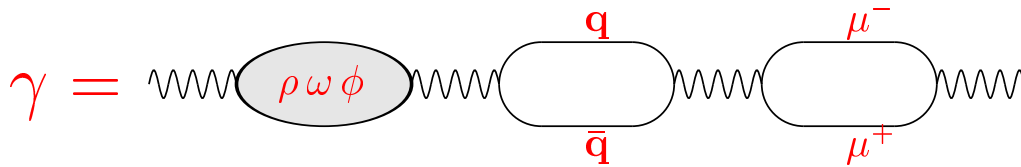


## Die Struktur des



Richard Nisius (CERN)



03.05.01

- **Einleitung**

- 1) Elektron-Photon Streuung**

- a) QED Struktur**

- b) Hadronische Struktur**

- 2) Resultate anderer Reaktionen**

- a) Photon-Photon Streuung**

- b) Elektron-Proton Streuung bei HERA**

- 3) Zukünftige Messungen zur Photonstruktur**

- **Zusammenfassung und Ausblick**

---

Mehr Informationen unter:

<http://home.cern.ch/nisius>, und

R. Nisius, Phys.Rep. 332 (2000) 165, (hepex/9912049).

## Die 'Geschichte' des Photons

Datum	Ereignis
8.11.1895	Röntgen entdeckt die X-Strahlen (erster Nobelpreis für Physik 1901).
1900	Planck interpretiert Licht durch 'Energiequanten' $E = h \nu$ , mit $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ .
1905	Einstein erklärt den Photoeffekt durch 'Photonen'.
1922	Entdeckung der Comptonstreuung $e\gamma \rightarrow e'\gamma'$ .
1927	Heisenberg formuliert die Unschärferelation z. B. $\Delta E \Delta t \geq \hbar$ .
1930	Erster Versuch der Messung von Photon-Photon Streuung von Hughes et. al.
1936	Erste Berechnung der Photon-Photon Streuung durch Euler und Kockel.
1981	Erste Messung der hadronischen Photonstrukturfunktion durch PLUTO.
2011	Das Higgs-Boson wird bei TESLA durch Photon-Photon Fusion erzeugt?

## Eigenschaften des Photons

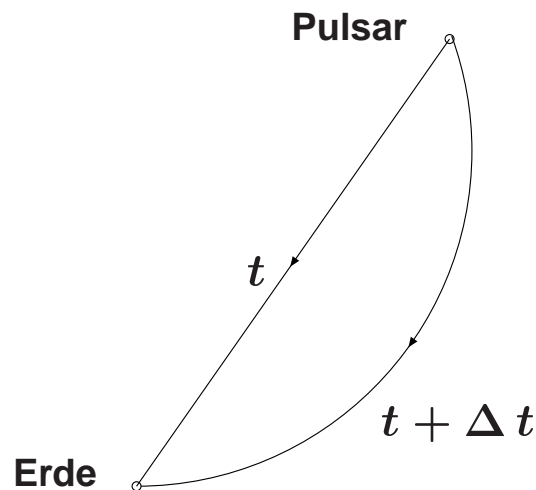
Eigenschaft	
Masse (m)	0 ( $m/m_e < 4 \cdot 10^{-22}$ , [1])
Ladung (Q)	0 ( $Q/Q_e < 5 \cdot 10^{-30}$ , [2])
Geschwindigkeit (c)	299792458 m/s
Spin Parität ( $J^{PC}$ )	$1^{--}$
Kopplungsstärke ( $\alpha$ )	$1/137.03599976(50)$
Natur	Welle und/oder Teilchen
Aufgabe	Eichboson der elektromagnetischen Wechselwirkung, keine Selbstkopplung

---

[1] Roderic Lakes, Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 1826.

[2] Georg Raffelt, Phys. Rev. D50 (1994) 7792.

## Bestimmung der Ladungsobergrenze



1. Pulsare sind weit von der Erde entfernte Quellen von Photonen.
2. Falls Photonen eine Ladung haben so wirkt auf sie die Lorentzkraft, und ihre Bahnen im Magnetfeld sind gekrümmt.
3. Daraus resultiert eine energieabhängige Laufzeitvariation von  $\frac{\Delta t}{t} = \frac{Q^2 B^2 l^2}{6E^2}$ .
4. Aus der beobachteten Dispersion der Photonpulse des Pulsars PSR 1937+21 lässt sich eine Ladungsobergrenze von  $Q/Q_e < 5 \cdot 10^{-30}$  ableiten.

---

[2] Georg Raffelt, Phys. Rev. D50 (1994) 7792.

# Photon-Photon Streuung anno 1930

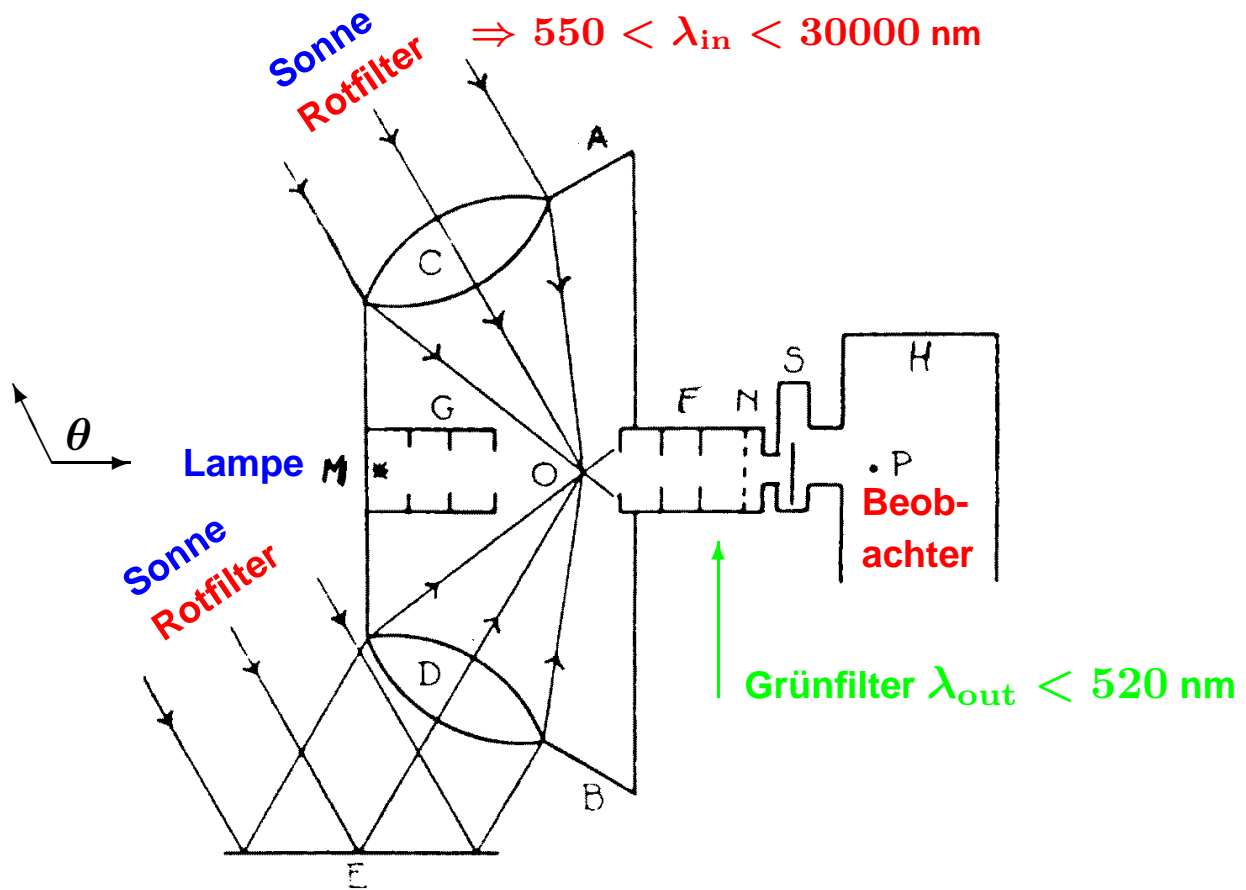


Fig. 2. Diagram of apparatus.

$$\gamma_1(\lambda_{in})\gamma_2(\lambda_{in}) \rightarrow \gamma'_1(\lambda_{out})\gamma'_2(\lambda_{out})$$

mit:  $\lambda_{out} = \lambda_{in}(1 + \cos \theta)$

Es wurde kein Licht beobachtet.

$$\Rightarrow \sigma_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma} < 3 \cdot 10^8 \text{ pb}$$

## Wirkungsquerschnitt der Photon-Photon Streuung

Für niederenergetische Photonen mit

$E_\gamma = h\nu \ll m_e c^2$  gilt:

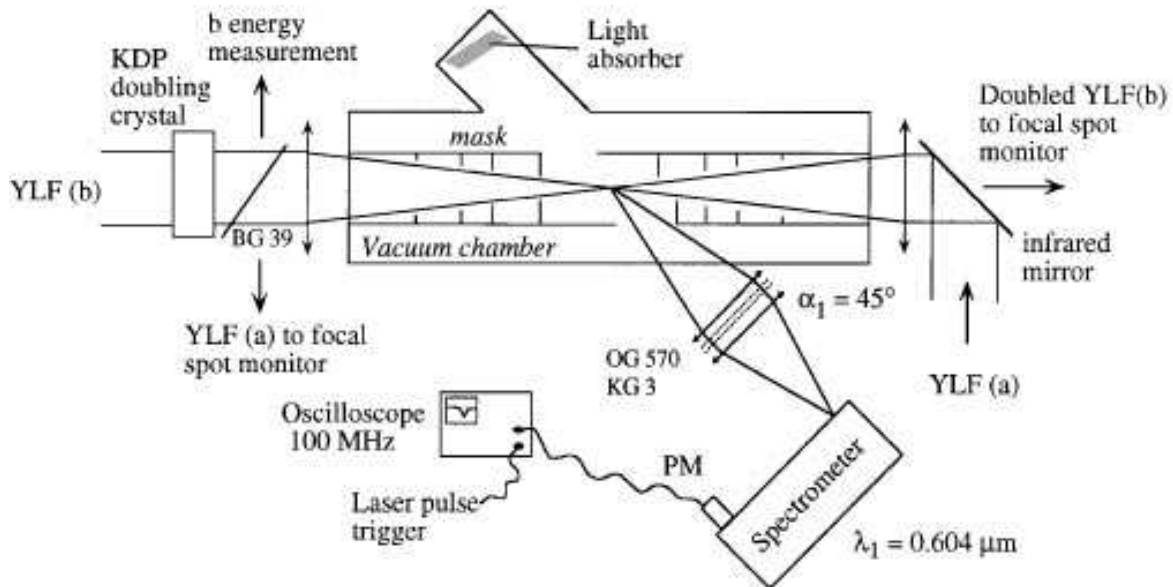
$$\frac{\sigma_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma}}{d\Omega} = \frac{139}{32400\pi} \alpha^2 r_e^2 \left( \frac{h\nu}{m_e c^2} \right)^6 (3 + \cos^2 \theta)^2$$

$$\frac{\sigma_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma}}{\text{pb}} = 0.73 \cdot 10^{-29} \cdot \left( \frac{h\nu}{\text{eV}} \right)^6$$

Für sichtbares Licht  $\lambda = 400 - 700$  nm ergibt sich:

$$\sigma_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma} = (2.2 - 64) \cdot 10^{-28} \text{ pb}$$

## Photon-Photon Streuung anno 1996



**Fig. 2.** Schematics of the experimental set-up. Two synchronized laser beams at  $\lambda_0 = 1.053 \mu\text{m}$  and  $\lambda_0/2$  are focussed to a common focal spot. A photon-photon collision can give a scattered photon detected at  $\alpha_1 = 45^\circ$  with  $\lambda_1 = 0.604 \mu\text{m}$  wavelength. We did not attempt to observe the other scattered photon at  $\alpha_2 = 79^\circ$  with  $\lambda_2 = 0.838 \mu\text{m}$

**Durch Nutzung monochromatischer Laser hoher Leistung sowie der Nachweismöglichkeit einzelner Photonen wurde die Sensitivität extrem verbessert. Es wurde kein einziges gestreutes Photon beobachtet.**

$$\Rightarrow \sigma_{\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma} < 9.9 \cdot 10^{-4} \text{ pb}$$

