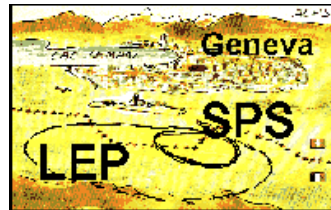
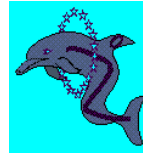


# Messungen zur Photonstruktur

bei



Richard Nisius, CERN

Karlsruhe, 15.05.2000

- Einleitung
- 1. QED Struktur
- 2. Hadronische Struktur
- 3. Zukünftige Messungen zur Photonstruktur
- Zusammenfassung und Ausblick

# Das Photon in unserer Welt

Beobachtung	Photonenergie
Molekülrotationen	meV
Urlaubssonne	eV
Wasserstoff Atomspektrum	keV
Röntgenstrahlung	MeV
$e^+e^-$ Paarerzeugung	GeV
⇒ Bremsstrahlung bei LEP	TeV ←
Kosmische Strahlung	

# Das Photon im Standardmodell

## Die Bausteine der Materie

$$\begin{array}{l} \text{Quarks} \\ \text{Leptonen} \end{array} \begin{array}{ccc} \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix} \end{array}$$

## Wechselwirkungen der Materie durch Eichbosonen

Photon( $\gamma$ ),  $W^\pm$  und  $Z^0$  Bosonen, und Gluonen

## Messungen zu Eichbosonen bei LEP

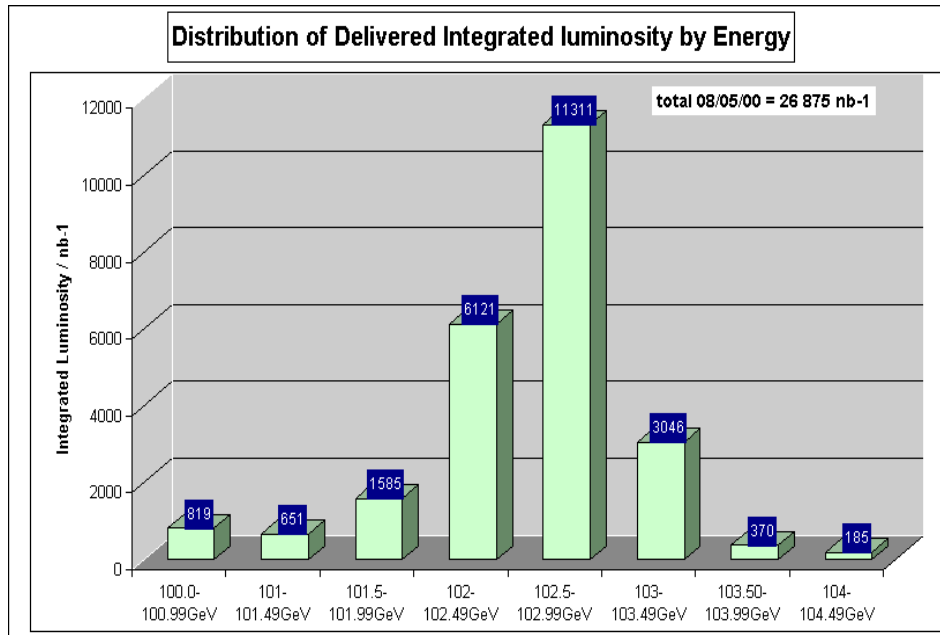
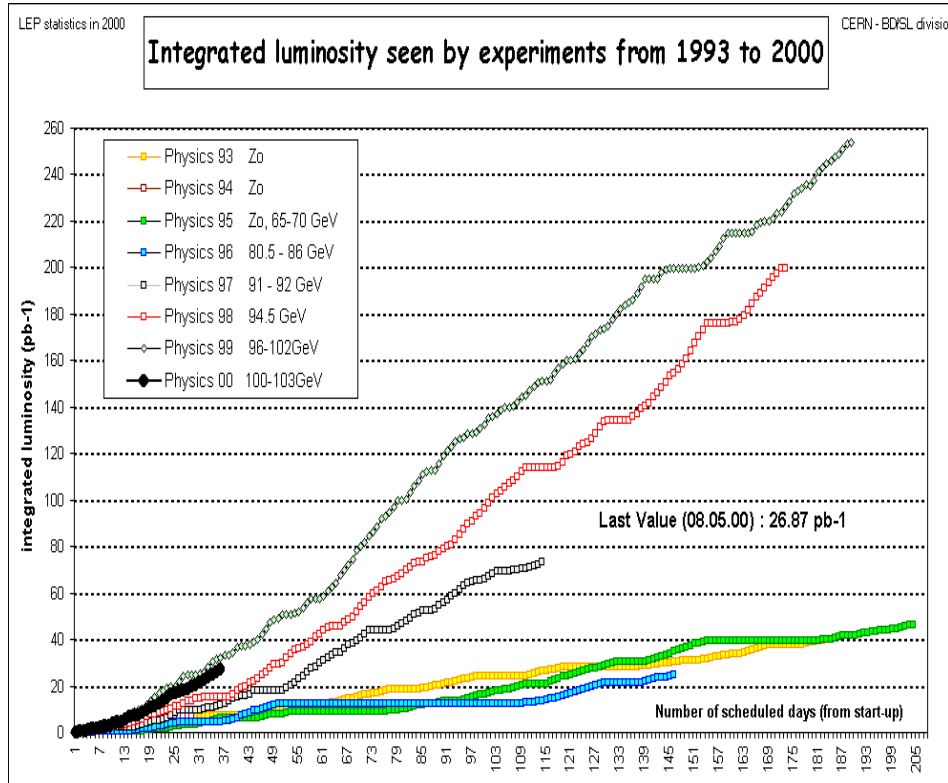
Objekt	Messung
$Z^0$	Präzisionsmessungen bei LEP100
$W^\pm$	$M_W$ auf 75 MeV bei LEP200
Gluonen	QCD Kopplung $\alpha_s (M_{Z^0})$ auf ca. 5% bei LEP100
Photon	Photonstruktur auf 10–30% bei LEP100–200

**Messungen zur Photonstruktur geben Aufschluß über ein fundamentales Eichboson des Standardmodells.**

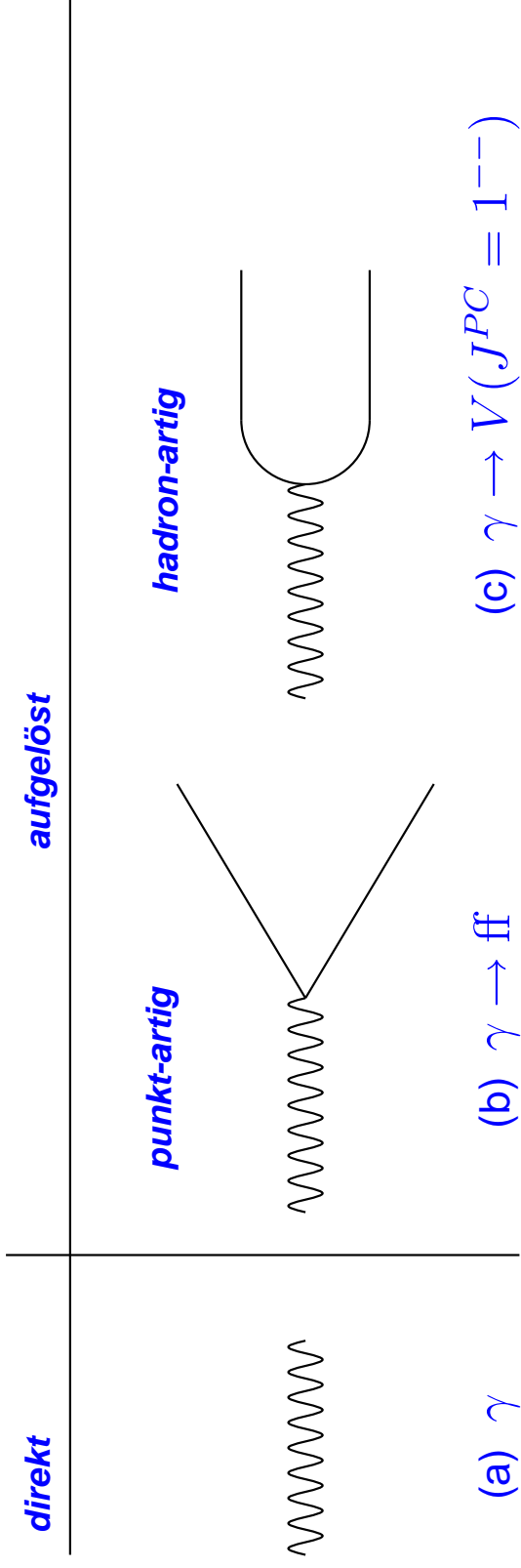
# Der LEP Beschleuniger



# Die integrierten Luminositäten



# Warum sprechen wir von Photonstruktur?



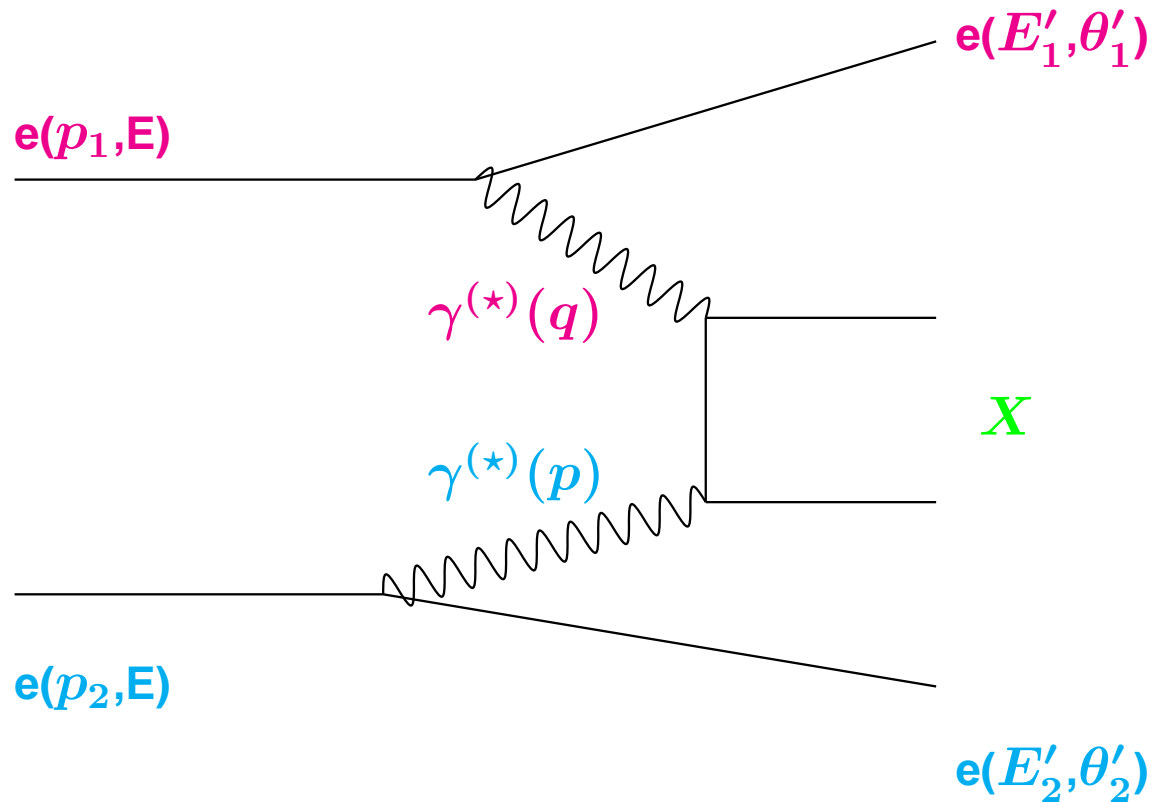
In (a) wechselwirkt das Photon als Ganzes  $\Rightarrow$  **KEINE Struktur**

Die Fluktuationen (b,c) können wegen der Unschärferelation existieren  $\Rightarrow$  **Photon 'Struktur'**

Die typische Lebensdauer der Fluktuationen **steigt** mit der **Photonenergie an** und

**fällt** mit der **Photonvirtualität ab**

# Die Reaktion $e e \rightarrow e e X$



$$d^6\sigma = \frac{d^3p'_1 d^3p'_2}{E'_1 E'_2} \frac{\alpha^2}{16\pi^4 Q^2 P^2} \left[ \frac{(q \cdot p)^2 - Q^2 P^2}{(p_1 \cdot p_2)^2 - m_e^2 m_e^2} \right]^{1/2}$$

$$\left( 4\rho_1^{++} \rho_2^{++} \sigma_{TT} + 2\rho_1^{++} \rho_2^{00} \sigma_{TL} \right.$$

$$\left. + 2\rho_1^{00} \rho_2^{++} \sigma_{LT} + \rho_1^{00} \rho_2^{00} \sigma_{LL} + \right.$$

$$\left. 2|\rho_1^{+-} \rho_2^{+-}| \tau_{TT} \cos 2\bar{\phi} - 8|\rho_1^{+0} \rho_2^{+0}| \tau_{TL} \cos \bar{\phi} \right)$$

$$Q^2 = -q^2 = 2 E E'_1 (1 - \cos \theta'_1)$$

$$P^2 = -p^2 = 2 E E'_2 (1 - \cos \theta'_2)$$

$$x = \frac{Q^2}{Q^2 + W^2 + P^2}$$

## Limit der tiefinelastischen Elektron-Photon Streuung

Using:

$$2x F_T^\gamma = \frac{Q^2}{4\pi^2\alpha} \sigma_{TT}(x, Q^2)$$

$$F_L^\gamma = \frac{Q^2}{4\pi^2\alpha} \sigma_{LT}(x, Q^2)$$

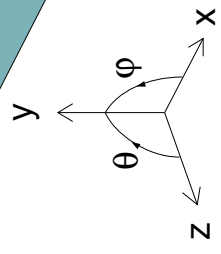
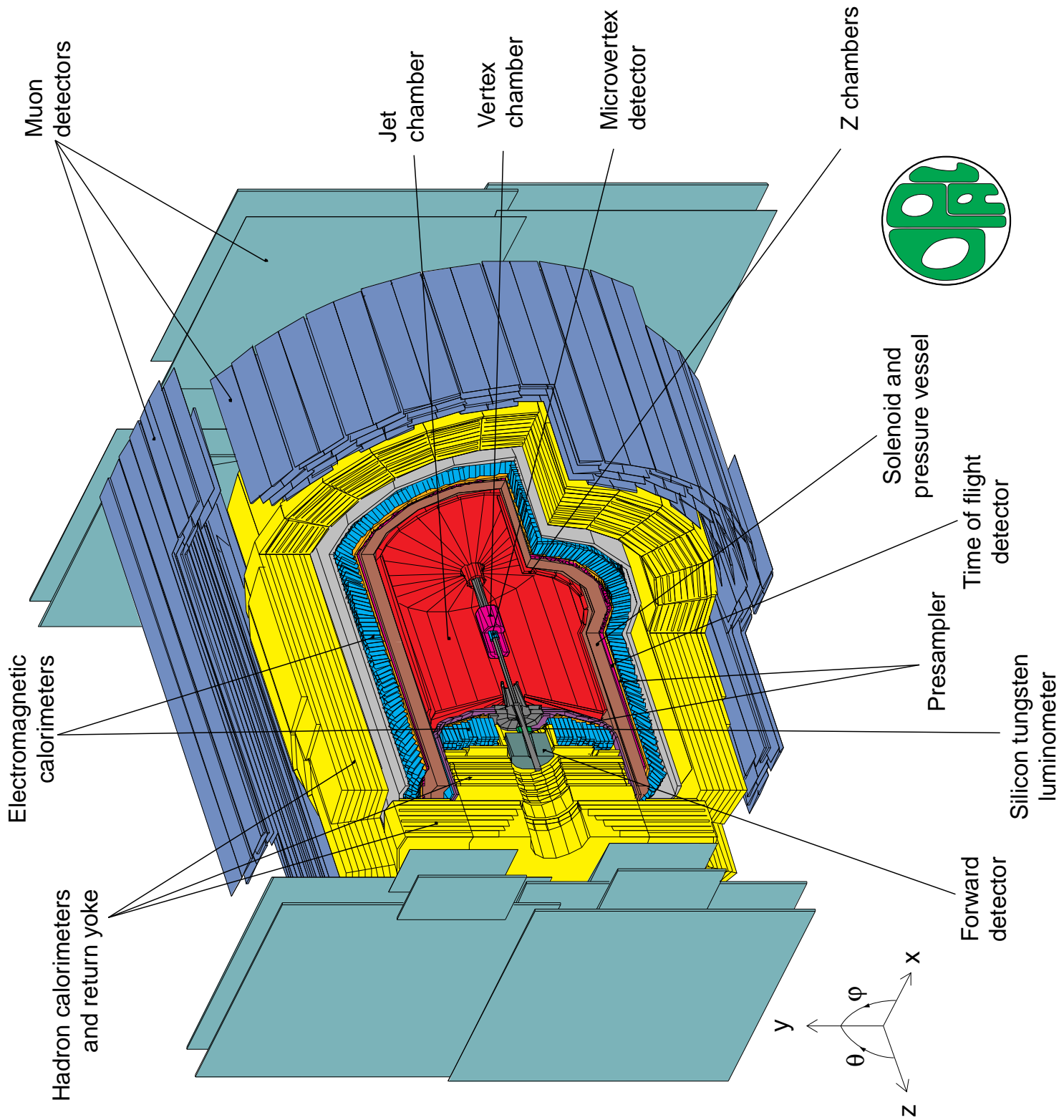
$$F_2^\gamma = 2x F_T^\gamma + F_L^\gamma$$

