

# TEILCHENPHYSIK FÜR FORTGESCHRITTENE

Diesseits und jenseits des Standardmodells  
(teilweise in Anlehnung an Skript R. Klanner/T. Schörner)

**Caren Hagner**  
**Achim Geiser**



Universität Hamburg, IExpPh  
Sommersemester 2009

# ÜBERBLICK

1. Die quantenmechanische Beschreibung von Elektronen
2. Feynman-Regeln und –Diagramme
3. Lagrange-Formalismus und Eichprinzip
4. QED
5. Starke Wechselwirkung und QCD
6. Schwache Wechselwirkung, elektro-schwache Vereinigung und der Higgs-Mechanismus
7. Der Higgs-Mechanismus
8. Mischung von Quarks und Leptonen
9. **Diesseits und Jenseits des Standardmodells**
  - 9.1 Erfolge und Misserfolge des SM
  - 9.2 GUT
  - 9.3 SUSY
  - 9.4 (Super)Strings und Extra Dimensionen
10. Wie geht es weiter? Träume der Teilchenphysiker

# 9.1 ERFOLGE UND MISSERFOLGE DES SM

## Erfolge und Misserfolge des SM

(erfüllt SM Anforderungen an eine fundamentalen Theorie?)

1. (wenige) Grundannahmen? Kausalität, Quantentheorie, spezielle Relativitätstheorie **ja**
2. Konsistenz (ohne innere Widersprüche) ? **ja**
  - keine Divergenzen (Renormierbarkeit)
  - Extrapolation zu hohen Energien (Hierarchieproblem, Gravitation) **nein**
3. Übereinstimmung mit Experimenten **ja**
  - Entwicklung des Universums (dunkle Materie, dunkle Energie, Baryonen-Asymmetrie) **?nein?**
4. Vorhersagekraft **ja**
  - W, Z, charm, top,  $\nu_\tau$  **ja**
  - Selbst-WW der Eichbosonen g-g, W-W, etc. **ja**
  - Massenerzeugung durch Higgsmechanismus **??**
5. Einfachheit (Occams razor) **nein**
  - 27 willkürliche, fein abgestimmte Parameter
  - (3 Kopplungskonstanten  $\alpha, \alpha_W, \alpha_S$ )
  - 2 Parameter Higgs-Potential,  $v, \lambda, (M_{\text{Higgs}})$ ,
  - 6 Quarkmassen + 6 Leptonmassen
  - 4 Quark- + 4 Lepton-Mischungswinkel
  - 1 QCD-Phase
  - 1 Gravitationskonstante)

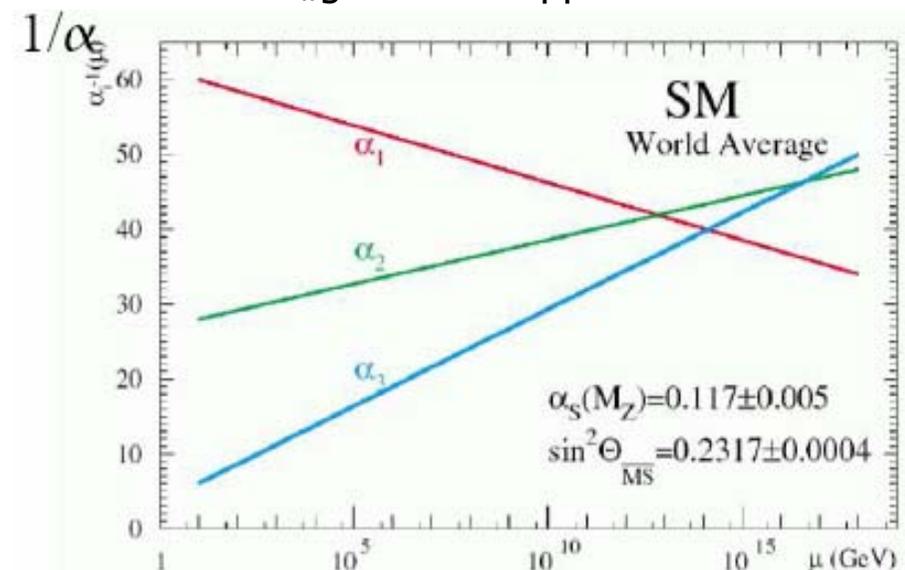
## außerdem viele offene Fragen:

- Warum 3 Familien?
- Warum Massenwerte Quarks, Leptonen?
- Warum 1/3 Ladung der Quarks?
- Lassen sich die 3 WW des SM vereinheitlichen?
- Warum so versch. Energieskalen (0.2– $10^{19}$  GeV)?
- Wie passt die Gravitation in das Bild?

**Wir wissen die Antworten nicht, aber wir haben Ideen + Experimente um Fragen zu beantworten z.B.**

## GUT (Grand Unified Theories)

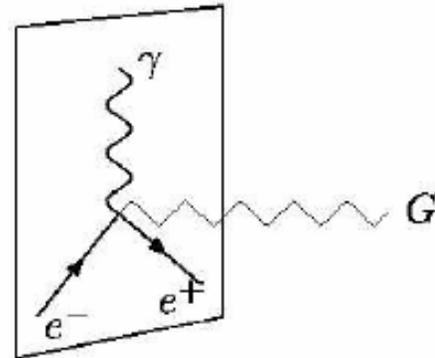
Vereinheitlichung der 3 WW  $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$  in einer neuen „großen“ Gruppe:



# IDEEN JENSEITS DES STANDARDMODELLS

## Composite Models

- Fundamentale Teilchen habe Sub-Struktur (bisher keine Evidenz  $\rightarrow < 10^{-19}$  m)



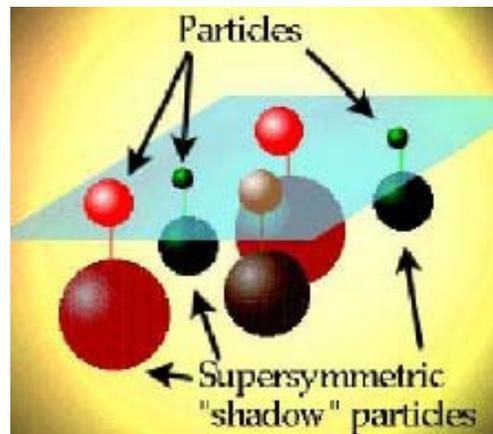
## Extra Dimensionen

(String Theorie)

- SM in 3+1 Dimensionen
- Gravitation in N extra Dimensionen

## Supersymmetrie (SUSY)

Symmetrie zwischen Fermionen („Materieteilchen“) und Bosonen („Kraftteilchen“)  $\rightarrow$  zu jedem Fermion  $\leftrightarrow$  Boson



## Hierarchie-Problem des SM:

**Energieskalen** im und jenseits des SM:

- $\Lambda_{\text{QCD}} \approx 0.2 \text{ GeV}$   $\alpha_s(Q^2) = 12\pi / [(33 - 2N_f) \ln(Q^2 / \Lambda^2)]$
- $v = 246 \text{ GeV}$  ( $M_{Z,W} \approx 100 \text{ GeV}$ ) – e+w-Vereinigung
- $M_{\text{GUT}} \approx 10^{16} \text{ GeV}$  ew+starke-Vereinigung
- $M_{\text{Planck}} \approx 10^{19} \text{ GeV}$   $M_{\text{Planck}} = \sqrt{\hbar c / G_N} = 22 \mu\text{g}$   
(bei  $E = M_{\text{Planck}}$  Comptonwellenlänge  $\lambda = \hbar c / M c^2 = R_{\text{Schw}} = G_N M / c^2$  Schwarzschildradius  $\rightarrow$  Teilchen  $\rightarrow$  schwarzes Loch Ende „Raum-Zeit-Kontinuum“)

## Quantenkorrekturen und Renormierung:

|   |   |                                  |   |  |
|---|---|----------------------------------|---|--|
| gemessene Parameter $g, \sin\theta_W, \alpha_s$ | = | „nackte“ Parameter + in Lagrange | + | Quantenkorrekturen (Berechnung in höherer Ordnung) |
|---|---|----------------------------------|---|--|

$$\alpha(Q^2) = \alpha_0 + \alpha_0^2 + \dots$$

The diagram shows the expansion of the coupling constant  $\alpha(Q^2)$  into a tree-level term  $\alpha_0$  and a one-loop correction term  $\alpha_0^2$ , with an ellipsis indicating higher-order terms. The tree-level diagram is a simple vertex, and the one-loop diagram is a vertex with a loop.

eg. Kopplungskonstanten:

$$g^2(Q^2) = g_0^2 + C \cdot g^4 \cdot \ln(M_X^2 / Q^2)$$

$\rightarrow$  **logarithmisch divergent !!!**

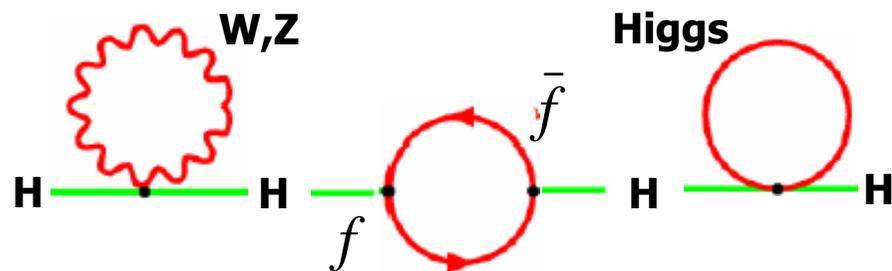
$M_X$  ... maximale Energie im Loop-Integral  
(ie maximale Energie bis zu der Theorie gültig ist)

