

# HERA – Ein Labor für die QCD

**Benno List**

**ETH**

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



für die H1 und ZEUS Kollaborationen

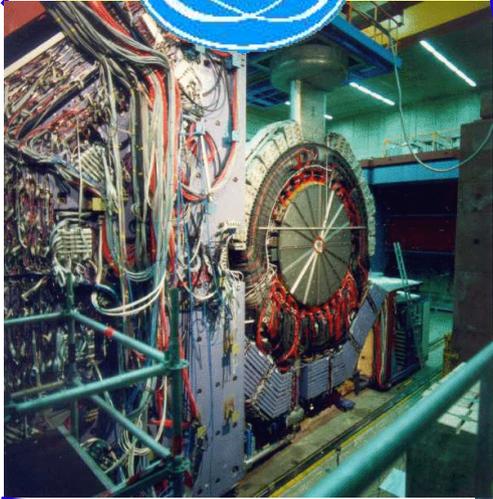


DPG-Frühjahrstagung Mainz 2004

- Einführung
- Partondichten,  $\alpha_s$  aus Strukturfunktionen
- $\alpha_s$  aus Jetraten und *event shapes*, Schwere Quarks
- ~~Low  $x$ , Diffraktion~~ **Pentaquarks**



# HERA

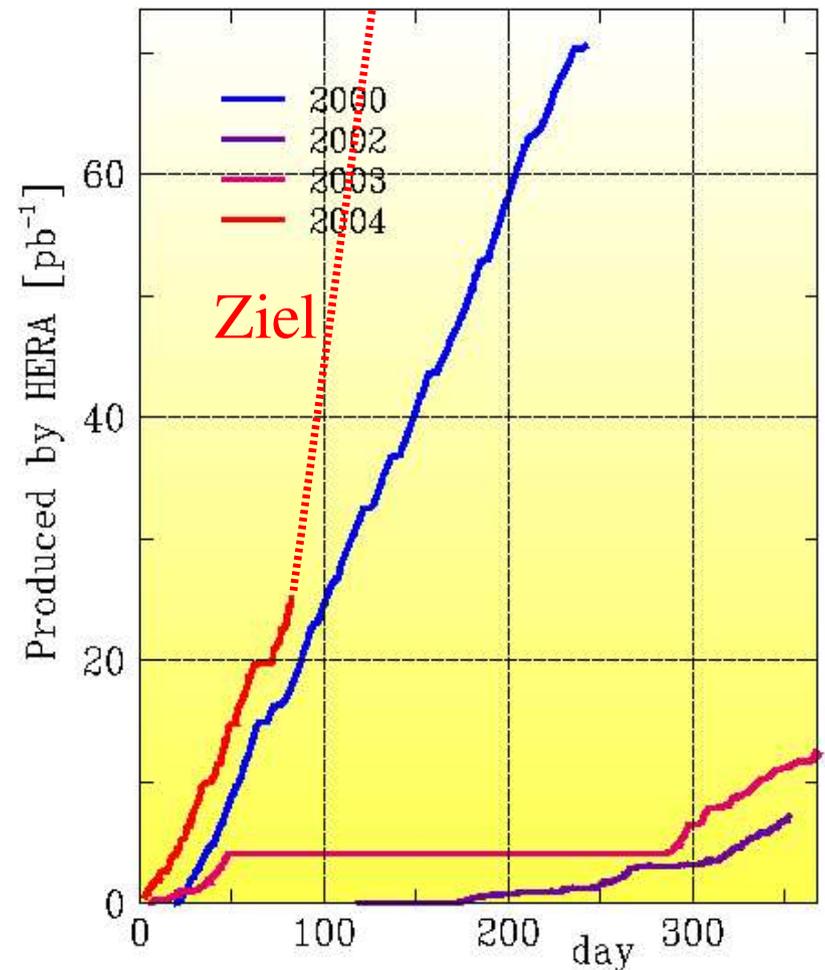


27.5 GeV Elektronen/Positronen, auf 920 GeV Protonen  $\rightarrow \sqrt{s} = 318 \text{ GeV}$   
2 Collider-Experimente: H1 und ZEUS  
HERA-I:  $16 \text{ pb}^{-1} e^-p$ ,  $120 \text{ pb}^{-1} e^+p$   
HERA-II: ca.  $700 \text{ pb}^{-1}$ , ca. 50% Polarisation

# Status von HERA-II

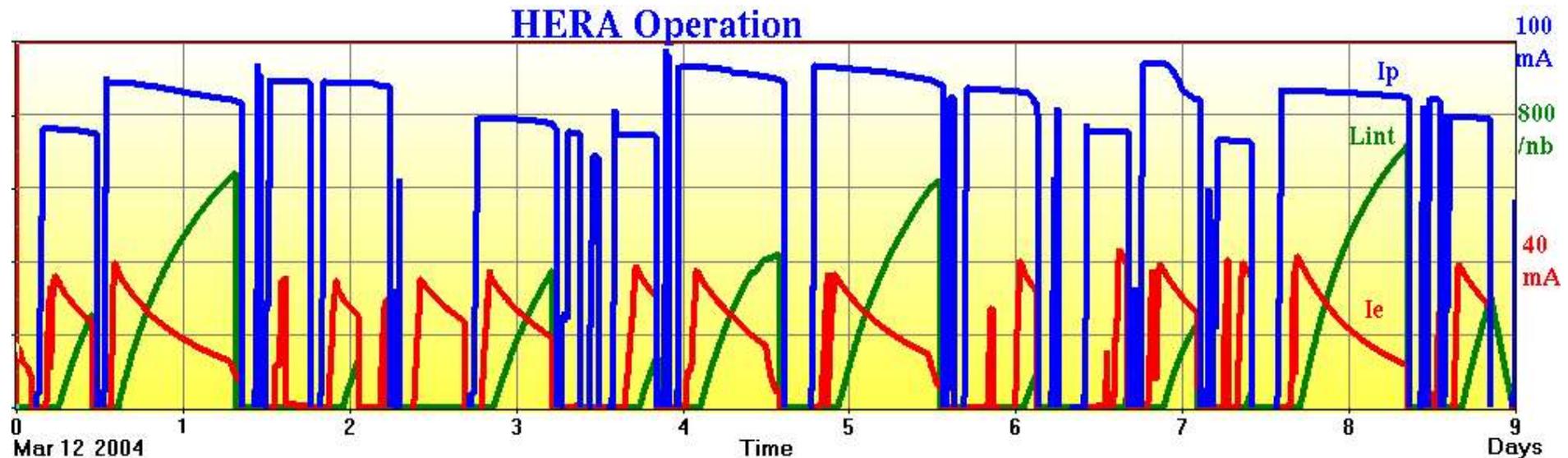
- 2002/03: Untergrundprobleme
  - Zahlreiche Verbesserungen:
    - Synchrotronstrahlungsabschirmung
    - Zusätzliche Vakuumpumpen
    - Besseres Monitoring der Maschine
    - Besseres Alignment der Magnete in den WW-Zonen
- =>Keine Beschränkung des Strahlstromes durch Untergrundprobleme mehr
- Verbesserte Zuverlässigkeit

HERA: Integrierte Luminosität



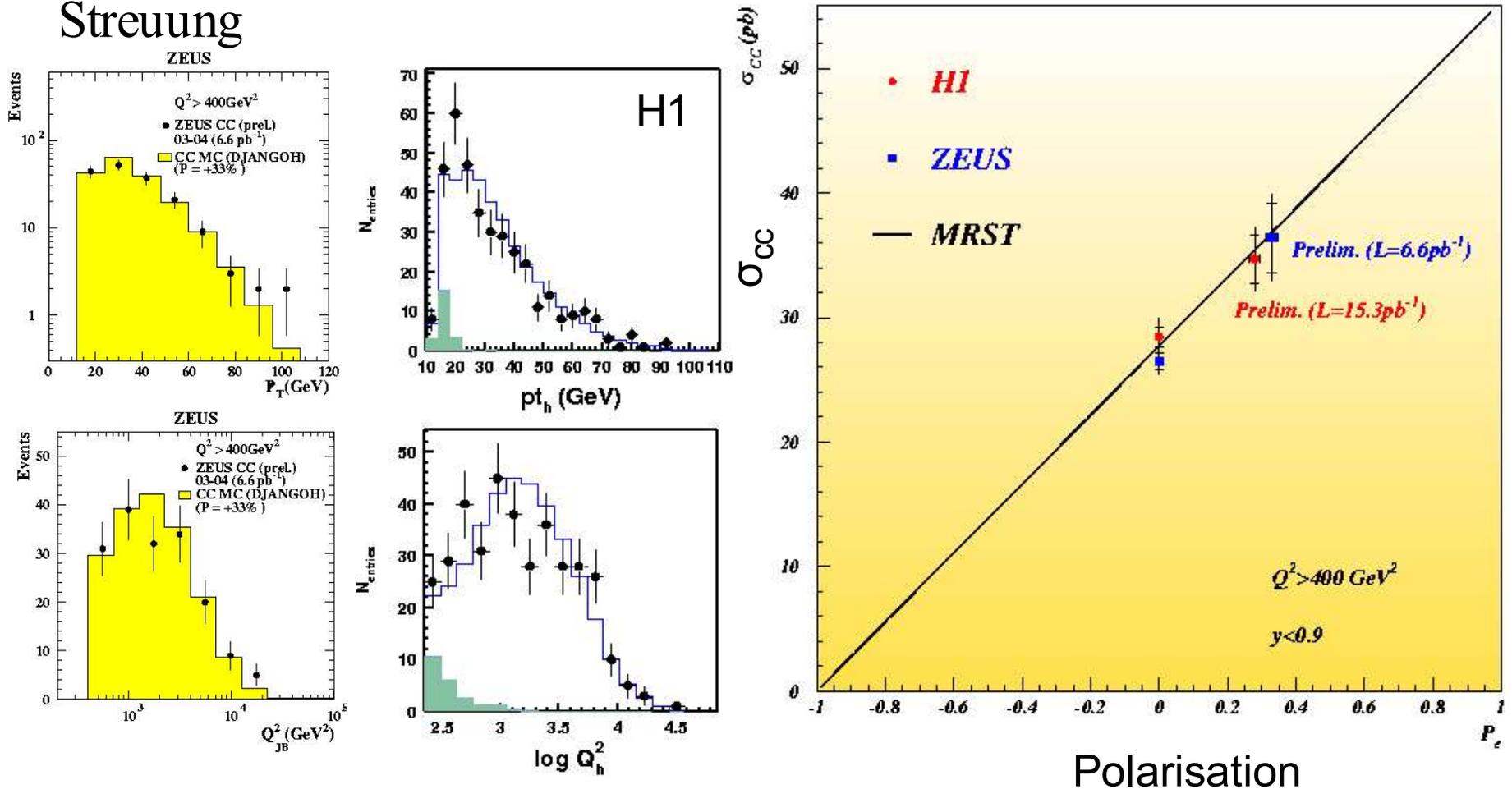
# HERA-II-Betrieb

- Ströme: typ. 90mA Protonen, 40mA Positronen
- Integrierte Luminosität: 400-700nb<sup>-1</sup> pro Füllung
- Lepton-Polarisation: 40%



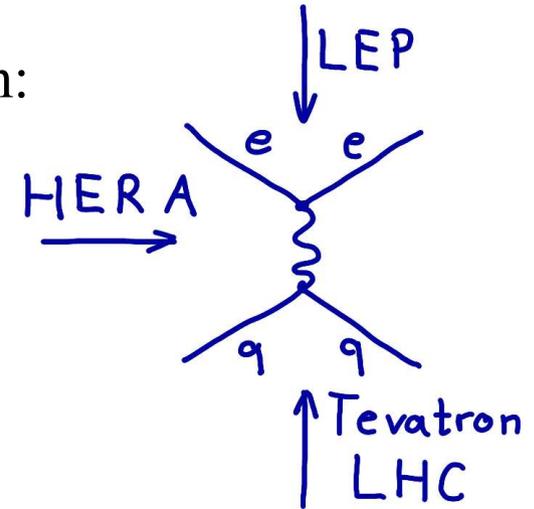
# CC mit Polarisation

- HERA-II: *Longitudinal* polarisierte Leptonen für H1 und ZEUS
- Erste Messung des polarisierten CC-Wirkungsquerschnittes in ep-Streuung



# QCD @ HERA

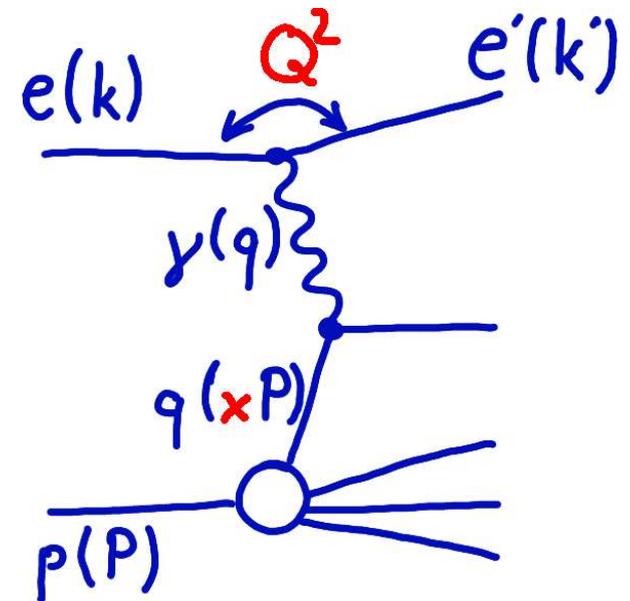
- Elektronen: Punktförmige, „saubere“ Sonde
  - ermöglichen gute Rekonstruktion des Geschehenen: Kinematik,  $\gamma/Z$ - oder W-Austausch
- Protonen im Anfangszustand: „Fluch und Segen zugleich“
  - A priori unbekannte Partondichten  
=> Tests der QCD sind kompliziert
  - Aufklärung der Struktur des Protons inkl. Bestimmung der Partondichten möglich!



# Kinematik

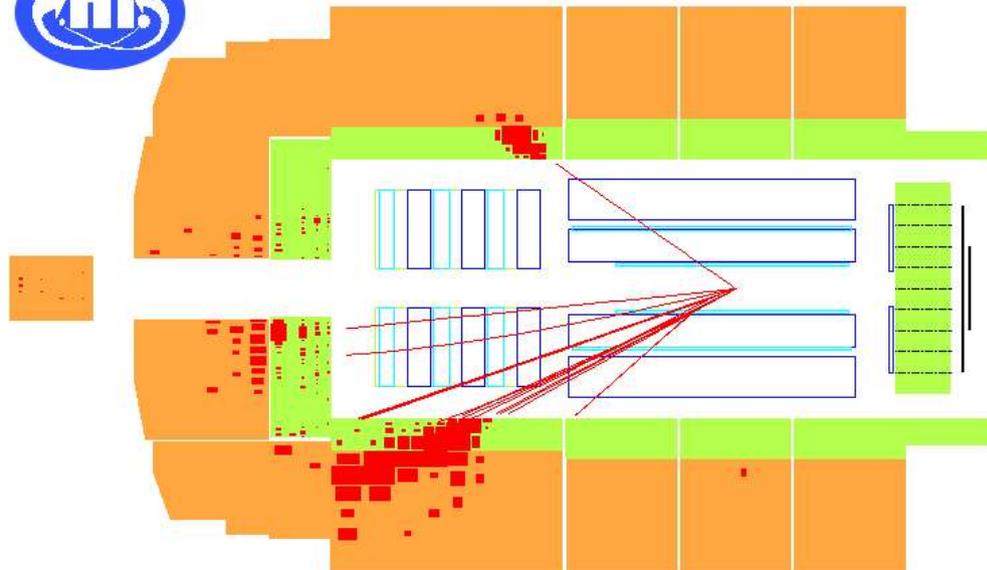
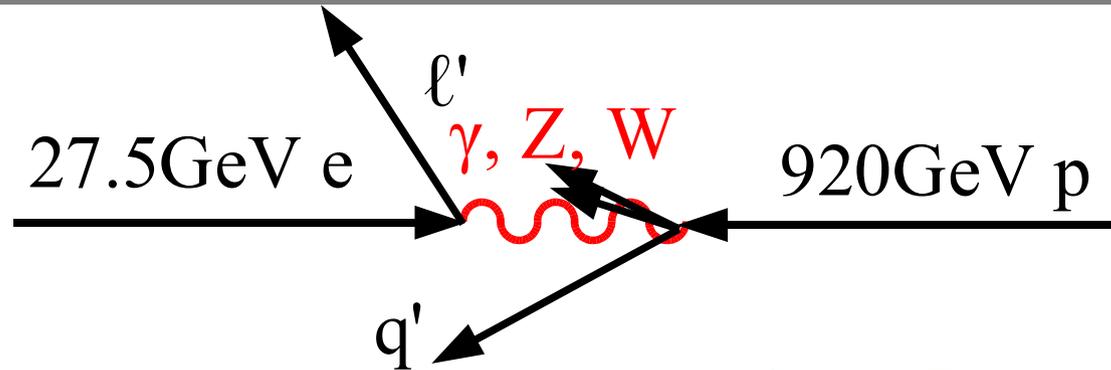
Quark-Parton-Modell: „Streuung an asymptotisch freien Quarks“

- Photonimpuls  $q=k'-k$
- Quadrierte Schwerpunktsenergie  $s=(k+P)^2 \approx 2k \cdot P$
- **Virtualität  $Q^2 = -q^2$**
- **Quarkimpuls  $x \cdot P$ :**  
Bjorken- $x = Q^2/(2q \cdot P)$
- Inelastizität  $y=q \cdot P/k \cdot P$   
( $E_\gamma/E_e$  im Proton-Ruhsystem)
- **„Masterformel“:  $Q^2 = x \cdot y \cdot s$**   
 **$\Rightarrow$  nur zwei unabhängige Variablen, normalerweise  $x$  und  $Q^2$**

