



University  
of Glasgow



# Vermessung der zeit- und raumartigen Struktur des Nukleons

Inti Lehmann

University of Glasgow

Seminar, 28.01.2010, Johannes Gutenberg Universität Mainz





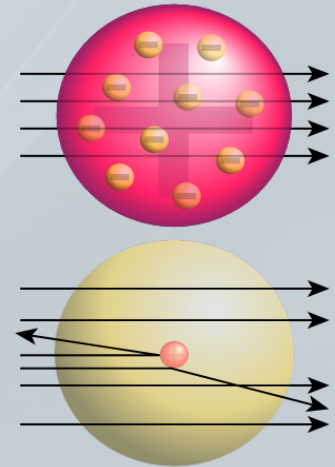
- **Einführung**
  - **Raum- und zeitartige Formfaktoren**
  - **Strukturfunktionen - Spinstruktur**
- **Bisherige Messungen**
  - **Raumartig - HERMES**
    - Asymmetrien in tiefvirtueller Compton-Streuung
    - $J_u$ - $J_d$  Extraktion
    - Targetspektrometer (Recoil)
- **Zukünftige Messungen**
  - **2-Photonen-Austausch - OLYMPUS**
  - **Proton-Antiproton-Annihilation - PANDA**
  - **Weitere Ideen**
- **Zusammenfassung**



# Einführung

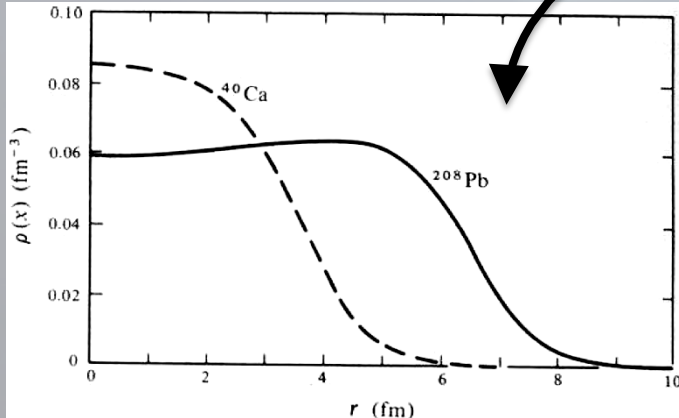
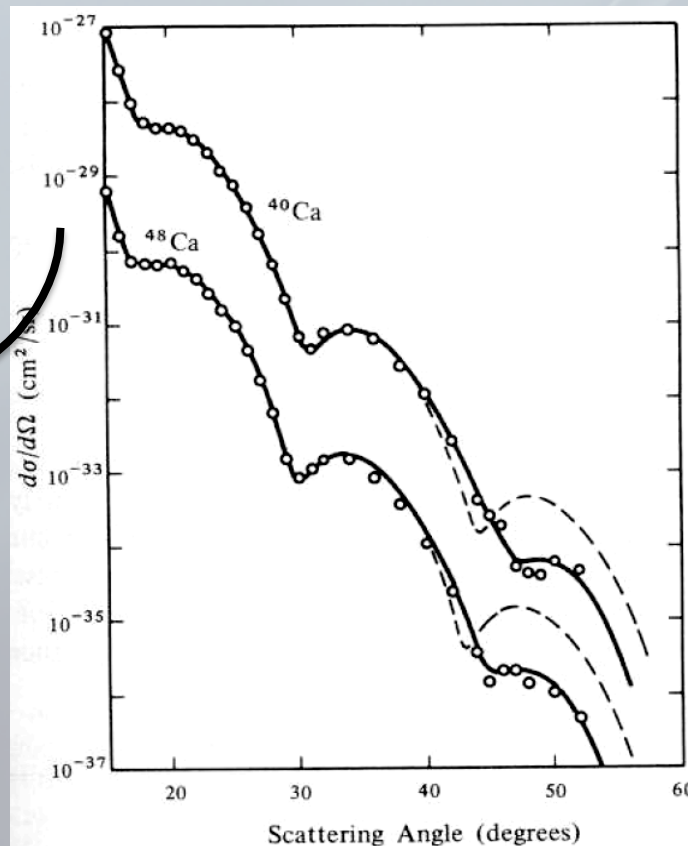
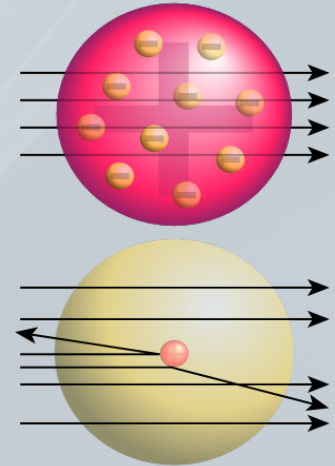
# Allgemeine Methoden

