Massiv? — Massiv!
Higgs-Phänomenologie an zukünftigen Beschleunigern

Sven Heinemeyer, CERN

Würzburg, 05/2005

1. Einleitung
2. Messung von Higgs-Kopplungen am LHC
3. Das Higgs-Boson in der Supersymmetrie
4. SUSY-Higgs-Physik und Dunkle Materie
5. Zusammenfassung

1. Einleitung

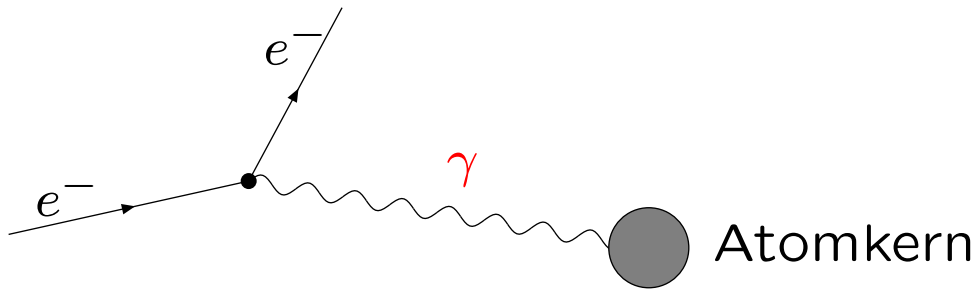
Standardmodell (SM) der elektroschwachen und starken Wechselwirkung

SM: Quantenfeldtheorie $\Rightarrow$ Wechselwirkung: Austausch von Feldquanten

Bauprinzip des SM: Eichinvarianz

Beispiel: Quantenelektrodynamkik (QED)

Feldquant: Photon A_μ



$\mathcal{L}_{\text{QED}}$ invariant unter Eichtransformation:

$\Psi \to e^{i\,e\,\lambda(x)}\Psi$, $A_\mu \to A_\mu + \partial_\mu \lambda(x)$

Massenterm für Photon: $m^2 A^\mu A_\mu$ nicht eichinvariant

$\Rightarrow A_\mu$ ist masseloses Eichfeld

Unsere Welt im Kleinsten:

A) Elektroschwaches Standardmodell:

vereinheitlichte Beschreibung von elektromagnetischer und schwacher Kraft

Materie-Teilchen: Fermionen

Quarks: $\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}, u_R, d_R,$ Leptonen: $\begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}, e_R, \nu_R$

3 Generationen:

u, d	s, c	t, b
ν_e, e	ν_μ, μ	ν_τ, τ

Feldquanten: Eichbosonen: γ, Z, W^+, W^-

Eichgruppe: $SU(2)_I \times U(1)_Y \supset U(1)_{em}$

B) Starke Wechselwirkung: QCD

Eichbosonen: $g_1, \ldots g_8$: Gluonen , Eichgruppe: $SU(3)_C$

$\Rightarrow$ **Standardmodell der elektroschwachen und starken Wechselwirkung**
(nicht-abelsche Eichtheorie)

Alle postulierten Fermionen und Eichbosonen experimentell nachgewiesen

Problem:

Eichfelder Z, W^+, W^- sind massiv

explizite Massenterme im Lagrangian $\Leftrightarrow$ Brechung der Eichinvarianz

Lösung: Higgs-Mechanismus

skalares Feld postuliert, Massenterme aus der Kopplung an das Higgs-Feld

Higgs-Sektor im Standardmodell:

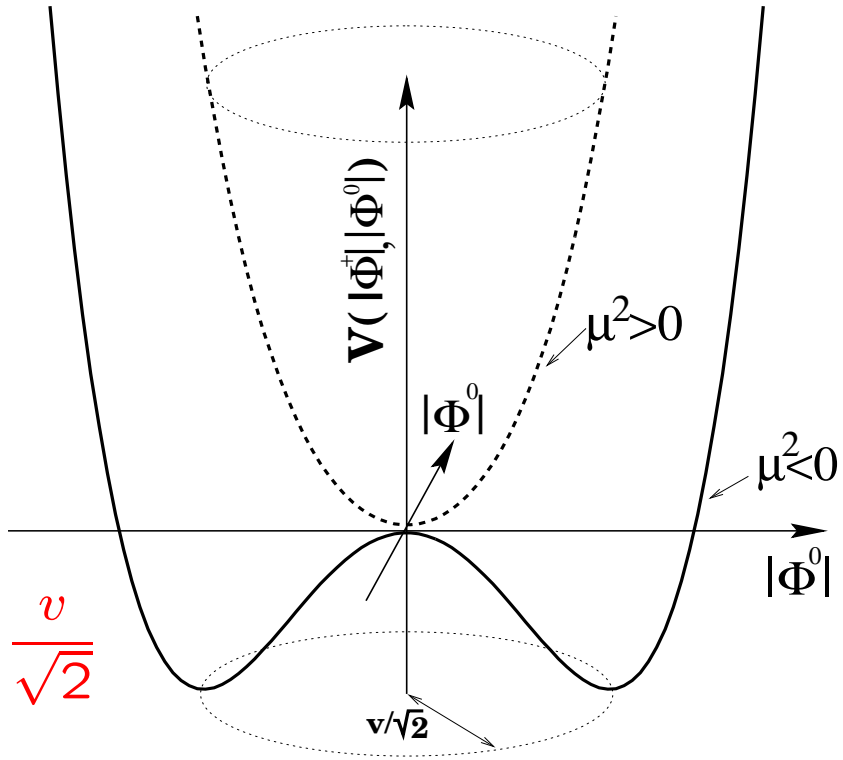
Skalares SU(2)-Dublett: $\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$

Higgs-Potential:

$$V(\Phi) = \mu^2 \left|\Phi^\dagger \Phi\right| + \lambda \left|\Phi^\dagger \Phi\right|^2, \quad \lambda > 0$$

$\mu^2 < 0$: Spontane Symmetrie-Brechung

Potential-Minimum bei $|\langle \Phi_0 \rangle| = \sqrt{\frac{-\mu^2}{2\lambda}} \equiv \frac{v}{\sqrt{2}}$



$$\Phi = \begin{pmatrix} 0 \\ v + H \end{pmatrix} \quad \text{(unitäre Eichung)}$$

H: elementares Skalar-Feld, Higgs-Boson

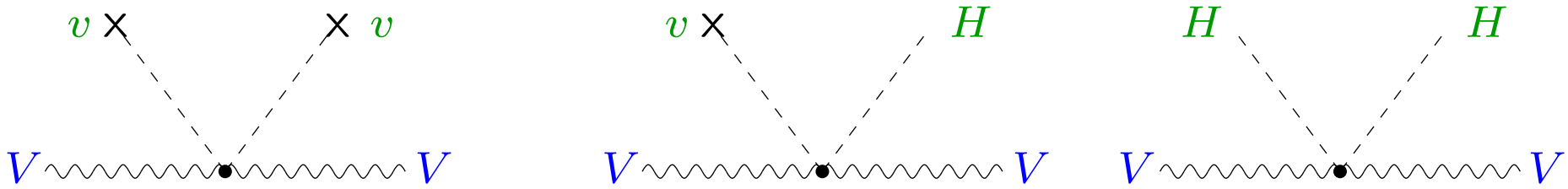
Lagrange-Dichte:

$$\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = (D_\mu \Phi)^\dagger (D^\mu \Phi) - V(\Phi)$$

Eichinvariante Kopplung an Eichfelder

$\Rightarrow$ Massenterme für Eichbosonen und Fermionen

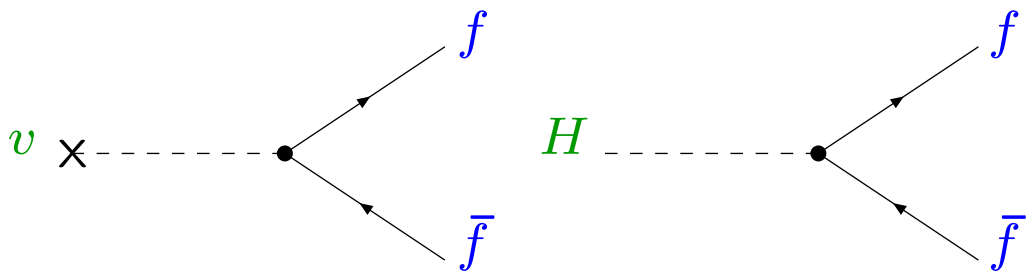
1.) $VV\Phi\Phi$ Kopplung:



$\Rightarrow$ VV Massenterme $\qquad$ $\Rightarrow$ 3er- und 4er-Kopplungen an Eichbosonen

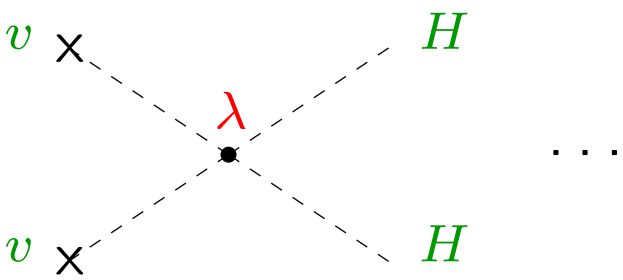
$g_2^2 v^2/2 \equiv M_W^2$, $(g_1^2 + g_2^2) v^2/2 \equiv M_Z^2$ $\Rightarrow$ Kopplung $\propto$ Massen

2.) Fermion-Massenterme: Yukawa-Kopplungen



$m_f = v\, g_f \Rightarrow$ Kopplung $\propto$ Massen

3.) Masse des Higgs-Bosons: Selbstkopplung



$\ldots$

$\lambda = M_H^2/v$

$M_H = v\sqrt{\lambda}$ freier Parameter

$\rightarrow$ Letzter unbekannter Parameter des SM

$\Rightarrow$ Etablierung des Higgs-Mechanismus $\equiv$ Higgs-Entdeckung $\oplus$ Messung der Higgs-Kopplungen

SM (incl. Higgs): Eichinvariante Lagrangedichte:

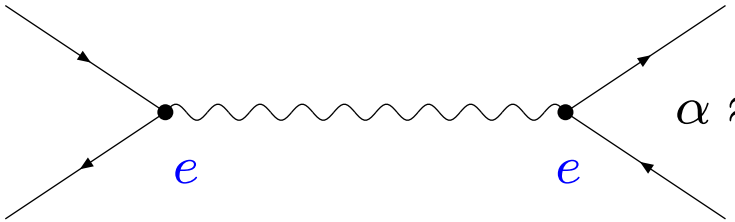
$$\mathcal{L}_{\mathrm{EW}}(\underbrace{g_2, g_1, v}_{M_W,\ M_Z,\ \alpha},\ \underbrace{\lambda}_{M_H},\ \underbrace{g_f}_{m_f}) + \mathcal{L}_{\mathrm{QCD}}(\alpha_s)$$

Eichinvarianz $\Rightarrow$ **Theorie ist renormierbar**

[*G. 't Hooft '71*] [*G. 't Hooft, M. Veltman '72*] *Nobelpreis '99*

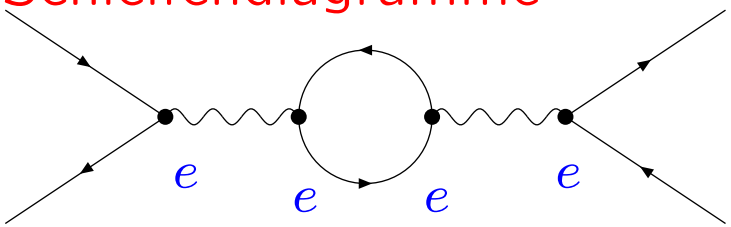
Quantenfeldtheorie: Quanteneffekte berechenbar

Entwicklung in der Kopplungskonstante: Niedrigste Ordnung, klassischer Grenzfall:



$$\alpha \approx \frac{1}{137} = \frac{e^2}{4\pi}$$

Quantenkorrekturen: Schleifendiagramme



In Schleifenkorrekturen: alle Teilchen/Parameter des Modells gehen ein

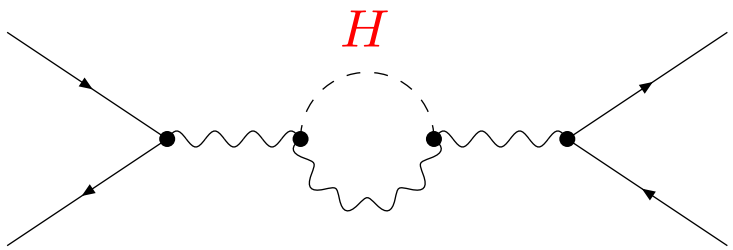
Indirekte Messung mit Präzisions-Observablen:

Vergleich von elektroschwachen Präzisions-Observablen mit Theorie:

EW Präzisions-Daten:		Theorie:
$M_{\mathrm{W}}, \sin^2\theta_{\mathrm{eff}}, (g-2)_\mu, \ldots$	$\leftrightarrow$	SM, MSSM , . . .

$$\Downarrow$$

Test der Theorie auf dem Quanten-Niveau:
Sensitivität auf Loop-Korrekturen



$$\Downarrow$$

Alle Parameter des Modells gehen ein
$\Rightarrow$ Schranken an M_H

Globaler Fit an alle SM-Daten:

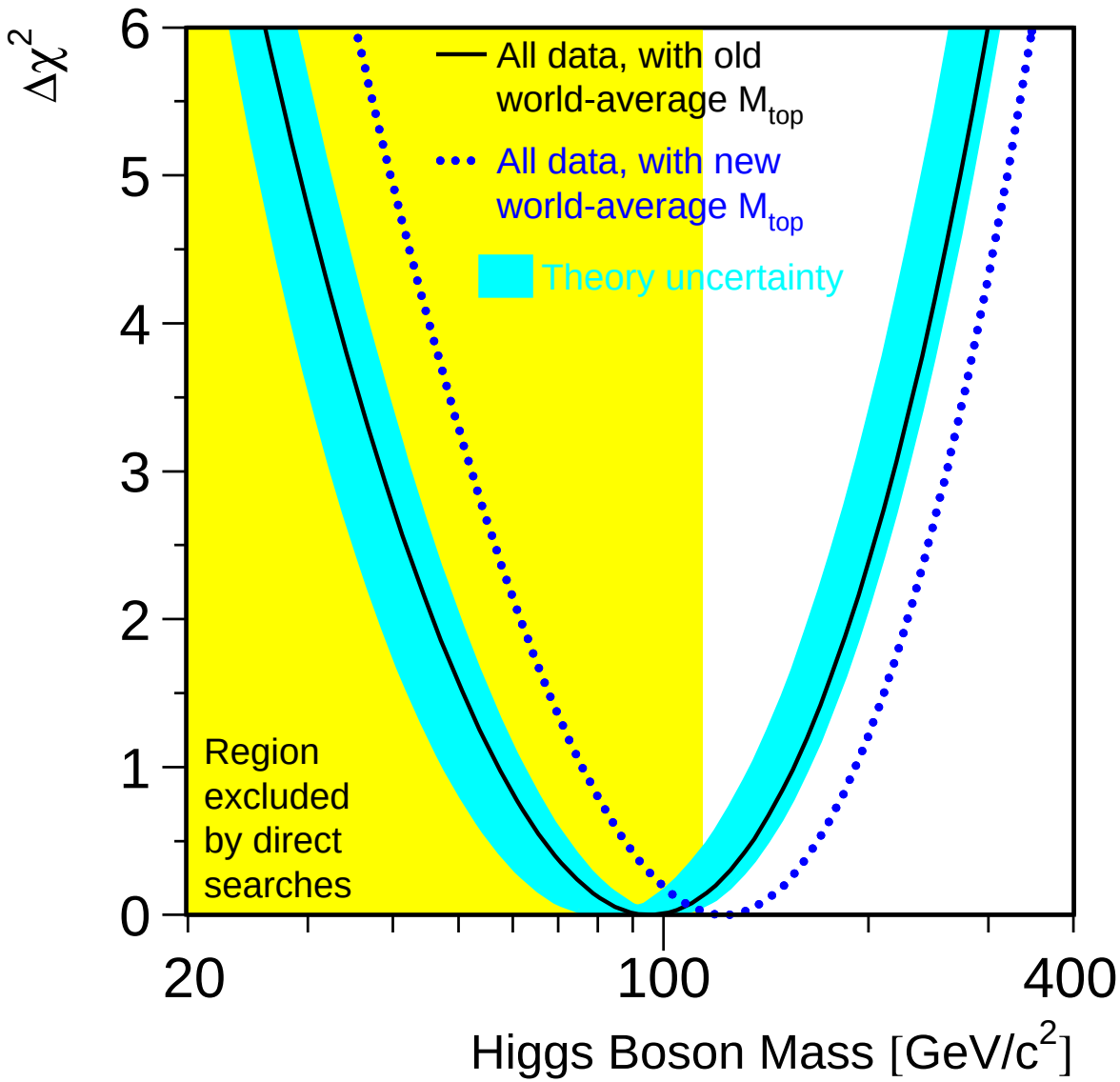
[*LEPEWWG '04*]

$\Rightarrow M_H = 117^{+67}_{-45}$ GeV

$M_H < 251$ GeV, 95% C.L.

Annahme beim Fit:
SM inkl. Higgs-Boson

$\Rightarrow$ keine volle Bestätigung des Higgs-Mechanismus

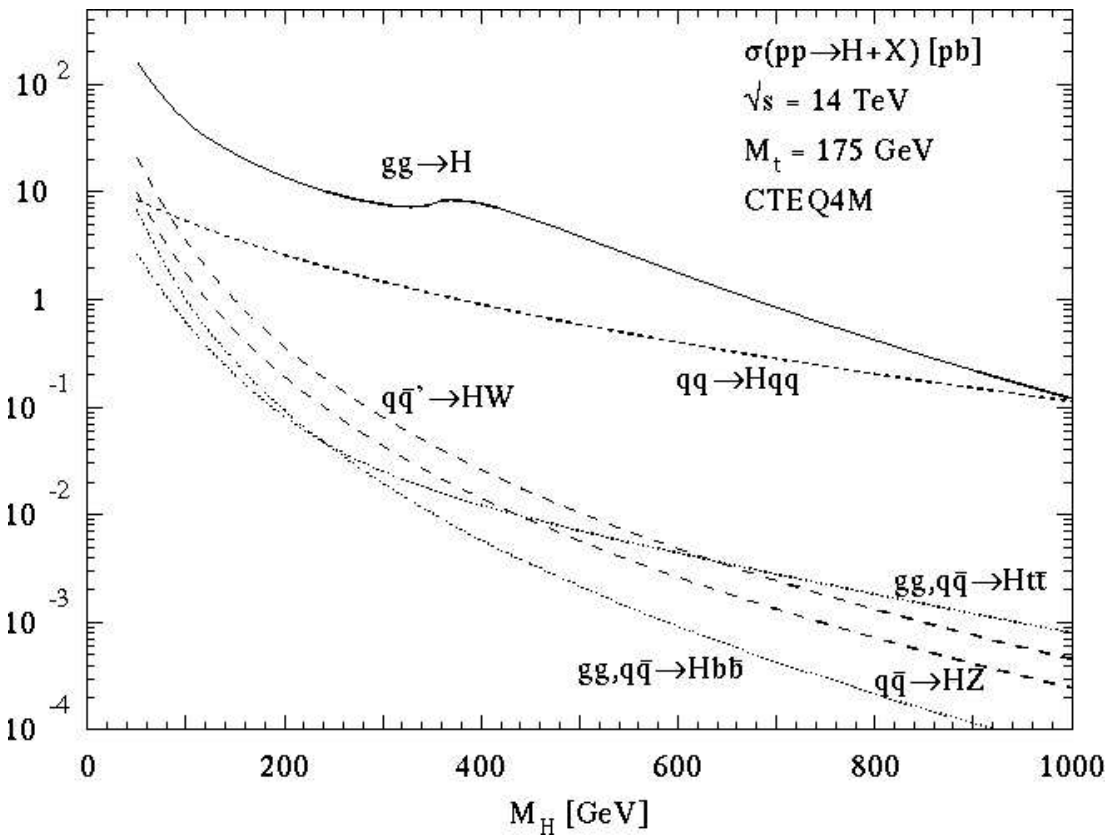


$\Rightarrow$ Higgs-Boson scheint leicht zu sein, $M_H \lesssim 250$ GeV

2. Messung von Higgs-Kopplungen am LHC

[*M. Dührssen, S.H., H. Logan, D. Rainwater, G. Weiglein, D. Zeppenfeld '04*]

Higgs-Produktion am LHC: (LHC: pp Beschleuniger) → T



Gluon-Fusion: $gg \to H$

Eichboson-Fusion (WBF): $q\bar{q} \to q'\bar{q}'H$

Top-Quark assoziierte Produktion: $gg, q\bar{q} \to t\bar{t}H$

Eichboson assoziierte Produktion: $q\bar{q}' \to WH, ZH$

[*M. Spira et al.*]

Können daraus (modell-unabh.) die Higgs-Kopplungen bestimmt werden?