# Das Photon in unserer Welt

Beobachtung	Photonenergie
Molekülrotationen	meV
Urlaubssonne Atomspektren des Wasserstoffs	eV
Röntgenstrahlung	keV
$e^+e^-$ Paarerzeugung	MeV
⇒ Bremsstrahlung bei LEP	GeV
Bremsstrahlung bei TESLA Kosmische Strahlung	TeV ⇐



# Das Photon im Standardmodell

## Die Bausteine der Materie

$$\text{Quarks} \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

$$\text{Leptonen} \quad \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

## Wechselwirkungen der Materie durch Eichbosonen

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

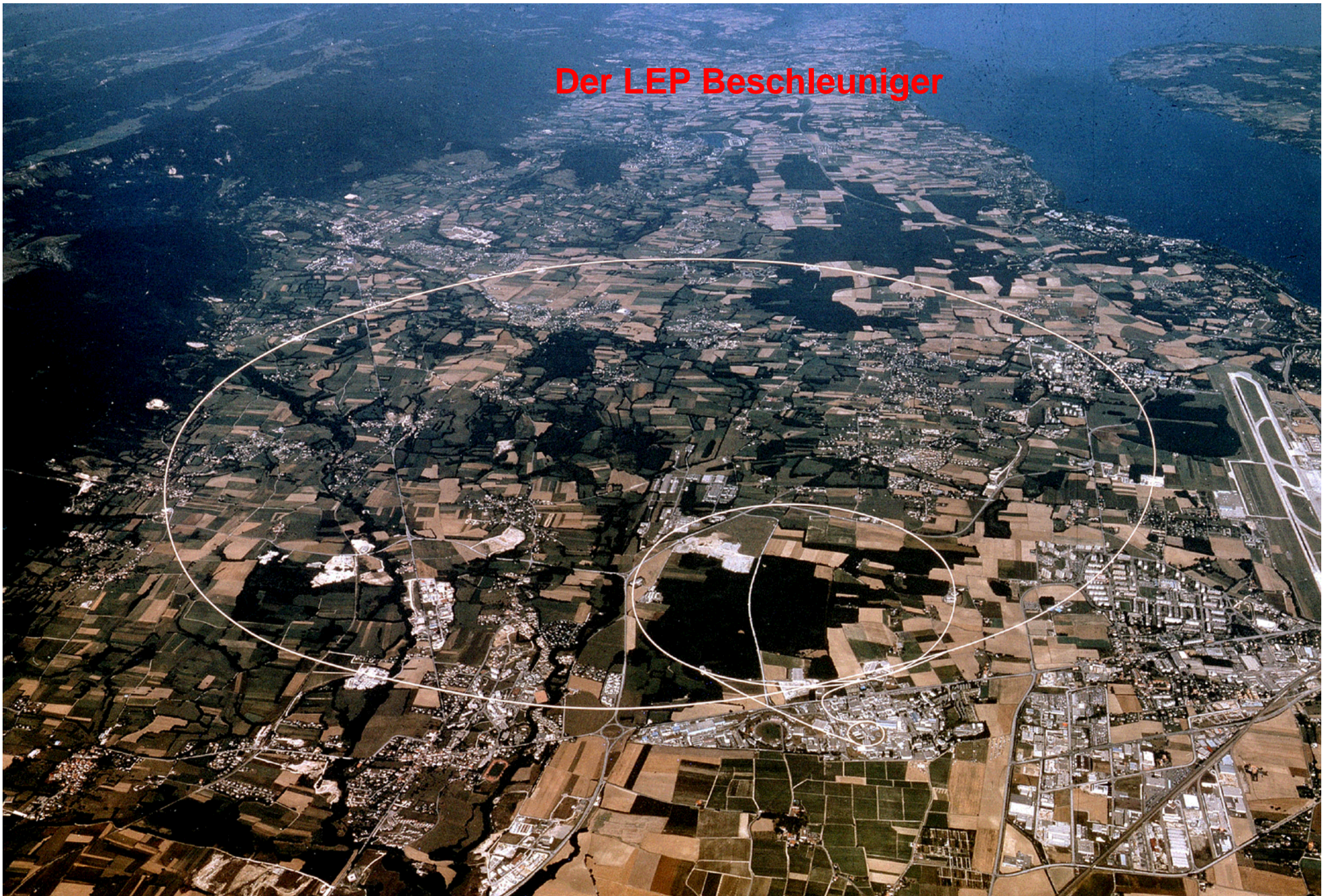
## Messungen zu Eichbosonen bei LEP

Objekt	Messung
$Z^0$	Präzisionsmessungen bei LEP100
$W^\pm$	$M_W$ auf 40 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.**

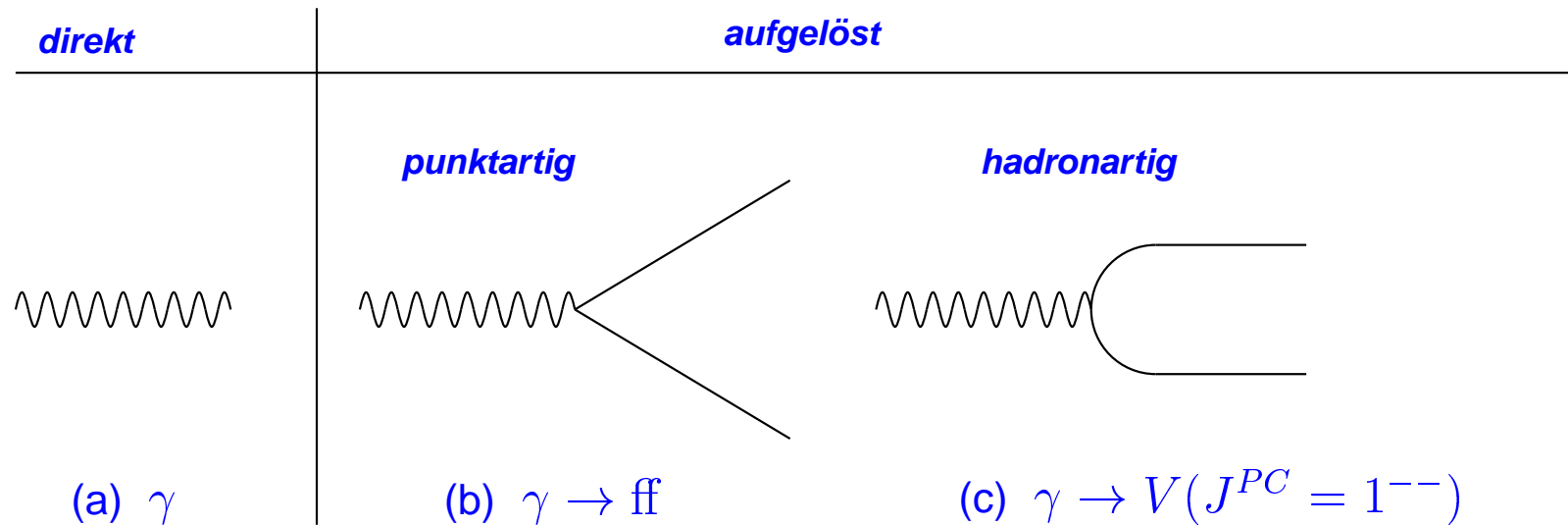


# Der LEP Beschleuniger





# Warum sprechen wir von Photonstruktur?

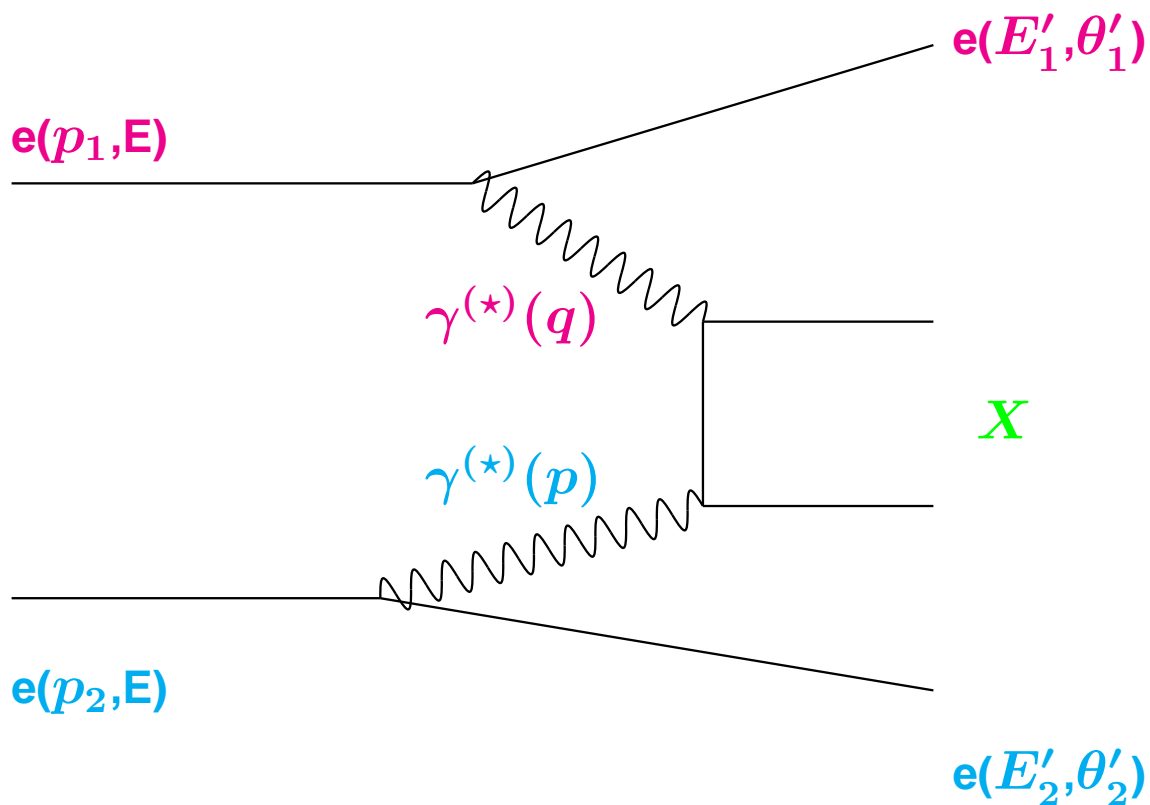


In (a) nimmt das Photon als Ganzes an der Wechselwirkung teil  $\Rightarrow$  **KEINE Struktur**.

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.

