

Untersuchung der Spinstruktur des Nukleons am COMPASS Experiment

Malte Wilfert

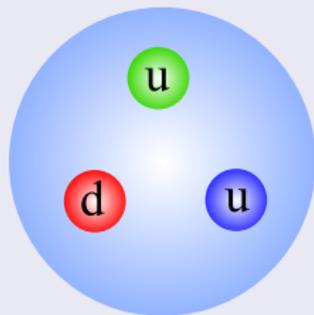
Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Promotionsvortrag
4. Juli 2017



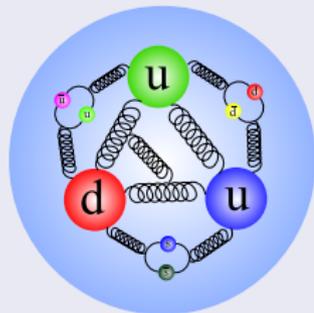
- 1 Motivation
- 2 COMPASS Experiment & neue Daten
- 3 Ergebnisse
 - Asymmetrien und Strukturfunktionen
 - NLO QCD Analyse, systematische Studien
 - Erste Momente
- 4 Zusammenfassung

Naives Quark-Parton-Modell (QPM)



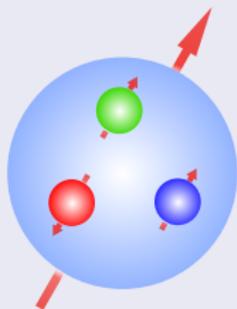
- Drei Valenzquarks
- Zwei Quarktypen q (up (u), down (d))
- Isospindublett ($p = uud$, $n = udd$)

QCD erweitertes Quark-Parton-Modell



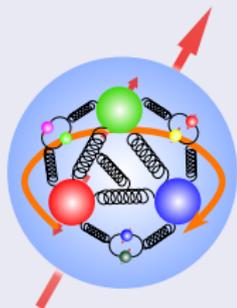
- Gluonen ($g \rightarrow q\bar{q}$)
- Seequarks (q, \bar{q})
- Mehr Quarktypen ($u, d, s, \bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \dots$)
- Abhängig von Auflösung

Naive Erwartung



- Drei Valenzquarks mit Spin $1/2$
- Kombination der Spins: $\uparrow\uparrow\downarrow$
- Ergibt den Nukleon Spin $1/2$

Realistisches Modell



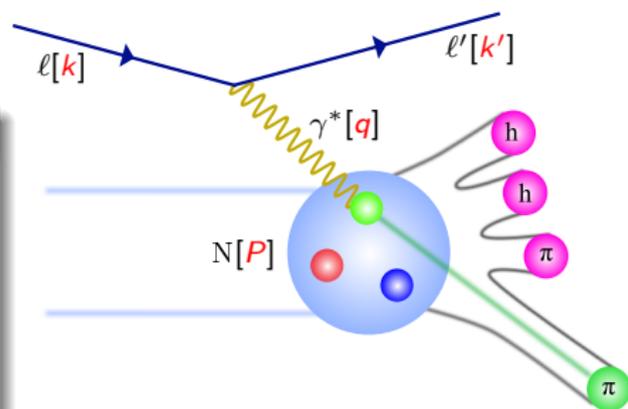
- Beitrag der Quarks $\Delta\Sigma?$
- Beitrag der Gluonen $\Delta G?$
- Beitrag von Bahndrehimpulsen $L?$
- $S_z = \frac{1}{2} = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta G + L$
- Abhängig von Auflösung

Tiefinelastische Lepton-Nukleon-Streuung (DIS)

$$\ell + N \longrightarrow \ell' + X$$

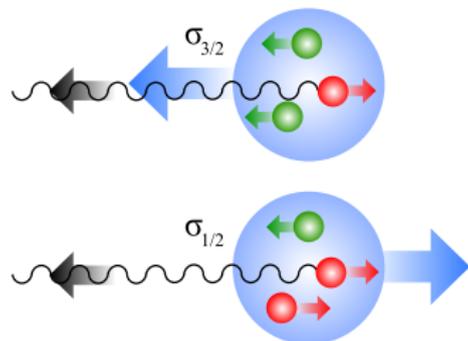
DIS Variablen

- Photonvirtualität: $Q^2 = -q^2$
- Bjorken Skalenvariable: $x = \frac{Q^2}{2 \cdot P \cdot q}$
- Relative Photonenergie: $y = \frac{E - E'}{E}$
- Invariante Masse: $W^2 = (P + q)^2$



- Inklusiver Wirkungsquerschnitt (nur einlaufendes/gestreutes Lepton)
- Bestimmung von Strukturfunktionen F_1, F_2
- Extraktion von Partonverteilungen $q(x, Q^2)$ über Strukturfunktionen
- Erweitertes QPM: Q^2 als weitere Variable

Doppelt polarisierte tiefinelastische Streuung



- Absorption polarisierter Photonen

$$\sigma_{1/2} \sim q^+$$

$$\sigma_{3/2} \sim q^-$$

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

- Photon-Nukleon Asymmetrie

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

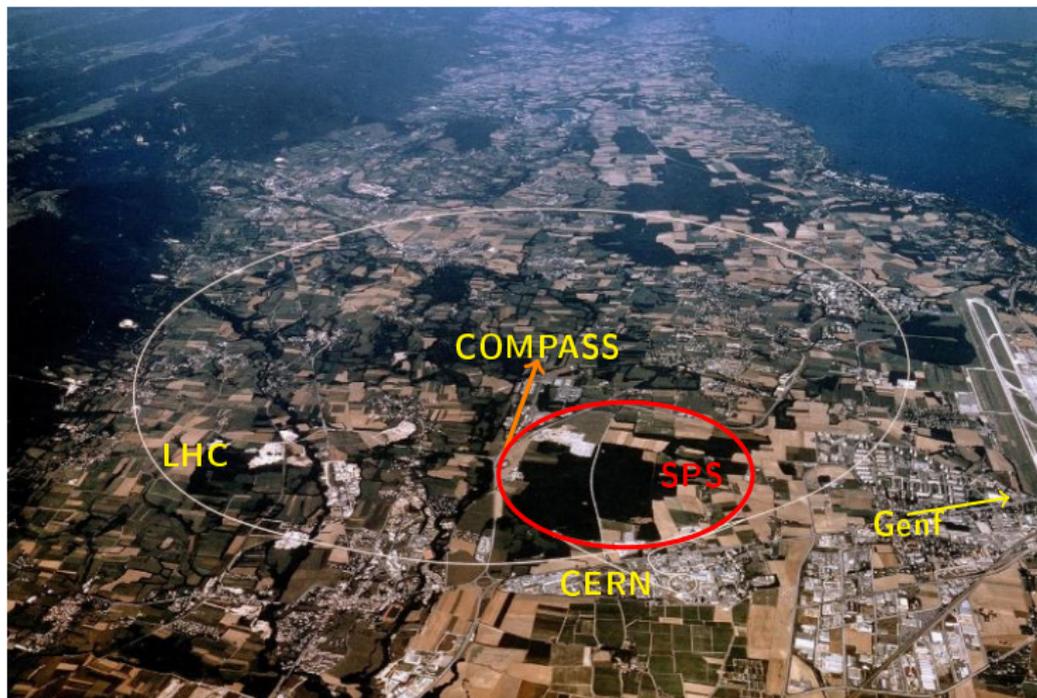
- Spinstrukturfunktion

$$g_1(x, Q^2) = A_1(x, Q^2) \cdot F_1(x, Q^2) \stackrel{\text{QPM}}{=} \frac{1}{2} \sum_q e_q^2 \Delta q(x)$$

