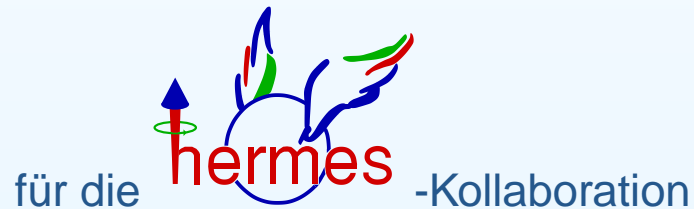


# *Transversale Spinphänomene und ausgewählte HERMES Ergebnisse*

Markus Diefenthaler



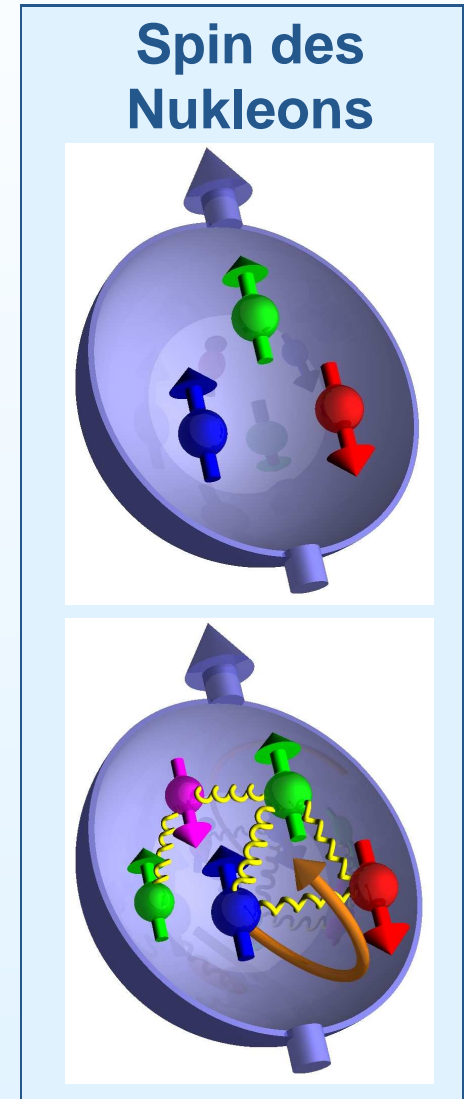
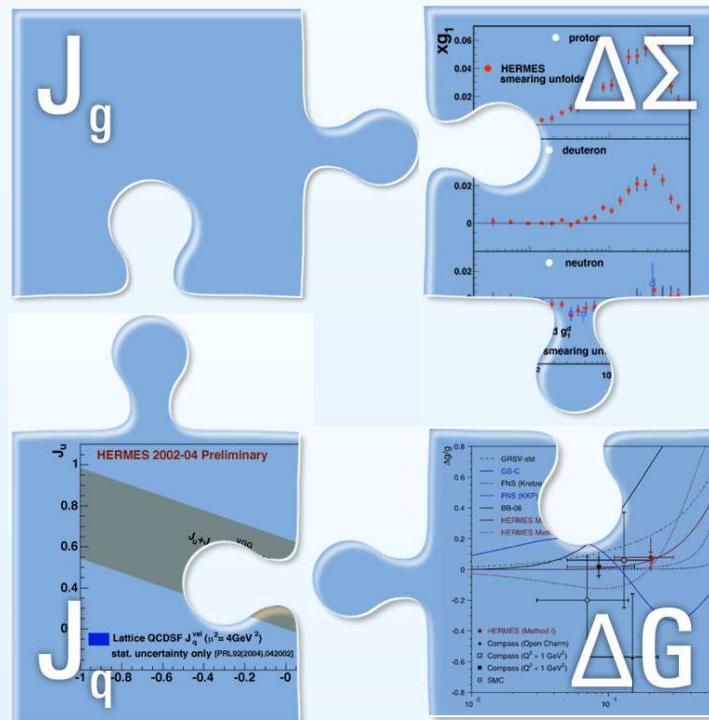
Physikalisches Institut II, FAU Erlangen-Nürnberg

# Die Spinstruktur des Nukleons:

Zusammensetzung des Nukleonenspin  $s_z^N$ :

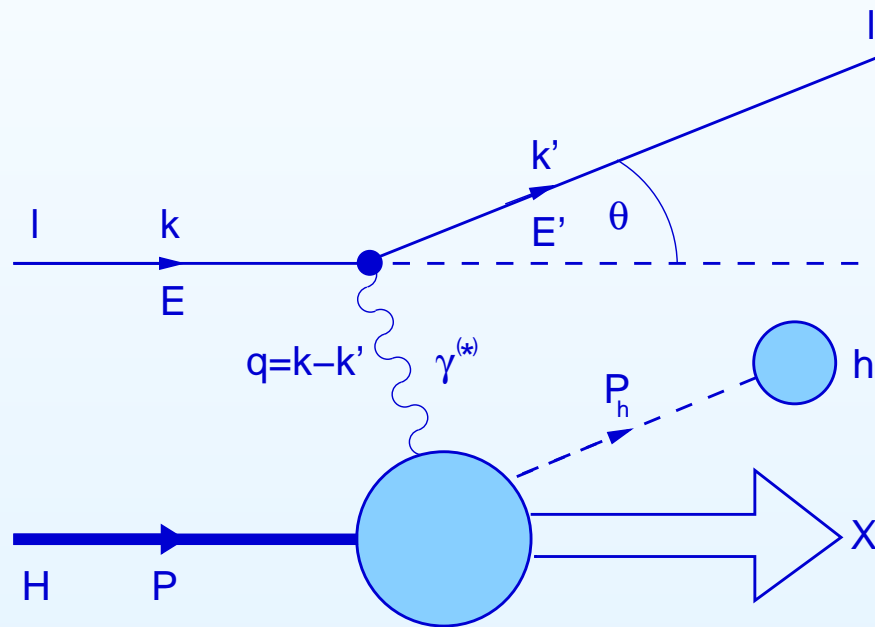
$$\frac{s_z^N}{\hbar} = \frac{1}{2} = J_q + J_g = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + L_z^q + \Delta G + L_z^g$$

Beitrag der HERMES Kollaboration:



# Die tiefinelastische Streuung (DIS):

DIS ist der fundamentale elektroschwache Prozeß, um die Struktur des Nukleons zu untersuchen (transversale Ortsauflösung  $\sim \hbar/\sqrt{Q^2}$ ):



## Lorentz-invariante Kinematik:

$$Q^2 = -q^2 = 4EE' \sin^2 \left( \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\nu = \frac{Pq}{M} = E - E'$$

$$x = \frac{2Pq}{Q^2} = \frac{Q^2}{2M\nu}$$

$$z = \frac{PP_h}{Pq} = \frac{E_h}{\nu}$$

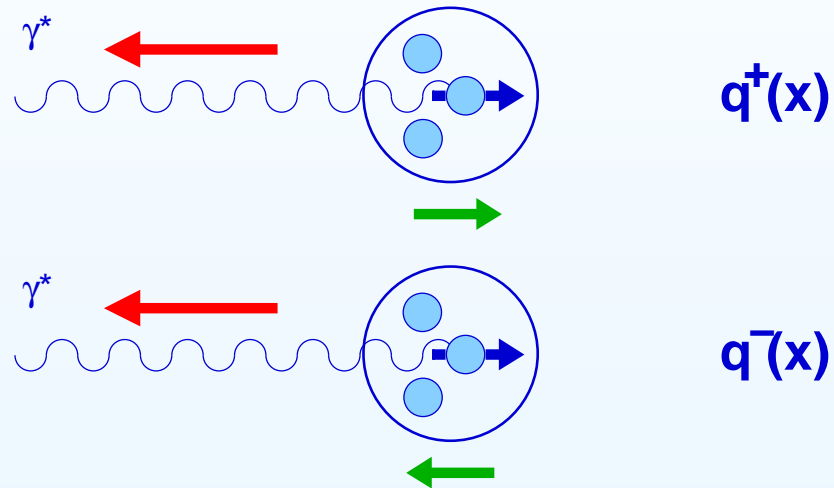
**inklusive Messung:**  $lH \rightarrow l'X$

**semi-inklusive Messung:**  $lH \rightarrow l'h_1 \dots h_n X$

**exklusive Messung:**  $lH \rightarrow l'h_1 \dots h_n H'$

# Polarisierte Streuexperimente:

- Experimente, in denen spin-polarisierte Leptonen an spin-polarisierten Hadronen streuen:

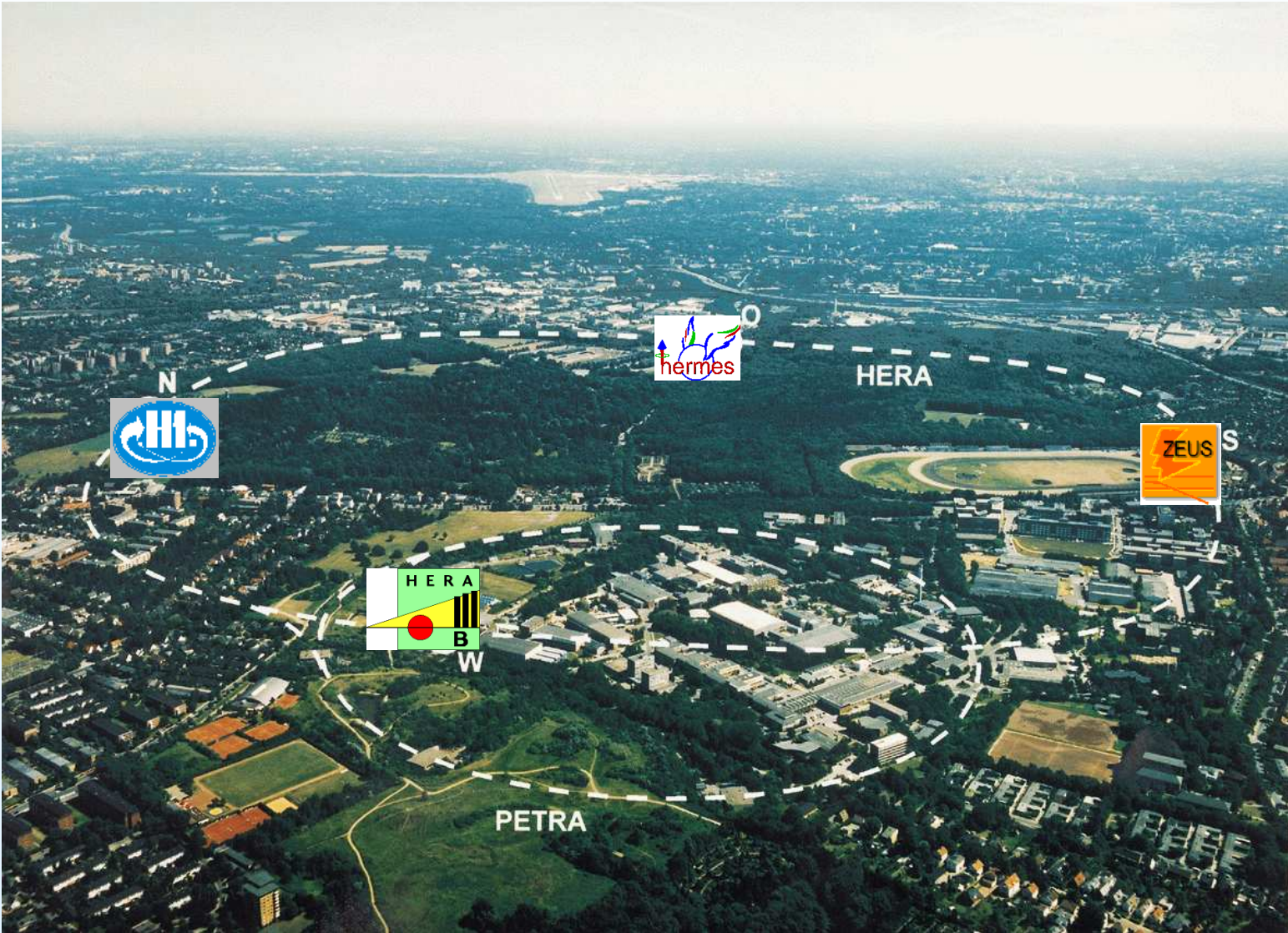


Helizitätserhaltung: Photon wechselwirkt nur mit Quarks mit entgegengesetztem Spin

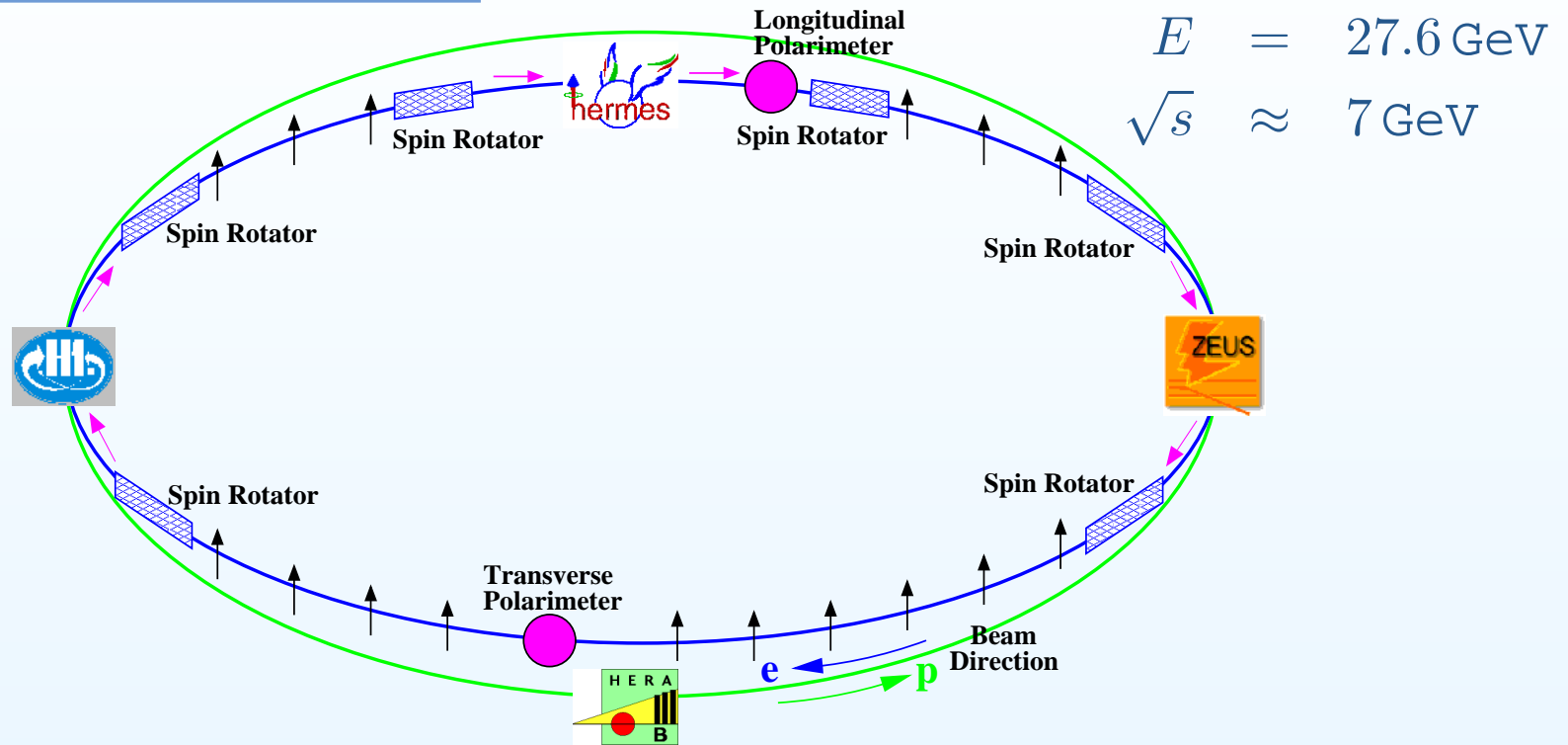
- Bestimmung von Wirkungsquerschnittsasymmetrien:

$$A_{\parallel} = \frac{\sigma_{\leftarrow\leftarrow}^{\rightarrow} - \sigma_{\rightarrow\rightarrow}^{\rightarrow}}{\sigma_{\leftarrow\leftarrow}^{\rightarrow} + \sigma_{\rightarrow\rightarrow}^{\rightarrow}}$$