# 9.2 GRAND UNIFIED THEORY (SU(5)-GUT)

## Hierarchie-Problem des SM (Beispiel $M_{\text{Higgs}}$ ):

- Higgs Potential:  $V_{|\Phi|} = \mu^2 |\Phi|^2 + \lambda |\Phi|^4$
- Higgsmasse:  $M_{\text{Higgs}}(M_W) = 2 \cdot \lambda \cdot v^2$
- Quantenkorrekturen:

$$M^2_{\text{Higgs}}(M_X) = M^2_{\text{Higgs}}(M_W) + C \cdot g^2 \cdot M^2_X$$



damit  $M_{\text{Higgs}}(M_W) < \text{TeV}$  (Unitarität in W-W-Streuung) **muss**  $M^2_{\text{Higgs}}$  mit großer Genauigkeit  $C \cdot g^2 \cdot M^2_X$  kompensieren (bekannt unter „fine tuning problem“),

**entweder**  $C=0$ :

gilt nicht im SM, aber in SUSY durch Einführen neuer Teilchen, die um  $1/2$  Einheit Spin verschieden sind

**oder**

„neue“ Physik Energieskala bei  $M_X \approx 1 \text{ TeV}$  (bei LHC sichtbar – bisher in Präzisionsmessungen bei LEP, HERA, Tevatron keine Spur!)

## Grand Unified Theories (GUT)

- SM:  $U(1)_Y \otimes SU(2)_L \otimes SU(3)_C$
- 1974: Georgi-Glashow: SU(5) einfachste Gruppe, die  $U(1)_Y \otimes SU(2)_L \otimes SU(3)_C$  enthält  $\rightarrow$
- Leptonen und Quarks in SU(5)-Multipletts :  $[q^C \equiv \bar{q}]$

### Quarks and Leptons in $\bar{5}$ - and 10-plets:

$$\begin{pmatrix} d_r^C \\ d_r^C \\ d_b^C \\ e^- \\ -\nu_e \end{pmatrix}_L, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & +u_b^C & -u_r^C & -u_g & -d_g \\ -u_b^C & 0 & +u_g^C & -u_r & -d_r \\ +u_r^C & -u_g^C & 0 & -u_b & -d_b \\ +u_g & +u_r & +u_b & 0 & -e^+ \\ +d_g & +d_r & +d_b & +e^+ & 0 \end{pmatrix}_L$$

da elektrische Ladung ein Generator von SU(5):

- aus Vertauschungsrelationen  $\rightarrow$  Quantisierung Q
- mit  $\sum Q_i = 0$  innerhalb Spalten  $\rightarrow Q_d = 1/3 Q_e$

**Eichbosonen:**  $8g, W^\pm, Z^0, \gamma$  + **12 Eichbosonen X, Y**

- 6 **X**:  $Q = -4/3$ , Farben r, g, b + Anti-Teilchen,
- 6 **Y**:  $Q = -1/3$ , Farben r, g, b + Anti-Teilchen

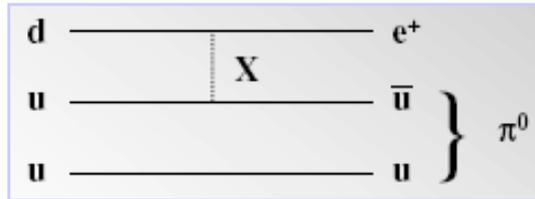
### Gauge bosons in 5x5 matrices:

$$\begin{pmatrix} G_{11} - \frac{2B}{\sqrt{30}} & G_{12} & G_{13} & X_1^C & Y_1^C \\ G_{21} & G_{22} - \frac{2B}{\sqrt{30}} & G_{23} & X_2^C & Y_2^C \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} - \frac{2B}{\sqrt{30}} & X_3^C & Y_3^C \\ \hline X_1 & X_2 & X_3 & \frac{W^+}{\sqrt{2}} + \frac{3B}{\sqrt{30}} & W^+ \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & W^- & -\frac{W^+}{\sqrt{2}} + \frac{3B}{\sqrt{30}} \end{pmatrix}$$

# GRAND UNIFIED THEORY (SU(5)- GUT)

## Vorhersagen SU(5)-GUT

- X-Boson vermittelt Zerfall  $p \rightarrow \pi^0 e^+$  mit Lebensdauer:



$$\tau = \frac{M_X^4}{\alpha^2 (M_{GUT}) \cdot M_p^5} \approx 10^{30 \pm 1} a$$

$$1/\tau = \Gamma \sim 1/(Q^2 + M_X^2)^2$$

für  $M_X = 10^{15} \text{ GeV}$

(Wert von  $M_X$ :  $\sim$  gleiche Kopplungen)

- um dies zu überprüfen wurde in Japan der Super-Kamiokande Detektor (50 kt  $H_2O$  – Entdeckung  $\nu$ -Oszillationen, SN 1987A – Nobelpreis) gebaut
- Ergebnis:  $\tau > 5 \cdot 10^{32} a$  → ~~SU(5)-GUT~~ (minimal)
- Kopplungen bei  $\mu = M_{GUT}$  gleich? → **nein** nur ungefähr

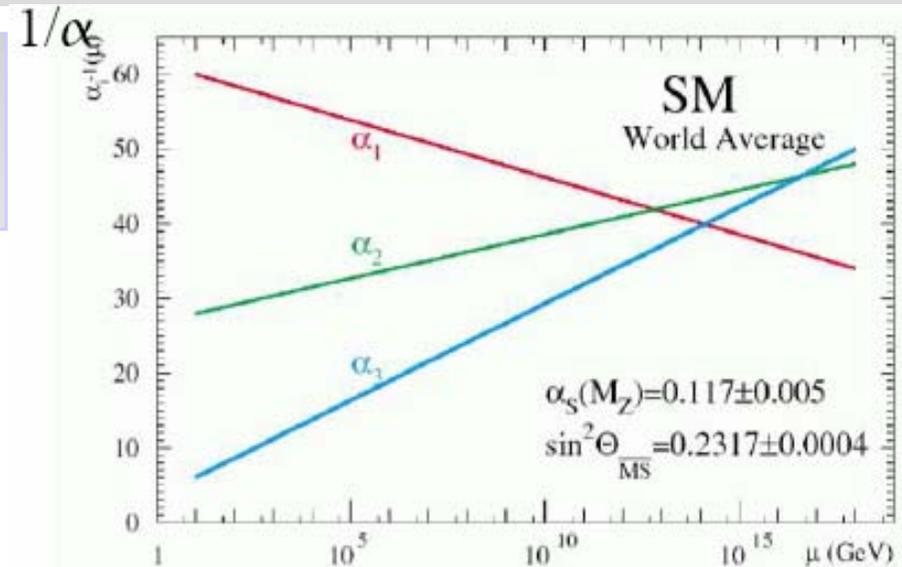
$$\alpha_i(Q^2) = \alpha_i(\mu^2) / (1 - \beta_i^0 \cdot \alpha_i(\mu^2) \ln(Q^2 / \mu^2))$$

$$-\beta_i^0 = \frac{11N_c - 4N_f}{12\pi} \quad N_c = 0, 2, 3 \text{ für } U(1), SU(2), SU(3)$$

$N_f = 3$  (Anzahl Familien)

$$\alpha_1 = \frac{8}{3} \alpha = \frac{8}{3} (e^2 / 4\pi), \alpha_2 = g^2 / 4\pi; (g = e / \sin \theta_w), \alpha_2 = \alpha_3$$

- $\sin^2 \theta_w(M_X) = 3/8$  →  $\sin^2 \theta_w(M_W) = 0.214 \pm 0.004$   
Exp.  $0.23120 \pm 0.00015$  → **nein** nur ungefähr
- **Fermionmassen**: stimmt recht gut, aber nur für die 3<sup>te</sup> Generation!  
 $M_b / M_\tau \approx 3$



