Messung der Strukturfunktion $F_2(x, Q^2)$ bei kleinen Q^2 bei HERA mit Hilfe der neuen H1 Detektorkomponenten Spacal und BDC

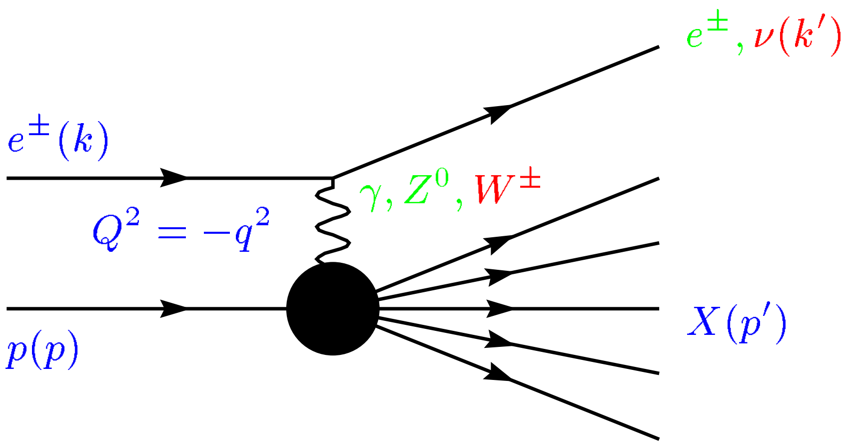
Andreas Meyer

- Tief-unelastische Streuung
- H1 Experiment

- Energiekalibration
- Bestimmung von F_2

- Ergebnis
- Vergleich mit Modellen
- Zusammenfassung

Tief unelastische Streuung



$$e^\pm p \xrightarrow{\gamma, Z^0 (\mathrm{NC})} e^\pm X \qquad e^\pm p \xrightarrow{W^\pm (\mathrm{CC})} \overset{(-)}{\nu} X$$

$$Q^2 = -q^2 = -(k - k')^2 \quad \text{(4-Impulsübertrag)}^2$$

$$x = \frac{Q^2}{2pq} \quad \text{Impulsanteil des gestr. Quarks}$$

$$y = \frac{pq}{pk} \quad \text{Relativer Energieübertrag im Protonruhsystem}$$

HERA: $e^\pm$: 27.5 GeV p: 820 GeV

$$s = 4E_e E_p \quad \text{(CMS Energie)}^2 \quad \sqrt{s} = 300\,\text{GeV}$$

$$Q^2 = sxy$$

$\rightarrow Q^2 \leq 90000\ \text{GeV}^2$

$\rightarrow x \geq 10^{-6}\ (Q^2 \sim 0.1\ \text{GeV}^2)$

Strukturfunktionen

$$\frac{\mathrm{d}^2\sigma^{e^\pm p}}{\mathrm{d}x\mathrm{d}Q^2} =$$

$$\frac{4\pi\alpha^2}{xQ^4}\left[Y_+ F_2(x,Q^2) - y^2 F_L(x,Q^2) \mp Y_- xF_3(x,Q^2)\right]$$

$$Y_\pm = 1 \pm (1-y)^2$$

$$F_L = F_2 - 2xF_1$$

xF_3: Beitrag aus paritätsverletzenden Prozessen

– Für $Q^2 << M_{Z^0}^2$: $\quad xF_3 = 0$

Moderates $Q^2 \rightarrow$ Ein–Photon Austausch:

Born Wirkungsquerschnitt

$$\frac{\mathrm{d}^2\sigma}{\mathrm{d}x\mathrm{d}Q^2} = \frac{2\pi\alpha^2}{xQ^4}\left(2(1-y) + \frac{y^2}{1+R(x,Q^2)}\right) F_2(x,Q^2)$$

$$\text{mit} \qquad R = \frac{F_L}{F_2 - F_L}$$

F_L: Beitrag von longitudinal polarisierten Photonen.

– Geringer Einfluß bei kleinen y

– Annahme von F_L aus Modellrechnungen.

Quark Parton Modell und QCD

QPM: Punktförmige, freie Partonen im Proton.

$$F_2 = F_2(x) = \sum_{i=q,\bar{q}} e_i^2 x q_i(x)$$

QCD: Kopplung zwischen Quarks via Gluonen.

$$\alpha_S = \alpha_S(Q^2) \qquad \begin{array}{ll} Q^2 \to \infty: & \text{asympt. Freiheit} \\ Q^2 \to 0: & \text{Confinement} \end{array}$$

QCD-verbessertes Partonmodell: Quarks und Gluonen.

DGLAP Glg.: Entwicklung von $f_i(x, Q^2)$ nach Q^2.

Kleine x in LO : $\dfrac{\mathrm{d}F_2}{\mathrm{d}\log Q^2} \propto \alpha_s(Q^2) x g(x, Q^2)$

Inkl. Wirkungsquerschnitt $\leftrightarrow$ Protonkonstituenten

$\rightarrow$ Messung von F_2

Test von QCD und Bestimmung der Partonverteilungen.

Quark Parton Modell und QCD

QPM: Punktförmige, freie Partonen im Proton.

$$F_2 = F_2(x) = \sum_{i=q,\bar{q}} e_i^2 x q_i(x)$$

QCD: Kopplung zwischen Quarks via Gluonen.

$$\alpha_S = \alpha_S(Q^2) \qquad \begin{array}{ll} Q^2 \to \infty: & \text{asympt. Freiheit} \\ Q^2 \to 0: & \text{Confinement} \end{array}$$

QCD-verbessertes Partonmodell: Faktorisierung.

$$F_2 = F_2(x, Q^2) = \sum_{i=q,\bar{q},g} C_i \otimes f_i$$

C_i : pQCD, berechnet in NLO

f_i : hadronspezifisch, universell (prozeßunabhängig)

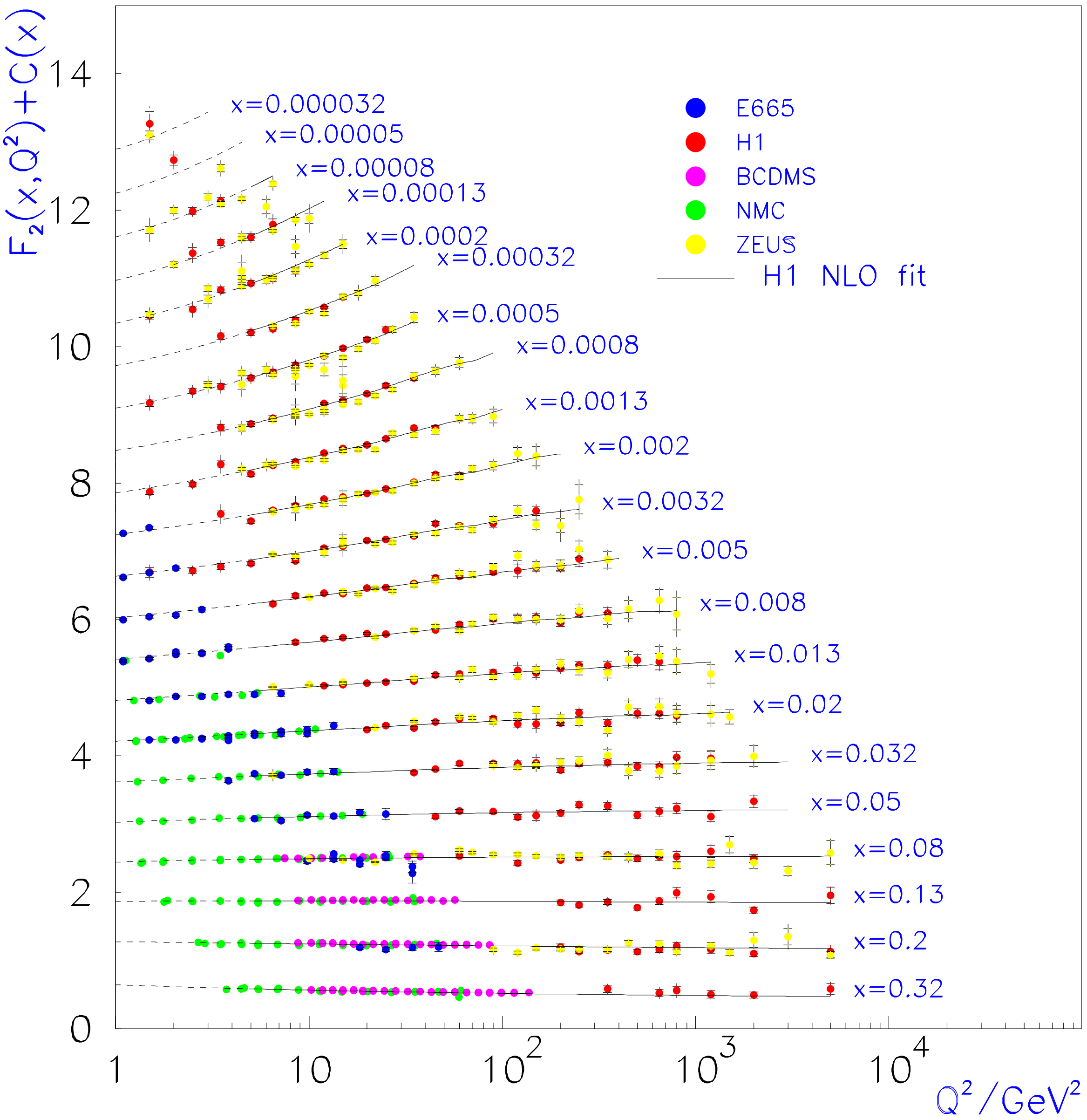
DGLAP Glg.: Entwicklung von $f_i(x, Q^2)$ nach Q^2.