# Das HERMES Experiment:



# Das HERMES Experiment:

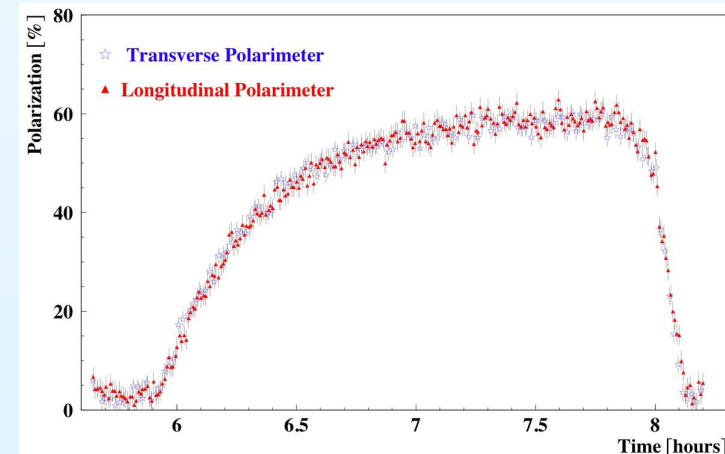


## Sokolov-Ternov Mechanismus:

⇒ transversale Strahlpolarisation

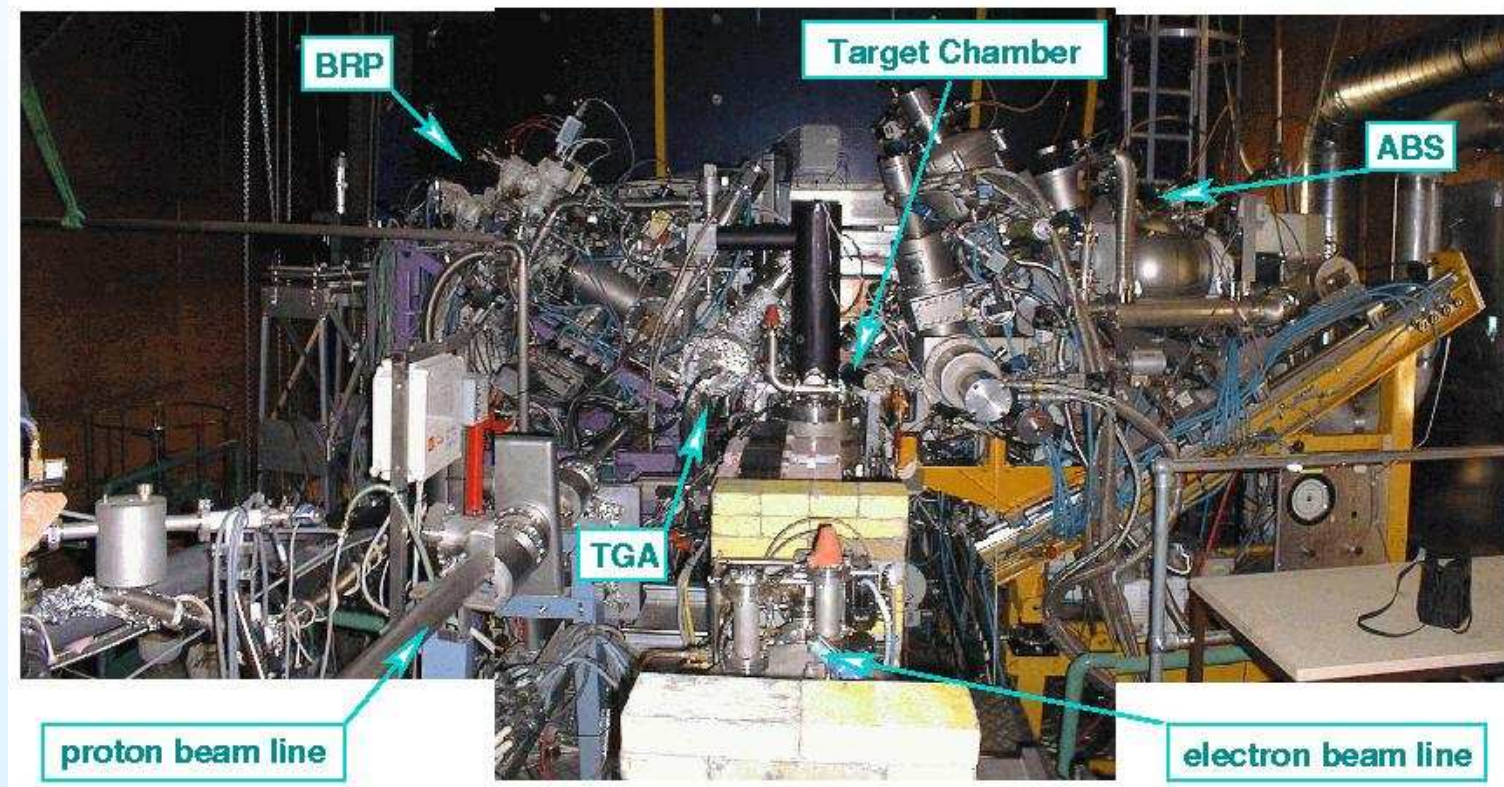
## Spinrotatoren:

⇒ longitudinale Strahlpolarisation

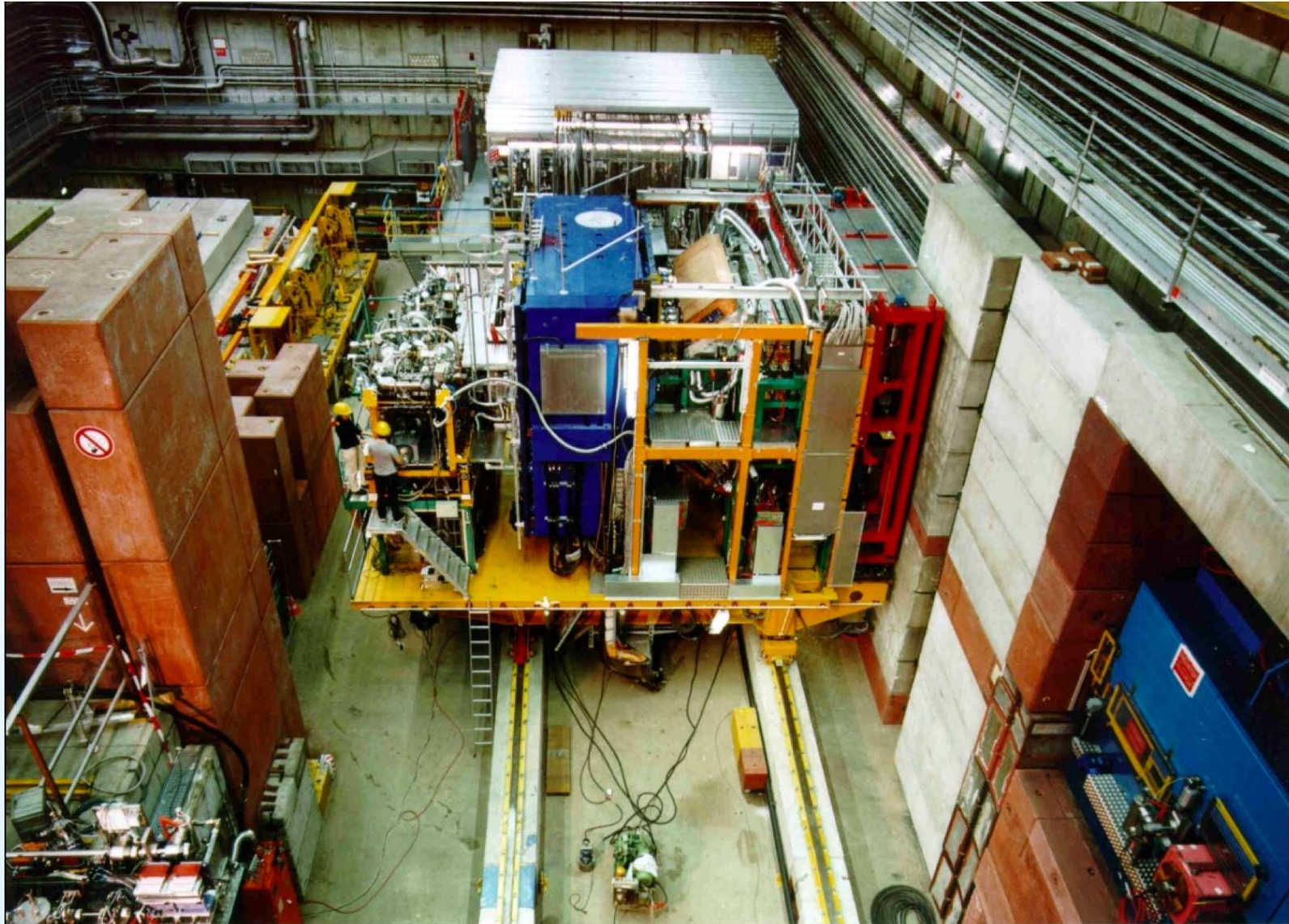


## Das (longitudinal oder transversal) polarisierte Target:

- Polarisiertes **Gas-Target** (H,D,He) im Inneren des Speicherrings,
- Mehrfachstreuung und Verdünnung der Polarisation durch unpolarisiertes Trägermaterial unterbunden
- hoher Polarisationsgrad ( $\langle P_z \rangle \approx 80\%$ )

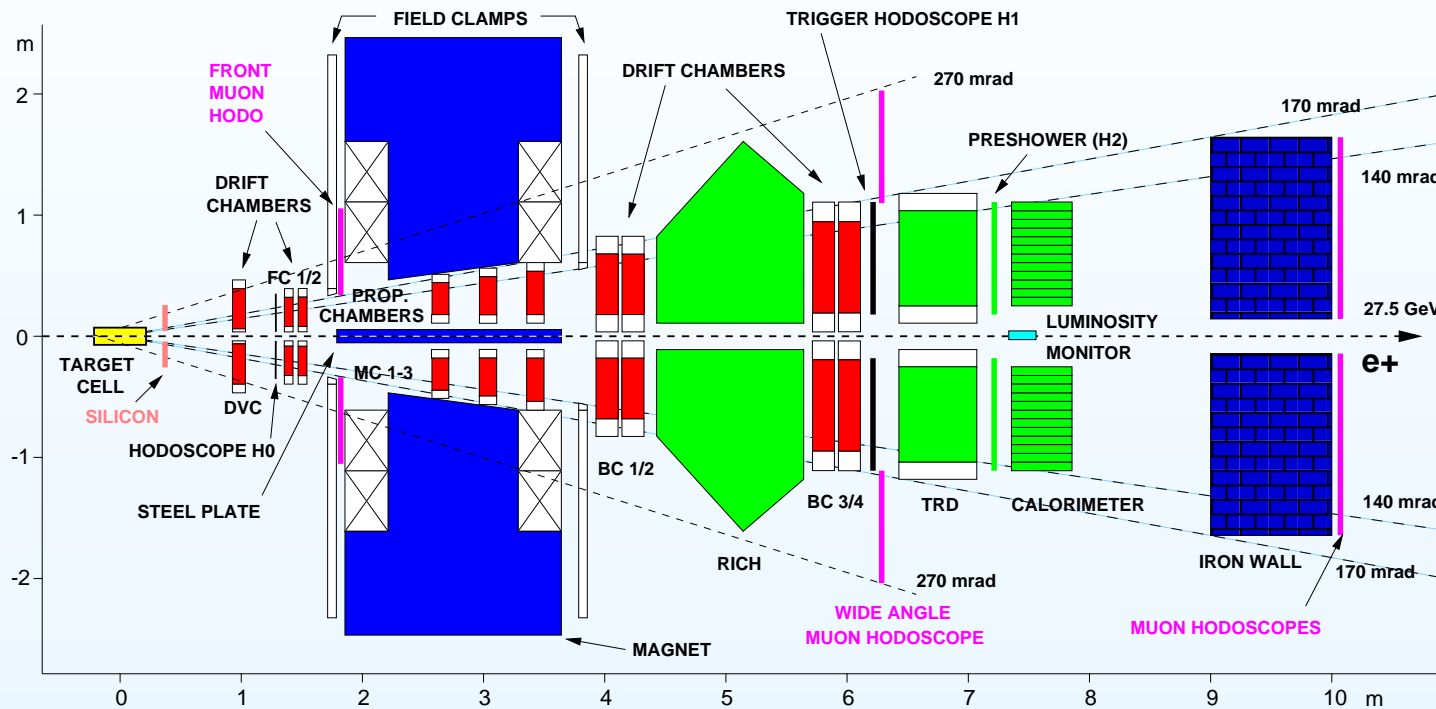


# Das Vorwärtsspektrometer:



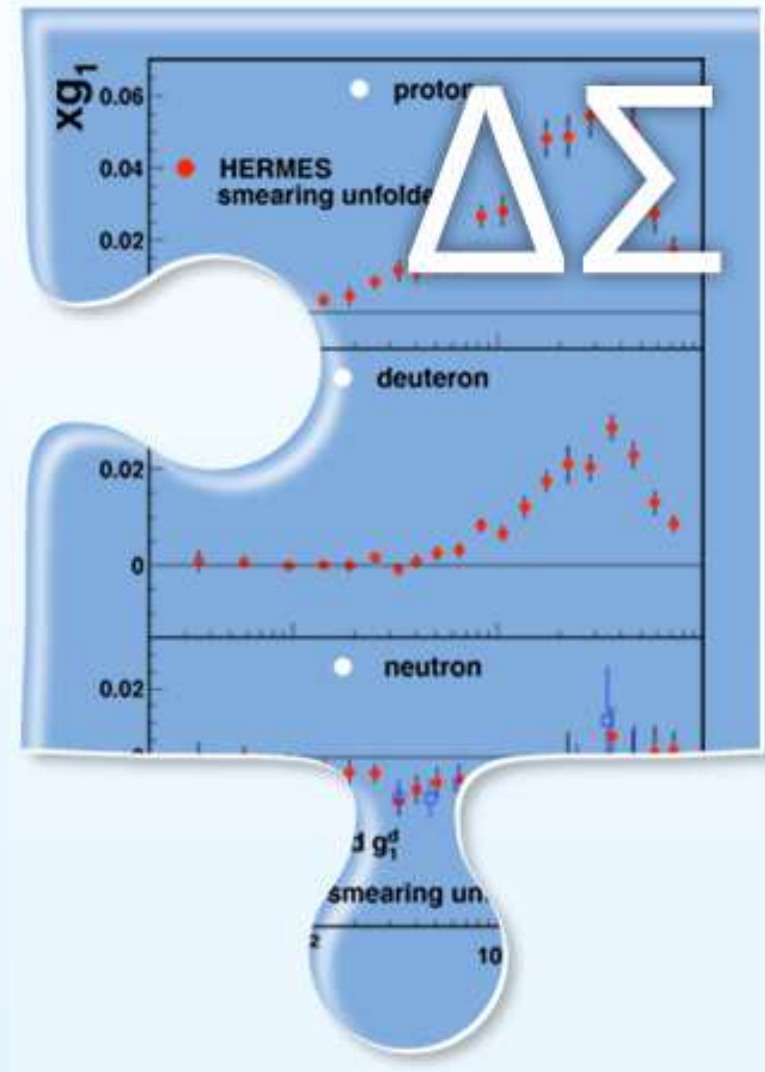


# Das Vorwärtsspektrometer:



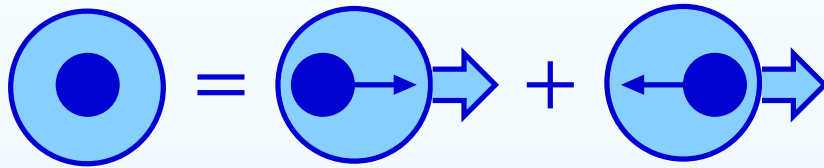
- große Impuls- und Winkelakzeptanz:  $\theta_{\text{hor.}} \leq 175 \text{ mrad}$ ,  
 $40 \text{ mrad} \leq \theta_{\text{vert.}} \leq 140 \text{ mrad}$
- präzise Impulsbestimmung:  $\Delta p/p = 0,7 - 1,3\%$
- und Winkelauflösung:  $\Delta\theta \leq 0,6 \text{ mrad}$
- zuverlässige Unterscheidung von Leptonen und Hadronen