Im Limit  $(p \cdot q)^2 - Q^2 P^2 \approx (p \cdot q)^2$  reduziert sich der Wirkungsquerschnitt zu:

$$\frac{d^4\sigma}{dx dQ^2 dz dP^2} = \frac{d^2 N_\gamma^T}{dz dP^2} \cdot \frac{2\pi\alpha^2}{x Q^4} \cdot [1 + (1-y)^2] \cdot \underbrace{\left[ 2x F_T^\gamma(x, Q^2) + \frac{2(1-y)}{1+(1-y)^2} F_L^\gamma(x, Q^2) \right]}_{\rightarrow F_2^\gamma \text{ for } y \ll 1}$$

$$\text{mit: } \frac{d^2 N_\gamma^T}{dz dP^2} = \frac{\alpha}{2\pi} \left[ \frac{1+(1-z)^2}{z} - \frac{1}{P^2} - \frac{2m_e^2 z}{P^4} \right]$$





# Vorhersagen zur Photonstruktur

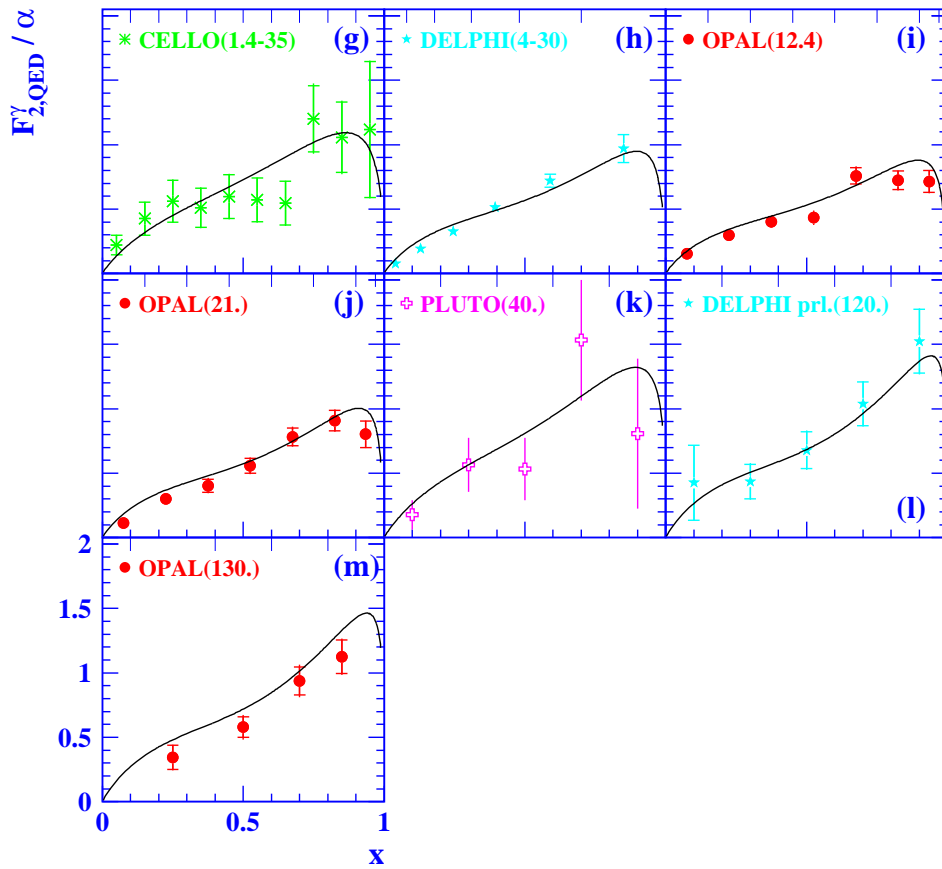
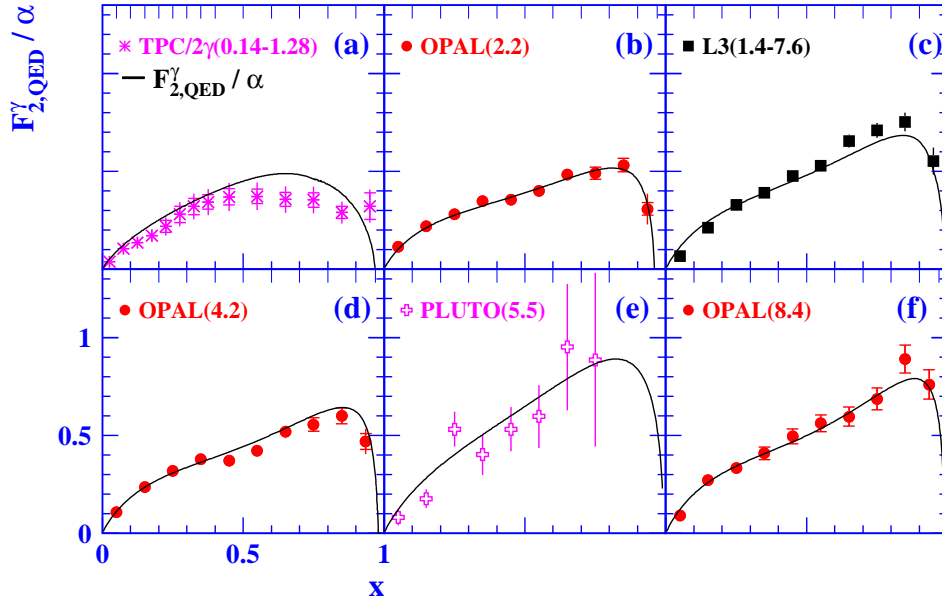
## QED Struktur

1. Die punkt-artige Komponente führt zum Anstieg der QED Struktur für große  $x$ .
2. Die Struktur virtueller Photonen ist unterdrückt.
3. Virtuelle Photonen haben eine longitudinale Komponente.
4. Interferenzterme sind wichtig für virtuelle Photonen.

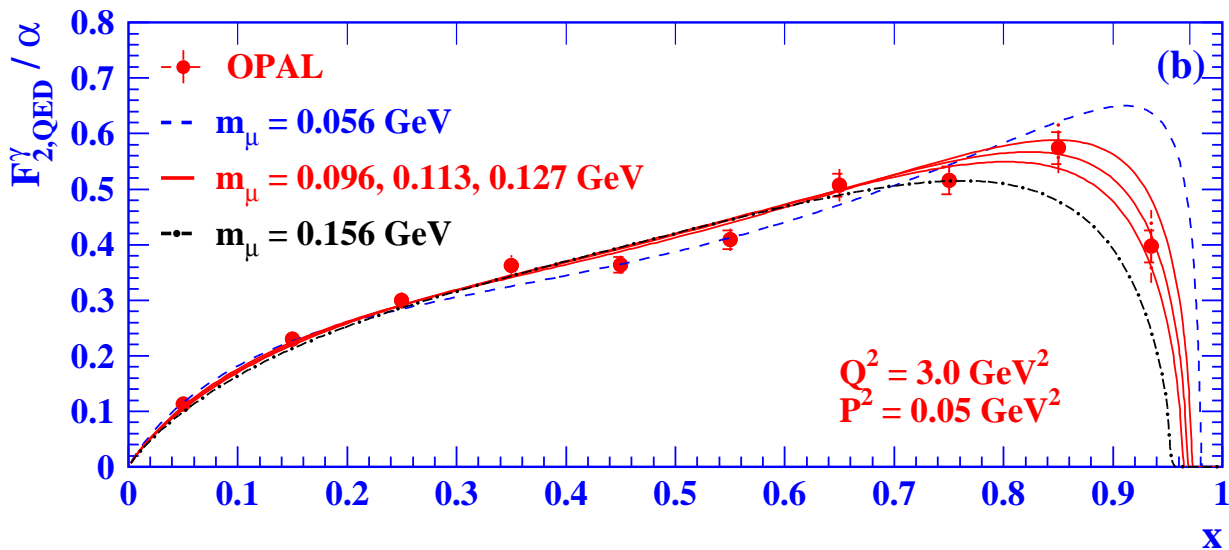
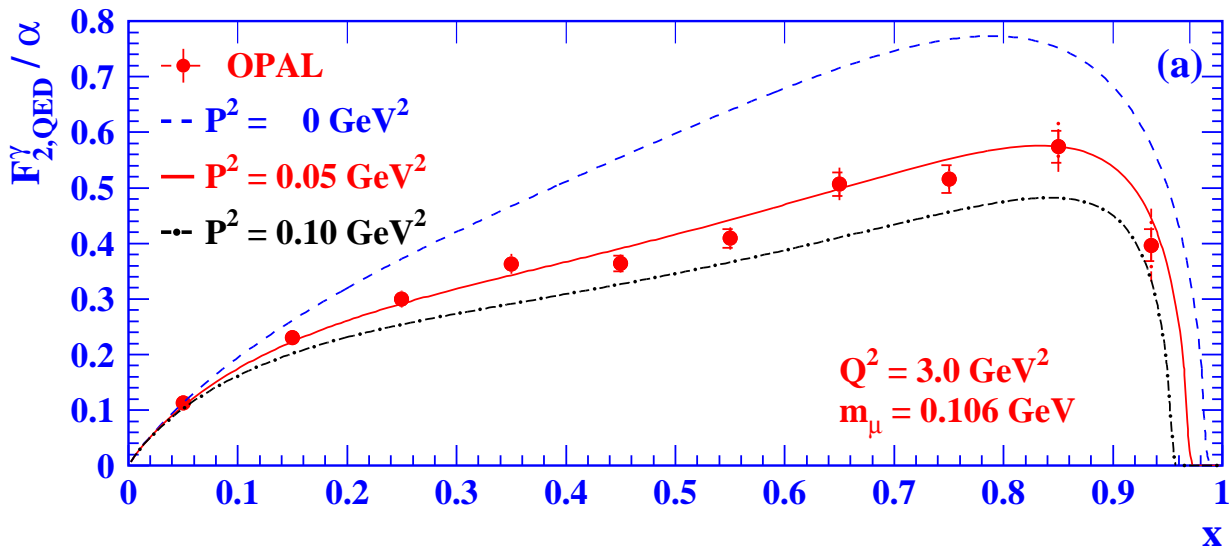
## Hadronische Struktur

1. Im Bereich in dem die punkt-artige Komponente dominiert, gelten die globalen Aussagen der QED modulo QCD Korrekturen.
2. Kennt man die Partonverteilungen im Photon bei einem Impulsübertrag, dann wird die Entwicklung mit  $Q^2$  von der perturbativen QCD vorhergesagt.
3. Insbesondere zeigt die  $Q^2$  Entwicklung der Photonstruktur einen positiven Anstieg für alle Werte von  $x$ .
4. Die QCD Dynamik erzwingt bei festem  $Q^2$  einen steilen Anstieg der Struktur für kleine Werte von  $x$ .

# Alle Daten für $F_{2,QED}^\gamma$

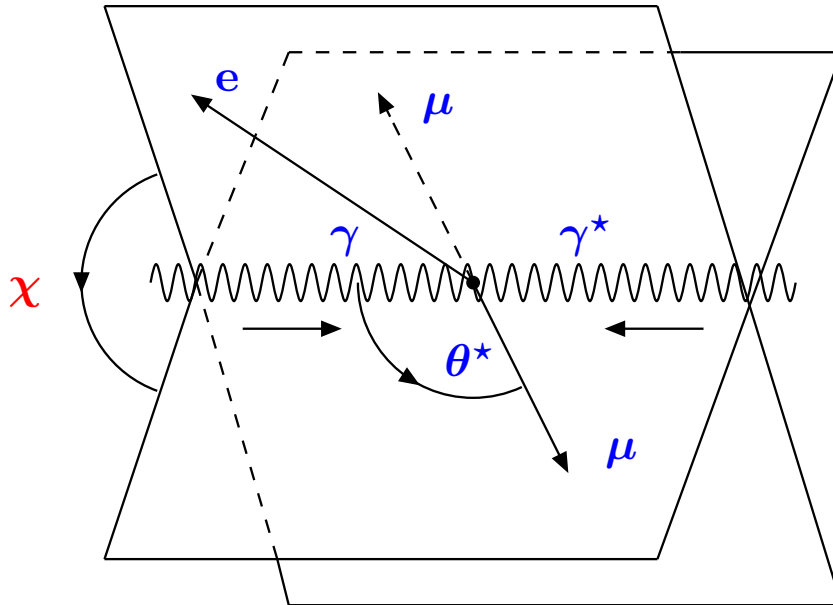


# $P^2$ und $m_\mu$ Abhängigkeiten von $F_2^\gamma$



Die  $P^2$  Abhängigkeit ist in den Daten deutlich sichtbar. Die Muon Masse kann mit  $\pm 15\%$  Genauigkeit bestimmt werden.

# Azimuthale Korrelationen



$$e\gamma \rightarrow e\mu\mu$$

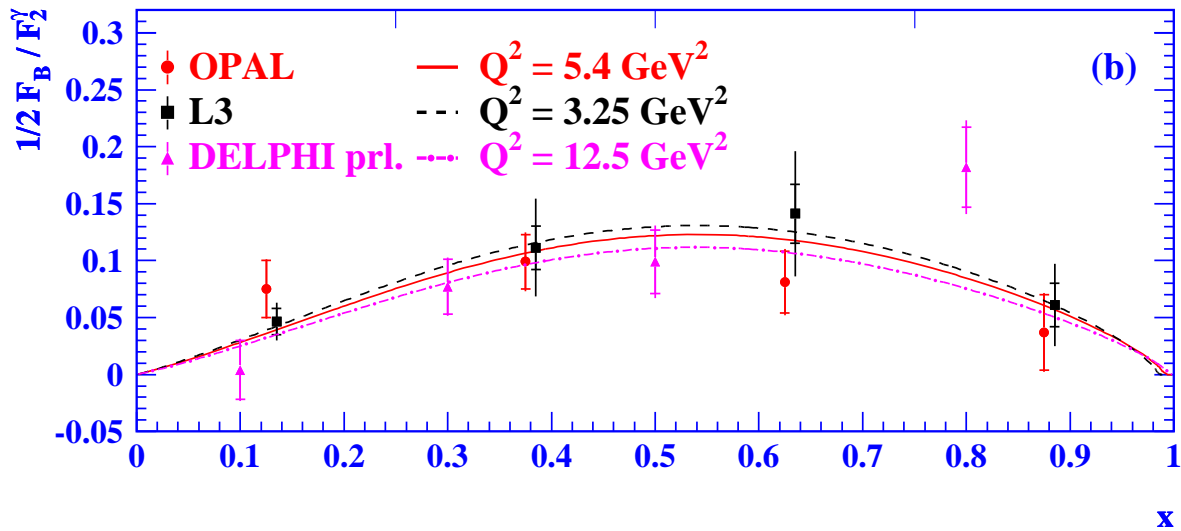
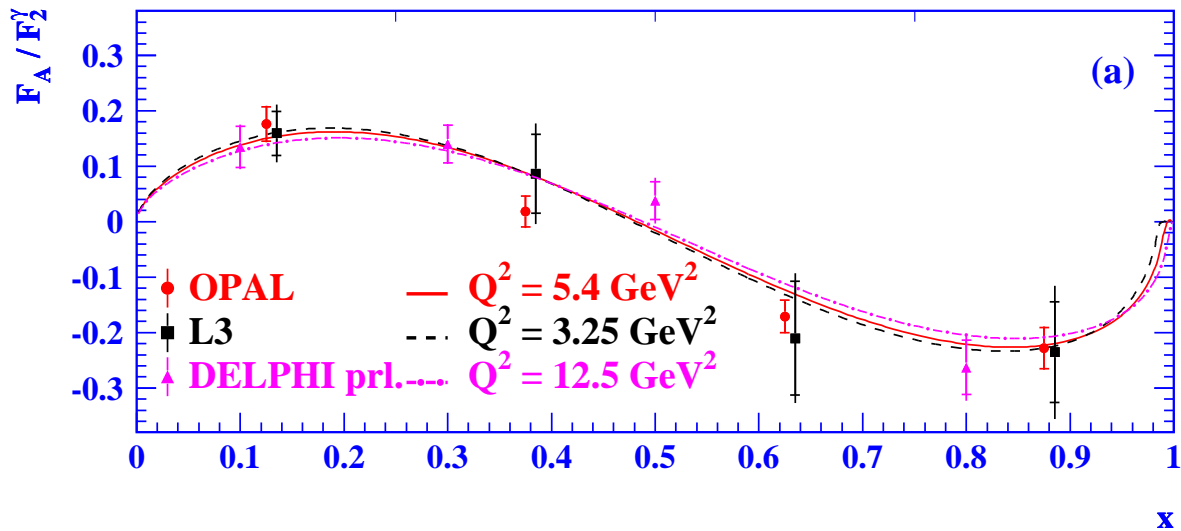
$$d\sigma \propto 1 - \rho(y) F_A^\gamma / F_2^\gamma \cos \chi + \frac{1}{2} \epsilon(y) F_B^\gamma / F_2^\gamma \cos 2\chi$$

$$\epsilon(y) = \frac{2(1-y)}{1+(1-y)^2} \approx 1, \quad \rho(y) = \frac{(2-y)\sqrt{1-y}}{1+(1-y)^2} \approx 1$$

Die Abhängigkeit von  $\chi$  gibt Zugang zu anderen  
Strukturfunktionen neben  $F_2^\gamma$ .

