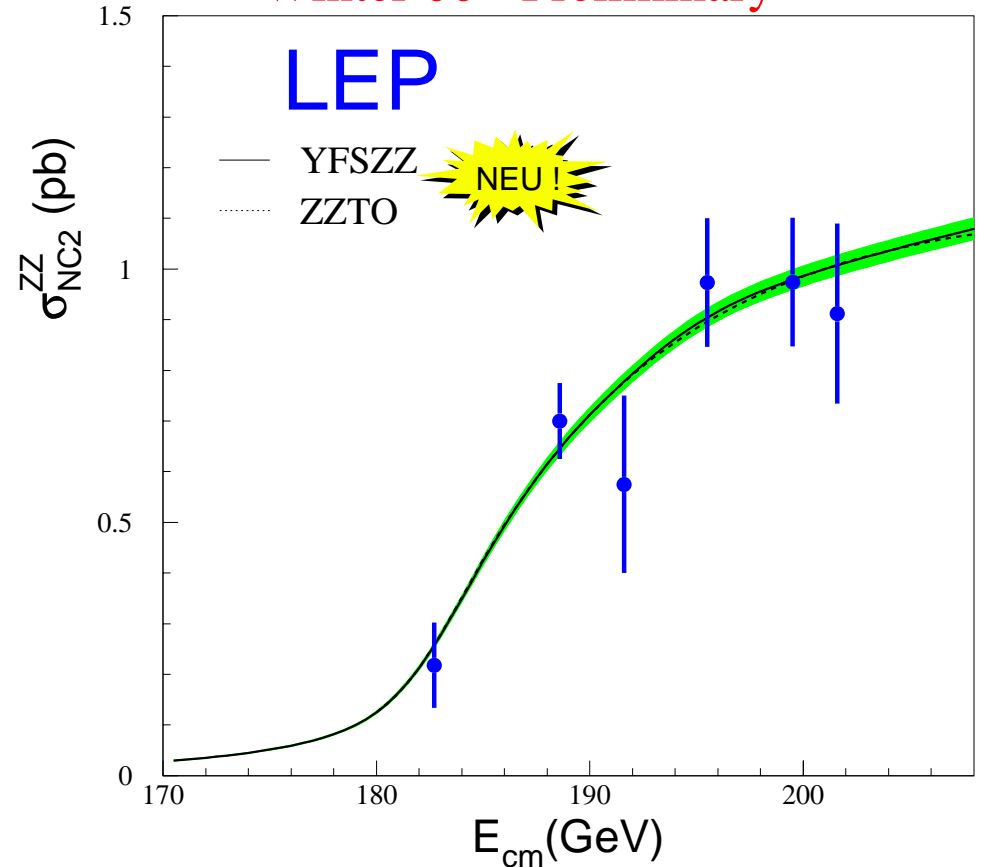


ZZ-Wirkungsquerschnitt

→ Definition des Signals (NC02) :



Winter 00 - Preliminary



→ untersuchte experimentelle Signaturen :

$$ZZ \rightarrow l^+ l^- l^+ l^- \quad 1\% \quad ZZ \rightarrow q \bar{q} l^+ l^- \quad 9\%$$

$$ZZ \rightarrow q \bar{q} \nu \bar{\nu} \quad 28\% \quad ZZ \rightarrow b \bar{b} q \bar{q} \quad 16\%$$

→ verbesserte Vorhersagen :

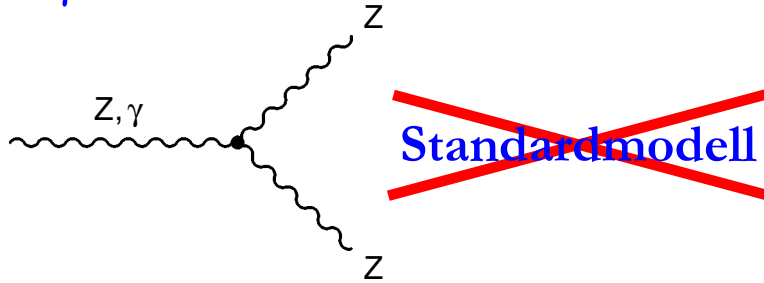
YFSZZ S.Jadach et al.

ZZTO G.Passarino et al.



Anomale Z- und γ -Kopplungen

→ $e^+e^- \rightarrow ZZ$ testet ZZZ - und $ZZ\gamma$ -Vertices :



- 4 Kopplungsparameter : $f_i^{V=Z,\gamma}$
 $i = 4 \sim \text{CP verletzend}$
 $i = 5 \sim \text{C + P verletzend}$
 K.Hagiwara et al.

- Abweichung im (diff.) ZZ -Wirkungsquerschnitt

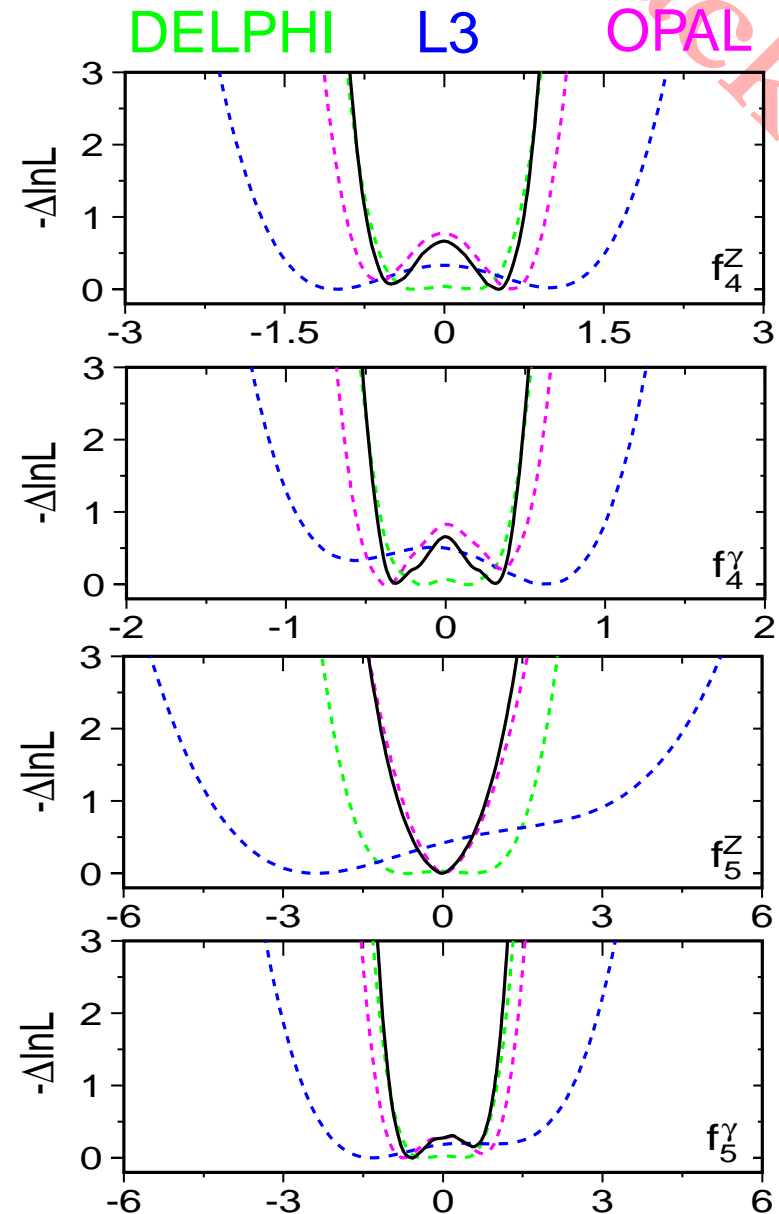
→ LEP kombinierte Ergebnisse :



$$f_4^Z = +0.49^{+0.19}_{-0.31} \quad f_5^Z = 0.0^{+0.6}_{-0.6}$$

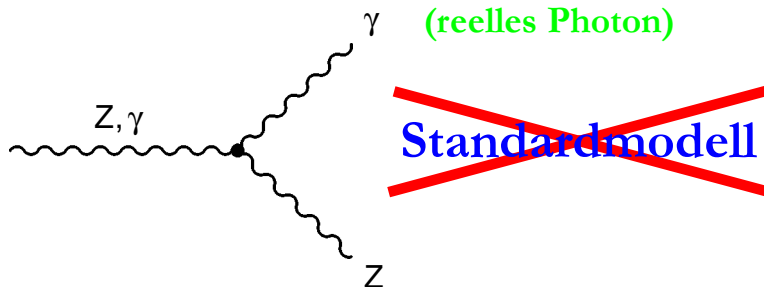
$$f_4^\gamma = +0.29^{+0.11}_{-0.21} \quad f_5^\gamma = -0.6^{+1.4}_{-0.3}$$

→ mit Null verträglich



Backup

→ $e^+e^- \rightarrow f \bar{f} \gamma$ testet $ZZ\gamma$ - und $Z\gamma\gamma$ -Vertices :



- 8 Kopplungsparameter : $h_i^{V=Z,\gamma}$
 - $i = 1,2 \sim$ CP verletzend
 - $i = 3,4 \sim$ CP erhaltend
- K.Hagiwara et al.

Operatoren der Dimension 6 oder 8
 \Rightarrow Formfaktor : $h_i^V(s) = h_{i0}^V / (1+s/\Lambda^2)^{n=3,4}$

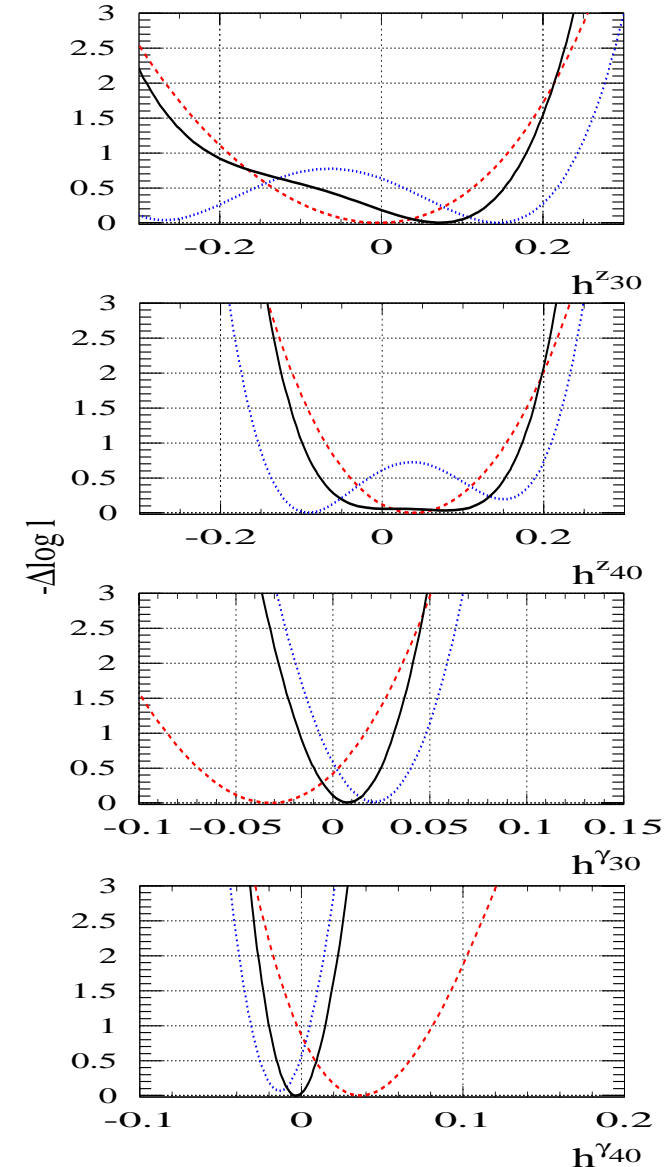
- studiere Raten und Verteilungen von $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}\gamma$ und $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$ Ereignissen

→ LEP-Mittelwerte : NEU!

$$\begin{aligned}
 h_{10}^Z &= -0.13^{+0.10}_{-0.07} & h_{20}^Z &= +0.07^{+0.05}_{-0.09} & h_{30}^Z &= +0.07^{+0.08}_{-0.15} & h_{40}^Z &= +0.08^{+0.07}_{-0.16} \\
 h_{10}^\gamma &= -0.10^{+0.06}_{-0.04} & h_{20}^\gamma &= -0.05^{+0.12}_{-0.04} & h_{30}^\gamma &= +0.01^{+0.02}_{-0.02} & h_{40}^\gamma &= -0.00^{+0.01}_{-0.01}
 \end{aligned}$$

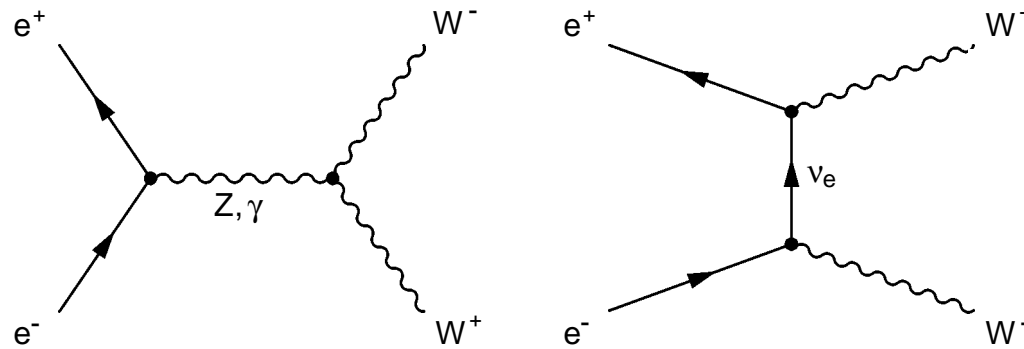
→ mit Null verträglich

DELPHI + L3 COMBINED



Produktion von W-Bosonpaaren bei LEP

→ relevante Diagramme (CC03) :



→ alle Endzustände bei LEP beobachtbar

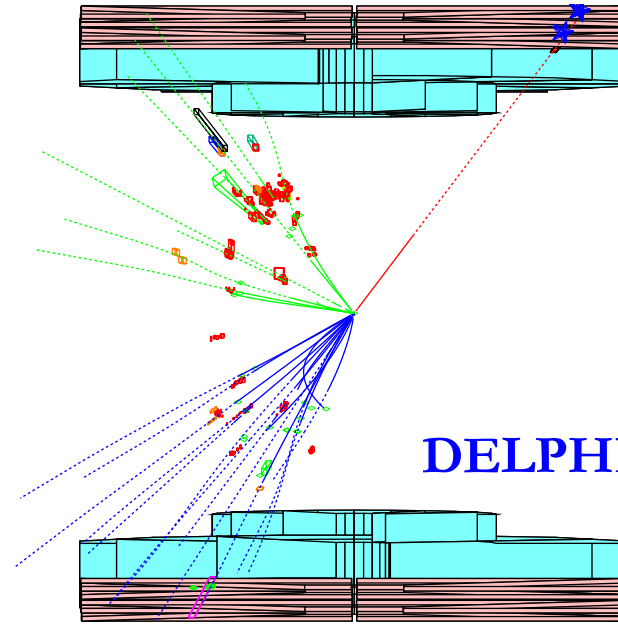
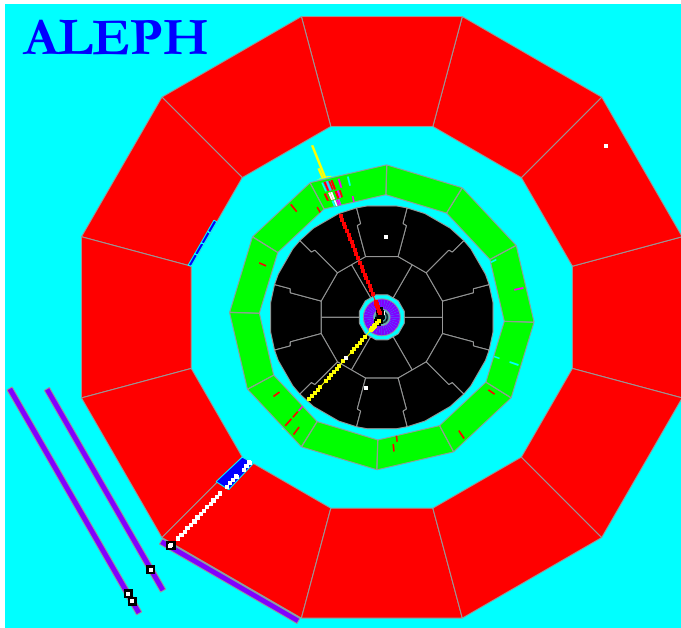
→ Datensätze pro Experiment :

