

# Messung von Multijet-Wirkungsquerschnitten in tiefunelastischer Elektron-Proton-Streuung mit dem ZEUS-Detektor bei HERA

Jörg Behr, Holger Enderle, Robert Klanner, Peter Schleper,  
Thomas Schörner-Sadenius, Thorben Theedt

- DPG Frühjahrstagung Freiburg -  
4. März 2008

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



Universität Hamburg



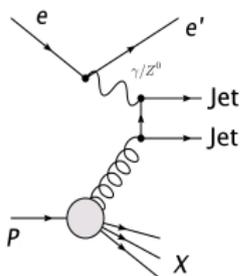
BMBF - Förderschwerpunkt  
Elementarteilchenphysik

Großgeräte der physikalischen  
Grundlagenforschung

# Gliederung

- 1 Jetproduktion in tiefunelastischer Elektron-Proton-Streuung
- 2 Motivation für die Messung von Multijet-Wirkungsquerschnitten
- 3 Vorstellung der Analyse (Selektion)
- 4 Zweijet- und Dreijet-Wirkungsquerschnitte,  $R_{3/2}$
- 5 Ausblick und Zusammenfassung

# Jetproduktion in tiefunelastischer ep-Streuung



Bei Prozessen des neutralen Stromes tritt ein gestreutes Elektron im Endzustand auf.

$$Q^2 = -q^2 = -(l - l')^2 \quad \text{Bosonvirtualität}$$

$$x_{Bj} = \frac{Q^2}{2p \cdot q} \quad \text{Impulsbruchteil des Partons in der Wechselwirkung}$$

$$y = \frac{p \cdot q}{p \cdot l} \quad \text{Inelastizität des Elektrons}$$

$$Q^2 = s \cdot y \cdot x_{Bj}$$

## Jets:

- Partonen im Endzustand fragmentieren und bilden farbneutrale Hadronen
- Impulse dieser Hadronen sind in etwa kollinear mit dem ursprünglichen Quark. Hadronen bilden einen sogenannten *Jet*.
- Viererimpuls des Jets  $\approx$  Viererimpuls des ursprünglichen Quarks
- Zugang zur Partondynamik ( $\leftrightarrow$  QCD)

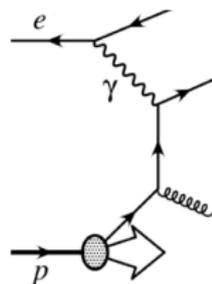
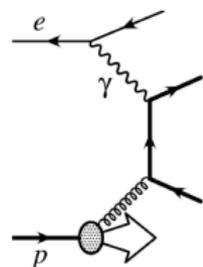
# Motivation

Jet-Wirkungsquerschnitt (symbolisch):

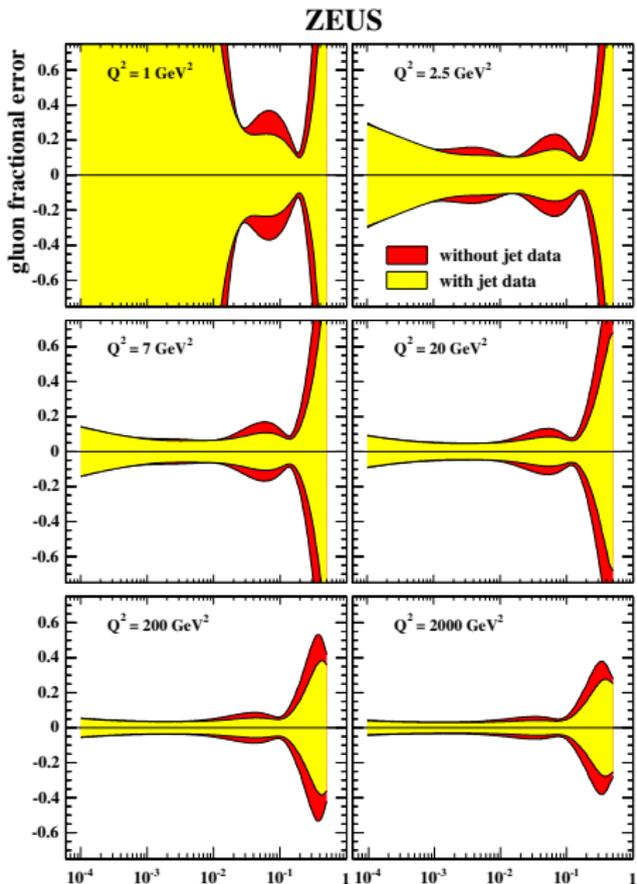
$$\sigma \sim \sum_j \alpha_s^j(\mu_r^2) \cdot \sum_a [f_{a/p}(x, \mu_f^2) \otimes \hat{\sigma}_a(\mu_f^2, \mu_r^2, x, j)]$$