Jura mountains
CERN
ATLAS
CMS
Geneve Airport
LHC tunnel (27km)

Messungen am LHC:

Messung von $\sigma \times$ BR: "narrow width"-Näherung:

$$\Rightarrow \sigma(H) \times \mathrm{BR}(H \to xx) \;=\; \sigma(H)^{\mathrm{SM}} \cdot \frac{\Gamma_{\mathrm{prod}}}{\Gamma_{\mathrm{prod}}^{\mathrm{SM}}} \times \frac{\Gamma_{\mathrm{partial}}}{\Gamma_{\mathrm{tot}}}$$

Beobachtung von verschiedenen Kanälen
$\Rightarrow$ Information über Kombinationen von $\Gamma_b, \Gamma_\tau, \Gamma_W, \Gamma_Z, \Gamma_g, \Gamma_\gamma, Y_t^2$

$\Rightarrow$ Zusätzliche theoretische Annahmen notwendig für absolute Bestimmung von Partial-Breiten

Einzige Annahme:

$\rightarrow$ betrachte allgemeines Multi-Higgs-Dublett-Modell
mit/ohne zusätzliche Higgs-Singletts
($\Rightarrow$ schließt z.B. MSSM ein)

$\Rightarrow$ Absolute Bestimmung von Γ_{tot} und Higgs-Kopplungen mit globalem Fit

$\Rightarrow$ (annähernd) modell-unabhängige Analyse

Luminosität am LHC:

- $2 * 30$ fb^{-1}: 30 fb^{-1} in jedem der beiden Experimente
- $(2*300+2*100)$ fb^{-1}: 300 fb^{-1} in jedem Experiment, aber nur 100 fb^{-1} nutzbar für Eichboson-Fusion

Abschätzung der Fehler:

1.) Statistische Fehler:

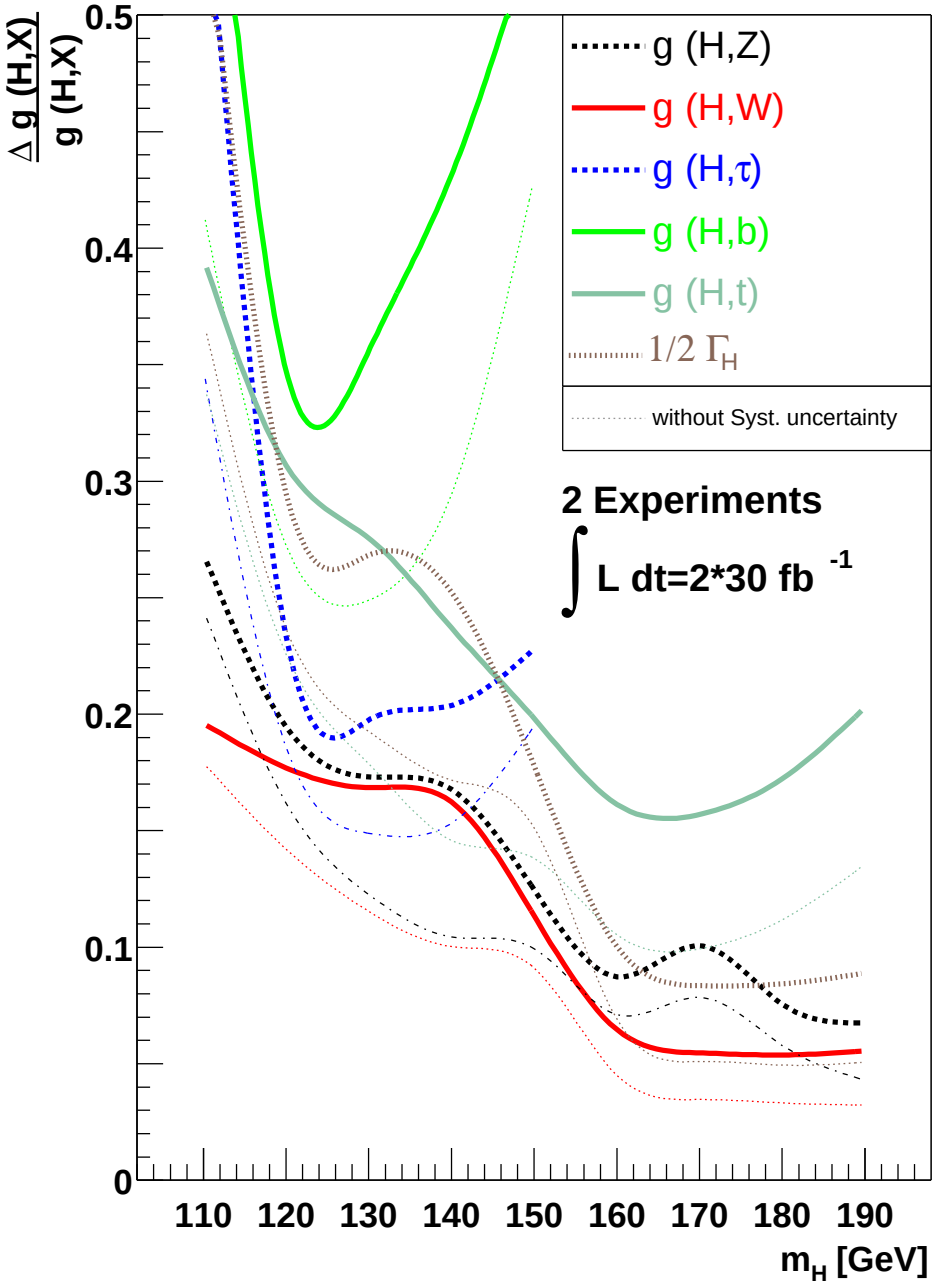
Annahme: SM-Raten für Produktion und Zerfall in allen Szenarien

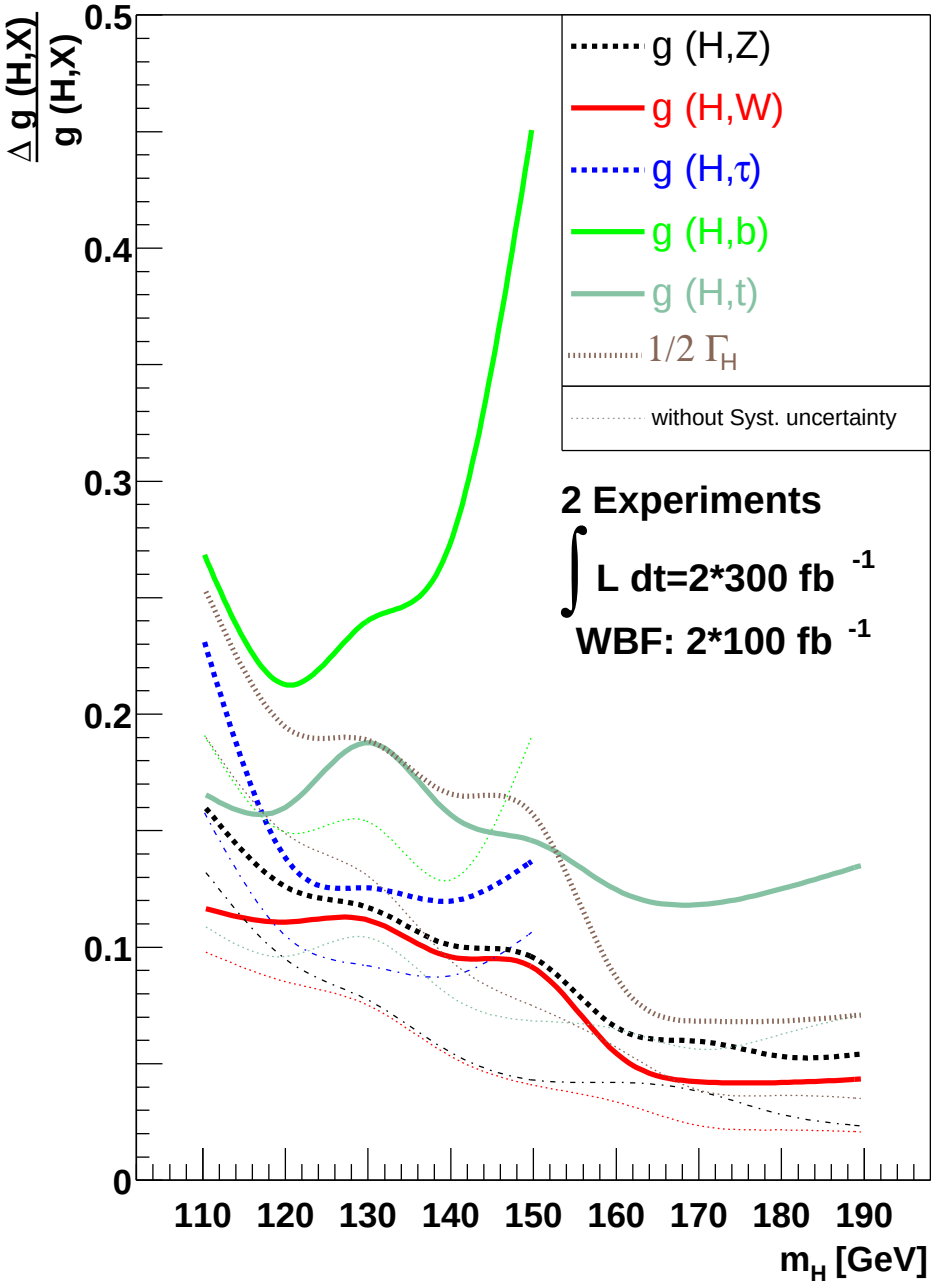
2.) Systematische Fehler:

$\rightarrow$ Versuch, alle denkbaren Fehler realistisch abzuschätzen

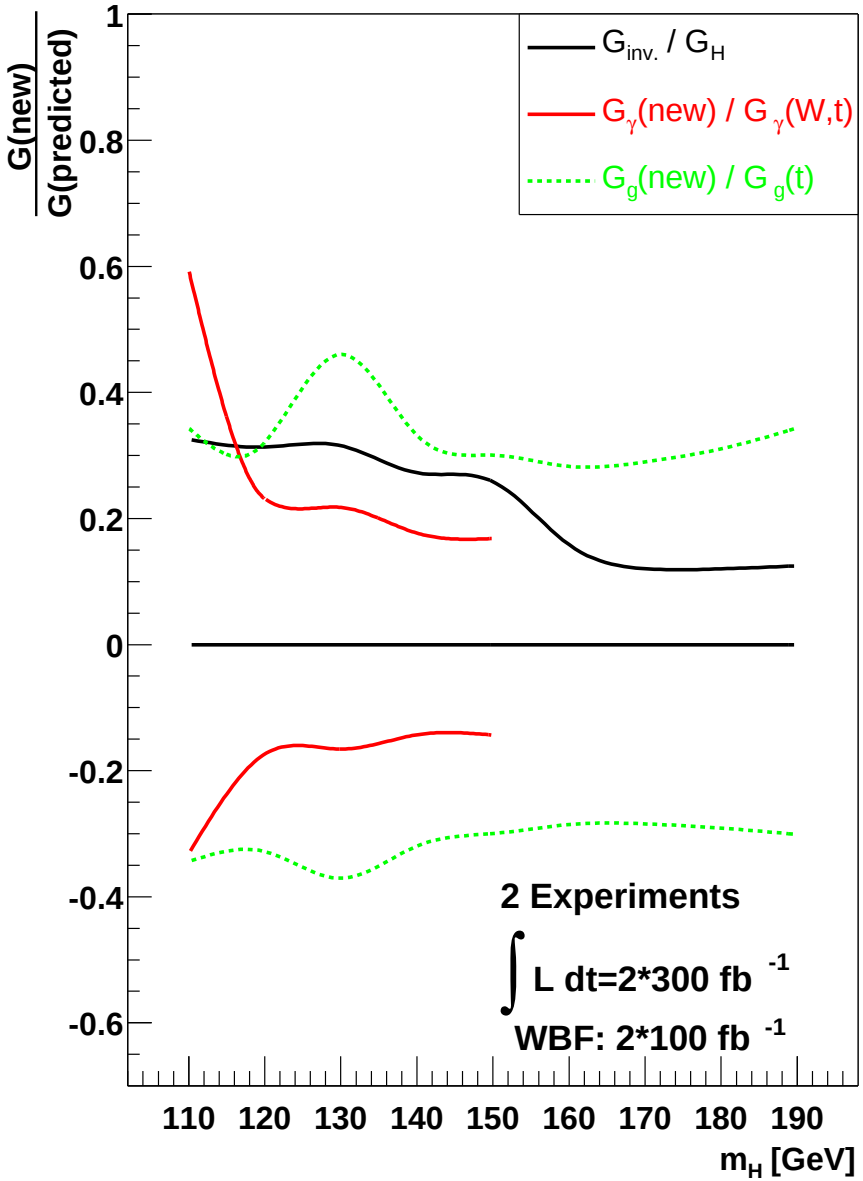
$\Rightarrow$ "log likelihood"-Funktion,
basierend auf statistischen und systematischen Fehlern

Relative Präzision für partielle und totale Higgs-Breiten: zwei Szenarien





Schranken an neue "'extra" Partial-Breiten:



Messung von SM-Raten

⇒ Schranken an Breiten:

$(2 * 300 + 2 * 100)$ fb^{-1} Szenario:

$$\Delta\Gamma_\gamma \leq 0.2 \times \Gamma_\gamma^{\mathrm{SM}}$$

$$\Delta\Gamma_g \leq 0.4 \times \Gamma_g^{\mathrm{SM}}$$

$$\Delta\Gamma_{\mathrm{inv}} \leq 0.2 \times \Gamma_{\mathrm{tot}}^{\mathrm{SM}}$$

⇒ Schranken an neue Physik

Ergebnisse:

Absolute Bestimmung von Higgs-Kopplungen möglich!

Szenario mit niedriger Luminosität: $2 * 30$ fb^{-1} :

für leichtes Higgs: Ergebnisse signifkant schlechter verglichen zu hoher Luminosität

Szenario mit höherer Luminosität: $(2 * 300 + 2 * 100)$ fb^{-1} :

- Typische Genauigkeit von 15-25% für $m_H \lesssim 150$ GeV
- 5% Genauigkeit für HVV Kopplungen über WW-Schwelle

Systematische Fehler tragen bis zur Hälfte zum totalen Fehler bei, speziell bei hoher Luminosität

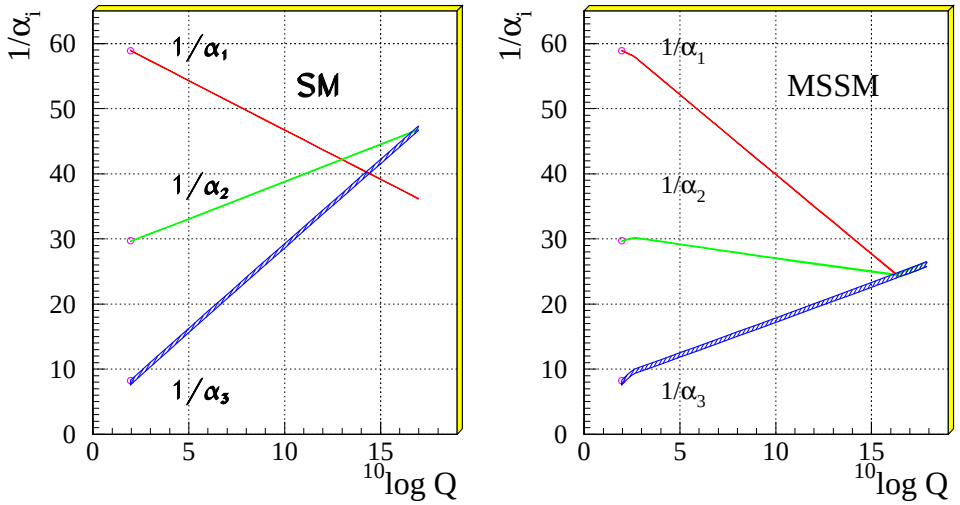
3. Das Higgs-Boson in der Supersymmetrie

Supersymmetrie: Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen

$$Q|\text{Boson}\rangle = |\text{Fermion}\rangle$$
$$Q|\text{Fermion}\rangle = |\text{Boson}\rangle$$

- Haag-Lopuszanski-Sohnius Theorem
- lokale SUSY: Verbindung zur Gravitation
- Kopplungs-Konstanten-Vereinigung
- Higgs-Mechanismus automatisch
  $\Rightarrow$ Top-Quark Massen-Vorhersage
- LSP ist guter CDM-Kandidat

Unification of the Coupling Constants in the SM and the minimal MSSM



$\Rightarrow$ Das Minimale Supersymmetrische Standardmodell (MSSM) ist eine sehr gut motivierte Erweiterung des SM

Das Minimale Supersymmetrische Standardmodell (MSSM)

Superpartner für alle Standardmodell Teilchen

$$\left[u, d, c, s, t, b\right]_{L,R} \quad \left[e, \mu, \tau\right]_{L,R} \quad \left[\nu_{e,\mu,\tau}\right]_{L} \qquad \text{Spin } \tfrac{1}{2}$$

$$\left[\tilde{u}, \tilde{d}, \tilde{c}, \tilde{s}, \tilde{t}, \tilde{b}\right]_{L,R} \quad \left[\tilde{e}, \tilde{\mu}, \tilde{\tau}\right]_{L,R} \quad \left[\tilde{\nu}_{e,\mu,\tau}\right]_{L} \qquad \text{Spin } 0$$

$$g \quad \underbrace{W^{\pm}, H^{\pm}} \quad \underbrace{\gamma, Z, H_1^0, H_2^0} \qquad \text{Spin 1 / Spin 0}$$

$$\tilde{g} \quad \tilde{\chi}^{\pm}_{1,2} \quad \tilde{\chi}^{0}_{1,2,3,4} \qquad \text{Spin } \frac{1}{2}$$

Erweiterter Higgs-Sektor: zwei Higgs-Doubletts

Exakte SUSY: $m_f = m_{\tilde{f}} \Rightarrow$ SUSY muss gebrochen sein

SUSY-Massenskala: $M_{\text{SUSY}} = \mathcal{O}\,(1 \text{ TeV})$

$\Rightarrow$ Ähnlich gute Beschreibung der experimentellen Daten wie im SM

Erweiterter Higgs-Sektor: zwei Higgs-Doubletts

$$H_1 = \begin{pmatrix} H_1^1 \\ H_1^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 + (\phi_1 + i\chi_1)/\sqrt{2} \\ \phi_1^- \end{pmatrix}$$

$$H_2 = \begin{pmatrix} H_2^1 \\ H_2^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_2^+ \\ v_2 + (\phi_2 + i\chi_2)/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

$$V = m_1^2 H_1 \bar{H}_1 + m_2^2 H_2 \bar{H}_2 - m_{12}^2 (\epsilon_{ab} H_1^a H_2^b + \text{h.c.})$$

$$+ \underbrace{\frac{g'^2 + g^2}{8}}_{} (H_1 \bar{H}_1 - H_2 \bar{H}_2)^2 + \underbrace{\frac{g^2}{2}}_{} |H_1 \bar{H}_2|^2$$

Eich-Kopplungen, im Gegensatz zum SM

Physikalische Zustände: $h^0, H^0, A^0, H^\pm$

Goldstone-Bosonen: $G^0, G^\pm$

Neue Parameter: (müssen experimentell bestimmt werden!)

$$\tan\beta = \frac{v_2}{v_1}, \qquad M_A^2 = -m_{12}^2 (\tan\beta + \cot\beta)$$

Im Gegensatz zum SM Higgs-Sektor:

SUSY legt Higgs-Sektor-Parameter fest (aus Eichsektor)

$\Rightarrow m_h$ ist kein freier Parameter, Berechnung innerhalb des Modells möglich

Niedrigste Ordnung: $m_h \leq M_Z$

$\Rightarrow$ SUSY sagt leichtes Higgs-Boson h voraus

Exkursion: Higgs-Massen-Berechnung $\Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow$

Was ist eine Teilchen-Masse?

