

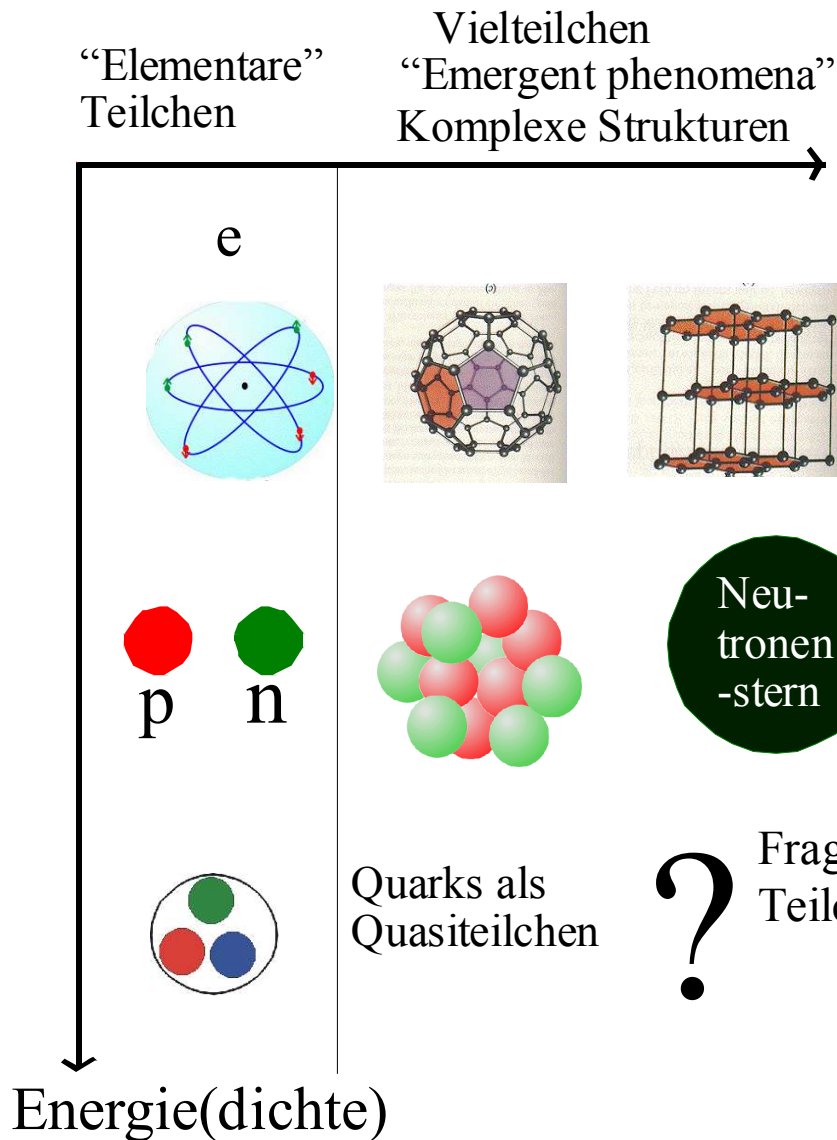
# Experimentelle Untersuchungen zur Struktur des Nukleons

1. Einleitung
2. Der elektrische Formfaktor des Protons
3. Ergebnisse, die auf eine Abweichung einer sphärischen Ladungsverteilung beim Proton bzw.  $\Delta$  hinweisen
4. Überprüfung einer Beziehung, die eine statische Größe des Protons mit seinem Anregungsspektrum herstellt
5. Neue Möglichkeiten der Spektroskopie des Anregungsspektrums des Nukleons
6. Zusammenfassung

# 1. Einleitung

## Strukturen

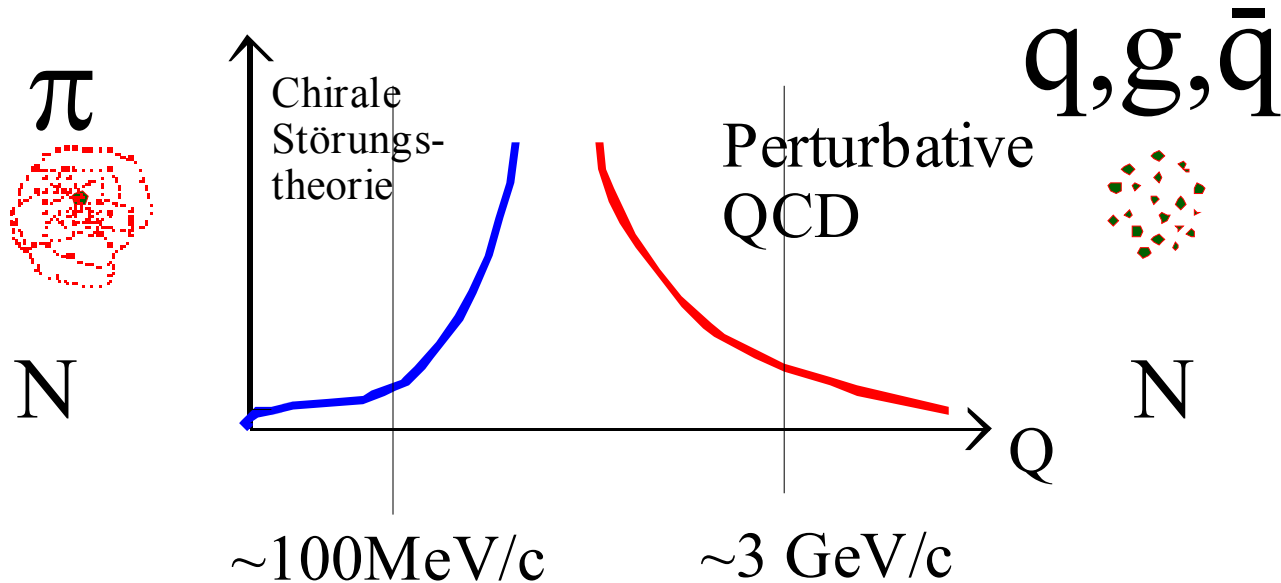
Atome → Quarks : Ähnlichkeiten ,  
neue Herausforderungen!



Fragen: QCD-Struktur des Vakuums, Masse der  
Teilchen, Relativistisches Vielteilchenproblem

# Näherungen im Rahmen der QCD

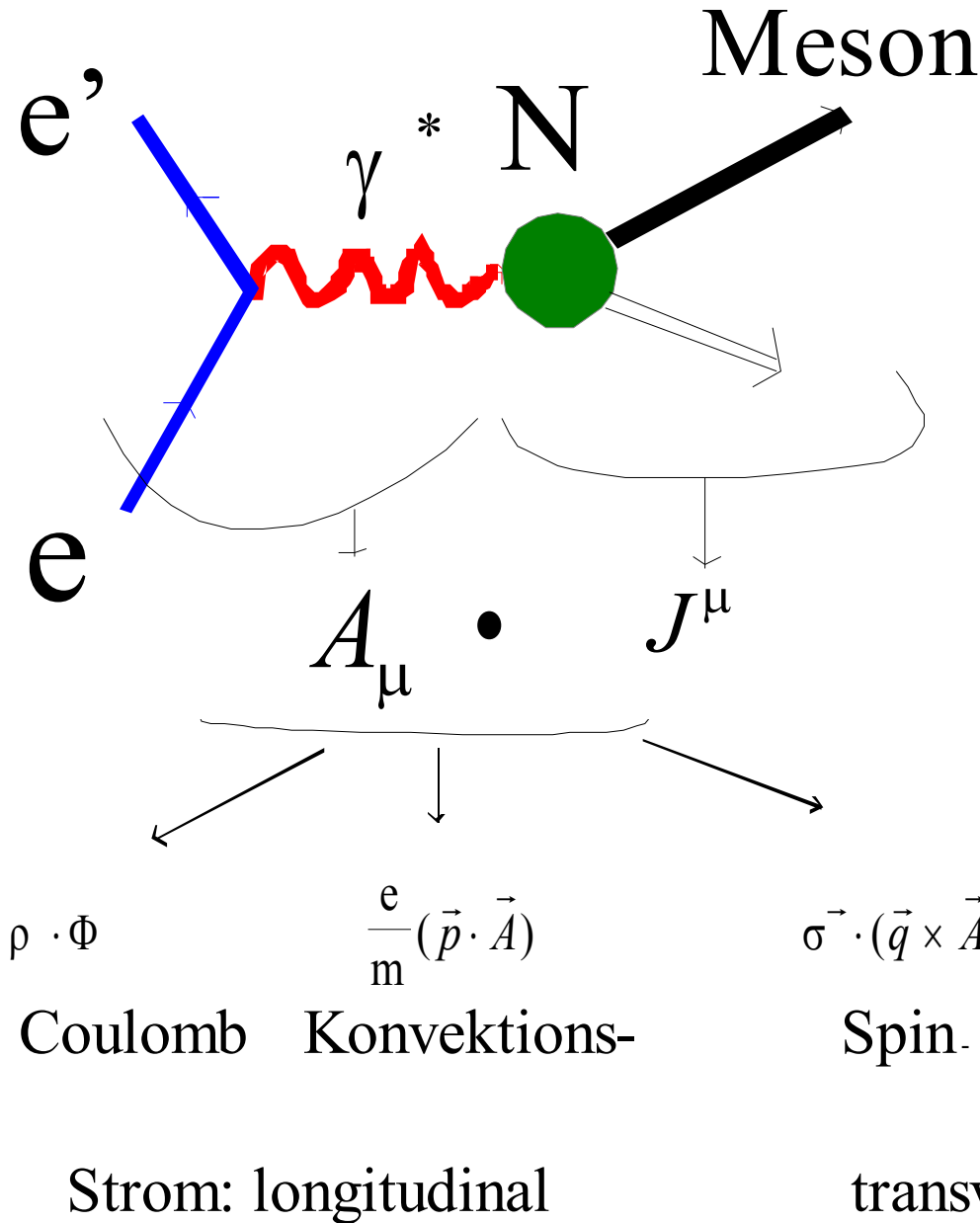
“Kopplungskonstanten”