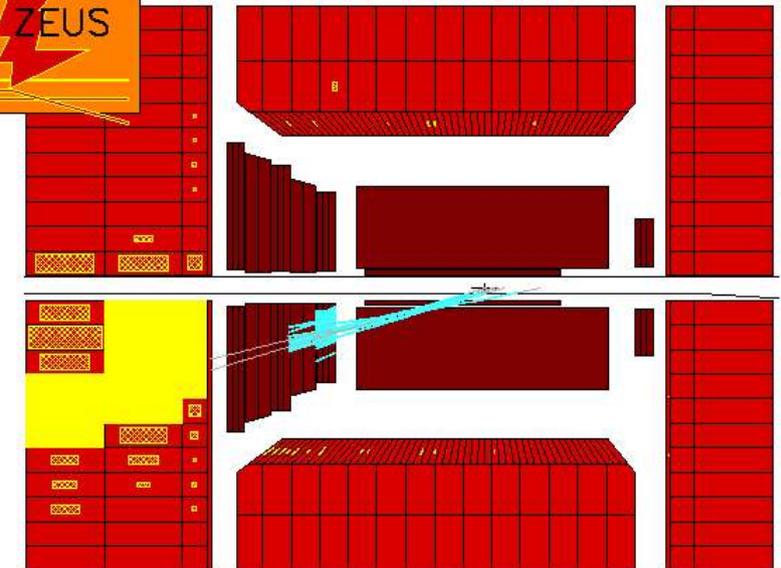


**Kinematik ist rekonstruierbar aus gestreutem Elektron und/oder hadronischem Endzustand  $\Rightarrow$  überbestimmt!**

# Zwei Sorten von Prozessen



Neutraler Strom  
 $ep \rightarrow e' X$



Geladener Strom  
 $ep \rightarrow \nu X$

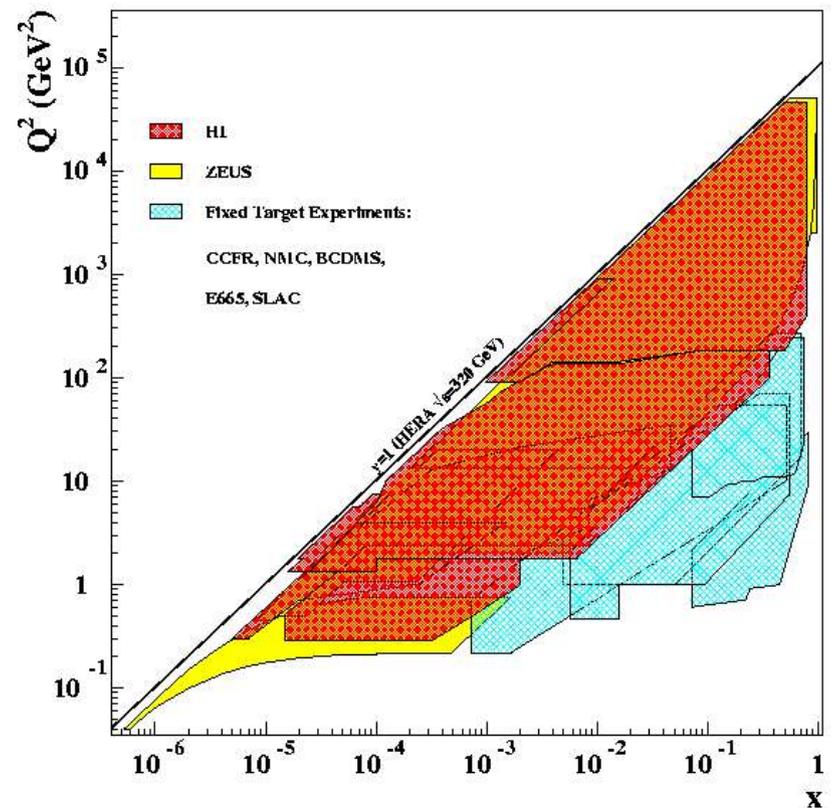
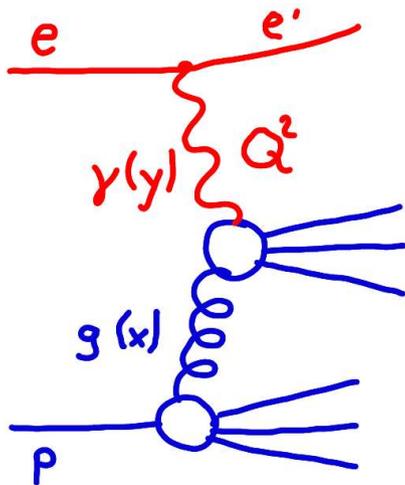
# Kinematische Ebene

HERA überdeckt mehr als 5 Größenordnungen in  $x$  und  $Q^2$

- Eröffnet neuen Bereich bei sehr kleinem  $x \Rightarrow$  hohe Partondichten
- Testet Evolution der Partondichten über weiten  $Q^2$ -Bereich

$$Q^2 = x \cdot y \cdot s$$

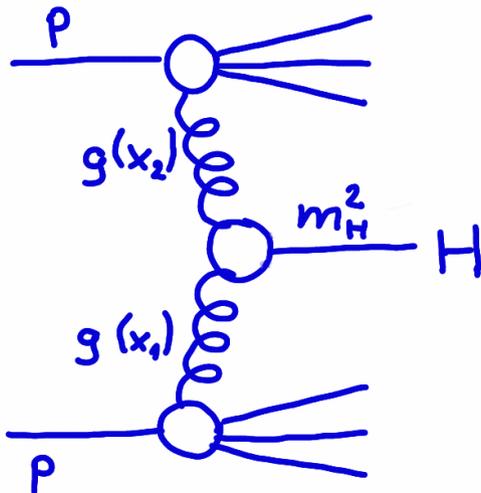
$\Rightarrow$  Nutzbarer  $y$ -Bereich bestimmt kinematisch zugänglichen Bereich



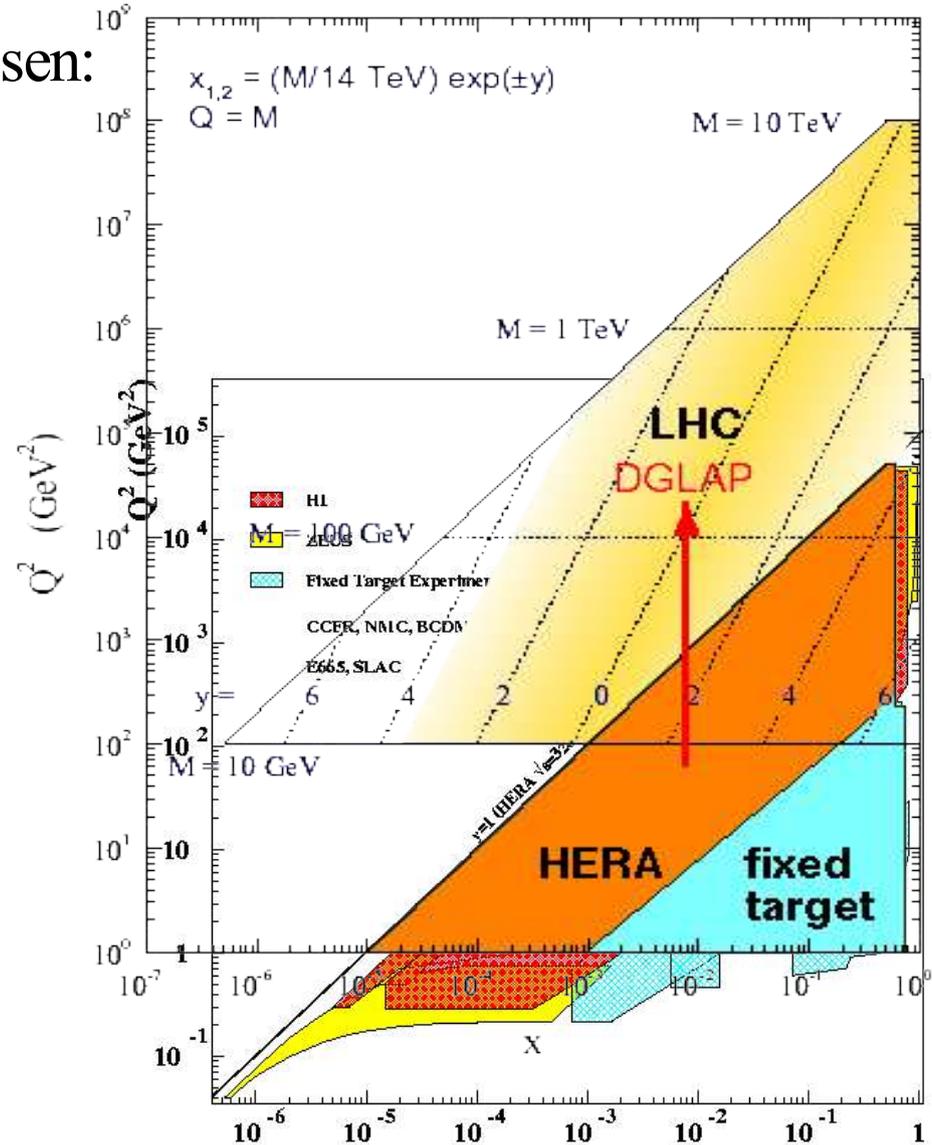
# HERA und LHC

HERA-Resultate essentiell für  
Vorhersage von LHC-Prozessen:

- Gluondichte
- Quarkdichten bei großem  $x$   
=> Entdeckungspotential!  
Braucht hohe Luminosität:  
HERA-II!



LHC parton kinematics



# HERA und LHC

**HERA AND THE LHC**  
A workshop on the implications of HERA for LHC physics

March 2004 - January 2005

Parton density functions  
Multijet final states and energy flow  
Heavy quarks  
Diffraction  
Monte Carlo tools

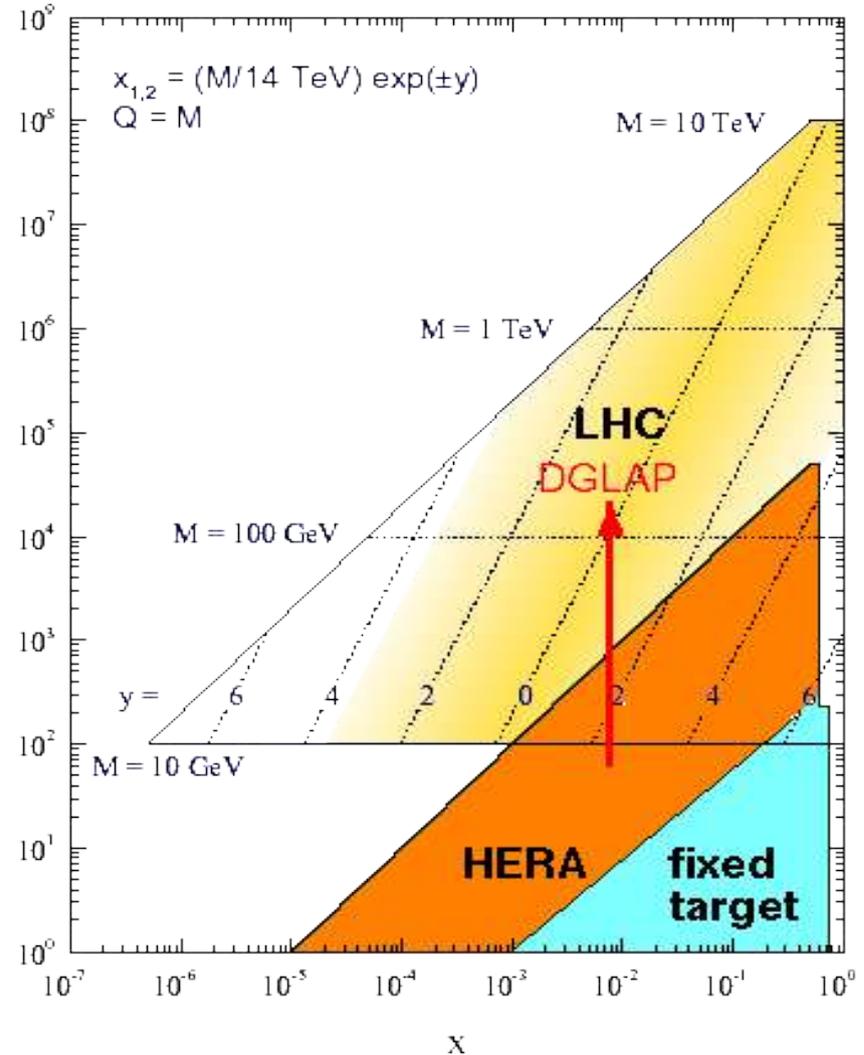
**Startup Meeting**  
March 26-27 2004  
**Midterm Meeting**  
11-13 October 2004  
CERN, Geneva  
**Final Meeting**  
January 2005  
DESY, Hamburg

Organizing Committee:  
G. Abbiati (CERN), J. Brande (DESY),  
M. Bahr (DESY), J. Butterworth (LHC),  
A. Dechade (DESY), J. Kwiecinski (DESY),  
H. Jung (DESY), J. Kwiecinski (DESY), M. Krawinkel (DESY),  
A. Morfonis (CERN), P. Newman (Birmingham),  
G. Poleschi (INFN), G. Schneider (EPFL),  
R. Yoshida (JHU).

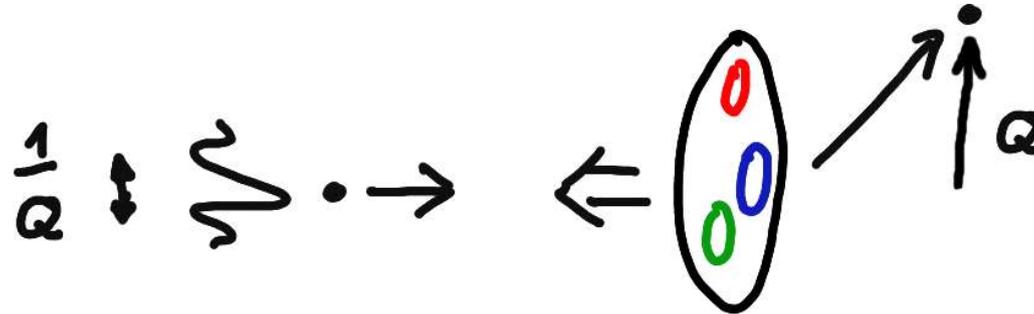
Advisory Committee:  
G. Barone (Hamburg), M. Dole (Hamburg) (CERN),  
J. Ellis (CERN), J. Garraffo (CERN),  
G. Gustafson (Lund), G. Ingelman (Uppsala),  
P. Janus (CERN), R. Kniehl (DESY),  
M. Koba (DESY), L. Motyka (DESY),  
T. Nakatsu (CERN), D. Schaerer (CERN),  
F. Schwenn (DESY), J. Sjöstrand (CERN),  
J. Sjöstrand (DESY), W.R. Turk (Michigan),  
A. Wagner (DESY), R. Yoshida (JHU).

[www.desy.de/~heralhc](http://www.desy.de/~heralhc) [heralhc.workshop@cern.ch](mailto:heralhc.workshop@cern.ch)

LHC parton kinematics



# Parton-Modell

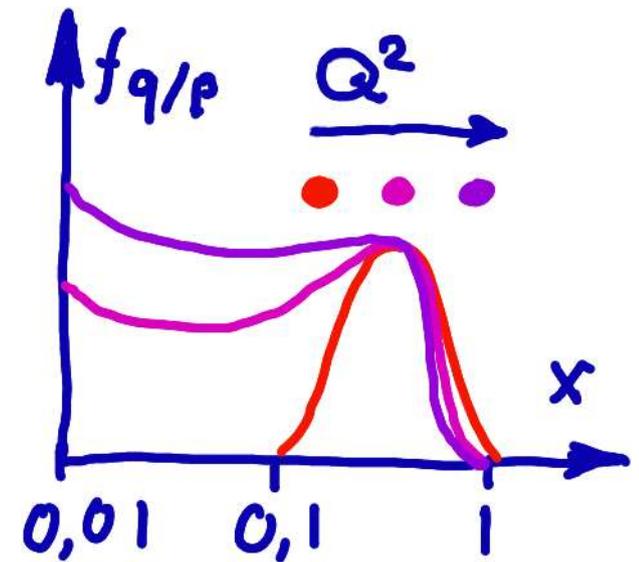
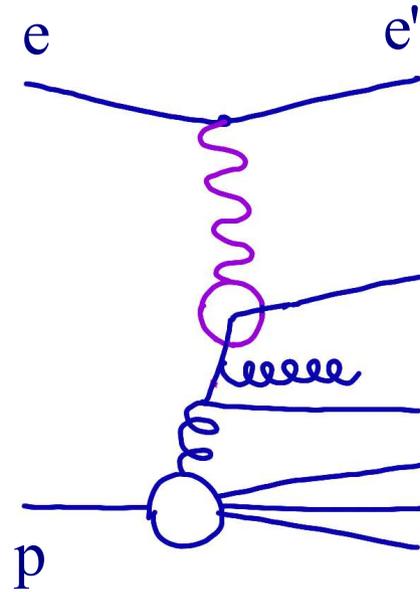
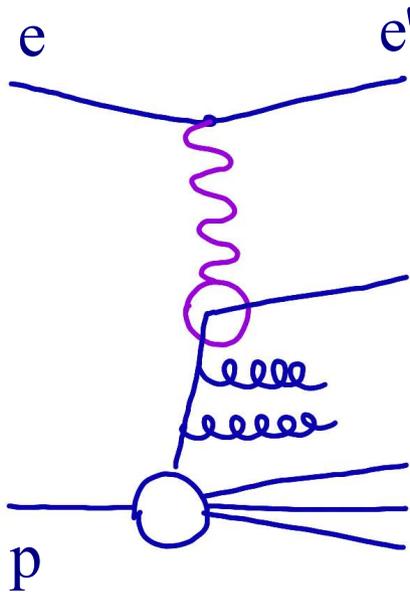


- Schwerpunktsystem:  
Lorentz-Kontraktion des Protons, Zeitdilatation der Partonbewegung  
– => Elektron „sieht“ statische Partonverteilung  
– Heisenberg: Ortsauflösung  $\approx 1/\text{Transversalimpuls} \approx 1/Q$ :  
 $Q^2=4\text{GeV}^2: \delta x=0.1\text{fm}$        $Q^2=20000\text{GeV}^2: \delta x=0.0014\text{fm}$
- Streuung an asymptotisch freien Quarks:  $d\sigma/dQ^2$
- Fluss von Quarks unterschiedlicher Impulse:  $d^2\sigma/dQ^2 dx \sim F_2(x, Q^2)$
- $x \cdot F_2(x) = e_u^2 f_{u/p}(x) + e_d^2 f_{d/p}(x) + \dots$

# QPM → QCD: Skalenverletzungen!

QCD:  $F_2$  hängt von  $Q^2$  ab.