Definition: Die Masse^2 eines Teilchens ist der Pol des Propagators

Bsp: skalares Teilchen

Propagator:

$$\frac{i}{q^2 - m^2}$$

q^2 : Viererimpulsquadrat
m^2: Konstante aus der Lagrangedichte

Wenn $q^2 = m^2$ gewählt wird, so besitzt der Propagator einen Pol.
Dieses q^2 ist dann die Masse des Teilchens.

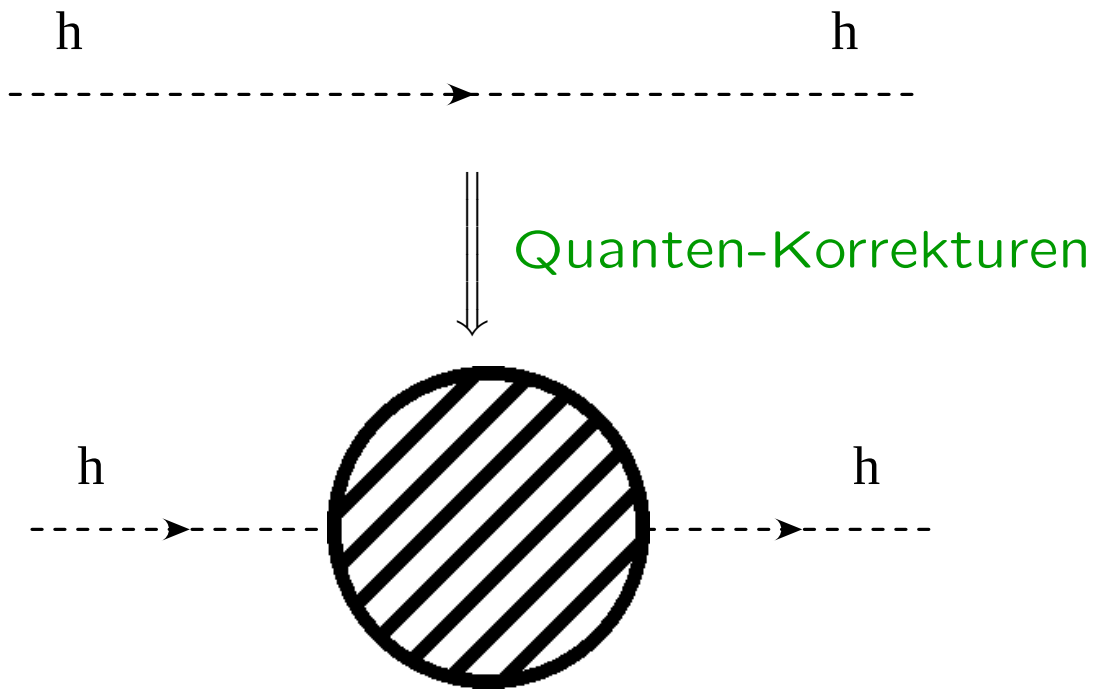
$\Rightarrow$ Pol des Propagators entspricht Nullstelle des inversen Propagators.

Inverser Propagator:

$$-i(q^2 - m^2)$$

Problem: Quanten-Korrekturen

Higgs-Propagator:



Inverser Propagator:

$$-i(q^2 - m^2) \quad \longrightarrow \quad -i\left(q^2 - m^2 + \hat{\Sigma}_h(q^2)\right)$$

$\hat{\Sigma}_h(q^2)$: renormierte Higgs-Selbstenergie

Exkursion: Higgs-Massenberechnung (Fortsetzung)

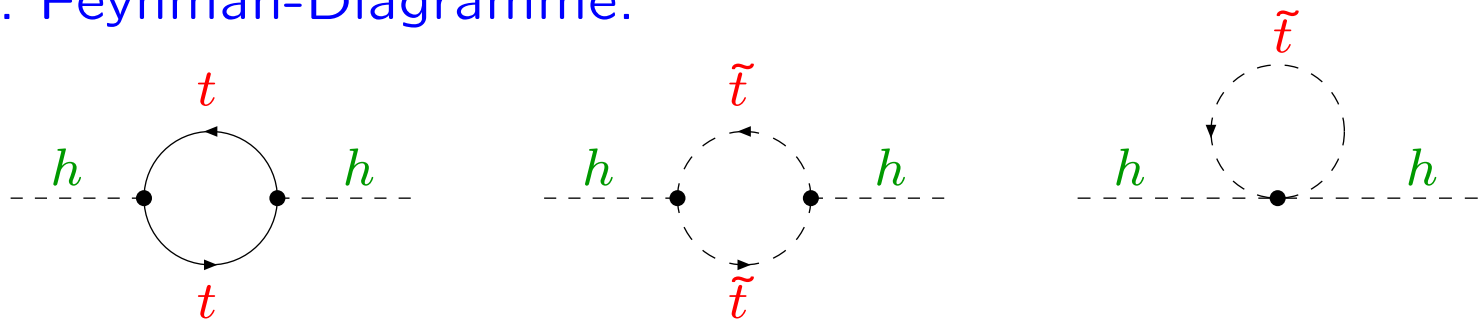
Berechnung des "Blobs":

$= \hat{\Sigma}(q^2) = \hat{\Sigma}^{(1)}(q^2) + \hat{\Sigma}^{(2)}(q^2) + \ldots$

: alle MSSM-Teilchen tragen bei

Hauptbeitrag: $t/\tilde{t}$-Sektor ($\tilde{t}$: skalares Top, SUSY-Partner des t)

1-Loop: Feynman-Diagramme:



Dominante 1-Loop-Korrekturen: $\Delta m_h^2 \sim G_\mu m_t^4 \log\left(\frac{m_{\tilde{t}_1} m_{\tilde{t}_2}}{m_t^2}\right)$

Größe der Korrekturen: $\mathcal{O}(50\ \text{GeV})$

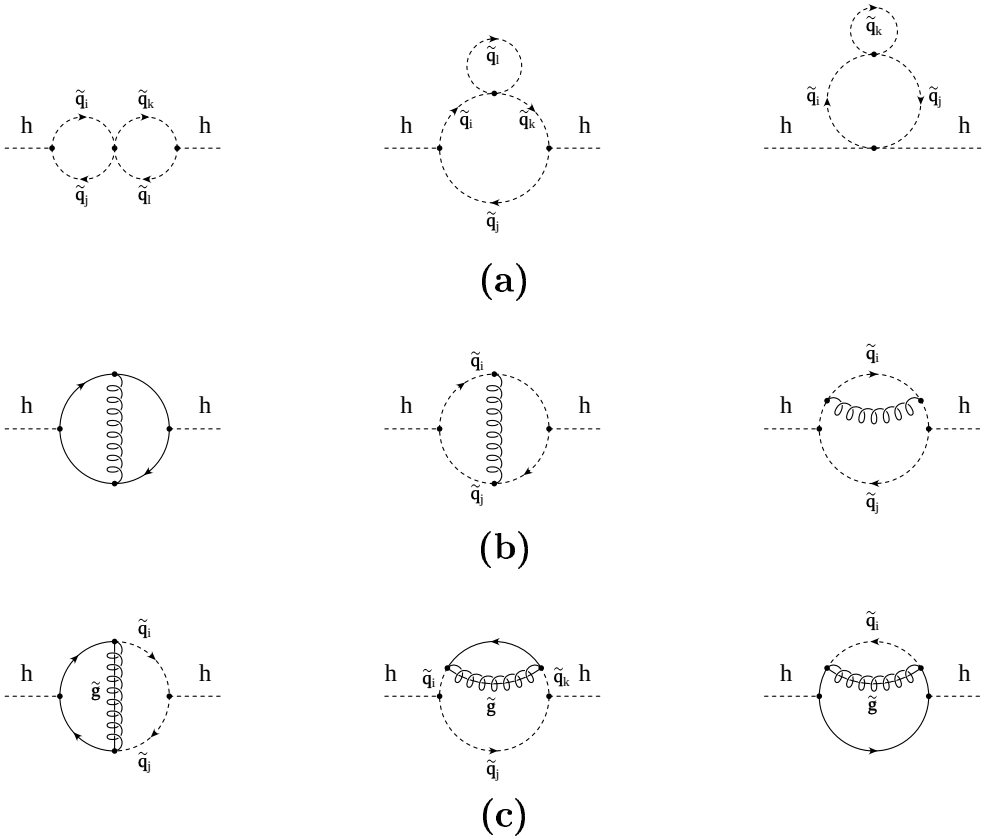
$\Rightarrow$ 2-Loop-Rechnung notwendig!

2-Loop: $\hat{\Sigma}^{(2)}(0)$

[*S. H., W. Hollik, G. Weiglein '98*]

Dominante Beiträge in $\mathcal{O}(\alpha\alpha_s)$:

(a) rein skalare Diagramme
(b) Diagramme mit Gluon-Austausch
(c) Diagramme mit Gluino-Austausch



Sehr aufwändige Berechnung . . .
$\Rightarrow$ Einsatz von Computer-Algebra

[*S.H. et al. '98-'05:*] $\Rightarrow$ Vorhersagen weiter verbessert durch viele neue Rechnungen

Abschätzung der verbleibenden Unsicherheit: 3 GeV $\Rightarrow$ es gibt viel zu tun

Im Gegensatz zum SM Higgs-Sektor:

SUSY legt Higgs-Sektor-Parameter fest (aus Eichsektor)

$\Rightarrow m_h$ ist kein freier Parameter, Berechnung innerhalb des Modells möglich

Niedrigste Ordnung: $m_h \leq M_Z$

$\Rightarrow$ SUSY sagt leichtes Higgs-Boson h voraus

$\Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow$ **Ende der Exkursion: Higgs-Massen-Berechnung**

Im Gegensatz zum SM Higgs-Sektor:

SUSY legt Higgs-Sektor-Parameter fest (aus Eichsektor)

$\Rightarrow m_h$ ist kein freier Parameter, Berechnung innerhalb des Modells möglich

Niedrigste Ordnung: $m_h \leq M_Z$

$\Rightarrow$ SUSY sagt leichtes Higgs-Boson h voraus

$\Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow$ **Ende der Exkursion: Higgs-Massen-Berechnung**

Große Quantenkorrekturen:

Zwei-Loop Ergebnisse $\Rightarrow m_h \lesssim 140$ **GeV**

[*S.H., W. Hollik, G. Weiglein '99*]

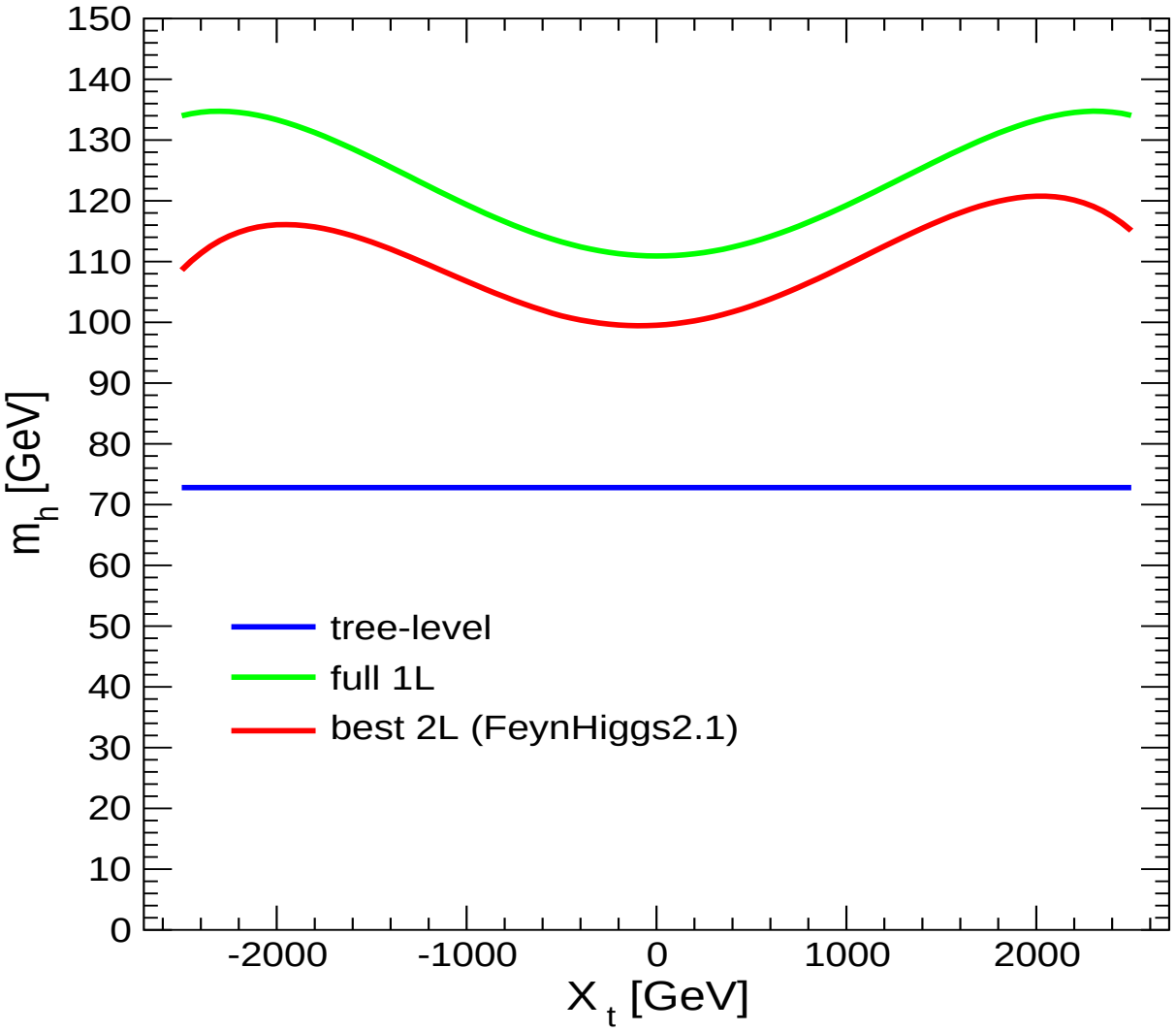
[*G. Degrassi, S.H. W. Hollik, P. Slavich, G. Weiglein '02*]

[*S.H., W. Hollik, H. Rzehak, G. Weiglein '04*]

$\Rightarrow$ **MSSM macht definitive Vorhersage: Obere Schranke für** m_h
$\Rightarrow$ **kann direkt experimentell getestet werden**

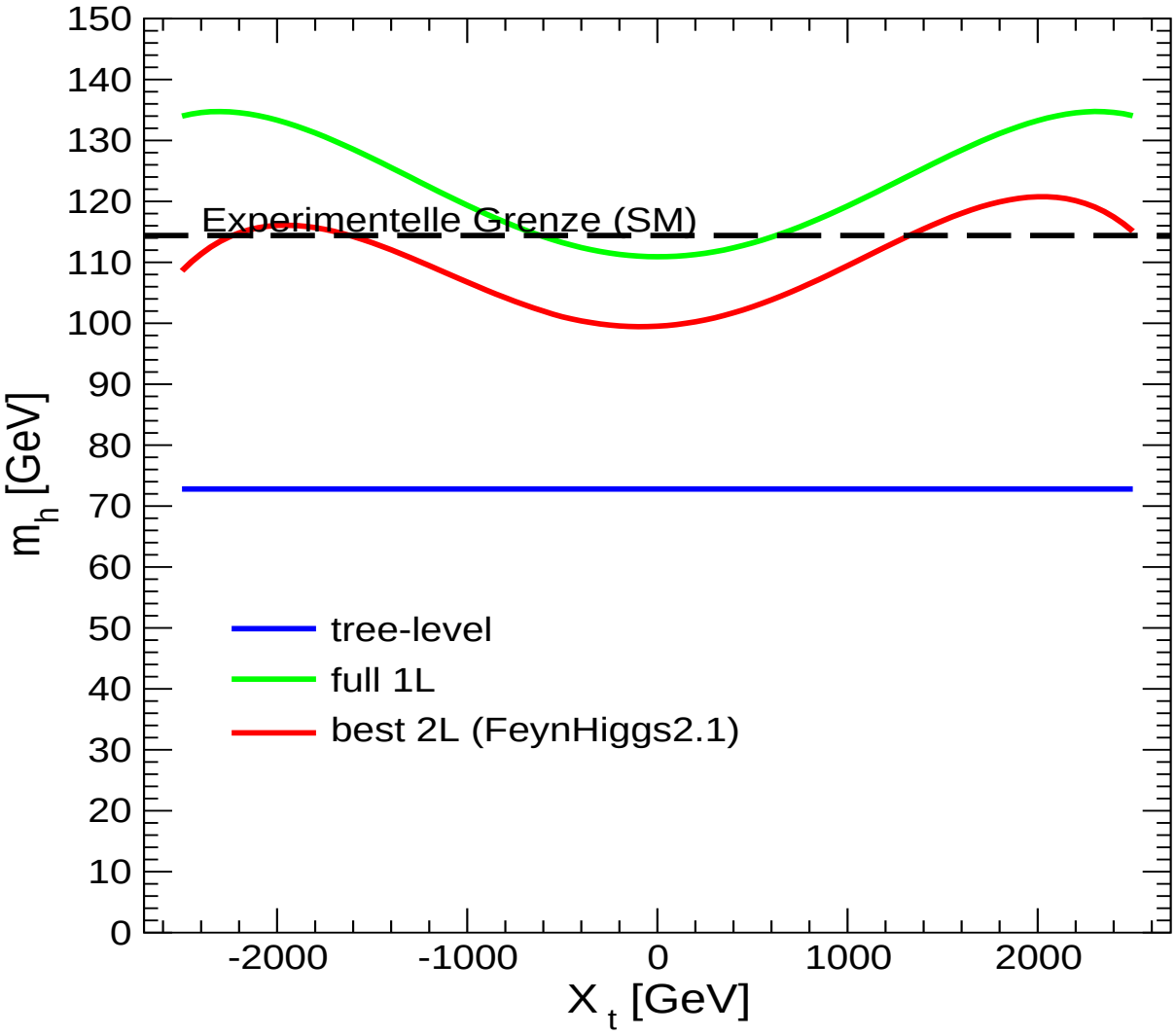
Effekte der Schleifenkorrekturen:

Beispiel für einen MSSM Parametersatz



Effekte der Schleifenkorrekturen:

Beispiel für einen MSSM Parametersatz



Vergleich mit experimenteller Grenze

⇒ starker Einfluss auf SUSY-Parameter-Schranken

– m_h: starke Abhängigkeit von anderen Parametern des MSSM

– m_h: genaue Messung an zukünftigen Experimenten:
  LHC: 0.2 GeV, ILC: 0.05 GeV

$\Rightarrow$ genaue Vorhersage von m_h notwendig
  (gilt auch für andere Observablen im MSSM Higgs-Sektor)

– m_h: starke Abhängigkeit von anderen Parametern des MSSM
– m_h: genaue Messung an zukünftigen Experimenten:
LHC: 0.2 GeV, ILC: 0.05 GeV
⇒ genaue Vorhersage von m_h notwendig
(gilt auch für andere Observablen im MSSM Higgs-Sektor)

Spezialisierter Code:

Alle berechneten Korrekturen zu Higgs-Boson-Massen und Kopplungen sind implementiert in
[*S.H. et al., '99 - '05*]

FeynHiggs

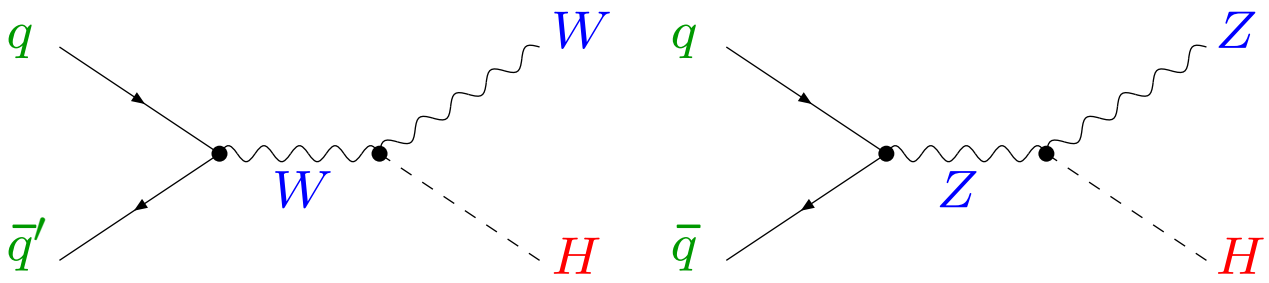
www.feynhiggs.de

⇒ alle Higgs-Massen, Kopplungen, Zerfälle (neu: Higgs-Produktion . . .)
→ finale LEP-Analysen
→ Higgs-Suche am Tevatron
→ Higgs-Analysen für den LHC
→ Higgs-Analysen füer den ILC

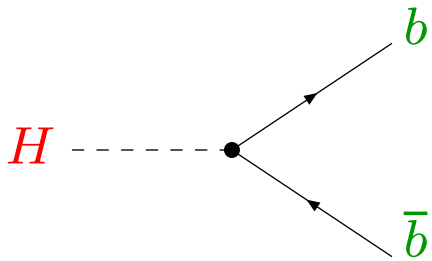
Aktuelle Suche: Tevatron (Fermilab)

Tevatron: $p\bar{p}$-Beschleuniger: $\rightarrow$ T

Dominante Produktionsprozesse:



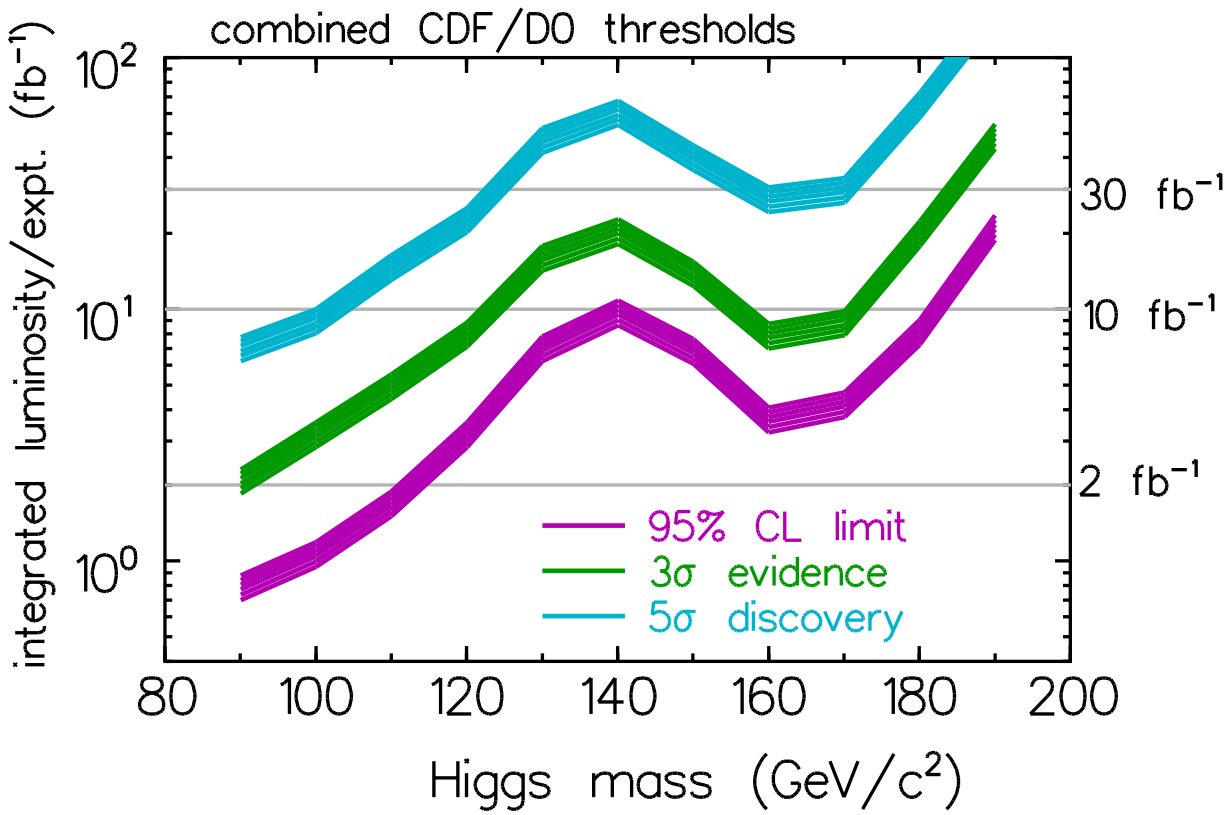
Dominanter Zerfallsprozess: $H \rightarrow b\bar{b}$



Suche nach dem SUSY-Higgs am Tevatron:

$\Rightarrow$ sehr ähnlich der SM-Suche

Aussichten für die Higgs-Entdeckung am Tevatron:



Leider: Luminositäts-Probleme $\Rightarrow$ Zeitplan noch unklar

Für SM Higgs-Boson mit $M_H \lesssim 120$ GeV:

$\approx$ 2006/07: Sensitivität für 95% C.L. Ausschluss

$\approx$ 2008/09: Sensitivität für 3σ Evidenz

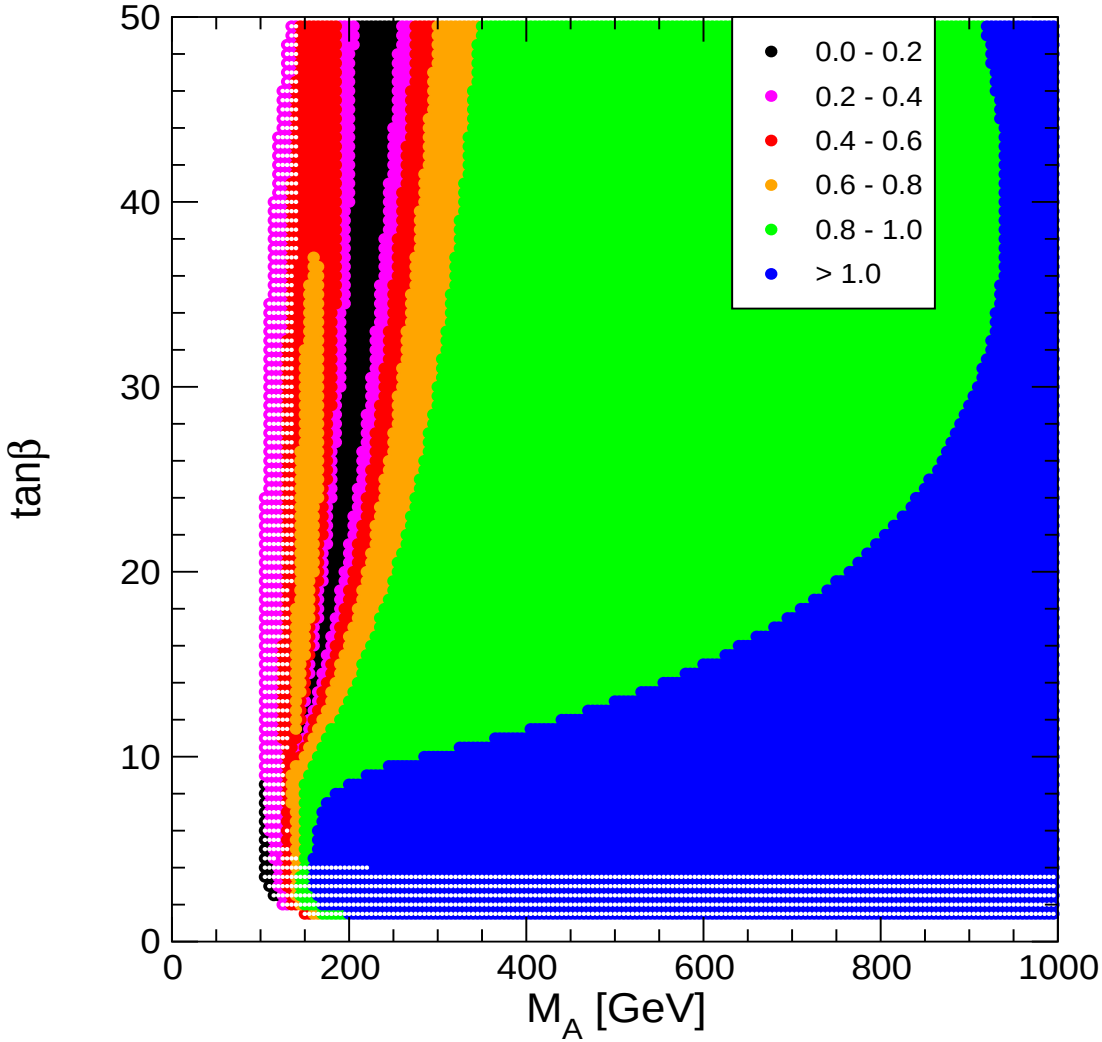
Mögliches Problem in SUSY:

$$h \to b\bar{b}$$

kann stark unterdrückt sein

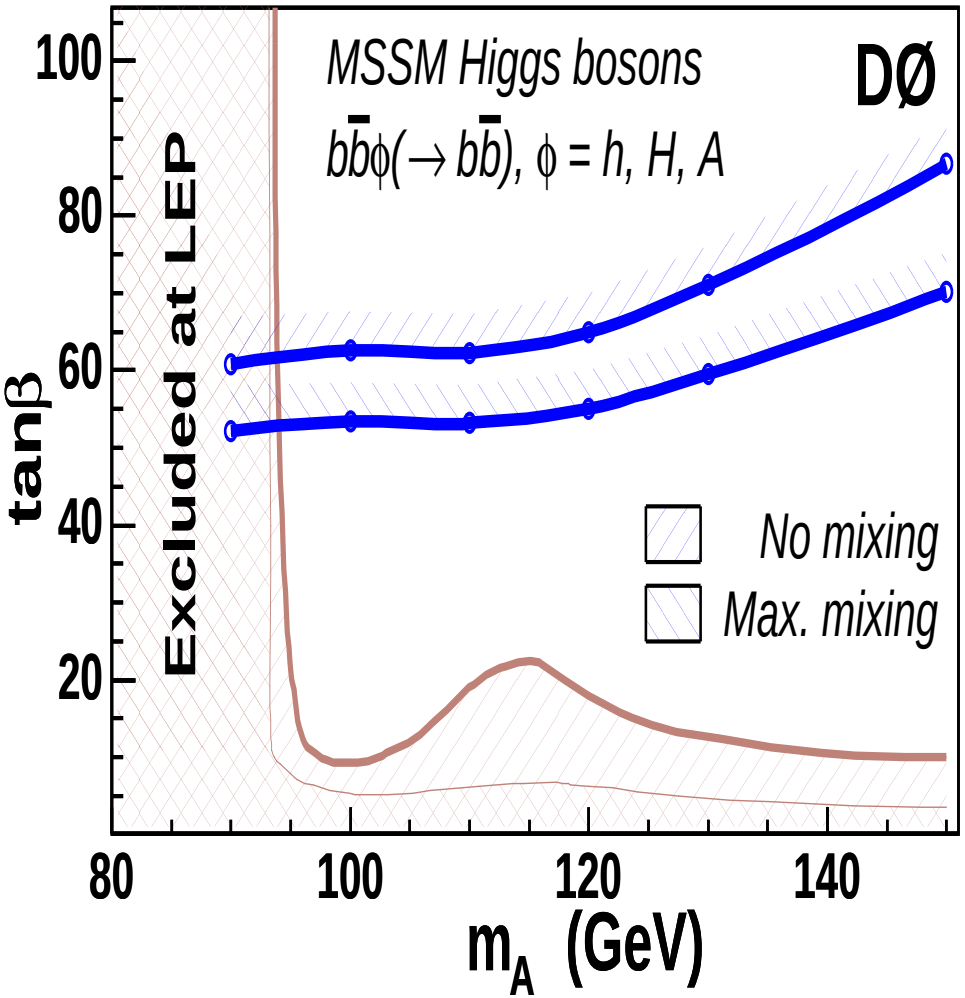
$\longrightarrow$ "Small α_{eff} scenario"

[*M. Carena, S.H., C. Wagner, G. Weiglein '02*]

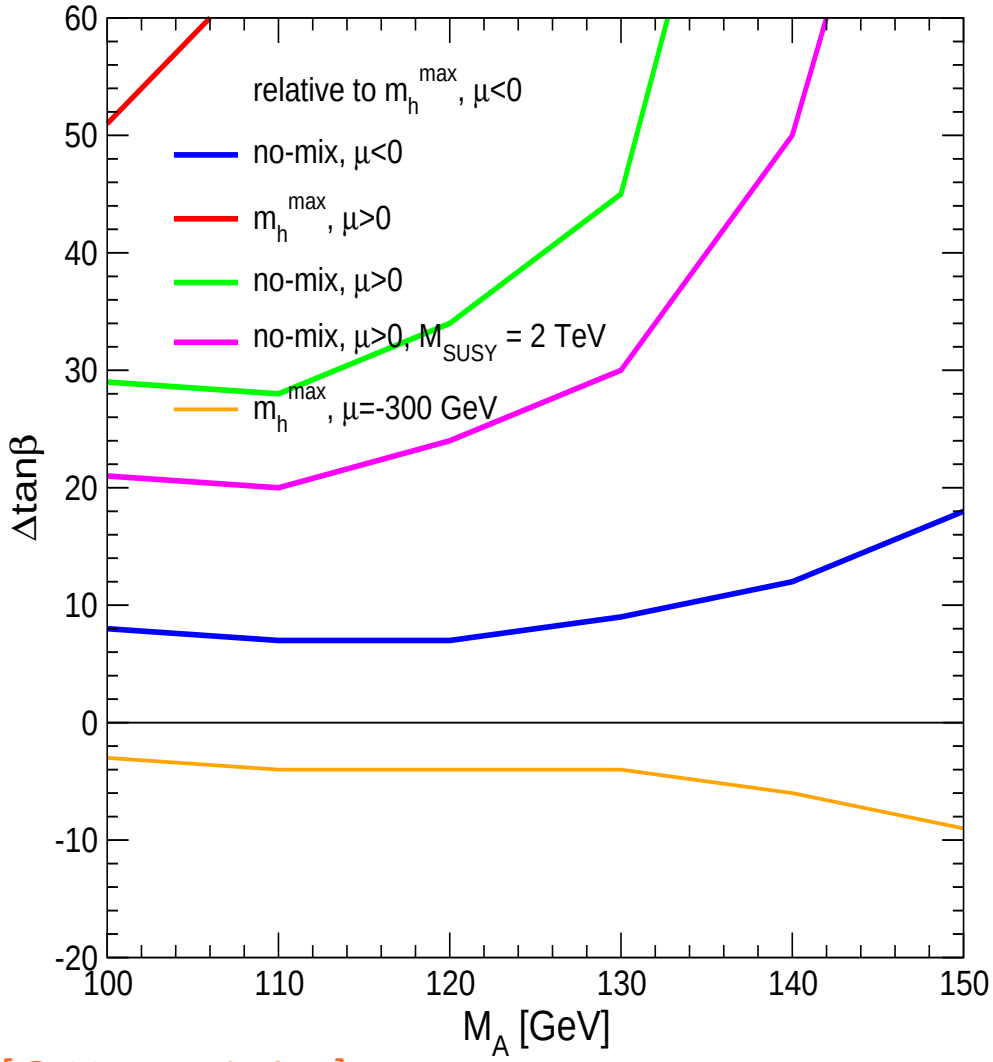


$\Rightarrow$ Starke Unterdrückung von von $h \to b\bar{b}$ möglich, bis zu $M_A \lesssim 350$ GeV

Existierende Tevatron-Daten erlauben Einschränkungen an SUSY Parameter-Raum:



[D0 '05]