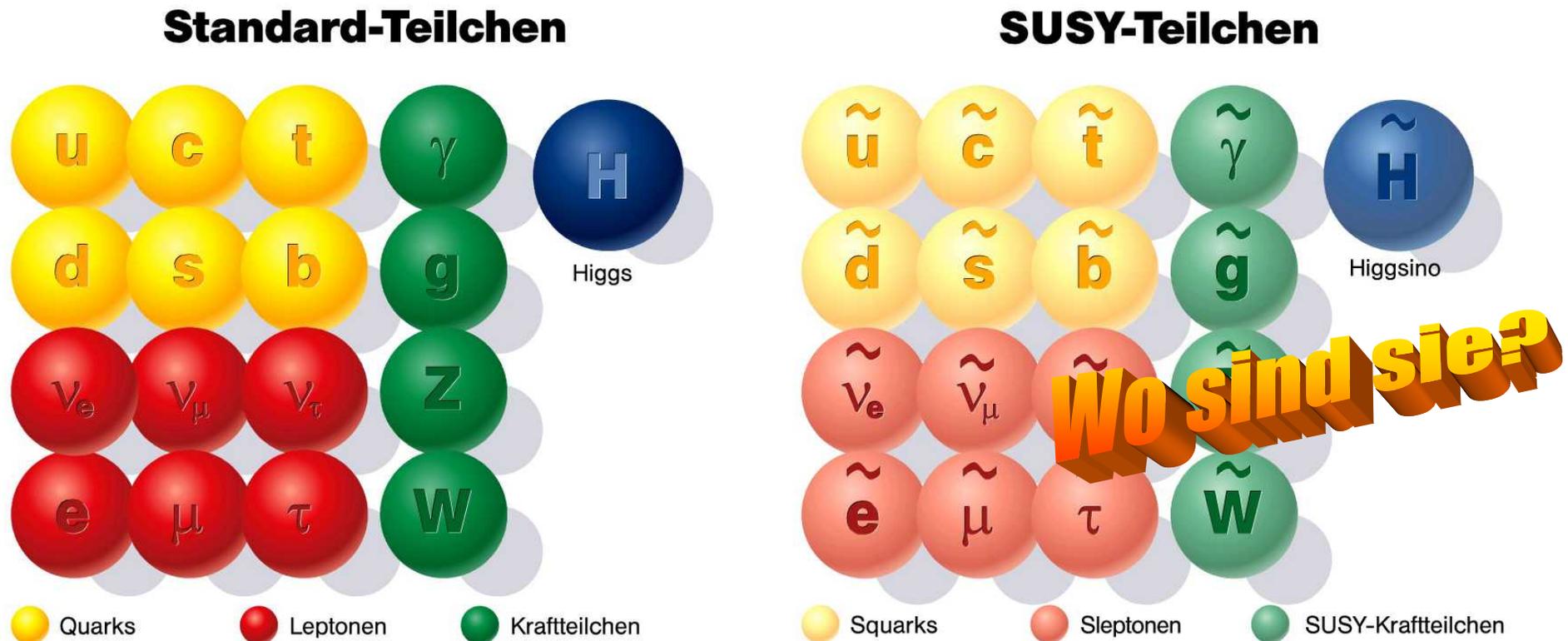
- Neutrinomassen:  $M_\nu \sim M_\mu^2 / M_X = 10^{-7} \text{ eV}$  → verträglich mit Daten
- Magnetische Monopole mit Massen von  $O(10^{17} \text{ GeV})$
- löst **nicht** Generationenproblem (Verfahren muss für jede Generation wiederholt werden)

- SU(5)-GUT macht präzise Vorhersagen
- widersprechen den Präzisionsmessungen
- dennoch: qualitativ werden zahlreiche Beobachtungen beschrieben und offene Fragen des SMs erklärt



# Supersymmetrie

- verdoppele Anzahl der Teilchen:



- bisher nicht gesehen bei LEP, HERA, Tevatron ... -> müssen (zu) schwer sein!
- Hoffnung des Nachweises bei LHC!

# 9.3 SUPERSYMMETRIE (SUSY)

## SUSY: Fermionen Bosonen $\leftrightarrow$ Symmetrie

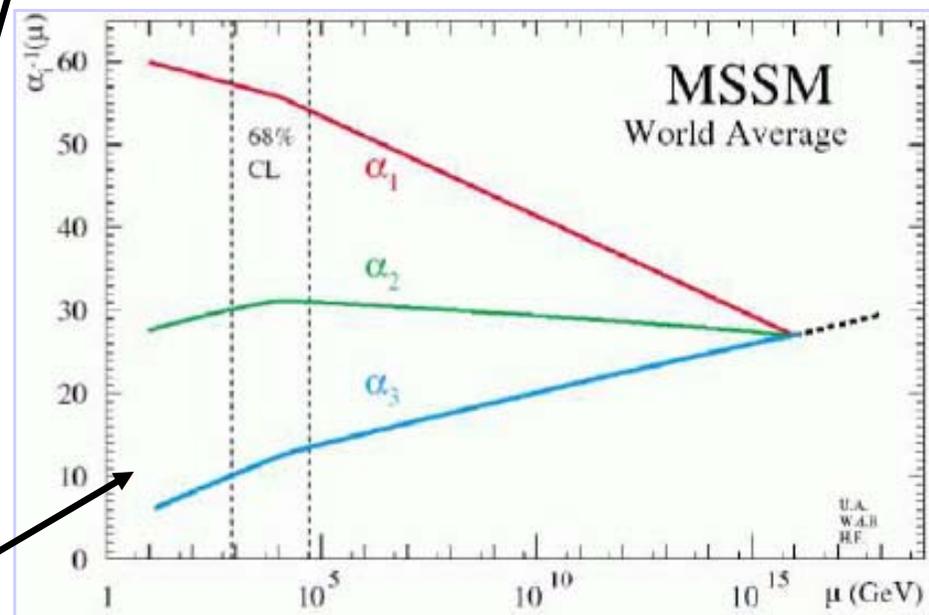
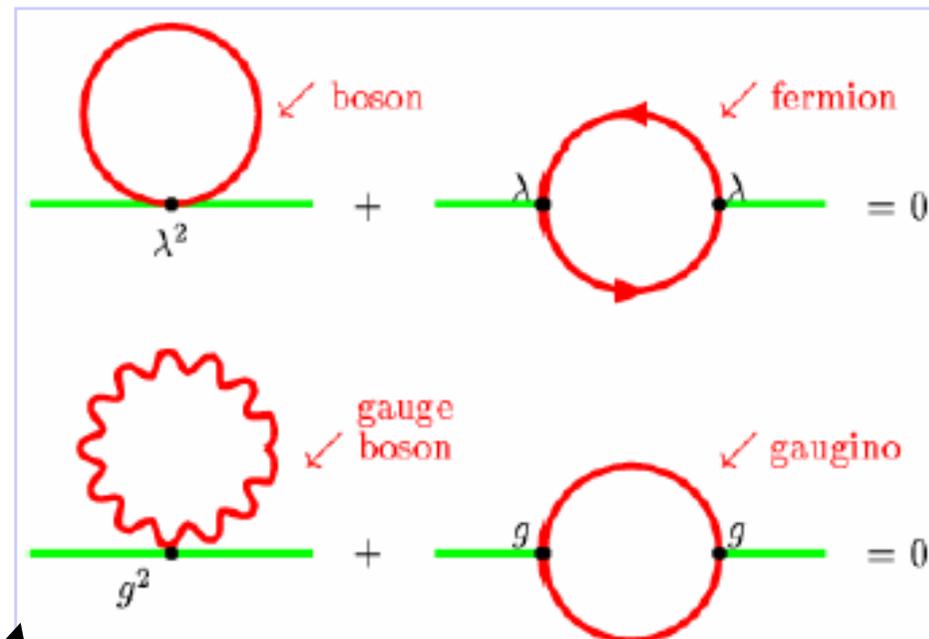
**SM:** Fermionen: „Materie“-gegeben

Bosonen: „Theorie“  $\rightarrow$  Eichfelder oder aus Higgs-Mechanismus

**SUSY:** Fermionen und Bosonen „gleichberechtigt“

**Postulat:** zu jedem Teilchen des SM gibt es ein neues Teilchen mit um  $1/2$  verschiedenem Spin:

| Teilchen        | Spin  | S-Teilchen               | Spin  |
|-----------------|-------|--------------------------|-------|
| Quark $Q$       | $1/2$ | Squark $\tilde{Q}$       | 0     |
| Lepton $l$      | $1/2$ | Slepton $\tilde{l}$      | 0     |
| Photon $\gamma$ | 1     | Photino $\tilde{\gamma}$ | $1/2$ |
| Gluon $g$       | 1     | Gluino $\tilde{g}$       | $1/2$ |
| $W^\pm$         | 1     | Wino $\tilde{W}^\pm$     | $1/2$ |
| $Z^0$           | 1     | Zino $\tilde{Z}^0$       | $1/2$ |



**Lösung des Hierarchieproblems**, da Fermionpartner mit negativem Vorzeichen beitragen und exakt Bosonenterme kürzen, falls

- gleiche Wechselwirkungen,
- gleiche Ladungen, und
- gleiche Massen

**Lösung Problem Vereinheitlichung der SM-WW**

# SUPERSYMMETRIE - SUSY

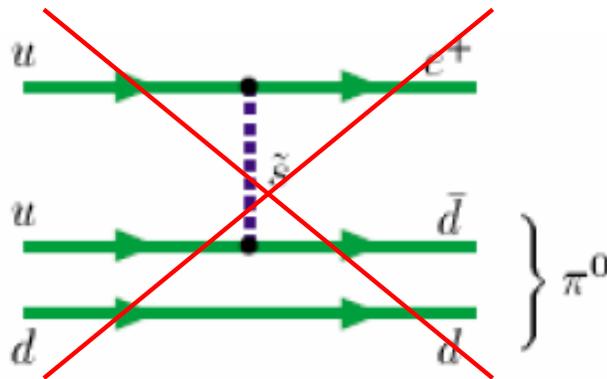
**SUSY:** zusätzliche WW, die SUSY- und eich-invariant sind ermöglichen Lepton- u. Baryonzahlverletzung  
 → Einführung der  $R_p$  (R-Parität) \*):

$$R_p = (-1)^{3B+2S+L}$$

-  $R_p = +1$  ... SM-Teilchen

-  $R_p = -1$  ... SUSY-Partner

→ jeder Vertex hat eine gerade Anzahl von SUSY-Teilchen → verhindert Proton-Zerfall