SPS Protonstrahl: 400 GeV/c

Sekundärer Hadronstrahl (p, π, K): 150 – 270 GeV/c

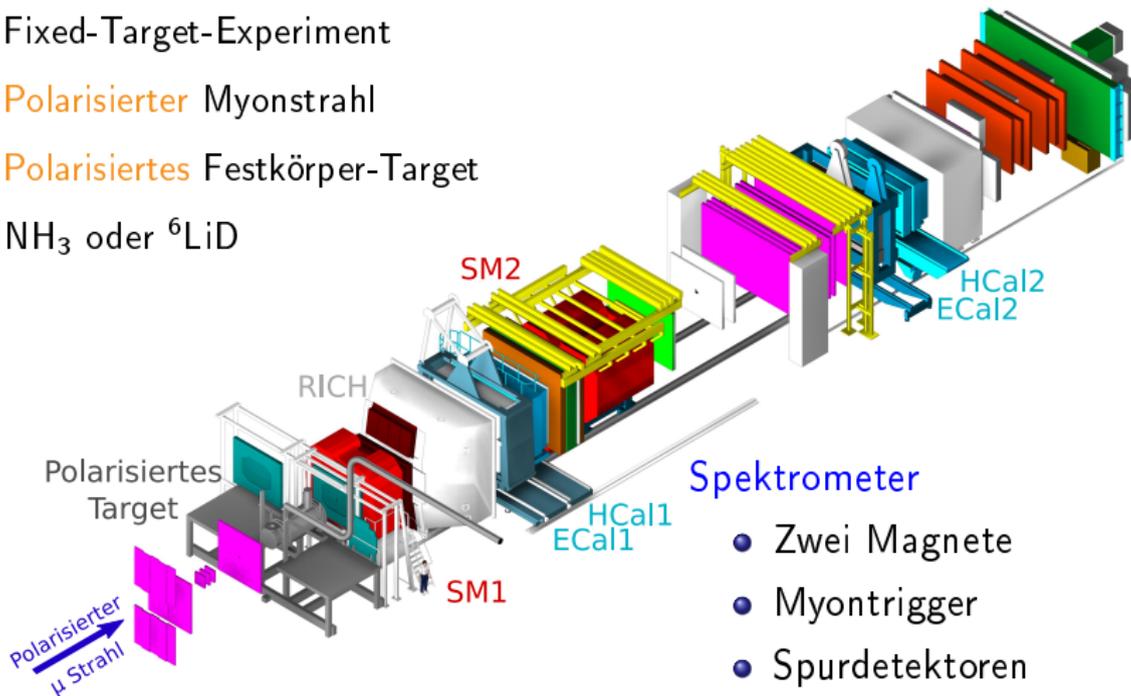
Tertiärer polarisierter Myonstrahl ($\sim 80\%$): 100 – 200 GeV/c



Das COMPASS Experiment

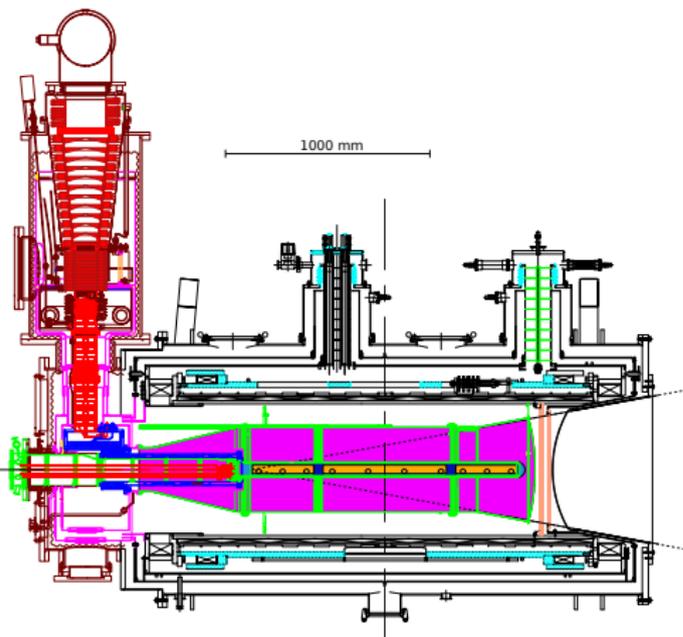
COmmon MUon and PROton APPARATUS for STRUCTURE and SPECTROSCOPY

- Fixed-Target-Experiment
- Polarisierter Myonstrahl
- Polarisiertes Festkörper-Target
- NH_3 oder ${}^6\text{LiD}$



Spektrometer

- Zwei Magnete
- Myontrigger
- Spurdetektoren
- Teilchenidentifikation



- Benötigt: Polarisierte p, d
→ Festkörper-Target
- Polarisation durch DNP
(Dynamic Nuclear Polarisation)
- Starkes Magnetfeld:
2.5 T Solenoidfeld
- Niedrige Temperatur: 50 mK
- ${}^6\text{LiD}$ (Longitudinale
Deuteron-Polarisation: $\sim 50\%$)
- NH_3 (Longitudinale
Proton-Polarisation: $\sim 90\%$)
- Große geometrische Akzeptanz
(180 mrad)

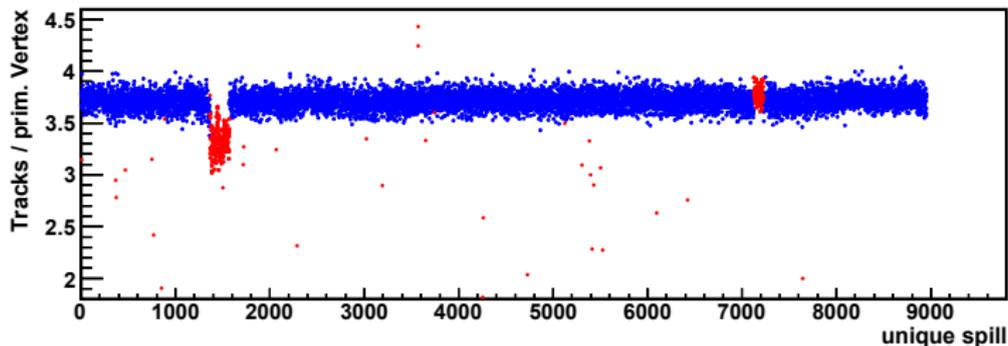
LiD Target

- 2002-2004: 160 GeV Myonstrahl
- 2006: 160 GeV Myonstrahl

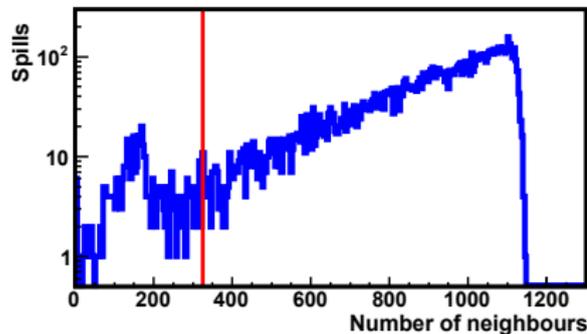
NH₃ Target

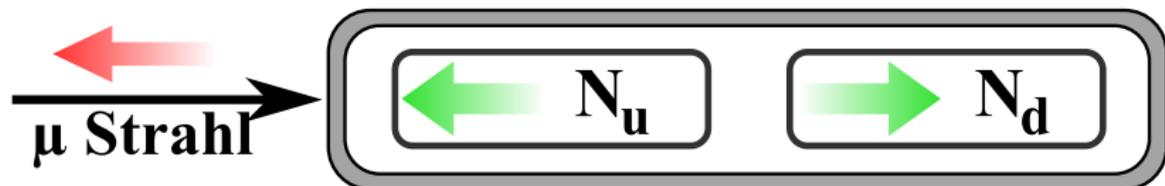
- 2007: 160 GeV Myonstrahl
 - 2011: 200 GeV Myonstrahl
 - Höhere Q^2
 - Kleinere x
-
- Analyse in zwei kinematischen Bereichen
 - $Q^2 > 1 \text{ (GeV/c)}^2$: Erlaubt perturbative Berechnungen
 - $Q^2 < 1 \text{ (GeV/c)}^2$: Nicht perturbativer Bereich, empirisch Interessant