# Elektron-Photon Streuung



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

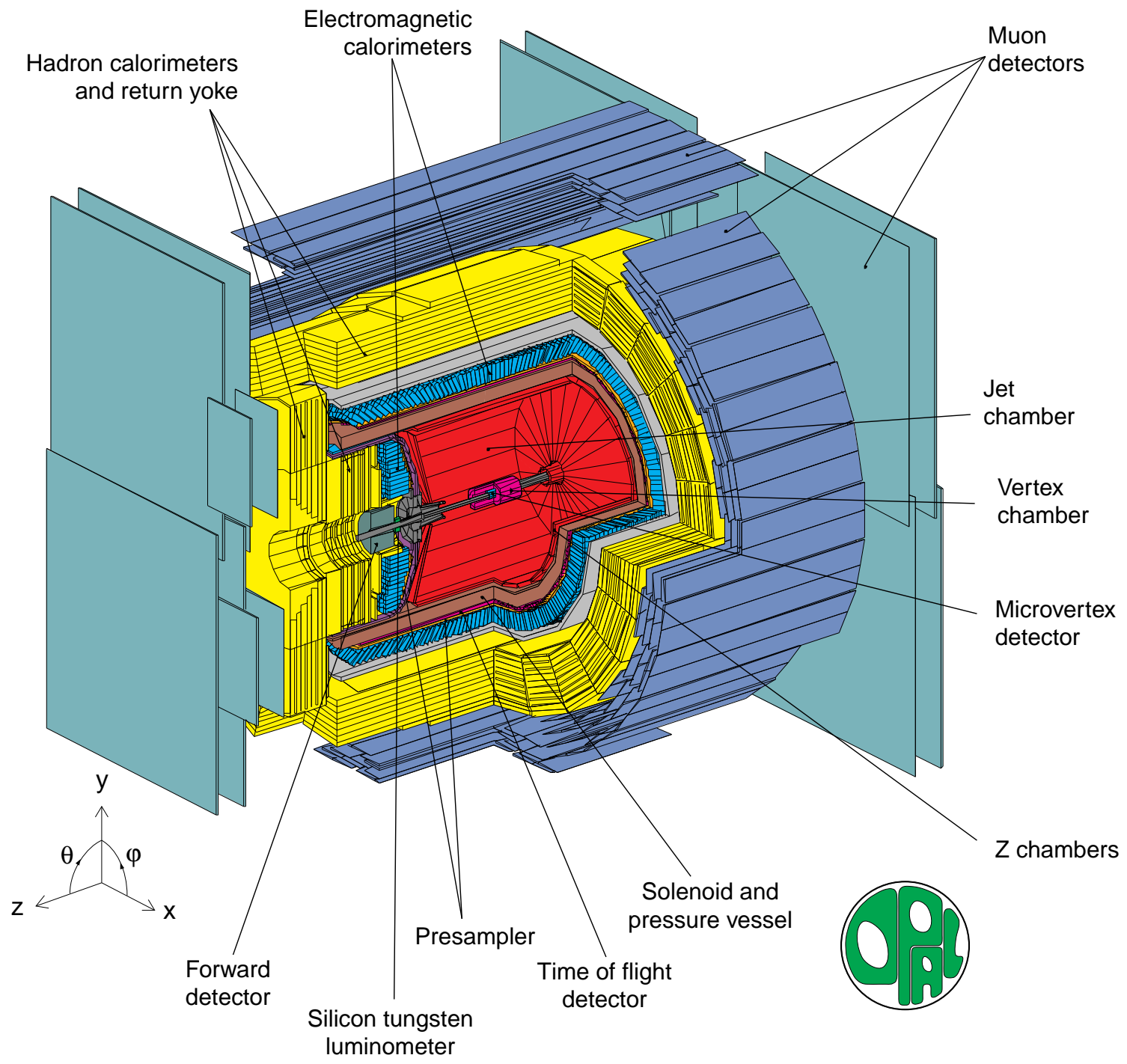
mit:

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

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

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

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



# Vorhersagen zur Photonstruktur

## QED Struktur

1. Die punktartige 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 punktartige Komponente dominiert, gelten die globalen Aussagen der QED modulo QCD Korrekturen.
2. Die  $Q^2$  Entwicklung der Photonstruktur zeigt einen positiven Anstieg für alle Werte von  $x$ .
3. Die QCD Dynamik erzwingt bei festem  $Q^2$  einen steilen Anstieg der Struktur für kleine Werte von  $x$ .

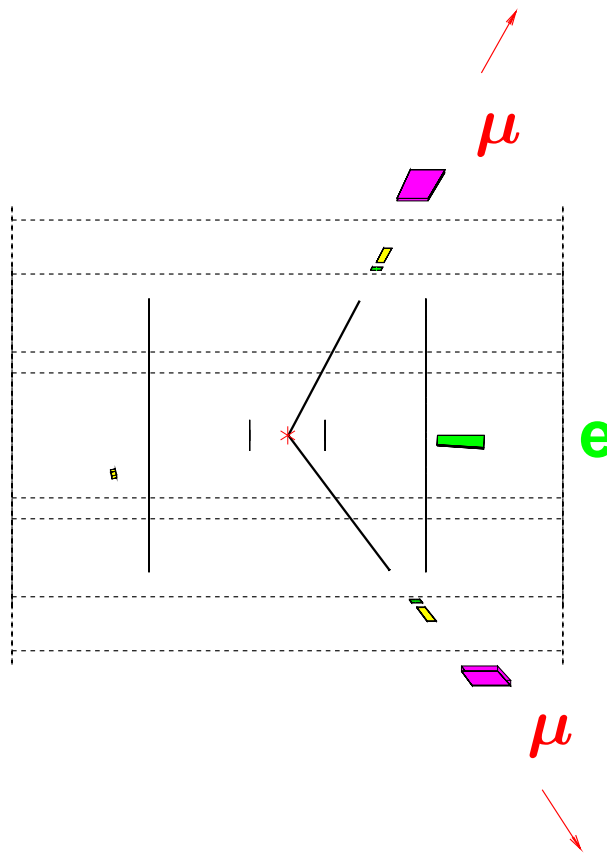
# Der Muonpaarendzustand

Run:event 5198:229277 Date 940625 Time 211645 Ctrk(N= 2 Sump= 7.3) Ecal(N= 3 SumE= 1.4) Hcal(N= 4 SumE= 3.3)  
Ebeam 45.62 Evis 10.5 Emiss 80.7 Vtx ( -0.02, 0.04, 0.47) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)  
Bz=4.029 Bunchlet 1/1 Thrust=0.8469 Aplan=0.0012 Oblat=0.4878 Spher=0.4109



## Event type bits

4 Low mult presel  
12 Tagged two phot  
22 S phot muon veto  
32 "Phys1" selection  
1 Z0 type physics



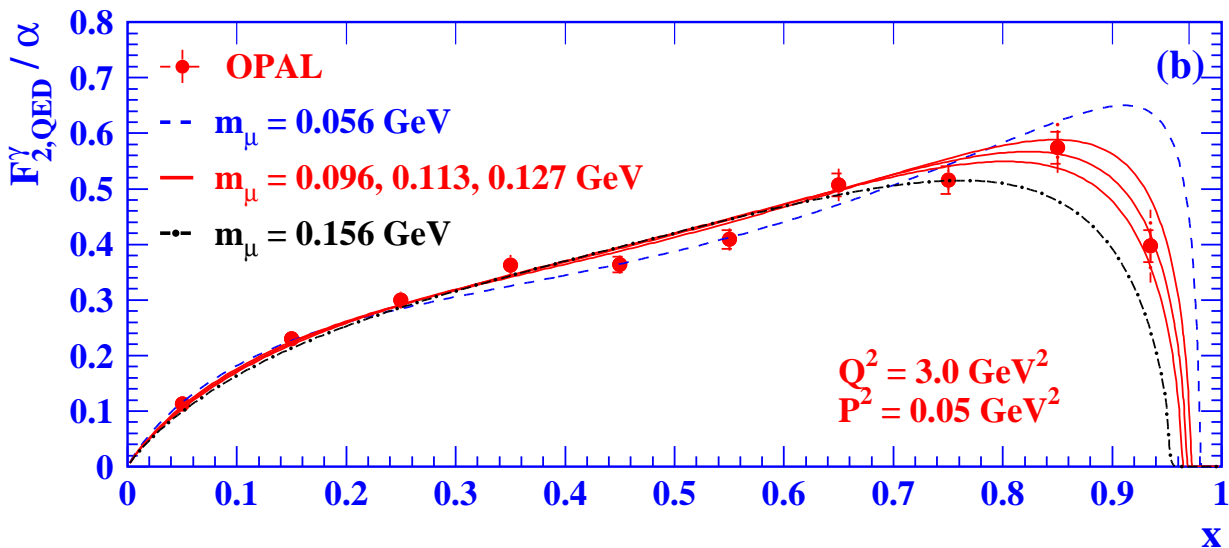
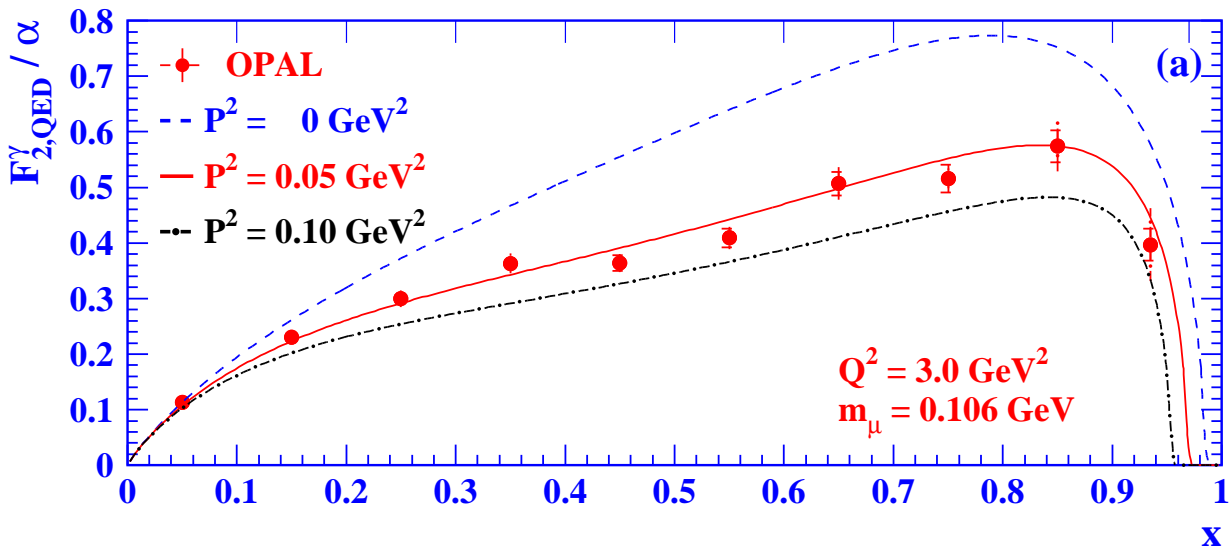
Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)

200. cm.

510 20 50 GeV

**Der Muonpaarendzustand ist eine klare Topologie mit guter Massenauflösung.**

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



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



# Der hadronische Endzustand

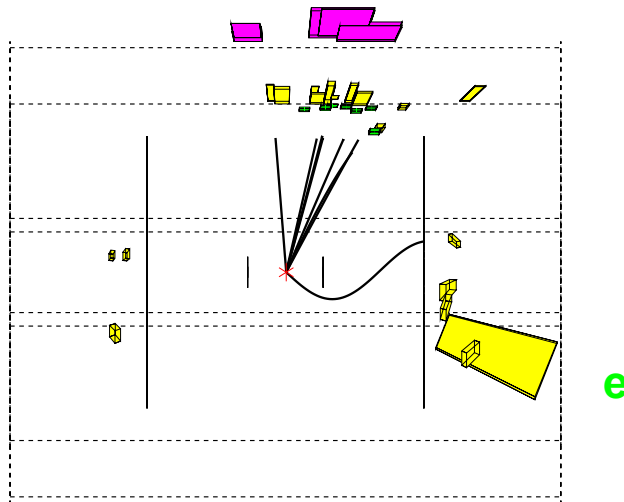
Run:event 6422: 47694 Date 950817 Time 155240 Ctrk(N= 8 Sump= 12.4) Ecal(N= 19 SumE= 46.8) Hcal(N= 6 SumE= 3.4)  
 Ebeam 45.64 Evis 58.0 Emiss 33.3 Vtx ( -0.05, 0.11, 1.11) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)  
 Bz=4.028 Bunchlet 3/3 Thrust=0.7845 Aplan=0.0006 Oblat=0.4769 Spher=0.0370



## Event type bits

- 4 Low mult presel
- 8 Singl phot presel
- 12 Tagged two phot
- 13 Higgs high mult
- 24 S phot EM ass TOF
- 25 S phot EM and TOF
- 26 S phot In-time TOF
- 27 S phot EM clus
- 28 S phot High pT trk
- 30 S phot no H+MJ vet
- 31 long-lived decays
- 32 "Phys1" selection
- 1 Z0 type physics

## Hadronen



Centre of screen is ( 0.0000, 0.0000, 0.0000)

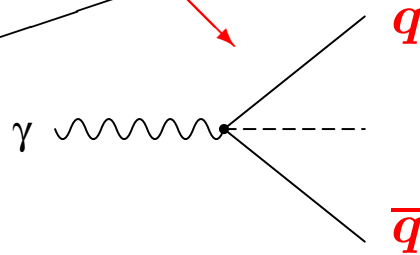
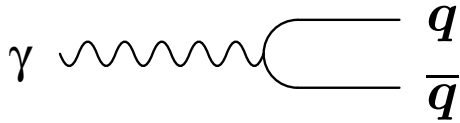
200. cm.