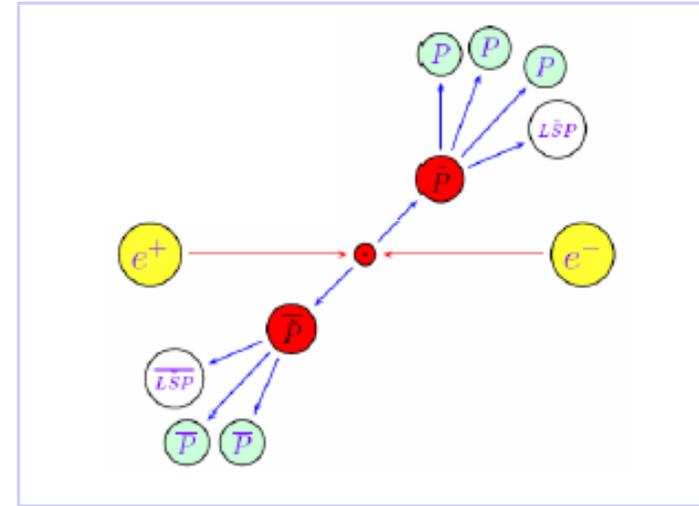
→ SUSY-Partner können nur paarweise erzeugt werden

→ das leichteste SUSY-Teilchen **LSP** (Lightest SUSY Particle) ist stabil, neutral und ohne Farbladung → nur schwache WW → im Detektor wie Neutrino „nachweisbar“

→ Kandidat für dunkle Materie

\*) **B...Baryonzahl, S...Spin, L...Leptonzahl**

- Paarerzeugung LSP in  $e^+e^-$ ,  $pp$ , ...



**SUSY:** löst SUSY die Probleme des SM ???

- >100 freie Parameter zur Beschreibung der Massen und Kopplungen der SUSY-Teilchen
  - keine SUSY-Teilchen experimentell gefunden → Supersymmetrie ist „gebrochen“ ( $M_{SUSY} \neq M_{SM}$ )
  - falls keine SUSY-Teilchen bis zu  $M \sim 1$  TeV → Hierarchieproblem nicht gelöst
  - so lange keine experimentelle Evidenz für SUSY → viele Modelle, wie SUSY gebrochen sein könnte
- SUSY-Teilchen-Suche ein Schwerpunkt des experimentellen Programms an Hochenergiebeschleunigern und der Astro-Teilchenphysik

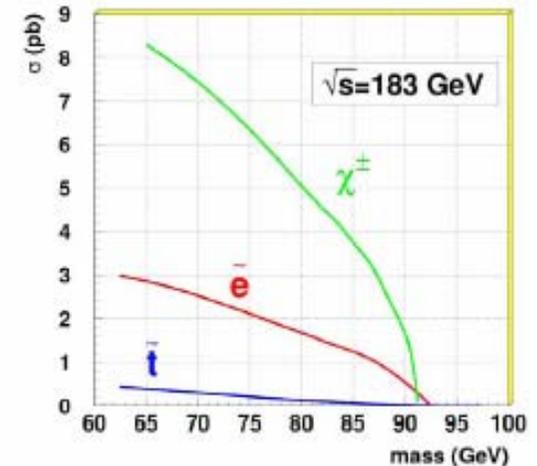
# SUCHE NACH SUSY-TEILCHEN IN $e^+e^-$

## Direkte SUSY-Suche:

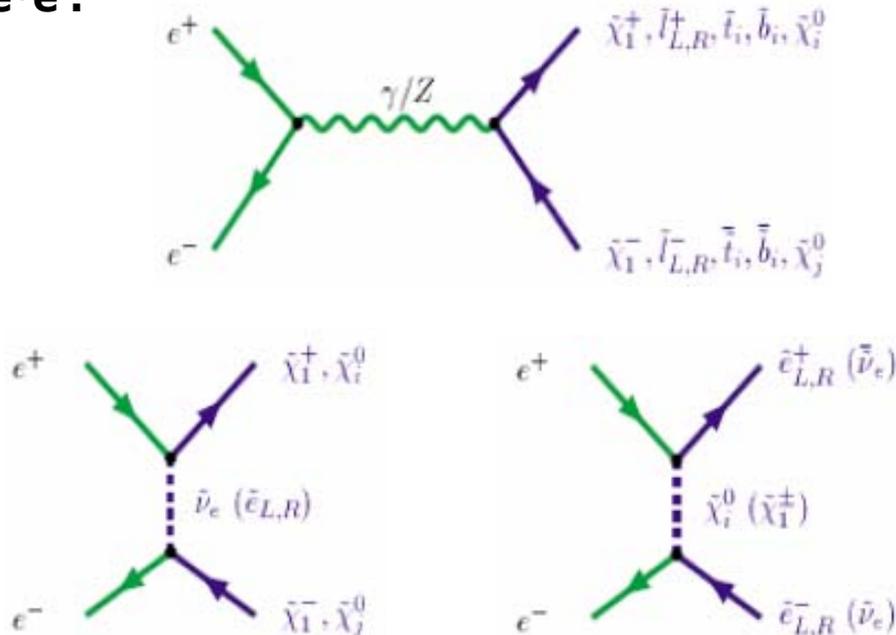
- Suche nach „fehlender Energie (Impuls)“ durch LSP in hochenergetischen Teilchenreaktionen
- $M_{\text{SUSY}}$ , Zerfälle hängen in komplizierter Weise von den Annahmen über die SUSY-Parameter ab,
- die signifikantesten Massen-Grenzen kommen von  $e^+e^-$  (LEP), TeVatron (pp) und HERA (ep)
- falls am LHC SUSY nicht gefunden wird: SUSY (in heutiger Vorstellung) schwierig

## Ergebnisse $e^+e^-$ :

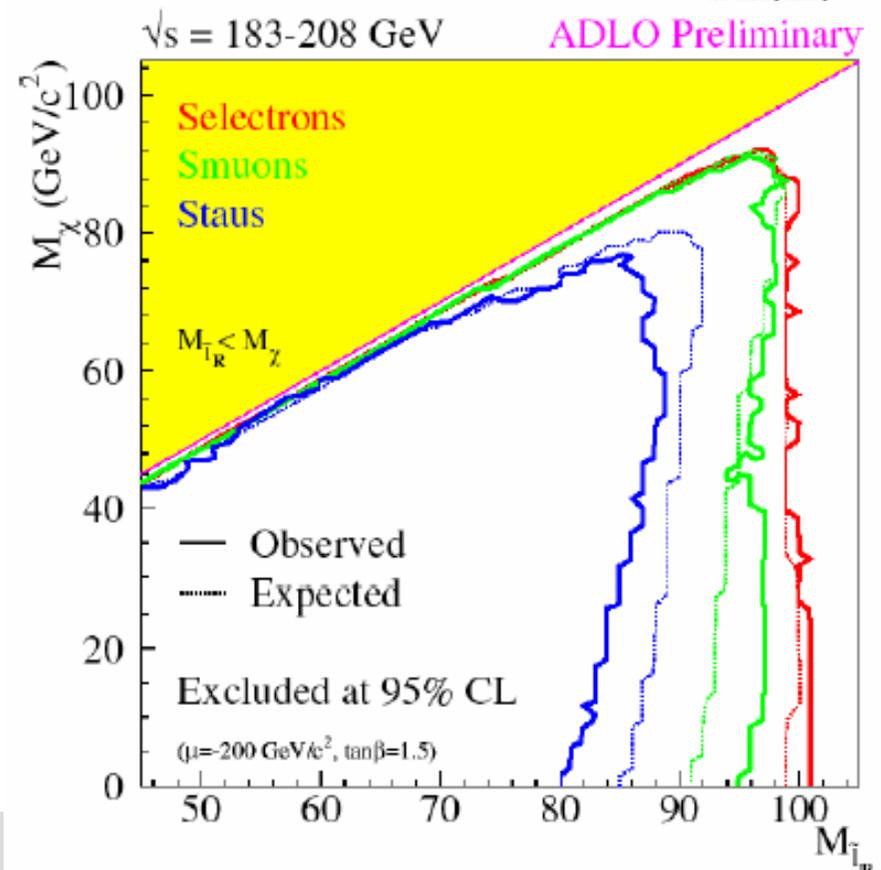
empfindlich bis:  
 $M_{\text{SUSY}} < E_{\text{CM}}/2$   
 $\sim 100 \text{ GeV}$



$e^+e^-$ :



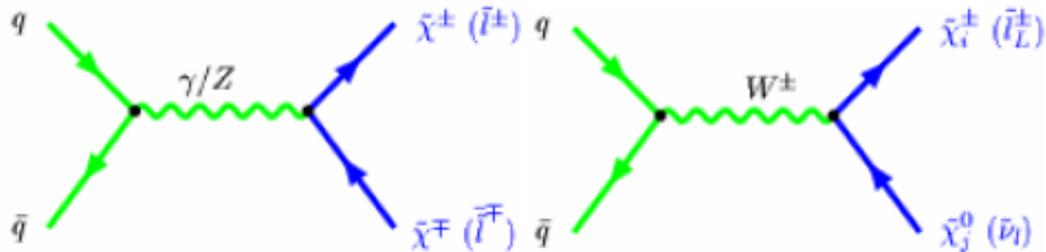
$\chi^0$  Neutralinos ... Mischung von  $\tilde{W}^0, \tilde{B}^0$  und neutralen Higgsinos  $\tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0$   
 $\chi^\pm$  Charginos ... Mischung von Winos  $\tilde{W}^\pm$  und geladenen Higgsinos  $\tilde{H}_2^\pm, \tilde{H}_1^\pm$



