

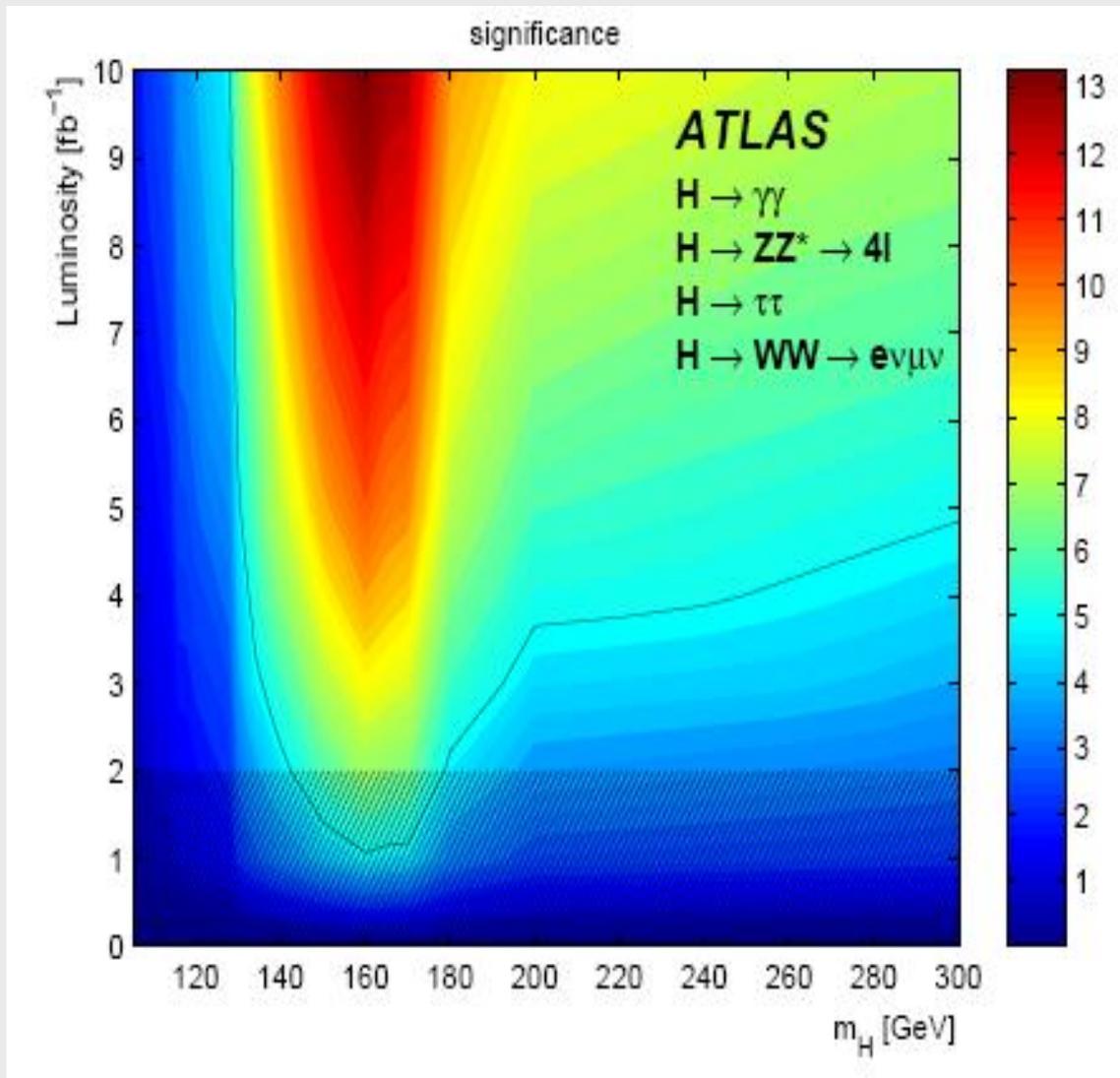
Higgs-Physik und Phänomenologie jenseits des Standardmodells

Dr. Jochen Dingfelder und Prof. Markus Schumacher
Freiburg / Sommersemester 2009

Kapitel 1: Higgs-Physik im Standardmodell

- 1.1 Theorie und Phänomenologie**
- 1.2 Stand der Suche und Entdeckungspotenzial am LHC**
- 1.3 Untersuchung des Higgs-Sektors am LHC und ILC**
- 1.4 Probleme des SM-Higgs-Sektors und möglicher
Erweiterungen und Alternativen**

Potenzial für Higgs-Suchen mit ATLAS am LHC



Falls ein SM-artiges Higgs in der Natur realisiert ist, wird der LHC es nach wenigen Jahren entdecken“

LHC/ATLAS:

Expected Performance of the ATLAS Experiment : Detector, Trigger and Physics

By ATLAS Collaboration, arXiv:0901.0512; CERN-OPEN-2008-020

LHC/CMS:

CMS Physics TDR: Volume II (PTDR2), Physics Performance

CERN-LHCC-2006-021, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 34 995-1579,

Übersichtsartikel:

a) Higgs bosons at the LHC

by Karl Jakobs, Eur.Phys.J.C59:463-495,2009.

b) Prospects for Higgs Boson Searches at LHC,

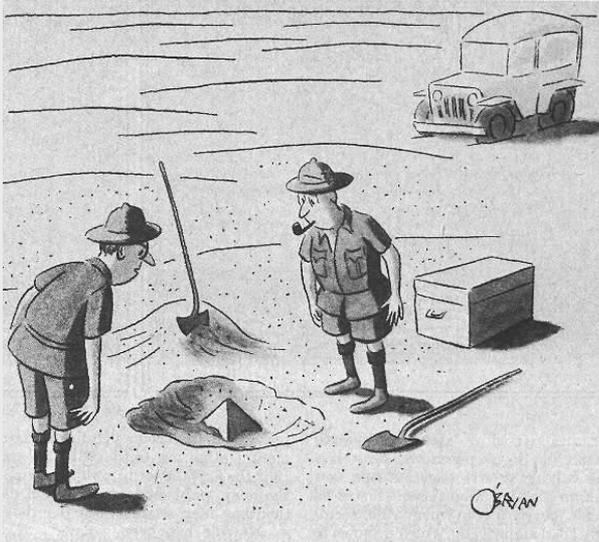
Karl. Jakobs u. Markus Schumacher,

Int. Journal of Mod. Physics A, Volume 23, Issue 32, (2008) 5093

<http://db0.worldscinet.com/worldsci->

[staging/Files/20090428175625625906%5B500372@132.230.190.158%5D@page.pdf](http://db0.worldscinet.com/worldsci-staging/Files/20090428175625625906%5B500372@132.230.190.158%5D@page.pdf)

Entdeckung ist nur der erste Schritt



"This could be the discovery of the century. Depending, of course, on how far down it goes."



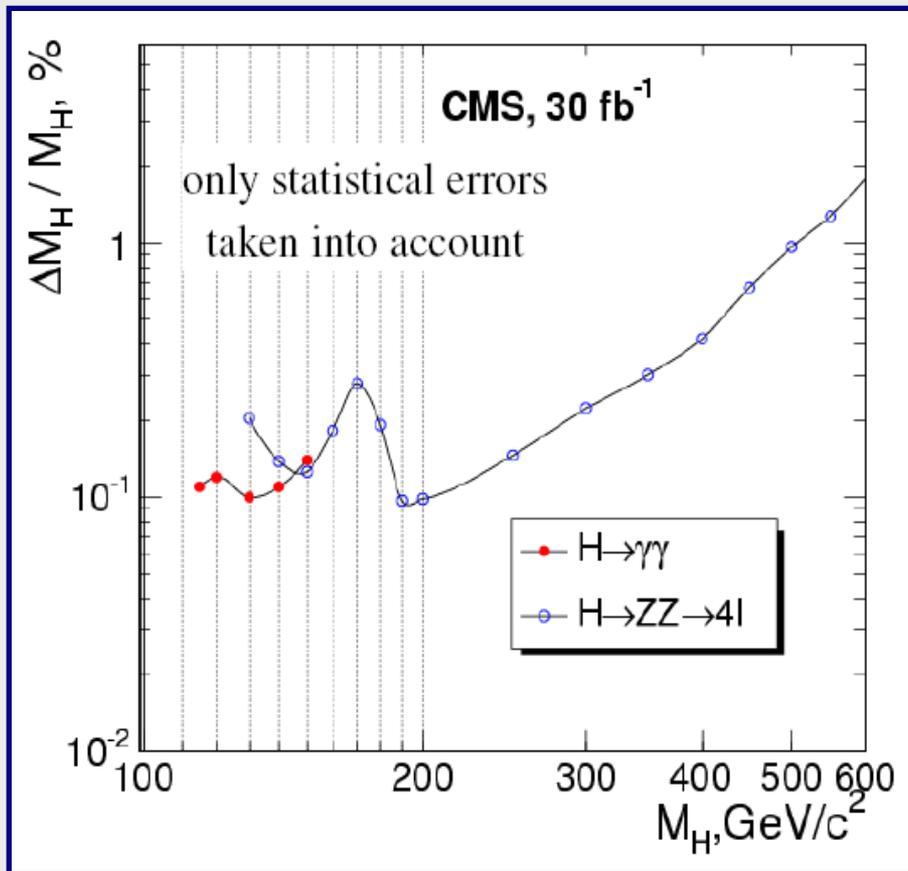
- ist es wirklich ein Higgs-Boson?
 - ist es der Begleiter der Massenerzeugung?
 - ist die Symmetrie spontan gebrochen?
 - ist es das Higgs-Boson des SM?
-
- Bestimmung der Masse
 - Profil im SM festgelegt
 - Spin = 0 ? CP = + ?
 - Kopplung \sim Masse?
 - Selbstwechselwirkung?
 - Konsistenz oder Abweichung vom SM?

Bestimmung der Masse

- Genauigkeit ideal gegeben durch: Massenauflösung/SQRT(Signal)

- Systematische Effekte:

- Kenntnis der absoluten Energieskala (Bias?)
- Kenntnis des Untergrundes und dessen Form



- wichtigste Zerfälle

$H \rightarrow gg$ $S/B = 1/40$

$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ $S/B \sim O(1)$

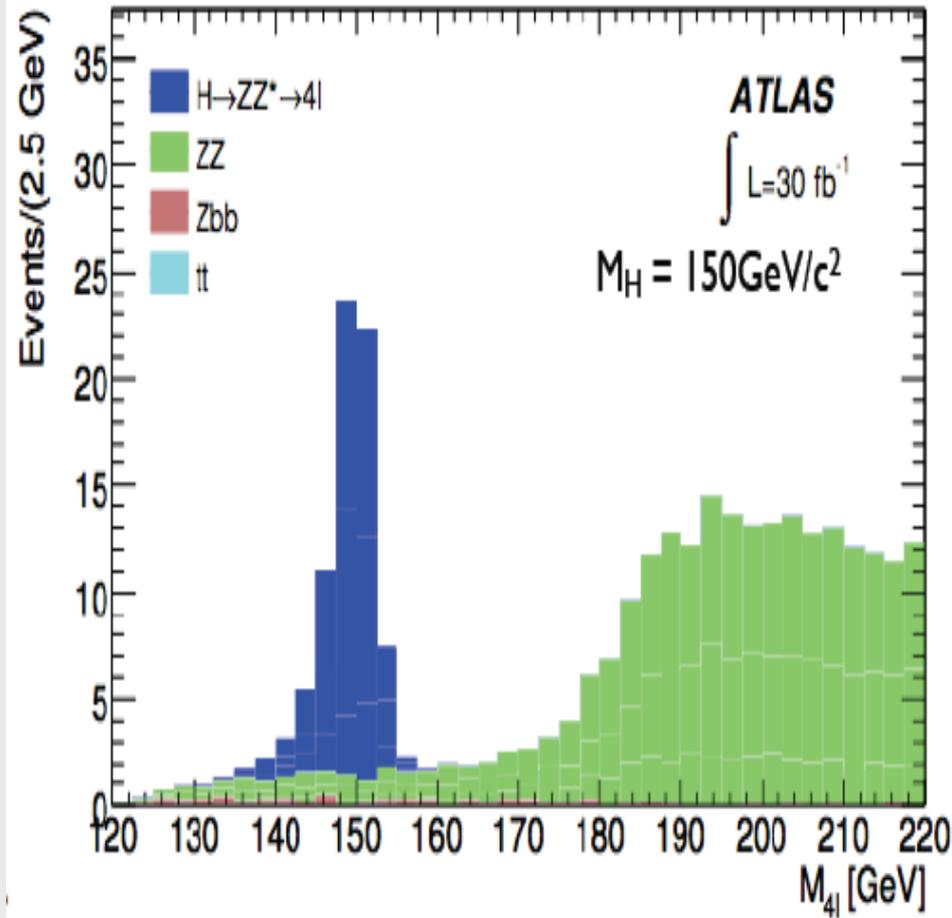
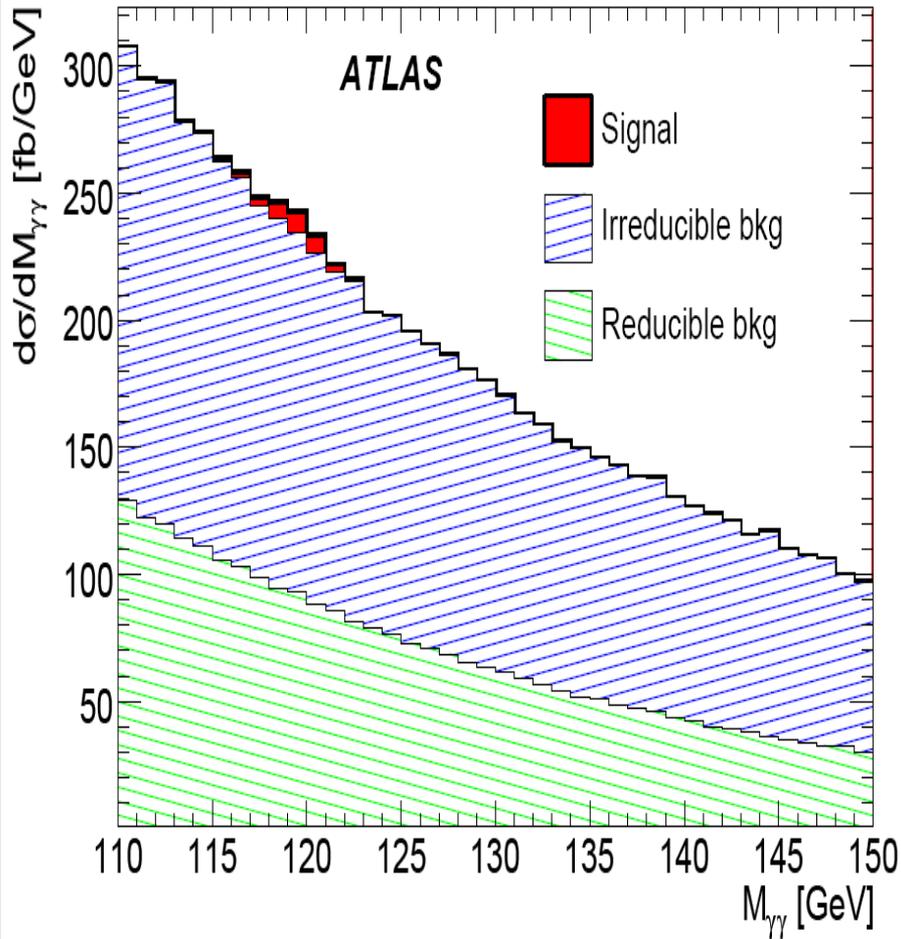
- Massenauflösung $\Delta M/M \sim 1.5\%$

- Genauigkeit für 30fb-1

0.1 bis 1 %

(ohne syst. Unsicherheit)

Sensitivste Kanäle für Massenmessung



- relative Massenauflösung $\sim 1.5\%$
- zum Vergleich: $H \rightarrow \tau\tau$ 10% und $H \rightarrow b\bar{b}$ 15%

Bestimmung der Masse des Higgs-Boson: mehr Daten

■ **Direkt** aus Massen-Peak:

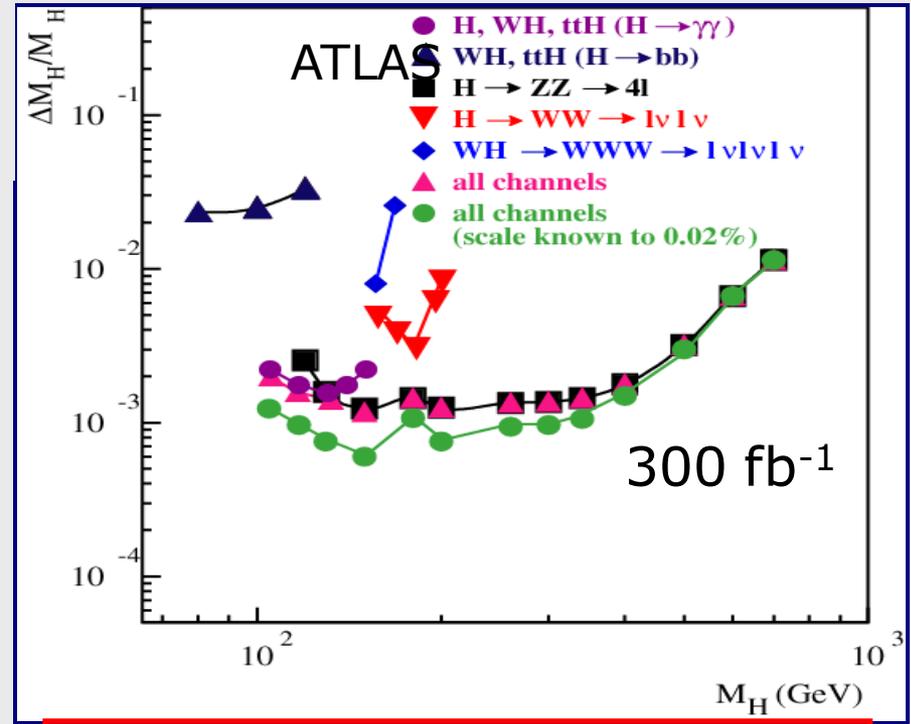
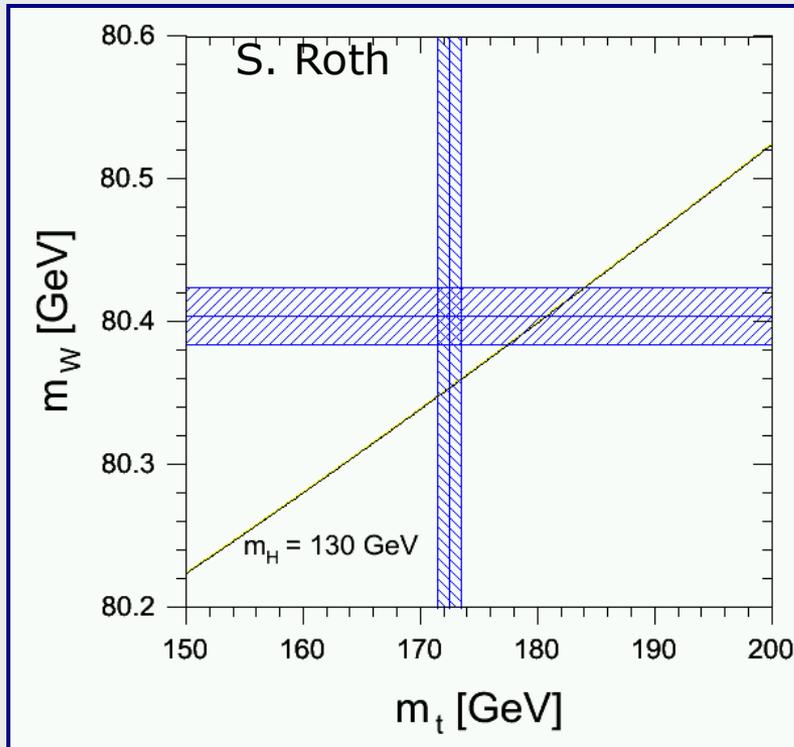
$H \rightarrow \gamma\gamma$ **$H \rightarrow bb$** **$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$**

(energy scale 0.1 (0.02)% for l, γ , 1% for jets)

❖ "Indirekt"

aus transversaler Masse:

$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ **$WH \rightarrow WWW \rightarrow l\nu l\nu l\nu$**



