

Physik mit TESLA

Bad Honnef

24/11/2000

Klaus Desch
Universität Hamburg

- Einleitung
- Das Profil des Higgs Bosons
- Alternativen zum elementaren Higgs
- Supersymmetrie
- Raum-Zeit-Struktur: Extra Dimensionen
- Neue Eichbosonen
- top-Quark
- Zusammenfassung

Einleitung

Zielsetzung von TESLA:

Präzisionsphysik im Energiebereich zwischen LEP2 und o(1 TeV).

- Skala der elektro-schwachen Symmetrie-
brechung: $v = 246 \text{ GeV}$
- Komplementarität zum LHC (experimentelle Vorteile von e^+e^-)
- Extrapolation in den multi-TeV Bereich Definition der Zielsetzung einer multi-TeV Maschine (CLIC, VLHC, μC)

Einleitung

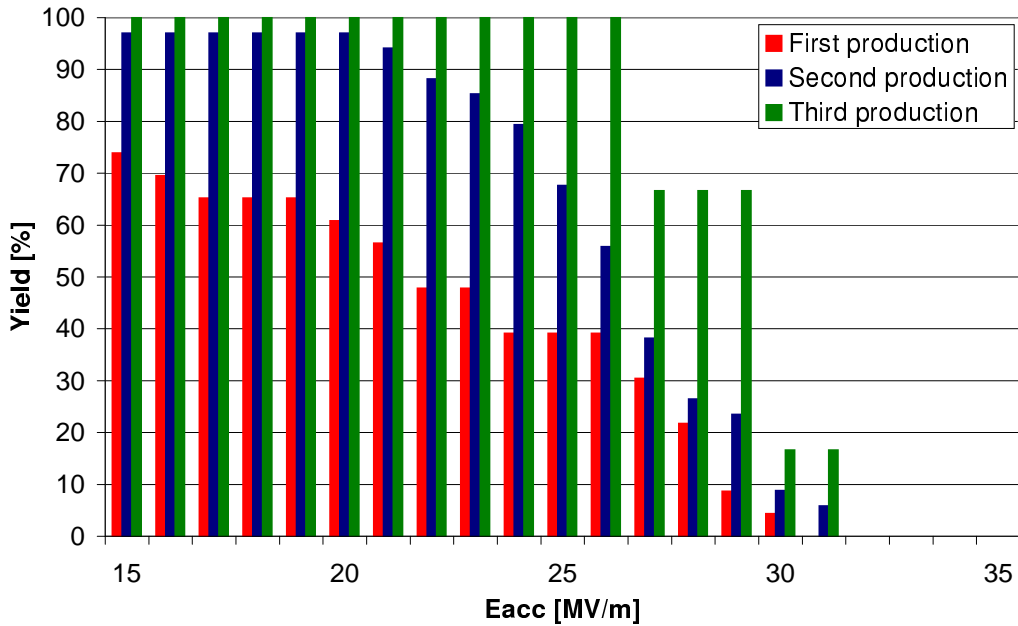
Das TESLA Projekt



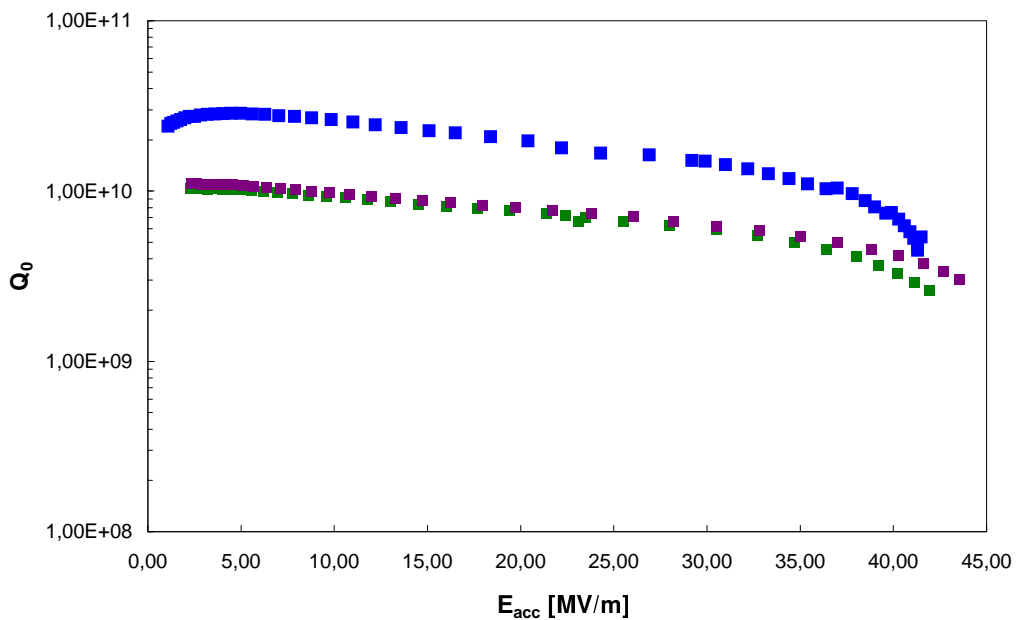
- supraleitender e^+e^- -Linearbeschleuniger
- Phase 1: 500 GeV, Phase 2: 800 GeV
- großer Bunchabstand (337/189) ns
- Beamspot: 5×535 nm, Länge 0.3 mm
- Luminosität: $3-5 \times 10^{34} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
- 300 - 500 fb^{-1} / Jahr
- Polarisation (80% e^- , 45-60% e^+)
- Optionen: $\gamma\gamma$, $e\gamma$, e^-e^- -Modus, **Giga Z**

Einleitung

Technologie: supraleitende Niob-Kavitäten:



Einzellige Strukturen nach electro-polishing:

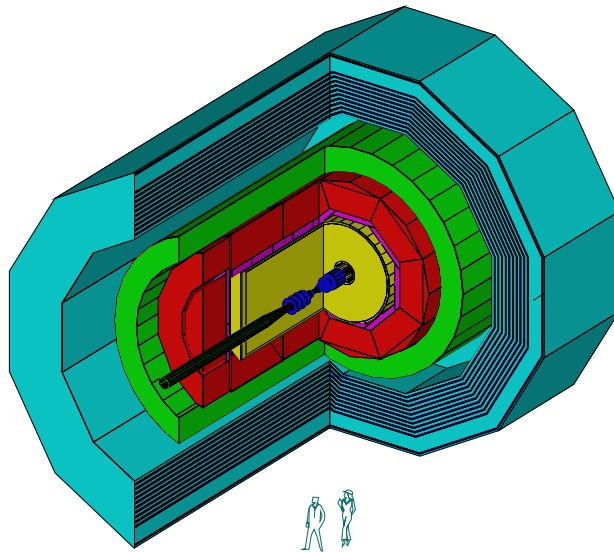


$\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}: 23 \text{ MV/m}$ $\sqrt{s} = 800 \text{ GeV}: 37 \text{ MV/m}$

Einleitung

Experimentieren bei 500 – 800 GeV:

- (relativ) problemlose Untergrundbedingungen
- Beamstrahlung beherrschbar



Hochauflösender Detektor, Highlights:

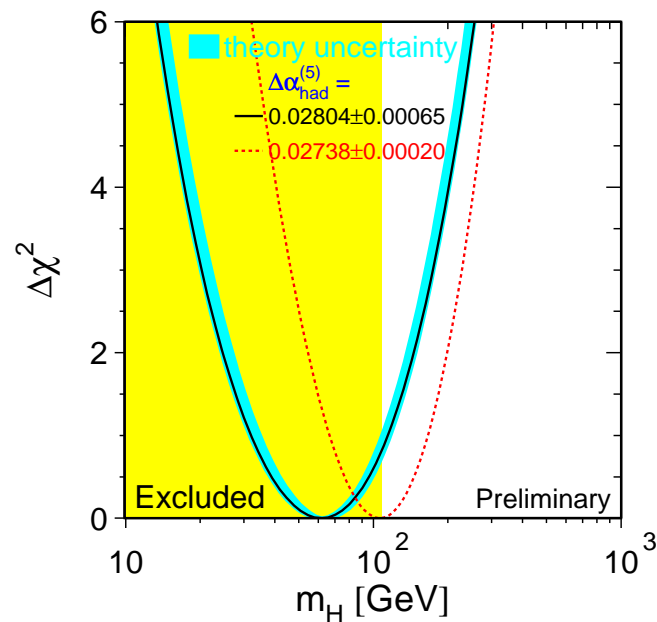
- Flavour-Tag: b/c–Separation
- Impulsauflösung + Redundanz (TPC + Si)
- Hochauflösendes, hermetisches "tracking"-Kalorimeter
- Hermetizität bis zu kleinen Winkeln (instrumentierte Maske)
- kein Trigger!