# Die Strukturfunktionen

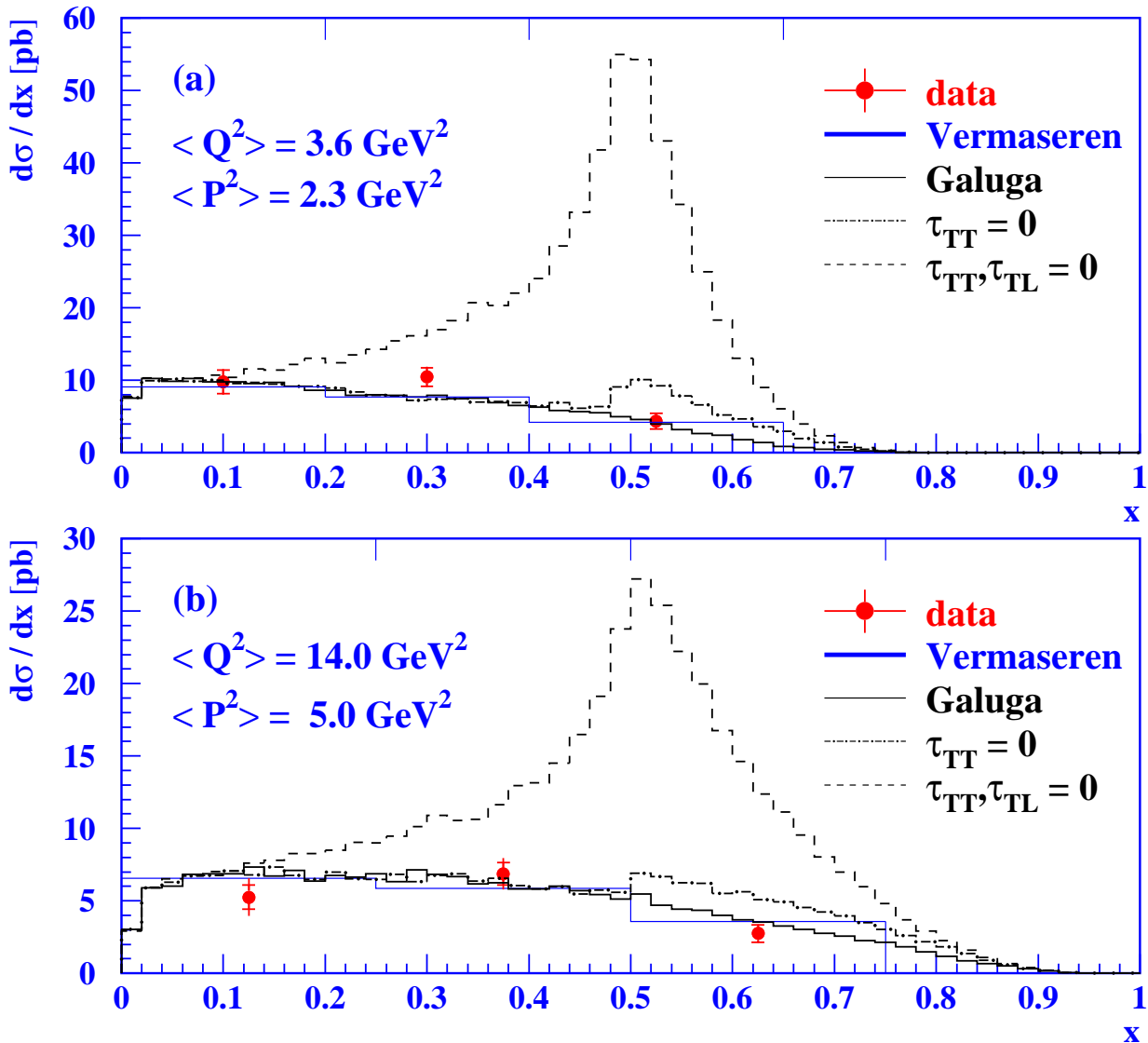
$$F_A^\gamma \text{ und } F_B^\gamma$$



Dies ist die erste Messung die über die Messung des differentiellen Wirkungsquerschnitts hinausgeht.

# Wirkungsquerschnitt für $ee \rightarrow ee\gamma^*\gamma^* \rightarrow ee\mu^+\mu^-$

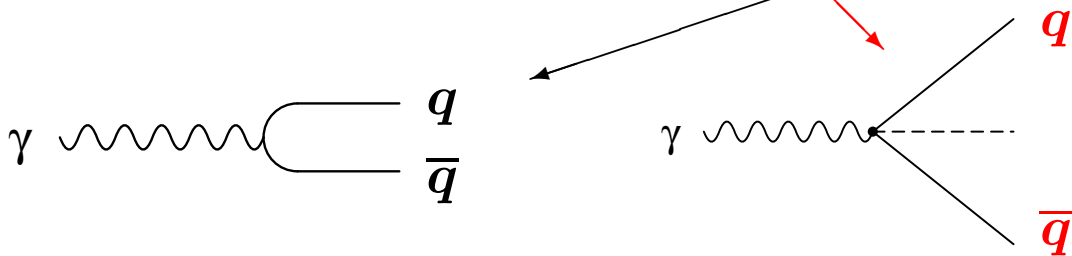
OPAL



Die QED Vorhersage stimmt gut mit den Daten überein  
und die Existenz der Interferenzterme wurde zum  
ersten Mal klar gesehen.

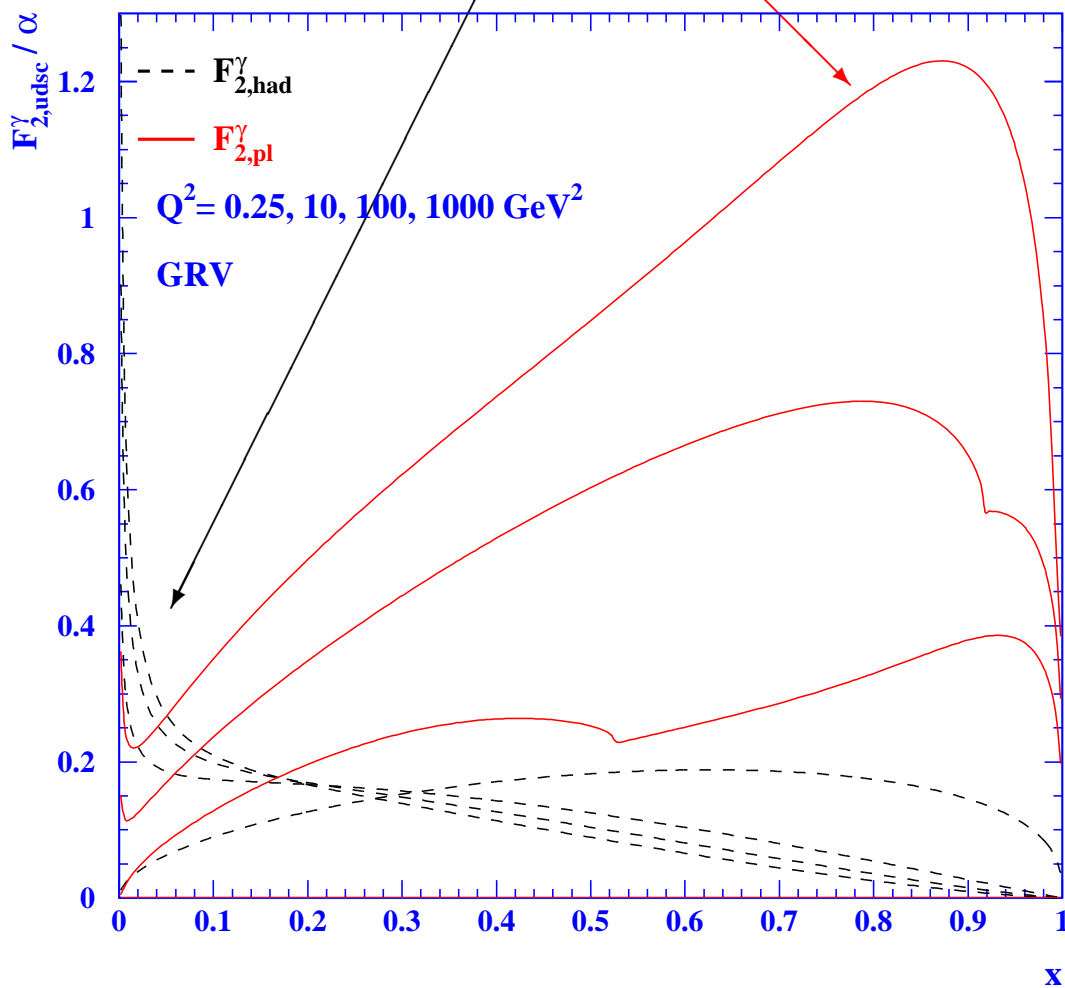
# Beiträge zu $F_2^\gamma(x, Q^2)$

$$F_2^\gamma(x, Q^2) = x \sum_{c,f} e_q^2 f_{q,\gamma}(x, Q^2)$$



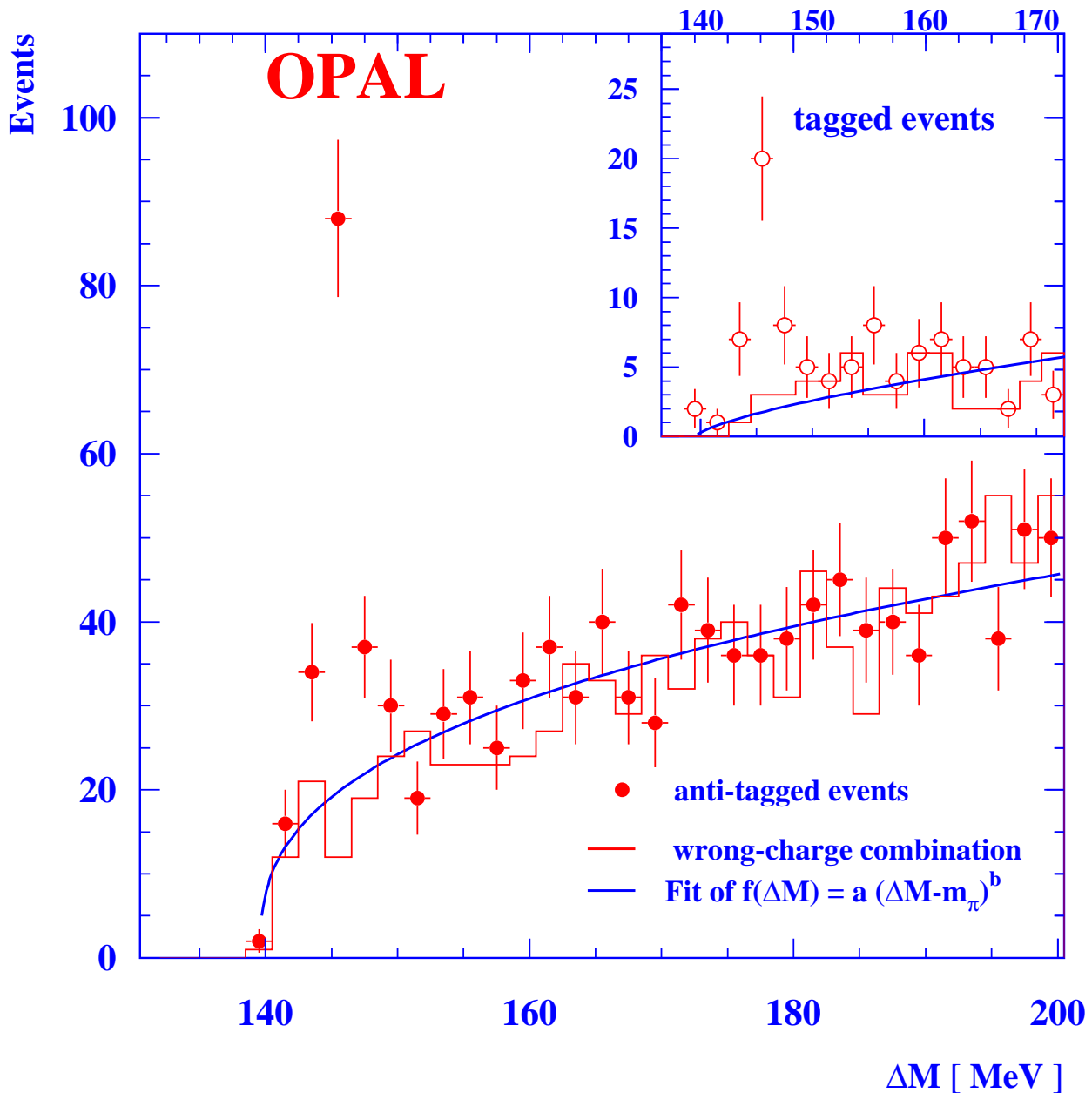
hadron-artig, nicht-perturbativ  
e.g. VMD( $\rho, \omega, \phi$ ), kleines- $x$

punkt-artig, perturbativ  
großes- $x$



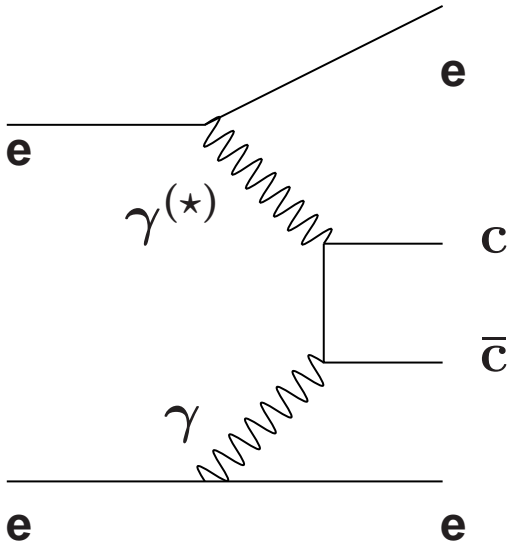


# Charm Quarks identifiziert durch $D^*$ s

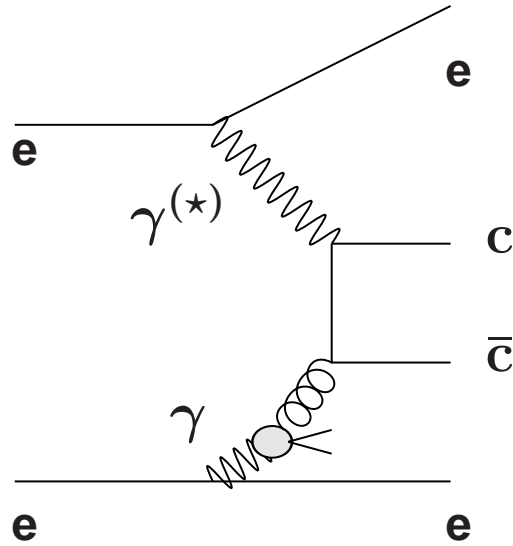


Ein klares Signal im  $\Delta(M) = M(D^*) - M(D^0)$   
Massenspektrum ist sichtbar für anti-tagged und  
tagged Ereignisse