161 GeV - 189 GeV \approx 3600 Ereignisse

192 GeV - 202 GeV \approx 3800 Ereignisse

$WW \rightarrow l\nu l\nu$

(~11%)



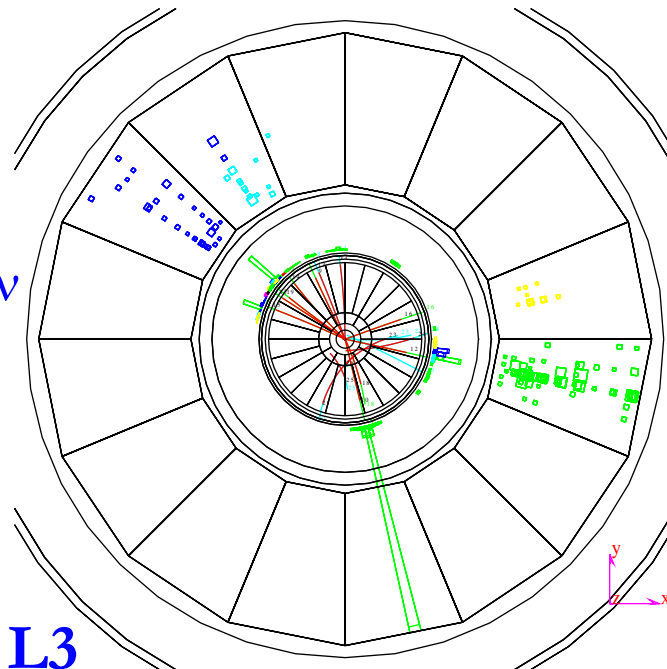
$WW \rightarrow q\bar{q}\mu\nu$

(~15%)

DELPHI

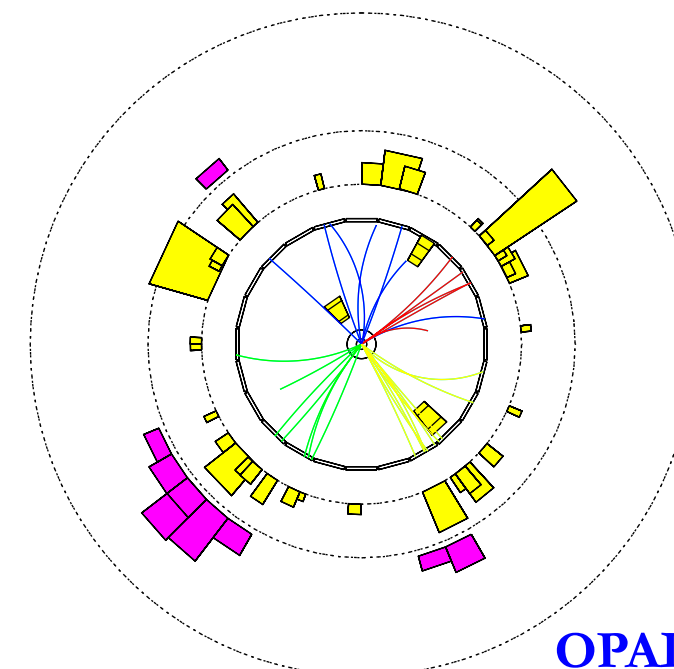
$WW \rightarrow q\bar{q}e\nu$

(~15%)



$WW \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$

(~46%)



OPAL



Wirkungsquerschnitt für W-Paarproduktion

→ kombinierte LEP-Ergebnisse für $e^+e^- \rightarrow W W$

→ Vergleich mit Vorhersagen:

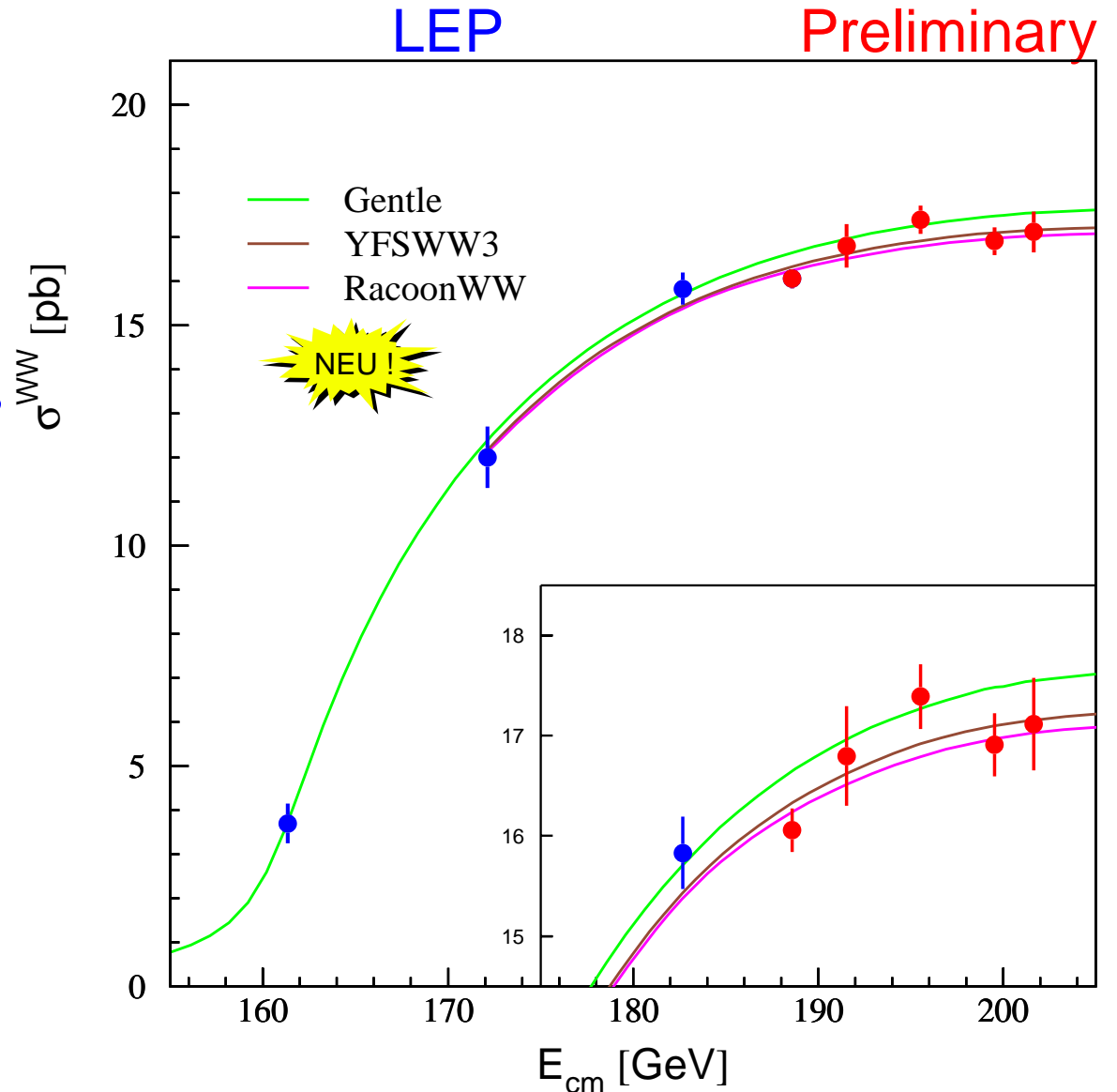
● GENTLE ~ 2% theor. Fehler, fehlende höhere Ordnungen

● LEP 2-Generator-Workshop: verbesserte Vorhersagen

RacoonWW S.Dittmaier et al.

YFSWW3 S.Jadach et al.

~ 0.5% theor. Unsicherheiten



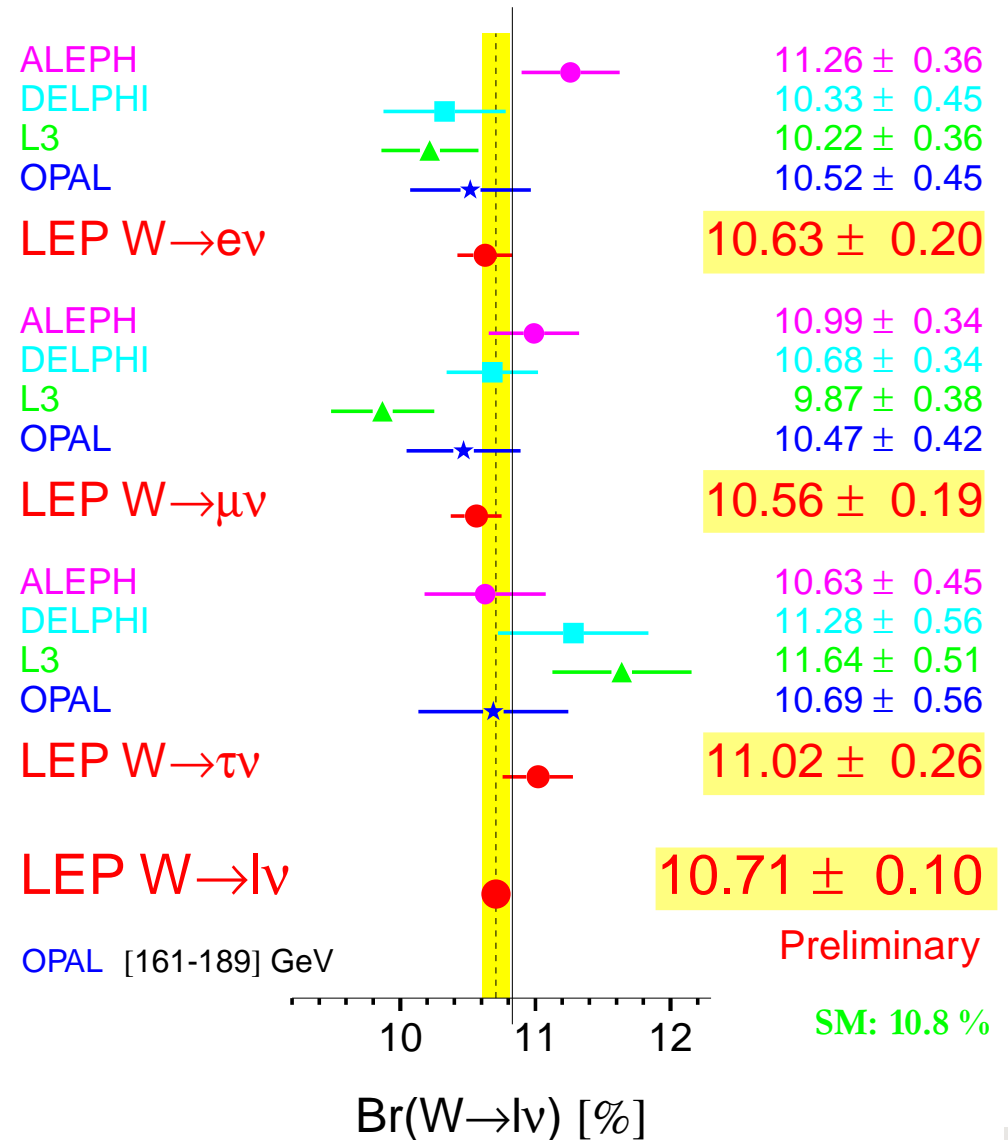
W-Verzweigungsverhältnisse

W Leptonic Branching Ratios

→ LEP : alle Endzustände gemessen
 ⇒ Verzweigungsverhältnisse

→ BR konsistent mit
 Lepton-Universalität

→ CDF: $BR(W \rightarrow e\nu) = 10.37 \pm 0.22 \%$
 D0: $BR(W \rightarrow e\nu) = 10.80 \pm 0.30 \%$



→ hadronisches Verzweigungsverhältnis :

$$\text{BR}(W \rightarrow \text{had}) = 1 - 3 \times \text{BR}(W \rightarrow l\nu)$$

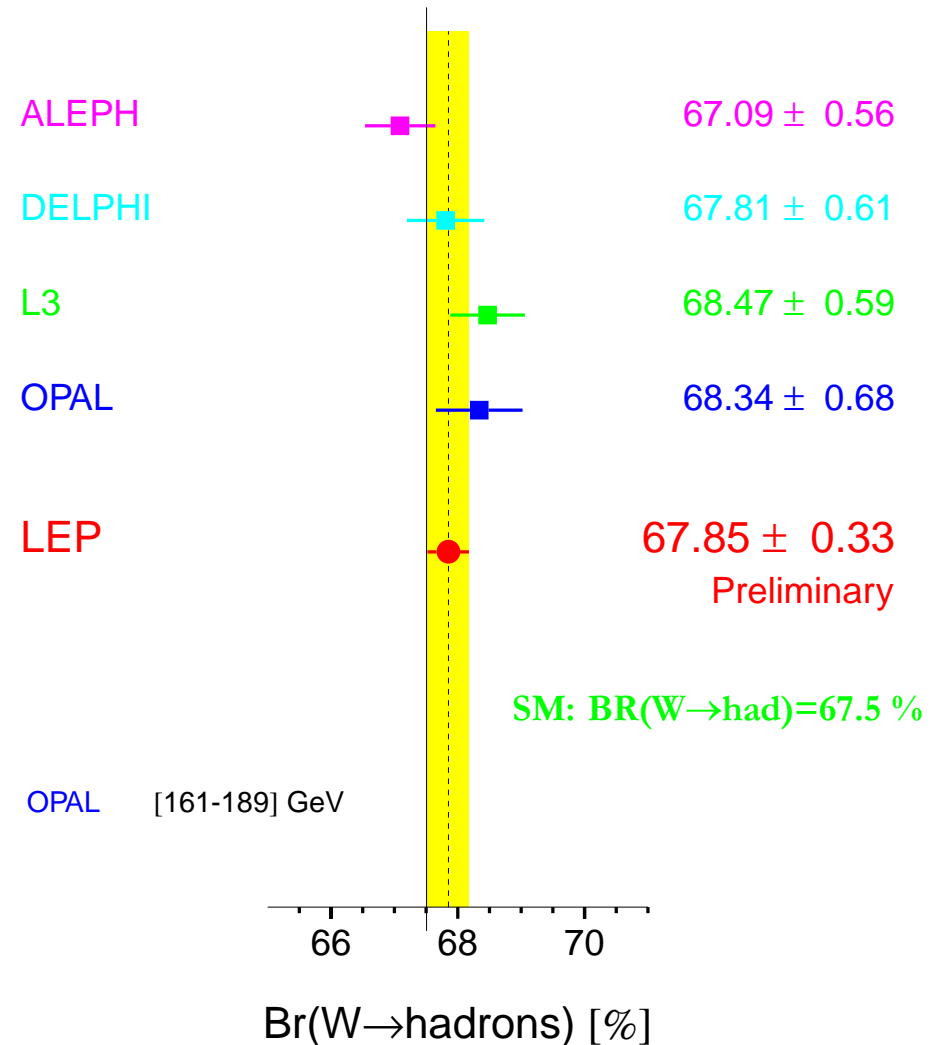
Annahme: Lepton-Universalität

→ Interpretation ~ CKM-Matrix :

$$\frac{\text{BR}_{\text{had}}}{1 - \text{BR}_{\text{had}}} = \sum_{i=u,c} \sum_{j=d,s,b} |V_{ij}|^2 \left(1 + \frac{\alpha_s}{\pi} \right)$$

- verwende PDG-Werte für $v_{ij} \neq v_{cs}$
- direkte Messung : $|v_{cs}| = 0.993 \pm 0.016$
(PDG'98 : $|v_{cs}| = 1.04 \pm 0.16$)
CKM-Unitarität nicht verwendet !