Das Profil des Higgs Bosons

Leichtes Higgs Boson: sehr natürliche Erklärung der exp. Daten

Argumente:

1) EW-Präzisionsdaten:

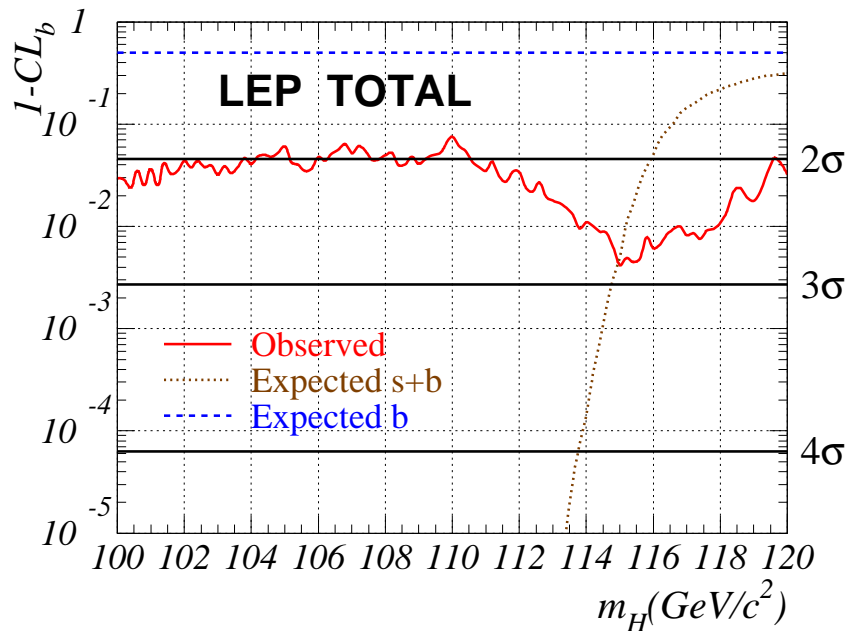


2) Gilt der Fit auch, wenn es neue Physik knapp oberhalb der momentan ausgeschlossenen Grenzen gibt ?

Ja, $m_H > 400$ GeV kaum möglich bei allgemeinen Annahmen über die neue Physik (Barbieri+Strumia,1999)

Das Profil des Higgs Bosons

3) Hinweis auf Higgs Boson bei LEP2



3 σ -Überschuss in den letzten LEP-Daten konsistent mit $m_H = 115^{+1.3}_{-0.9}$ GeV

4) Leichtes Higgs theoretisch gut motiviert:

GUT: $m_H \lesssim 180$ GeV

SUSY: $m_h \lesssim 180$ GeV (MSSM: < 135 GeV)

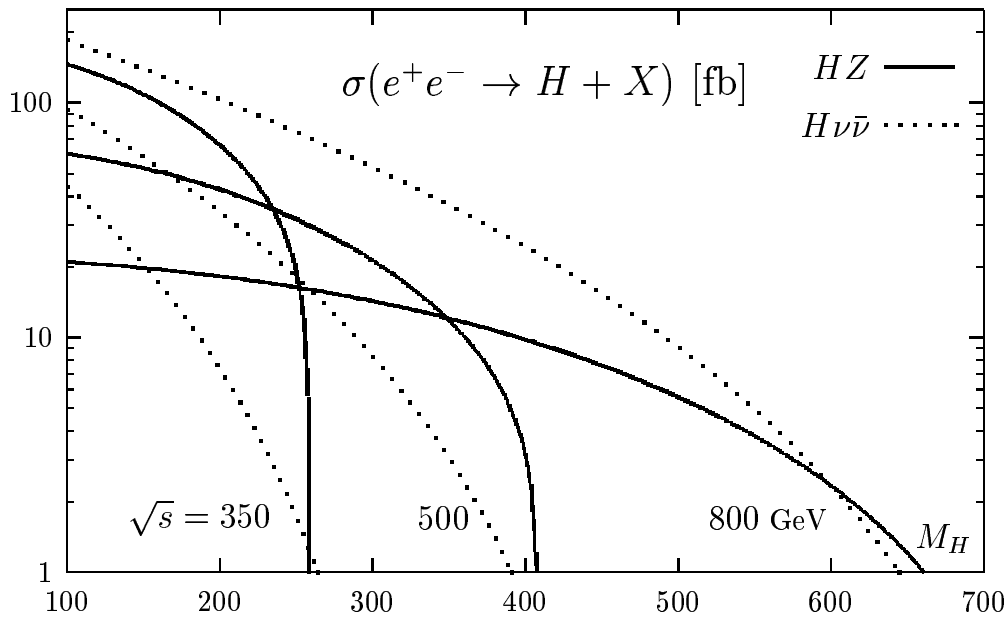
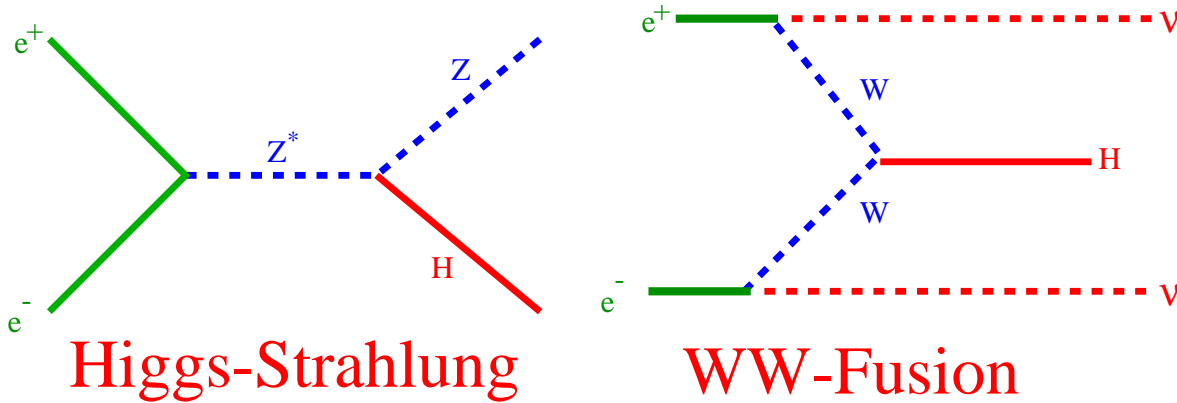
Das Profil des Higgs Bosons

Ziel:

Etablierung des Higgs–Mechanismus (in allen Bestandteilen) als dem Mechanismus der elektro–schwachen Symmetriebrechung:

- Masse: letzter SM Parameter
- totale Breite, Lebensdauer
- Spin, CP
- $g_{Hff} \sim m_f$ (Yukawa–Kopplungen)
- $g_{HWW} = g_{HZZ}$ (Eich–Kopplungen)
- $V = \lambda(\phi^2 - \frac{1}{2}v^2)^2 \rightarrow g_{HHH}, g_{HHHH}$
(Higgs–Selbstkopplung)

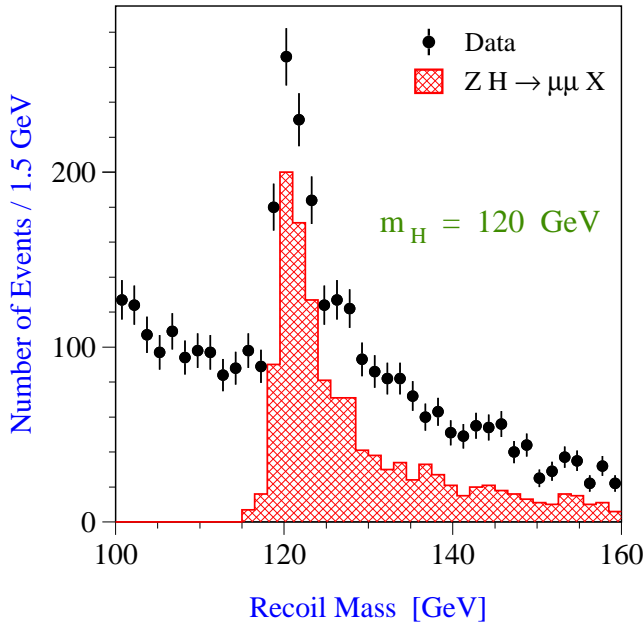
Das Profil des Higgs Bosons



- $\mathcal{O}(10^5)$ Higgs-Bosonen / Jahr (Higgs-Factory)
- Nachweis mit hoher Effizienz (s. LEP)
- geringer Untergrund

Das Profil des Higgs Bosons

Modellunabhängiger Nachweis:

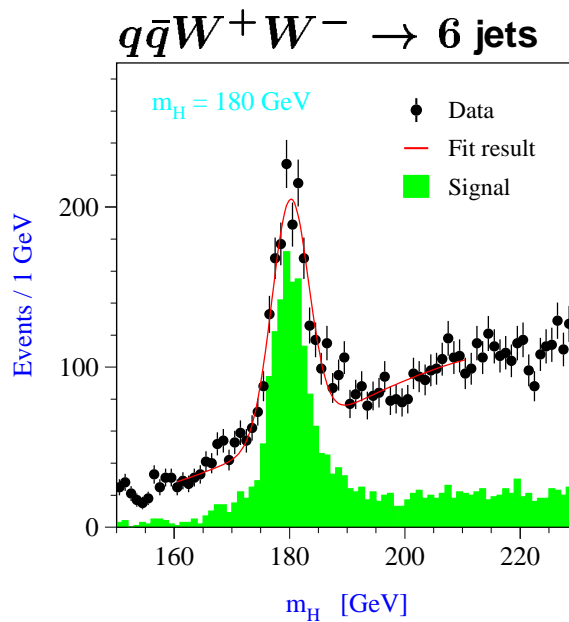
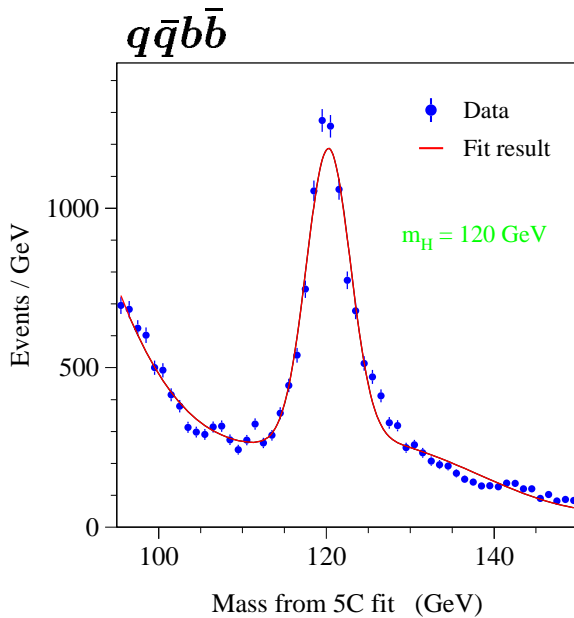


$e^+e^- \rightarrow HZ$ mit
 $Z \rightarrow \ell^+\ell^-$

Rückstoßmasse zum Z^0
ist unabhängig vom Higgs-
Zerfall!