Überprüfung der Datenqualität



- Überprüfung von Mittelwerten verschiedener Größen
 - Anzahl primärer Vertices pro Ereignis
 - Anzahl an Spuren pro primärem Vertex
 - ...
- Vergleich mit zeitlichen Nachbarn
- Einfluss von:
 - Problemen im Spektrometer
 - Problemen in der Strahlführung





- Gesucht:

$$A = \frac{\sigma^{\uparrow\downarrow} - \sigma^{\uparrow\uparrow}}{\sigma^{\uparrow\downarrow} + \sigma^{\uparrow\uparrow}}$$

- Gemessen:

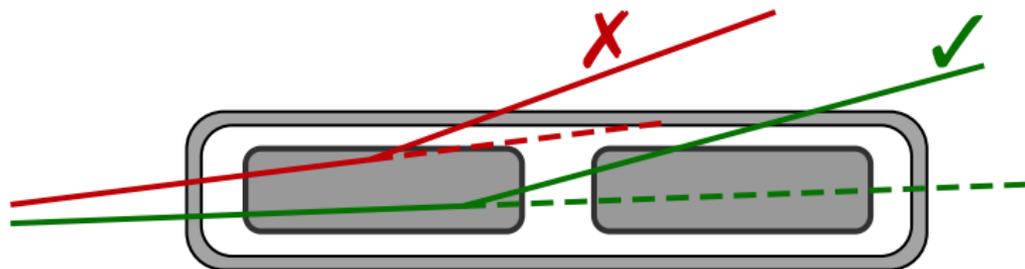
$$A_{exp} = \frac{N_u - N_d}{N_u + N_d}$$

- $N \sim \sigma \cdot \text{Fluss} \cdot \text{Akzeptanz}$

- Benötigt:

- Flussverhältnis = 1
- Akzeptanzverhältnis = 1
→ Rotation der Polarisation
→ 2/3 Targetzellen

Methode zur Asymmetriebestimmung



- Gesucht:

$$A = \frac{\sigma^{\uparrow\downarrow} - \sigma^{\uparrow\uparrow}}{\sigma^{\uparrow\downarrow} + \sigma^{\uparrow\uparrow}}$$

- Gemessen:

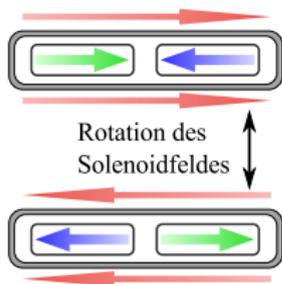
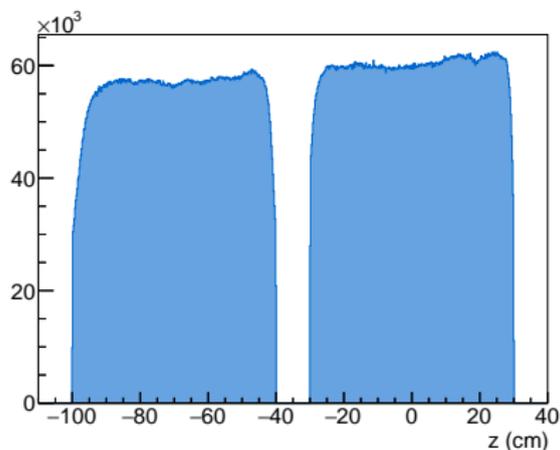
$$A_{exp} = \frac{N_u - N_d}{N_u + N_d}$$

- $N \sim \sigma \cdot \text{Fluss} \cdot \text{Akzeptanz}$

- Benötigt:

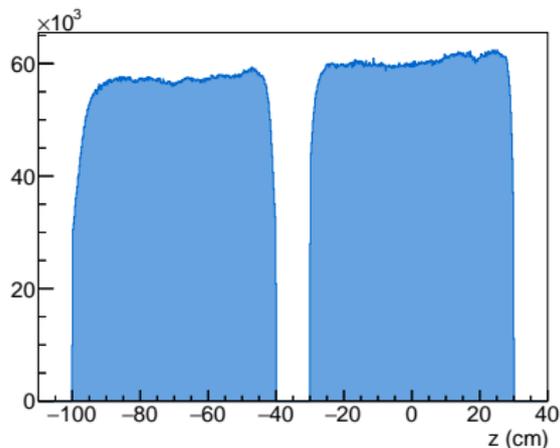
- Flussverhältnis = 1
- Akzeptanzverhältnis = 1
→ Rotation der Polarisation
→ 2/3 Targetzellen

Beseitigung der Abhängigkeit von der Akzeptanz

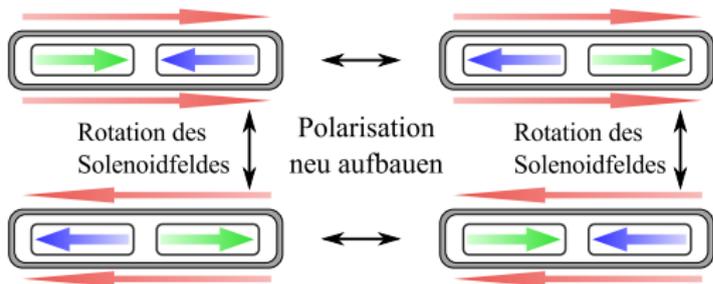


- Akzeptanz ändert sich mit z
 - Zwei/Drei Targetzellen mit entgegengesetzter Polarisation
 - Simultane Messung mit beiden Polarisationen
 - Regelmäßige Änderung der Polarisation:
 - Rotation des Solenoidfeldes
 - Neu polarisieren
- Aufhebung residueller Effekte durch Feldrichtung

Beseitigung der Abhängigkeit von der Akzeptanz



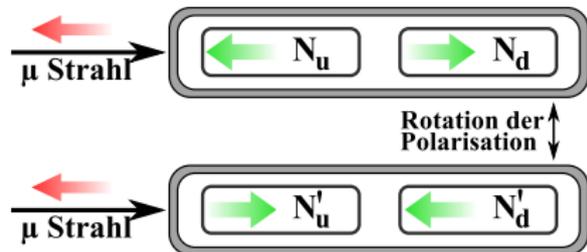
- Akzeptanz ändert sich mit z
- Zwei/Drei Targetzellen mit entgegengesetzter Polarisation
- Simultane Messung mit beiden Polarisationen
- Regelmäßige Änderung der Polarisation:



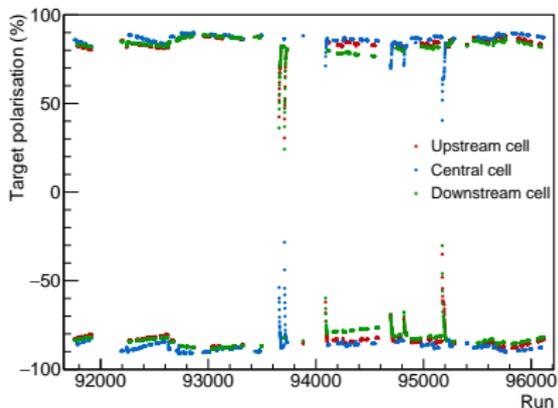
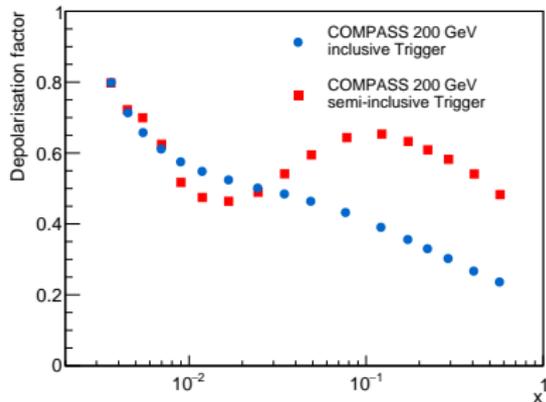
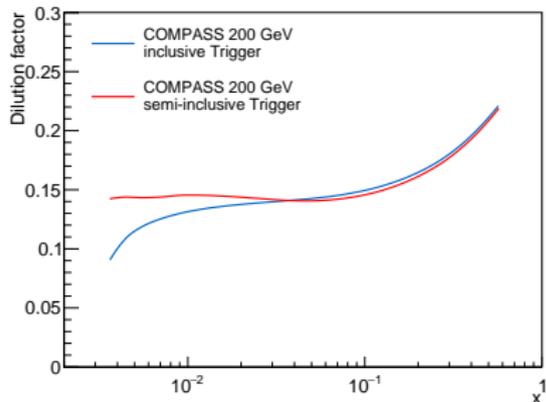
- Rotation des Solenoidfeldes
 - Neu polarisieren
- Aufhebung residueller Effekte durch Feldrichtung

