# Die Jagd nach dem Higgs Boson bei LEP


Joachim Mnich
CERN EP


RWTH Aachen
19. Oktober 1998

## Inhalt:

- Das Higgs Boson im Standardmodell
- Die direkte Suche nach dem Higgs
- Bestimmung der Higgs Masse aus schwachen Korrekturen
- Higgs Bosonen in Supersymmetrie
- Ausblick

## Erzeugung der Massen der schweren Eichbosonen $W^{\pm}$ und Z durch spontane Symmetriebrechung

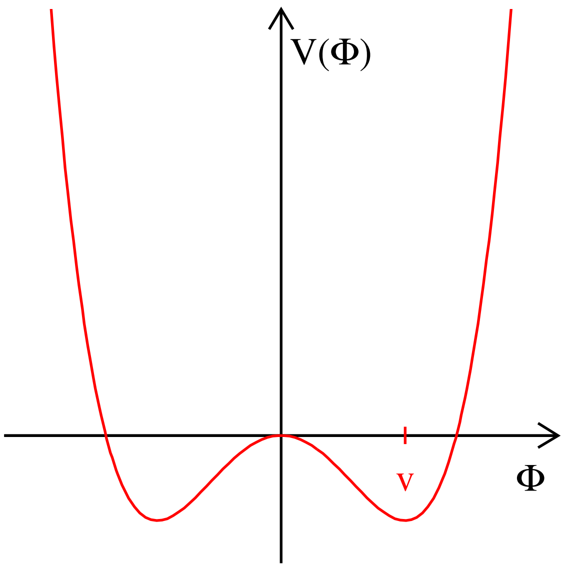
**Einführung eines komplexen, skalaren Feldes**

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \Phi_1 + i\Phi_2 \\ \Phi_3 + i\Phi_4 \end{pmatrix}$$

**mit Potential**

$$V(\Phi) = \mu^2 \, \Phi^\dagger \Phi + \lambda \, \left(\Phi^\dagger \Phi\right)^2$$

$$\mu^2 < 0 \qquad \lambda > 0$$




**Vakuumerwartungswert** $v = \sqrt{-\mu^2/\lambda}$

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + \eta(x) \end{pmatrix}$$

$$V(\eta) = -\frac{\mu^4}{4\lambda} - \mu^2 \, \eta^2 + \lambda v \, \eta^3 + \frac{1}{4} \lambda \, \eta^4$$

**Forderung nach lokaler $SU(2)\times U(1)$ Eichinvarianz führt zu Massentermen in der Lagrange-Funktion:**

$$m_{\mathrm{W}} = \frac{1}{2}\, g\, v \qquad m_{\mathrm{Z}} = \frac{1}{2}\sqrt{g^2 + g'^2}\, v \qquad m_{\gamma} = 0$$

**$SU(2)\times U(1)$ Kopplungskonstanten:**

$$g \sin\vartheta_{\mathrm{W}} = g' \cos\vartheta_{\mathrm{W}} = e$$

- **Higgs-Mechanismus liefert Erklärung für die Massen der Fermionen**
- **Kopplung des Higgs an Fermionen ist proportional zu deren Masse**
$$m_{\mathrm{f}} = g_{\mathrm{f}}\,\frac{v}{\sqrt{2}}$$
- **Massen der Fermionen sind freie Parameter Yukawa-Kopplungen $g_{\mathrm{f}}$**

**Hier: minimales Standardmodell mit einem Higgs-Dublett**

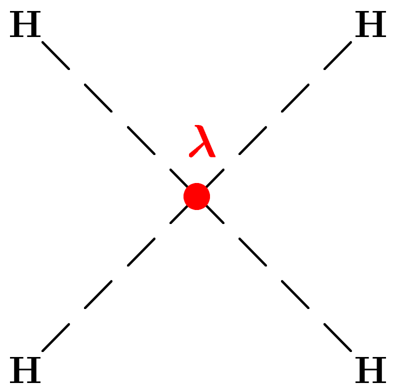
**Higgs-Boson ist das letzte noch nicht nachgewiesene Teilchen des SM!**

**Higgs-Masse ist freier Parameter:**

$$m_{\mathrm{H}} = \sqrt{2\lambda}\, v$$

$v = 247$ **GeV durch Messung von** $m_{\mathrm{Z}}, m_{\mathrm{W}}$

$\lambda$ **Kopplung am 4-Higgs Boson Vertex**

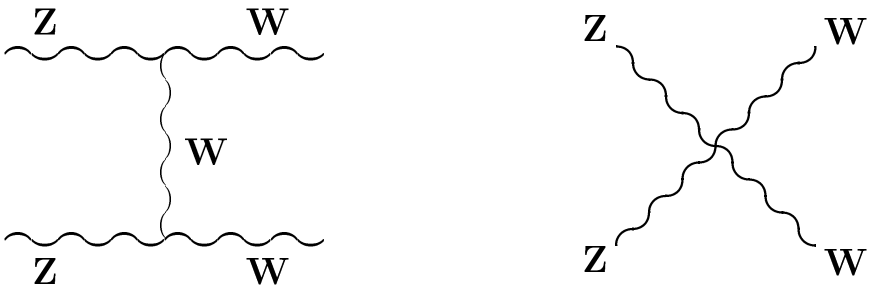



- **Störungsrechung** $\lambda < 1$
  $\Rightarrow$ **obere Grenze für** $m_{\mathrm{H}}$

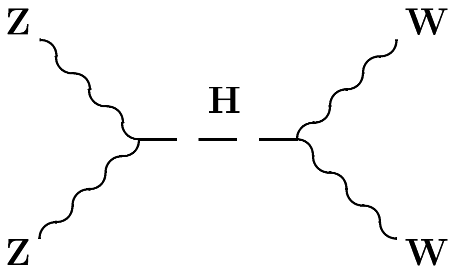
- **Vakuumstabilität** $\lambda > 0$
  $\Rightarrow$ **untere Grenze für** $m_{\mathrm{H}}$
  **(Strahlungskorrekturen)**

## Obere Grenze für $m_{\mathrm{H}}$ aus Unitarität

**Streuung von schweren Eichbosonen, z.B. :**




Divergenter Wirkungsquerschnitt $\sigma \propto \dfrac{s}{m_{\mathrm{W}}^4}$




$$\mathcal{M}_{\mathrm{H}} = -i \frac{e^2}{4 m_{\mathrm{W}}^2 \sin^2\vartheta_{\mathrm{W}}} \frac{s^2}{s - m_{\mathrm{H}}^2}$$

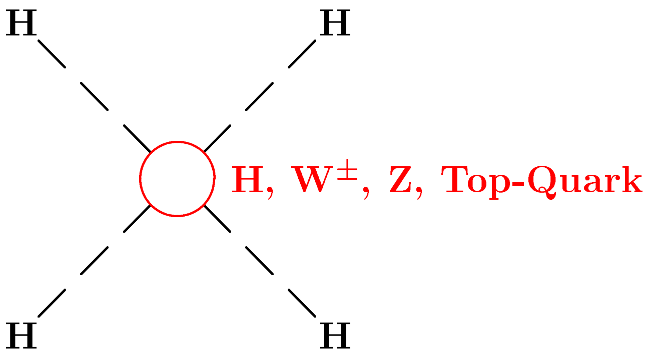
Gesamter Wirkungsquerschnitt

$$\sigma_{\mathrm{ZZ}\to\mathrm{WW}} = \frac{\pi\alpha^2}{16\sin^4\theta_{\mathrm{W}}} \left(\frac{m_{\mathrm{H}}}{m_{\mathrm{W}}}\right)^4 \frac{s}{(s - m_{\mathrm{H}}^2)^2}$$

Unitariät: $\sigma \leq \dfrac{16\pi}{s}$ für $s \to \infty$

$$m_{\mathrm{H}} \leq \frac{4\sin\theta_{\mathrm{W}}}{\sqrt{\alpha}} m_{\mathrm{W}} \approx 1 \text{ TeV}$$

Beiträge zum Higgs-Potential durch höhere Ordnungen:




- Obere Grenze für $m_{\mathrm{H}}$ aus Laufen der Kopplung $\lambda$

$$\lambda(\Lambda) = \frac{\lambda}{1 - \frac{3}{2\pi^2}\,\lambda \ln(\sqrt{2}\Lambda/v)} \qquad \text{(nur Higgs−Schleifen)}$$

Analogie zum Landau-Pol in der QED

- Untere Grenze aus Vakuumstabilität
  effektives Potential:

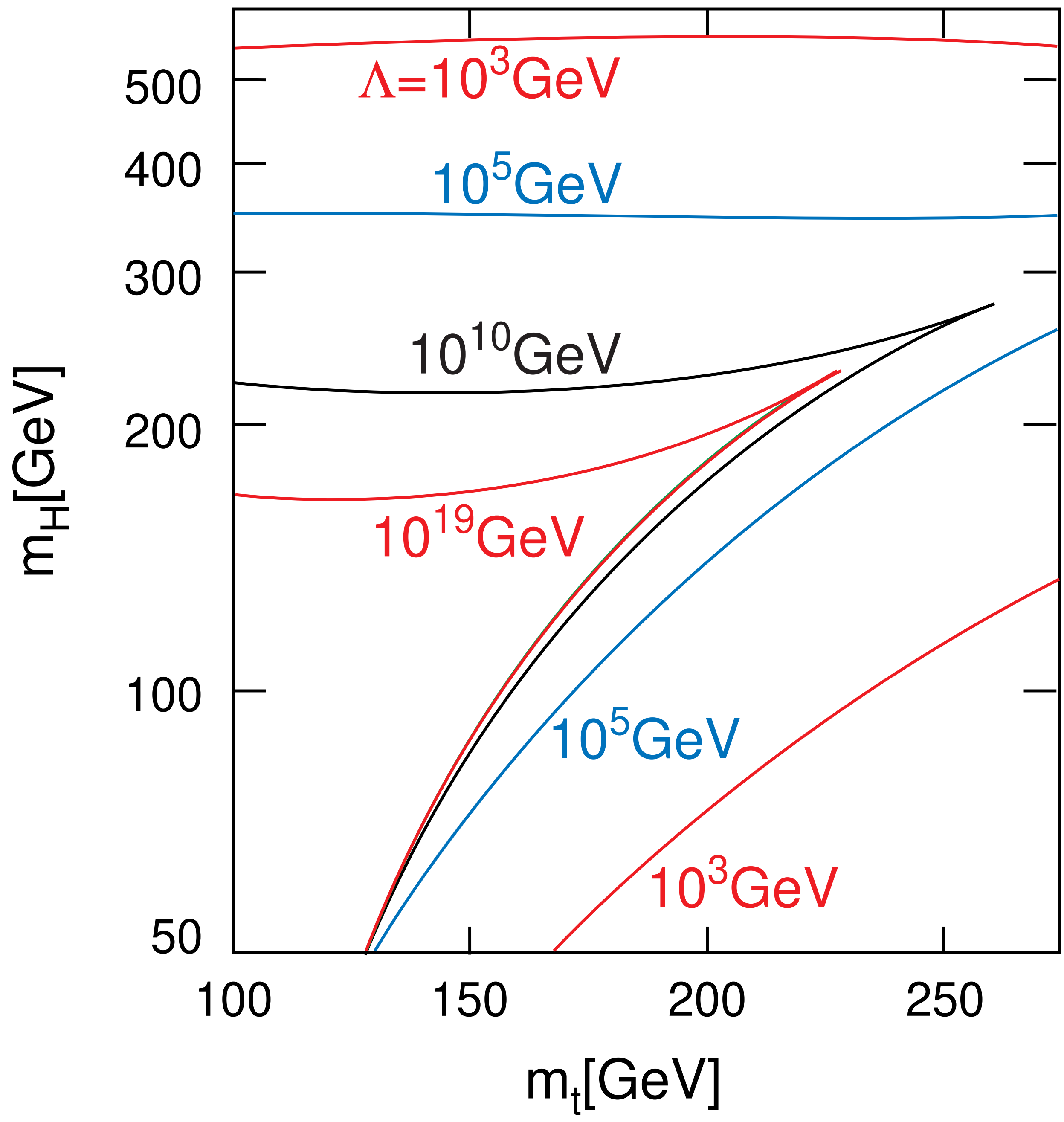
$$\begin{aligned} V(\Phi) &= \mu^2\,\Phi^\dagger\Phi + \lambda\,\left(\Phi^\dagger\Phi\right)^2 \\ &+ \gamma\,\left(\Phi^\dagger\Phi\right)^2\left(\ln\left(\Phi^\dagger\Phi\right)^2/v^2 - 1/2\right) \\ \gamma &= \frac{1}{16\pi^2 v^4}\left(m_{\mathrm{H}}^4 + 3m_{\mathrm{Z}}^4 + 6m_{\mathrm{W}}^4 - 12m_{\mathrm{t}}^4\right) \end{aligned}$$