Br(W→hadrons) [%]



Lepton-Universalität in τ -Zerfällen

Backup

→ leptonische Verzweigungsverhältnisse :

$$\text{BR}(\tau \rightarrow e \nu \nu) = (17.791 \pm 0.054)\%$$

$$\text{BR}(\tau \rightarrow \mu \nu \nu) = (17.333 \pm 0.054)\%$$

$$\Rightarrow \text{BR}(\tau \rightarrow l \nu \nu) = (17.805 \pm 0.039)\%$$

(für masselose l)

→ Tau-Lebensdauer :

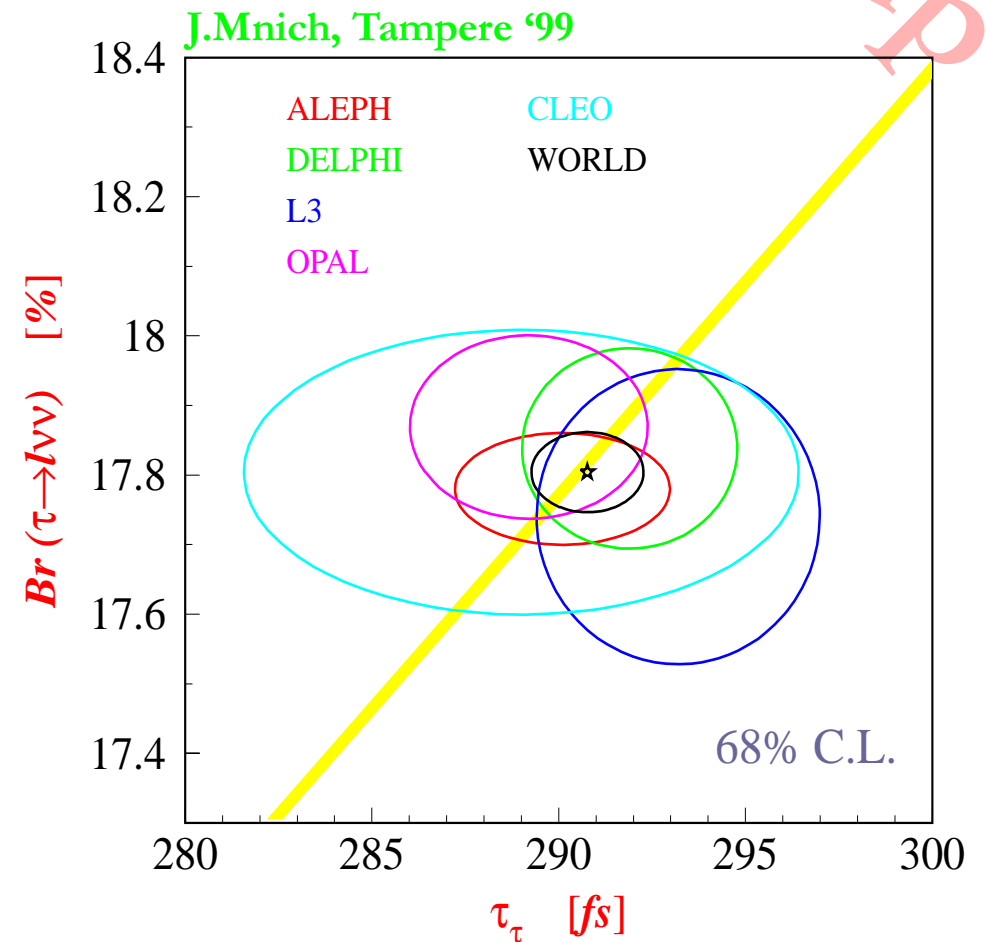
$$\tau_\tau = 290.77 \pm 0.99 \text{ fs}$$

→ Universalität der Kopplungen für $Q^2 = m_\tau^2$:

$$g_\mu / g_e = 1.0006 \pm 0.0023 \quad \tau \rightarrow \mu \nu \nu / \tau \rightarrow e \nu \nu$$

$$g_\tau / g_\mu = 0.9997 \pm 0.0024 \quad \Gamma(\tau \rightarrow e \nu \nu) / \Gamma(\mu \rightarrow e \nu \nu)$$

sensitiver als LEP 2-Test der
W-Verzweigungsverhältnisse



Longitudinal polarisierte W-Bosonen

→ massive Eichbosonen haben drei Polarisationszustände:

● transversal (-,+)

● longitudinal (0)

→ Zerfallswinkel θ^* des Leptons (Quarks) im W-Ruhsystem

$$\propto (1 \pm \cos \theta^*)^2 \quad \text{transversal}$$

$$\propto \sin^2 \theta^* \quad \text{longitudinal}$$

→ L3 ~ Anteil der unterschiedlich polarisierten W-Bosonen :

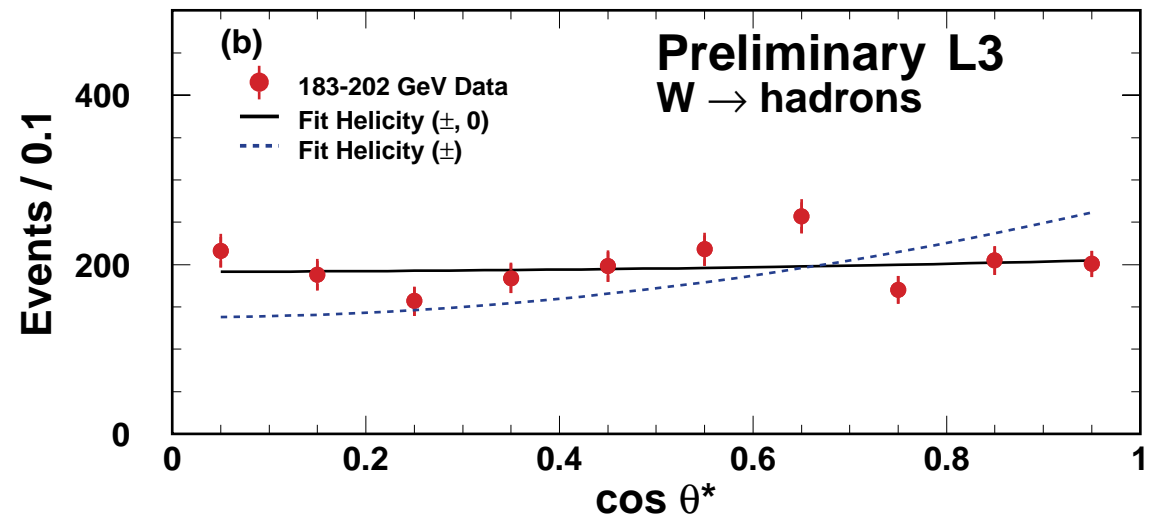
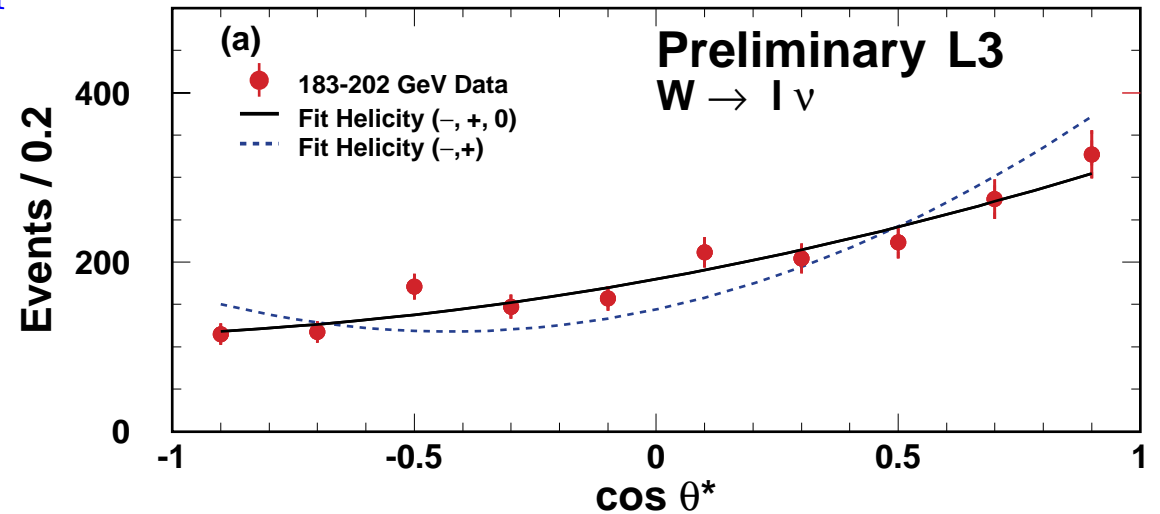
$$f_- = (56.2 \pm 4.5) \%$$

$$f_+ = (17.9 \pm 2.3) \%$$

$$f_0 = (25.9 \pm 3.5) \%$$

→ SM-Vorhersage :

$$f_- = 57.6\% \quad f_+ = 17.6\% \quad f_0 = 24.8\%$$



Drei-Boson-Kopplungen

→ allgemeiner Lorentz-inv. Ansatz :

2 x 7 Kopplungen

für γWW - und ZWW -Vertices

→ Annahmen :

- ~ reelle Kopplungen
- ~ C-, P- und CP-Invarianz
- ~ Ladung des W(=e)

→ drei Kopplungsparameter :

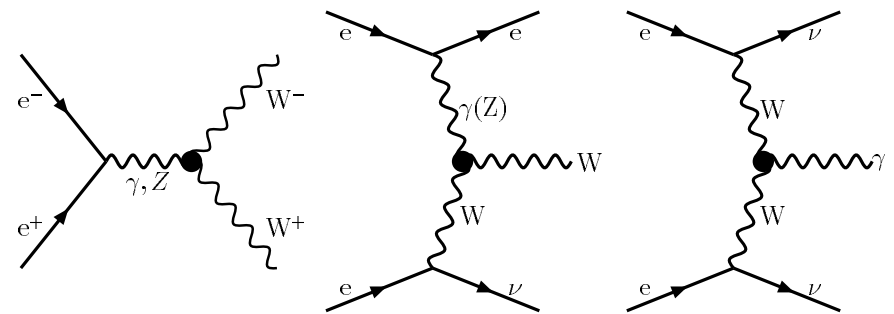
$$\Delta g_1^Z$$

$$\Delta \kappa_\gamma = -\tan \theta_w (\Delta \kappa_Z - \Delta g_1^Z)$$

$$\lambda_\gamma = \lambda_Z$$

$$\text{SM (Born)} : g_1^Z = 1 \quad \kappa_\gamma = 1 \quad \lambda_\gamma = 0$$

→ sensitiv auf Drei-Boson-Kopplungen :



W-Paarprod. „single-W“ „single- γ “

→ Abweichungen vom SM verändert :

- totale Wirkungsquerschnitte
- Verteilung der W-Produktionswinkel
- W-Polarisation

→ Wirkungsquerschnitt für „single-W“-Produktion

● sensitiv auf $\Delta\kappa_\gamma$

→ γ -Energien in „single- γ “-Ereignissen

● sensitiv auf $\Delta\kappa_\gamma$ und λ_γ

→ WW-Zerfälle

● sensitiv auf alle Kopplungen

● diff. Wirkungsquerschnitt quadratisch in anomalen Kopplungen α_i :

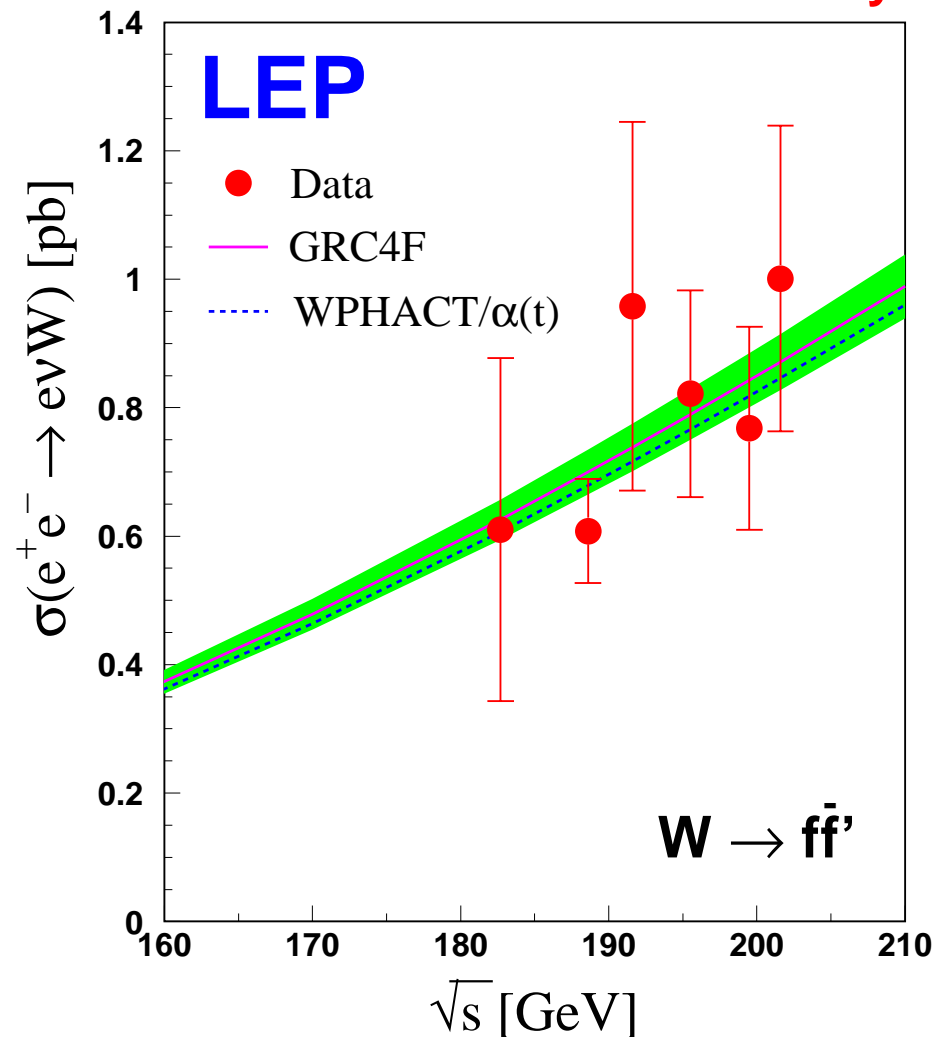
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = S_0(\Omega) + \sum_i S_{1,i}(\Omega) \alpha_i + \sum_{ij} S_{2,ij}(\Omega) \alpha_i \alpha_j$$

mit : $\Omega = (\cos \theta_W, \cos \theta_\pm^*, \phi_\pm^*)$

● lin. Approximation : $O_i(\Omega) = \frac{S_{1,i}(\Omega)}{S_0(\Omega)}$
 ~optimale Observable