DGLAP-Gleichungen: Erlauben Evolution von kleinem zu größerem  $Q^2$ .



Valenzquarks:

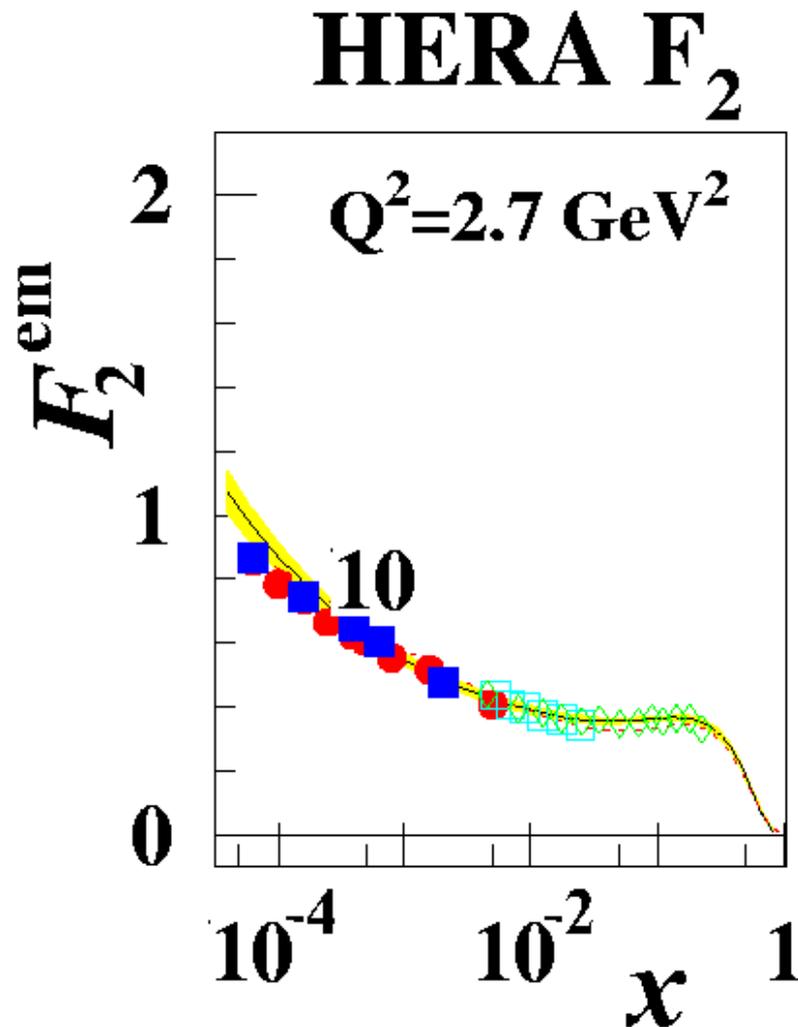
$F_2$  sinkt bei großem  $x$

$F_2$  steigt bei kleinem  $x$

Seequarks:

$F_2$  steigt bei kleinem  $x$

# Messung von $F_2$



- Präzise Daten hoher Qualität, Fehler 2-5% für  $2.7 < Q^2 < 120 \text{ GeV}^2$
- Grundlage für genaue Fits der Partondichten und Messung von  $\alpha_s$
- Hervorragende Beschreibung durch NLO-QCD-Fit: Test der QCD!

 ZEUS NLO QCD fit

 H1 PDF 2000 fit

 H1 96/97

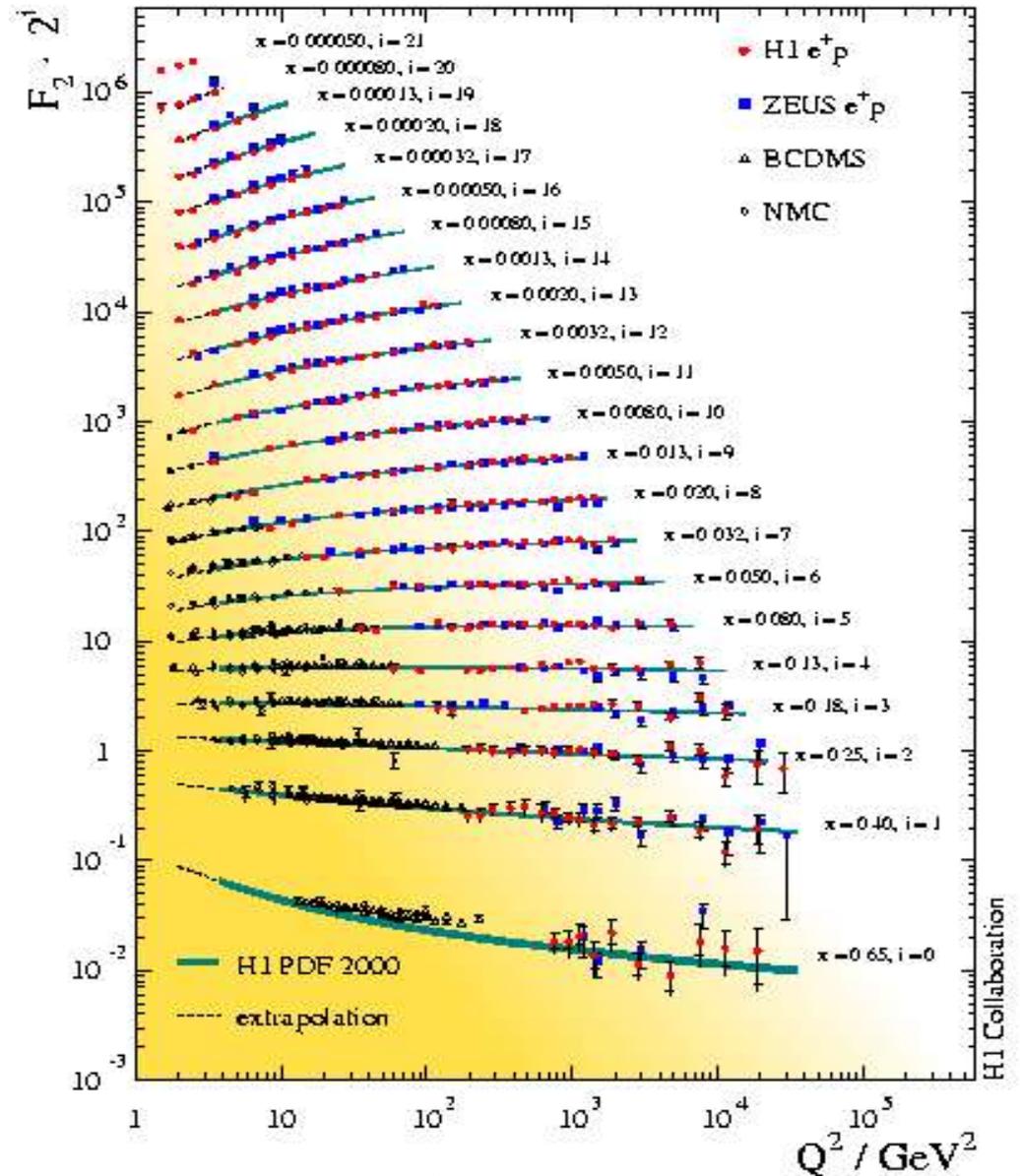
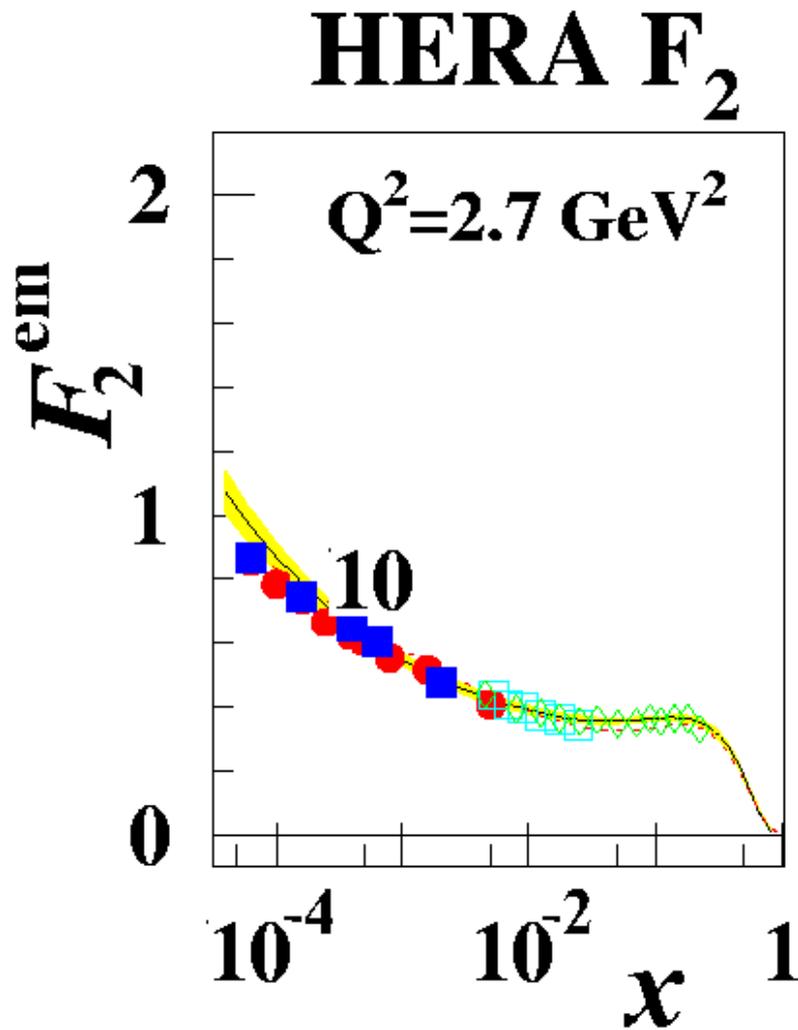
 BCDMS

 ZEUS 96/97

 E665

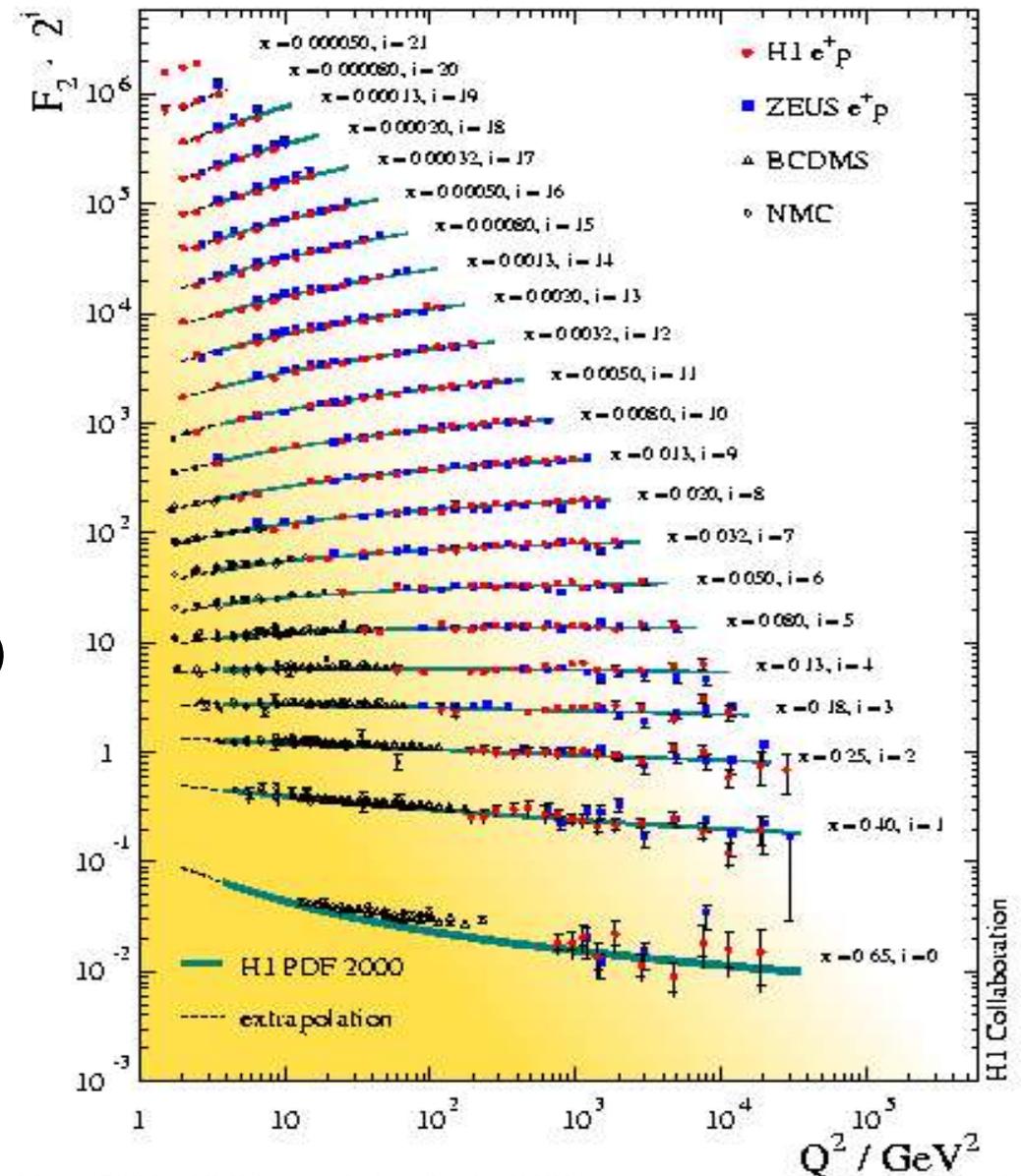
 NMC

# Messung von $F_2$

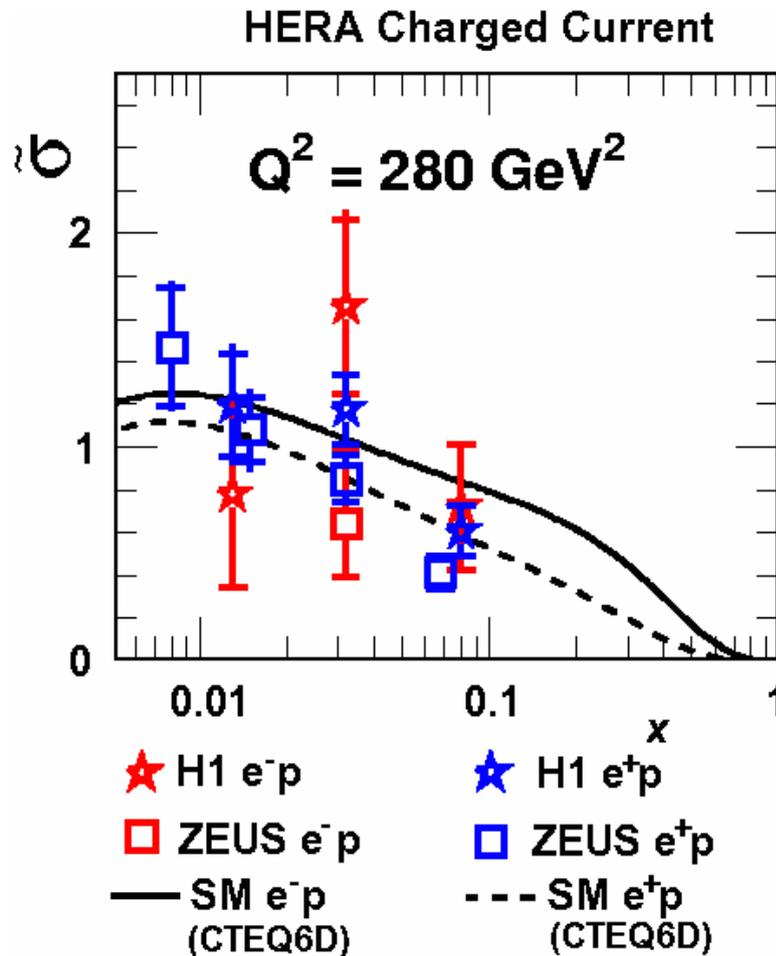


# $F_2$ im Überblick

- Kinematischer Bereich:
  - 4 Dekaden in  $x$ :  
 $0.000065 < x < 0.65$
  - $Q^2$  bis  $30000 \text{ GeV}^2$
- HERA-I-Daten fast komplett analysiert
- HERA-II:
  - 3-fache ( $e^+$ ) bis 20-fache ( $e^-$ ) Datenmenge
  - => bessere Genauigkeit bei kleinem  $x$ , großem  $Q^2$