Berechnung der Asymmetrie

- Anzahl an Interaktionen in einer Zelle: $N_i = a_i \phi_i n_i \bar{\sigma} (1 + fDP_B P_T A_1)$
 - Akzeptanz: a_i
 - Fluss: ϕ_i
 - Anzahl Targetnukleonen: n_i
 - Spinunabhängiger Wirkungsquerschnitt: $\bar{\sigma}$
- Nutze Gewichte: $w = fDP_B$
- Berechne $\Omega_j = \sum_{\text{Daten}} w_i$
- Berechne A_1 aus $\delta = \frac{\Omega_u \Omega'_d}{\Omega'_u \Omega_d}$
 $\rightarrow aA_1^2 + bA_1 + c = 0$
- P_T nicht im Gewicht:
 - Zeitliche Änderung
 - Quelle falscher Asymmetrien
- Mittelwerte: $\langle x \rangle = \frac{\sum w \cdot w \cdot x}{\sum w \cdot w}$



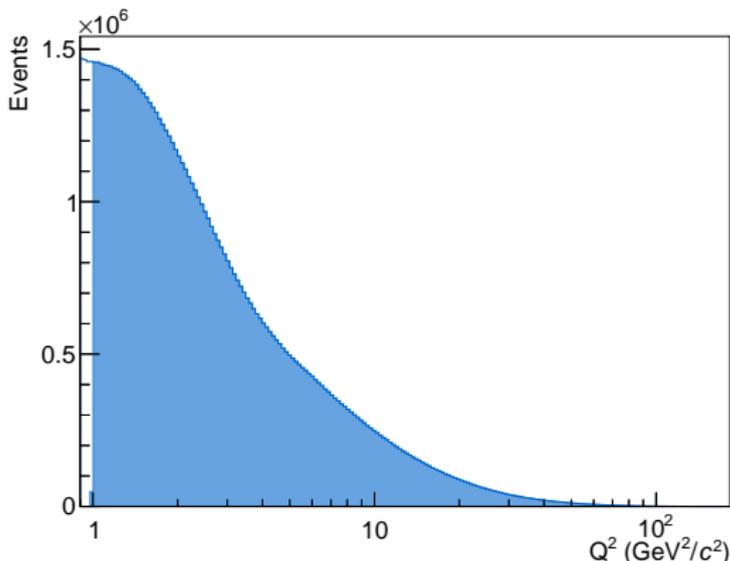
Beiträge zur Asymmetriestimmung



- $A_{exp} = A_1 \cdot P_B \cdot P_T \cdot f \cdot D$
- D : Depolarisationsfaktor
- f : Verdünnungsfaktor
- P_T : Targetpolarisation
- P_B : Strahlpolarisation \rightarrow Simulation
- Berechne Asymmetrie für Gruppen

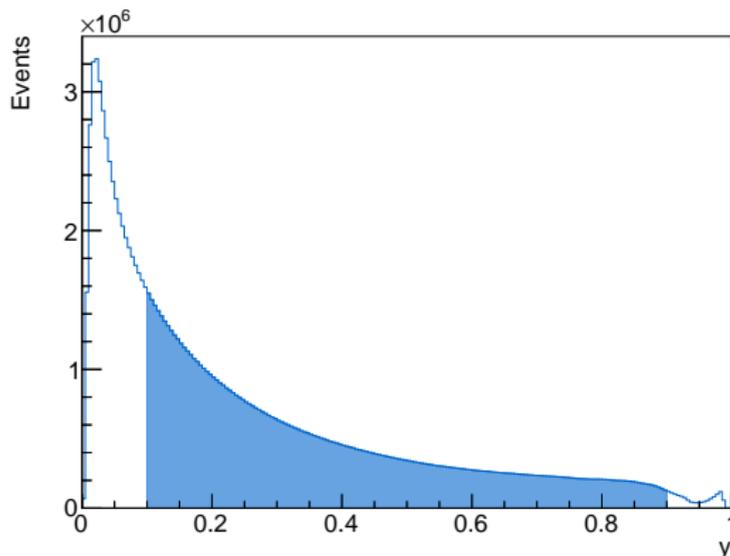
Ereignisselektion

- Vertex im Targetmaterial
 - Spur des einlaufenden Myons hätte alle Targetzellen durchquert
 - $Q^2 > 1 (\text{GeV}/c)^2$
 - $0.1 < y < 0.9$
- $\Rightarrow 0.0025(0.004) < x < 0.7$
- $\Rightarrow W^2 > 5 (\text{GeV}/c^2)^2$



Ereignisselektion

- Vertex im Targetmaterial
 - Spur des einlaufenden Myons hätte alle Targetzellen durchquert
 - $Q^2 > 1 (\text{GeV}/c)^2$
 - $0.1 < y < 0.9$
- $\Rightarrow 0.0025(0.004) < x < 0.7$
- $\Rightarrow W^2 > 5 (\text{GeV}/c^2)^2$

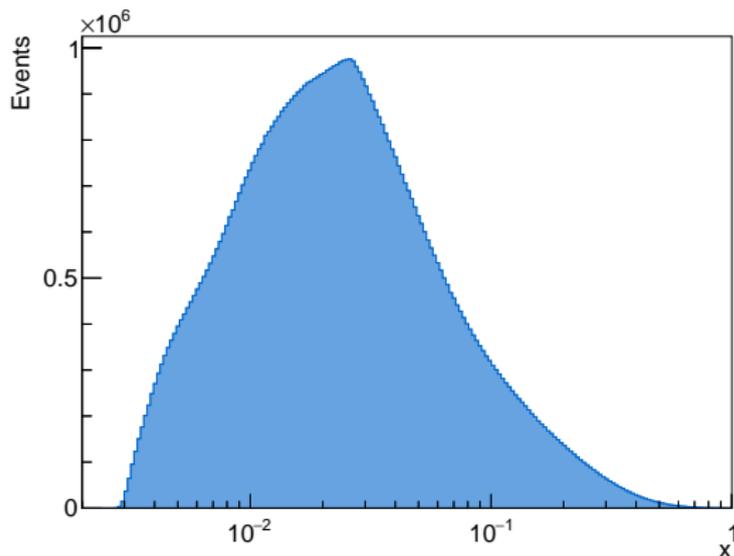


Ereignisselektion

- Vertex im Targetmaterial
- Spur des einlaufenden Myons hätte alle Targetzellen durchquert
- $Q^2 > 1 (\text{GeV}/c)^2$
- $0.1 < y < 0.9$

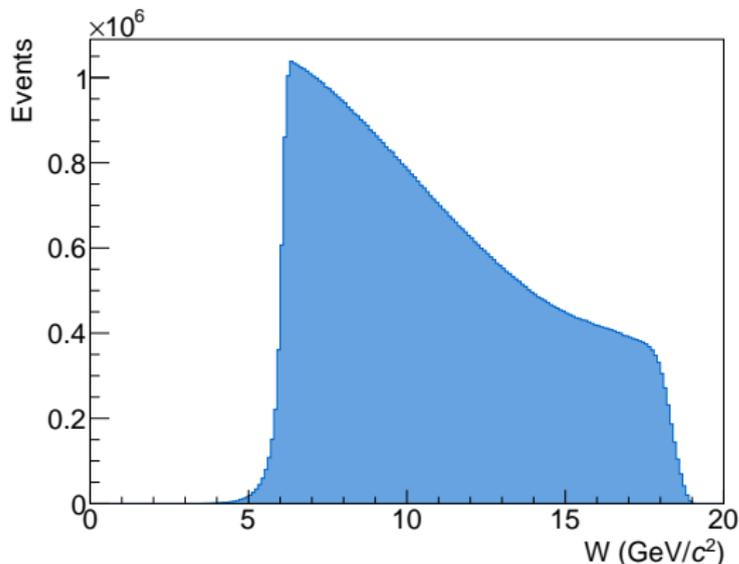
$$\Rightarrow 0.0025(0.004) < x < 0.7$$

$$\Rightarrow W^2 > 5 (\text{GeV}/c^2)^2$$



Ereignisselektion

- Vertex im Targetmaterial
 - Spur des einlaufenden Myons hätte alle Targetzellen durchquert
 - $Q^2 > 1 (\text{GeV}/c)^2$
 - $0.1 < y < 0.9$
- $\Rightarrow 0.0025(0.004) < x < 0.7$
- $\Rightarrow W^2 > 5 (\text{GeV}/c^2)^2$

