HERMES Botschaften vom Nukleonspin

Marc Beckmann

für die HERMES Kollaboration

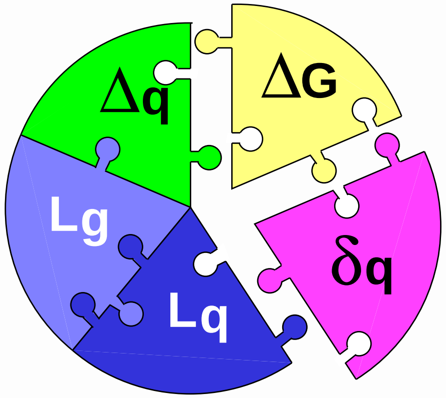
DESY, Hamburg

bmb+f - Förderschwerpunkt
HERMES
Großgeräte der physikalischen Grundlagenforschung

Arbeitstreffen
"Hadronen und Kerne"
Meissen,
8.-11. September 2003

- Motivation
- Das HERMES Experiment bei HERA
- Polarisierte tiefinelastische Streuung
- Ergebnisse aus inklusiver Streuung:
  - Die Strukturfunktion g_1^d
  - Quarkhelizitätsverteilungen aus NLO–Fits
  - Die Strukturfunktion b_1^d
- Ergebnisse aus semi–inklusiver Streuung:
  - Quarkhelizitätsverteilungen des Nukleons $\Delta q(x)$
  - Azimuthale Winkelverteilungsasymmetrien
- Ausblick: Messungen an einem transversalen Target

Die Helizitätsstruktur des Nukleons



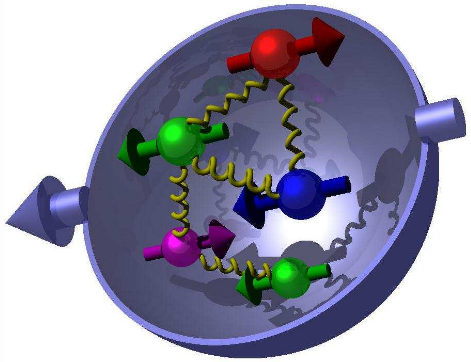
- Helizitätssummenregel für das Nukleon:

$$S_z = \frac{1}{2}\hbar = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta G + L_q + L_g$$

mit

$$\Delta\Sigma = \Delta u + \Delta\bar{u} + \Delta d + \Delta\bar{d} + \Delta s + \Delta\bar{s} \simeq \begin{cases} 0.14\ldots 0.2 & \text{gemessen} \\ 0.58 & \text{erwartet} \end{cases}$$

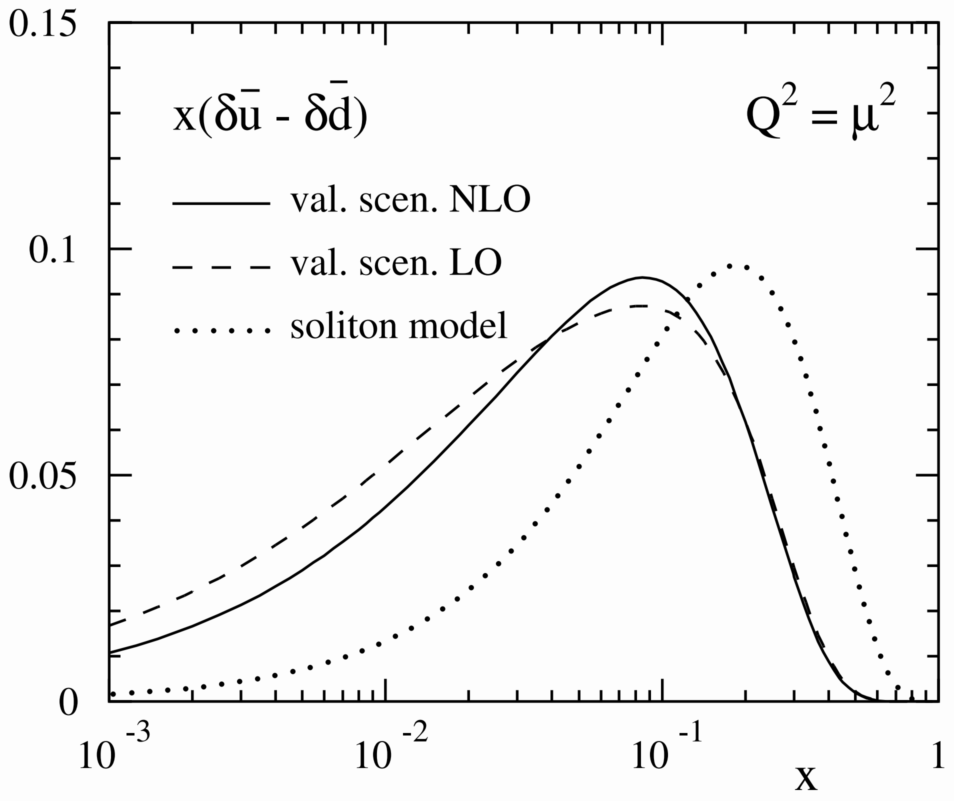
- Die $\Delta q = \Delta u, \Delta\bar{u}, \ldots$ sind die 1. Momente der Helizitätsdichten $\Delta u(x), \Delta\bar{u}(x), \ldots$
- Helizitätsdichte: $\Delta q(x) = q^+(x) - q^-(x)$
- Unpolarisierte Quarkdichte: $q(x) = q^+(x) + q^-(x)$



hermes

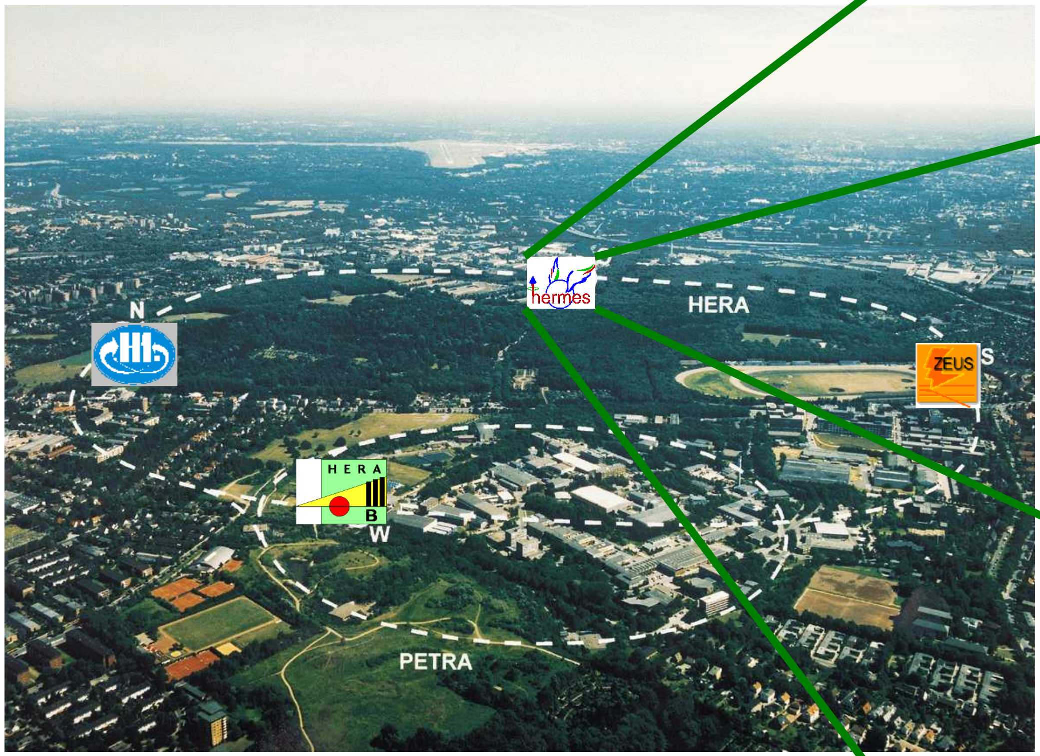
Modelle für See–Quark Helizitätsverteilungen

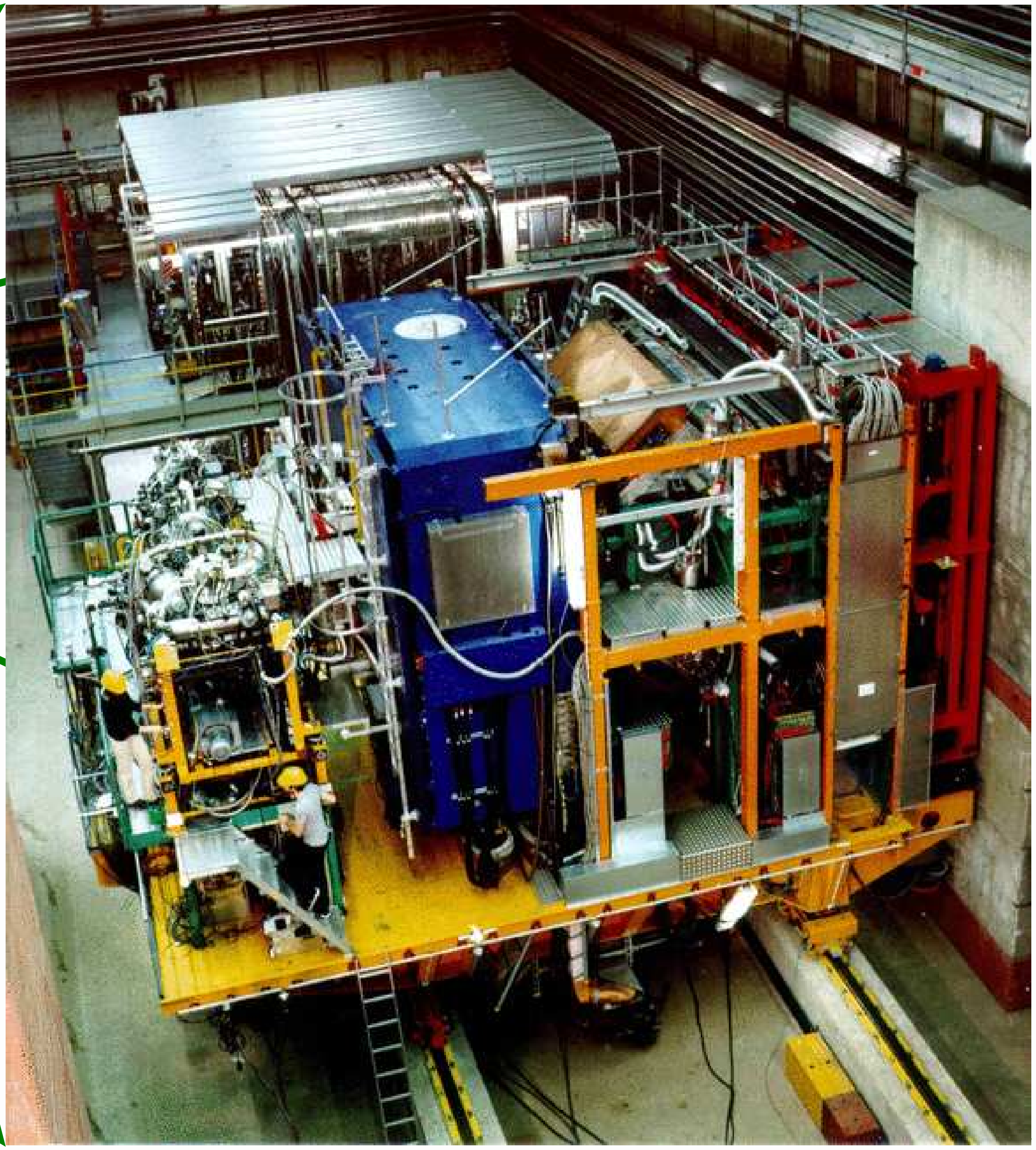
- Verschiedene Modelle sagen vorher: $\Delta\bar{u}(x) \neq \Delta\bar{d}(x) \neq \Delta s(x)$
  - Chirales Quark–Soliton Modell (χQSM)
    [Dressler et al., EPJ C14 (2000) 147]
  - Pauli–Blocking Ansatz
    [Glück et al., PRD 63 (2001) 094005]
  - Statistisches Modell
    [Bourrely et al., EPJ C23 (2002) 487]
  - ⋮



