

Test der elektroschwachen Wechselwirkung an Elektron- Positron-Beschleunigern

**Joachim Mnich
RWTH Aachen**

Freiburg 12.10.2001

Übersicht:

- Anfänge bei $\sqrt{s} < m_Z$

- LEP und SLC

$$e^+ e^- \rightarrow Z \rightarrow f\bar{f}$$

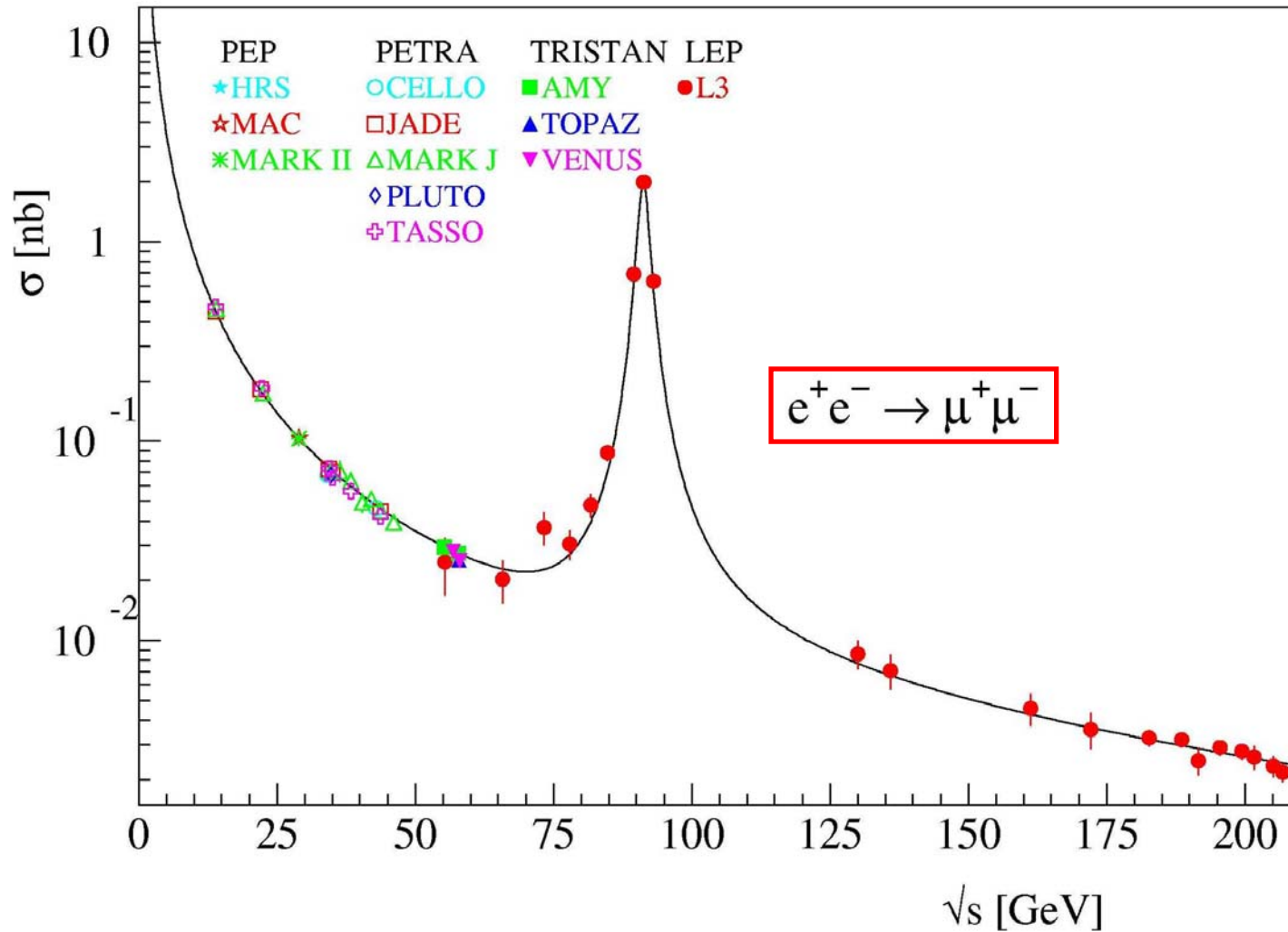
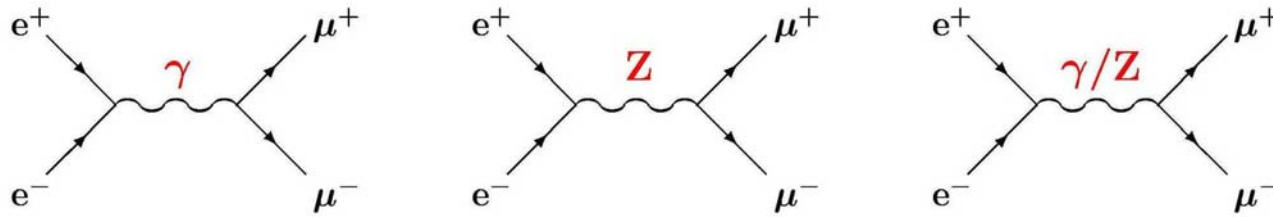
$$e^+ e^- \rightarrow W^+ W^- \rightarrow 4 f$$

Suche nach dem Higgs-Boson

- Zukunft: $e^+ e^-$ -Linearbeschleuniger (TESLA)

Test des Higgs-Mechanismus

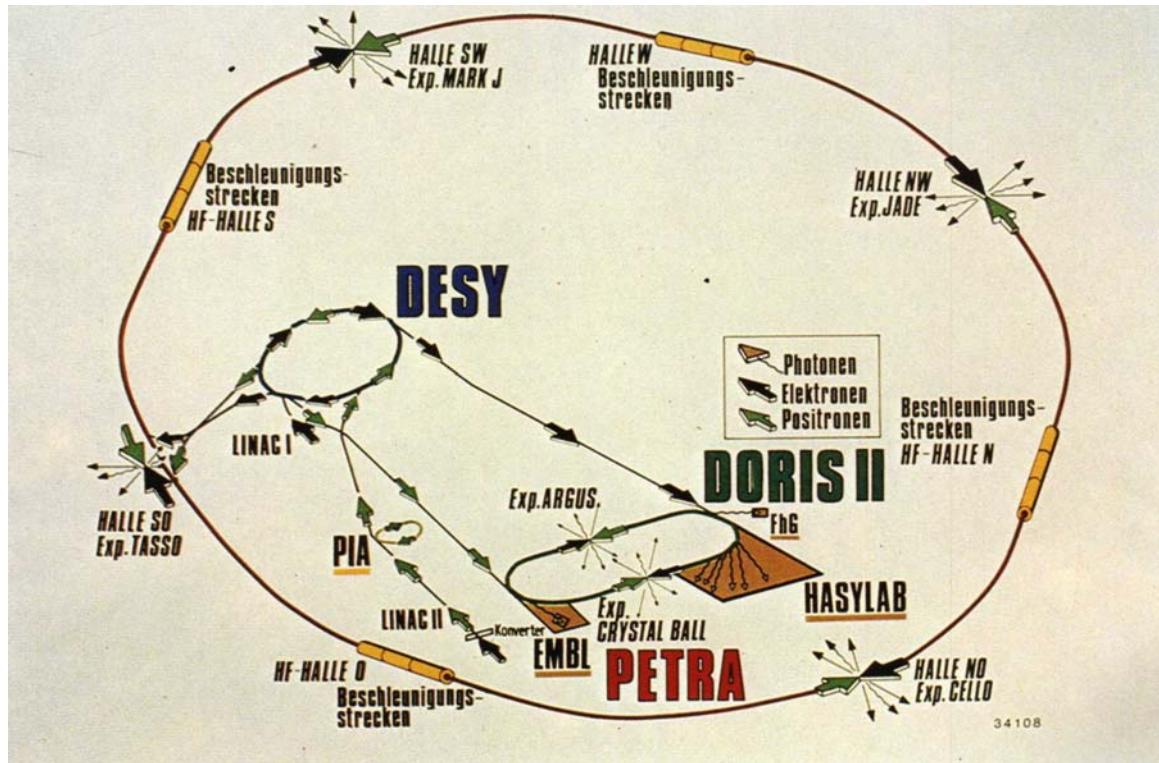
Studium der Reaktion $e^+ e^- \rightarrow f\bar{f}$



Erste Messungen zur elektroschwachen Wechselwirkung an $e^+ e^-$ -Beschleunigern:

Photon-Z-Interferenz

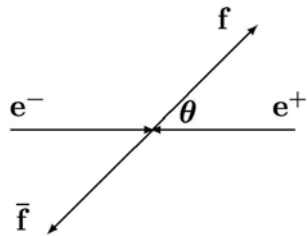
- **PETRA am DESY (1979-1986)** $\sqrt{s} = 35-47$ GeV



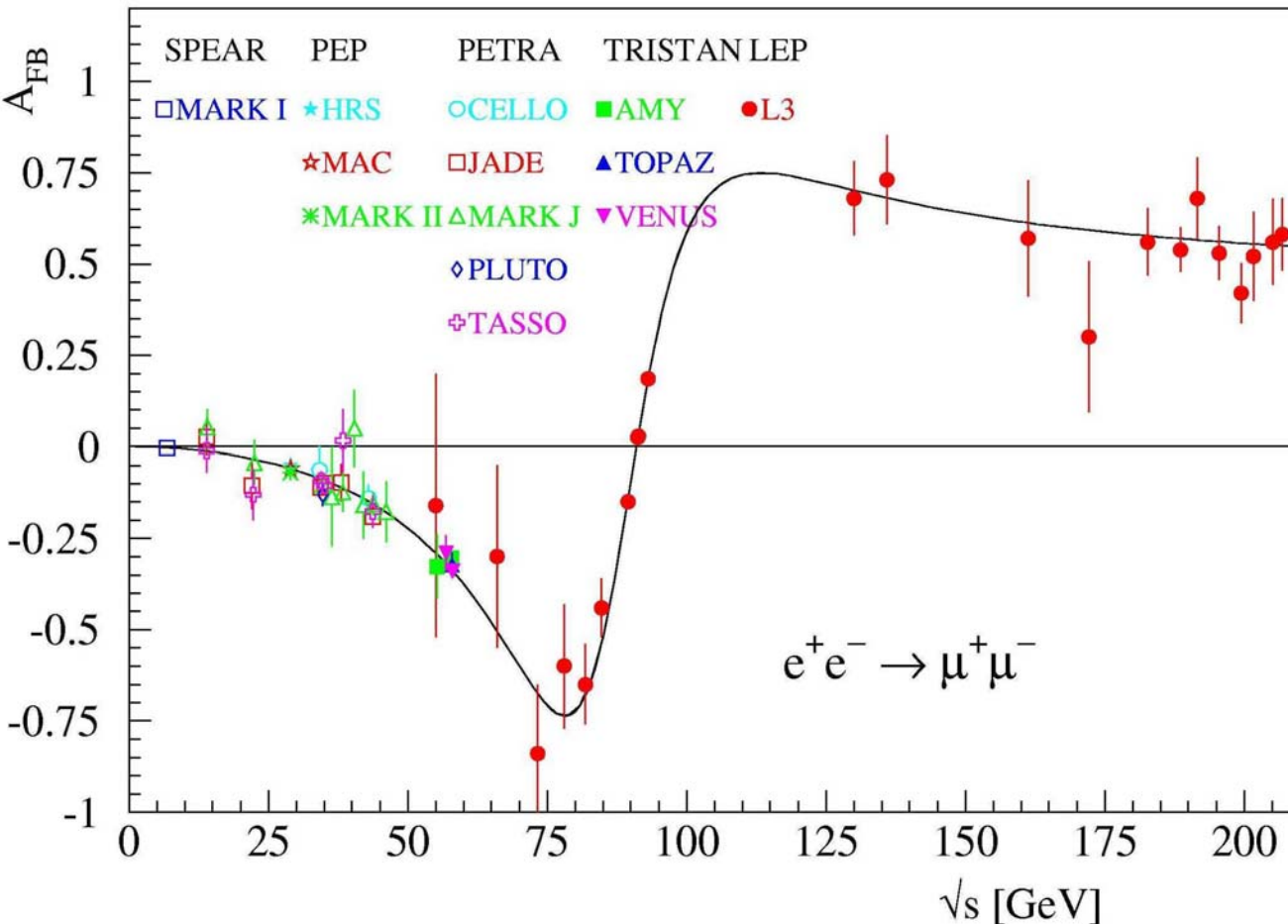
- **PEP am SLAC** $\sqrt{s} = 29$ GeV

Interferenzeffekte: Einblick in die Physik bei höheren Energien

Beispiel Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie A_{FB} in $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$



$$A_{FB} = \frac{\sigma(\theta < 90^\circ) - \sigma(\theta > 90^\circ)}{\sigma(\theta < 90^\circ) + \sigma(\theta > 90^\circ)}$$



1987: Petra & PEP
($\sqrt{s} = 29 - 45$ GeV):

Messung von σ_μ und
 A_{FB} auf $\approx 1\%$

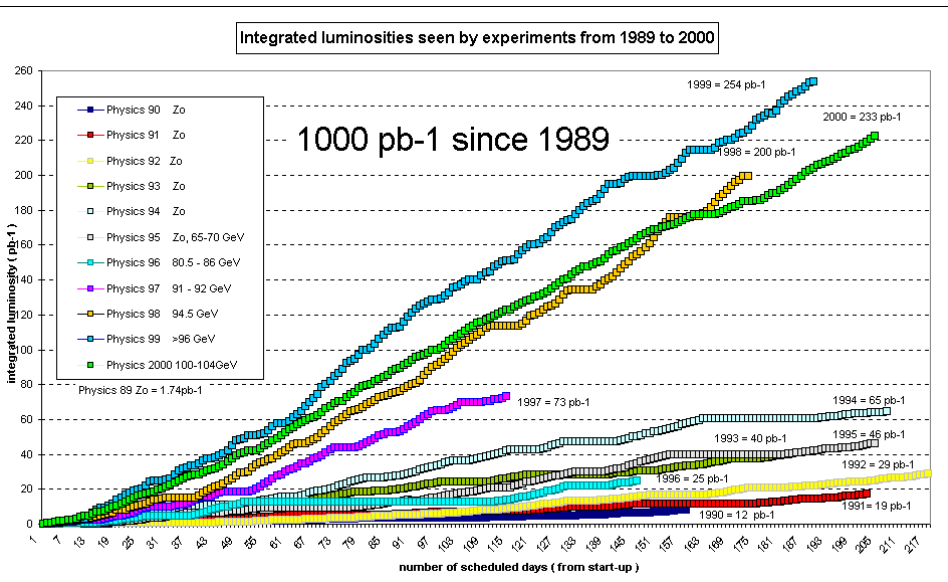


$m_Z = 89 \pm 2$ GeV

Die Ära von LEP und SLC 1989-2000

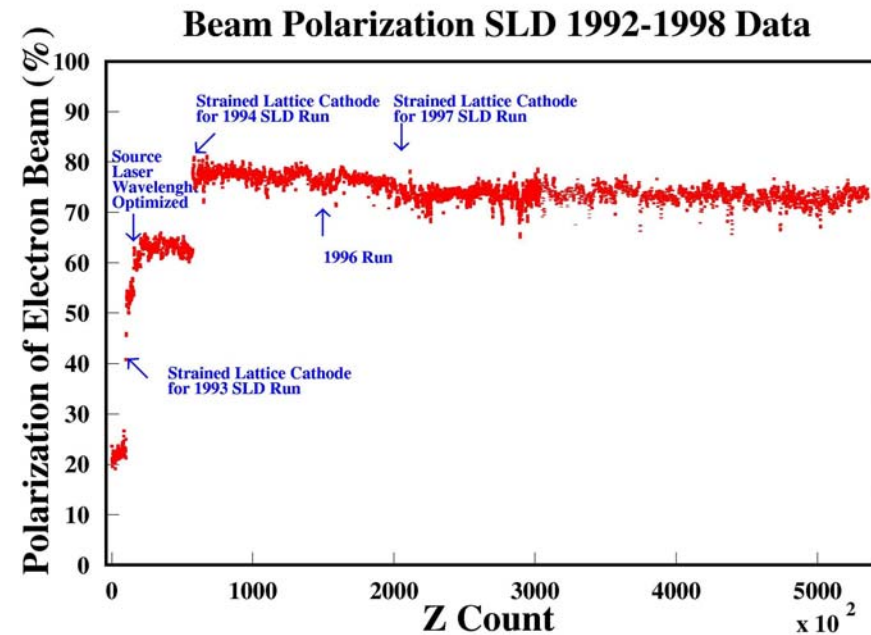
$$\sqrt{s} \geq m_Z$$

LEP: Hohe Luminosität



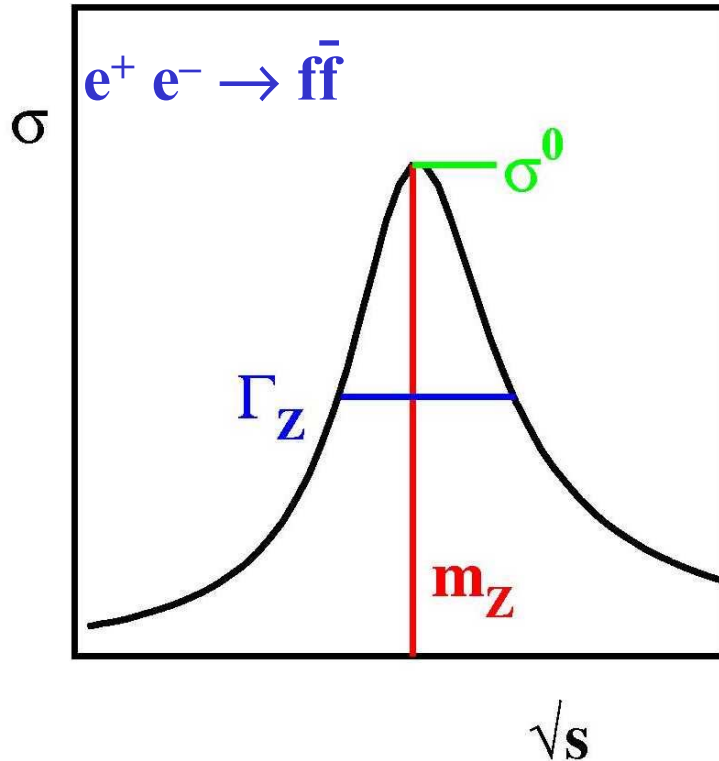
$4 \cdot 10^6$ Z-Bosonen/Experiment

SLC: Polarisation



50 000 Z-Bosonen bei 75%
longitudinaler Polarisation

Messungen der totalen Wirkungsquerschnitte auf der Z-Resonanz:



- **Masse des Z-Bosons m_Z**
- **Totale Breite Γ_Z**
- **Partielle Breiten Γ_f**

$$\sigma_0^f(m_Z) = \frac{12\pi}{m_Z^2} \frac{\Gamma_e \Gamma_f}{\Gamma_Z^2}$$

$$m_Z = 91\,187,6 \pm 2,1 \text{ MeV}$$

$$\Gamma_Z = 2\,495,2 \pm 2,3 \text{ MeV}$$

$$\Gamma_{\text{had}} = 1\,745,8 \pm 2,7 \text{ MeV}$$

$$\Gamma_e = 83,92 \pm 0,12 \text{ MeV}$$

$$\Gamma_\mu = 83,99 \pm 0,18 \text{ MeV}$$

$$\Gamma_\tau = 84,08 \pm 0,22 \text{ MeV}$$

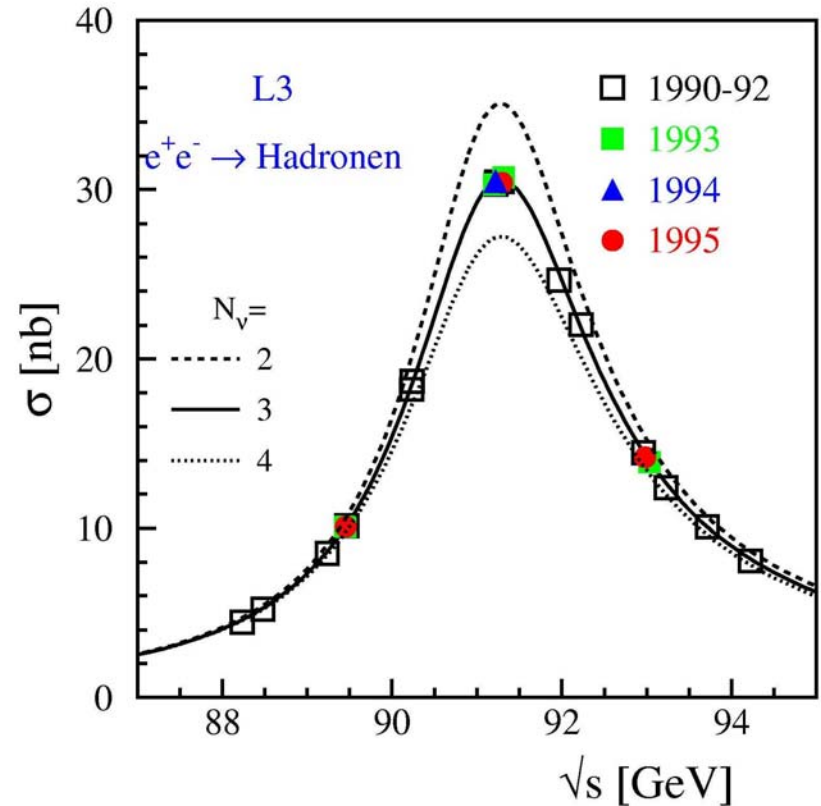
Zahl der Neutrino-Sorten:

$$\Gamma_{\text{inv}} = \Gamma_Z - \Gamma_{\text{had}} - 3\Gamma_l$$

$$= 499,2 \pm 1,5 \text{ MeV}$$

$$N_\nu = \frac{\Gamma_{\text{inv}}}{\Gamma_\nu^{\text{SM}}}$$

$$= 2,9841 \pm 0,0083$$



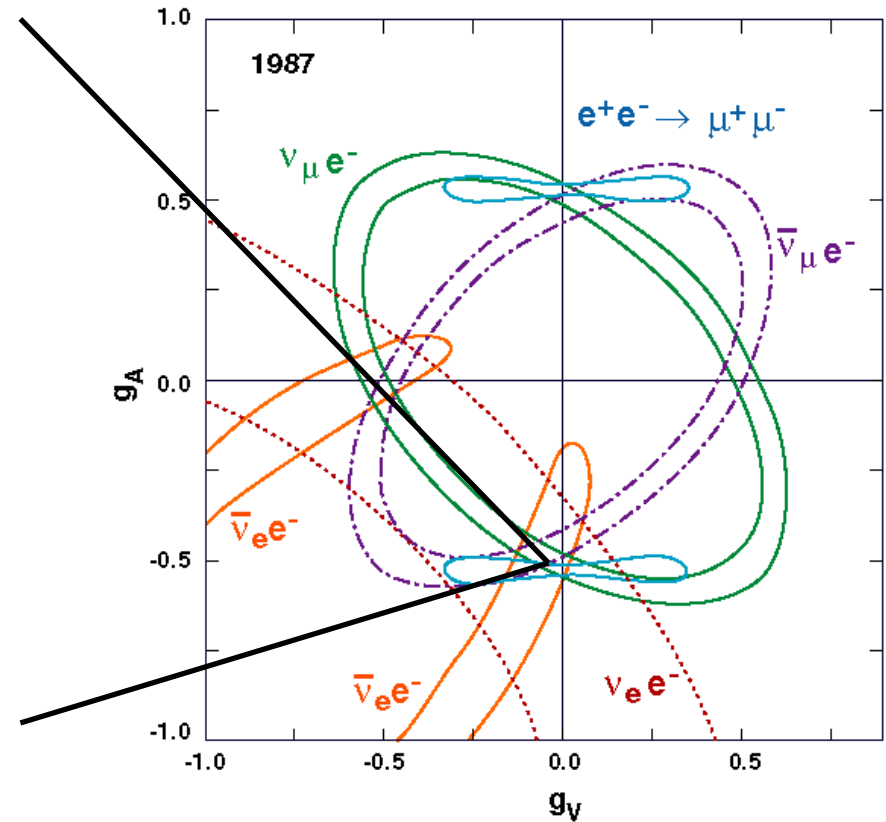
Es gibt 3 Generationen der fundamentalen Fermionen

$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$
--	--	--	--	--	--

Kopplung des Z-Bosons an geladene Leptonen

$$g_L = g_V + g_A \quad g_R = g_V - g_A$$

LEP & SLD



⇒ Leptonuniversalität:

$$g_A^e = g_A^\mu = g_A^\tau \quad g_V^e = g_V^\mu = g_V^\tau$$

Der schwache Mischungswinkel $\sin^2\vartheta_W$: $g_V/g_A = 1 - 4 \sin^2\vartheta_W$

} **Leptonische Kanäle**

} **Hadronische Kanäle**

Differenz $3,3\sigma$!

**\Rightarrow Hinweis auf leichtes
Higgs-Boson**

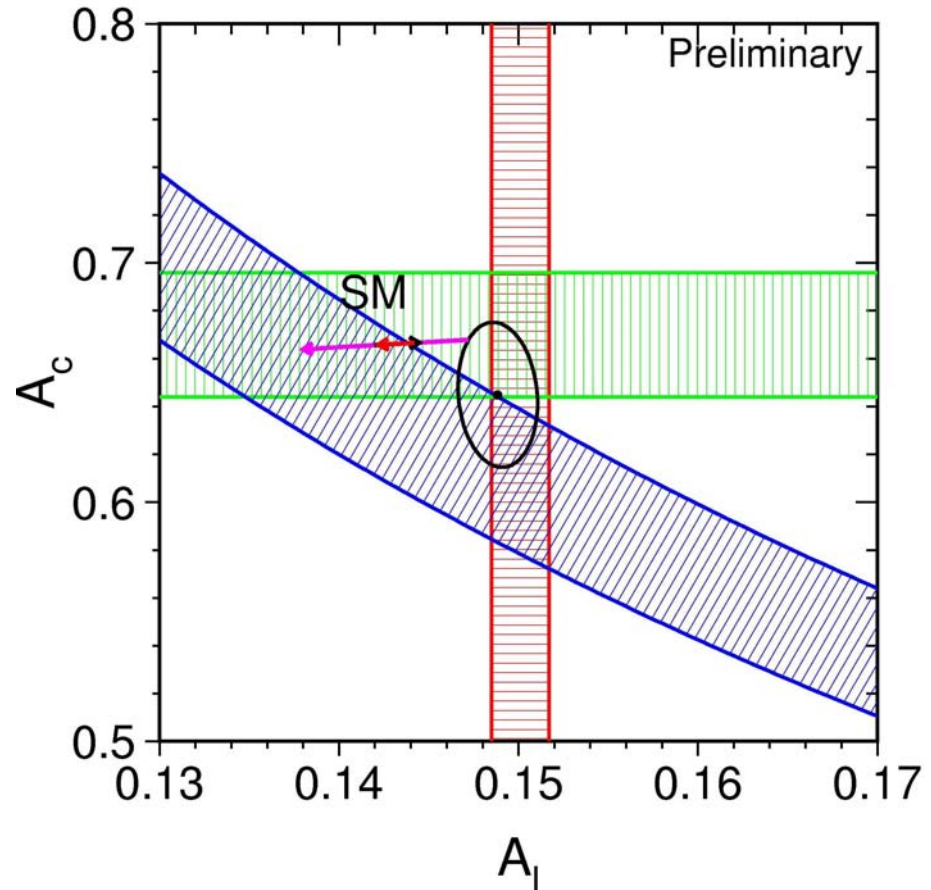
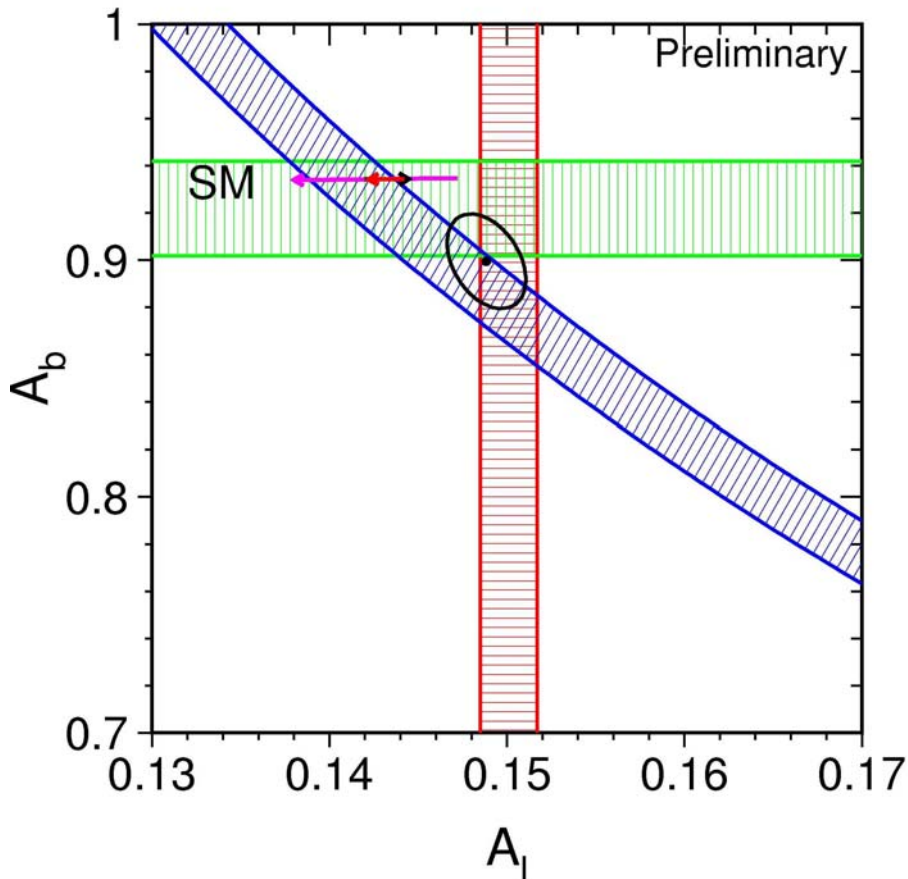
Kopplungen von Leptonen und b(c)-Quarks:

$$A_f = 2 \frac{g_A g_V}{g_A^2 + g_V^2}$$

$A_{b(c)}$ SLC (Links-Rechts Vorwärts-Rückwärts Asymmetrie)

A_I LEP & SLC (A_{LR} , A_{FB}^I , Tau-Polarisation)

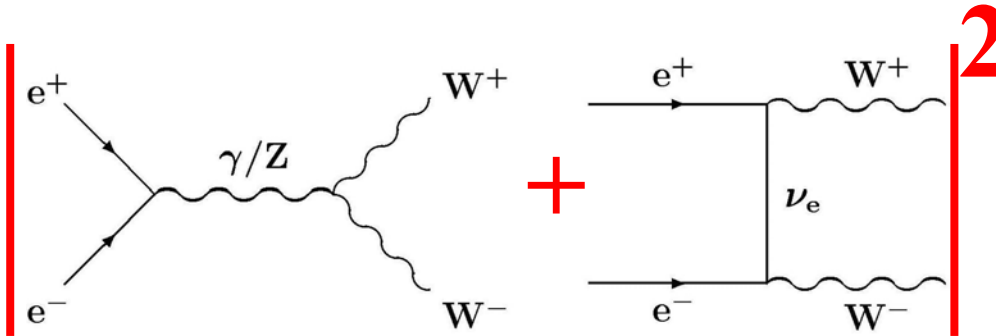
$A_{FB}^b = 3/4 A_b A_I$ LEP (b-Quark Vorwärts-Rückwärts Asymmetrie)



LEP II: Produktion von W-Paaren $e^+ e^- \rightarrow W^+ W^- \rightarrow 4f$

08/07/2001

3 Feynman-Diagramme mit divergierenden Einzelbeiträgen:

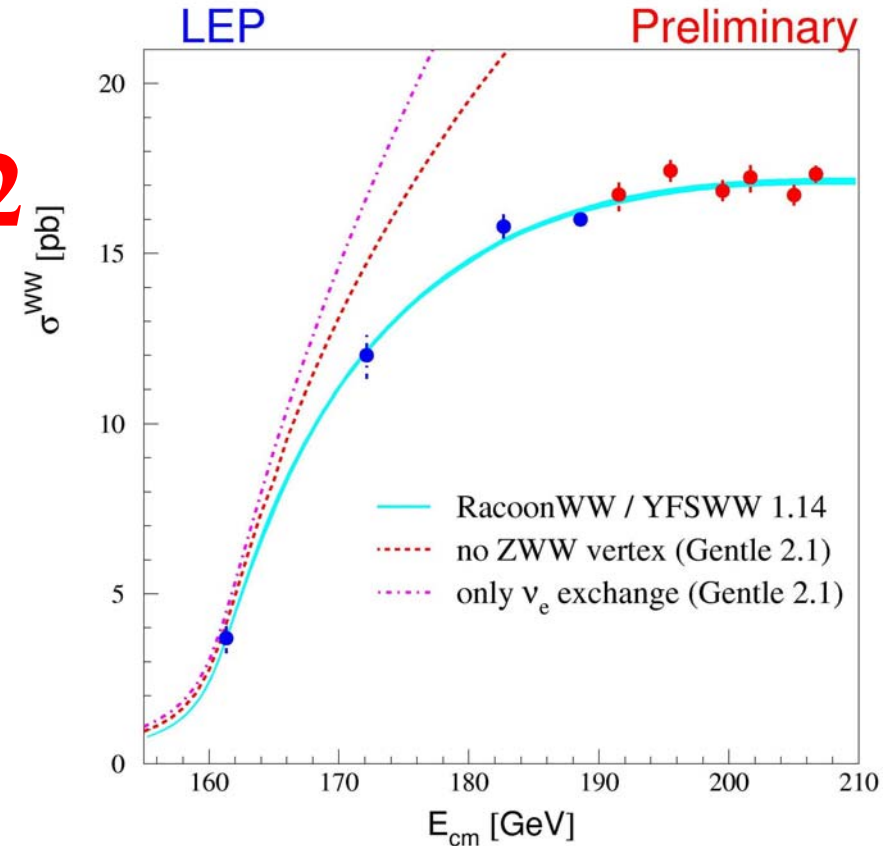


z.B.:

$$\sigma_v = \frac{\pi \alpha^2 s}{96 \sin^4 \vartheta_W m_W^4} \rightarrow s \quad (s \gg m_W^2)$$

Standardmodell:

$$\sigma_{SM} = \frac{\pi \alpha^2}{2 \sin^4 \vartheta_W} \frac{1}{s} \ln \frac{s}{m_W^2} \quad (s \gg m_W^2)$$



- **Existenz des ZWW-Vertex**
- **Überprüfung der 3-Boson-Kopplungen auf Prozentniveau**

Messung der W-Masse:

$\approx 10\,000$ W-Paare/Exp.

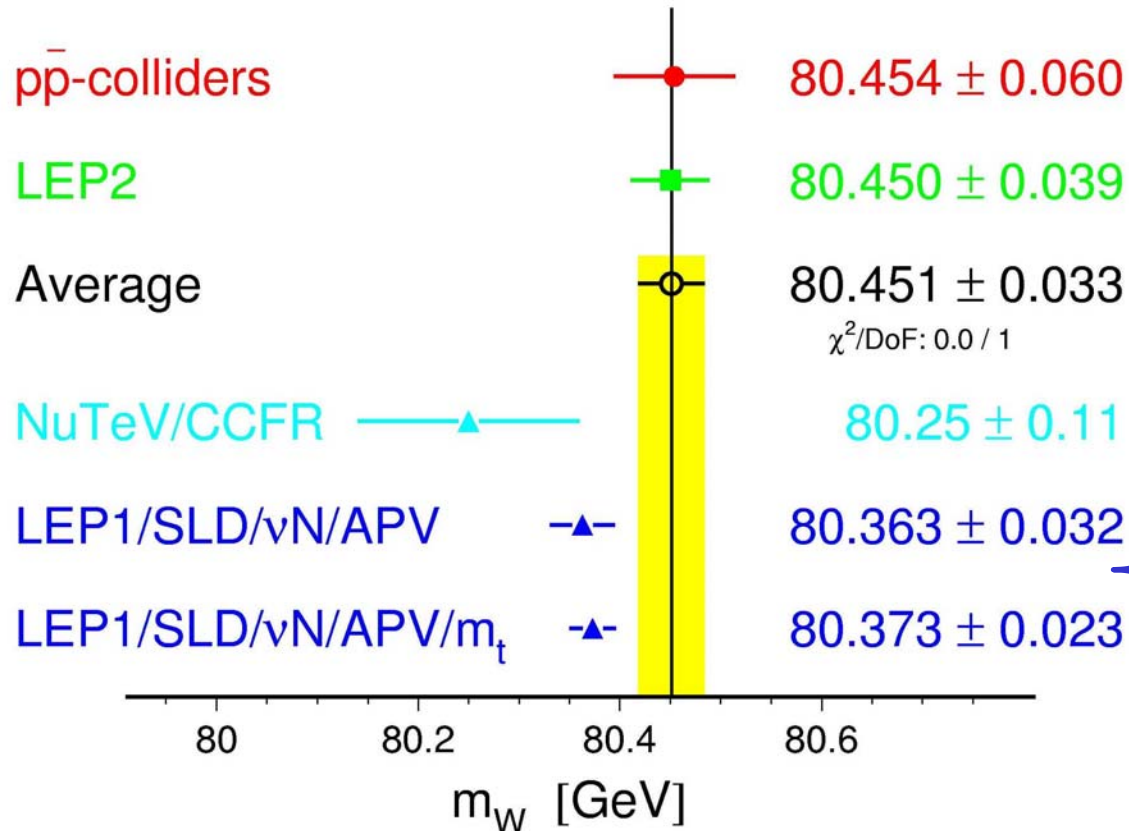
$$m_W = 80,450 \pm 0,039 \text{ GeV}$$

Vergleich von Messungen der W-Masse:

I. m_W aus Rekonstruktion der invarianten Masse der Zerfallsprodukte (LEP II und pp-Experimente)

II. Im SM bestimmen die Massen der Eichbosonen die elektroschwachen Kopplungen: $\cos \vartheta_W = m_W / m_Z$

W-Boson Mass [GeV]



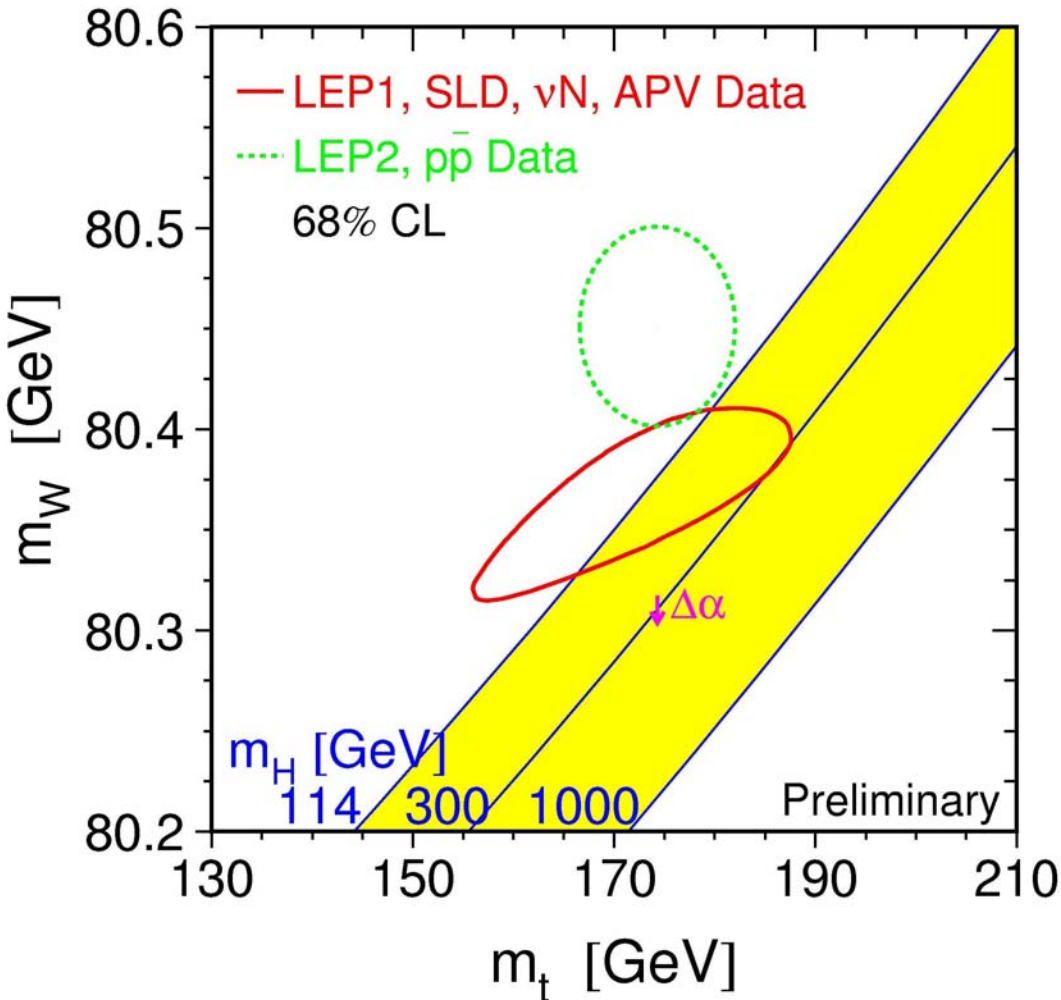
Messung von m_W bei $\sqrt{s} = m_Z$, z.B.:

$$\Gamma_\ell = \frac{\alpha m_Z}{12 \sin^2 \vartheta_W \cos^2 \vartheta_W} \left[(g_A^\ell)^2 + (g_V^\ell)^2 \right]$$

$\rho = 1$ (plus Strahlungskorrekturen)

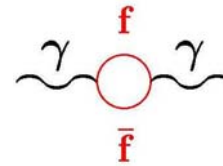
Test des SM in höheren Ordnungen

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{\pi\alpha}{2} \frac{1}{m_W^2 \sin^2 \vartheta_W} \frac{1}{1 - \Delta r} \quad 1 - \Delta r \approx (1 - \Delta\alpha)(1 - \Delta r_W)$$

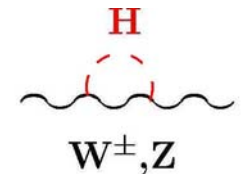
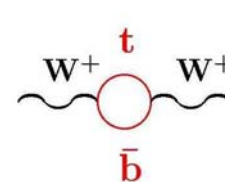


a) QED Kopplungskonstante α

$$\alpha(m_Z) = \alpha(Q^2 = 0) / (1 - \Delta\alpha)$$



b) Schwache Korrekturen



$$\Delta r_W \approx \Delta r_W(m_t^2, \log m_H)$$

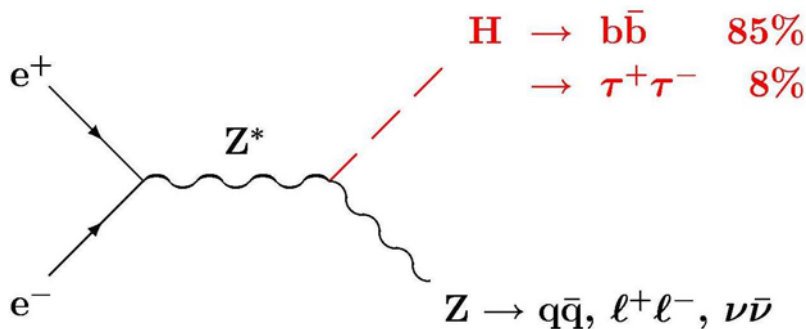
- **Voraussage der Top-Masse**
- **SM ist korrekt „1-Loop“**
- **Leichtes Higgs-Boson**

Die Suche nach dem Higgs-Boson bei LEP:

- Vor LEP keine belastbare experimentelle Massengrenze
- Higgs-Suche braucht ergiebige Quelle von schweren Teilchen, z.B. Z-Bosonen

⇒ Higgs-Suche begann mit LEP

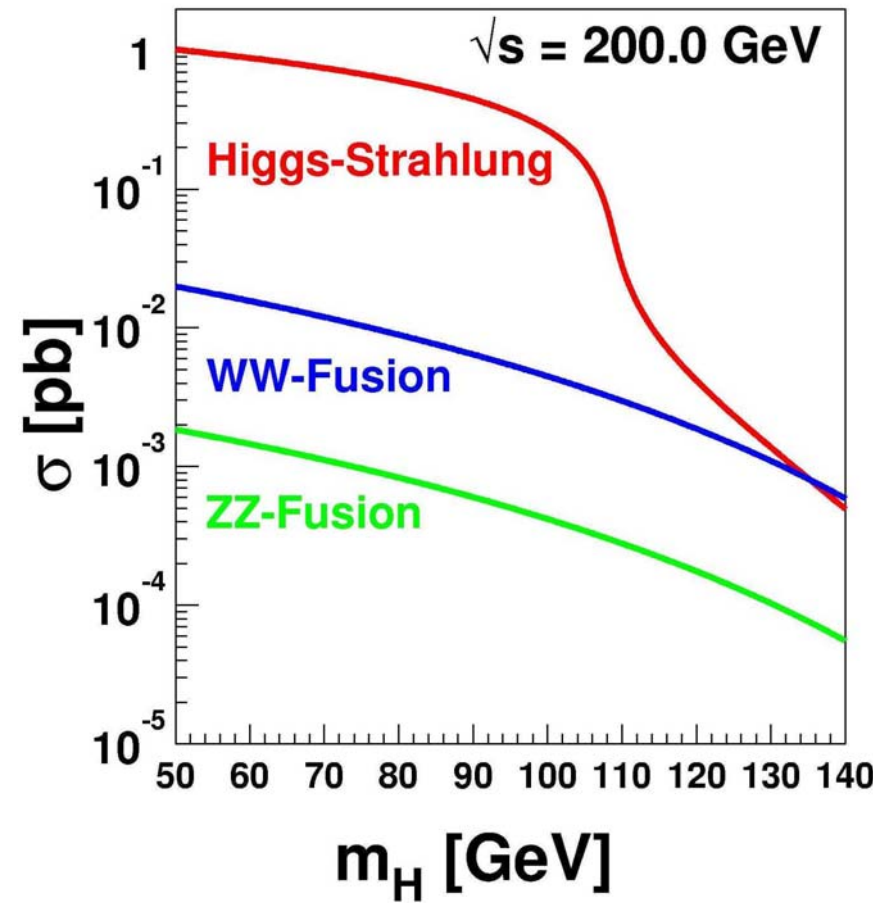
Higgsstrahlung:



Produktion eines realen Z-Bosons

+ Masseninformation $m_{ff} \approx m_Z$

- Suche bis maximal $m_H \approx \sqrt{s} - m_Z$

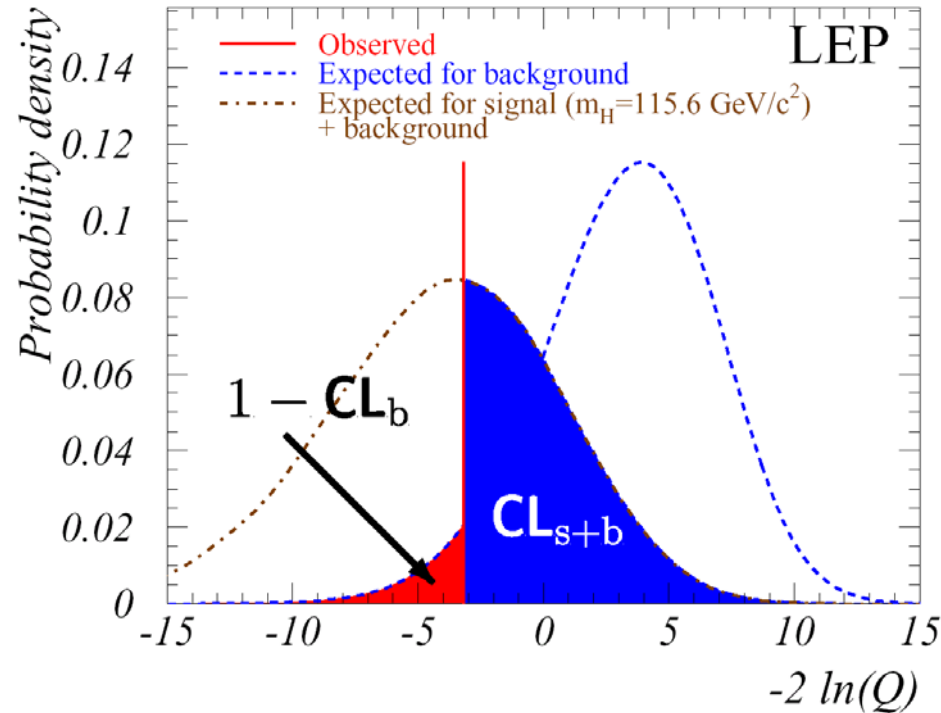
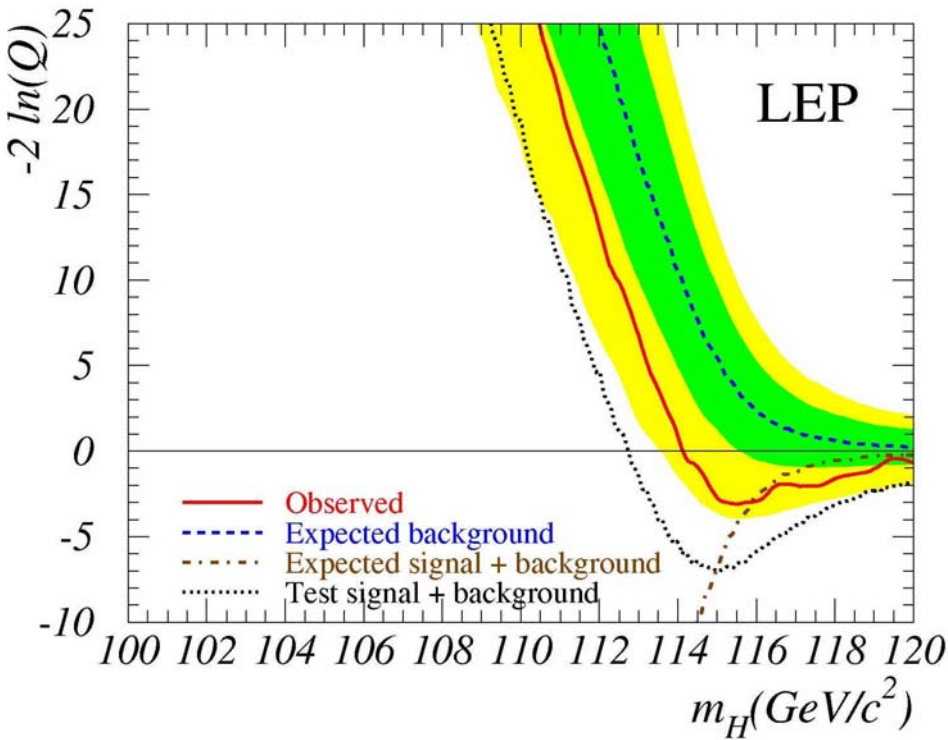


2001: Higgs-Kandidaten bei höchsten Energien ($\sqrt{s} = 208 \text{ GeV}$)

ALEPH $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}q\bar{q}$

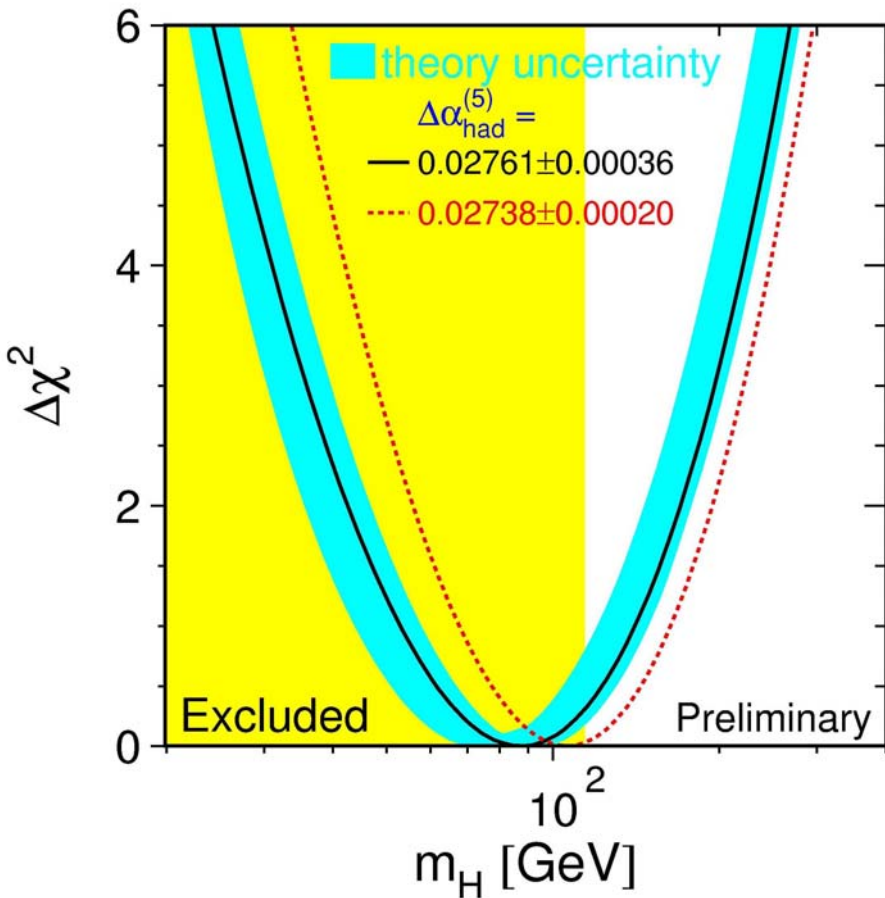
Status der kombinierten LEP-Analyse:

Likelihood-Analyse: $Q = \frac{L(s+b)}{L(b)}$ $L(s+b) = \prod_i P(n_i; s_i + b_i)$ $L(b) = \prod_i P(n_i; b_i)$

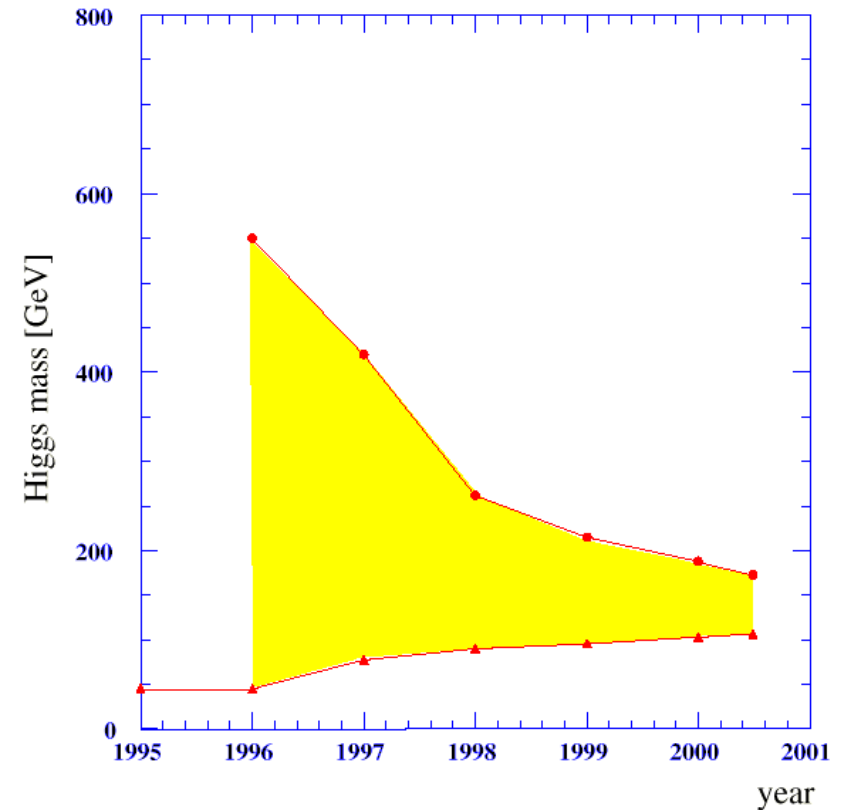


- $\approx 2\sigma$ „Signal“ bei $m_H = 115,6 \text{ GeV}$
- 95% CL-Grenze $m_H > 114,1 \text{ GeV}$

Experimentelle Information über das SM Higgs-Boson:



Zeitliche Entwicklung der m_H -Grenzen

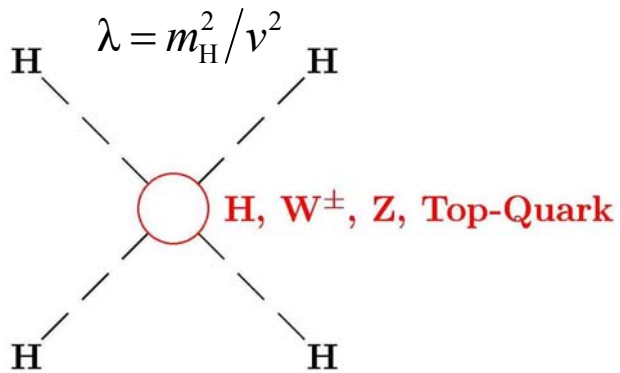


$\Rightarrow m_H < 196$ GeV

Das Higgs-Boson ist leicht

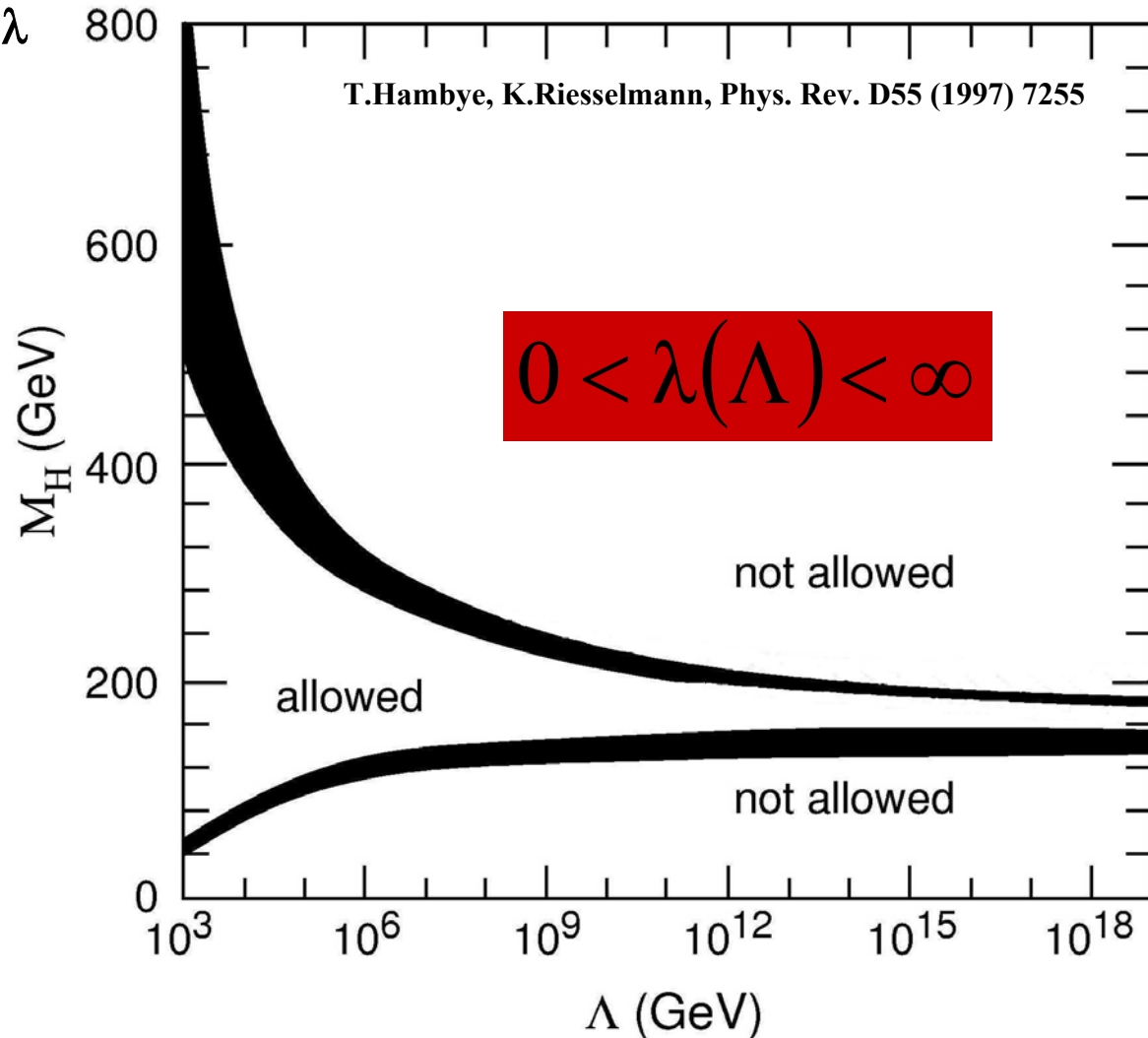
Theoretische Grenzen für die Higgs-Masse:

Kopplung am 4-Higgs-Boson-Vertex
Laufen der Kopplungskonstanten λ



$$\lambda(\Lambda) = \frac{\lambda}{1 - \frac{3}{2\pi^2} \lambda \ln(\sqrt{2}\Lambda/v)}$$

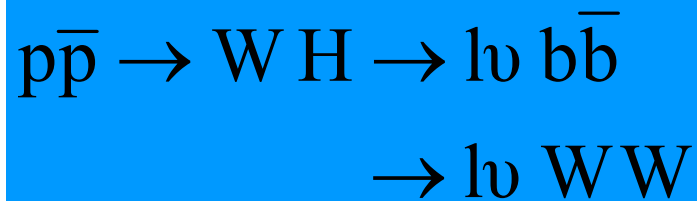
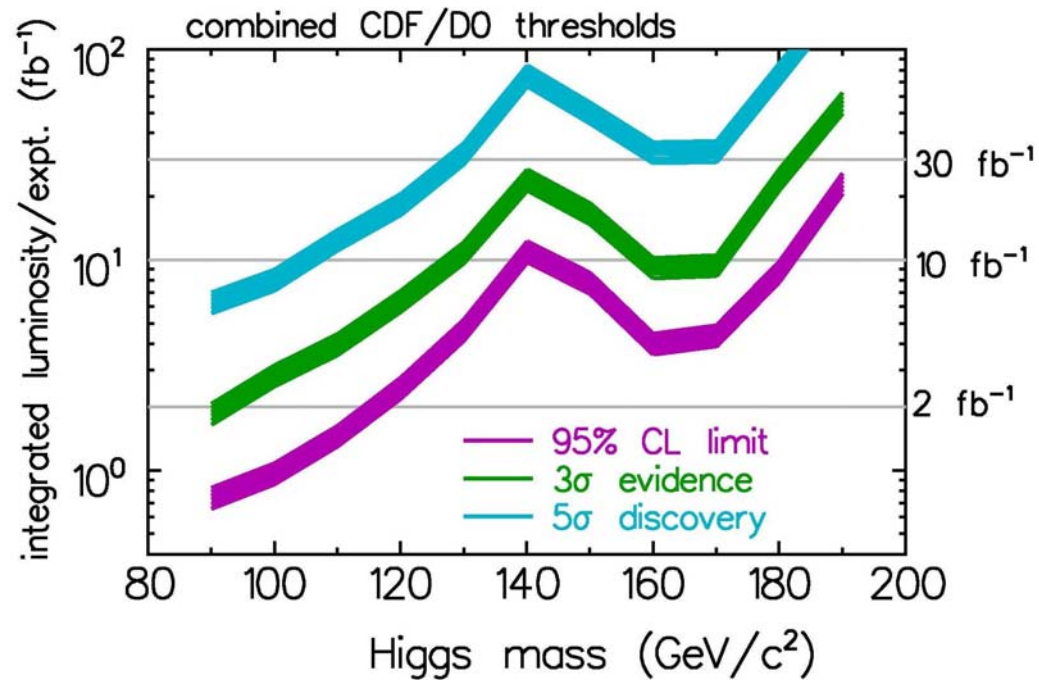
Analog zum Landau-Pol der QED



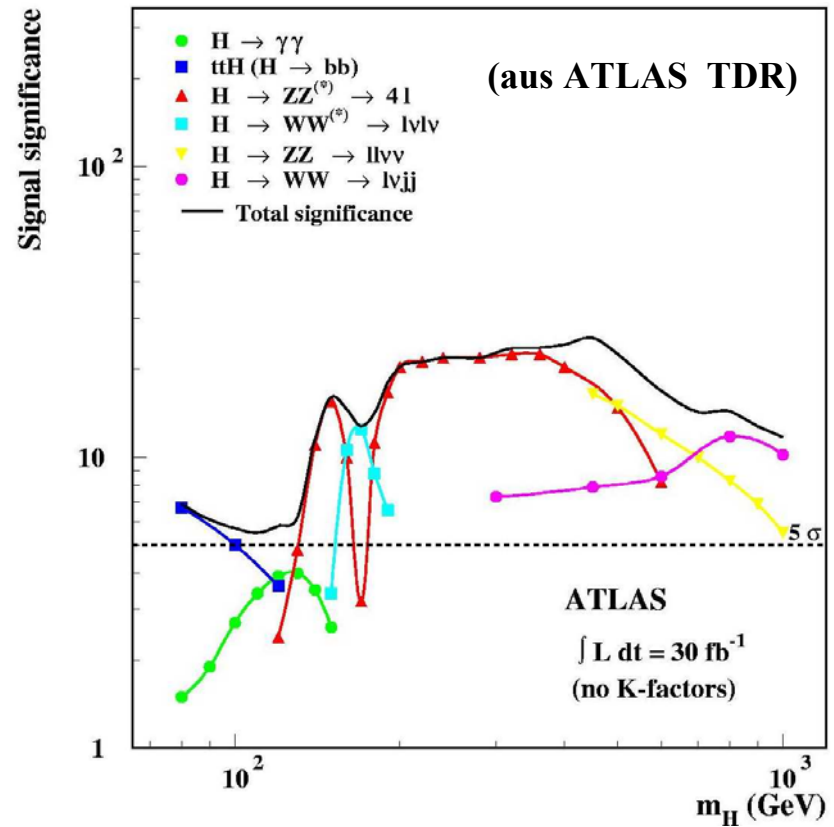
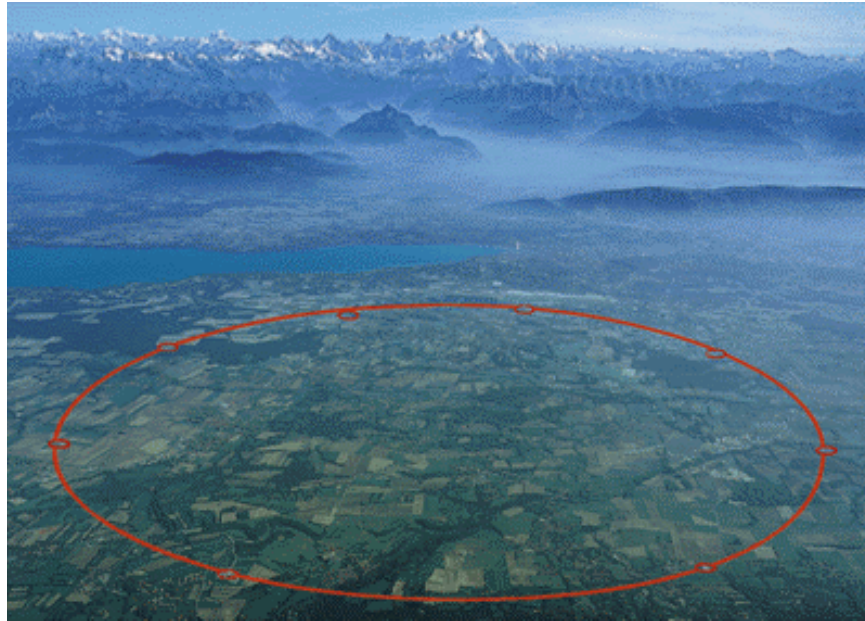
Entdeckung des Higgs an Proton-Beschleunigern:

Tevatron Run II ($\sqrt{s} = 2$ TeV):

Frühjahr 2001 bis zum Start des LHC



$H \rightarrow W^+ W^-$ dominiert ab $m_H \geq 140$ GeV



- Erster LHC Run 2006/07
- Erwartete Luminosität 10 fb^{-1}

Ausreichend zum Nachweis (Entdeckung?) des Higgs

Vergleich LHC ($\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$) und Tevatron ($\sqrt{s} = 2 \text{ TeV}$):

Signal:

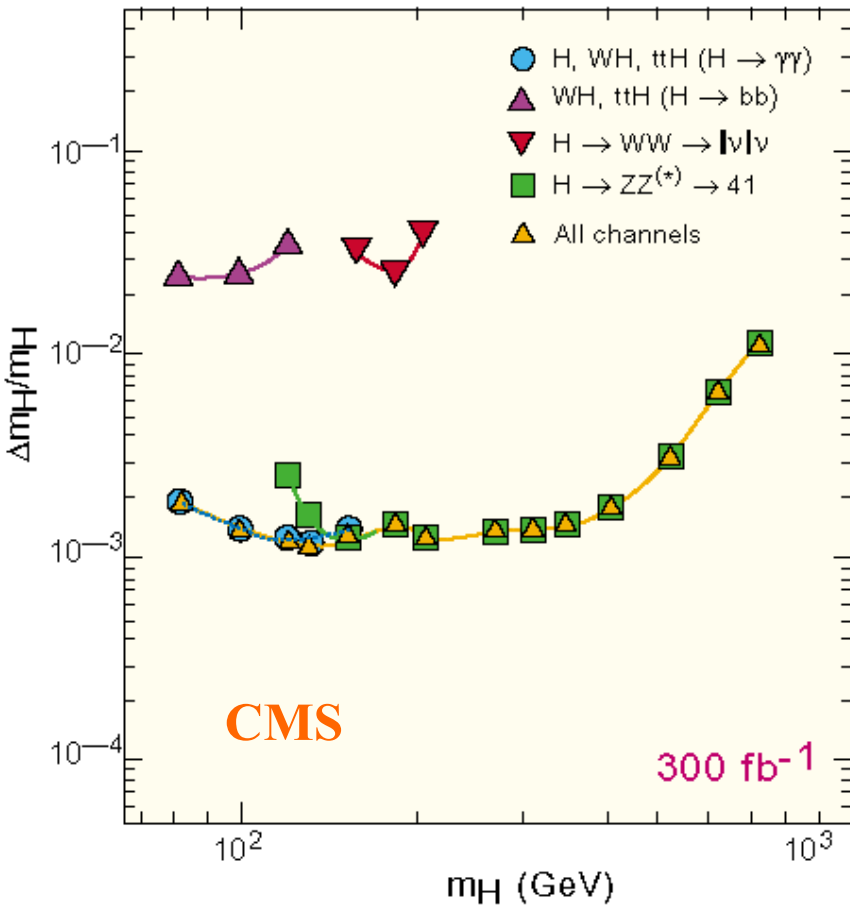
$q\bar{q} \rightarrow W/Z + H$	$\sigma^{\text{LHC}} \approx 10 \times \sigma^{\text{Tev}}$
$gg \rightarrow H$	$\sigma^{\text{LHC}} \approx 70 - 80 \times \sigma^{\text{Tev}}$

Untergrund:

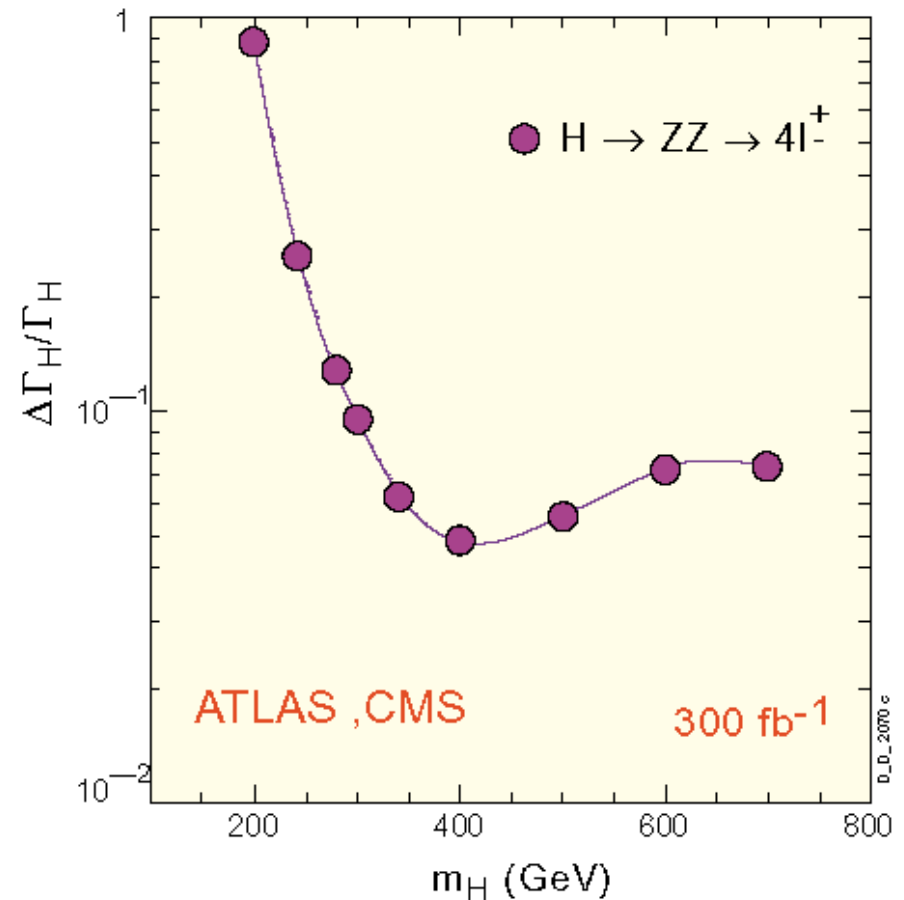
WW/WZ	$\sigma^{\text{LHC}} \approx 10 \times \sigma^{\text{Tev}}$
$t\bar{t}$	$\sigma^{\text{LHC}} \approx 10 \times \sigma^{\text{Tev}}$
QCD Jets	$\sigma^{\text{LHC}} \approx 100 \times \sigma^{\text{Tev}}$

Bestimmung der Eigenschaften des Higgs-Bosons am LHC:

• Messung von m_H auf $\geq 0,1\%$



• Messung von Γ_H auf $\approx 5 - 10\%$
($m_H > 2 m_Z$)



• Verhältnisse von Kopplungen

Die Zukunft der Präzisionstest des Standardmodells

$e^+ e^-$ - Linearbeschleuniger

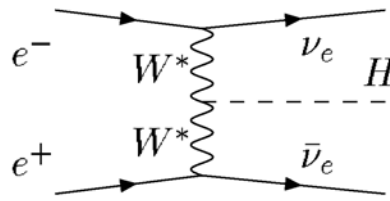
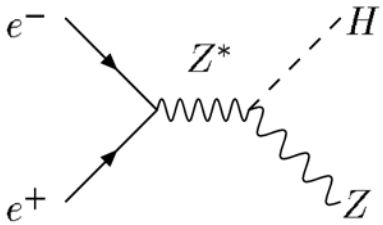
- Higgs-Entdeckung am Tevatron oder LHC
- Genaue Bestimmung der Higgs-Kopplungen und des Higgs-Potentials am $e^+ e^-$ -Linearbeschleuniger