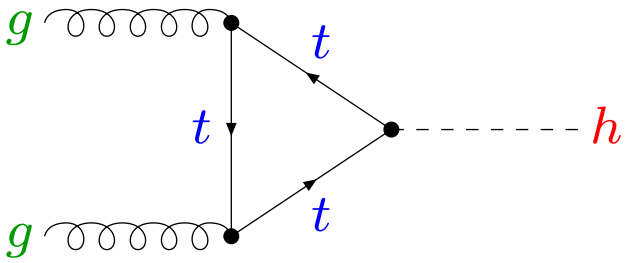
[S.H. et al. '05]

Zukünftige Suche: LHC (CERN)

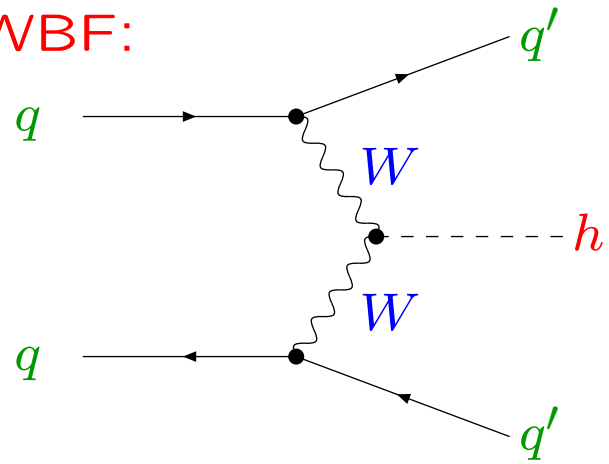
LHC: pp-Beschleuniger: Start: Sommer 2007

Wichtige Higgs-Produktions-Kanäle am LHC:

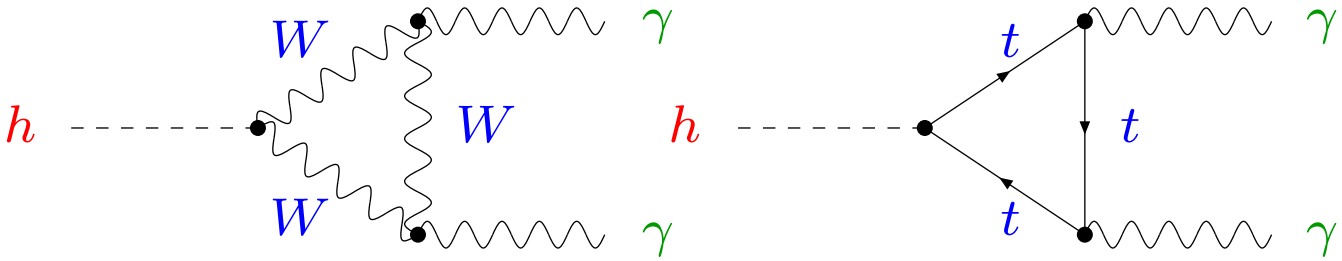
Gluon-Fusion:



WBF:



Wichtiger Zefallskanal für Massenbestimmung:



SM Higgs-Suche am LHC: $\Rightarrow$ Parameter-Bereich vollständig abgedeckt

Mögliches Problem in SUSY:

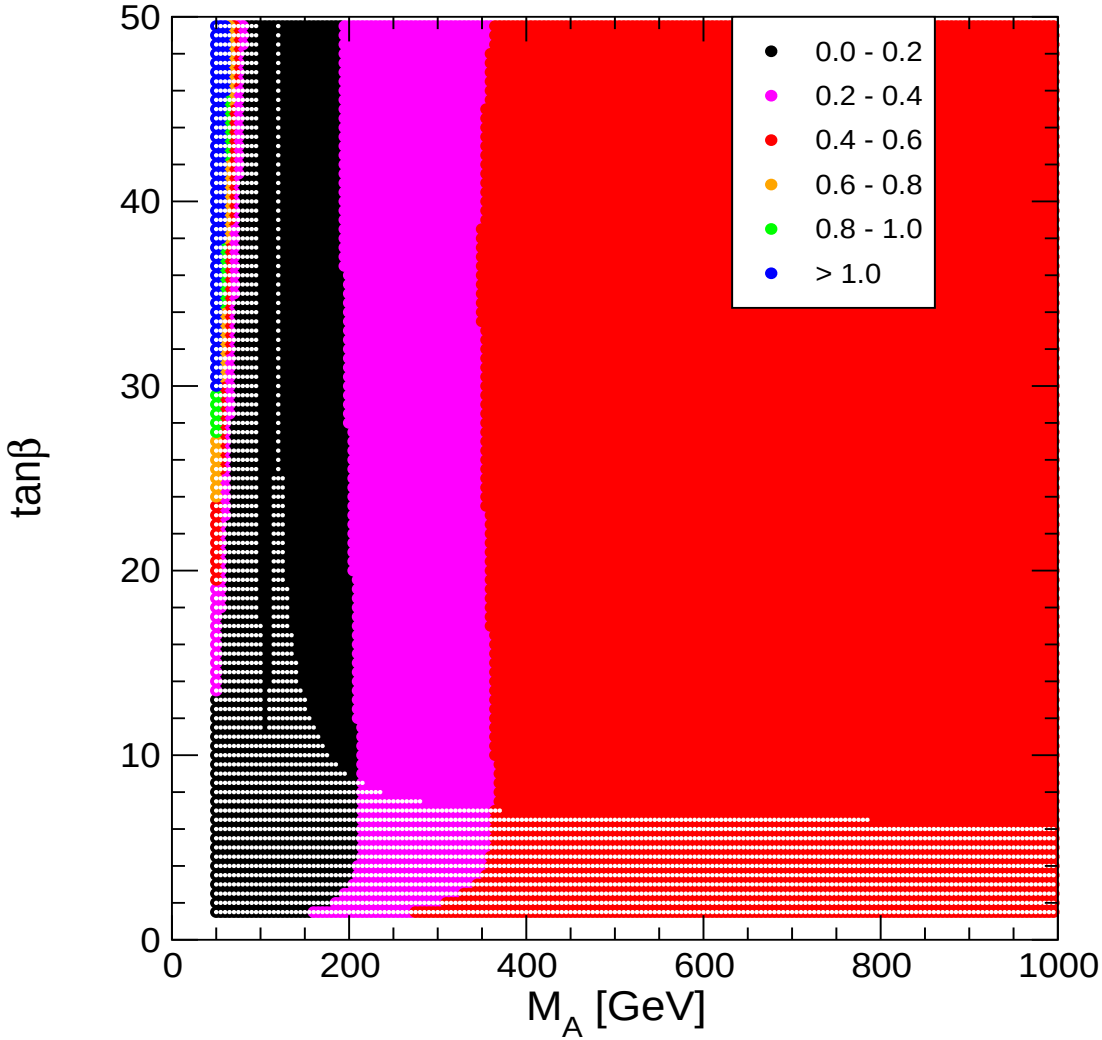
$$gg \to h \to \gamma\gamma$$

kann stark unterdrückt sein

$\longrightarrow$ "gluophobic Higgs scenario"

[*M. Carena, S.H., C. Wagner, G. Weiglein '02*]

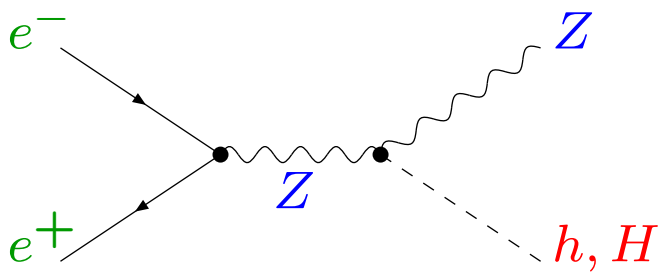
$\Rightarrow$ Starke Unterdrückung von von $gg \to h \to \gamma\gamma$ möglich im gesamten Parameterraum



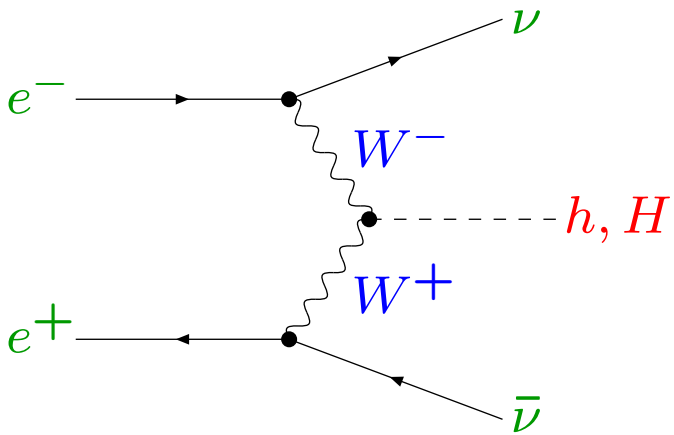
Zukünftige Suche: ILC (DESY/Fermilab/...?)

ILC: e^+e^--Beschleuniger: Möglicher Start: 2015

Higgs-Strahlung:



Eichboson-Fusion:



$\Rightarrow$ Messung von Massen, Kopplungen, ... im Prozent/Promille-Bereich

$\Rightarrow$ Theorie-Vorhersagen müssen von gleicher Genauigkeit sein!

$\Rightarrow$ Starke Sensitivität auf hohe Skalen des (und jenseits des) MSSMs

4. SUSY-Higgs-Physik und Dunkle Materie

Einfaches SUSY-Modell: "CMSSM" oder "mSUGRA"

$\Rightarrow$ Modell ist definiert durch:

$$m_0,\ m_{1/2},\ A_0,\ \tan\beta,\ \mathrm{sign}\,\mu$$

m_0 : universeller skalarer Massenparameter

$m_{1/2}$: univ. fermionischer Massenparameter

A_0 : universelle Dreierkopplung

} an der GUT-Skala

$\tan\beta$: Verhältnis der Higgs-Vakuum-Erwartungwerte

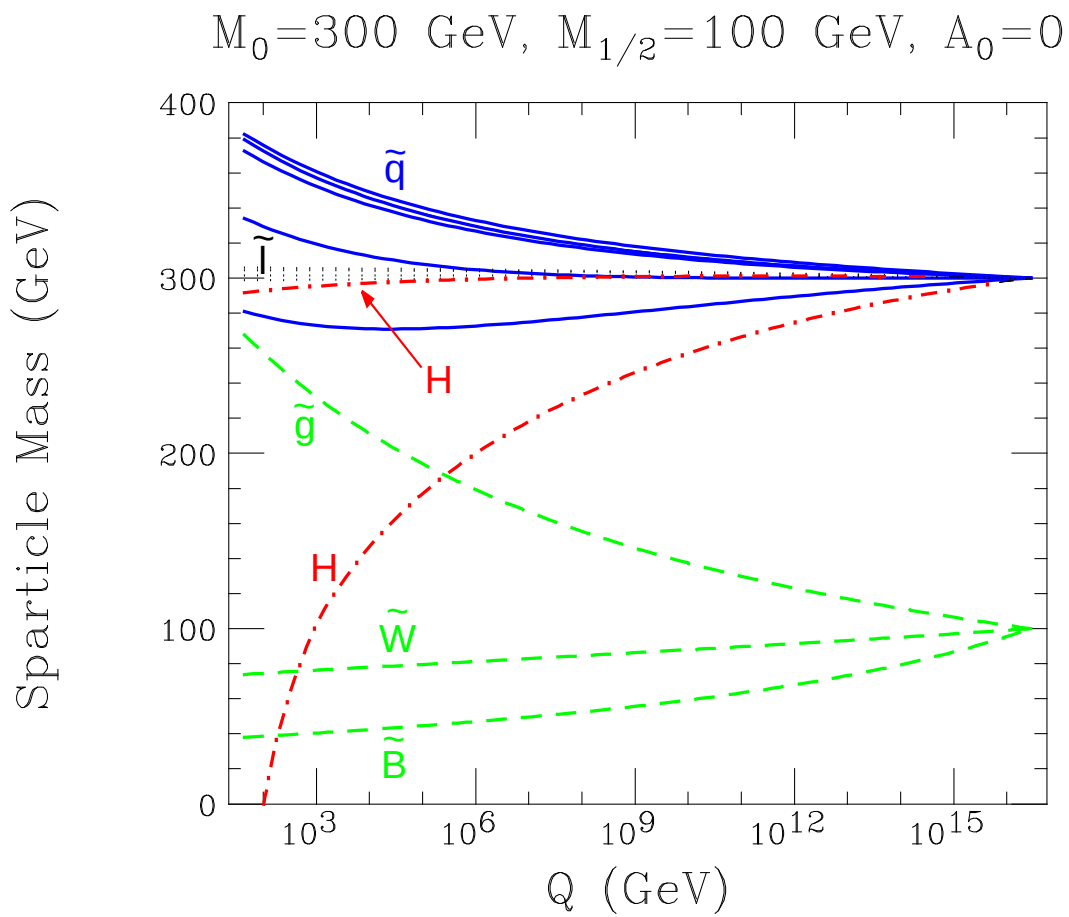
$\mathrm{sign}(\mu)$: Vorzeichen des Higgs-Mischungsparameters

$\Rightarrow$ Massenspektrum an elektroschwacher Skala

Leichtestes SUSY-Teilchen (LSP) ist das leichteste Neutralino, $\tilde{\chi}_1^0$

Niederenergie-Parameter (an der elektroschwachen Skala) durch
"Renormierungs-Gruppen-Gleichungen" (RGGs)

[RGG: Gleichungen, die Parameter an verschiedenen Energie-Skalen verbinden]



[*Isajet*]

Ein Parameter (im Higgs-Sektor) wird negativ
⇒ Spontane Symmetriebrechung (Higgs-Mech.) entsteht automatisch

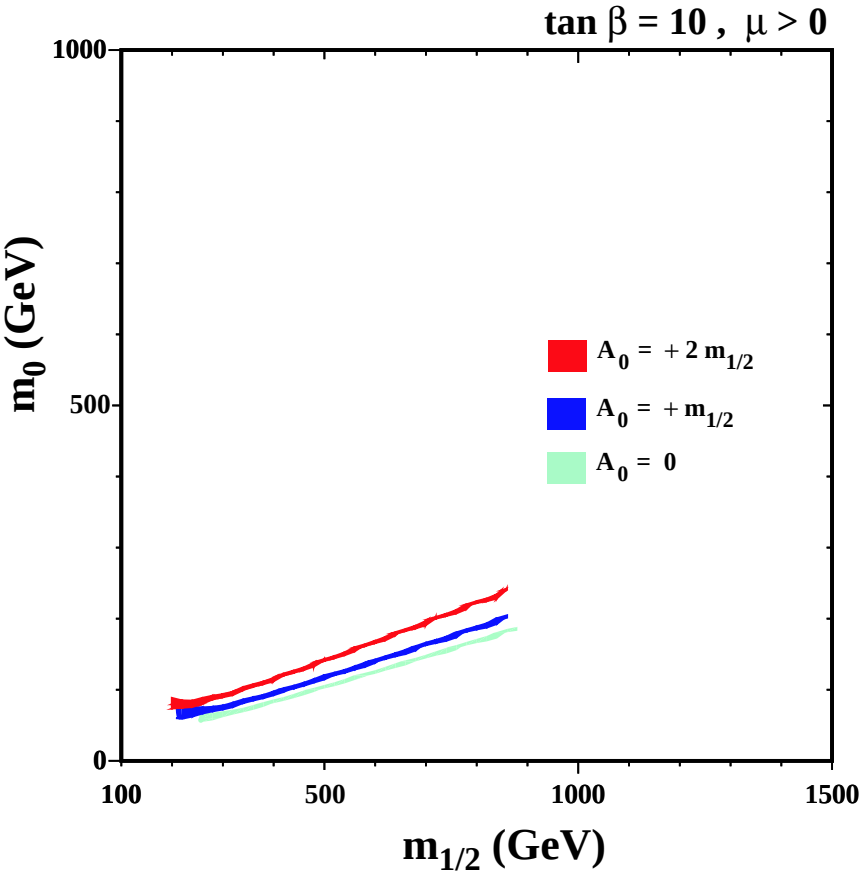
Das LSP ist ein ausgezeichneter Kandidat für dunkle Materie

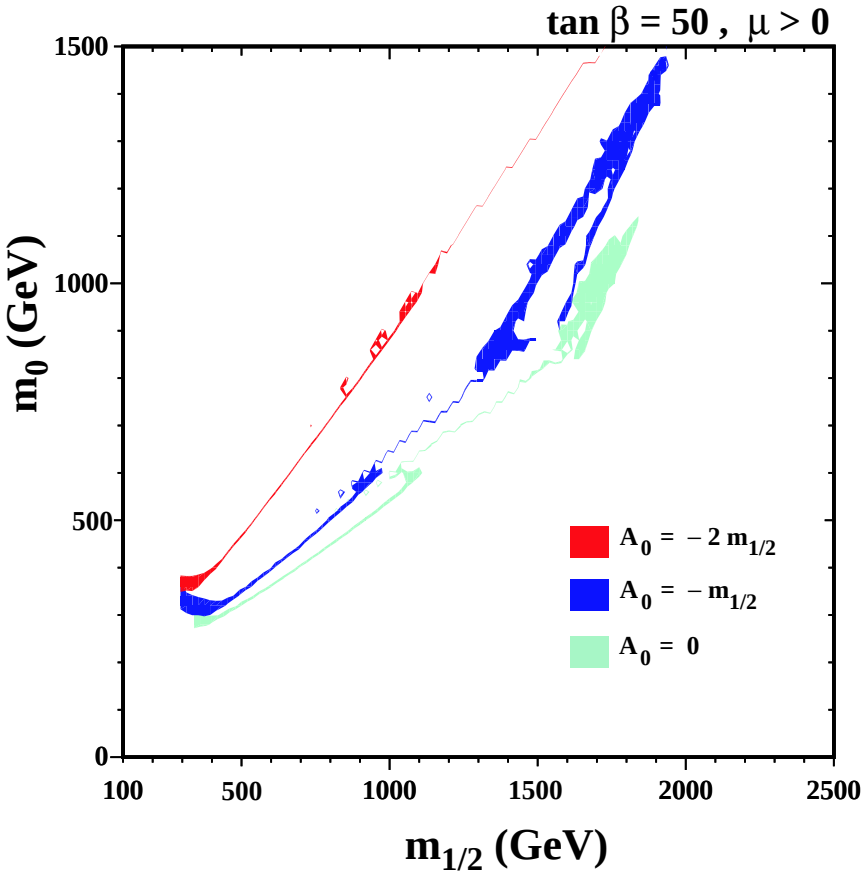
Aktuelle Messung:

$$0.094 < \Omega_{\mathrm{CDM}} h^2 < 0.129$$

[*WMAP '03*]

sehr genaue Messung $\Rightarrow$ dünne Streifen im CMSSM-Parameterraum erlaubt





[*J. Ellis, S.H., K. Olive, G. Weiglein '04*]

Trotz seiner Einfachheit stimmt das CMSSM mit allen experimentellen Daten überein:

- Kalte dunkle Materie
- LEP-Grenzen an Higgs-Masse: $m_h \gtrsim 114$ GeV
- $(g-2)_\mu$: das anomale magnetische Moment des Muons
- b Zerfälle: BR$(b \to s\gamma)$, BR$(B_s \to \mu^+\mu^-)$
- elektroschwache Präzisions-Observablen: M_{W}, $\sin^2\theta_{\mathrm{eff}}$, ...