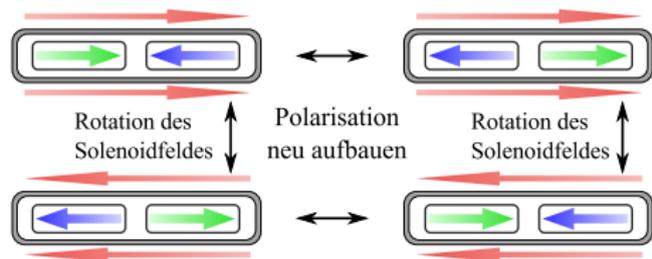
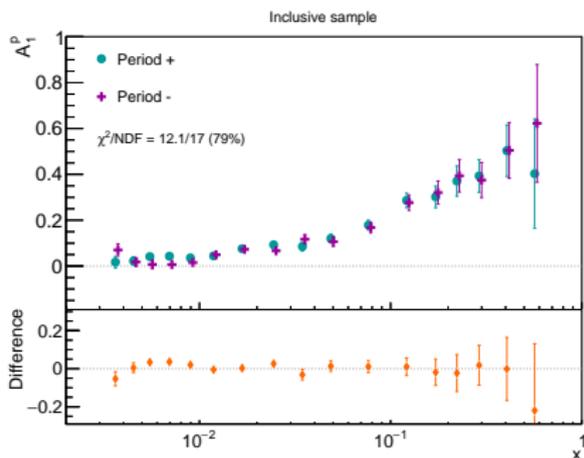


Systematische Studien

- Wichtig: Test der Akzeptanzaufhebung

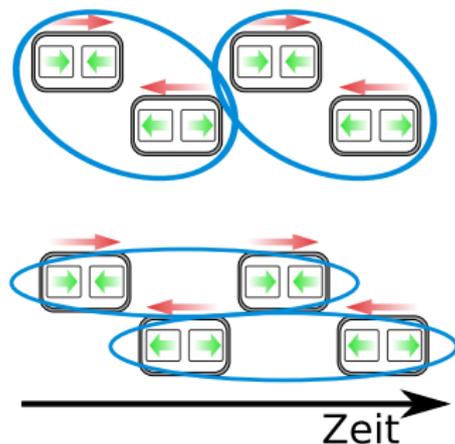
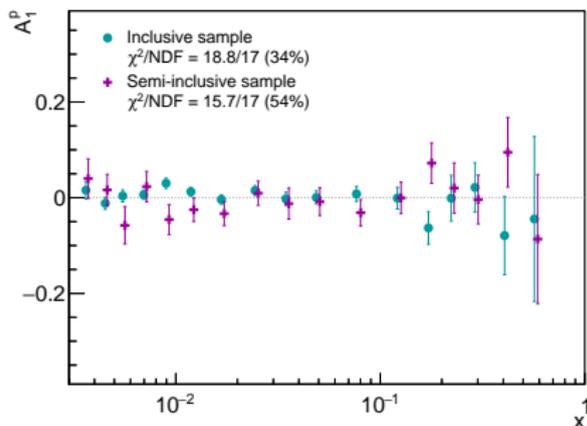
⇒ Suche nach falschen Asymmetrien

- Vergleich der Daten vor/nach dem Neupolarisieren
- Vergleich gleicher Spinkonfigurationen
- ...



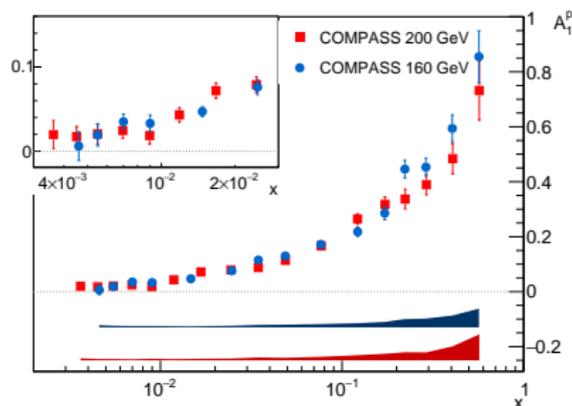
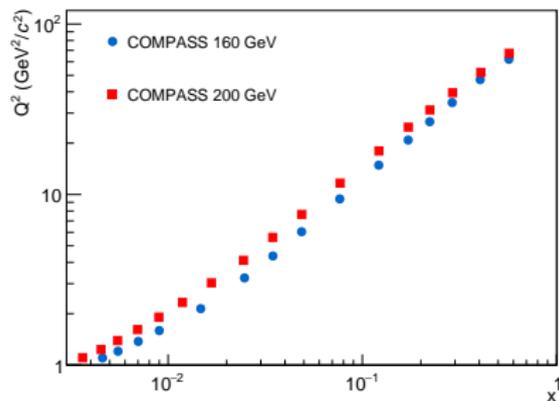
Systematische Studien

- Wichtig: Test der Akzeptanzaufhebung
- ⇒ Suche nach falschen Asymmetrien
 - Vergleich der Daten vor/nach dem Neupolarisieren
 - Vergleich gleicher Spinkonfigurationen
 - ...



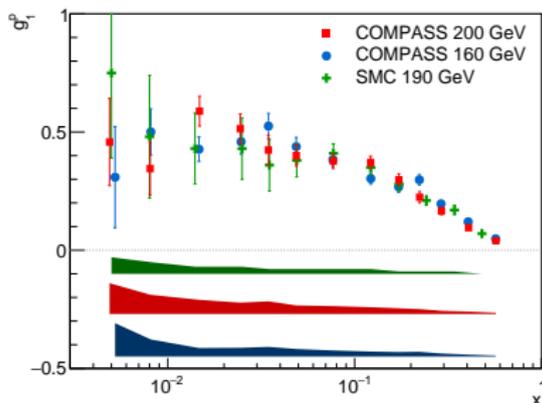
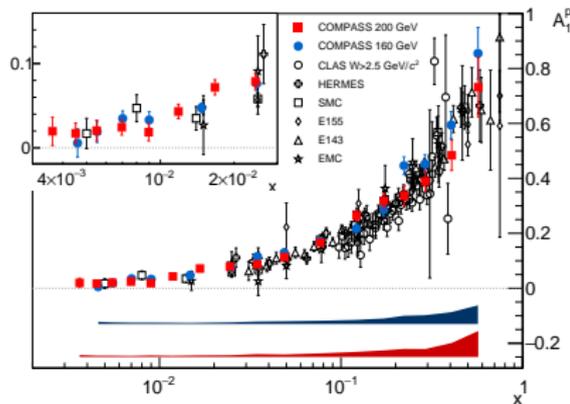
Ergebnisse zu A_1^p

- Höhere Strahlenergie für 2011
160 GeV \rightarrow 200 GeV
 - Höhere Q^2
 - Kleinere x \Rightarrow Wichtig für erste Momente
- Korrekturen zur Asymmetrie
 - Korrektur für ^{14}N (Spin-1)
 - Spinabhängige Strahlungskorrekturen
- Anstieg zum Valenzbereich
- Gute Übereinstimmung
- Schwache Q^2 Abhängigkeit
- $g_1^p(x, Q^2) = \frac{F_2^p(x, Q^2)}{2x(1+R(x, Q^2))} A_1^p(x, Q^2)$