Inkl. Wirkungsquerschnitt $\leftrightarrow$ Protonkonstituenten

$\to$ Messung von F_2:

Test von QCD und Bestimmung der Partonverteilungen.

HERA 94: $Q^2 \geq 1.5$ GeV^2



NLO DGLAP Fit beschreibt Daten.

Grenzen der QCD ? → kleinere Q^2

Rekonstruktion von x und Q^2

Elektron-Methode (e):

$$y_e = 1 - \frac{E'_e}{E_e} \cdot \sin^2\frac{\theta_e}{2} \qquad Q^2_e = 4 \cdot E'_e \cdot E_e \cdot \cos^2\frac{\theta_e}{2}$$

- Einfluß von Bremsstrahlung (ISR) groß.
- Sehr gute Auflösung bei großem y: $\delta y/y \propto 1/y$

Hadron-Methode (JB):

$$y_{\mathrm{JB}} = \frac{\sum_{\mathrm{had}}(E - p_z)}{2E_e} \qquad Q^2_{\mathrm{JB}} = \frac{(\sum_{\mathrm{had}} p_\perp)^2}{1 - y_{\mathrm{JB}}}$$

Σ-Methode:

$$y_\Sigma = \frac{\sum_{\mathrm{had}}(E - p_z)}{\sum E - p_z} \qquad Q^2_\Sigma = \frac{p^2_{\perp,e}}{1 - y_\Sigma}$$

- $\sum E - p_z = 2 \cdot E_e = 55$ GeV
- Einfluß von ISR klein.
- Gute Auflösung: $\delta y/y \propto y$

Doppel-Winkel-Methode (DA):

- θ_e, γ_{had}

Alle Methoden: $$x = \frac{Q^2}{sy}$$

H1 '95: Neue Detektorkomponenten

SPACAL: Blei/Szintillationsfaser-Kalorimeter

Winkelakzeptanz ($\leq 177.5°$)	$\rightarrow$ kleine Q^2 ($Q^2 \geq 0.35$ GeV^2)
Kleine Zellen (4×4 cm^2)	
Homogenität ($< 2\%$)	$\rightarrow$ Orts- und Energieauflösung
Hadronischer Abschnitt (2λ)	e/π Trennung
Zeitauflösung (< 1 ns)	$\rightarrow$ Untergrundunterdrückung
Rauschpegel (< 3 MeV)	$\rightarrow$ Triggerschwellen

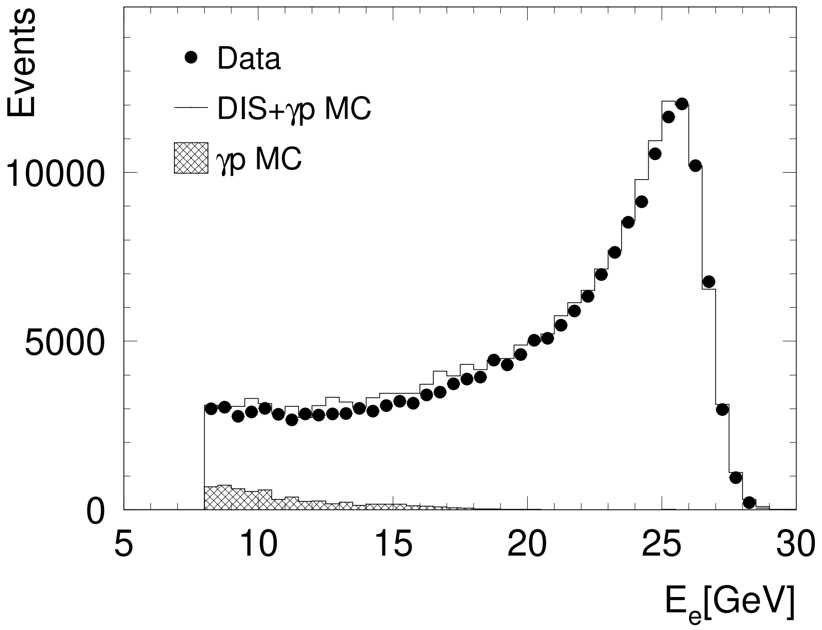
BDC: Driftkammer, 8 Lagen

Auflösung: $\sigma_R = 0.5$ mm

Position: $\Delta\theta = 0.5$ mrad

Energiekalibration

Energieverteilung des gestreuten Elektrons bei kleinen Q^2:



– Kinematisches Maximum bei $E'_e \approx E_e$

– Position des Maximums präzise berechenbar.

– MC: Berücksichtigung von Detektoreffekten.

Kalibration:

– Selektion von Ereignissen mit kleinem y,

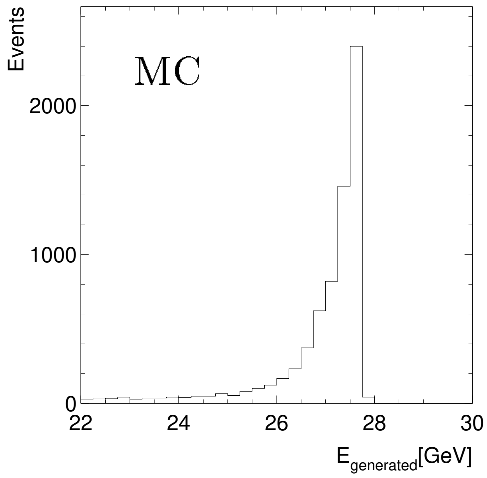
– Zellweise Anpassung Daten $\rightarrow$ MC Simulation.

