

Physik bei hohem Q^2 und die Suche nach neuen Phänomenen bei HERA



Isabell-Alissandra Melzer-Pellmann
DESY Hamburg, ZEUS



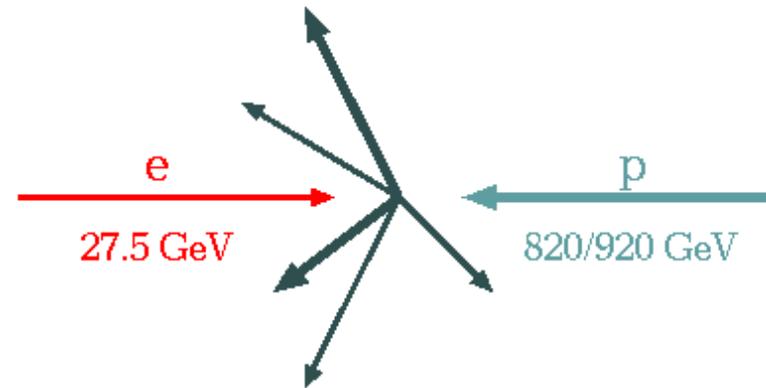
DPG-Frühjahrstagung Aachen
10.-13.3.2003

Überblick

- Einführung
- Partonverteilungen im Proton und inklusive Wirkungsquerschnitte
 - Neutraler Strom
 - Geladener Strom
- Suche nach neuen Phänomenen
- Zusammenfassung und Ausblick

Einführung: HERA

HERA: Einziger ep-Speicherring auf der Welt



Maximale Schwerpunktsenergien: $\sqrt{s} = 300 \text{ GeV}$ (1992-1997)
 $\sqrt{s} = 318 \text{ GeV}$ (1998-2000)

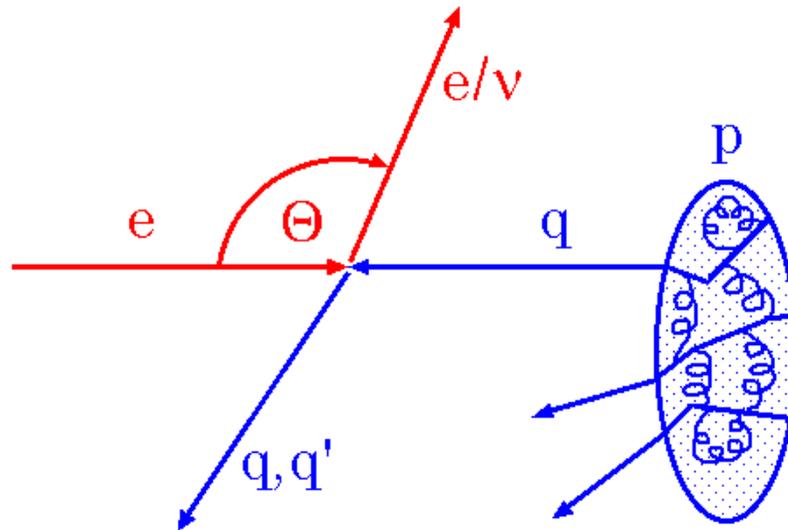
☞ Untersuchung der Protonstruktur
bei sehr hohem Impulsübertrag ($Q_{\text{max}}^2 = s$)

☞ **weltbestes Mikroskop für Protonen**

Luminosität pro
Experiment:
e⁻p: ?16 pb⁻¹
e⁺p: ?100 pb⁻¹

Einführung: Tiefinelastische Streuung

Elektron:
punktförmig



Proton:
zusammengesetzt
aus (quasifreien)
Quarks und
Gluonen

Tiefinelastische Streuung: Wirkungsquerschnitt (?):

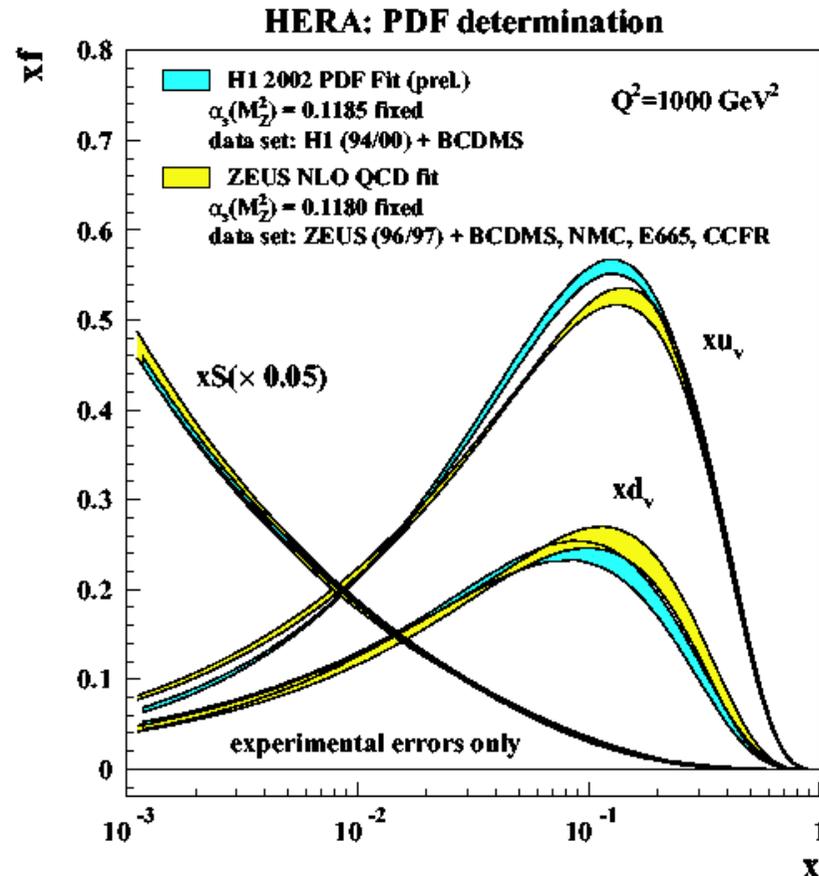
$$? = \int_{q, \bar{q}} ? \text{ Partonverteilung} \cdot \text{differentieller (eq)-?}$$

Partonverteilung: Wahrscheinlichkeit, Parton q mit Impulsanteil x im Proton zu finden

Einführung: Partonverteilung

Partonverteilung aus
NLO-QCD-Fit:

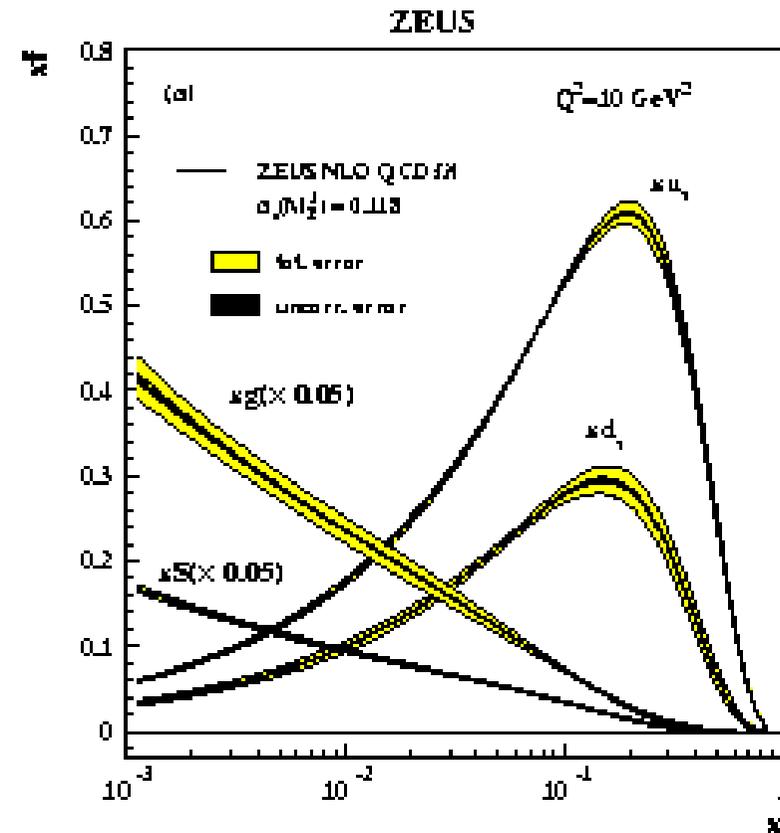
- ✍ **große x** : Hauptbeitrag durch die Valenzquarks
- ✍ **kleine x** : Hauptbeitrag durch Gluonen und von ihnen erzeugte Seequarks (Abstrahlung)



Einführung: Partonverteilung

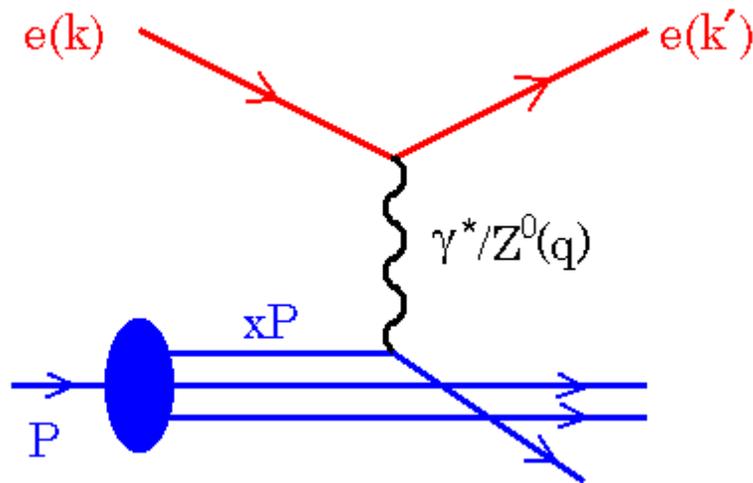
Partonverteilung aus
ZEUS NLO-QCD-Fit:

- ✍ **große x** : Hauptbeitrag durch die Valenzquarks
- ✍ **kleine x** : Hauptbeitrag durch Gluonen und von ihnen erzeugte Seequarks (Abstrahlung)