a) $V(v) < 0$ (Minimum des Potentials)
$\Rightarrow m_{\mathrm{H}}^2 > \gamma\, v^2$ oder $m_{\mathrm{H}} > 7$ GeV (für $m_{\mathrm{t}} = 0$)

(Linde-Weinberg Grenze)

b) $V(\Phi) \to +\infty$ für $|\Phi| \to \infty$
$\Rightarrow m_{\mathrm{H}}$ muß mit $m_{\mathrm{t}}$ wachsen

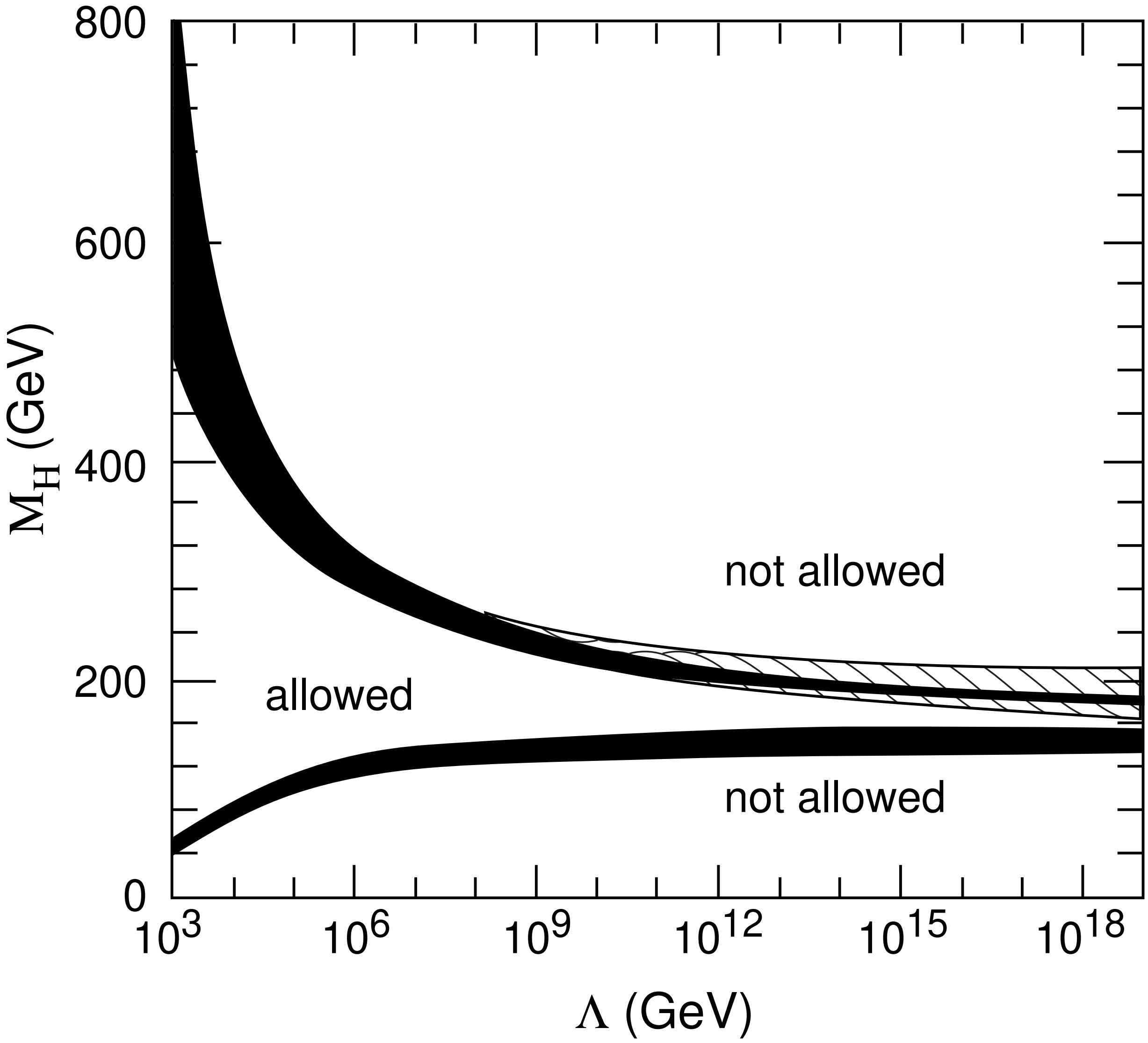
M. Lindner, Z. Phys. C 31 (1986) 295




- **Leichtes Higgs (100 GeV $\leq m_H \leq$ 200 GeV)**
  **Standardmodell gültig bis zu großen Energien $\Lambda$ ?**
- **Schweres Higgs ($m_H \geq$ 500 GeV)**
  **Neue Physik bei 1 TeV**

**Neue Rechnungen für $m_{\mathrm{t}} = 175$ GeV**

T. Hambye, K. Riesselmann, Phys. Rev. D 55 (1997) 7255




**In Modellen mit mehreren Higgs-Dubletts**
**Grenzen gültig für mittlere Higgs-Masse**

## Experimenteller Status der Higgs-Suche vor LEP

**PDG 1988:**

- Kernzerfälle $\quad m_{\mathrm{H}} > 13$ MeV
- $\mathrm{K}^{\pm} \to \pi^{\pm}\mathrm{H}$
  50 MeV $< m_{\mathrm{H}} <$ 211 MeV ausgeschlossen
- $\mathrm{B} \to \mathrm{K\,H}$, $\Upsilon \to \mathrm{H}\gamma$
  0.3 GeV $< m_{\mathrm{H}} <$ 3.6 GeV ausgeschlossen

**Große theoretische Unsicherheiten:**
Verzweigungsverhältnisse, CKM Matrix,
Masse des Top-Quarks, $\alpha_{\mathrm{s}}$

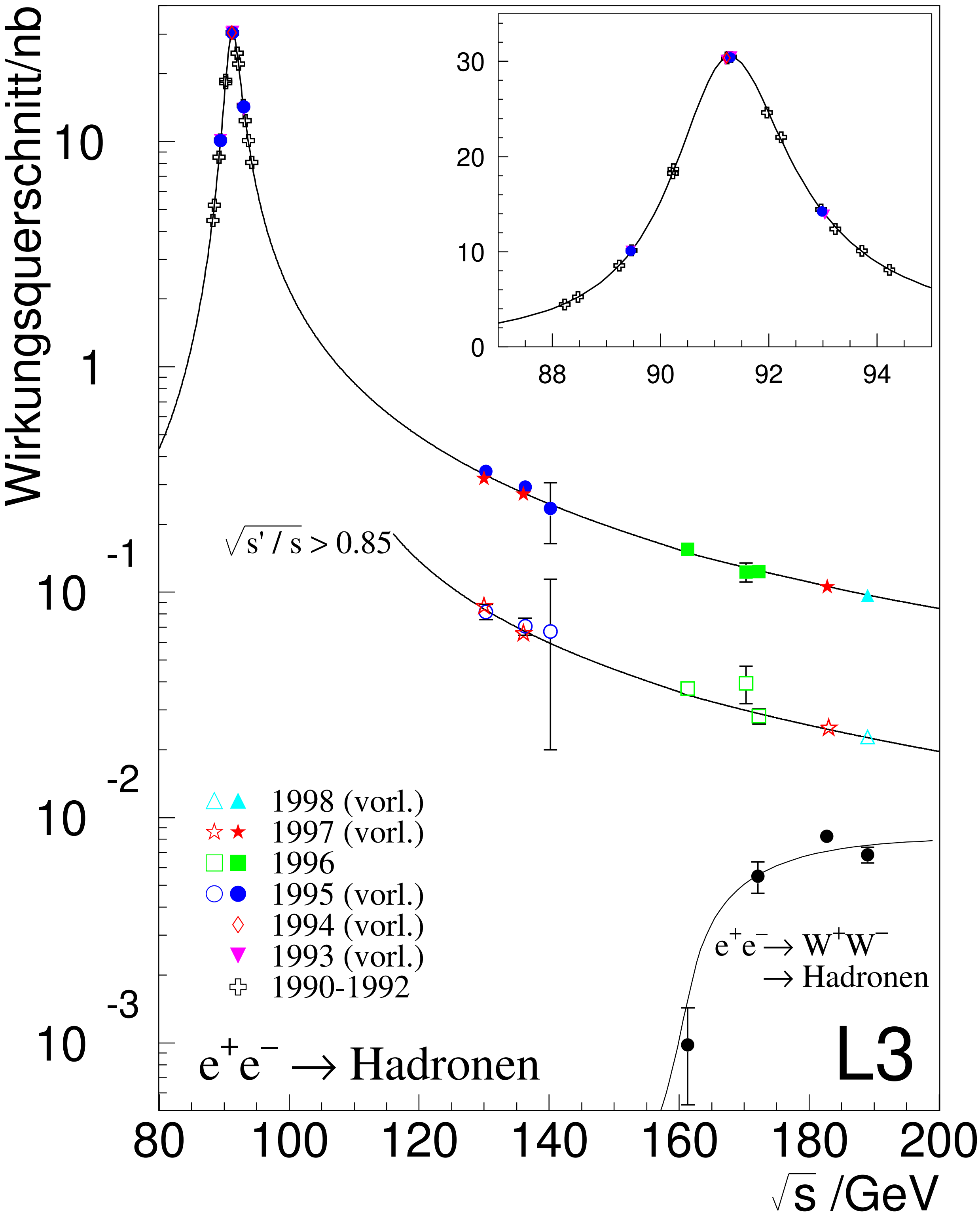
Gesucht ist

- Elektroschwacher Prozess
- Quelle für schwere Teilchen, z.B. $\mathrm{W}^{\pm}$ oder Z Bosonen