Trotz seiner Einfachheit stimmt das CMSSM mit allen experimentellen Daten überein:

- Kalte dunkle Materie
- LEP-Grenzen an Higgs-Masse: $m_h \gtrsim 114$ GeV
- $(g-2)_\mu$: das anomale magnetische Moment des Muons
- b Zerfälle: BR($b \to s\gamma$), BR($B_s \to \mu^+\mu^-$)
- elektroschwache Präzisions-Observablen: M_{W}, $\sin^2\theta_{\mathrm{eff}}$, ...

3 Analysen:

A) Fit an existierende Daten

B) Untersuchung der Higgs-Phänomenologie in CDM-erlaubten Parameter-Bereichen

C) Präzisions-Rechnungen für Kalte Dunkle Materie

A) Fit an existierende Daten

[*J. Ellis, S.H., K. Olive, G. Weiglein '04*]

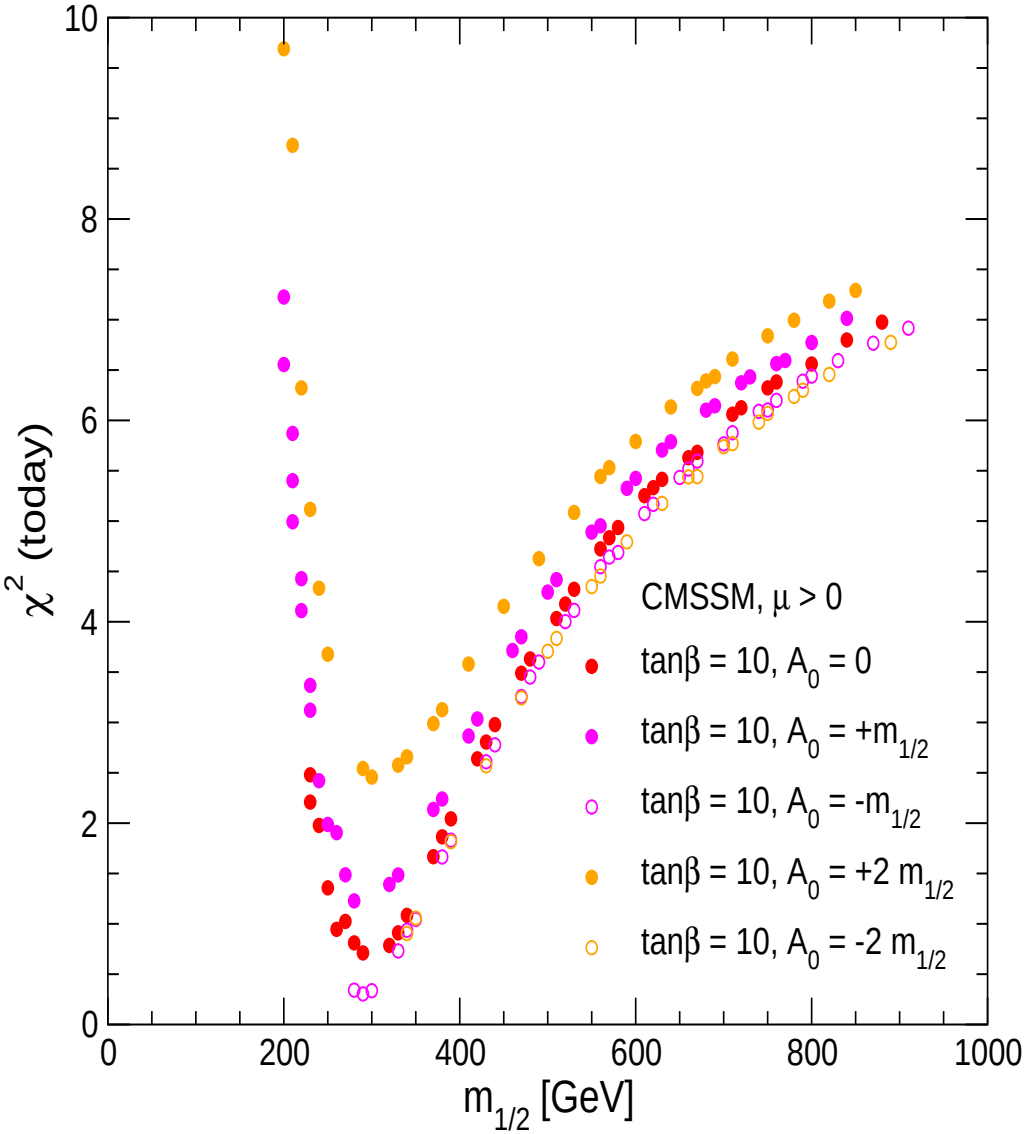
Fit an
CDM, $(g-2)_\mu$, BR$(b \to s\gamma)$,
M_W, $\sin^2\theta_{\text{eff}}$

$\Rightarrow$ sehr niedriges χ^2

$\Rightarrow$ relativ niedriege Massen-Skalen favorisiert:

$m_{1/2} \approx 300$ GeV
$m_0 \approx 60$ GeV
$A_0 \approx -300$ GeV

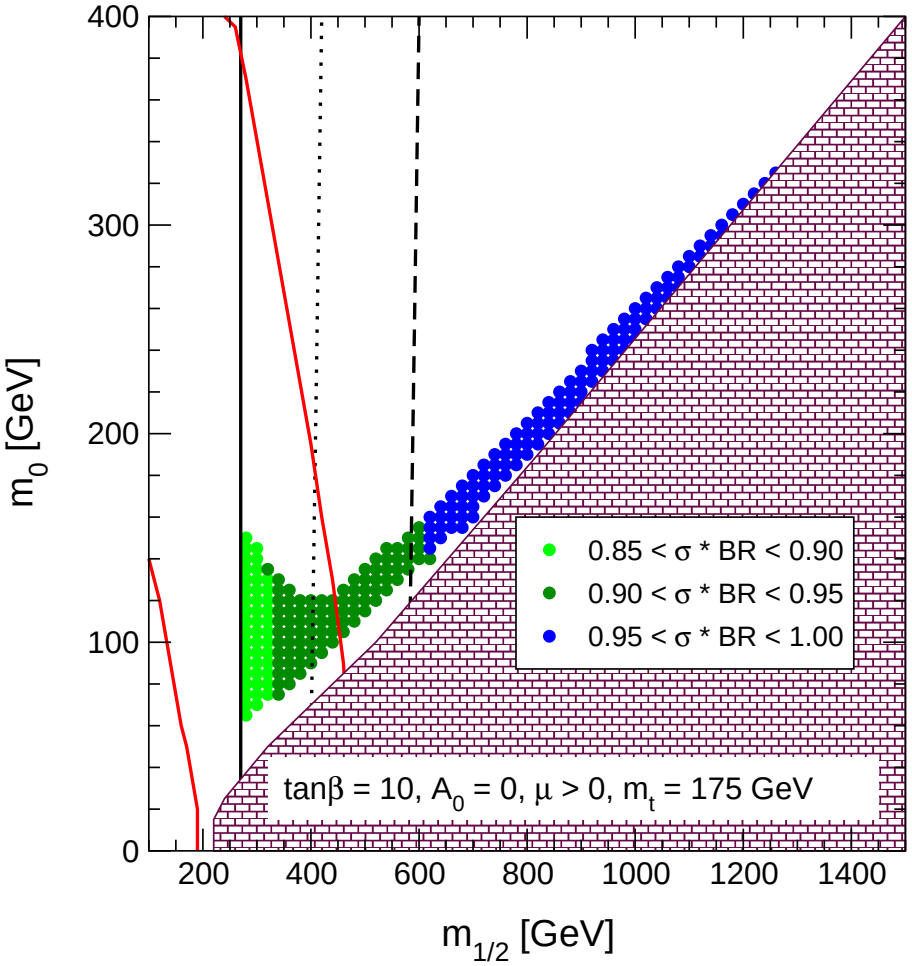
$\Rightarrow$ gute Aussichten für LHC/ILC

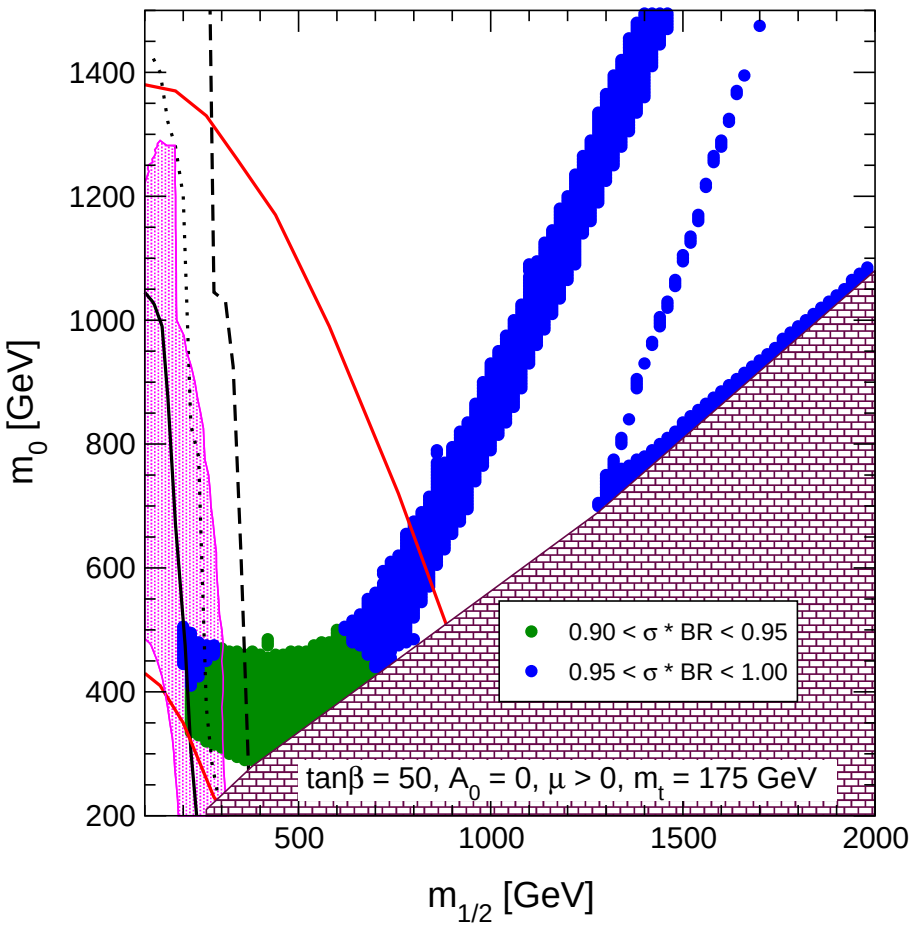


B) Untersuchung der Higgs-Phänomenologie in den CDM-favorisierten Parameter-Bereichen

[*J. Ellis, S.H., K. Olive, G. Weiglein '02, '03*]

Interessant für den LHC: $gg \to h \to \gamma\gamma$: MSSM/SM ($0.1 < \Omega_{\mathrm{CDM}} h^2 < 0.3$)





$\Rightarrow$ gute Aussichten für den LHC!

C) Präzisions-Rechnungen für Kalte Dunkle Materie

[*J. Ellis, S.H., K. Olive, G. Weiglein '05/'06*]

Messungen für Kalte Dunkle Materie, $\Omega_{\mathrm{CDM}} h^2$:

WMAP: $\sim 10\%$ (heute)

Planck: $\sim 2\%$ (Start: 2007)

2dF, SDSS: $\sim 4\%$ (heute)

C) Präzisions-Rechnungen für Kalte Dunkle Materie

[*J. Ellis, S.H., K. Olive, G. Weiglein '05/'06*]

Messungen für Kalte Dunkle Materie, $\Omega_{\text{CDM}} h^2$:

WMAP: $\sim 10\%$ (heute)

Planck: $\sim 2\%$ (Start: 2007)

2dF, SDSS: $\sim 4\%$ (heute)

$\Rightarrow$ Kosmologische Messungen werden so genau, dass sie Schleifen-Rechnungen erforderlich machen

$\Rightarrow$ Berechnung von CDM-Annihilations-Wirkungsquerschnitten auf dem Prozent-Niveau (1-Schleifen)

$\tilde{\chi}\tilde{\chi} \to b\bar{b}$

$\tilde{\chi}\tilde{\tau} \to \tau\gamma$

$\tilde{\tau}\tilde{\tau} \to \tau\tau$

$\tilde{\chi}\tilde{\chi} \to H/A \to f\bar{f}$

$\ldots$

5. Zusammenfassung

- Das Standardmodell enthält/benötigt das Higgs-Boson
- Messung von Higgs-Kopplungen am LHC:

  Kopplungs-Bestimmung notwendig, um Higgs-Mechanismus zu etabl.
  $\Rightarrow$ Kopplungs-Bestimmung bis zu 10-20%
- Higgs-Bosonen in der Supersymmetrie

  Supersymmetrie fordert ein leichtes Higgs-Boson: MSSM: $m_h \lesssim 140$ GeV
  Große Strahlungskorrekturen zu Higgs-Massen, -Kopplungen, BR's
- Spezieller Computer-Code: FeynHiggs $\rightarrow$ LEP, Tevatron, LHC, ILC, ...
- SUSY-Higgs-Suche und Dunkle Materie

  CMSSM beschreibt alle Daten, liefert guten CDM-Kandidaten
  $\rightarrow$ Globaler Fit bevorzugt niedrige SUSY Massenskalen
  $\rightarrow$ Higgs-Phän. in CDM-erlaubten Bereichen: gute LHC-Aussichten
  $\rightarrow$ genaue kosmologische Messungen erfordern Schleifen-Rechnungen

5. Zusammenfassung

- Das Standardmodell enthält/benötigt das Higgs-Boson
- Messung von Higgs-Kopplungen am LHC:

  Kopplungs-Bestimmung notwendig, um Higgs-Mechanismus zu etabl.
  $\Rightarrow$ Kopplungs-Bestimmung bis zu 10-20%
- Higgs-Bosonen in der Supersymmetrie

  Supersymmetrie fordert ein leichtes Higgs-Boson: MSSM: $m_h \lesssim 140$ GeV
  Große Strahlungskorrekturen zu Higgs-Massen, -Kopplungen, BR's
- Spezieller Computer-Code: FeynHiggs $\rightarrow$ LEP, Tevatron, LHC, ILC, ...
- SUSY-Higgs-Suche und Dunkle Materie

  CMSSM beschreibt alle Daten, liefert guten CDM-Kandidaten
  $\rightarrow$ Globaler Fit bevorzugt niedrige SUSY Massenskalen
  $\rightarrow$ Higgs-Phän. in CDM-erlaubten Bereichen: gute LHC-Aussichten
  $\rightarrow$ genaue kosmologische Messungen erfordern Schleifen-Rechnungen

Higgs-Physik stellt eine große und interessante Herausforderung dar

Backup slides

Einige LHC-Details:

LHC: "recoil"-Methode (LEP/LC) nicht möglich: $e^+e^- \to ZH$, $Z \to e^+e^-, \mu^+\mu^-$

$\Rightarrow$ keine Messung des totalen Higgs-Produktions-WQ

QCD-Hintergrund $\Rightarrow$ nicht alles Zerfalls-Moden sind verfügbar, z.B. $H \to b\bar{b}$

Messung von $\sigma \times$ BR: "narrow width"-Näherung:

$$\Rightarrow \sigma(H) \times \mathrm{BR}(H \to xx) \;=\; \sigma(H)^{\mathrm{SM}} \cdot \frac{\Gamma_{\mathrm{prod}}}{\Gamma_{\mathrm{prod}}^{\mathrm{SM}}} \times \frac{\Gamma_{\mathrm{decay}}}{\Gamma_{\mathrm{tot}}}$$

Beobachtung von verschiedenen Kanälen
$\Rightarrow$ Information über Kombinationen von $\Gamma_b, \Gamma_\tau, \Gamma_W, \Gamma_Z, \Gamma_g, \Gamma_\gamma, Y_t^2$

$\Rightarrow$ Bestimmung von Verhältnissen von Partial-Breiten durch globalen Fit
[*M. Dührrsen '03*]

$\Rightarrow$ Zusätzliche theoretische Annahmen notwendig für absolute Bestimmung von Partial-Breiten

Beispiel für theoretische Annahmen:

[*D. Zeppenfeld, R. Kinnunen, A. Nikitenko, E. Richter-Was '00*]

– SM Verhältnis von $\Gamma(H \to b\bar{b})/\Gamma(H \to \tau^+\tau^-)$

– SM Verhältnis von $\Gamma(H \to WW^*)/\Gamma(H \to ZZ^*)$

– keine relevanten unerwarteten Zerfalls-Moden

$\Rightarrow$ Bestimmung der Kopplungen, aber . . .

"SM rein – SM raus"?

$\Rightarrow$ Annahmen fragwürdig in vielen Modellen (z.B. SUSY)

F: Ist es möglich mit "weniger" Annhamen Kopplungen zu messen?