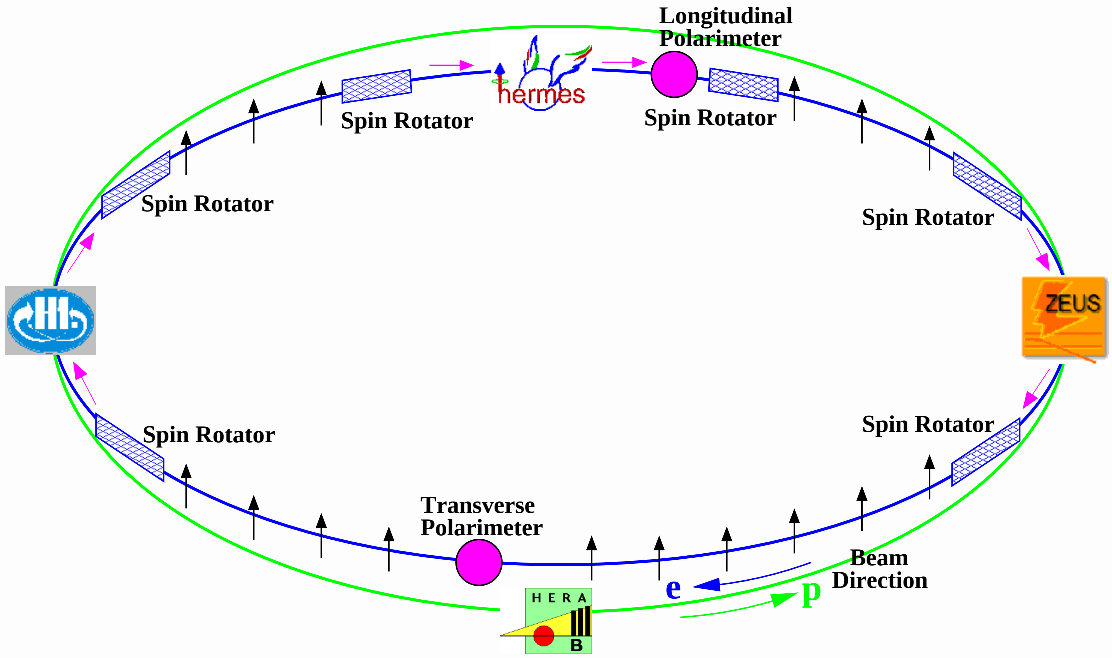
[Glück et al., PRD 63 (2001) 094005]

Das HERMES Experiment bei HERA



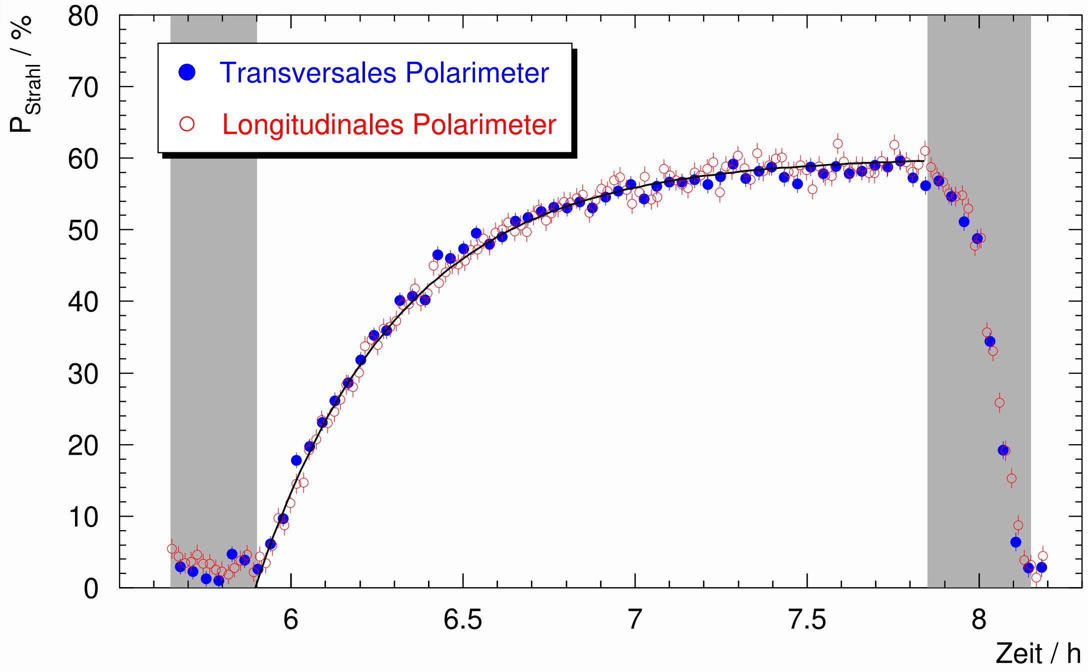


Der polarisierte $e^{\pm}$–Strahl bei HERA



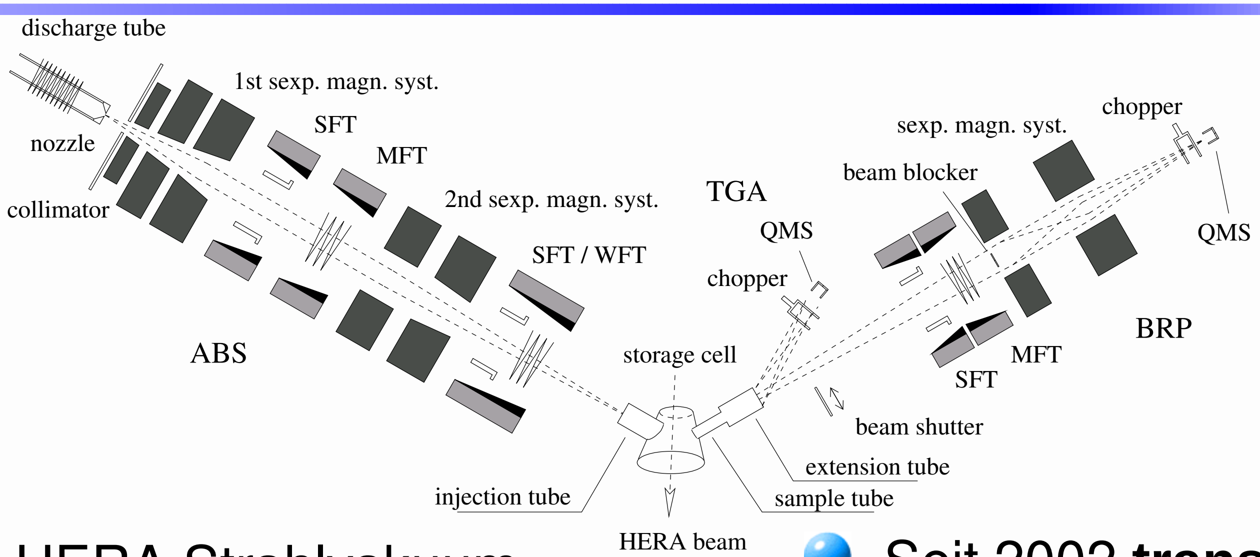
- Transversale Selbstpolarisation durch Emission von Synchrotronstrahlung
- Longitudinale Strahlpolarisation mittels Spinrotatorpaaren

- Echtzeitmessung der Strahlpolarisation mit zwei Compton Rückstreupolarimetern



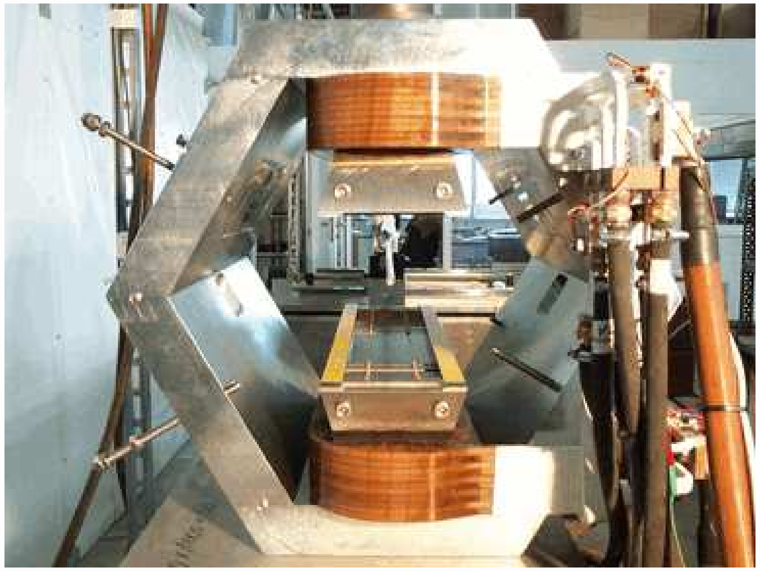
- Mittl. Strahlpolarisation $\langle P_B \rangle \sim 55\%$
- $\delta P_B / P_B = 1.8 \ldots 3.4\%$