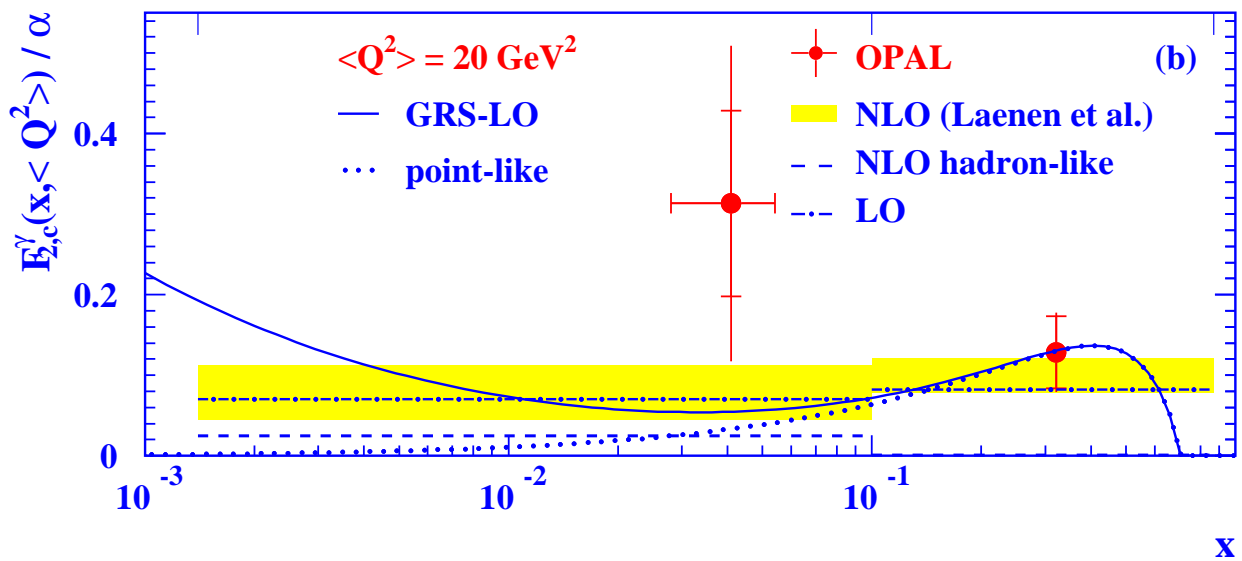
# Die erste Messung von $F_{2,c}^\gamma$



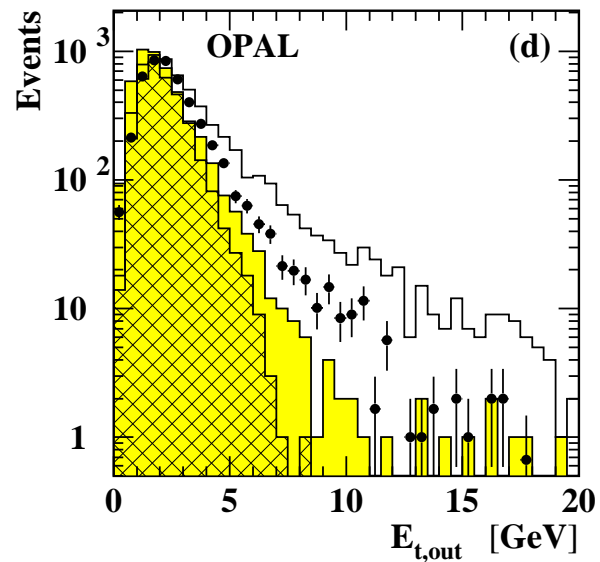
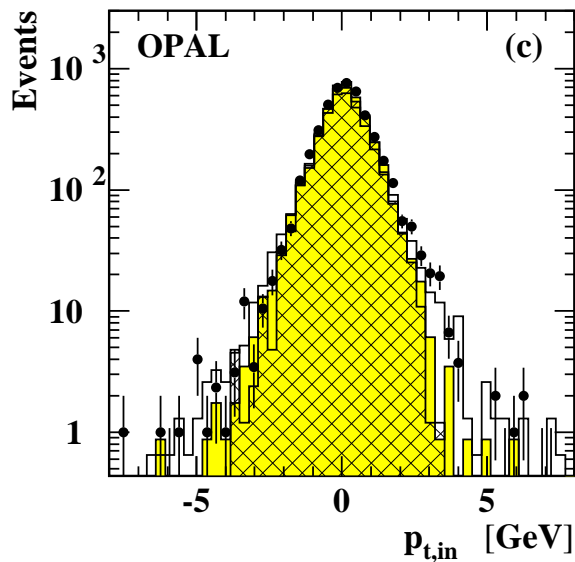
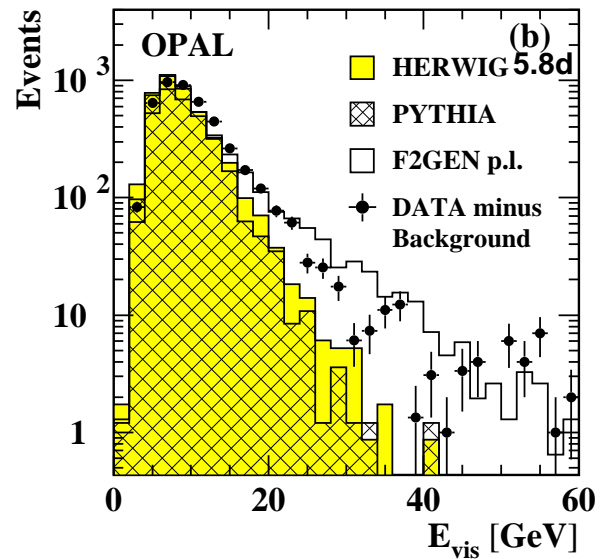
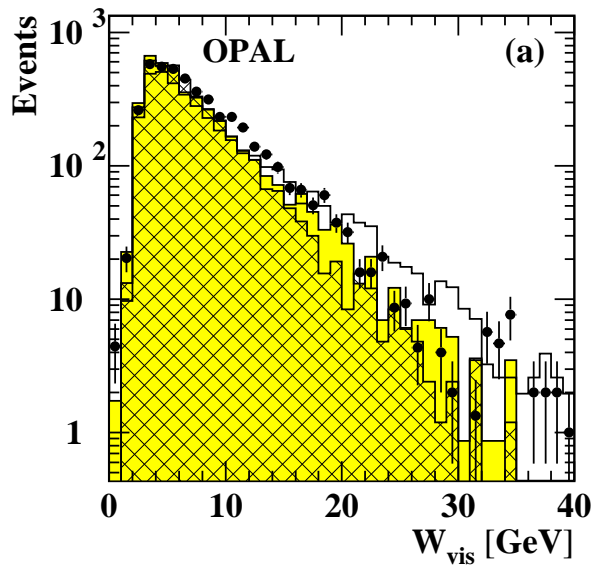
**punkt-artig**, rein perturbative QCD Vorhersage, dominiert bei **großen- $x$**



**hadron-artig**, hängt von  $f_g^\gamma$  ab, dominiert bei **kleinen- $x$**

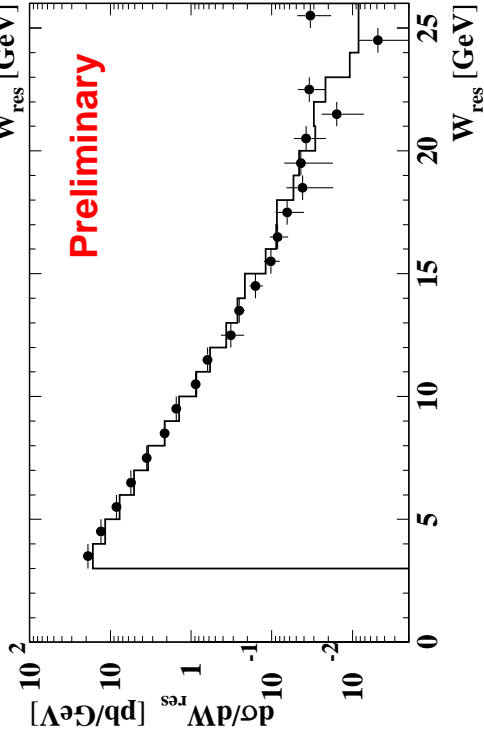
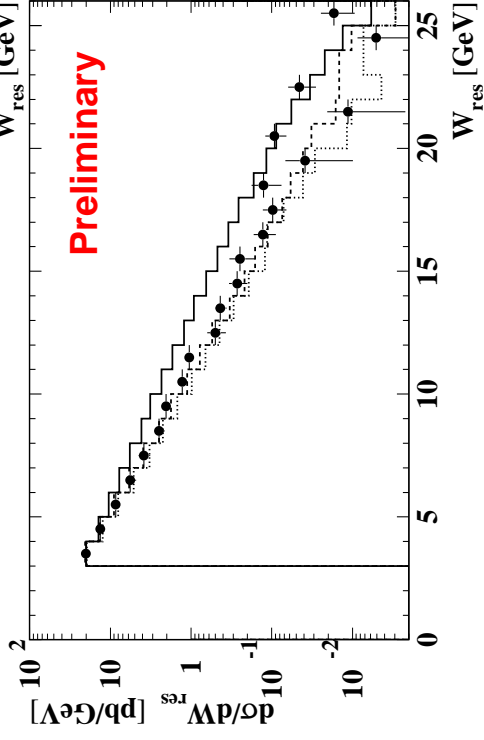
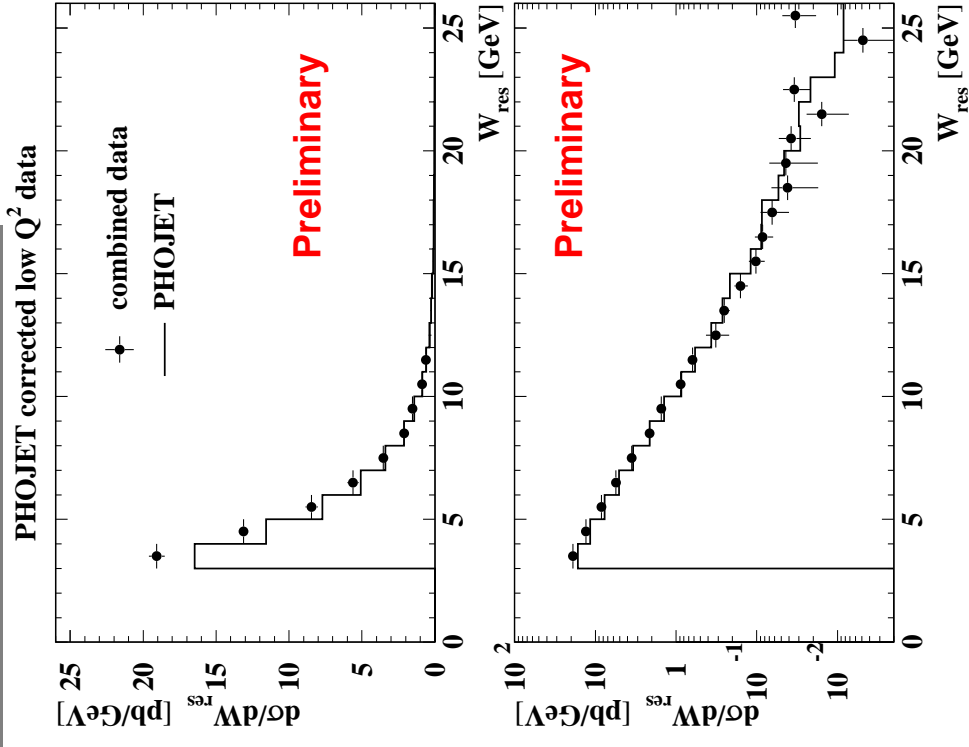
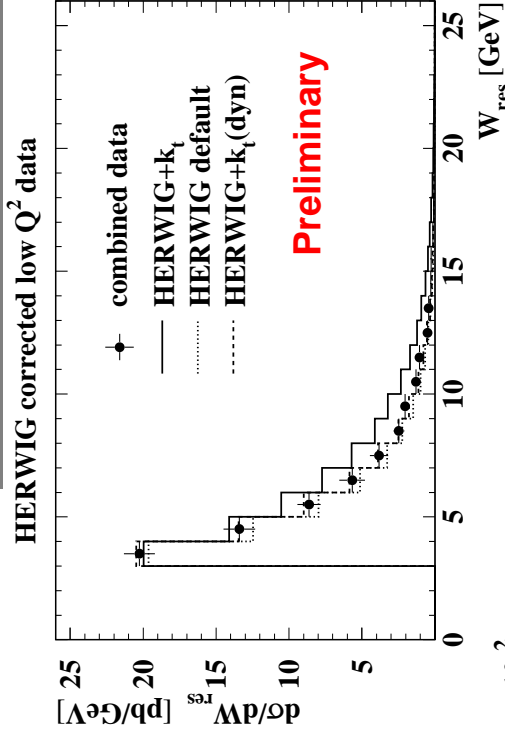


# Beschreibung des hadronischen Endzustands



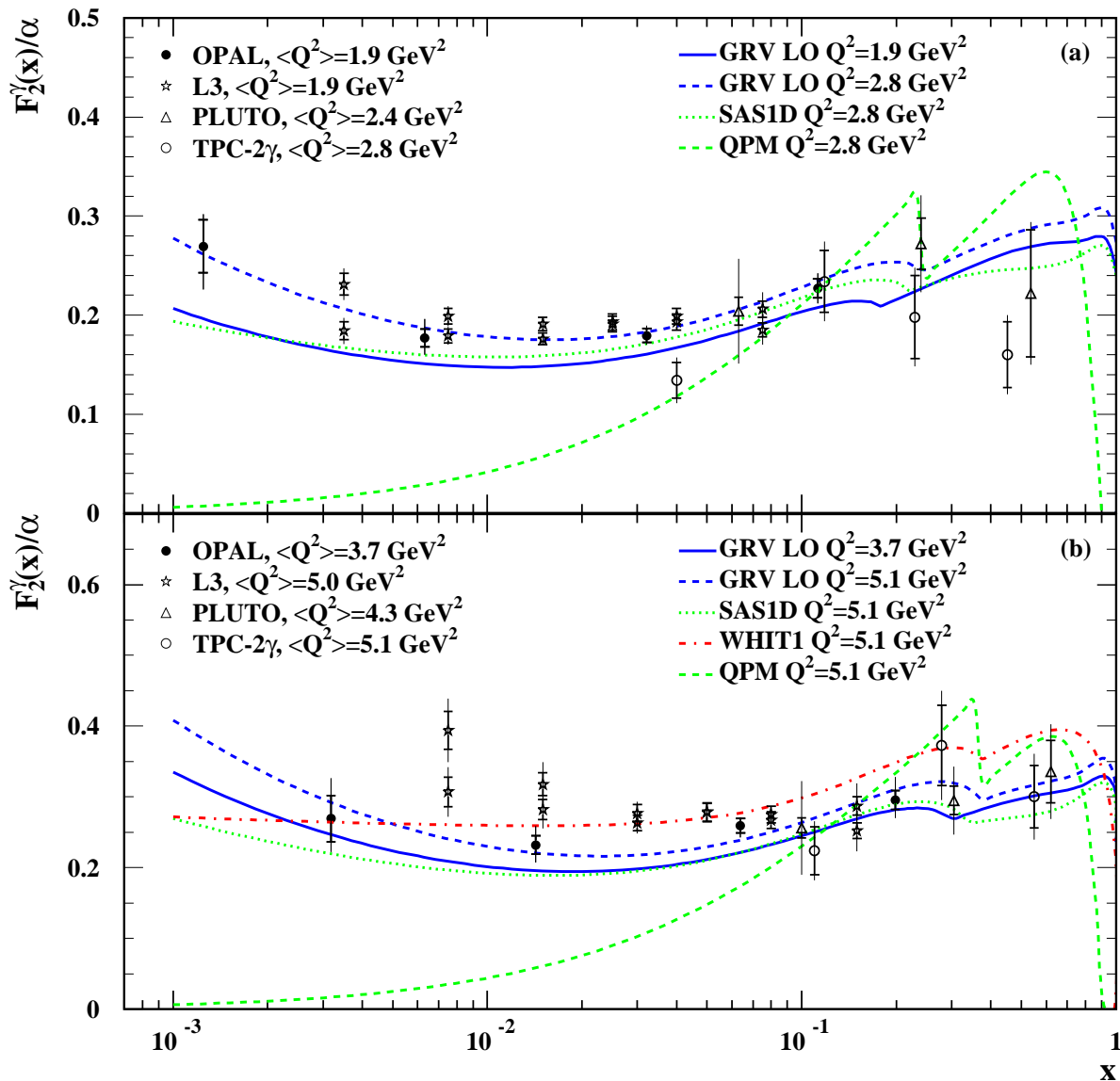
Signifikante Unterschiede zwischen Daten und Monte Carlo Vorhersagen sind sichtbar (OPAL '96)