Ergebnisse zu A_1^P

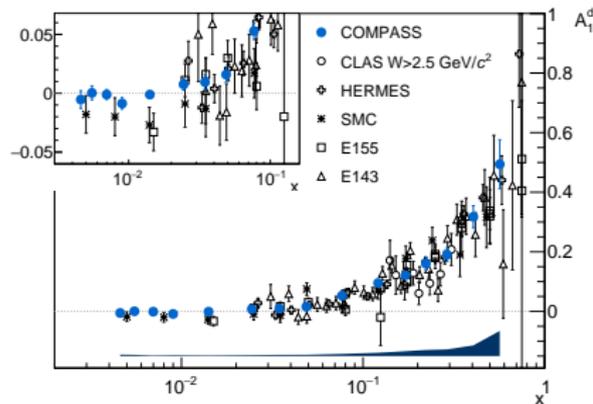
- Höhere Strahlenergie für 2011
160 GeV \rightarrow 200 GeV
 - Höhere Q^2
 - Kleinere x \Rightarrow Wichtig für erste Momente
- Korrekturen zur Asymmetrie
 - Korrektur für ^{14}N (Spin-1)
 - Spinabhängige Strahlungskorrekturen
- Anstieg zum Valenzbereich
- Gute Übereinstimmung
- Schwache Q^2 Abhängigkeit
- $g_1^P(x, Q^2) = \frac{F_2^P(x, Q^2)}{2x(1+R(x, Q^2))} A_1^P(x, Q^2)$



Weitere Ergebnisse

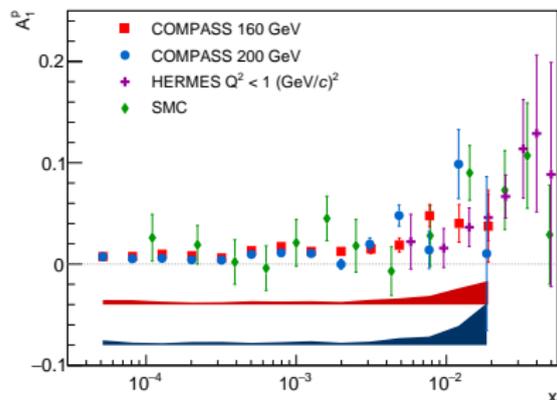
- Deuterondaten, $Q^2 > 1 (\text{GeV}/c)^2$

- Kombiniert mit existierenden Daten
- Verbesserte Statistik ($\sim 50\%$)
- Gute Übereinstimmung
- Asymmetrie mit Null verträglich bei kleinen x



- Protondaten, $Q^2 < 1 (\text{GeV}/c)^2$

- Messung bei sehr kleinen x
- Deutliche Verbesserung im Vergleich mit SMC
- Erstmalige Beobachtung von Spineffekten bei so kleinen x
- Keine signifikante x Abhängigkeit



- Effekt der Auflösungsänderung in perturbativer Weise berechenbar
- DGLAP Entwicklungsgleichungen

$$\frac{d}{d \ln Q^2} \Delta q_{NS} = \frac{\alpha_s(Q^2)}{2\pi} \Delta P_{qq} \otimes \Delta q_{NS}$$

$$\frac{d}{d \ln Q^2} \begin{pmatrix} \Delta q_{Si} \\ \Delta g \end{pmatrix} = \frac{\alpha_s(Q^2)}{2\pi} \begin{pmatrix} \Delta P_{qq} & 2n_f \Delta P_{qg} \\ \Delta P_{gq} & \Delta P_{gg} \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} \Delta q_{Si} \\ \Delta g \end{pmatrix}$$

- Strukturfunktion:

$$g_1 = \frac{1}{2} \langle e^2 \rangle (C^{Si}(\alpha_s) \otimes \Delta q_{Si} + C^{NS}(\alpha_s) \otimes \Delta q_{NS} + C^g(\alpha_s) \otimes \Delta g)$$

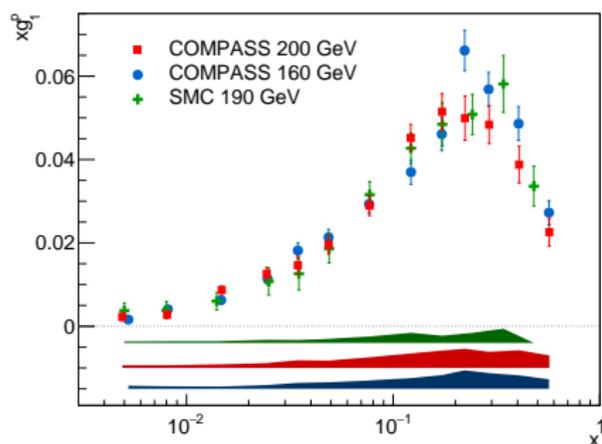
- Koeffizienten ΔP und C berechnet in 2. Ordnung (NLO)

$$\Delta q_{Si} = \Delta(u + \bar{u}) + \Delta(d + \bar{d}) + \Delta(s + \bar{s}),$$

$$\Delta q_3 = \Delta(u + \bar{u}) - \Delta(d + \bar{d}),$$

$$\Delta q_8 = \Delta(u + \bar{u}) + 2\Delta(d + \bar{d}) - \Delta(s + \bar{s})$$

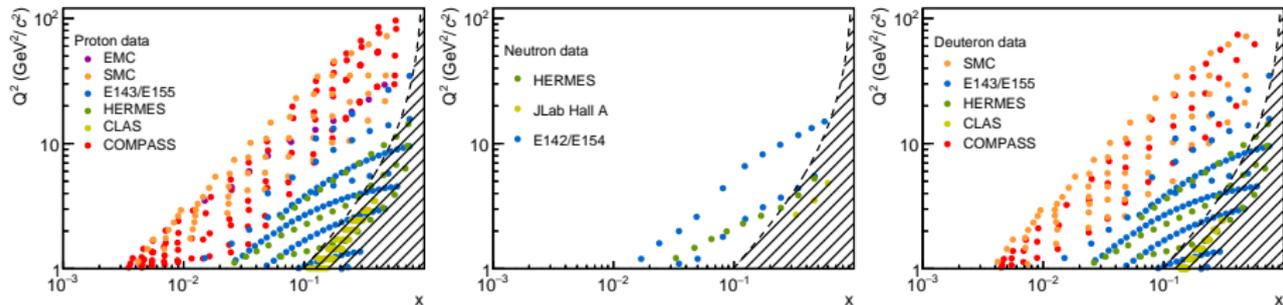
- Gleiche Kopplung des Photons an q und $\bar{q} \Rightarrow$ keine Separation



- x -Abhängigkeit unbekannt
- Parametrisierung für $Q_0^2 = 1 (\text{GeV}/c)^2$ benötigt
- Typischer Ansatz:
 - Niedrige x : x^α
 - Hohe x : $(1-x)^\beta$
 - Nulldurchgang: $1 + \gamma x$

$$f = \eta \frac{x^\alpha (1-x)^\beta (1+\gamma x)}{\int_0^1 x^\alpha (1-x)^\beta (1+\gamma x) dx}$$