Erinnerung: x = Impulsanteil des
Partons im Proton

Kinematik am Beispiel eines NC-Ereignisses



$$Q^2 = -q^2 = -(k - k')^2 = 2E_e E'_e (1 + \cos \theta) = sxy$$

Viererimpuls-Austausch

$$x = \frac{Q^2}{2P \cdot q} = \frac{Q^2}{sy} \quad \text{Bjorken-}x$$

Impulsanteil des getroffenen Partons im Proton

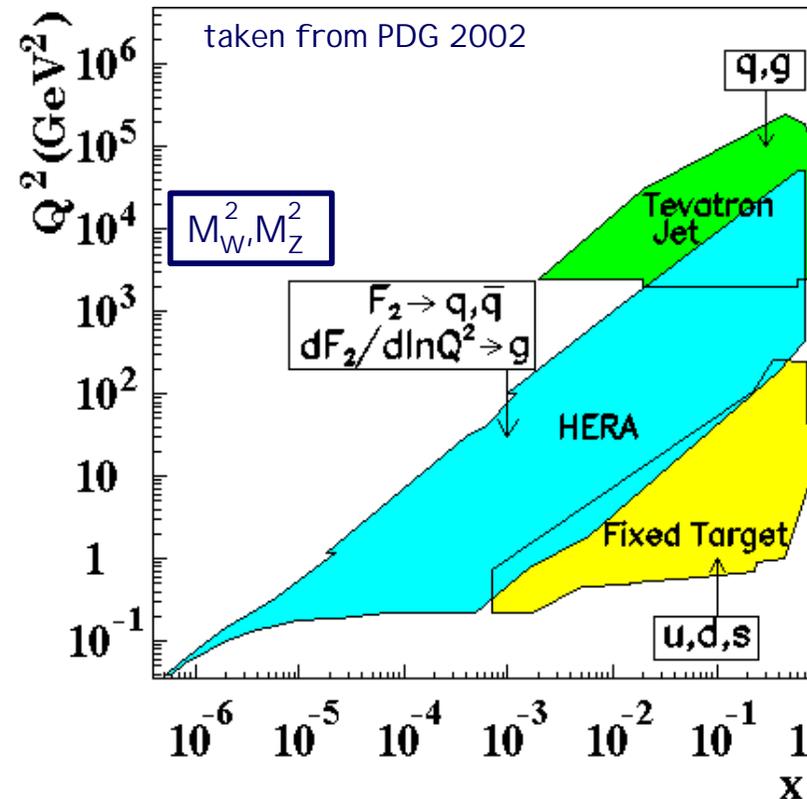
$$y = \frac{P \cdot q}{P \cdot k} = 1 - \frac{E'_e}{2E_e} (1 - \cos \theta) \quad \text{Inelastizität}$$

Relativer Energieübertrag auf das Proton in seinem Ruhesystem

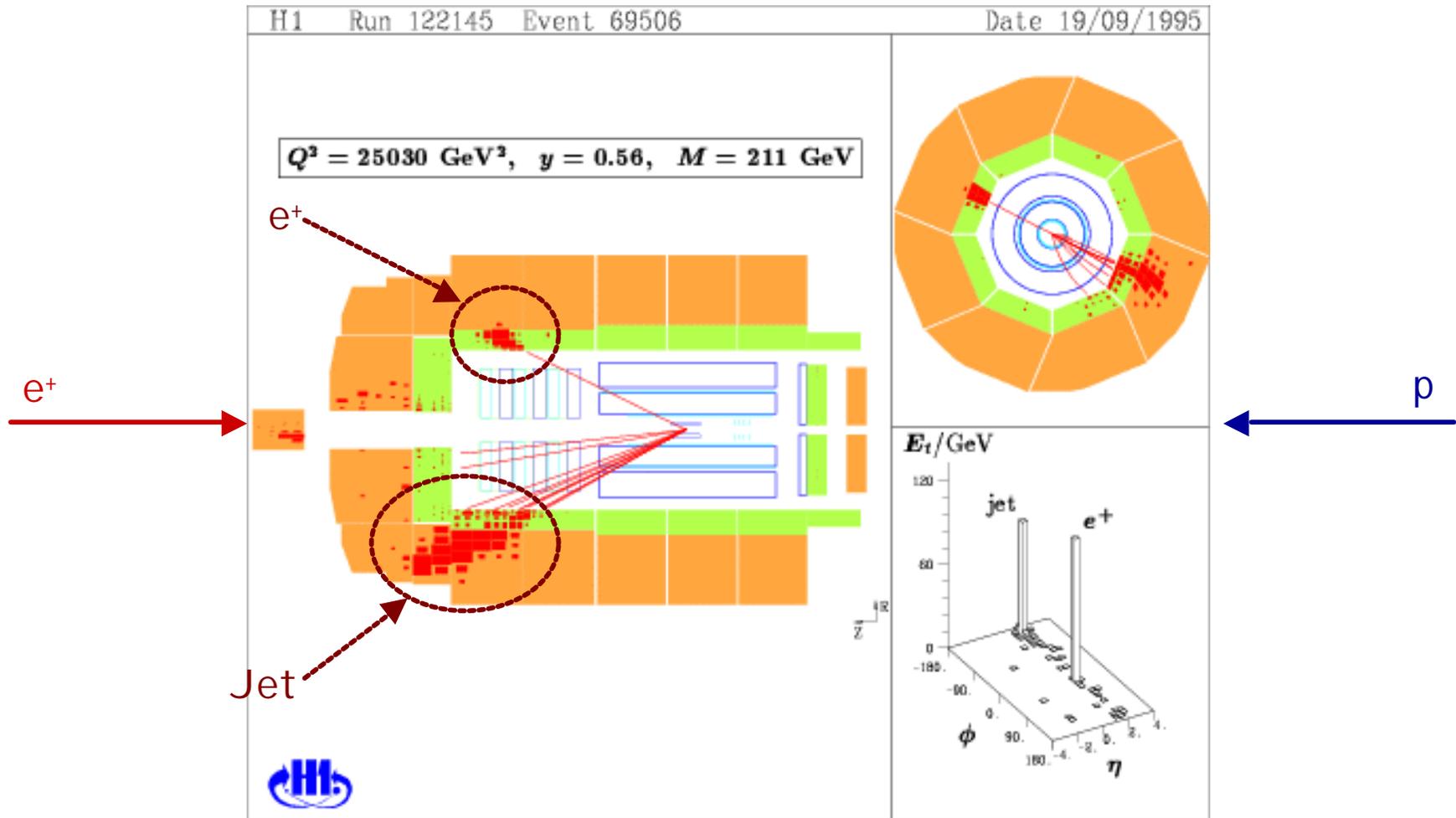
Einführung: Kinematischer Bereich von HERA

Hohes Q^2 :

- elektroschwache Effekte werden sichtbar, Suche nach neuen Phänomenen
- Hohes $Q^2 \Leftrightarrow$ großes x
- Erinnerung: $Q^2 = sxy$
- Auflösung von 1/1000 der Größe des Protons



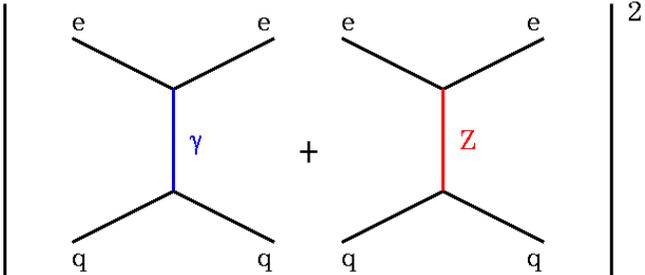
Neutraler Strom: Ereignis im Event Display



Neutraler Strom: Strukturfunktionen

Wirkungsquerschnitt:

$$\frac{d^2\sigma_{NC}}{dx dQ^2}(e^?) = \frac{2y^2}{xQ^4} (Y_+ F_2 + Y_- x F_3 - y^2 F_L)$$



$F_2 = x \sum_f A_f [q + \bar{q}]$ Hauptbeitrag durch γ -Austausch-Term
 $x F_3 = x \sum_f B_f [q - \bar{q}]$ sensitiv auf Valenzquarks

F_L : longitudinale Strukturfunktion, klein bei hohem Q^2

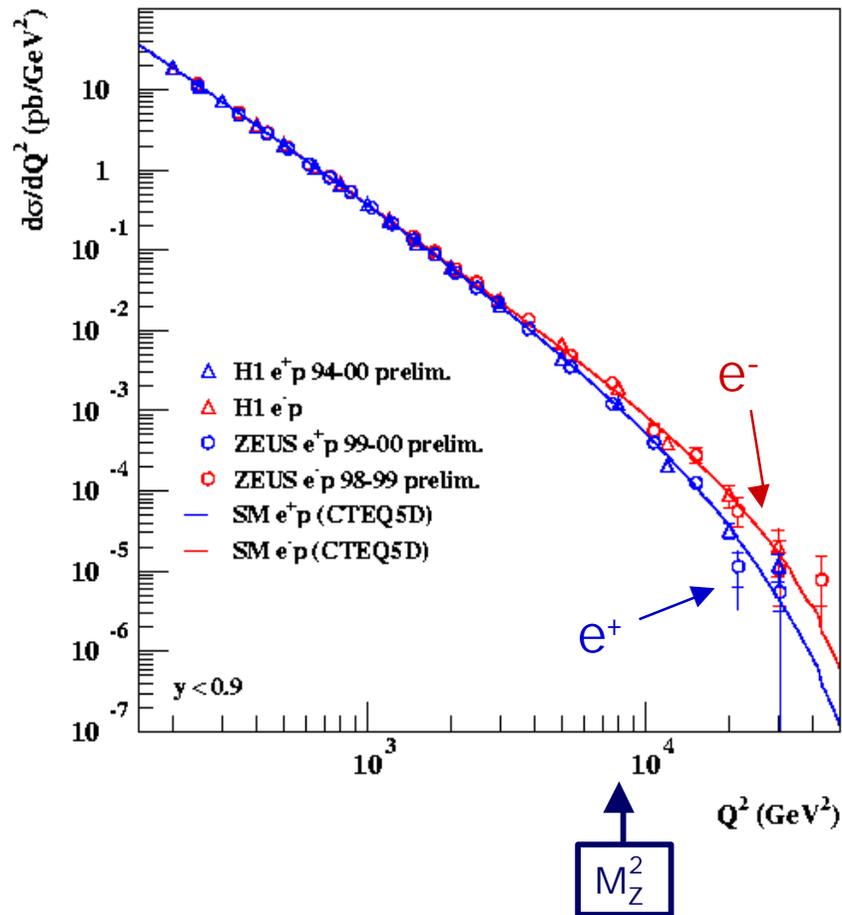
A_f : γ -Austausch + γ -Z-Interferenz + Z-Austausch
 B_f : γ -Z-Interferenz + Z-Austausch

groß
klein

$$Y_+ = 1 - y^2$$

Neutraler Strom: Messung des Wirkungsquerschnitts

HERA Neutral Current



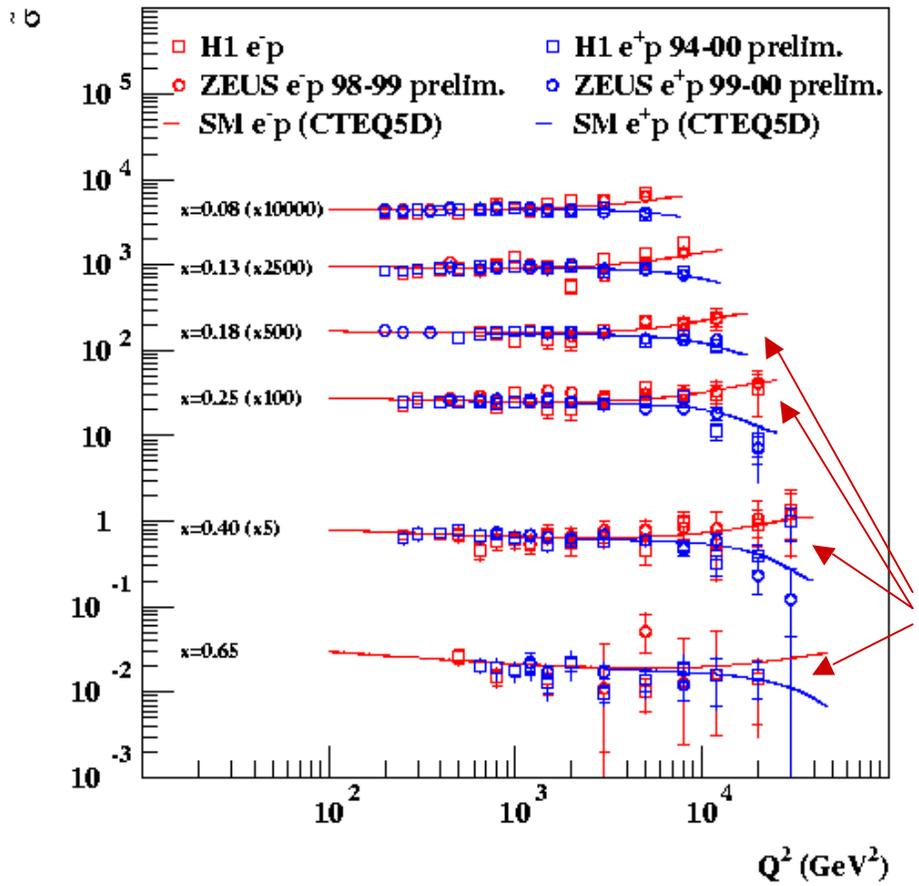
Effekt der γ -Z-Interferenz sichtbar bei großem Q^2 :
Konstruktive Interferenz für e^-
destruktive Interferenz für e^+ .