# Der Helizitätsbeitrag der Quarks:



# Strukturfunktionen:

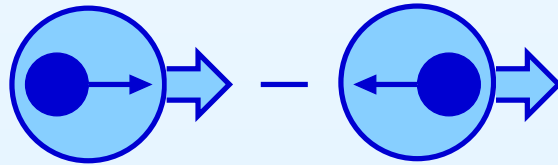
**Impulsverteilung  $q(x)$  :**  
mißt Mittelwert des Spin



$$q(x) = q^+(x) + q^-(x)$$

$$F_1(x) = \frac{1}{2} \sum e_q^2 (q(x) + \bar{q}(x))$$

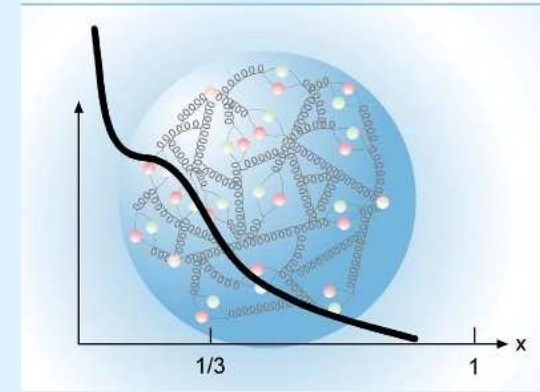
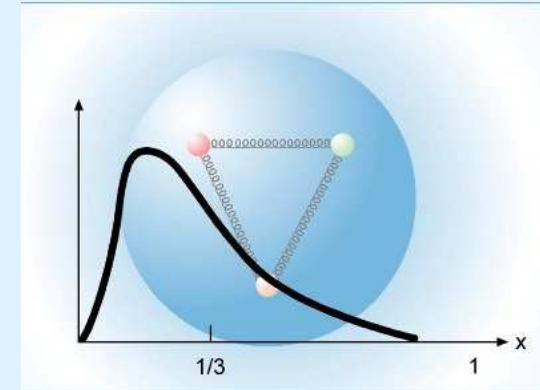
**Helizitätsverteilung  $\Delta q(x)$  :**  
mißt Helizitätsunterschied



$$\Delta q(x) = q^+(x) - q^-(x)$$

$$g_1(x) = \frac{1}{2} \sum e_q^2 (\Delta q(x) + \Delta \bar{q}(x))$$

**$F_1(x)$  :**



# Extraktion der Spinstrukturfunktion:

- **Messung von  $A_{\parallel}$ :**

$$A_{\parallel} = \frac{1}{P_{\text{Strahl}} P_{\text{Target}}} \frac{N^{\leftarrow\rightarrow} - N^{\rightarrow\leftarrow}}{N^{\leftarrow\leftarrow} + N^{\rightarrow\rightarrow}}$$

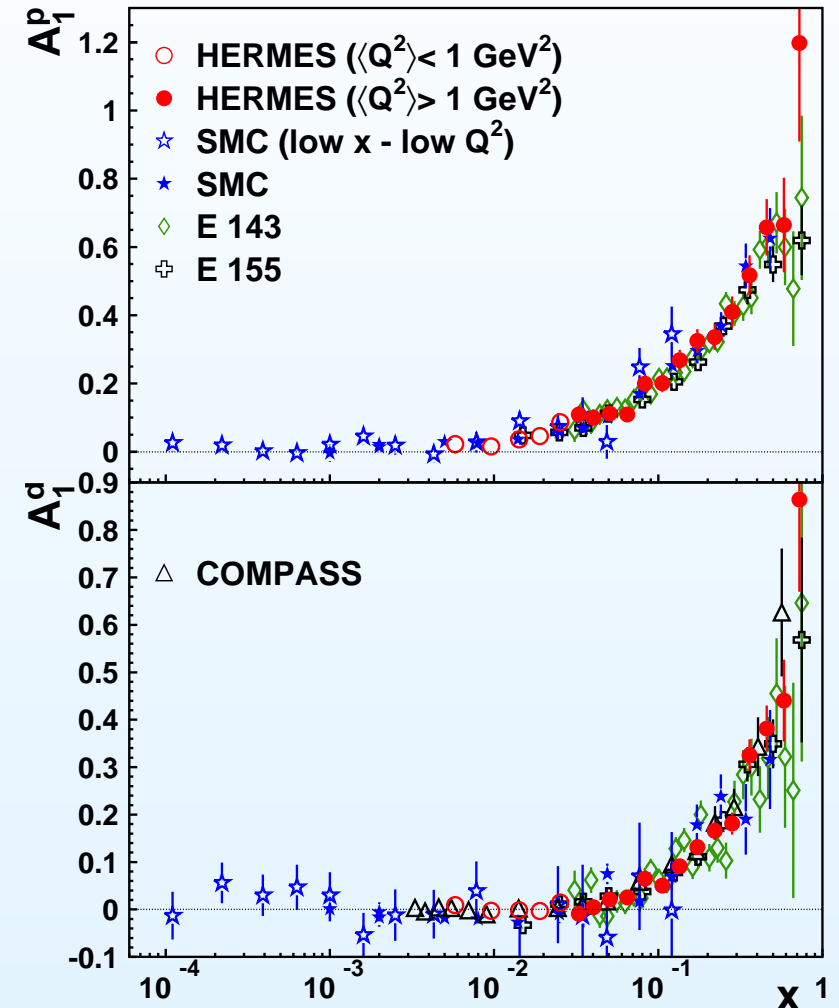
$$A_1 \simeq \frac{A_{\parallel}}{D}, \quad D = \frac{P_{\gamma^*}}{P_{\text{Strahl}}}$$

- **Bestimmung von  $g_1$ :**

$$g_1 \simeq F_1 A_1$$

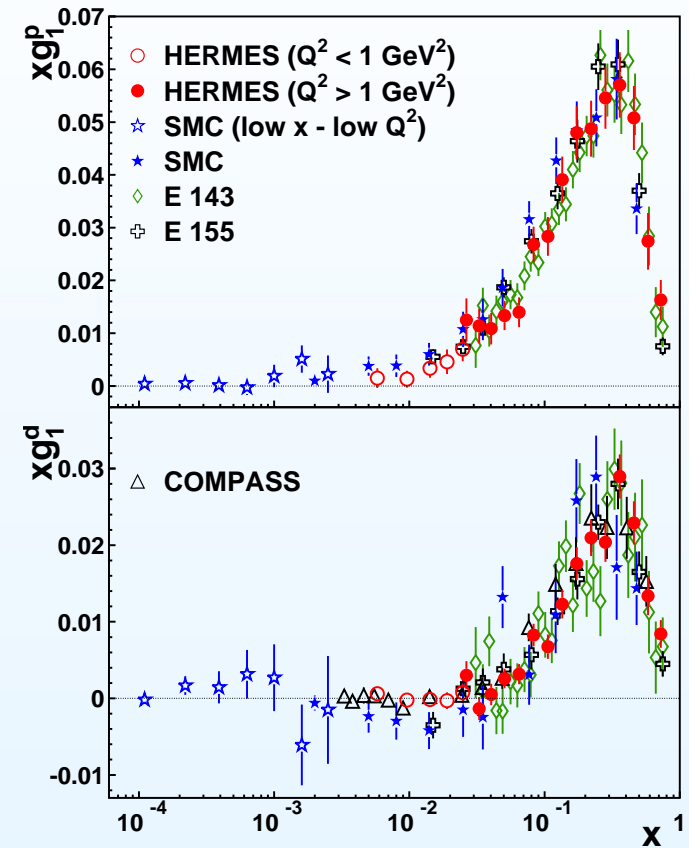
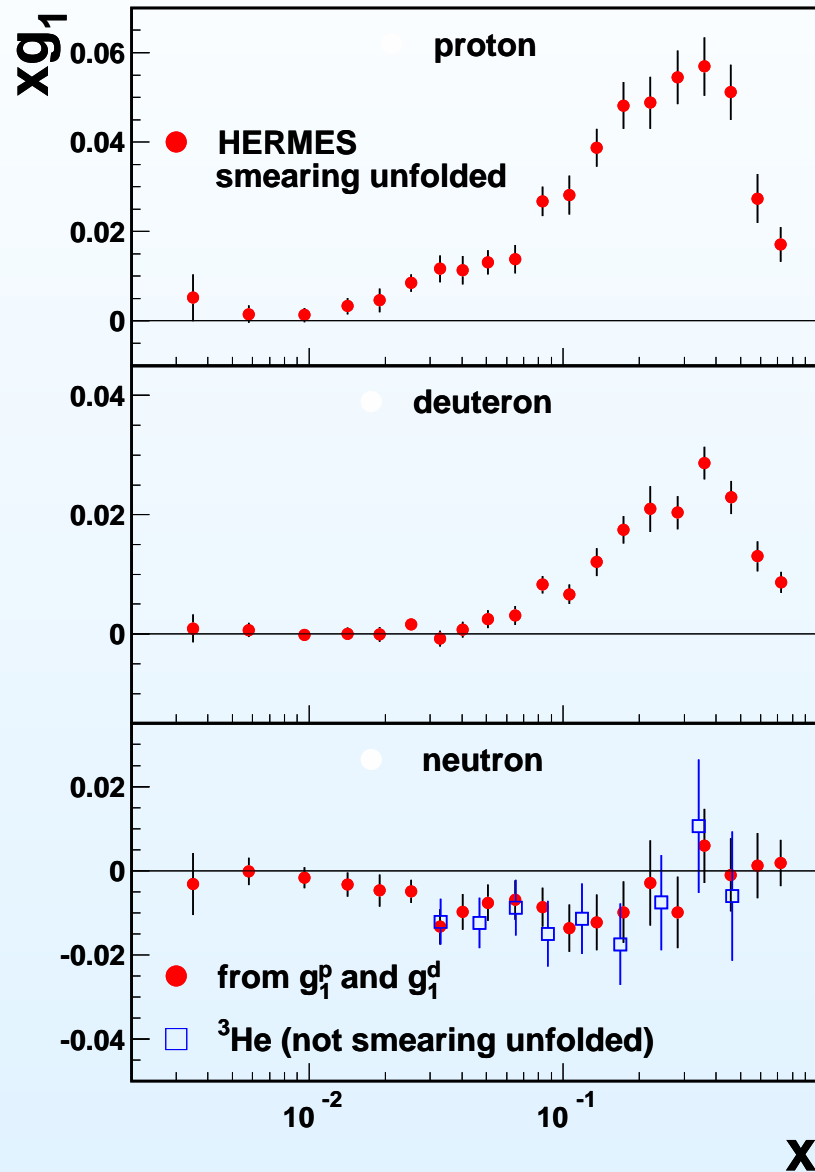
$$g_1^n = \frac{2g_1^d}{1 - \frac{3}{2}w_D} - g_1^p$$

Phys. Rev. D 75 (2007) 012007



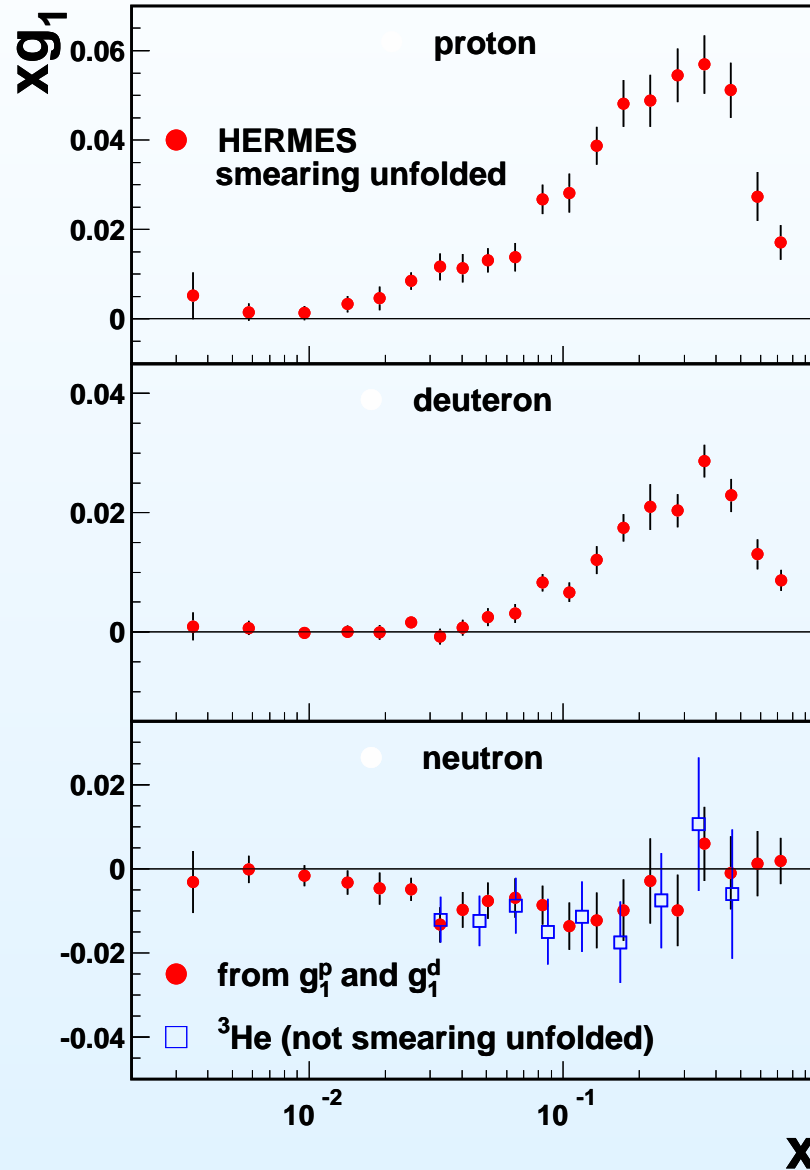
# Die HERMES Messung von $xg_1$ :

Phys. Rev. D 75 (2007) 012007



# Die HERMES Messung von $xg_1$ :

Phys. Rev. D 75 (2007) 012007



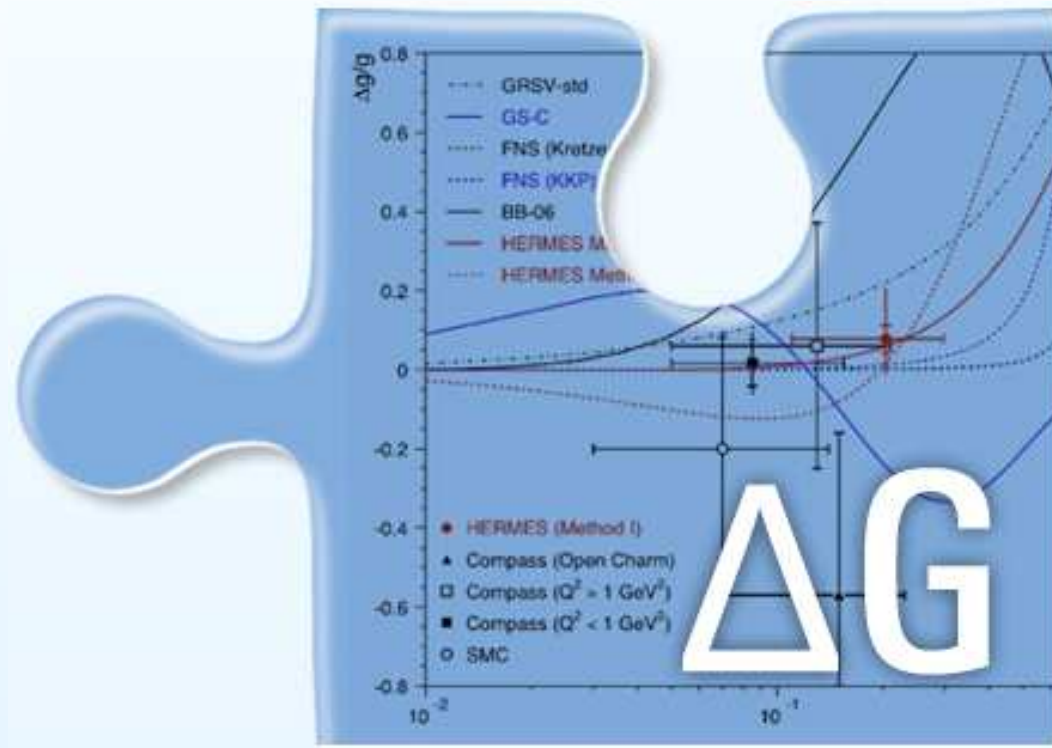
## Bestimmung von $\Delta\Sigma$ :

- **HERMES:**  $0.352 \pm 0.025$   
(aus Deuterondaten,  $\overline{\text{MS}}$ -Schema, NNLO-Analyse)
- EMC (1988):  $0.12 \pm 0.14$   
(aus Protondaten)
- COMPASS:  $0.33 \pm 0.06$   
(aus Deuterondaten, NLO-QCD Fit)

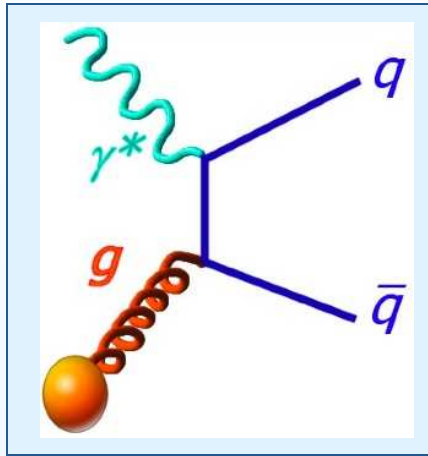
Rückschlüsse auf  $\Delta u$  und  $\Delta d$  (im Valenzquarkbereich) durch Isospinsymmetrie:

- $\Delta u^p (= \Delta d^n)$  dominiert und ist positiv.
- $\Delta d^p (= \Delta u^n)$  ist signifikant kleiner und negativ.