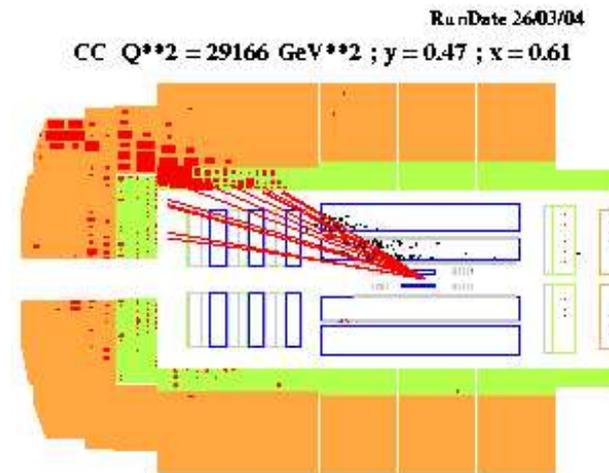


# CC-Wirkungsquerschnitt



$$ep \rightarrow \nu X$$

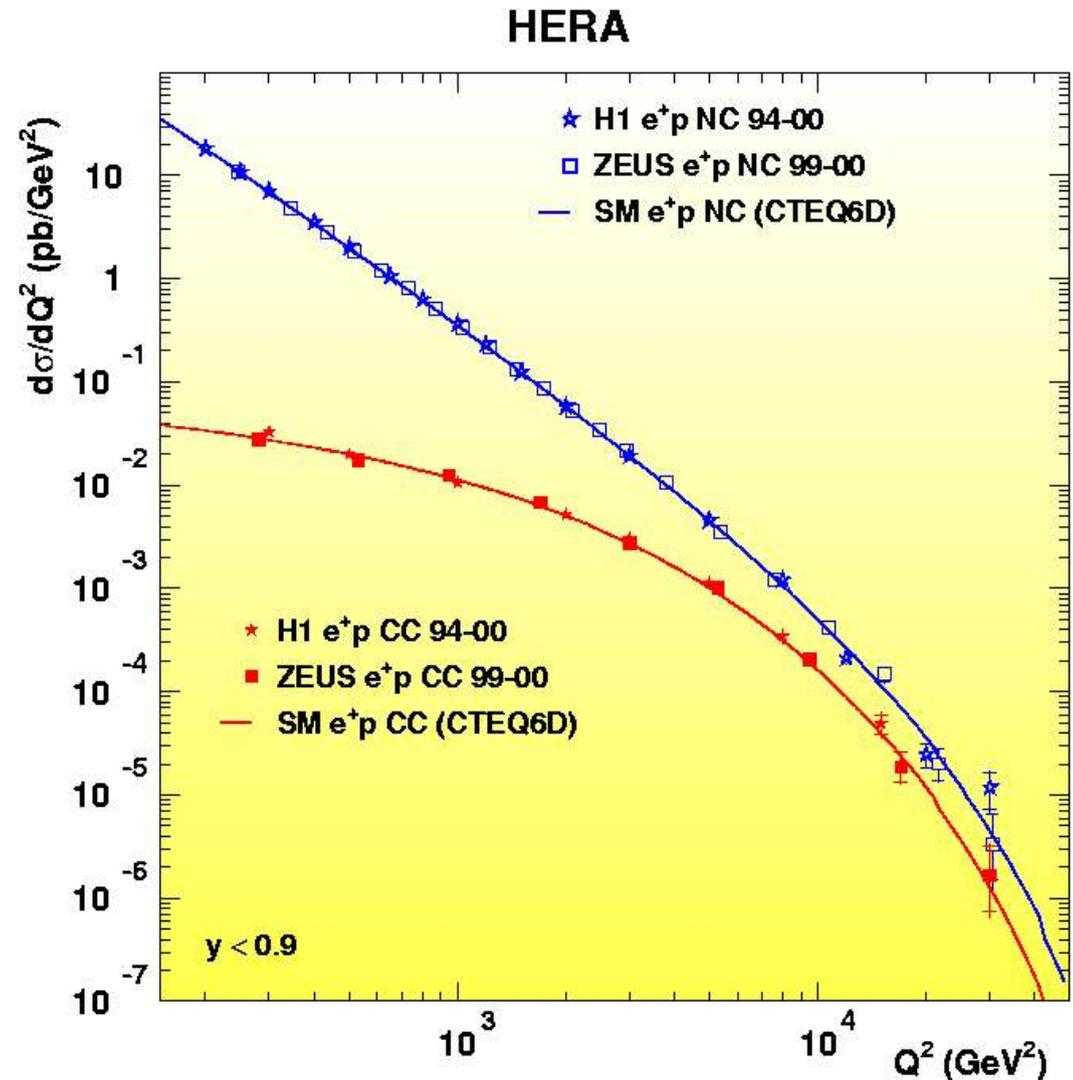
- Kinematik bestimmt aus dem hadronischem Endzustand
- $e^-p$ : Streuung an  $u, \bar{d}, \bar{s}$
- $e^+p$ : Streuung an  $d, s, \bar{u}$
- $\Rightarrow$  Trennt zwischen  $u$  und  $d$ !



CC-Event vom 26.3.04  $Q^2=29166 \text{ GeV}^2$

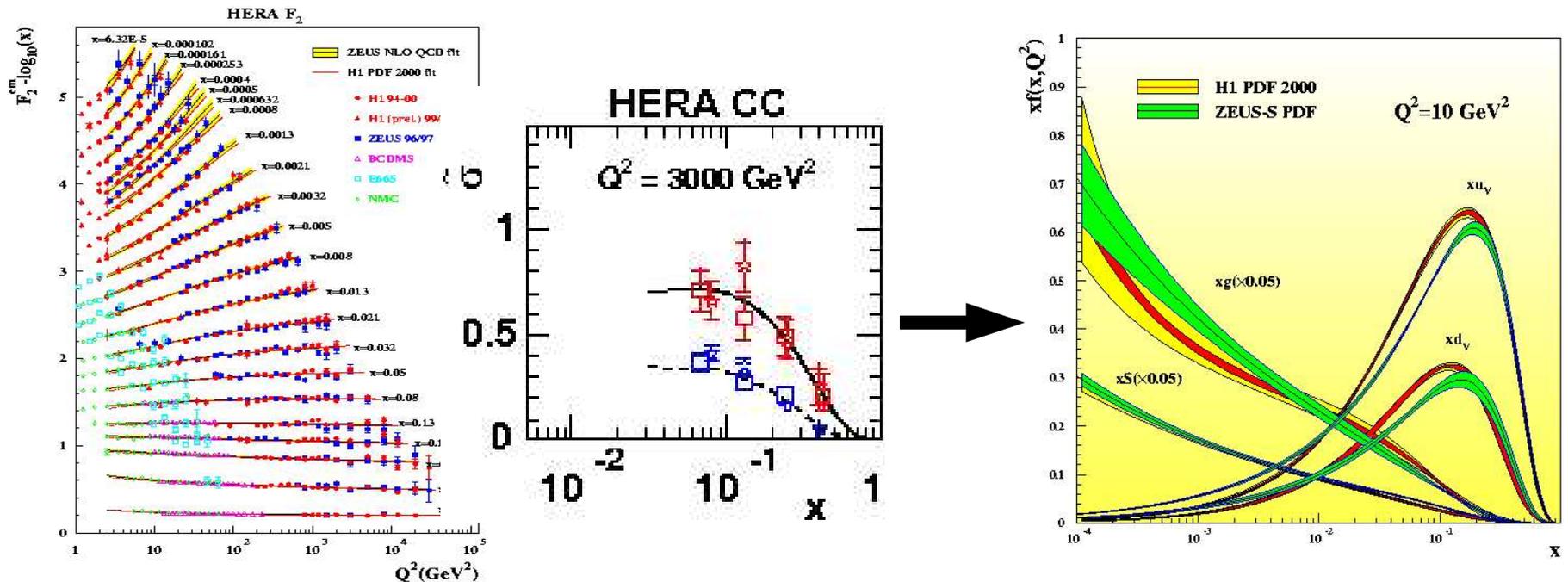
# „Elektroschwache Vereinigung“

- Bei  $Q^2 \approx m_W^2$  werden  $\gamma/Z^0$ - und W-Austausch (NC und CC) gleich stark
- W-Propagatormasse:  
 $m_W = 78.9 \pm 2.0 \pm 1.8$  GeV (ZEUS)

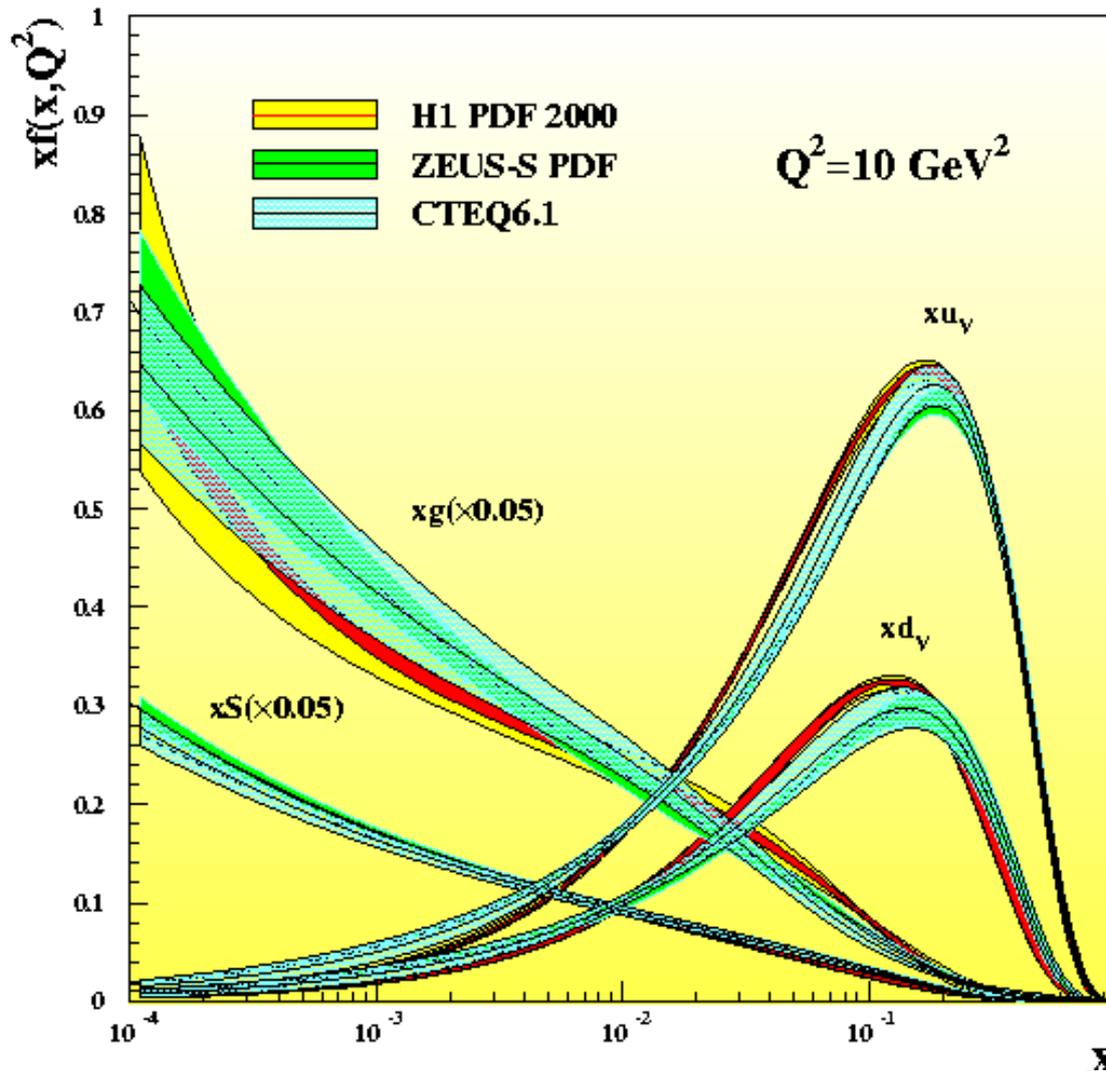


# Extraktion von Partondichten

- Parametrisiere Partondichten (u, d, s, g...) bei Startskala  $Q_0^2$   
z.B.  $x \cdot G(x) = A \cdot x^B \cdot (1-x)^C \cdot (1+D \cdot x)$   
 $\Rightarrow$  11/10 freie Parameter (ZEUS-S/H1-2000)
- Benutze DGLAP-Gleichungen zur Evolution zu beliebigem  $Q^2$
- Vergleiche mit Messungen, passe Parameter an



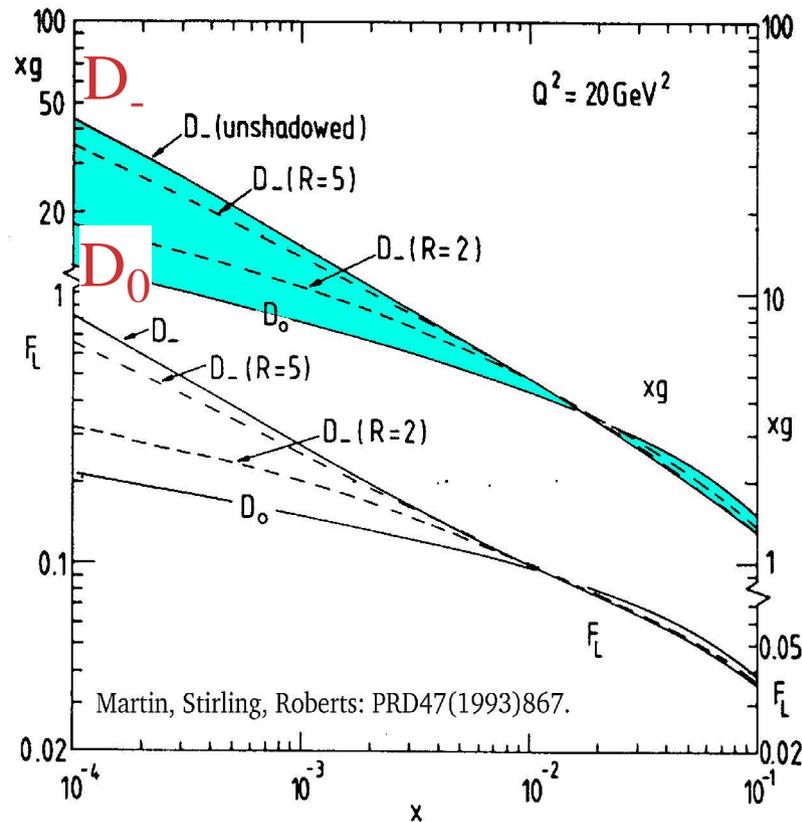
# Partondichten: Resultat



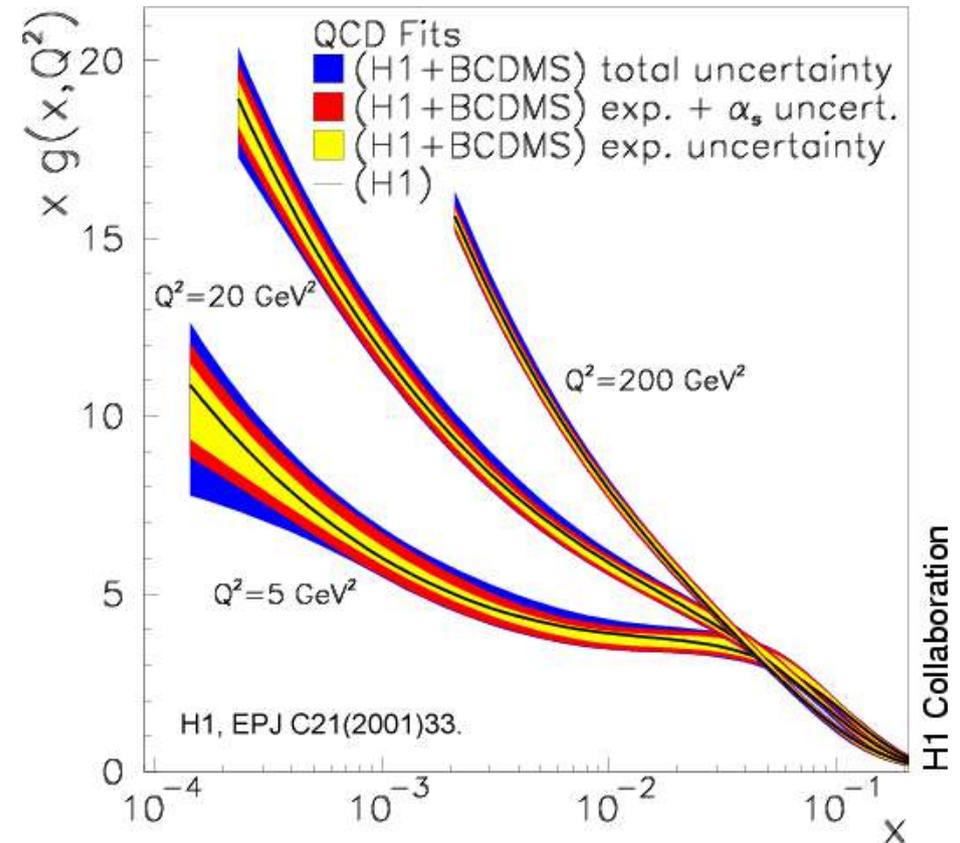
- Qualitative Übereinstimmung H1-ZEUS
- Unterschiede bedingt durch verschiedene Fit-Methoden und (externe) Datensätze

Beachte: Seequarkdichte  $S$  und Gluondichte  $g$  herunterskaliert um Faktor 20!