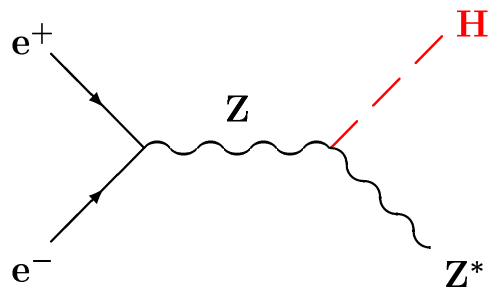
$\Rightarrow$ **LEP**

**LEP: Large Electron Positron Collider (CERN)**
**4 Experimente: ALEPH, DELPHI, L3, OPAL**

## Wirkungsquerschnitt $e^+e^- \rightarrow$ Hadronen als Funktion der Schwerpunktsenergie:

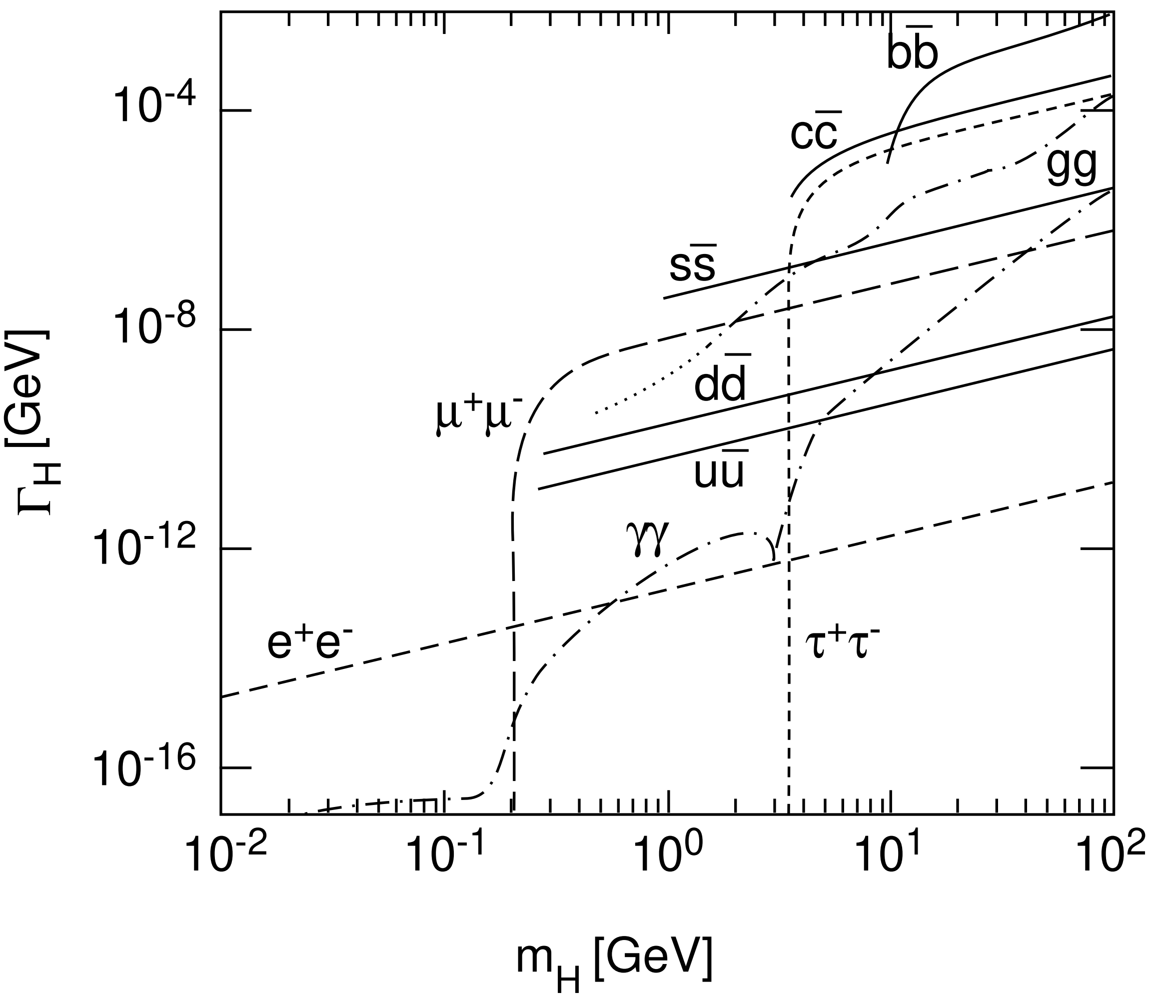


## Higgs-Produktion bei LEP I
## (Higgsstrahlung, Bjorken-Prozess)




## Zerfallsbreite des Higgs Boson:

$$\Gamma(\mathrm{H} \to \mathrm{f\bar{f}}) = \frac{N_c\, g^2}{32\,\pi} \frac{m_\mathrm{H}}{m_\mathrm{W}^2} m_\mathrm{f}^2\, \beta_\mathrm{f}^3 \qquad \beta_\mathrm{f} = \sqrt{1 - 4\, m_\mathrm{f}^2 / m_\mathrm{H}^2}$$

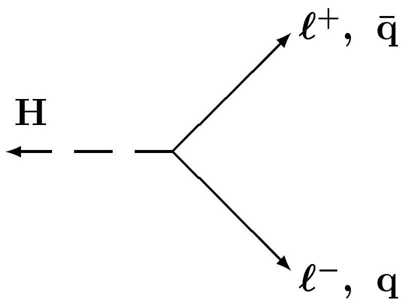


**Strategie abhängig von $m_\mathrm{H}$, z.B.:**

- **Sehr leichtes Higgs hätte sehr lange Lebensdauer**

$$m_\mathrm{H} < 100 \text{ MeV} \quad \Rightarrow \quad <\ell>= c\tau\gamma > 1 \text{ m}$$

**Suche nach akoplanaren Paaren von Leptonen und Jets aus Z* Zerfall**



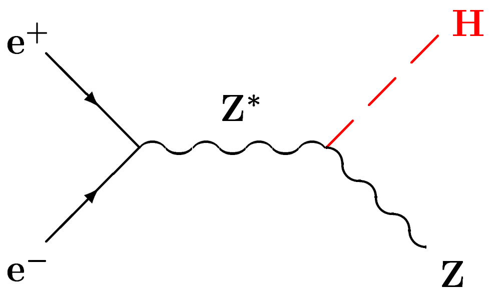

- **Für $m_\mathrm{H} > 2m_\mathrm{b}$ Zerfall $\mathrm{H} \to \mathrm{b\bar{b}}$**
  **Suche nach Ereignissen**

$$\begin{aligned} \mathrm{e^+e^-} \to \mathrm{HZ^*} &\to \mathrm{q\bar{q}\, e^+e^-} \\ &\to \mathrm{q\bar{q}}\, \mu^+\mu^- \\ &\to \mathrm{q\bar{q}}\, \nu\bar{\nu} \end{aligned}$$

**(QCD Untergrund für $\mathrm{HZ^*} \to \mathrm{q\bar{q}\, q\bar{q}}$)**

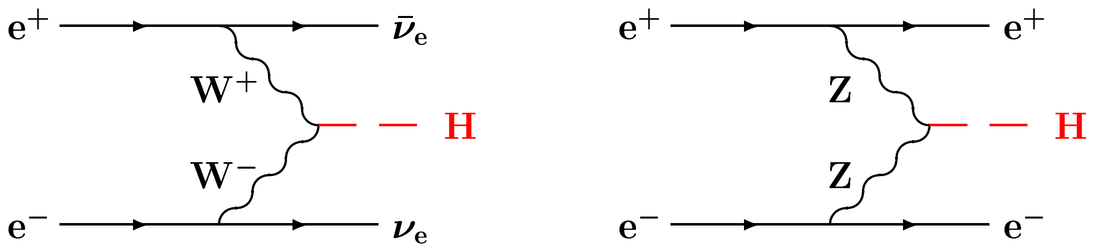
**Letztes Resultat von LEP I mit 4 Million Z-Zerfällen:**