A: Ja! :-)

Allgemeine Strategie: sehr einfache theoretische Annahmen

$\rightarrow$ betrachte allgemeines Multi-Higgs-Doublett-Modell
mit/ohne zusätzlichen Higgs-Singletts
($\Rightarrow$ schließt z.B. MSSM ein)

$\Rightarrow$ HVV Kopplung besitzt Obergrenze: SM-Wert, $\Gamma_V \leq \Gamma_V^{\mathrm{SM}}$, $V = W, Z$
$\Rightarrow$ Obere Schranke für Γ_V

Beobachtung von Higgs-Produktion
$\Rightarrow$ untere Schranke an Produktions-Kopplungen
untere Schranke an totale Breite Γ_{tot}

Beobachtung von $H \rightarrow VV^*$ in WBF
$\Rightarrow$ bestimmt $\Gamma_V^2/\Gamma_{\mathrm{tot}}$
$\Rightarrow$ liefert obere Schranke an Γ_{tot}

$\Rightarrow$ Absolute Bestimmung von Γ_{tot} und Higgs-Kopplungen mit globalem Fit

$\Rightarrow$ (annähernd) modell-unabhängige Analyse

Abschätzung der Fehler:

Statistische Fehler:

Annahme: SM-Raten für Produktion und Zerfall in allen Szenarien

Systematische Fehler:

- 5% Luminositäts-Fehler
- Unsicherheit bei der Rekonstruktion: Identifizierung von Leptonen: 2%
  Identifizierung von Photonen: 2%
  Identifizierung von b quarks: 3%
- forward tagging/veto jets: 5%
- Fehler-Fortpflanzung für Hintergrund-Bestimmung aus Seiten-Band-Analysen: von 0.1% ($H \to \gamma\gamma$) bis 5% ($H \to WW^*, H \to \tau^+\tau^-$)
- theoretische und parametrische Unsicherheiten für Higgs-Produktion: ggH: 20%, $t\bar{t}H$: 15%, WH, ZH: 7%, WBF: 4%
- theoretische and parametrische Unsicherheiten für Higgs-Zerfälle: 1% (als zukünftige Annahme)

$\Rightarrow$ log likelihood-Funktion,
basierend auf statistischen und systematischen Fehlern

Betrachtete Zerfalls-Kanäle:

- $H \to W^{+(*)} W^{-(*)} \to l^+ l^- + p_{\mathrm{T,miss}}$
- $H \to Z^{(*)} Z^{(*)}$
- $H \to \gamma\gamma$
- $H \to \tau^+ \tau^-$
- $t\bar{t}H,\ H \to b\bar{b}$

Konkrete Strategie: (sogar noch leichtere) Annhamen:

$$g^2_{HVV} \leq 1.05 \times g^2_{HVV,\mathrm{SM}}, \quad V = W, Z$$

exta 5% für

- theoretische Unsicherheiten in Umrechnung von Partial-Breite zu g^2_{HVV}
- kleine Beimischung von "exotischen" Teilchen (Tripletts, ...)
- Zusätzliche Teilchen dürfen beitragen zu $H \to \gamma\gamma$ and $gg \to H$
  ($\Rightarrow$ gefittet mit pos. /neg. extra Partial-Breite zu $H \to \gamma\gamma$ and $gg \to H$)
- Zusätzliche Higgs-Zerfallsbreiten erlaubt
  ($\Rightarrow$ gefittet mit extra Partial-Breiten)

$\tilde{t}$-Sektor im MSSM: (skalarer Partner des top Quarks)

Massen-Matrix für $\tilde{t}_L, \tilde{t}_R$:

$$(\tilde{t}_L, \tilde{t}_R) \begin{pmatrix} M^2_{\tilde{t}_L} + m_t^2 + DT_{1t} & m_t X_t \\ m_t X_t & M^2_{\tilde{t}_R} + m_t^2 + DT_{2t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{t}_L \\ \tilde{t}_R \end{pmatrix}$$

$$\Big\Downarrow \leftarrow \text{Diagonalisierung}, \theta_{\tilde{t}}$$

$$(\tilde{t}_1, \tilde{t}_2) \begin{pmatrix} m^2_{\tilde{t}_1} & 0 \\ 0 & m^2_{\tilde{t}_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{t}_1 \\ \tilde{t}_2 \end{pmatrix}$$

$X_t = A_t - \mu \cot\beta$; große Mischung möglich

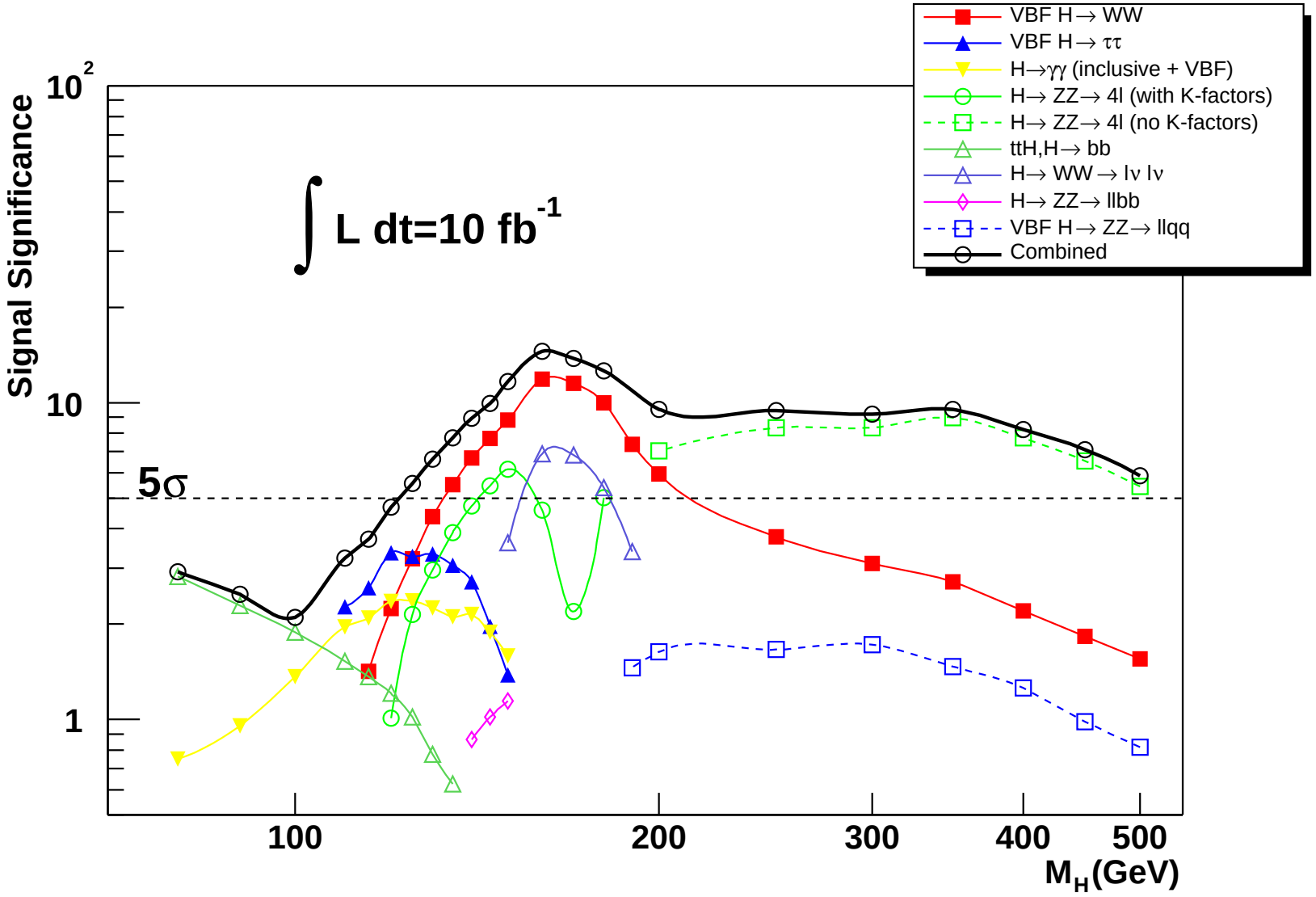
$\Rightarrow$ Physikalische Parameter: $m_{\tilde{t}_1}$, $m_{\tilde{t}_2}$, $\theta_{\tilde{t}}$

$\Rightarrow$ Soft SUSY-Brechungs-Terme: $M_{\tilde{t}_L}$, $M_{\tilde{t}_R}$, A_t

$\Rightarrow$ Soft SUSY-Brechungs-Terme bestimmen die SUSY-Massen

SM Higgs-Suche am LHC:

[*K. Cranmer, Y. Fang, B. Mellado, S. Paganis, W. Quayle, S. Wu '04*]



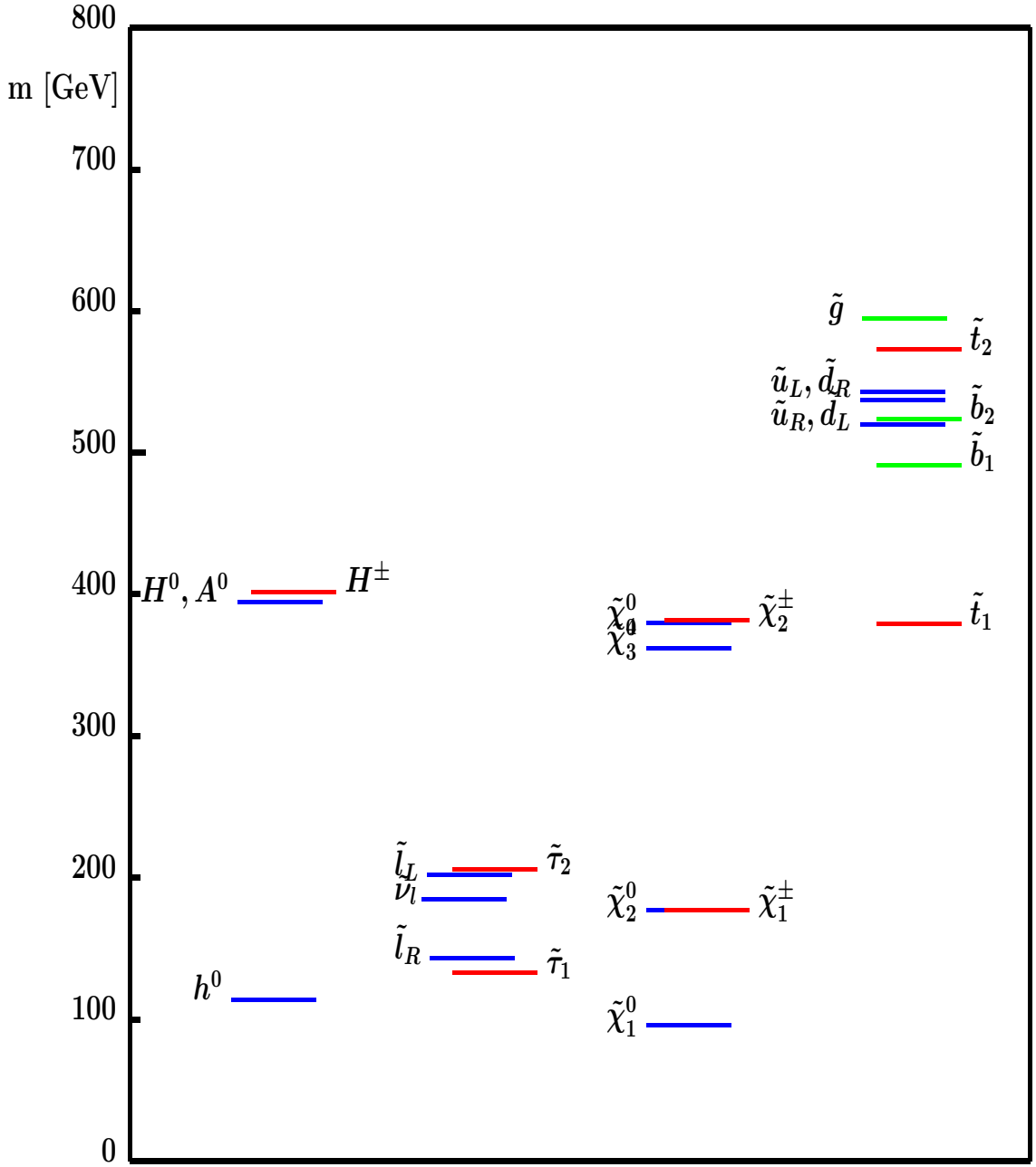
"Typisches" CMSSM-Szenario (SPS 1a benchmark scenario):

SPS home page:

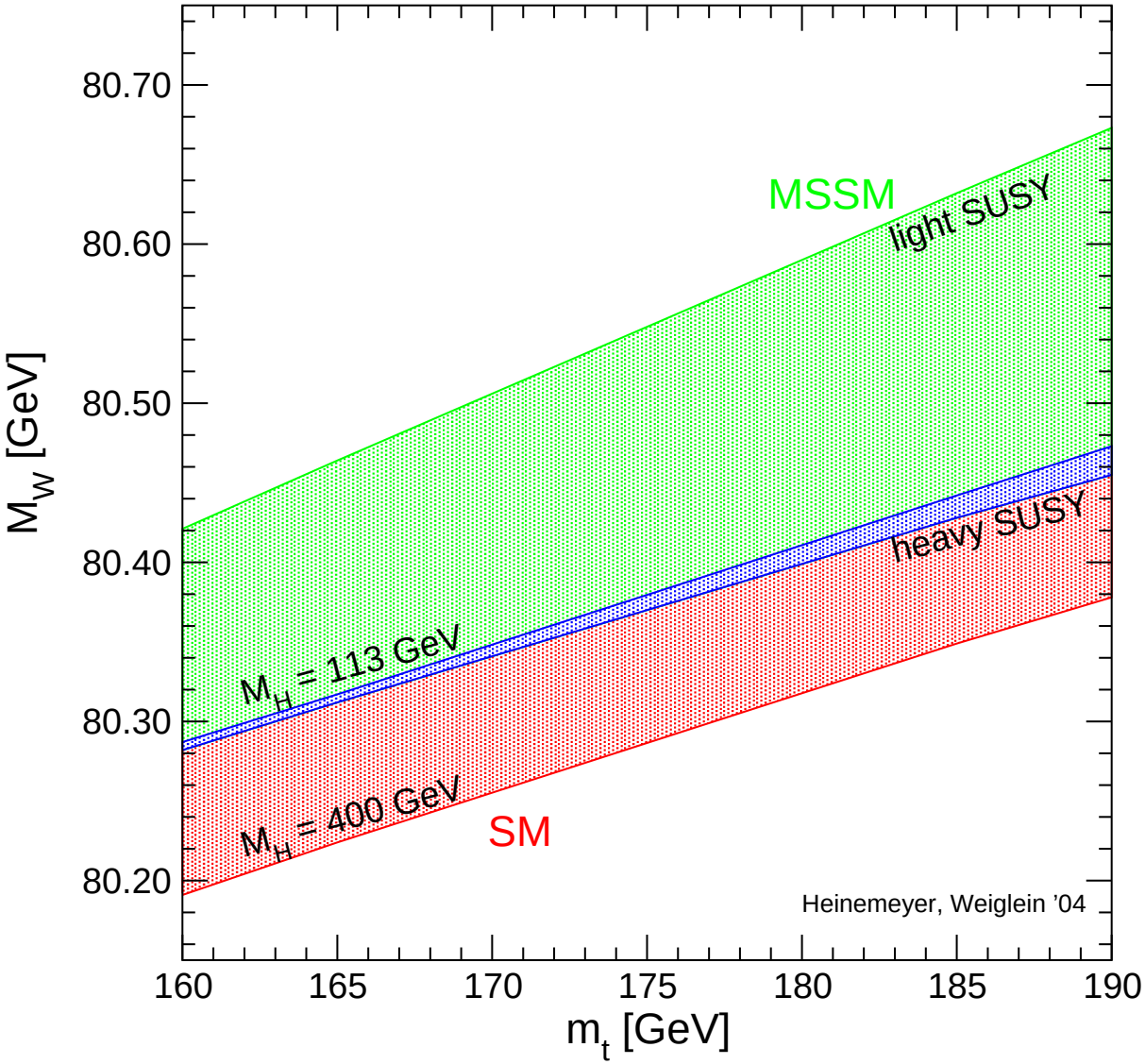
`www.ippp.dur.ac.uk/~georg/sps`

$\Rightarrow m_h \lesssim 130$ GeV

$\Rightarrow$ beobachtbar am Tevatron



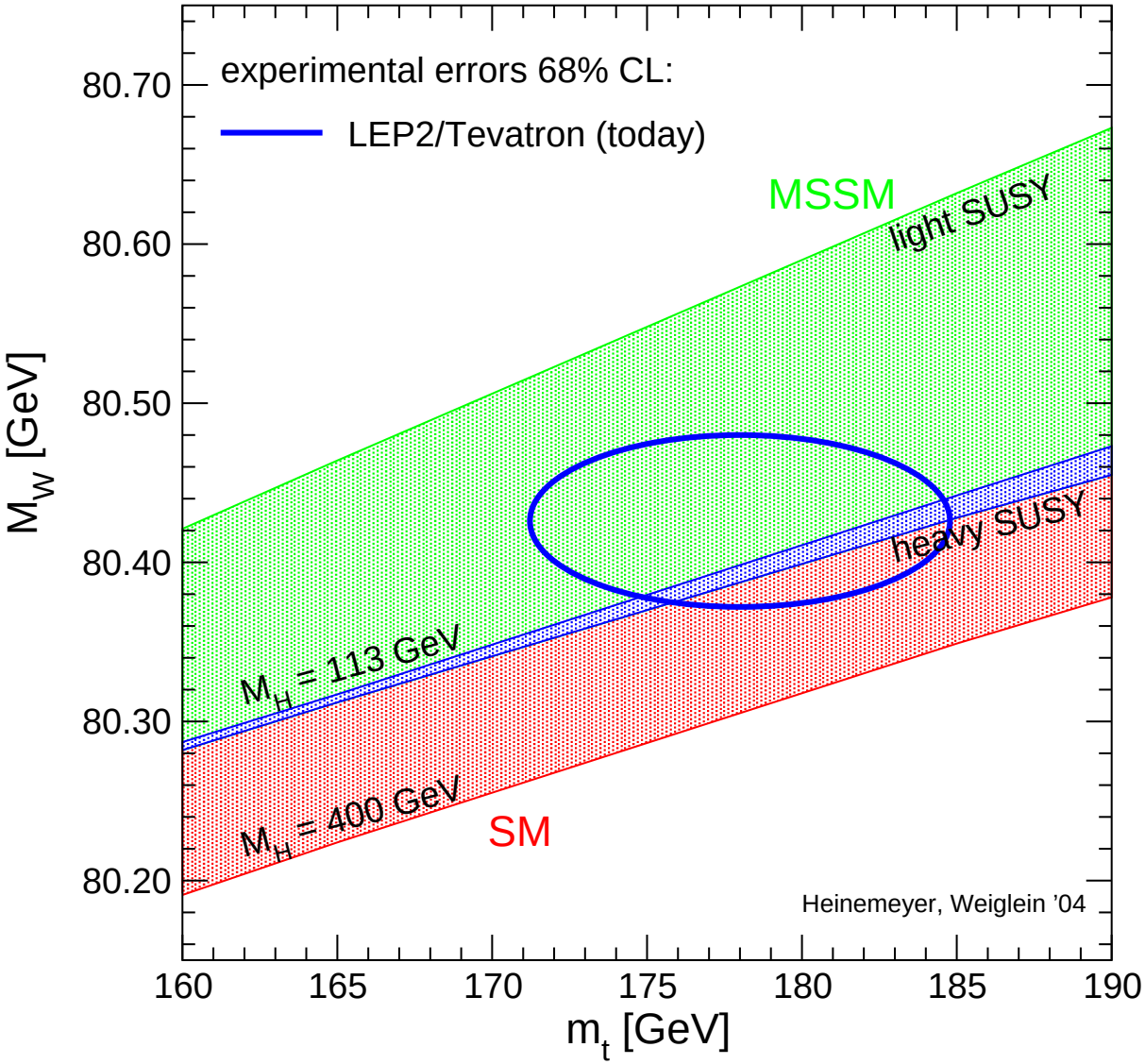
Beispiel: Vorhersage von M_W im SM und im MSSM :