# Die Gluonpolarisation:

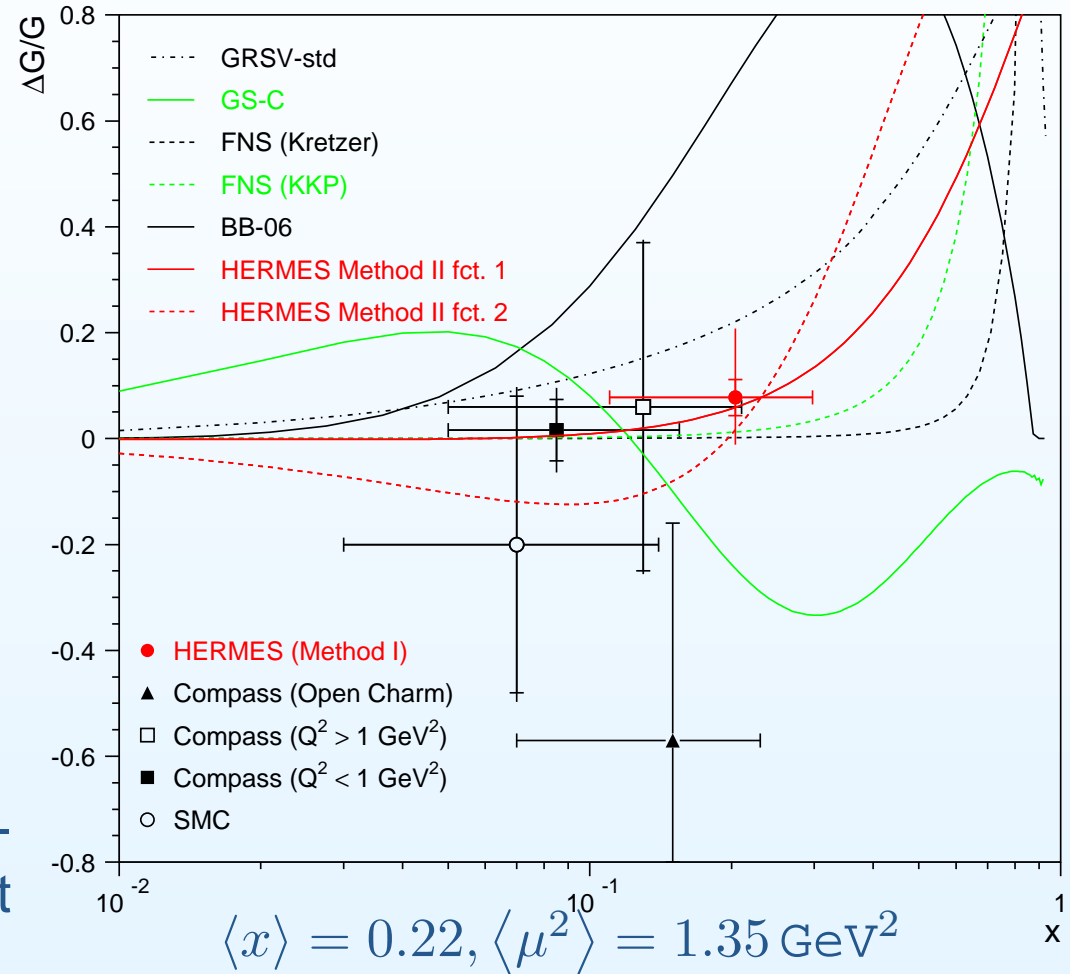


# Die Gluonpolarisation:



- Untersuchung von Ereignissen einzelner Hadronen mit hohem Transveralimpuls
- Bestimmung der Konkurrenzereignisse mit PYTHIA Monte Carlo

Kon-  
mit



$$\frac{\Delta G}{G}(x, \mu^2) = 0.071 \pm 0.034^{(\text{stat})} \pm 0.010^{(\text{sys-exp})} \begin{matrix} +0.127 \\ -0.105 \end{matrix}^{(\text{sys-models})}$$



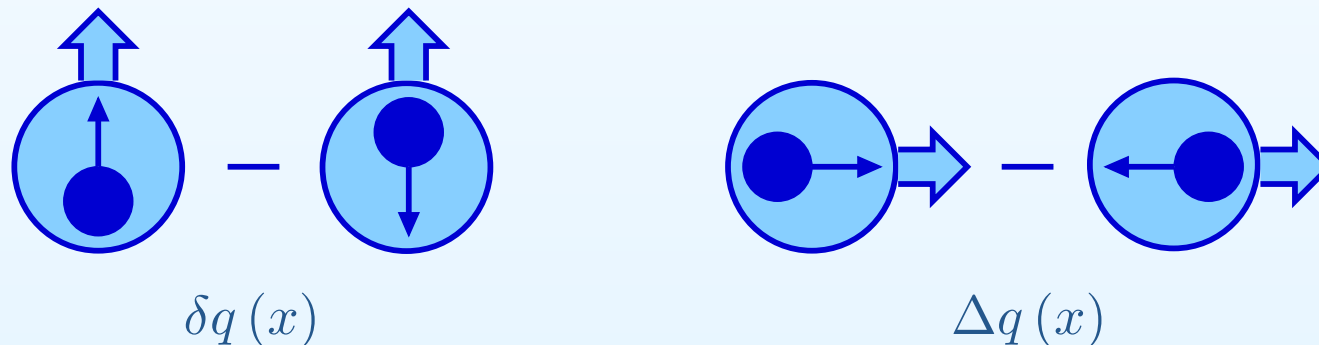
## Transversale Spinphänomene:



(mit freundlicher Genehmigung von Alessandro Bacchetta (DESY-Theoriegruppe))

## Die Transversity-Verteilung $\delta q$ :

- vollständige Beschreibung von Impuls und Spin der Quarks im Inneren des Nukleons in Verbindung mit  $q(x)$  und  $\Delta q(x)$  (im führenden Twist)
- experimentell unbestimmt
- **Helizitätsumkehr:**  $N^{\uparrow}q^{\downarrow} \rightarrow N^{\downarrow}q^{\uparrow}$
- **Wahrscheinlichkeitsinterpretation:**

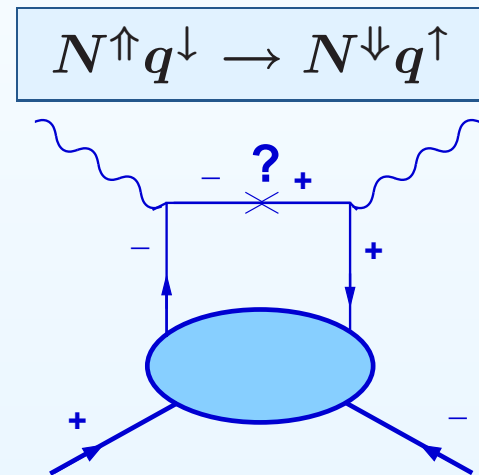


- für nicht-relativistische Quarks:  $\delta q(x) = \Delta q(x)$ ,
- aber Quarks im Inneren des Nukleons sind relativistisch
- keine Transversity-Verteilung der Gluonen im Nukleon

# Messung der Transversity-Verteilung:

- **Chiralitätseigenschaften:**

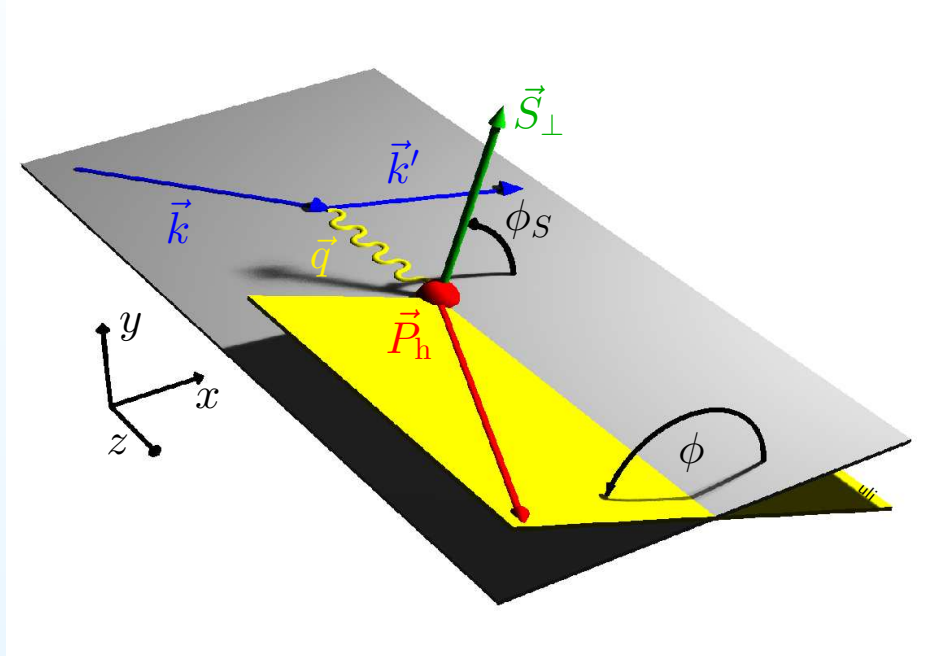
- Transversity-Verteilung mißt Helizitätsumkehr
- chiral ungerade Quarkverteilungsfunktion:



- nicht meßbar in inklusiver DIS
- meßbar in Verbindung mit chiral-ungeraden Partner
- **Messung bei HERMES:** semi-inklusive Messung an einem transversal polarisierten Wasserstoff-Target (Deuterium-Target bei COMPASS)

# Azimutale Einzel-Spin-Asymmetrien:

- **Kinematik an einem transversal polarisierten Target:**



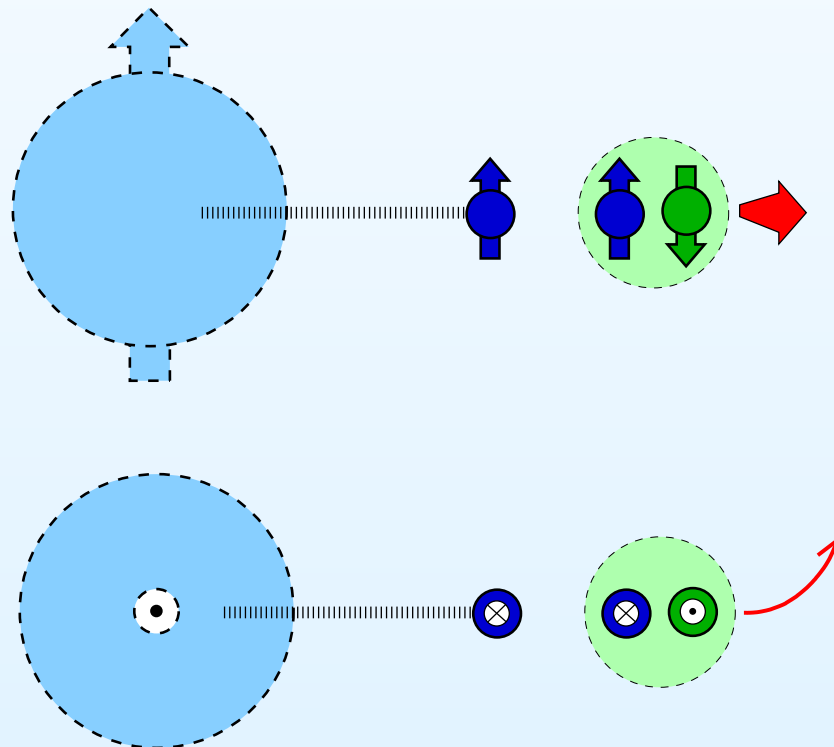
- **Azimutale Einzel-Spin-Asymmetrie (SSA):**
  - azimutale Asymmetrie in der Impulsverteilung der erzeugten Hadronen in transversaler Richtung zum Nukleonspin
  - nichtverschwindender transversaler Hadronimpuls  $P_{h\perp}$  bedingt durch intrinsische transversale Impulse  $p_{\perp}$  und  $k_{\perp}$



**Collins- und Siversmechanismus**

## Der Collins-Mechanismus:

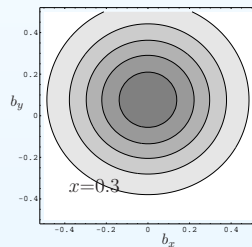
- **Collins-Fragmentationsfunktion**  $H_1^{\perp q}$
- chiral-ungerader Partner für die Transversity-Verteilung
- Korrelation zwischen der transversalen Polarisation des fragmentierenden Quarks und des transversalen Impulses  $P_{h\perp}$  des entstandenen Hadrons



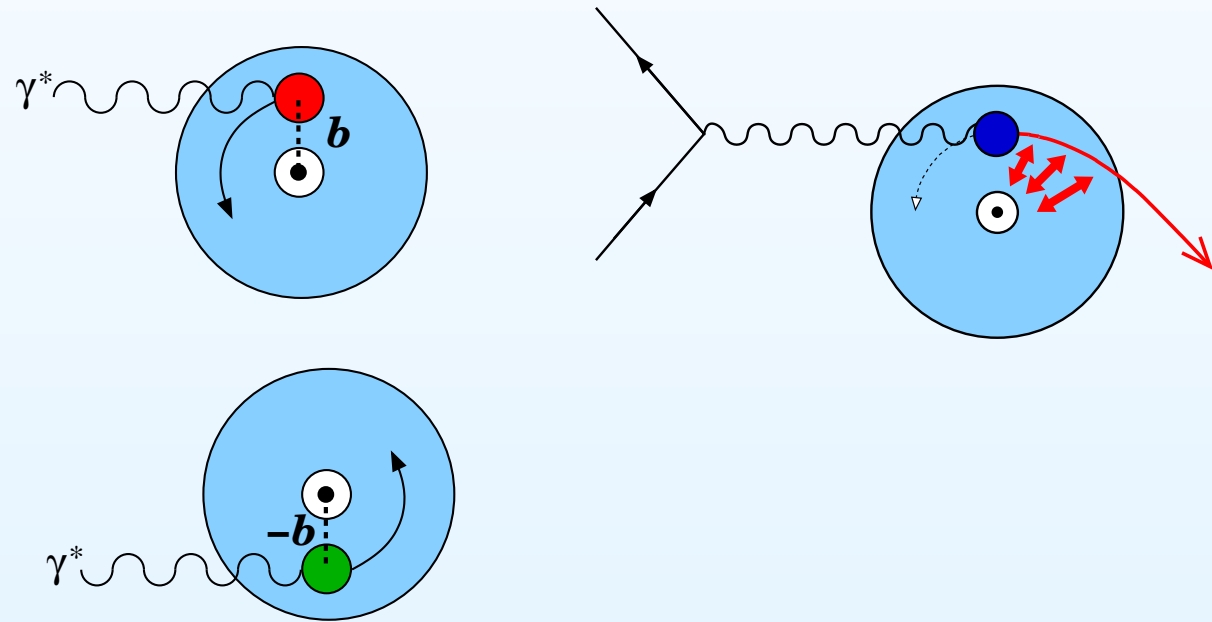
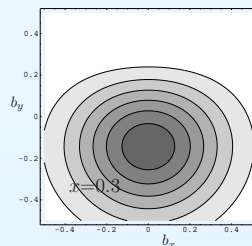
# Der Sivers-Mechanismus:

- nicht verschwindende **Siversverteilung**  $f_{1T}^\perp$  involviert nicht verschwindende Streuamplitude der Form  $N^{\uparrow} q^\uparrow \rightarrow N^{\downarrow} q^\uparrow$
- **Bahndrehimpuls der Quarks:** unterschiedliches  $x$  für unterschiedlichen Modellparameter  $b_\perp$

$$u_X(x, \mathbf{b}_\perp)$$



$$d_X(x, \mathbf{b}_\perp)$$



- **Wechselwirkung im Endzustand:**

Links-Rechts-Asymmetrie einer Verteilungsfunktion

⇒ Links-Rechts-Asymmetrie der Impulsverteilung

## Die Collins- and Siversamplituden:

Einzel-Spin-Asymmetrie  $A_{UT}^h$  für den Hadrontyp  $h$ , unpolarisierten Leptonenstrahl (U) und transversal polarisiertes Target (T):

$$\begin{aligned}
 A_{UT}^h &= \frac{\sigma^{\uparrow\downarrow} - \sigma^{\uparrow\uparrow}}{\sigma^{\uparrow\downarrow} + \sigma^{\uparrow\uparrow}} \\
 &\approx 2 |S_T| \frac{\sin(\phi + \phi_S)}{\sum_q e_q^2 q(x) D_1^q(z)} \frac{\sum_q e_q^2 \delta q(x) H_1^{\perp q}(z)}{\sum_q e_q^2 q(x) D_1^q(z)} \\
 &\quad \text{unterscheidbare} \\
 &\quad \text{Collinsamplitude} \\
 &= 2 |S_T| \frac{\text{Signatur} \downarrow \sin(\phi - \phi_S)}{\sum_q e_q^2 q(x) D_1^q(z)} \frac{\sum_q e_q^2 f_{1T}^{\perp q}(x) D_1^q(z)}{\sum_q e_q^2 q(x) D_1^q(z)} \\
 &\quad \text{Siversamplitude}
 \end{aligned}$$

# Die Extraktion der Collins- und Siversamplituden:

- Messung von Asymmetrien:

$$A_{\text{UT}}^h(\phi, \phi_S) = \frac{1}{\langle P_z \rangle} \cdot \frac{N_h^{\uparrow}(\phi, \phi_S) - N_h^{\downarrow}(\phi, \phi_S)}{N_h^{\uparrow}(\phi, \phi_S) + N_h^{\downarrow}(\phi, \phi_S)}$$

$$\langle P_z \rangle = 0.754 \pm 0.050$$

- Extraktion mit **zweidimensionalen Fit**:

$$A_{\text{UT}}^h(\phi, \phi_S) = 2 \cdot \langle \sin(\phi + \phi_S) \rangle_{\text{UT}}^h \cdot \sin(\phi + \phi_S) +$$

**Collinsamplitude**

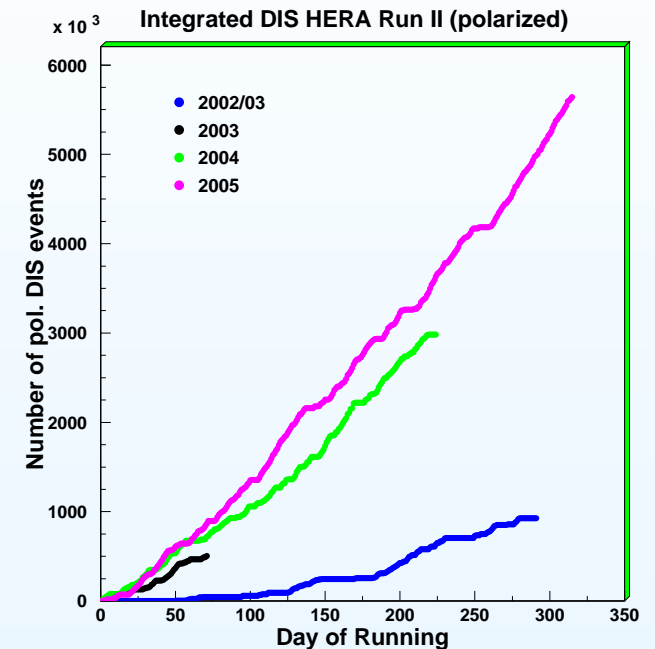
$$2 \cdot \langle \sin(\phi - \phi_S) \rangle_{\text{UT}}^h \cdot \sin(\phi - \phi_S) +$$

**Siversamplitude**

$$2 \cdot \langle \sin(2\phi - \phi_S) \rangle_{\text{UT}}^h \cdot \sin(2\phi - \phi_S) +$$

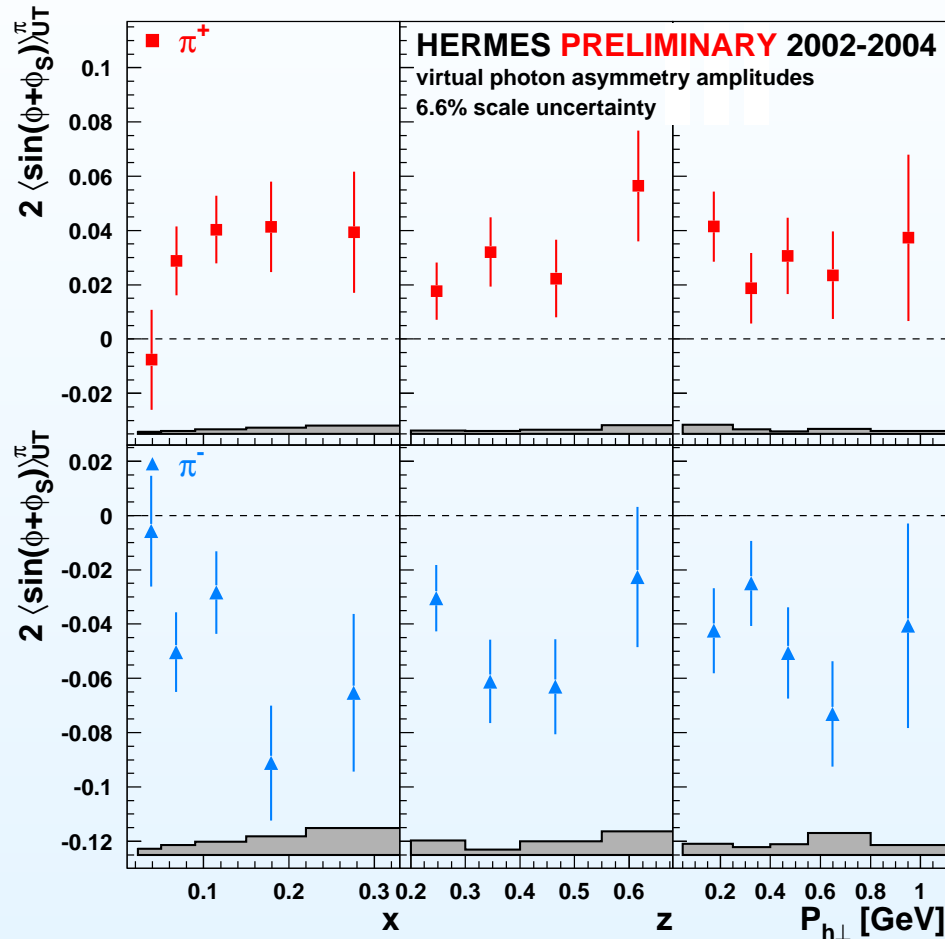
$$2 \cdot \langle \sin \phi_S \rangle_{\text{UT}}^h \cdot \sin \phi_S + c$$

## Wasserstoff-Target:





# Die Collinsamplitude für geladene Pionen:



Vergleich der COMPASS- und HERMES Resultate in Herrn Schweitzers Vortrag

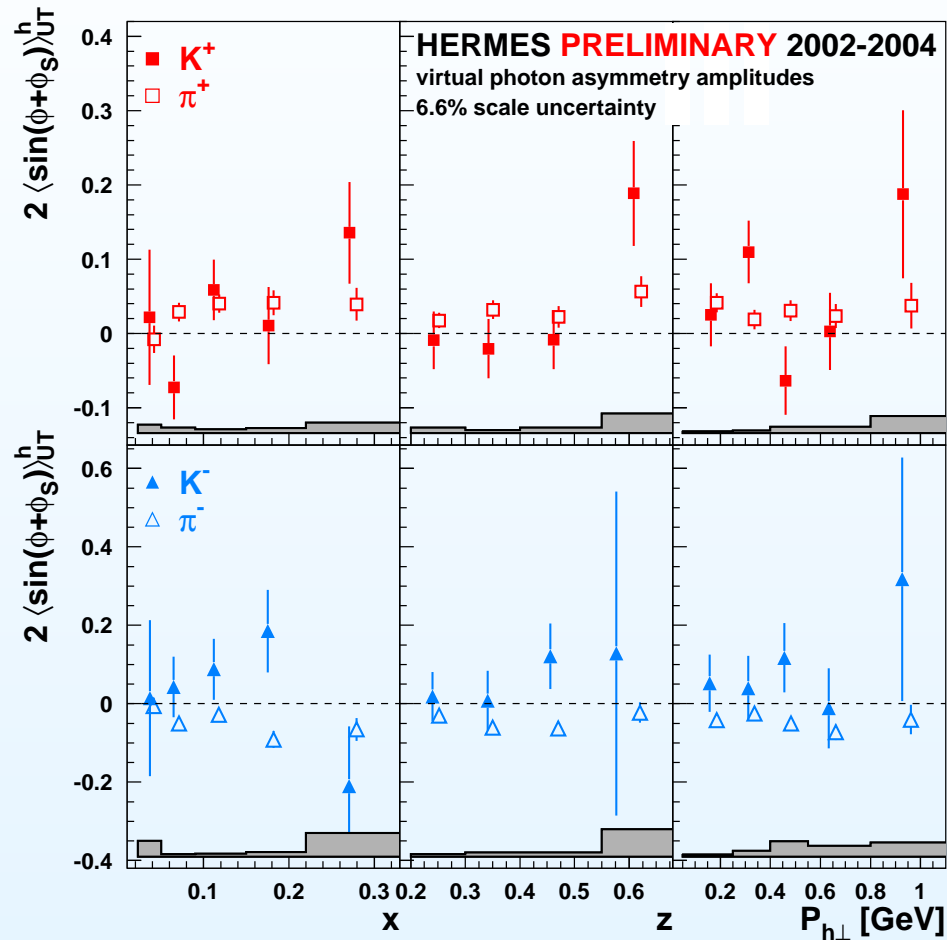
## Resultate der Collinsamplitude:

$$\delta q(x) \otimes H_1^{\perp q}(z)$$

aus den 2002–2004 Daten:

- positive Amplitude für  $\pi^+$
- negative Amplitude für  $\pi^-$
- Collinsamplitude für  $\pi^-$  vom Betrag **unerwarteterweise** größer als diejenige für  $\pi^+$
- $H_1^{\perp, \text{unfav}}(z) \approx -H_1^{\perp, \text{fav}}(z)$ ?
- zur **Extraktion Transversity-Verteilung** werden Informationen über die Collins Fragmentationsfunktion benötigt (BELLE)

# Die Collinsamplitude für geladene Kaonen:



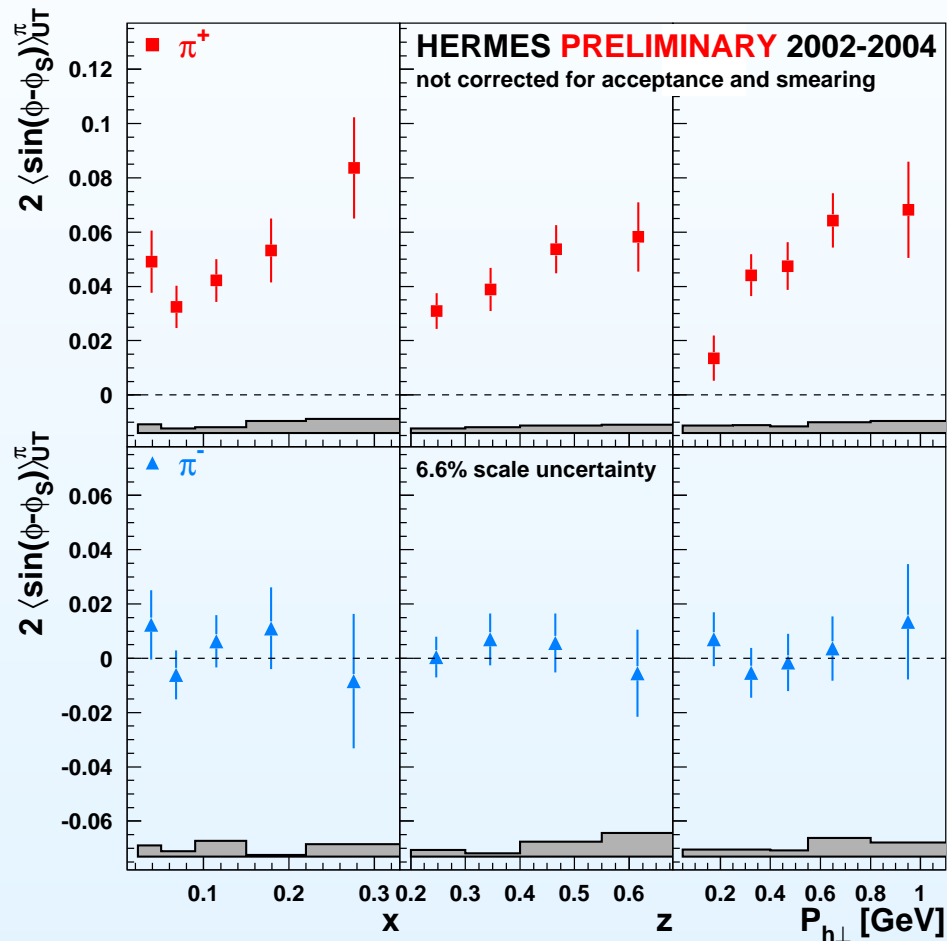
## Resultate der Collinsamplitude:

$$\delta q(x) \otimes H_1^{\perp q}(z)$$

## aus den 2002–2004 Daten:

- keine signifikanten (von Null verschiedenen) Collinsamplituden für geladene Kaonen
- $K^+$ -Collinsamplitude innerhalb der Fehler konsistent mit der für  $\pi^+$

# Die Siversamplitude für geladene Pionen:



## Resultate der Siversamplitude:

$$f_{1T}^{\perp q}(x) \otimes D_1^q(z).$$

## aus den 2002–2004 Daten:

- signifikant positive Siversamplitude für  $\pi^+$
- impliziert nicht verschwindenden Bahndrehimpuls  $L_z^q$
- Siversamplitude für  $\pi^-$  konsistent mit Null.
- **Extraktion der Siversfunktion** aus Kenntnis der spinunabhängigen Fragmentationsfunktion  $D_1^q(z)$