- Reihenentwicklung von  $\sigma$  in Ordnungen von  $\alpha_s$  (perturbative QCD)
- **Faltungen** von **Parton-Verteilungsfunktionen**  $f_{a/p}$  (PDFs) und **Matrixelement**  $\hat{\sigma}_a$  der "harten Streuung"  $\rightarrow$  Faktorisierung
- **PDFs**  $f_{a/p}$  sind a-priori nicht berechenbar
- "harte Matrixelement"  $\hat{\sigma}_a$  wird für jede feste Ordnung  $j$  in  $\alpha_s$  berechnet (Zweijets  $\rightarrow O(\alpha_s^2)$ , Dreijets  $\rightarrow O(\alpha_s^3)$ )

- Bei hohem  $Q^2$  werden Unsicherheiten der theoretischen Vorhersagen "klein"
  - Bestimmung der Kopplungskonstanten  $\alpha_s$  der starken Wechselwirkung
  - Informationen über **Parton-Verteilungsfunktionen**  $f_{a/p}$

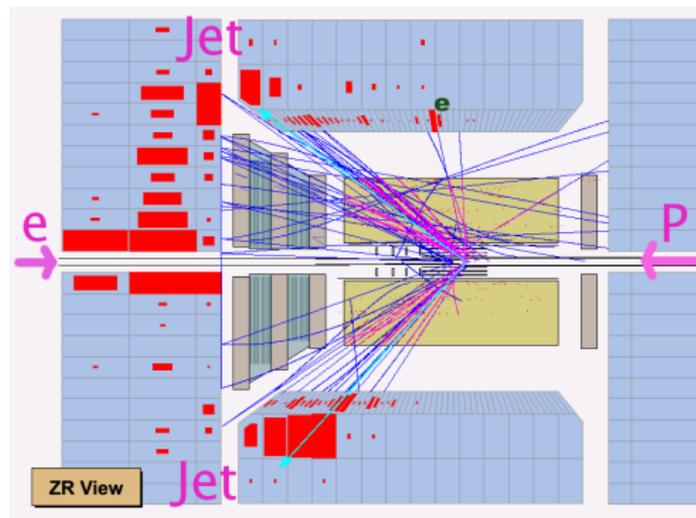
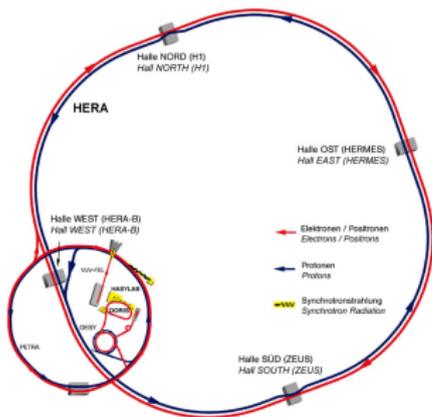


- Gluon-PDF: bisher  $\frac{d\sigma^2}{dx dQ^2} \propto F_2(x, Q^2)$  (indirekter Beitrag über Skalenverletzung)
- $\sigma$  für den Boson-Gluon-Fusions-Prozess hängt von  $\alpha_s$  und der Gluon-PDF ab
- $\hookrightarrow$  Messung erlaubt Bestimmung der Gluon-PDFs in kombinierten QCD-„Fits“
  - $\frac{d\sigma^2}{dx dQ^2} \propto F_2(x, Q^2)$
  - zusätzlich: inklusive Jet- und Dijet-Wirkungsquerschnitte (hep-ph/0503274)
  - Unsicherheit in Intervallen von  $Q^2$  und  $x$  ohne (rot) und unter (gelb) Einbeziehung von Jet-Daten
  - $\hookrightarrow$  Jet-Daten reduzieren die Unsicherheit bei mittleren bis hohen  $x$



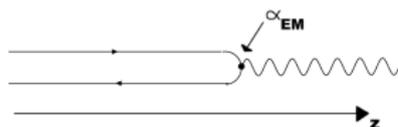
# Beschleuniger HERA und der ZEUS-Detektor