MSSM-Variation:
unbekannte Masse
der SUSY-Teilchen

SM-Variation:
unbekannte Masse
des Higgs-Teilchens

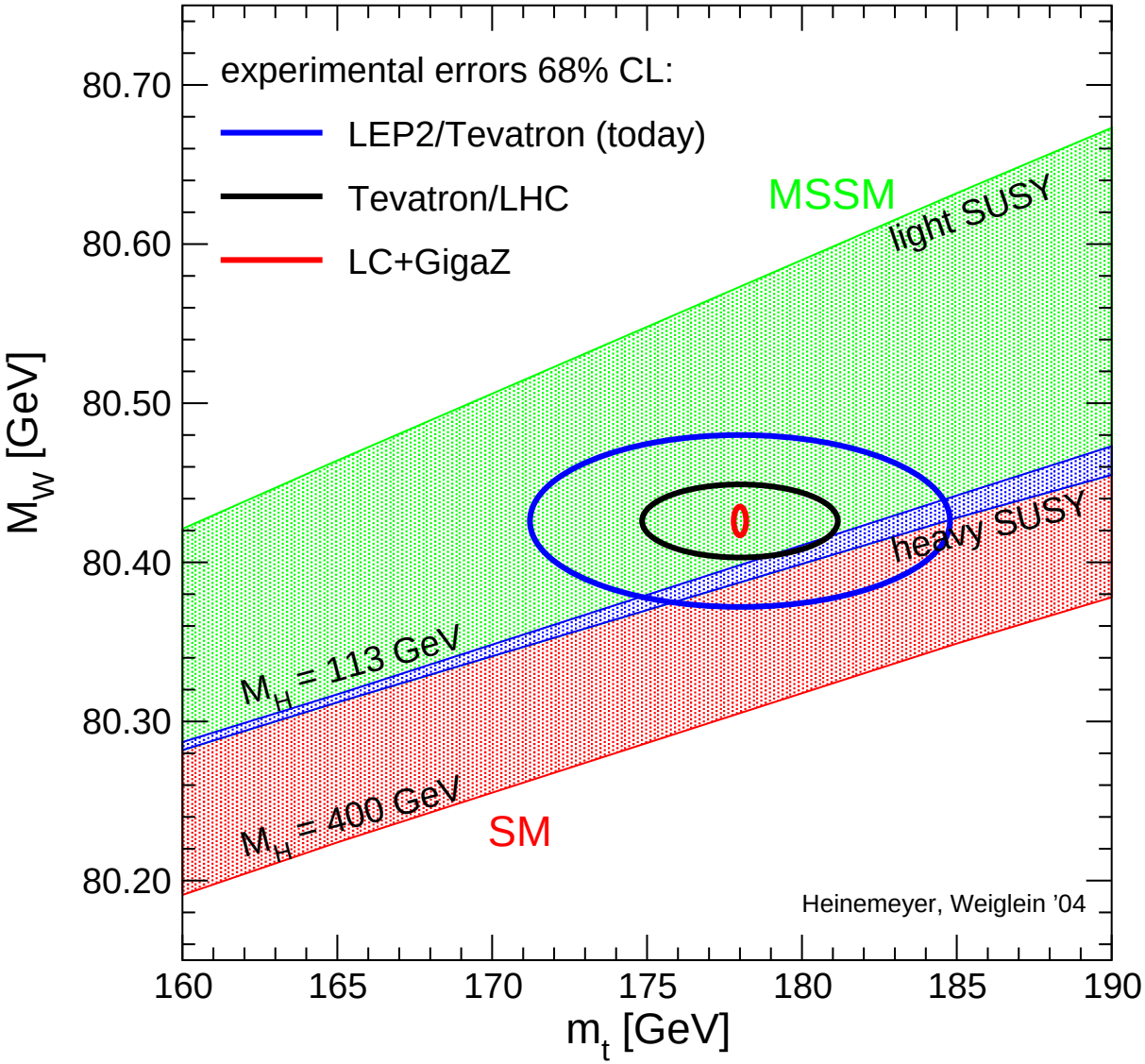
Beispiel: Vorhersage von M_W im SM und im MSSM :



MSSM-Variation:
unbekannte Masse
der SUSY-Teilchen

SM-Variation:
unbekannte Masse
des Higgs-Teilchens

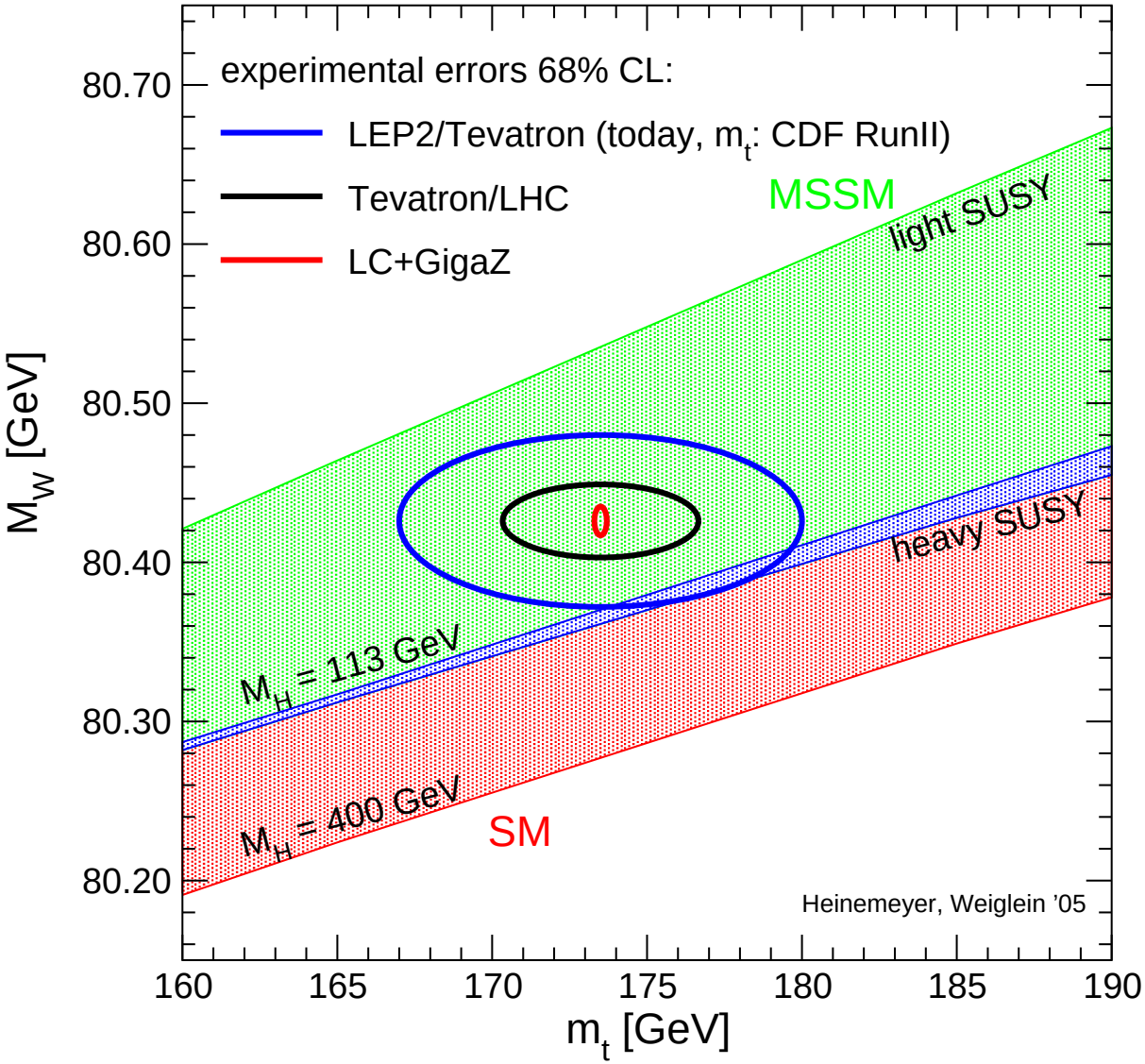
Beispiel: Vorhersage von M_W im SM und im MSSM :



MSSM-Variation:
unbekannte Masse
der SUSY-Teilchen

SM-Variation:
unbekannte Masse
des Higgs-Teilchens

Beispiel: Vorhersage von M_W im SM und im MSSM :

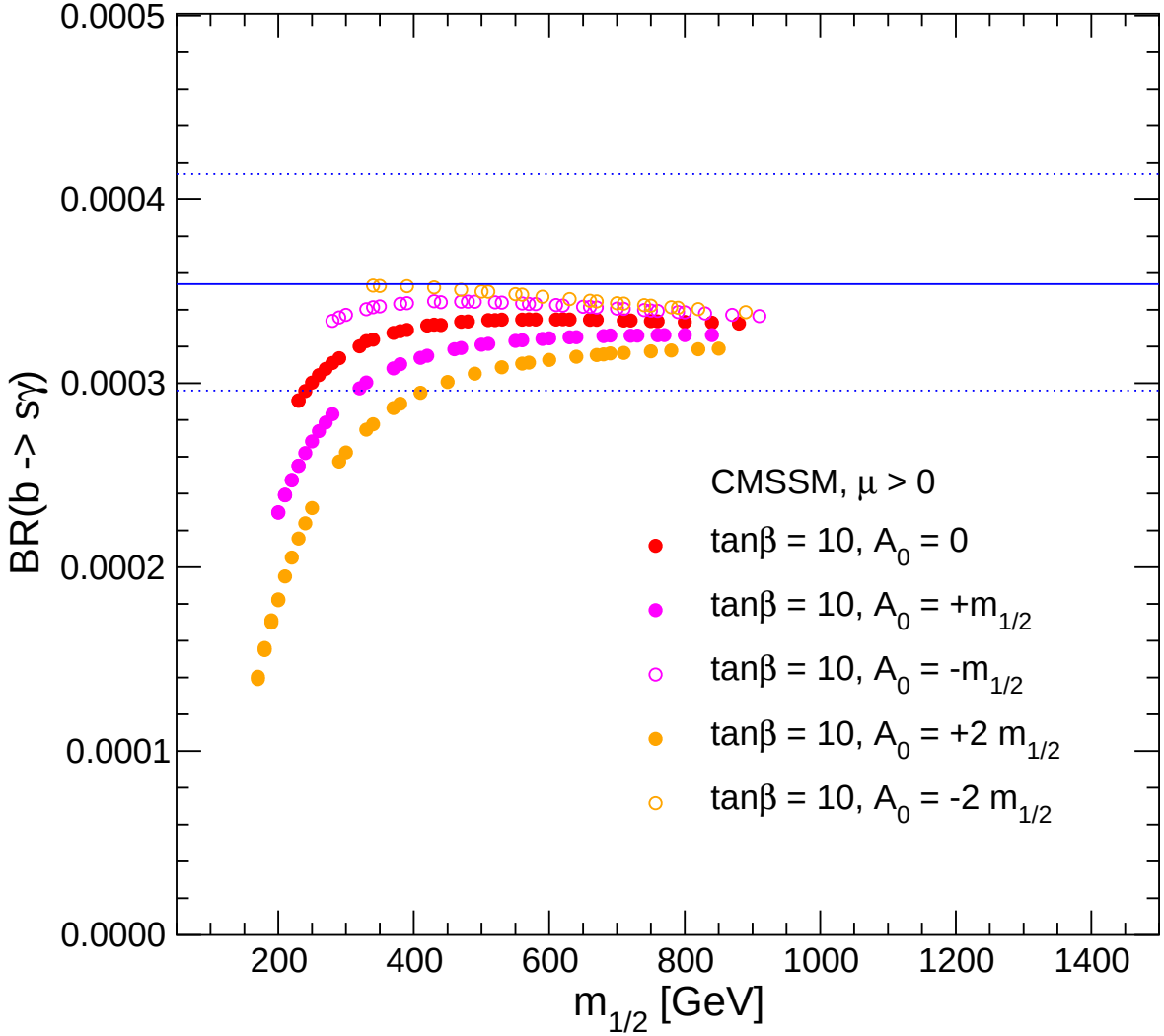


MSSM-Variation:
unbekannte Masse
der SUSY-Teilchen

SM-Variation:
unbekannte Masse
des Higgs-Teilchens

Investigation of mSUGRA with cold dark matter constraint:

BR($b \to s\gamma$), $\tan\beta = 10$



Scan over $m_{1/2}$, m_0, A_0

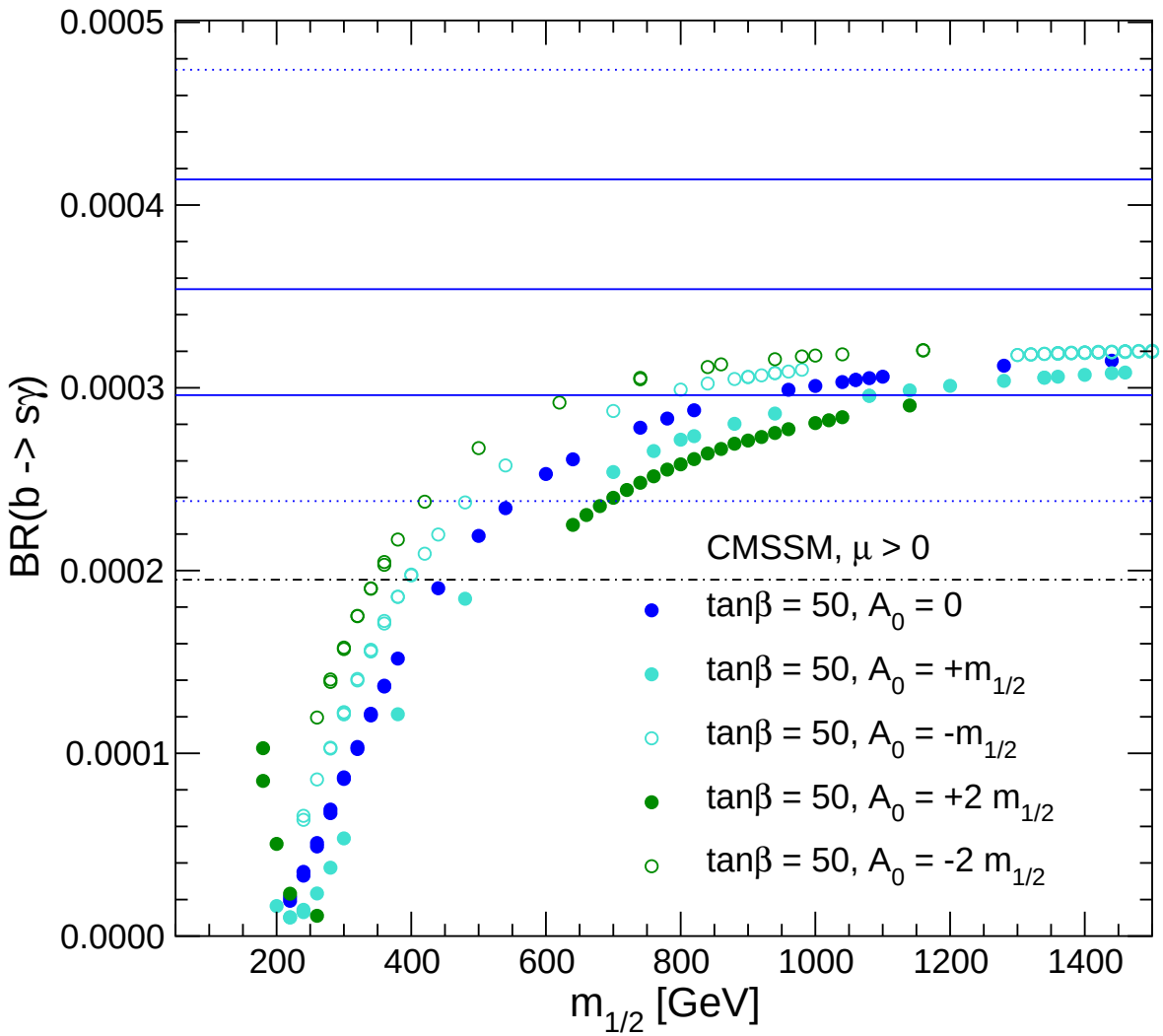
$\tan\beta = 10$

selected points give correct amount of cold dark matter

[*Ellis, S.H., Olive, Weiglein '04*]

Investigation of mSUGRA with cold dark matter constraint:

BR($b \to s\gamma$), $\tan\beta = 50$



Scan over $m_{1/2}$, m_0, A_0

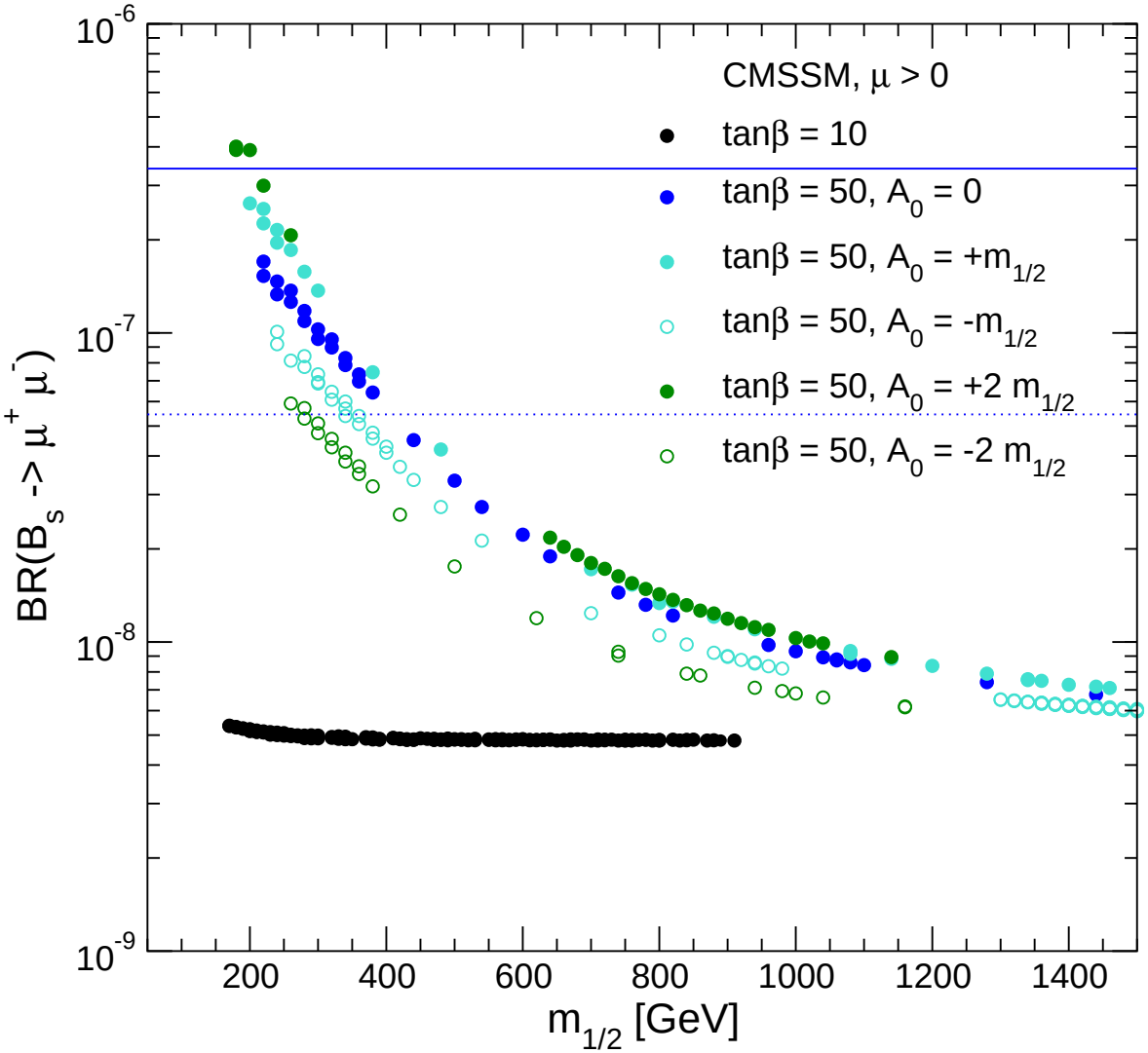
$\tan\beta = 50$

selected points give correct amount of cold dark matter

[*Ellis, S.H., Olive, Weiglein '04*]

Investigation of mSUGRA with cold dark matter constraint:

BR($B_s \to \mu^+\mu^-$)



Scan over $m_{1/2}$, m_0, A_0

$\tan\beta = 10, 50$

selected points give correct amount of cold dark matter

[*Ellis, S.H., Olive, Weiglein '04*]