$\Delta M/M$: 0.1% to 1%

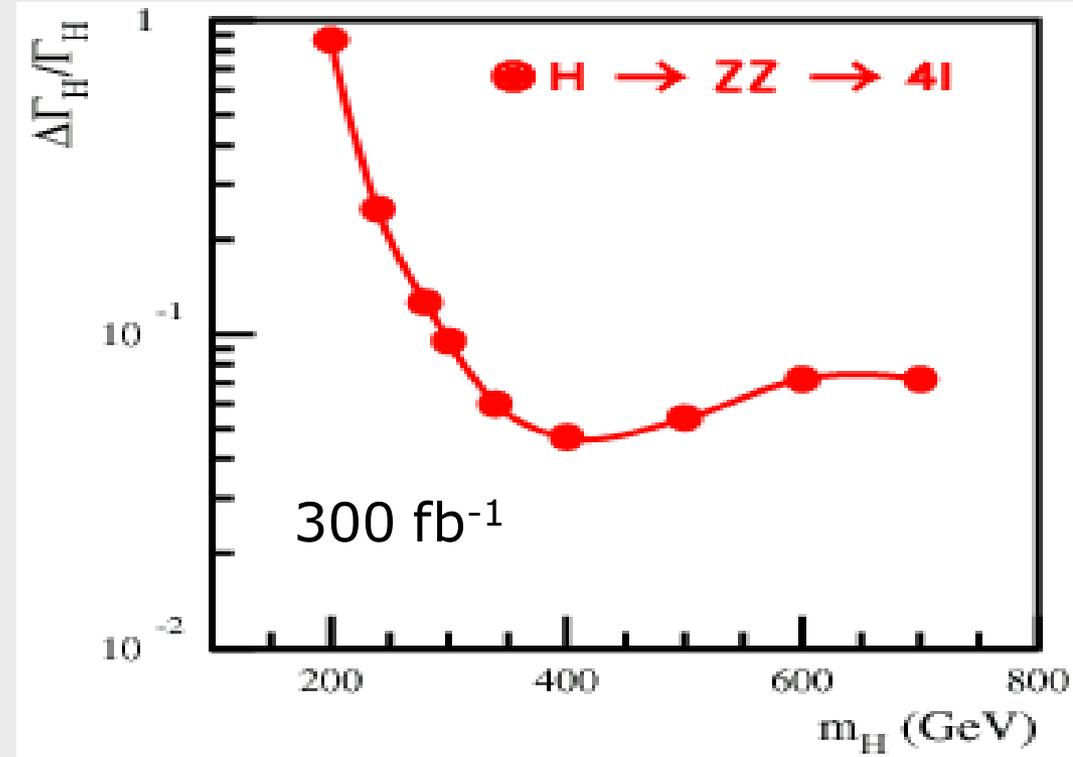
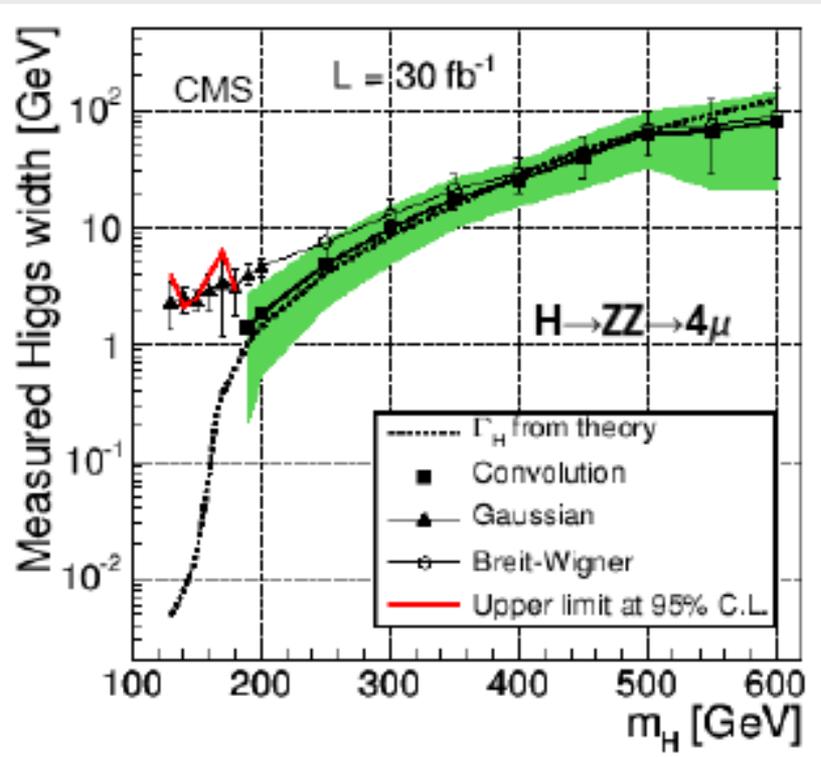
inkl.sys. Unsicherheit

Genau Messung der Masse

→ Konsistenztest des
Standardmodells

Bestimmung der totalen Breite

- aus Massen-Peak wenn natürliche Breite \sim Massenauflösung

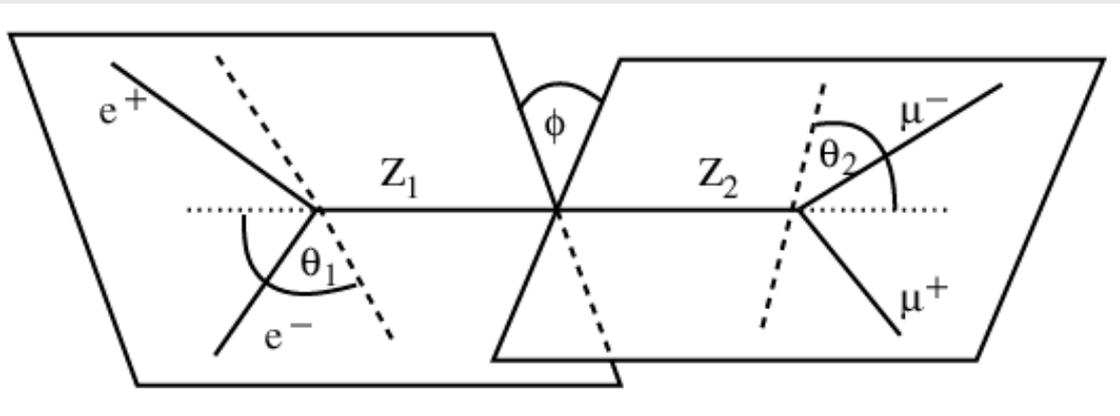


- nur möglich in $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4$ Leptonen für $M_H > 200$ GeV

- Beobachtung von $H \rightarrow \gamma\gamma$ or $gg \rightarrow H$ schliessen Spin=1 aus
(Young-Landqau Theorem: Spin1 Teilchen können nicht an ein paar masseloser identischer Spin 1 Teilchen koppeln)
und fixieren C auf +
- Spin= 0 \rightarrow flache Verteilung der Zerfälle im Higgs-Ruhesystem
generell: andere Spinthesen ändern Winkelverteilungen
- CP-Eigenschaften \rightarrow transversale Spinkorrelationen
brauchen Spinanalysator
 \rightarrow instabile Teilchen im Higgs-Bosonzerfall z.B. $H \rightarrow ZZ$ oder $H \rightarrow \tau\tau$
 \rightarrow assoziierte Produktion mit anderen Teilchen

Analyse von $H \rightarrow ZZ$ am LHC

Ruhesystem des Higgs-Bosons



Φ : Winkel zwischen den Zerfallsebenen

Θ : Winkel zwischen Lepton und Z-Flugrichtung im Z-Ruhesystem

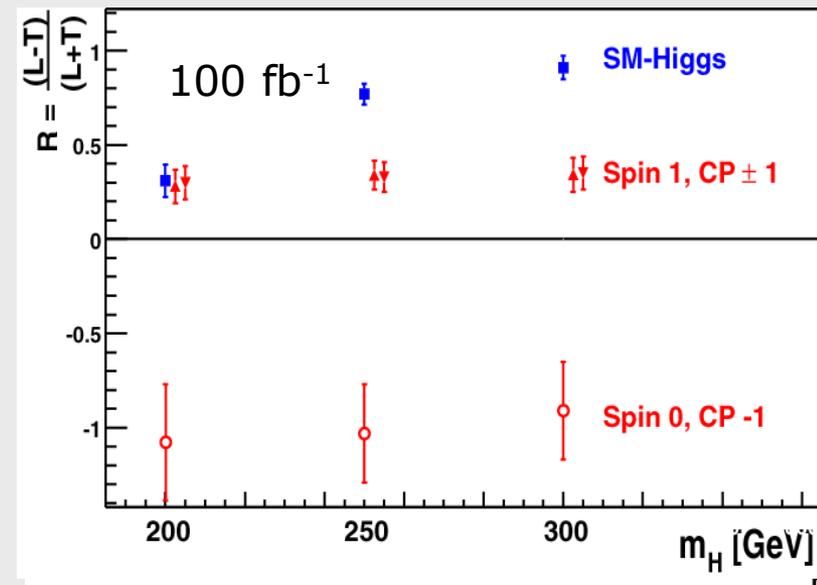
(Gottfried Jackson-Winkel

■ diese Winkelverteilungen abhängig von Spin und CP-Quantenzahlen

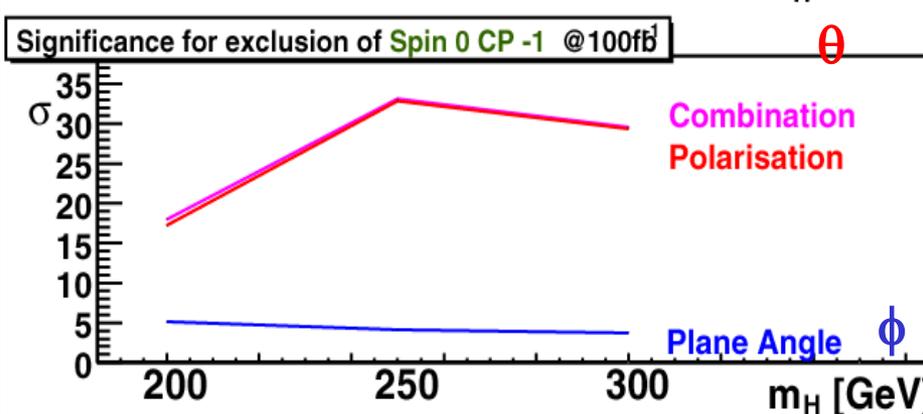
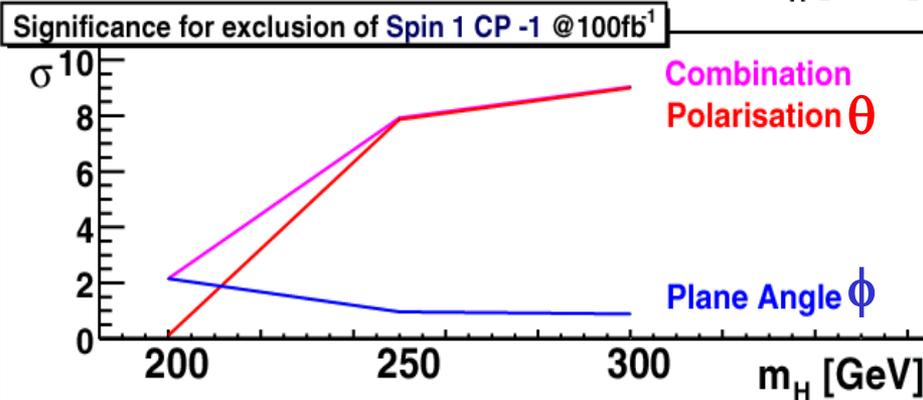
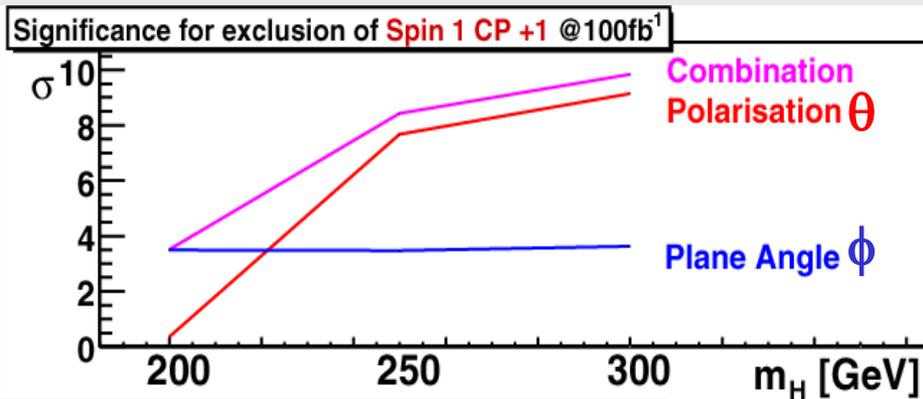
$$G(\theta) = L \sin^2(\theta) + T(1 + \cos^2(\theta))$$

L (T) Anteil von longitudinal (transversal) polarisierten Z-Bosonen

$$R = \frac{L - T}{L + T}$$



Spin und CP: Unterscheidungsvermögen



- Unterscheidung dominiert durch θ für masses > 250 GeV
- Unterscheidung $> 2 \sigma$ für alle Spin, CP Hypothesen und $M_H > 200$ GeV

Struktur des HVV Vertex

- Vertex zwischen Higgs-Bosonen elektroschwachen Eichbosonen

$$\text{SM Higgs} \quad \mathcal{L}_I \sim HV_\mu V^\mu$$

+ neu Terme in effektiver Lagrangedichte:

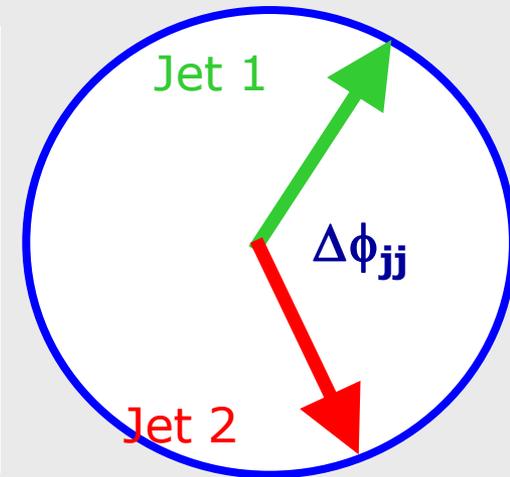
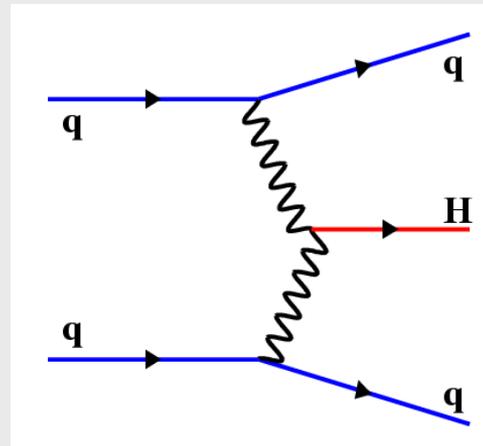
$$\text{CP even} \quad \mathcal{L}_{eff} \sim HV_{\mu\nu} V^{\mu\nu}$$

$$\text{CP odd} \quad \mathcal{L}_{eff} \sim HV_{\mu\nu} \tilde{V}^{\mu\nu}$$

- sensitivste Observable:

Differenz im Azimutwinkel
der Taggingjets

in der Vektorbosonfusion $\Delta\phi_{jj}$

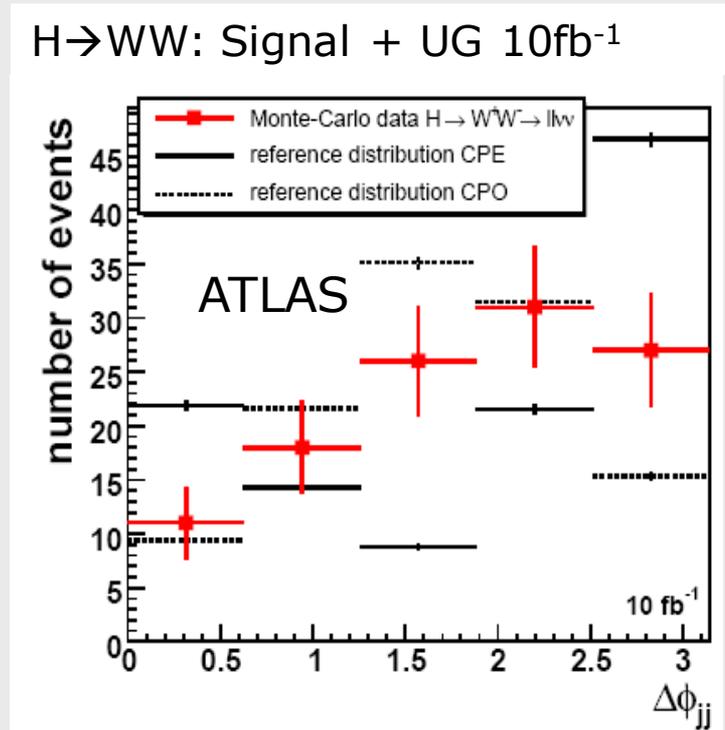
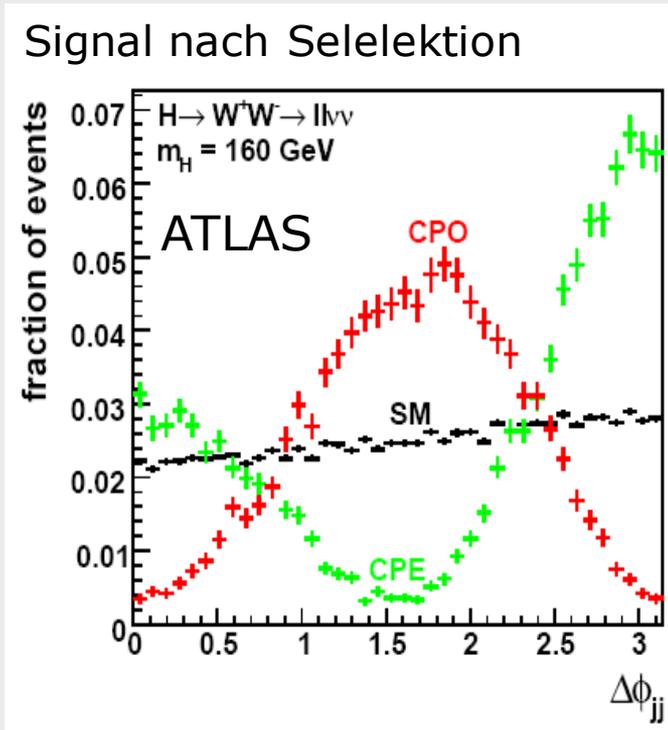


- Untersuchung in zwei Schritten

- 1) Dominanter Kopplungsterm? reines SM o. CP gerade o. CP ungerade
- 2) SM + kleine anomaler Beitrag

CP-Quantenzahl

- wenn SM-Form dominant \rightarrow skalares Feld besitzt vev ("Higgs")
- wenn CP erhalten: CP der Kopplung = CP Quantenzahl des Teilchens



- Sensitivität für Ausschluss von CPE/CPO- nicht SM-Beiträgen

$H \rightarrow WW$ (160 GeV): $\sim 5 \sigma$ mit 10 fb^{-1}

$H \rightarrow \tau\tau$ (120 GeV): $\sim 2.5 \sigma$ mit 30 fb^{-1}

Bestimmung der Kopplungen

Bornniveau-Kopplungen:

Fermionen $g_f = m_f / v$

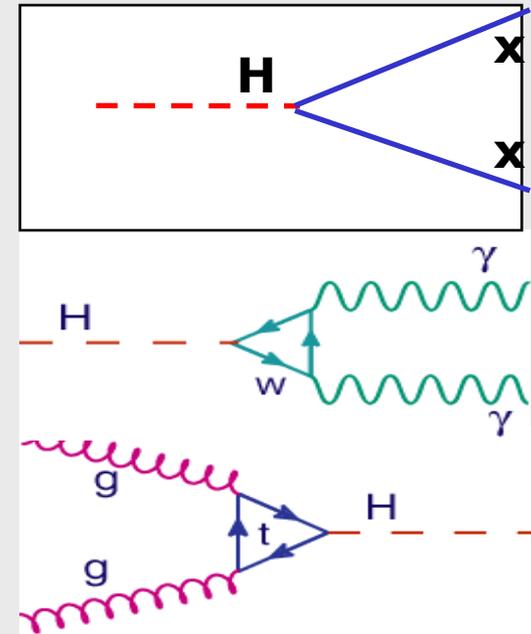
W/Z Bosonen: $g_V = 2 M_V^2 / v$

Schleifeninduzierte Kopplungen:

(sensitiv auf neue Physik)

Photon: $g_\gamma = g_W \text{ "+" } g_t \text{ "+" } \dots$

Gluon: $g_g = g_t \text{ "+" } g_b \text{ "+" } \dots$



■ Kopplungen in Produktion $\sigma_{Hx} = \text{const} \times \Gamma_{Hx}$ u. Zerfall $\text{BR}(H \rightarrow \gamma\gamma) = \Gamma_{H\gamma} / \Gamma_{\text{tot}}$

■ Experiment: nur Ereignisraten

■ Schwierigkeiten:

- Trennung der Beiträge von Produktion und Zerfall

- Bestimmung der gesamten Zerfallsbreite

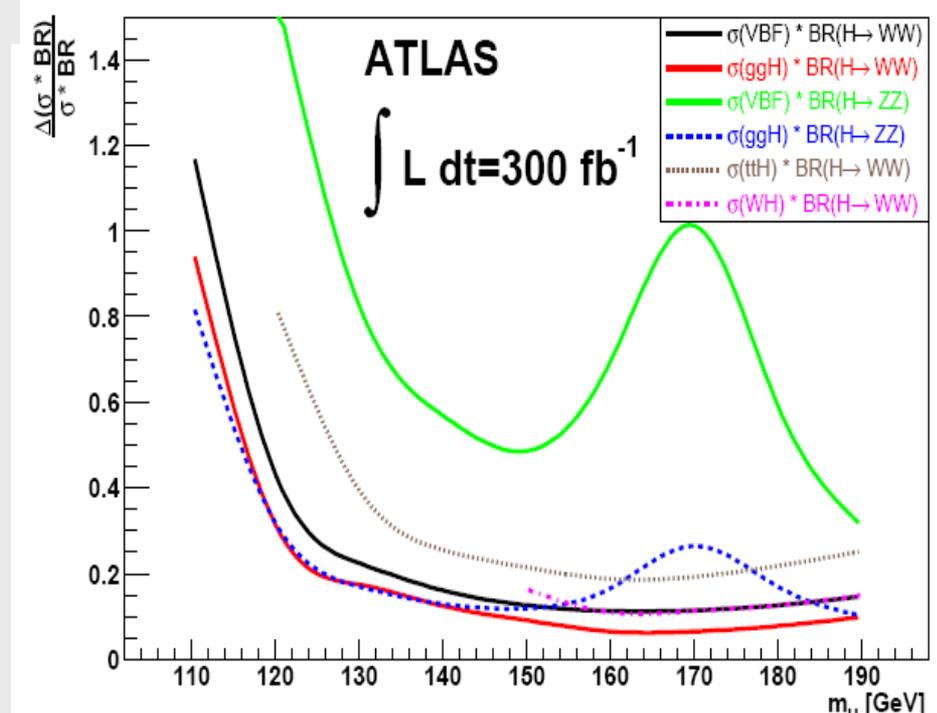
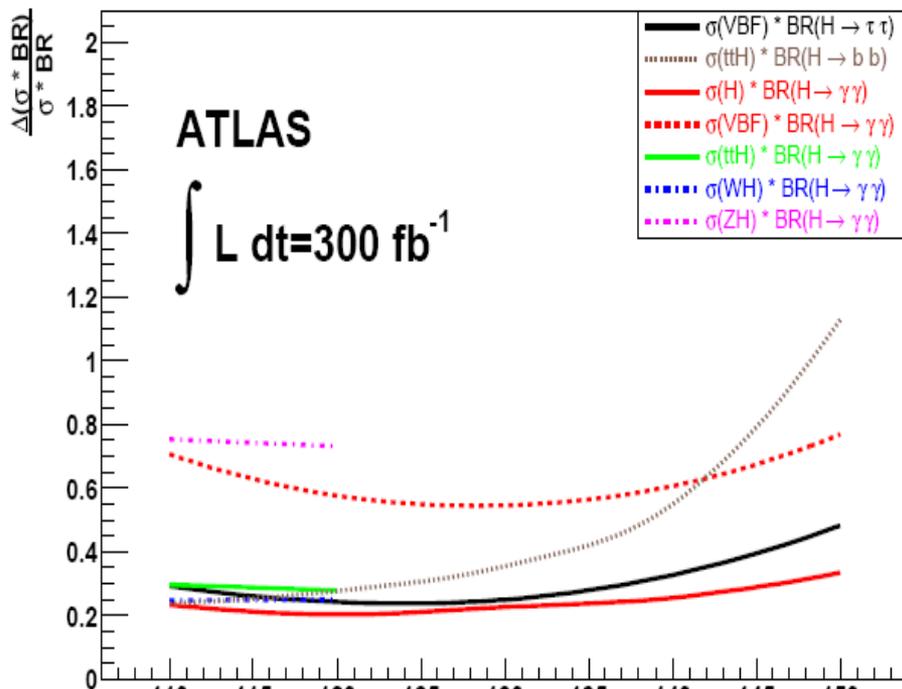
z.B. alle bekannten Partialbreiten Faktor 2 grösser und neue

Zerfallsbreite mit 50% totale SM-Zerfallsbreite

→ totale Breite = 4x SM und alle Raten gleich

Bestimmung der Ereignisraten

- **Signalraten:** $\text{Signal} = N_{\text{OBS}} - N_{\text{BG}} = (\text{eff}_{\text{VBF}} \sigma_{\text{VBF}} + \text{eff}_{\text{GGF} \rightarrow \text{VBF}} \sigma_{\text{GGF}}) \times \text{lumi.}$
braucht:
 - Effizienzen für Signal und Übersprechen
 - Untergrund (aus Seitenbändern, Kontrolldatensätzen)
 - Luminosität



- Bestimmung mit Genauigkeiten von bis zu 10%
- hier noch alte vielversprechende ttH, H→bb Studie
- mit 300 fb⁻¹: Faktor 2 Verbesserung, VBF-Kanäle nur mit 30fb⁻¹

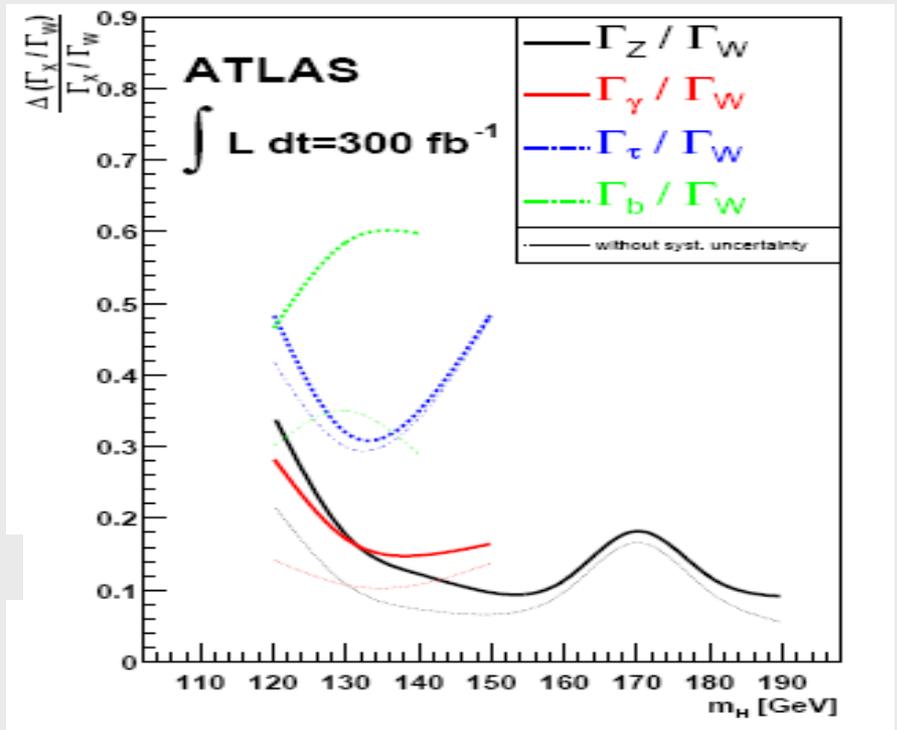
Bestimmung der Verhältnisse von Zerfallsbreiten

- totale Zerfallsbreite eliminiert
 - in Verhältnissen von Raten mit gleichem Zerfall o. Produktion
 - Redundanz in 13 Analysen

$$\frac{\sigma_{\text{VBF}} \times \text{BR}(H \rightarrow WW)}{\sigma_{\text{VBF}} \times \text{BR}(H \rightarrow \tau\tau)} = \frac{\Gamma_W \Gamma_W \Gamma_{\text{tot}}}{\Gamma_W \Gamma_\tau \Gamma_{\text{tot}}} = \frac{\Gamma_W}{\Gamma_\tau}$$

$\frac{\text{BR}(H \rightarrow ZZ)}{\text{BR}(H \rightarrow WW)} \equiv \frac{\Gamma_Z}{\Gamma_W}$	$(\sigma \cdot \text{BR})_{gg \rightarrow H(H \rightarrow WW)}$
$\frac{\text{BR}(H \rightarrow \gamma\gamma)}{\text{BR}(H \rightarrow WW)} \equiv \frac{\Gamma_\gamma}{\Gamma_W}$	$(\sigma \cdot \text{BR})_{qqH(H \rightarrow WW)}$
$\frac{\text{BR}(H \rightarrow WW)}{\text{BR}(H \rightarrow WW)} \equiv \frac{\Gamma_W}{\Gamma_W}$	$(\sigma \cdot \text{BR})_{t\bar{t}H(H \rightarrow WW)}$
$\frac{\text{BR}(H \rightarrow \tau\tau)}{\text{BR}(H \rightarrow WW)} \equiv \frac{\Gamma_\tau}{\Gamma_W}$	$(\sigma \cdot \text{BR})_{WH(H \rightarrow WW)}$
$\frac{\text{BR}(H \rightarrow WW)}{\text{BR}(H \rightarrow WW)} \equiv \frac{\Gamma_W}{\Gamma_W}$	$(\sigma \cdot \text{BR})_{ZH(H \rightarrow WW)}$
$\frac{\text{BR}(H \rightarrow b\bar{b})}{\text{BR}(H \rightarrow WW)} \equiv \frac{\Gamma_b}{\Gamma_W}$	

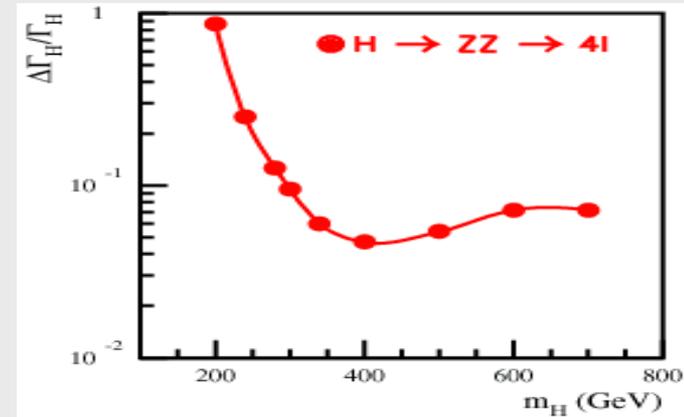
alle Signalaraten durch 9 Parameter



- Normiert auf Partialbreite für $H \rightarrow WW$, weil am besten bestimmbar
- Genauigkeit für Eichbosonbreiten im Bereich 10% zu 30%
- Genauigkeit für Fermionbreiten im Bereich 30 bis 60%

Einschränkung der Totale Zerfallsbreite Γ_H

- für $M_H > 200$ GeV, $\Gamma_{\text{tot}} > 1$ GeV
→ Messung von Peak-Breite in $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$
- für $M_H < 200$ GeV, $\Gamma_{\text{tot}} \ll$ Massenauflösung
→ brauchen indirekte Einschränkung für Γ_{tot}



- untere Grenzen aus beobachtete Raten:

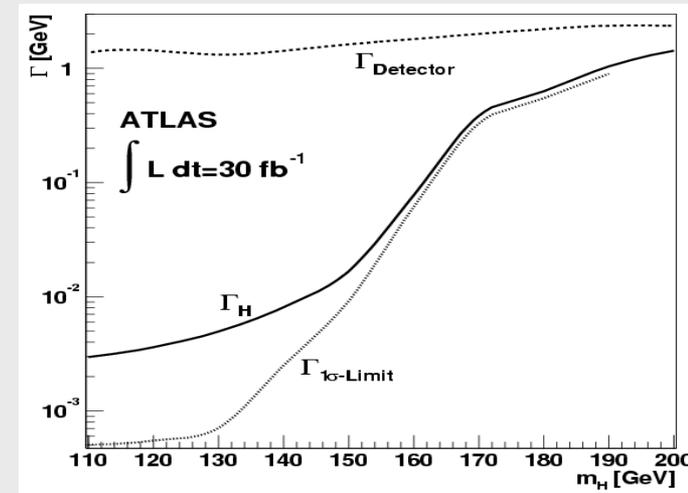
$$\Gamma_{\text{tot}} > \Gamma_W + \Gamma_Z + \Gamma_t + \Gamma_g + \dots$$

- obere Grenze durch theoretische Annahme:

$g_V < g_V^{\text{SM}}$ gültig in Modellen mit nur
Higgs-Doublets und -Singulets

$$\text{Rate}(\text{VBF}, H \rightarrow WW) \sim \Gamma_V^2 / \Gamma_{\text{tot}} < (\Gamma_V^2 \text{ in SM}) / \Gamma_{\text{tot}}$$

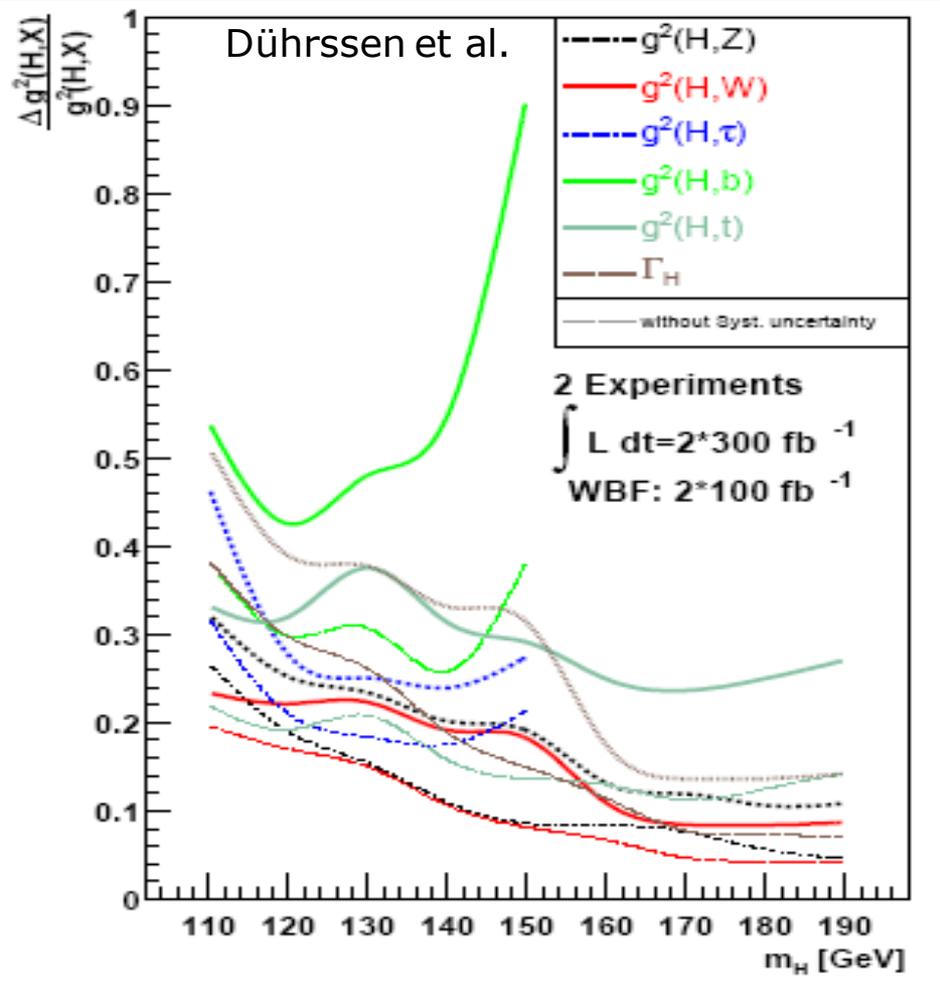
$$\rightarrow \Gamma_{\text{tot}} < \text{rate} / (\Gamma_V^2 \text{ in SM})$$



Absolute Kopplungen mit $g_v < g_v^{\text{SM}}$ Bedingung

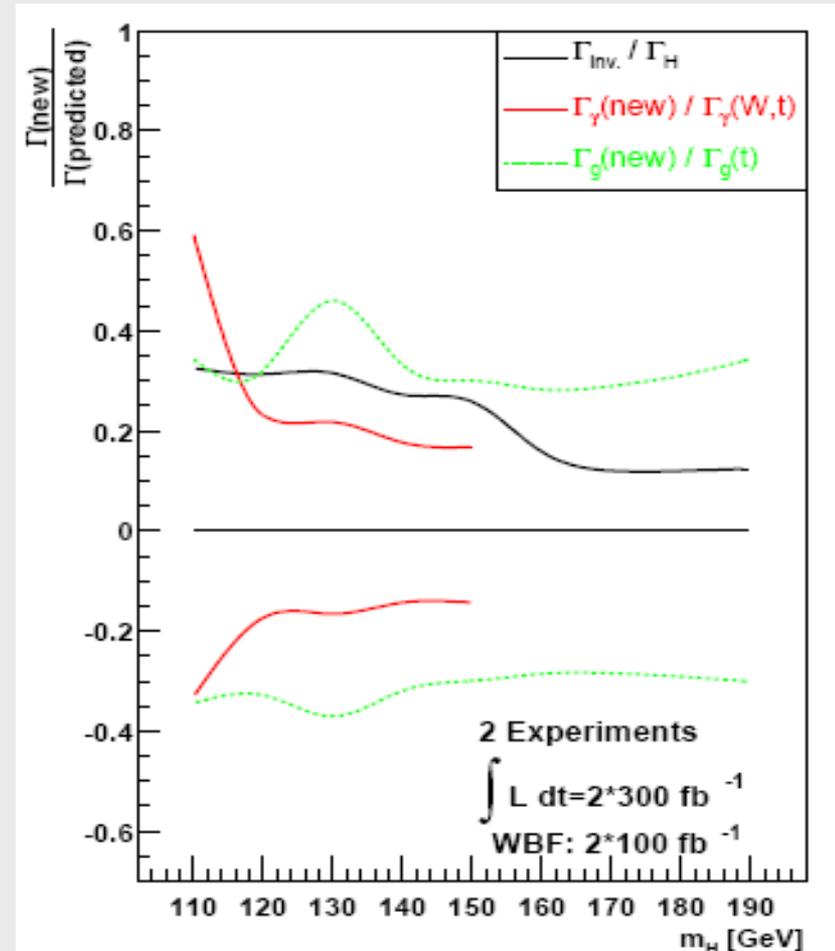
■ Kopplung an W, Z, τ, b, t

■ Γ_{inv} für nicht detektierbare Zerfälle

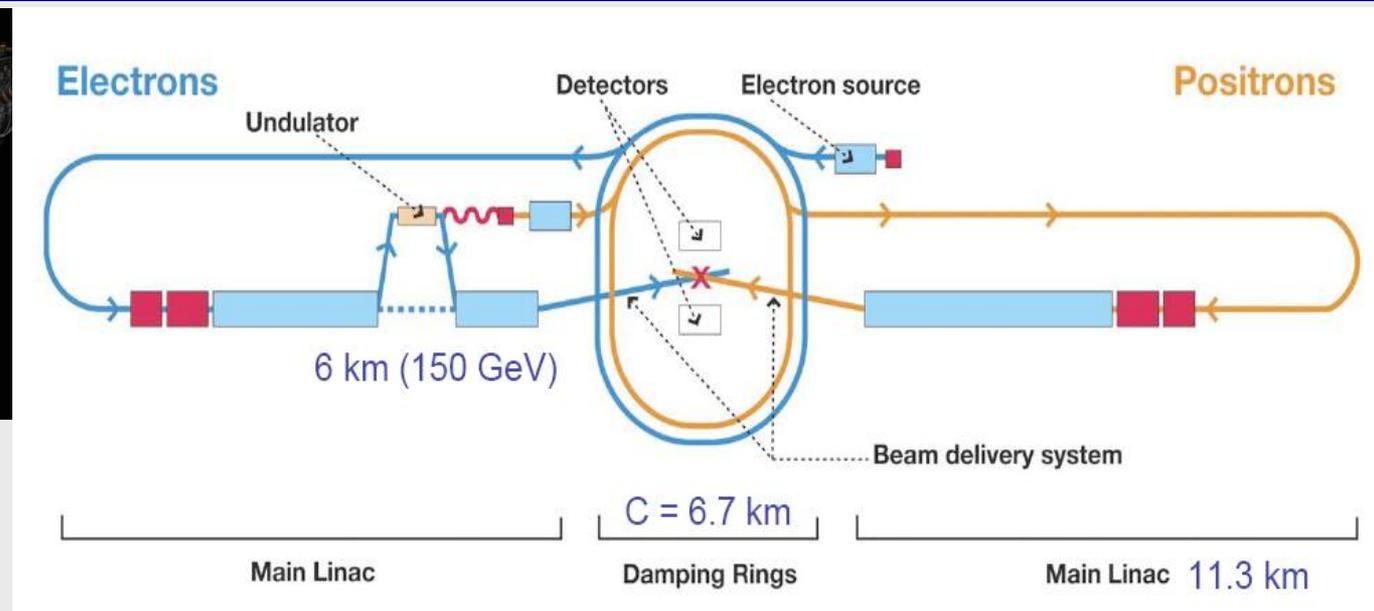
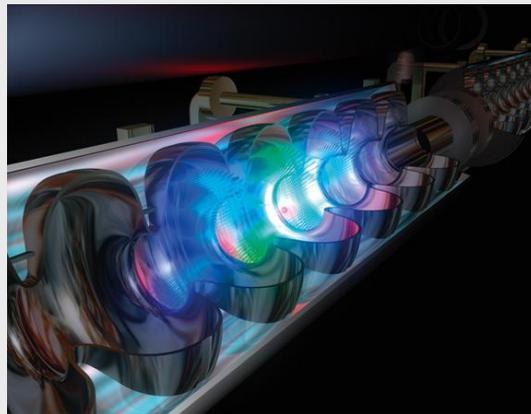


$$\Delta g/g = \frac{1}{2} \Delta(g^2)/g^2$$

■ $\Gamma_{\text{photon}}(\text{new}), \Gamma_{\text{gluon}}(\text{new})$
in Schleifenkopplung