Standardmodell beschreibt
Daten über 6 Größenordnungen!

$Q^2 > 10^4$ GeV 2 : Massenskala der
elektroschwachen Eichbosonen
(Sensitivität auf elektroschwache
Effekte)

Neutraler Strom: ?Z-Interferenz

HERA Neutral Current



Reduzierter Wirkungsquerschnitt:

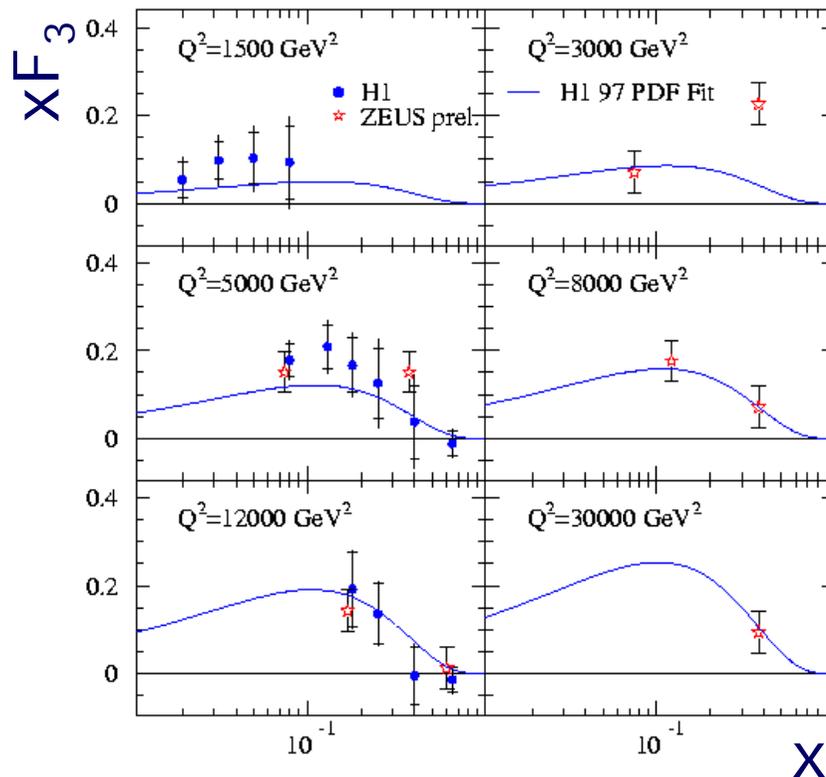
$$\sigma = \frac{1}{Y_+} \frac{xQ^4}{2s^2} \frac{d^2\sigma}{dx dQ^2}$$

QCD-Fits: dominiert von Daten bei kleinem Q² (höhere Statistik)

Effekt der ?-Z-Interferenz

Neutraler Strom: Erste Messung von xF_3 bei HERA

$$\frac{d^2\sigma_{NC}}{dx dQ^2}(e^+) = \frac{2y^2}{xQ^4} (Y_+ F_2 + Y_- xF_3 - y^2 F_L)$$

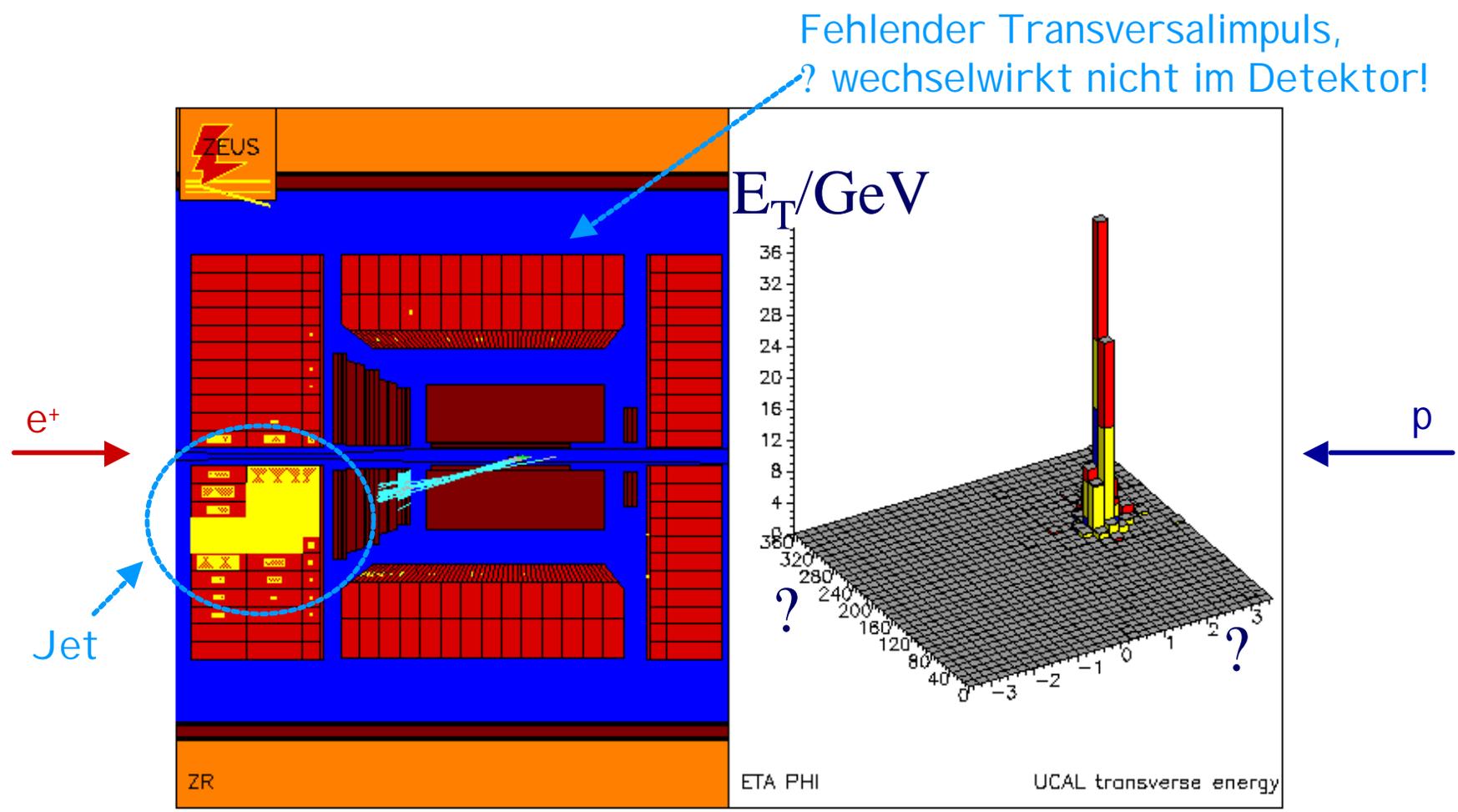


Gute Übereinstimmung
mit QCD-Vorhersage!

Sensitiv auf Valenzquarks:
 $xF_3 \propto (q - \bar{q}) = ((q_V + q_S) - \bar{q}) \propto q_V$

Ergebnisse in Statistik limitiert
durch kleineren e^- - Datensatz.

Geladener Strom: Ereignis im Event Display

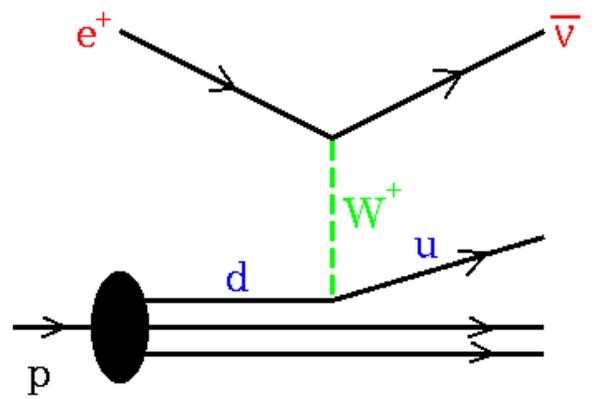


Geladener Strom: Strukturfunktionen

Wirkungsquerschnitt:

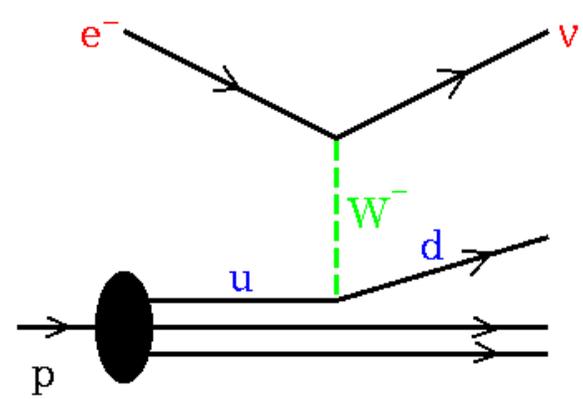
$$\frac{d^2\sigma_{CC}}{dx dQ^2}(e^?) = \frac{G_F^2}{4x} \left[\frac{M_W^2}{M_W^2 + Q^2} \right]^2 (Y_+ F_2^? + Y_- x F_3^? - y^2 F_L^?)$$

Effekt der W-Masse durch Propagator



$$\sigma^{e^+p} = x [\bar{u} + \bar{c} + (1-y)^2(d+s)]$$

↑
Test des d-Valenzquarks

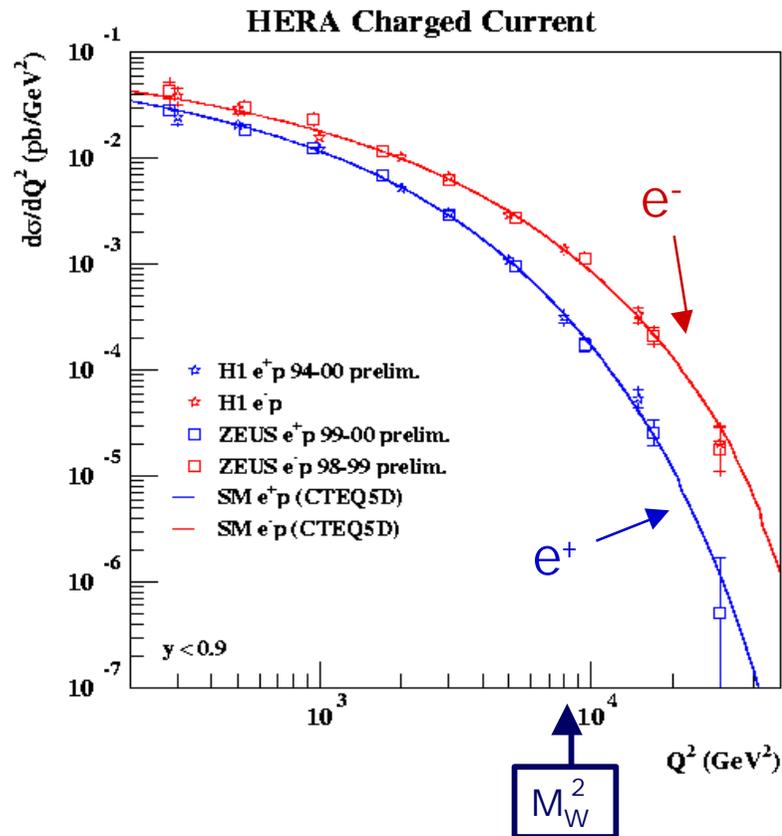


$$\sigma^{e^-p} = x [u + c + (1-y)^2(\bar{d} + \bar{s})]$$

↑
Test des u-Valenzquarks

e+ und e- koppeln an unterschiedliche Quarks

Geladener Strom: Messung des Wirkungsquerschnittes



Standardmodell beschreibt die Daten sehr gut!