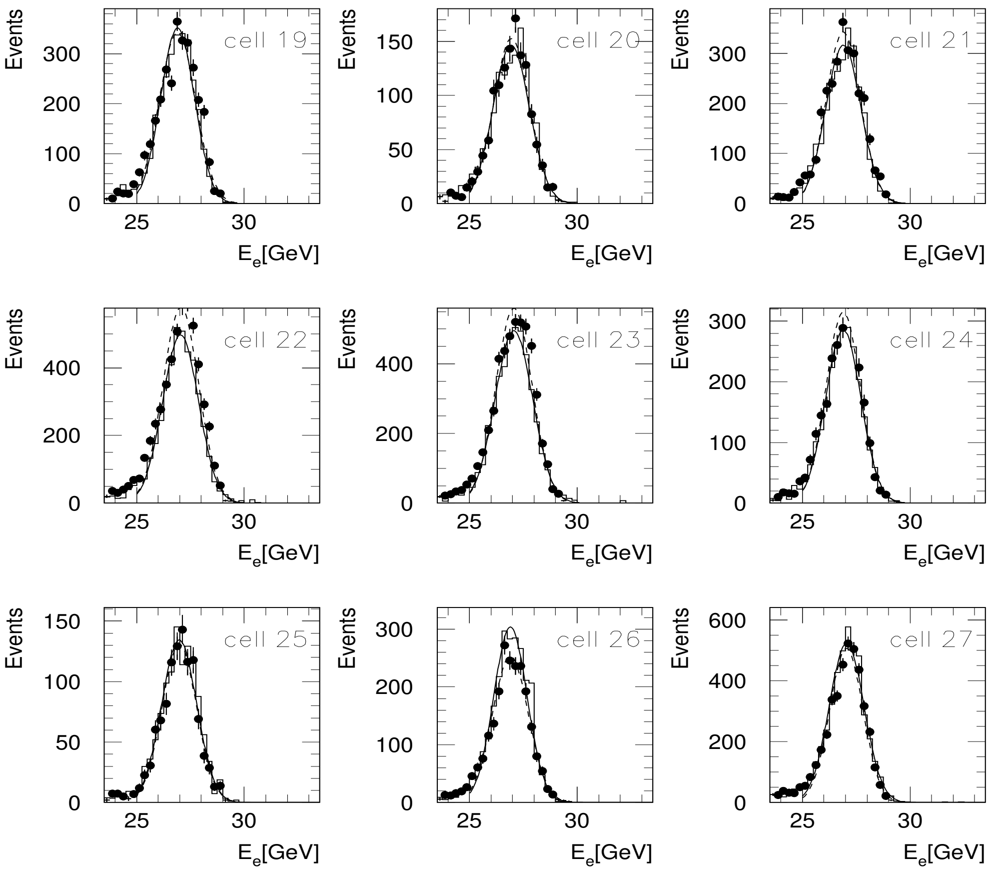
Prozedur

Selektion: $y_{\mathrm{JB}} < 0.05$

Wahre e-Verteilung:
Scharfes Maximum bei Strahlenergie

Gemessene e-Verteilung:
$\sim$ Symmetrisch





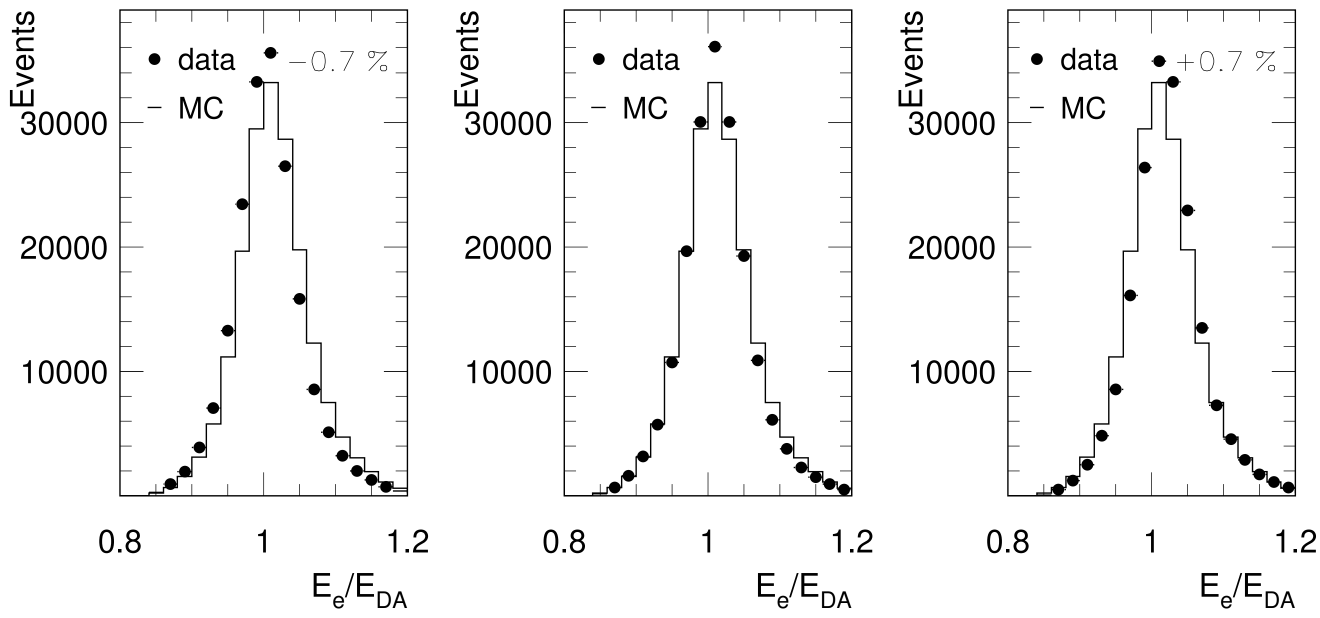
Position: Zellweise Abgleich Daten $\rightarrow$ MC.

Breite: Detektorauflösung: $< 3\%$ bei 27 GeV.
$\rightarrow$ Zellweise Abgleich MC $\rightarrow$ Daten.

Ergebnis der Kalibration

Konsistenz mit 'Doppel-Winkel-Methode':

E_{DA} aus θ_e und $\gamma_h \rightarrow E'_e/E_{\mathrm{DA}}$

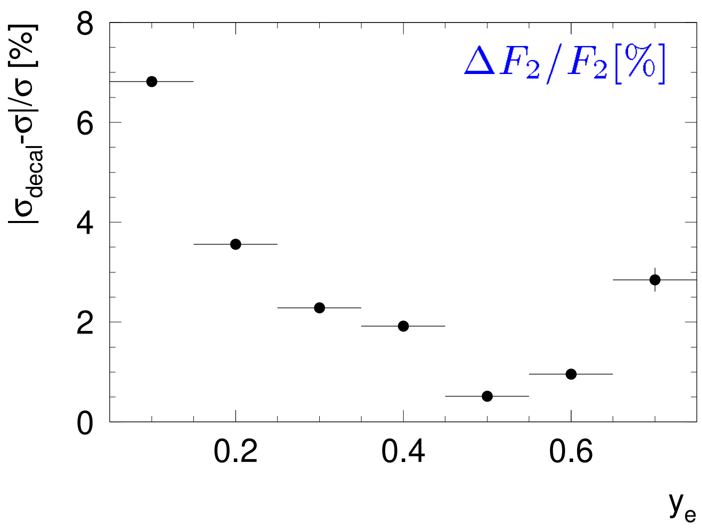


Sensitivität auf Variation der Energieskala:

$\rightarrow$ Systematischer Fehler $< 0.7\%$

Einfluß auf gemessenes F_2 (e-Methode):

$\sim 7\%$ bei $y < 0.15$



Experimentelle Bestimmung von $\boldsymbol{F_2(x,Q^2)}$

Gemessener Wirkungsquerschnitt:

$$\frac{\mathrm{d}^2\sigma}{\mathrm{d}x\mathrm{d}Q^2} = \underbrace{\frac{2\pi\alpha^2}{xQ^4}\left(2(1-y)+\frac{y^2}{1+R}\right)F_2(x,Q^2)}_{\text{Born WQ}}(1+\delta_{\mathrm{RC}})$$

Integ. Born WQ:

$$\sigma_{\square x,Q^2} = \frac{N}{\mathcal{L}} = \frac{N_{\mathrm{Daten}}-N_{\mathrm{Ug}}}{\mathcal{L}}\cdot\frac{1}{A\cdot\epsilon}\cdot\frac{1}{1+\delta_{\mathrm{RC}}}$$

N_{Ug}: Untergrundereignisse

A: Detektorakzeptanz

ϵ: Nachweiswahrscheinlichkeit

δ_{RC}: Korrekturen höherer Ordnung

Strukturfunktion $F_2(x,Q^2)$:

– $R(x,Q^2)$

– Bingrößen- und Zentralwertkorrektur (x_c, Q_c^2).

$$F_2(x_c,Q_c^2) = \frac{N_{\mathrm{Daten}}-N_{\mathrm{Ug}}}{N_{\mathrm{MC}}}\,\frac{\mathcal{L}_{\mathrm{MC}}}{\mathcal{L}_{\mathrm{Daten}}}\cdot F_2^{\mathrm{MC}}(x_c,Q_c^2)$$

– Iterative Anpassung: $F_2^{\mathrm{MC}} \rightarrow F_2$

– Diese Analyse: F_2^{MC} aus H1-QCD Fit '94.

Bedingung: MC beschreibt Daten (A, ϵ, N_{Ug})

Ereignisselektion

Daten mit nominellem WW Punkt, 1995
Runselektion $\rightarrow \mathcal{L} = 565.2 \text{ nb}^{-1}$

- $\exists$ gestreutes Elektron (Spacal): $E'_e > 8$ GeV

Identifikation des gestreuten Elektrons:

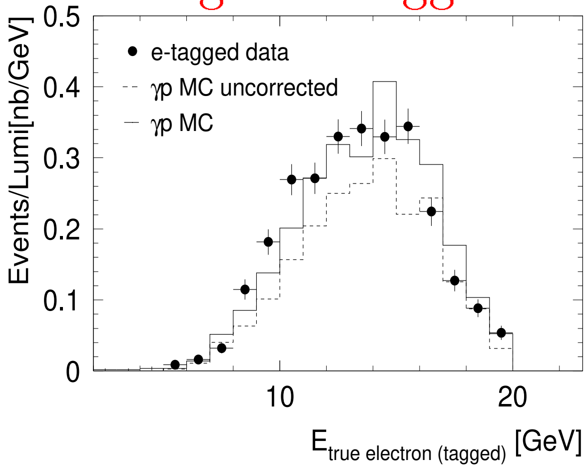
Schauerradius	$R_{cl} < 3.5$ cm
Energie im hadron. Spacal	$E_{e,had} < 0.5$ GeV
Track-Cluster Matching	$\lvert\Delta R\rvert < 2$ cm
(BDC–Spacal)	$\lvert R\Delta\phi\rvert < 2.5$ cm
Energie nahe am Strahlrohr	$E_{veto} < 1$ GeV
Detektorakzeptanz	$R > 8.7$ cm

- $\exists$ Wechselwirkungspunkt (zent. oder vorw. Spurkammer): $-30 \text{ cm} < z_{\text{vtx}} < 30 \text{ cm}$

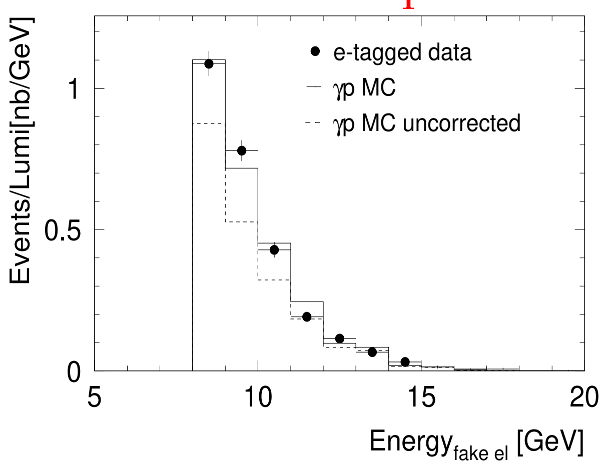
- Geringe Signalverluste in Rückwärtsrichtung: $E - p_z > 35$ GeV
  $\rightarrow$ Minimiere γp Untergrund,
  $\rightarrow$ Verwirf Ereignisse mit ISR.