510 20 50 GeV

**Das gestreute Elektron ist klar sichtbar.  
 Der hadronische Endzustand kann jedoch teilweise  
 entlang der Strahlachse verschwinden.**

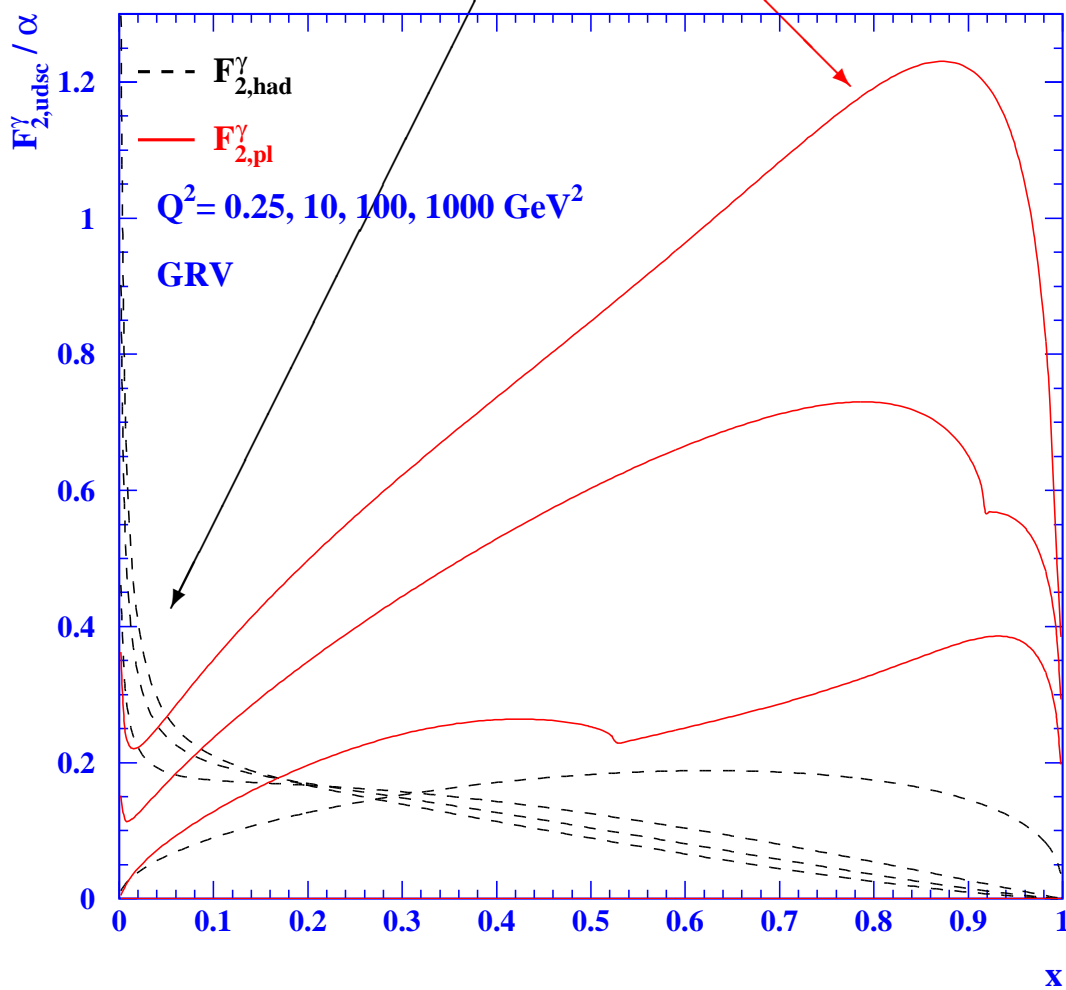
# Beiträge zu $F_2^\gamma(x, Q^2)$

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

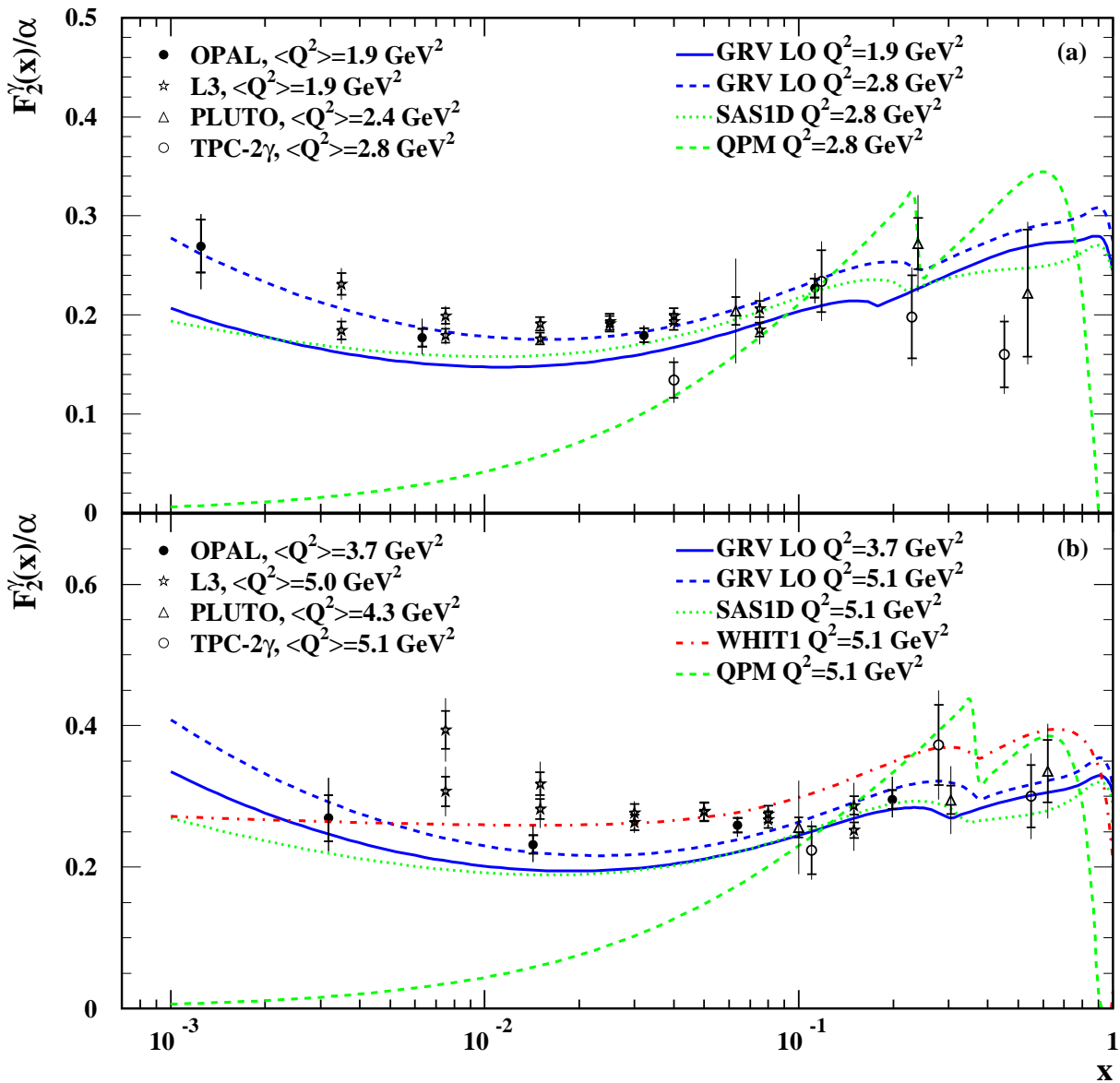


hadronartig, nicht-perturbativ  
e.g. VMD ( $\rho, \omega, \phi$ ), kleines- $x$

punktartig, perturbativ  
großes- $x$

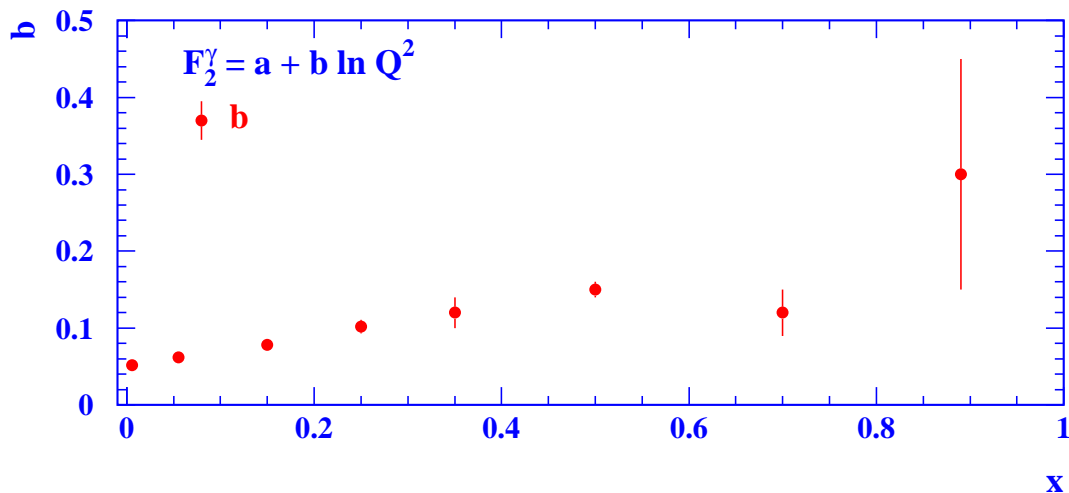
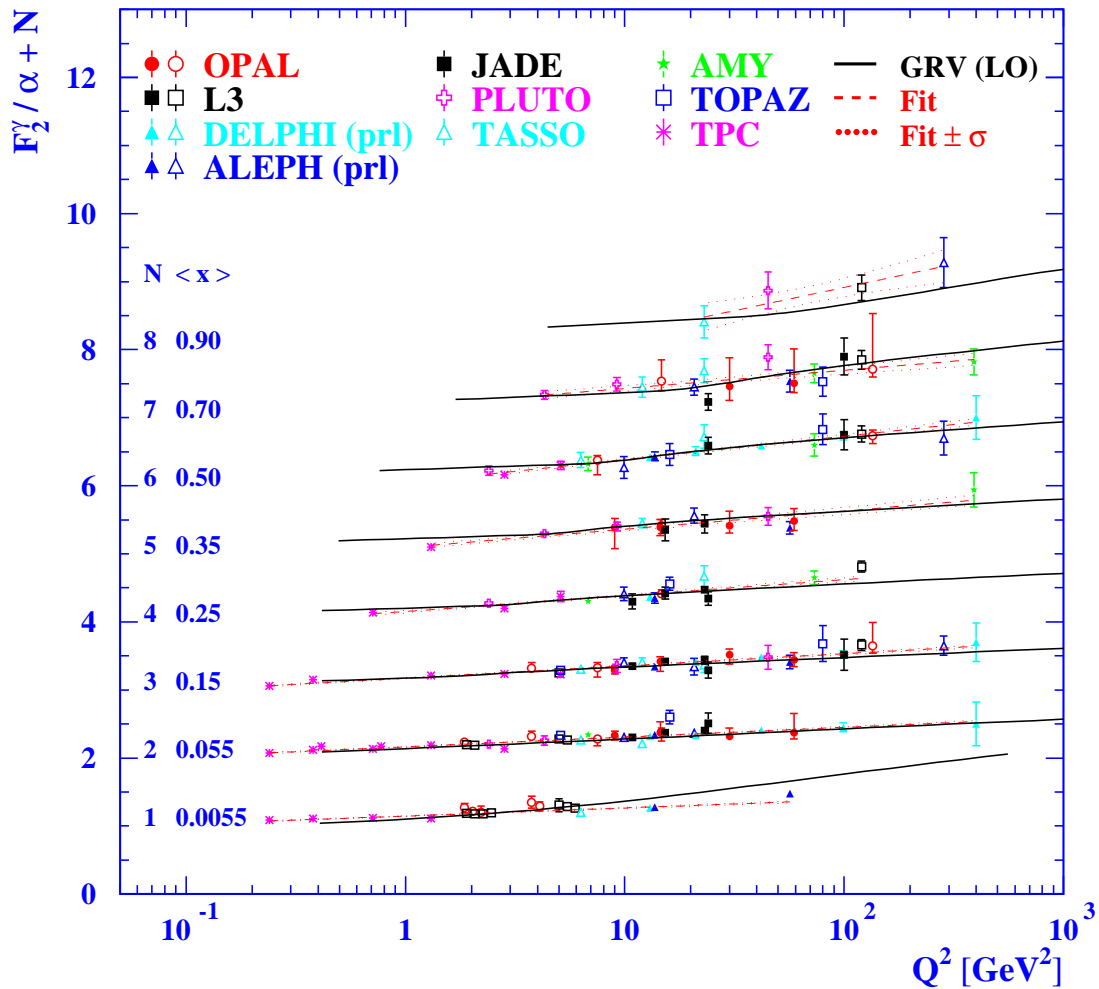