# Vergleich zu kombinierten LEP Daten



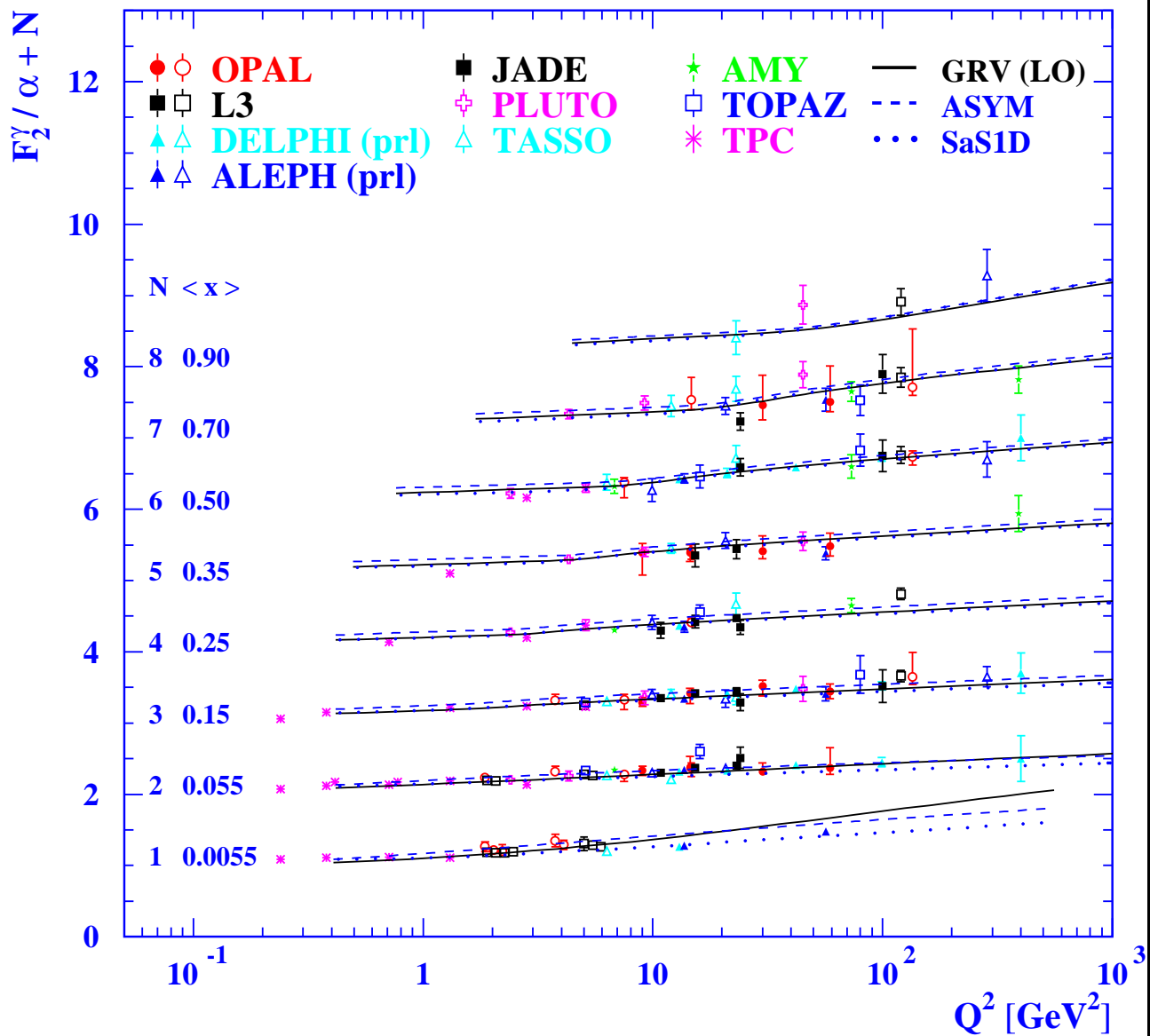
**Die kombinierten LEP Daten sind ein wertvoller Input zur weiteren Verbesserung der Monte Carlo Modelle (LEP Two-Photon WG '99)**

# Messungen bei kleinem $Q^2$ und $x$



**GRV(LO) und SaS1D sind etwas niedrig im Vergleich zu den Daten, die zusätzlich bezüglich des  $P^2$  Effekt nicht korrigiert sind.**

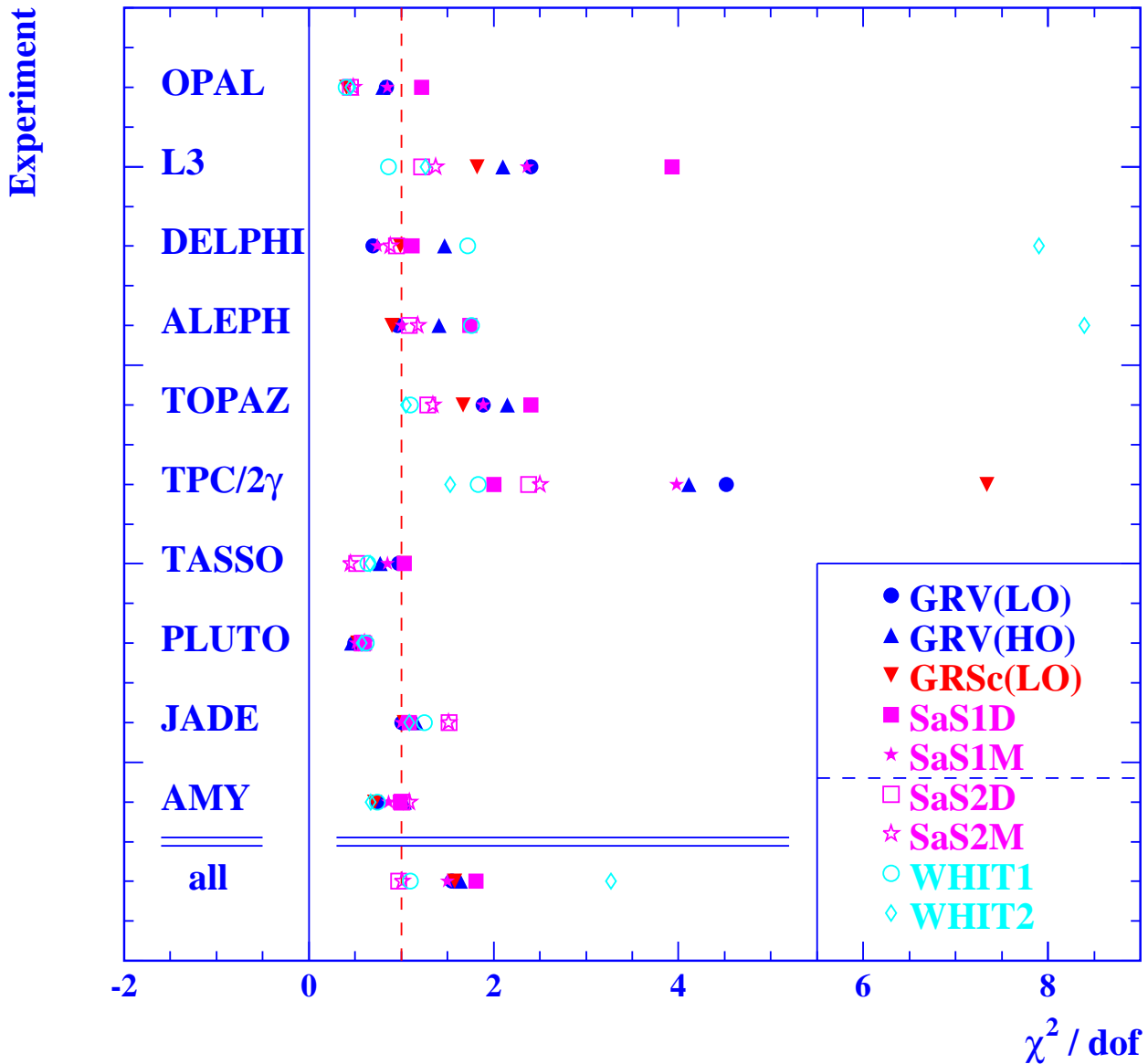
# $Q^2$ Entwicklung von $F_2^\gamma$ für $n_f = 4$



Der generelle Trend der Daten wird von den Parametrisierungen beschrieben.

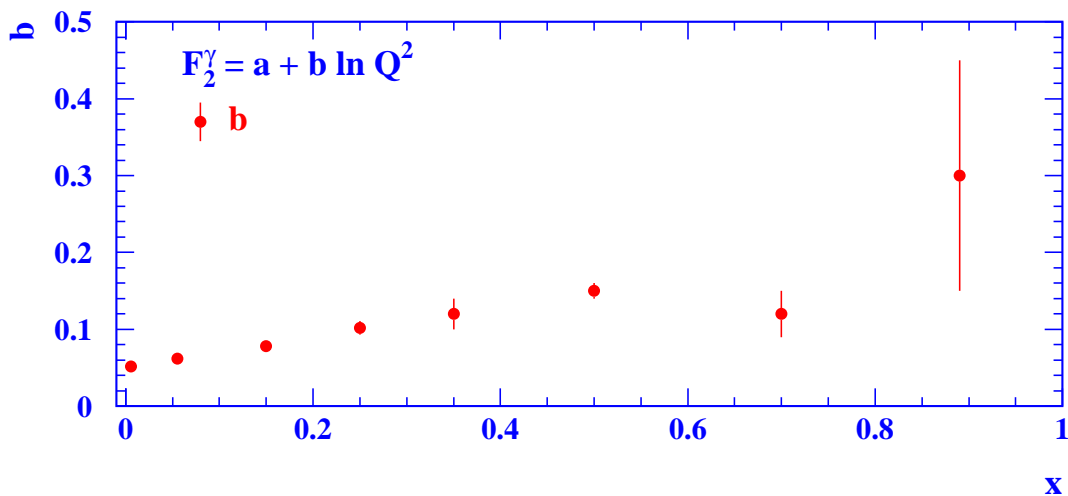
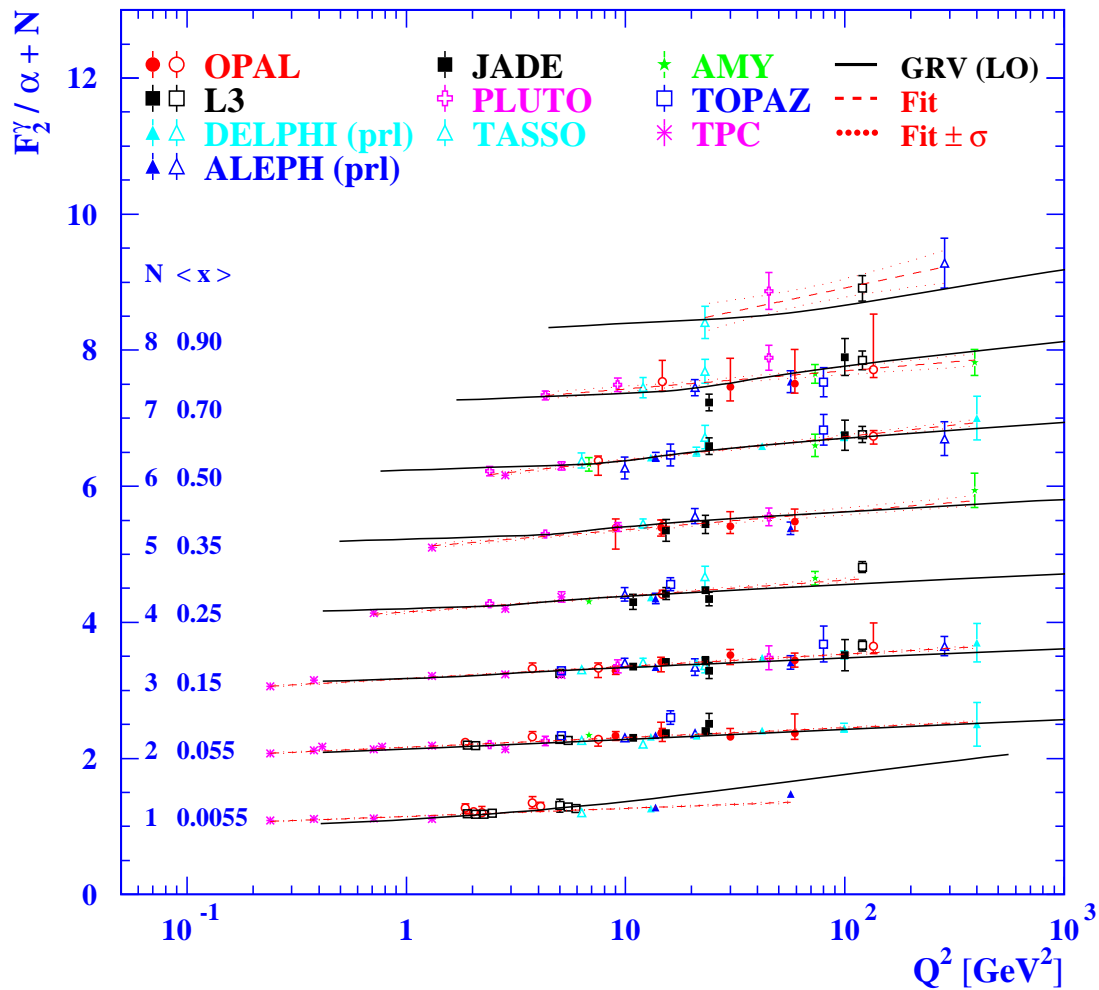
# Beschreibung der Daten durch PDF's

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{\text{dof}} \left( \frac{F_{2,i}^\gamma - \langle F_2^\gamma(x, \langle Q^2 \rangle, 0) \rangle}{\sigma_i} \right)^2$$



Die meisten Daten können von den PDF's beschrieben werden, aber...

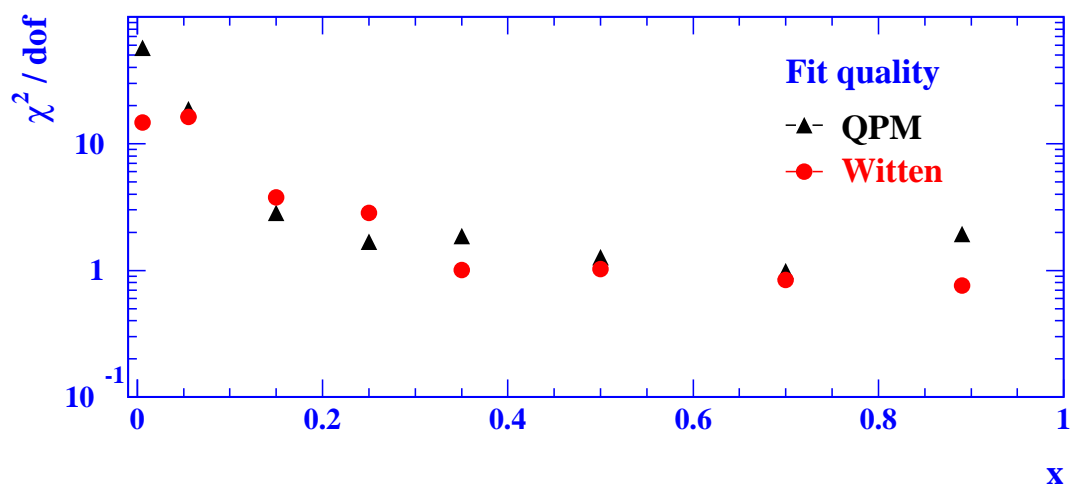
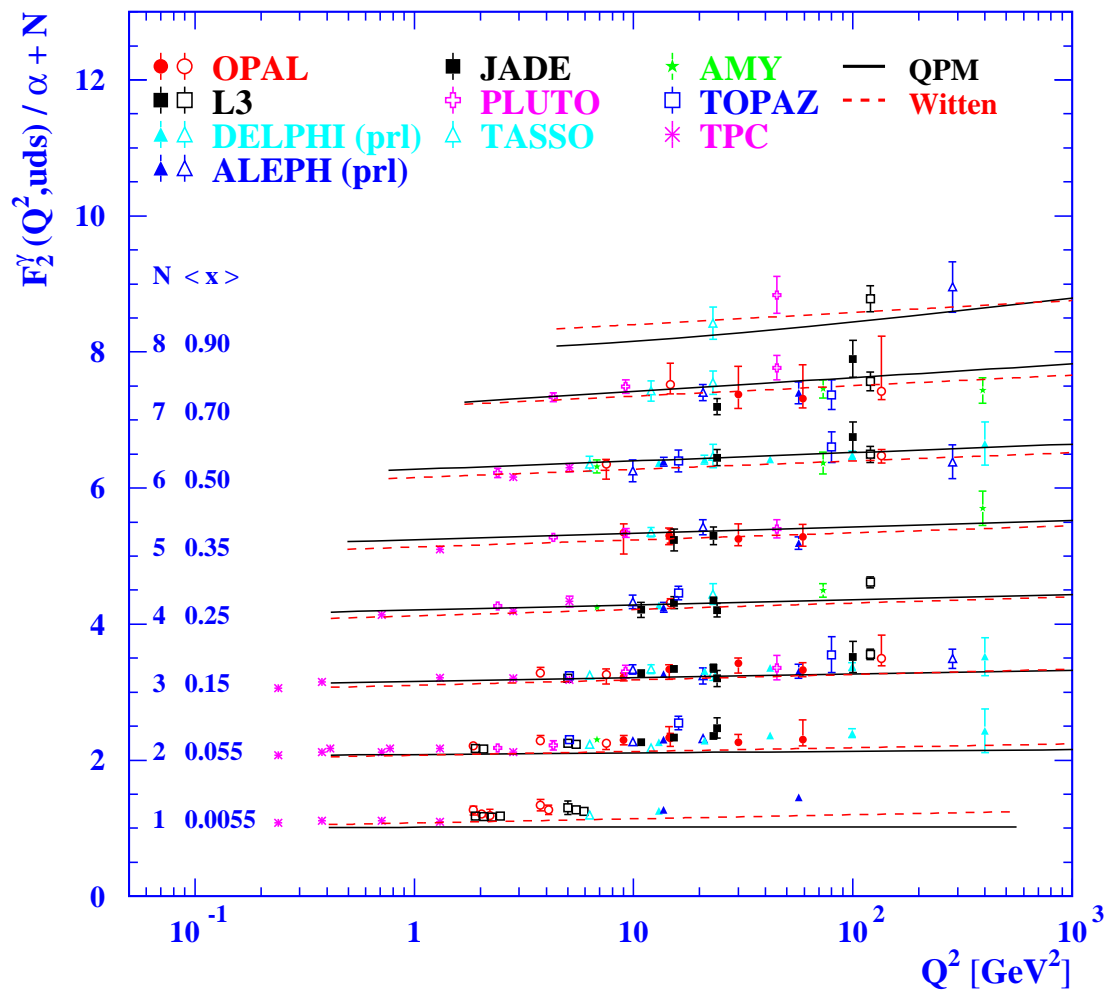
# Parametrisierung der $Q^2$ Entwicklung



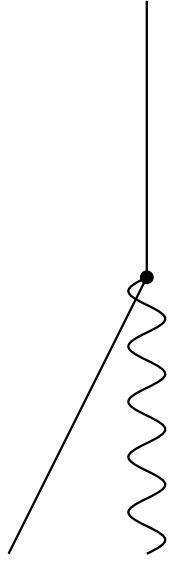
Die angepassten Geraden werden mit  $x$  steiler.