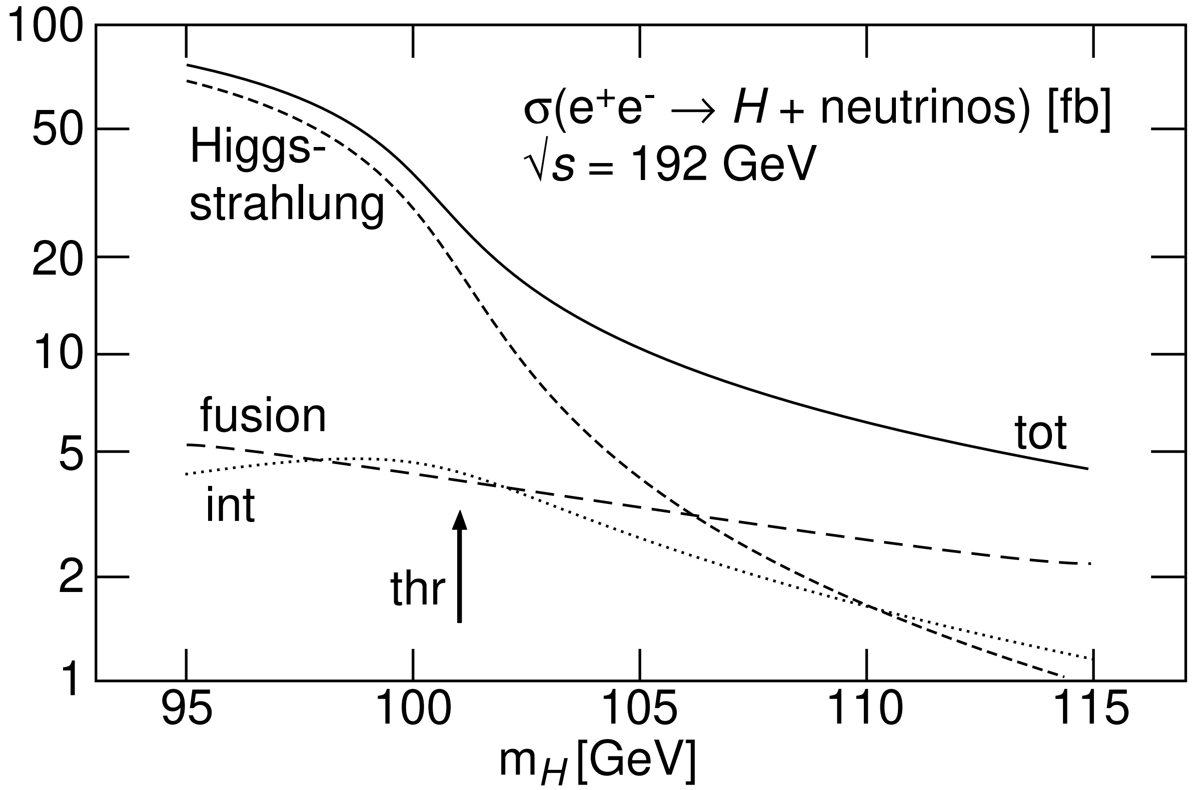
$$m_\mathrm{H} > 63.9 \text{ GeV}$$

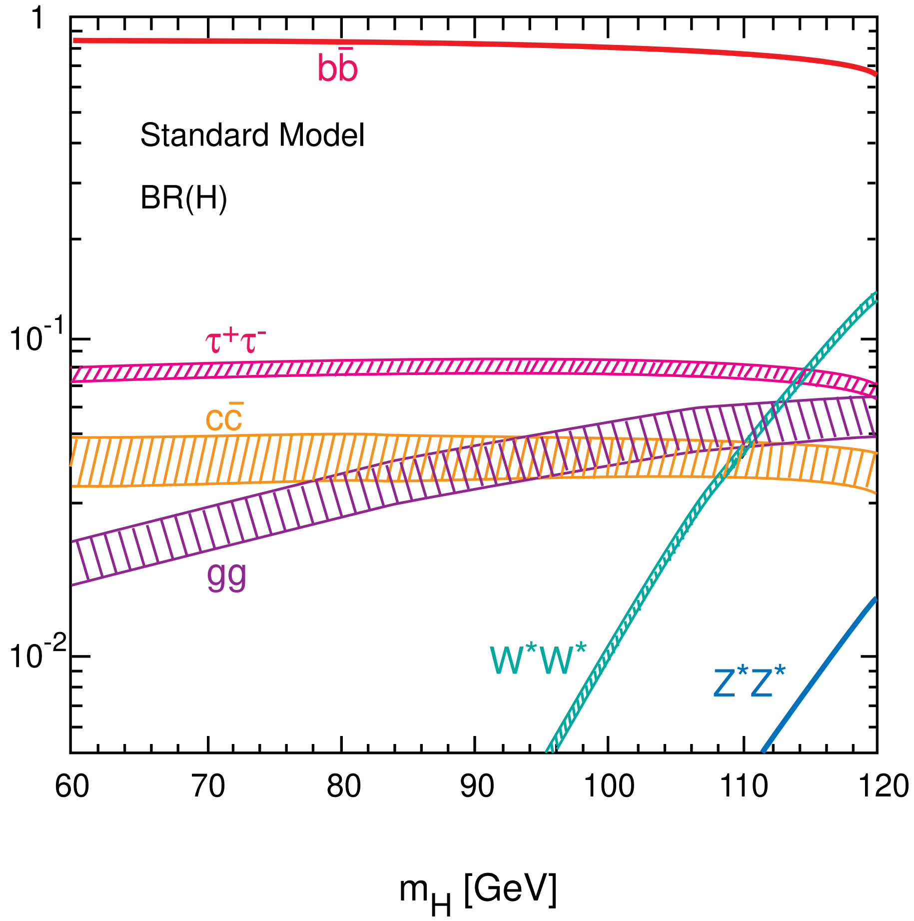



**Produktion eines reellen Z Bosons**
**Suche bis $m_H \approx \sqrt{s} - m_Z$ möglich**

**Higgs Produktion durch W und Z Fusion:**



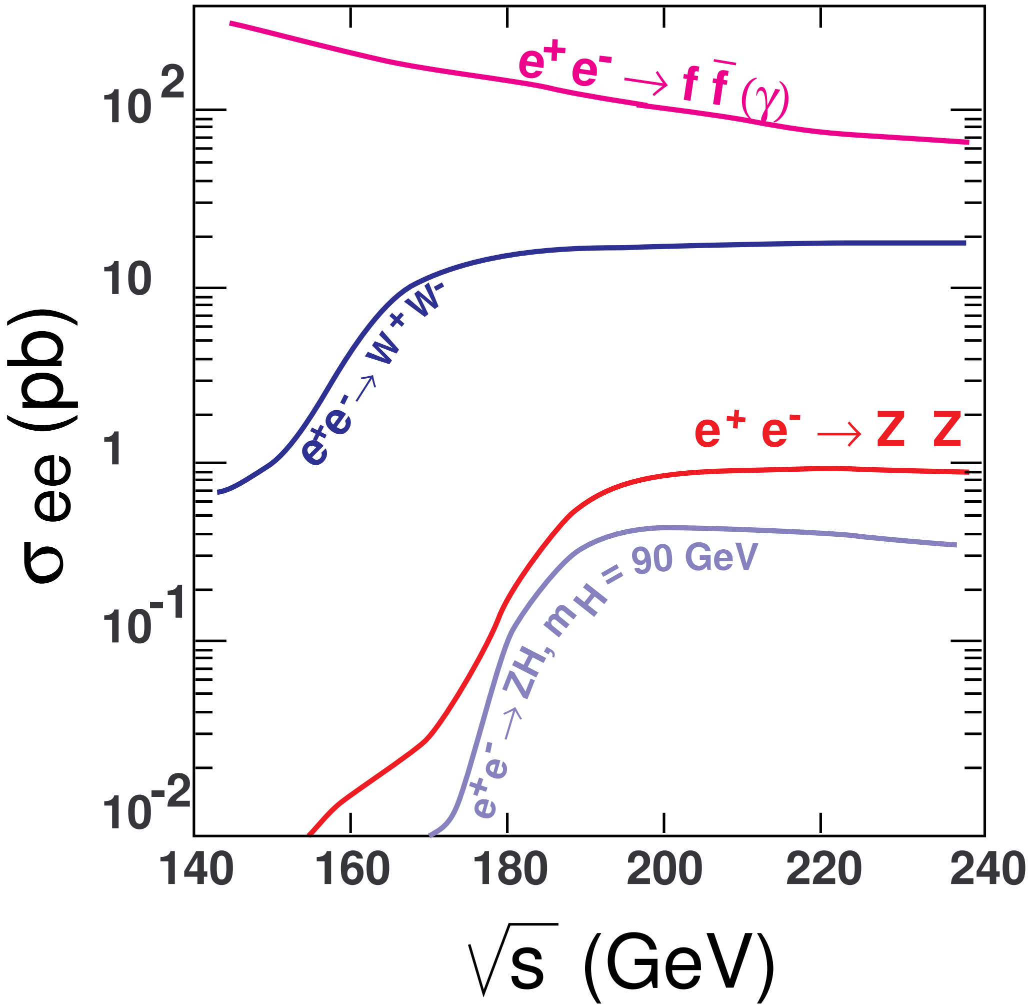



- **$H \to b\bar{b}$ dominant ($\approx 85\%$)**
  **Erkennung von b-Quarks durch Sekundärvertices**
- **Masseninformation**
  **$m_{f\bar{f}} \approx m_Z$ (experimentelle Auflösung, Breite des Z)**

**4 Topologien des Endzustandes**

| | |
|---|---|
| $Hq\bar{q}$ | - 4 Jets |
| $H\nu\bar{\nu}$ | - 2 akoplanare Jets |
| $He^+e^-$, $H\mu^+\mu^-$ | - 2 Jets, 2 Leptonen |
| $\tau^+\tau^- q\bar{q}$ | - 2 Tau-Leptonen, 2 Jets |

Vergleich von SM Wirkungsquerschnitten:

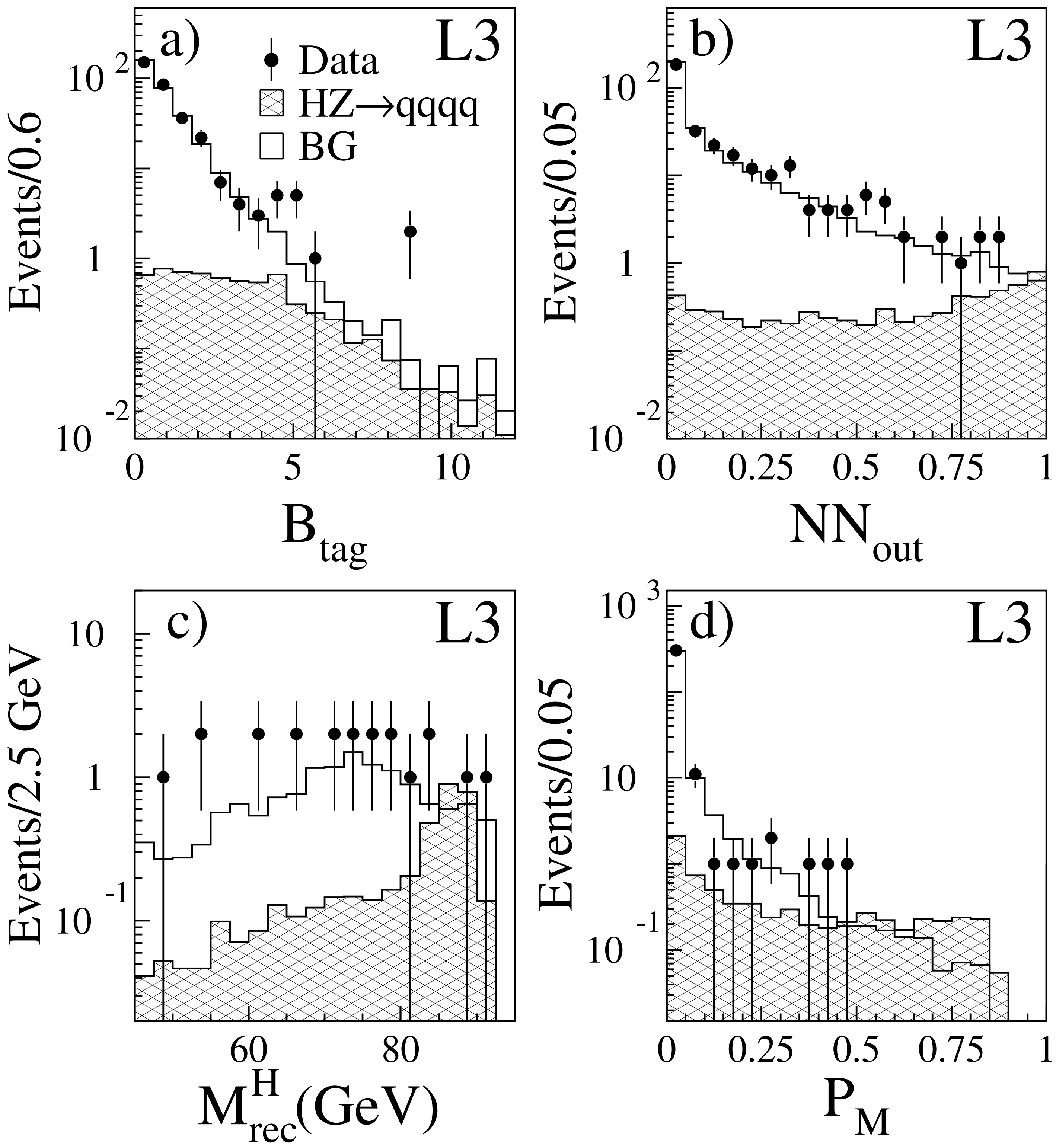



- **Beachtlicher Wirkungsquerschnitt $e^+e^- \to HZ$**
- **Besseres Signal-Untergrundverhältnis als bei LEP I**