Photoproduktionsuntergrund

Energie: e-Tagger



e-Kand. im Spacal



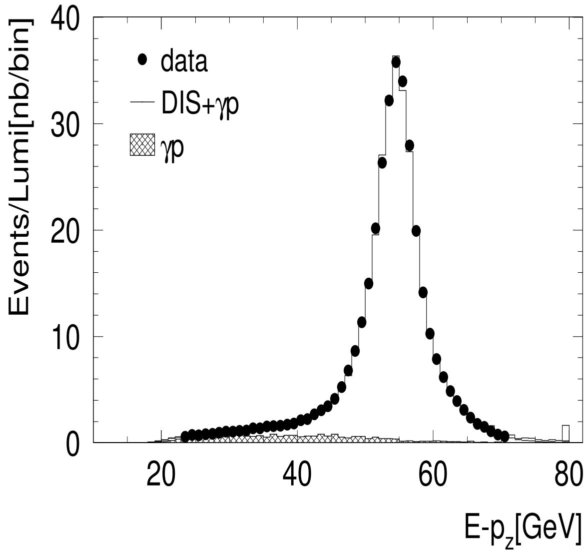
- Hadronischer Endzustand täuscht e-Signatur vor.
- 10% des γp-Untergrundes nachweisbar (e-Tagger).

- Vernachlässigbar bei kleinen y, $< 20\%$ in allen Bins.
- Statistische Subtraktion (PHOJET MC Simulation), 30% Unsicherheit auf subtrahierten Untergrund.

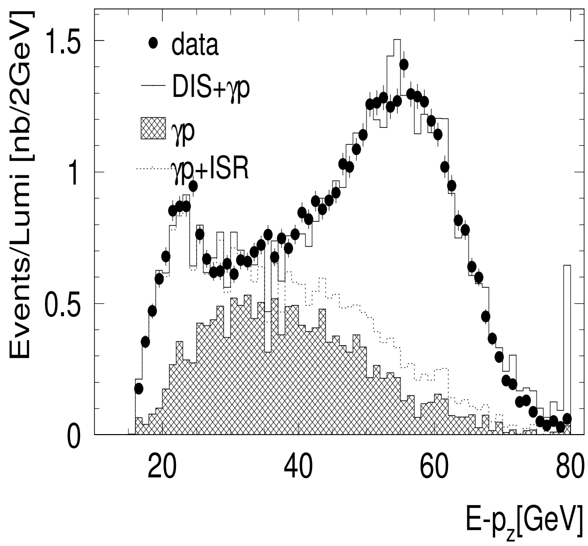
Systematischer Fehler an F_2: $< 6\%$.

Selektionsschnitte

$\sum E - p_z$

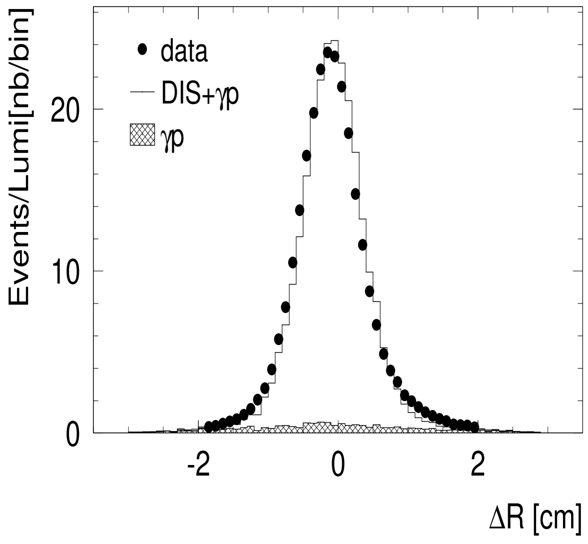


$\sum E - p_z$: $y_e > 0.55$, $Q_e^2 < 4$ GeV^2

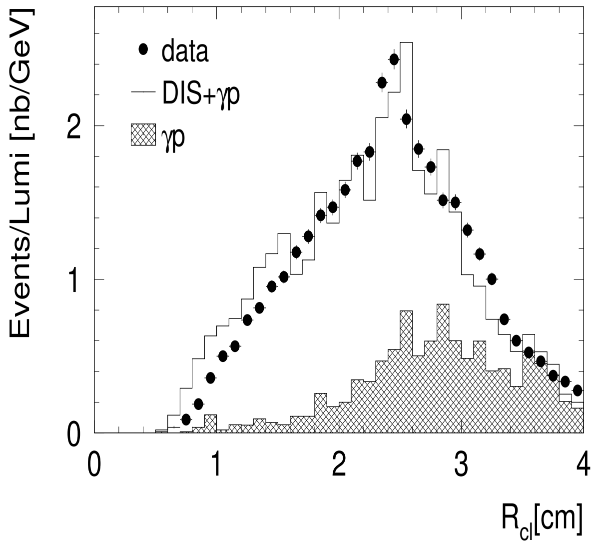


- $E - p_z < 35$ GeV: ISR und γp

$\Delta R_{\mathrm{Spacal-BDC}}$



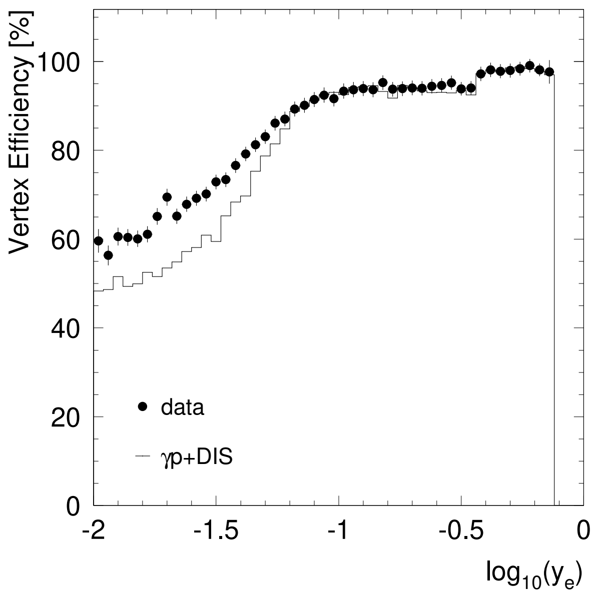
R_{cl}: $y_e > 0.55$, $Q_e^2 < 4$ GeV^2

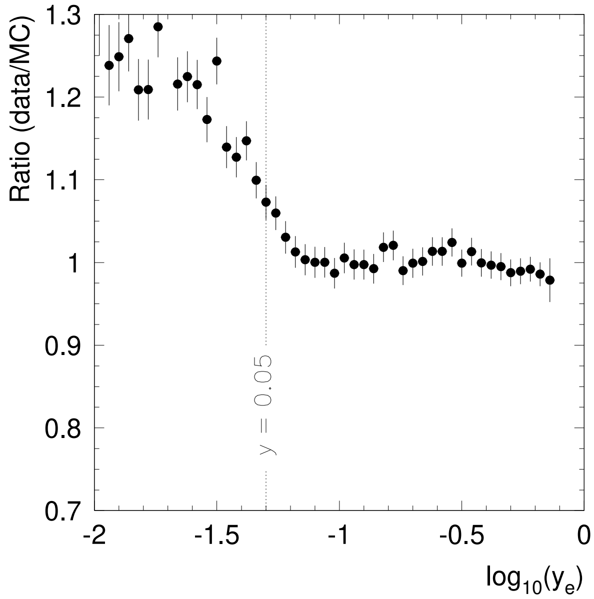


- Systematischer Fehler: 30% des Anteils der verworfenen Elektronen (MC)

Vertexrekonstruktion

Nachweiswahrscheinlichkeit:





- $y > 0.05$: $\epsilon : 90 - 95\%$,
  – Gute Übereinstimmung: Daten/MC

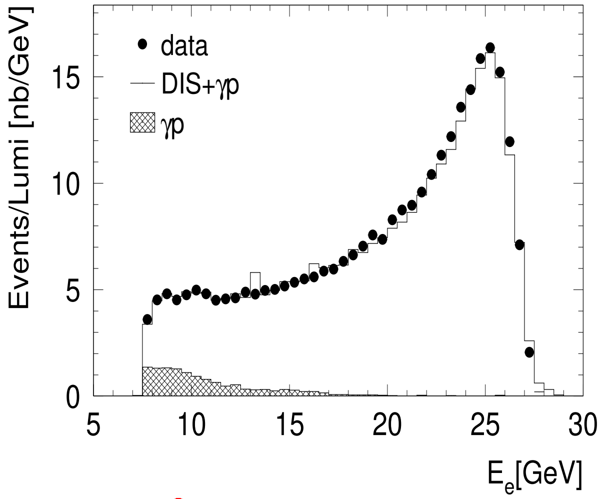
- $y < 0.05$: Diskrepanz unverstanden.