# $Q^2$ Entwicklung für $n_f = 3$



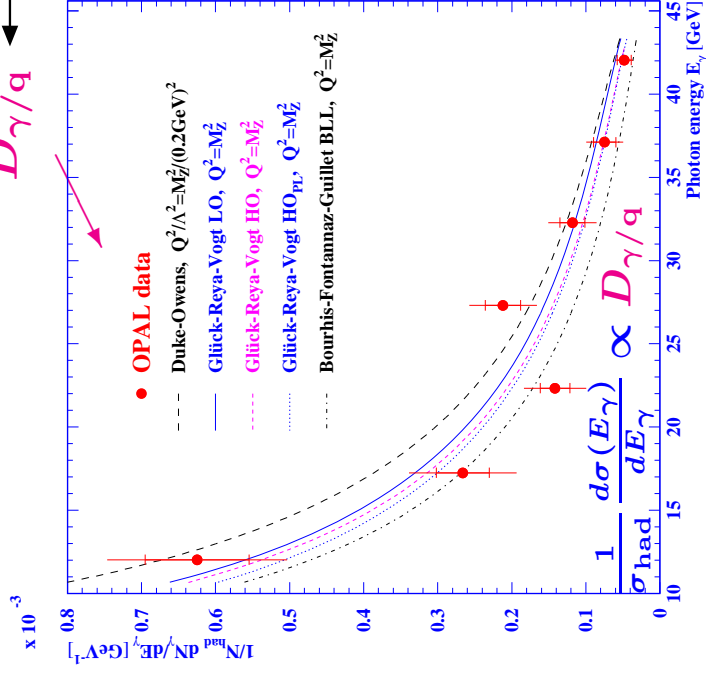
# Der Photon-Quark Vertex



$D_{\gamma/q}$

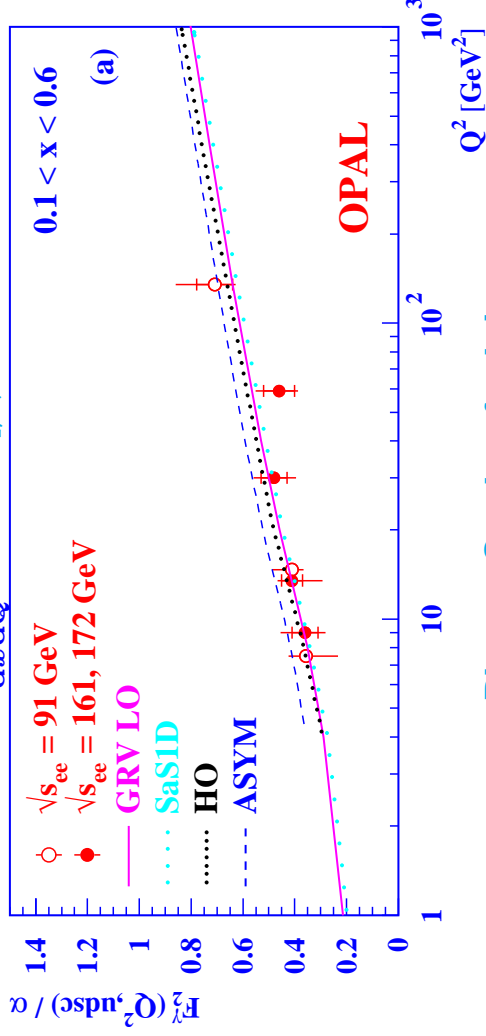
time

$f_{q/\gamma}$



Quark zu Photon Fragmentationsfunktion

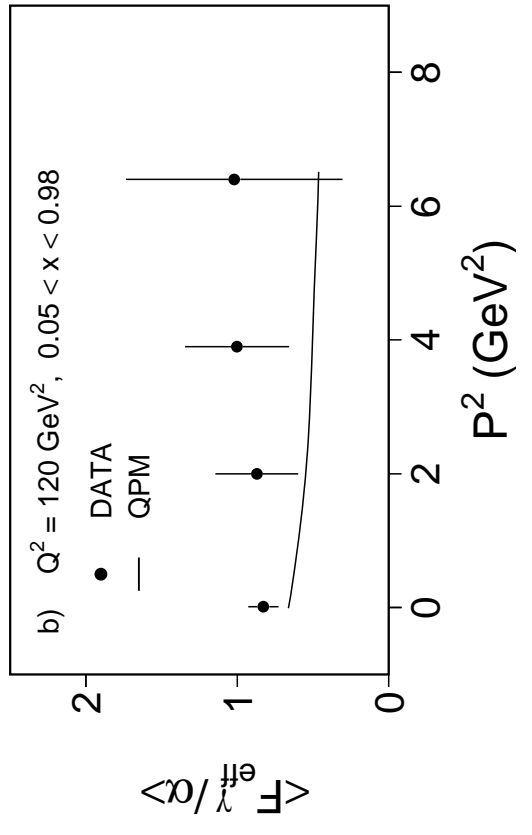
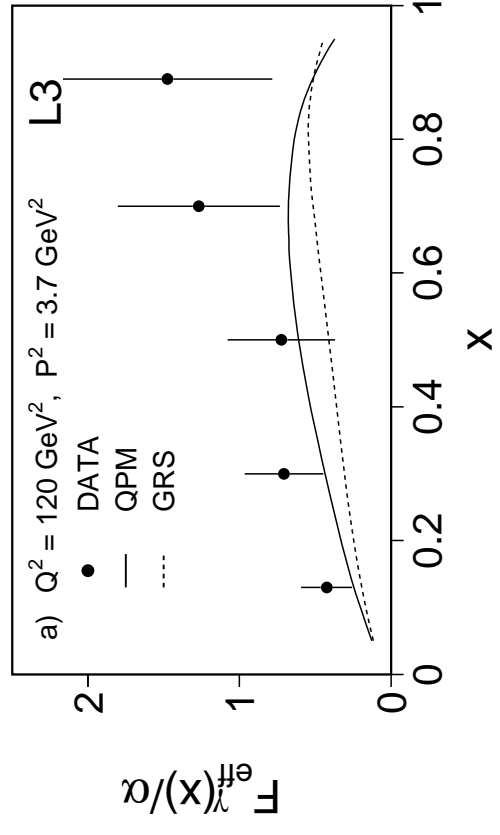
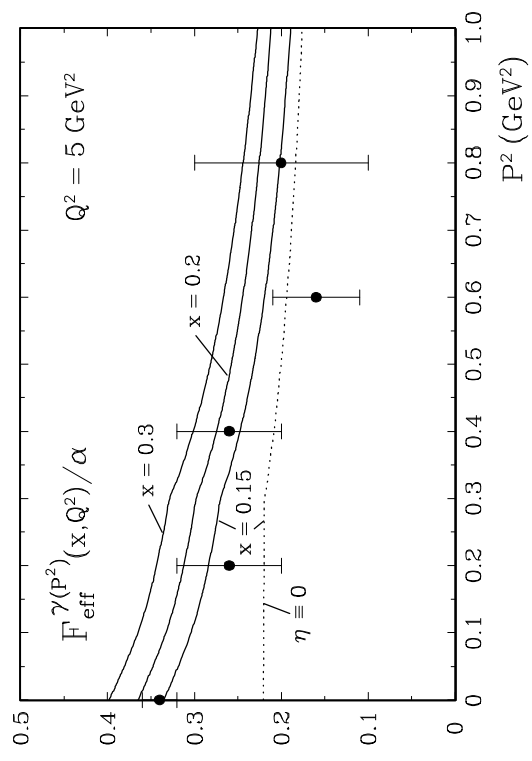
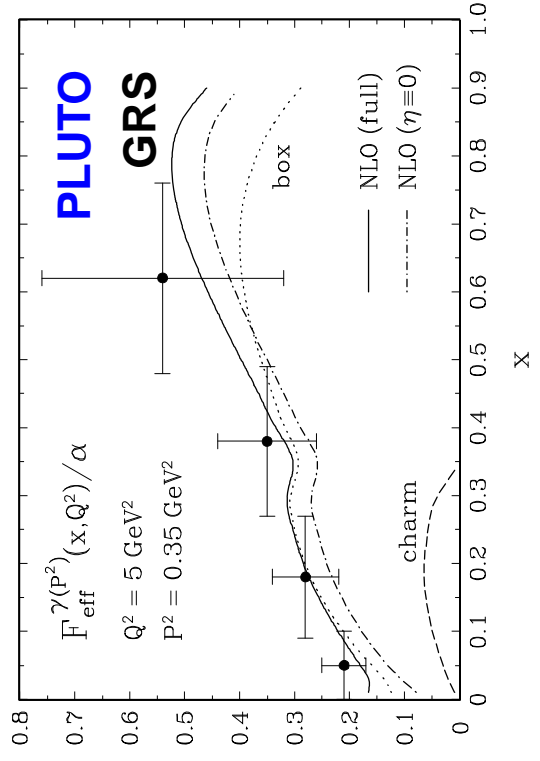
$$\frac{d^2 \sigma_{e\gamma \rightarrow eX}}{dx dQ^2} \propto f_{q/\gamma}$$



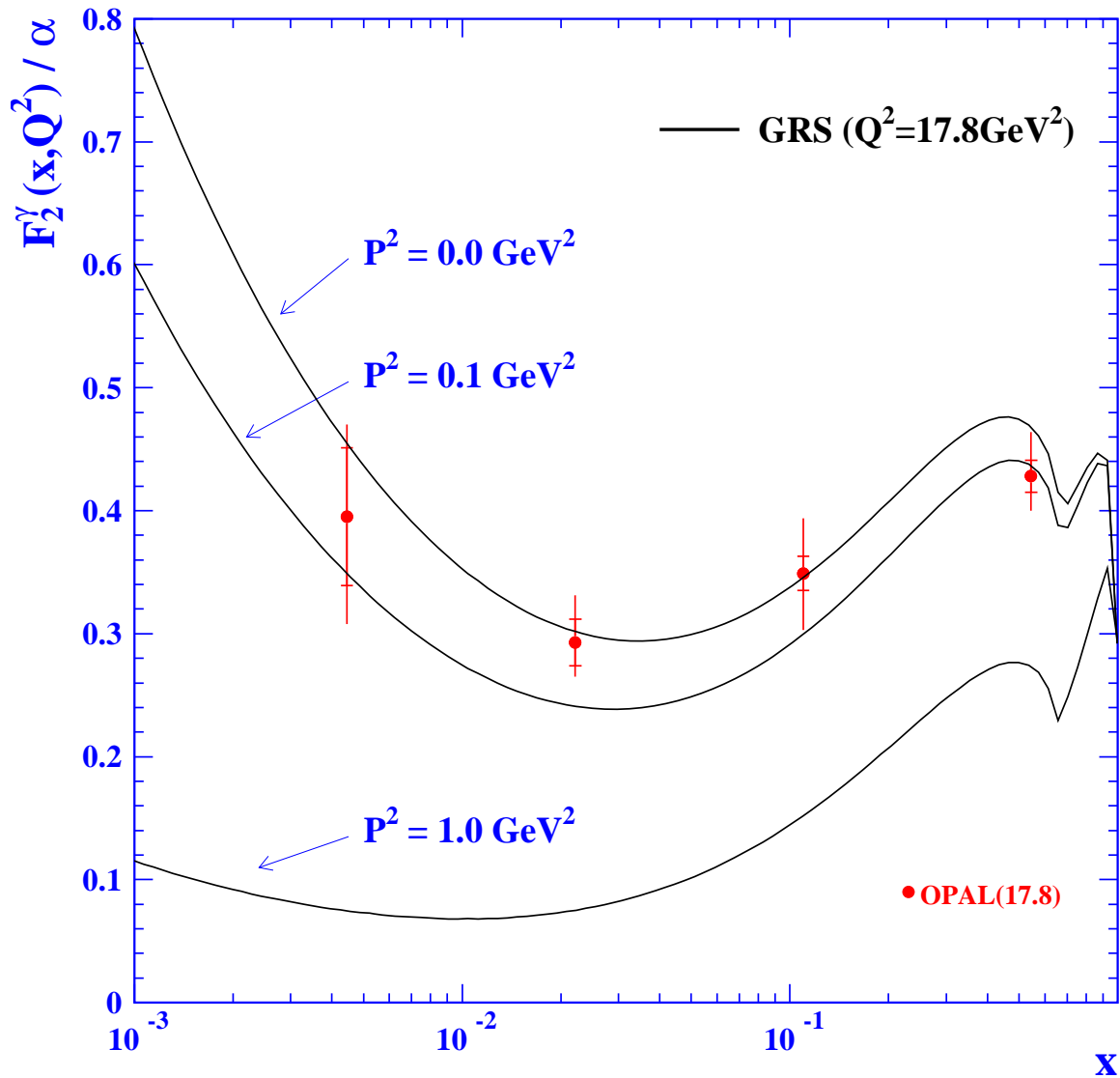
Photon Strukturfunktion

'Es ist alles eine Frage der Zeit'

# Messungen von $F_{\text{eff}}^{\gamma} \propto \sum \sigma_{AB} + \frac{1}{2} \tau_{TT} \cos 2\bar{\phi} - 4\tau_{TL} \cos \bar{\phi}$

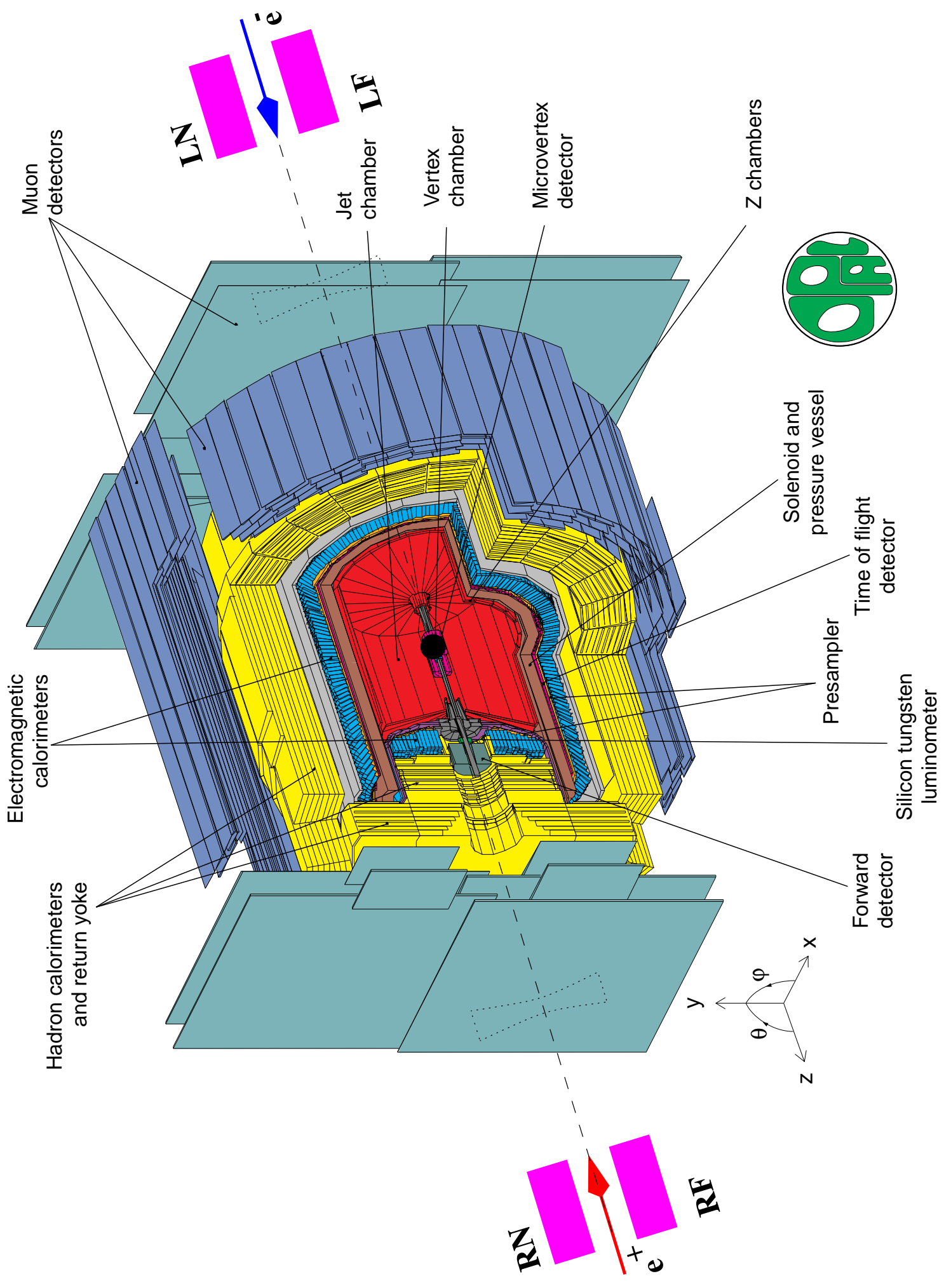


# $P^2$ Unterdrückung von $F_2^\gamma$



Für  $P^2 = 0.1-1.0 \text{ GeV}^2$  ist  $F_2^\gamma$  um ca. 30-60%  
unterdrückt

Eine gute  $P^2$ -Auflösung  $\Leftrightarrow$  Orts-Auflösung ist nötig.