- Wie misst man Strukturen von  $10^{-15}\text{m}$ ?
  - **Teilchenstreuung: verschiedene WW**
  - **Beugungsmuster  $\rightarrow$  Struktur**



# Allgemeine Methoden

- Wie misst man Strukturen von  $10^{-15}\text{m}$ ?
  - Teilchenstreuung: verschiedene WW
  - Beugungsmuster  $\rightarrow$  Struktur
- Beispiel
  - Kernstruktur



# Formfaktoren des Nukleons

- Definitionen für elastische Streuung

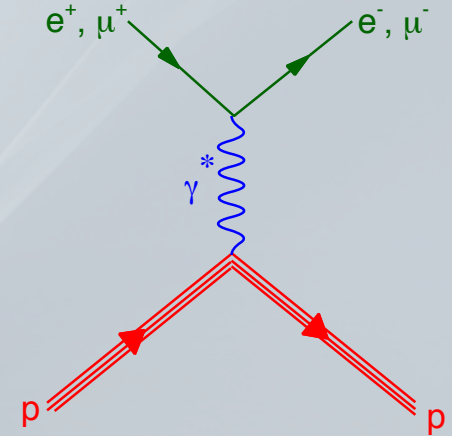
- **N Vertex**  $\langle N(P') | J_{EM}^\mu(0) | N(P) \rangle = \bar{u}(P') \left[ \gamma^\mu F_1^N(Q^2) + i\sigma^{\mu\nu} \frac{q_\nu}{2M} F_2^N(Q^2) \right] u(P)$