(\rightarrow e.g. unsichtbare Higgs-
Zerfälle) $\Delta\sigma_{ZH} \approx 3\%$

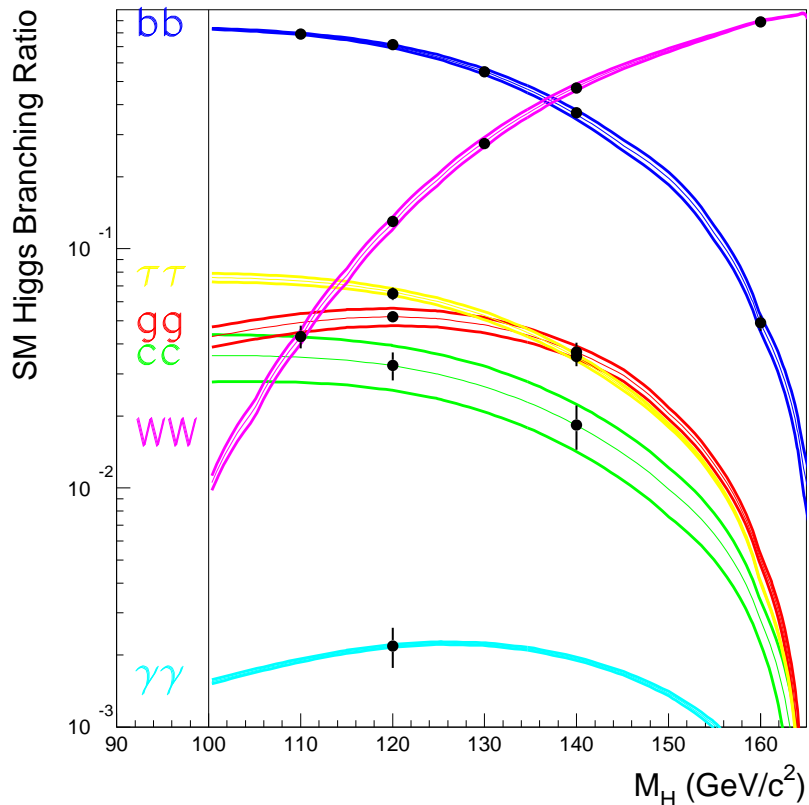
Exklusive Endzustände (z.B.):



$$\Delta m_H \approx 50 \text{ MeV}$$

Das Profil des Higgs Bosons

Messung der Higgs–Verzweigungsverhältnisse:



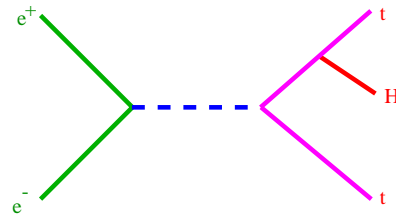
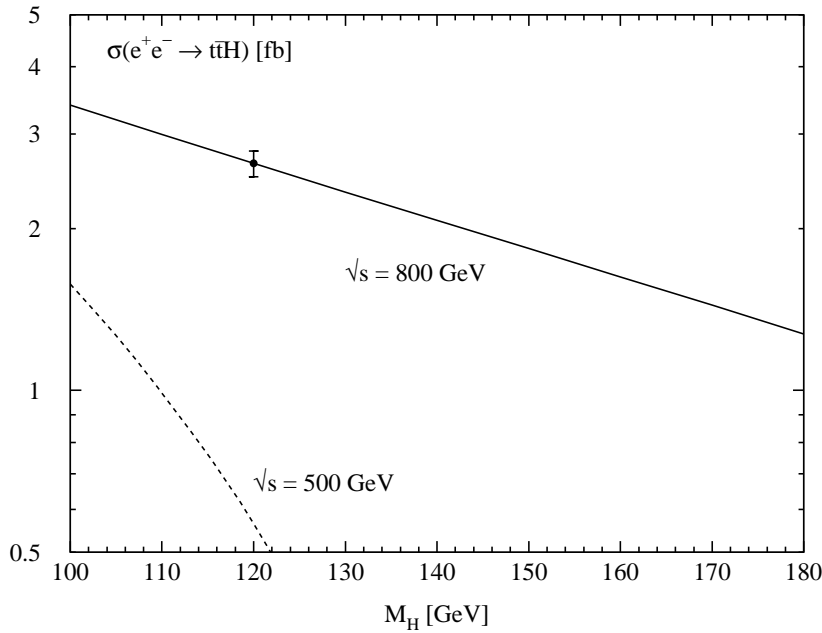
– Separation von $b\bar{b}$, $c\bar{c}$ and gg aus simultanem Fit
(Voraussetzung: sehr gute b/c–Separation)

Zerfall	Präzision
$H \rightarrow b\bar{b}$	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}
 $m_H = 120 \text{ GeV}$

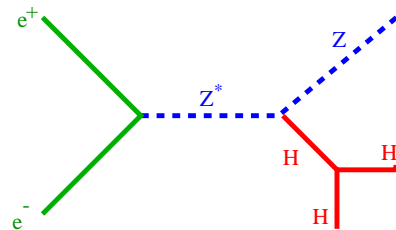
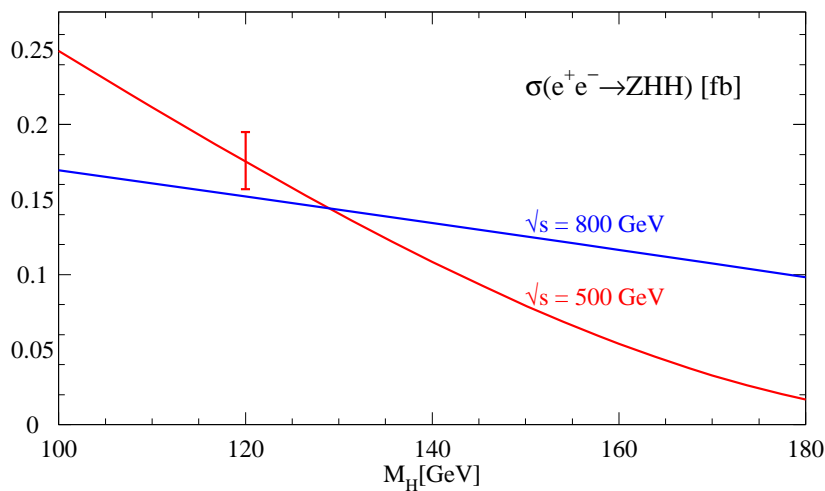
Das Profil des Higgs Bosons

Messung der Higgs-top Yukawa Kopplung:



→ $\Delta g_{ttH}/g_{ttH} \approx 6\%$

Messung der Higgs-Selbstkopplung:



→ $\Delta \lambda/\lambda \approx 20\%$

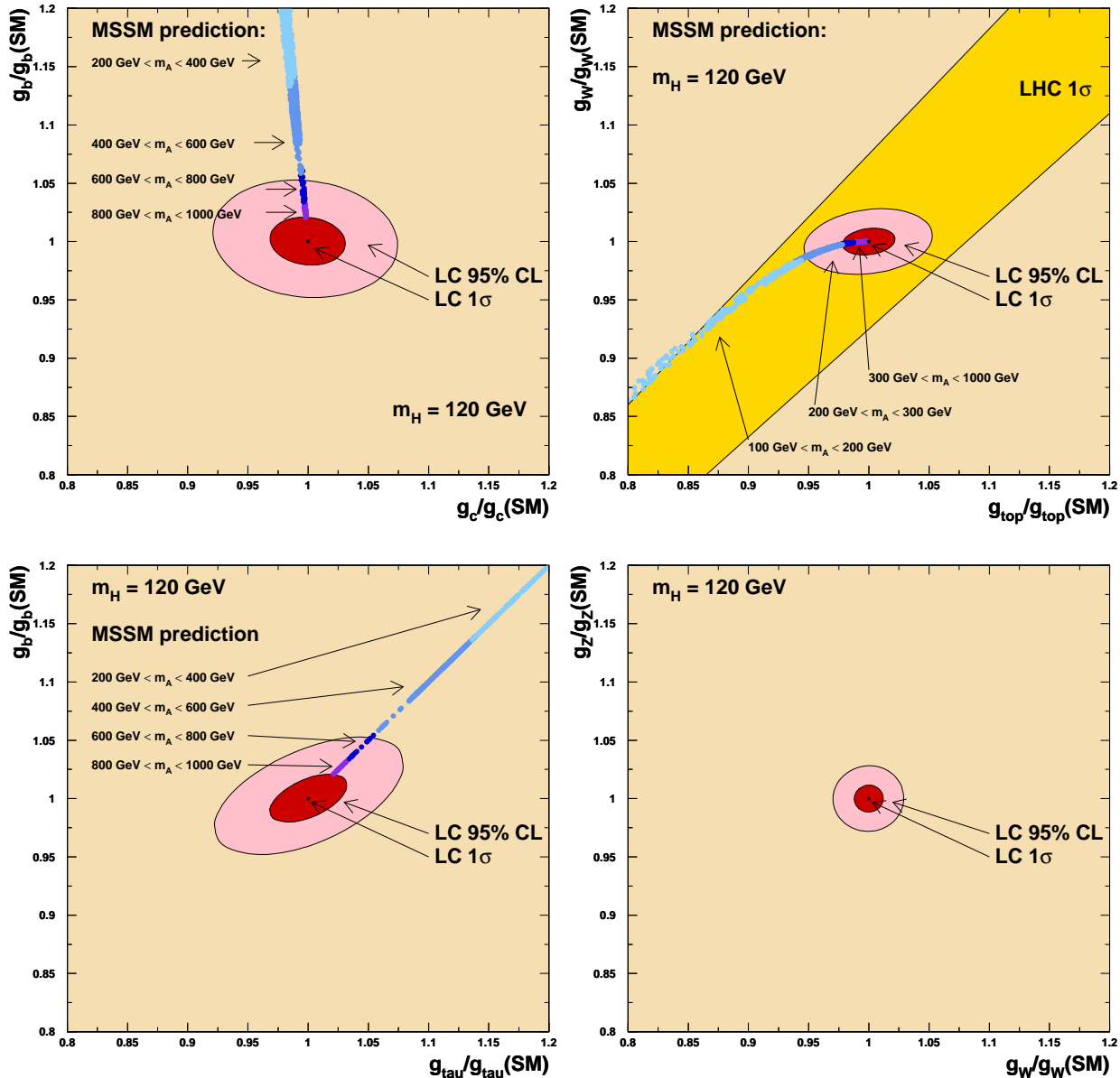
Das Profil des Higgs Bosons

für $m_H = 120 \text{ GeV}$

Parameter	LHC	TESLA
Masse	120 MeV	50 MeV
Spin	?	ja
CP	–	3 %
Breite	?	5 %
$\frac{g_{HWW}}{g_{HZZ}}$	(15%)?	2%
$\frac{g_{Hcc}}{g_{Hbb}}$	–	4%
$\frac{g_{H\tau\tau}}{g_{Hbb}}$	–	3%
$\frac{g_{H\tau\tau}}{g_{HWW}}$	(7%)?	3%
$\frac{g_{Htt}}{g_{HWW}}$	7%	2%
g_{HZZ}	–	1 %
g_{HWW}	–	1 %
g_{Hbb}	–	2 %
g_{Hcc}	–	3 %
g_{Htt}	–	2 %
$g_{H\tau\tau}$	–	3 %
λ_{HHH}	–	20 %

Das Profil des Higgs Bosons

HFITTER: globaler Fit der Higgs-Kopplungen







Hohe Sensitivität auf Abweichung von SM-Kopplungen

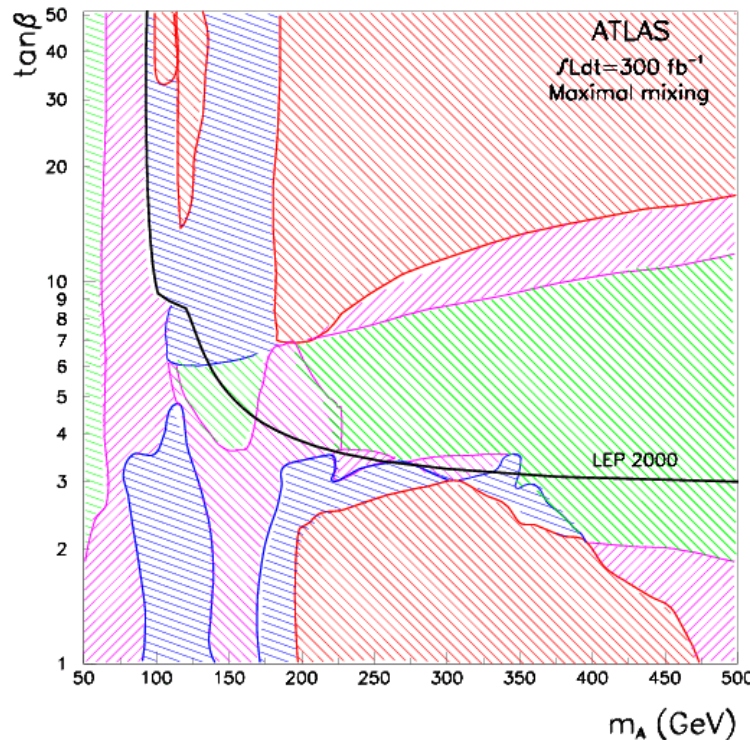
MSSM: "Statistische" Sensitivität bis $m_A \sim 1 \text{ TeV}$

Erfordert präzise theoretische Vorhersagen (\rightarrow Quarkmassen,...)

Das Profil des Higgs Bosons

SUSY-Higgs-Bosonen H^0, A^0, H^\pm

-  4 Higgs observable
-  3 Higgs observable
-  2 Higgs observable
-  1 Higgs observable



- LHC: großer Bereich in dem nur h^0 sichtbar ist
- TESLA: $e^+e^- \rightarrow HA$ bis $M_A, M_H \lesssim \sqrt{s}/2 - \epsilon$
- TESLA: $\gamma\gamma \rightarrow H^0, A^0$ bis $M_A, M_H \lesssim 0.8\sqrt{s_{ee}}$
- TESLA: Trennung von fast entarteten H^0, A^0
- TESLA: H^\pm bis $\sqrt{s}/2 - \epsilon$
- CLIC: alle schweren Higgs-Bosonen auch im "decoupling limit"

Kein elementares Higgs–Boson ?

→ Divergenz in der $W_L W_L \rightarrow W_L W_L$ Streuamplitude

→ neue starke Wechselwirkung bei der Skala

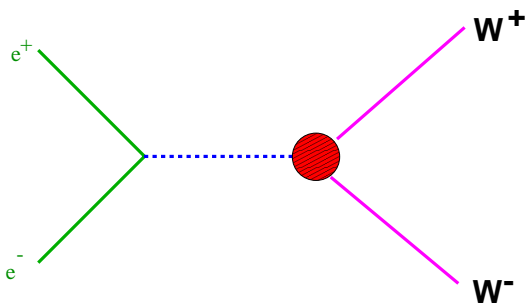
$$\Lambda^2 \sim o\left(\frac{4\pi\sqrt{2}}{G_F}\right) = (1.2\text{TeV})^2$$

- spontan gebrochene chirale Symmetrie
- Goldstone–Bosonen ("Pionen") = W_L –Zustände

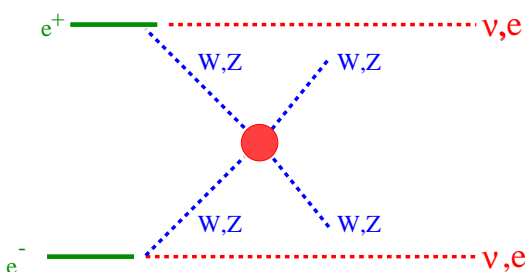
bis heute gibt es keine berechenbare konkrete Theorie in Übereinstimmung mit den experimentellen Daten !

Experimentelle Konsequenzen:

TESLA + LHC: Schwellenverhalten



$$\Lambda \leq 3 \text{ TeV } (\sqrt{s} = 500 \text{ GeV})$$

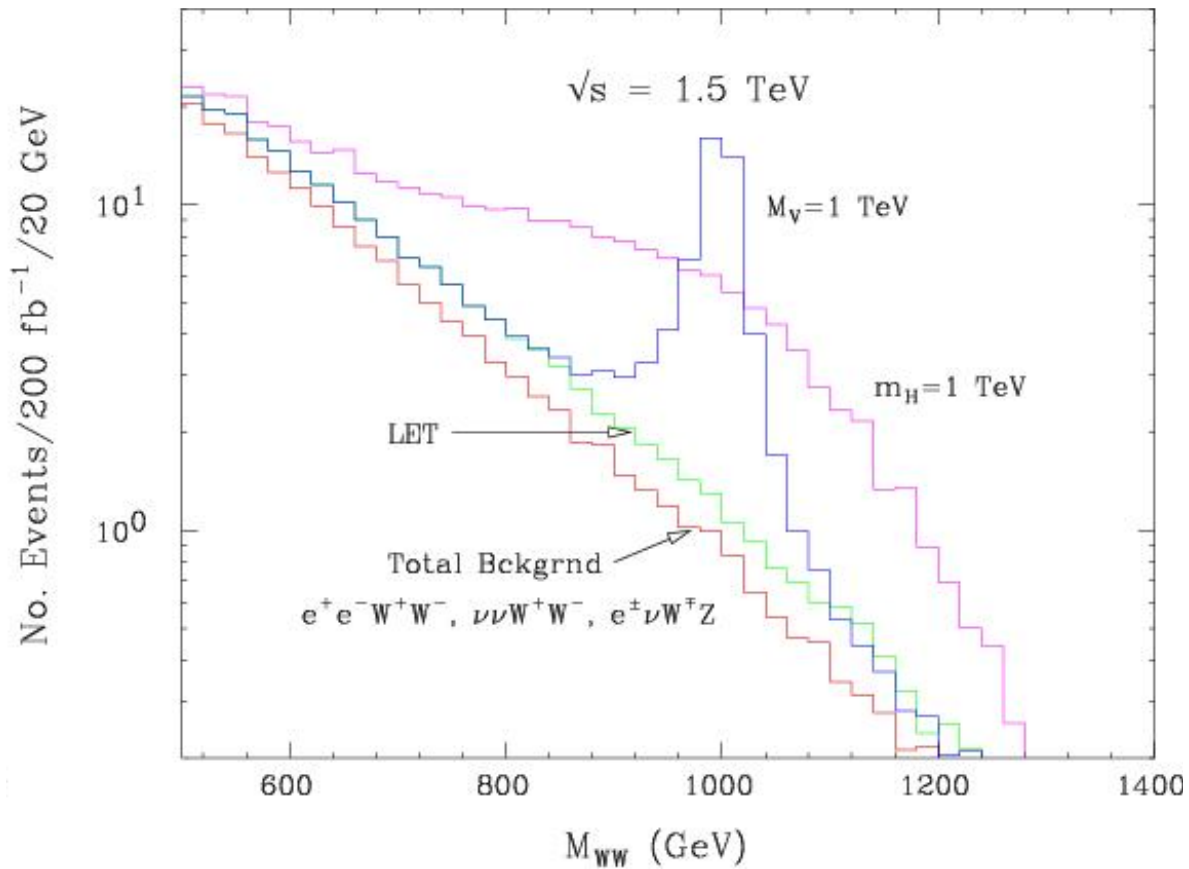


$$\Lambda \leq 2.5 \text{ TeV } (\sqrt{s} = 800 \text{ GeV})$$

gesamter stark–wechselwirkender Schwellenbereich vor Resonanzbildung abgedeckt

Kein elementares Higgs-Boson ?

Resonanzen ($W_L W_L \rightarrow \rho_{TC}$ etc.) im Bereich von CLIC:



Supersymmetrie

- **bestmotivierte Erweiterung des Standard-Modells**

- Verbindung zur Gravitation
- GUT-Vereinigung

$$\sin^2 \theta_W^{SUSY} = 0.2335(17)$$

$$\sin^2 \theta_W^{exp} = 0.2311(02)$$

- Lösung des Hierarchie-Problems
(wenn $\tilde{M} \lesssim o(1TeV)$)

- **Entdeckung von SUSY:**

Tevatron ?

LHC! :

direkte Produktion:

- $m(\tilde{q}, \tilde{g}) \lesssim 2 - 3 \text{ TeV}$
- $m(\tilde{\chi}) \lesssim 200 \text{ GeV}$
- $m(\tilde{\ell}) \lesssim 350 \text{ GeV}$

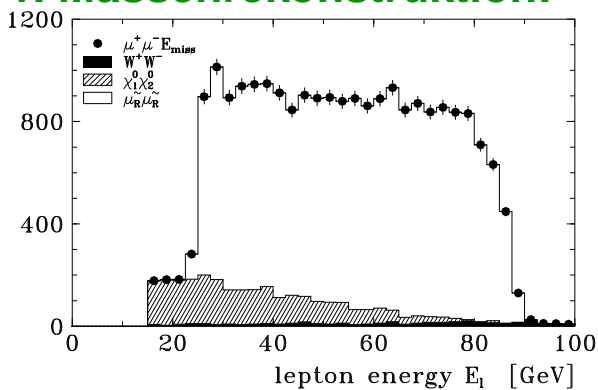
Kaskadenzerfälle: $\lesssim m(\tilde{q})$

Supersymmetrie

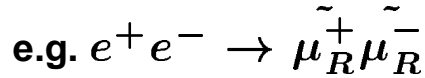
Aufgabe von TESLA:

- präzise Bestimmung des Spektrums (Massen)
- Messung der SUSY-Parameter
(Kopplungen, Mischungswinkel,...)

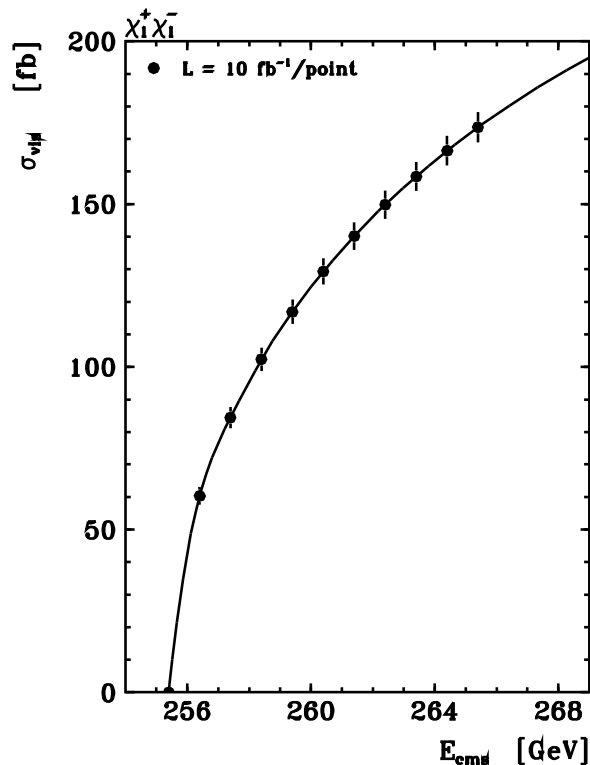
1. Massenrekonstruktion:



Endpunkte der Energie-Spektren

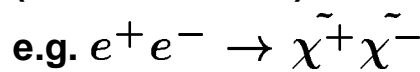


$\Delta m \approx 200 \text{ MeV}$



Schwellen-Scan

(10 fb^{-1} /Punkt)