Systematischer Fehler ($y > 0.05$): 2%

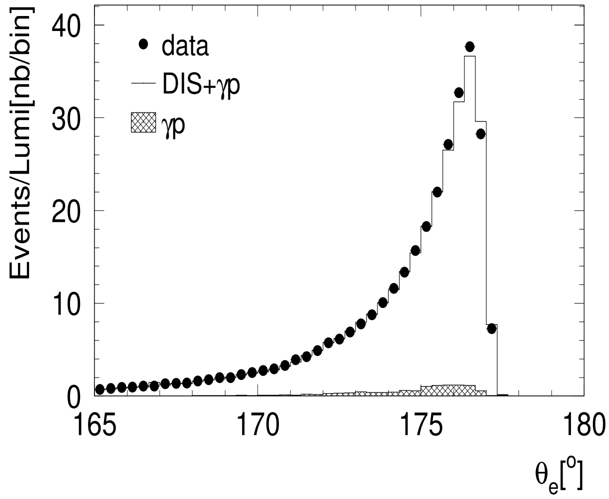
Kinematische Verteilungen

$y_{JB} > 0.05$

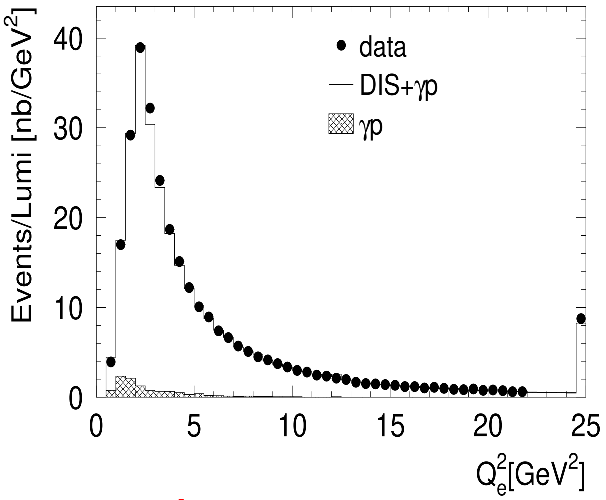
E'_e



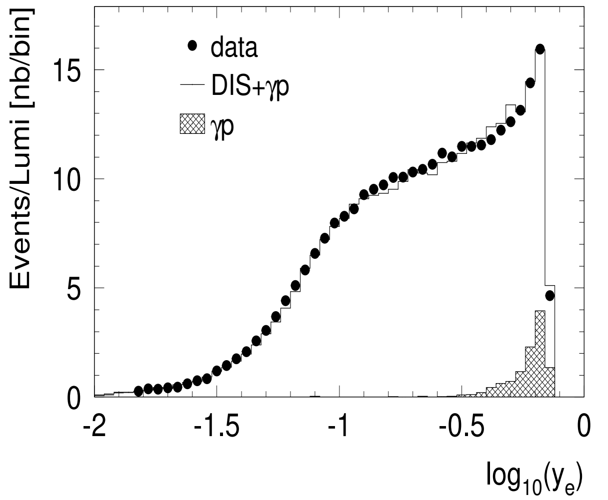
θ_e



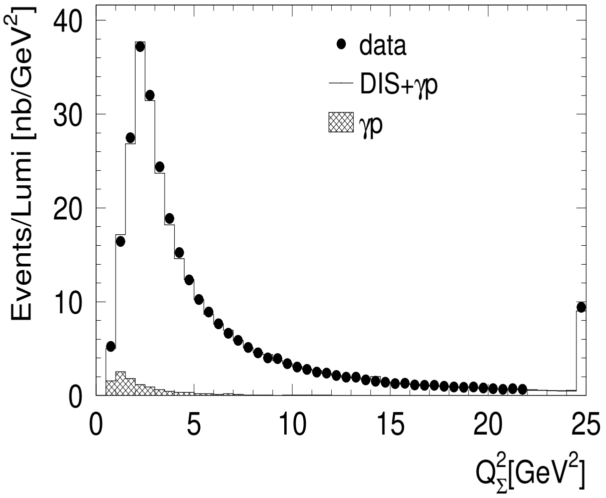
Q_e^2



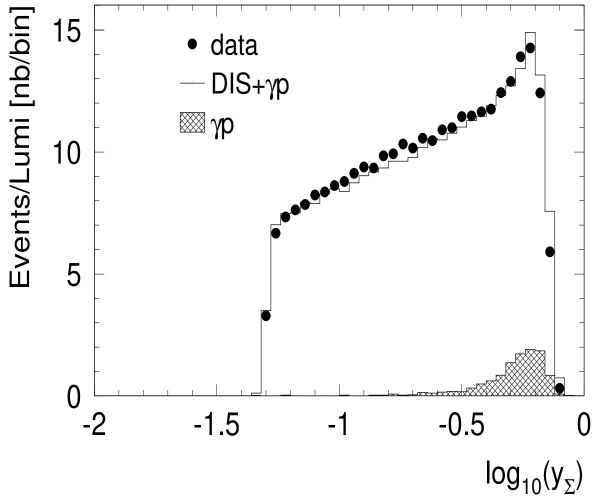
$\log(y_e)$



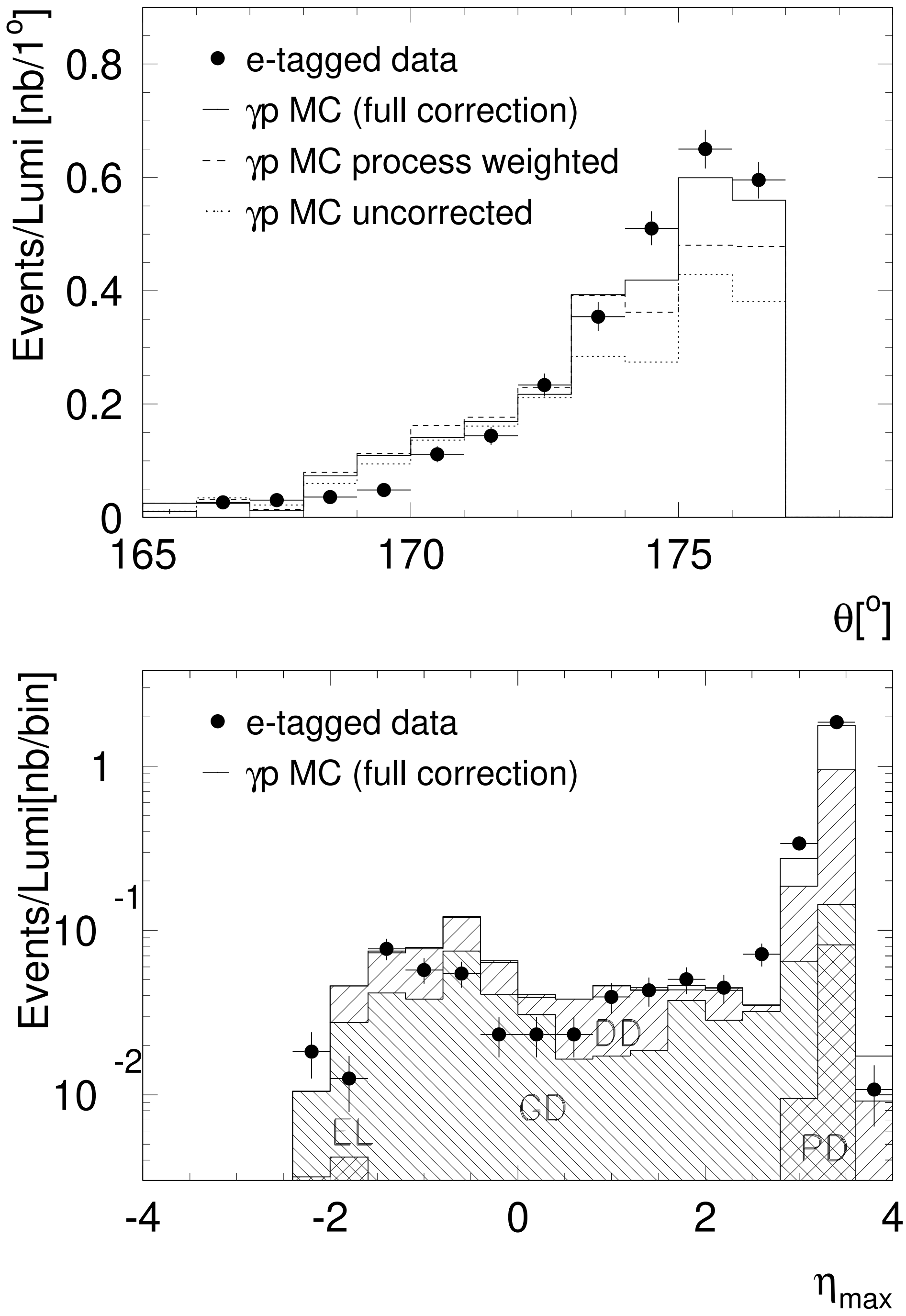
Q_Σ^2



$\log(y_\Sigma)$



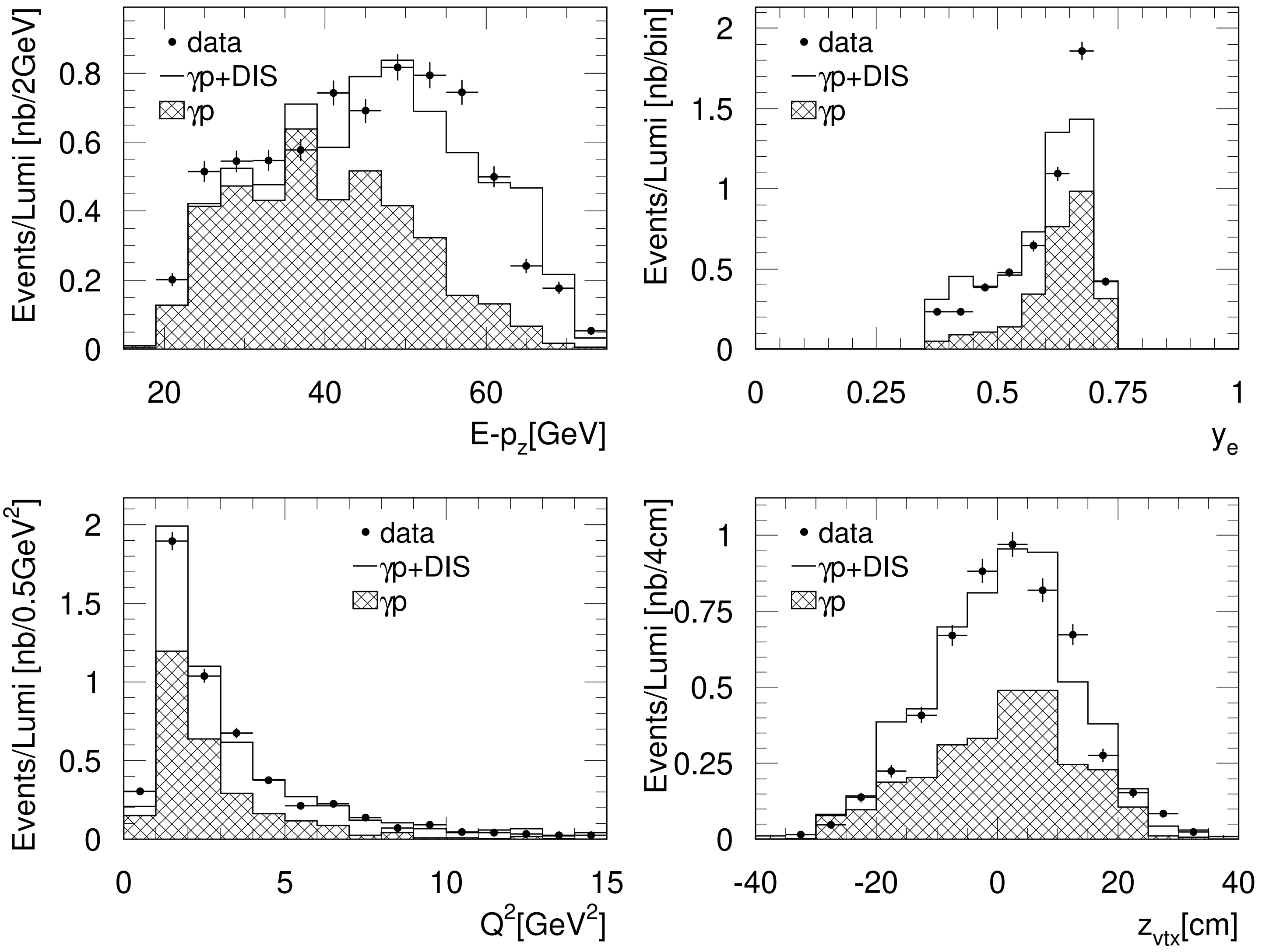
Korrektur der PHOJET Simulation



– Korrigiere relative Anteile der diffraktiven Subprozesse in MC Sim.

– $\theta > 173.5°$: Gewichtsfaktor 1.3 für nicht–diffraktive Ereignisse.

γp: Systematischer Fehler



– Verwende Ereignisse mit $3.5 < R_{cl} < 4$ cm,

– Alle anderen Selektionskriterien gefordert