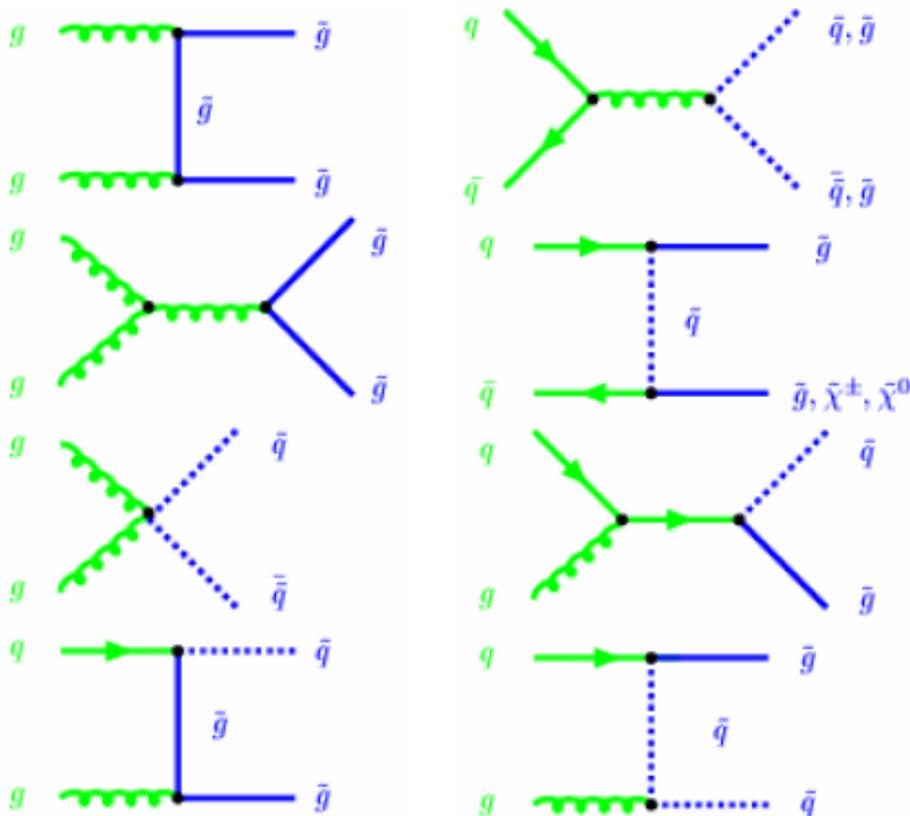
# SUCHE NACH SUSY-TEILCHEN IN pp

## pp̄-Produktion:

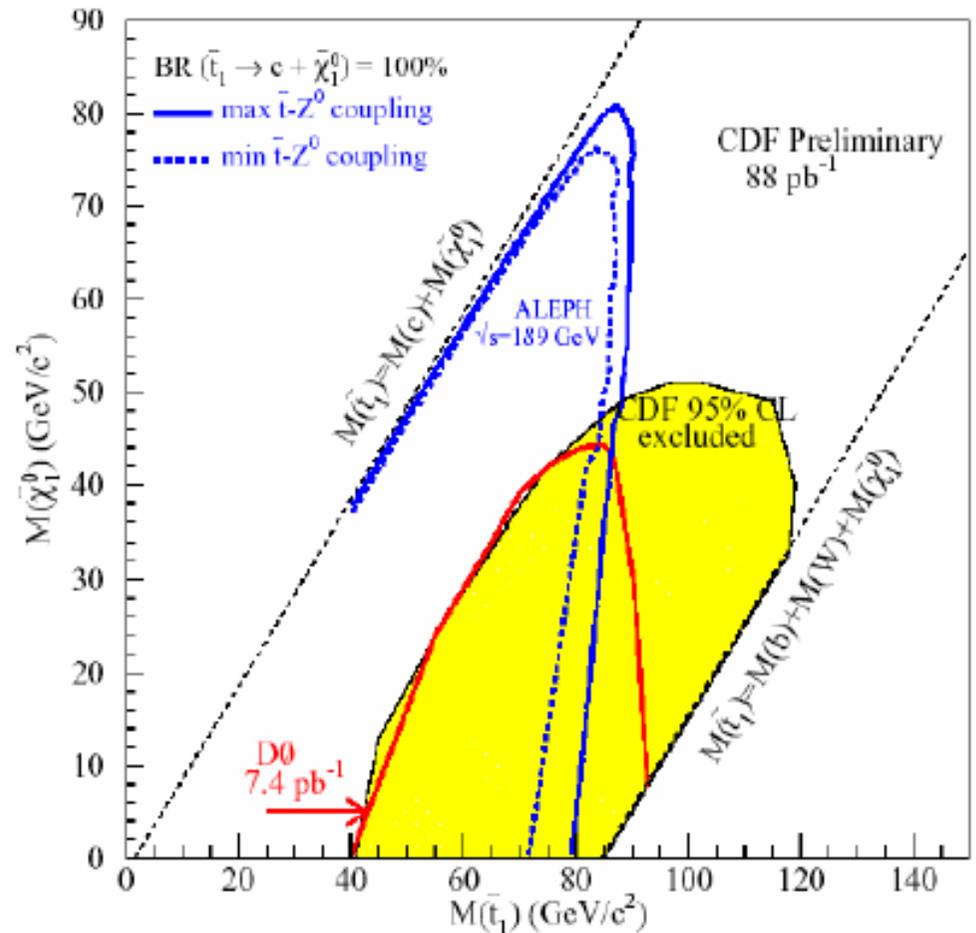
- Quark-Antiquark Annihilation:



- Gluon induzierte Erzeugung:



## Ergebnisse pp̄:

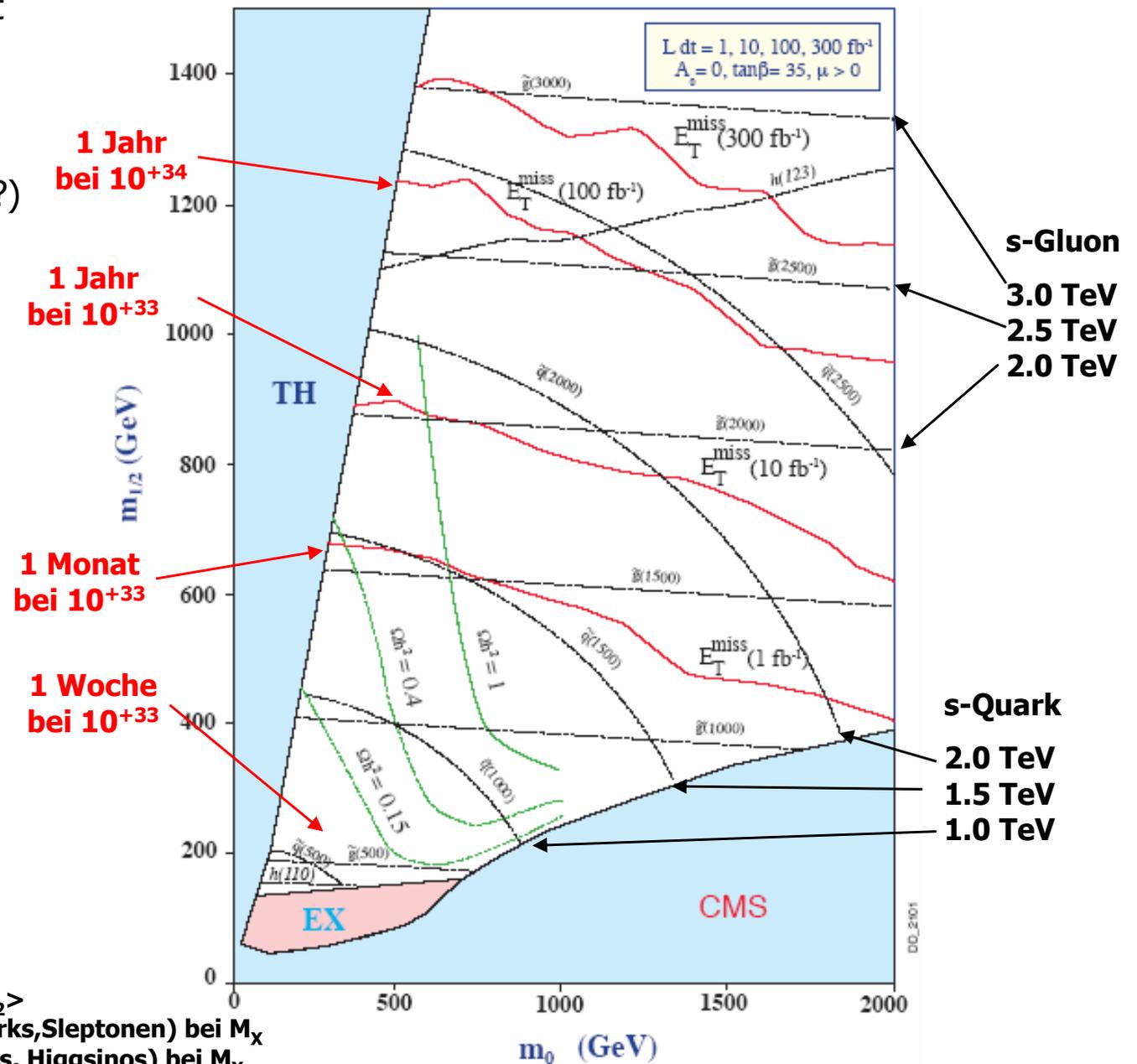


Zurzeit läuft TeVatron ausgezeichnet und SUSY-Suche ist ein wesentlicher Teil des Programms, aber Antwort (Entdeckung) voraussichtlich erst am LHC