Das polarisierte HERMES Gastarget



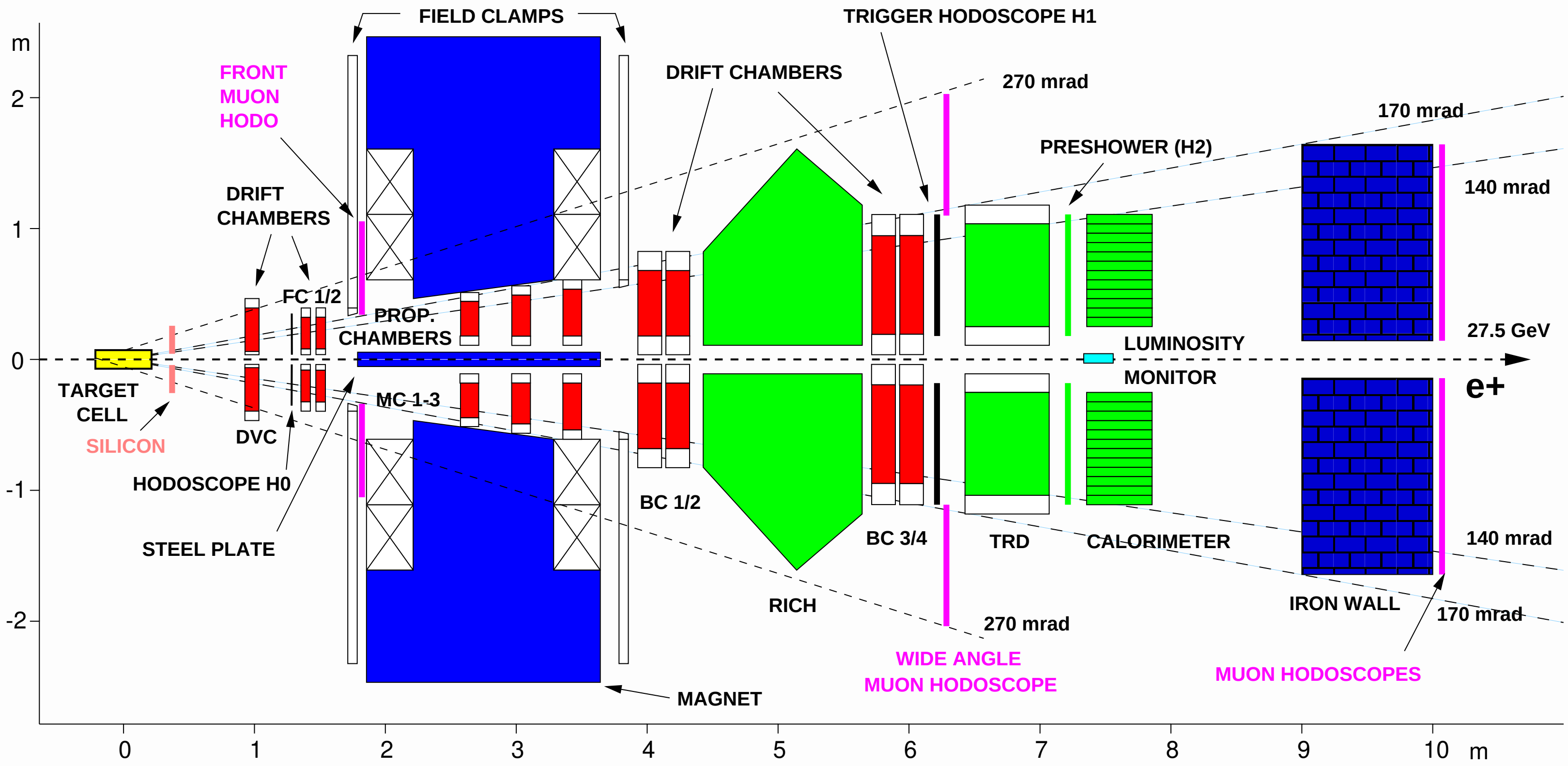
- Reines Gastarget im HERA Strahlvakuum
- Speicherzelle (75μm Al) auf 60 . . . 260 K gekühlt
- Schnelles Umschalten der Spinrichtung
- Bis 2000 long. polarisierte $\vec{\mathrm{H}}$– und $\vec{\mathrm{D}}$–Targets
- Mittl. Targetpolarisationen:
  $\langle P \rangle_{\vec{\mathrm{H}}} = 0.824 \pm 0.034$, $\langle P \rangle_{\vec{\mathrm{D}}} = 0.844 \pm 0.037$
- Zusätzlich: unpol. Targets H_2, D_2, He, N_2, Ne, Kr

- Seit 2002 **transversal** polarisiertes $\mathrm{H}^{\uparrow}$–Target



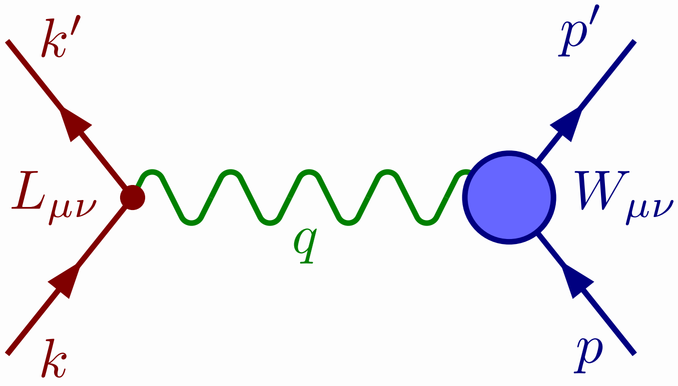
hermes

Der HERMES Detektor



- Kinematische Abdeckung: $0.02 \leq x \leq 0.8$ bei $Q^2 > 1$ GeV^2 und $W > 2$ GeV
- Auflösung: $\delta p/p = 1.4 \ldots 2.5\%$, $\delta\Theta \lesssim 1$ mrad
- Teilchenidentifikation: TRD, Preshower, Kalorimeter, sowie
  $\longrightarrow$ 1997: Schwellen–Čerenkovzähler
  1998 $\longrightarrow$: RICH (zwei Radiatoren) + Eisenwand (μ–ID)

Der DIS Wirkungsquerschnitt



$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega\, dE'} = \frac{\alpha^2}{M\, Q^4}\,\frac{E}{E'}\, L_{\mu\nu}\, W_{\mu\nu}$$

- $L_{\mu\nu}$ rein elektromagnetisch $\rightarrow$ vollständig berechenbar
- $W_{\mu\nu}$ Hadronischer Tensor, parametrisiert durch Strukturfunktionen:

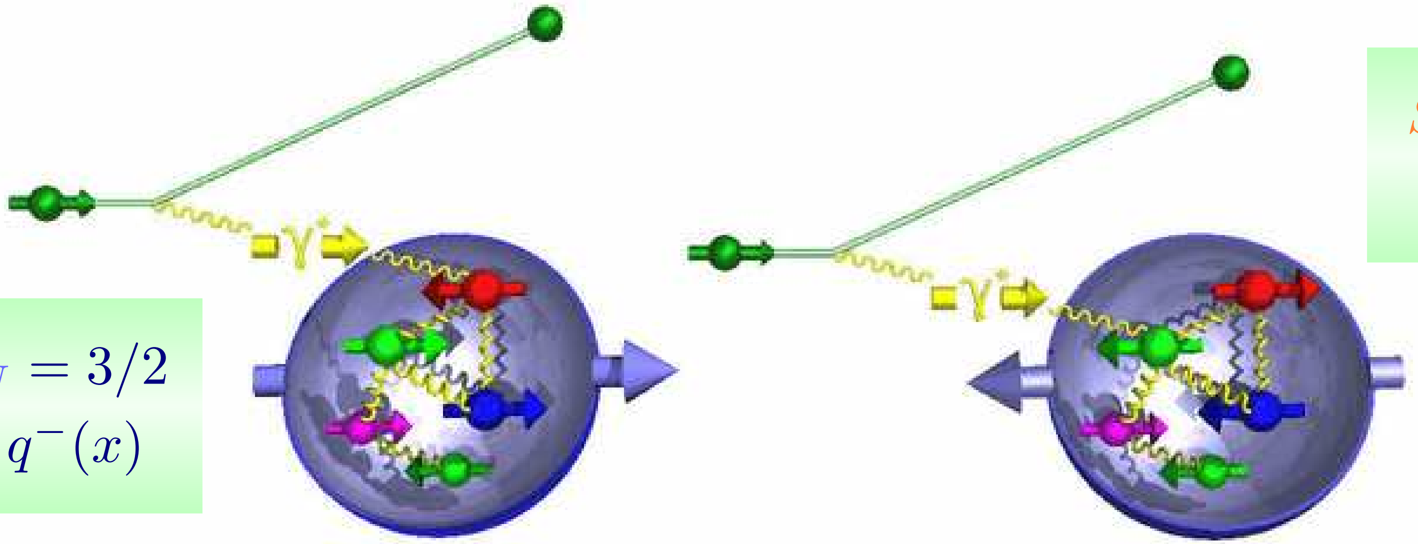
$$W_{\mu\nu} \sim \Big[\ldots F_1(x,Q^2) + \ldots F_2(x,Q^2) + \ldots g_1(x,Q^2) + \ldots g_2(x,Q^2)$$

$$\text{(für Spin 1)} \ldots b_1(x,Q^2) + \ldots b_2(x,Q^2) + \ldots b_3(x,Q^2) + \ldots b_4(x,Q^2)\Big]$$

hermes

DIS Wirkungsquerschnitt–Asymmetrien

$$\vec{S}_\gamma + \vec{S}_N = 3/2$$
$$\sigma_{3/2} \propto q^-(x)$$



$$\vec{S}_\gamma + \vec{S}_N = 1/2$$
$$\sigma_{1/2} \propto q^+(x)$$

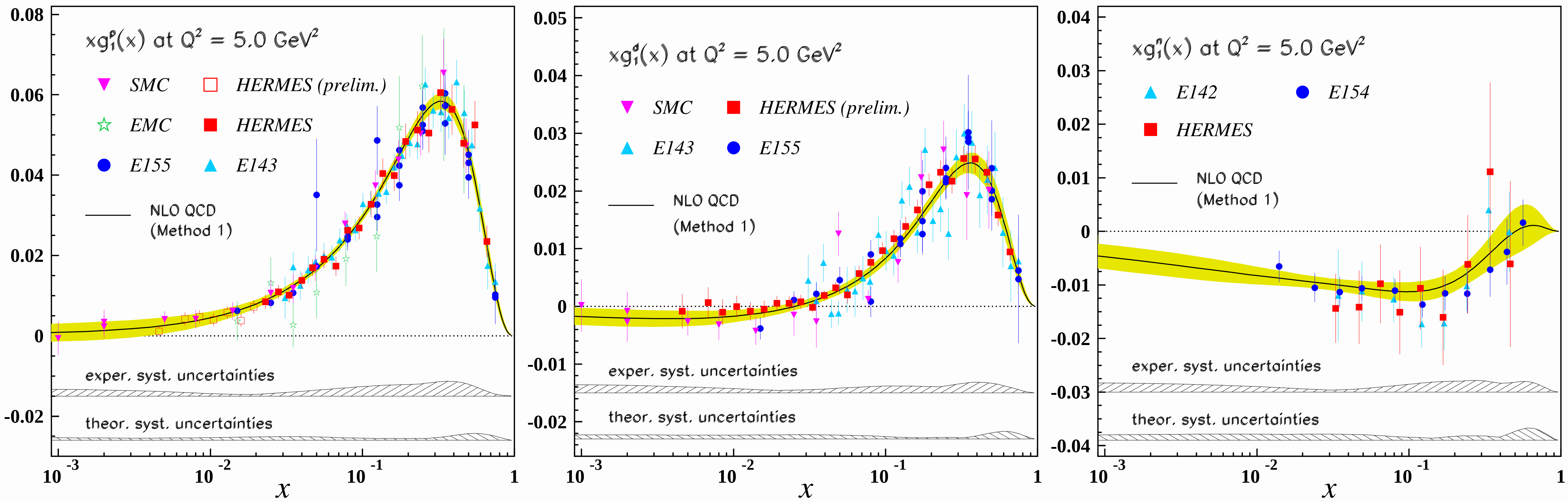
- Photon–Nukleon Asymmetrie:

$$A_1(x,Q^2) = \frac{\sigma_{1/2} - \sigma_{3/2}}{\sigma_{1/2} + \sigma_{3/2}} \simeq \frac{g_1(x,Q^2)}{F_1(x,Q^2)} \stackrel{\text{QPM}}{=} \frac{\sum_q e_q^2\, \Delta q(x,Q^2)}{\sum_q e_q^2\, q(x,Q^2)}$$

- Zusammenhang mit gemessenen Grössen:

$$A_1(x,Q^2) = \frac{1}{(1+\eta\gamma)D} \underbrace{\frac{1}{\langle P_T\, P_B\rangle} \frac{(N/\mathcal{L})^{\uparrow\downarrow} - (N/\mathcal{L})^{\uparrow\uparrow}}{(N/\mathcal{L})^{\uparrow\downarrow} + (N/\mathcal{L})^{\uparrow\uparrow}}}_{\equiv\ A_{||}(x,Q^2)}$$

NLO QCD Fits: Anpassung an g_1 (exp.)