Preliminary



Backup

→ LEP ~ 1 Parameter :

$$\Delta\kappa_\gamma = 0.021^{+0.063}_{-0.060}$$

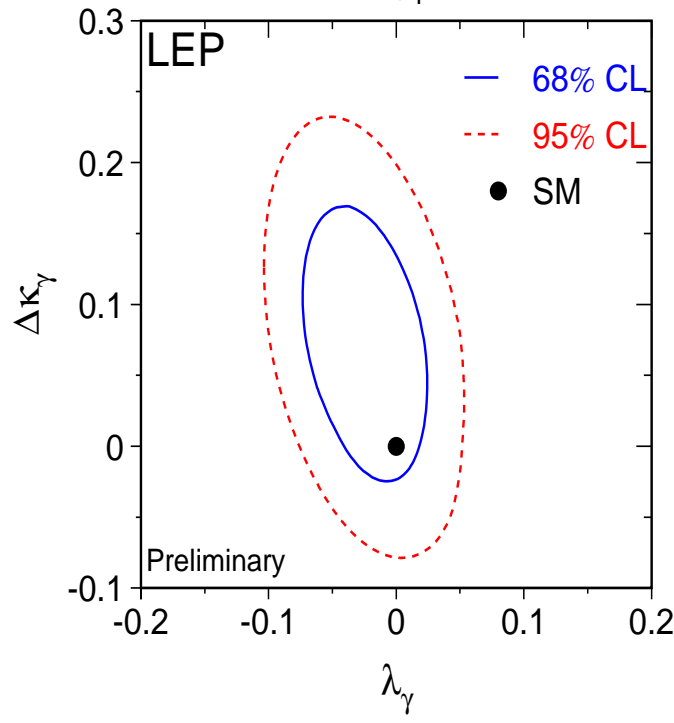
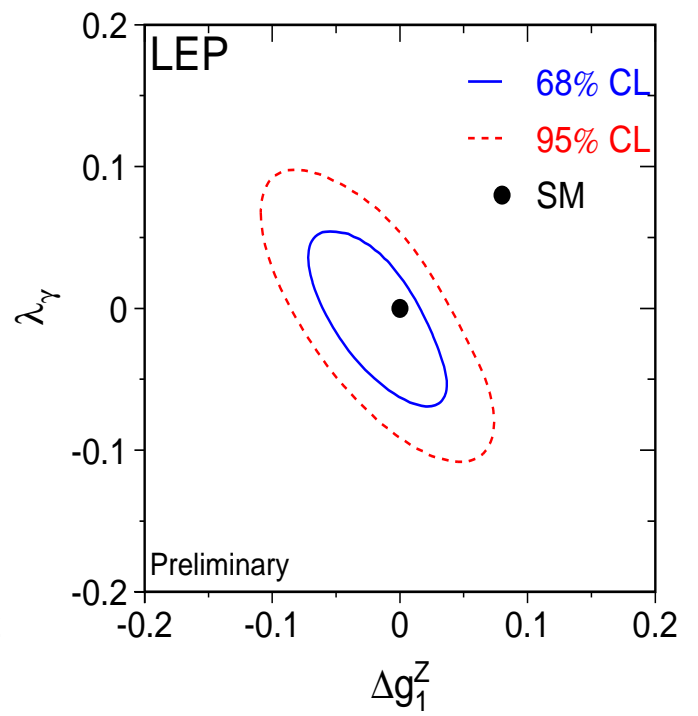
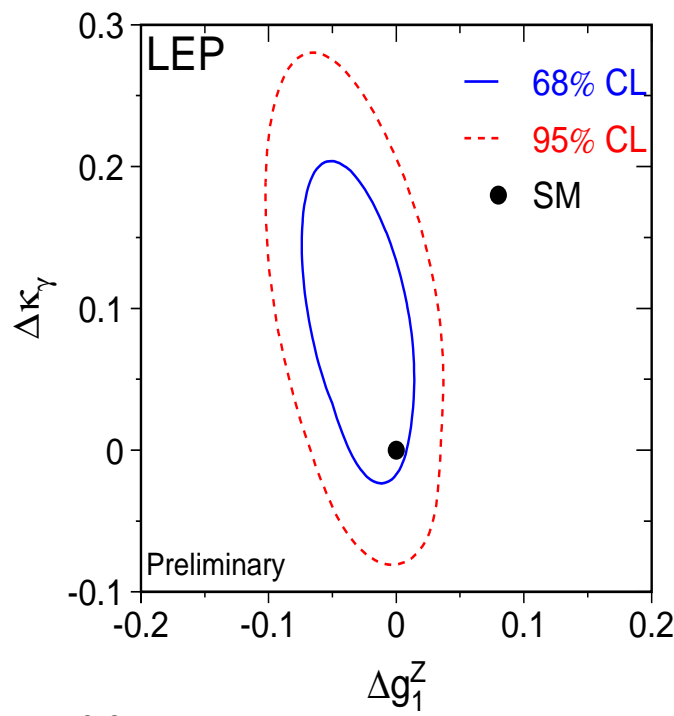
$$\Delta g_1^Z = -0.024^{+0.025}_{-0.024}$$

$$\lambda_\gamma = -0.016^{+0.026}_{-0.026}$$

→ Ergebnisse von D0 :

$$\Delta\kappa_\gamma = -0.08 \pm 0.34$$

$$\lambda_\gamma = 0.00 \pm 0.10$$



← Ergebnisse mit zwei freien Parametern

→ konsistent mit SM



→ LEP ~ 1 Parameter :

$$\Delta\kappa_\gamma = 0.021^{+0.063}_{-0.060}$$

$$\Delta g_1^Z = -0.024^{+0.025}_{-0.024}$$

$$\lambda_\gamma = -0.016^{+0.026}_{-0.026}$$

→ konsistent mit SM

→ indirekte Messung von :

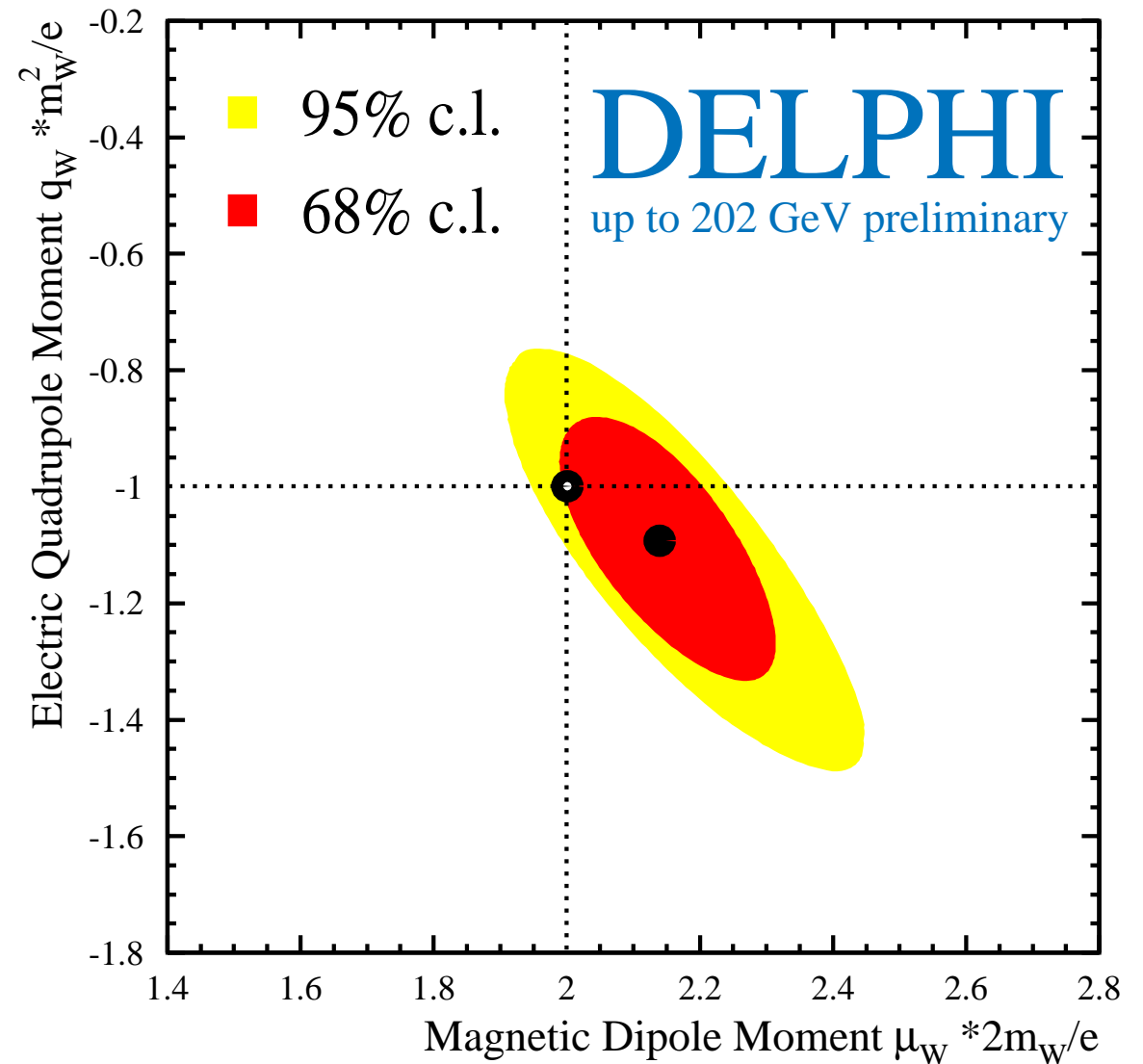
$\mu_W \sim$ mag. Dipolmoment

$q_W \sim$ elek. Quadrupolmoment

$$\mu_W = \frac{e}{2m_W} (1 + \kappa_\gamma + \lambda_\gamma)$$

$$q_W = -\frac{e}{m_W^2} (\kappa_\gamma - \lambda_\gamma)$$

statische Eigenschaften des W



Bestimmung der W-Massen an der WW-Schwelle

→ Wirkungsquerschnitt nahe der Schwelle sensitiv auf W-Masse

→ Phasenraum-Unterdrückung :

- s-Kanal $\sim \beta^3$
- t-Kanal ν -Austausch $\sim \beta$

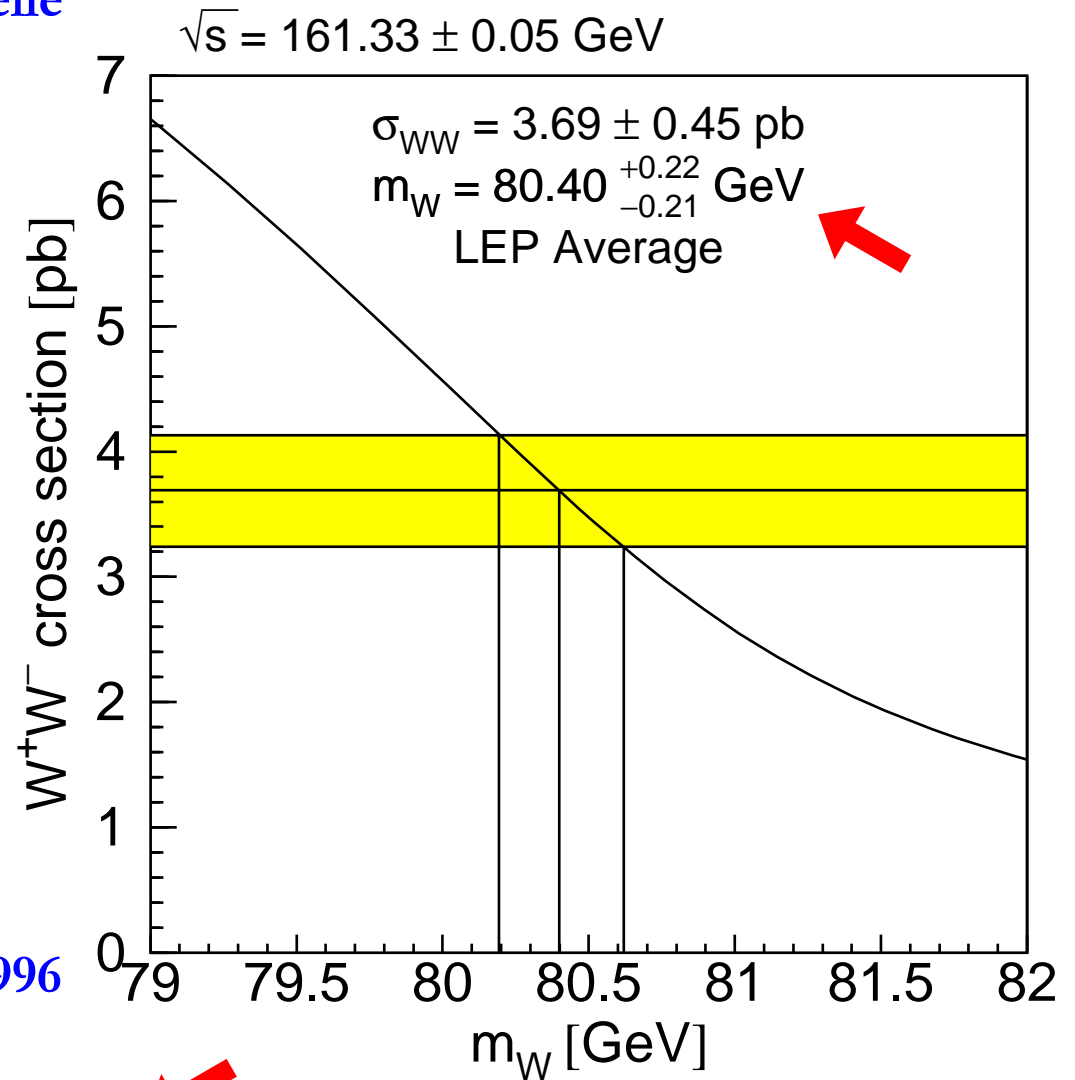
→ nur gut bekannte $W\epsilon\nu$ -Kopplung
 ⇒ minimale Sensitivität auf TGC

→ Interferenzkorrektur für „single-W“ :

- ~ 10 % für $e\nu q\bar{q}$
- ~ 5 % für $l\nu l\nu$
- 0 sonst

→ Ergebnisse basieren auf 10 pb^{-1} aus 1996

→ statistisch dominiert ~ Option für 2000, falls Probleme mit Maschine ?



W-Masse aus direkter Rekonstruktion

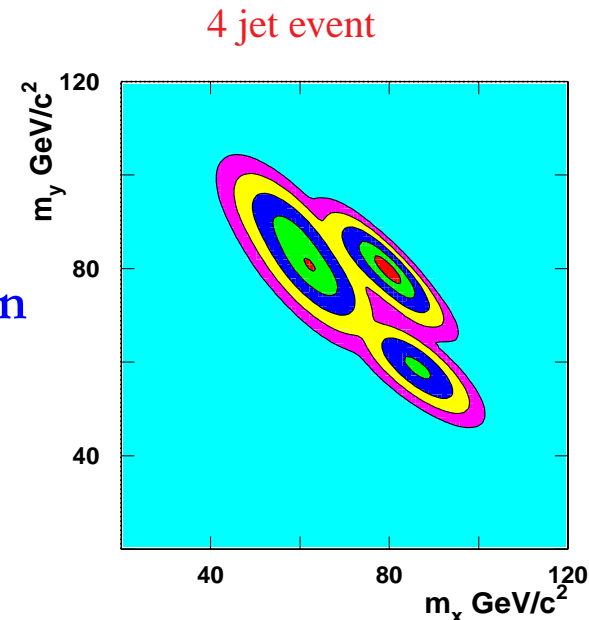
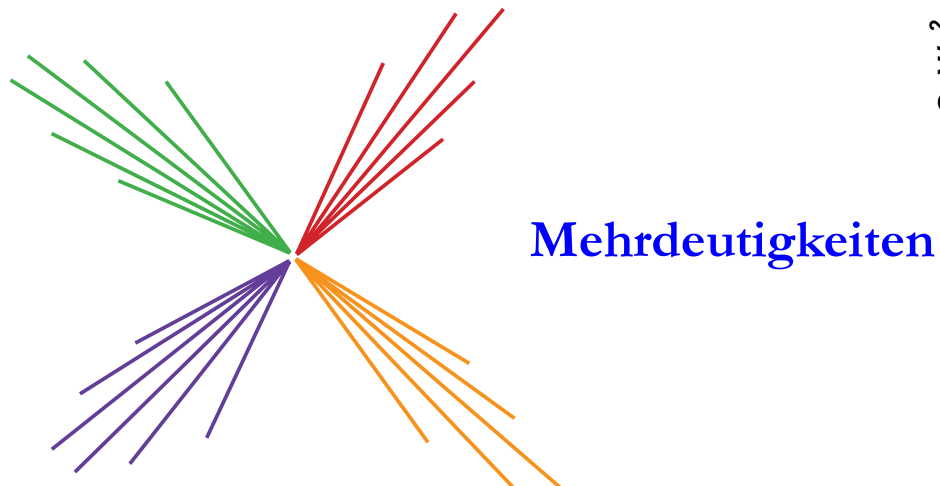
→ bestimme m_W aus rekonstruiertem invarianten Massenspektrum
(auch sensitiv auf Γ_W)

→ experimentelle Auflösung 5-10 %
kinematischer Fit ~ Energie-/Impulserhaltung, $m_{W1} \approx m_{W2}$ (5C)

● $W W \rightarrow q \bar{q} l \nu$ $l=e,\mu$ \Rightarrow fehlender ν -Impuls ~ 2C-Fit