# Gluondichten vor/nach HERA



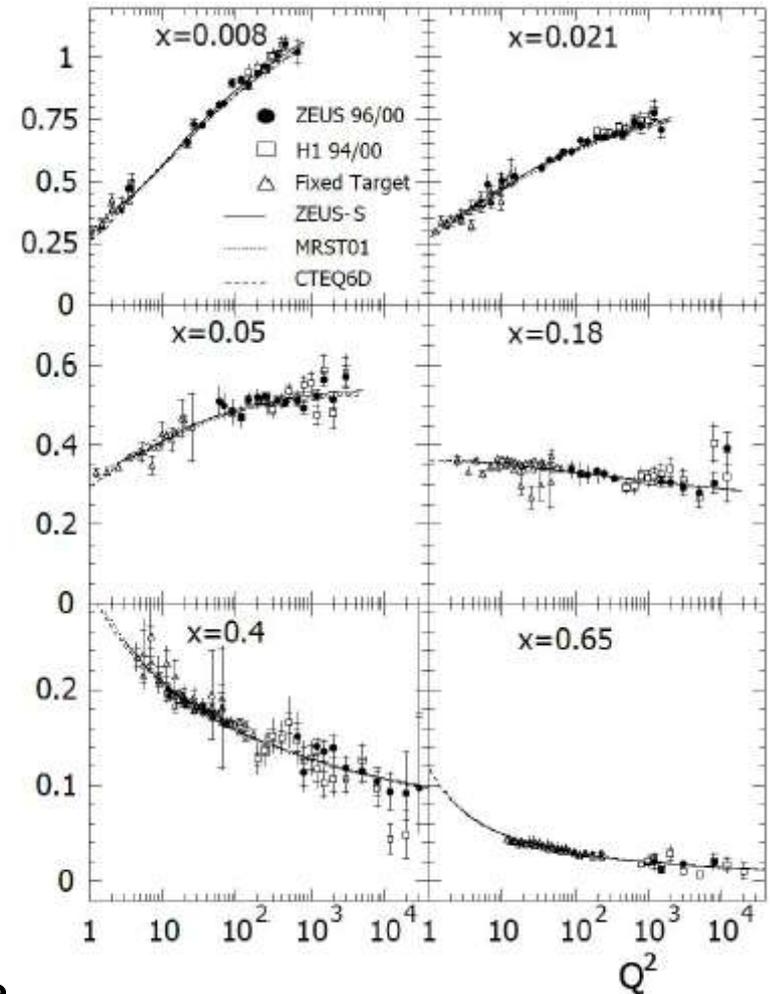
1993: Unsicherheit Faktor 3  
 bei  $x=2 \cdot 10^{-4}$ ,  $Q^2=20 \text{ GeV}^2$   
 (theoretische Schätzung!)



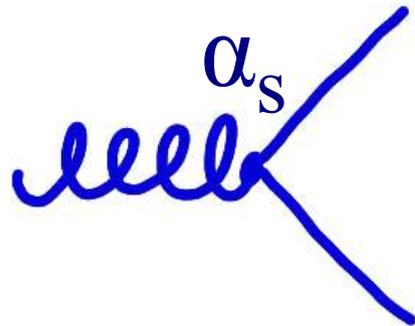
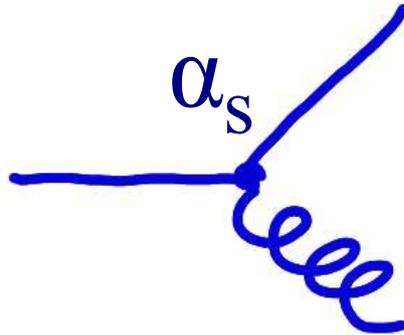
2001:  $\pm 5\%$  Unsicherheit,  
 basierend auf Messungen

# Ein Erfolg für DGLAP

- Zusammen mit *Fixed-Target*-Daten: Test der Skalenverletzungen über 4 Größenordnungen in  $Q^2$  bei festem  $x$
- NLO-QCD-Fits basierend auf DGLAP-Evolution beschreiben Daten hervorragend
- Keine offensichtlichen Abweichungen vom „Standardmodell der Partondichten“
- Aber:
  - Gluondichte kompatibel mit Jet-Daten vom Tevatron?
  - Beschreibung hadronischer Endzustände bei low  $x$  problematisch



# Extraktion von $\alpha_s$



Skalenverletzungen

- Proportional zu  $\alpha_s$  und Gluondichte
- Bei hohem  $x$ : Gluonabstrahlung von Quarks dominiert,  $\partial F_2 / \partial \ln Q^2$  erlaubt Messung von  $\alpha_s$
- *Gluon Splitting* dämpft Skalenverletzung durch Gluonabstrahlung  
=> Verlässliche Bestimmung von  $\alpha_s$  aus DIS benötigt sehr gutes Verständnis der Gluondichte über weiten kinematischen Bereich!

# $\alpha_s$ aus Strukturfunktionen

## Resultate aus NLO QCD-Anpassungen an $F_2$ :

- H1:  $\alpha_s(M_Z)=0.1150\pm 0.0017$   $\begin{matrix} +0.0009 \\ -0.0005 \end{matrix}$

*exp. model*

Variation der Faktorisierungs- und Renormierungsskala: 0.005

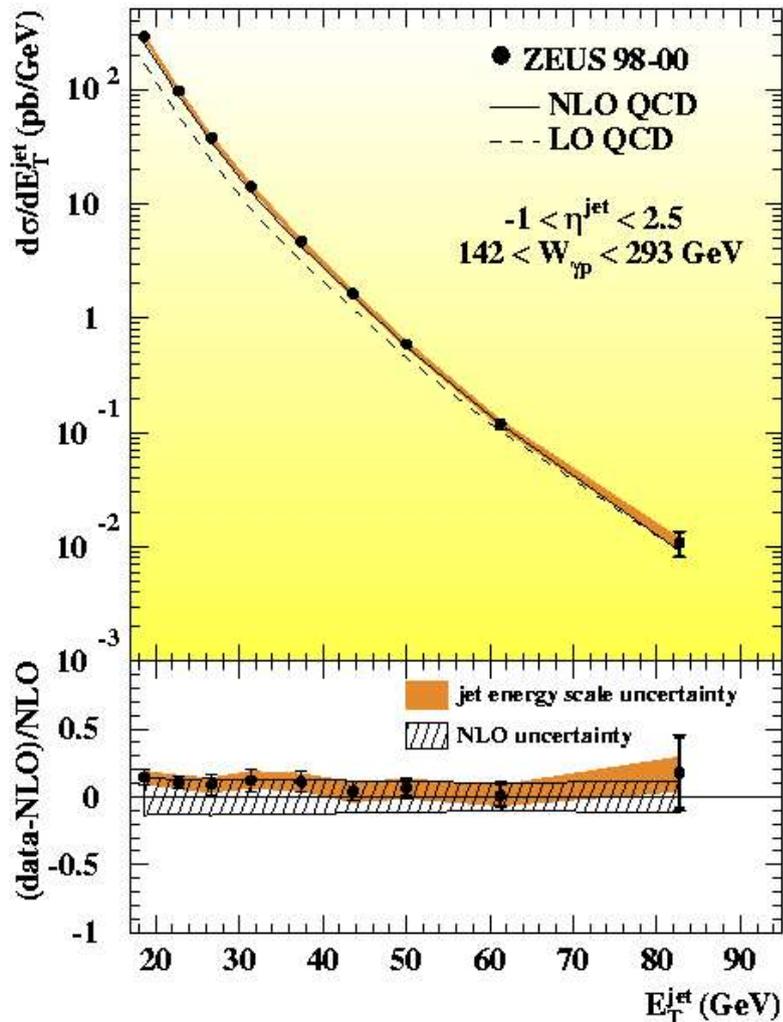
- ZEUS:  $\alpha_s(M_Z)=0.1166\pm 0.0008\pm 0.0032\pm 0.0036\pm 0.0018$

*uncorr. corr. norm. model*

Variation der Faktorisierungs- und Renormierungsskala: 0.004

# $\alpha_s$ aus Jetraten

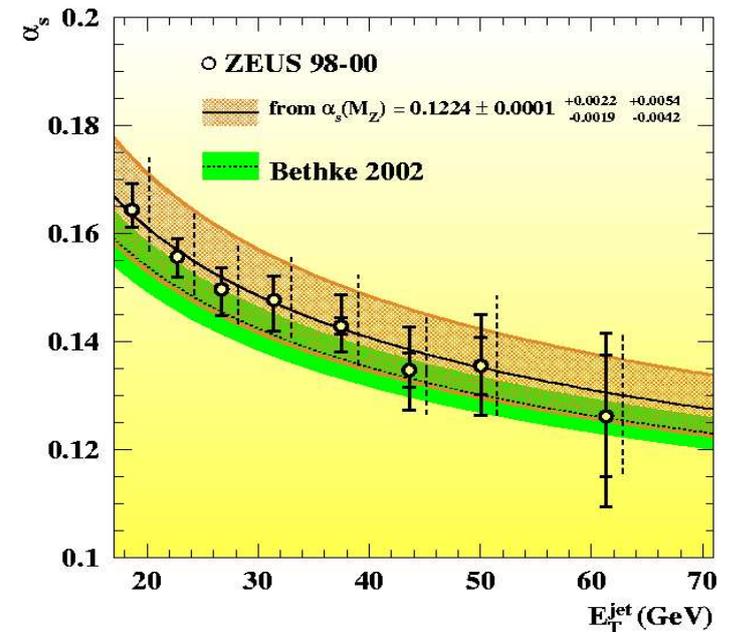
## ZEUS



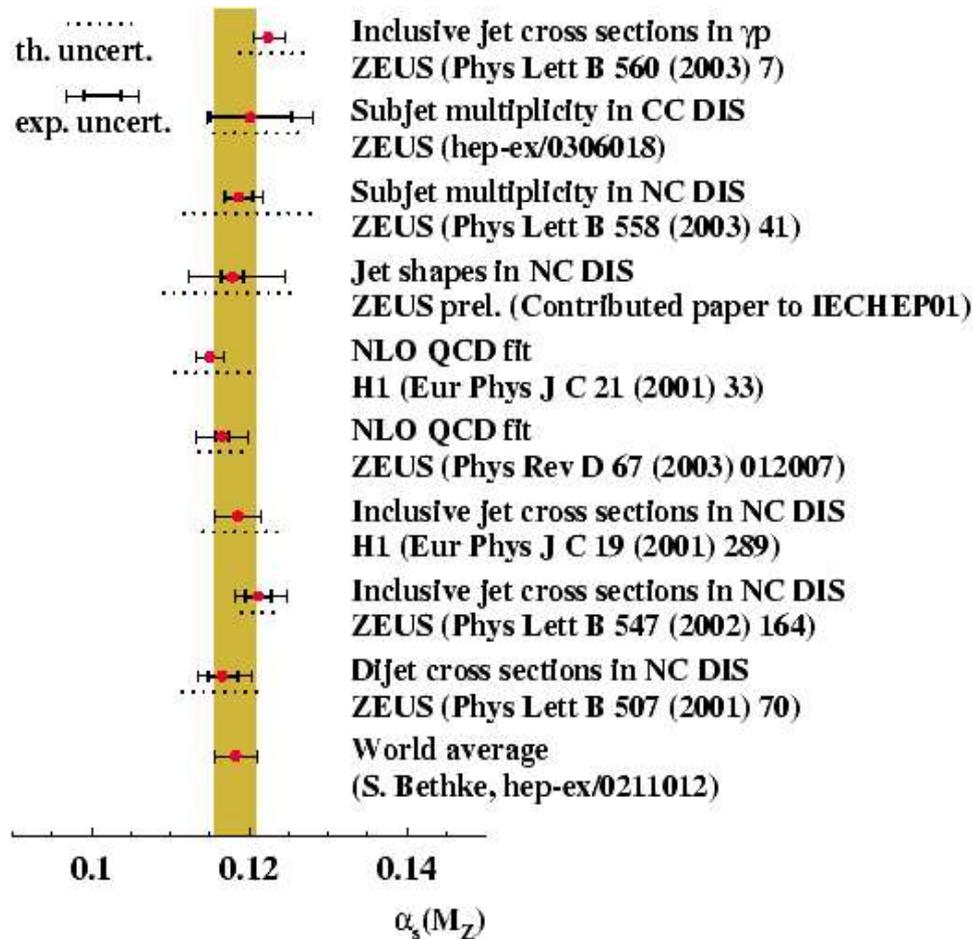
ZEUS: DESY-02-228

- Jetraten in Photoproduktion
- NLO QCD-Fit
- $\alpha_s(M_Z) = 0.1124 \pm 0.0001$ 

$+0.0022$	$+0.0054$
$-0.0019$	$-0.0042$
<i>stat.</i>	<i>exp. theory</i>



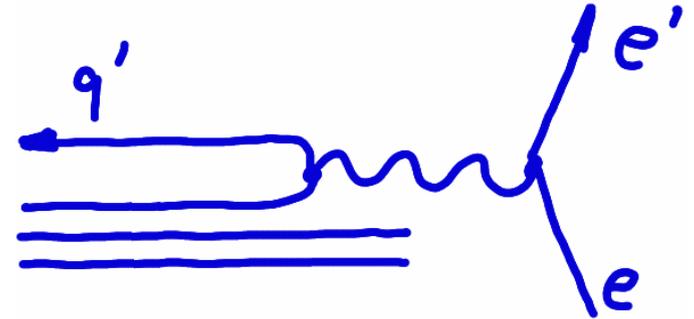
# Übersicht: $\alpha_s$



- Große Anzahl von NLO  $\alpha_s$ -Messungen bei HERA
- Ergebnisse sind konsistent untereinander und mit Welt-Mittelwert
- Skalenunsicherheit von typ. 0.004 bei NLO dominiert über experimentelle Fehler
- Neu: Rechnungen in NNLO (Vermaseren et al)  
=> Messungen gehen in eine neue Runde!

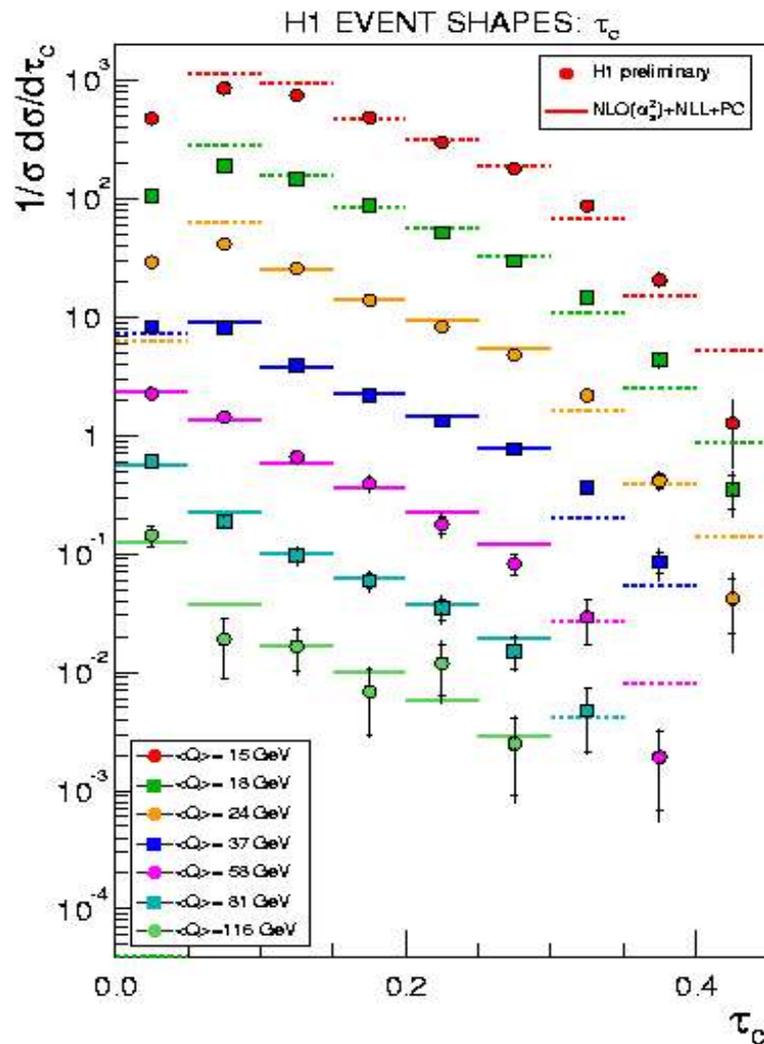
# Event Shapes

- Breit-Frame:  $p(q) \rightarrow -p(q)$
- Quark-Hemisphäre:  
„halbes  $e^+e^-$ -Ereignis“

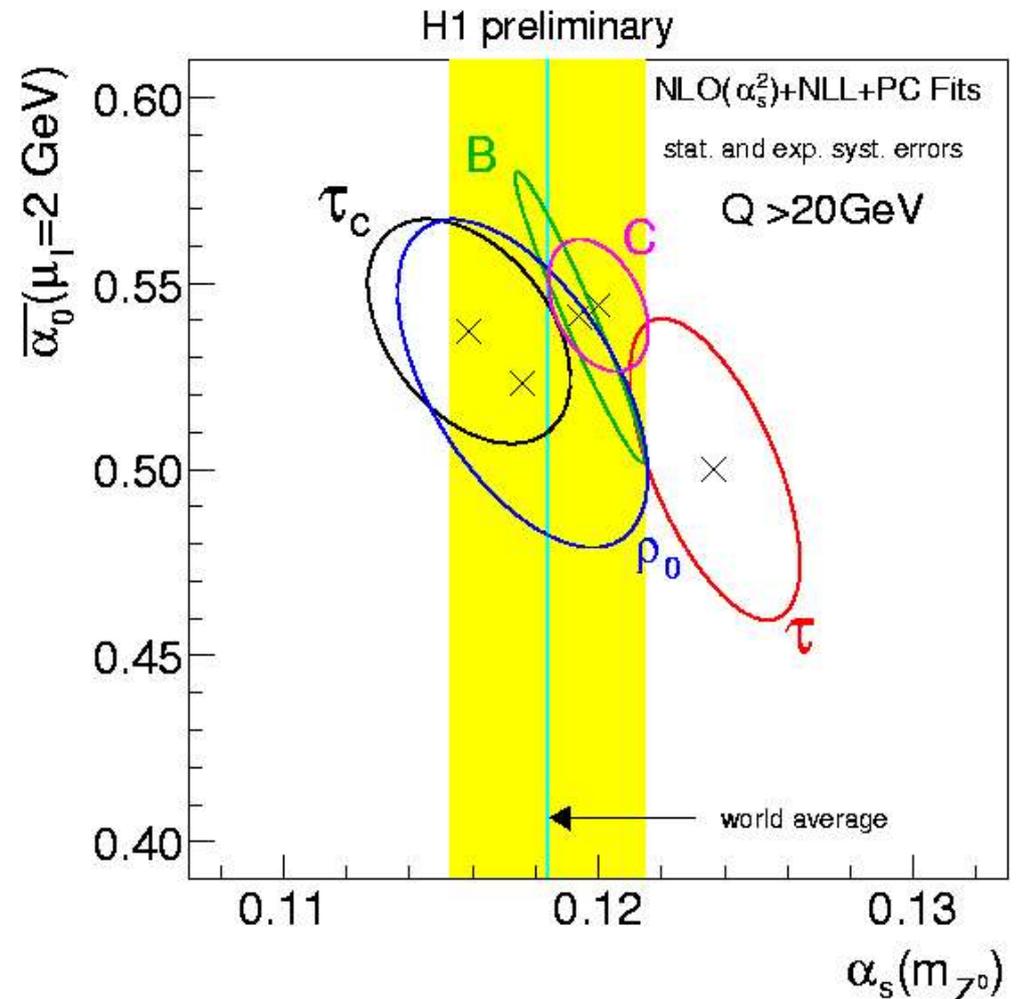


- *Event-Shape-Variablen: Thrust, jet broadening, jet mass, etc.:*  
Infrarot-sichere Observablen, unterliegen QCD-Evolution
- Dokshitzer & Webber: Power corrections  
 $\langle A \rangle = \langle A_{\text{NLO}} \rangle + \text{const}/Q$ ;  
 $\text{const} \sim \bar{\alpha}_0$  absorbiert langreichweitige Effekte
- Dasgupta & Salam 2002: NLO+NLL-Rechnung verfügbar