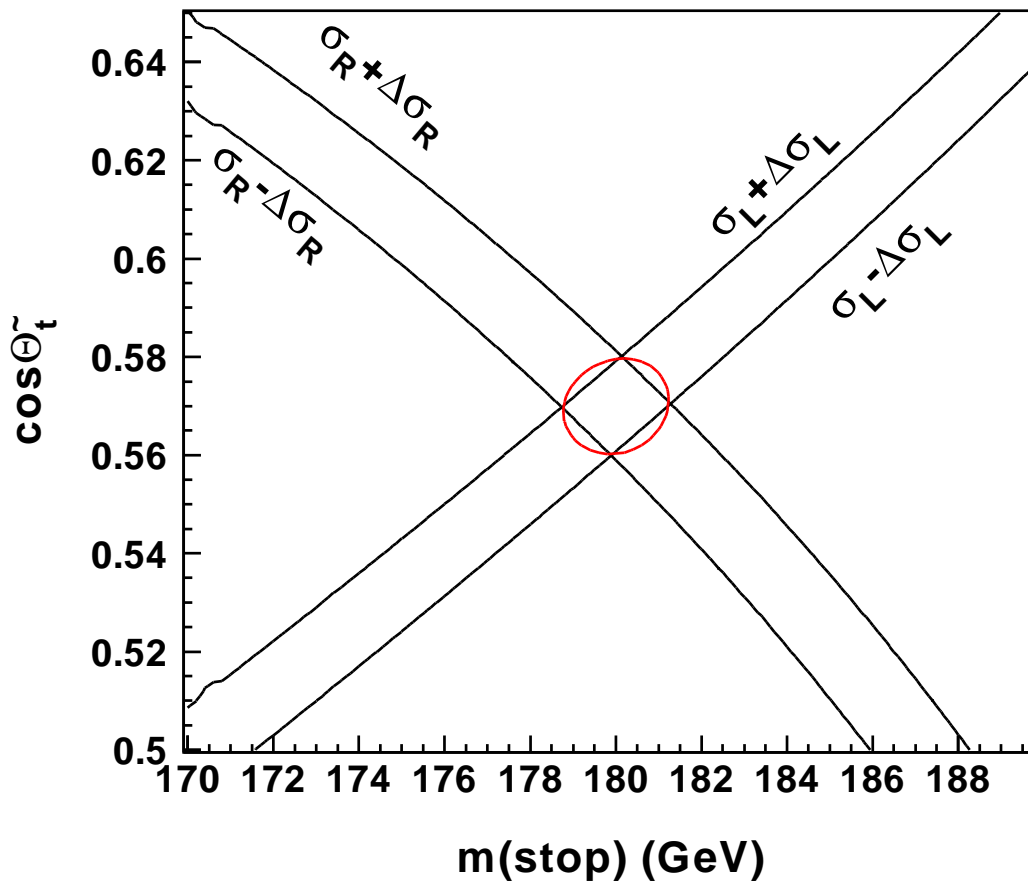


$\Delta m \approx 50 \text{ MeV}$

Supersymmetrie

2. Messung der SUSY-Parameter:

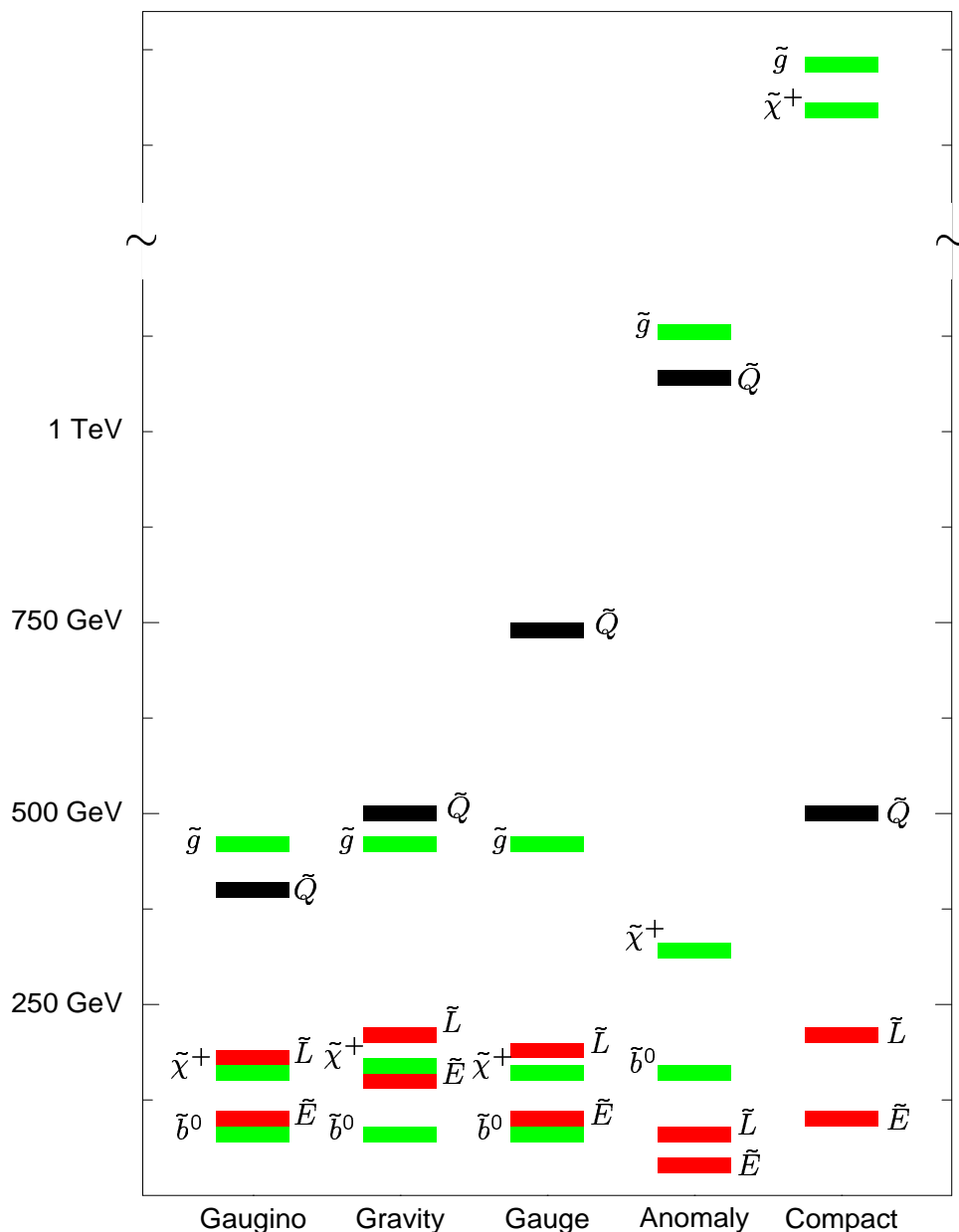
z.B. Messung des \tilde{t} -Mischungswinkels $\Theta_{\tilde{t}}$
mithilfe von Strahl-Polarisation:



Supersymmetrie

Wozu diese Genauigkeit ?

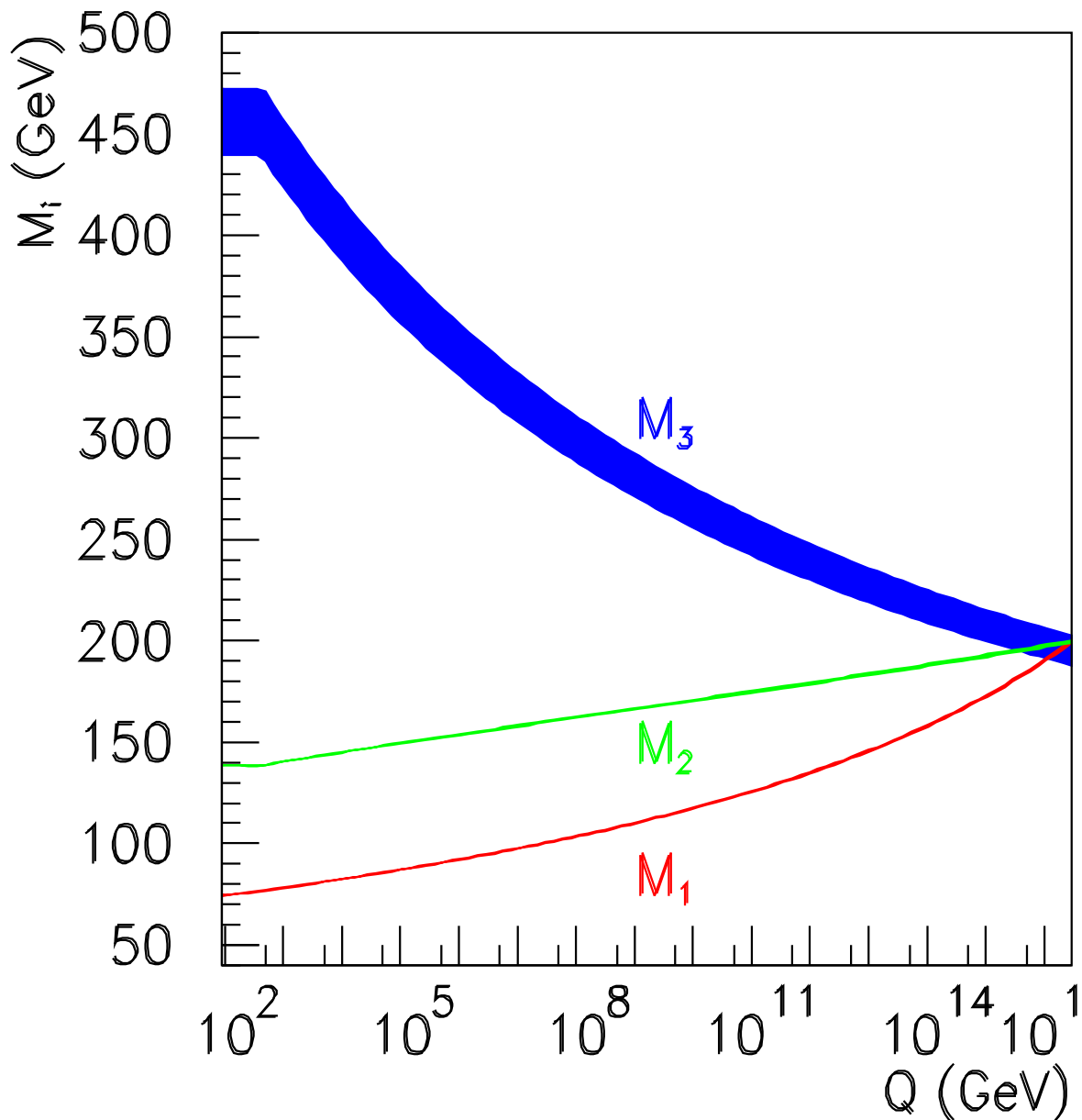
- Extrapolation zu hohen Energie
- Modellunabhängige Information über
 - zugrundeliegenden SUSY-Brechungsmechanismus
 - "GUT" Vereinigung der Kopplungen und Massen



Supersymmetrie

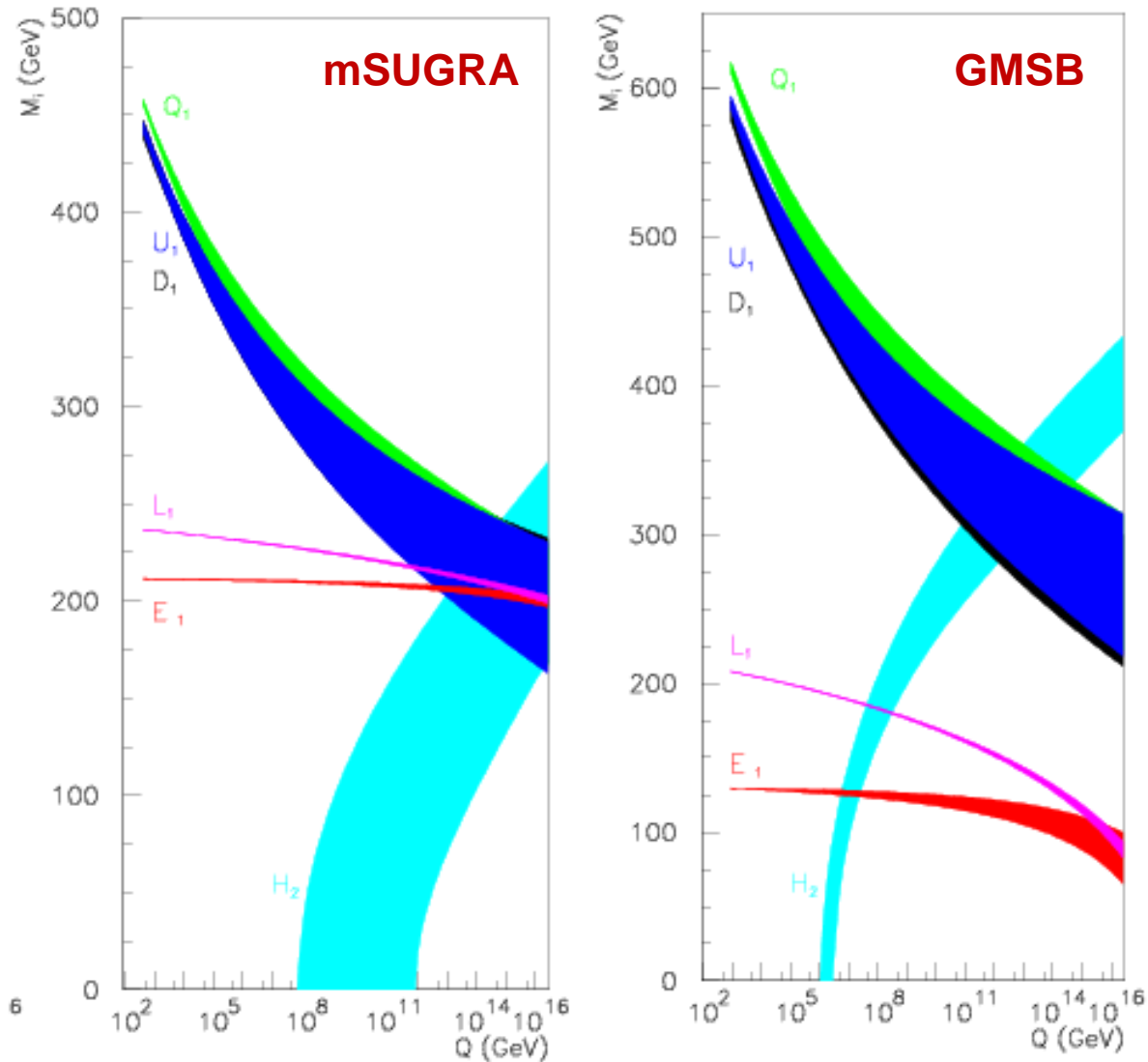
Benutze supersymmetrische RGE's um die SUSY-Parameter zu extrapolieren:
zu extrapolieren:

Vereinigung bei der GUT-Skala ?