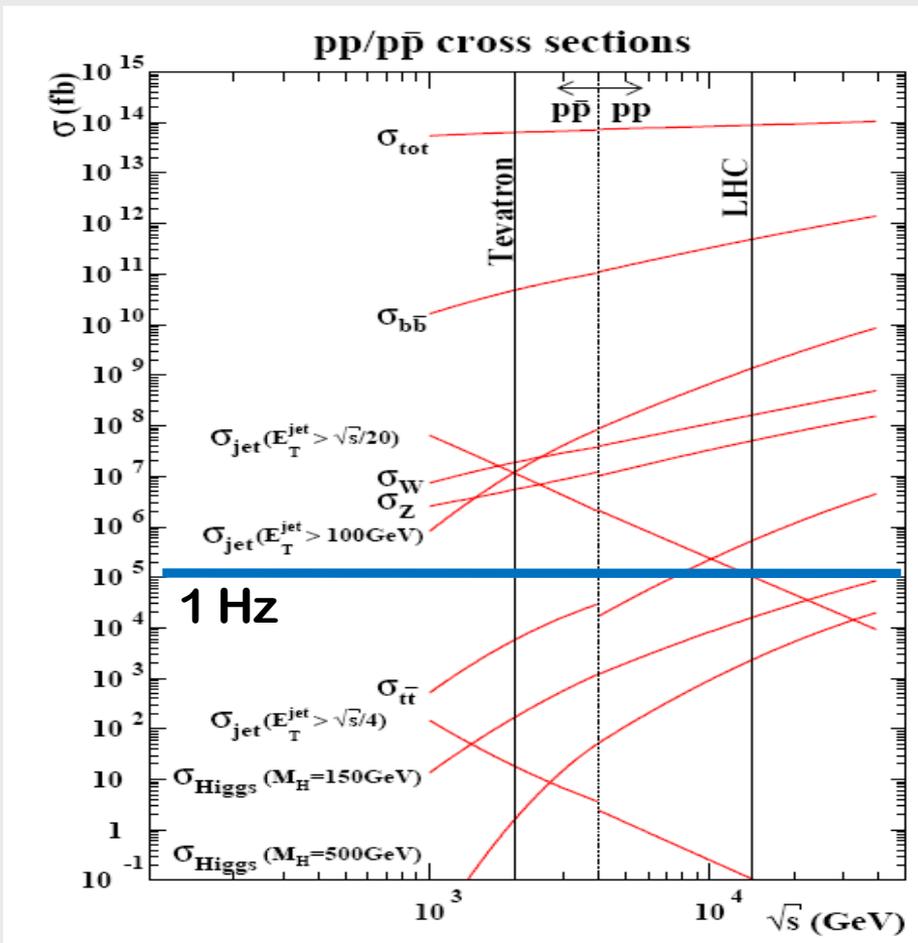


International Linear Collider



- Linearer Elektron-Positron-Kollider mit supraleitenden Kavitäten
- Energie 500 GeV mit Ausbaumöglichkeit auf 1 TeV
- hohe Luminosität: $> 500 \text{ fb}^{-1}$ in 4 Jahren
- flexibel: Energie einstellbar zwischen 90 (GIGAZ) und 500 GeV
- Polarisation: Elektronen (90%) + Positronen (60%)
- Vorteil: Energie und Quantenzahlen im Anfangszustand bekannt

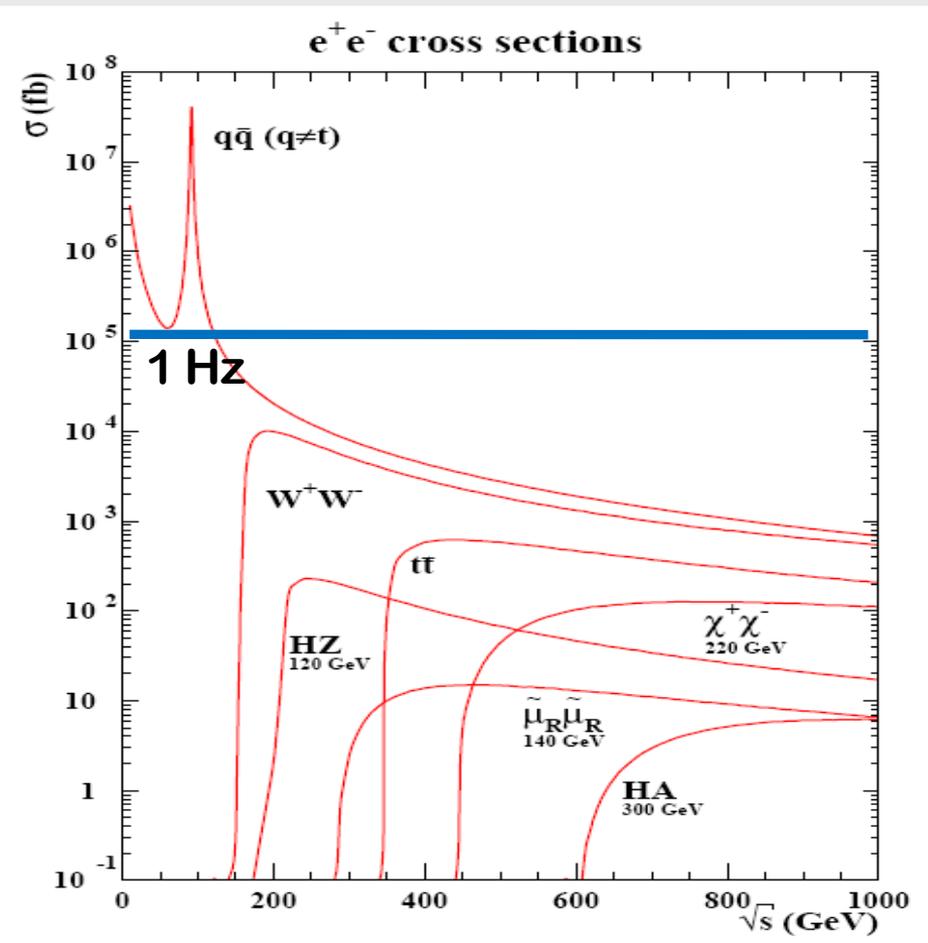
Komplementarität der Beschleuniger



Signal-zu-Untergrund $< 10^{-10}$

Trigger benötigt für Reduktion um 10^{-6}

höchste Energie \rightarrow Entdeckungen



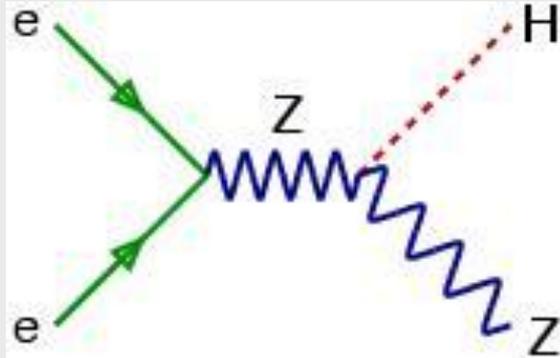
Signal-zu-Untergrund: $\sim 10^{-2}$

Kein Trigger nötig

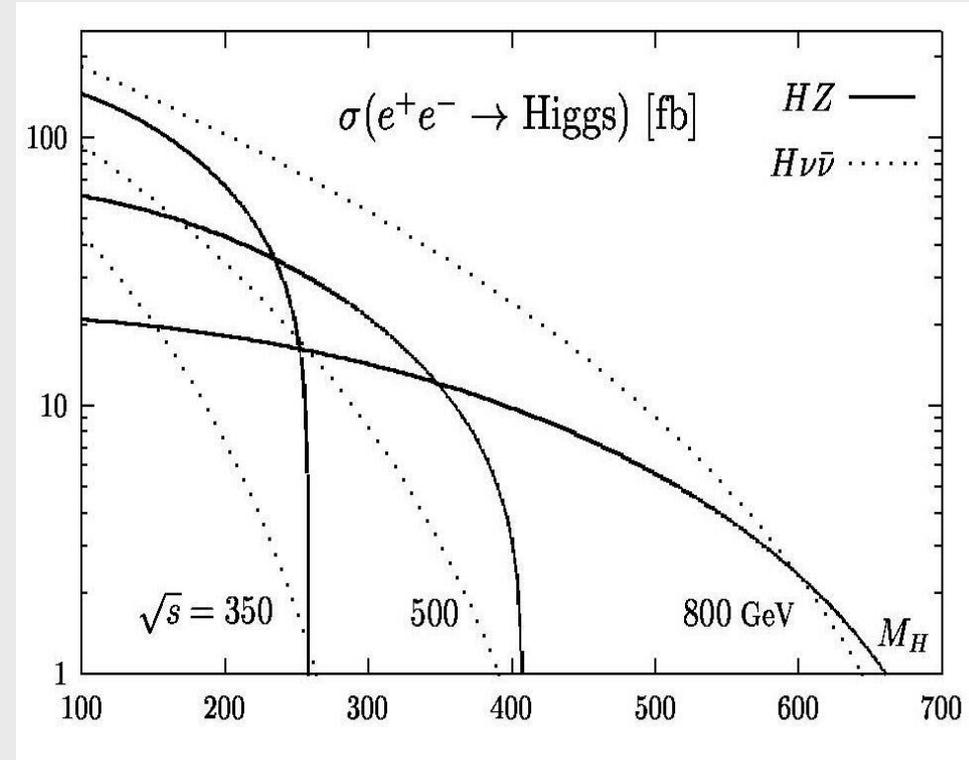
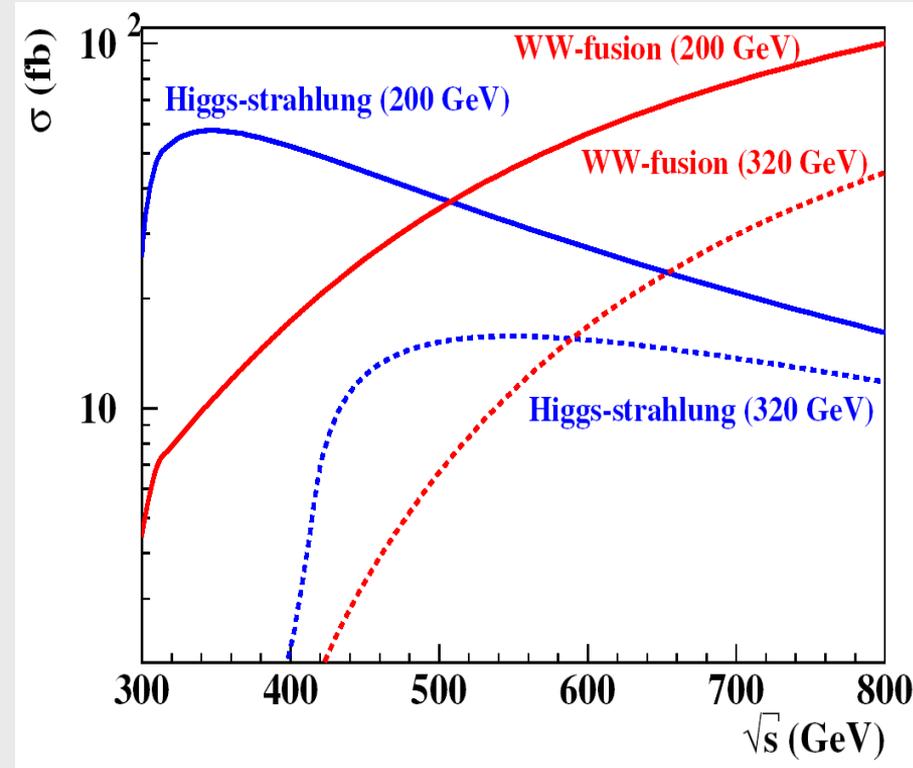
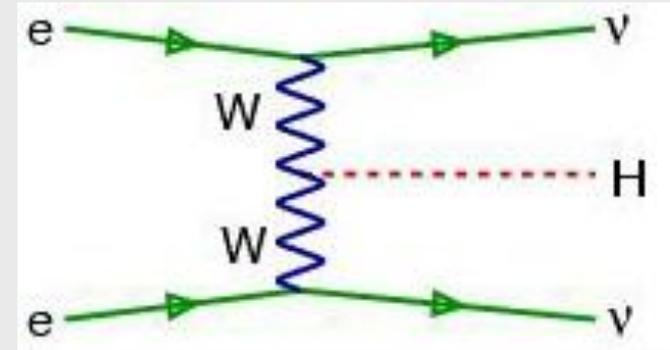
Präzisionsuntersuchungen

Higgs Produktion am ILC

Higgs-Strahlung

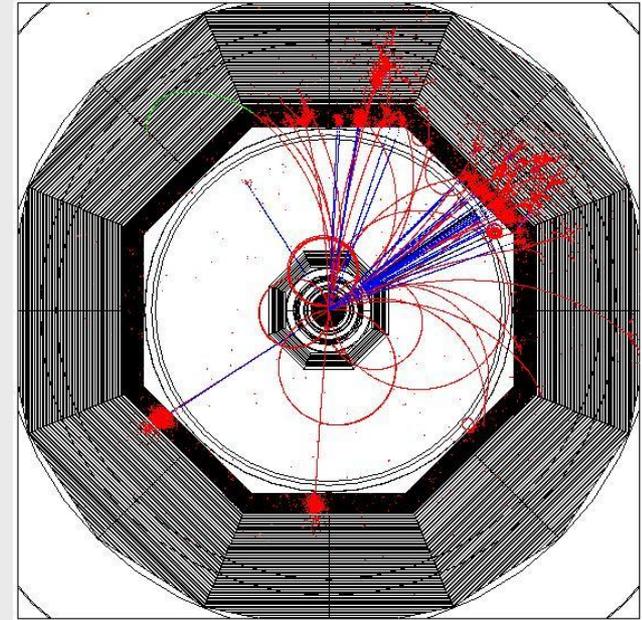
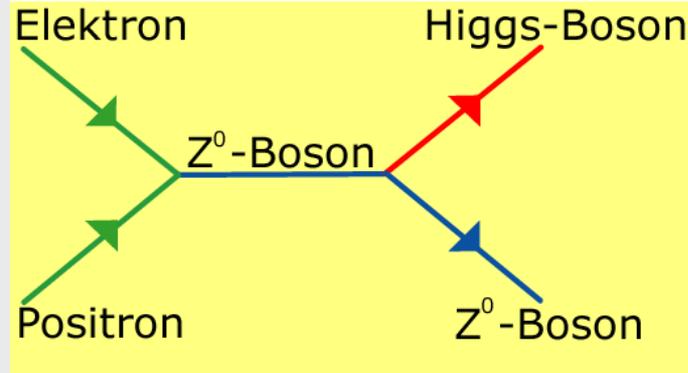


WW fusion

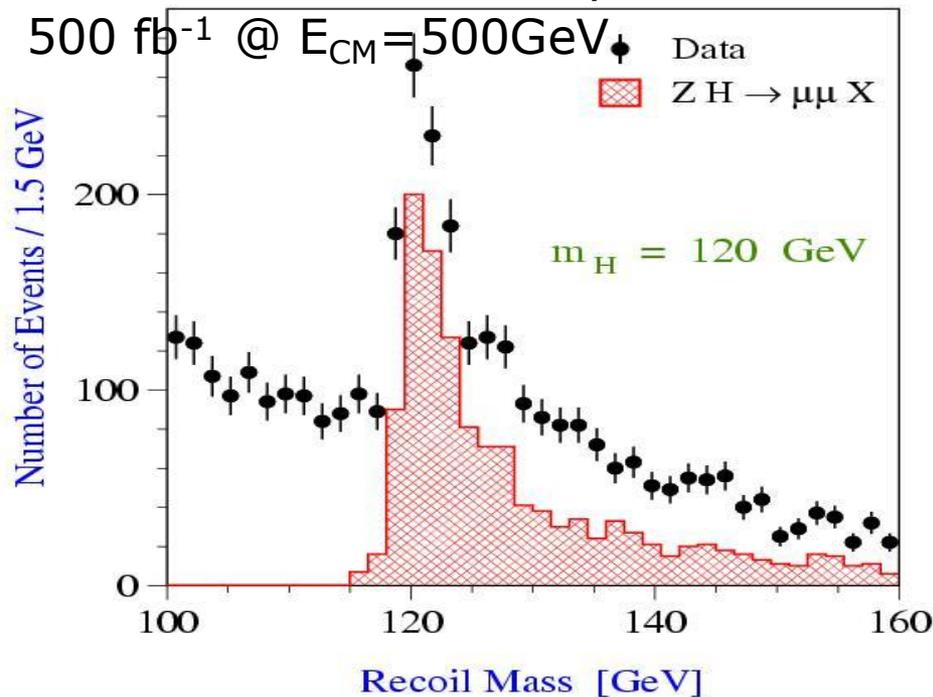


Modell- und zerfallskanalunabhängige Beobachtung

- der „Schlüssel“ am ILC: „Beobachten ohne hinzuschauen“



- zerfallskanalunabhängige Beobachtung im Rückstossmassenspektrum



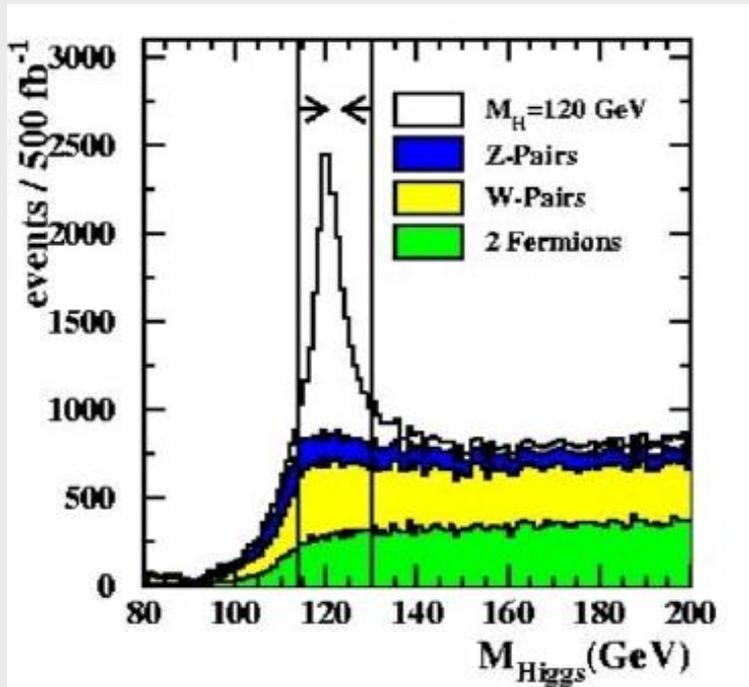
Masse: aus Peak-Position

Genauigkeit ~ 50 MeV

Wirkungsquerschnitt aus Höhe:

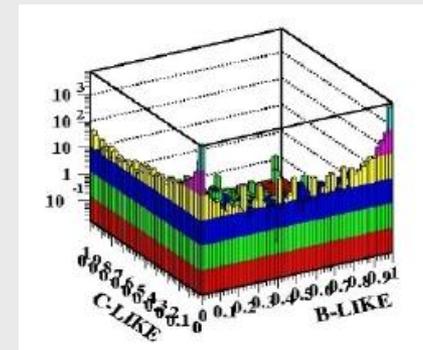
$\Delta\sigma_{ZH} \sim \Gamma_{Z^*} \sim 2\% \rightarrow g_Z \sim 2 \text{ bis } 3\%$

Verzweigungsverhältnisse



- Selektiere $t ZH \rightarrow qq$ qq Ereignisse
- Bestimmte Likelihood for $H \rightarrow bb, cc, gg$ aus präzisen Spurinformaton
- Anpassung von MC-Verteilungen an Daten \rightarrow Ereignisraten für jeden Zerfall

Daten =

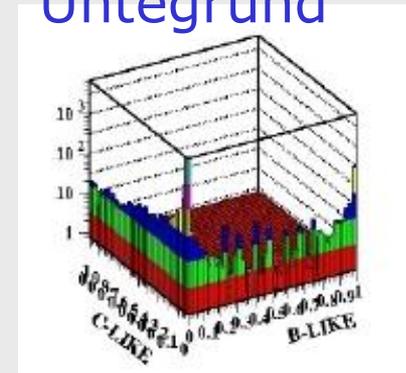
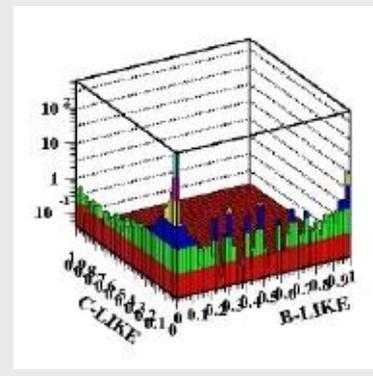
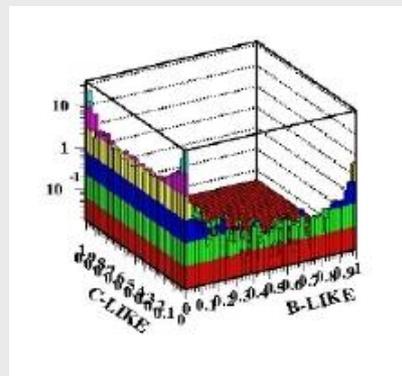
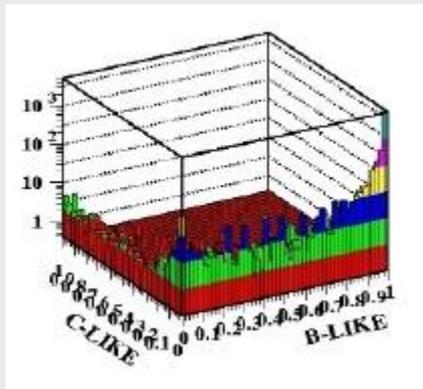