- Anpassung an $x \cdot g_1^{p,d,n}(x, Q^2)$ (exp.) mittels

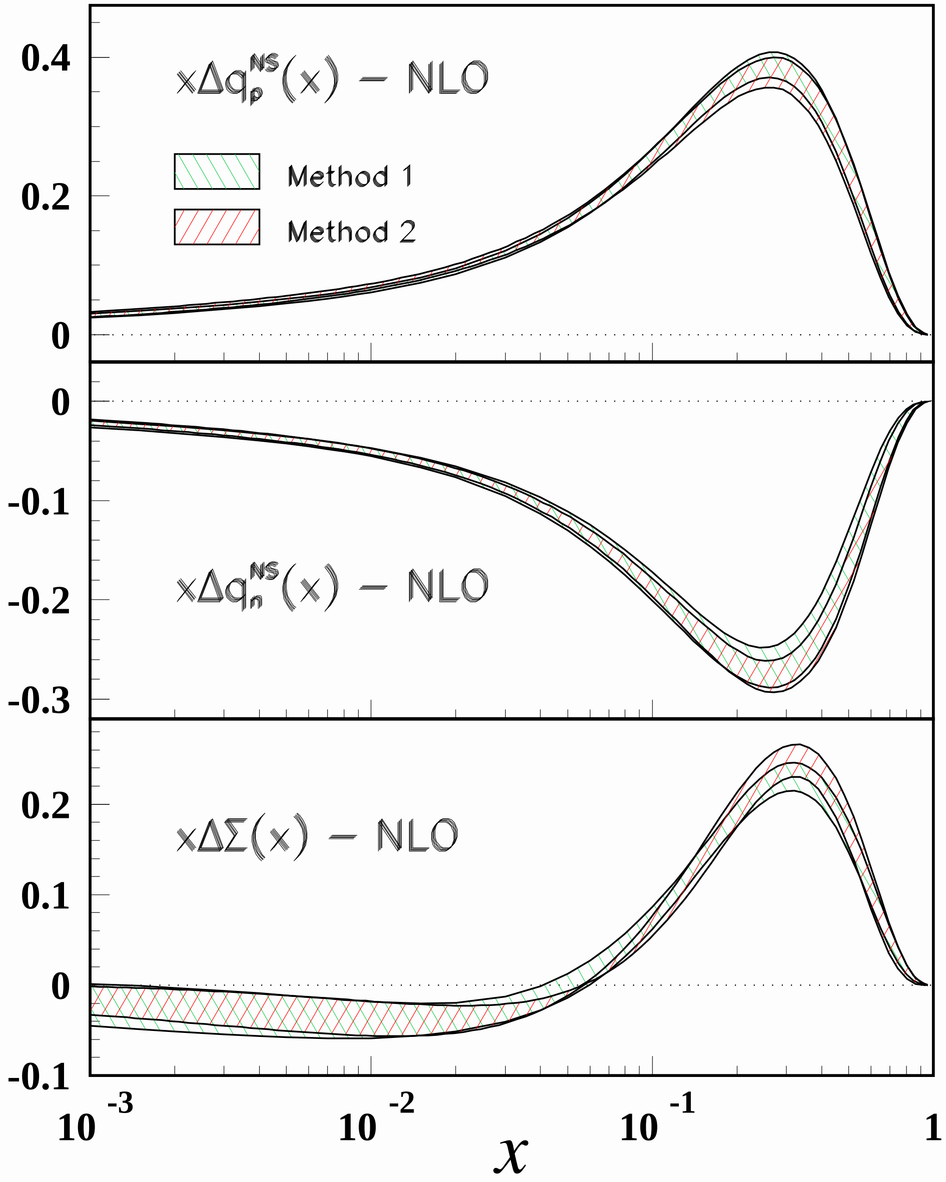
$$x \cdot \Delta f_i(x, Q_0^2) = \eta_i\, A_i\, x^{\alpha_i} (1-x)^{\beta_i} \left(1 + \gamma_i x + \rho_i \sqrt{x}\right)$$

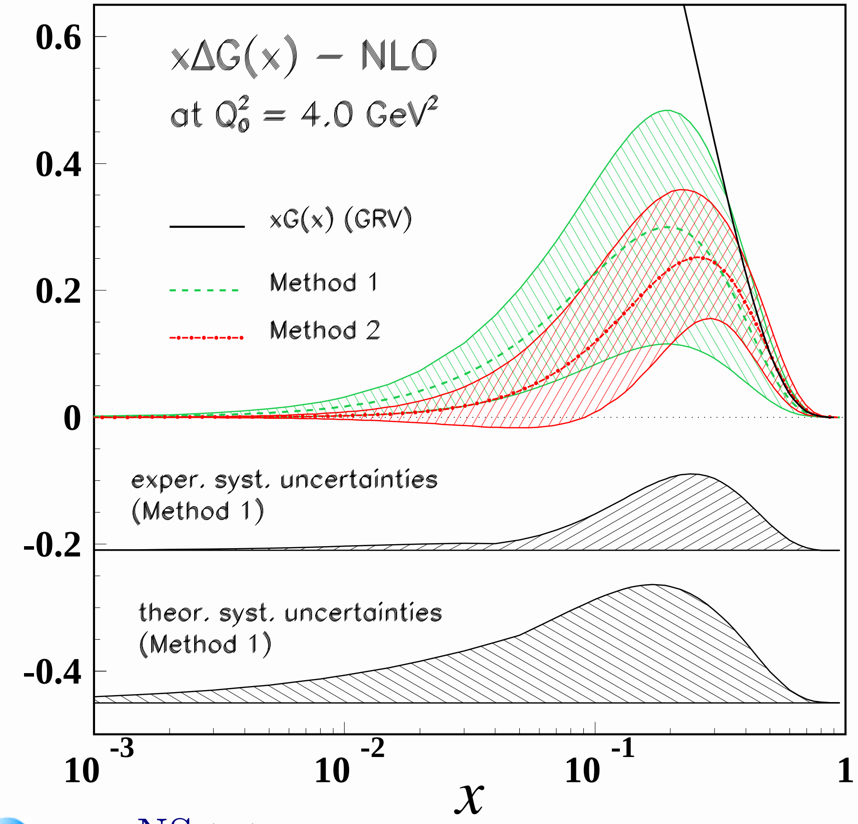
- Symmetrieannahme: $SU(3)_f$–symmetrischer See

$$\Delta q_s(x) = \Delta u_s(x) = \Delta \bar{u}(x) = \Delta d_s(x) = \Delta \bar{d}(x) = \Delta s(x) = \Delta \bar{s}(x)$$

- Technisch: Konsistenztest mittels zweier verschiedener Methoden

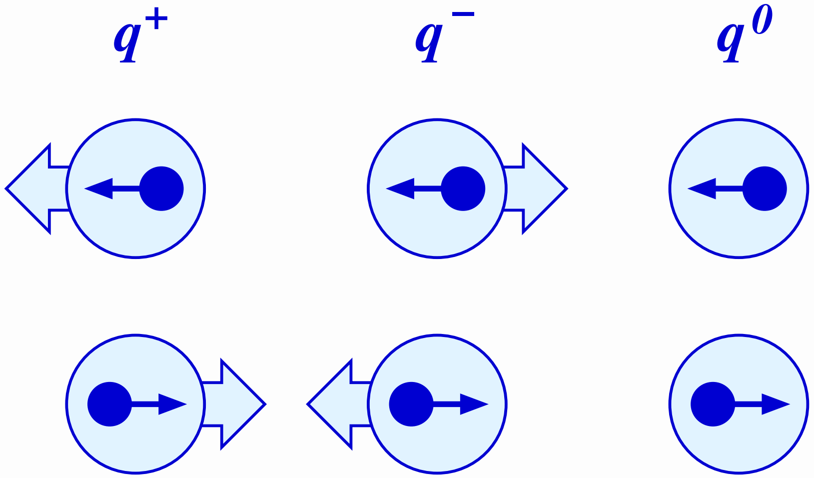
NLO QCD Fits: Partonverteilungen





- $\Delta q^{\mathrm{NS}}(x) \equiv$ $\Delta u(x) + \Delta\bar{u}(x) - [\Delta d(x) + \Delta\bar{d}(x)]$, sowie $\Delta\Sigma(x)$ präzise bestimmt
- $\Delta\Sigma = 0.20$ bei $Q_0^2 = 4$ GeV^2
- $\Delta G(x)$ mit erheblichen Unsicherheiten

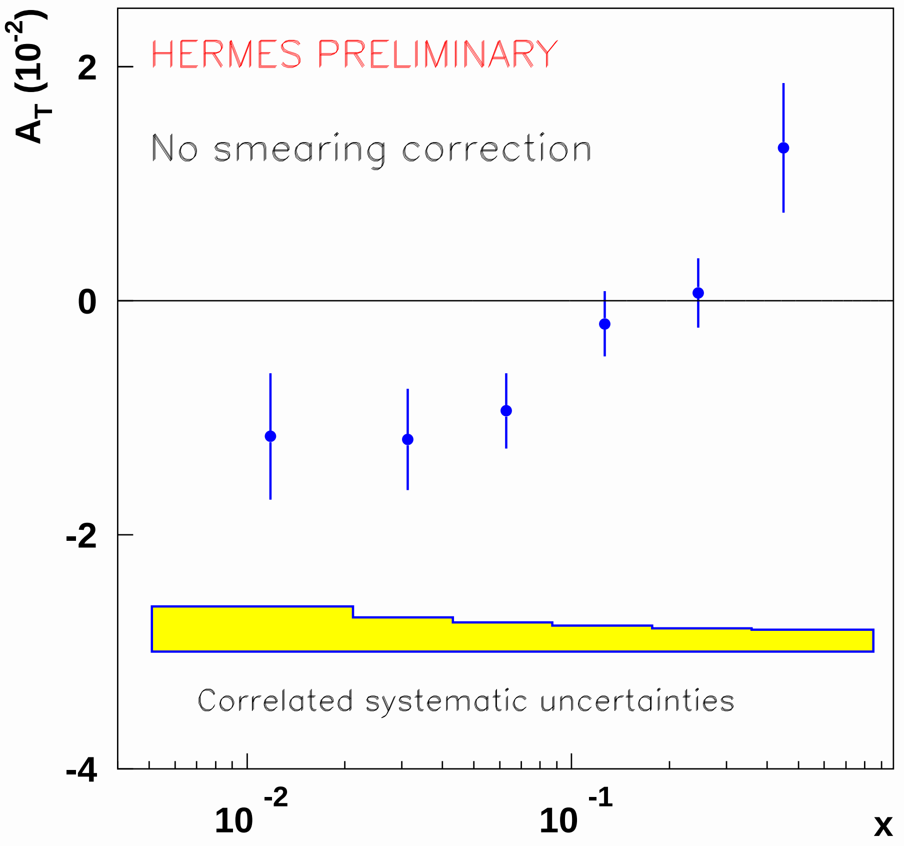
Die Deuteron–Strukturfunktion $b_1^d(x)$