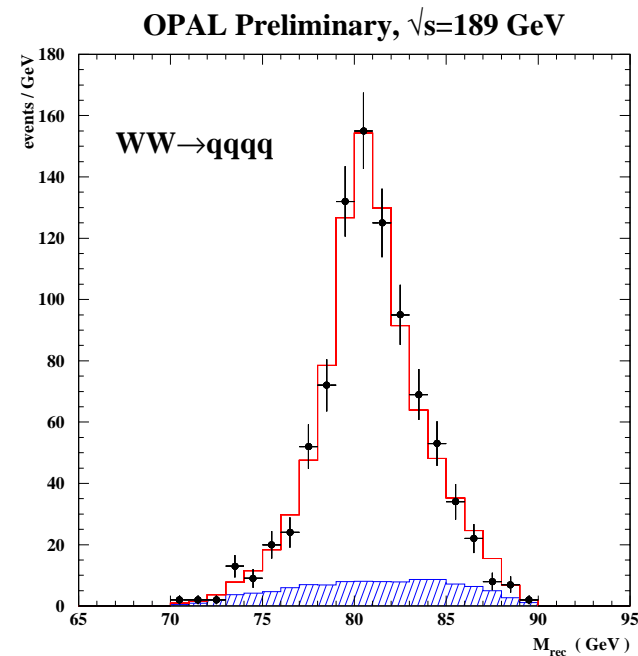
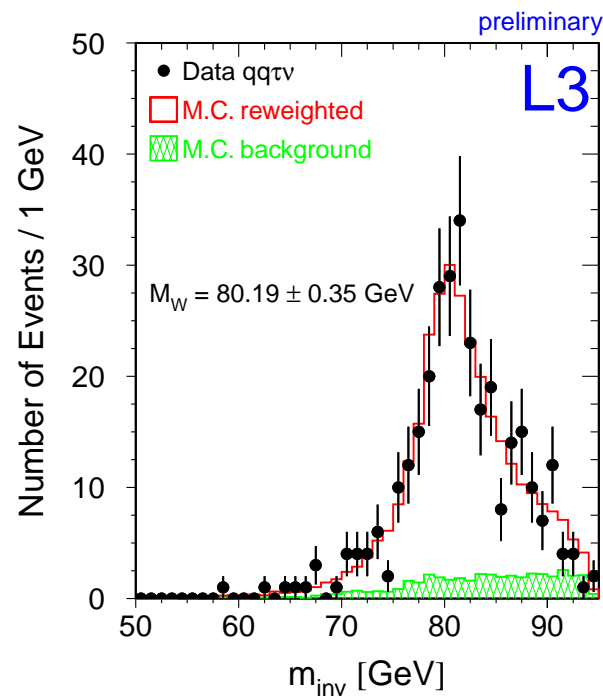
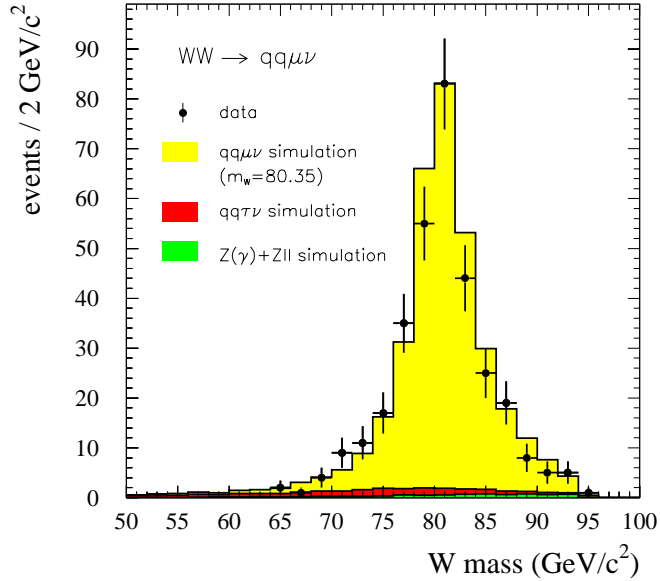
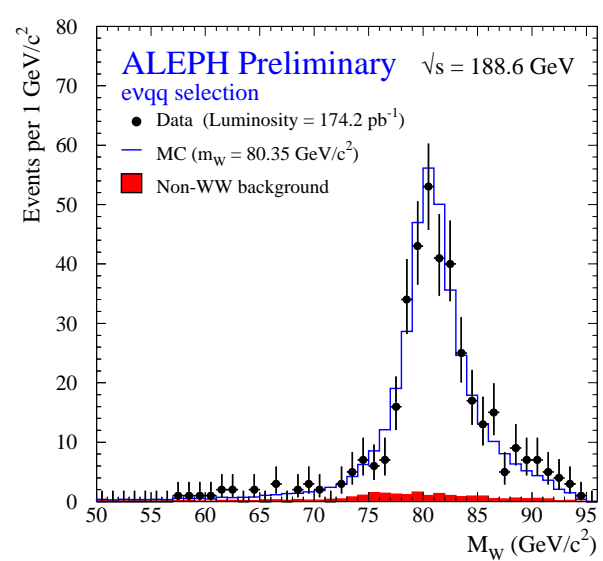
● $W W \rightarrow q \bar{q} \tau \nu$ \Rightarrow geringe Information aus hadr. Jets

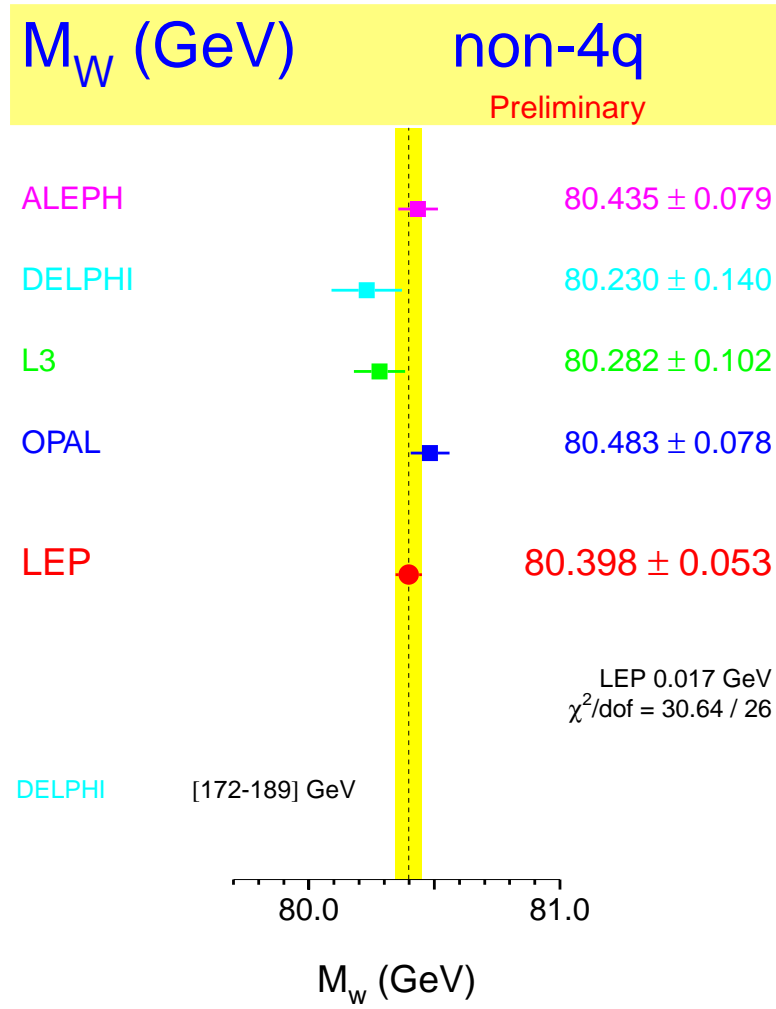
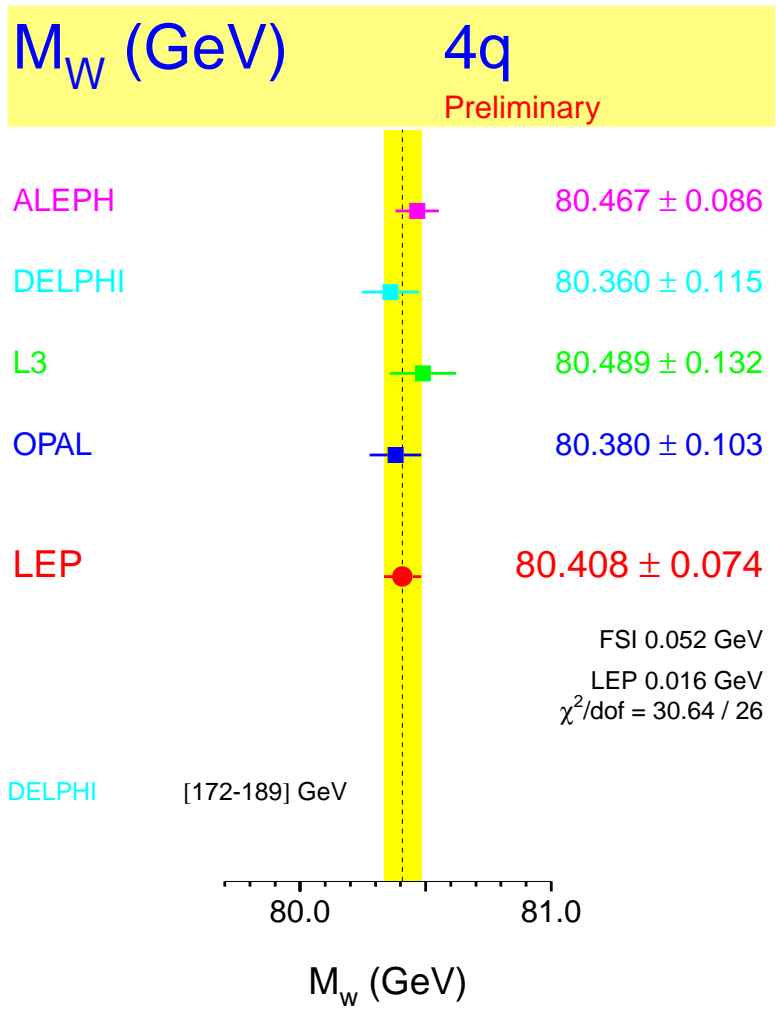
● $W W \rightarrow q \bar{q} q \bar{q}$ \Rightarrow 5C-Fit, 4 Jets mit 3 Kombinationen



→ Signale nach kinematischem Fit (189 GeV) :

Backup



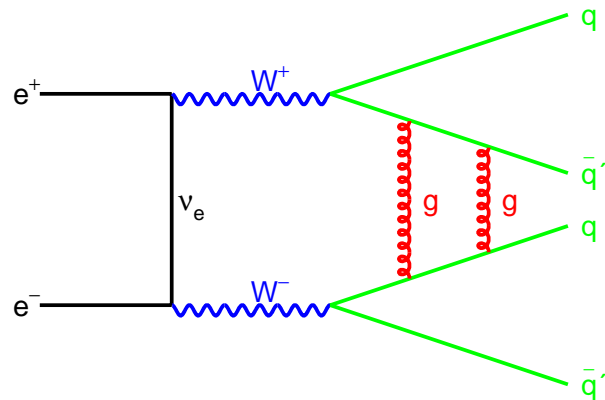


→ **kombiniert:** $m_W = 80.401 \pm 0.027(\text{stat}) \pm 0.031(\text{sys}) \pm 0.018(\text{FSI}) \pm 0.017(\text{LEP})$
in GeV

Endzustands-Wechselwirkungen bei $WW \rightarrow 4$ Jets

- limitiert Genauigkeit von m_W
- Quarks von unterschiedlichen W-Bosonen können wechselwirken :

W-Lebensdauer ~ 0.1 fm
 Fragmentations-Skala ~ 1 fm

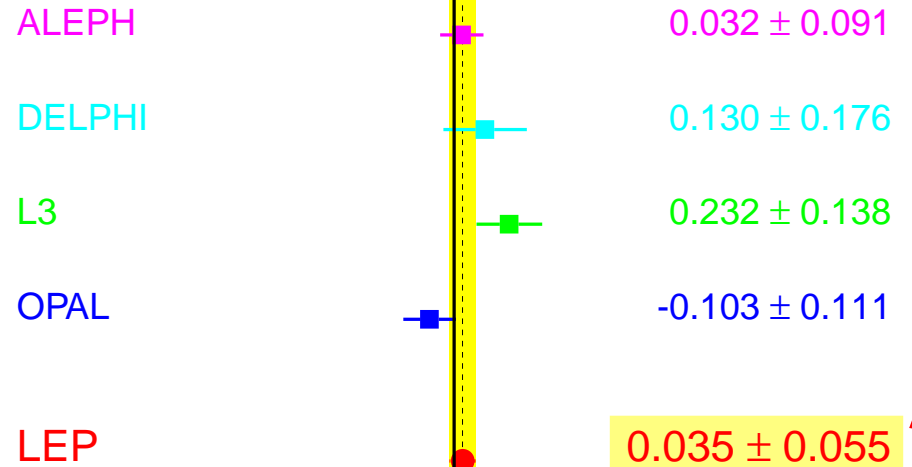


- „Color-Reconnection“
- Bose-Einstein-Korrelationen

- Unterschied in Ergebnissen für $WW \rightarrow 4$ Jets und $WW \rightarrow q \bar{q} l \nu$?

ΔM_W (GeV)

Preliminary



0.035 ± 0.055

+ FSI : 0.052 GeV

$\chi^2/\text{dof} = 30.64 / 26$

DELPHI [172-189] GeV

ΔM_W (GeV)

„Color-Reconnection“

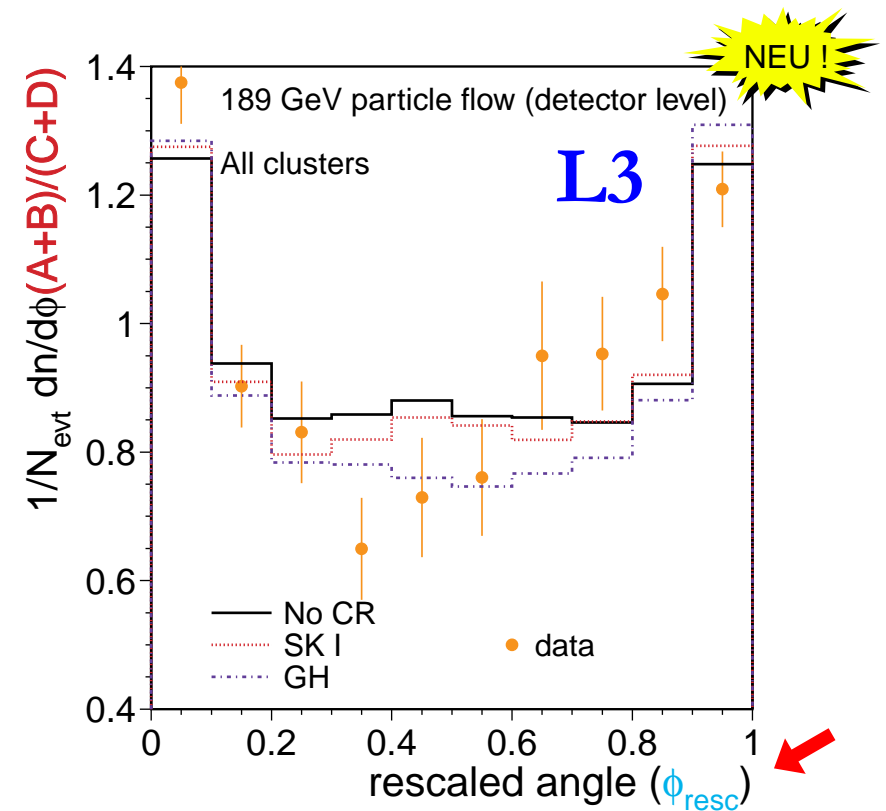
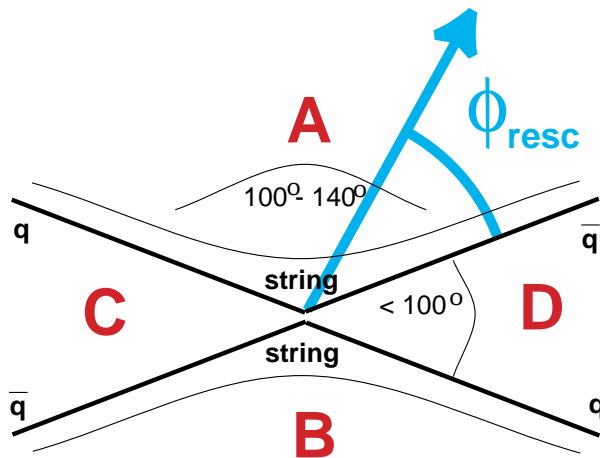
Backup

→ BR(B → J/ψ X) erklärt durch CR (Fritzsch '79, Gustafson+Zerwas '85)

→ CR in perturbativer Phase : $\frac{\sigma_{rec}}{\sigma_{4q}} \approx \frac{C_F \alpha_s}{N_C^2} \frac{\Gamma_W}{m_W} < 10^{-4} \Rightarrow$ vernachlässigbar (Khoze, Gustafson)