Vorgehensweisen im Bereich der nicht störungstheoretisch erfassbaren QCD:

Phänomenologie: Auf der QCD basierende Modelle  
Gittereichtheorie

# Elektromagnetische Wechselwirkung



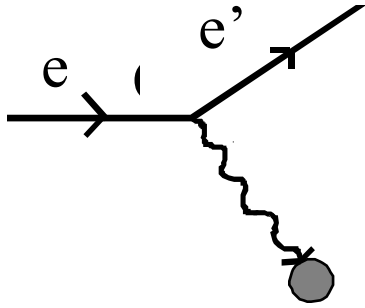
Projektion des nicht-bekanntes hadronischen Systems auf bekannte Größen der El.magn. Wechselwirkung

Multipole:  
 Coulomb,  
 Elektrisch,  
 Magnetisch

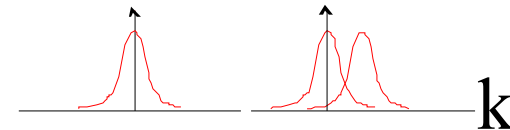
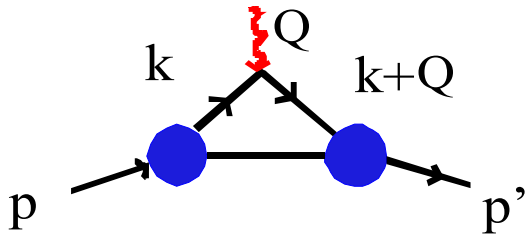
## 2. Der elektrische Formfaktor des Protons

## Elastische Streuung:

Kein Energieübertrag,  
aber Impulsübertrag



$$F(Q) = \int \Psi^*(\mathbf{k} + \mathbf{Q}) \cdot \Psi(\mathbf{k}) d^3k$$



Überlappintegral: Formfaktor

Wirkungsquerschnitt:

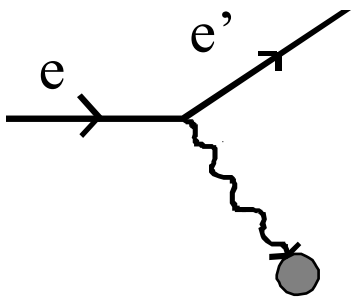
Kinematische Größen

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{Mott} \cdot \left[ f_1^{kin} \cdot G_E^2 + f_2^{kin} \cdot G_M^2 + f_3^{kin} \cdot G_M^2 \right]$$

Elektrischer Formfaktor

Magnetischer Formfaktor

# Proton: FF( Elektrisch, magnetisch)

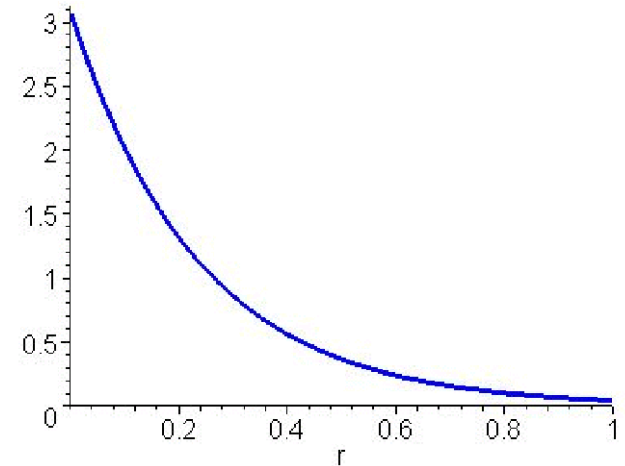


„Dipol“ –  
Formfaktor

„Gute“ Parametrisierung

$$G_D = \frac{1}{(1 + Q^2/0.71)^2}$$

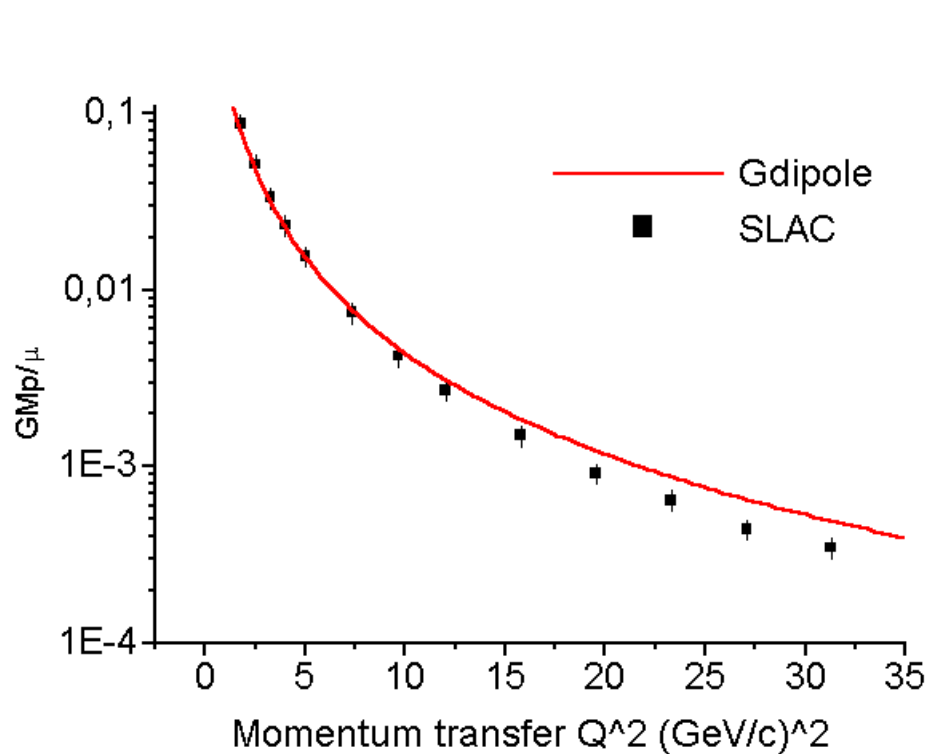
Im Ortsraum:  $\rho_D(\mathbf{r}) = \frac{\mu^3}{(8\pi)} e^{-\mu \cdot r}$



# Magnetischer Formfaktor am Proton

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{Mott} \cdot \left( \frac{G_E^2 + \tau \cdot G_M^2}{1 + \tau} + \tau \cdot G_M^2 \cdot \tan^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