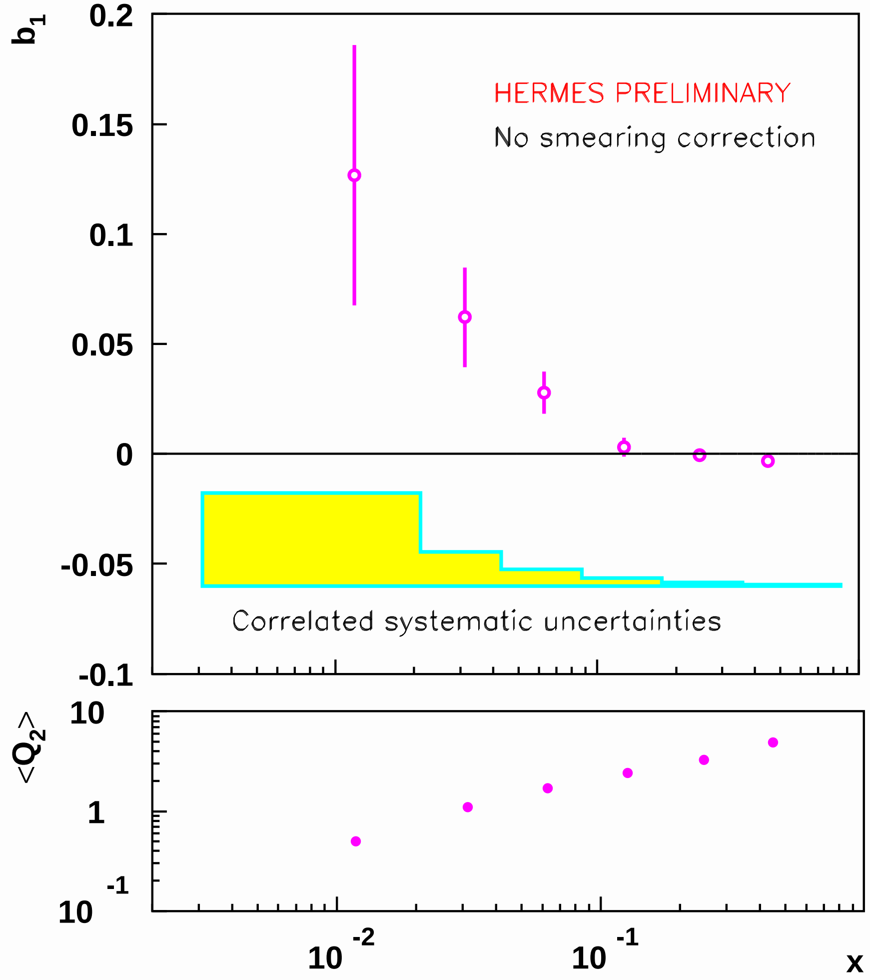


	Proton	Deuteron
$F_1(x)$:	$\frac{1}{2}\sum_f e_f^2 \left[q_f^+(x) + q_f^-(x)\right]$	$\frac{1}{3}\sum_f e_f^2 \left[q_f^+(x) + q_f^-(x) + \mathbf{q_f^0(x)}\right]$
$g_1(x)$:	$\frac{1}{2}\sum_f e_f^2 \left[q_f^+(x) - q_f^-(x)\right]$	$\frac{1}{2}\sum_f e_f^2 \left[q_f^+(x) - q_f^-(x)\right]$
$b_1(x)$:		$\frac{1}{2}\sum_f e_f^2 \left[2\,\mathbf{q_f^0(x)} - \left(q_f^+(x) + q_f^-(x)\right)\right]$

b_1^d ist ein Maß für den Unterschied der Quarkimpulsverteilungen zwischen Targets mit Helizität 0 und 1

Ergebnisse: $b_1^d(x)$



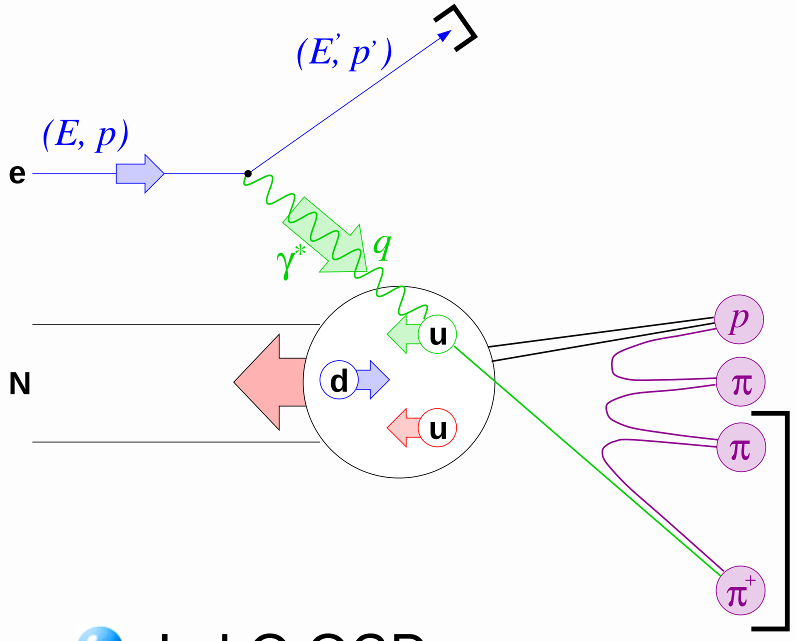


$$A_T = \frac{1}{\langle P_T \rangle} \cdot \frac{\frac{N^+}{\mathcal{L}^+} + \frac{N^-}{\mathcal{L}^-} - 2\,\frac{N^0}{\mathcal{L}^0}}{\frac{N^+}{\mathcal{L}^+} + \frac{N^-}{\mathcal{L}^-} + \frac{N^0}{\mathcal{L}^0}}$$

$$b_1^d = -\frac{3}{2} \cdot A_T \cdot F_1^d$$

- $b_1^d(x) > g_1^d(x) \quad (x \lesssim 0.05)$!

Semi–Inklusive DIS



- In SIDIS $e + p \to e' + h + X$ Korrelation zwischen getroffener Quarksorte q und detektiertem Hadron h

$\Rightarrow$ Trennung der Beiträge von verschiedenen Quarksorten möglich:
$\Delta u, \Delta\bar{u}, \Delta d, \Delta\bar{d}, \Delta s, (\Delta\bar{s})$

- In LO QCD:

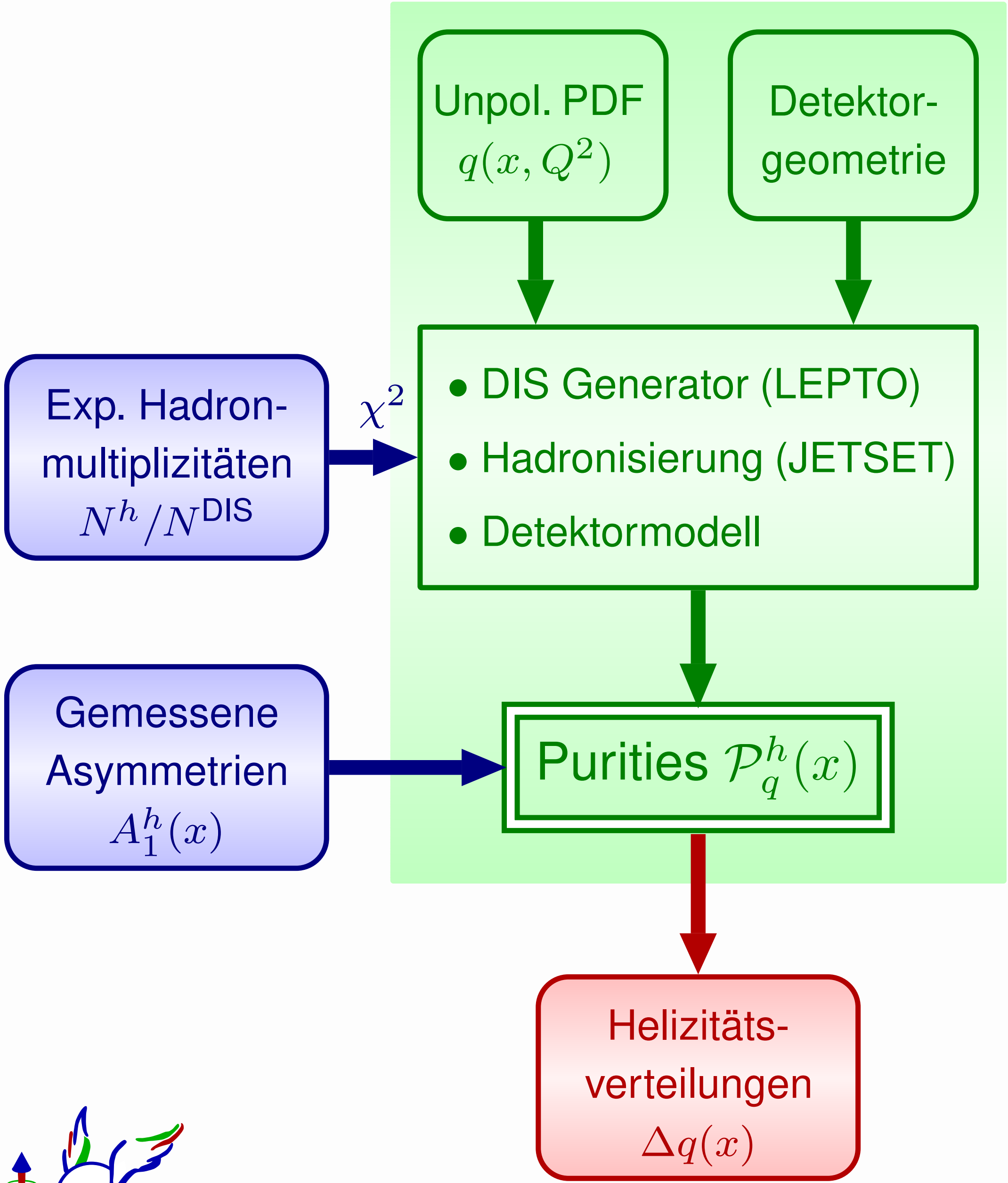
$$A_1^h(x) = \frac{\sigma^h_{1/2} - \sigma^h_{3/2}}{\sigma^h_{1/2} + \sigma^h_{3/2}} \sim \frac{\sum_q e_q^2\, \Delta q(x)\ \int dz\, D_q^h(z)}{\sum_q e_q^2\, q(x)\ \int dz\, D_q^h(z)} = \sum_q \underbrace{\frac{e_q^2\, q(x) \int dz\, D_q^h(z)}{\sum_{q'} e_{q'}^2 q'(x) \int dz\, D_{q'}^h(z)}}_{\equiv \mathcal{P}_q^h(x,z)\ \text{“Purity”}} \cdot \frac{\Delta q(x)}{q(x)}$$

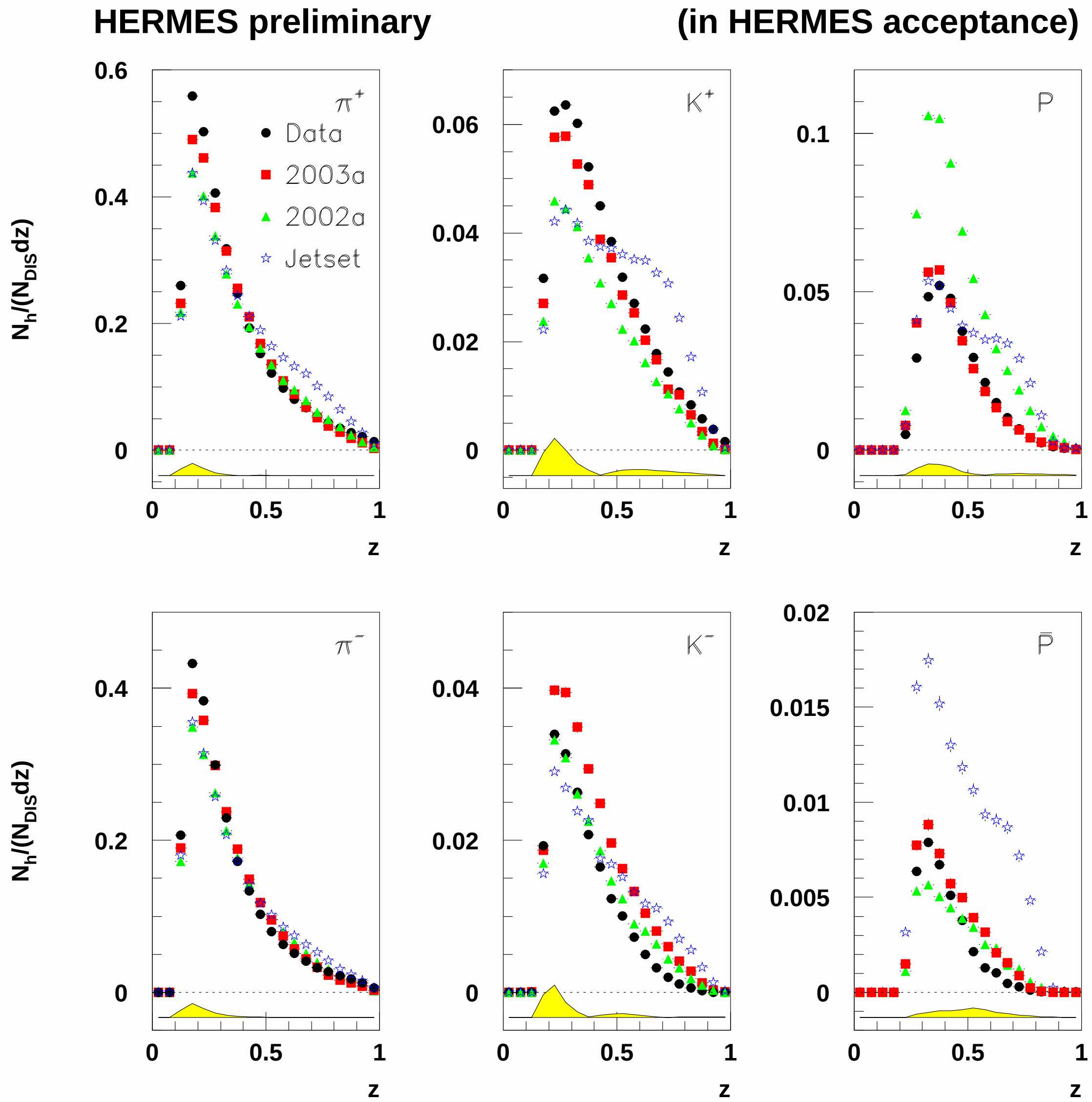
- Lösen eines linearen Gleichungssystems mit