→ CR in Hadronisierung ~ Modelle ⇒ Effekt : $\Delta m_W = O(50 \text{ MeV})$

→ Beispiel :
Energie-/Teilchenfluß zwischen Jets :



bisher kein experimentelles Signal für CR in WW



Bose-Einstein-Korrelationen

→ Korrelationsfunktion :

$$C(Q) \propto 1 + \lambda \exp(-\sigma^2 Q^2)$$

mit $Q^2 = -(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)^2$

● $\sigma \sim$ Quellenradius (~ 1 fm)

● $\lambda \sim$ Korrelationsstärke

→ Modelle \sim Effekt : $\Delta m_W = O(30 \text{ MeV})$

→ BEK sichtbar innerhalb eines W (semilept. WW-Ereignisse)

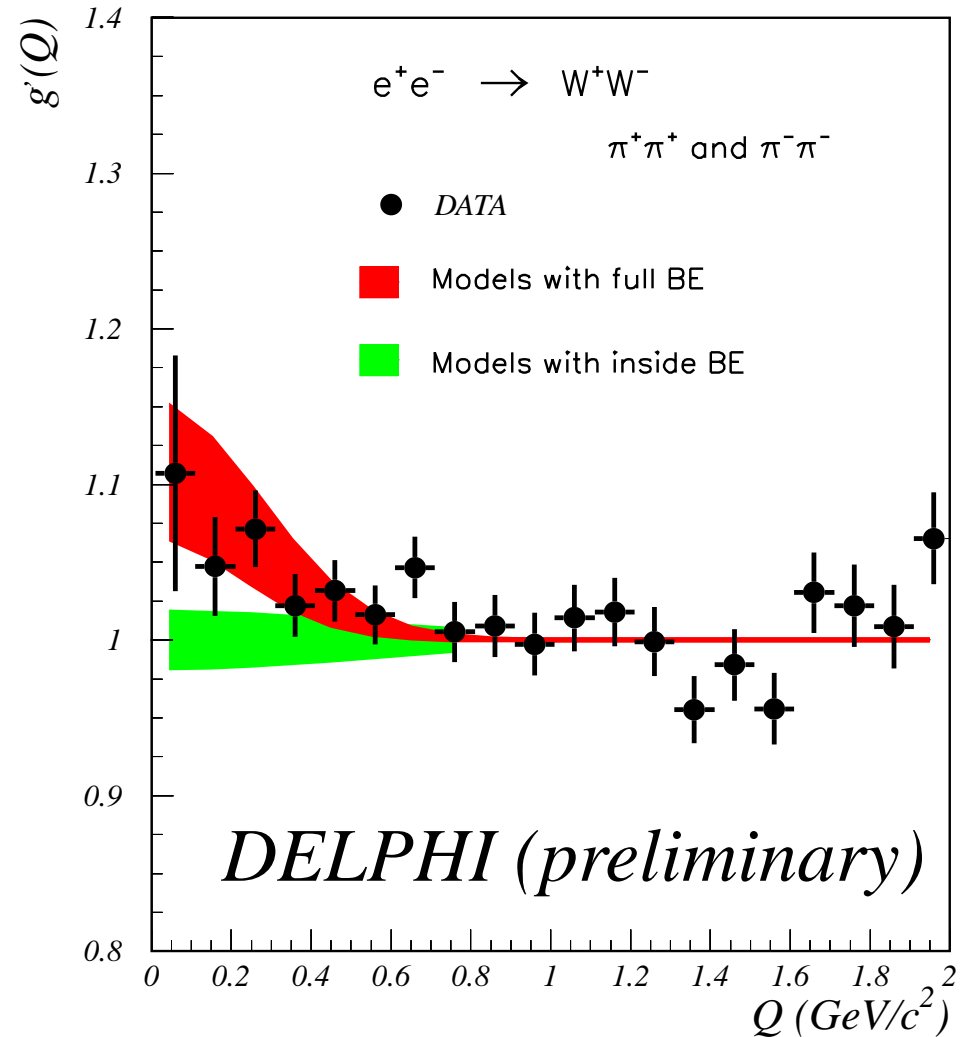
→ BEK zwischen unterschiedlichen W :

● ALEPH sieht keine BEK ($\sim 2.2 \sigma$)

● DELPHI bevorzugt BEK ($\sim 2 \sigma$)

● OPAL/L3 konsistent mit keiner BEK

experimentelle Situation unklar !



Unsicherheit der LEP 2-Strahlenergie

-4

→ Methode der NMR-Magnetfeld-Extrapolation :

- resonante Depolarisation bei 40-60 GeV \Rightarrow Kalibration der NMR-Feldmessung
- extrapoliere mittels NMR-Messungen und Modell zu Physik-Energien
- Vergleiche mit Messungen des „Flux-Loop“-Systems

Source	Error [MeV]	
	1997	1998
Extrapolation from NMR-Polarisation:		
NMR rms/ \sqrt{N} at physics energy	10	8
Different E_{pol} Fills	5	4
Flux-loop test of extrapolation:		
NMR flux-loop difference at physics energy	20	15
Field not measured by flux loop	5	5
Optics difference	4	6
Corrector effects	3	4
IP specific corrections ($\delta E_{\text{CM}}/2$):		
RF model	4	4
Total	25	20

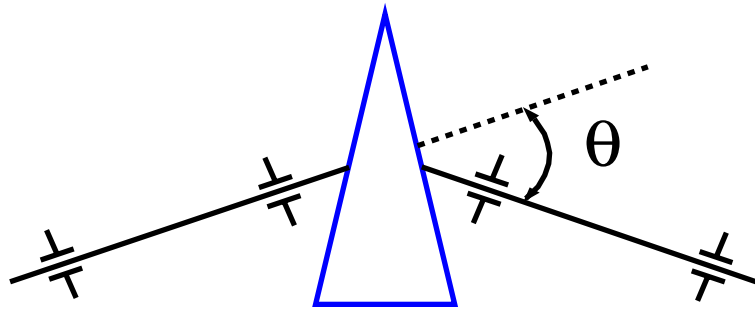
1999 ähnliche Fehler

→ Fehler dominiert durch Unterschiede zwischen NMR und Flux-Loop



Spektrometer zur Messung der Strahlenergie

→ Prinzip: $\theta \sim \int B dl / E_{\text{beam}}$



→ vollständige Installation während Shutdown 98/99 (bzw. Juli 99)

→ erste vorläufige Ergebnisse: (Chamonix-2000)
Datennahme nach August 1999



● Strahlablenkung in Dipolfeld

● bestimme $\int B dl$ und θ

mit Genauigkeiten von :

$$\delta B / B \sim 3 \times 10^{-5}$$

$$\delta \theta / \theta \sim 3 \times 10^{-4} \text{ oder pos. } \sim 1 \mu\text{m}$$

● Messung bei 40-60 GeV eichen mit resonanter Depolarisation (RDP)

$$\sigma(E_{\text{Spek}} - E_{\text{RDP}}) = 8.0 \pm 1.7 \text{ MeV (erwartet 7.6 MeV)}$$

● relative Messung für 100 GeV

$$E_{\text{Spek}} - E_{\text{NMR}} = 0.3 \pm 11.0 \text{ MeV}$$

Genauigkeit von $\sigma_E < 15 \text{ MeV}$ scheint realistisch $\sim \sigma(m_W) < 12 \text{ MeV}$

Synchrotron-Oszillations-Frequenz und Beschleunigungsfeld

→ vereinfachter Zusammenhang :

$$Q_s^2 = \left(\frac{\alpha_c h}{2\pi E} \right) \sqrt{(e^2 V_{RF}^2 - U_0^2)}$$

$U_0 \sim$ Energieverlust, hängt von E ab

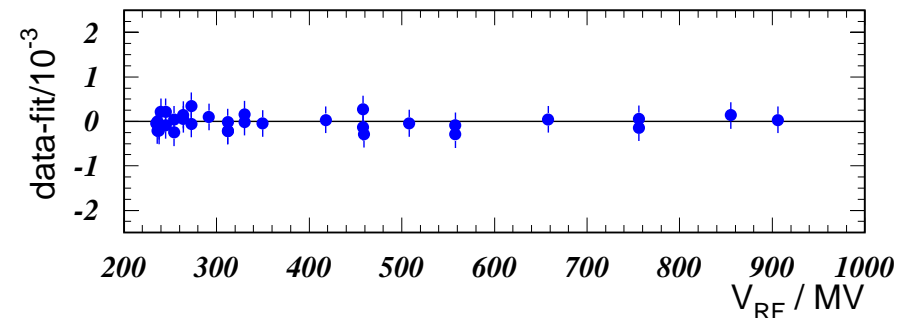
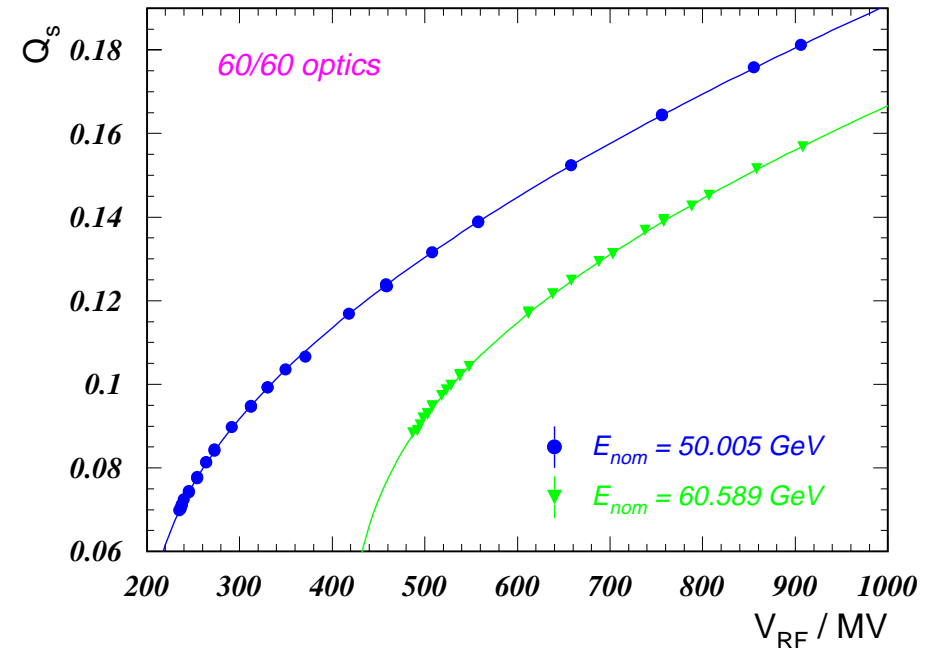
→ messe Q_s und V_{RF}

→ Abhängigkeiten können genau modelliert werden

→ Meßreihen in 1998 und 1999

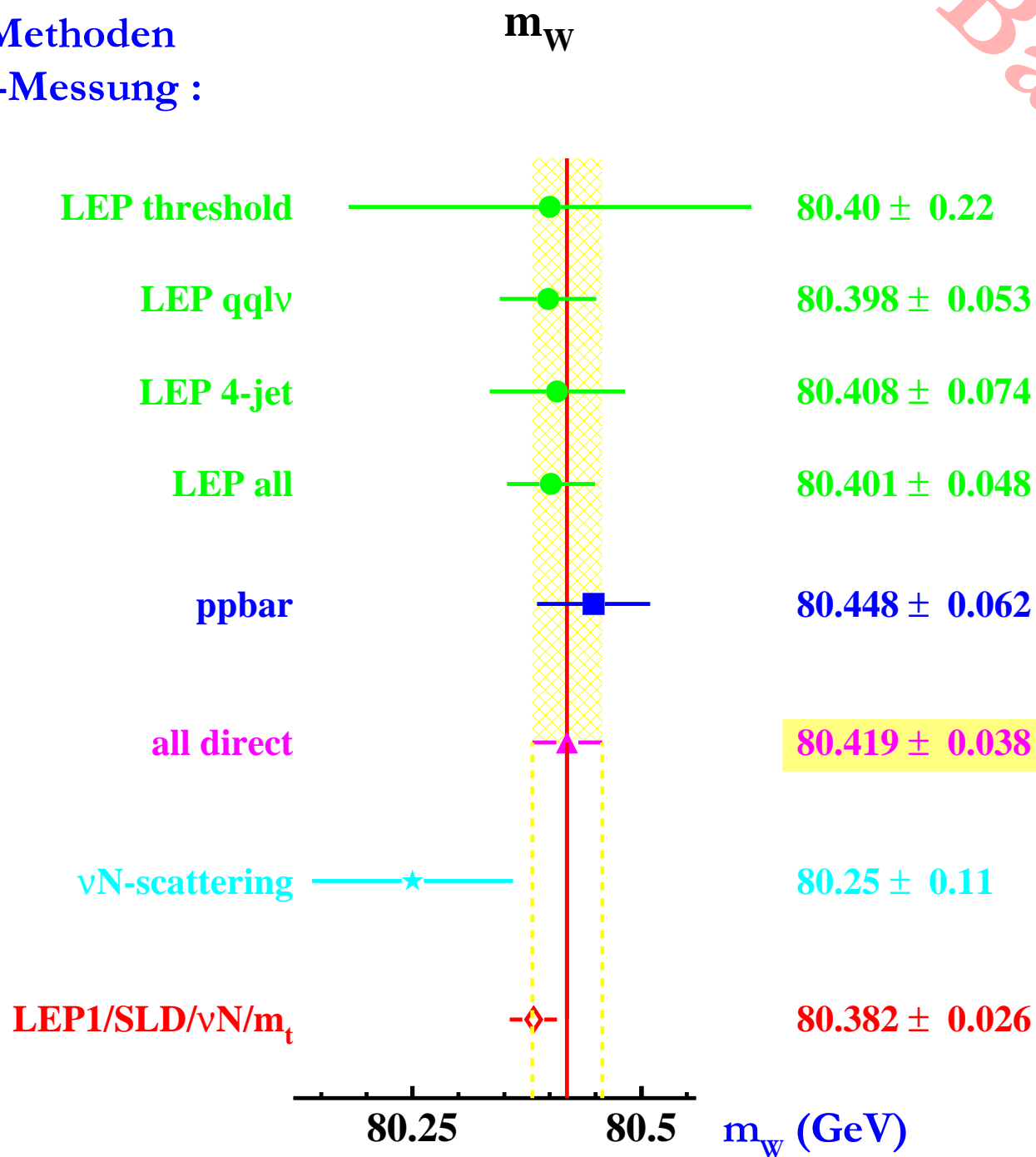
→ erste Ergebnisse stimmen mit NMR-Extrapolation überein

→ Genauigkeit ~ 20 MeV erreichbar



Backup

→ Vergleich der Methoden zur W-Massen-Messung :

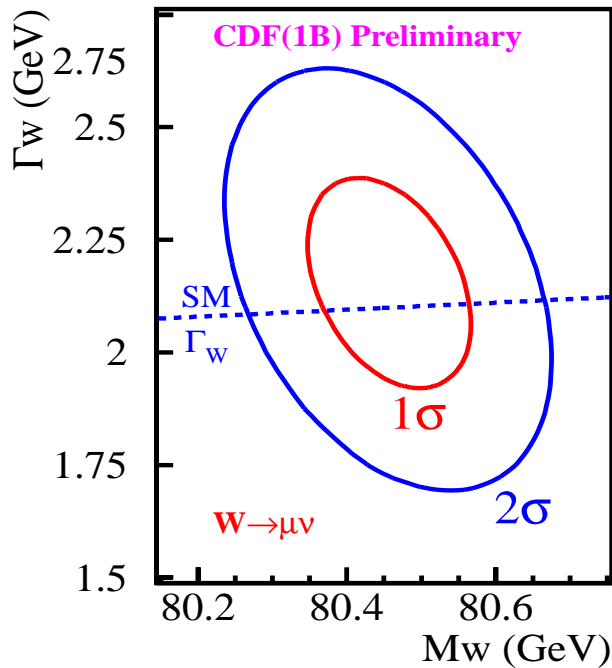
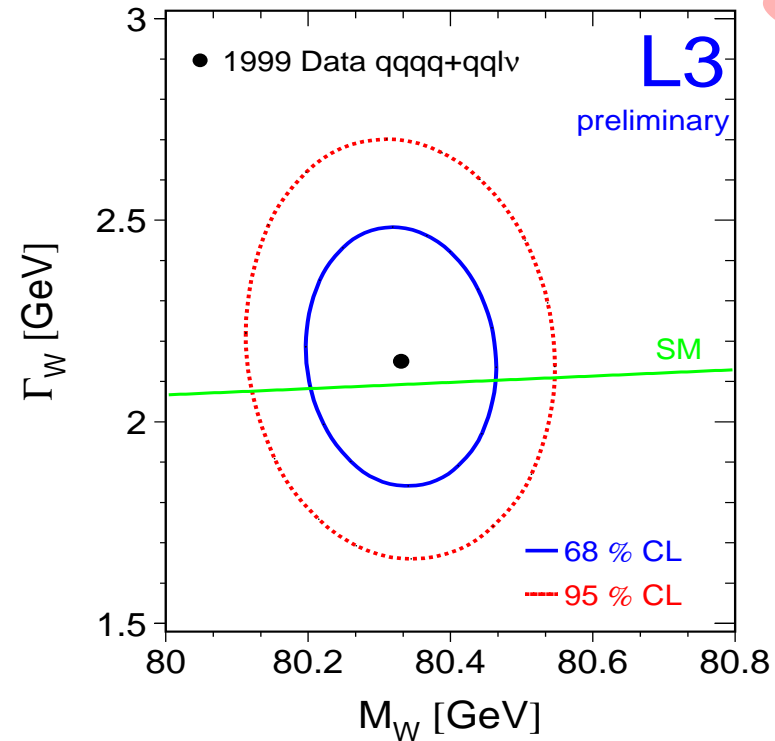