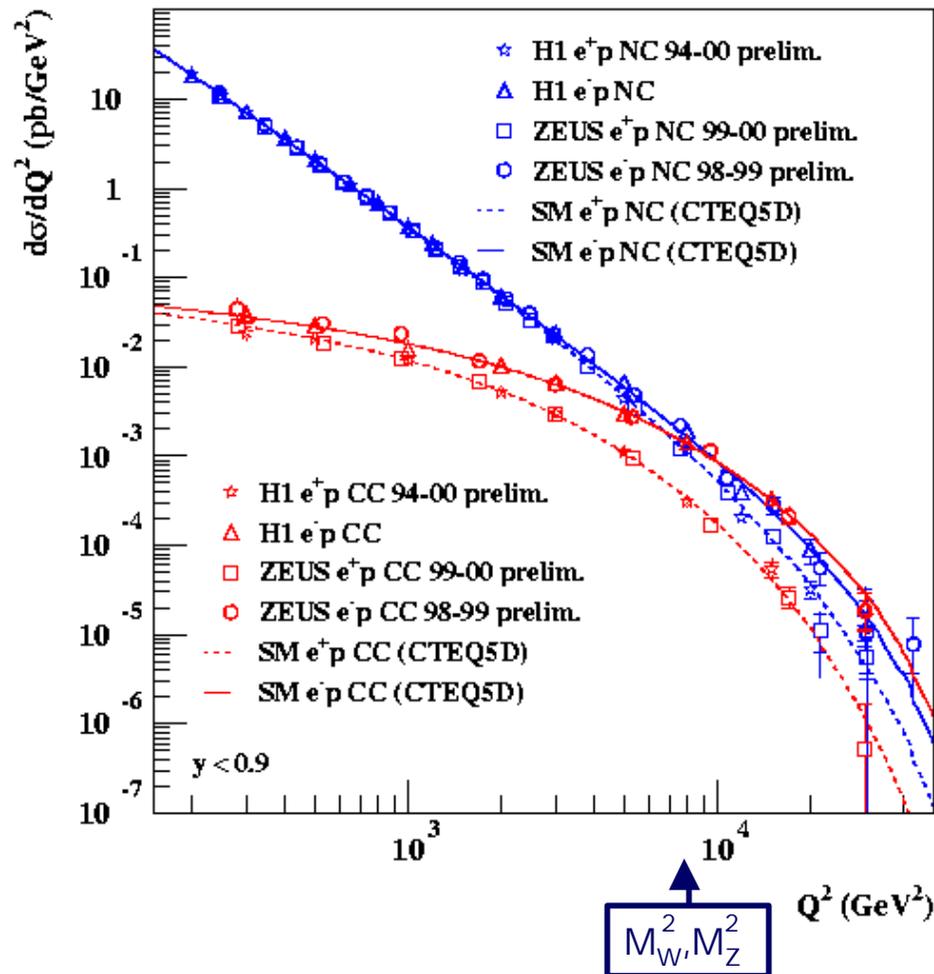
Unterschied e⁺ ? e⁻:

- **niedriges Q²** : See-Quarks dominierend, Wirkungsquerschnitt ähnlich groß
- **hohes Q²** : Valenz-Quarks dominierend

$$\int_{e^-p} \int u \quad \int_{e^+p} \int (1-y)^2(d)$$

$$\int_{e^-p} \int u > \int_{e^+p} \int (1-y)^2(d)$$

Neutraler und geladener Strom: Wirkungsquerschnitt



$$Q^2 > M_W^2, M_Z^2:$$

?_{CC} ? ?_{NC}

Elektroschwache
Vereinheitlichung

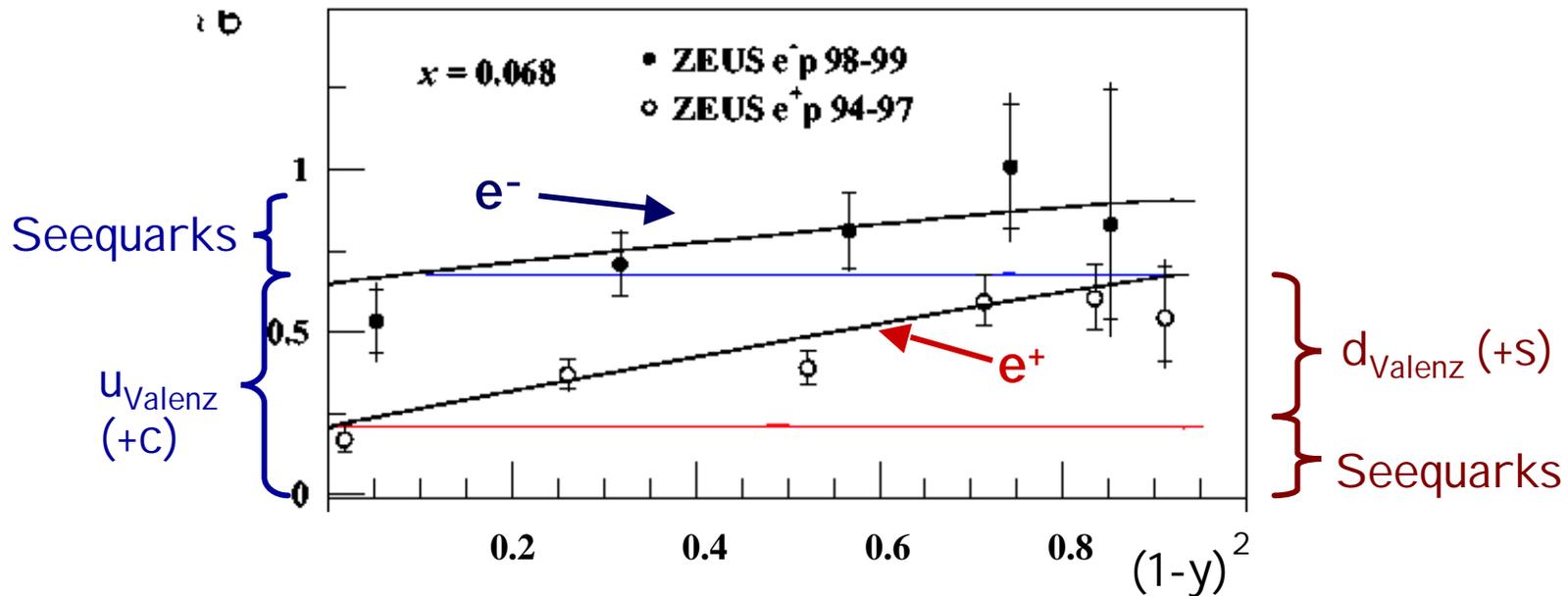
Geladener Strom: reduzierte WQ in Abhängigkeit von $(1-y)^2$

e^- : Antiquarks sind abhängig von $(1-y)^2$:

$$\sigma^{ep} \sim \underbrace{u+c}_{\text{Test des u-Valenzquarks}} + (1-y)^2(\bar{d}+\bar{s})$$

e^+ : Quarks sind abhängig von $(1-y)^2$:

$$\sigma^{ep} \sim \bar{u}+\bar{c} + (1-y)^2(\underbrace{d+s}_{\text{Test des d-Valenzquarks}})$$



Zusammenfassung (I)

Test des Standardmodells:

- ✍ Messung der inklusiven Wirkungsquerschnitte für neutralen und geladenen Strom mit hoher Statistik

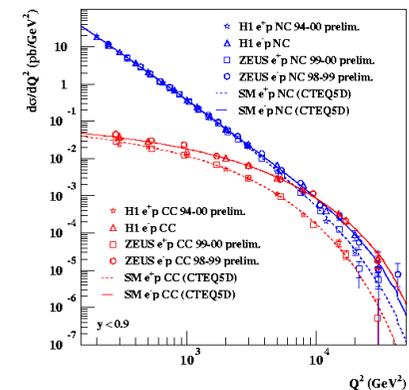
Mehrere Effekte sichtbar:

- ✍ Elektroschwache WW: γ -Z-Interferenz
- ✍ Perturbative QCD: Evolution der Q^2 -Abhängigkeit bis hin zu Auflösungen von 10^{-18} m bei $Q^2 > M_{W/Z}^2$
- ✍ Nicht-perturbative QCD: Bestimmung der x -Abhängigkeit der Partonverteilung

☞ **Summe aller Effekte:**

?_e? (NC & CC) konsistent beschrieben

- ✍ Erste Messung der Strukturfunktion xF_3
- ✍ Sensitivität auf verschiedene Quarks im Proton beim geladenen Strom
- ☞ **Hervorragende Übereinstimmung SM ? Daten**



Suche nach neuen Phänomenen

HERA bietet weites Feld an Möglichkeiten,
bei hohem Q^2 nach neuer Physik zu suchen:

- Suche nach Resonanzen
 - ✍ Leptoquarks
 - ✍ R_p verletzende SUSY
 - ✍ Angeregte Fermionen
- Suche nach Interferenzen
 - ✍ Kontaktwechselwirkungen
 - ✍ Große Extra-Dimensionen
- Außergewöhnliche Ereignisse
 - ✍ Multi-Elektron-Ereignisse
 - ✍ Isolierte Leptonen bei fehlendem Transversalimpuls (FCNC?)