# Messungen bei kleinen $Q^2$ und $x$



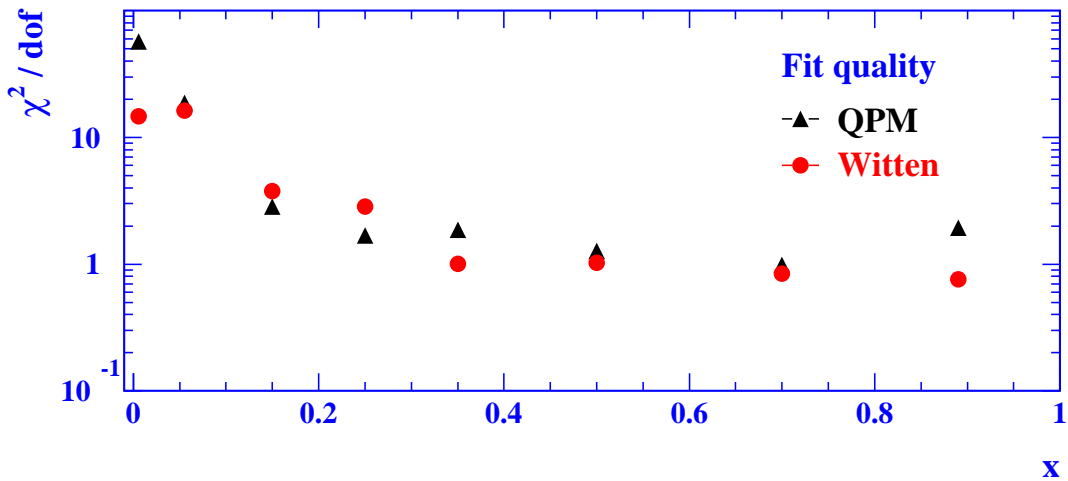
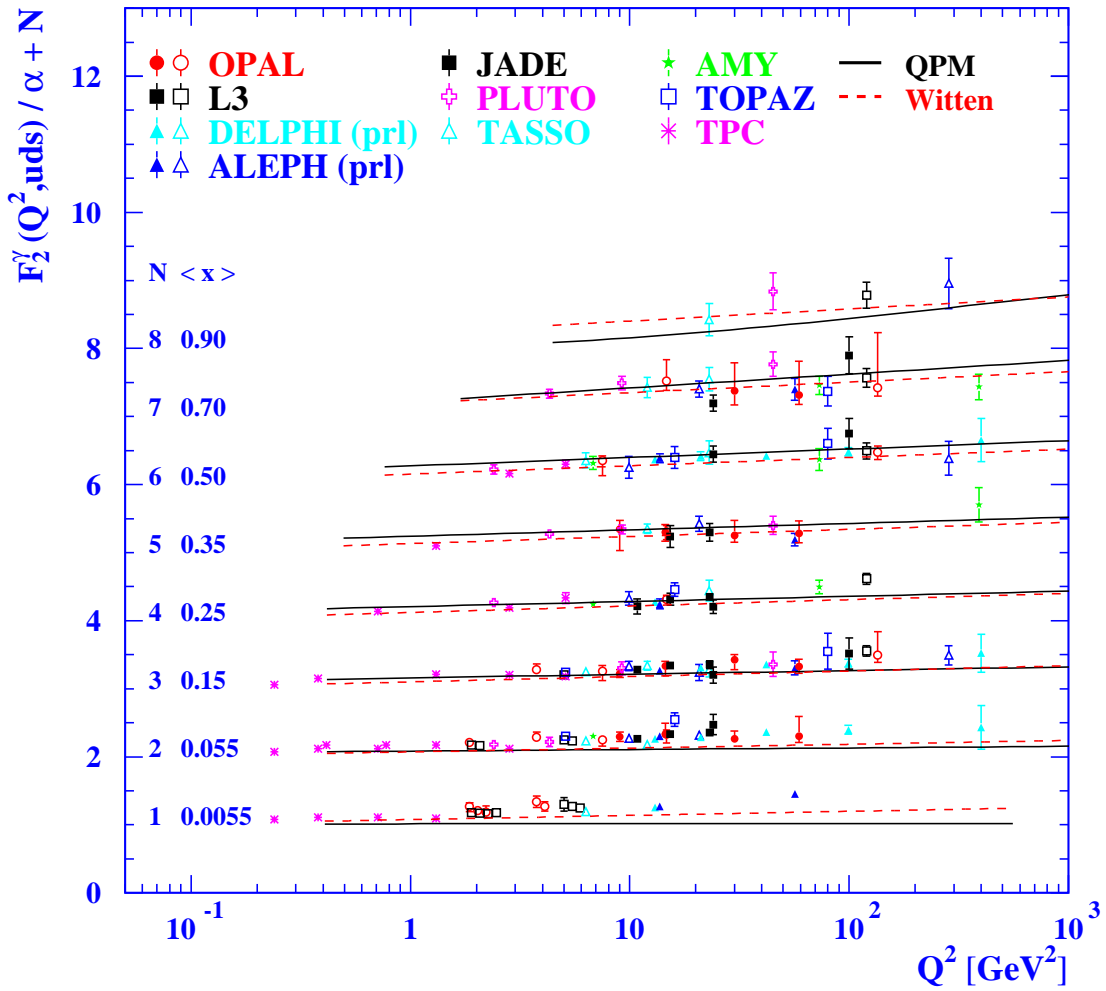
**GRV(LO) und SaS1D sind etwas niedrig im Vergleich zu den Daten.**

# Parametrisierung der $Q^2$ Entwicklung

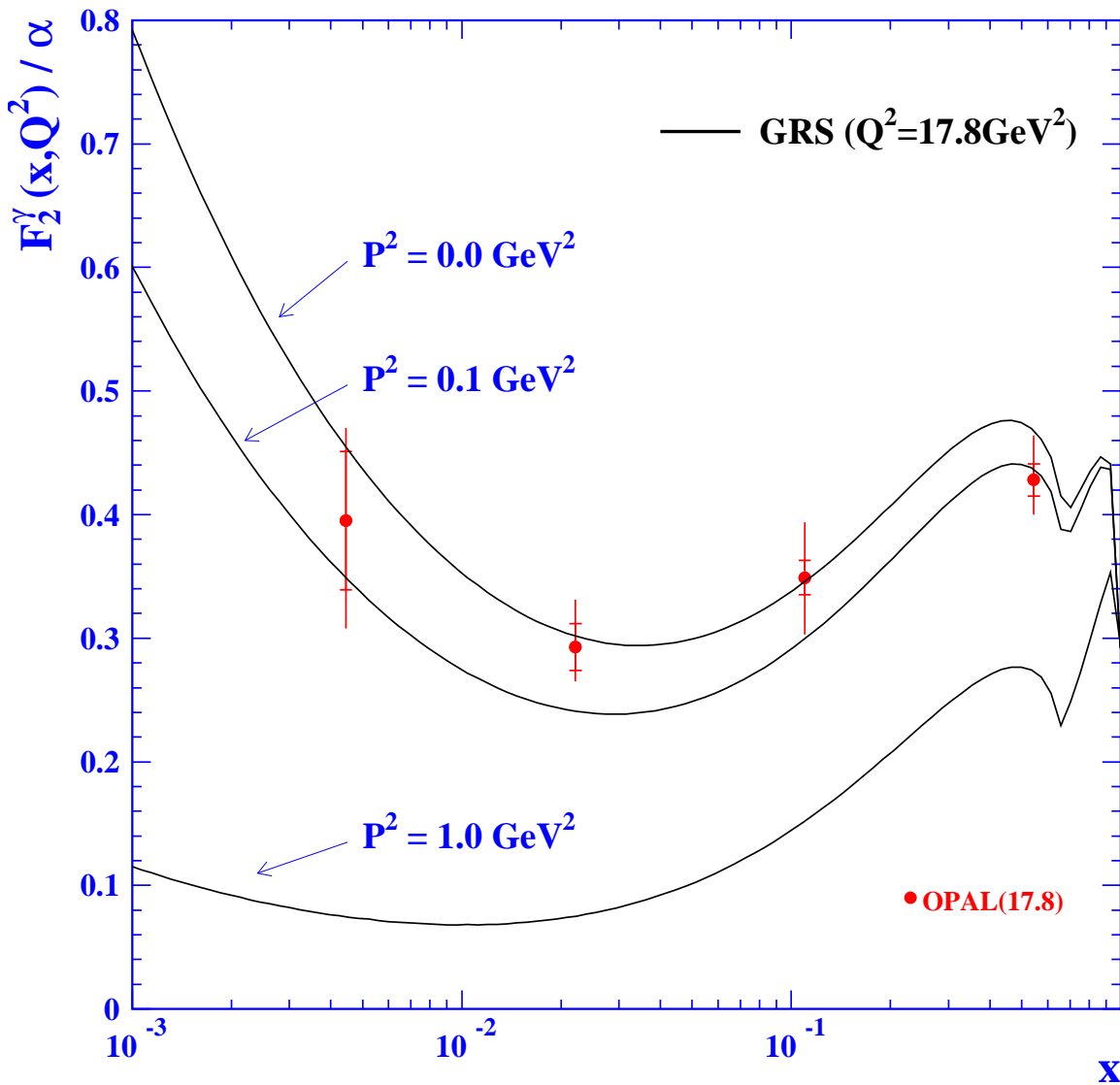


Die angepassten Geraden werden mit  $x$  steiler.