# $\alpha_s$ aus *Event Shapes*



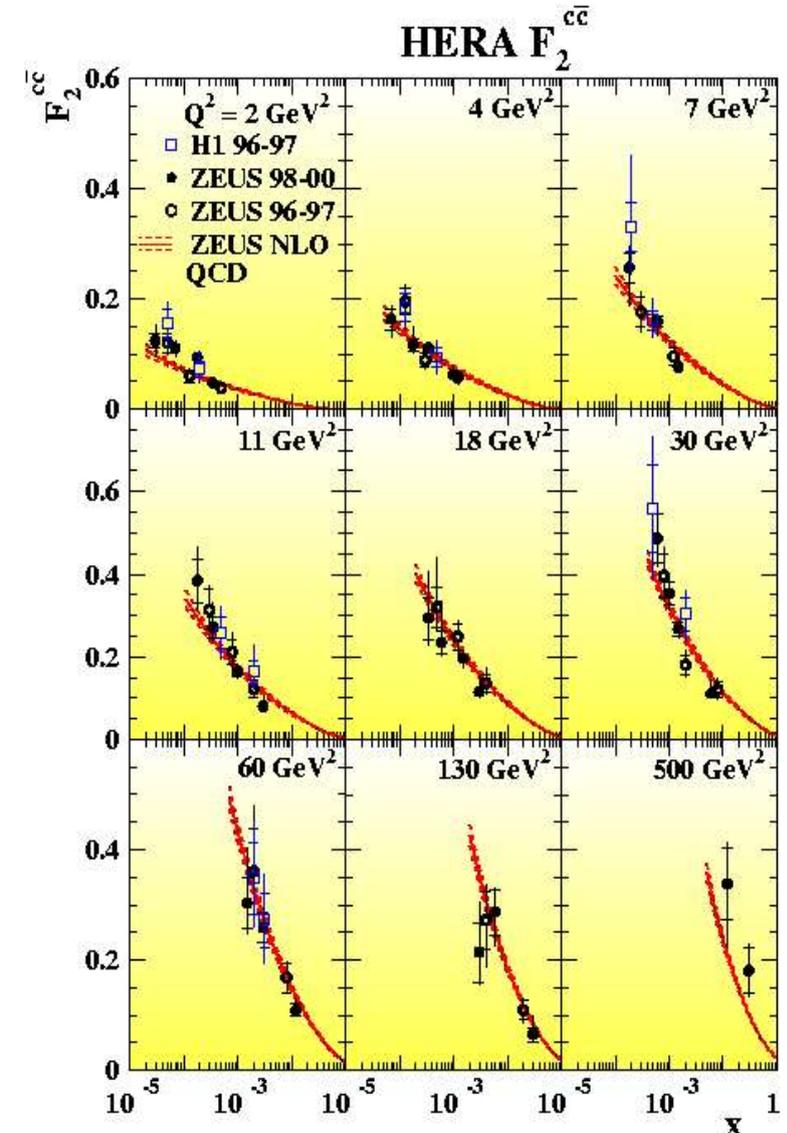
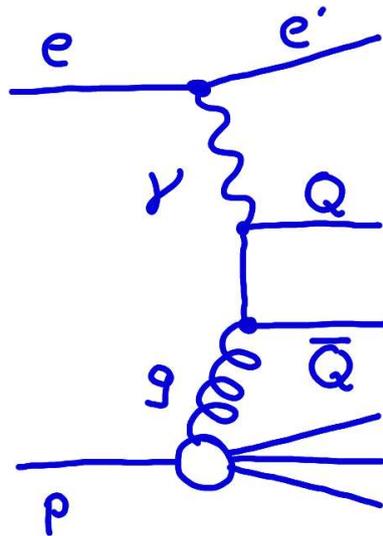
+9 weitere Variablen (4 mit Power corrections gefittet)



Theoretische Unsicherheit von typ  $\pm 5\%$  nicht dargestellt

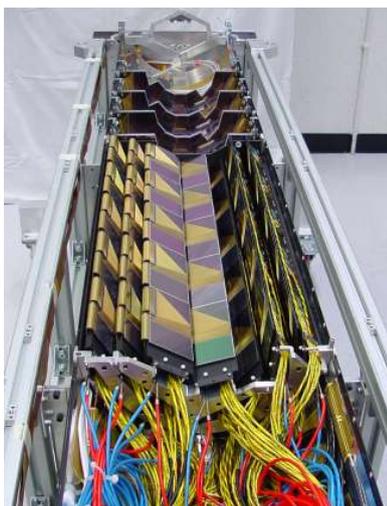
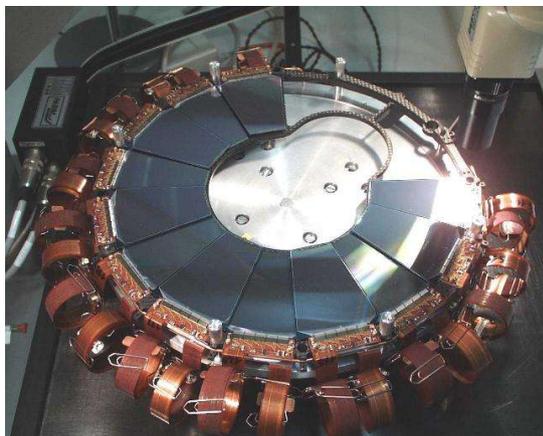
# Produktion von Charm-Quarks

- Produktion schwerer Quarks dominiert durch Boson-Gluon-Fusion
- Vorhersage von Charm-Produktion auf Basis der Gluondichte aus  $F_2$ -Messung in NLO beschreibt Daten: wichtiger QCD-Test!
- Charm: 30% von  $F_2$  bei hohem  $Q^2$

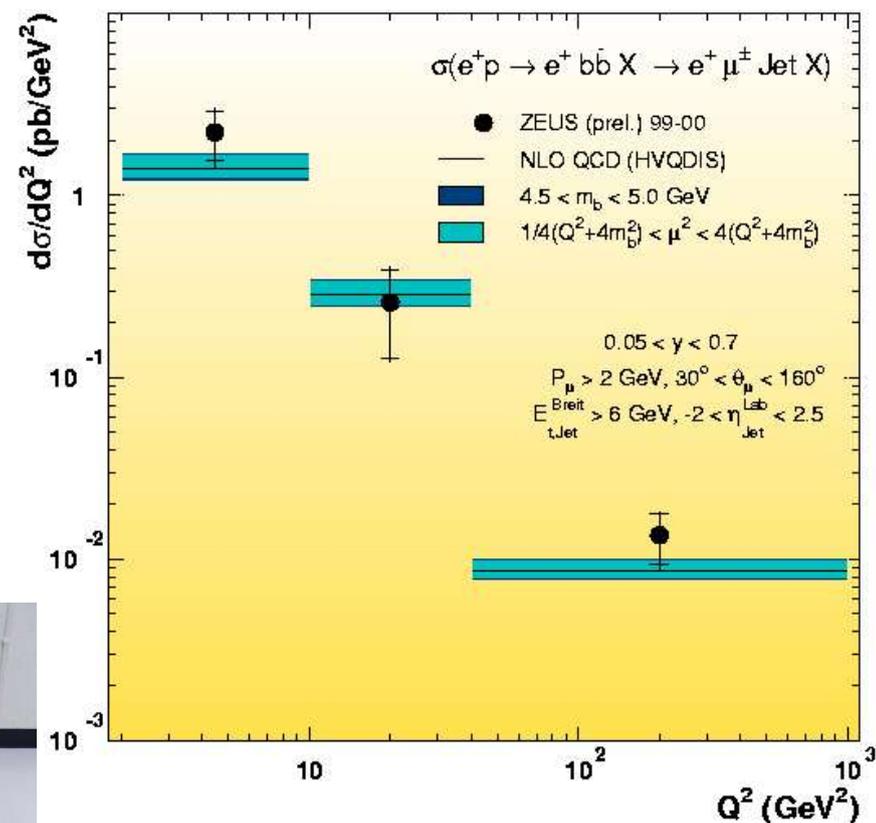


# Der nächste Schritt: Bottom

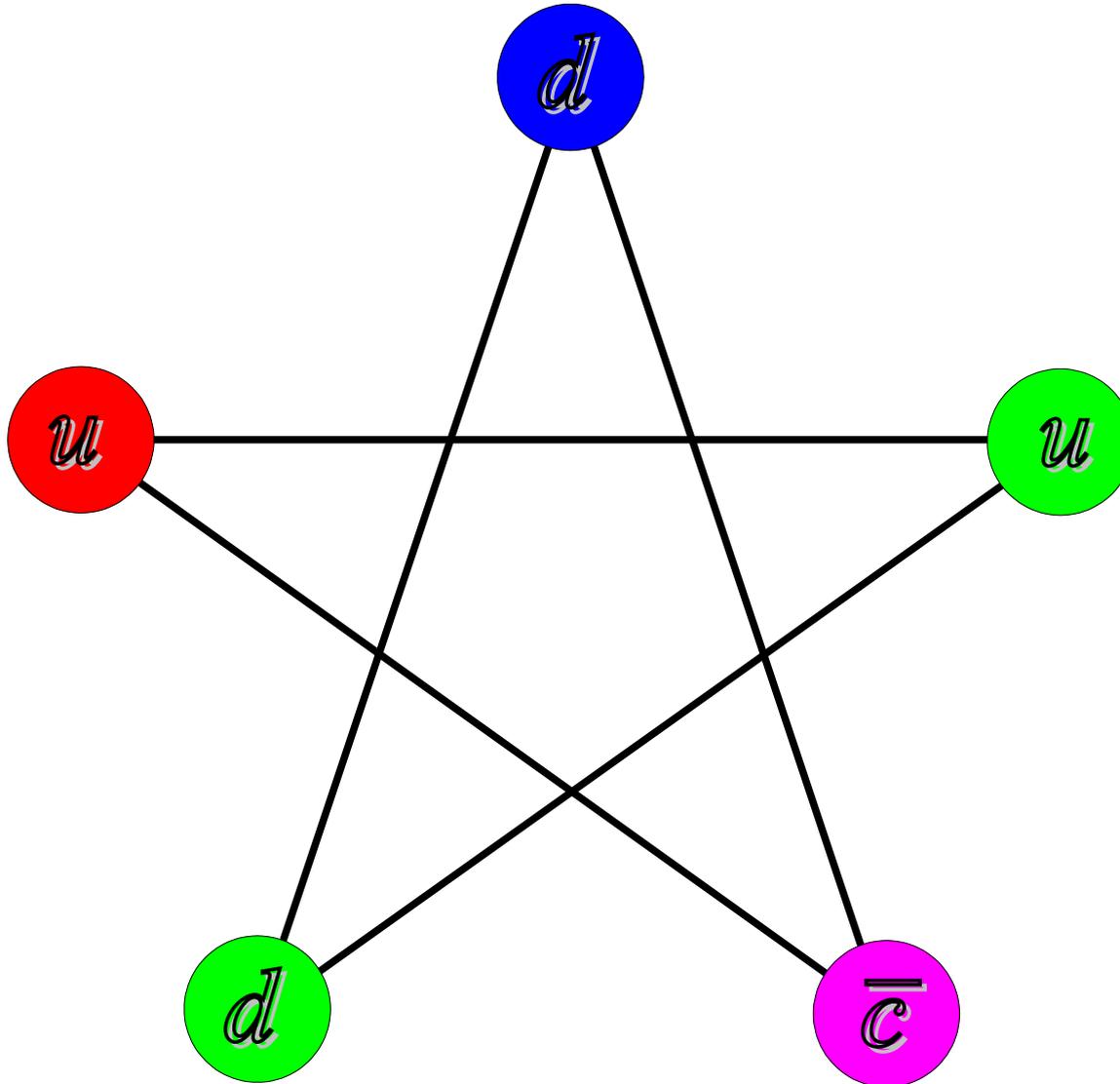
- B-Tagging mit Myonen+Jets oder Sekundärvertex-Information
- DIS: Gute Übereinstimmung mit NLO-Vorhersagen
- Photoproduktion: Wirkungsquerschnitte zu hoch?  
=> Braucht mehr Statistik, bessere Detektoren: HERA-II



## ZEUS



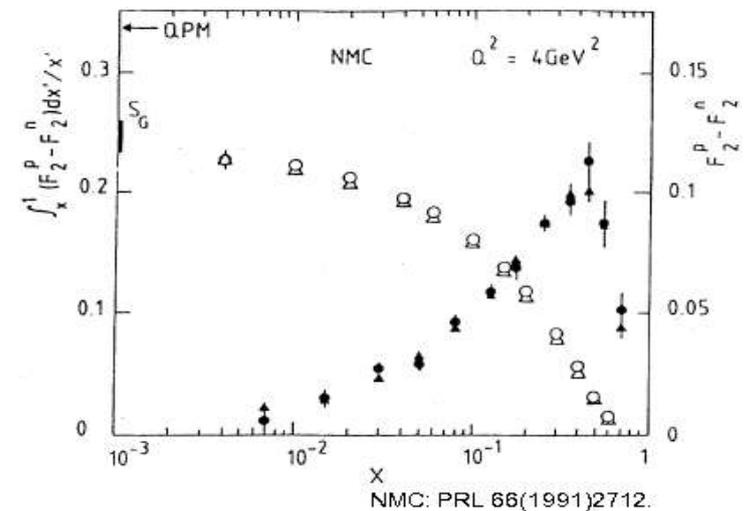
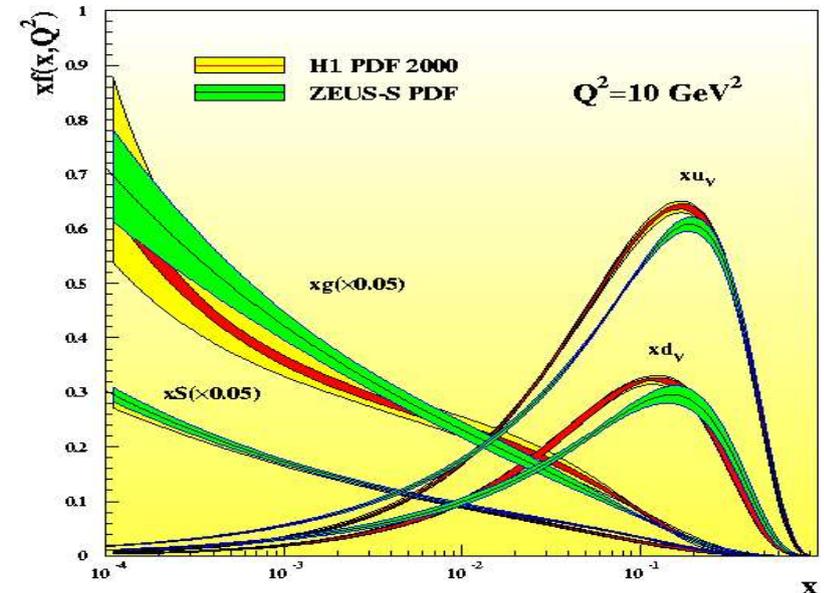
# Pentaquarks



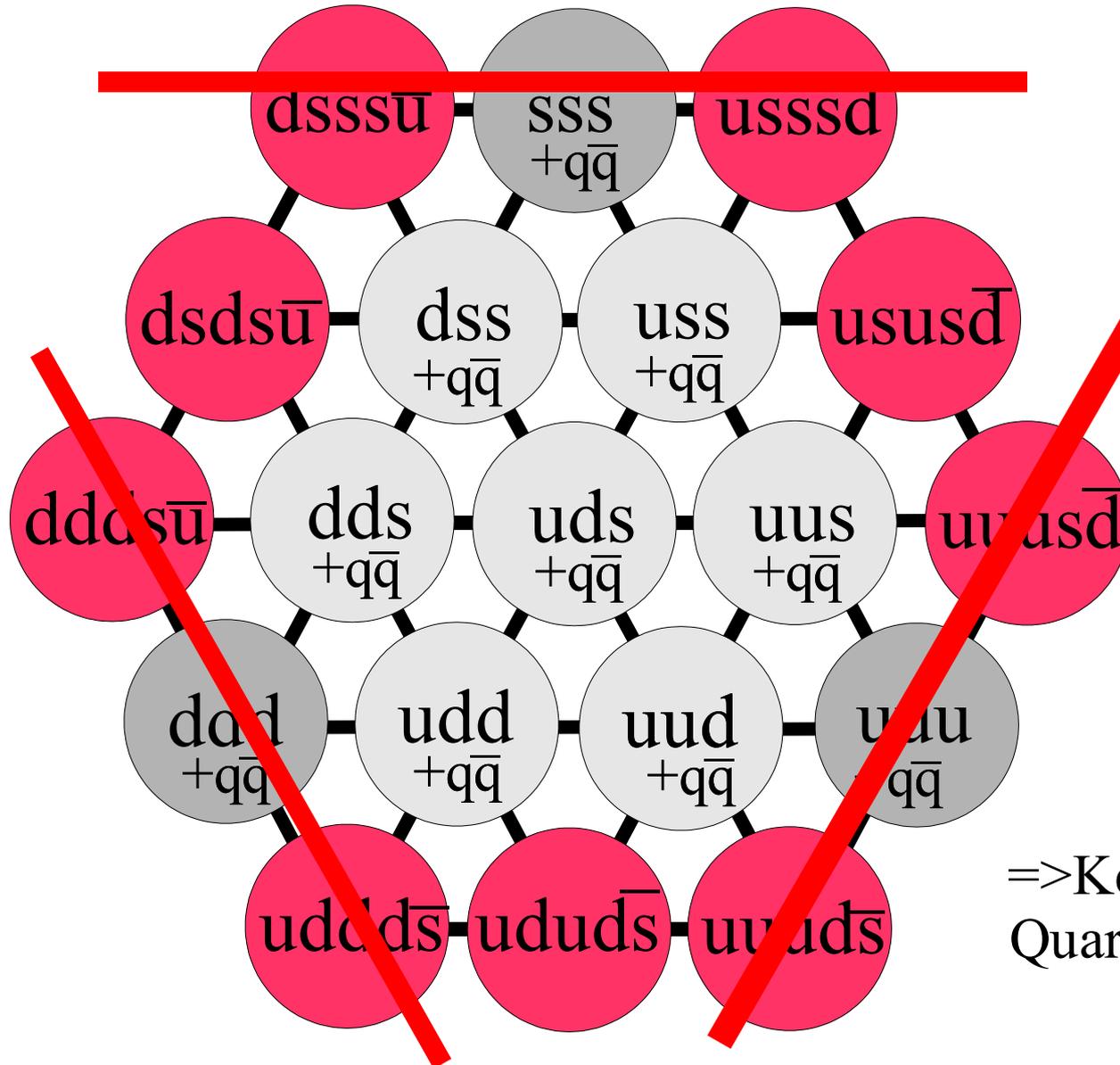
# Das Proton: Mehr als 3 Quarks?!