SLAC-DATA:1986



# Um den elektrischen FF bestimmen zu können $\Rightarrow$ **Polarisation**

Hier: Strahl + Rückstoßproton

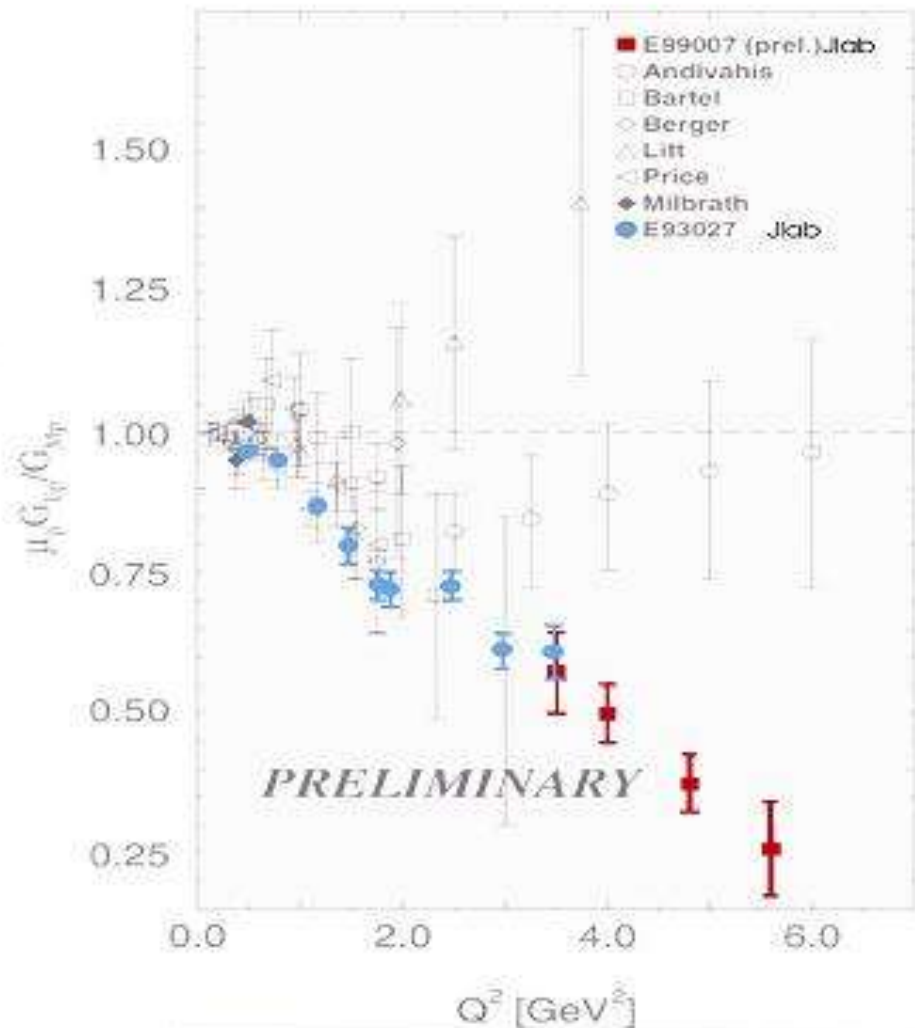
Asymmetrien

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \underbrace{\dots(G_E^2 + \dots G_M^2)}_{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{unpol.}}} + \underbrace{\dots \mathbf{P}_e \cdot \mathbf{P}_N^{\uparrow} \cdot G_E \cdot G_M}_{A^{\rightarrow\uparrow}} + \underbrace{\dots \mathbf{P}_e \cdot \mathbf{P}_N^{\rightarrow} \cdot G_M^2}_{A^{\rightarrow\rightarrow}}$$

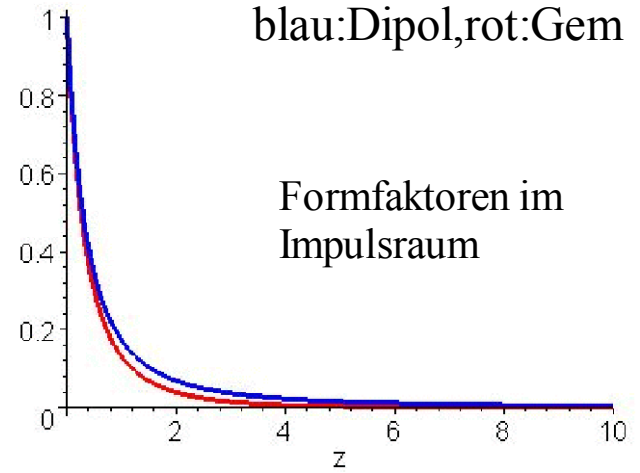
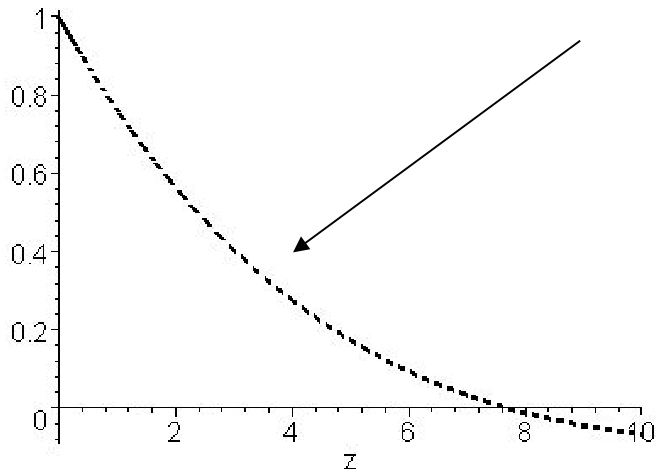


Jefferson-Lab.  
Verhältnis: Elektrischer FF/Magnetischer FF

Elektrischer FF  
fällt  
schneller!

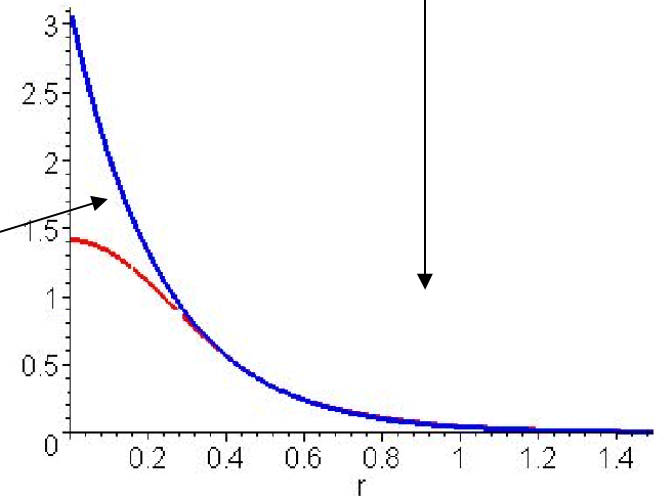


Gemessen: Verhältnis:  $\frac{GE_p \text{ (elektrisch)}}{GM_p \text{ (magnetisch)}}$



Fouriertransformation  
in den Ortsraum

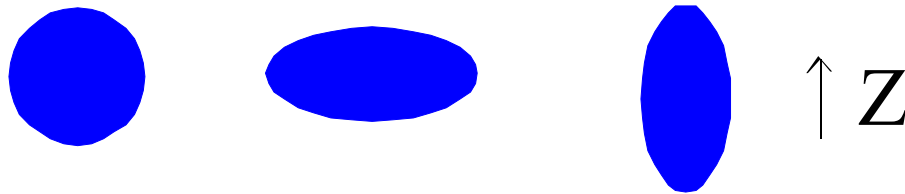
Bei den hohen  
Impulsüberträgen  
Eigentlich nicht statthaft,  
aber anschaulich



**Sichtbarer Unterschied zwischen  
Ladungsdichte und  
Magnetisierungsdichte**

### 3. Ergebnisse, die auf eine Abweichung einer sphärischen Ladungsverteilung beim Proton bzw. $\Delta$ hinweisen

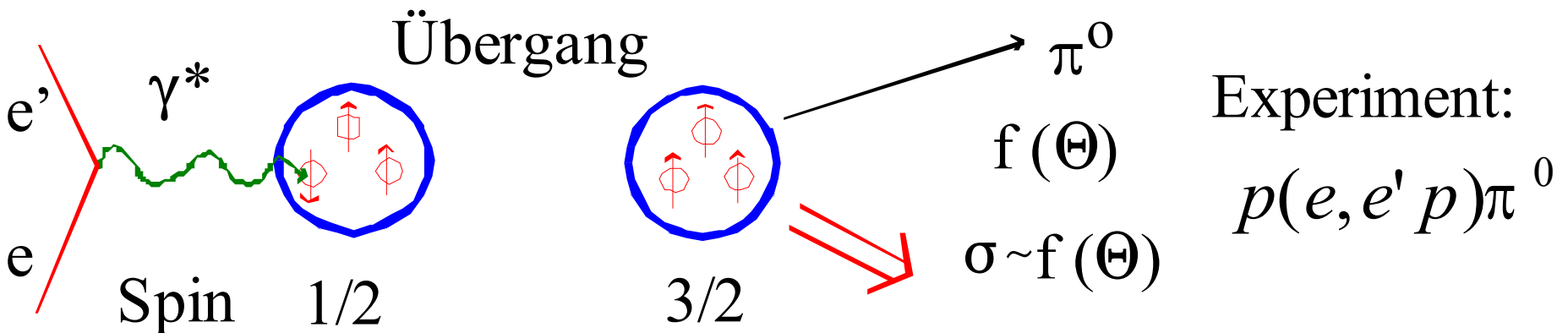
Die Ladungsverteilung des Nukleons und seiner Resonanzen muss nicht kugelförmig sein:



Quadrupolmoment:

$$Q = \int d^3r \cdot \rho(r) (3z^2 - r^2)$$

**Ursachen:** Tensorkräfte zwischen Quarks  $\pm d$ -Zustandsbeimischung in der Wellenfunktion, Eingluonaustausch? Deformation der Mesonenwolke?