- Dirac und Pauli FF:  $F_1$  und  $F_2$

- Sachs FF

- elektrischer  $G_E$ , magnetischer  $G_M$

$$G_E = F_1 - \tau F_2; \quad G_M = F_1 + F_2, \quad \tau = \frac{Q^2}{4M^2}$$



- FF Fouriertransformierte der jeweiligen Verteilung

- Gute Näherung bei nicht zu großen Impulsüberträgen

- Rosenbluth Wirkungsquerschnitt

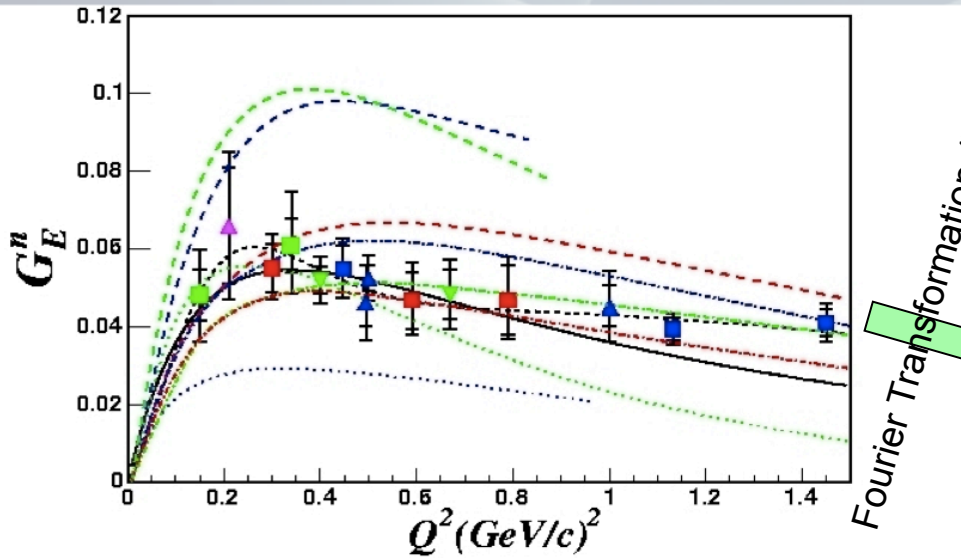
- (Ein-Photon-Austausch)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2 \beta C}{4q^2} \left[ |G_M|^2 (1 + \cos^2 \theta) + \frac{4m^2}{q^2} |G_E|^2 \sin^2 \theta \right]$$

- Trennung durch Winkel- und Impulsübertrags-Abhängigkeit

# Beispiel: Ladungsstruktur, Neutron

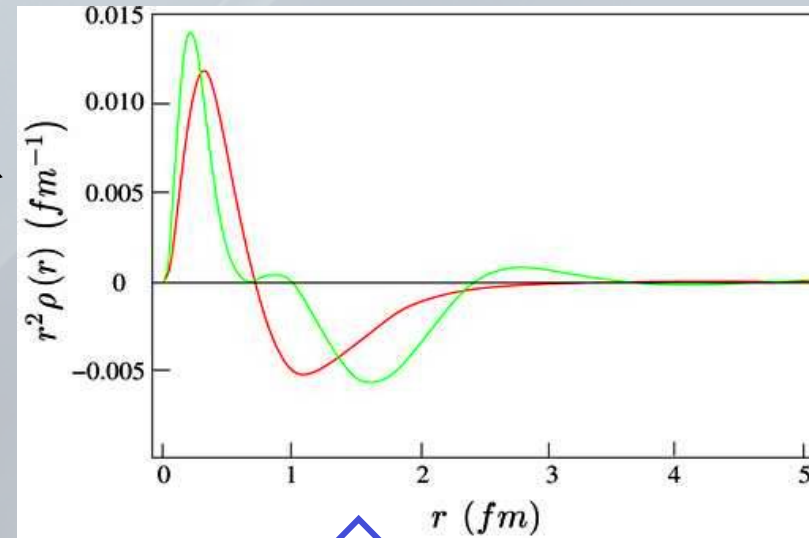
## Elektrischer Formfaktor



Fourier Transformation (Breit frame)

- | Experiment                            | Theory                                 |
|---------------------------------------|--|
| ■ - MAMI-A1 $D(\vec{e}, e' \vec{n})p$ | ..... SU(3) Nambu-Jona-Lasinio         |
| ▼ - MAMI $^3\text{He}(\vec{e}, e'n)p$ | ----- Relativistic Constituent Quark   |
| ■ - MAMI-A3 $D(\vec{e}, e' \vec{n})p$ | ----- Generalised Parton Distributions |
| ■ - JLAB $D(\vec{e}, e' \vec{n})p$    | ----- Vector Meson Dominance           |
| ▲ - JLAB $\vec{D}(\vec{e}, e'n)p$     | ----- Dispersion Theory                |
| ▲ - NIKHEF $\vec{D}(\vec{e}, e'n)p$   | ----- Diquark-quark                    |
|                                       | ..... Chiral Soliton                   |
|                                       | ----- Lattice QCD                      |
|                                       | <u>Phenomenological Fits</u>           |
|                                       | —— Galster                             |
|                                       | ----- Friedrich-Walcher                |