W-Zerfallsbreite

Backup

→ bestimme W-Zerfallsbreite durch
Fit an Massenspektrum :

	Γ_W [GeV]	
ALEPH	2.17 ± 0.20	(202 GeV)
DELPHI	2.48 ± 0.41	(183 GeV)
L3	2.19 ± 0.21	(202 GeV)
OPAL	1.84 ± 0.38	(183 GeV)
LEP	2.19 ± 0.15	
SM	2.08	



→ CDF : Ende der transversalen Massenverteilung :

$$\Gamma_W = 2.055 \pm 0.125 \text{ GeV}$$

→ indirekte Messung über :

$$\frac{\sigma(p\bar{p} \rightarrow W + X) \text{ BR}(W \rightarrow l\nu)}{\sigma(p\bar{p} \rightarrow Z + X) \text{ BR}(Z \rightarrow ll)} = \left(\frac{\sigma_W}{\sigma_Z}\right)^{\text{SM}} \left(\frac{\Gamma_Z}{\Gamma_{Z \rightarrow ll}}\right)^{\text{LEP}} \frac{\Gamma_{W \rightarrow l\nu}^{\text{SM}}}{\Gamma_W}$$

CDF : $\Gamma_W = 2.179 \pm 0.046 \text{ GeV}$
D0 : $\Gamma_W = 2.107 \pm 0.054 \text{ GeV}$



W-Masse aus ν -Nukleon-Streuung

Backup

→ Verhältnis der Wirkungsquerschnitte für neutrale und geladene Ströme ist sensitiv auf :

$$\sin^2\theta_W = 1 - m_W^2 / m_Z^2$$

→ Paschos-Wolfenstein-Variable :

$$R^- = \frac{\sigma_{NC}^{\nu} - \sigma_{NC}^{\bar{\nu}}}{\sigma_{CC}^{\nu} - \sigma_{CC}^{\bar{\nu}}}$$

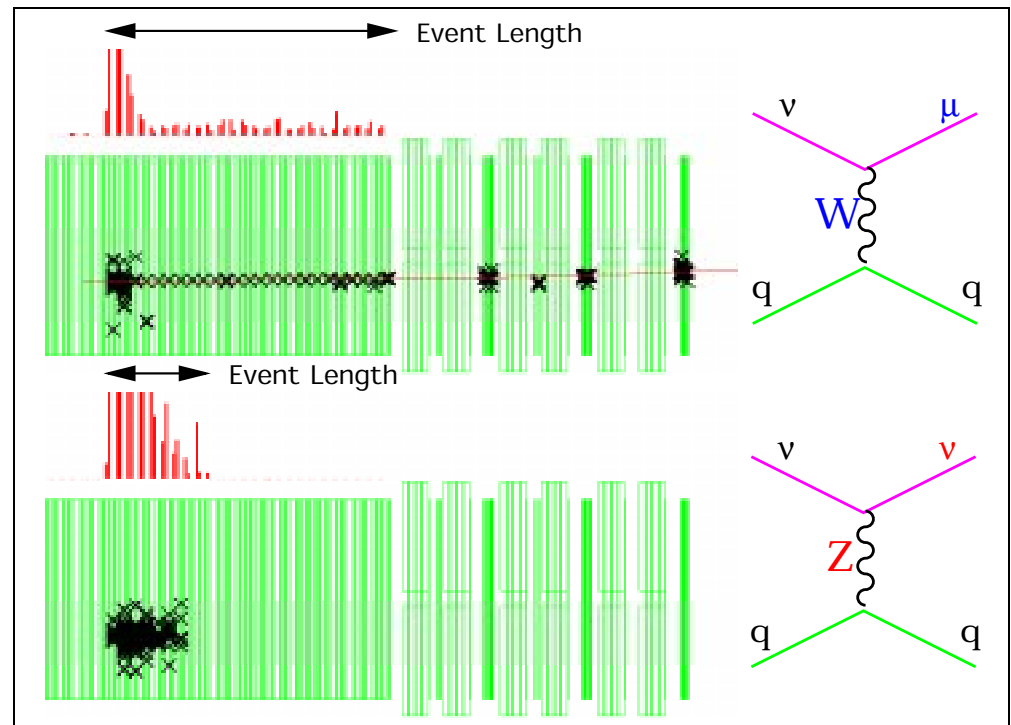
Quark-See-Beiträge kürzen sich raus,

da : $\sigma_{\nu q} = \sigma_{\bar{\nu} \bar{q}}$ $\sigma_{\nu \bar{q}} = \sigma_{\bar{\nu} q}$

→ NuTeV und CCFR haben ν - und $\bar{\nu}$ -Wirkungsquerschnitte gemessen :

$$\Rightarrow \sin^2\theta_W = 0.2255 \pm 0.0021$$

$$\text{oder } m_W = 80.25 \pm 0.11 \text{ GeV}$$



Status der Messung bei BES

Backup

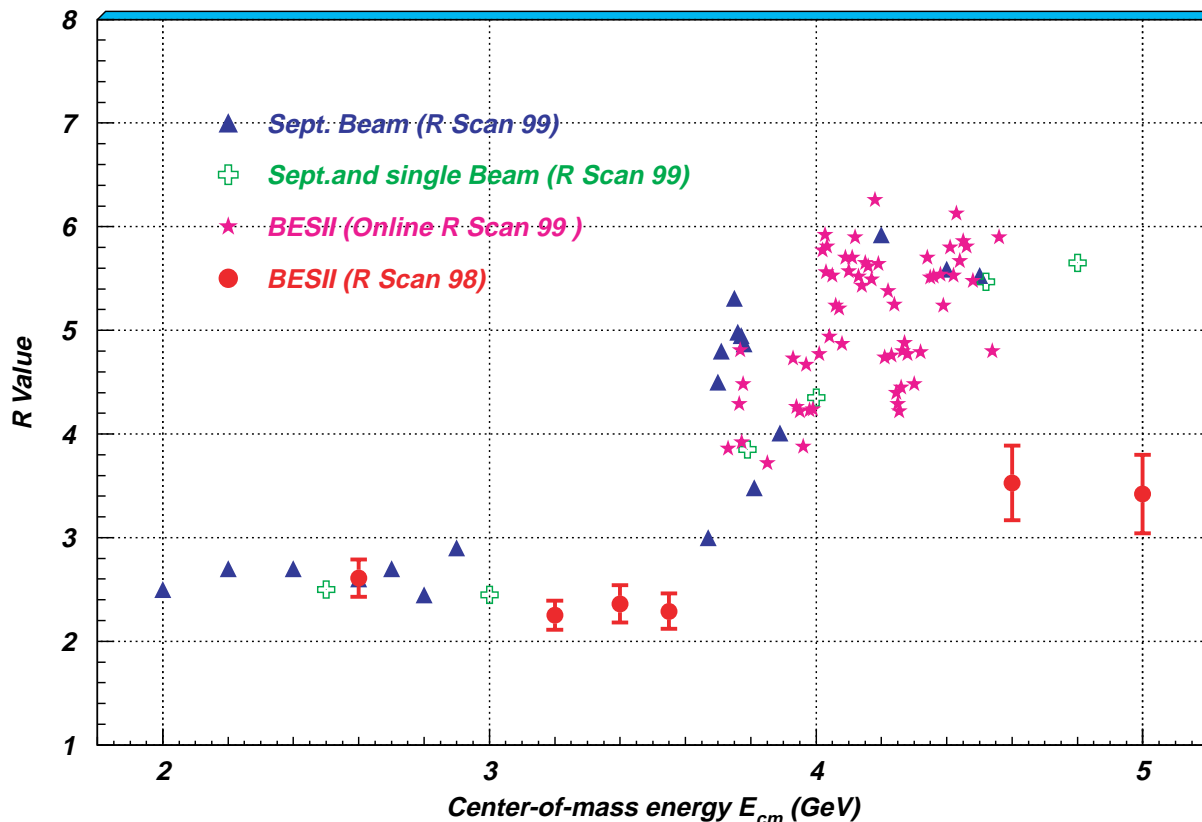
→ Interpretation der elektroschwachen Messungen benötigt $\alpha(m_Z^2)$

→ Vakuum-Polarisation enthält Beitrag der 5 leichten Quarks :

$$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)} = 0.02804 \pm 0.00065 \text{ (Eidelmann, Jegerlehner)}$$

Fehler dominiert durch Unsicherheit in $R(s) = \sigma_{\text{had}}/\sigma_{\mu\mu}$ bei kleinen Energien

Y.Zhu, Tampere 1999



→ **BES** : $2 \text{ GeV} \leq \sqrt{s} \leq 5 \text{ GeV}$

● Struktur nahe der Charm-Schwelle

● Ziel : messe R mit 6 - 10 %

● 6 Punkte-Scan publiziert



● 1999 gab es einen Scan mit 85 Energiepunkten

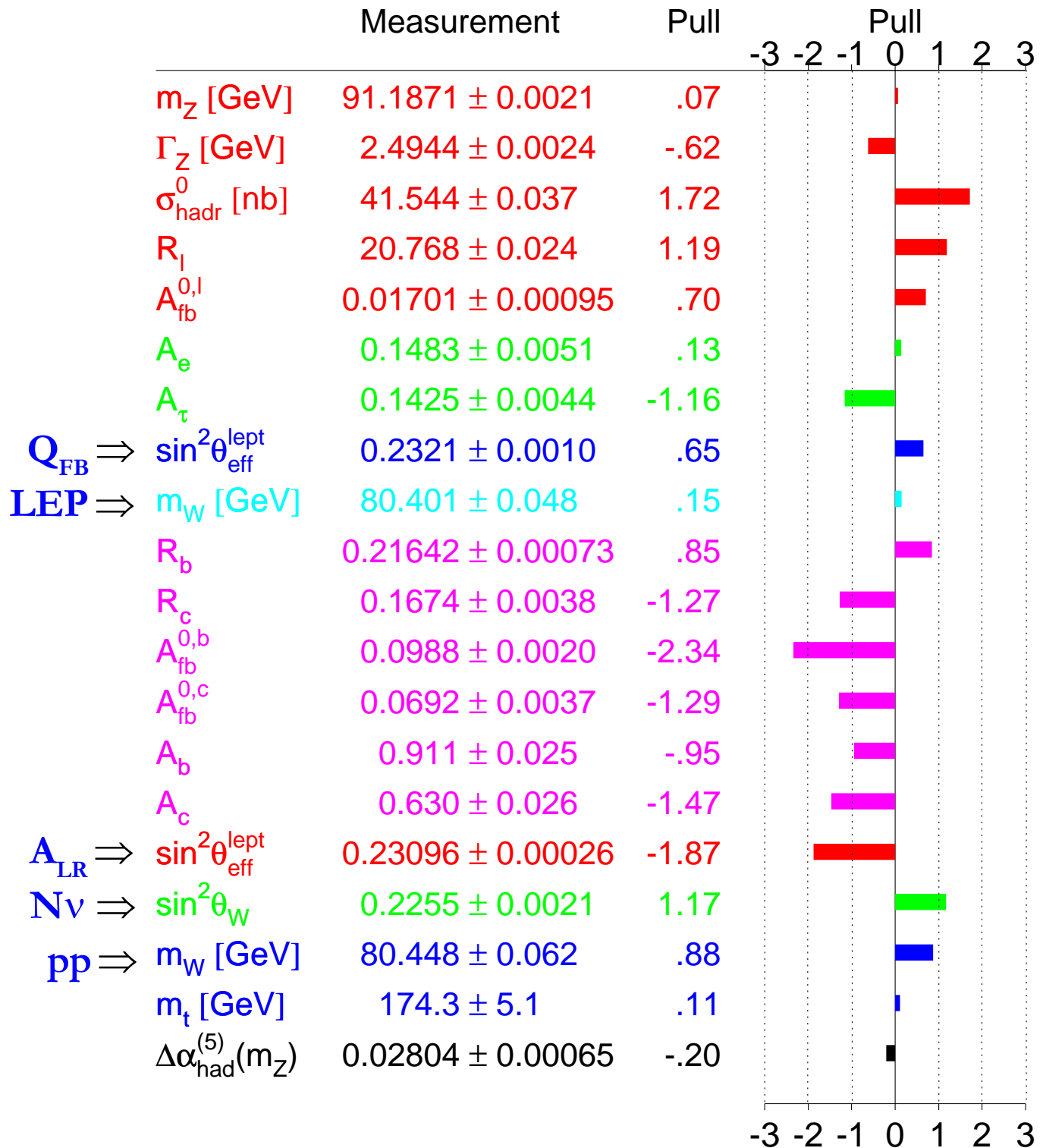
→ Analyse nicht abgeschlossen



Standardmodell-Fits

→ Abweichungen der Daten zum Standardmodell-Fit

Moriond 2000



$$\chi^2/\text{ndf} = 23/15 \Rightarrow \text{prob}(\chi^2) = 9\%$$



→ Anpassung an die Daten von :

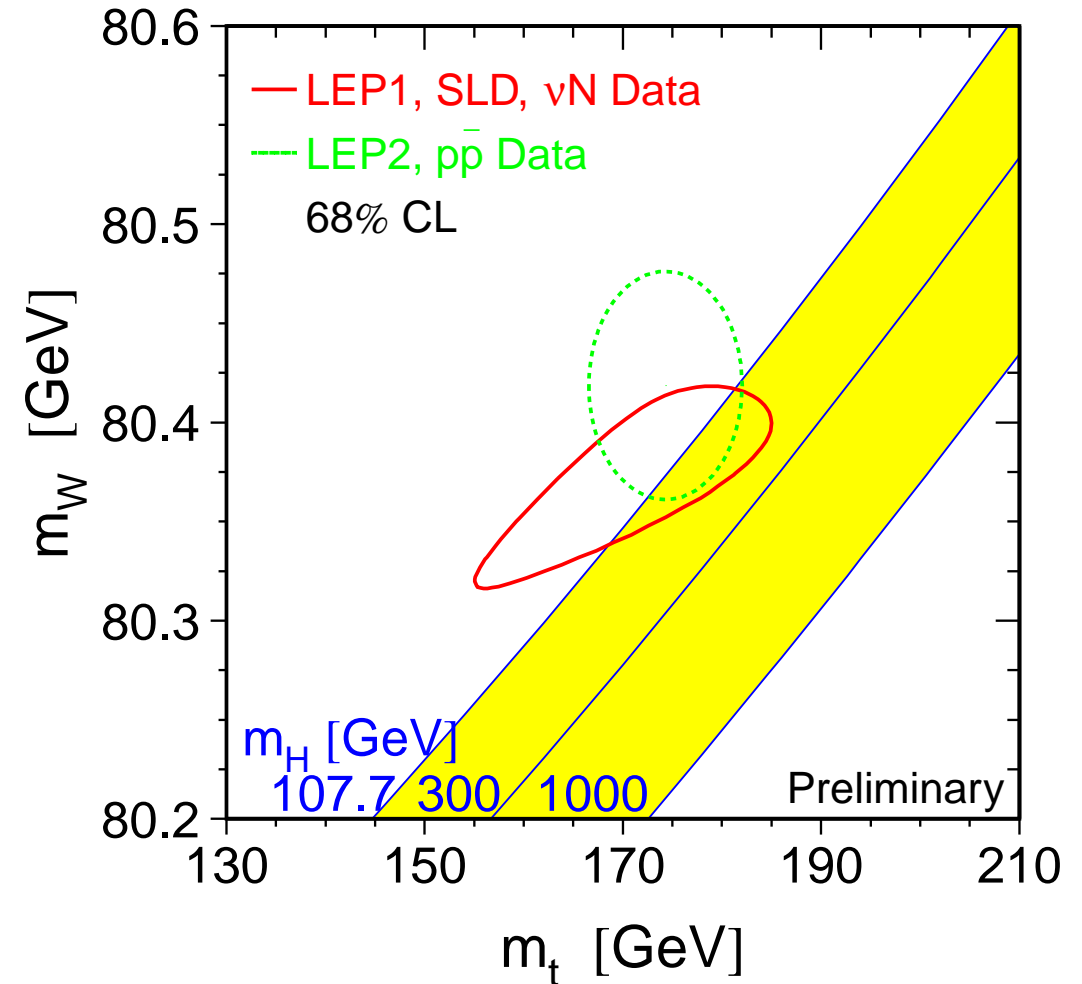
- präzise Z-Daten von LEP+SLC
- m_W von LEP-2 und CDF+D0
- $\sin^2 \theta_W$ aus der ν -Nukleon-Streuung
- $m_t = 174.5 \pm 5.1 \text{ GeV}$ (CDF+D0)
- hadronischer Beitrag zu $\alpha(m_Z^2)$:
 $\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)} = 0.02804 \pm 0.00065$