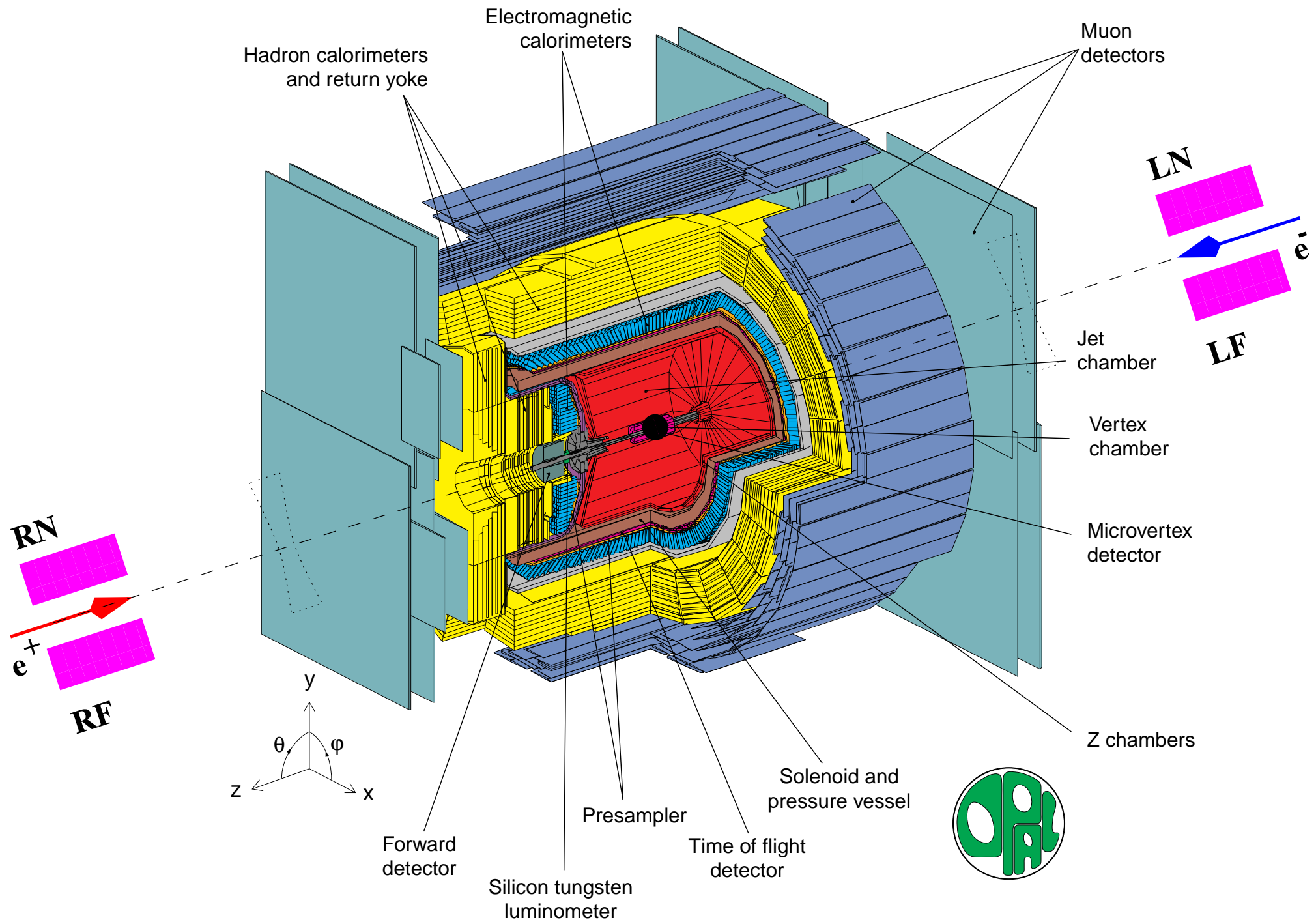
# $Q^2$ Entwicklung für $n_f = 3$



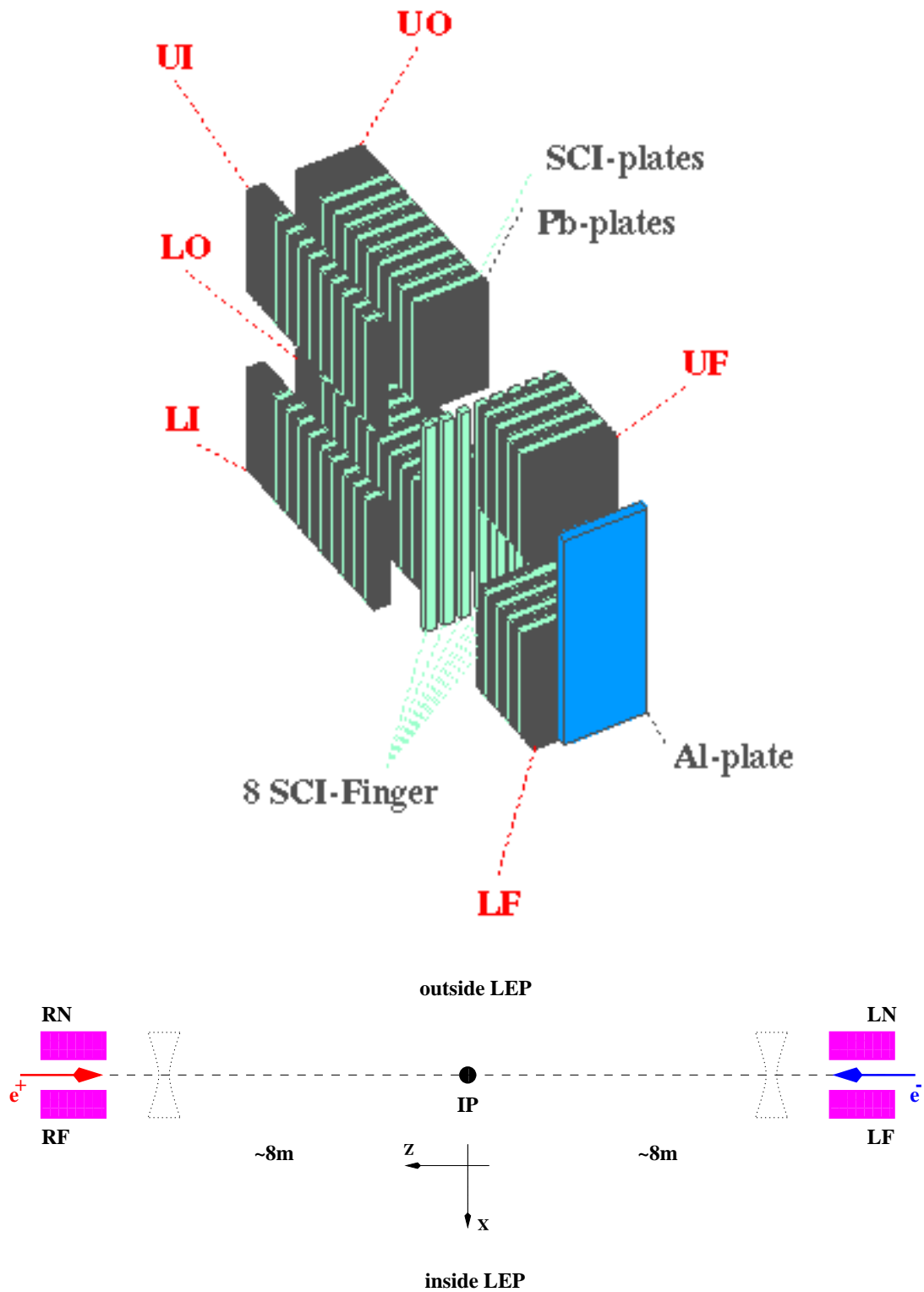
## $P^2$ Unterdrückung von $F_2^\gamma$



Für Virtualitäten von  $P^2 = 0.1-1.0 \text{ GeV}^2$  ist  $F_2^\gamma$   
um ca. 30-60% unterdrückt.  
Eine gute  $P^2$ -Auflösung  $\Leftrightarrow$  Orts-Auflösung ist nötig.



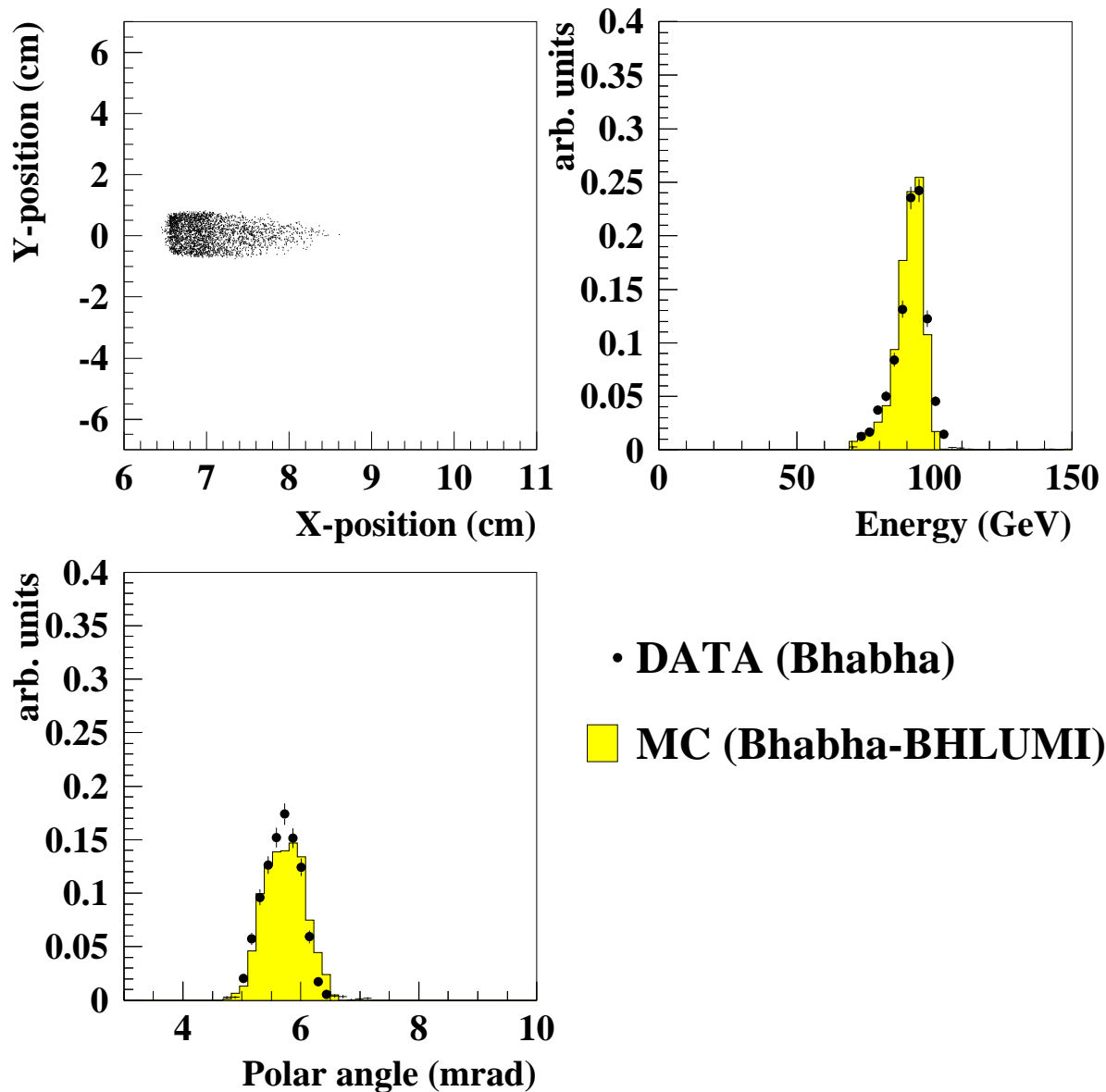
# Das OPAL Far Forward Kalorimeter





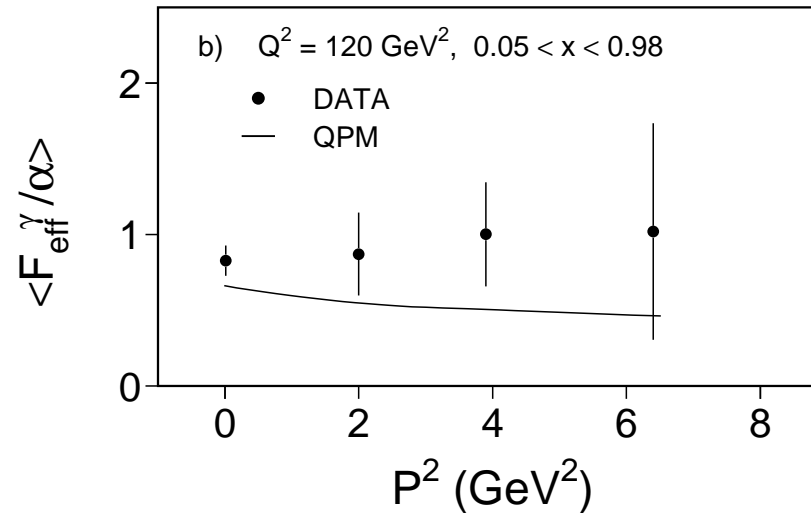
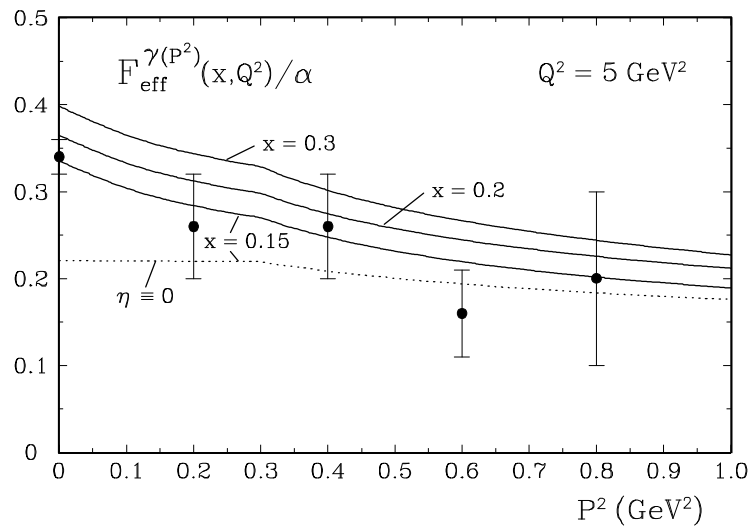
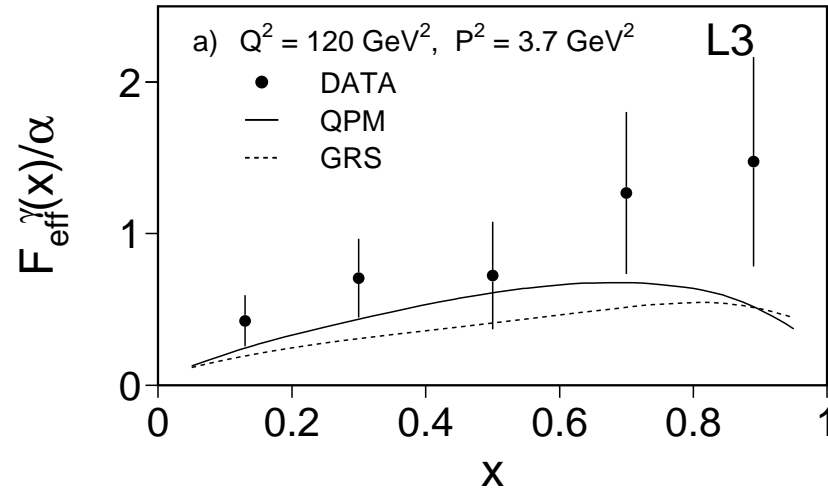
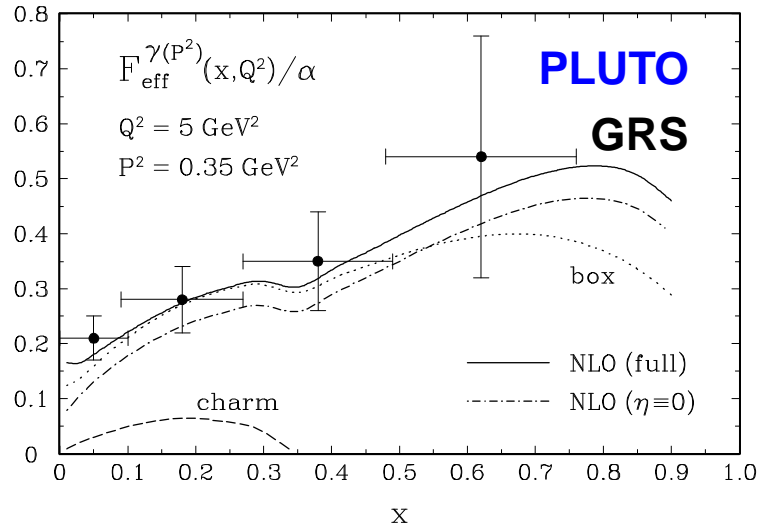
# Daten versus Monte Carlo für Bhabha Ereignisse