Leptoquarks: Idee

Quarks und Leptonen:

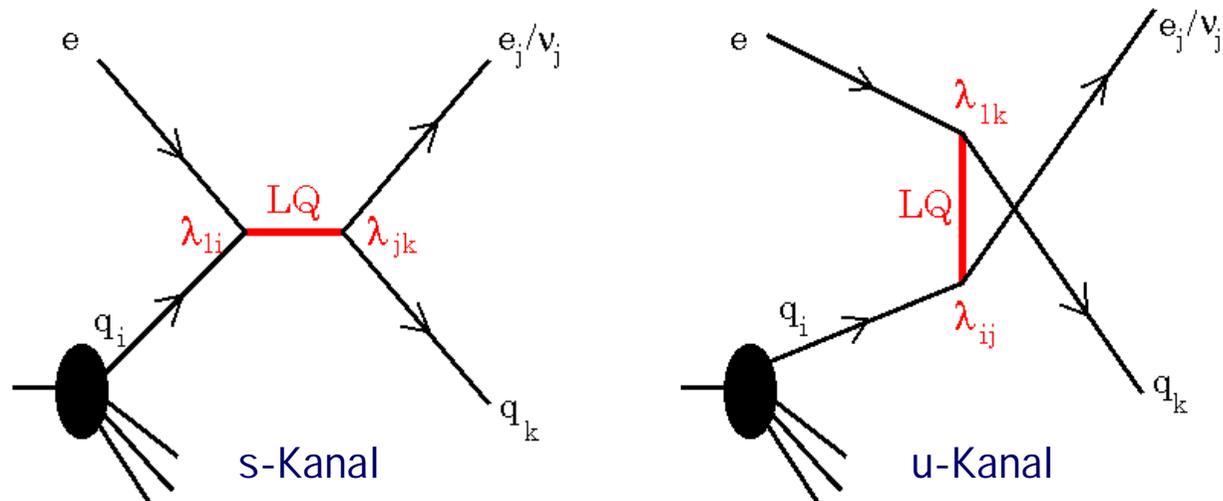
punktförmige Teilchen, die sich ähnlich verhalten:

- Gruppierung in Familien (3x2)
- Proton und Elektron haben den gleichen Betrag an Ladung

⇒ Gibt es eine höhere Symmetrie?

⇒ Leptoquarks (LQ): Teilchen mit $B \neq 0$ und $L \neq 0$ und drittelzahliger Ladung

Mehrere Theorien sagen Existenz von LQs voraus!



Leptoquarks: Ergebnisse: e⁺-Jet-Massenverteilung

Signatur: einzeln nicht unterscheidbar von NC/CC Ereignis, aber:

Resonanz in e⁺-Jet-Massenverteilung

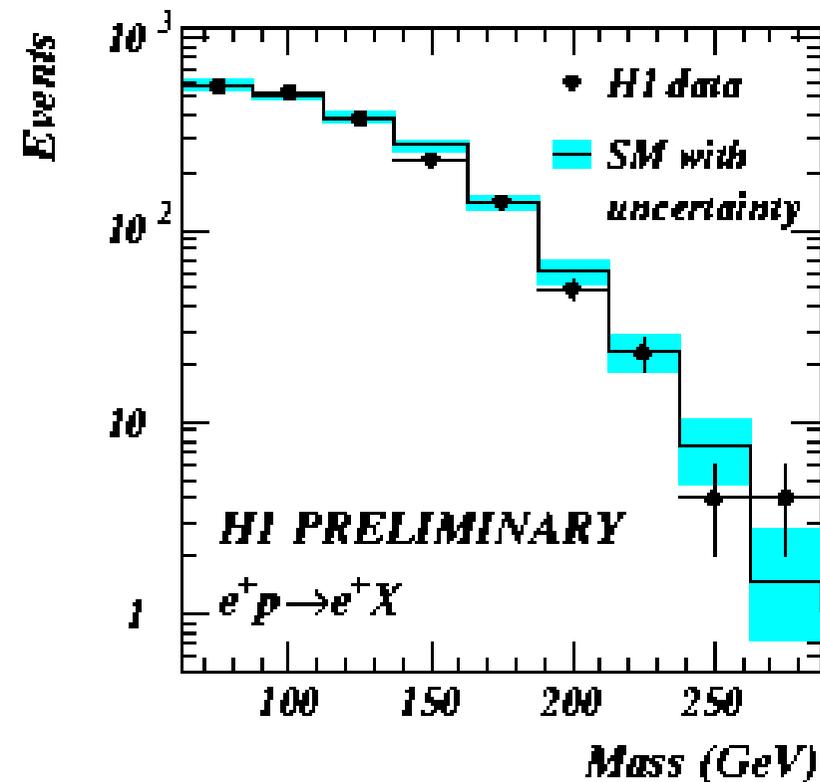
☞ **SM**: WQ sinkt mit Q²,

☞ **LQ**: Überschuss bei hohem Q²

Kein signifikantes Signal

bei H1 und bei ZEUS!

☞ Berechne Grenzen für die Kopplung λ_{ij} als Funktion von M_{LQ}

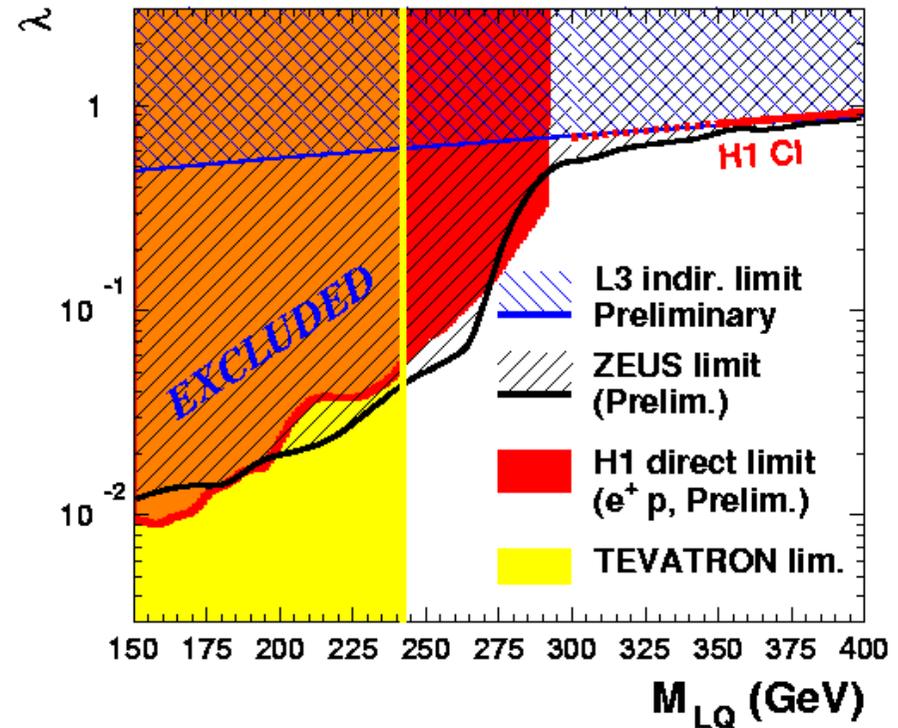


Leptoquarks: Ergebnisse Massen- und Kopplungslimits

Grenze unter der Annahme,
dass LQs unter Beachtung
der SM-Symmetrien
in $e q$ oder νq zerfallen

Ergebnisse abhängig von der
Yukawa-Kopplung λ_{ij}
außer beim Tevatron (Paarproduktion)

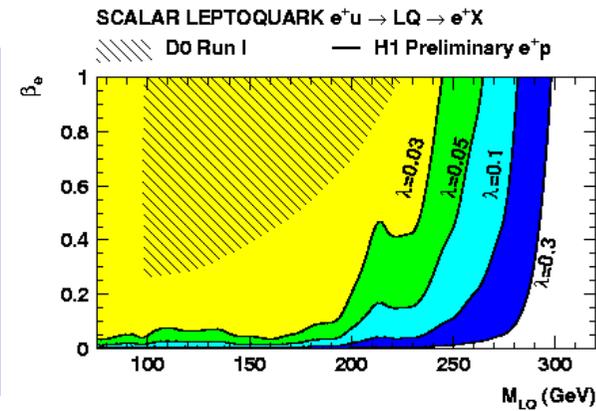
SCALAR LEPTOQUARKS WITH $F=0$ ($\tilde{S}_{1/2,L}$)



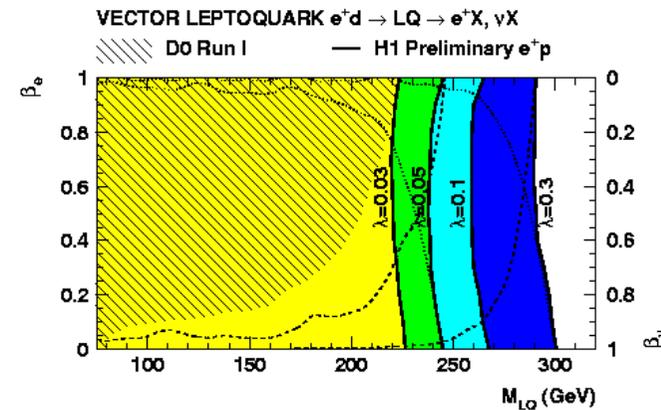
Leptoquarks: Ergebnisse Massen- und Kopplungslimits

Grenzen auf $\beta_e = BR(LQ \rightarrow e q)$
im Fall, dass LQs beim Zerfall in
 $e q$ und γq SM-Symmetrien nicht
beachten, für verschiedene
feste β_{ij} und $\beta_e + \beta_\gamma = 1$

Sensitivität fast am kinematischen
Limit, auch für kleine Werte von β_e



Kopplung
an u

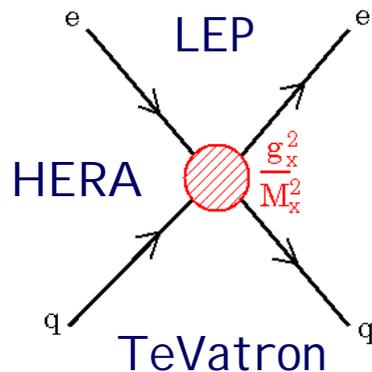


Kopplung
an d

Kontaktwechselwirkungen

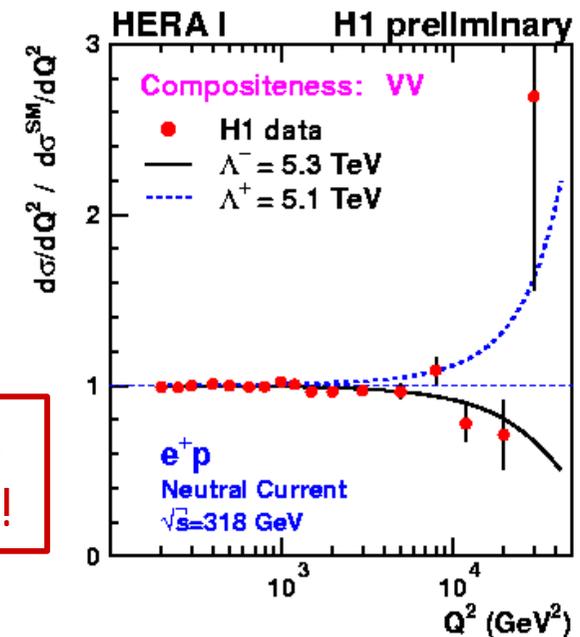
Schwere Teilchen (Masse $M_x \gg \sqrt{s}$): sichtbar durch Interferenz mit SM-Prozessen!

☞ Suche bei hohem Q^2 (höchste Energien, kleinste Distanzen)



Vergleiche SM-Vorhersage mit den Daten.

☞ Keine Abweichung vom Standardmodell sichtbar!