**Untergrund:**

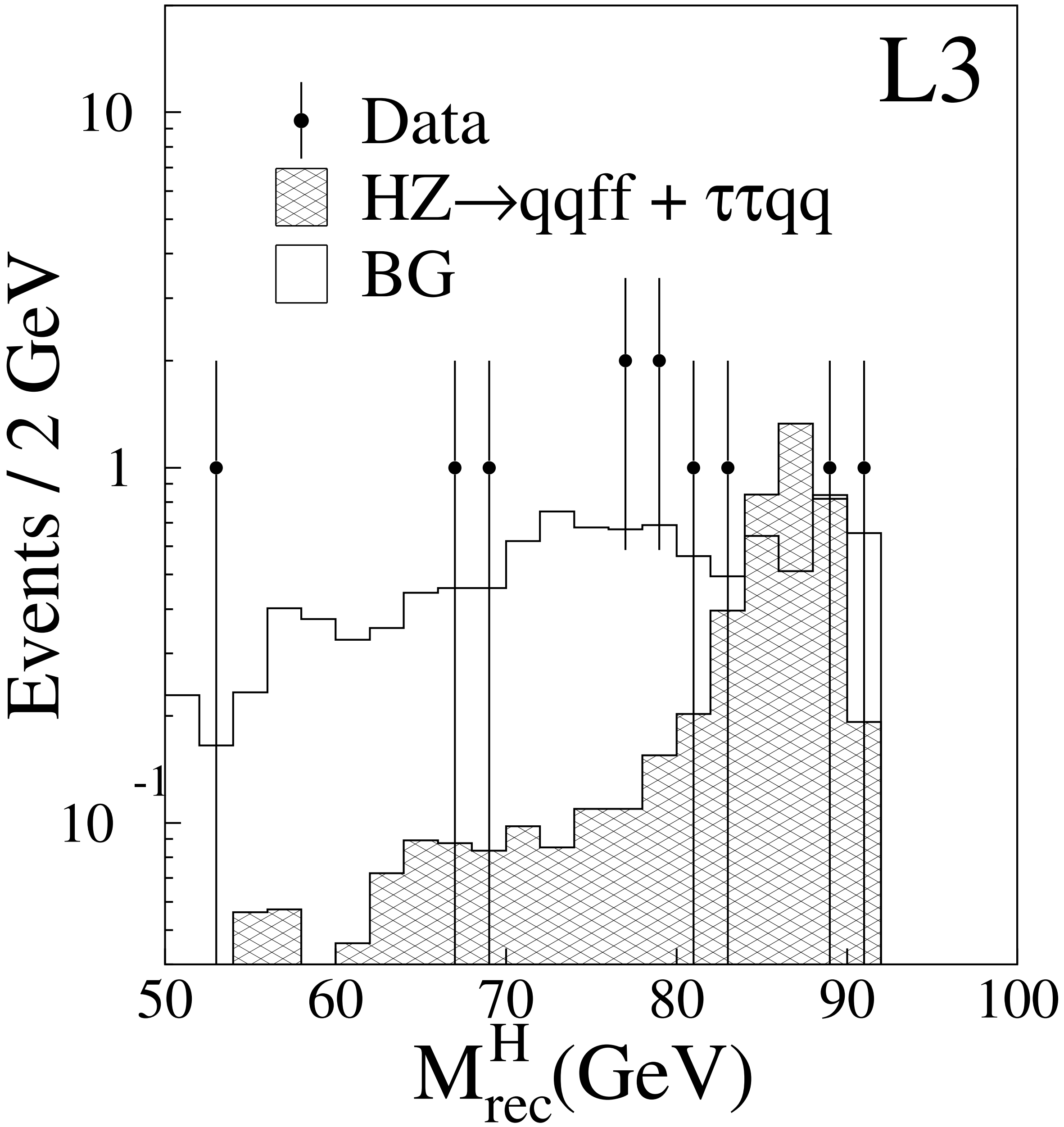
- **Fermionpaare, besonders $e^+e^- \to Z/\gamma \to q\bar{q}(\gamma)$**
- **4-Fermion-Endzustände $e^+e^- \to W^+W^-,\ ZZ$**
- **Einzel W-Produktion $e^+e^- \to W\,e\nu$ (für $H\nu\bar{\nu}$)**

## Higgs-Suche bei $\sqrt{s} = 183$ GeV in $\mathrm{HZ} \to \mathrm{q\bar{q}\,q\bar{q}}$:



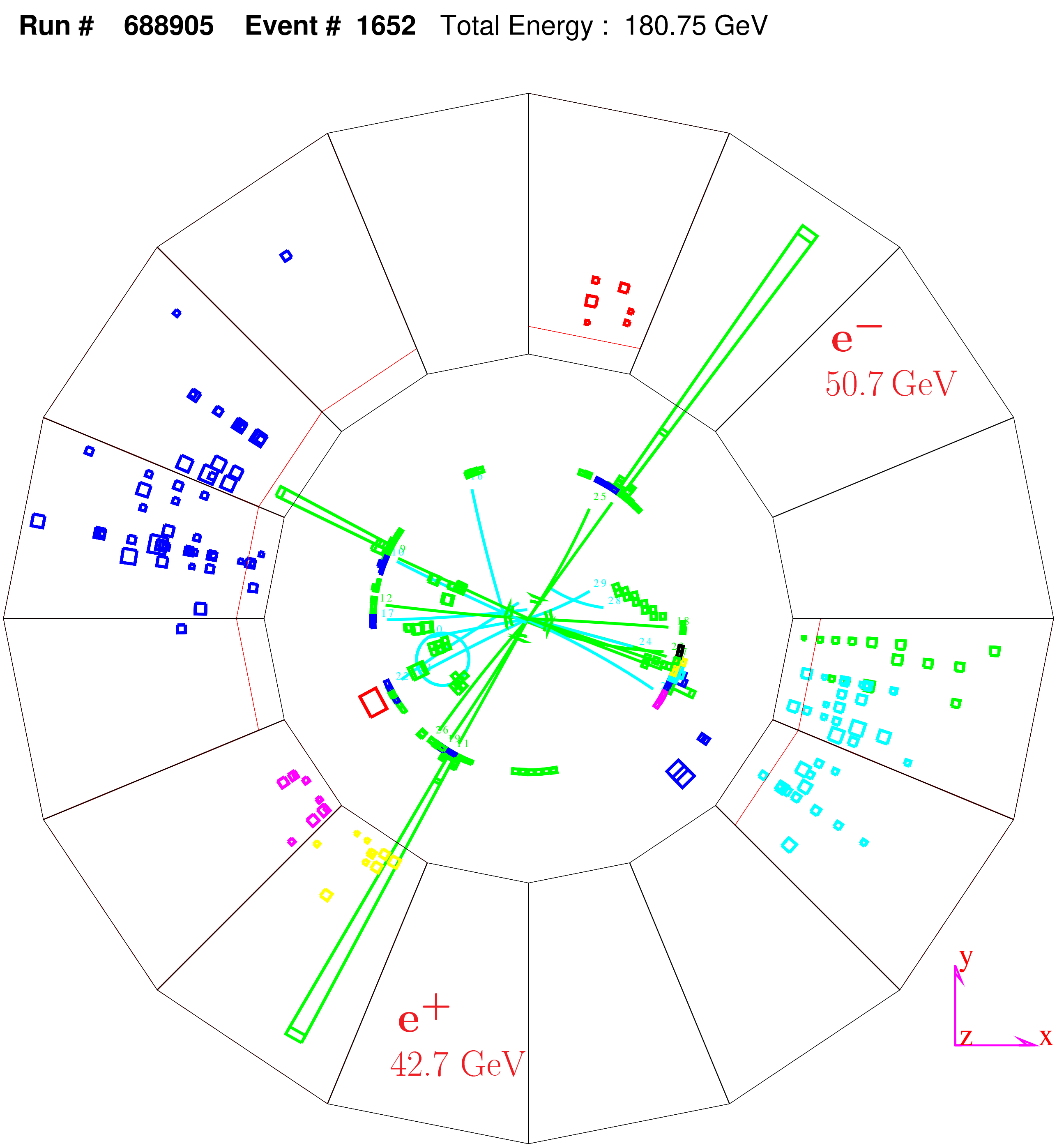

Simulation des Higgs-Signals für $m_{\mathrm{H}} = 87$ GeV

Massenspektrum der 13 besten Higgs-Kandidaten (L3):




Massenauflösung 2 – 3 GeV nach kinematischem Fit

## Kandidat $e^+e^- \to HZ \to b\bar{b}\, e^+e^-$




$$m_{ee} = 92.8\,\mathrm{GeV} \qquad m_{jj} = 88.8\,\mathrm{GeV}$$

## Kein Anzeichen für Higgs-Produktion bei LEP

**Untere Higgs-Massengrenzen ($\sqrt{s} \leq 183$ GeV):**

| | |
|---|---|
| ALEPH | 87.9 GeV |
| DELPHI | 85.7 GeV |
| L3 | 87.6 GeV |
| OPAL | 88.3 GeV |

**Kombination der LEP Experimente**
**(Verschiedene Methoden)**

$$m_{\mathrm{H}} > 89.8 \text{ GeV} \qquad (95\% \text{ C.L.})$$

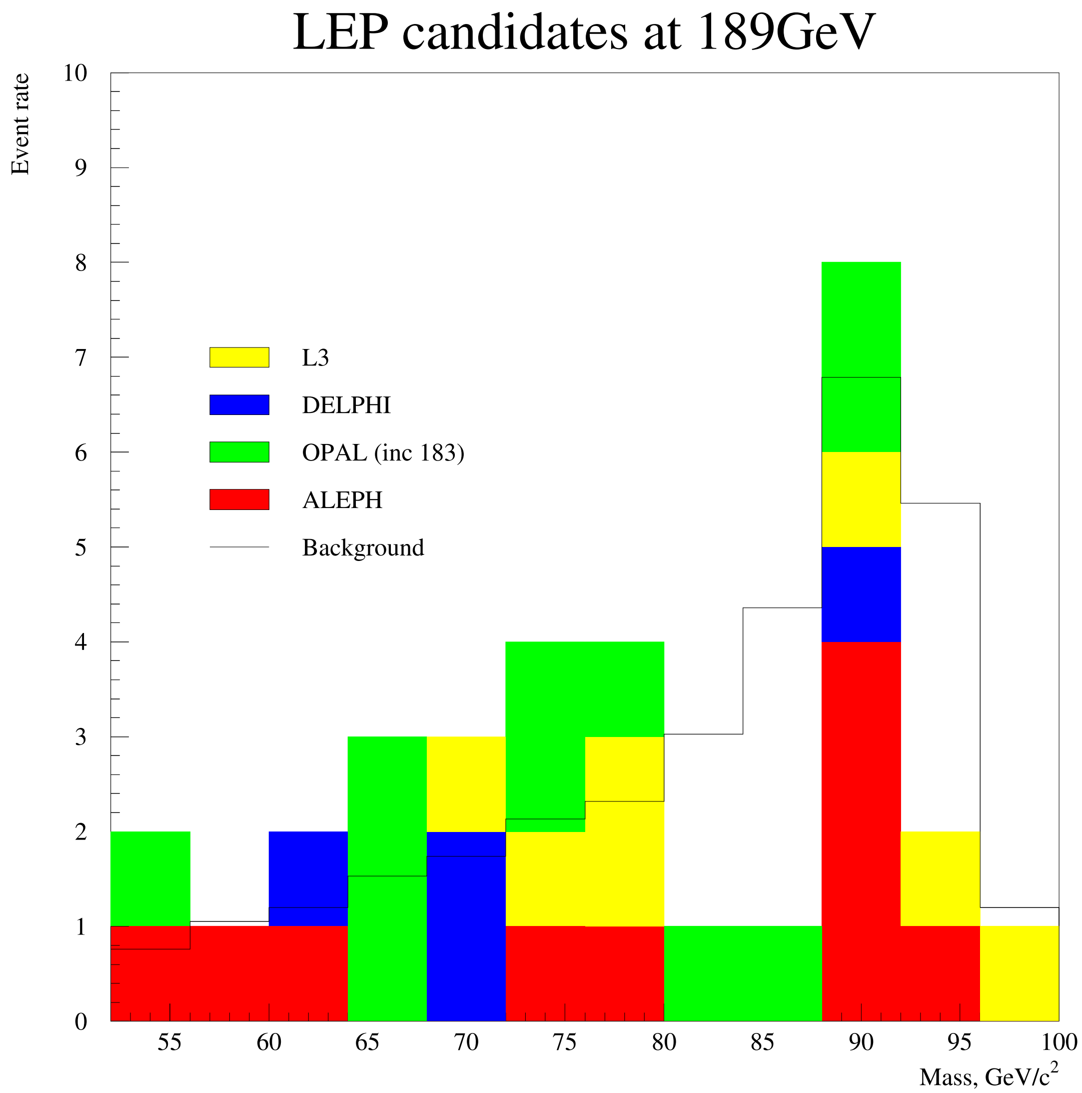
**Erste Resultate bei $\sqrt{s} = 189$ GeV:**