OPAL preliminary



**Das Verhalten des Detektors ist ausreichend gut  
verstanden.**

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



## 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.

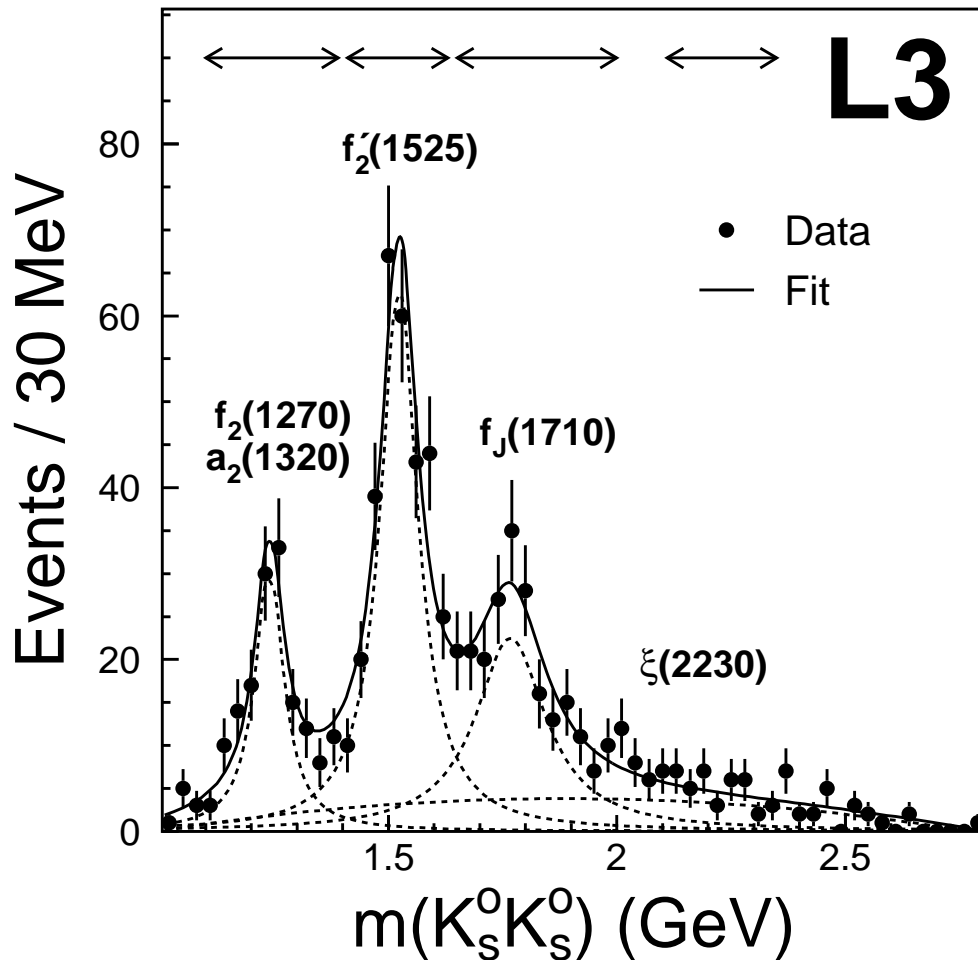
## Die Suche nach Glueballs

1. Glueballs sind eine aussergewöhnliche Materieform gebundener farbneutraler Resonanzzustände aus Gluonen. Die Leichtesten durch Rechnungen auf dem Gitter vorhergesagten Glueballs liegen im Massenbereich von ca. 1500–2500 MeV.
2. Glueballs sollten vornehmlich ingluonreichen Umgebungen wie z.B. der  $p\bar{p}$  Vernichtung oder in  $J/\Psi$  Zerfällen produziert werden.
3. Photonen koppeln nicht direkt an Gluonen. Deswegen sollten Glueballkandidaten eine **kleine Zerfallsbreite  $\Gamma_{\gamma\gamma}(R)$**  in der Reaktion  $\gamma^*\gamma^* \rightarrow R$  haben.

### Wirkungsquerschnitt:

$$\sigma(\gamma^*\gamma^* \rightarrow R) = 8\pi(2J_R + 1) \frac{\Gamma_{\gamma\gamma}(R)\Gamma(R)}{(W_{\gamma\gamma}^2 - m_R^2)^2 + m_R^2\Gamma^2(R)}$$

Die Winkelverteilung der Zerfallsprodukte gibt Aufschluss über den Spin ( $J$ ) der Resonanz.



$R$	$\Gamma(\gamma^* \gamma^* \rightarrow R) \cdot BR(R \rightarrow K \bar{K})$
$f_2'(1525)$	$76 \pm 6 \pm 11 \text{ eV}$
$f_J(1710)$	$49 \pm 11 \pm 13 \text{ eV}$
$\xi(2230)$	$< 1.4 \text{ eV}$ bei 95% CL

## Das Konzept der effektiven Partonverteilung

$$\frac{d^5\sigma}{dz dx_\gamma dx_p d\cos\theta^* dP^2} \propto \frac{1}{z} \frac{d^2 N_\gamma^T}{dz dP^2} \frac{\tilde{f}_\gamma(x_\gamma, Q^2, P^2)}{x_\gamma} \frac{\tilde{f}_p(x_p, Q^2)}{x_p} |M_{\text{SES}}(\cos\theta^*)|^2$$

mit:

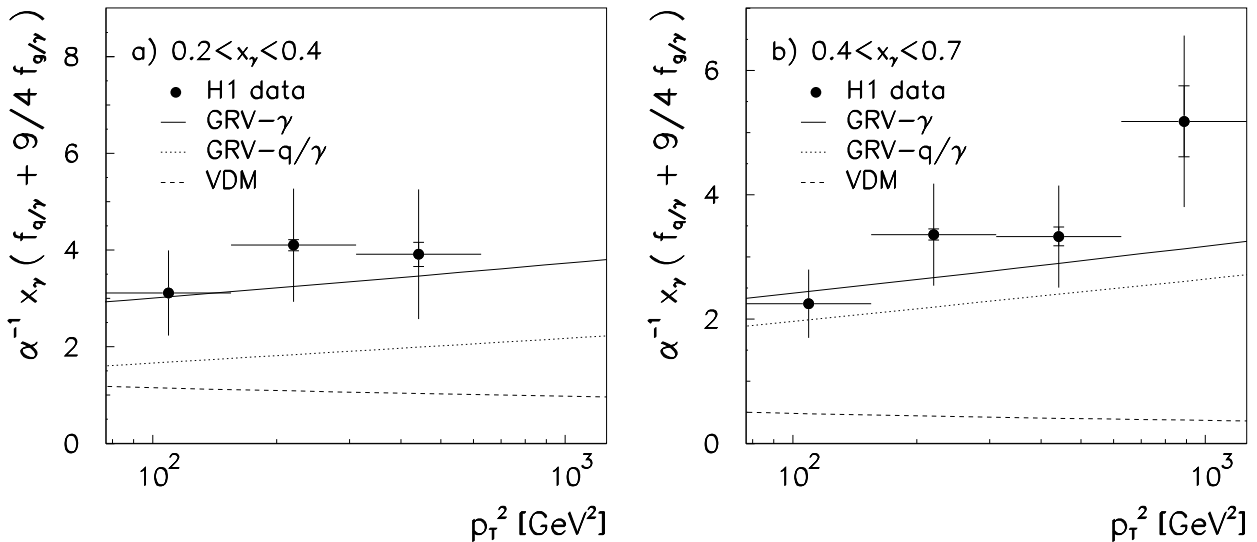
$$\tilde{f}_p(x_p, Q^2) \equiv \sum_{k=1}^{n_f} [q_k^p(x_p, Q^2) + \bar{q}_k^p(x_p, Q^2)] + \frac{9}{4} g^p(x_p, Q^2)$$

$$\tilde{f}_\gamma(x_\gamma, Q^2, P^2) \equiv \sum_{k=1}^{n_f} [q_k^\gamma(x_\gamma, Q^2, P^2) + \bar{q}_k^\gamma(x_\gamma, Q^2, P^2)] + \frac{9}{4} g^\gamma(x_\gamma, Q^2, P^2)$$

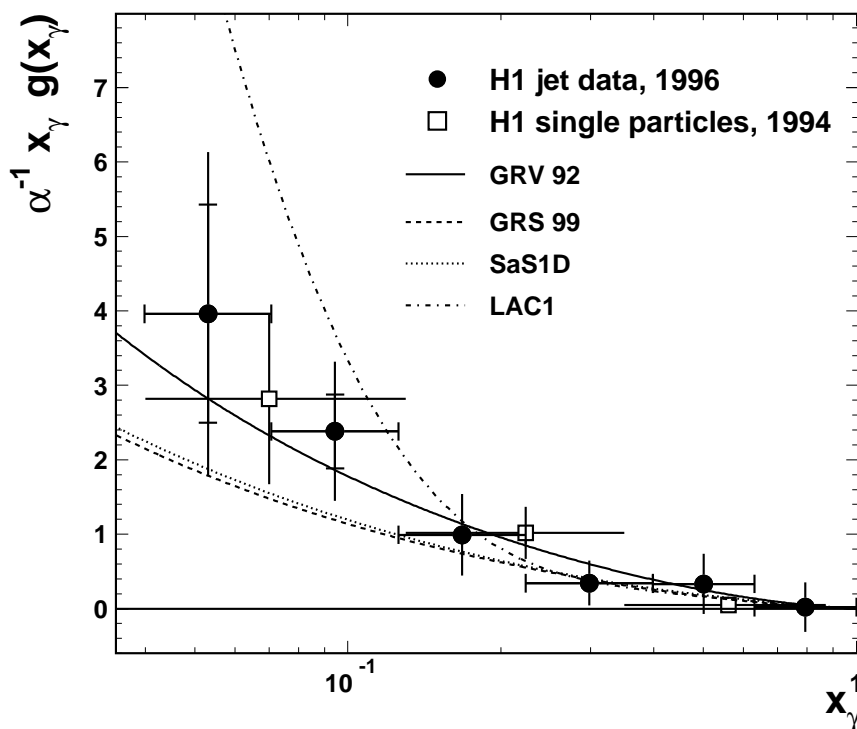
$$\tilde{f}_\gamma = \tilde{f}_\gamma^T + \frac{2(1-z)}{1+(1-z)^2} \tilde{f}_\gamma^L$$