$H \rightarrow bb$

$H \rightarrow cc$

$H \rightarrow gg$

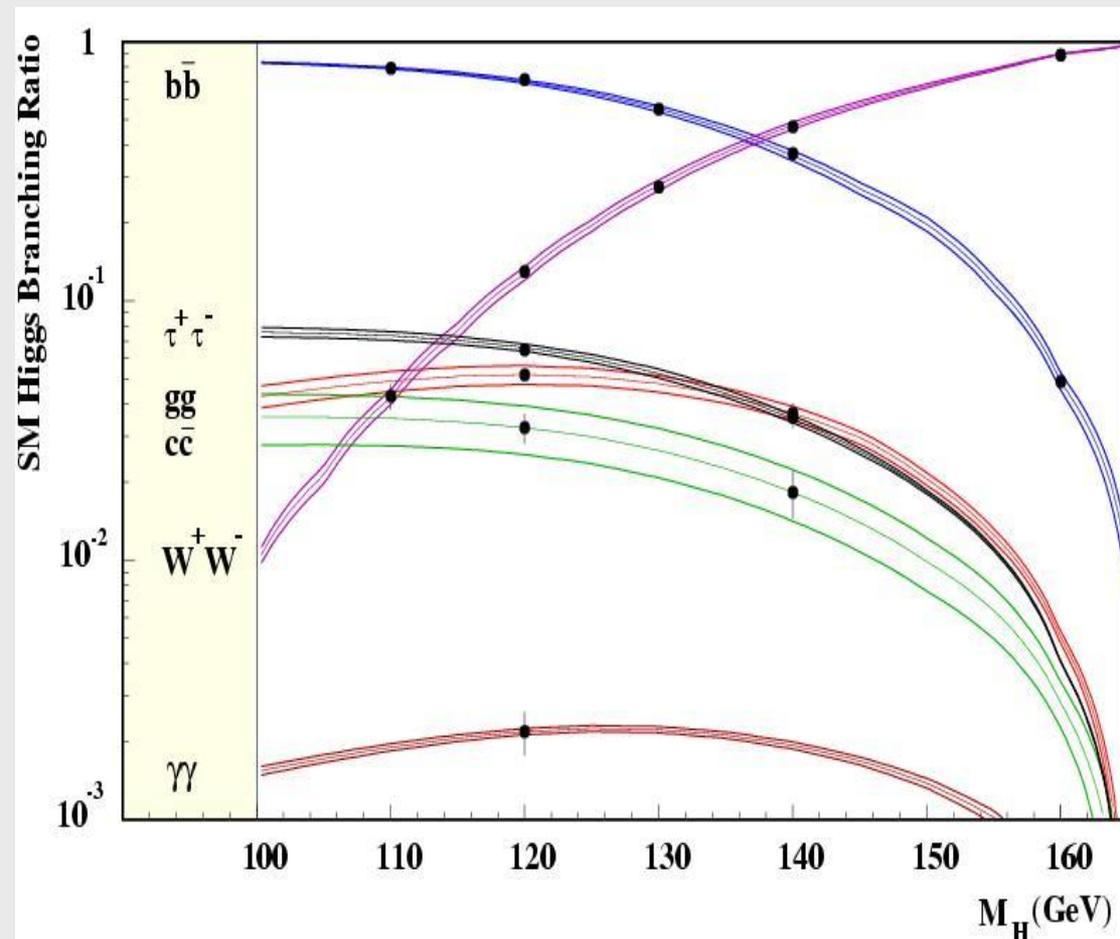
Untegrund



Verzweigungverhältnisse

Experiment: Messung von $\sigma_{ZH} \times \text{BR}(H \rightarrow ff)$ aus Zählrate

σ_{ZH} modelunabhängig \rightarrow $\text{BR}(H \rightarrow ff)$



Zerfall

Rel.Fehler

$H \rightarrow b\bar{b}$ 2.4 %

$H \rightarrow c\bar{c}$ 8.3 %

$H \rightarrow gg$ 5.5 %

$H \rightarrow \tau^+\tau^-$ 6.0%

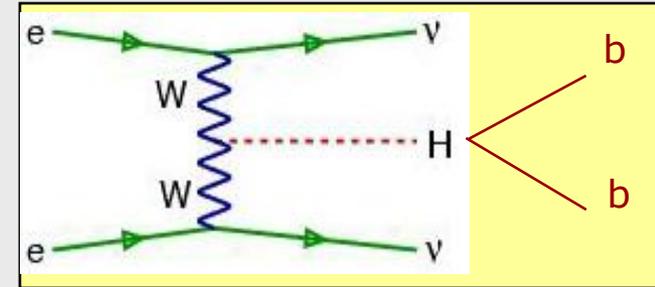
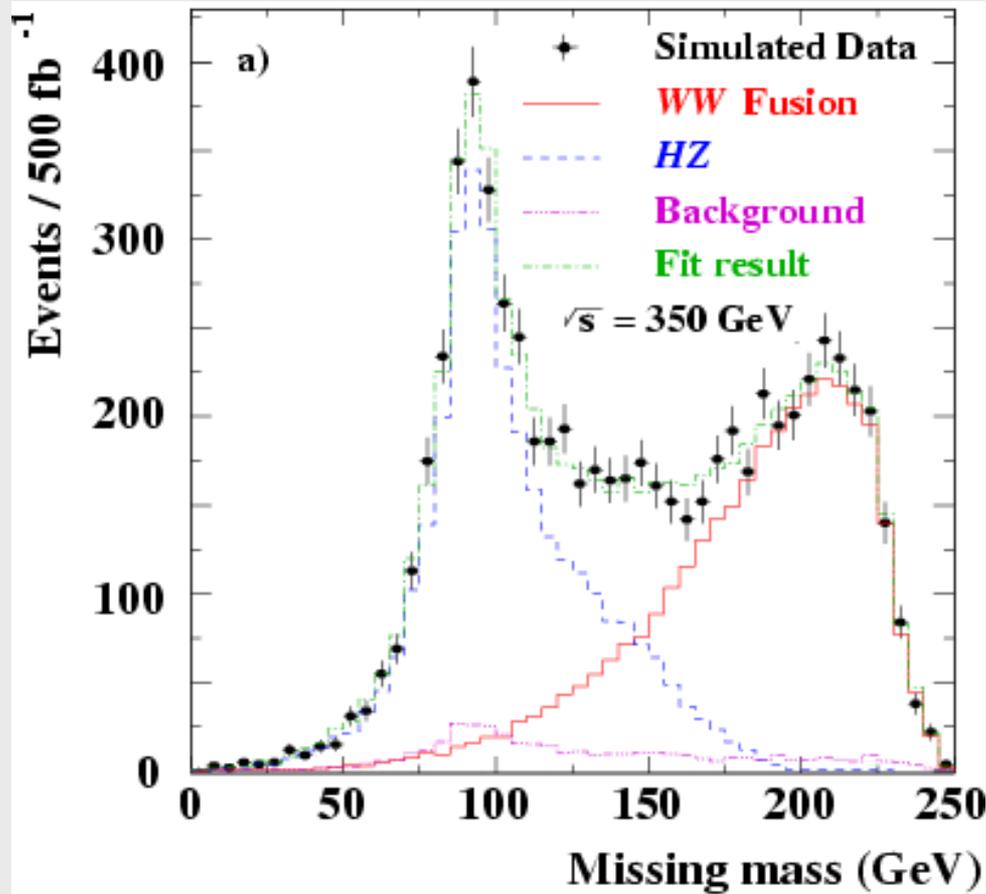
$H \rightarrow W^+W^-$ 5.4%

$H \rightarrow \gamma\gamma$ 10-15%

für 500 fb^{-1} , $m=120 \text{ GeV}$

Kopplung an das W-Boson

WW-Fusions-Prozess:



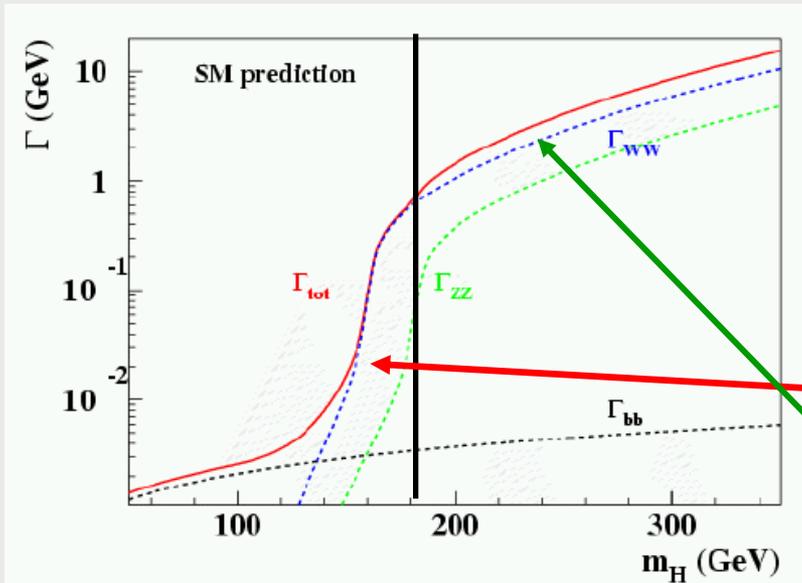
Fit an das Spektrum der fehlenden Masse:

$$\sigma \sim g_w^2 \times \text{BR}(H \rightarrow bb)$$

Nach Messung von $\text{BR}(H \rightarrow bb)$ in ZH
modellunabhängige Messung von g_w

$$\Delta g \sim 3 \text{ bis } 13\%$$

Totale Zerfallsbreite



Benötigt zur Bestimmung der Fermion-Kopplungen

$$g_f^2 \sim \Gamma_{ff} = \text{BR}(H \rightarrow ff) \times \Gamma_{\text{tot}}$$

Indirekte Bestimmung

Direkte Bestimmung

a) $M < 180 \text{ GeV}$

$\Gamma_{\text{tot}} \ll \text{Detektorauflösung} \rightarrow \text{Indirekte Bestimmung}$

$$\Gamma_{\text{tot}} = \Gamma(H \rightarrow xx) / \text{BR}(H \rightarrow xx)$$

$\Gamma(H \rightarrow WW)$ aus Messung des WQ in WW-Fusion

$\text{BR}(H \rightarrow WW)$ aus Higgsstrahlung $ZH, H \rightarrow WW$

$$\Delta\Gamma/\Gamma = 6 \text{ bis } 13 \% \text{ für } M_H = 120 \text{ bis } 160 \text{ GeV}$$

Totale Zerfallsbreite

b) $M_H > 180$ GeV:

$\Gamma_{\text{tot}} \geq$ Detektorauflösung

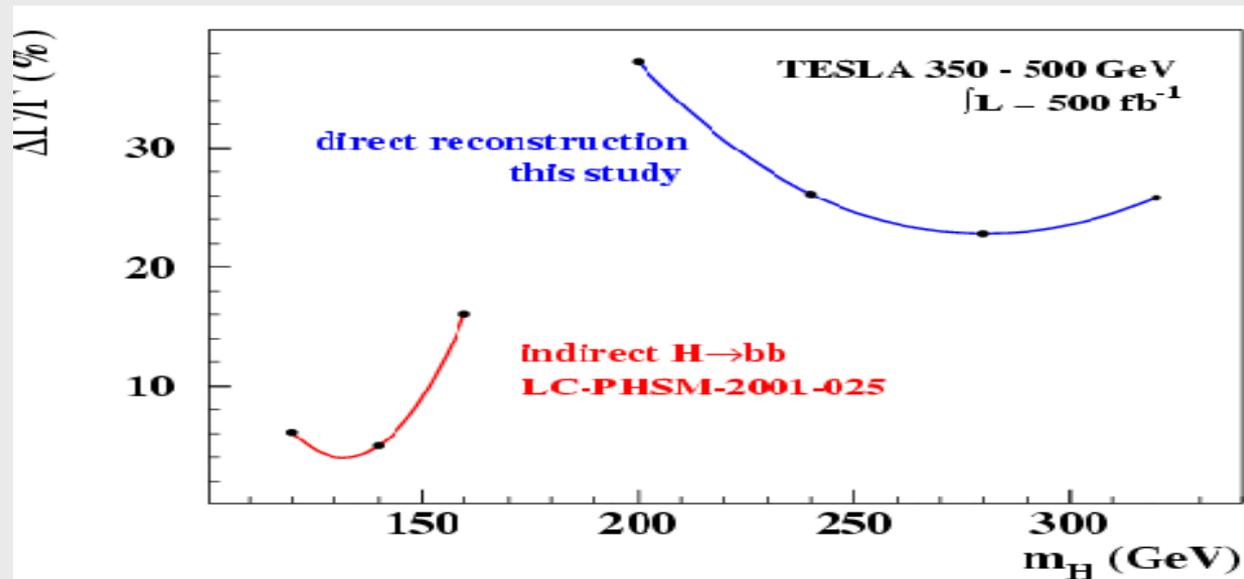
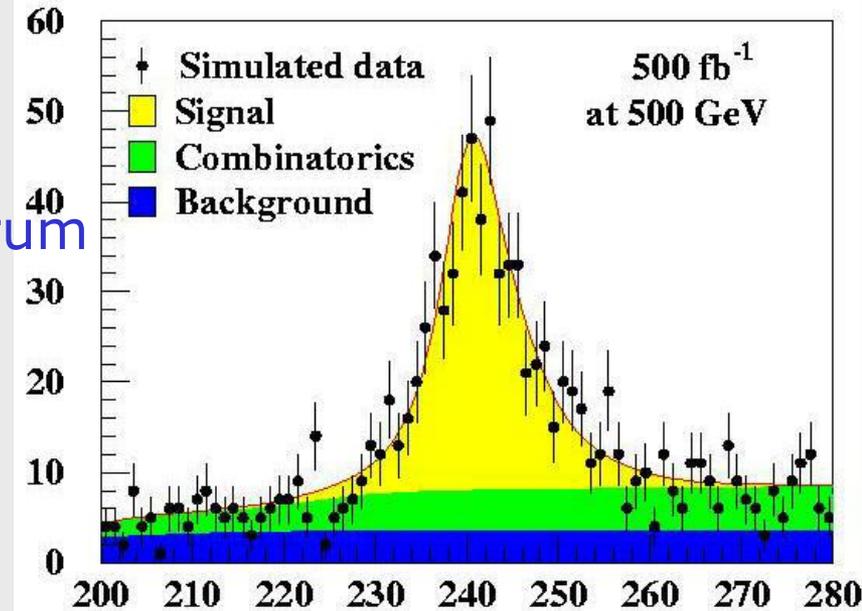
Bestimmung aus dem Massenspektrum

$ZH \rightarrow llWW(ZZ) \rightarrow llqqqq$

Breite = Faltung von Γ_{tot} und Massenauflösung

$M_H = 200 \rightarrow 320$ GeV

$\Delta\Gamma/\Gamma = 23 \rightarrow 34$ %



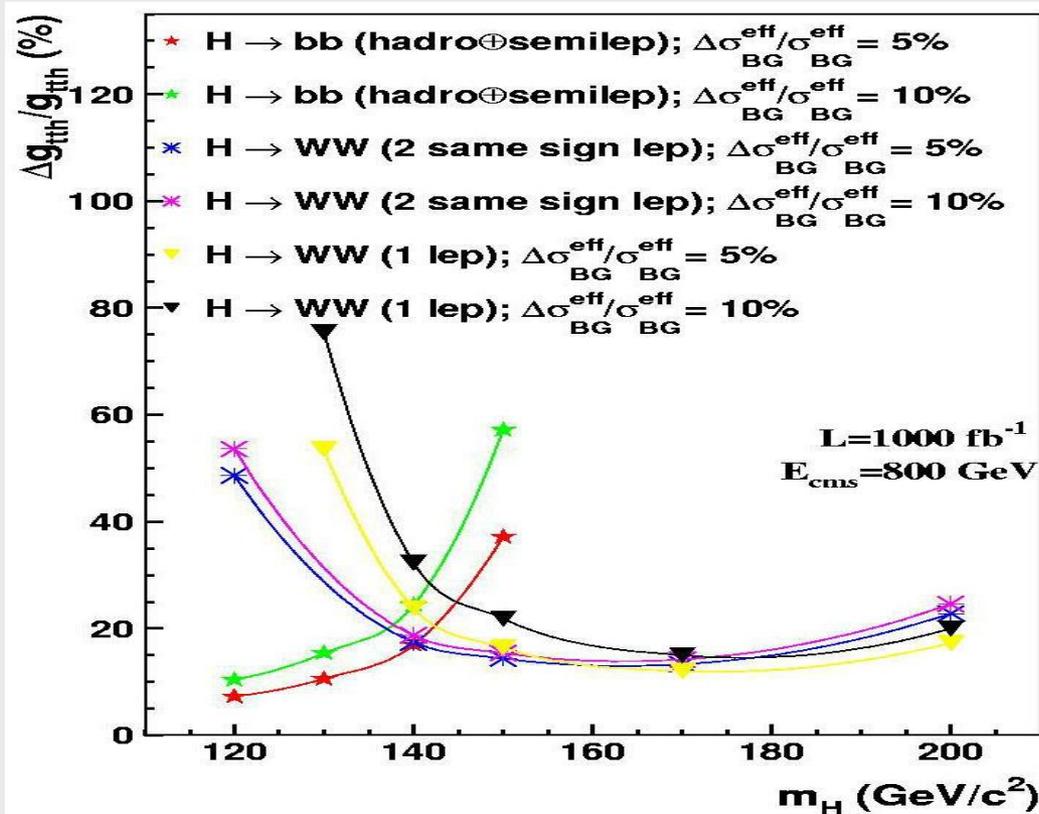
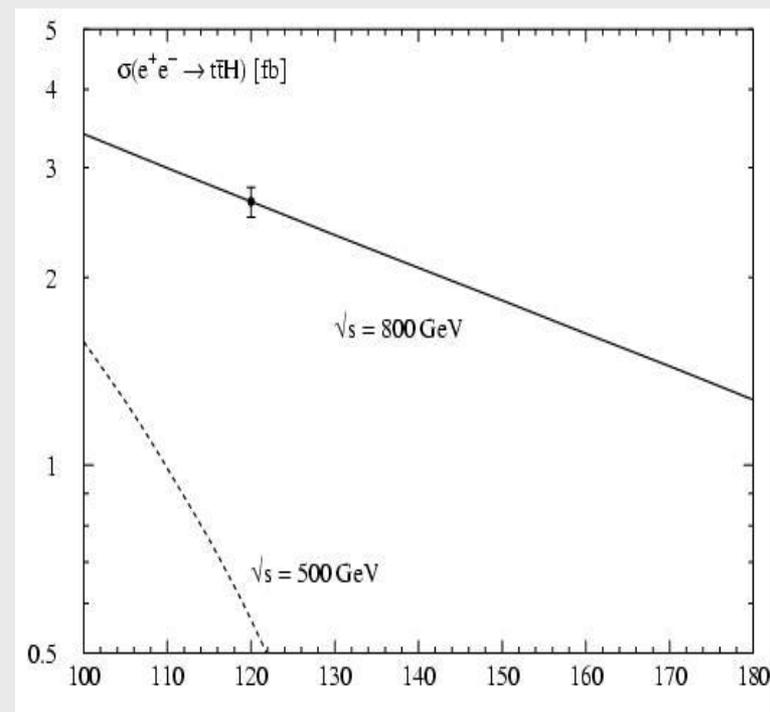
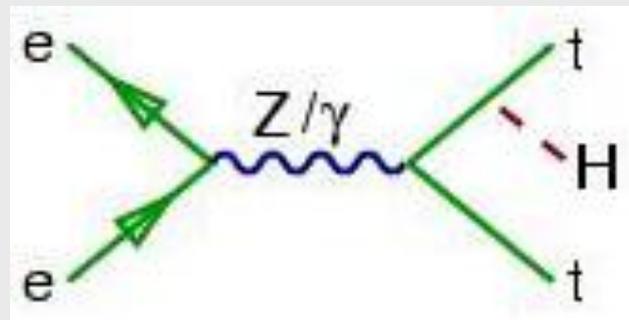
Top-Quark-Yukawa-Kopplung