- Seequarks: Proton enthält  $q\bar{q}$ -Paare
- Valenzquarkdichten für u und d sind unterschiedlich
- Verletzung der Gottfried-Summenregel: Seequarkdichten für u und d sind unterschiedlich
- $\Rightarrow$  Diquarks, Meson-Wolken etc.

3 Quarks sind nicht genug.



# Zustände aus Baryon+Meson

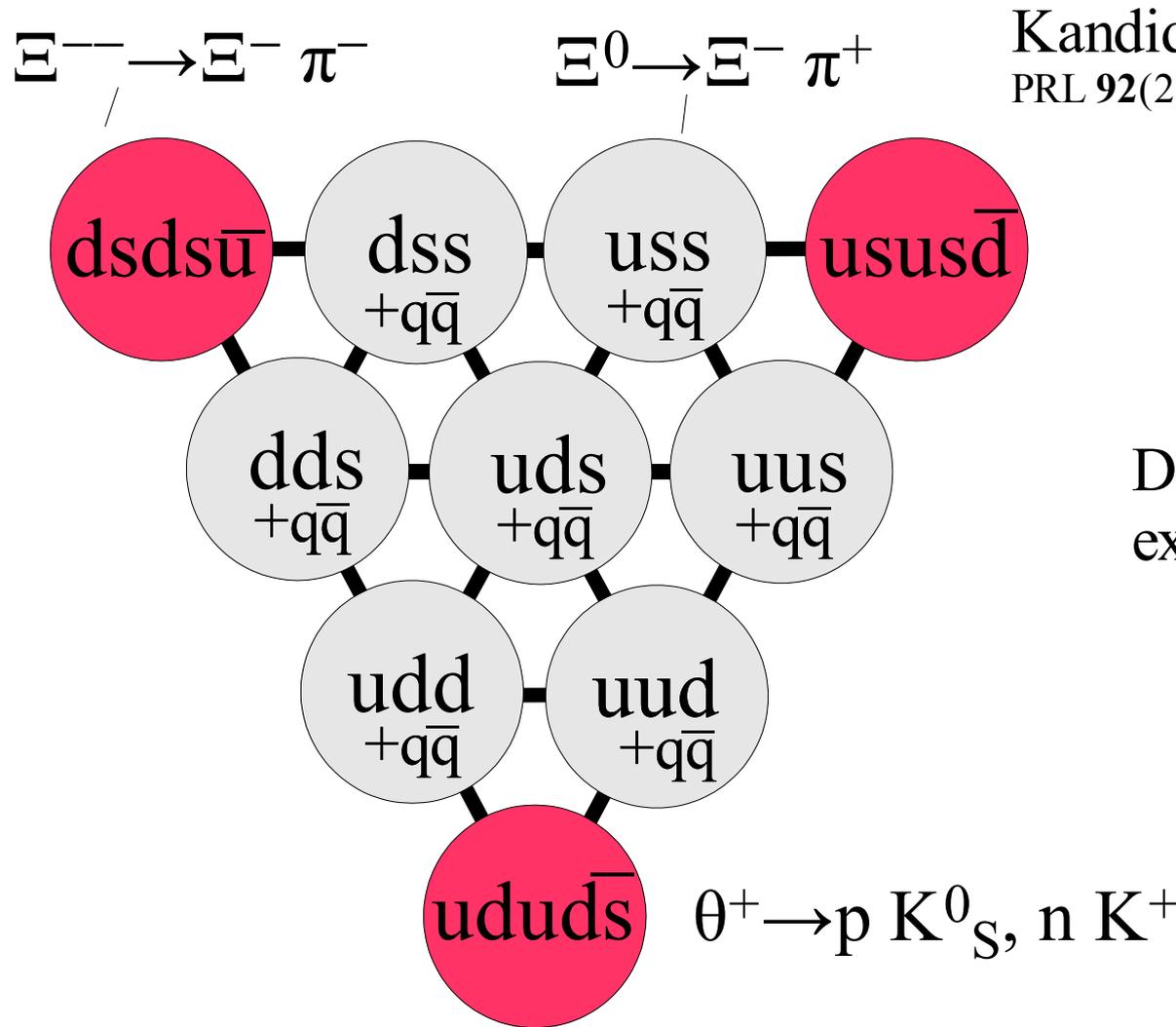


Betrachte Pentaquark als System aus Diquark+Diquark+Antiquark

Diquarks aus identischen Quarks energetisch ungünstig wg. Hyperfein-WW (Lipkin 1977)

=>Keine drei identischen Quarks!

# Exotische Quantenzahlen

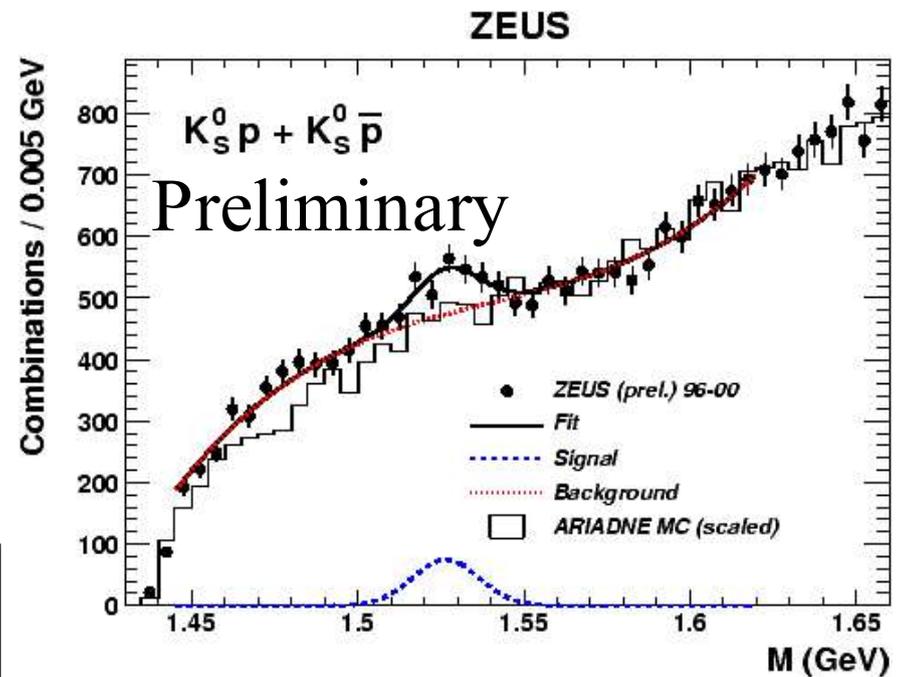
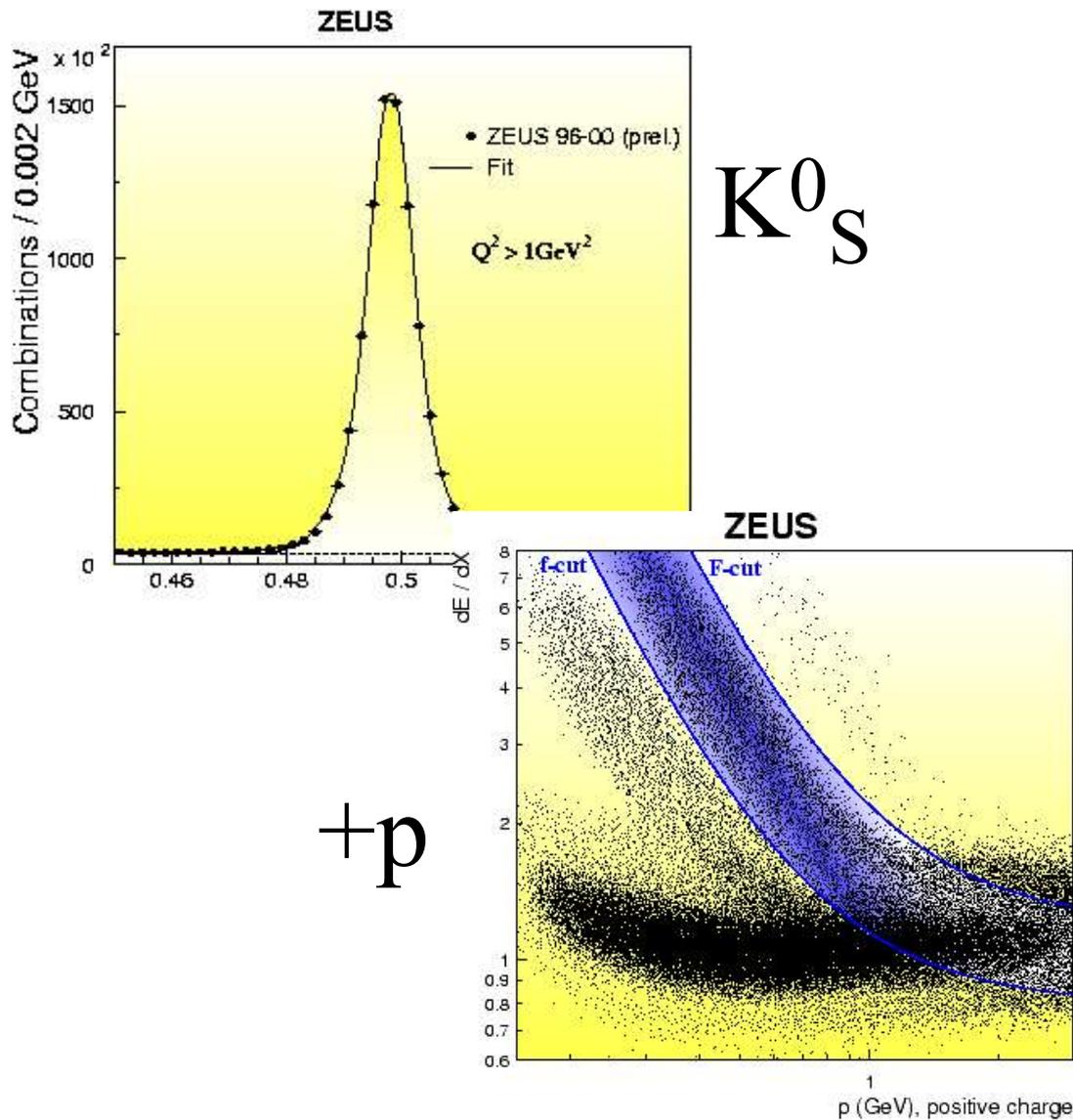


Kandidaten von NA49  
PRL 92(2004)042003

Dekuplett mit drei  
exotischen Zuständen

Spring-8, DIANA,  
CLAS, SAPHIR,  
ITEP, HERMES,  
SVD, COSY-TOF

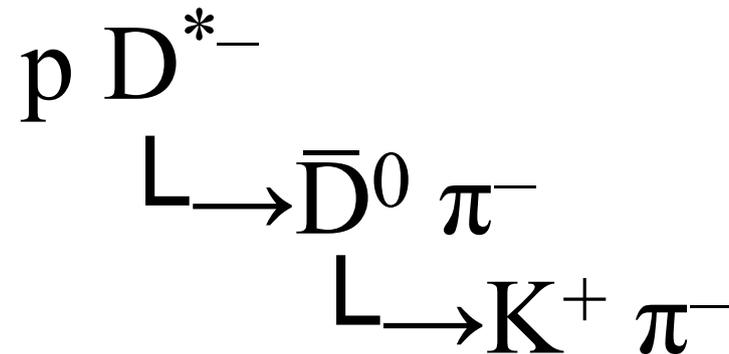
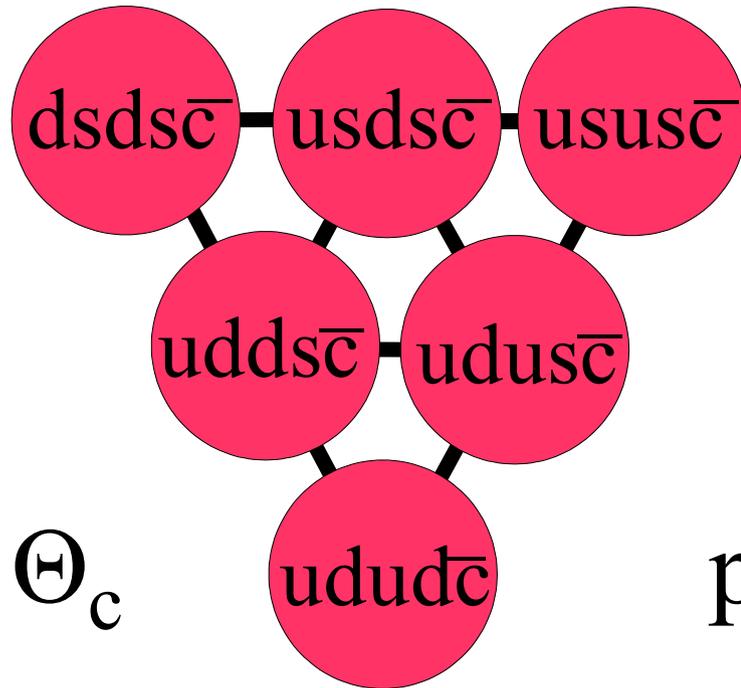
# ZEUS: Suche nach $\theta^+ \rightarrow p K_S^0$



$=\theta^+ ?$

$372 \pm 75$  Kandidaten ( $\sim 5\sigma$ )  
 $m = 1527 \pm 2$  MeV  
 $W = 10 \pm 2$  MeV

# Suche nach Pentaquarks mit Charm



# Die Suche bei H1 (Phys Lett to appear)

D\*-Selektion:

Selektiere  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$  (+c.c.)

plus weiteres Pion  $\pi_s^+$ :

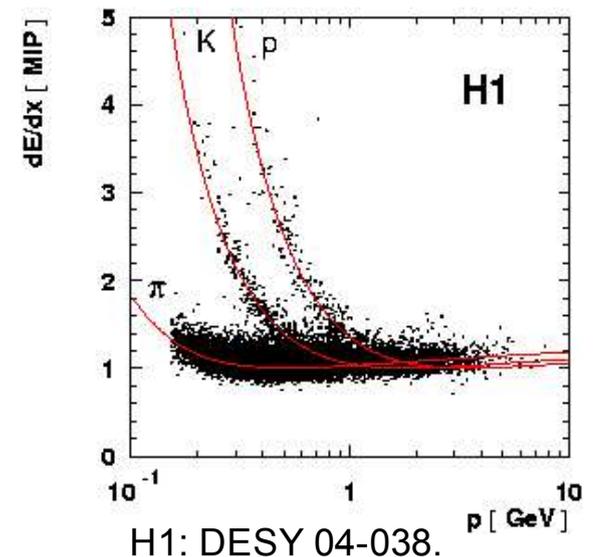
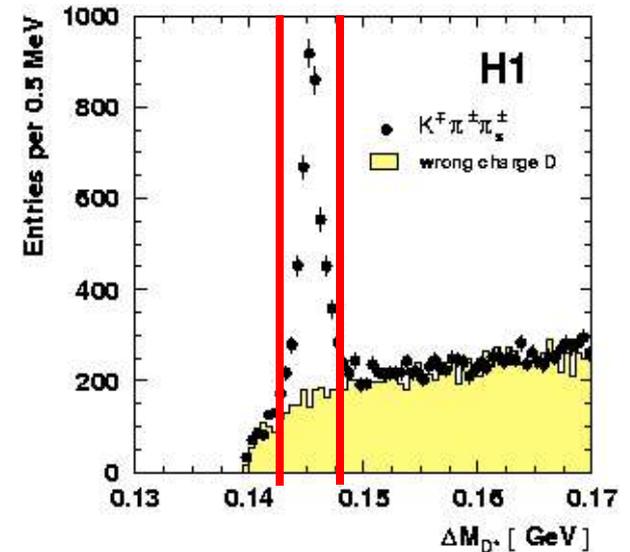
–  $p_T(D^{*+}) > 1.5 \text{ GeV}$