# Wirkungsquerschnitt für $\gamma^*$

(virtuelles  $\gamma$ ):

$$\frac{d^2\sigma_v}{d\Omega_{\pi^0}^*} = \boxed{A^\varphi} + \boxed{B^\varphi} \cdot \cos\varphi_{\pi^0}^* + \boxed{C^\varphi} \cdot \cos 2\varphi_{\pi^0}^*$$

Meßgrößen

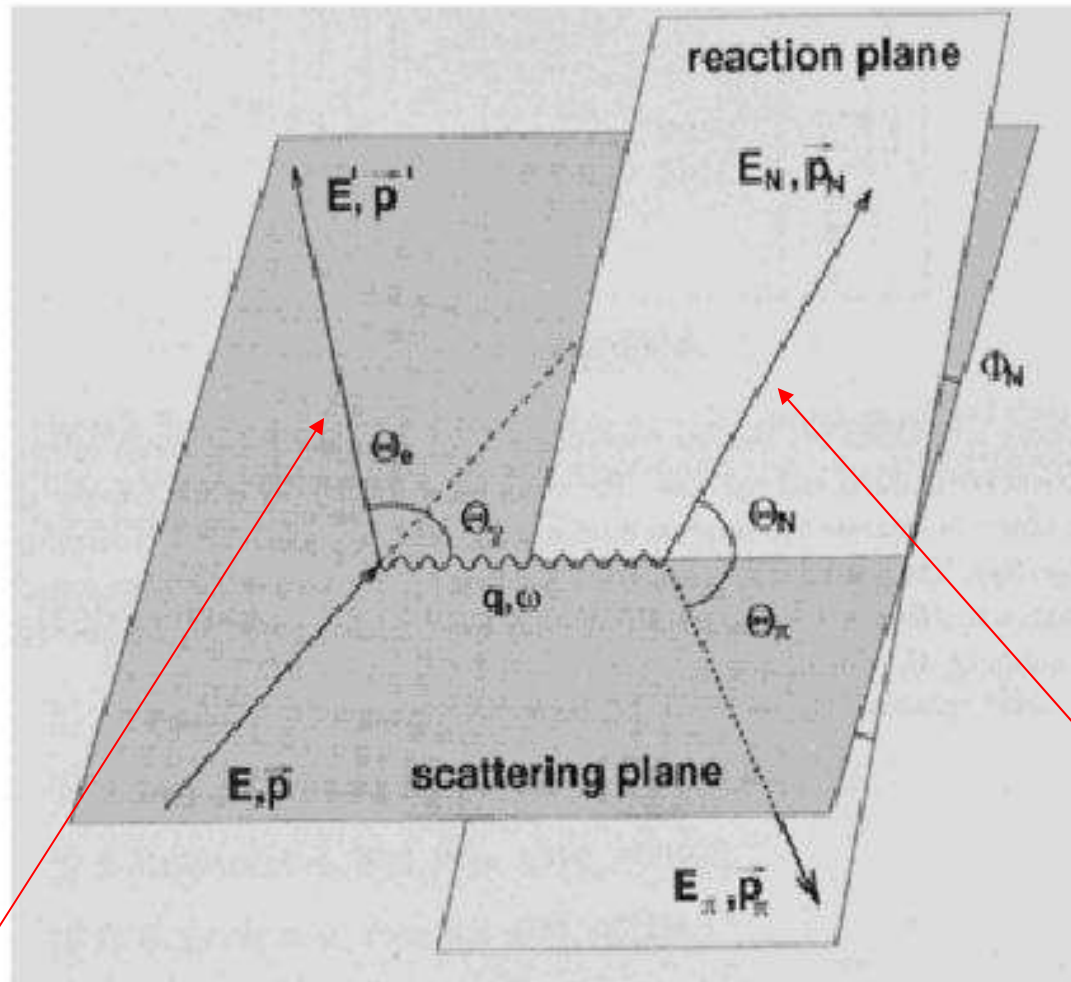
$$A^\varphi(\theta) = 2.5 A_0^\theta + 2 A_1^\theta \cos\theta_{\pi^0}^* - 1.5 A_0^\theta \cdot \cos^2\theta_{\pi^0}^* \quad \text{etc. for B, C}$$

$\Theta$ -Abhängigkeit bestimmt  
Multipolzusammensetzung

$$C^\varphi(\theta) = C_0^\theta \sin^2\theta_{\pi^0}^*$$

$$\approx \sin^2\theta_{\pi^0}^* \left( 1.5 |E_{1^+}|^2 - 0.5 |M_{1^+}|^2 - \text{Re} \left[ E_{1^+}^* (M_{1^+} - M_{1^-}) + M_{1^+}^* M_{1^-} \right] \right)$$

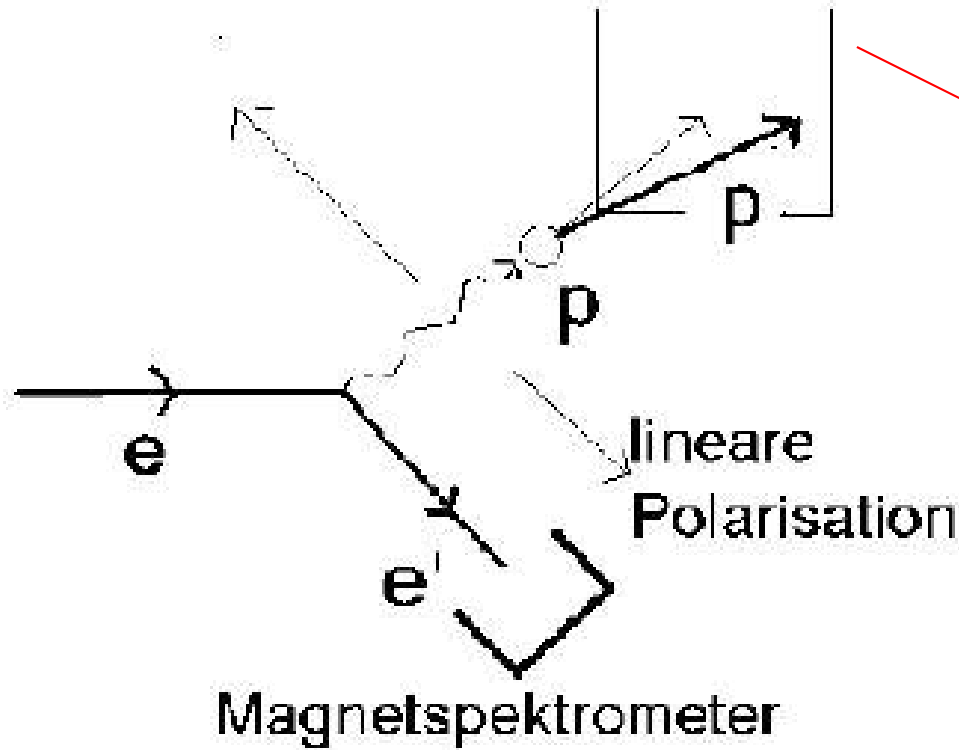
„Out-of-plane“ –Messung:



Elektron

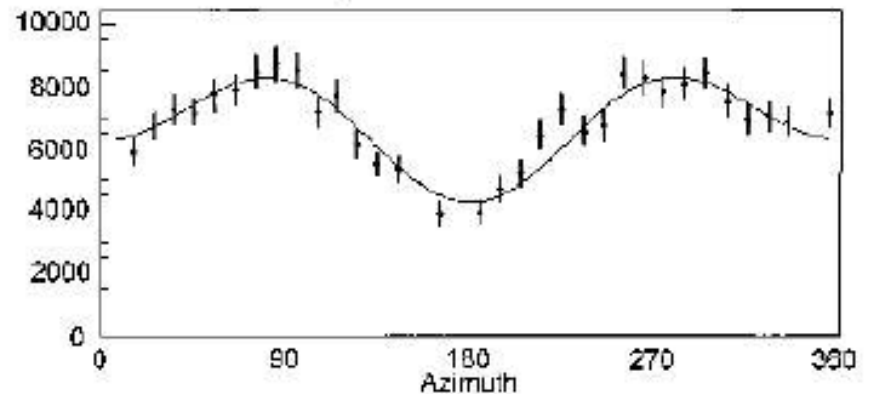
Proton

# Flugzeitspektrometer (3m\*3m)

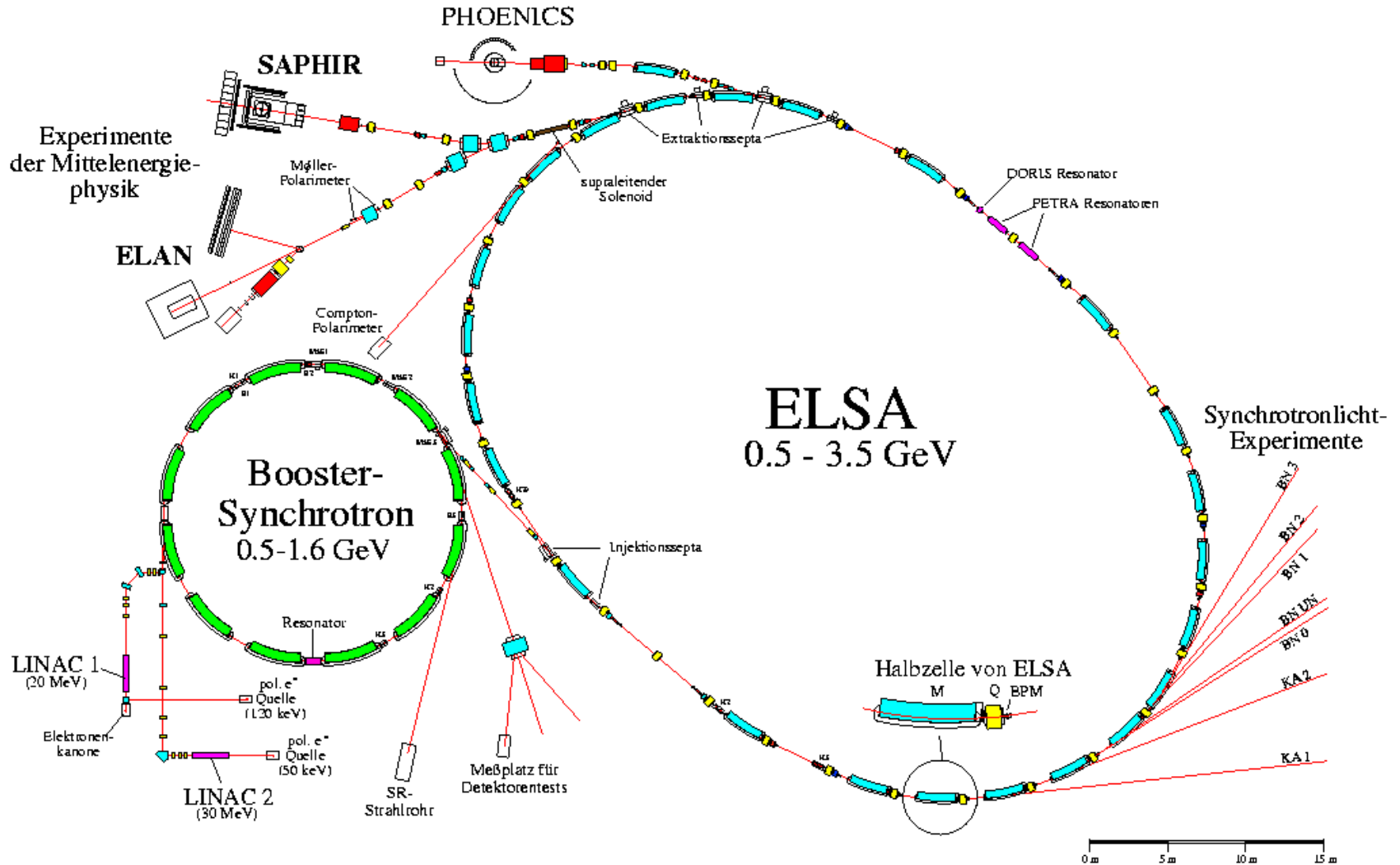


Azimuthverteilung

Messung:



# Elektronen Stretcher Anlage (ELSA)

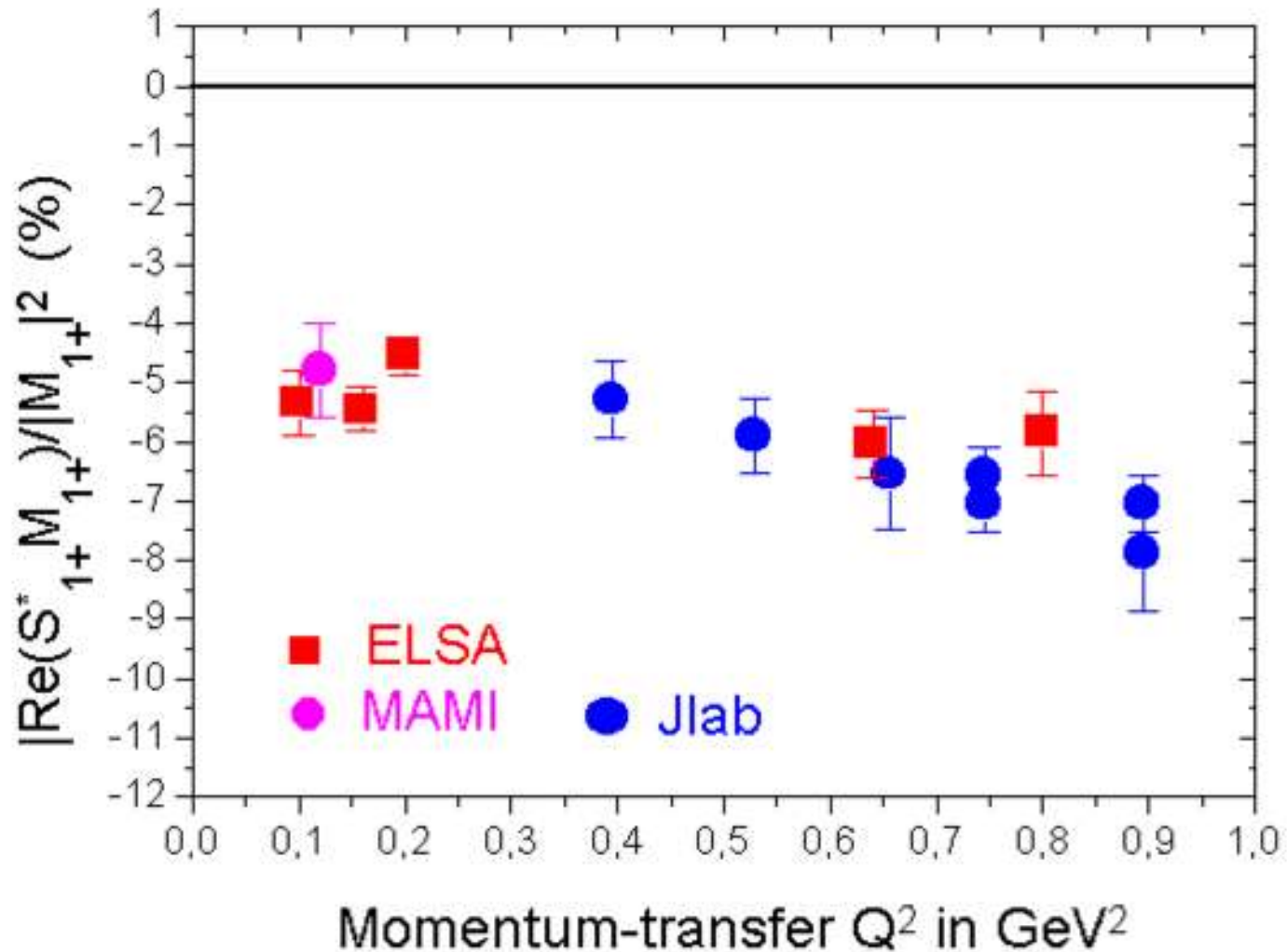


# Ergebnisse:

Longitudinale elektrische Quadrupolamplitude

---

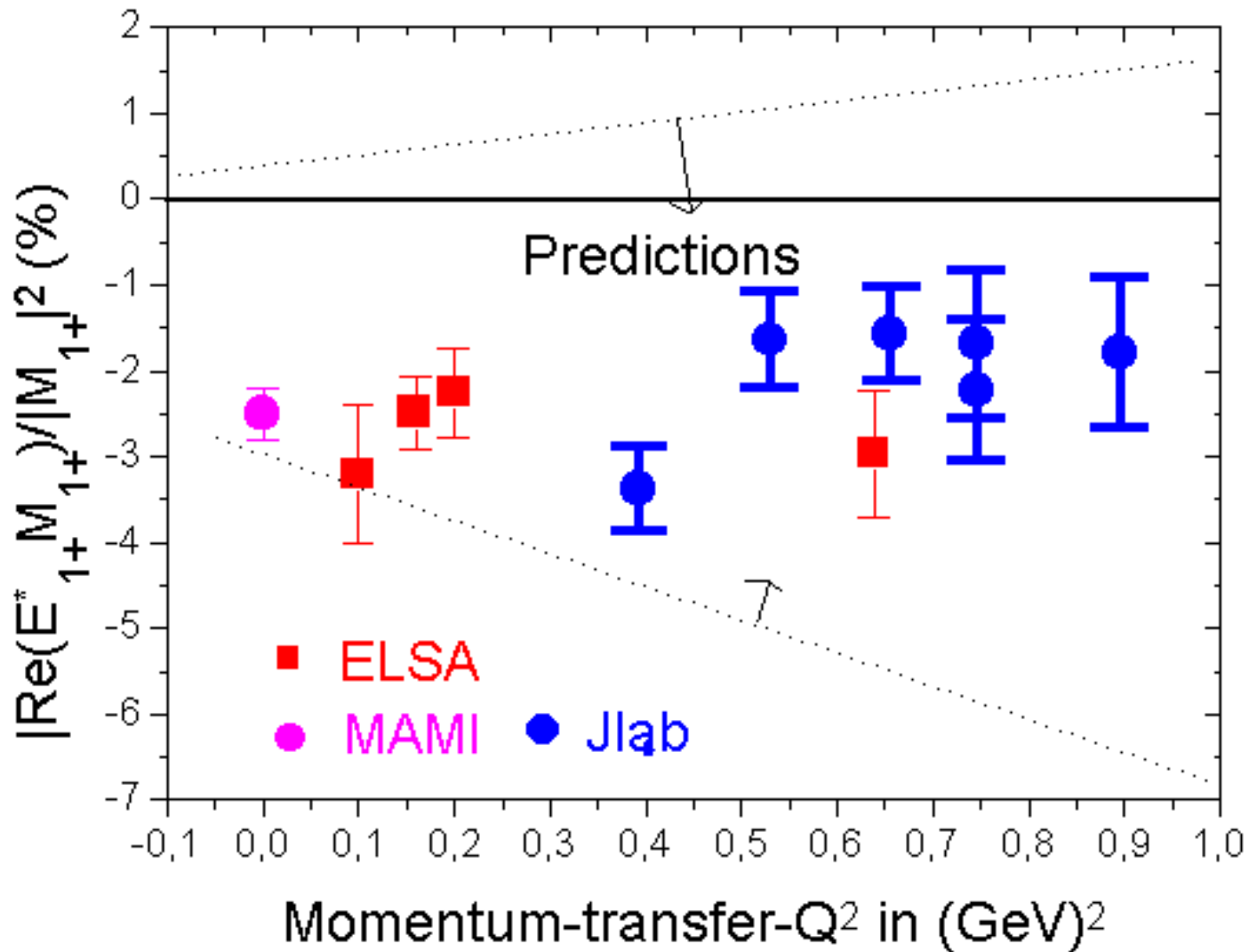
Magnetische Dipolamplitude





# Elektrische Quadrupolamplitude

## Magnetische Dipolamplitude

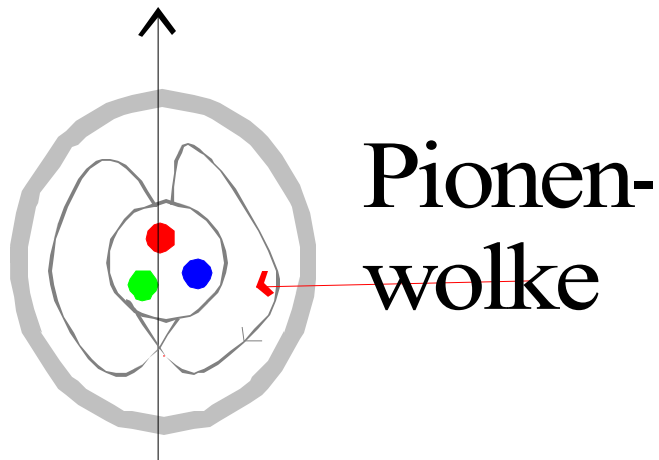


# Mögliche Interpretation der Daten:

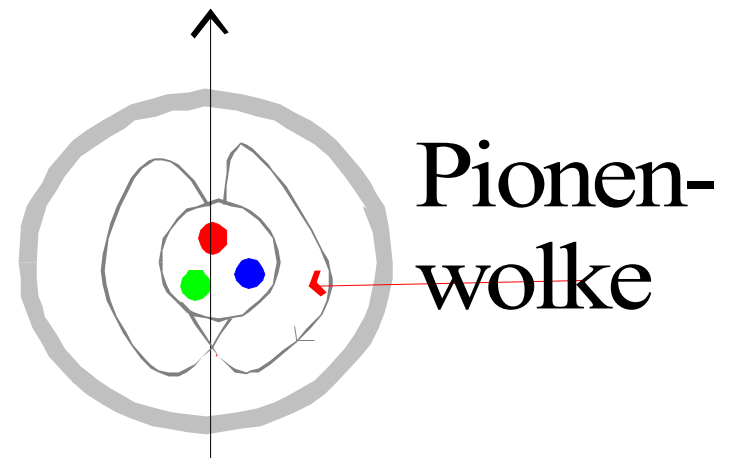
...Abweichung der sphärischen Symmetrie bei der Ladungsverteilung des Protons und des  $\Delta$ 's ...

Aber modellabhängige

(Quarkmodell, Skyrmemodell, Pionwolkenmodell ) Aussagen:z.B.:



Ladungsverteilung:  
Verteilung beim Proton  
Prolat!

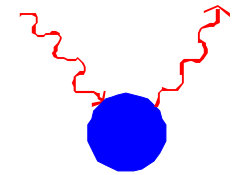


$\Delta$ : oblat

# 4. Überprüfung einer Beziehung, die eine statische Größe des Protons mit seinem Anregungsspektrum herstellt

## Die experimentelle Bestimmung der GDH-Summenregel

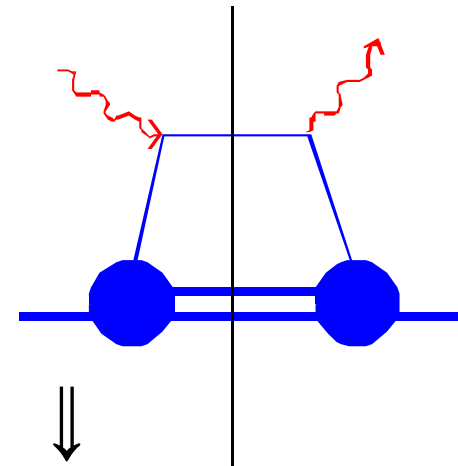
Zusammenhang: Elastische  
Photonenstreuung zum totalen  
Wirkungsquerschnitt



N

Photonenstreuung:

Elastische Streuung



$\sigma(\text{total})$

Streuamplitude:

$$T(\omega, \theta = 0) = \hat{\varepsilon}'^* \cdot \hat{\varepsilon} f(\omega) + i(\hat{\varepsilon}'^* \times \hat{\varepsilon}) \cdot \vec{\sigma} g(\omega)$$

$$4\pi f(\omega) = -\frac{e^2}{m} + 4\pi(\alpha + \beta) \frac{\omega^2}{(2\pi)^2} + [\omega^4] \quad \varepsilon: \gamma\text{-Polarisation}$$

$$4\pi g(\omega) = -\frac{e^2 \kappa^2}{m^2} \pi \cdot \omega + \frac{2\gamma^3 \omega^3}{(2\pi)^2} + [\omega^5]$$

$\alpha$ : elektrische-,  $\beta$ :magnetische-,  $\gamma$ : Spin-Polarisierbarkeit