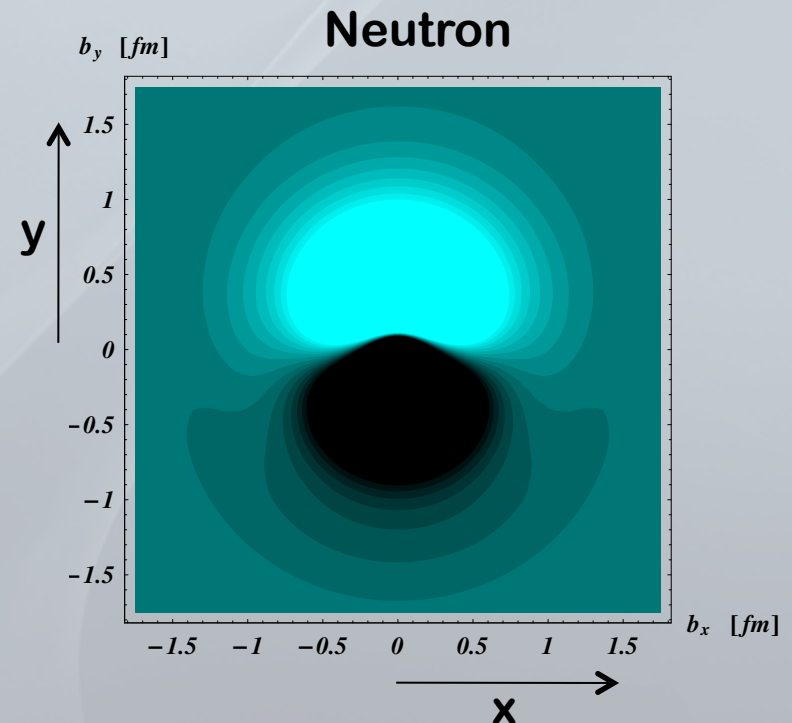
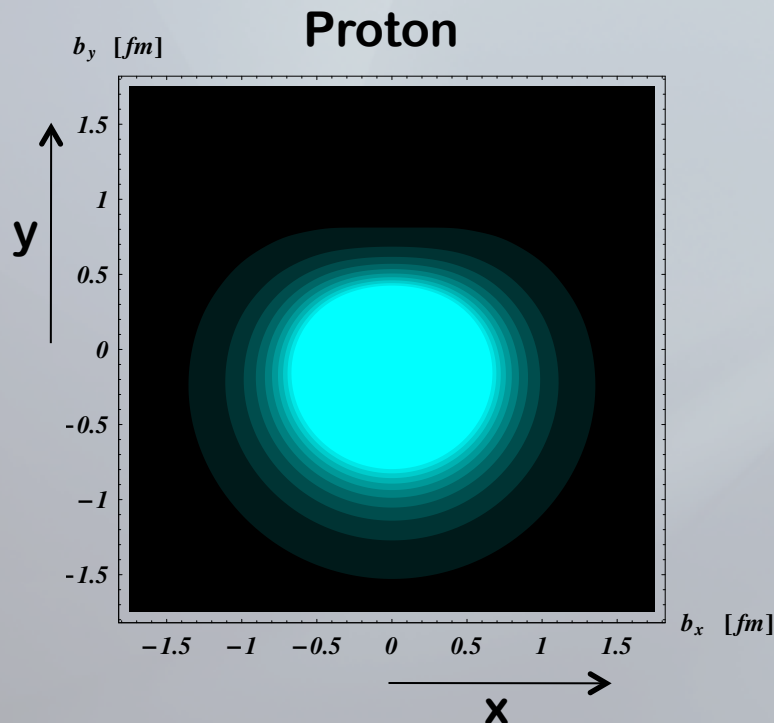
## Ladungsverteilung



Pionen-Wolke

# Rückschlüsse auf Struktur

- Transversale Ladungsverteilung im Nukleon (aus e.m. FF, Polarisation des Nukleons entlang x-Achse)