Daten und Einschränkungen



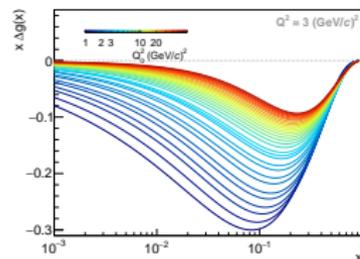
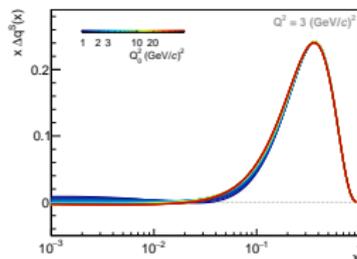
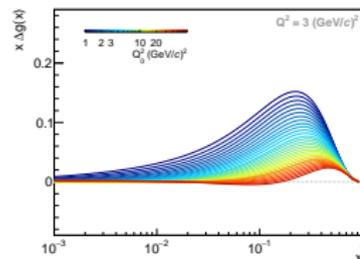
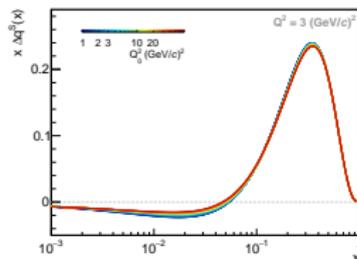
- $$\chi^2 = \sum_{n=1}^{N_{Exp}} \left[\sum_{i=1}^{N_n^{Daten}} \left(\frac{g_1^{fit} - \mathcal{N}_n g_{1,i}^{Daten}}{\mathcal{N}_n \sigma_i} \right)^2 + \left(\frac{1 - \mathcal{N}_n}{\delta \mathcal{N}_n} \right)^2 \right] + \chi_{\text{Positivität}}^2$$
- Positivität: $|\Delta g(x)| < g(x)$ und $|\Delta(q(x) + \bar{q}(x))| < q(x) + \bar{q}(x)$
- Insgesamt: 495 Datenpunkte ($W^2 > 10 \text{ GeV}^2$), 11 freie Parameter und 15 Normierungsparameter
- Unpolarisierte Partonverteilungen von MSTW2008

Lösungen für die Helizitätsverteilungen

- Mehrere gleich gute Lösungen
 - Wähle die zwei extremen Parametrisierungsformen
 - Systematische Studien:
 - Verschiedene Parametrisierungen
 - Referenzskala Q_0^2
 - χ^2 stabil
- ⇒ Systematische Fehler größer als statistische

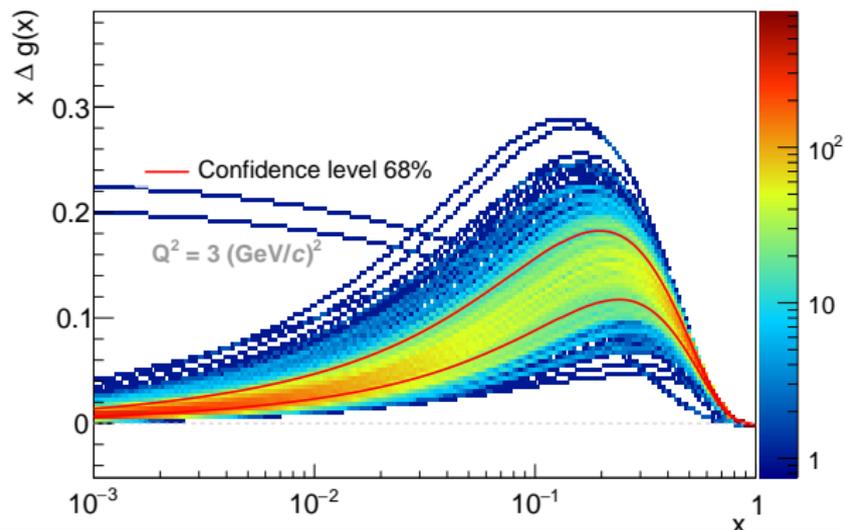
Singlet

Gluon

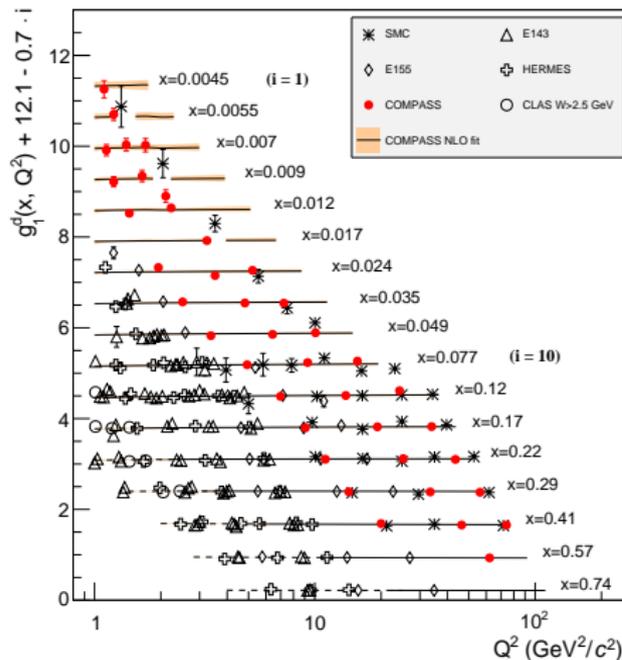
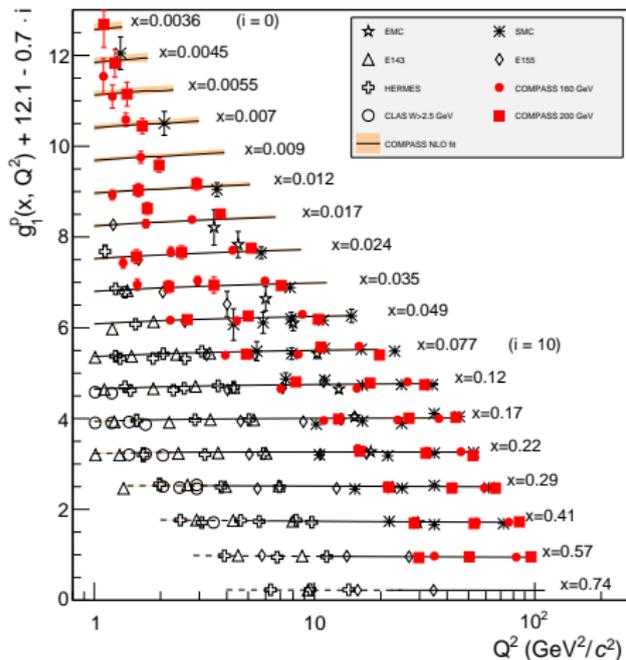


Statistische Fehler

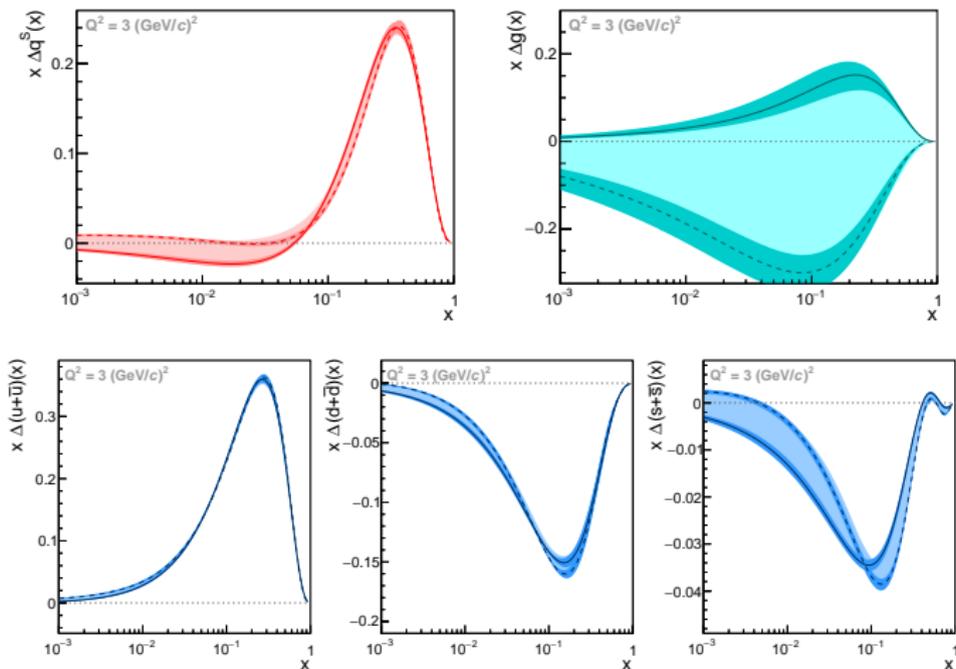
- Erzeuge 1000 Sätze an Pseudodaten:
Verschiebe Datenpunkte zufällig gemäß einer Gaußverteilung (Breite = stat. Fehler, Mittelwert = Messwert)
- Führe zu jedem Datensatz eine Anpassung durch
- Berechne Mittelwert und Breite (1σ Intervall) der Verteilung