Vergleiche:

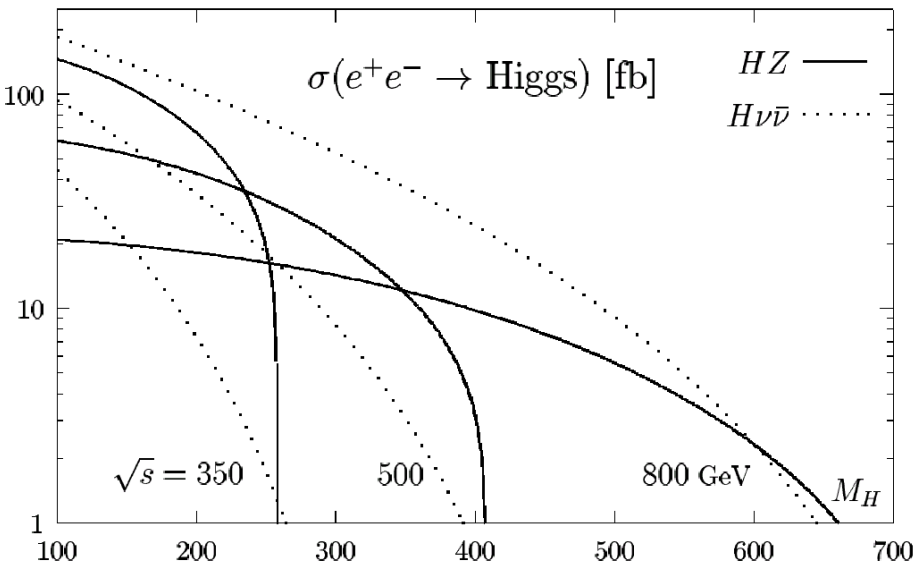
1983 Entdeckung der W- und Z-Bosonen am SPS (UA1 & UA2)
ab 1989 Genaue Bestimmung der Eigenschaften bei LEP & SLC

Produktion von Higgs-Bosonen

Higgs-Strahlung und WW-Fusion:

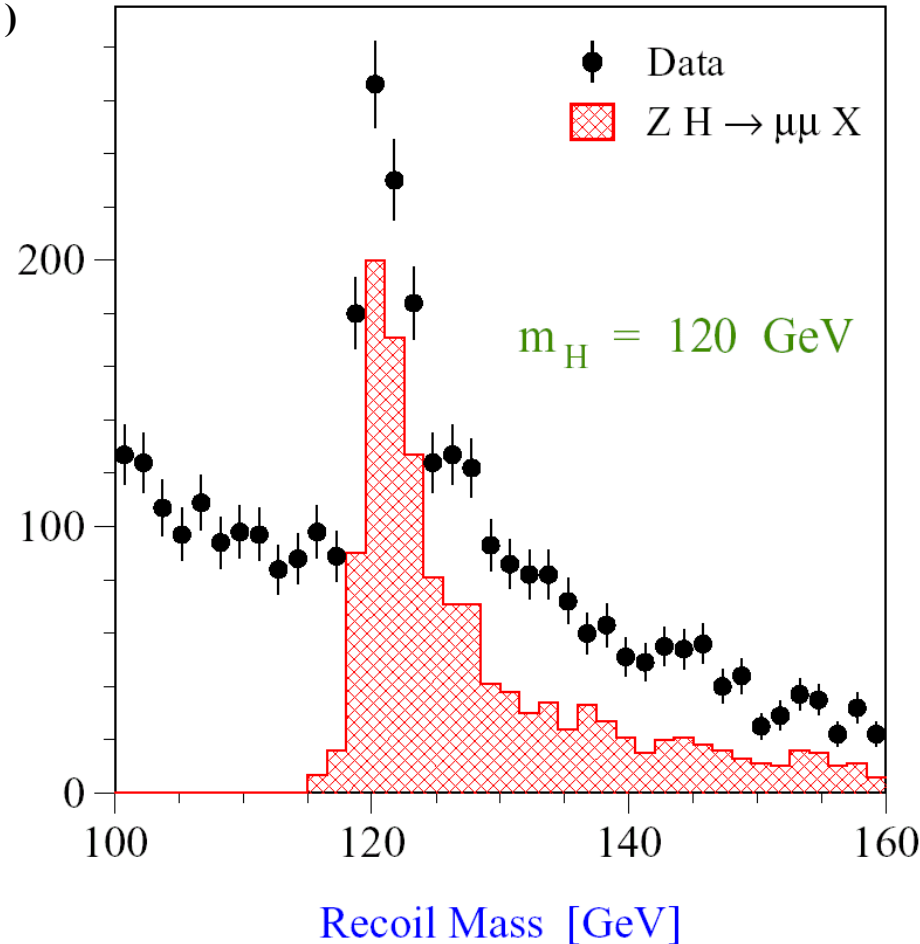


$$\sigma(ZZ \rightarrow H) = 1/10 \sigma(WW \rightarrow H)$$



Number of Events / 1.5 GeV

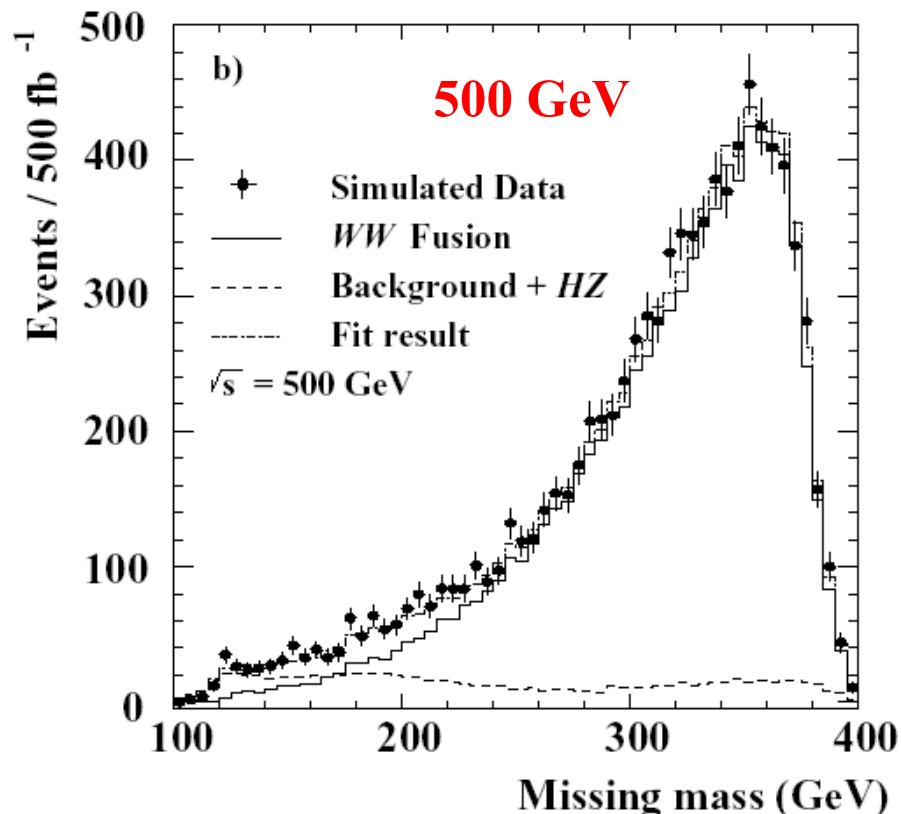
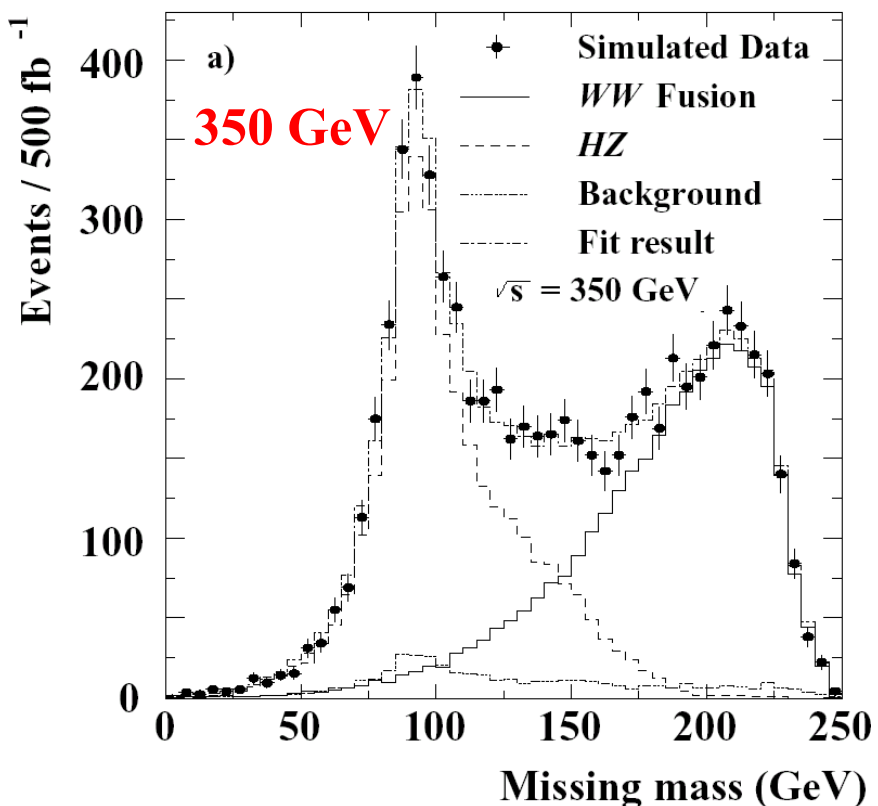
- **Higgs-Strahlung: Nachweis des Higgs unabhängig vom Zerfall in $e^+ e^- \rightarrow HZ \rightarrow H e^+ e^- (\mu^+ \mu^-)$**



- **Messung der Wirkungsquerschnitte für Higgs-Strahlung und WW-Fusion**
- **Bestimmung der Higgs-Kopplungen an W- und Z-Bosonen g_{HWW} und g_{HZZ}**

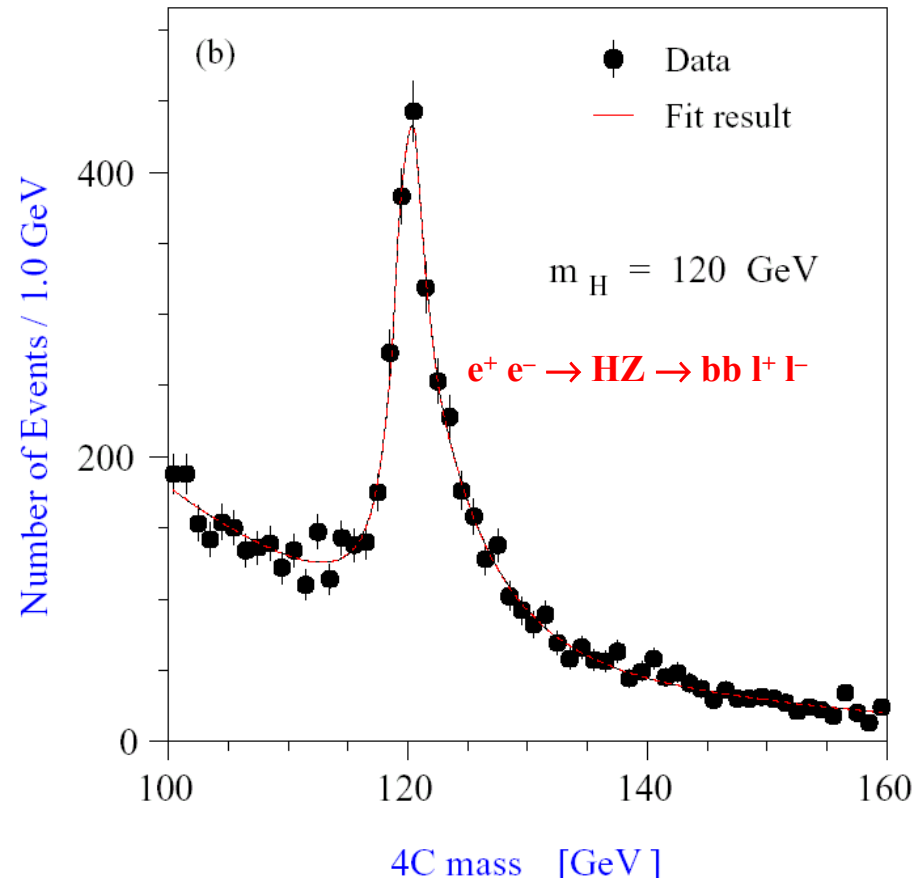
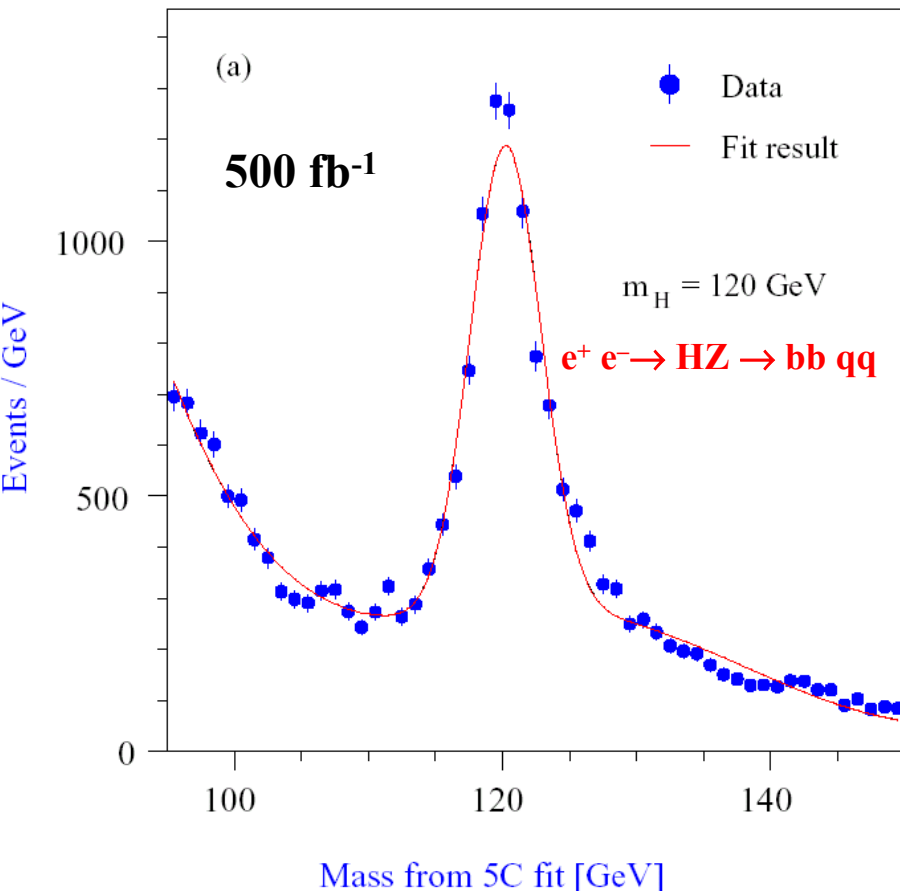
$e^+ e^-$ - Physik: genaue absolute Messung und theoretische Voraussage von Wirkungsquerschnitten

Beispiel: $e^+ e^- \rightarrow b\bar{b} \nu\bar{\nu}$ ($m_H = 120$ GeV)



Higgs-Massenmessung:

Kinematischer Fit $\sum E_i = \sqrt{s}$ $\sum \vec{p}_i = 0$
Energie-Skala bestimmt durch E_{beam}



$\Delta m_H \approx 40 \text{ MeV}$ (abhängig von m_H)

(Vergleiche Messung von m_W bei LEP und am Tevatron)

Messung der totalen Breite Γ_H :

- **Schweres Higgs ($m_H > 2 m_Z$):**
breites Higgs durch $H \rightarrow WW, ZZ$
direkte Messung von Γ_H möglich

$$\Delta \Gamma_H / \Gamma_H \approx 10\%$$

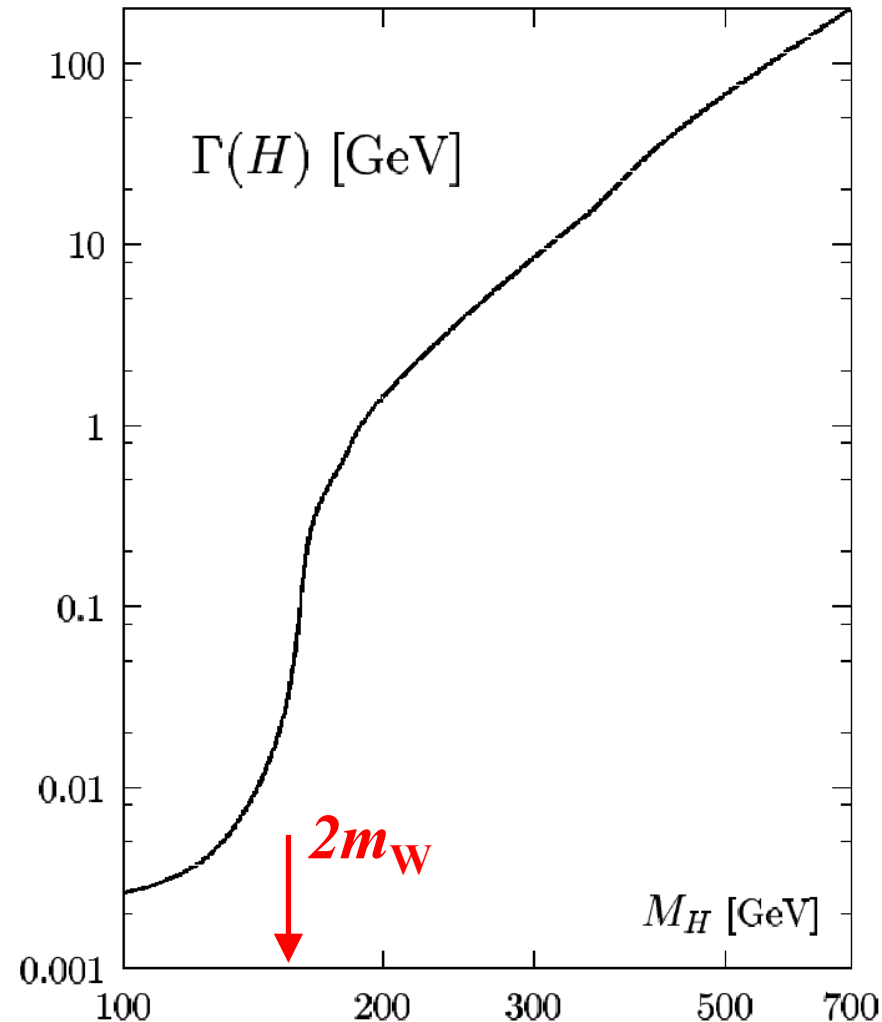
- **Leichtes Higgs $m_H < 160 \text{ GeV}$**
Higgs ist sehr schmal $\Gamma_H < 10 \text{ MeV}$