Kleiner Wirkungsquerschnitt und

„viel Masse“ im Endzustand

→ grosse $E_{\text{CM}} = 800 \text{ GeV}$

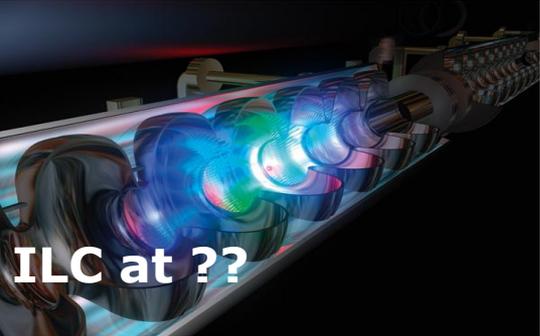
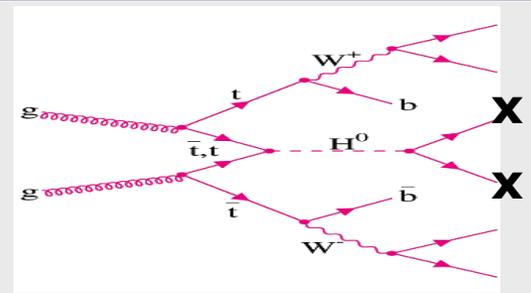
→ Hohe Luminosität $L = 1 \text{ ab}^{-1}$



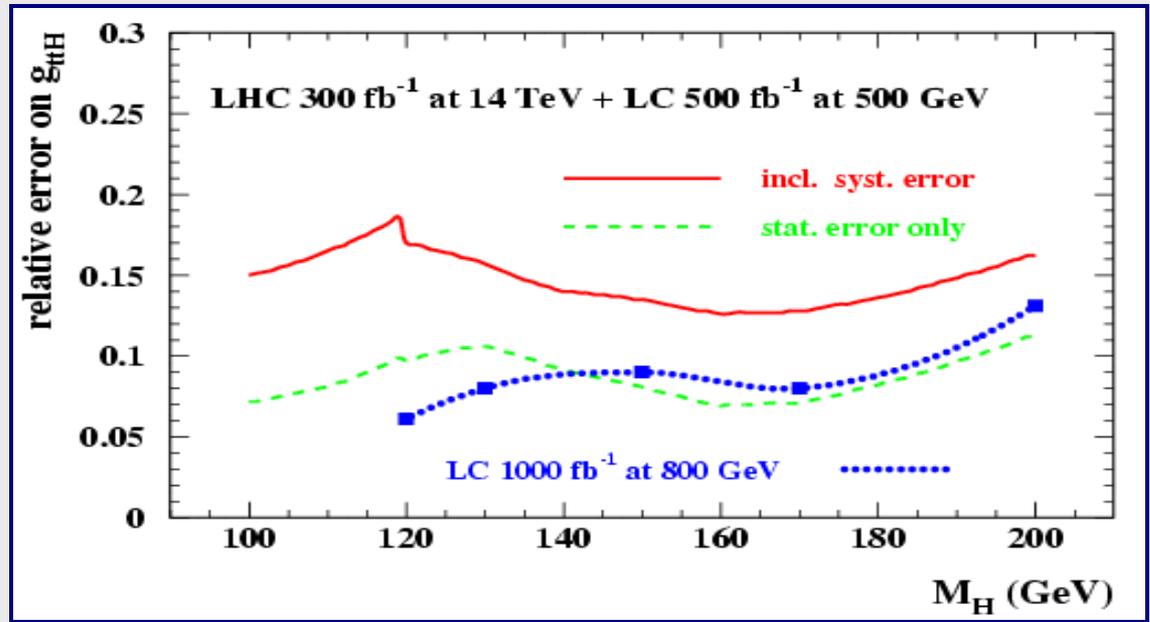
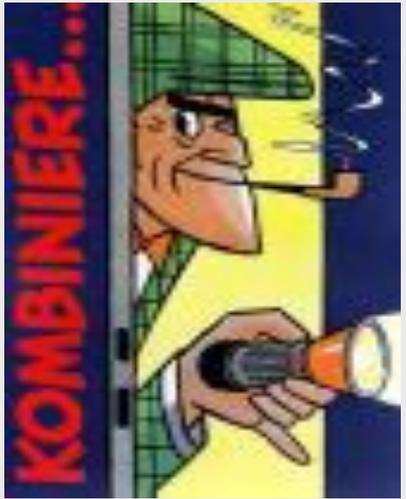
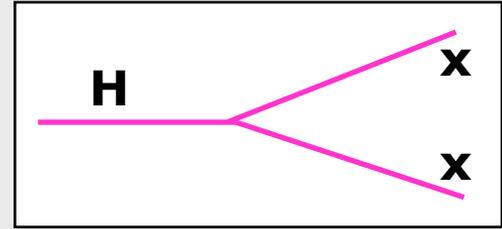
Top Kopplung: Synergie von LHC und ILC



LHC: Messung von
 $\sigma_{tth} \times BR(H \rightarrow bb)$
 $\sigma_{tth} \times BR(H \rightarrow WW)$
 $\rightarrow g_t^2 \times BR(H \rightarrow xx)$

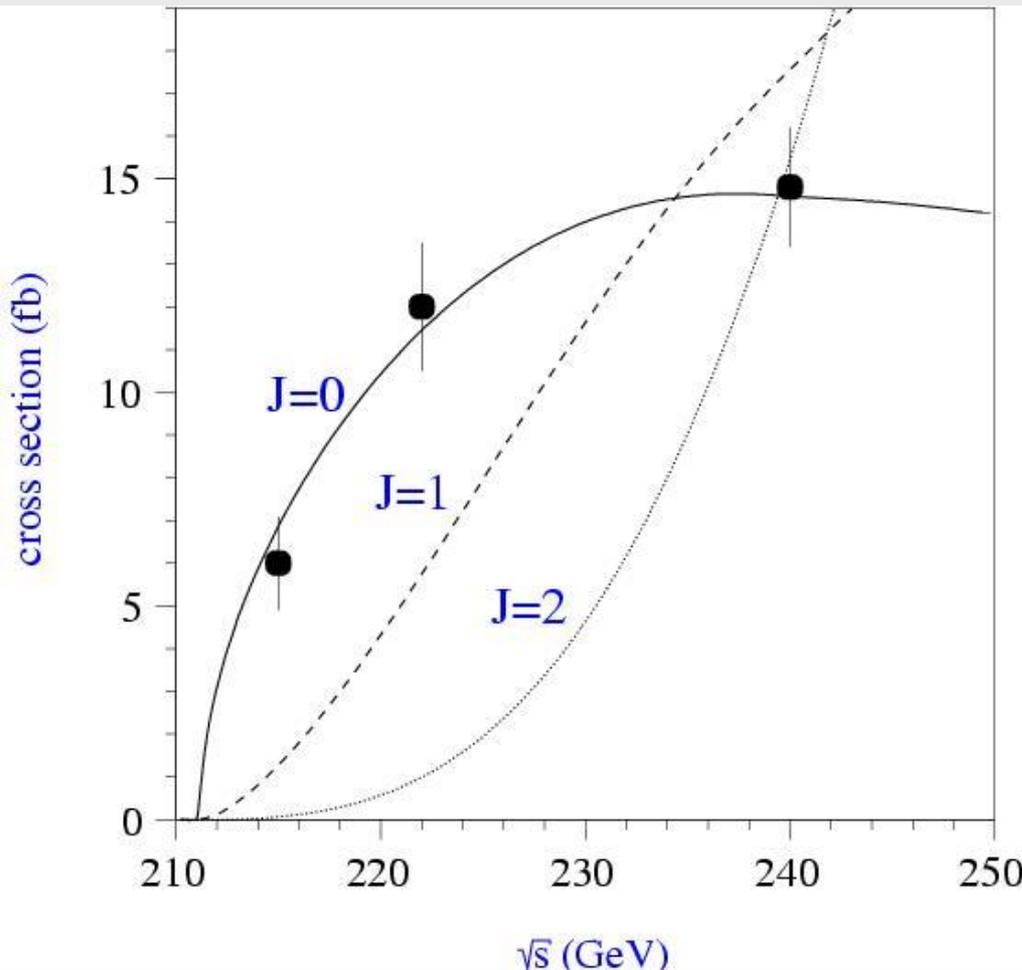


ILC: Messung der BRs
 $BR(H \rightarrow bb)$
 $BR(H \rightarrow WW)$



Bestimmung der Quantenzahlen

Vorhersage des SM: Spin = 0, CP = ungerade



Spin J:

“Schwellenscan” des Wirkungsquerschnitt $ee \rightarrow ZH \rightarrow \ell\ell X$ (modellunabhängig)

CP:

aus Winkelverteilungen Von Z und f aus $Z \rightarrow ff$ in $ee \rightarrow ZH$ (a LHC)

(modellunabhängig)

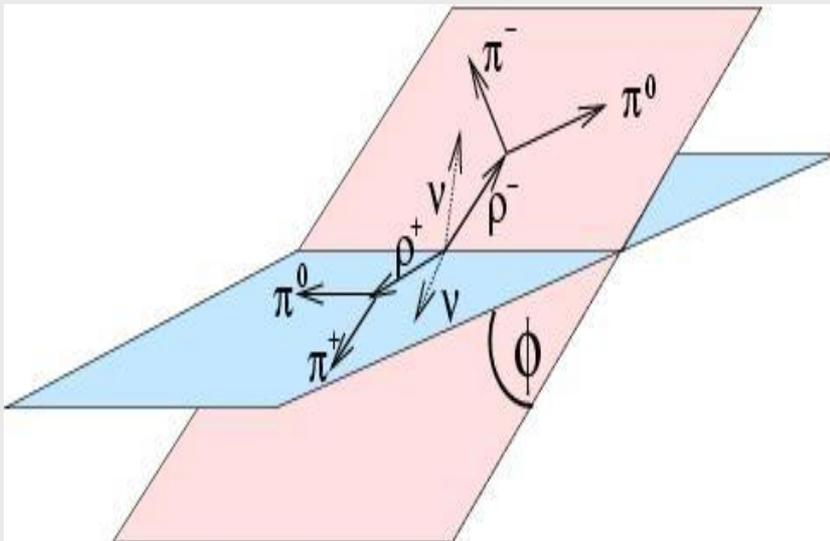
Bestimmung von CP

CP gerade h oder CP ungerade A ?

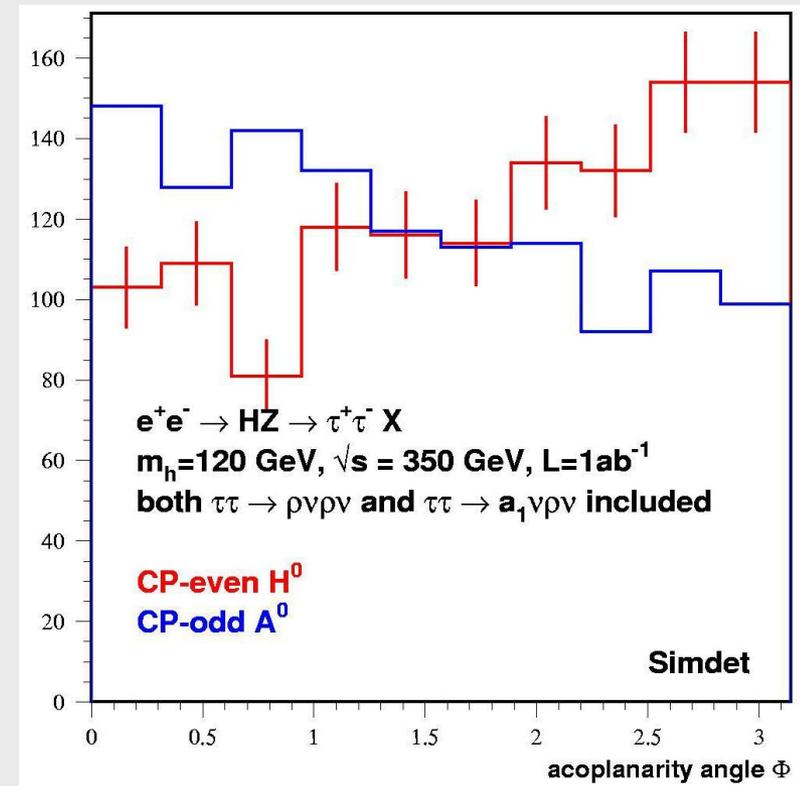
CP-Natur aus Polarisation der Higgs-Zerfallsprodukte

→ Untersuche $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \nu \rho \nu \rho$

Observable: $\rho\rho$ -Akoplanarität:



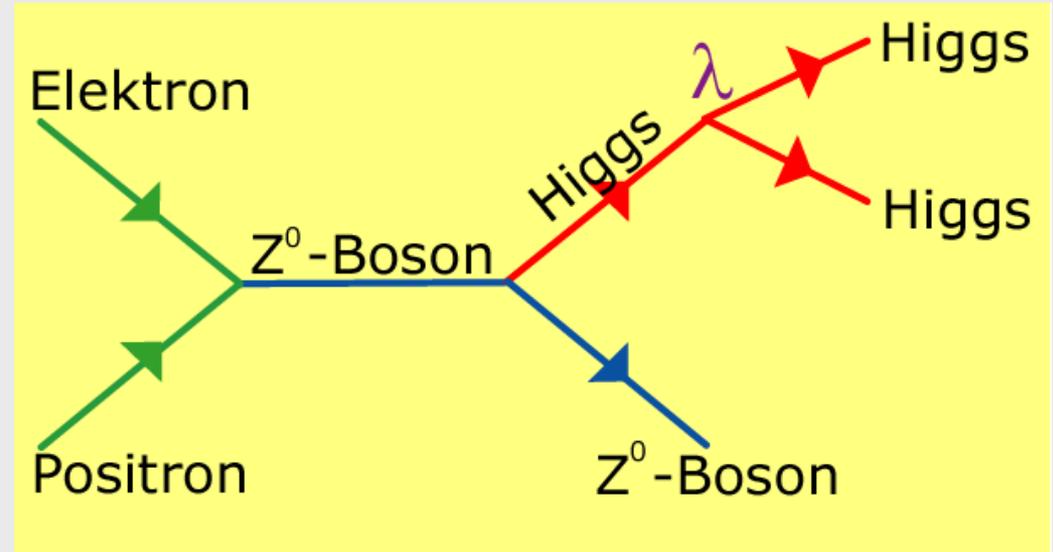
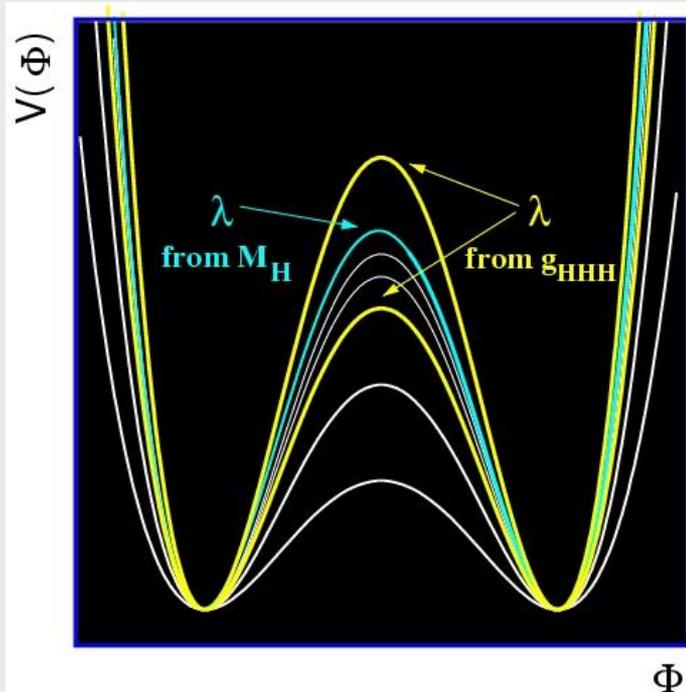
> 8σ Trennung zwischen CP+ and CP-
für 120 GeV Higgs (350 GeV u. 1 ab^{-1})



Higgs-Selbstkopplung

Ist die elektroschwache Symmetrie spontan gebrochen ?

Rekonstruktion des Potentials = Messung der Triple-Higgs-Kopplung



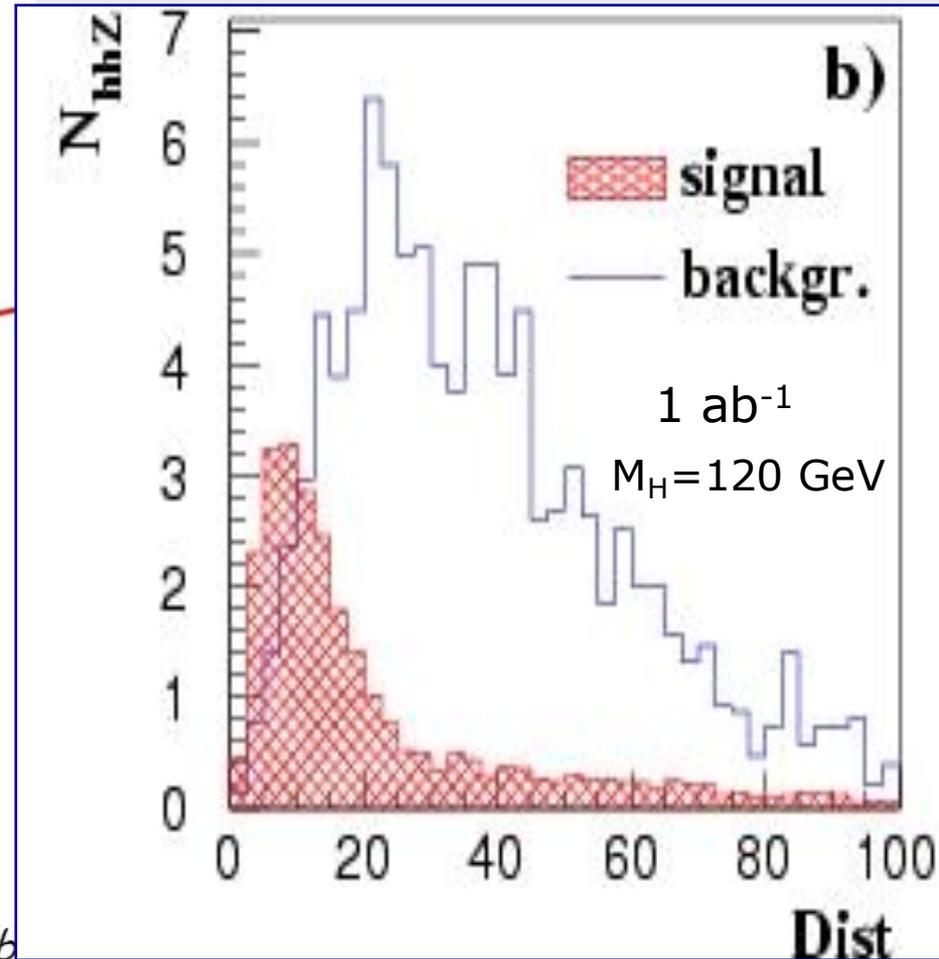
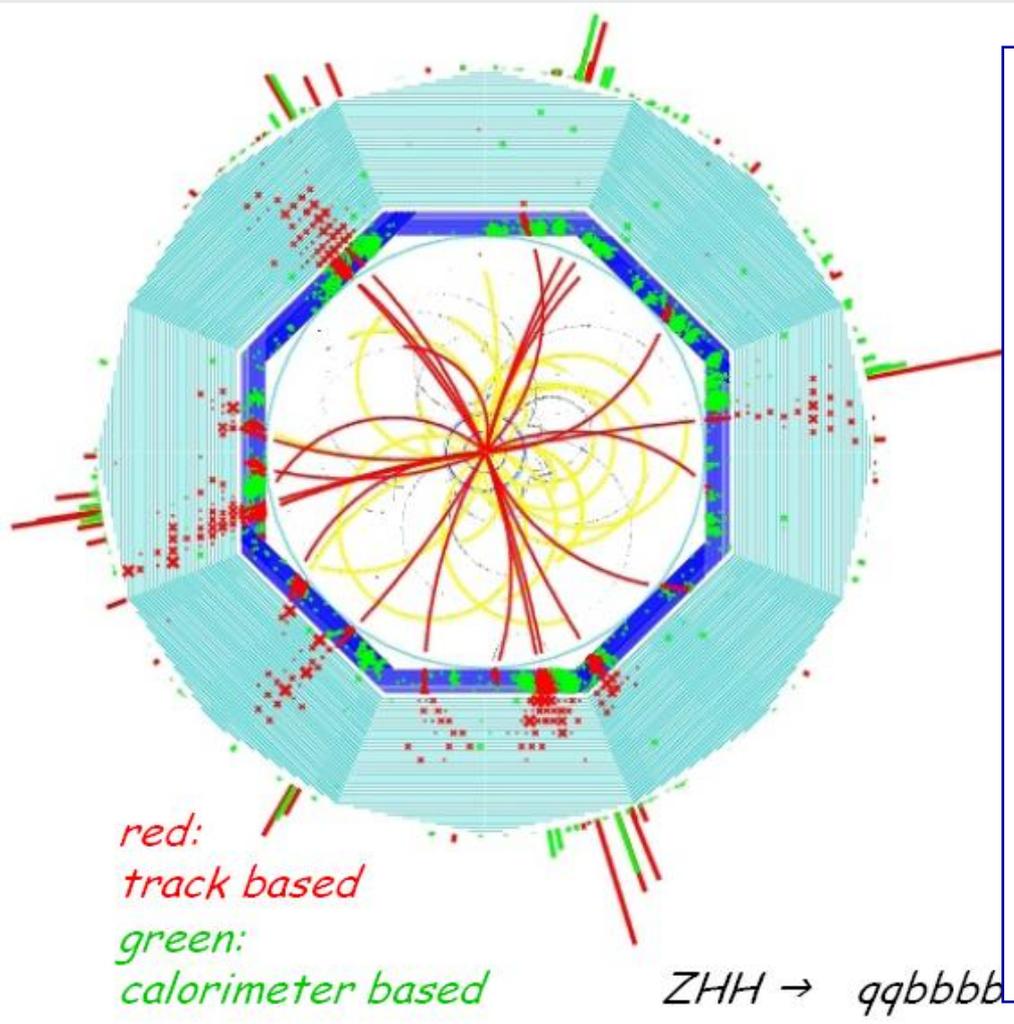
winziger Wirkungsquerschnitt: $0.15 \text{ fb} \rightarrow$ hohe Luminosität