**Problem für $m_\mathrm{H} \approx m_\mathrm{Z}$:**

**$\mathrm{e^+e^-} \rightarrow$ ZZ hat gleiche Signatur!**

**$\Gamma(\mathrm{Z} \rightarrow \mathrm{b\bar{b}})/\Gamma(\mathrm{Z} \rightarrow \text{Hadronen}) = 0.22$**

**Beobachtete Kandidaten ($\approx 35\ \mathrm{pb}^{-1}$/Experiment):**

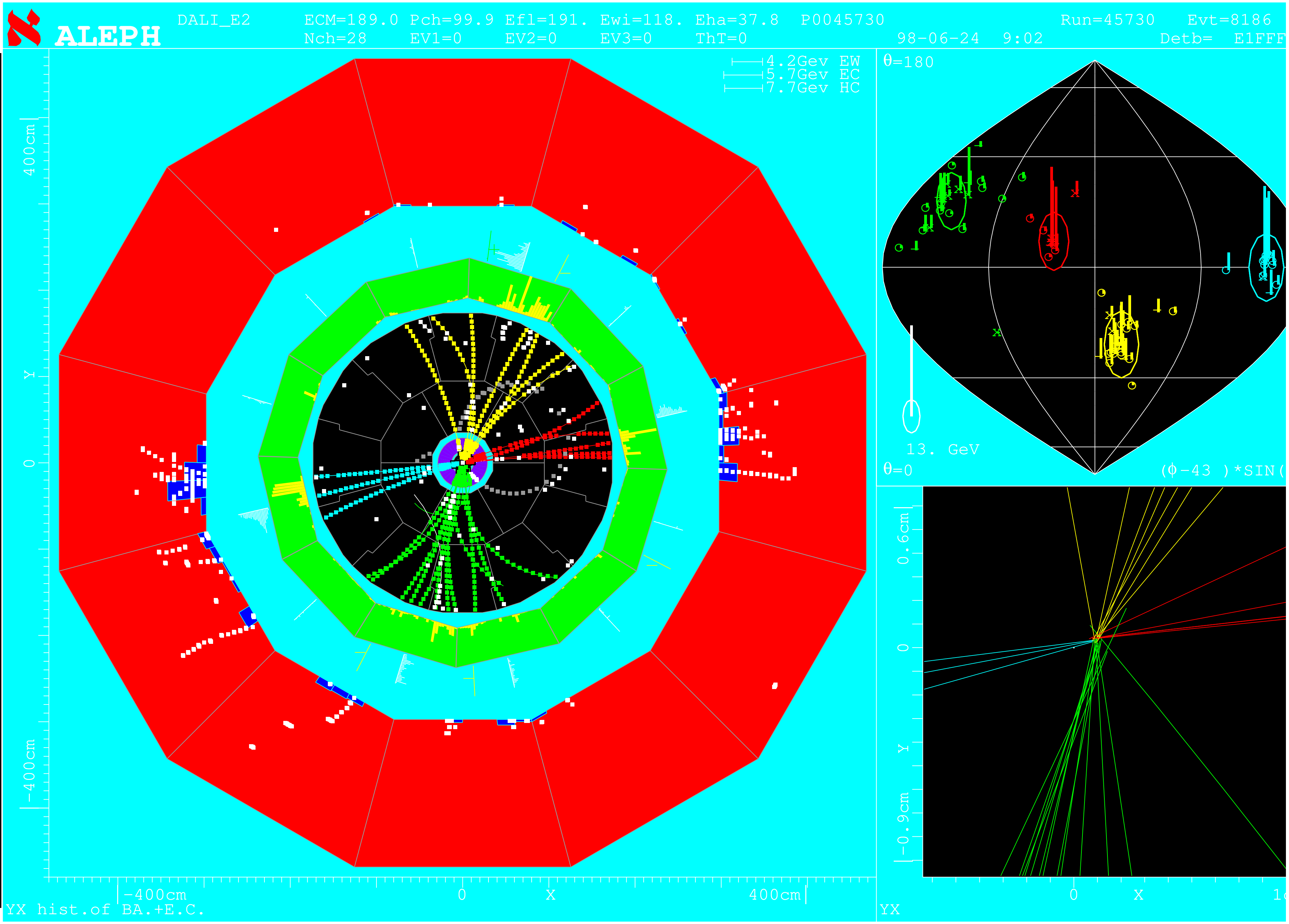



**P.McNamara in Vancouver**

**(Noch) kein Higgs-Signal**

# LEP II Higgs-Suche

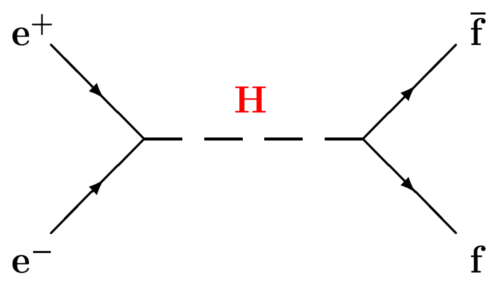
## ALEPH Kandidat $e^+e^- \to HZ \to b\bar{b}\,q\bar{q}$ ($m_H = 95.8$ GeV)




J. Mnich – CERN EP

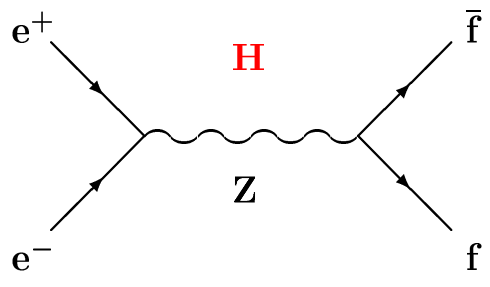
**Indirekter Nachweis des Higgs-Bosons:**

**Higgs-Austausch ?**




$$\text{Beitrag} \propto \left(\frac{m_e m_f}{m_Z^2}\right)^2 \approx 10^{-13}$$

**Schwache Strahlungskorrekturen durch Higgs Boson:**




$$\text{Beitrag} \propto \ln \frac{m_H}{m_W} \qquad \text{('1-Loop')}$$

**Bestimmung der Strahlungskorrekturen bei LEP (und SLC) durch Präzisionmessungen von Wirkungsquerschnitten in $e^+e^- \to f\bar{f}$**

**Parameter des Standardmodells:**

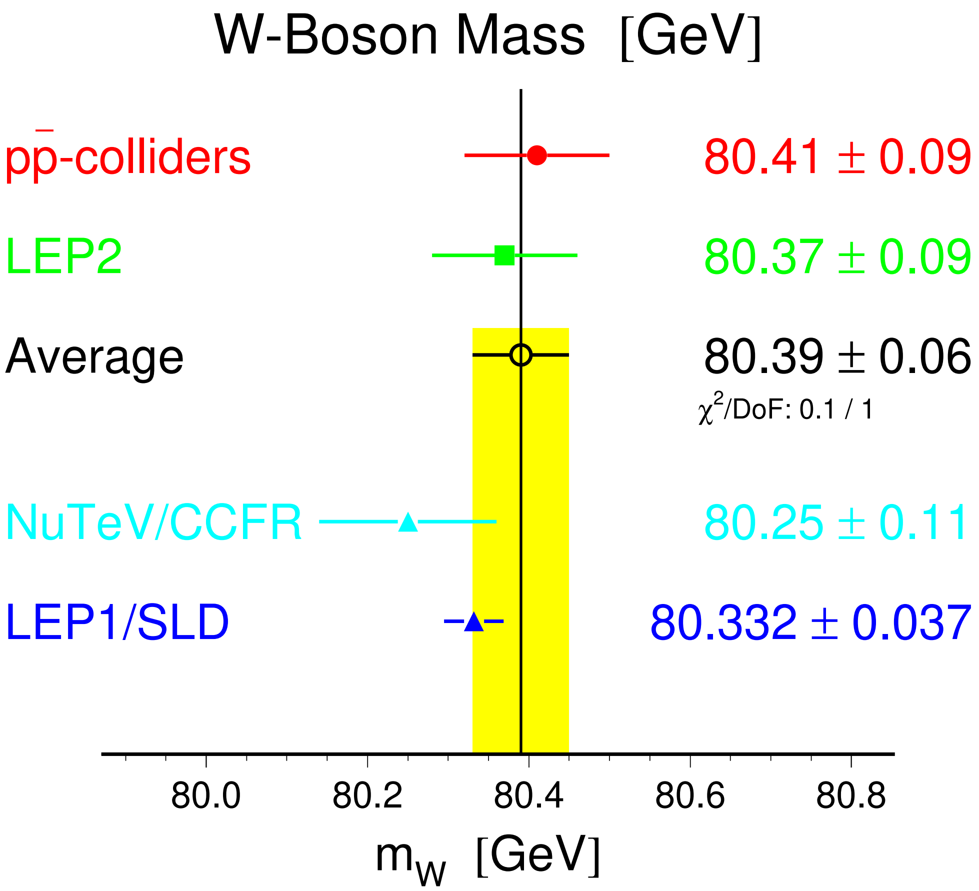
| | |
|---|---|
| $\alpha$, $m_Z$, $m_W$ | niedrigste Ordnung |
| $m_H$, $m_f$ | besonders $m_t$ |
| $\alpha_s$, CKM Matrix | in $e^+e^- \to$ hadrons |

**Alle anderen Observablen (Wirkungsquerschnitte, Asymmetrien) können im Standardmodell berechnet werden.**

$\alpha$: $g-2$ -Experimente, Quanten-Hall-Effekt
$\alpha^{-1}(Q^2{=}0) = 137.035\,989\,5(61)$

$m_Z$: Päzisionsmessung bei LEP: $m_Z = 91\,186.7 \pm 2.1$ MeV

$m_W$: $p\bar{p}$-Experimente & LEP II: $m_W = 80.39 \pm 0.06$ GeV



Fermi-Konstante $G_F$ aus Myon-Lebensdauer genau bekannt:

$$G_F = 1.166\,39(1) \cdot 10^{-5}\ \mathrm{GeV}^{-2}$$

Relation zwischen $m_W$ und $G_F$:

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{\pi\,\alpha}{2} \cdot \frac{1}{m_W^2 \sin^2\vartheta_W} \cdot \frac{1}{1-\Delta r} \qquad \cos\vartheta_W \equiv m_W/m_Z$$