Muon detectors

Electromagnetic calorimeters

Hadron calorimeters and return yoke

LN  $-e$  LF

Jet chamber

Vertex chamber

Microvertex detector

Z chambers



Solenoid and pressure vessel

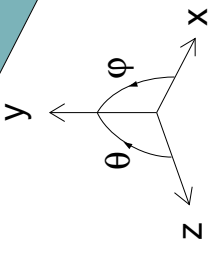
Time of flight detector

Presampler

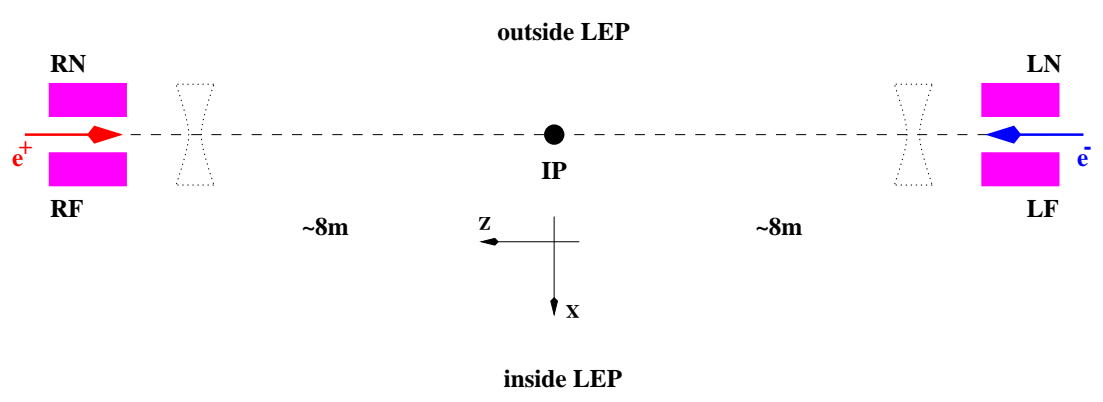
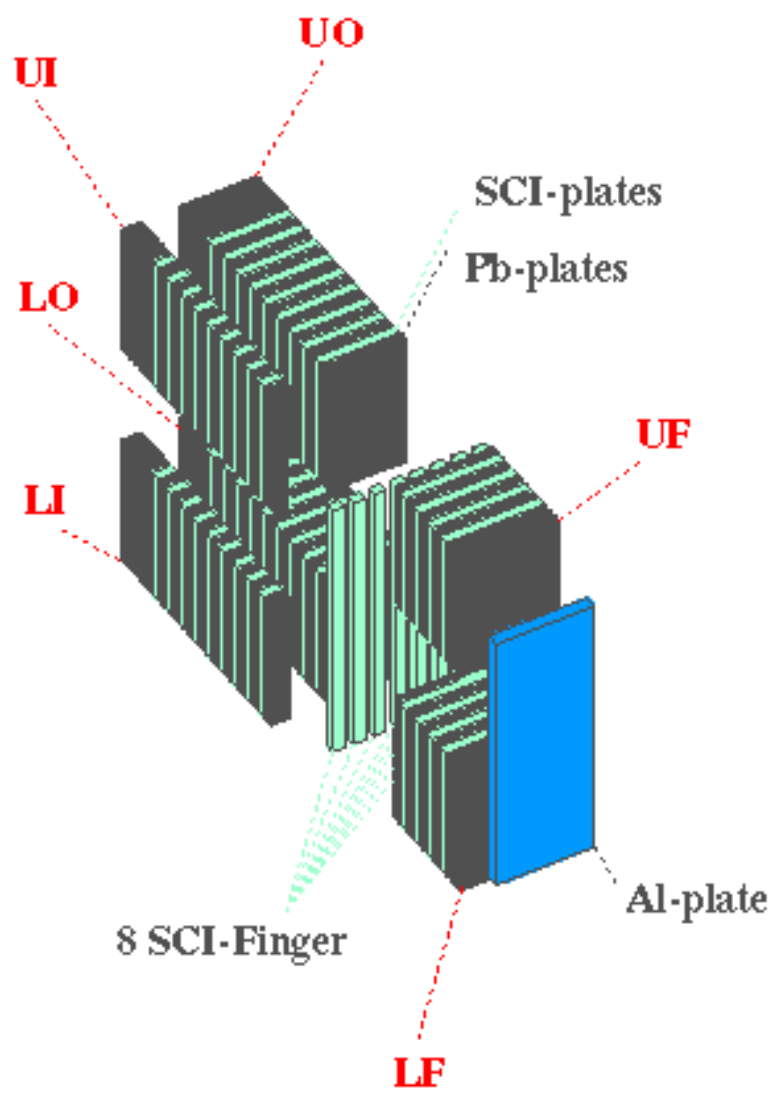
Silicon tungsten luminometer

Forward detector

RN  $+e$  RF

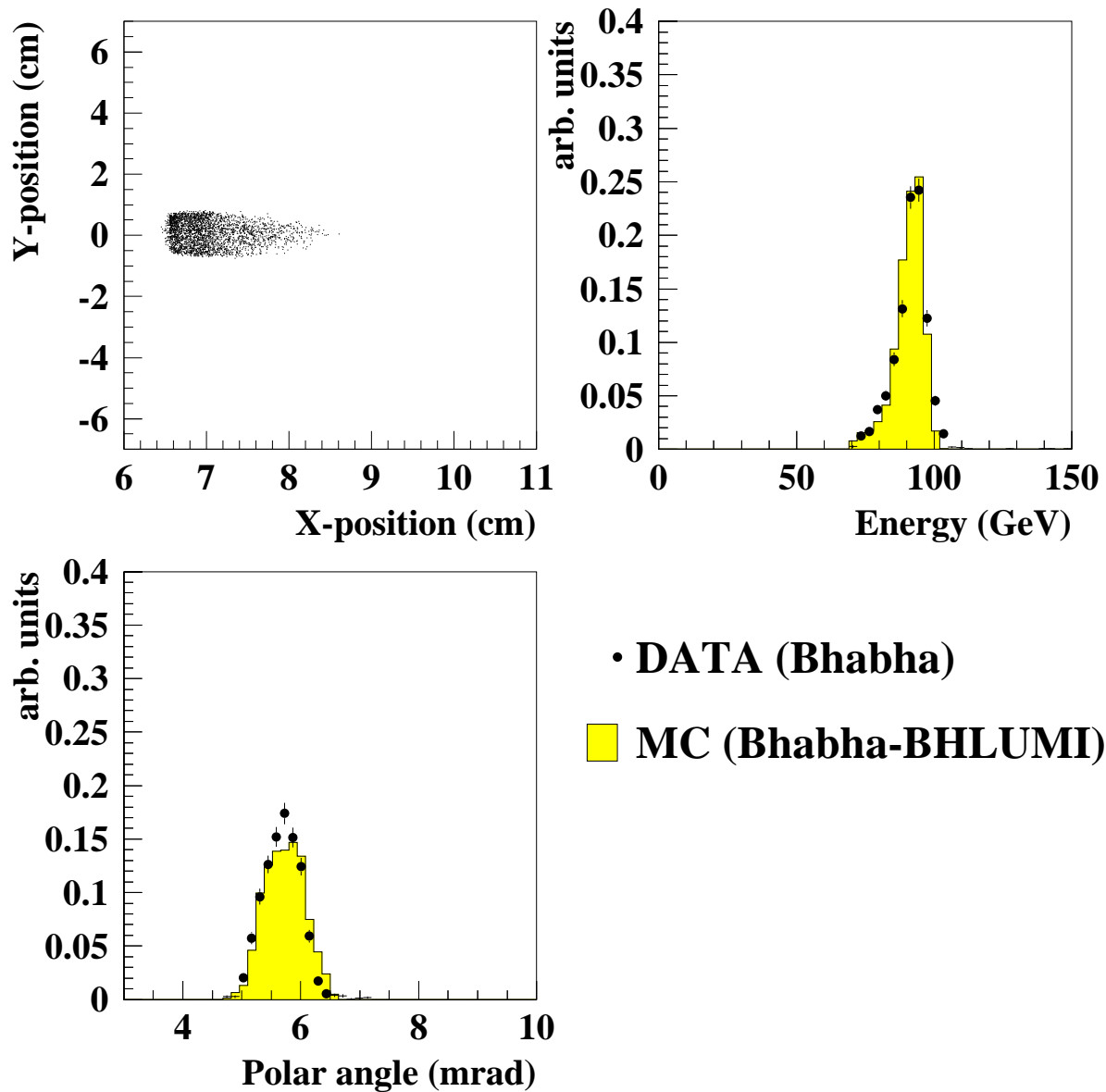


# OPAL Far Forward Kalorimeter



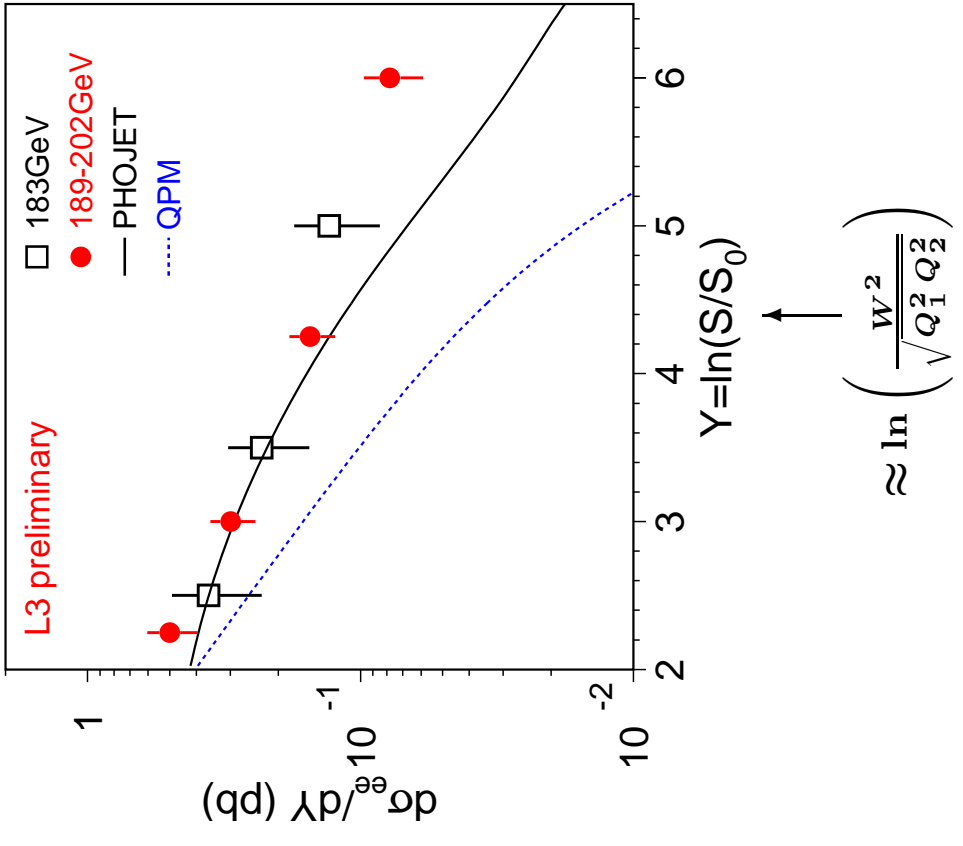
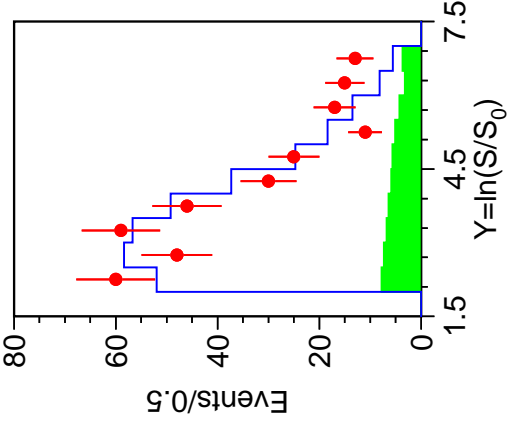
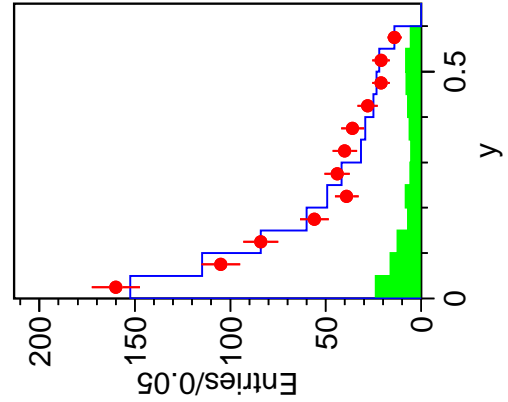
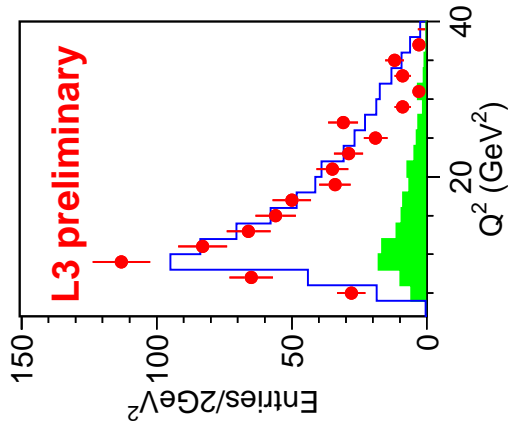
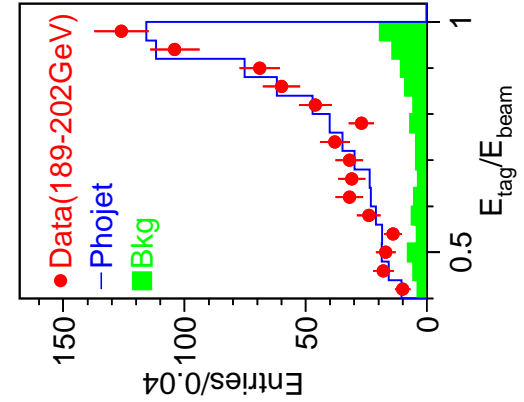
# Daten versus Monte Carlo für Bhabha Ereignisse

OPAL preliminary



Das Verhalten des Detektors ist genügend gut  
verstanden

# Messung von $ee \rightarrow ee\gamma^*\gamma^* \rightarrow ee$ hadronen





# Welche Vorhersagen sind verifiziert ?

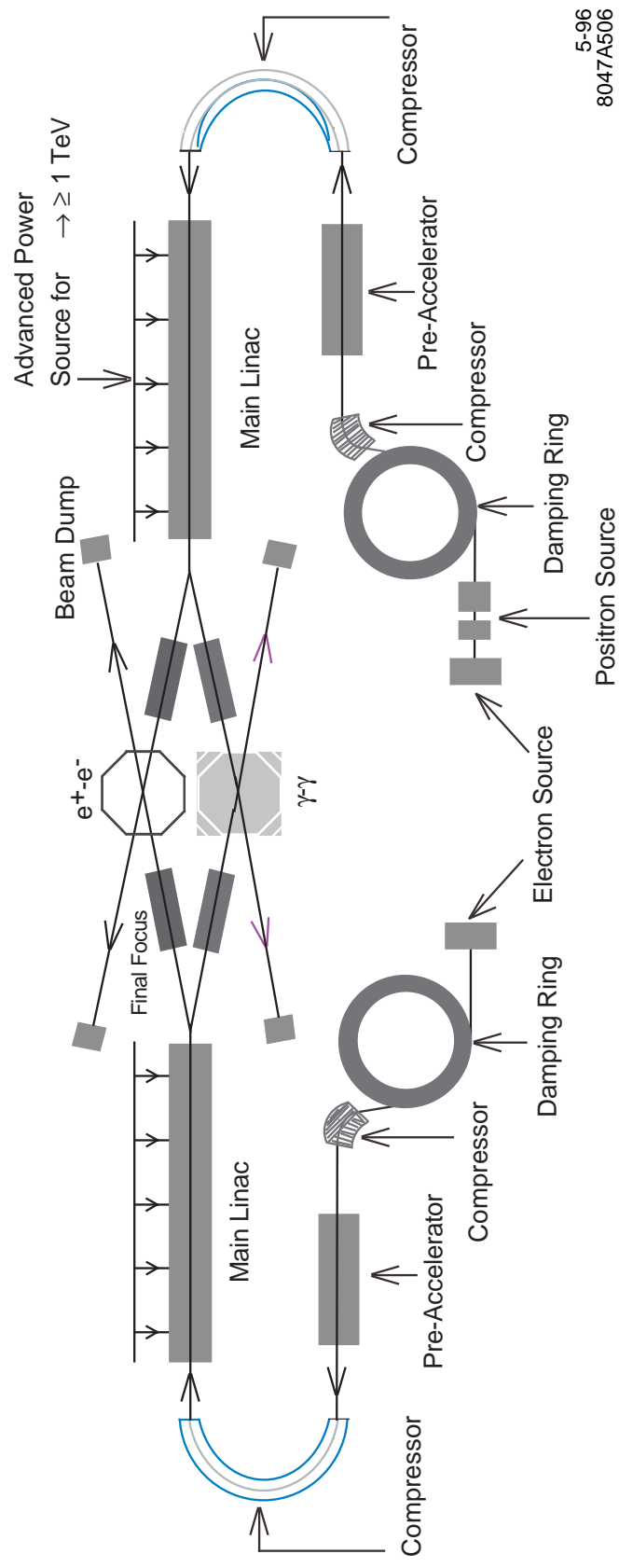
## QED Struktur

1. Der Anstieg der QED Struktur für große  $x$  ist klar ersichtlich.
2. Die  $P^2$  Unterdrückung der QED Strukturfunktion ist verifiziert.
3. Es gibt eine indirekte Evidenz der Existenz der Interferenzterme.