Komplexer Endzustand: $ZH \rightarrow ZHH \rightarrow qq \text{ } bb \text{ } bb$

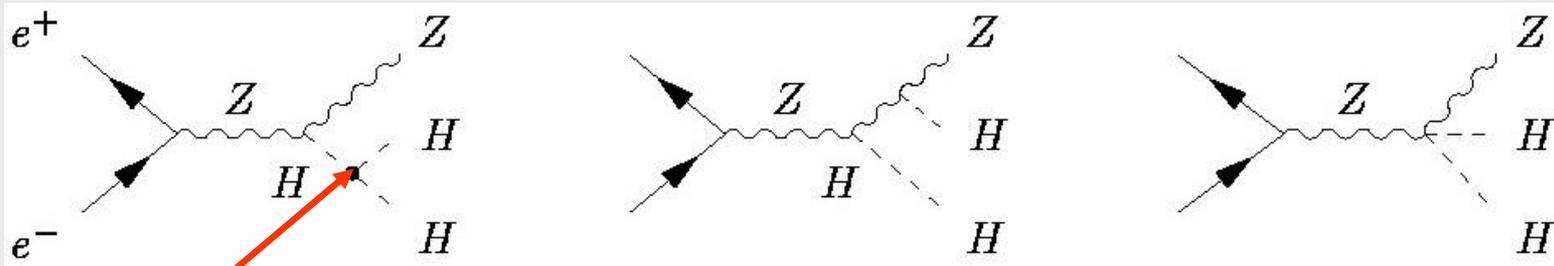
Higgs-Selbstkopplung

ZH → ZHH → qq bb bb

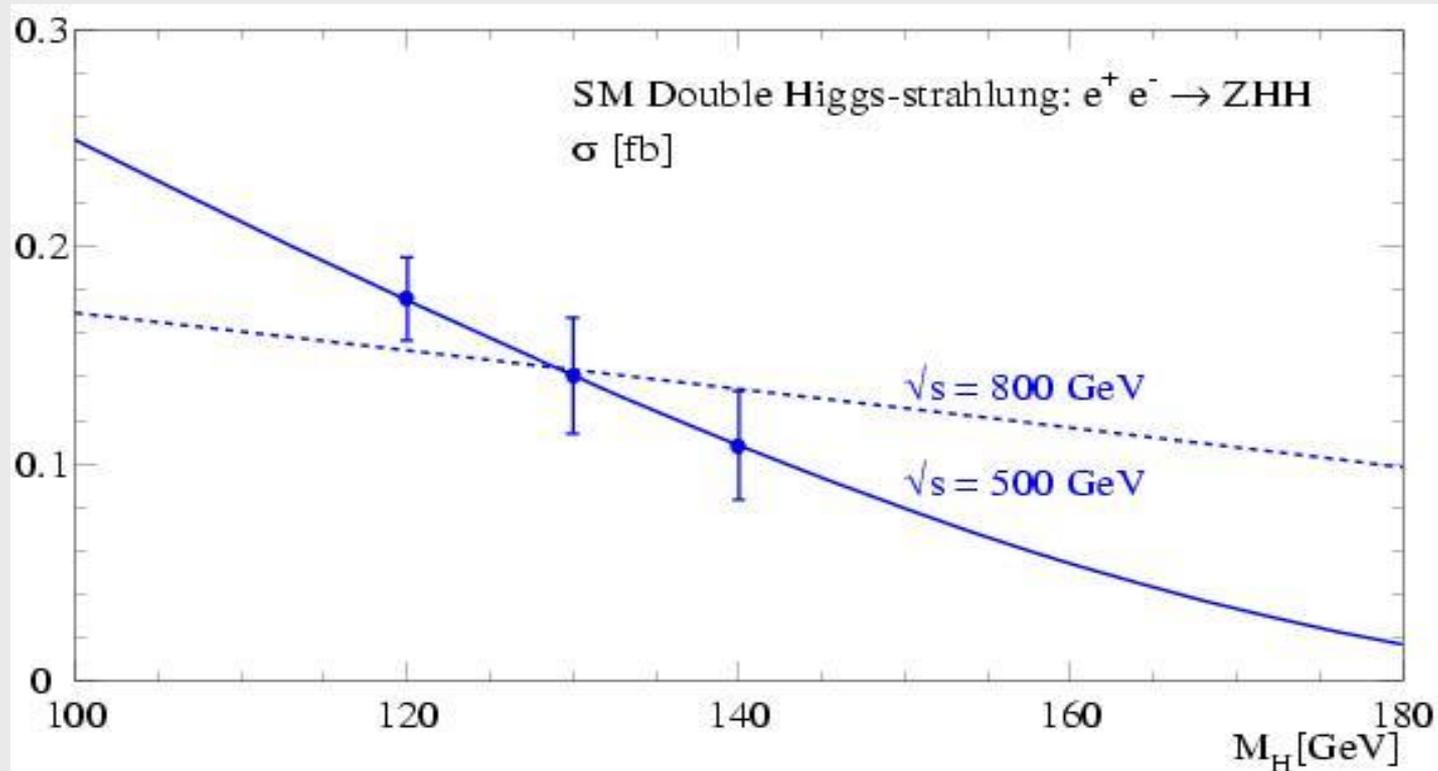
Neurale-Netz-Analyse: $S/\sqrt{B}=6$



Higgs-Selbstkopplung

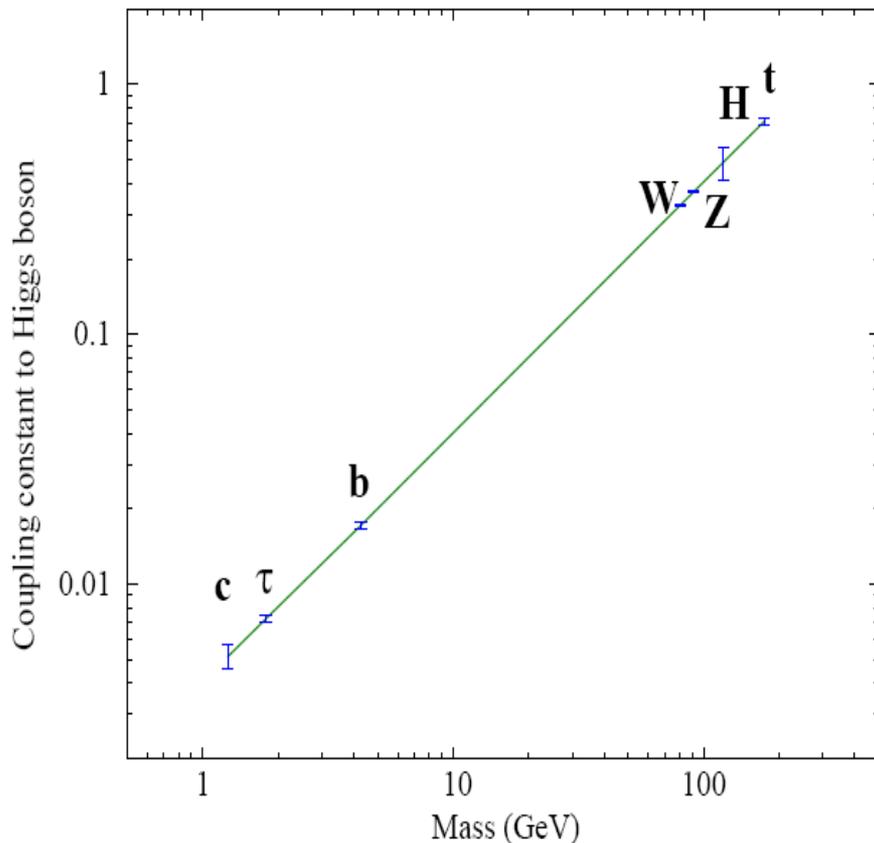


Als einziger sensitiv auf $\lambda \rightarrow \Delta\sigma/\sigma=13\% \rightarrow \Delta\lambda/\lambda=23\%$



Absolute Kopplungen: Überblick

Coupling Mass Relation

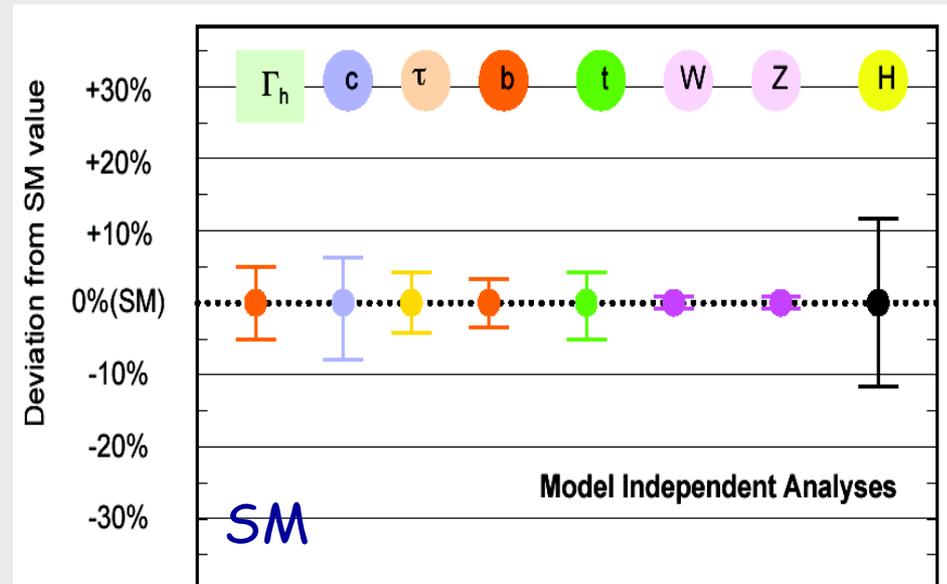
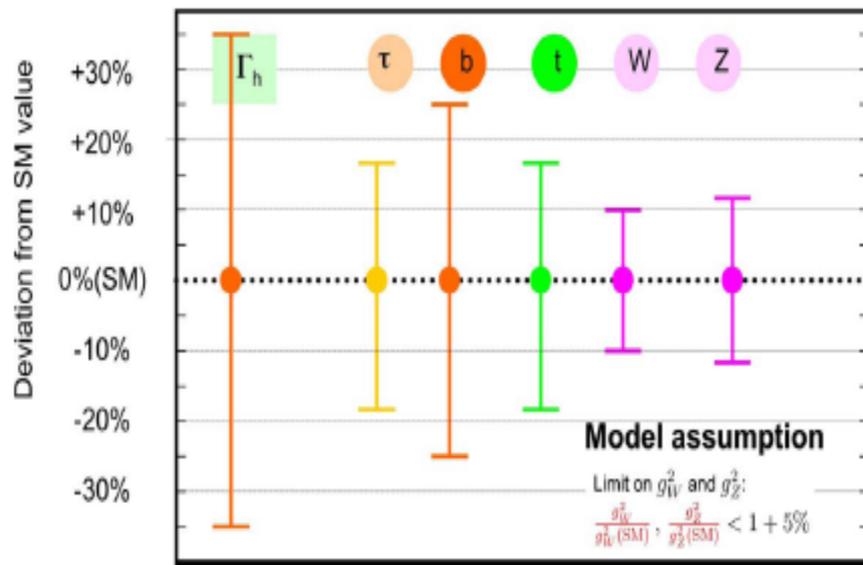


Quantity	$M_H = 120 \text{ GeV}$	$M_H = 140 \text{ GeV}$
ΔM_H	± 0.00033	± 0.0005
Γ_H	± 0.061	± 0.045
ΔCP	± 0.038	–
λ_{HHH}	± 0.22	± 0.30
g_{HWW}	± 0.012	± 0.020
g_{HZZ}	± 0.012	± 0.013
g_{Htt}	± 0.030	± 0.061
g_{Hbb}	± 0.022	± 0.022
g_{Hcc}	± 0.037	± 0.102
$g_{H\tau\tau}$	± 0.033	± 0.048

- Kopplungen modellunabhängig auf Niveau von wenigen % bestimmbar
- Kopplung an unterschiedliche Fermionsorten auch aus 2. Generation
- Higgs-Selbstkopplung auf Niveau von 20 bis 30% bestimmbar

Warum die Präzision?

- Test des bisher unentdeckten und unbekanntes Higgs-Sektors
- wenn Abweichung → Hinweis auf neue Physik und deren Ursprung
- erwartete Präzision für SM-artiges Higgs-Boson (120 GeV)
 - am LHC
 - am ILC



Welches Higgs?

UnHiggs

Private Higgs

Little Higgs

Gaugephobic Higgs

Intermediate Higgs

Littlest Higgs

Slim Higgs

Composite Higgs

Fat Higgs

Higgsless

Portal Higgs

Gauge Higgs

Twin Higgs

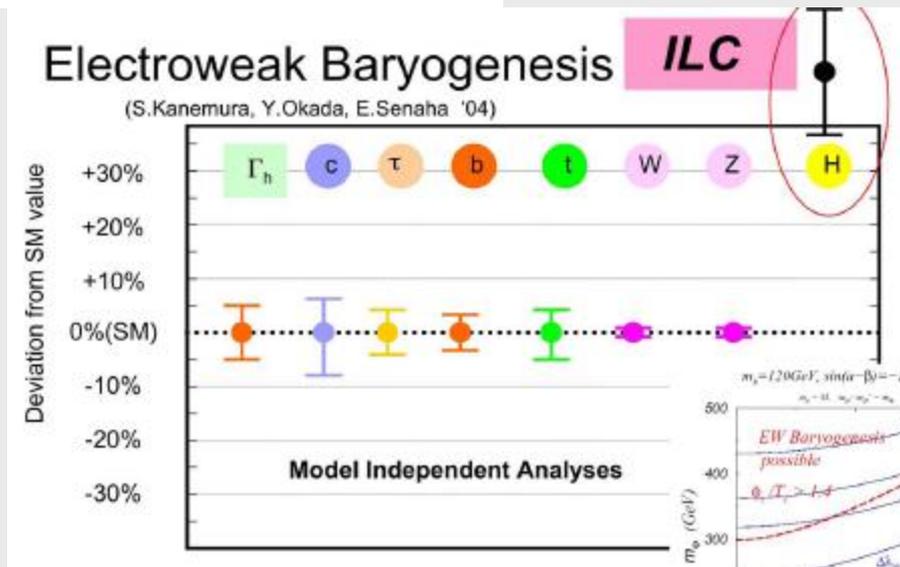
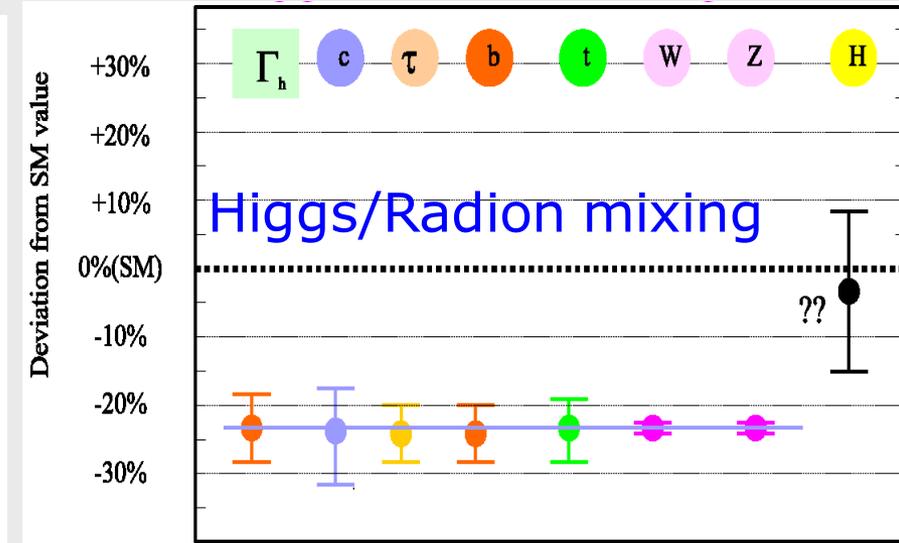
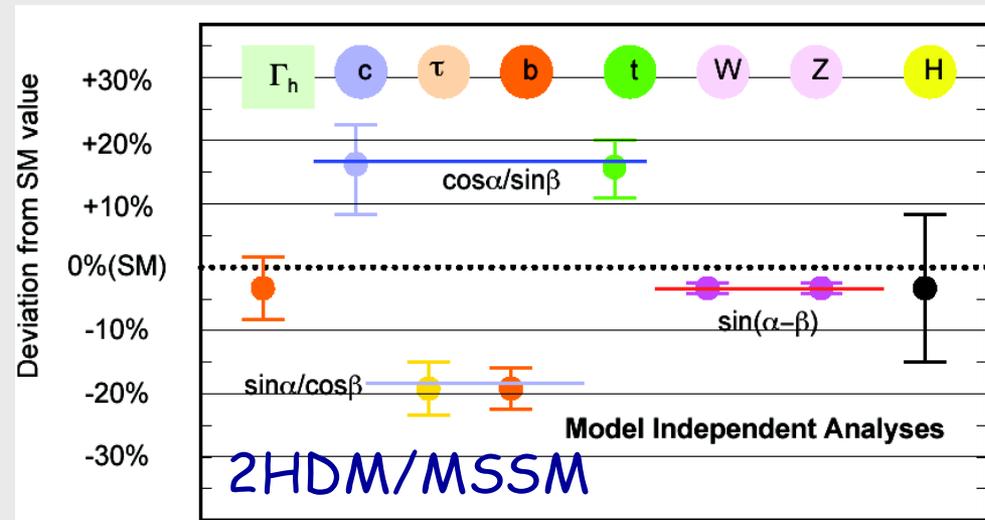
Lone Higgs

Simplest Higgs

Phantom Higgs

Warum die Präzision?

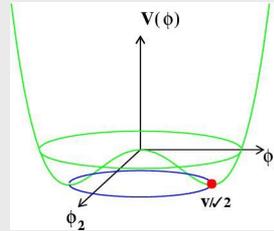
Beispiele für veränderte Kopplungen in erweiterten Higgs-Sektoren



Fragen/Probleme des Higgs-Sektors u. des SM

- Hierarchieproblem: alle Massen im SM proportional zu $v=246$ GeV
Planckskala $M_{Pl} = 10^{19}$ GeV
woher kommt diese große Hierarchie?