Messung am LC durch

- $\Gamma_{H \rightarrow WW}$ aus WW-Fusion
- $\text{BR}(H \rightarrow WW) = \Gamma_{H \rightarrow WW} / \Gamma_H$

$$\Delta \Gamma_H / \Gamma_H \approx 5\%$$

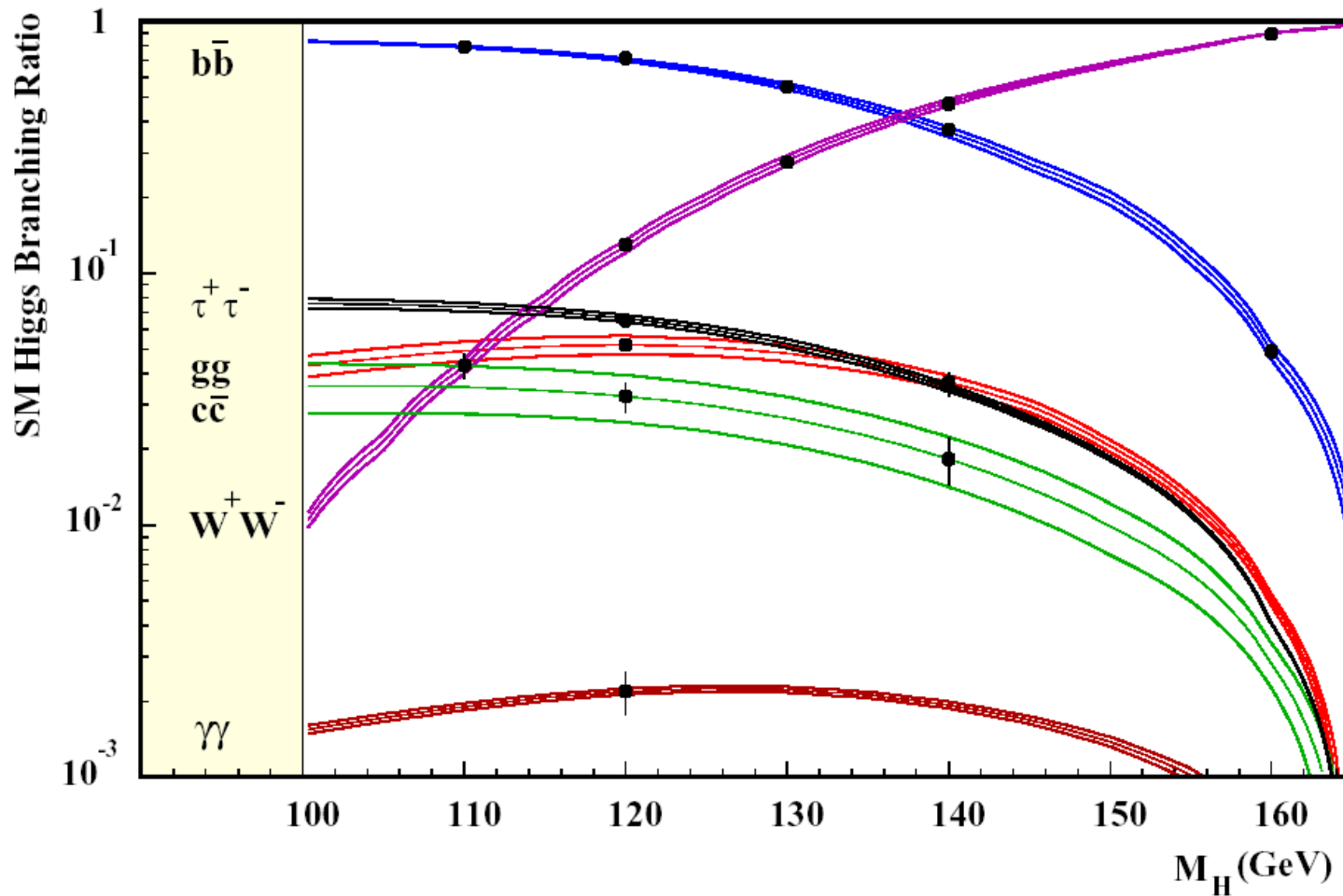
$\Gamma_H(m_H)$ im Standardmodell:



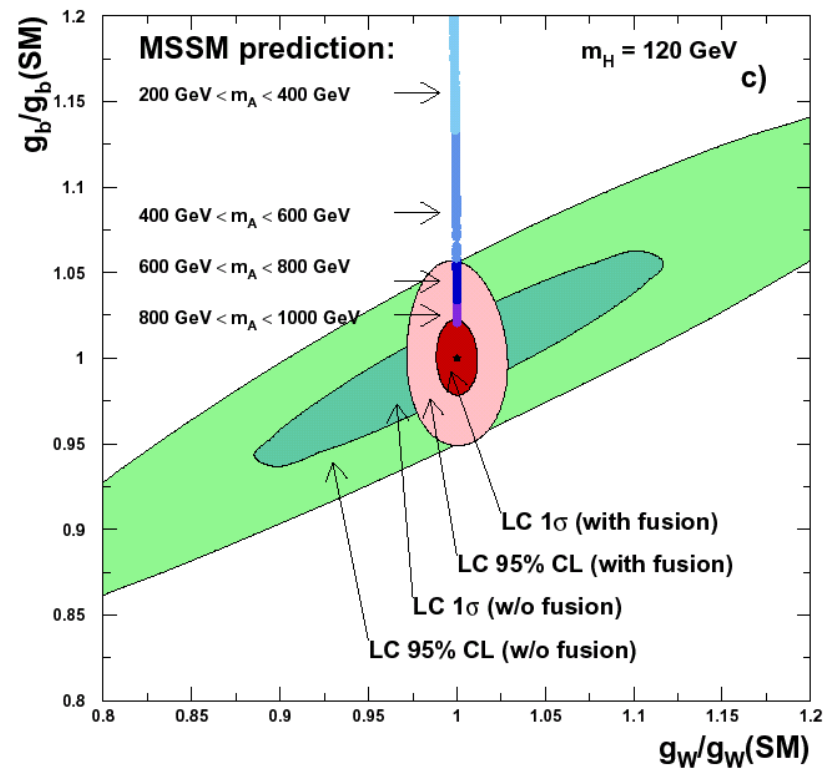
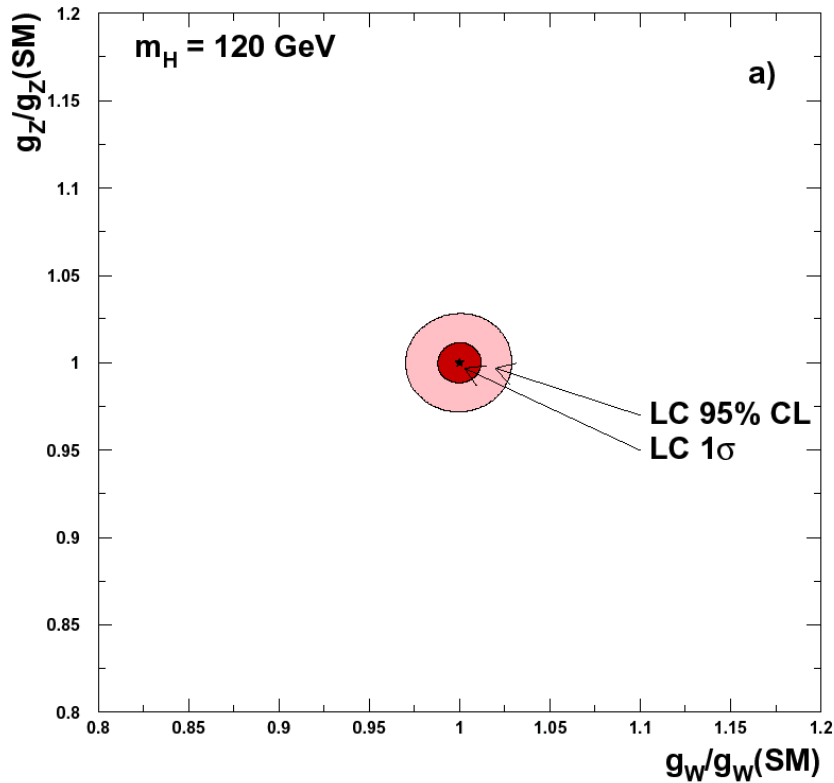
Bestimmung der Kopplungen des Higgs Bosons:

- Kopplung an Fermionen proportional zu Masse: $g_f = m_f / v$
- Kopplung an schwere Eichbosonen: $g_{HWW} = 2m_W^2/v$ $g_{HZZ} = 2m_Z^2/v$

Messung der Verzweungsverhältnisse:



Bestimmung der Kopplungen des Higgs Bosons:



Relative Genauigkeit der Higgs-Kopplungen:
($m_H = 120 \text{ GeV}$, 500 fb^{-1})

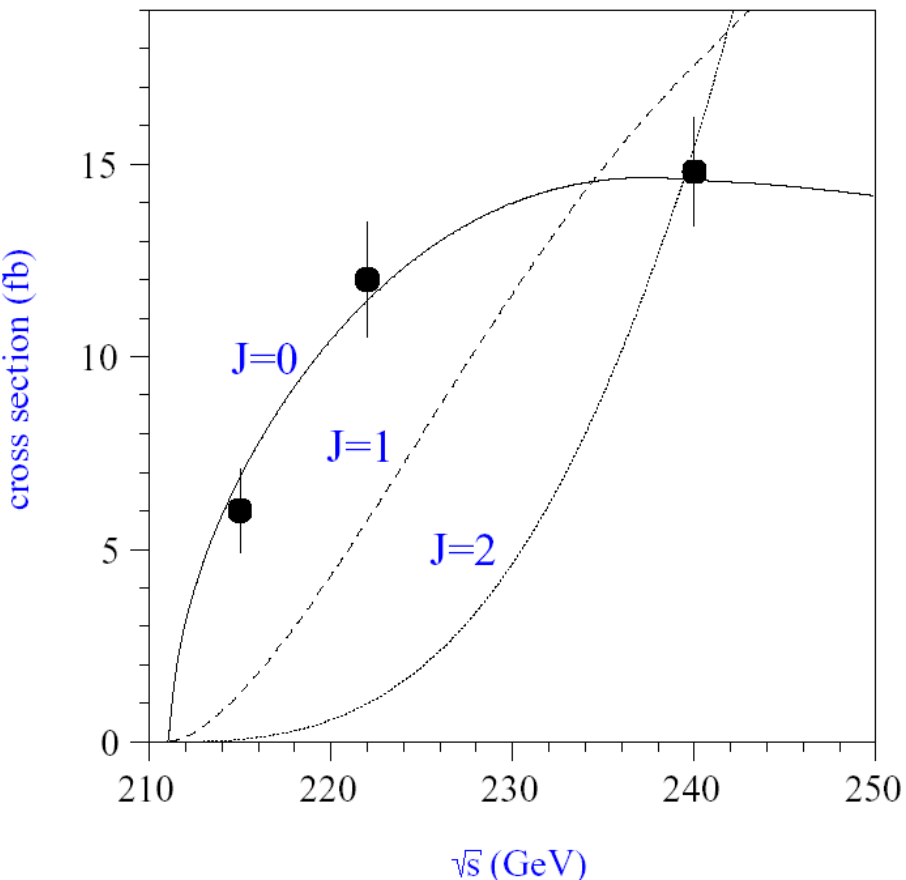
g_{HZZ}	$\pm 0,012$	g_{HWW}	$\pm 0,012$
g_{top}	$\pm 0,030$	g_{bottom}	$\pm 0,022$
g_{charm}	$\pm 0,037$	g_{tau}	$\pm 0,033$

Bestimmung der Quantenzahlen des Higgs-Bosons:

SM: $J^{PC} = 0^{++}$

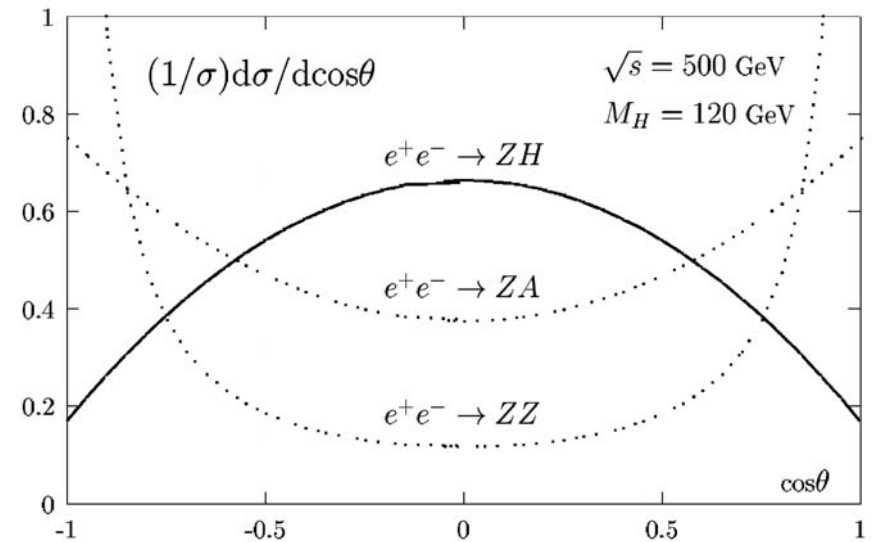
• Spin

Energie-Scan an der Schwelle
(3 Punkte mit 20 fb^{-1} , d.h 1/2 Jahr)

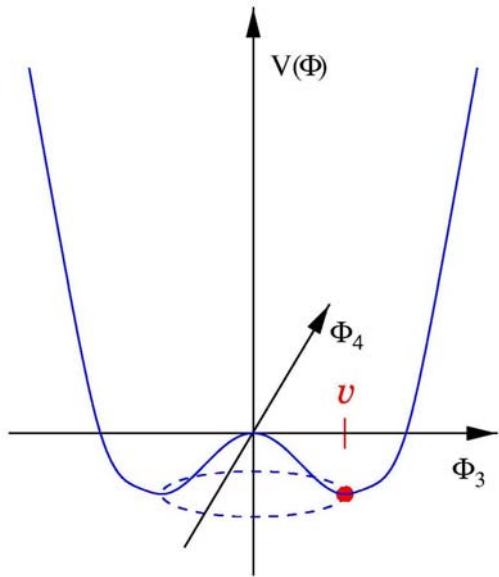


• Parität

Winkelverteilung im Kontinuum
Unterscheidung SM Higgs und 0^{-+} -Boson A



Verifizieren des Higgs-Potential:

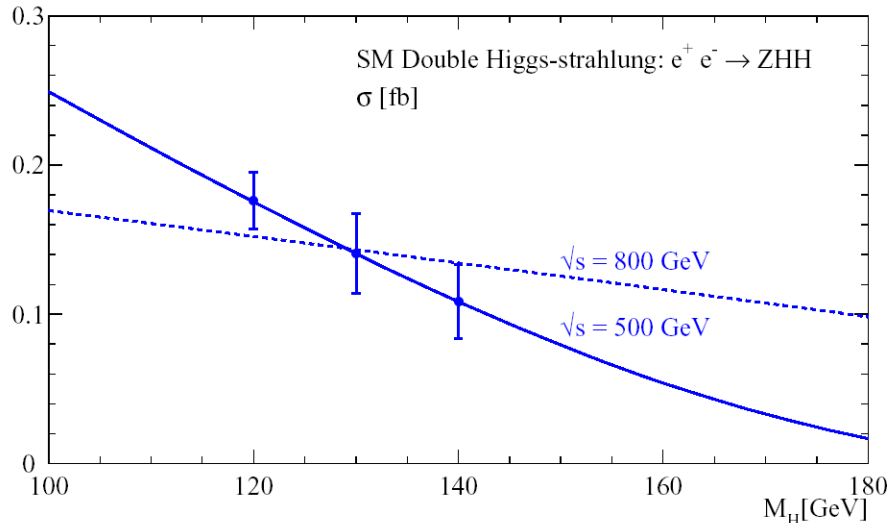
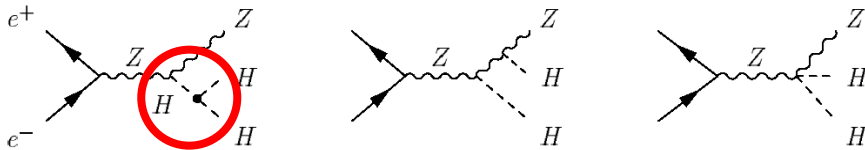
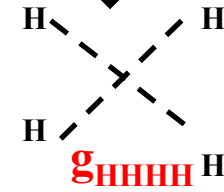
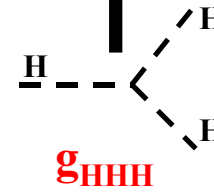


$$V(\Phi) = \mu^2 |\Phi|^2 + \lambda |\Phi|^4 \quad \mu^2 < 0 \quad \lambda > 0$$

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

$$V(H) = \lambda v^2 H^2 + \lambda v H^3 + \frac{1}{4} \lambda H^4$$

$$m_H = \sqrt{2\lambda v}$$



- **Messung der doppelten Higgsstrahlung:**
 $e^+ e^- \rightarrow HHZ$

$$\Delta g_{HHH} / g_{HHH} = 0,22$$

- **Messung von g_{HHHH} nicht möglich**

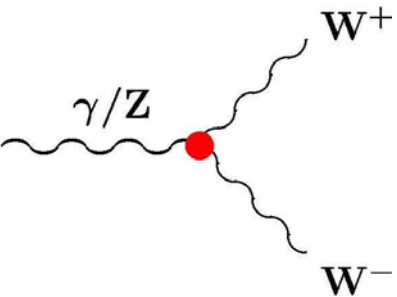
Vergleich Higgs-Physik $e^+ e^-$ -Linearbeschleuniger und LHC:

$m_H = 120 - 160$ GeV

	LHC $2 \times 300 \text{ fb}^{-1}$ $\Delta X/X$	LC 500 fb^{-1} $\Delta X/X$
m_H	10^{-3}	3×10^{-4}
Γ_H	----	0,04 – 0,06
$g_{u\text{-type}}$	----	0,02 – 0,04
$g_{d\text{-type}}$	----	0,01 – 0,02
g_{HWW}	----	0,01 – 0,03
g_{top}/g_{HWW}	0,070	0,023
g_{HZZ}/g_{HWW}	0,050	0,022
CP Test	----	0,03
g_{HHH}	----	0,22