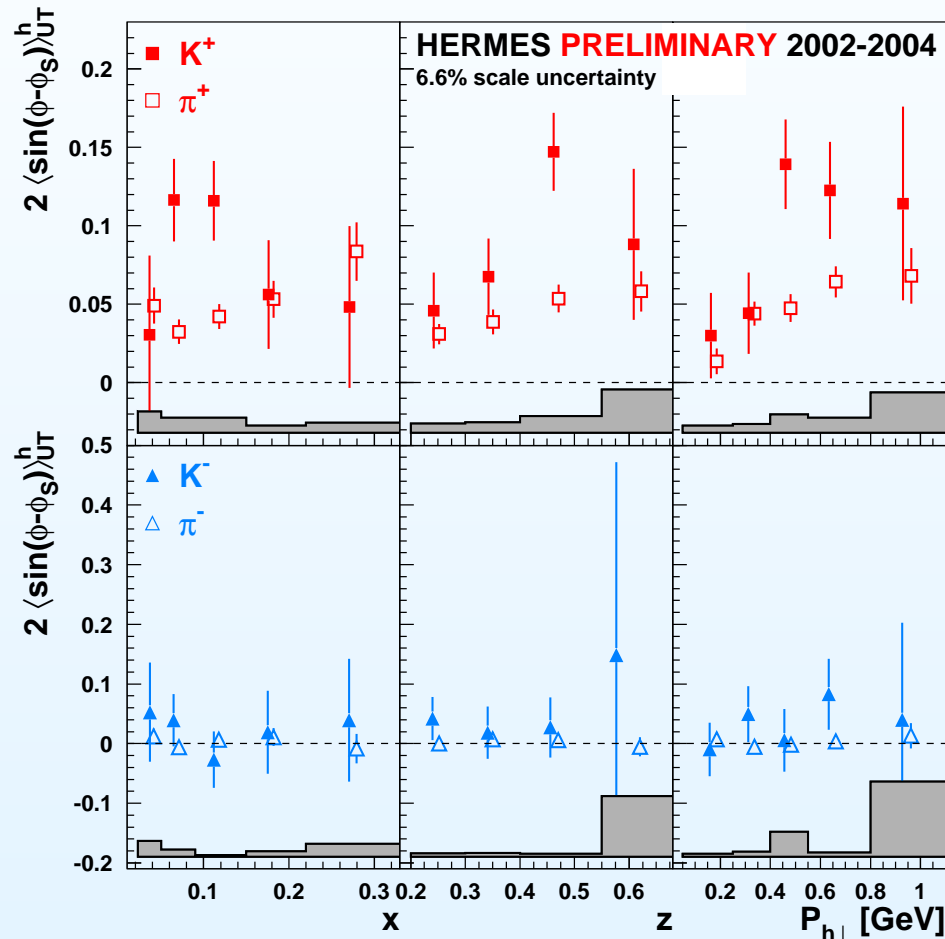
# Die Siversamplitude für geladene Kaonen:

## Resultate der Siversamplitude:

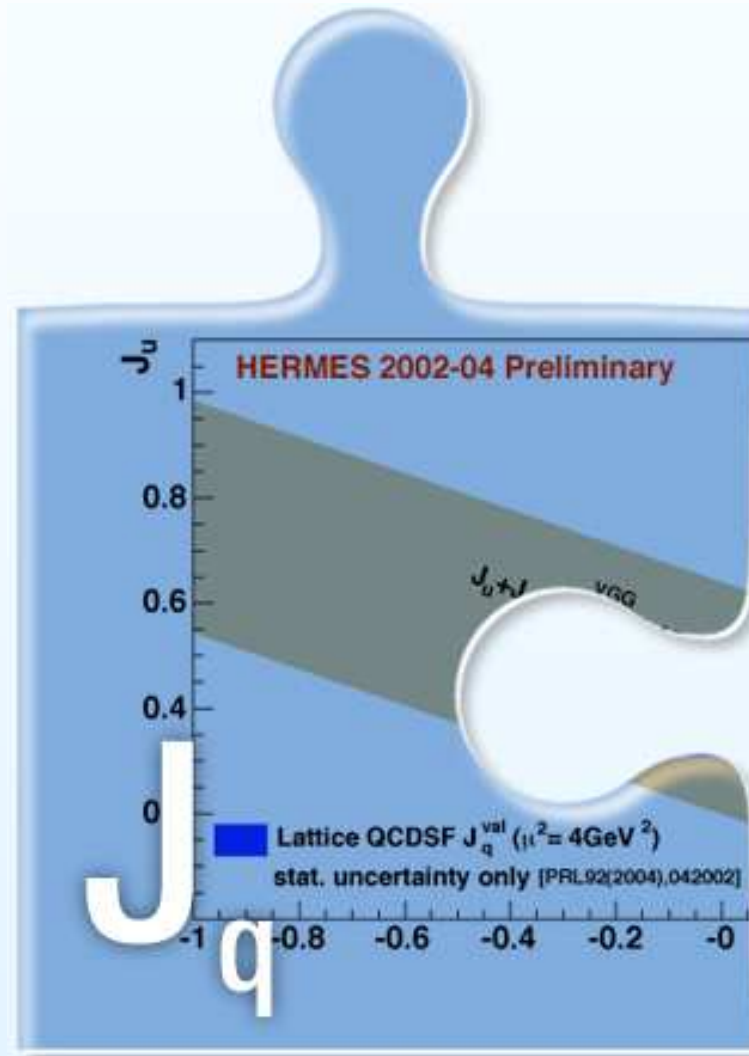
$$f_{1T}^{\perp(1/2)q}(x) \otimes D_1^{\perp q}(z).$$

## aus den 2002–2004 Daten:

- signifikant positive Siversamplitude für  $K^+$
- impliziert nicht verschwindenden Bahndrehimpuls  $L_z^q$
- Siversamplitude für  $K^-$  konsistent mit Null.
- Siversamplitude für  $K^+$  in einigen Bereich größer als diejenige der  $\pi^+ \Rightarrow$  Beitrag der Seaquarks zum Siversmechanismus könnte bedeutend sein



# Generalisierte Partonverteilungen:



# Der Bahndrehimpulsbeitrag:

- Die Spinstruktur des Nukleons:

$$\frac{s_z^N}{\hbar} = \underbrace{\frac{1}{2} \Delta\Sigma + L_z^q}_{J_q} + \underbrace{\Delta G + L_z^g}_{J_g}$$

$\Delta\Sigma$ : wohlbestimmt in inklusiven und semi-inklusiven Messungen

$\Delta G$ : erste Hinweise von COMPASS und HERMES

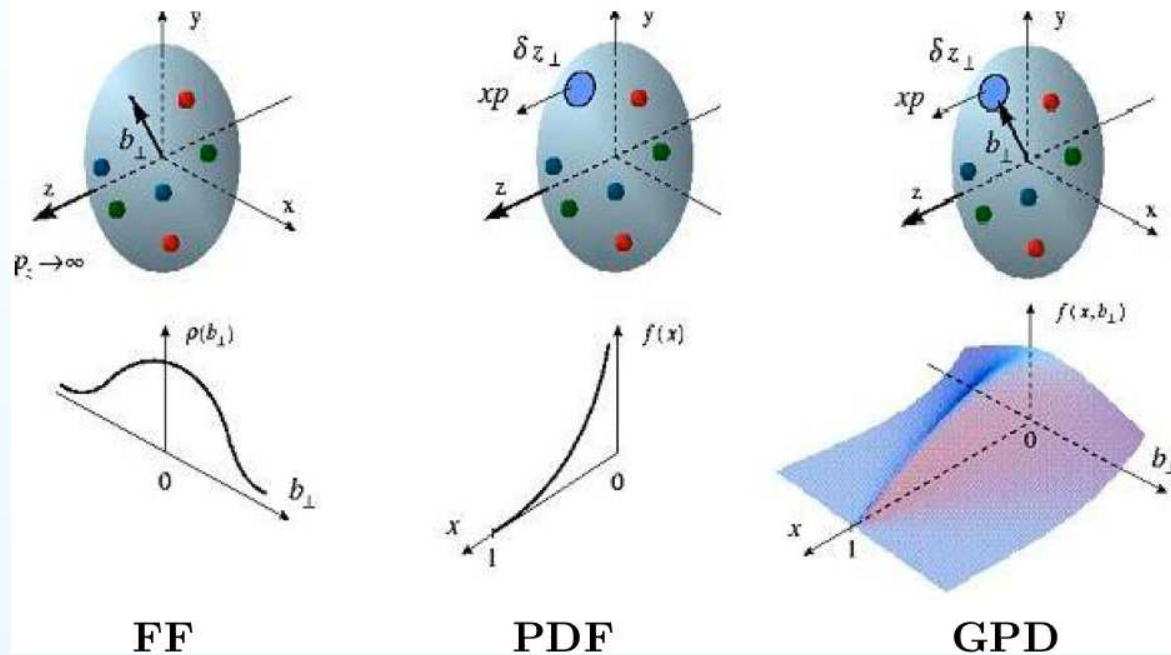
$L_z^q, L_z^g$ : unbekannt

- **Ji Summenregel:**

$$J_{q,g} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{2} \int_{-1}^1 dx x (H_{q,g}(x, \xi, t) + E_{q,g}(x, \xi, t))$$

- ermöglicht Rückschlüsse auf Bahndrehimpulsbeiträge  $L_z^{q,g}$

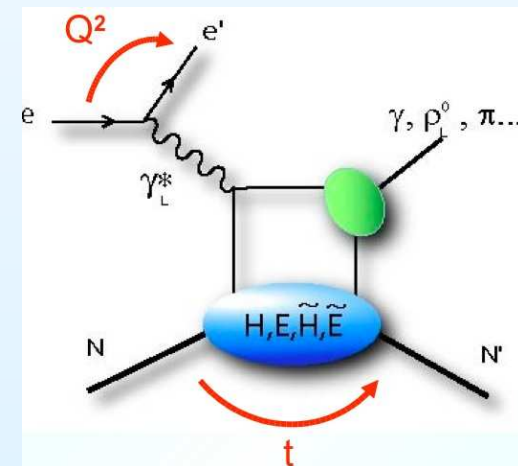
# Parametrisierungen der Nukleonenstruktur:



Formfaktoren (FF)

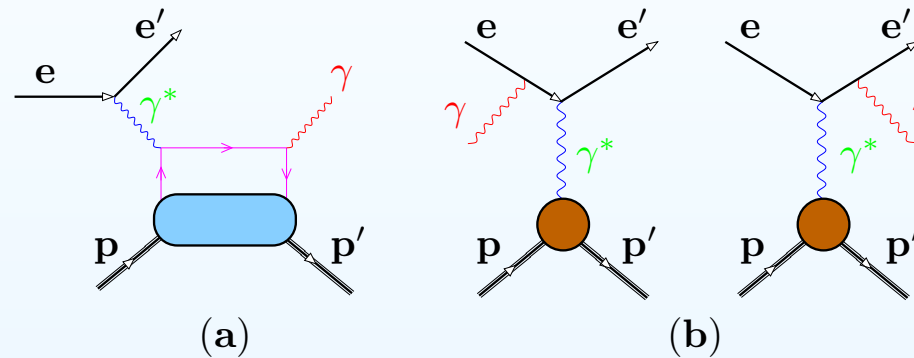
Partonverteilungen (PDF)

Generalisierte Partonverteilungen (GPD)



# Messung der GPD in DVCS:

- Endzustand der tiefvirtuellen Comptonstreuung (DVCS, a) und des Bethe-Heitler-Prozesses (BH, b) nicht unterscheidbar:



- Streuamplitude des Prozesses  $ep \rightarrow e'p'\gamma$ :

$$d\sigma (ep \rightarrow e'p'\gamma) \propto \underbrace{|\mathcal{T}_{\text{BH}}|^2}_{\text{dominierend}} + \underbrace{|\mathcal{T}_{\text{DVCS}}|^2}_{\text{unterdrückt}} + \underbrace{\mathcal{T}_{\text{BH}}\mathcal{T}_{\text{DVCS}}^* + \mathcal{T}_{\text{BH}}^*\mathcal{T}_{\text{DVCS}}}_{\text{Interferenzterm } \mathcal{I}}$$

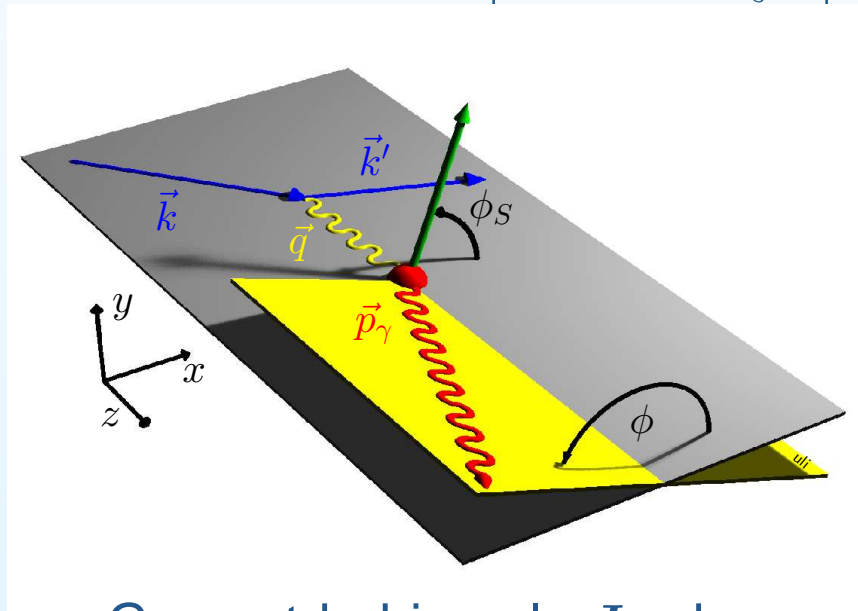
- $\mathcal{T}_{\text{DBH}}$  berechenbar in QED
- $\mathcal{T}_{\text{DVCS}}$  parametrisierbar durch Faltungen von GPD
- **indirekte** Messung von GPD durch Interferenzterm  $\mathcal{I}$



# Azimutale Asymmetrien in DVCS:

- **Transversale Target-Spin Asymmetrie**  $A_{\text{UT}}^{\sin(\phi - \phi_S) \cos \phi}$ :

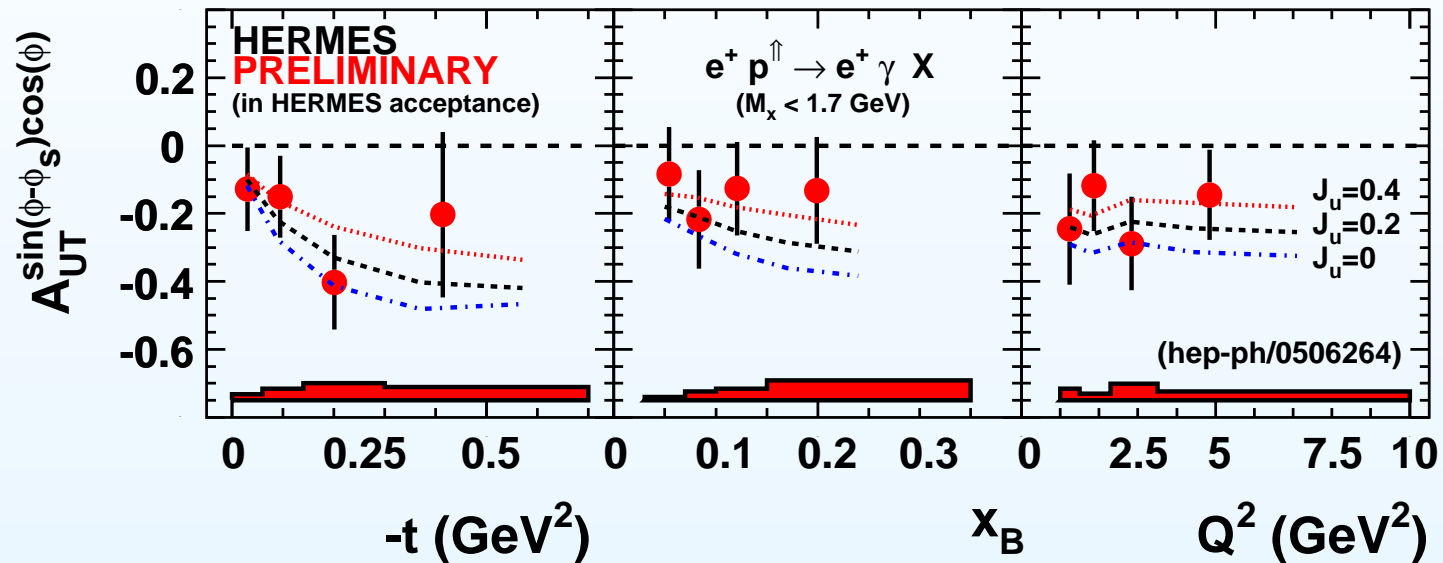
$$d\sigma(\phi, \phi_S) - d\sigma(\phi, \phi_S + \pi) \propto \text{Im}[F_2 H - F_1 E] \sin(\phi - \phi_S) \cos \phi + \text{Im}[F_2 \tilde{H} - F_1 \xi \tilde{E}] \cos(\phi - \phi_S) \sin \phi$$