$$\vec{A} = \left(A_{1,p}, A_{1,d}, A_{1,p}^{\pi^\pm}, A_{1,d}^{\pi^\pm}, A_{1,d}^{K^\pm}\right)(x) \text{ und } \vec{Q} = \left(\frac{\Delta u}{u}, \frac{\Delta\bar{u}}{\bar{u}}, \frac{\Delta d}{d}, \frac{\Delta\bar{d}}{\bar{d}}, \frac{\Delta s}{s}, \frac{\Delta\bar{s}}{\bar{s}} = 0\right)(x)$$

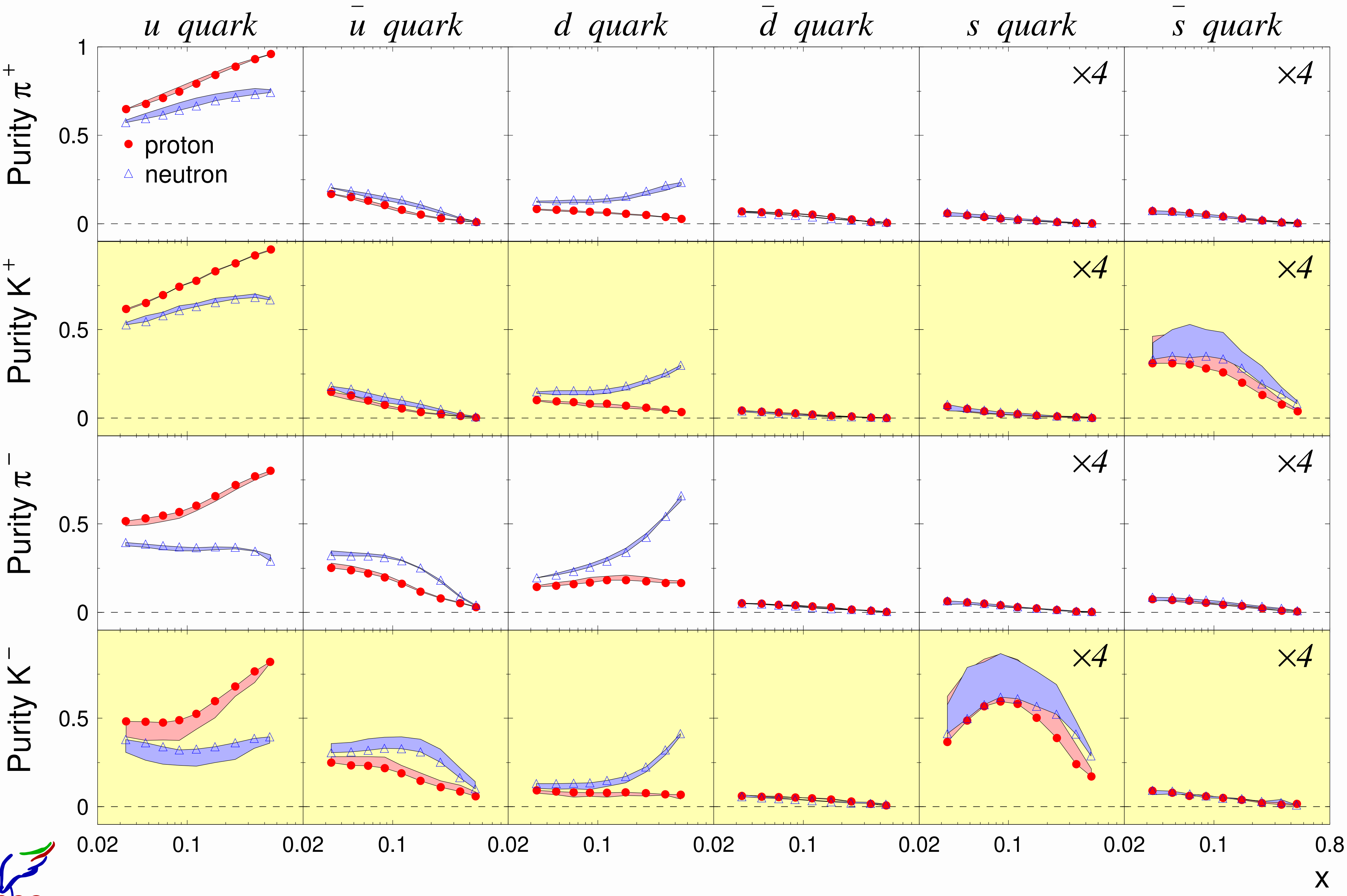
hermes

Monte Carlo Modellierung der Hadronisierung

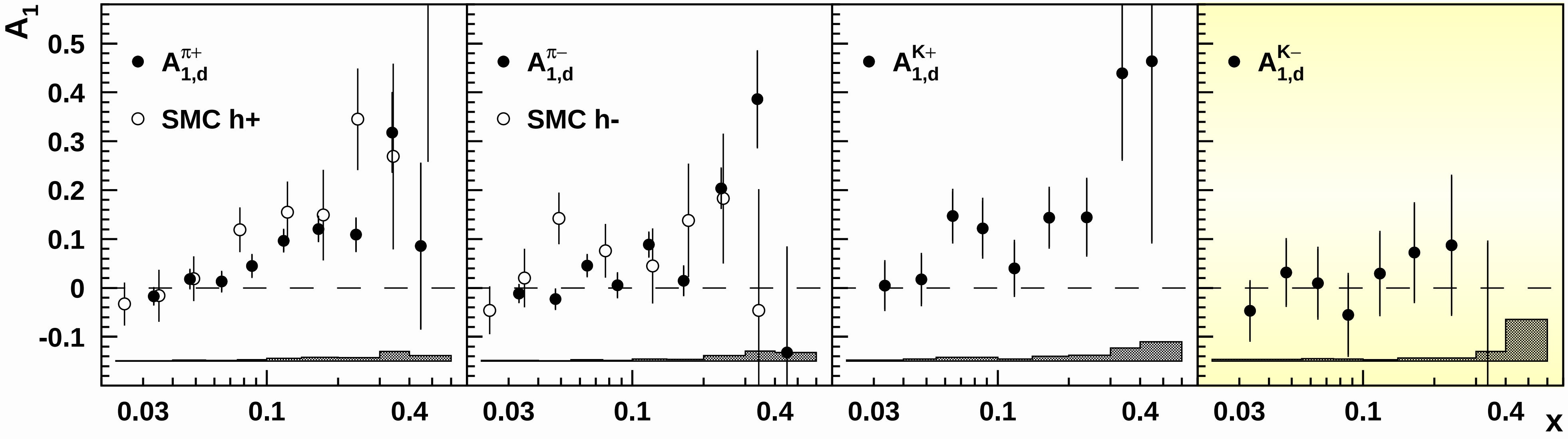




Generierte Purities



Pion– und Kaon–Asymmetrien am Deuteron

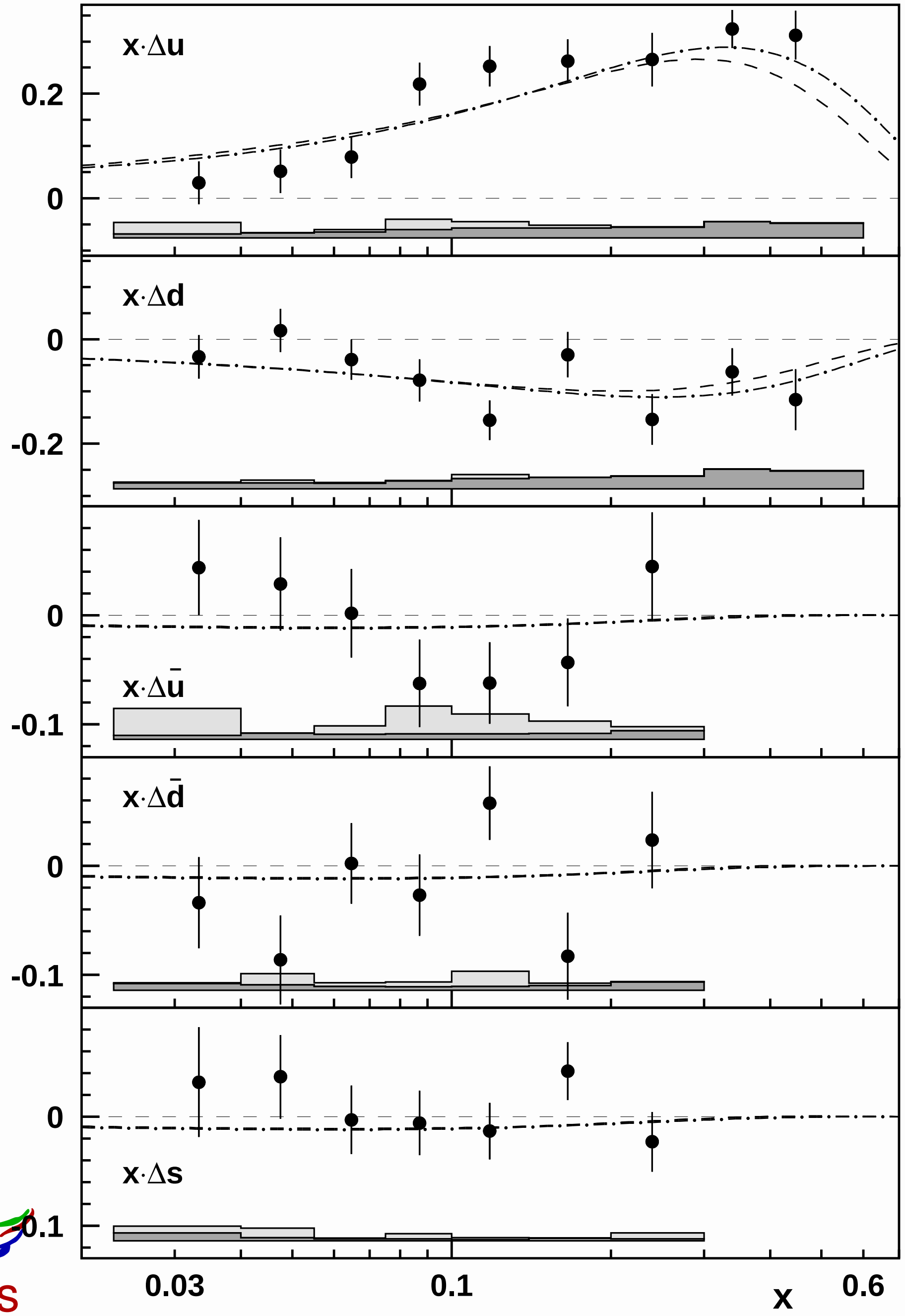


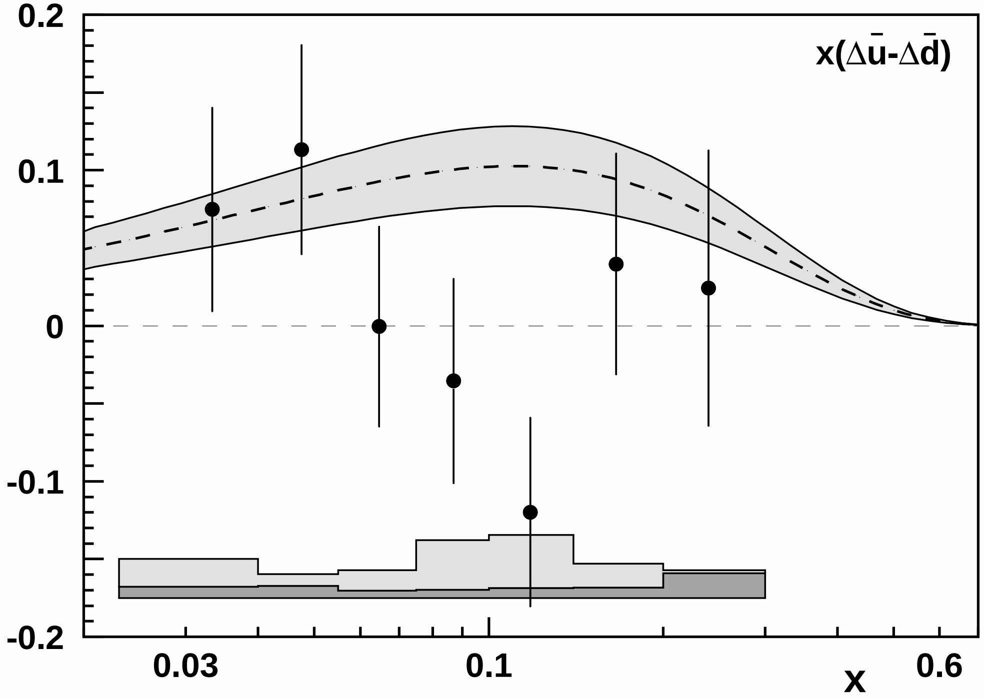
[A. Airapetian et al., hep-ex/0307064]

- Hadronselektion mit $0.2 \leq z = E_h/\nu \leq 0.8, \quad x_F \geq 0.1, \quad W^2 \geq 10$ GeV^2
- $A_1^{K^-}(x) \approx 0$, unterschiedlich von übrigen Asymmetrien
  $\Rightarrow K^- = (\bar{u}s)$
  $\Rightarrow$ Hinweis auf kleine Seequarkpolarisation!
- Statistische Fehler enthalten Beitrag von Entfaltung von QED–Strahlungskorrekturen und kinematischer Verschmierung
- Systematische Unsicherheiten dominiert durch Target– und Strahlpolarisationsmessung

Polarisierte Quarkdichteverteilungen (LO)

[A. Airapetian et al., hep-ex/0307064]

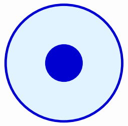
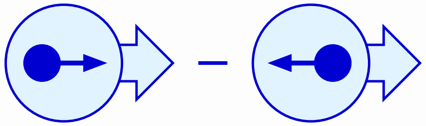
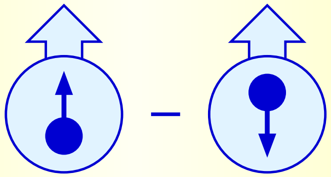




- Resultate konsistent mit $SU(3)_f$ Symmetrieannahme für Seequarksorten
- Keine Bestätigung der Vorhersage für $\Delta\bar{u}(x) - \Delta\bar{d}(x)$ aus dem χQSM