# SUCHE NACH SUSY AM LHC-ZUSAMMENFASSUNG

**SUSY am LHC:** hohe Empfindlichkeit für  $M_{\text{SUSY}}$  bis oberhalb von 2 TeV:

- sobald LHC und Detektoren laufen (2009/10) und **verstanden** (Datum?) sollte die Frage nach SUSY bald beantwortet sein
- $m_0, m_{1/2}, A_0, \tan\beta, \mu$  Parameter des speziellen SUSY-Modells



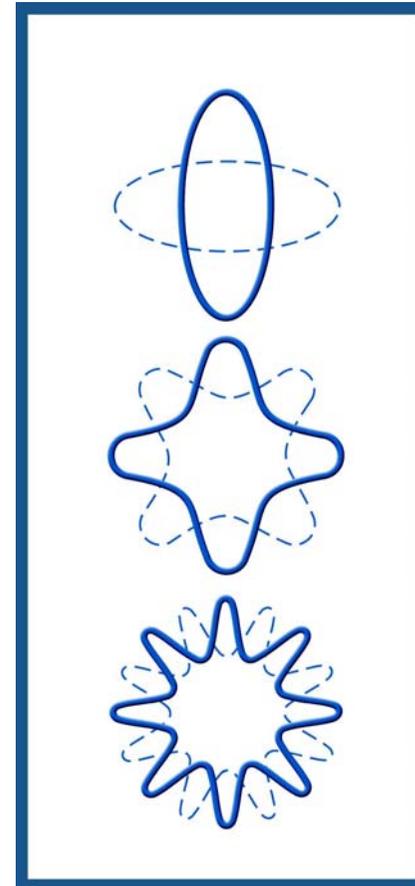
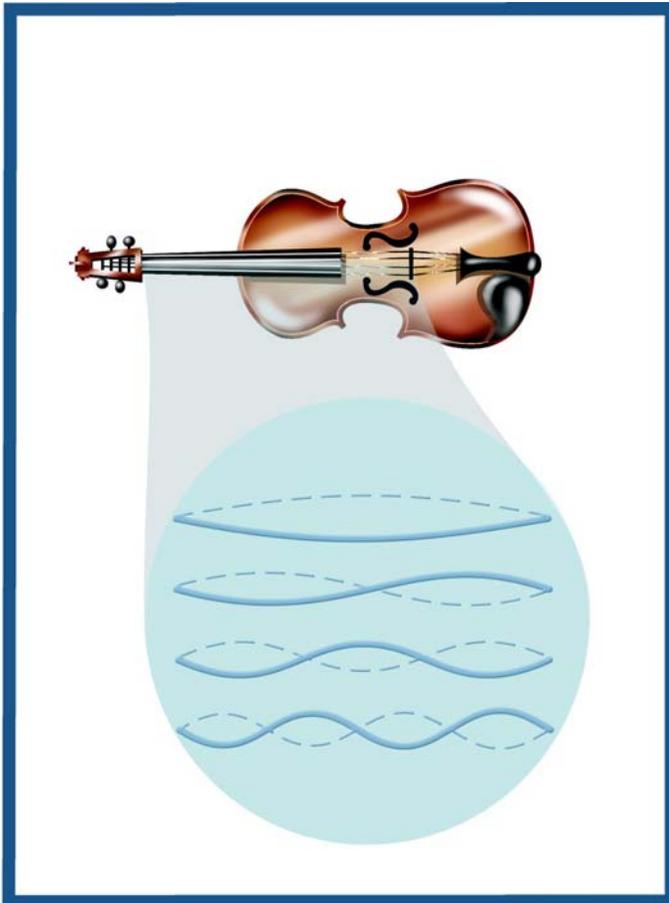
$\tan\beta = v_1/v_2 \dots$  Vakuumerwartungswerte  $\langle H^0_{1,2} \rangle$

$m_0 \dots$  gemeinsame Masse Bosonen (Higgs, Squarks, Sleptonen) bei  $M_x$

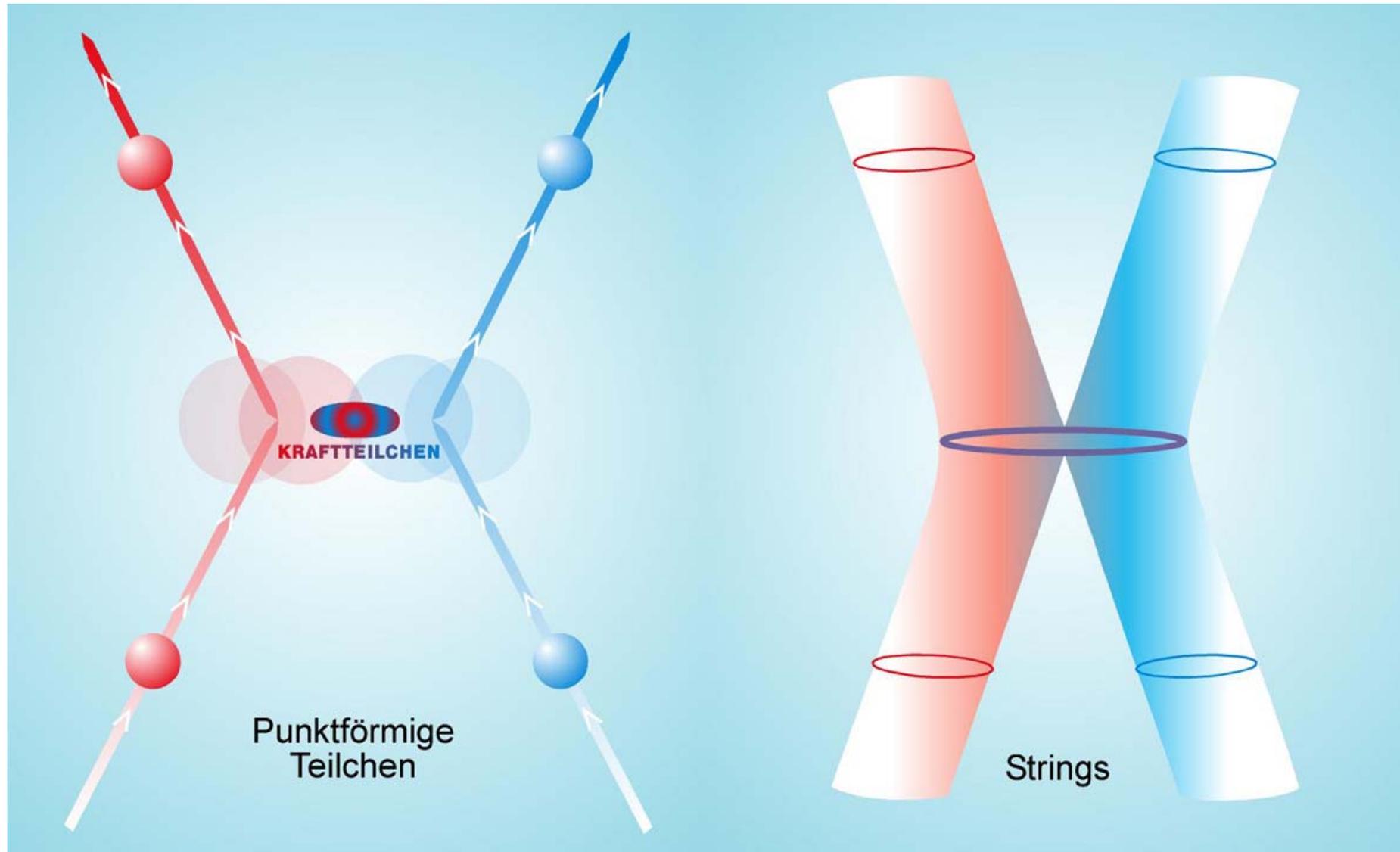
$m_{1/2} \dots$  gemeinsame Masse Fermionen (Gauginos, Higgsinos) bei  $M_x$

# 9.4 Vereinheitlichung und Superstrings

Um Gravitation in Vereinheitlichung der Kräfte einzubeziehen, benötige Superstrings (Supersymmetrische Strings)