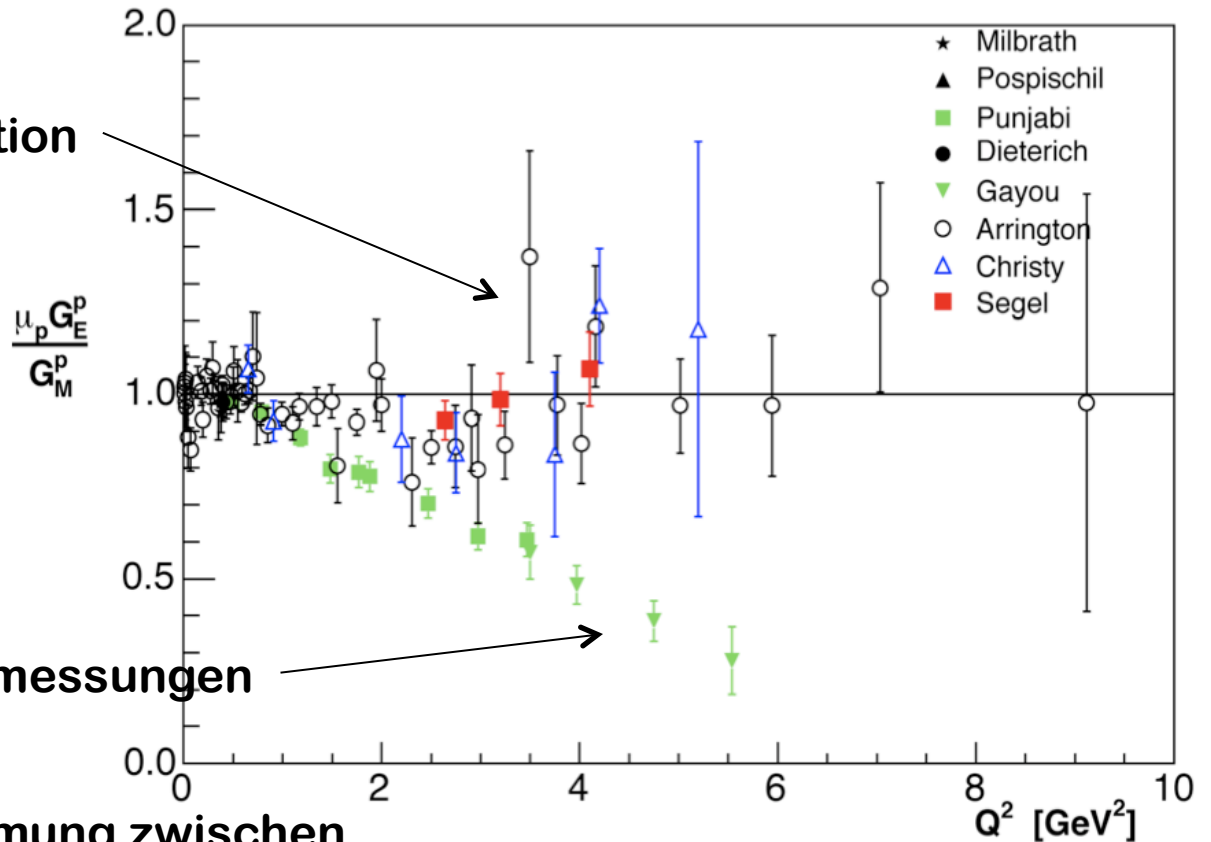
C.E. Carlson and M. Vanderhaeghen, [Phys. Rev. Lett. 100, 032004 \(2008\)](#)