Große Extra-Dimensionen führen zu ähnlichen Abweichungen

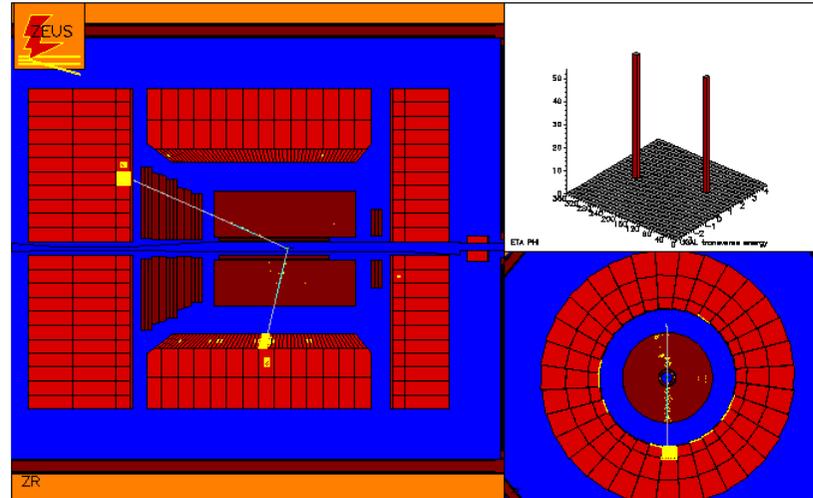
☞ kein Hinweis gefunden (Ausschluß bis zu $M_S = 0.8$ TeV)

Ungewöhnliche Ereignisse: Multi-Elektron-Ereignisse

SM Erwartung für Multi-Elektron-
Ereignisse von QED-Prozessen:
??? e^+e^-

Übereinstimmung mit SM über
gesamten Massenbereich
bis auf Bereich mit ($M_{12} > 100$ GeV)!

Untersuchung bei großen $M_{ee(e)}$:



| H1 Preliminary 115 pb ⁻¹ | Daten | SM |
|-------------------------------------|-------|-------------|
| 2e-Selektion ($M_{12} > 100$ GeV) | 3 | 0.25 ? 0.05 |
| 3e-Selektion ($M_{12} > 100$ GeV) | 3 | 0.23 ? 0.09 |

Überschuss
bei H1?

| ZEUS Preliminary 130 pb ⁻¹ | Daten | SM |
|---------------------------------------|-------|-------------|
| 2e-Selektion ($M_{12} > 100$ GeV) | 2 | 1.14 ? 0.09 |

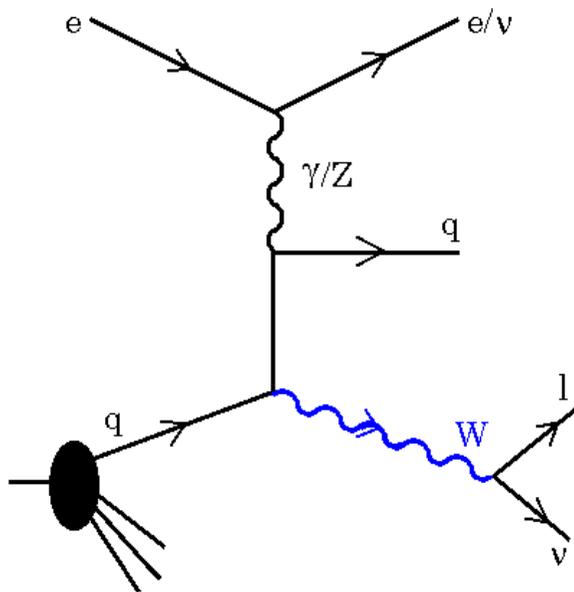
Übereinstimmung
mit SM bei ZEUS

Ungewöhnliche Ereignisse: Leptonen und fehlendes p_T

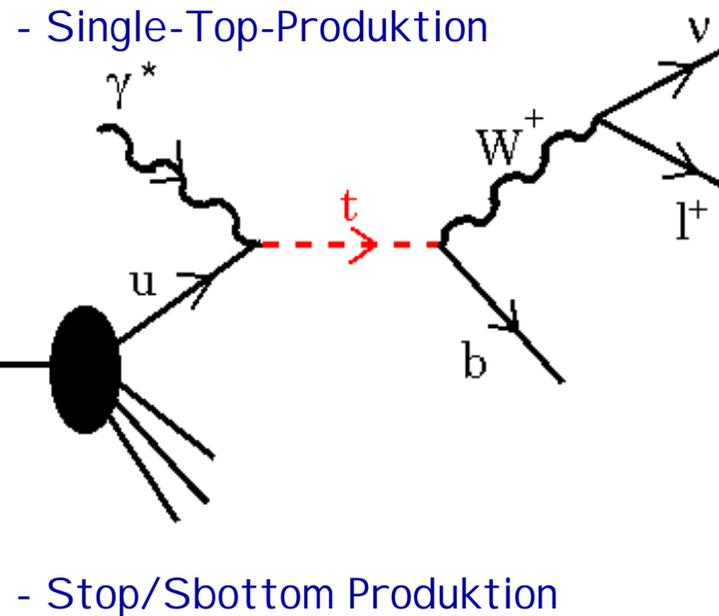
Beide Experimente haben Ereignisse mit fehlendem p_T und isolierten Leptonen mit hohem p_T beobachtet.

Mögliche Erklärungen:

- Single-W-Produktion



- Neue Physik:



Ungewöhnliche Ereignisse: Leptonen und fehlendes p_T

H1
e+p

| e und μ 118 pb ⁻¹ | Daten | SM |
|----------------------------------|-------|-----------------|
| $25 < p_T^X < 40$ GeV | 4 | 1.83 \pm 0.27 |
| $p_T^X > 40$ GeV | 6 | 1.08 \pm 0.22 |

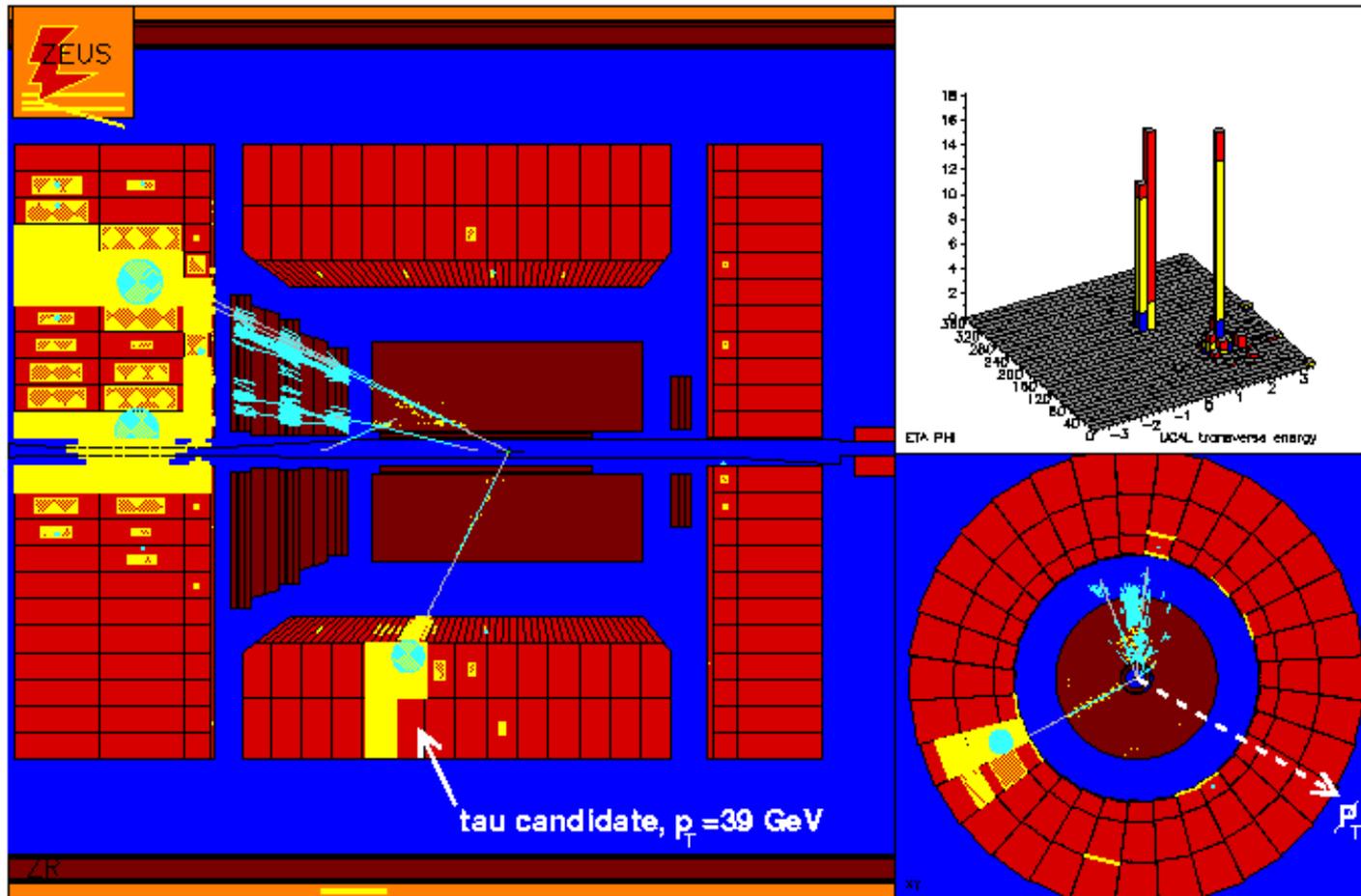
Überschuss bei großem p_T , wo der Untergrund am kleinsten ist!

ZEUS
preliminary

| 94-00 e+p 139pb ⁻¹ | e: Daten/SM | μ : Daten/SM | ?: Daten/SM |
|-------------------------------|--|--|-------------------|
| $p_T^X > 25$ GeV | 2/2.90 ^{+0.59} _{-0.32} | 5/2.75 ^{+0.21} _{-0.21} | 2/0.12 \pm 0.02 |
| $p_T^X > 40$ GeV | 0/0.94 ^{+0.11} _{-0.10} | 0/0.95 ^{+0.14} _{-0.10} | 1/0.06 \pm 0.01 |

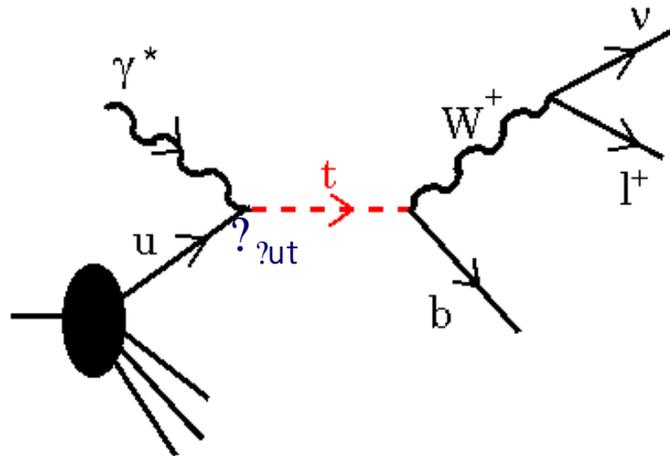
Kein Überschuss,
SM beschreibt die
Daten!