–  $-1.5 < \eta(D^{*+}) < 1$

–  $z(D^*) > 0.2$

Proton-Selektion:

Verlange Kompatibilität mit  
erwartetem  $dE/dx$  für Protonen  
(Auflösung: ca. 8%)



# Experimentelle Evidenz

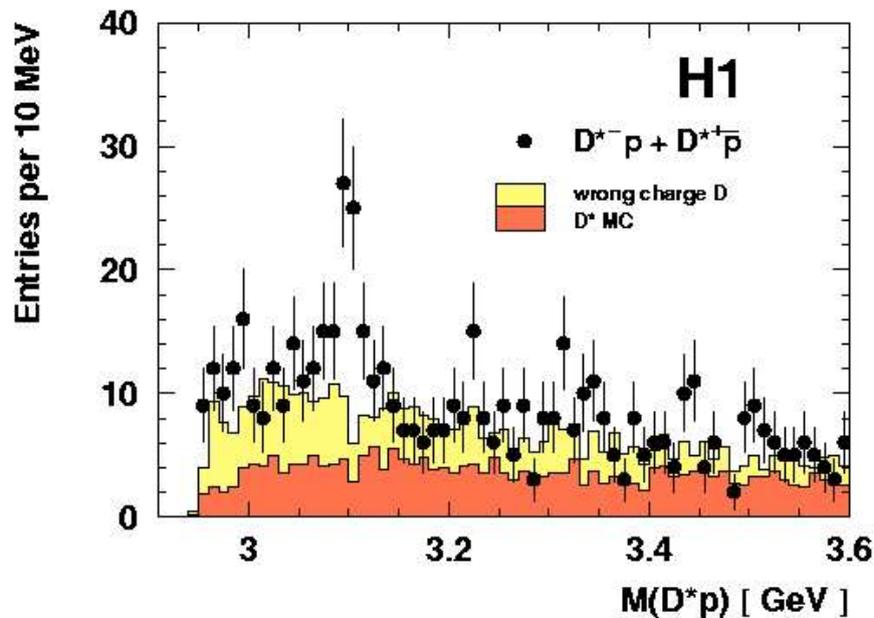
Klares Signal bei  $m=3099\text{MeV}$

Untergrund:

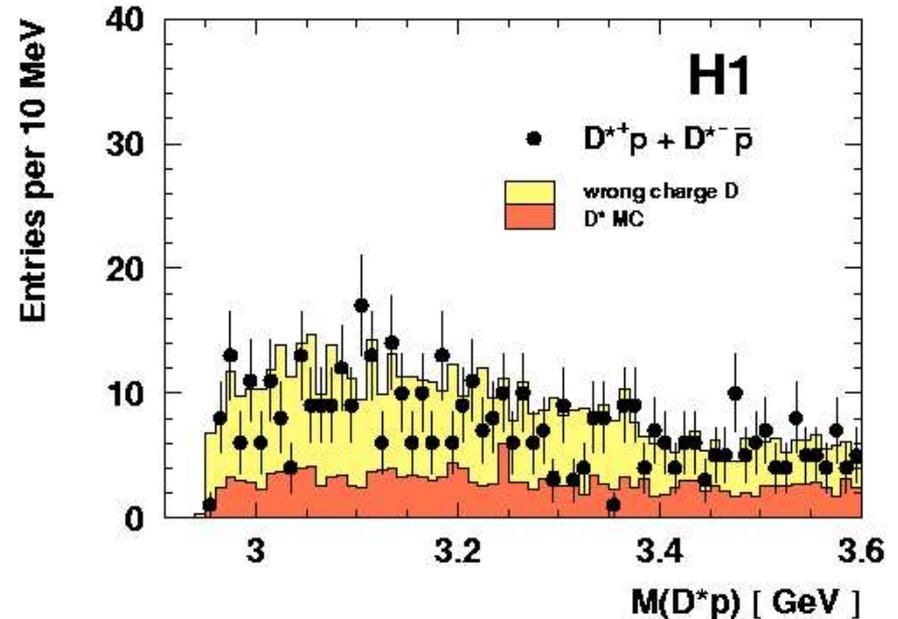
- Kombinatorischer  $D^*$ -Untergrund, modelliert durch  $K^+\pi^+\pi_s^\pm$
- Kombinatorik aus  $D^* h$ , modelliert durch MC-Simulation

Kein signifikantes Signal bei falscher Ladungskombination

$D^{*+}p$  und  $D^{*-}p$

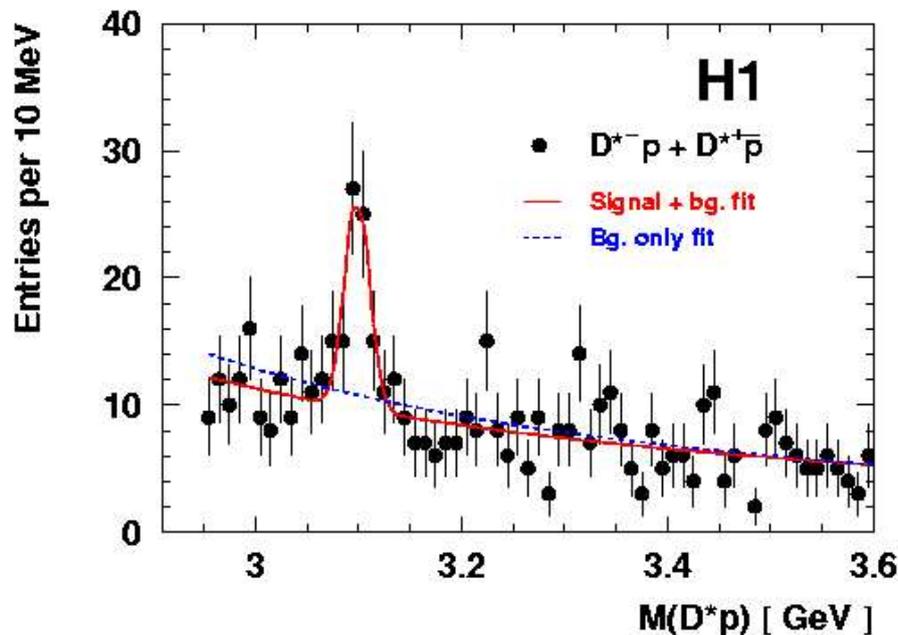


H1: DESY 04-038.



H1: DESY 04-038.

# Signifikanz



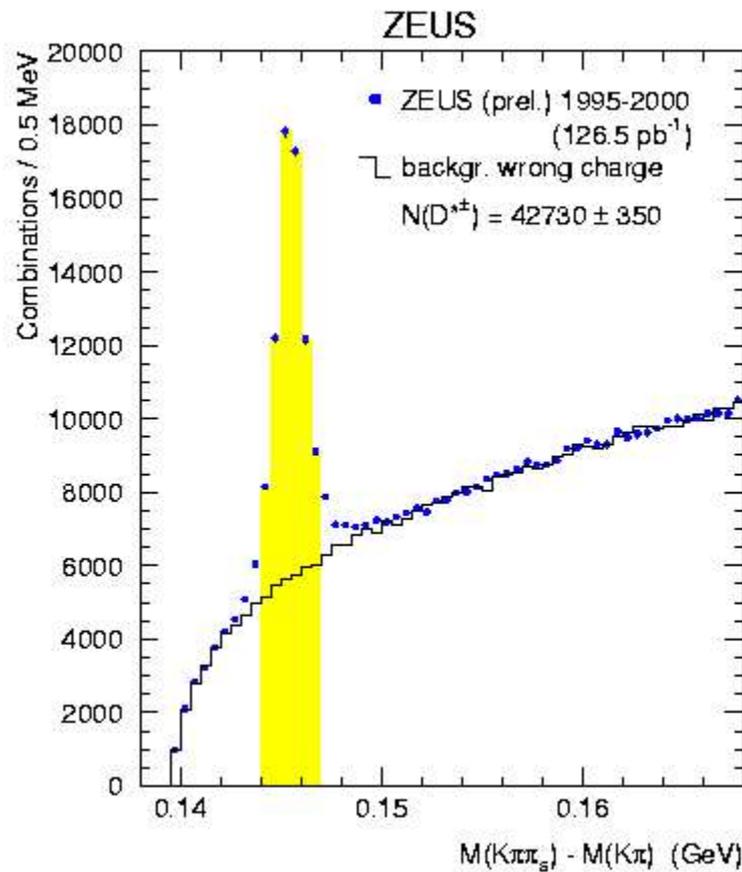
H1: DESY 04-038.

$ep \rightarrow eX$  in DIS,  $75 \text{ pb}^{-1}$   
 $1 < Q^2 < 100 \text{ GeV}^2$

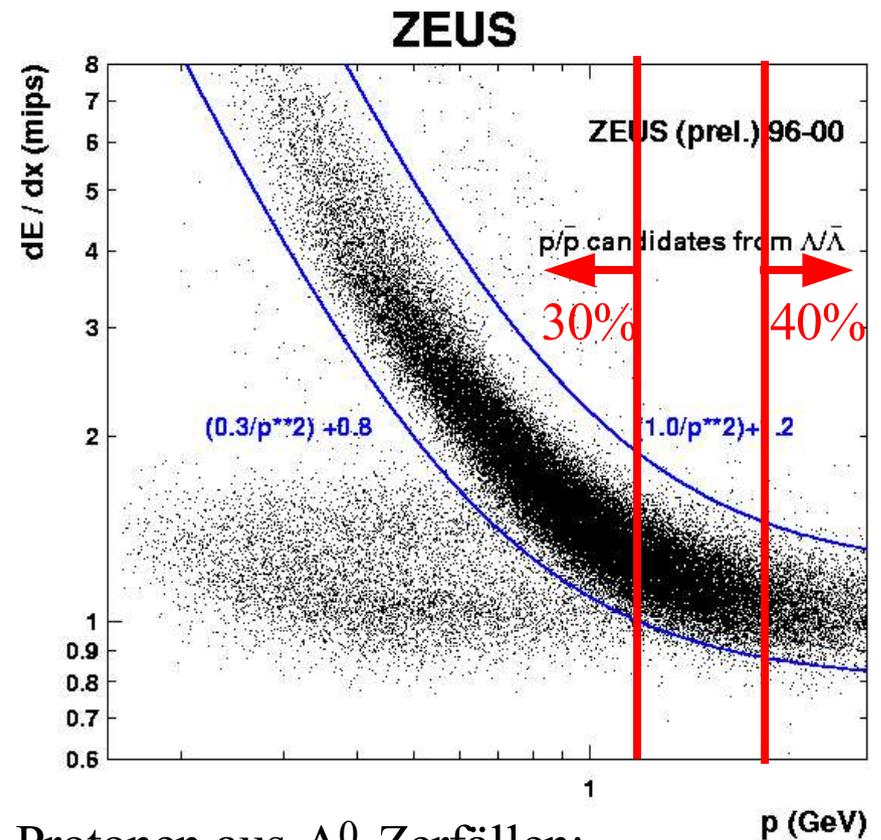
- Aus Untergrundfit:  
 $N_b = 51.7 \pm 2.7$   
in  $2\sigma$ -Massenfenster
- Aus Fit Signal+Untergrund:  
 $N_s = 50.6 \pm 11.2$
- Poisson-Wahrscheinlichkeit  $4 \cdot 10^{-8}$ ,  
entspricht  $5.4\sigma$
- $\Delta \ln(\mathcal{L})$  ergibt  $6.2\sigma$
- Masse:  $3099 \pm 3 \pm 5 \text{ MeV}$
- Breite:  $12 \pm 3 \text{ MeV}$ ,  
kompatibel mit erwarteter  
experimenteller Auflösung  
 $\Rightarrow$  **schmale Resonanz!**

# Was sieht ZEUS?

- ZEUS: Daten 1995-2000:  $126.5 \text{ pb}^{-1}$



D\*...

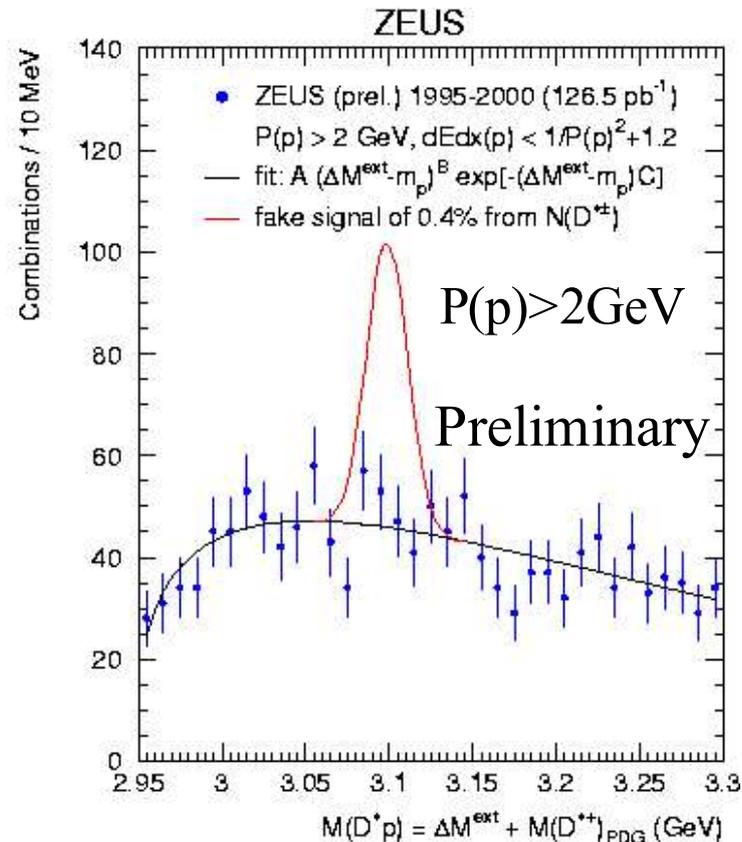
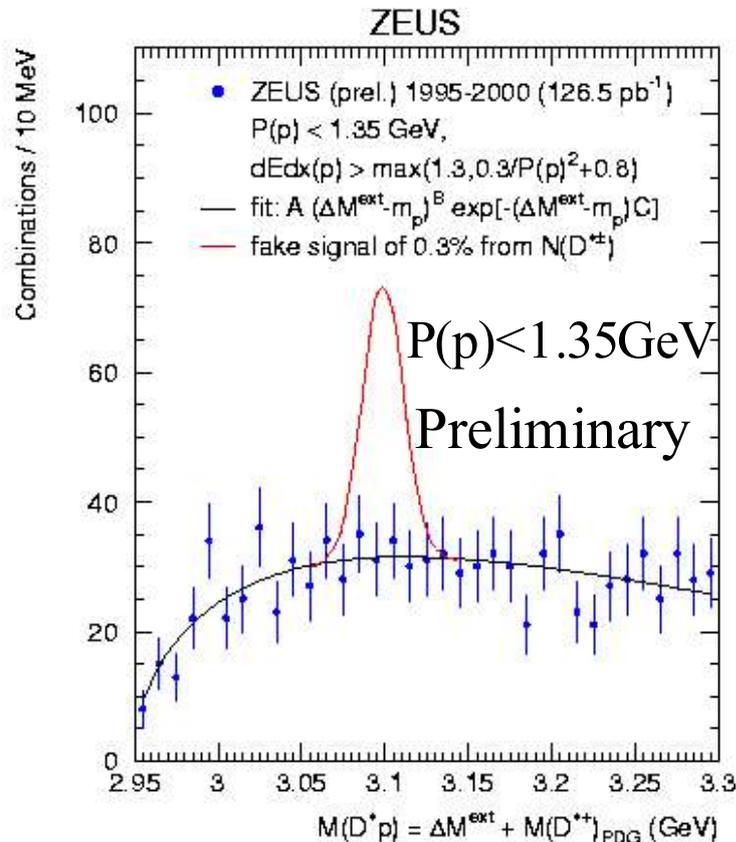


Protonen aus  $\Lambda^0$ -Zerfällen:  
Festlegung des  $dE/dx$ -Schnittes

+Proton...

# Nichts.

- ... leider kein Signal
- ZEUS: „Weniger als 1% der  $D^*$  aus  $\Theta_c$ -Zerfällen“



# Zusammenfassung

- Messungen der Protonstruktur über großen kinematischen Bereich; HERA-I-Daten größtenteils analysiert
- Extraktion von Partondichten (Quarks und Gluonen) und  $\alpha_s$  aus DIS mit zunehmender Genauigkeit im Prozentbereich; NNLO *ante portas*
- Konsistente Werte für  $\alpha_s$  aus Jetraten
- QCD-Tests: Produktion schwerer Quarks (c, b)
- Pentaquarks:
  - $\Theta^+ \rightarrow p K_S^0$  : Resonanz bei  $m=1527\pm 2$  MeV von ZEUS bestätigt
  - schmale Resonanz im System p  $D^{*0}$ : Baryon mit Charm=-1 von H1 beobachtet,  $m=3099\pm 3\pm 5$  MeV, schmal ( $<10$ MeV) von ZEUS bisher nicht bestätigt
- Vieles wurde heute ausgelassen: low-x, Diffraktion, Forward jets,...

# Ausblick

- H1 und ZEUS nehmen neue Daten:
  - Erste Messung des des polarisierten CC-Wirkungsquerschnittes in ep,  
mit Daten bis einschließlich März 2004
- Hohe Luminosität erlaubt Suche nach neuen Phänomenen
- Detektor-Veresserungen (Trigger, Silizium-Detektoren) eröffnen neue Möglichkeiten, speziell bei *Charm* und *Beauty*