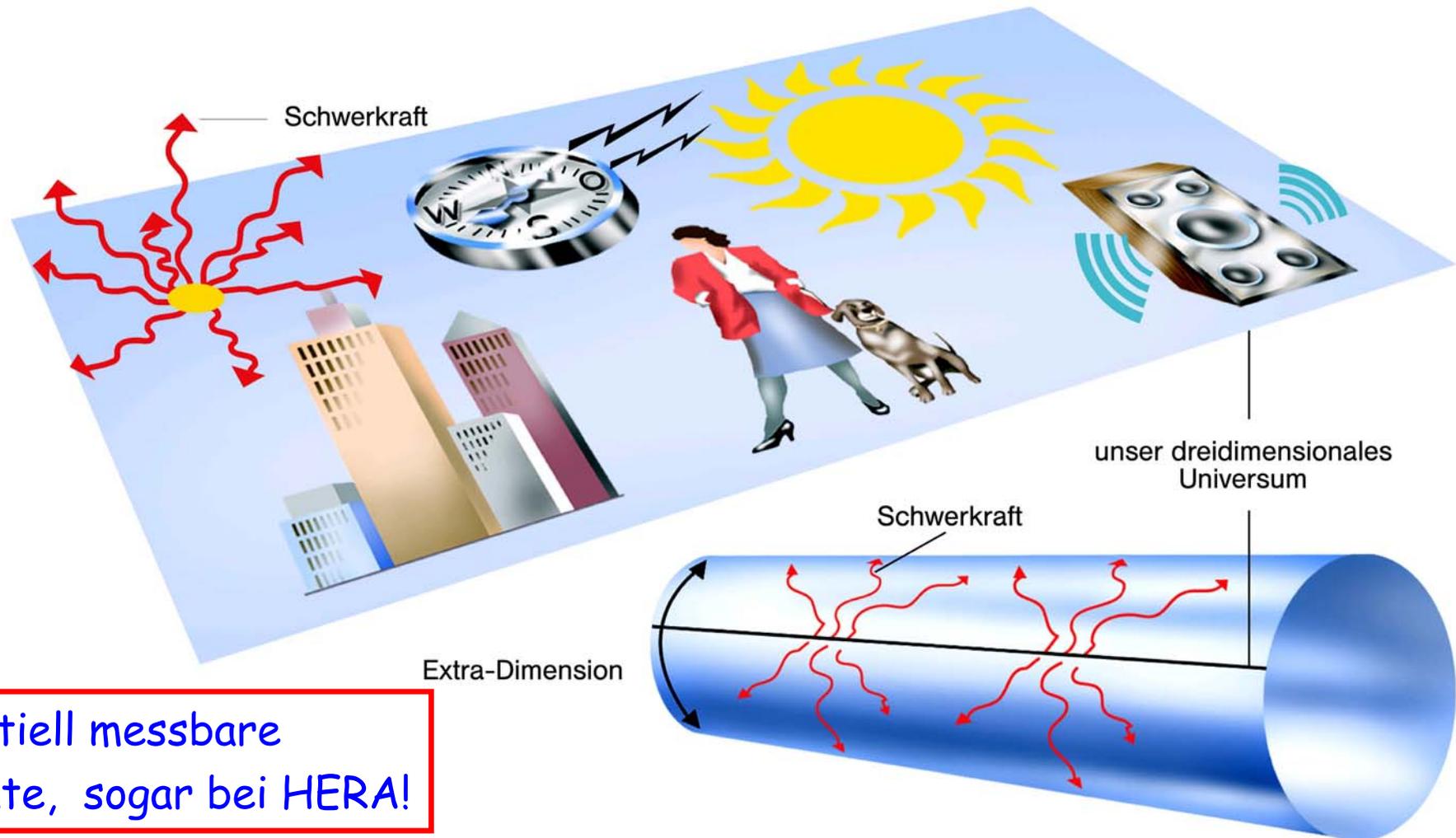


# Superstring-Wechselwirkung



# 9.5 Extra Dimensionen?

- Superstrings brauchen mehr als 3+1 Dimensionen
- Zusätzliche ("Extra") Dimensionen -> "aufgerollt"
  - könnten bis zu mm gross sein!



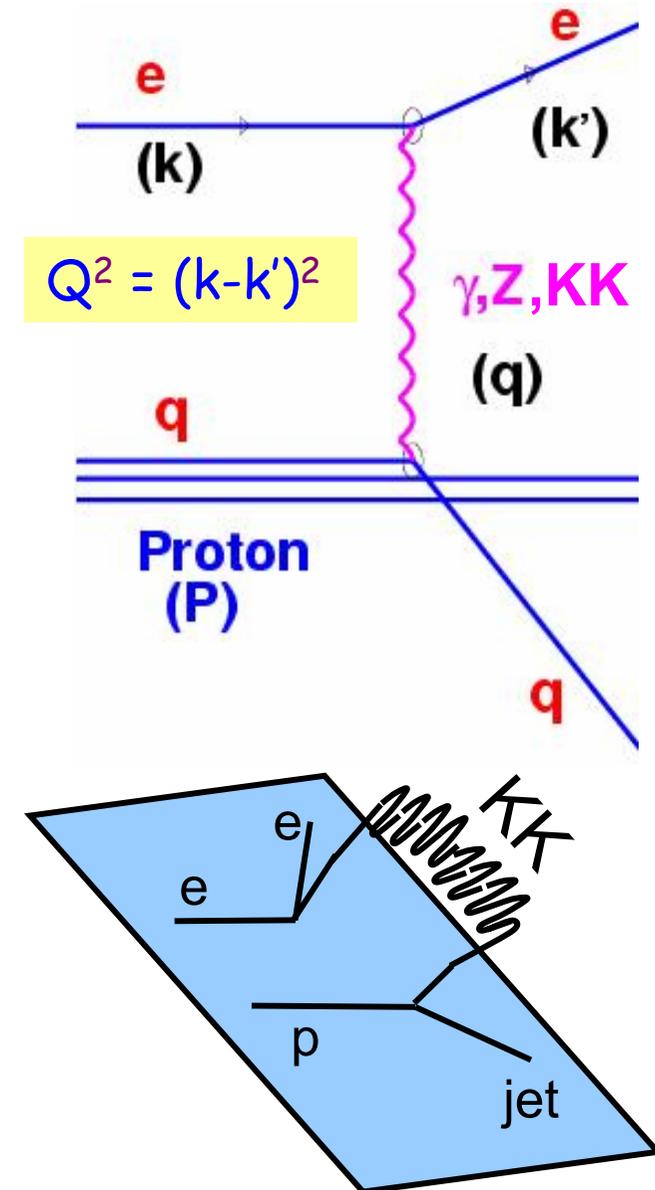
potentiell messbare  
Effekte, sogar bei HERA!

# Grosse Extra Dimensionen: Virtueller Graviton-Austausch

Virtueller Graviton-Austausch im t-Kanal interferiert mit tief unelastischer Streuung (DIS)

Austausch von «Kaluza-Klein-Turm» (KK, Serie von äquidistanten Resonanzen) beeinflusst  $Q^2$ -Verteilung bei grossen  $Q^2$  (Photon-Virtualität)

Vergleiche  $d\sigma/dQ^2$  mit Standard-Modell-Erwartung



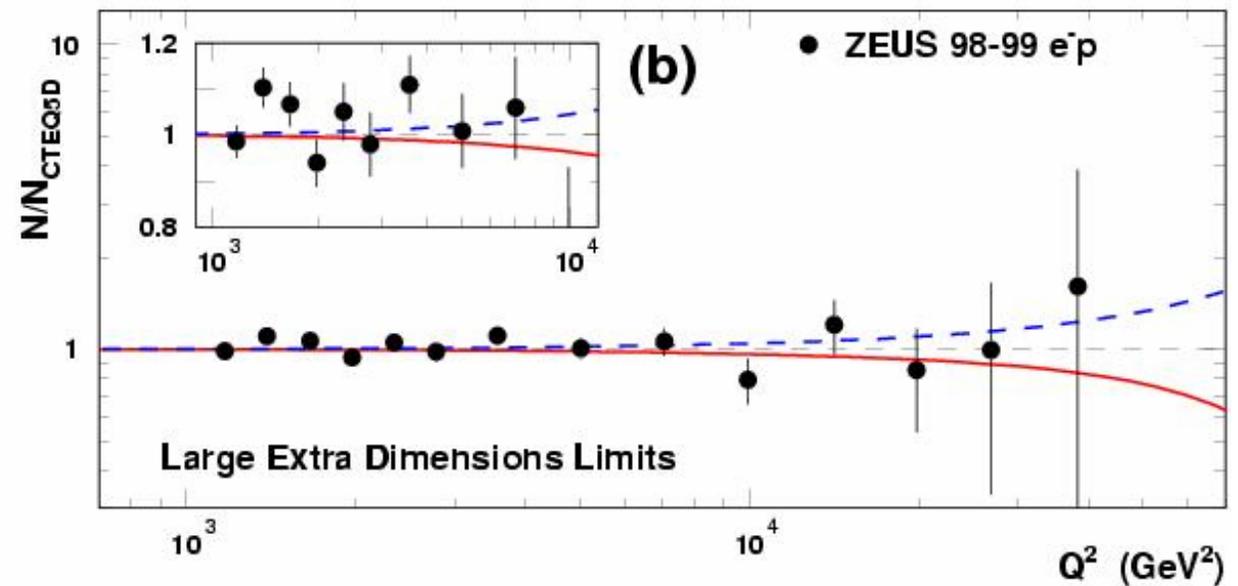
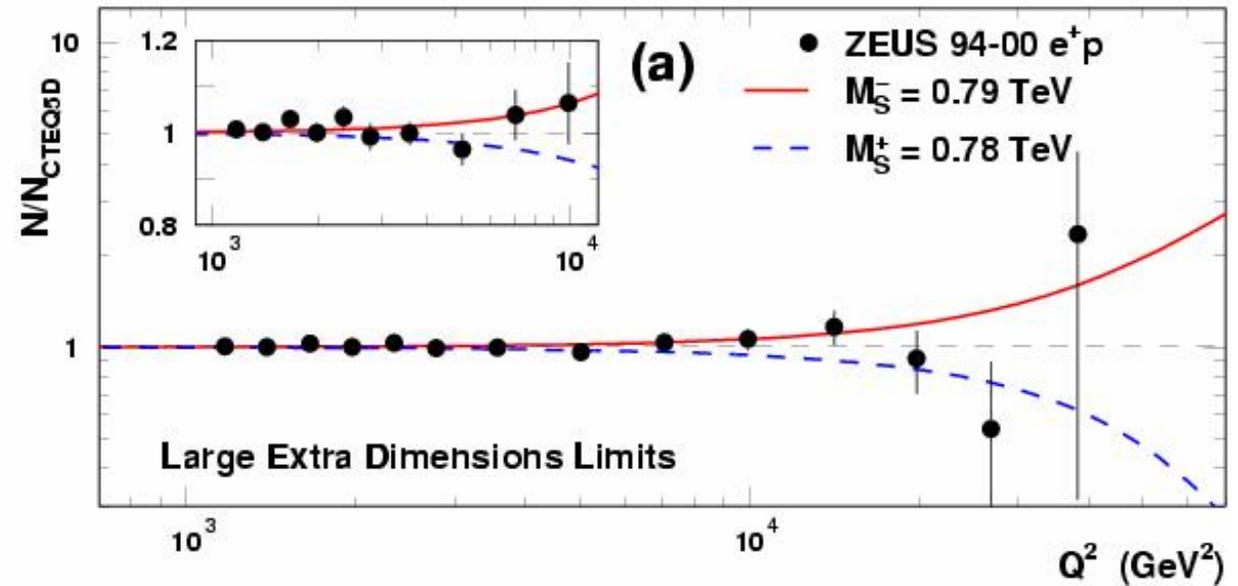
# Grosse Extra Dimensionen: Virtueller Graviton-Austausch