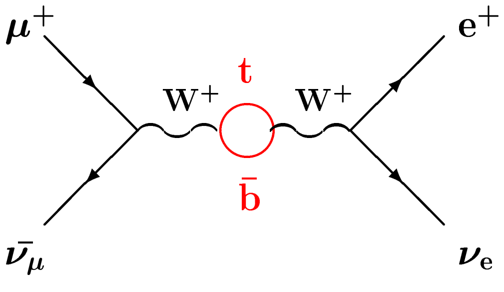
Elektroschwache Strahlungskorrekturen $\Delta r$

$$1 - \Delta r \approx (1-\Delta\alpha)\,(1-\Delta r_w)$$

a) 'Laufende' Kopplungskonstante:

$$\begin{aligned} \alpha(m_Z) &= \alpha(Q^2{=}0)/(1-\Delta\alpha) \\ \alpha(m_Z)^{-1} &= 128.896 \pm 0.090 \qquad (7\cdot 10^{-4}) \end{aligned}$$

b) Schwache Strahlungskorrekturen (Myonzerfall):




Massenunterschied von t- und b-Quarks:

$$\Delta r_w = -\frac{\cos^2\vartheta_W}{\sin^2\vartheta_W} \cdot \frac{3\,G_F}{8\,\pi^2\sqrt{2}} \cdot m_t^2 + \mathcal{O}(m_t^4)$$

$$+\mathcal{O}(\log m_H) + \ldots$$

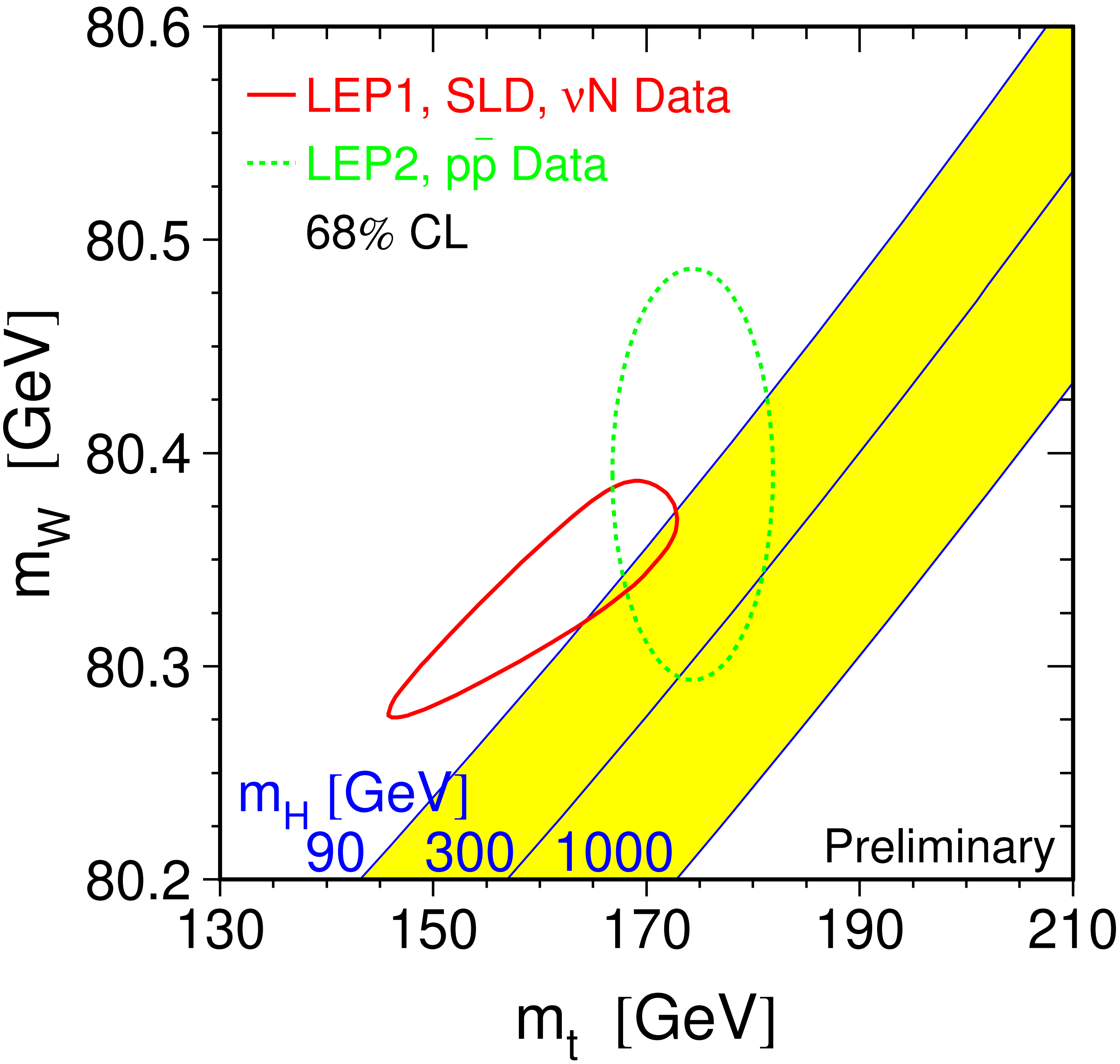
**LEP 1993 aus genauer Messung von Z Parametern Voraussage für Top-Masse**

$$m_t = 178 \pm 11 \pm 19(m_H) \text{ GeV}$$

**1994 Entdeckung des Top-Quarks in $p\bar{p}$-Kollisionen:**

$$m_t = 173.8 \pm 5.0 \text{ GeV} \qquad \text{(heutigerWert)}$$

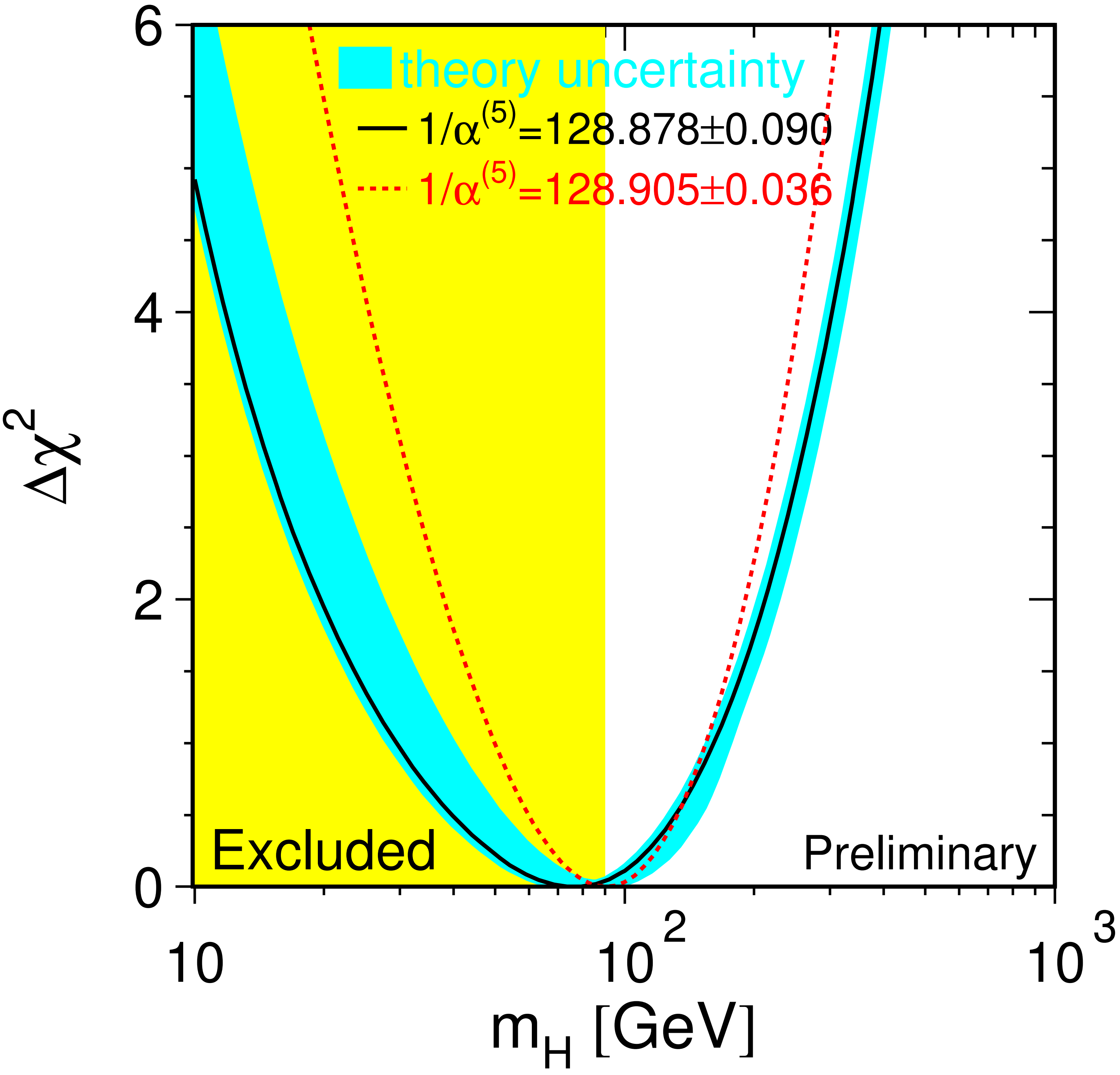
**Test des Standardmodells:**




⇒ **kleine Higgs-Masse bevorzugt**

**Standardmodellfit:**

**Daten von LEP, SLD, CDF, D0 und $\nu$N-Streuung**



$$\log m_H/\mathrm{GeV} = 1.88\,^{+0.33}_{-0.41} \pm 0.05(\mathrm{th})$$

$$m_H = 76\,^{+85}_{-47} \pm 10(\mathrm{th})\ \mathrm{GeV}$$

**Experimentelle obere Grenze für die Higgs-Masse:**

$$m_H < 260\ \mathrm{GeV} \qquad (95\%\ \mathrm{CL})$$

**Theoretischer Fehler aus Vergleich von Programmen und Optionen**

- **Ergebnis im erlaubten Bereich $2 \lesssim \log m_H/\mathrm{GeV} \lesssim 3$**
- **Standardmodell gültig bis zur Planckmasse?**
- **Standardmodellrechnungen für große $m_H$:**

  **Höhere Ordnungen?**
  **Störungsrechung?**

Minimales Supersymmetrisches Standardmodell (MSSM)

2 Higgs-Dubletts:

| | | |
|---|---|---|
| 2 neutrale Higgs Bosonen (CP $= +1$) | h,H | $(m_{\mathrm{h}} < m_{\mathrm{H}})$ |
| 1 neutrales Higgs Boson (CP $= -1$) | A | |
| 2 geladene Higgs Bosonen | $\mathrm{H}^{\pm}$ | |

Theoretische Voraussagen für Higgs-Massen:

- In niedrigster Ordnung

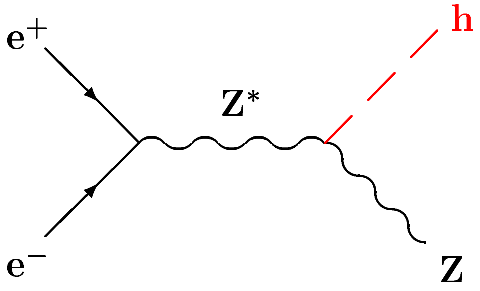
$$m_{\mathrm{h}} < m_{\mathrm{Z}} \qquad m_{\mathrm{H}^{\pm}} > m_{\mathrm{W}}$$