Ungewöhnliche Ereignisse: Event Display: ? und $p_{T,miss}$



Ungewöhnliche Ereignisse: Interpretation: $I^?$ und $p_{T,miss}$

SM-Erwartung für single-top-Produktion vernachlässigbar wegen FCNC vertex χ_{ut}

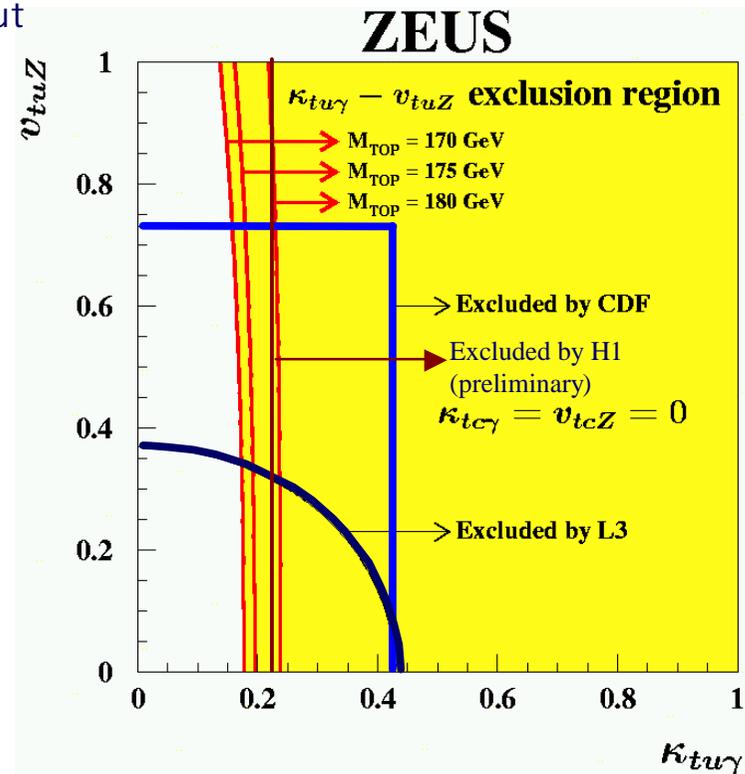


HERA: sehr sensitiv auf χ_{ut} ,
 χ_{Zut} klein

Andere Experimente:

LEP: $e^+e^- \rightarrow \gamma, Z \rightarrow t\bar{t}$

TeVatron: seltene t-Zerfälle: $t \rightarrow \gamma q, Z q$



Unterschied ZEUS ? H1 durch Überschuss an isolierten Leptonen bei H1

Zusammenfassung (II)

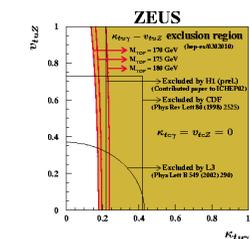
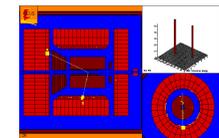
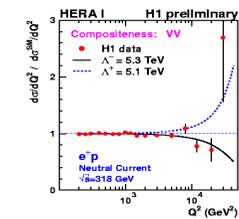
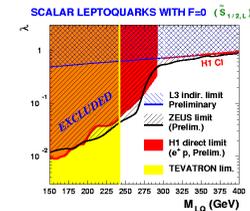
Suche nach neuen Phänomenen:

Ausschlussgrenzen, bei denen HERA führend bzw. konkurrenzfähig ist:

- ✍ Leptoquarks
- ✍ Angeregte Neutrinos
- ✍ FCNC
- ✍ R_p -verletzende SUSY
- ✍ (Kontaktwechselwirkungen, große Extra-Dimensionen)

Ungewöhnliche Ereignisse bei HERA:

- ✍ Multi-Elektron-Ereignisse
- ✍ Leptonen und fehlender Transversalimpuls
- ✍ höhere Statistik nötig



Ausblick

HERA II -Run (bis 2007):
deutlich höhere Luminosität und Polarisation bieten
großes Physik-Potential!

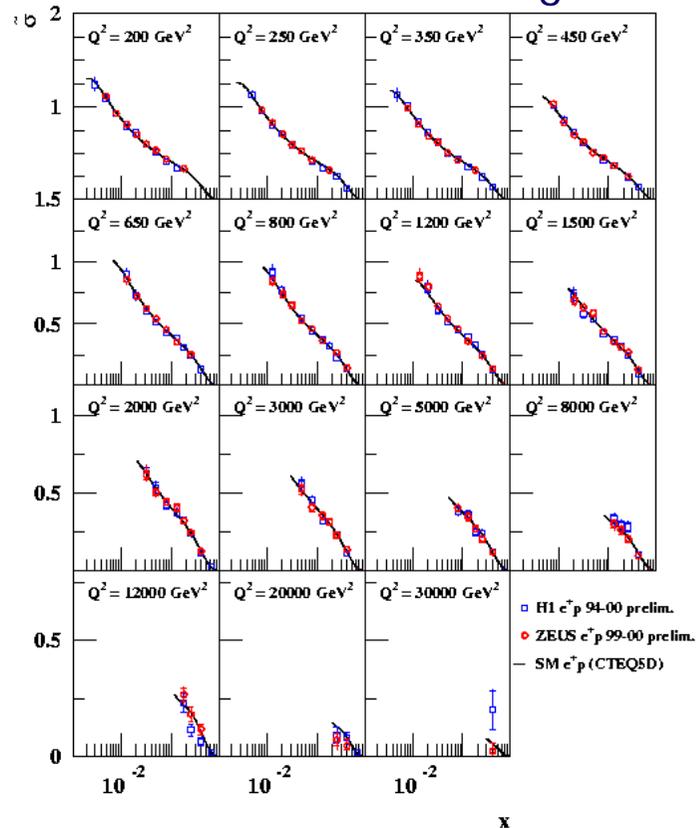
Beispiele:

- ✍ Präzise Messung der inklusiven Wirkungsquerschnitte
(Genauigkeit wenige % bis zu $Q^2 < 50000 \text{ GeV}^2$)
- ✍ Messung der Quark-Impulsverteilungen im Proton bis zu hohem x
- ✍ Direkte Messung von a und v für u/d-Quarks (6-17 %) – Polarisation!
- ✍ Mehr Statistik für Ereignisse mit isolierten Leptonen bei fehlendem Transversalimpuls und für Multielektronereignisse
✍ Potential für neue Entdeckungen!

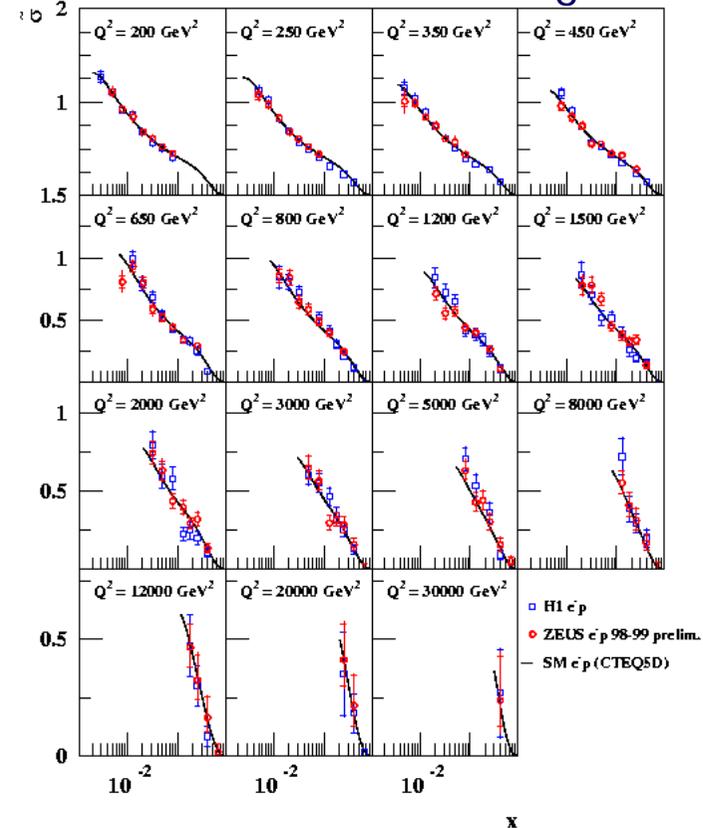
Reservefolien folgen

Neutraler Strom: reduzierte WQ für verschiedene Q^2

Positrons running:



Electron running:



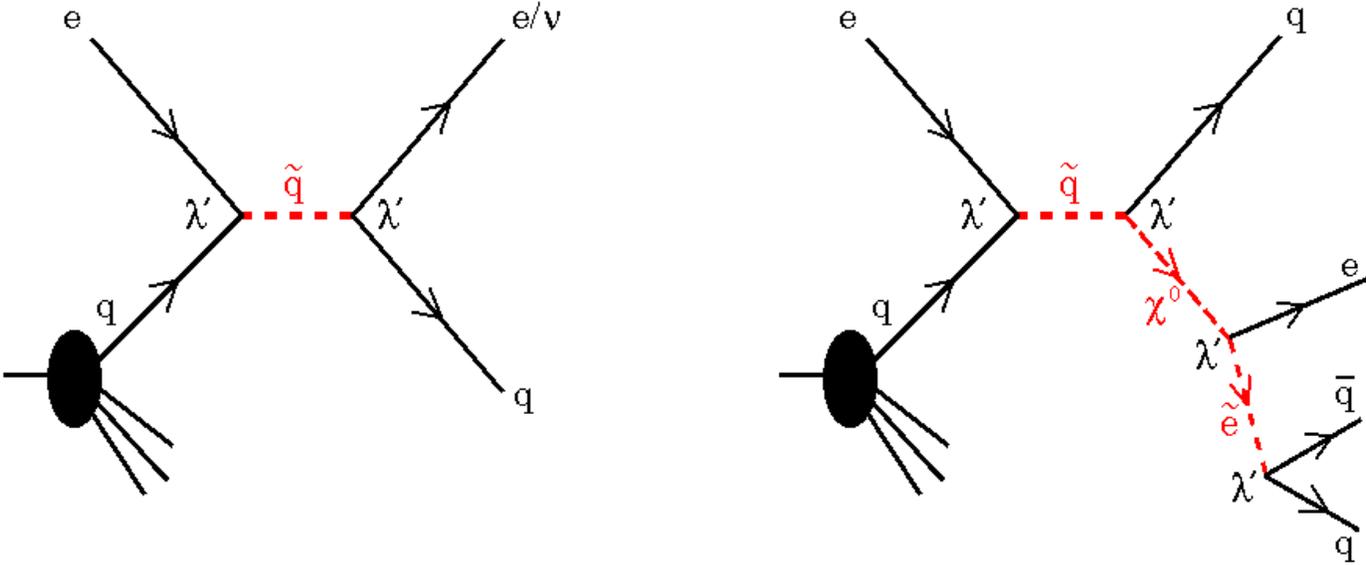
Sehr gute Übereinstimmung des SM mit den Daten im gesamten Q^2 -Bereich!

R-Parität verletzende Supersymmetrie: Idee

R-Parität $R_p = (-1)^{L+3B+2S}$:

- positiv für alle bekannten Teilchen
- negativ für die supersymmetrischen Partnerteilchen

☞ Verletzung der R-Parität:
SUSY-Teilchen können einzeln produziert werden!