$\rightarrow$ DIS Sample angereichert mit γp.

Max. Diskrepanz zwischen Daten u. MC: $\sim 30\%$

Kalibration und Ereignisselektion

- Energiekalibration: 0.7% bei 27 GeV.
- Photoproduktionsuntergrund:
  30% der subtrahierten Ereignisse $\rightarrow < 6\%$.
- Vertex Rekonstruktion: 2%
- Weitere Unsicherheiten:
  - Winkelmessung: 0.5 mrad
  - Hadronische Energieskala: 4%-7%
  - BDC Spurrekonstruktion: 1%
  - Korrekturen höherer Ordnung: 2%
  - Elektron–Trigger: 0.5%

  - Abs. Normierung (Luminosität): 1.5%

Gesamtfehler (moderates y):

– Systematisch: $\sim 3 - 4\%$

H1-94 (versch. WWP, $Q^2 \leq 6.5$ GeV^2): $6 - 12\%$

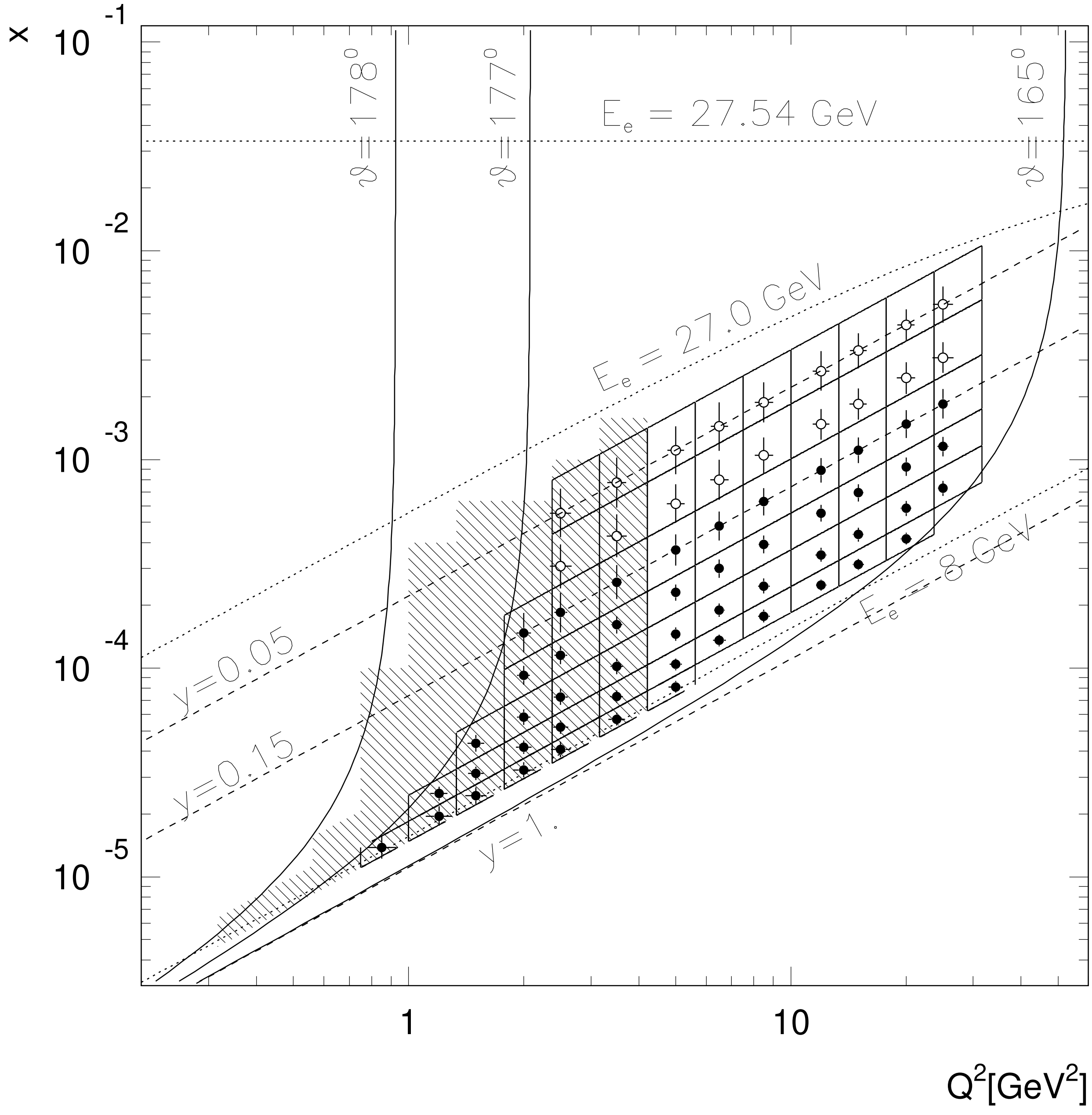
H1-95 (versch. WWP, $Q^2 \leq 3.5$ GeV^2): $5 - 6\%$

– Statistisch: $\sim 3\%$.