- Strahlungskorrekturen $(m_{\mathrm{t}}^4,\ \log m_{\tilde{\mathrm{t}}},\ \ldots)$

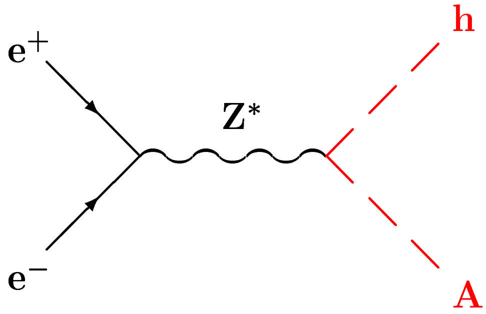
$$m_{\mathrm{h}} \lesssim 130 \text{ GeV}$$

Produktion der neutralen MSSM Higgs-Bosonen bei LEP abhängig vom Verhältnis der Vakuumerwartungswerte $(\tan\beta)$

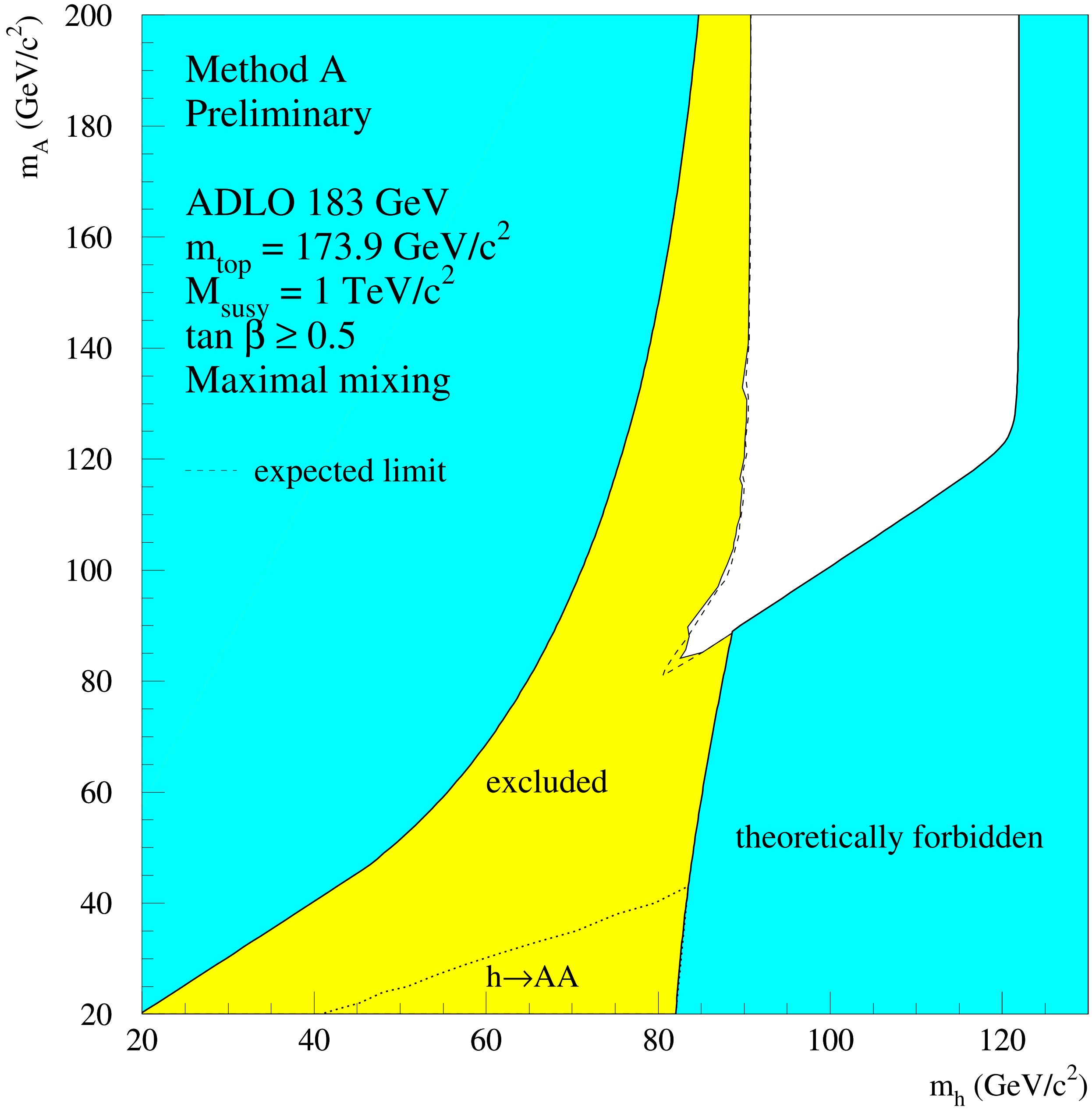
$\tan\beta$ klein:




$\tan\beta$ groß:



## Massengrenzen für h und A Bosonen
## Kombiniertes Resultat der LEP Experimente



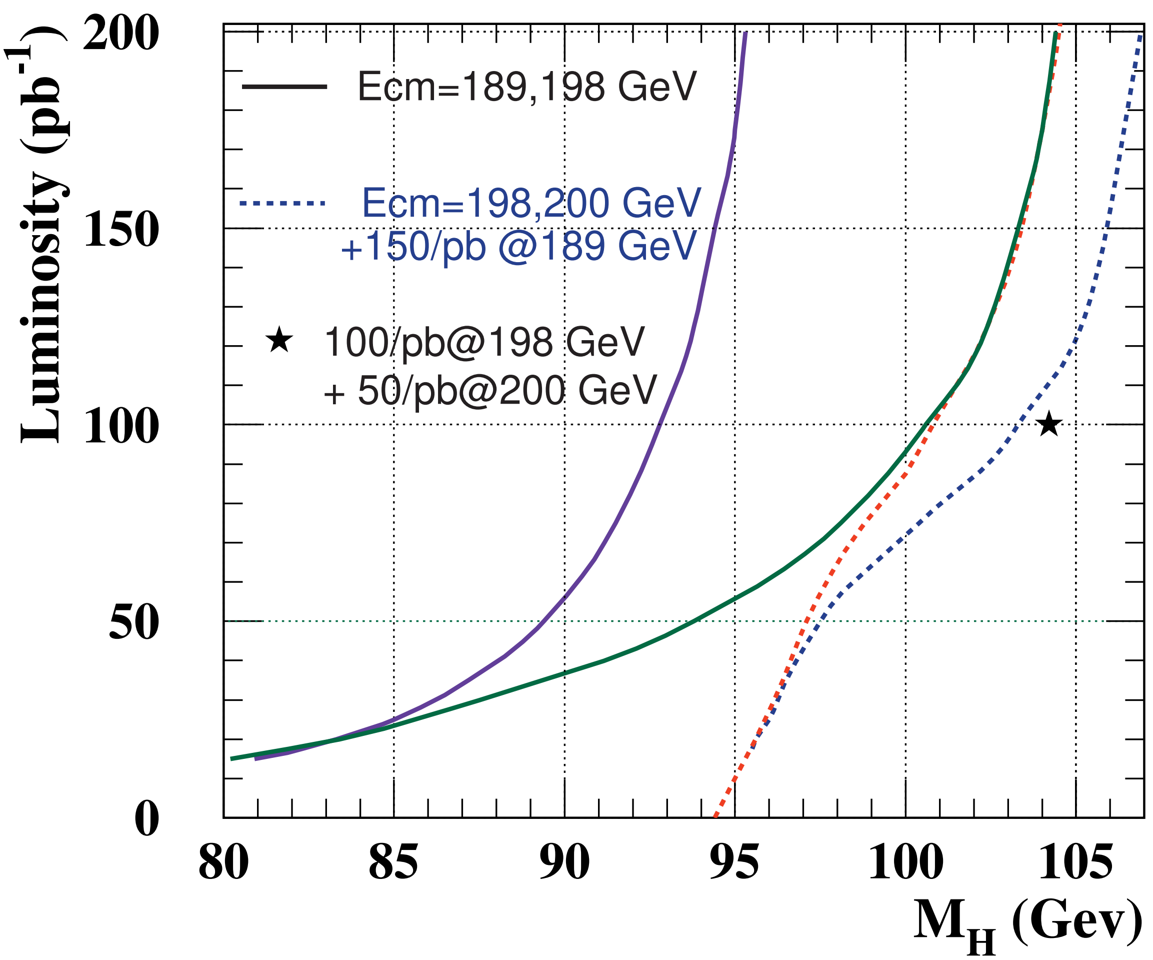

$m_h > 78.8$ GeV $\quad$ $m_A > 79.1$ GeV $\quad$ (95% CL)

## Standardmodell Higgs-Suche bei LEP:

**1998:** $\mathcal{L} \geq 150\ \mathrm{pb}^{-1}$ pro Experiment bei $\sqrt{s} = 189$ GeV
Überwinden der ZZ Schwelle
Ausschluß bis $m_{\mathrm{H}} \approx 97$ GeV

**1999:** Erwartung:
$\mathcal{L} \approx 150\ \mathrm{pb}^{-1}$ bei
$\sqrt{s} = 192$ GeV bis $\sqrt{s} = 200$ GeV

Zahlenbeispiel für 4 Experimente kombiniert:
Entdeckung ($5\sigma$) bis $m_{\mathrm{H}} \lesssim 104$ GeV




**2000:** $\sqrt{s} \geq 200$ GeV ...

**$m_{\mathrm{H}}$ aus Strahlungskorrekturen:**

**Reduzierung der Fehler $\alpha(m_{\mathrm{Z}})$, $\sin^2\bar{\vartheta}_{\mathrm{W}}$(bei SLD), $m_{\mathrm{W}}$ und $m_{\mathrm{t}}$ erwartet**

**$\Rightarrow$ verbesserter Fehler auf $\log m_{\mathrm{H}}/\mathrm{GeV}$**
**Einfluß auf obere Massengrenze schwierig abzuschätzen**

**Direkte Higgs-Suche nach LEP:**

- **TEVATRON Run II & III**
  **20 fb$^{-1}$ bis zum Jahr 2007**
  **$m_{\mathrm{H}} \leq 120$ GeV**
- **ab 2005 LHC**
  **Abdeckung des gesamten Massenbereiches**
  **100 GeV $\leq m_{\mathrm{H}} \leq 1$ TeV**

- Suche nach dem Standardmodell Higgs bei LEP

$$m_{\mathrm{H}} > 89.8 \text{ GeV}$$

- Suche nach MSSM Higgs Bosonen

$$\begin{aligned} m_{\mathrm{h}} &> 78.8 \text{ GeV} \\ m_{\mathrm{A}} &> 79.1 \text{ GeV} \end{aligned}$$

- Keine Anzeichen für Higgs-Produktion in neuen Daten ($\sqrt{s} = 189$ GeV)
- Obere Grenze der Higgs Masse aus Messung schwacher Korrekturen

$$m_{\mathrm{H}} < 260 \text{ GeV}$$

- Suche bei LEP bis $m_{\mathrm{H}} > 100$ GeV möglich