- Elektron/Positron-Proton-Beschleuniger (HERA) mit 27.5 GeV Strahlenergie für die Elektronen und 920 GeV Strahlenergie für die Protonen
- Betrieb bis Ende Juni 2007
- Schwerpunktsenergie  $\sqrt{s} \approx 318\text{GeV}$
- Daten des ZEUS-Experimentes aus den Jahren 1998 bis 2007
- integrierte Luminosität:  $L \approx 420 \text{ pb}^{-1}$  (1998 bis 2007)

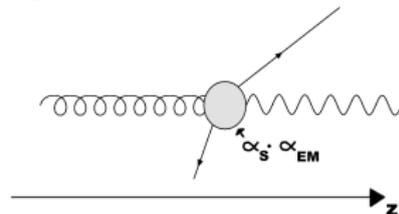


# Breit-Bezugssystem

## Quark-Parton-Modell



## Boson-Gluon-Fusion

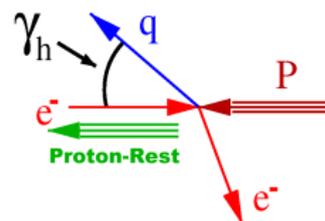


- Definition Breit-Bezugssystem:  $2x_{Bj}\vec{p} + \vec{q} = 0$
- ausgetauschtes Boson kollidiert "frontal" mit Parton aus dem Proton
- Transversalenergien sind ein Indikator für "harte" QCD-Prozesse
- Durch Schnitte auf Transversalenergien im Breit-Bezugssystem lassen sich nicht-QCD-Ereignisse unterdrücken

# Selektion

## Phasenraum-Schnitte

- Photonvirtualität:  $125 \text{ GeV}^2 < Q^2 < 5000 \text{ GeV}^2$
- Streuwinkel  $\gamma_h$  des hadronischen Systems im Labor:  $-0.65 < \cos \gamma_h < 0.65$



## Jet-Selektion

Jet-Rekonstruktion mit dem longitudinal invarianten  $k_{\perp}$ -Algorithmus im inklusiven Modus im Breit-Bezugssystem

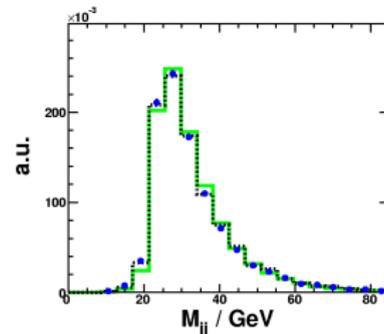
- Pseudorapidität:  $-2.0 < \eta_{\text{Breit}} < 1.5$
- Zweijet-Ereignisse:
  - Asymmetrischer  $E_{T,\text{Breit}}$ -Schnitt:
 
$$E_{T,\text{Breit}}^{\text{jet}1} > 12 \text{ GeV}, E_{T,\text{Breit}}^{\text{jet}2} > 8 \text{ GeV}$$
- Dreijet-Ereignisse:
  - $E_{T,\text{Breit}}^{\text{jet}} > 5 \text{ GeV}$
  - Invariante Dreijet-Masse:  $M > 25 \text{ GeV}$

# Vergleich unkorrigierter Daten mit MC-Simulationen

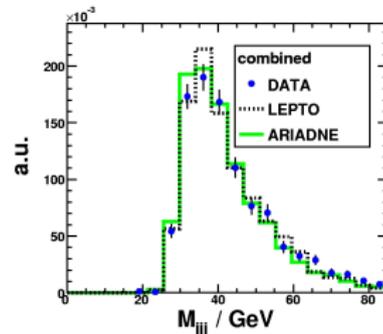
- Verwendung zweier verschiedener Modelle für Parton-Kaskaden:

- 1 *Farbdipol-Modell* (Ariadne)
- 2 *Parton-Schauer* (Lepto)