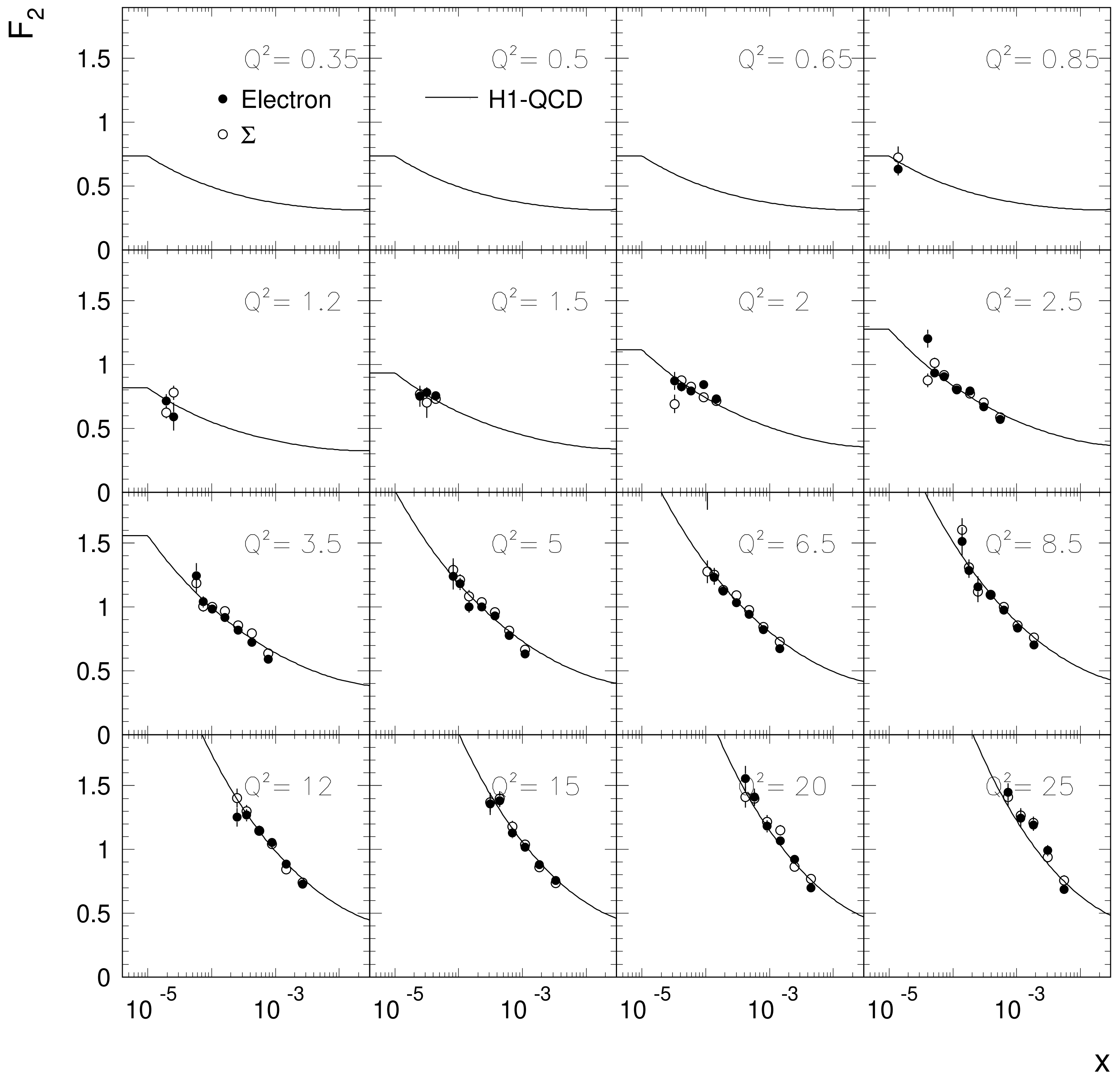
Einteilung der kinematischen Ebene

- – Maximale Anzahl der Meßpunkte,
  – Minimale Korrelation
- Exp. Unsicherheiten skalieren mit y (Vertex, Detektorauflösung etc.)

$\rightarrow$ Bins in y und Q^2



Ergebnis: $F_2(x, Q^2)$



– Daten: statistische Fehler, Kurve: H1-QCD Fit '94.

– e, Σ: Gute Übereinstimmung

$\rightarrow$ Energie- und Winkelmessung, ISR

– e: $y \geq 0.15$ und Σ: $0.05 \leq y < 0.15$.

Modelle für kleine x und Q^2

- DoLa (Donnachie, Landshoff):
  - Regge Theorie: $\sigma_{\gamma p}^{\text{tot}}(W) \propto (W^2)^{0.08}$
  - Annahme: Ähnliche Energieabhängigkeit im Bereich $0 \leq Q^2 \lesssim 10$ GeV^2 ($F_2 \propto x^{-0.08}$).

  $\rightarrow$ Anteil nicht-pert. Prozesse am WQ.

- GRV (Glück, Reya, Vogt):
  - Valenzartige Partonverteilung bei $Q_0^2 = 0.34$ GeV^2.
  - pQCD Entwicklung mit NLO DGLAP.

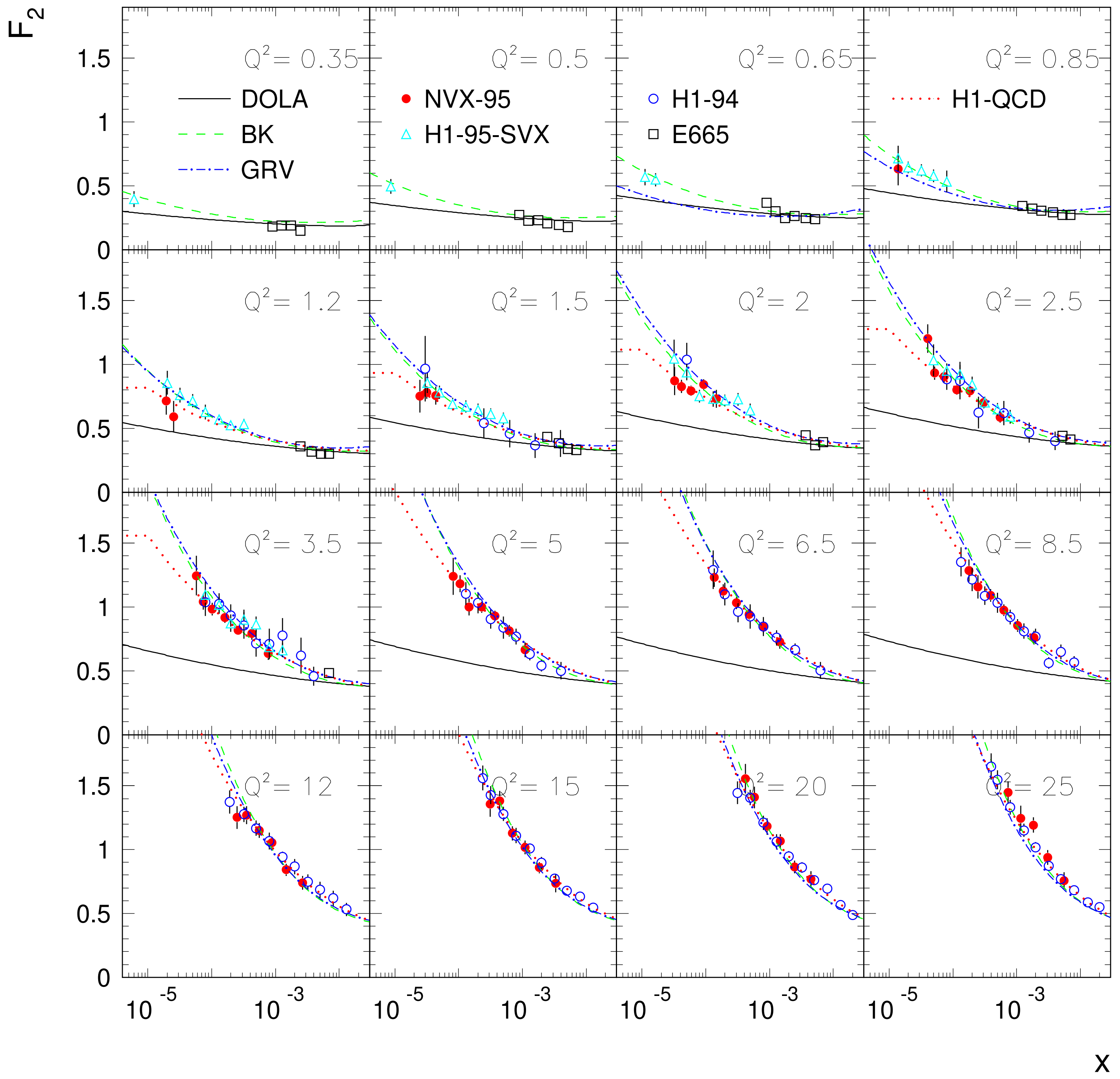
  $\rightarrow$ Keine Gültigkeit erwartet nahe der Startskala.

- BK (Badelek, Kwiecinski):
  - Kombination von pQCD und GVMD.

$$F_2(x, Q^2) = F_2^{\text{VMD}}(x, Q^2) + \frac{Q^2}{Q_0^2 + Q^2} F_2^{\text{QCD}}(\overline{x}, Q^2 + Q_0^2)$$

  $\rightarrow$ Weicher Übergang von nicht-perturbativem zu perturbativem Bereich.