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

# Struktur quasireeller Photonen

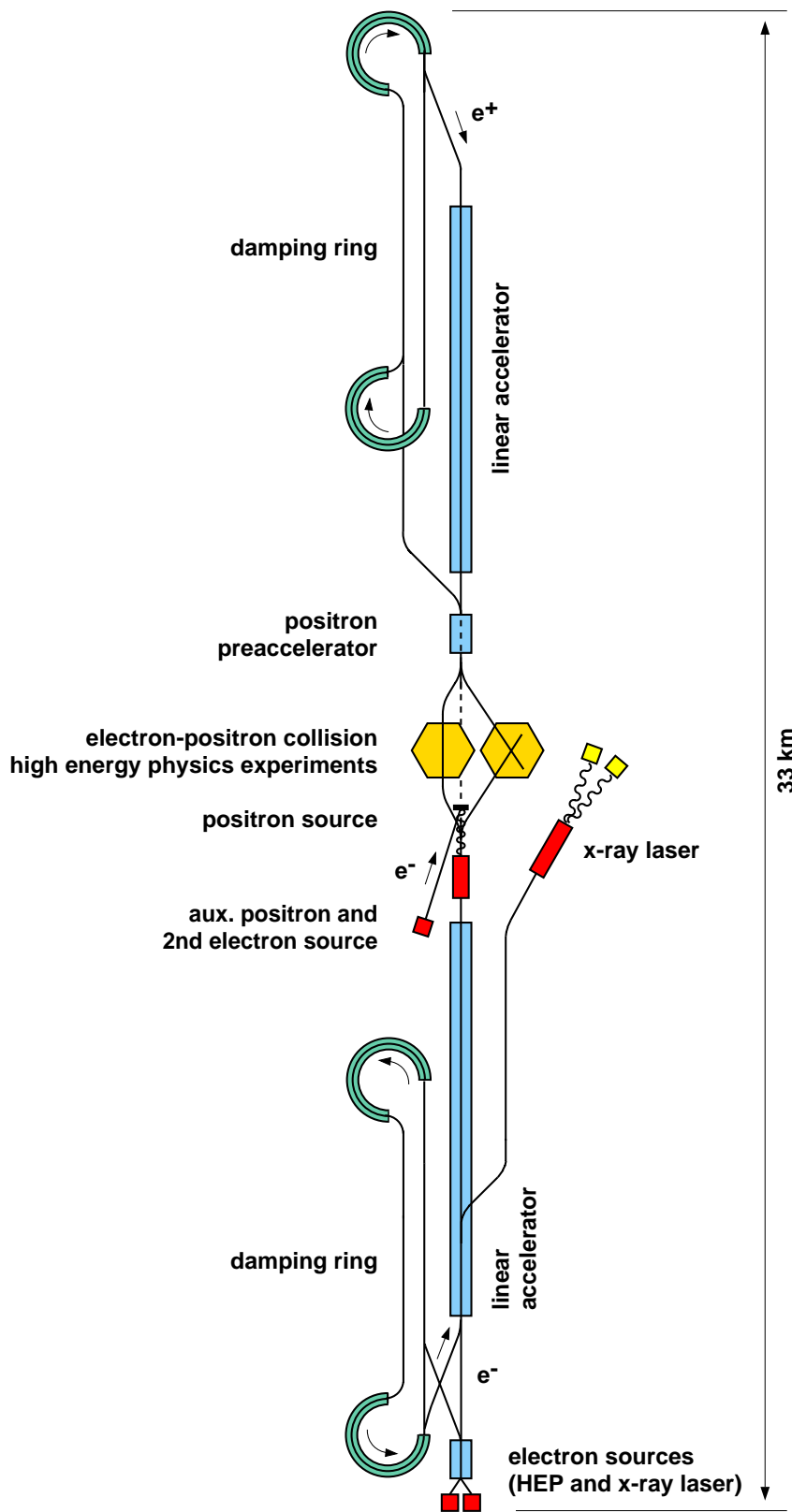


Der hadronartige Anteil ist zu klein für alle  $x$ , und der Quarkanteil ist nicht ausreichend  $\Rightarrow$  Gluonen werden gebraucht.



Der Gluonanteil steigt zu kleinen  $x$  stark an.

# Layout eines zukünftigen Linearbeschleunigers

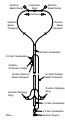




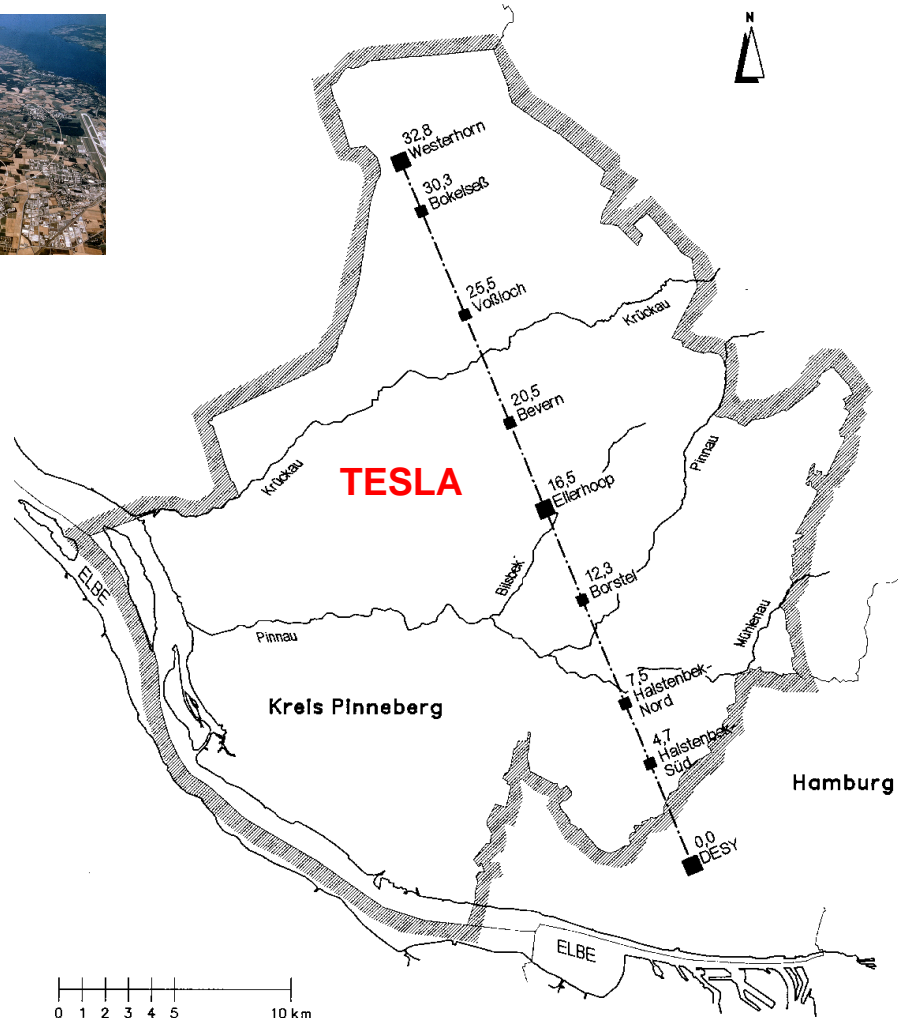
# Von LEP/ SLC zu TESLA



LEP

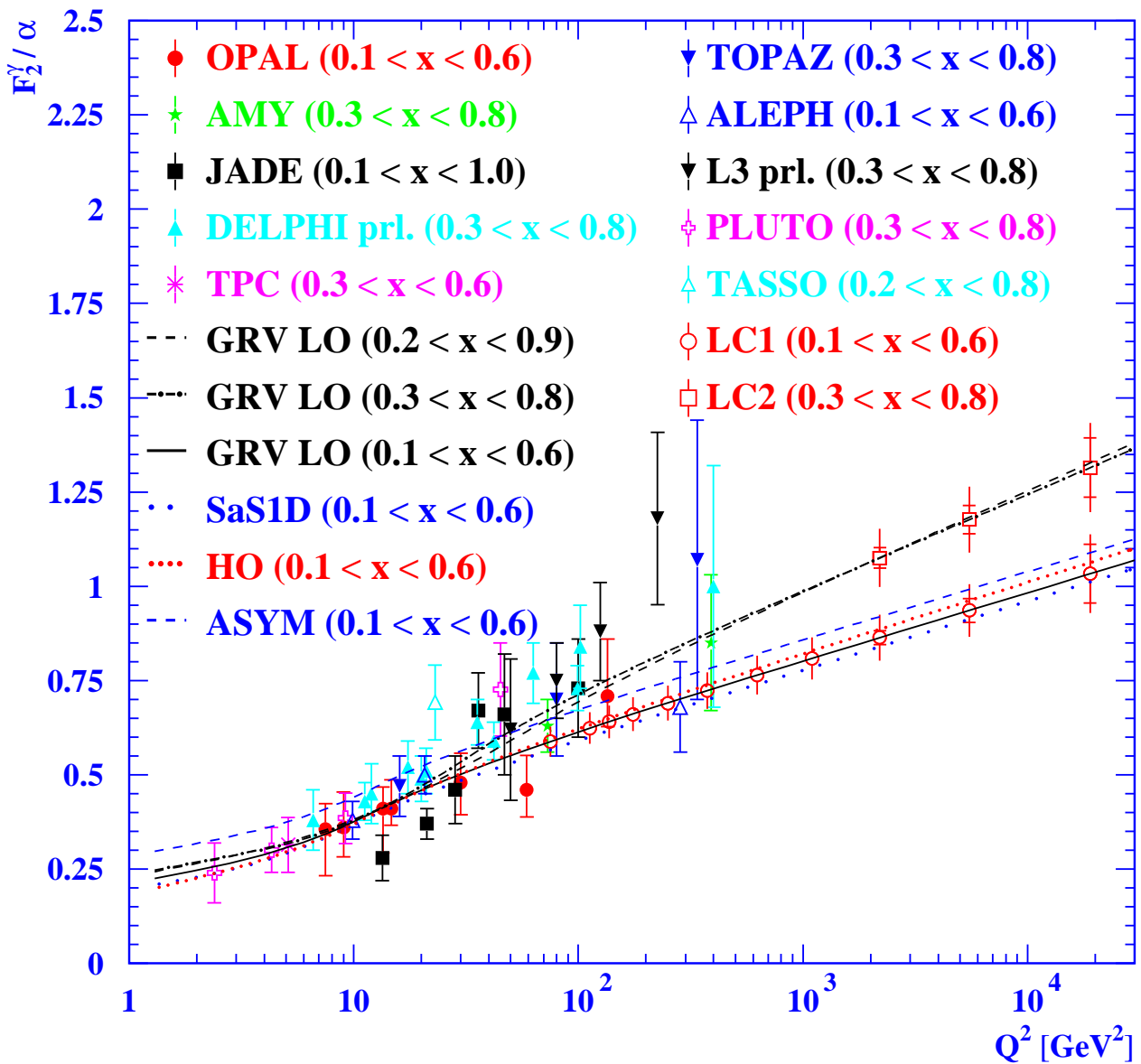


SLC



		LEP	SLC	TESLA
Radius	[km]	8.5	$\infty$	$\infty$
Länge	[km]	26.7	4	33
Gradient	[MV/m]	6	10	23,4
$\sigma_x / \sigma_y$	$[\mu\text{m} / \mu\text{m}]$	110 / 5	1.4 / 0.5	0.553/0.005
Energie	[GeV]	100	50	250
Lumi.	$[10^{31} / \text{cm}^2 \text{s}]$	7.4	0.1	3400
$\mathcal{L}_{int}$	[1/pb y]	250	15	10000

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



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

## Zusammenfassung

- Eine Vielzahl von Messungen zur Photonstruktur wurde 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

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