## Zweijet-Produktion



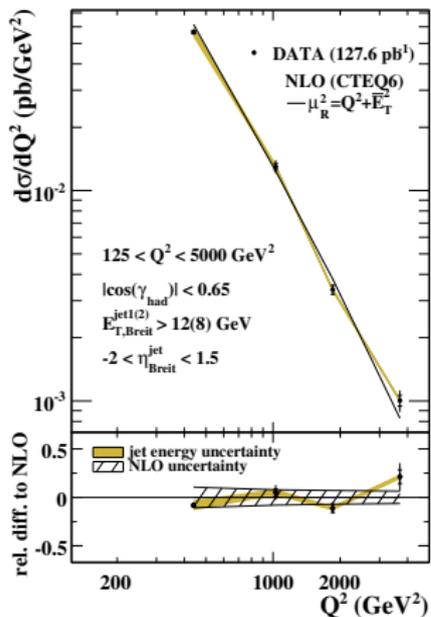
## Dreijet-Produktion



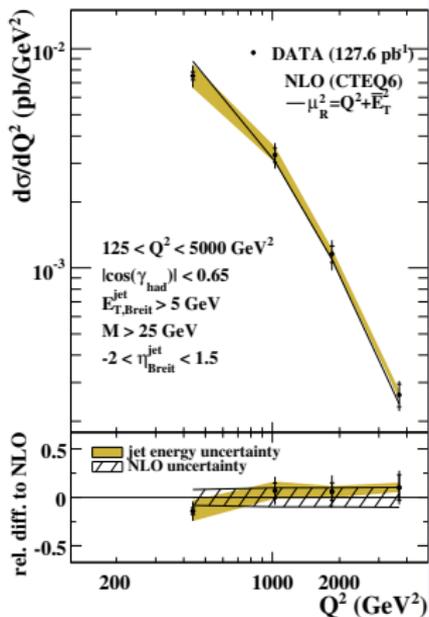
- MC-Simulationen beschreiben Verteilung der invarianten Jet-Masse der Daten
- gute Übereinstimmung zwischen Daten und MC-Simulationen in allen weiteren relevanten Verteilungen (hier nicht gezeigt)
- $\leftrightarrow$  Korrektur der Daten mit MC-Simulationen möglich (Elektron-Kalibration, hadronische Skalenkorrektur, Jet-Energie-Korrektur, Akzeptanzkorrektur, Hadronisierungskorrektur, QED-Korrektur)

# Wirkungsquerschnitte differentiell in $Q^2$

## Zweijet-Ereignisse:

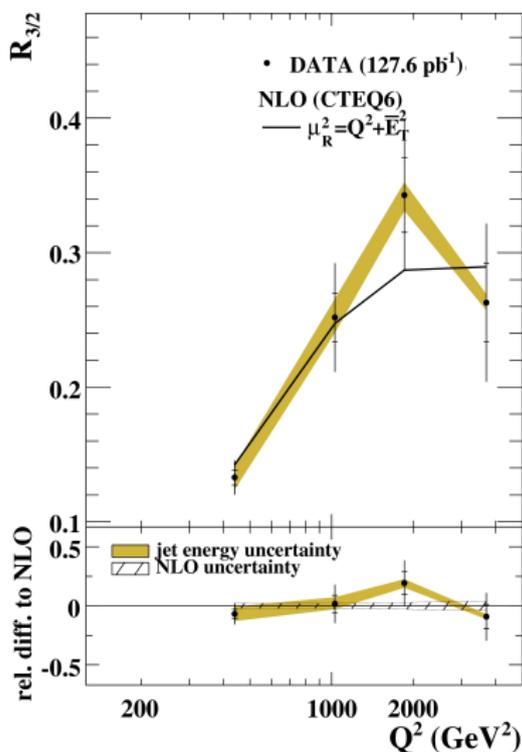


## Dreijet-Ereignisse:



- dominate systematische Unsicherheiten: Akzeptanzkorrektur, Jet-Energieskala (gelbliches Band)
- Vergleich der Daten mit theoretischen Vorhersagen (NLOJet++)
  - Zweijets  $O(\alpha_s^2)$
  - Dreijets  $O(\alpha_s^3)$
- ↔ gute Übereinstimmung
- ↔ Bestimmung von  $R_{3/2}(Q^2) = \frac{\sigma_{3\text{jet}}}{\sigma_{2\text{jet}}}$

# Verhältnis $R_{3/2} = \frac{\sigma_{3jet}}{\sigma_{2jet}}$ und Bestimmung von $\alpha_s$



$$R_{3/2} = \frac{\sigma_{3-Jet}}{\sigma_{2-Jet}}$$

- Gute Übereinstimmung zwischen Daten und theoretischer Vorhersage
- korrelierte systematische Unsicherheiten der Messung heben sich bei der Bestimmung von  $R_{3/2}$  teilweise heraus
- Reduzierung der systematischen Fehler der Messung notwendig
- Variation von  $\alpha_s$  in Berechnung der theoretischen Vorhersage  $\alpha_s$  (siehe nächste Folie)
- Ziel:  $\alpha_s$ -Extraktion