Vergleich mit Modellen

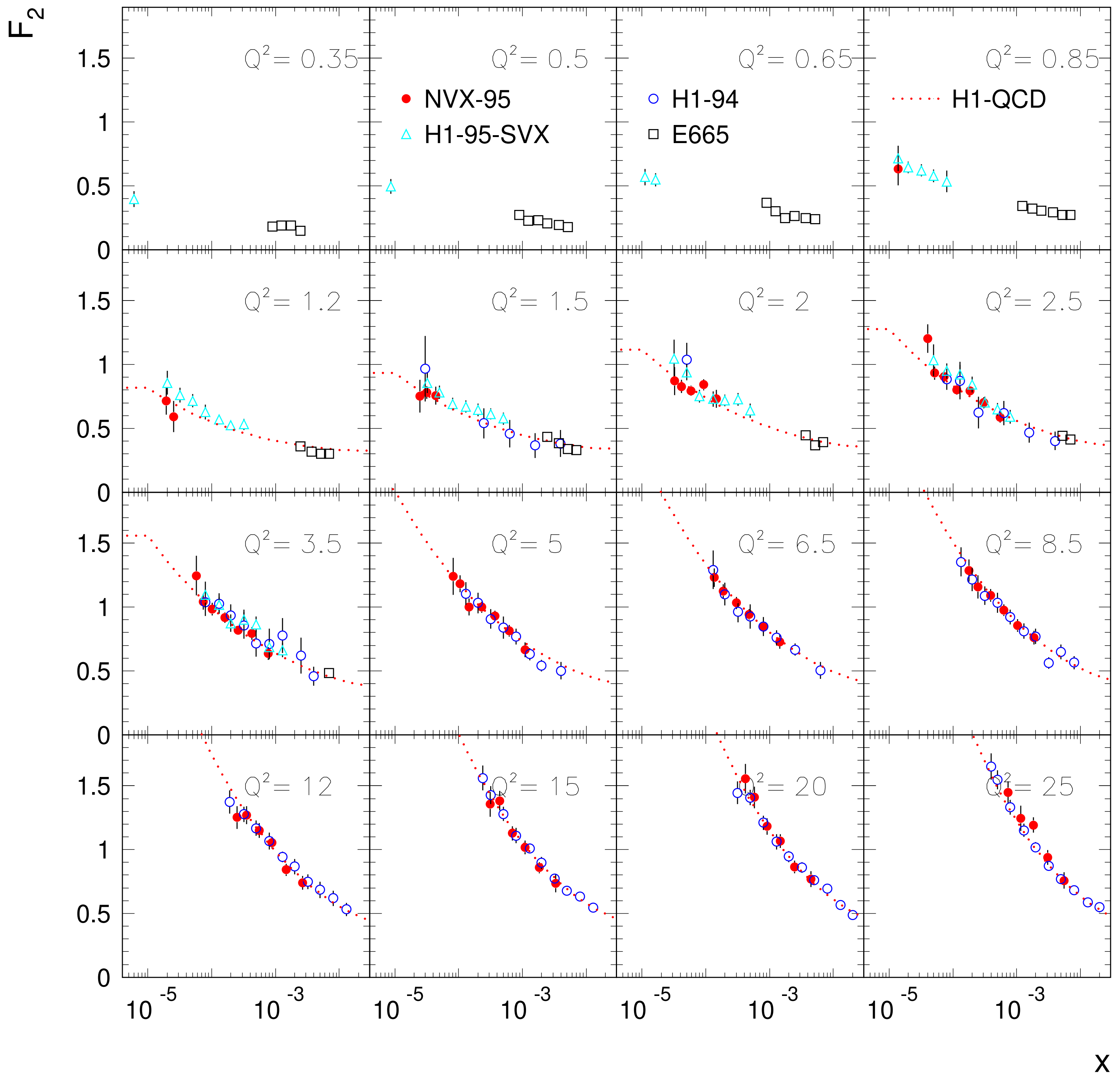


DoLa: Zu geringer Anstieg von F_2 zu kleinen x

GRV: Übereinstimmung bei $Q^2 \gtrsim 1$ GeV^2

BK: beschreibt gesamten Bereich ($Q^2 \geq 0.35$ GeV^2)

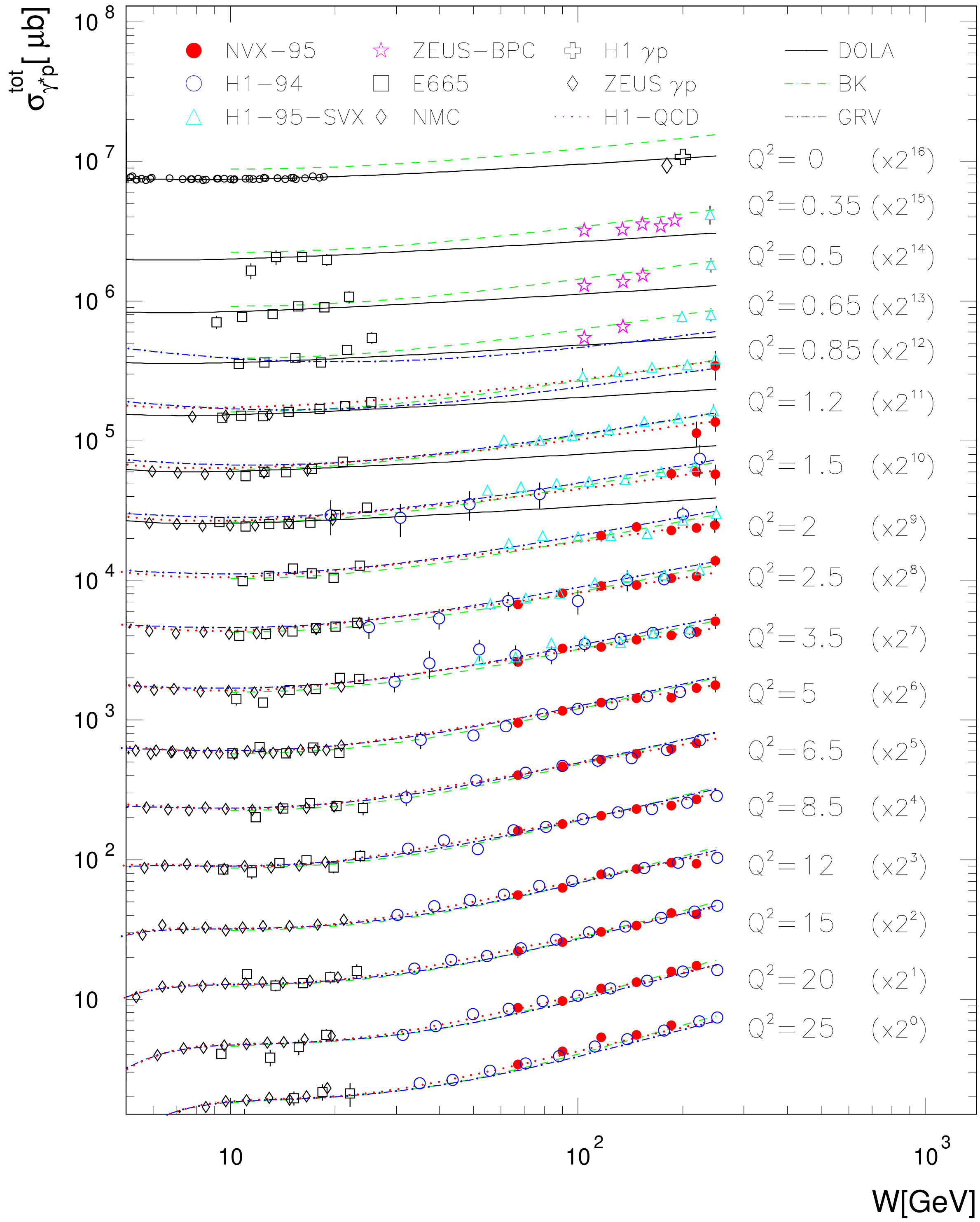
Vergleich



Übereinstimmung mit H1-94, H1-95

$2.5 \leq Q^2 \leq 6.5$ GeV^2: Fehler verringert um Faktor 2.

$\sigma^{tot}_{\gamma^* p}$: Energieabhängigkeit



$$\sigma^{tot}_{\gamma^* p} = \frac{4\pi^2\alpha}{Q^2} F_2 \qquad W^2 = \frac{Q^2}{x} \qquad \text{bei kleinen } x.$$

BK: verfehlt Daten bei $Q^2 = 0$

Zusammenfassung

HERA: Test von QCD ($\rightarrow$ kleine Q^2).

H1 '95: Neue Detektoren 'Spacal' und 'BDC'.
– Gute Präzision im ersten Betriebsjahr.
– Energiekalibration: Skala $< 0.7\%$, Auflösung $< 3\%$.

Messung von F_2:
– $0.85 \leq Q^2 \leq 25$ GeV^2 und $10^{-5} \leq x \leq 5 \cdot 10^{-3}$
– e- und Σ-Methode.
– Gute Übereinstimmung mit H1 NLO QCD Fit '94.
– Fehler verringert um Faktor 2 ($2.5 \leq Q^2 \leq 6.5$ GeV^2).

Vergleich mit Modellen:

pQCD (GRV, H1-QCD):	$Q^2 \gtrsim 1$ GeV^2
pQCD+GVMD (BK):	$Q^2 \gtrsim 0.35$ GeV^2
Regge:	$Q^2 = 0$

Gegenwärtig beschreibt kein Modell die Daten im gesamten kinematischen Bereich.