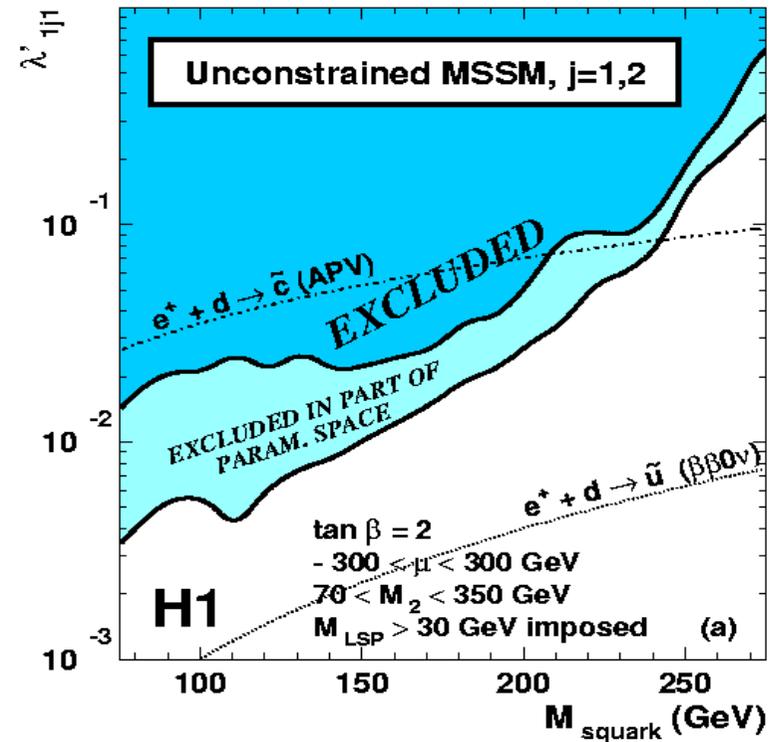
R-Parität verletzende SUSY: Ergebnisse für das MSSM

Suche nach $e + n$ Jets,
(e kann auch andere Ladung haben).

Keinen Überschuss gefunden
? setze Limit!

Ausschlusslimits auf Kopplungen λ'_{1j1}
im phänomenologischen
Minimale SuperSymmetrischen Modell
(MSSM)

Annahme: \tilde{q} koppelt an $q_1 = u, d$ (λ'_{1j1})
↪ Entdeckungspotential für $q_{2,3}$



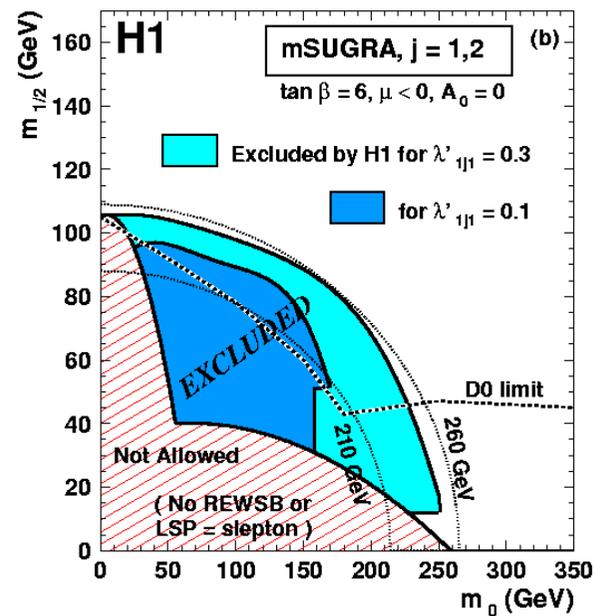
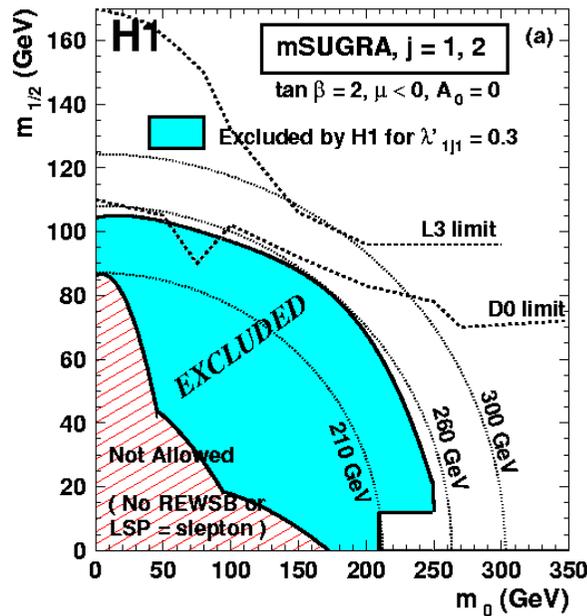
Ähnliche Ergebnisse von ZEUS.

R-Parität verletzende SUSY: Ergebnisse für das mSUGRA

Ausschlusslimits in der $(m_0, m_{1/2})$ -Ebene für das phänomenologische minimale SuperGravitationsmodell (mSUGRA)

Beschränkungen des mSUGRA u.a. durch:

- m_0 : universeller Massenparameter für Fermionen in der GUT-Skala
- Annahme: elektroschwache Symmetriebrechung wird durch radiative Korrekturen gesteuert



Angeregte Fermionen: Idee

Annahme: Fermionen sind nicht punktförmig (aus mehreren Teilchen zusammengesetzt)

☞ Dann besteht Möglichkeit, angeregte Zustände zu erzeugen!

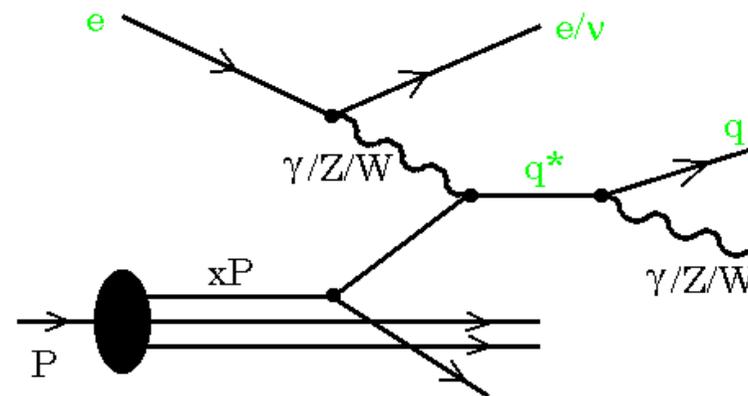
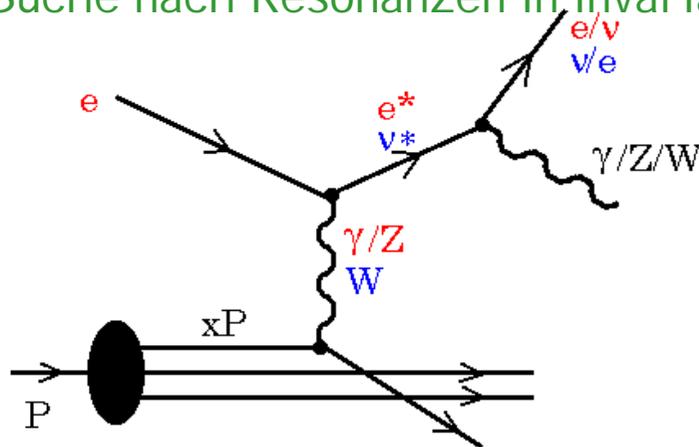
Lagrangian von Hagiwara *et al.*:

$$L = \lambda^{-1} (f \cdot SU(2) + f' \cdot U(1) + f_S \cdot SU(3))$$

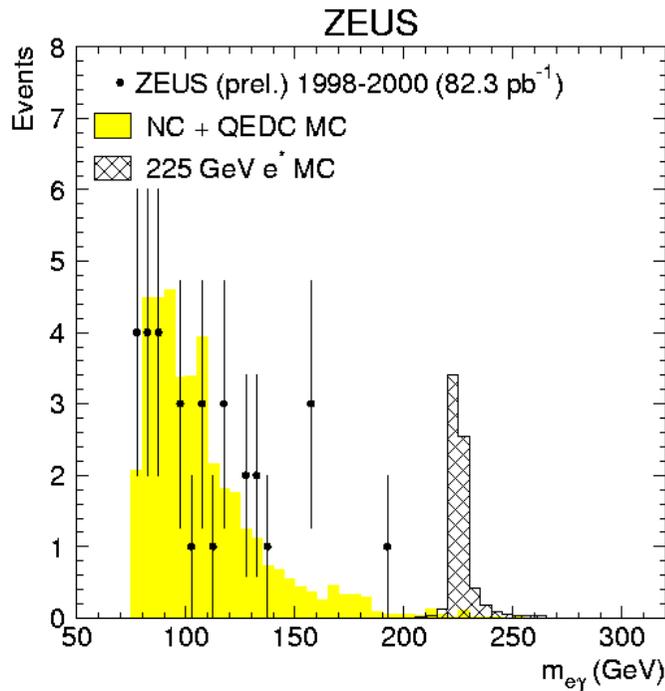
λ : Massenskala, muss endlich sein
 f, f', f_S : freie Parameter
 mind. einer muss $\neq 0$ sein

☞ Bei HERA: auslaufendes Lepton oder gestreutes Quark kann angeregt werden (NC und CC).

☞ Suche nach Resonanzen in invarianten Massen der Zerfallsprodukte

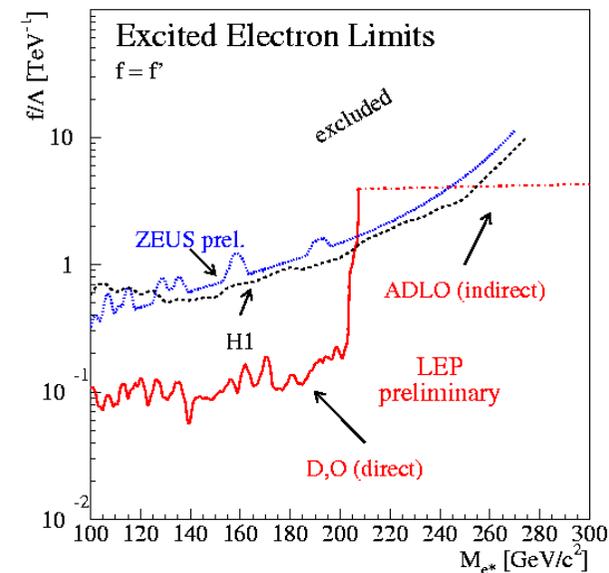


Angeregte Fermionen: Limits



Kein Überschuss gefunden
? setze Limit auf f /?!

Setze $f_s=0$ und $f=f'$, um die Sensitivität von HERA auf die elektroschwachen Kopplungen f, f' zu nutzen!



HERA-Experimente decken eine höhere Masse ab als LEP-Experimente!

Large Extra Dimensions

Idee:

- ✍ SM-Teilchen leben in 4 Dimensionen
- ✍ Gravitonen leben in $(4+n)$ Dimensionen
- ✍ Extra-Dimensionen sind aufgerollt mit Größe $R \sim 1/M_S$ ($M_S = O(\text{TeV})$: Gravitationsskala)
- ✍ „Projektionen“ der Gravitonen auf 4 Dimensionen koppeln mit Stärke $\sim g_s/M_S^4$ an massive Teilchen \Rightarrow ähnliche Modifikation des WQ wie bei Kontaktwechselwirkungen!

Keine Hinweise auf große Extra-Dimensionen!

Setze Limits auf Massenskala M_S : positiv bzw. negativ entsprechend der Interferenz.