  [B. Dressler et al., Eur. Phys. J. **C14** (2000) 147.]

Die dritte Twist–2 Strukturfunktion: h_1

$f_1^q =$ 	$g_1^q =$ 	$h_1^q =$ 

Unpolarisierte
Quarks und Nukleonen

Vektorladung:

$$\langle PS|\bar{\psi}\gamma^\mu\psi|PS\rangle =$$

$$\int_0^1 dx\, q(x) - \bar{q}(x)$$

$q(x)$: spingemittelte Dichte
gut bekannt

Longitudinal polarisierte
Quarks und Nukleonen

Axiale Ladung:

$$\langle PS|\bar{\psi}\gamma^\mu\gamma_5\psi|PS\rangle =$$

$$\int_0^1 dx\, \Delta q(x) + \Delta\bar{q}(x)$$

$\Delta q(x)$: Helizitätsdichte
bekannt

HERMES: 1995 - 2000

Transversal polarisierte
Quarks und Nukleonen

Tensorladung:

$$\langle PS|\bar{\psi}\sigma^{\mu\nu}\gamma_5\psi|PS\rangle =$$

$$\int_0^1 dx\, \delta q(x) - \delta\bar{q}(x)$$

$\delta q(x)$: Helizitätsflip
chiral ungerade!
unbekannt

HERMES: 2002...

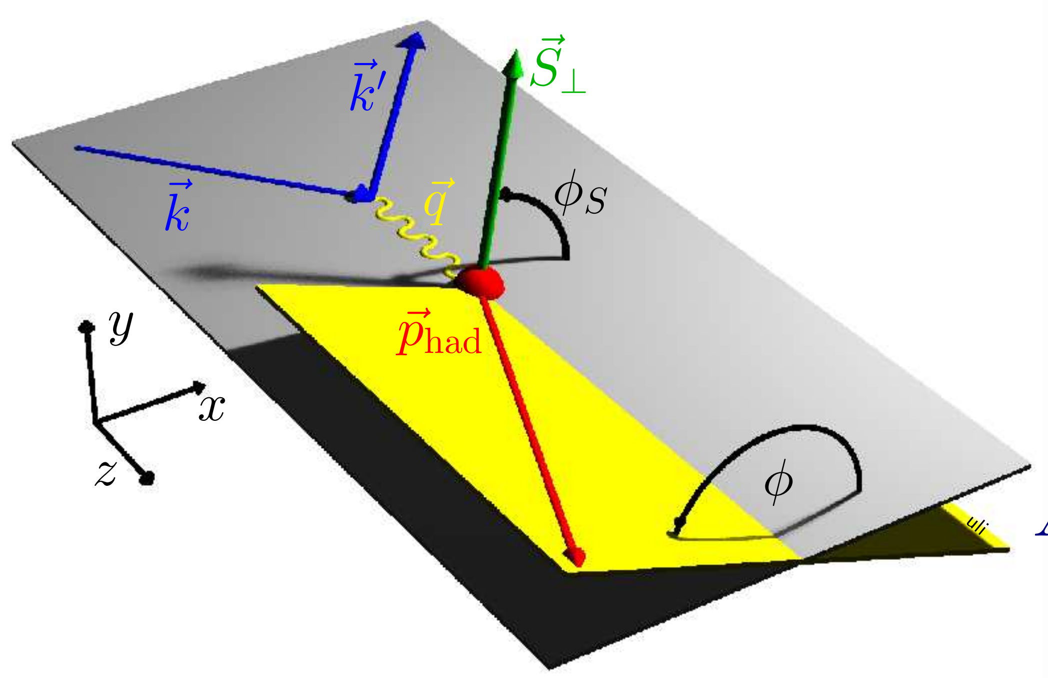
Transversal polarisierte Targetspinasymmetrien

$$ep^{\uparrow} \longrightarrow e'\pi X$$

$$\sigma^{ep\to e\pi X} = \sum_q f^{N\to q} \otimes \sigma^{eq\to eq} \otimes D^{q\to\pi}$$

$f^{N\to q}$: *Verteilungsfunktion* — ungerade Chiralität

$D^{q\to\pi}$: *Fragmentationsfkt.* — ungerade Chiralität



Collins–Winkel: $\Phi \equiv \phi + \phi_S$

$$A_{UT}^{\sin\Phi} \propto \frac{\sum_{i=1}^{N^+} \sin\Phi - \sum_{i=1}^{N^-} \sin\Phi}{\left(N^+ + N^-\right)/2}$$

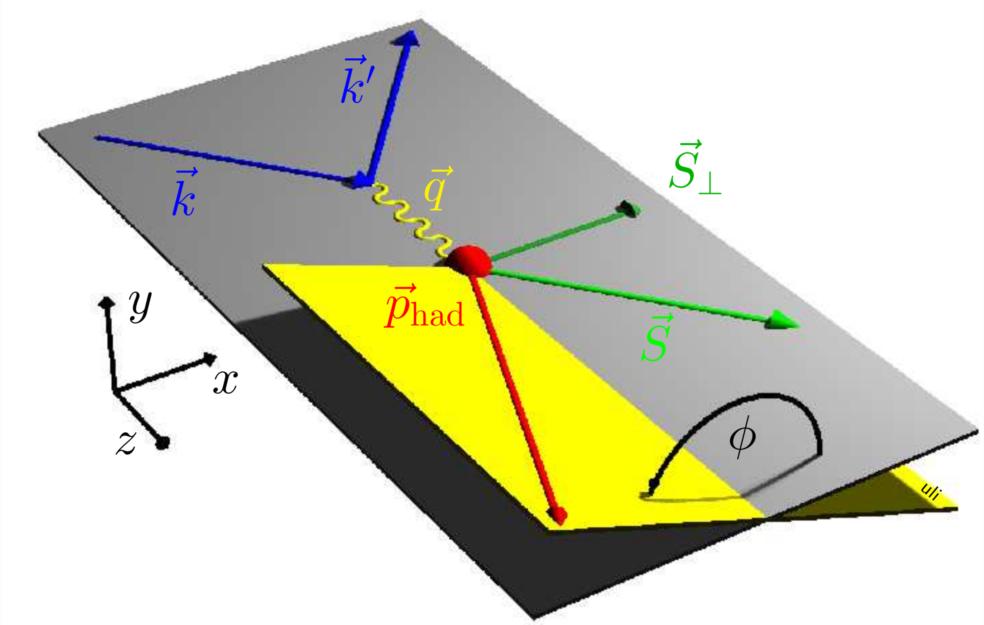
$$A_{UT}^{\sin\Phi} \propto \frac{\sum_q e_q^2\, \delta q(x)\, H_1^{\perp,q}(z)}{\sum_q e_q^2\, q(x)\, D_1^q(z)}$$