| Zeus    | $s^{1/2}(\text{GeV})$ | $L_{\text{int}}(\text{pb}^{-1})$ |
|---------|-----------------------|----------------------------------|
| $e^+ p$ | 301/319               | 112                              |
| $e^- p$ | 319                   | 16                               |

benutze  $d\sigma/dQ^2$  in  
binned likelihood  
 $\Rightarrow$  95% CL-Grenze auf  
 $M_S$  (TeV)

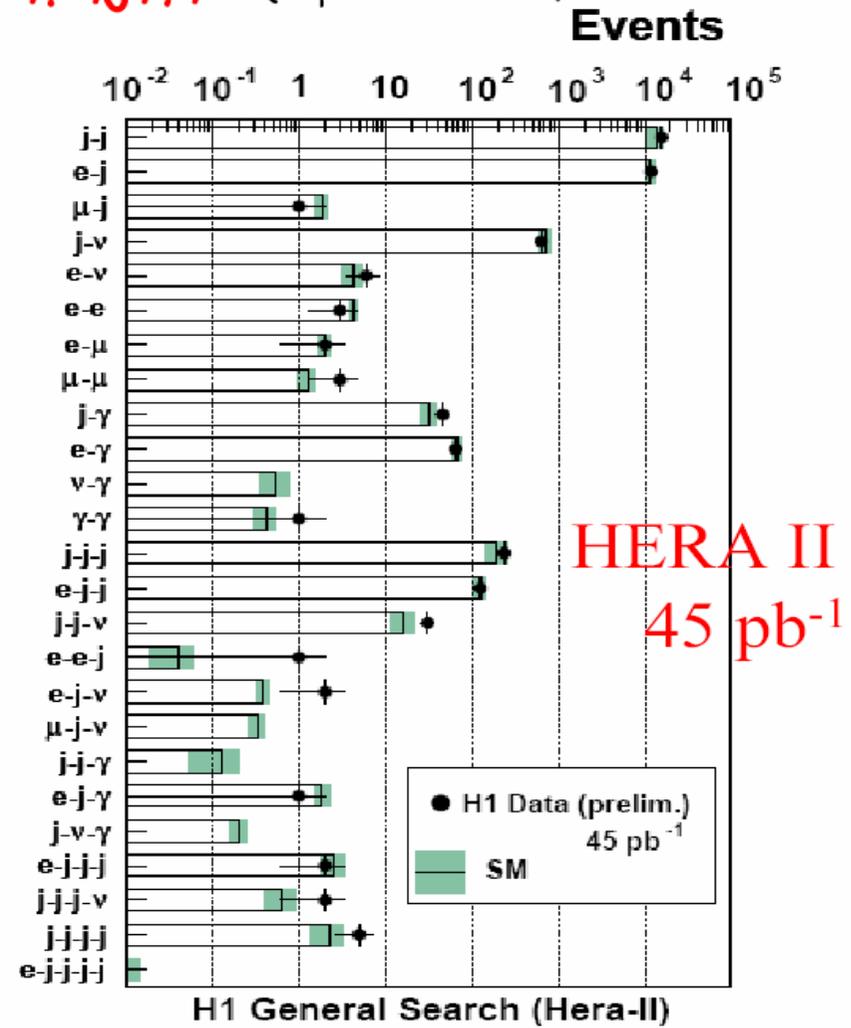
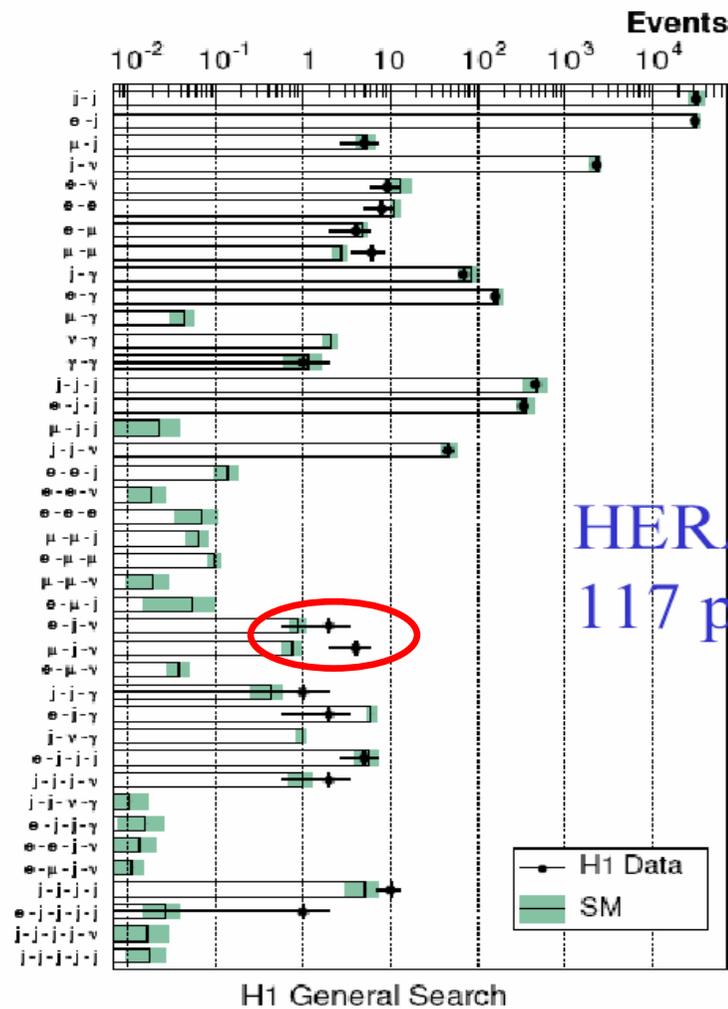
$$\lambda = -1 : M_S > 0.79 \text{ TeV}$$

$$\lambda = +1 : M_S > 0.78 \text{ TeV}$$



# Generelle Suche nach Abweichungen von SM bei hohem $p_T$

consider all final states with isolated  $e, \mu, j, \gamma, \nu$  ( $P_T > 20 \text{ GeV}$ ,  $10^\circ < \vartheta < 140^\circ$ )



- impressive overall agreement with the Standard Model predictions

# ZUSAMMENFASSUNG: PHYSIK JENSEITS DES SM

## Zusammenfassung Kapitel 10

- **Standard-Modell beschreibt die experimentellen Daten perfekt, lässt aber viele Fragen offen**
  - Warum 3 Familien ?
  - Warum die experimentell gefundenen Massenwerte der Quarks und Leptonen ?
  - Warum  $1/3$  Ladung der Quarks ?
  - Lassen sich ew und starke WW vereinheitlichen ?
  - Ist eine Extrapolation zu hohen Energien möglich ?
  - Warum sind die Energieskalen so verschieden ( $10^2 - 10^{16} - 10^{19}$  GeV) ?
  - Was ist die Lösung des Hierarchie-Problems?
  - Wie passt die Gravitation in das Bild ?
- **Das Standard-Modell sagt vorher, dass bei Energien um 1 TeV voraussichtlich eine neue Physik auftreten wird: SUSY?, Compositeness?, Extra Dimensionen?**
- **GUT-SU(5) (Große Vereinheitlichte Theorie), die „kleinste“ Gruppe, die  $U(1)_Y$  -SU(2)<sub>L</sub> - SU(3)<sub>C</sub> enthält, macht viele Vorhersagen, die allerdings quantitativ vom Experiment **nicht** bestätigt werden**
- **SUSY (Fermionen-Bosonen-Symmetrie) ist der theoretisch am besten verstandene Kandidat zur Beschreibung der Physik jenseits des Standard-Modells**
- **Stringtheorie versucht die Kräfte des SM mit der Gravitation zu vereinen – heroische Anstrengung, bisher (noch?) keine Verbindung mit dem Experiment**