Supersymmetrie

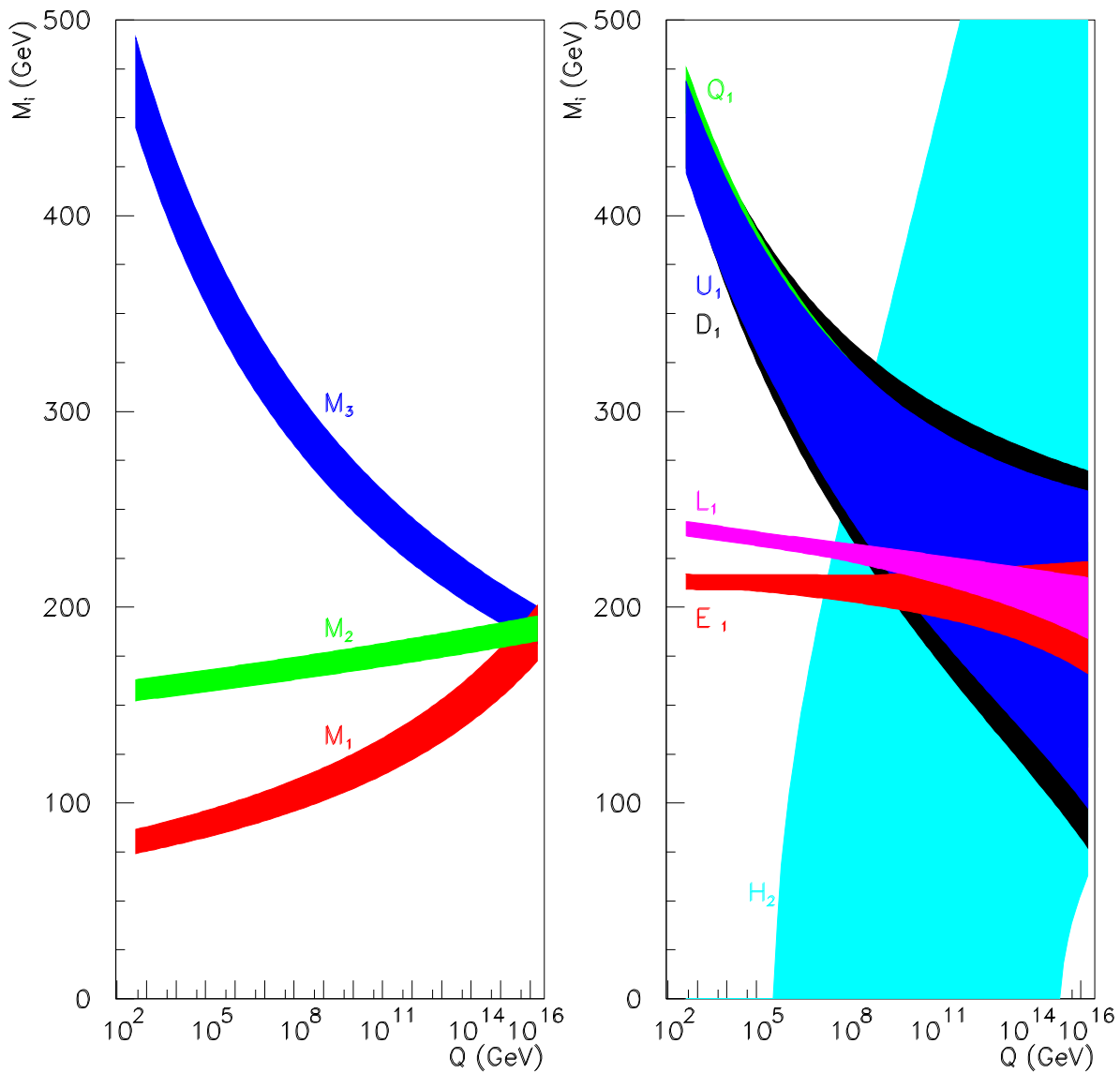
unterschiedliche Muster für unterschiedliche
SSB-Mechanismen...



...lassen sich unterscheiden
ohne Annahmen über das Modell!

Supersymmetrie

Nur LHC-Inputs:



Extra Dimensionen

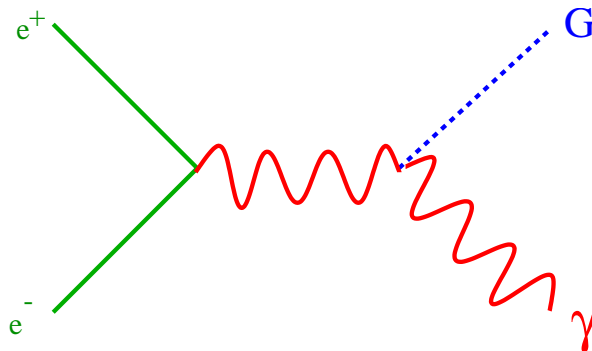
Motivation:

alternative Lösung des Hierarchie-Problems:
kompaktifizierte Dimensionen der Größe R
in denen sich die Gravitation bewegt,
nicht aber die anderen WW:

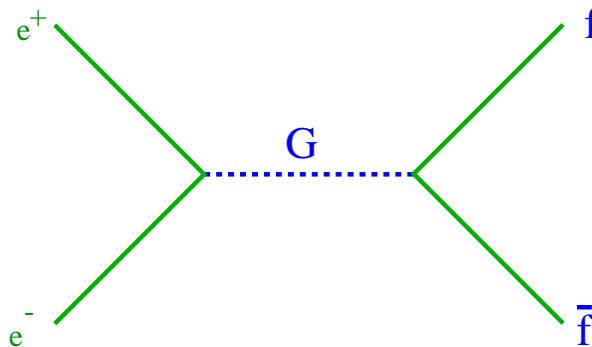
$$M_{Planck}^2 = M_S^{n+2} R^n$$
$$\rightarrow M_S \sim \text{o(TeV)!}$$

Phänomenologie bei TESLA:

a) reelle Effekte:



b) virtuelle Effekte:



(analog Drell-Yan-Produktion beim LHC)

Extra Dimensionen

Sensitivität auf M_S (reelle Graviton-Produktion):

n_{dim}	LHC	TESLA	CLIC
2	12.5 TeV	7.7 (9.3) TeV	o(40) TeV
4	7.5 TeV	4.5 TeV	o(22) TeV
6	6.0 TeV	3.1 TeV	o(16) TeV

Sensitivität auf M_S (virtuelle Effekte):

LHC	TESLA	CLIC
6 TeV	~ 6 TeV	o(40) TeV

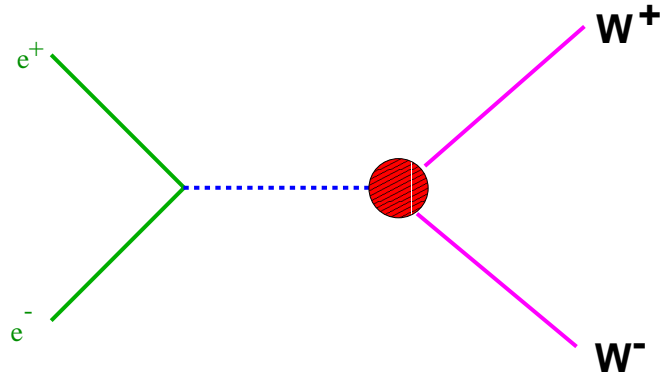
→ etwa gleiche Sensitivität von TESLA und LHC

→ TESLA: Nachweis von Spin 2 aus Winkelverteilungen !

dies ist nur das "einfachste" Modell
viele Szenarien sind "under study"