## Hadronische Struktur

1. Die  $Q^2$  Entwicklung der Photonstruktur zeigt einen deutlich positiven Anstieg für alle Werte von  $x$ .
2. Die Akzeptanz reicht nicht aus, um den Anstieg der Struktur für kleine Werte von  $x$  zu sehen.

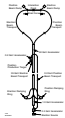
# Layout eines zukünftigen Linearbeschleunigers



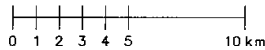
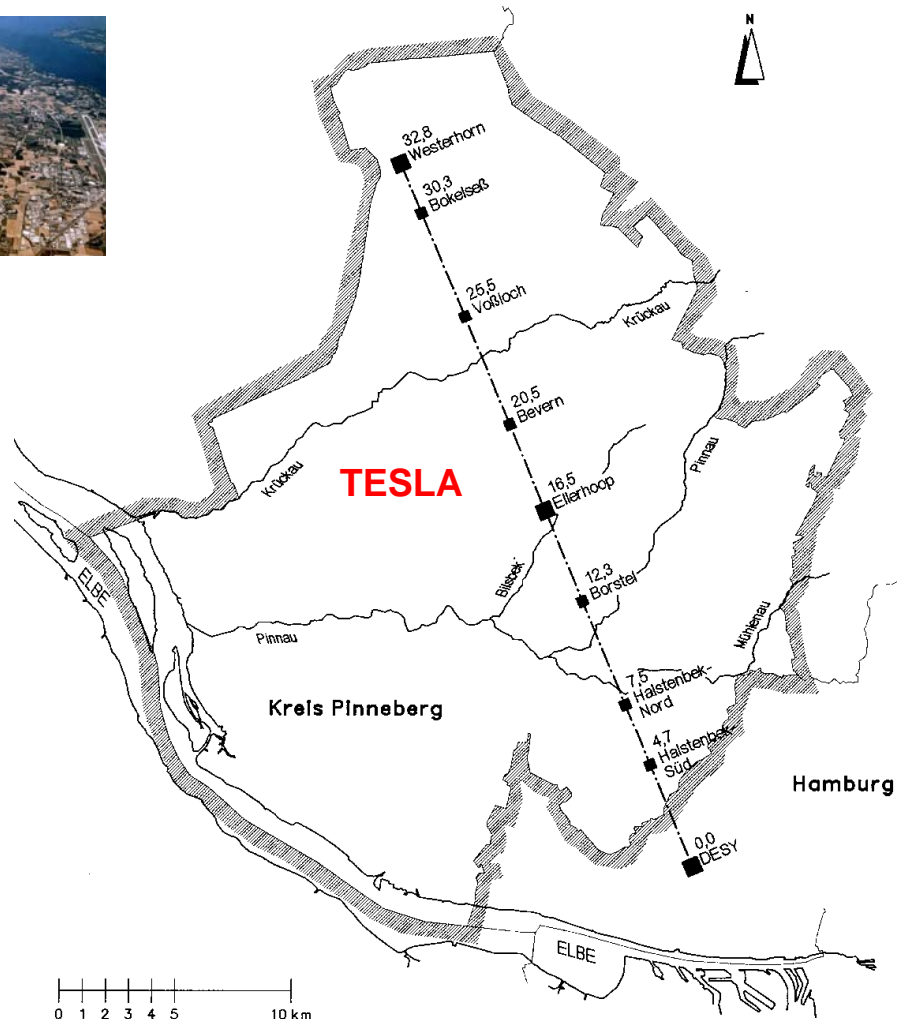
# Von LEP/ SLC zu TESLA



LEP



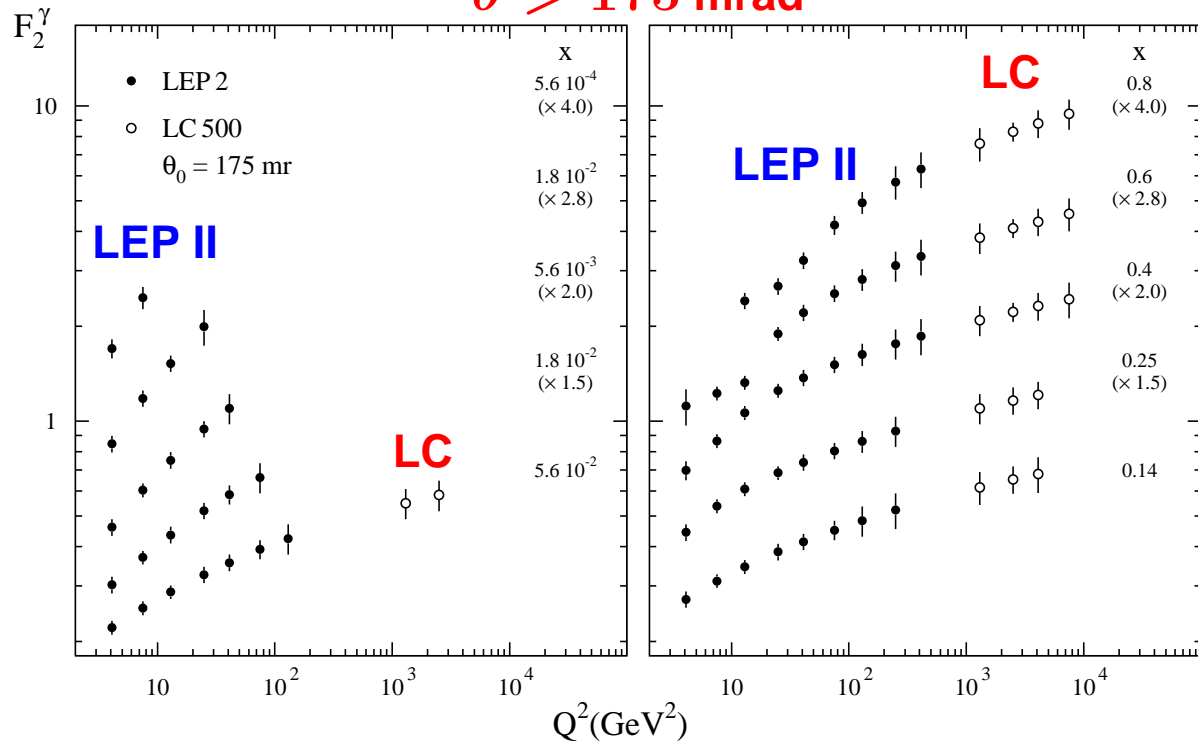
SLC



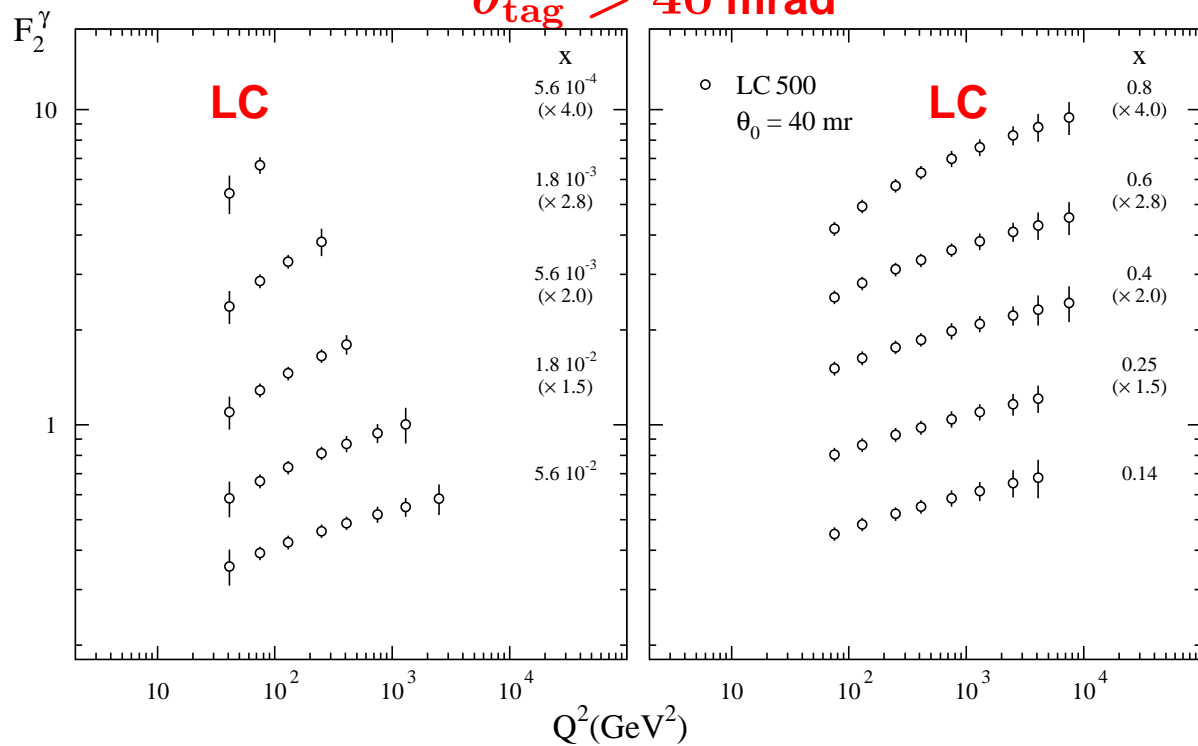
		LEP	SLC	TESLA
Radius	[km]	8.5	$\infty$	$\infty$
Länge	[km]	26.7	4	33
Gradient	[MV/m]	6	10	25
$\sigma_x / \sigma_y$	$[\mu\text{m} / \mu\text{m}]$	110 / 5	1.4 / 0.5	0.845 / 0.019
Energie	[GeV]	100	50	250
Lumi.	$[10^{31} / \text{cm}^2 \text{s}]$	7.4	0.1	5000-10000
$\mathcal{L}_{int}$	[1/pb y]	100	15	20000

# Messbereich von $F_2^\gamma$ am LC

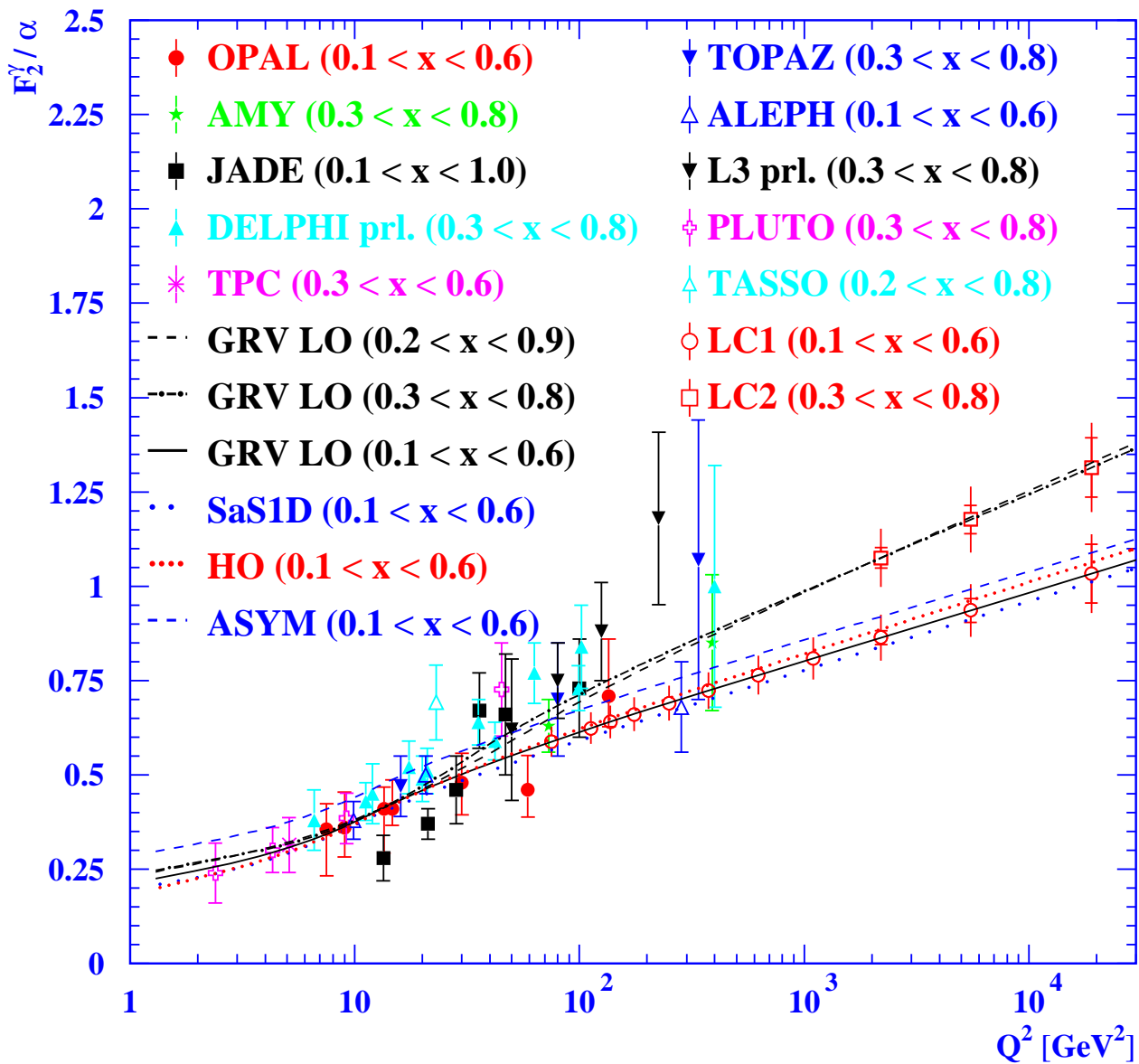
$\theta > 175$  mrad



$\theta_{\text{tag}} > 40$  mrad



# $Q^2$ Entwicklung von $F_2^\gamma$ am LC



**Der Linearbeschleuniger (LC) wird eine wichtige Rolle beim Test dieser fundamentalen Vorhersage der perturbativen QCD spielen.**

## **Zusammenfassung**

1. Eine Vielzahl von Messungen zur Photonstruktur wurden durchgeführt. Die globalen Eigenschaften sind theoretisch verstanden, es gibt jedoch noch viel zu verbessern, um zu einer sehr präzisen Vermessung der Photonstruktur zu gelangen.

## **Ausblick**

1. Mit der hohen Gesamtluminosität des LEP Programms und dem besseren Verständnis der zugrundeliegenden Physik werden eine Reihe von Messungen in Zukunft noch genauer werden.
2. In ferner Zukunft erlaubt das geplante Linearbeschleuniger Programm eine Erweiterung der Vermessung der Photonstruktur auf wesentlich höhere Impulsüberträge.

---

Folien: <http://home.cern.ch/nisius>

Mehr Informationen: Richard Nisius, hepex/9912049