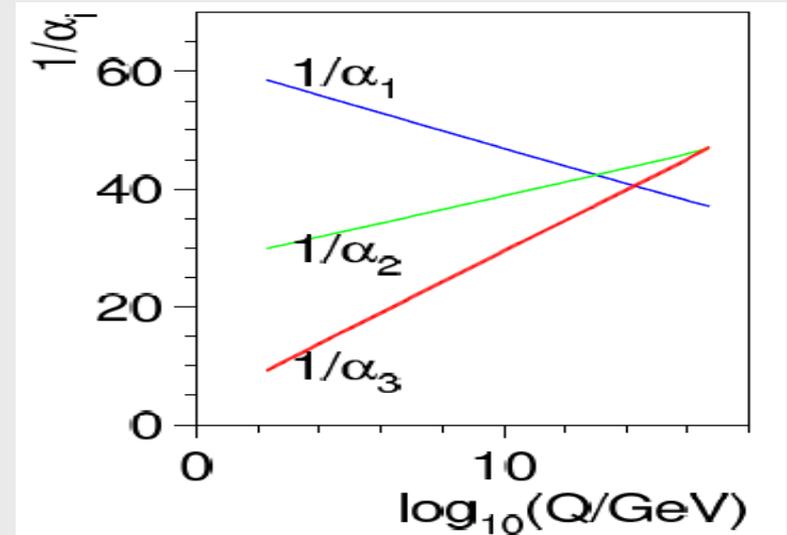
- warum ist Massenparameter im Higgs-Potenzial negativ?



$$V = -\mu^2 |\phi^+\phi| + \lambda |\phi^+\phi|^2$$

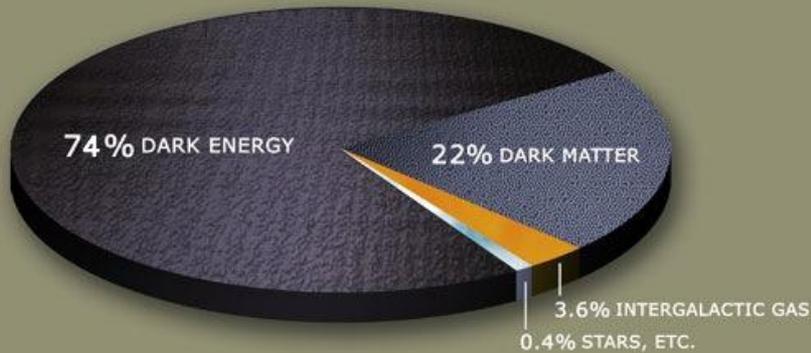
$$\mu^2, \lambda > 0$$

- keine Vereinigung der Kopplungen



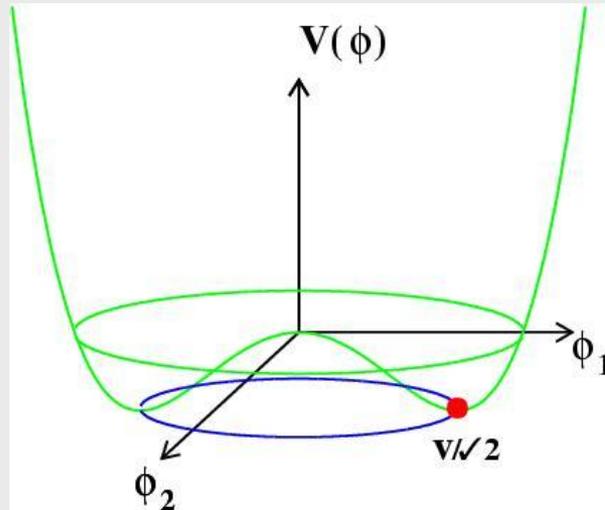
Fragen/Probleme des Higgs-Sektors u. des SM

■ Energieinhalt des Universums



keine geeignete Kandidaten für
dunke Materie im SM

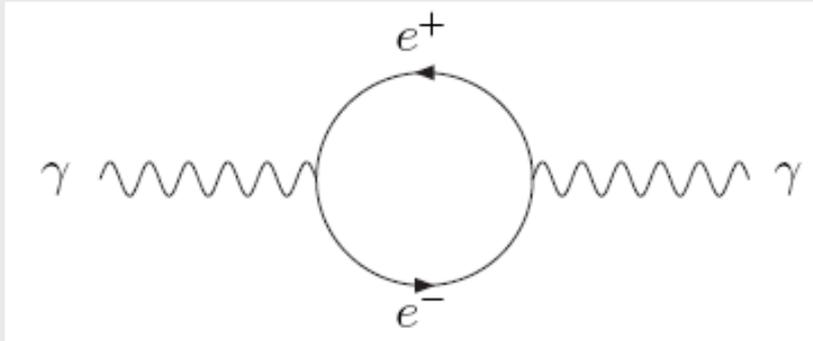
Neutrinos nur Prozentniveau



keine Erklärung für dunkle Energie
Higgs-Hintegrundfeld in naivem
Modell liefert Beitrag der
um Faktor -10^{52} falsch ist
(kann man fein adjustieren)

Selbstenergiekorrekturen (I): Photon

Photon



Zweipunktfunktion =

Propagatorkorrektur

Integration über innere
Impulse k bis
Abschneideskala bzw.
unendlich

$$\begin{aligned}\pi_{\gamma\gamma}^{\mu\nu}(0) &= - \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \text{tr} \left[(-ie\gamma^\mu) \frac{i}{\not{k} - m_e} (-ie\gamma^\nu) \frac{i}{\not{k} - m_e} \right] \\ &= -4e^2 \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{2k^\mu k^\nu - g^{\mu\nu} (k^2 - m_e^2)}{(k^2 - m_e^2)^2} \\ &= 0.\end{aligned}$$

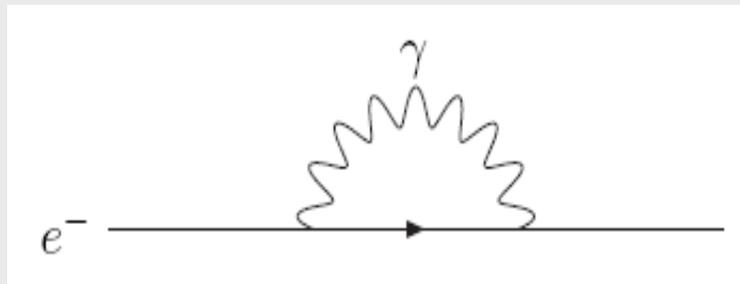
Korrekturen verschwinden in allen Ordnungen der Störungstheorie

Photon bleibt exakt masselos

Grund: Eichsymmetrie schützt Photonmasse

Selbstenergiekorrekturen (II): Elektron

■ Elektron



$$\begin{aligned}
 \pi_{ee}(0) &= \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} (-ie\gamma_\mu) \frac{i}{\not{k} - m_e} (-ie\gamma_\nu) \frac{-ig^{\mu\nu}}{k^2} \\
 &= -e^2 \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{1}{k^2 (k^2 - m_e^2)} \gamma_\mu (\not{k} + m_e) \gamma^\mu \\
 &= -4e^2 m_e \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{1}{k^2 (k^2 - m_e^2)}.
 \end{aligned}$$

logarithmische Divergenz: $\Delta M \sim \log \Lambda$

moderate Korrektur für $\Lambda_{\text{Cut}} = M_{\text{Pl}}$:

$$\delta m_e \simeq 2 \frac{\alpha_{\text{em}}}{\pi} m_e \log \frac{M_{\text{Pl}}}{m_e} \simeq 0.24 m_e,$$

Grund: für $m_e = 0$ hat Theorie chirale Symmetrie

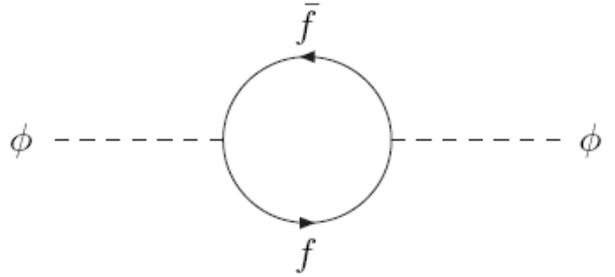
$$\psi_e \rightarrow \exp(i\gamma_5 \varphi) \psi_e$$

$m_e \neq 0$ bricht die Symmetrie leicht, aber dennoch schützt

ursprüngliche Symmetrie gegen grosse Divergenzen

Selbstenergiekorrekturen (III): Higgs-Boson

Higgs-Boson: Fermionschleife



$$\begin{aligned} \pi_{\phi\phi}^f(0) &= -N(f) \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \text{tr} \left[\left(i \frac{\lambda_f}{\sqrt{2}} \right) \frac{i}{\not{k} - m_f} \left(i \frac{\lambda_f}{\sqrt{2}} \right) \frac{i}{\not{k} - m_f} \right] \\ &= -2N(f)\lambda_f^2 \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{k^2 + m_f^2}{(k^2 - m_f^2)^2} \\ &= -2N(f)\lambda_f^2 \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \left[\frac{1}{k^2 - m_f^2} + \frac{2m_f^2}{(k^2 - m_f^2)^2} \right]. \end{aligned}$$

$$\Delta M_H^2 = N_f \frac{\lambda_f^2}{8\pi^2} \left[-\Lambda^2 + 6m_f^2 \log \frac{\Lambda}{m_f} - 2m_f^2 \right] + \mathcal{O}(1/\Lambda^2)$$

- erster Term: quadratisch divergent $\Delta M^2 \sim \Lambda^2$
- Grund: keine Symmetrie schützt Higgs-Bosonmasse oder Symmetriegruppe nicht grösser für $M_H=0$

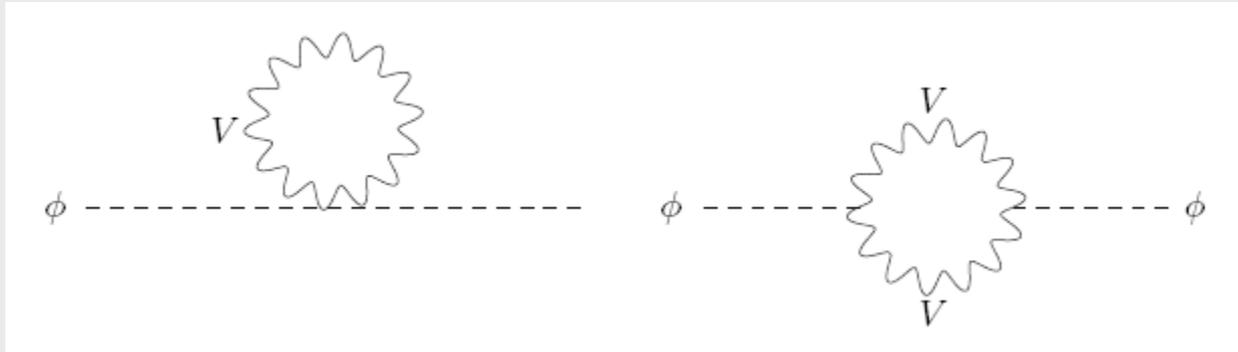
Für $\Lambda_{\text{Cut}} = M_{\text{Pl}}$ ist Korrektur $\sim 10^{30}$ (Vgl: Unitarität verlangt $M < 1\text{TeV}$)
 kein prinzipielles Problem in Renormierung,
 aber Feinabstimmung auf diesem Niveau erscheint extrem
 feinabgestimmt und unnatürlich (Finetuning, Naturelness)

Nach Renormierung: endlicher Beitrag: $N(f)m_f^2\lambda_f^2/8\pi$

Im SM: moderate Korrektur, neue Fermionen bei $M_{\text{GUT}} \rightarrow$ gr. Korrektur

Selbstenergiekorrekturen (IIb): Higgs-Boson

Higgs-Boson: Eichbosonschleifen



$$\pi_{\phi\phi}^V(0) = N(V) \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{-ig_{\mu\nu}}{k^2 - m_W^2} i\frac{g^2}{2} g^{\mu\nu} = 3g^2 \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{1}{k^2 - m_W^2}.$$

$$\begin{aligned} \pi_{\phi\phi}^{VV}(0) &= N(V) \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} (ig_{\mu\nu}gm_W) (ig_{\rho\sigma}gm_W) \frac{(-ig^{\mu\rho})(-ig^{\nu\sigma})}{(k^2 - m_W^2)^2} \\ &= 6g^2m_W \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{1}{(k^2 - m_W^2)^2}. \end{aligned}$$

Quadratische Divergenz von linkem Beitrag, logarithmische von rechtem

Selbstenergiekorrekturen (IIIc): Higgs-Boson

Higgs-Boson: Higgsbosonschleifen



$$\pi_{\phi\phi}^{\phi}(0) = \frac{3}{8}g^2 \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{1}{k^2 - m_{\phi}^2}$$

$$\pi_{\phi\phi}^{\phi\phi}(0) = \frac{9}{8}g^2 m_W^2 \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{1}{(k^2 - m_{\phi}^2)^2}$$

Quadratische Divergenz von linkem Beitrag, logarithmische von rechtem

$$\Delta M_H^2 = \frac{\lambda_S N_S}{16\pi^2} \left[-\Lambda^2 + 2m_S^2 \log\left(\frac{\Lambda}{m_S}\right) \right] - \frac{\lambda_S^2 N_S v^2}{16\pi^2} \left[-1 + 2\log\left(\frac{\Lambda}{m_S}\right) \right] + \mathcal{O}\left(\frac{1}{\Lambda^2}\right)$$

- alle Teilenschleifen führen zu quadratischen Divergenzen
- natürlicher Wert der Higgs-Boson-Masse = Skala neuer Physik
- für $\Lambda_{\text{neu}} = M_{\text{Pl}}$: Korrektur $\sim 10^{30} \text{ GeV}^2$
- nur elementare skalare Teilchen haben dieses Problem

Mögliche Auswege

Fermionkorrekturen

$$\Delta M_H^2 = N_f \frac{\lambda_f^2}{8\pi^2} \left[-\Lambda^2 + 6m_f^2 \log \frac{\Lambda}{m_f} - 2m_f^2 \right] + \mathcal{O}(1/\Lambda^2)$$

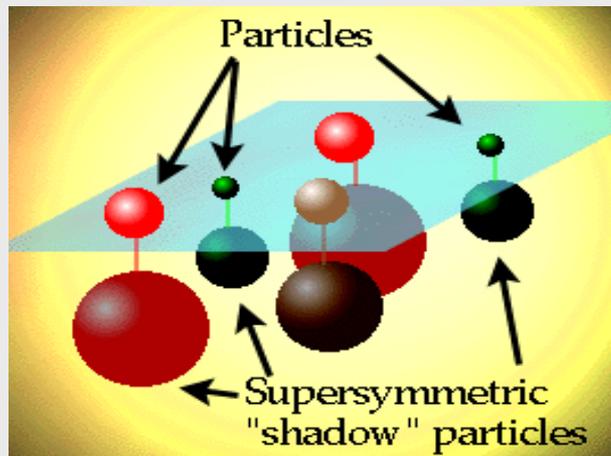
Skalarfeldkorrekturen

$$\Delta M_H^2 = \frac{\lambda_S N_S}{16\pi^2} \left[-\Lambda^2 + 2m_S^2 \log \left(\frac{\Lambda}{m_S} \right) \right] - \frac{\lambda_S^2 N_S}{16\pi^2} v^2 \left[-1 + 2 \log \left(\frac{\Lambda}{m_S} \right) \right] + \mathcal{O} \left(\frac{1}{\Lambda^2} \right)$$

■ Einführung einer neuen Symmetrie

- Masse des Higgs-Boson geschützt
- neue Teilchen mit angepassten Kopplungen kompensieren Divergenz

Beispiele: **Supersymmetrie**, Little Higgs etc.

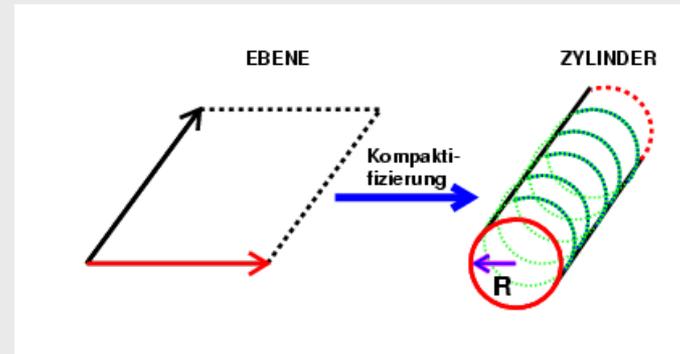
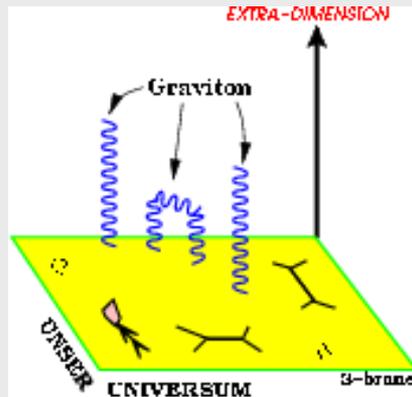


$$\lambda_f^2 = 2m_f^2/v^2 = -\lambda_S,$$

$$\Delta M_H^2 = \frac{\lambda_f^2 N_f}{4\pi^2} \left[(m_f^2 - m_S^2) \log \left(\frac{\Lambda}{m_S} \right) + 3m_f^2 \log \left(\frac{m_S}{m_f} \right) \right] + \mathcal{O} \left(\frac{1}{\Lambda^2} \right)$$

Mögliche Auswege

- Abschneideskala M_{pl} ist bei etwa TeV \rightarrow Korrektur moderat
 - zumindest Gravitation lebt in neuen Raumdimensionen
 - dort ist M_{pl} bei TeV, in drei Dimensionen ist $M_{pl} = 10^{19} \text{ GeV}$
- Beispiele: **ADD-Modell**, RS-Modell, Universal Extra Dimensions, ...



- Vermeide elementare skalare Teilchen im Spektrum
 - „Higgs-Boson“ ist zusammengesetzt
- Beispiel: Technicolor, aus Techniquarks mittels TC-Wechselwirkung (Analogie: Pion ein Quarkantiquarkbindungszustand in QCD)
- „Higgs Boson“ ist 5. Komponente eines Eichfeldes in höheren Dim.
- Beispiel: Higgsless Models

Die Artikel aus vorherigem Kapitel

Theorie:

1) An Introduction to supersymmetry.

By Manuel Drees , hep-ph/9611409

2) The Anatomy of electro-weak symmetry breaking. II.

The Higgs bosons in the minimal supersymmetric model.

By Abdelhak Djouadi , Phys.Rept.459:1-241,2008, hep-ph/0503173

ILC:

1) TESLA: The Superconducting electron positron linear collider

Technical design report. Part 3. Physics at an $e^+ e^-$ linear collider.

By ECFA/DESY LC Physics Working Group, hep-ph/0106315

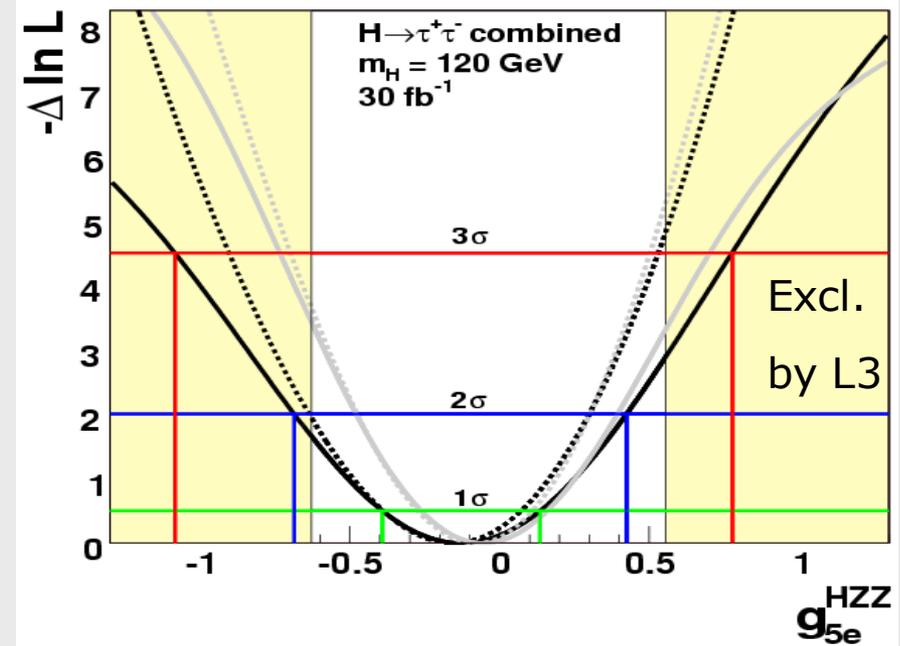
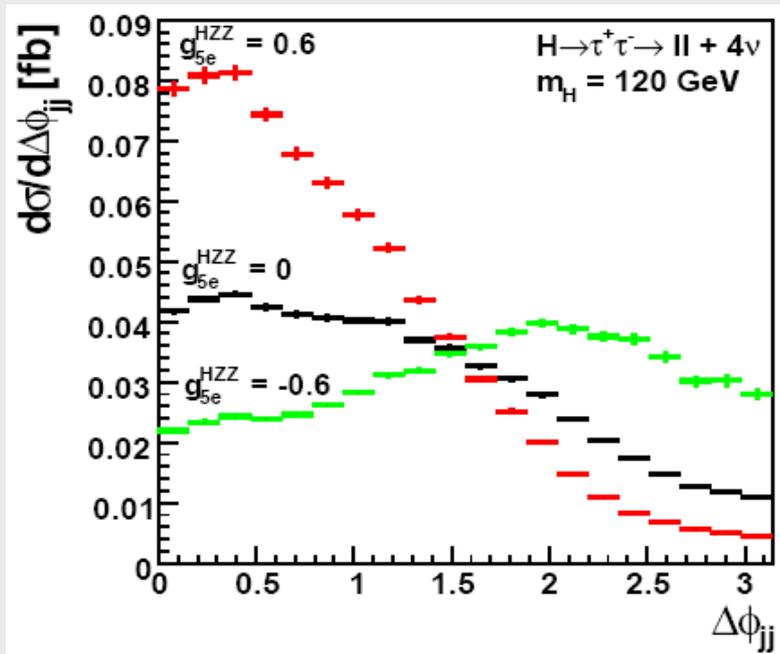
2) Higgs physics at a future $e^+ e^-$ linear collider.

By Markus Schumacher, hep-ph/0107273

Additional small coupling: „SM + g_{5E} CPE“

(i) different total cross section and (ii) distortion of $\Delta\phi_{jj}$ distribution

- SM+CPE: interference significant in $\Delta\phi_{jj}$ distribution
 - SM+CPO: no interference effects in the $\Delta\phi_{jj}$ distribution
- only SM+ g_{5E} CPE contribution studied here



$\Delta g_{5E} = 0.11$ at $m_H = 160 \text{ GeV}$ in $H \rightarrow WW$ for 30 fb^{-1}

$\Delta g_{5E} = 0.24$ at $m_H = 120 \text{ GeV}$ in $H \rightarrow \tau\tau$ for 30 fb^{-1}

systematic uncertainty from BG normalisation < 0.02

caveats: LO MC generators, gluon fusion from PYTHIA