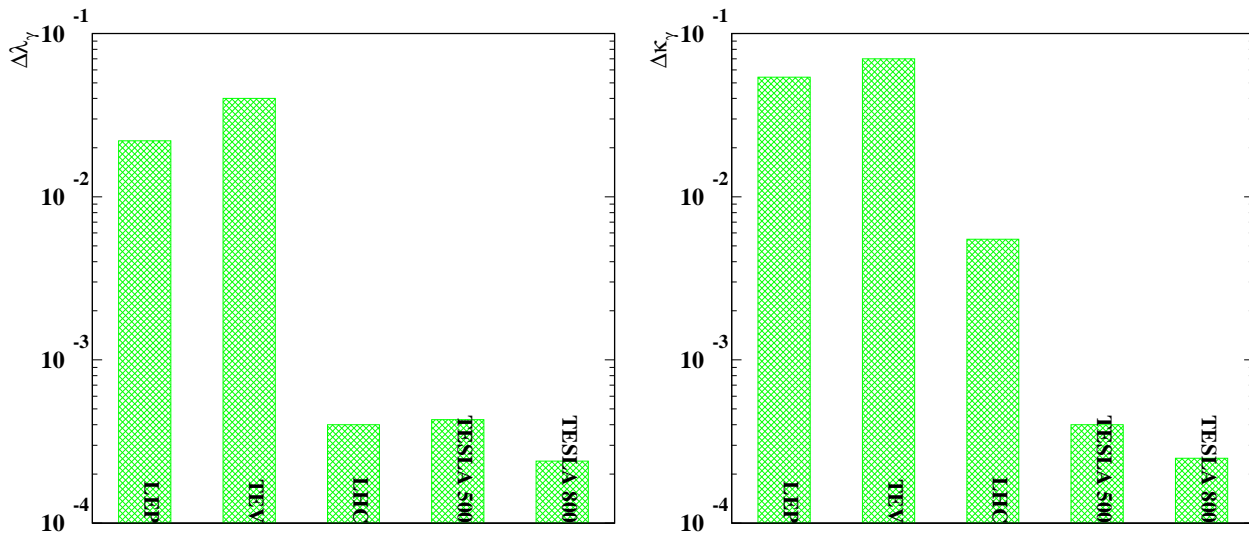
Eichtheorien

1) Präzisionstest der Eichboson–Selbstkopplung:



Präzisionstest der nicht–abelschen Eichtheorie

Schlüssel zu erwarteten **und unerwarteten** beyond–SM Phänomenen.



Trennung von $WW\gamma$ und WWZ –Kopplung durch Polarisation möglich!

Eichtheorien

2) Neue Eichsymmetrien:

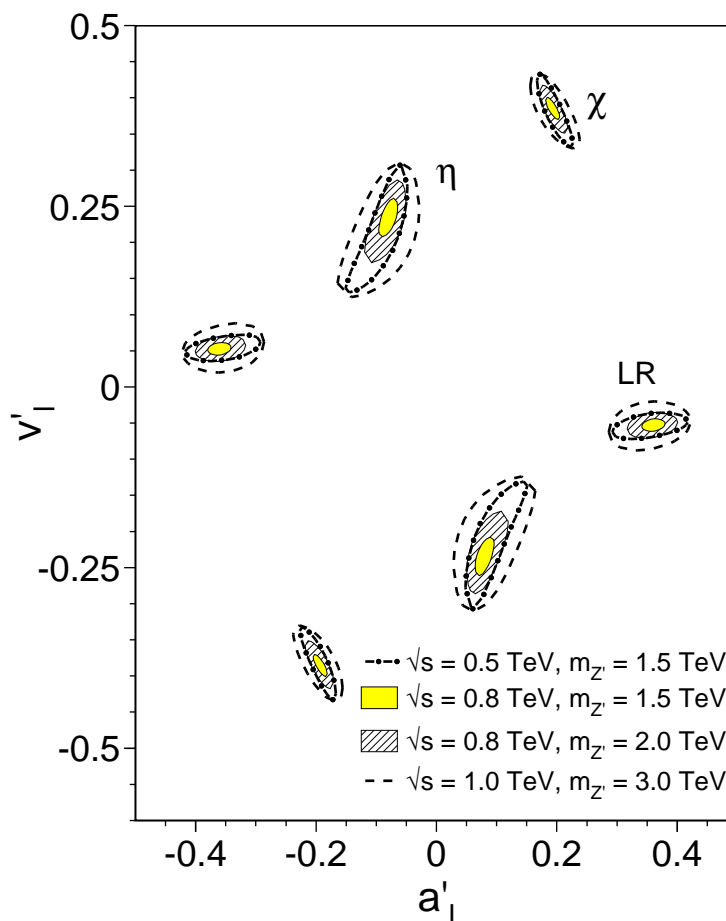
GUT-Eichgruppe muss nicht "auf einmal" (bei der GUT-Skala) gebrochen sein, sondern in mehreren Schritten.

→ z.B. neue $U(1)'$ mit Z' bei $o(\text{TeV})$

LHC: Entdeckung bis $\sim 4\text{--}5$ TeV

TESLA: Sensitivität auf Z' -Propagator bis ~ 6 (10) TeV

Messung der Vektor- und Axialvektor-Kopplungen:

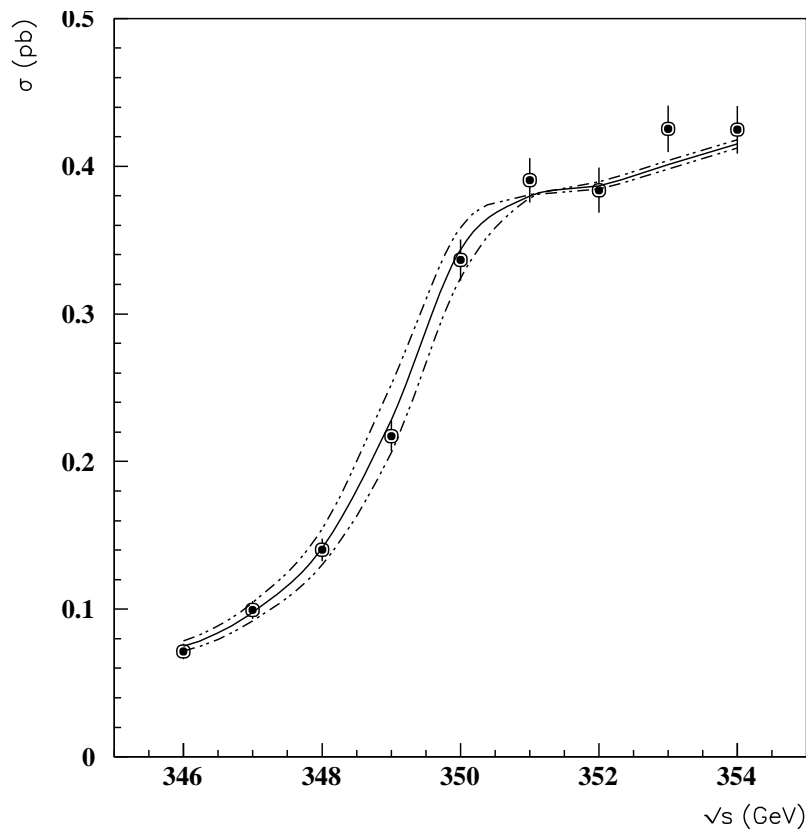


CLIC: bis $\sim 40\text{--}50$ TeV

top-Quark

Hochpräzisions-Messung der Eigenschaften des schwersten Quarks

• Masse und Breite – Schwellenscan:



$$\Delta m_{top} \approx 100 \text{ MeV}$$

$$\Delta \Gamma_{top} / \Gamma_{top} \approx 0.05$$

• Elektro-Schwache Eigenschaften

- magn. Dipolmoment $\lesssim 1.1 \times 10^{-2}$
- elektr. Dipolmoment $\lesssim 4 \cdot 10^{-19} \text{ ecm}$
- Michel-Parameter im Zerfall

Szenarien

P. Grannis, LCWS2000 summary:

1. Higgs $\lesssim 130$ GeV und Evidenz für SUSY:

- TESLA:
 - Higgs–Mechanismus
 - Präzisionsmessung des SUSY–Spektrums (\rightarrow GUT, SSB)
- CLIC:
 - schwere Higgs–Bosonen
 - schwere SUSY–Partner

2. Higgs $\lesssim 180$ GeV und keine Evidenz für SUSY:

- TESLA:
 - Higgs–Mechanismus (m, Spin, CP, Γ_{tot} , BR's) (\rightarrow non-SM Effekte ?)
 - TGC's ?
 - Giga–Z: Präzisionmessungen \rightarrow neue Physik ?

- CLIC: ?

3. Higgs $\gtrsim 180$ GeV und keine Evidenz für SUSY:

- TESLA:
 - Higgs–Mechanismus (m, Spin, CP, Γ_{tot})
 - TGC's
 - Giga–Z: Präzisionmessungen \rightarrow neue Physik ? (Widerspruch zwisches EW–Daten und m_H !)

- CLIC: ?

Szenarien

4. kein Higgs und keine SUSY:

- **TESLA:**
 - invisible Higgs,... ? (loopholes von LHC schließen)
 - neue starke WW ? → Schwellenverhalten
- **CLIC:**
 - Resonanzen

5. Higgs und SUSY und andere neue Physik:

- **TESLA:**
 - ideal um herauszufinden was passiert
- **CLIC: Programm definiert durch LHC + TESLA**

Zusammenfassung

- der TESLA Linearbeschleuniger hat ein gründlich motiviertes, gut studiertes und reiches Physik-Programm zur Erforschung des Energiebereiches der elektro-schwachen Symmetriebrechung.
- das Physik-Potential ist komplementär zum LHC (keine Phrase!!!)
- Phase 1(500 GeV) und Phase 2(800 GeV) sowie Optionen ($\gamma\gamma$, $e\gamma$, e^-e^- , Polarisation, Giga-Z) geben die Flexibilität auch in unerwarteten (und unwahrscheinlichen) Szenarien wesentliche Beiträge liefern zu können.
- die Präzision (Luminosität und experimentelle Auflösung) erlaubt Einblicke in die multi-TeV Region und darüber hinaus.