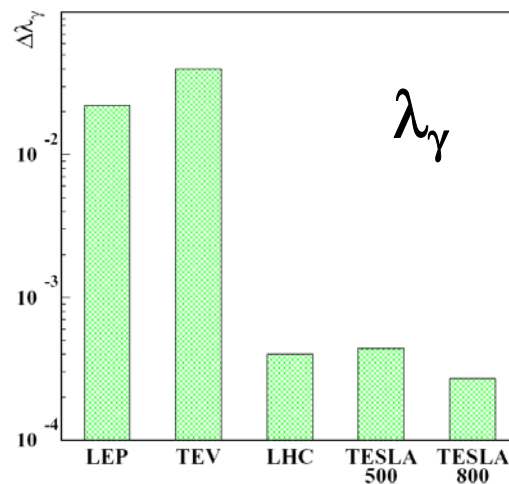
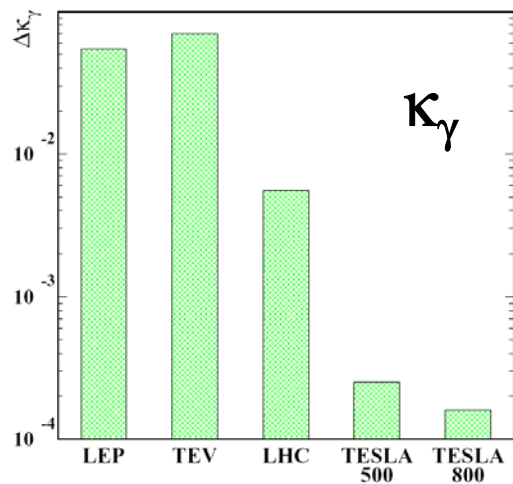
Beispiele für andere Präzisionsmessungen

•W-Kopplungen (TGC)



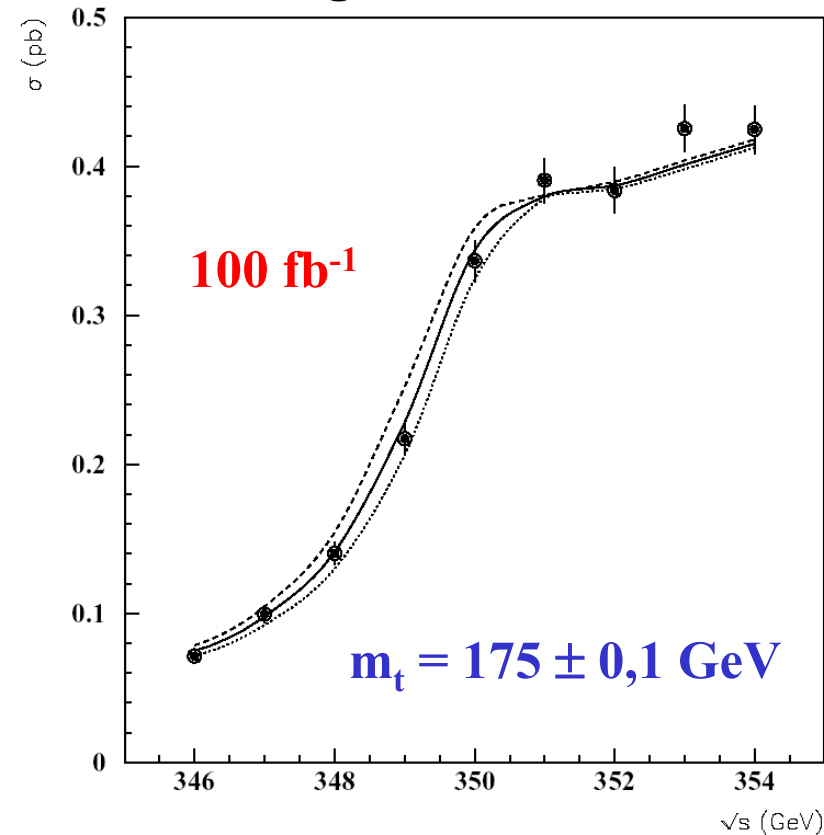
3 Parameter (SM-Werte):

$$g_1^Z = 1 \quad \kappa_\gamma = 1 \quad \lambda_\gamma = 0$$



•Top-Masse

Messung an der Schwelle



$$\Rightarrow \Delta m_t \approx 200 \text{ MeV}$$

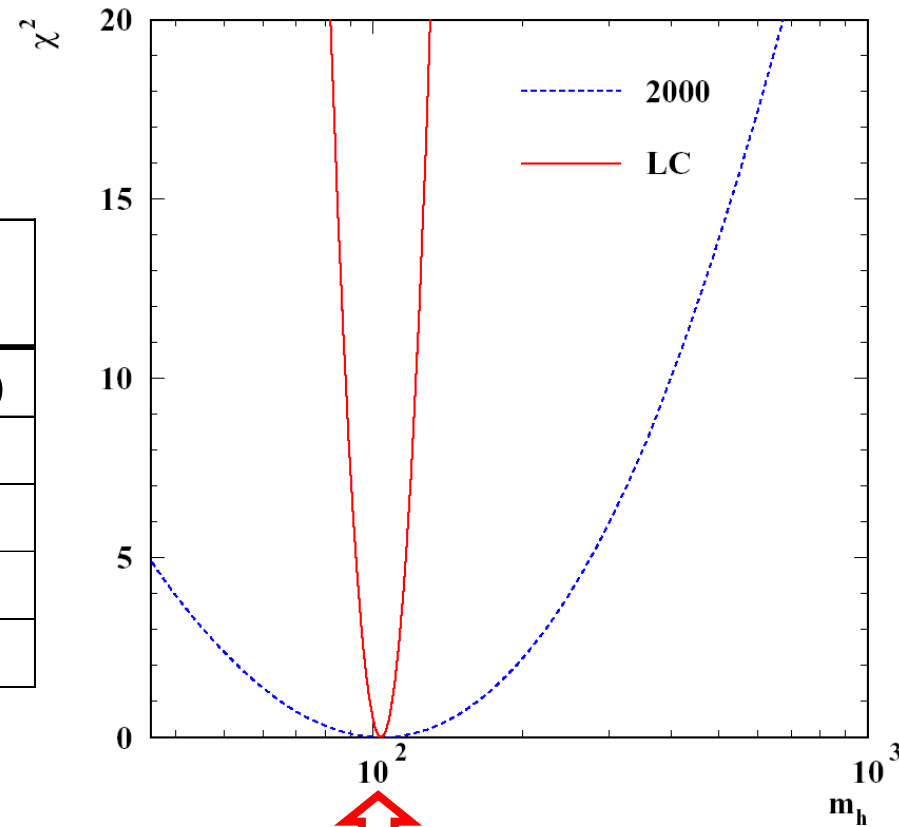
Test der schwachen Strahlungs-korrekturen Δr_W

Giga-Z: Produktion von 10^9 Z- Bosonen

- **100-fache LEP I Statistik**
- **Polarisation (wie SLC)**
- **$30 \text{ fb}^{-1} = 1/2 \text{ Jahr}$**

	LEP/SLC/Tevatron (2001)	Giga-Z
m_Z	$91\,187,5 \pm 2,1 \text{ MeV}$	$(\pm 2,1 \text{ MeV})$
$\sin^2 \vartheta_W$	$0,23152 \pm 0,00017$	$\pm 0,000013$
A_b	$0,898 \pm 0,015$	$\pm 0,001$
R_b	$0,21664 \pm 0,00065$	$\pm 0,00014$
m_W	$80\,363 \pm 32 \text{ MeV}$	$\pm 6 \text{ MeV}$

Vergleich des SM-Fits 2000 mit Giga-Z:



**Vergleich mit direkt
gemessener Higgs-Masse**

Supersymmetrie:

Falls $m_{\text{SUSY}} < 2 \text{ TeV} \Rightarrow$ Entdeckung am LHC

SUSY wird neues Standardmodell

- **Skalare Partner der Fermionen**

$$\tilde{e}_R, \tilde{e}_L, \tilde{\mu}_R, \tilde{\mu}_L, \dots, \tilde{t}_1, \tilde{t}_2$$

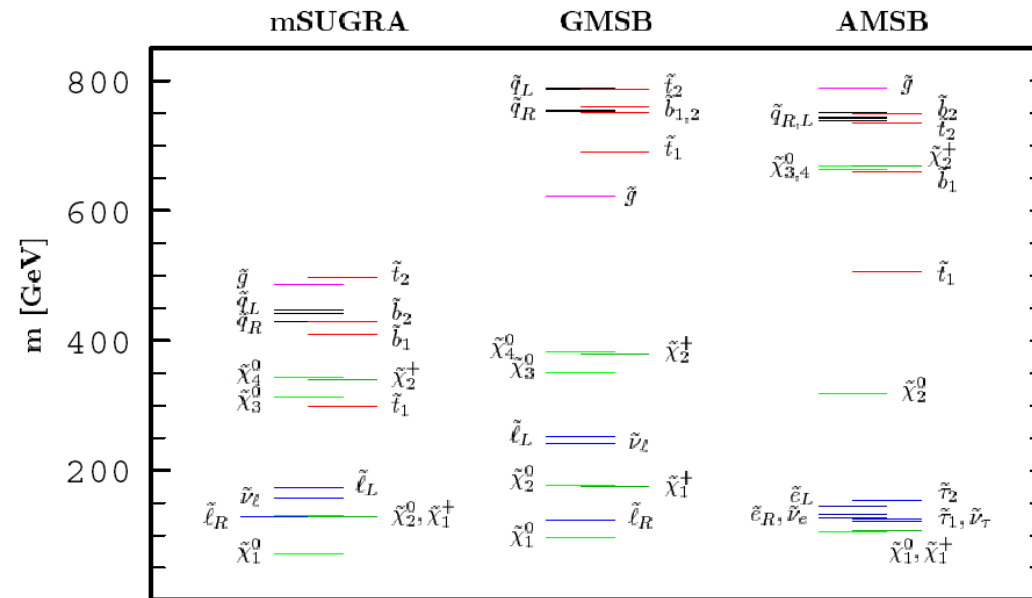
- **Fermionische Partner der Bosonen**

$$\tilde{\chi}^\pm, \tilde{\chi}^0, \dots, \tilde{\chi}_4^0, \tilde{g}$$

- **≥ 2 Higgs-Doublets**

$$h, H, A, H^\pm$$

Mögliche Teilchenspektren:



Vorteile eines Elektron-Positron-Beschleunigers

- **Massenmessung durch Energiescans an der kinematischen Schwelle**
- **Polarisation von Elektronen und Positronen**

Trennung von SUSY-Partnern z.B.: $e_L^+ e_L^- \rightarrow \tilde{e}_L^+ \tilde{e}_L^-$ $e_R^+ e_R^- \rightarrow \tilde{e}_R^+ \tilde{e}_R^-$

Realisierung eines $e^+ e^-$ -Linearbeschleunigers:

Konzepte für Linearbeschleuniger ($\sqrt{s} = 500 \text{ GeV} - 1 \text{ TeV}$)

	TESLA	NLC	JLC-X	JLC-C	SLC
G_{acc} [MV/m]	23.5	48	50.2	36	17
f_{rep} [Hz]	5	120	150	100	
N_b	2820	190	190	142	
ΔT_b [ns]	337	1.4	1.4	2.8	
	head on	angle	angle	angle	
$N_e/bunch$ [10^{10}]	2	.75	0.7	1.11	
$\sigma_{x/y}^*$ [nm]	553/5	245/2.7	239/2.57	318/4.3	./500
δ_E [%]	3.2	4.7	5.3	3.9	0.03
\mathcal{L} [$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	3.4	2	2.64	1.3	$3 * 10^{-4}$
P_{beam} [MW]	22.6	13.2	17.6	12.6	.04
$P_{AC}(linacs)$ [MW]	97	132	141	220	
L_{tot} [km]	33	30	16	linac 19	
Upgrade path to .8-1 TeV	Gradient 35 MV/m	double cavities	double length	double length	

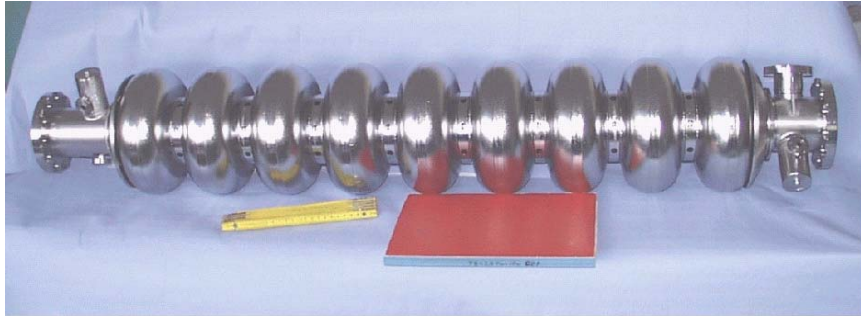
- **Kavitäten:** supraleitend normalleitend
- **Hochfrequenz:** 1,3 GHz X- (11,4 GHz) oder C-Band (5,7 GHz)

• **Höhere Energien ($\sqrt{s} = 5 \text{ TeV}$)**

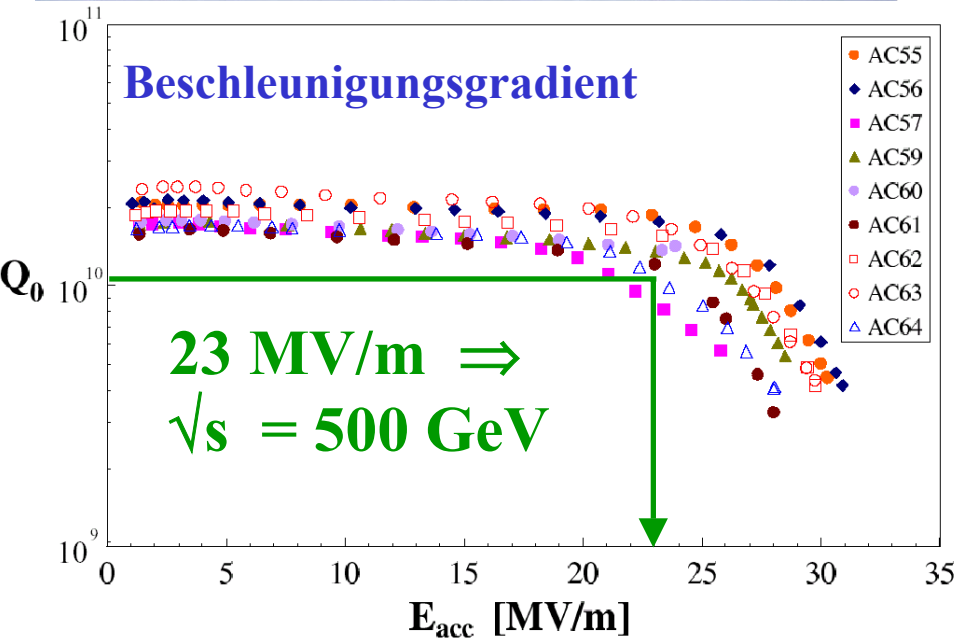
CLIC: Beschleunigung durch Drive-Beam

TESLA-Projekt (DESY): Technical Design Report März 2001

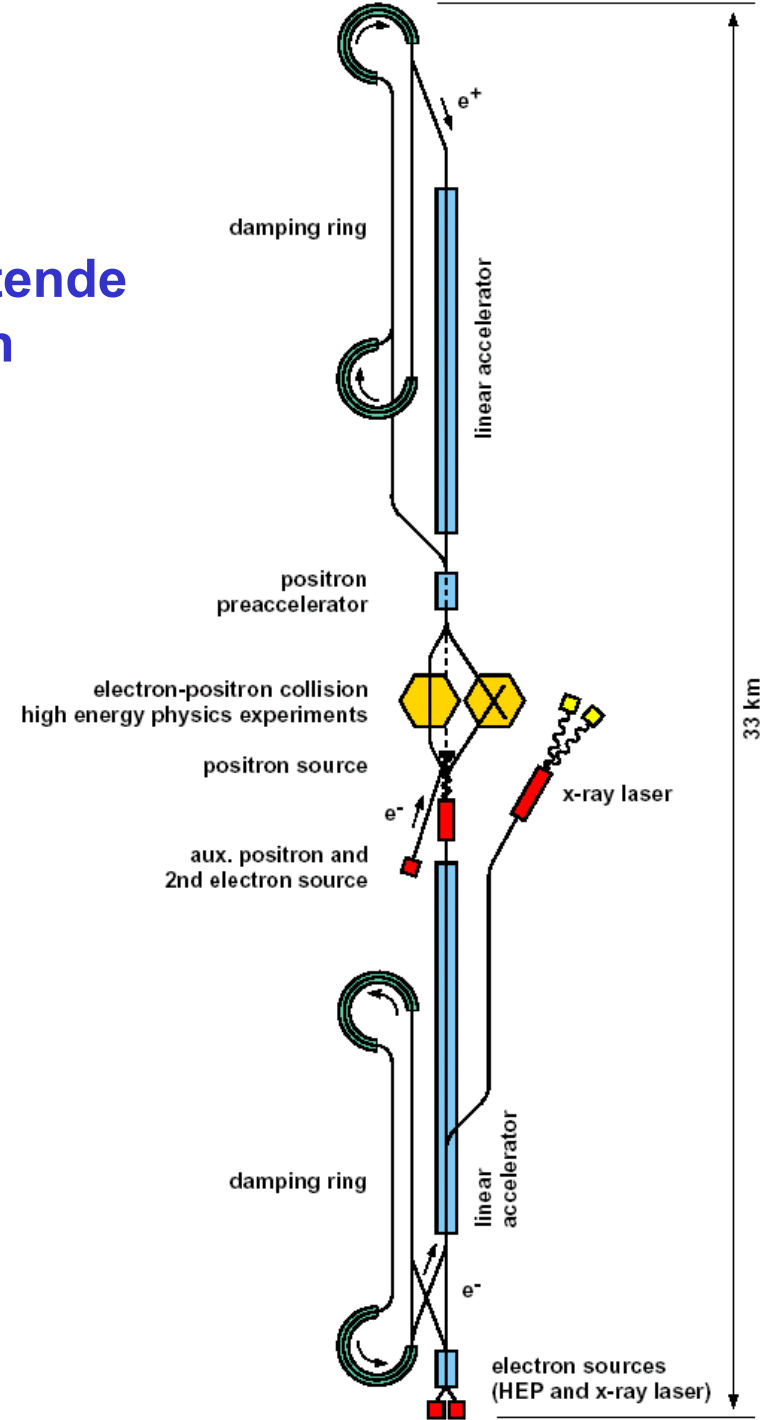
• Schwerpunktsenergie



Supraleitende Kavitäten



$35 \text{ MV/m} \Rightarrow \sqrt{s} = 800 \text{ GeV}$
erreichbar durch Electropolishing,
Hydroforming, Spinning