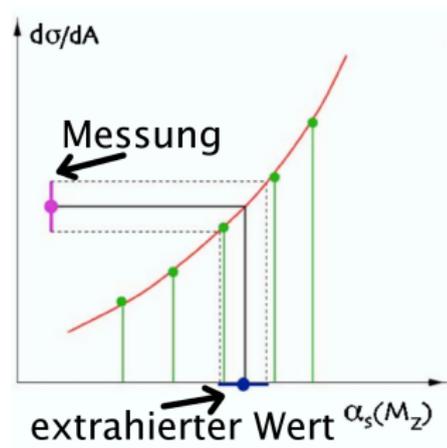
# Ziel der Analyse

## Eine Methode der $\alpha_s$ -Bestimmung

- Verwendung verschiedener Parametrisierungen der PDFs bei der Berechnung der theoretischen Vorhersagen für verschiedene Werte von  $\alpha_s(M_Z)$
- Verwendung verschiedener Sets von PDFs → Abschätzung PDF-Unsicherheit
- Parametrisierung der  $\alpha_s(M_Z)$ -Abhängigkeit durch

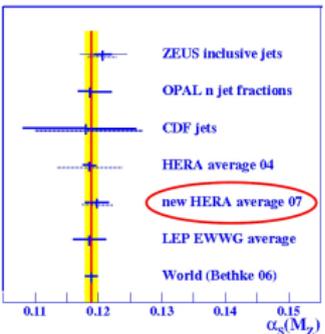
$$\frac{d\sigma}{dA} = C_1 \cdot \alpha_s(M_Z) + C_2 \cdot \alpha_s^2(M_Z).$$

- ↪ mit dem Resultat der Anpassung kann die Messung in einen  $\alpha_s(M_Z)$ -Wert transformiert werden
- Renormierungs-Gruppen-Gleichung ↪ "laufende" Kopplung

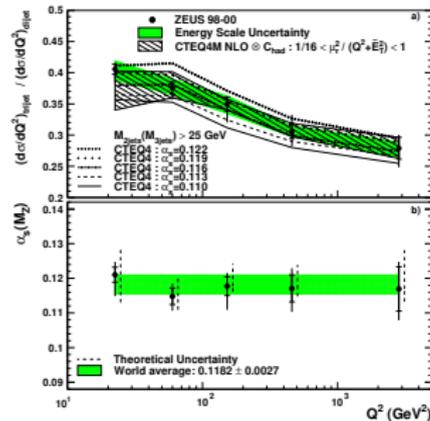


## Beispiel: ältere HERA-Resultate

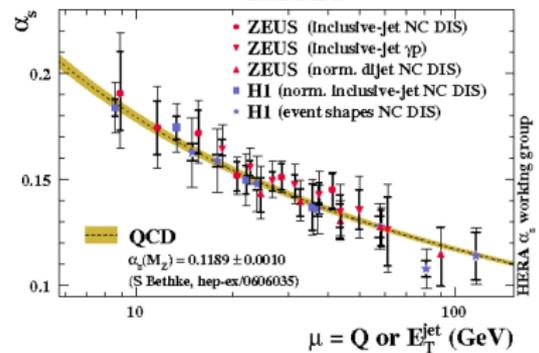
- $10 < Q^2/\text{GeV}^2 < 5000$   
(hep-ex/0502007)
- diese Analyse:  $\approx 5$  mal höhere Statistik, nur hohe  $Q^2 \rightarrow$  niedrige NLO-Unsicherheiten
- Konsistenz von  $\alpha_s$  aus vielen Prozessen (unten)
- HERA Jet-Daten zeigen "laufende" Kopplungsstärke



## ZEUS



## HERA



# Zusammenfassung

- $127.6 \text{ pb}^{-1}$  der insgesamt  $420 \text{ pb}^{-1}$  an Daten wurden analysiert
- Multijet-Wirkungsquerschnitte in tiefunelastischer ep-Streuung bei hohen  $Q^2$  wurden gemessen
- Akzeptable Übereinstimmung im Rahmen statistischer und systematischer Unsicherheiten zwischen Messung und theoretischen Vorhersagen (NLOJet++ Dreijets:  $O(\alpha_s^3)$ )
- Das Wirkungsquerschnittsverhältnis  $R_{3/2}$  wurde bestimmt und wird durch theoretische Vorhersagen beschrieben

## Ausblick

- Extraktion von  $\alpha_s$