Optisches Theorem + ..  $\Rightarrow$  **GDH**

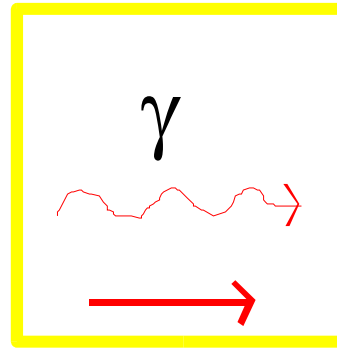
**Summenregel**

$$\kappa^2 = \frac{2m^2}{\pi e^2} \int_{\omega_0}^{\infty} \frac{\sigma_{3/2} - \sigma_{1/2}}{\omega} d\omega$$

Meß-  
größen

Experiment:

Doppelpolarisation

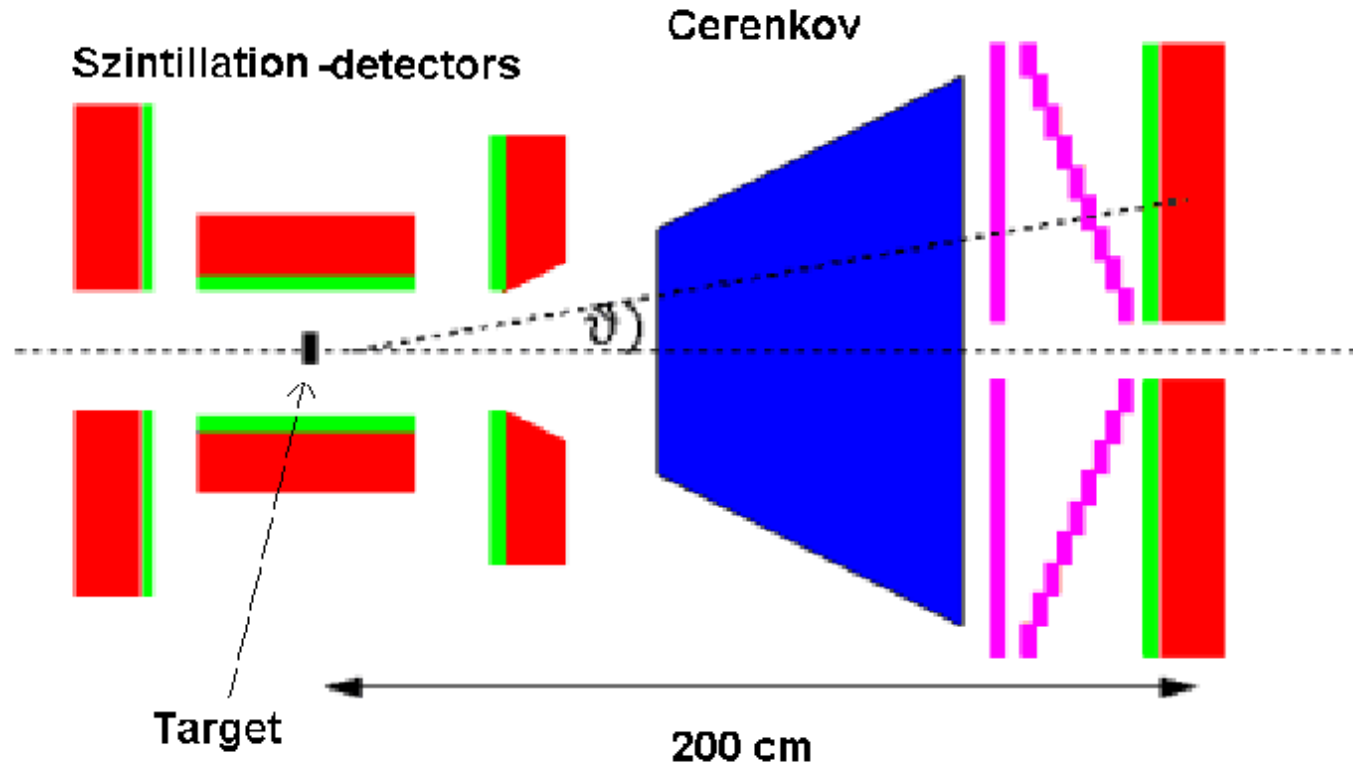


Spin:

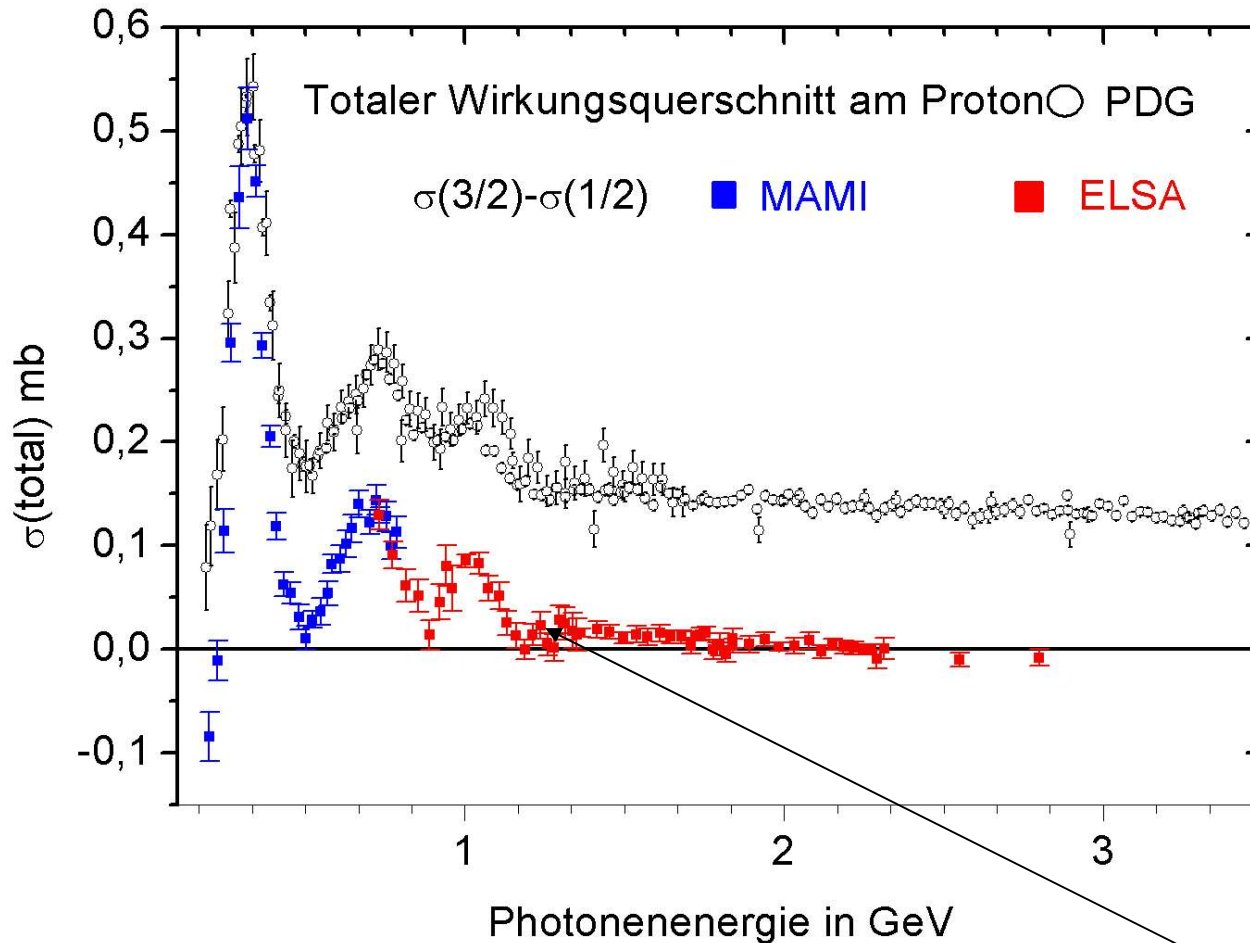
- → 3/2
- ← 1/2

Detektor:  
4 $\pi$ -Akzeptanz

GDH-  
Kollaboration



# Resultat der Messungen:



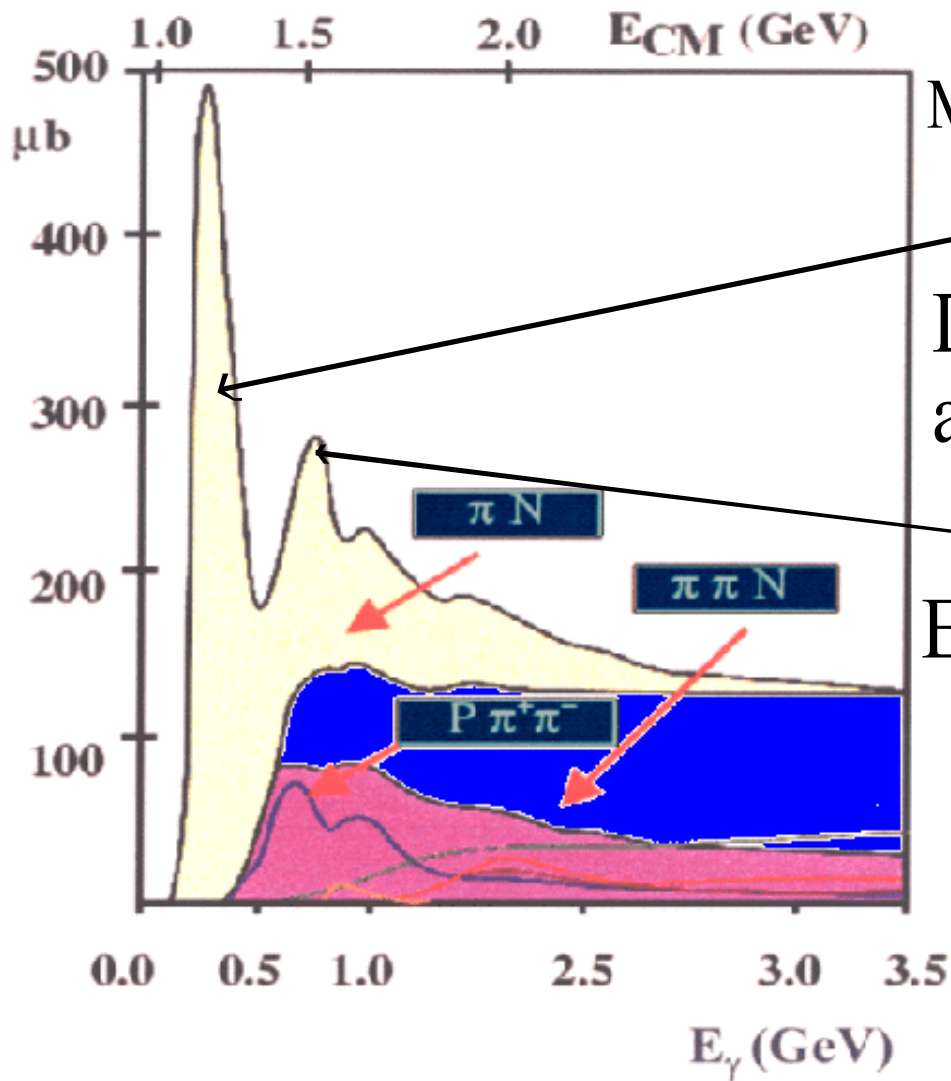
Weitere  
Daten:  
Neutron!

Zu verstehen:  
Stärkeverteilung

Integral innerhalb von  
10% betätigt!

$$\kappa^2 = \frac{2m^2}{\pi e^2} \int_{\omega_0}^{\infty} \frac{\sigma_{3/2} - \sigma_{1/2}}{\omega} d\omega$$

# 5. Neue Möglichkeiten der Spektroskopie des Anregungsspektrums des Nukleons



Identifikation und Vermessung der Anregungszustände

Magnetisch

Dipol-anregung

Elektrisch

Lage, Breite, Quantenzahlen, Zerfallskanäle, Stärke der Anregung

**Erfordert:** Partialwellenanalyse

Experiment: **Polarisierter Strahl** (linear und zirkular) +

**Target** (longitudinal + transversal)

**Detektor mit großen Akzeptanzen** in Winkel und Impuls:

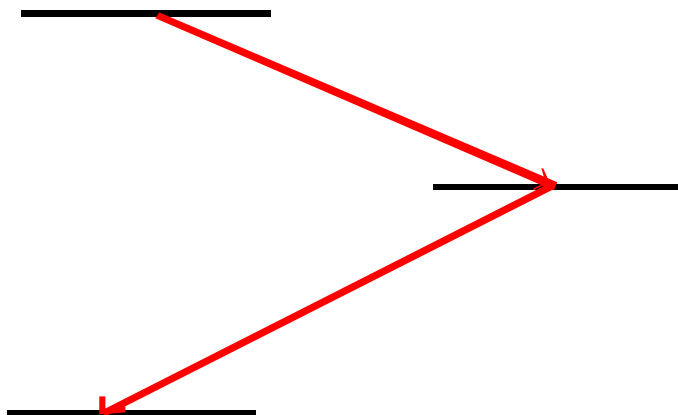
Bonn: Crystal barrel + geeigneter Vorwärtsdetektor, z.Zt.: **TAPS**

⇒⇒ Schwergewicht auf den Nachweis von Vielphotonenzuständen

z.B.: **Nachweiseffizienz** :

$$\eta \rightarrow 2\gamma \approx 70\% \text{ und } \eta \rightarrow 3\pi^0 \approx 36\%$$

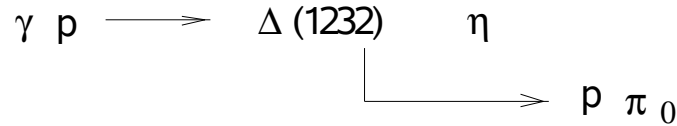
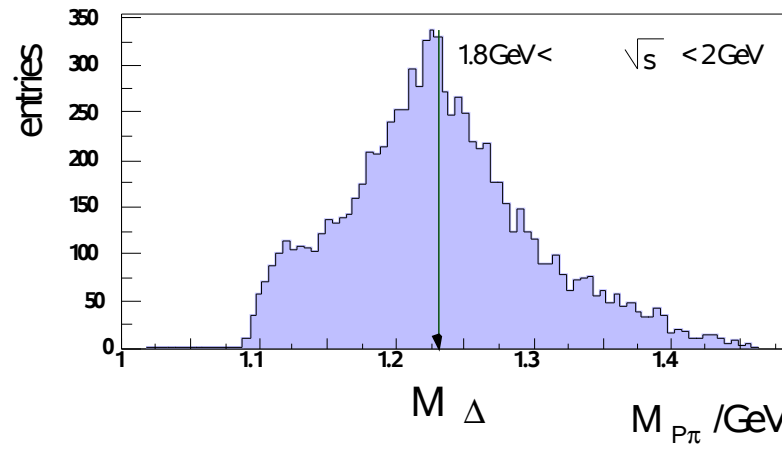
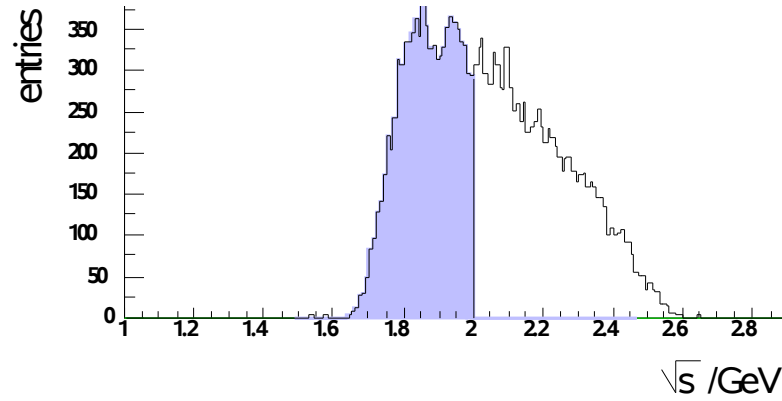
Mit der Auswahl neutraler Kanäle und Zerfälle in Kaskaden,  
werden gezielt Resonanzanregungen untersucht!



$$\gamma + p \Rightarrow p + \eta + \pi^0$$



# Erste Signaturen (M. Ostrick)



# 6. Zusammenfassung

## **1. Der elektrische Formfaktor des Protons:**

Die räumliche Verteilung der elektrischen Ladung ist verschieden zur magnetischen Stromverteilung

## **2. Ergebnisse, die auf eine Abweichung einer sphärischen Ladungsverteilung beim Proton bzw. $\Delta$ hinweisen:**

Die Ladungsverteilung des Protons/ $\Delta$  ist nicht sphärisch

## **3. Überprüfung einer Beziehung, die eine statische Größe des Protons**

### **mit seinem Anregungsspektrum herstellt:**

Die GDH-Summenregel für das Proton ist in den Grenzen des Experiments bestätigt! Wie verstehen wir die Stärkeverteilung?

## **4. Neue Möglichkeiten der Spektroskopie des Anregungsspektrums des Nukleons:** Eine neue Generation von Experimenten wird die Daten liefern, die einen großen Schritt zum Verständnis der Nukleonstruktur erlauben