Vergleich von Messung und Anpassung



Helizitätsverteilungen



• Quarkpolarisation $0.25 < \Delta\Sigma < 0.35$

• Gluonpolarisation $\Delta G = \int \Delta g(x) dx$ Nicht gut bestimmt
→ Direkte Messungen

$$\Gamma_1^{p,n}(Q^2) = \int_0^1 g_1^{p,n}(x, Q^2) dx = \frac{1}{36} [(a_8 \pm 3a_3) C^{\text{NS}}(Q^2) + 3a_0 C^{\text{S}}(Q^2)]$$

- Nutze Ergebnisse der QCD Analyse
 - Entwickle g_1 zu $Q^2 = 3(\text{GeV}/c)^2$
 - Extrapolation zu $x = 0$ und $x = 1$
- 97% im gemessenen Bereich
- Kleine Beiträge aus Extrapolation
- Ergebnisse:

$$\Gamma_1^{\text{p}} = 0.138 \pm 0.003_{\text{stat}} \pm 0.009_{\text{syst}} \pm 0.005_{\text{evol}}$$

$$\Gamma_1^{\text{N}} = \frac{1}{2} (\Gamma_1^{\text{p}} + \Gamma_1^{\text{n}}) = 0.046 \pm 0.002_{\text{stat}} \pm 0.004_{\text{syst}} \pm 0.005_{\text{evol}}$$

$$a_0 = \frac{1}{C^S(Q^2)} (9\Gamma_1^N(Q^2) - \frac{1}{4}a_8 C^{NS}(Q^2))$$

- Nutze das erste Moment von g_1^d und die axiale Ladung a_8
- a_8 bestimmt aus Messungen zum Hyperon und Neutron β -Zerfall
- a_0 beschreibt Beitrag der Quarks zum Nukleonspin
- $\overline{\text{MS}}$: $a_0 = \Delta\Sigma = \Delta(u + \bar{u}) + \Delta(d + \bar{d}) + \Delta(s + \bar{s})$
- Ergebnis für $Q^2 = 3 \text{ (GeV}/c)^2$:

$$a_0 = 0.32 \pm 0.02_{\text{stat}} \pm 0.04_{\text{syst}} \pm 0.05_{\text{evol}}$$

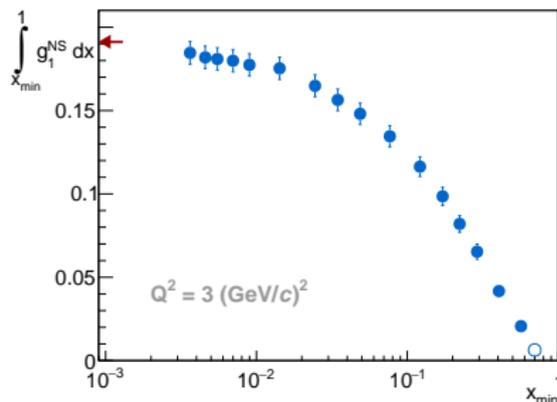
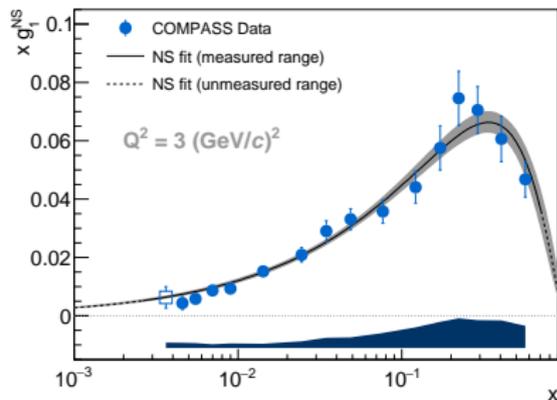
- QCD Analyse: $0.25 \leq \Delta\Sigma \leq 0.35$
- Möglichkeit zur Bestimmung der Beiträge der verschiedenen Flavour

$$\int_0^1 g_1^{\text{NS}}(x, Q^2) dx = \int_0^1 (g_1^{\text{p}}(x, Q^2) - g_1^{\text{n}}(x, Q^2)) dx = \frac{1}{6} \left| \frac{g_A}{g_V} \right| C_1^{\text{NS}}(Q^2)$$

- Non-singlet Strukturfunktion $g_1^{\text{NS}} = g_1^{\text{p}} - g_1^{\text{n}} = 2 \left[g_1^{\text{p}} - \frac{g_1^{\text{d}}}{1-3/2\omega_D} \right]$,
 $\omega_D = 0.05$ (D-Wellenanteil an Deuteronwellenfunktion)
- Bestimme g_1^{NS} nur aus COMPASS Daten
 - 2007 & 2011 Proton Daten
 - 2002 - 2004 & 2006 Deuteron Daten
- $\left| \frac{g_A}{g_V} \right| = 1.2723 \pm 0.0023$ aus dem Neutron β -Zerfall
- Ziel: Überprüfung der Bjorken Summenregel

Non-singlet Strukturfunktion

- Berechne $g_1^{\text{NS}} = g_1^{\text{p}} - g_1^{\text{n}}$
- Neue QCD Analyse
 - Nur Δq_3
 - Benötigt 3 Parameter
 - Entwicklung zu $Q^2 = 3 (\text{GeV}/c)^2$
 - Extrapolation zu $x = 0, 1$
- 93% im gemessenen Bereich
- Bestätigung der Bjorken Summenregel:
$$\left| \frac{g_A}{g_V} \right|_{\text{NLO}} = 1.29 \pm 0.05_{\text{stat}} \pm 0.10_{\text{syst}}$$
- Verbesserung durch neue Daten
 $|g_A/g_V| = 1.28 \pm 0.07 \pm 0.10$



- Neue Messung von A_1^p und g_1^p mit dem 200 GeV Myonstrahl
 - ⇒ Erweiterter kinematischer Bereich
- Neue Messung zu A_1^d und g_1^d mit dem 160 GeV Myonstrahl
 - ⇒ Verbesserte Genauigkeit
- Weiterführende Ergebnisse:
 - Verbesserte QCD Analyse der Weltdaten mit neuen Schlussfolgerungen
 - Bestimmung von ersten Momenten der Strukturfunktion
 - Bestimmung der axialen Ladung a_0
 - Bestätigung der Bjorken Summenregel mit verbesserten statistischen Fehler
- Messung von A_1^p und g_1^p bei $Q^2 < 1 (\text{GeV}/c)^2$
 - Messung einer positiven Asymmetrie/Strukturfunktion
 - Erstmalige Entdeckung von Spineffekten in diesem kinematischen Bereich

Abschätzung für falsche Asymmetrien

- Kein Hinweis auf falsche Asymmetrien
- Abschätzung für obere Grenze

⇒ Verteilung der "Pulls": $r_i = \frac{A_{1,i} - \bar{A}_1}{\Delta A_{1,i}^{\text{stat}}}$

- Statistische Methode
 - Zwei Beiträge zur Breite
 - Statistischer Beitrag $\sigma_{\text{stat}} = 1$
 - Systematischer Beitrag σ_{syst}
- ⇒ $\sigma_{\text{tot}}^2 = \sigma_{\text{stat}}^2 + \sigma_{\text{syst}}^2$

- Obere Grenze für Breite:
 $\sigma_{\text{tot}}^{\text{lim}} = \Delta\sigma_{\text{tot}} + \text{Max}\{1, \sigma_{\text{tot}}\}$
- Grenze für Unsicherheit

$$\sigma^{\text{syst}} = \sqrt{(\Delta\sigma_{\text{tot}} + \text{Max}\{1, \sigma_{\text{tot}}\})^2 - 1}$$