$H_1^{\perp,q}(z)$: Collins Fragmentationsfunktion

hermes

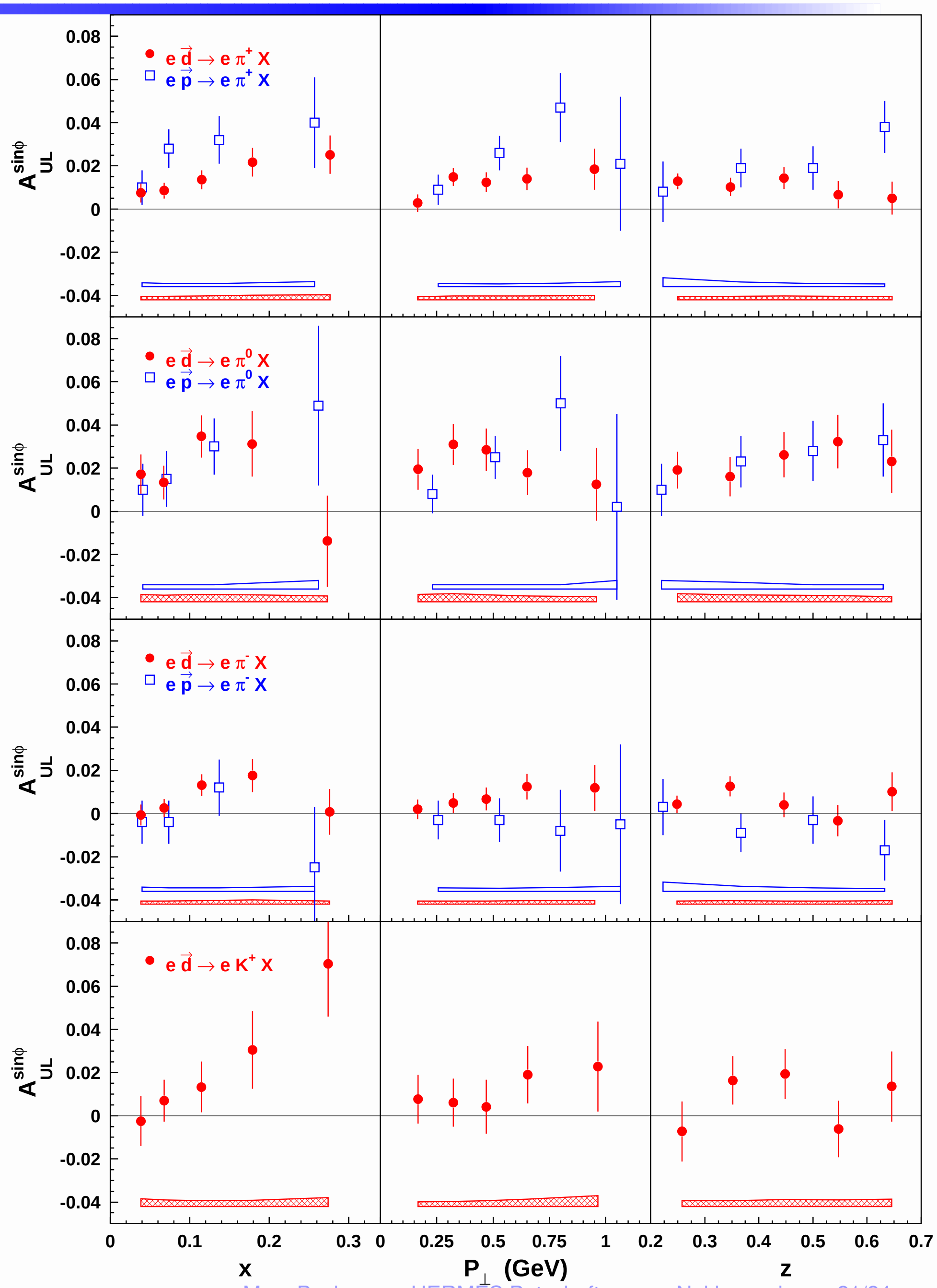
Der erste Blick auf Transversity?

Messungen an **longitudinal** polarisierten $\vec{\mathrm{H}}$– und $\vec{\mathrm{D}}$–Targets:



Transversale Komponente $S_\perp$ der Targetpolarisation im $\gamma^* N$–System:

$$S_\perp \propto \sin\Theta_\gamma \simeq \frac{2Mx}{Q}\sqrt{1-y} \overset{\text{HERMES}}{\sim} \mathbf{0.15}$$



Mögliche Interpretationen...

- Grundsätzlich verschiedene Erklärungsmöglichkeiten einer ϕ–Asymmetrie an **longitudinal** polarisiertem Target:
  - Collins–Effekt $\rightarrow$ χQSM + “DELPHI–motivierte Annahme”: $|H_1^\perp/D_1| \simeq 12.5\%$
    [A.V. Efremov et al., Eur. Phys. J. **C24** (2002) 407.]
  - Sivers–Funktion [Sivers, Mulders et al.] $\longrightarrow$ $\langle\sin\phi\rangle_{\mathrm{UL}} \propto f_{1T}^{\perp(1)} \cdot D_1$
- **Longitudinal polarisiertes Target:** Collins– und Sivers–Effekt ununterscheidbar
- **Transversal polarisiertes Target:**
  - Collins– und Sivers–Effekt unterscheidbar:

    $\langle\sin(\phi_h - \phi_S)\rangle$ Moment $\longleftrightarrow$ $\langle\sin(\phi_h + \phi_S)\rangle$ Moment
  - Grössere Asymmetrien $\langle\sin\phi\rangle_{\mathrm{UT}}$ erwartet

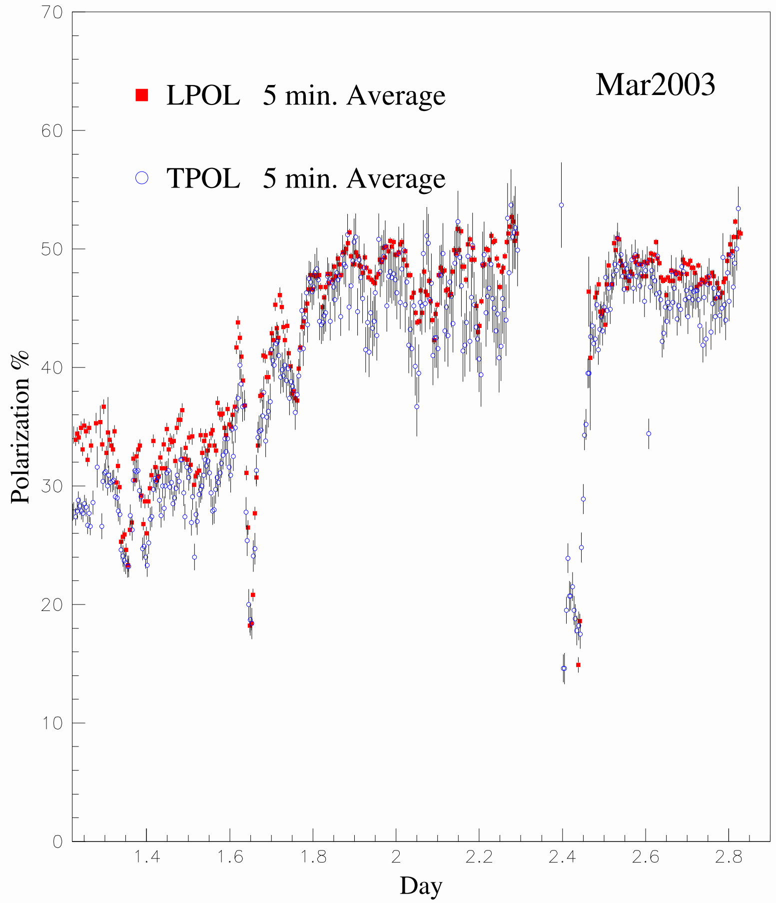
Zusammenfassung

- Inklusive Messungen
  - Sehr präzise Resultate für $g_1(x, Q^2)$ am Proton und Deuteron
  - $\Rightarrow$ NLO–QCD Fits: $\Delta\Sigma(x)$ und $\Delta q^{\mathrm{NS}}(x)$ gut bestimmt, $\Delta G(x) > 0$ mit erheblichen Unsicherheiten
  - Erste Messung von $b_1^d(x)$
- Semi–inklusive Messungen
  - Resultate für $\Delta u(x)$, $\Delta\bar{u}(x)$, $\Delta d(x)$, $\Delta\bar{d}(x)$ und $\Delta s(x)$ ohne Symmetrieannahmen
  - $\Rightarrow$ Konsistenz mit NLO–Fits an inklusive Daten
  - $\Rightarrow$ $\Delta\bar{u}(x) - \Delta\bar{d}(x)$ bestätigt nicht Vorhersage aus χQSM
  - Resultate für $A_{\mathrm{UL}}^{\sin\phi}$ für π^+, π^0, π^-, sowie K^+
- Transversity
  - Datennahme an transversal polarisiertem H$^\uparrow$–Target erfolgreich gestartet
  - Erste Resultate sind bald zu erwarten. . .

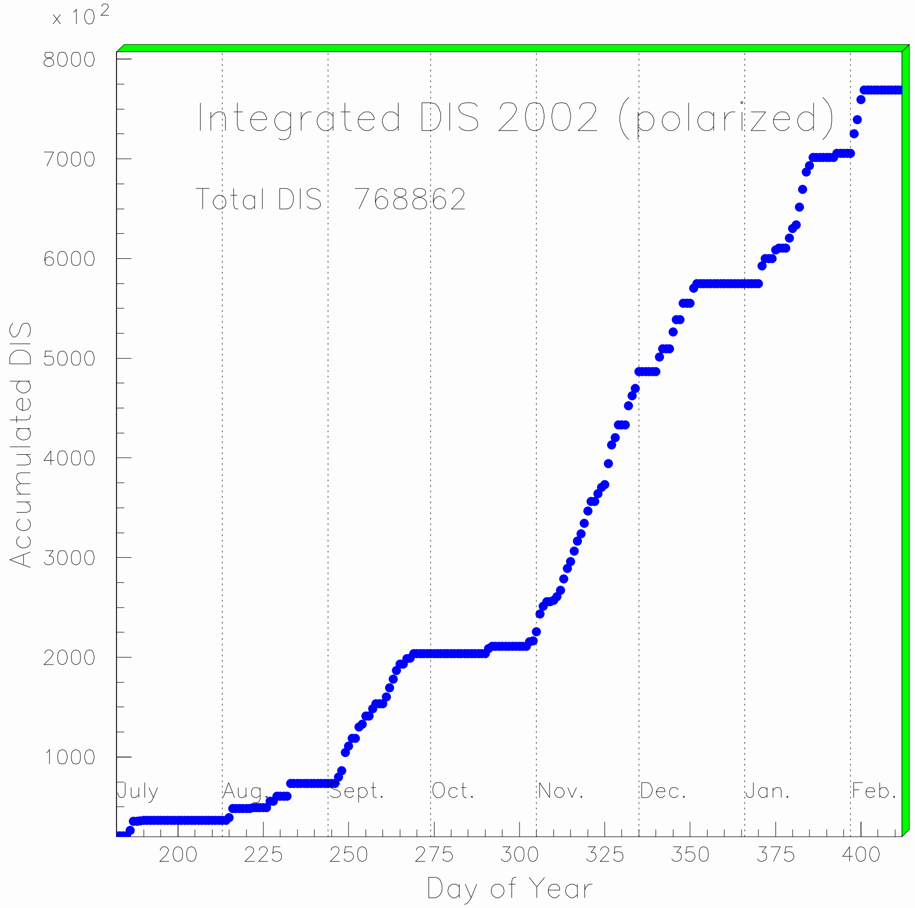
Perspektiven nach dem HERA Luminositätsupgrade

- Erste Datennahme in 2002 nach langer HERA–Umbauphase:

Erstmals **longitudinale** Strahlpolarisation gleichzeitig bei HERMES, H1 und ZEUS!



Datennahme am transversal polarisierten $H^{\uparrow}$–Target:



Positive Aussichten für 2003 . . . !