- GPD  $E$  hängt vom Gesamtdrehimpuls  $J_q$  ab
- $A_{\text{UT}}^{\sin(\phi - \phi_S) \cos \phi}$  **ist sensitiv auf  $J_q$**

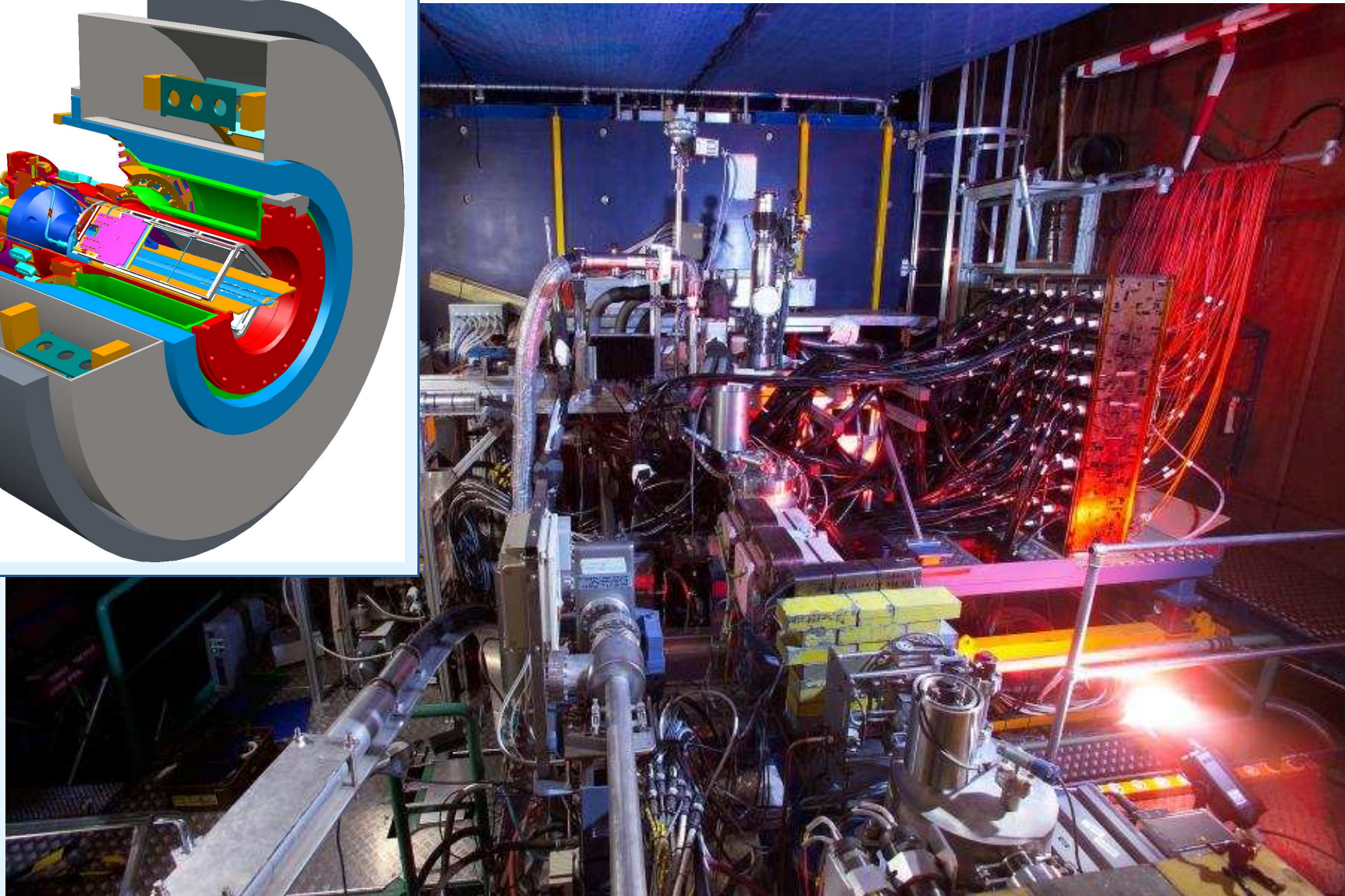
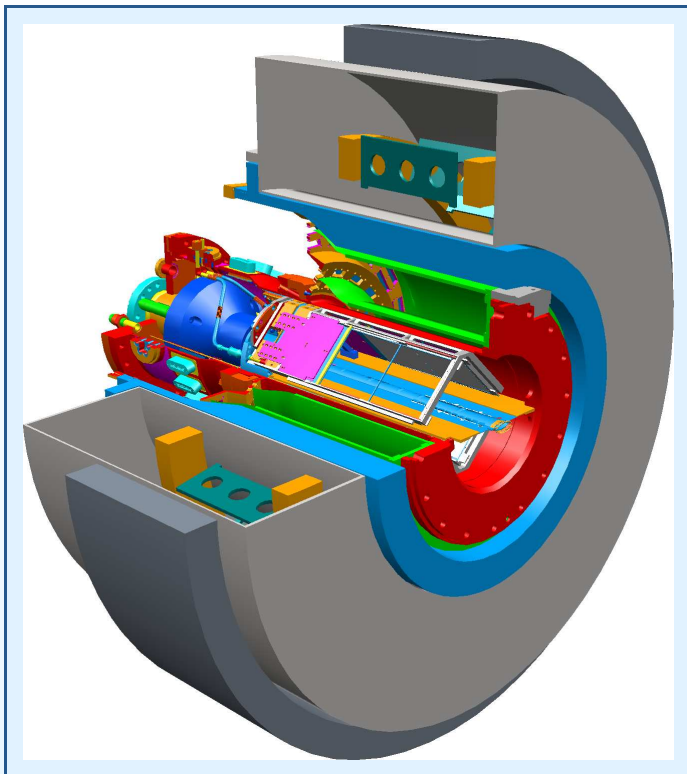
# Azimutale Asymmetrien in DVCS:

- **Transversale Target-Spin Asymmetrie  $A_{UT}^{\sin(\phi-\phi_S)\cos\phi}$ :**



- $A_{UT}^{\sin(\phi-\phi_S)\cos\phi}$  ist sensitiv zum Gesamtdrehimpuls  $J_u$
- nur ein geringer Einfluß von anderen GPD Modellparametern
- **(modellabhängige) Extraktion von  $J_u = L_z^u + \frac{1}{2}\Delta u$  möglich**
- $L_z^u < 0, L_z^d > 0$

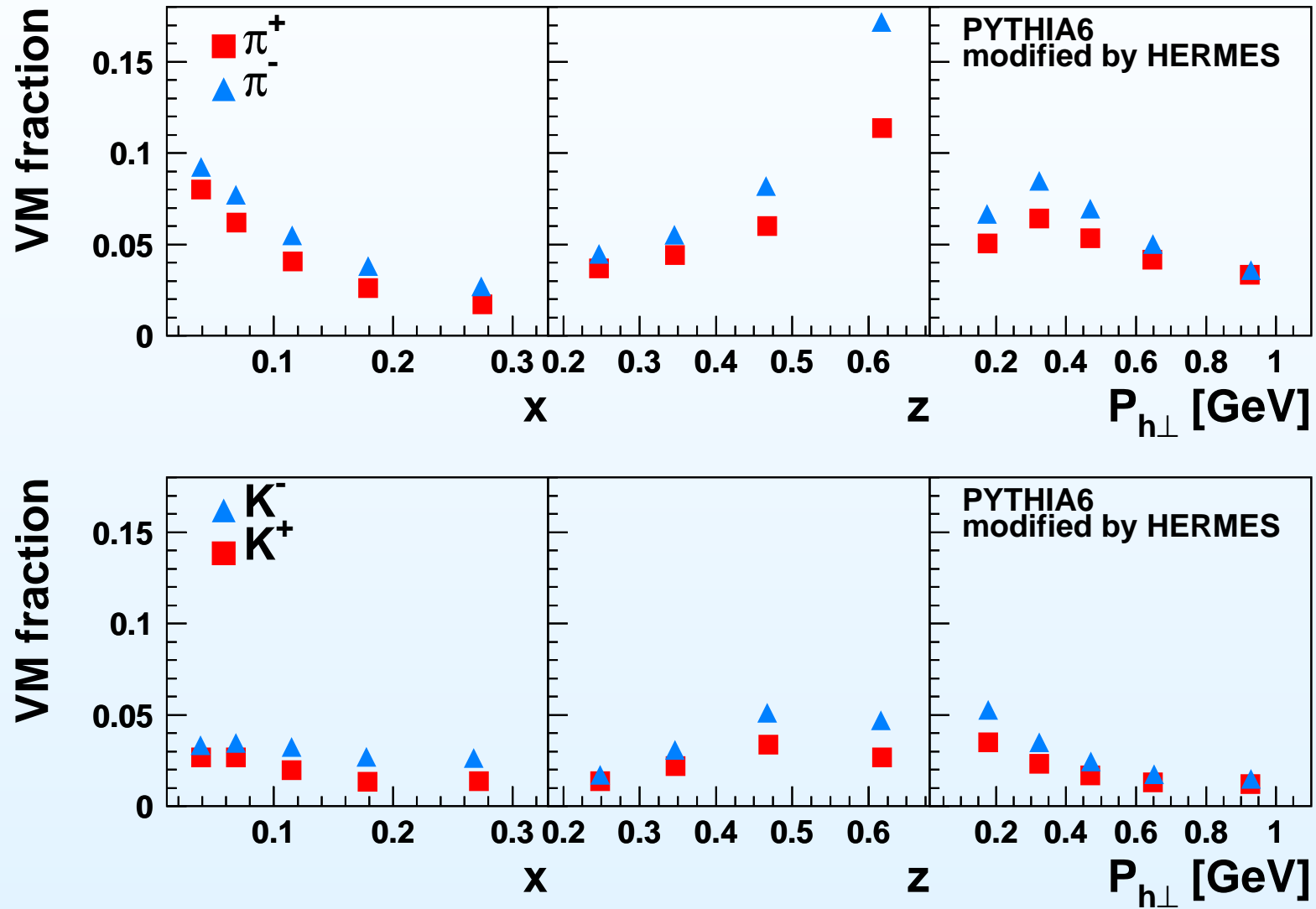
# Das Recoil-Projekt:



Reserve:

# Exklusive Vektormesonenerereignisse

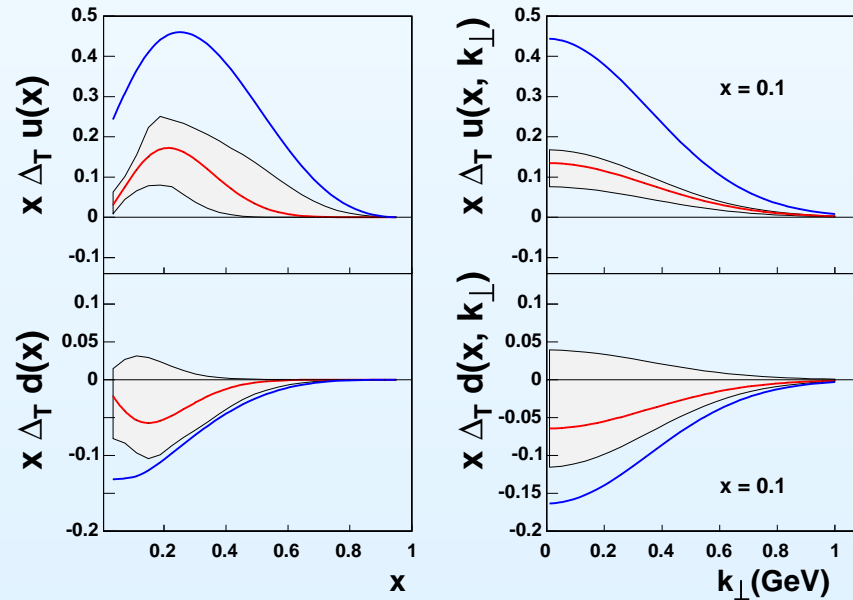
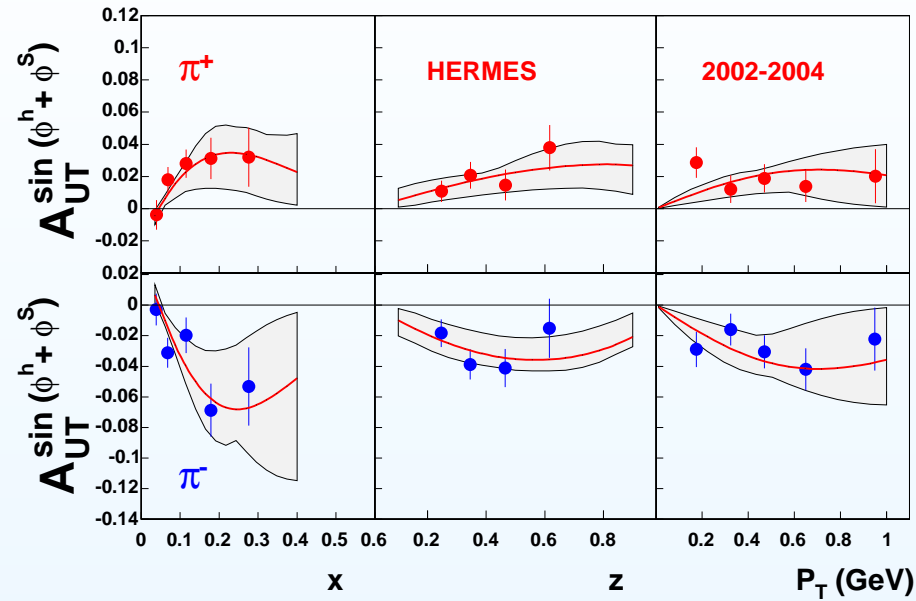
# Exklusive Ereignisse im semi-inklusiven Datensatz:



Reserve:

# Extraktion der Transversityverteilung

# Modellabhängige Extraktion von M. Anselmino u.a.:



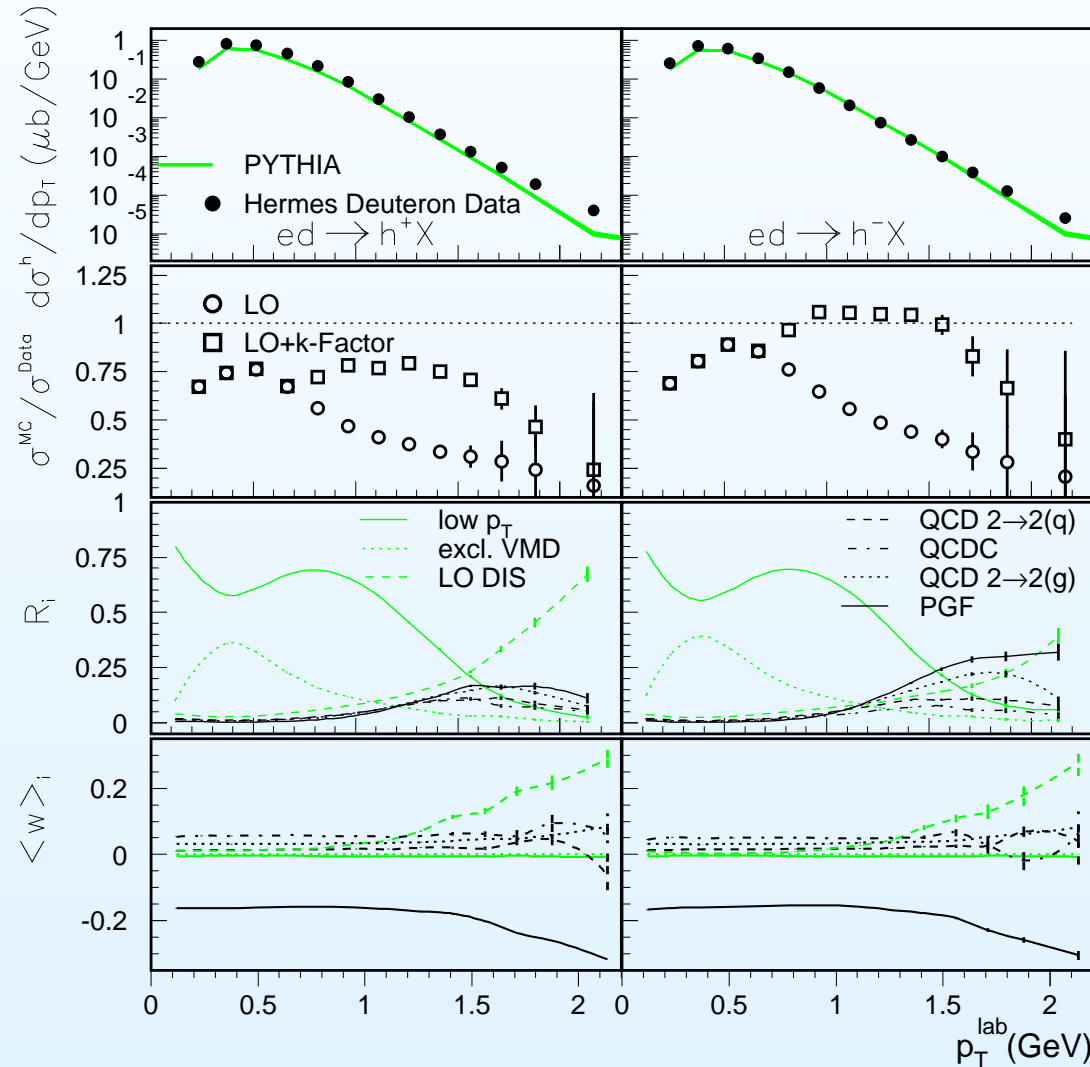
Reserve:

# Konkurrenzereignisse



# Vergleich des Wirkungsquerschnitts:

## Vergleich des Wirkungsquerschnitts zwischen Daten und der HERMES Pythia Monte Carlo Simulation

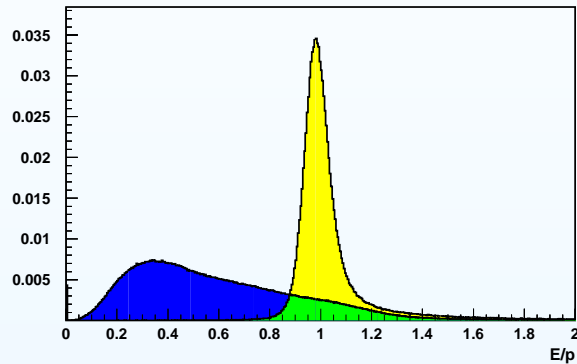


Reserve:

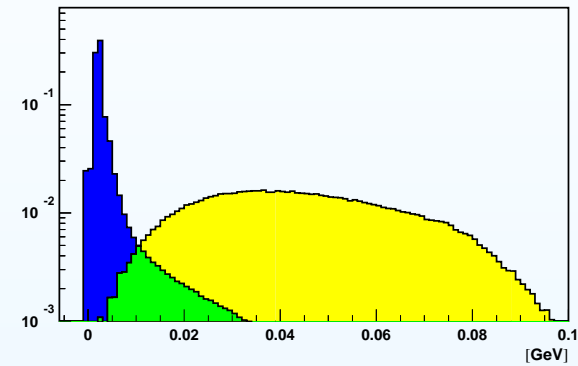
# Teilchenidentifikation

# Unterscheidung von **Leptonen** und **Hadronen**:

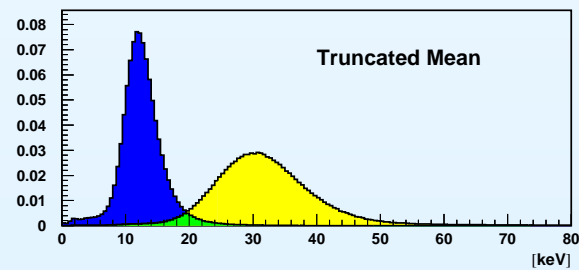
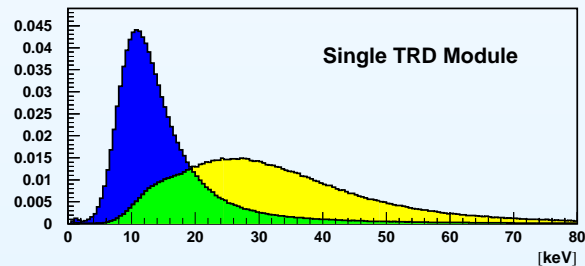
## Kalorimeter ( $E/p$ )



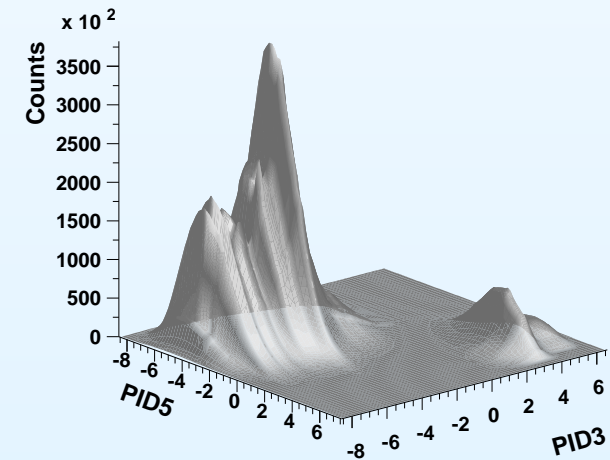
## Preshower-Hodoskop



## TRD ( $\sim \gamma = E/m$ )

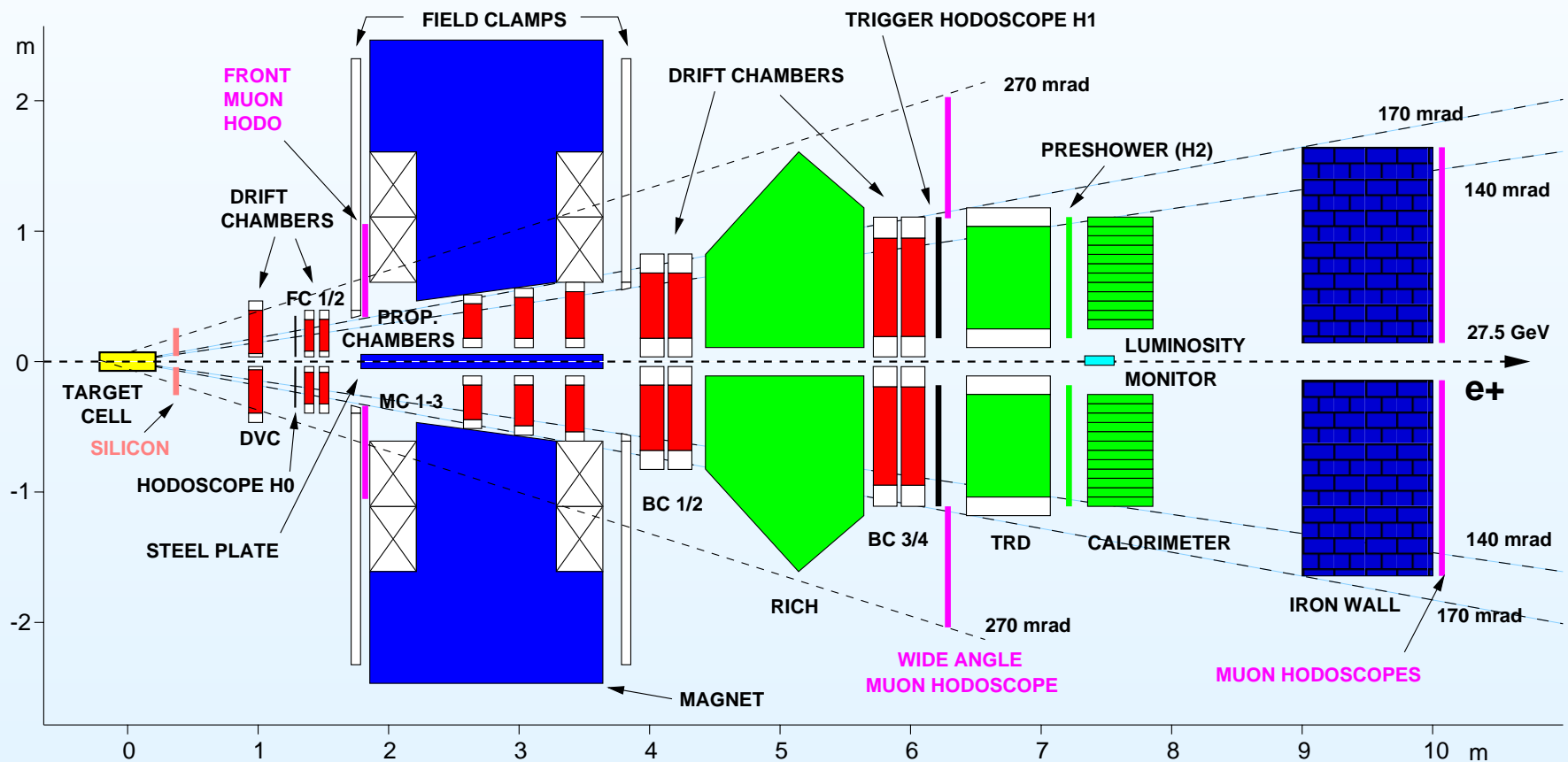


## Kombination der einzelnen Detektorsignale:



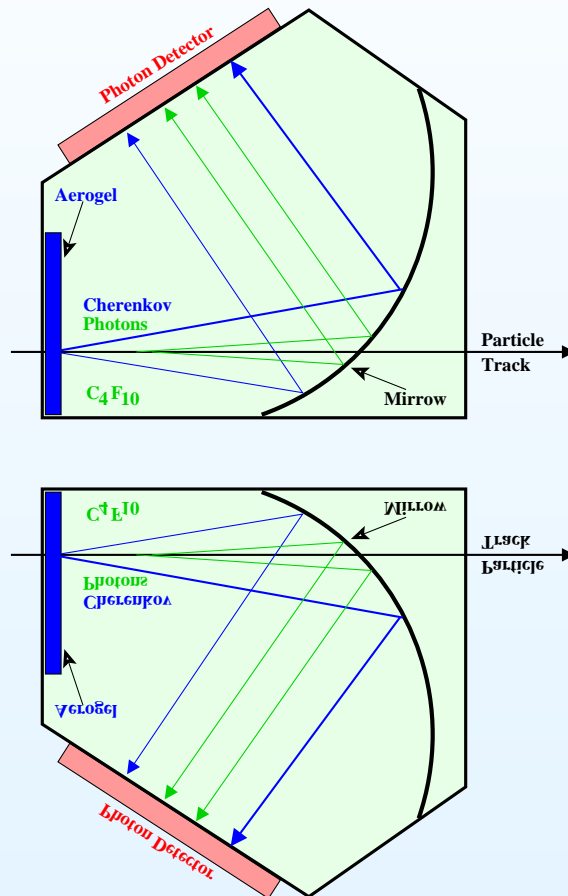
# Identifikation der Hadronen:

## Ring Image Čerenkov (RICH)-Detektor:



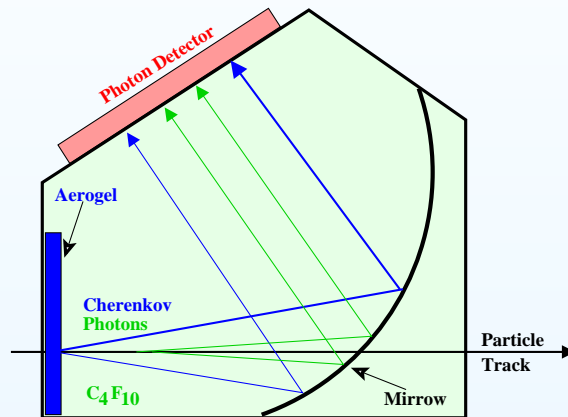
# Identifikation der Hadronen:

## Schematischer Aufbau des RICH:



# Identifikation der Hadronen:

## Schematischer Aufbau des RICH:



Brechungsindizes  $n$  der beiden Raditormaterialien:

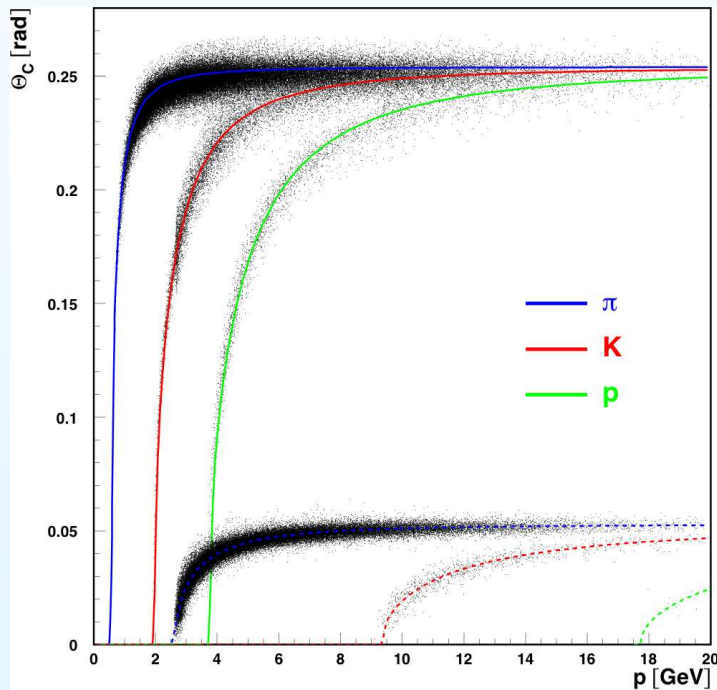
Aerogel:  $n = 1.03$

$C_4F_{10}$ :  $n = 1.0014$

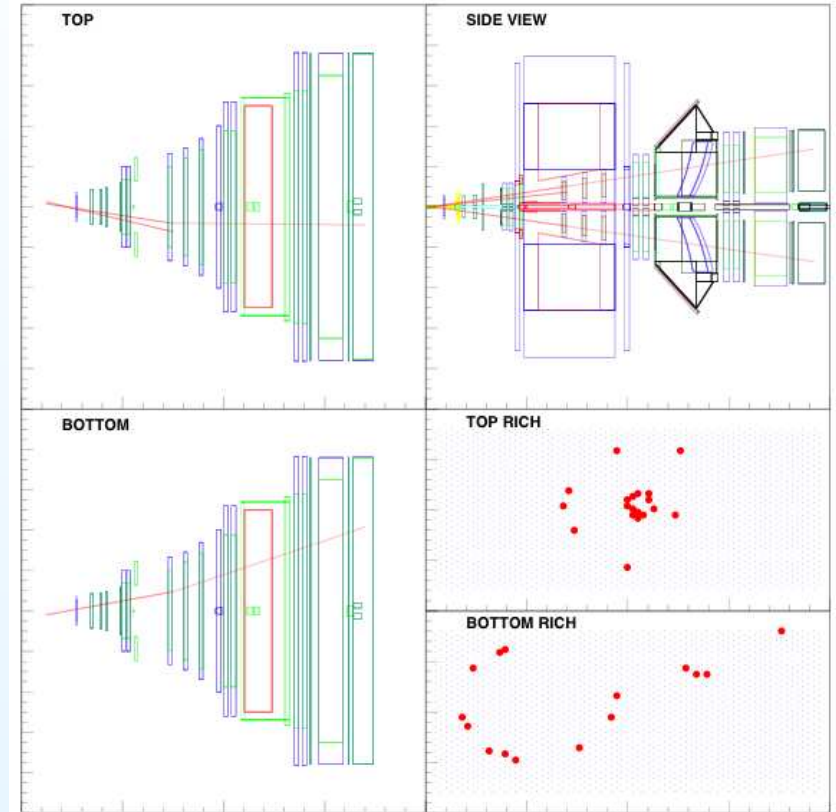
# Identifikation der Hadronen:

Čerenkovöffnungswinkel:

$$\theta = \arccos \frac{1}{\beta n}$$



$$p < p_{\text{thres}} = \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}}$$



Ein  $\pi K$ -Ereignis im RICH