• Luminosität

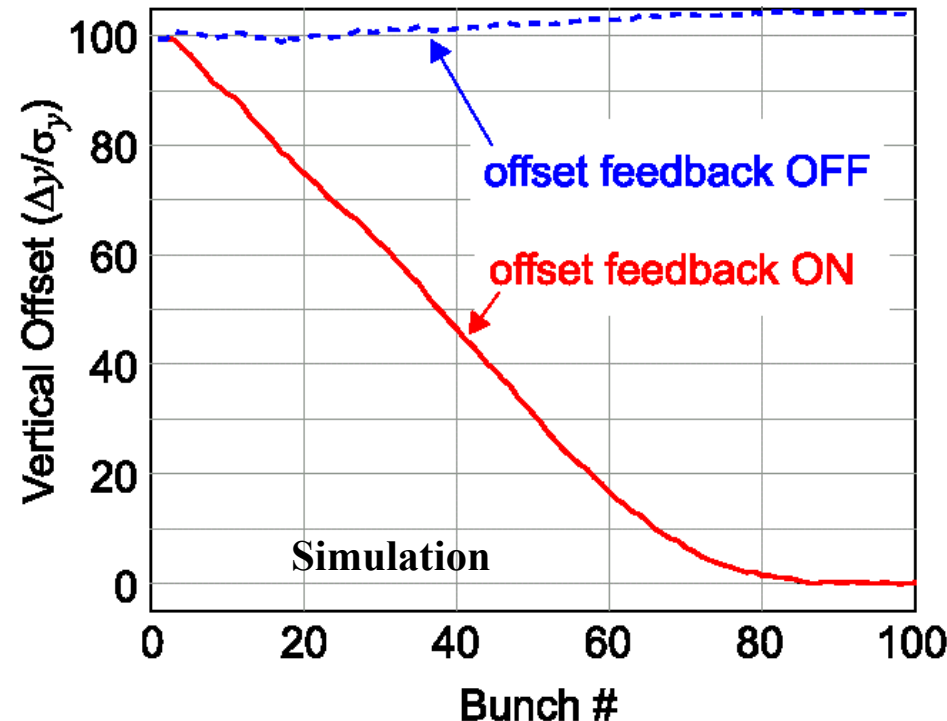
$$L = \frac{n_b N_e^2 f_{\text{rep}}}{4\pi \sigma_x^* \sigma_y^*} \times H_D$$

n_b Zahl der Bunche/Puls
 N_e Elektronen/Bunch
 f_{rep} Pulsrate
 H_D Erhöhungszahl (≈ 2)
 $\sigma_{x(y)}^*$ Strahldimension

➡ **Starke Fokussierung am Wechselwirkungspunkt**

$$\sigma_x^* = 550 \text{ nm} \quad \sigma_y^* = 5 \text{ nm}$$

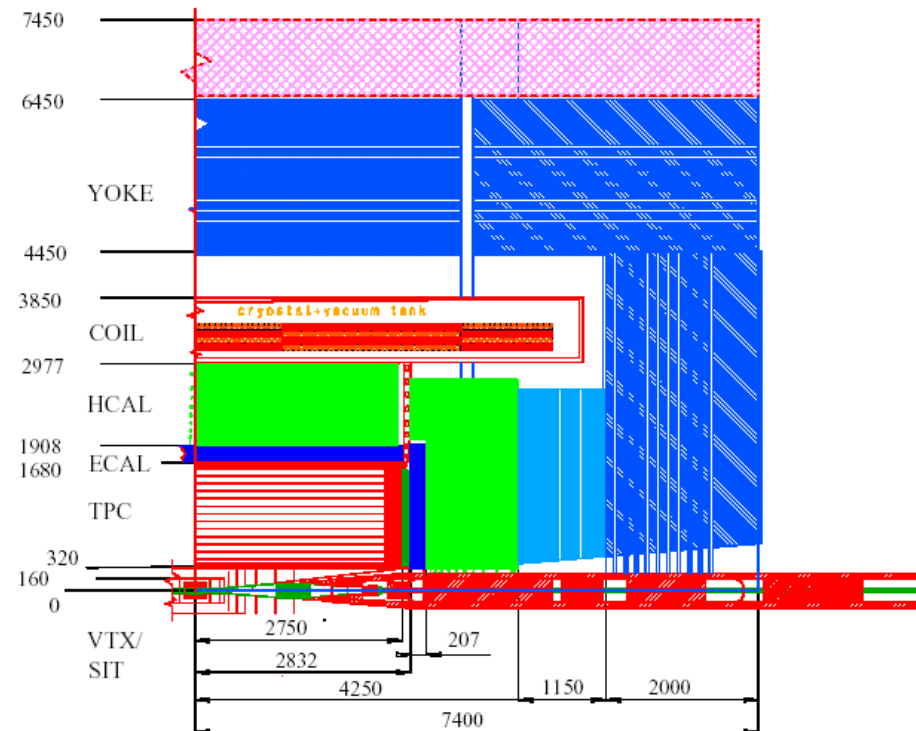
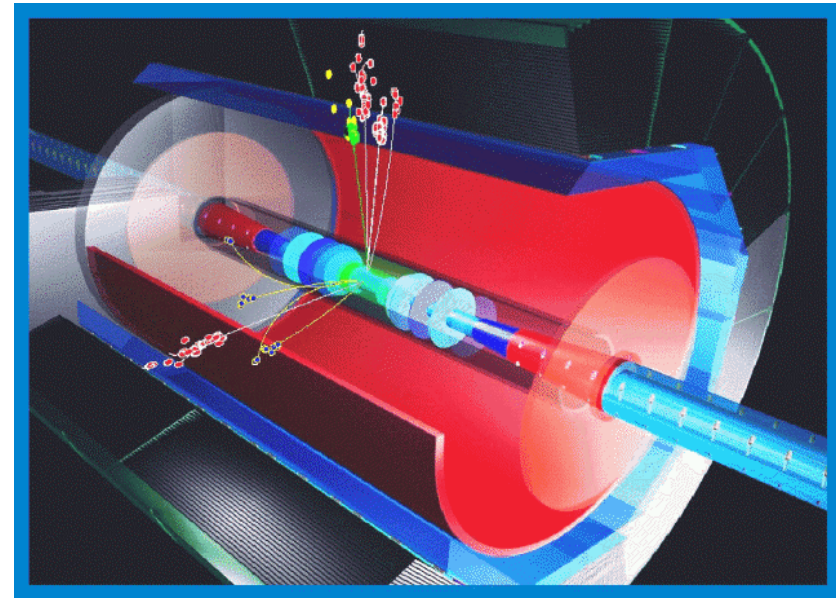
- **Erzeugung kleiner Bunche:**
Final-Focus-Test (SLAC/DESY)
- **Kollision der Strahlpakete:**
Schnelles Rückkopplungssystem
(Bunchabstand: 337 ns)
- **nutze Strahlablenkung/aufweitung nach Kollision**
- **Kickermagnet, Piezo-Kristalle**



Detektor R&D für einen $e^+ e^-$ - Linearbeschleuniger

Warum neuer $e^+ e^-$ -Detektor?

- höhere Energie
- komplexere Endzustände
 $e^+ e^- \rightarrow ZHH \rightarrow 6 \text{ Jets/Leptonen}$
- Auflösung
 $e^+ e^- \rightarrow ZH \rightarrow e^+ e^- (\mu^+ \mu^-) + X$
SUSY (fehlende Energie)
- Beschleuniger
Untergrund, Luminosität,
Bunch-Abstand
- ...wir wollen den besten
Apparat bauen...



Beispiel: Time Projection Chamber (TPC)

Problem: Ionenrückdrift

LEP: Gating zwischen Bunchen

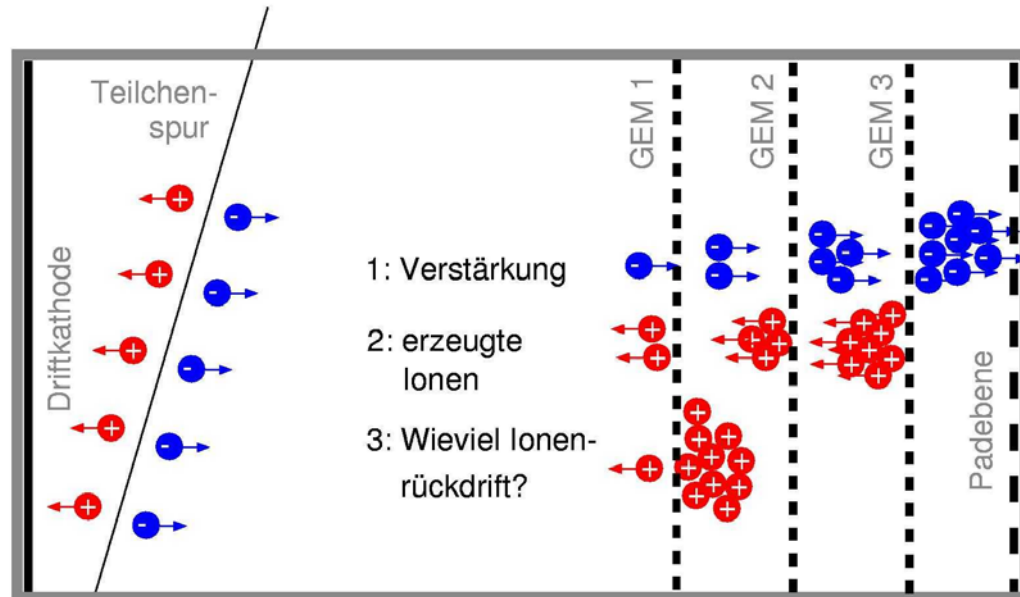
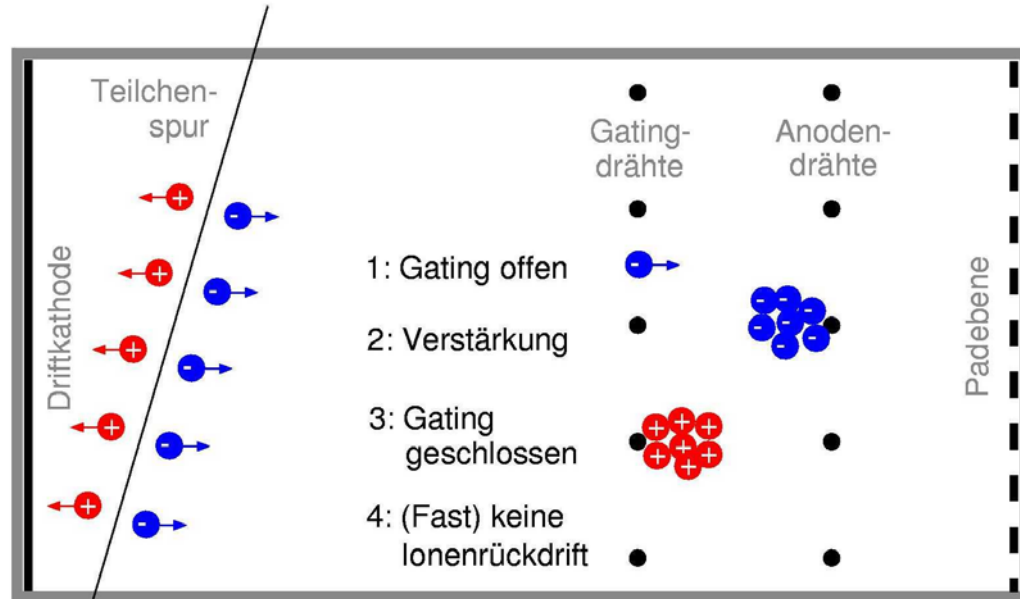
$$\Delta t = 11(22) \mu\text{s}$$

TESLA: Länge eines Makropulses

$$2820 \times 337 \text{ ns} \approx 1 \text{ ms}$$

Gasverstärkung durch GEMs:

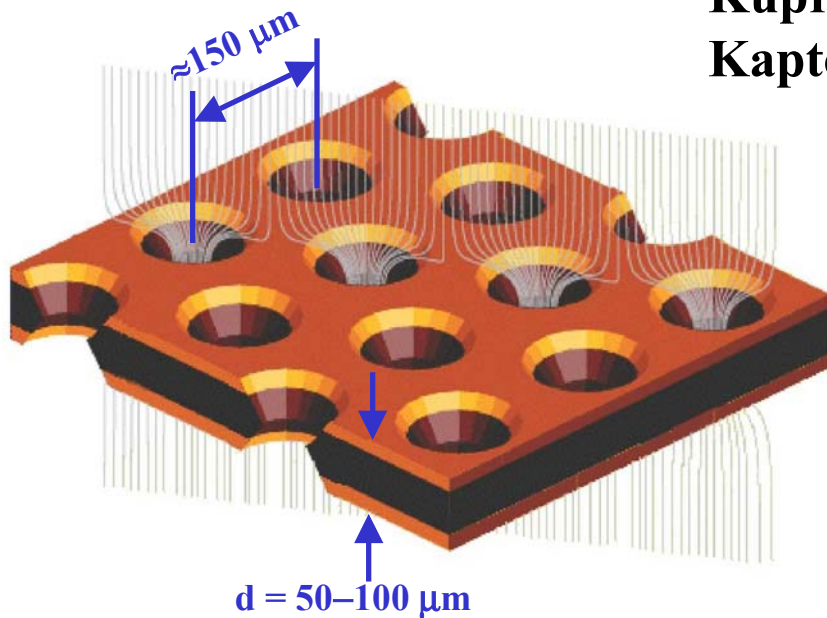
- inhärente Unterdrückung der Ionenrückdrift
- bessere Ortsauflösung durch kleinere Strukturen



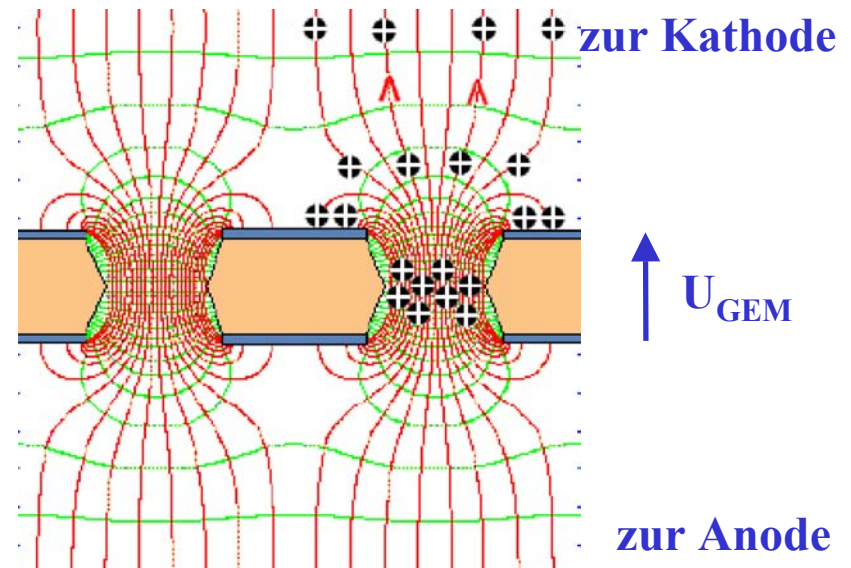
GEM: Gas Electron Multiplier

(F. Sauli et al., CERN)

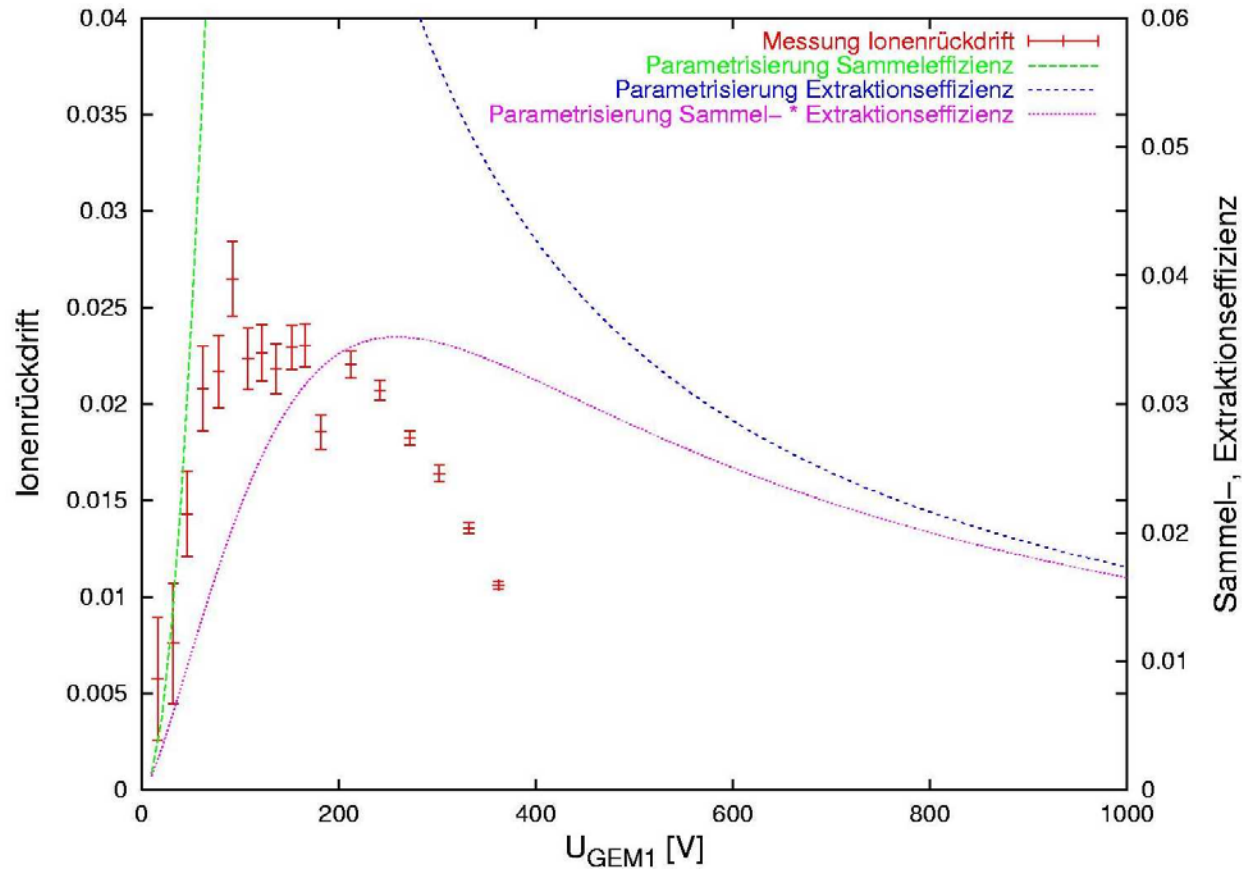
Kupferbeschichtete
Kapton-Folie



- $U_{\text{GEM}} \approx 250 - 400 \text{ V}$
- Gasverstärkung im hohen elektrischen Feld der Löcher
- eingebaute Unterdrückung der Ionenrückdrift



Messungen der Ionenrückdrift an Doppel-GEM-Strukturen



- Nur 1-2% der Ionen aus Gasverstärkung ($\approx 10^4$) erreichen den Driftraum
- Weitere Reduzierung durch Optimierung möglich

Zusammenfassung:

Elektron-Positron-Beschleuniger:

- Standardmodell getestet auf „1-Loop-Level“
- Begrenzung der Higgs-Masse

$$m_H < 196 \text{ GeV} \quad (\text{Strahlungskorrekturen})$$

$$m_H > 114,1 \text{ GeV} \quad (\text{direkte Suche})$$

Hadron-Beschleuniger:

- Entdeckung des Higgs-Bosons (Tevatron oder LHC)

$e^+ e^-$ - Linearbeschleuniger:

- experimentelle Verifikation des Higgs-Mechanismus
Kopplungen, Potential
- Konsistenzprüfungen des SM (Giga-Z)
- oder des Standardmodells nach dem LHC...

Der $e^+ e^-$ - Linearbeschleuniger ist technisch realisierbar!