	LEP including LEP-II m_W	all data except m_W and m_t	all data except m_W	all data
m_t [GeV]	176^{+14}_{-11}	167^{+10}_{-8}	172.9 ± 4.7	173.7 ± 4.4
m_H [GeV]	147^{+300}_{-92}	54^{+81}_{-27}	78^{+76}_{-41}	67^{+60}_{-33}
$\log(m_H/\text{GeV})$	$2.17^{+0.48}_{-0.43}$	$1.73^{+0.40}_{-0.30}$	$1.90^{+0.29}_{-0.32}$	$1.82^{+0.28}_{-0.30}$
$\alpha_s(m_Z^2)$	0.120 ± 0.003	0.118 ± 0.003	0.118 ± 0.003	0.118 ± 0.003
$\chi^2/\text{d.o.f.}$	12/9	22/12	22/13	23/15
$\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}$	0.23178 ± 0.00021	0.23149 ± 0.00017	0.23150 ± 0.00017	0.23145 ± 0.00016
$1 - m_W^2/m_Z^2$	0.2233 ± 0.0006	0.2232 ± 0.0007	0.2229 ± 0.0005	0.2227 ± 0.0004
m_W [GeV]	80.363 ± 0.030	80.368 ± 0.034	80.383 ± 0.026	80.394 ± 0.021

Ergebnisse und Vergleich der direkten und indirekten Messungen für m_W und m_t

→ Anpassung an alle Daten :

m_t [GeV]	173.7 ± 4.4
m_H [GeV]	67^{+60}_{-33}
$\log(m_H/\text{GeV})$	$1.82^{+0.28}_{-0.30}$
$\alpha_s(m_Z^2)$	0.118 ± 0.003
$\chi^2/\text{d.o.f.}$	23/15
$\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}$	0.23145 ± 0.00016
$1 - m_W^2/m_Z^2$	0.2227 ± 0.0004
m_W [GeV]	80.394 ± 0.021



→ gute Übereinstimmung zwischen direkten und indirekten Daten für m_W und m_t

→ SM ist ok auf 1-Loop-Niveau

Die Masse des Higgs-Bosons

→ Daten bevorzugen ein leichtes Higgs

→ Higgs-Massengrenze inklusive theoretischer Unsicherheiten :

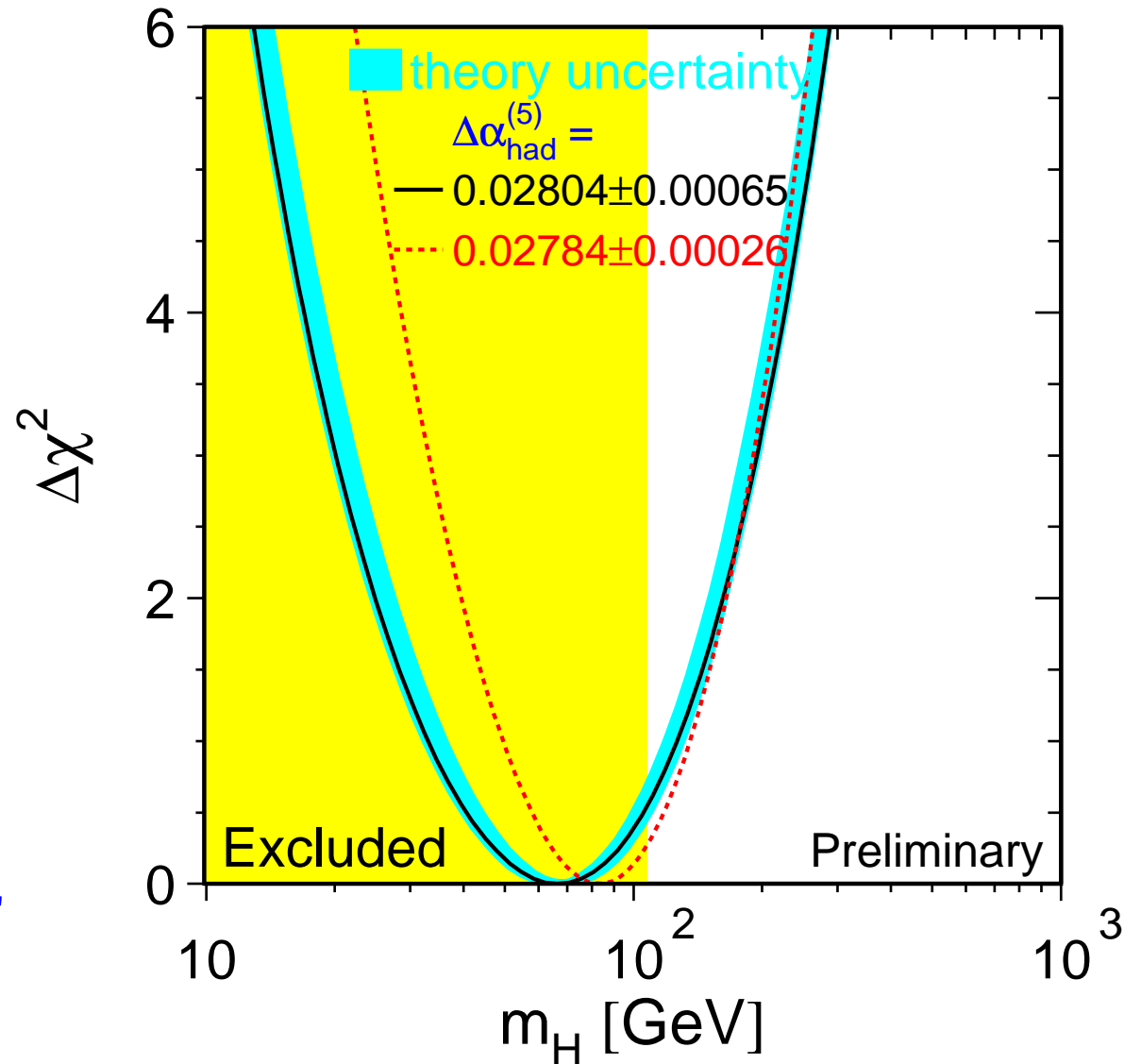
$$m_H < 188 \text{ GeV @ 95 \% CL}$$

Veränderung durch neues m_W

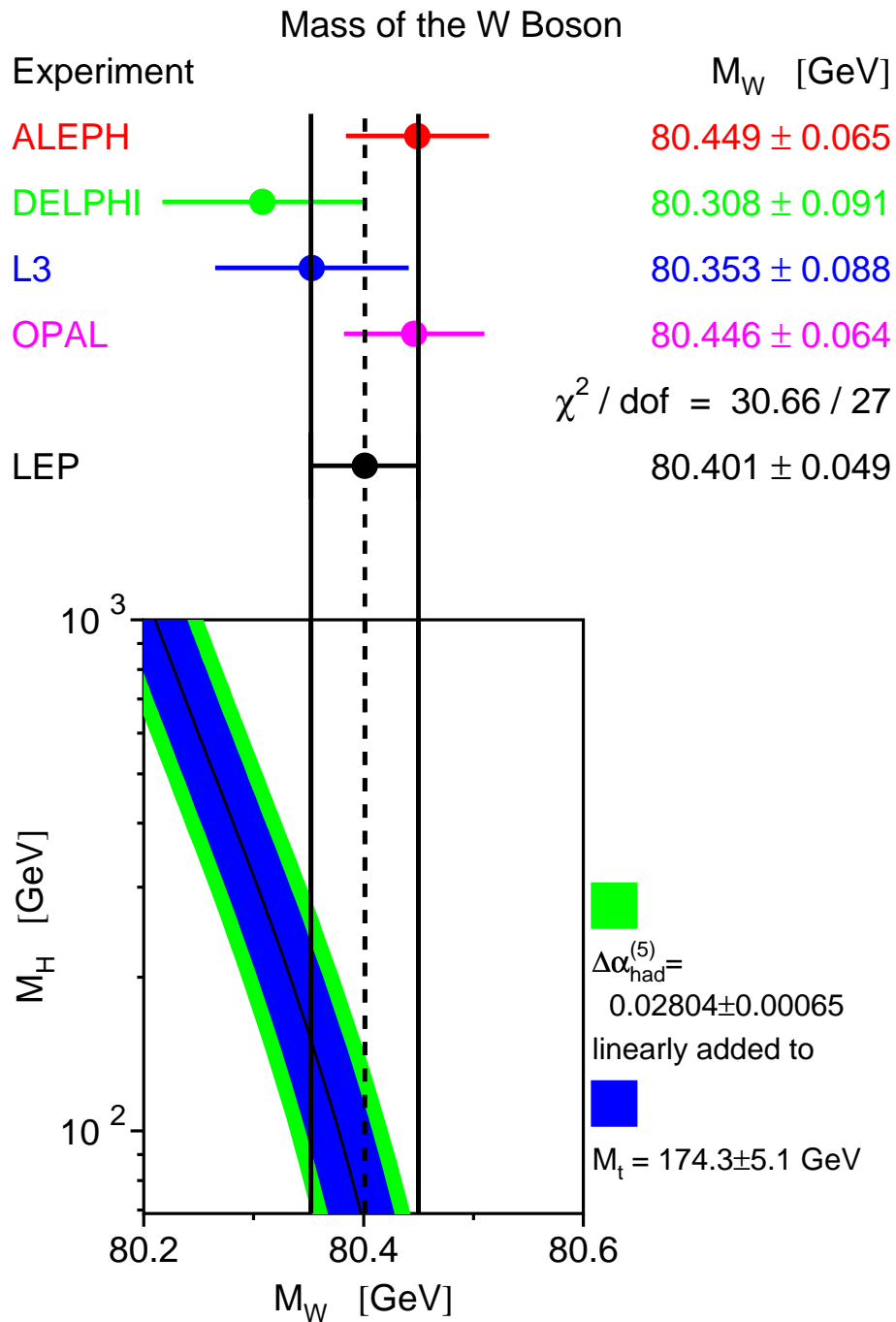
→ Massengrenze durch Higgs-Suchen bei LEP :

$$m_H > 107.7 \text{ GeV @ 95 \% CL}$$

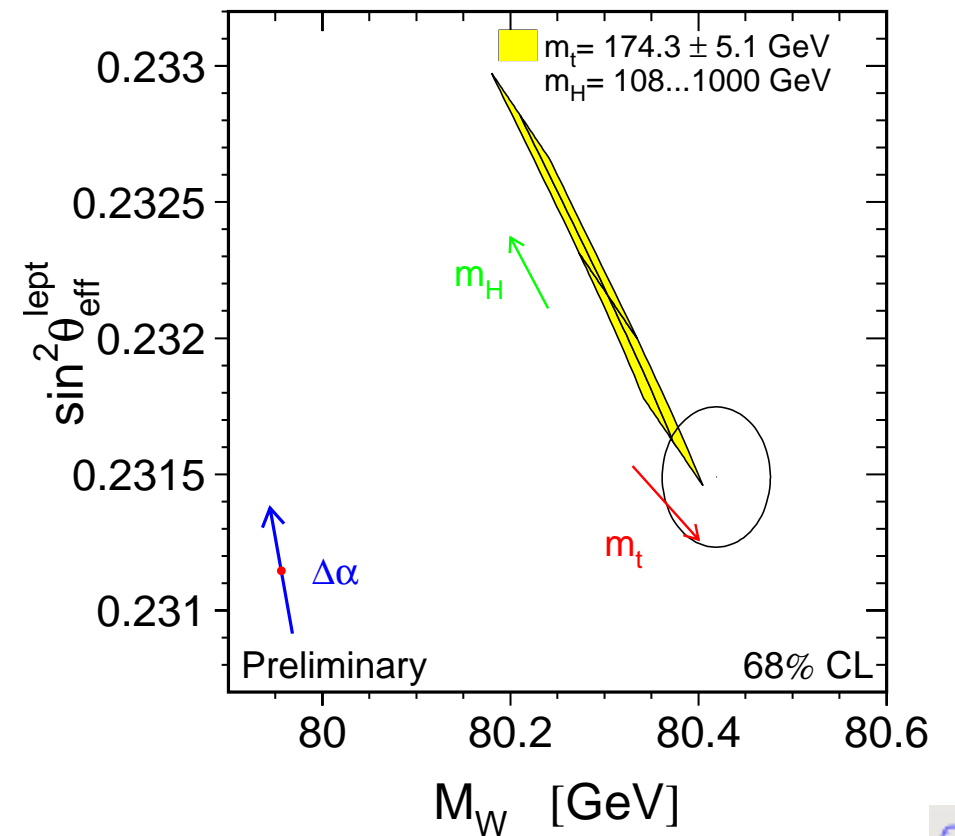
siehe Vortrag J.Mnich



Backup



→ auch W-Masse bevorzugt
leichtes Higgs



Zusammenfassung

- 10 Jahre elektroschwache Physik bei LEP

- 17 Millionen Z-Ereignisse

$$m_Z = 91.1871 \pm 0.0021 \text{ GeV}$$

- 500 pb⁻¹ pro Experiment bei LEP 2

$$m_W = 80.401 \pm 0.048 \text{ GeV}$$

- Parameter des Standardmodells festgelegt,
nur Higgs fehlt noch

- keine signifikanten Abweichungen von
SM-Vorhersagen bei LEP 2

- Strahlungskorrekturen :

das Higgs ist leicht

LEP-Betrieb im Jahr 2000

Backup

- 500 pb⁻¹ pro Experiment bis Ende 1999
⇒ geringe Verbesserung in $\sigma_{\text{stat}}(m_W)$
- LEP-Betrieb optimiert für SM-Higgs- und χ^\pm -Suchen

	102.5-103.0	103.3-103.5
wie 1999	90 pb ⁻¹	0 pb ⁻¹
+ Mini-Ramp	105 pb ⁻¹	15 pb ⁻¹
+ 30 min. Fills	120 pb ⁻¹	25 pb ⁻¹
+ 2x2 Bunche	200 pb ⁻¹	50 pb ⁻¹

← Strahlenergie in GeV

Chamonix-2000 Workshop
(optimistisch)

- Problem mit Maschine ⇒ Möglichkeit an W-Schwelle bei 161 GeV zu laufen ?
⇒ nur geringe Verbesserung in $\sigma_{\text{tot}}(m_W)$
- Fehler der LEP-Energie ~ 10 MeV ⇒ Verbesserung in $\sigma_{\text{tot}}(m_W) \sim 3-4$ MeV



→ Anpassung verschiedener SUSY-Modelle an elektroschwache Daten :

J.Erler, D.Pierce 1998

Backup