# $G_E/G_M$ raumartig



Rosenbluth Separation



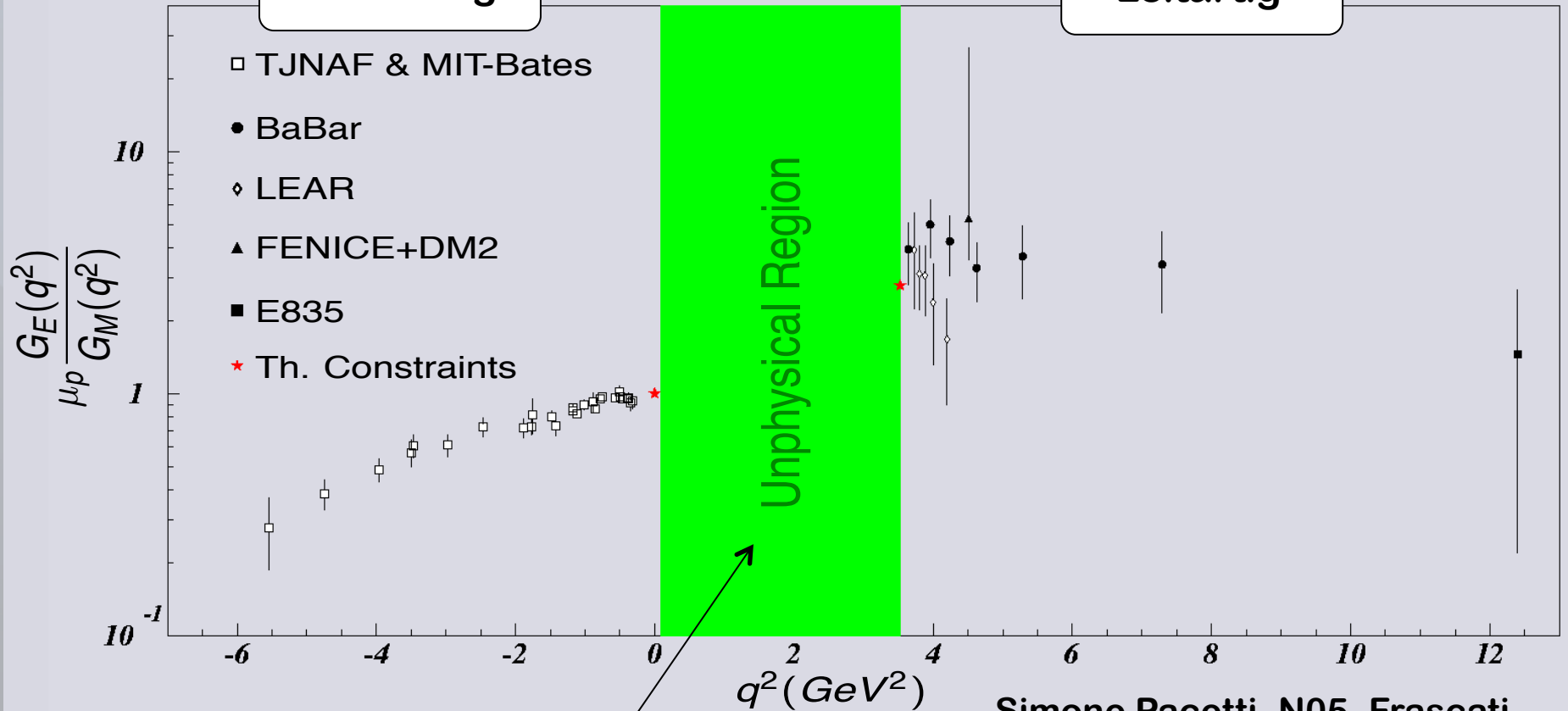
Doppel-Polarisationsmessungen

- Keine Uebereinstimmung zwischen
  - Messungen beruhend auf Rosenbluth Separation
  - Doppel-Polarisationsmessungen
- Erklarungsversuch: 2-Photonen-Austausch,
  - $1/Q^4$  (N. Kivel, M. Vanderhaeghen, Phys.Rev.Lett.103(2009)092004)

# $G_E/G_M$ raum und zeitartig

raumartig

zeitartig



Simone Pacetti, N05, Frascati

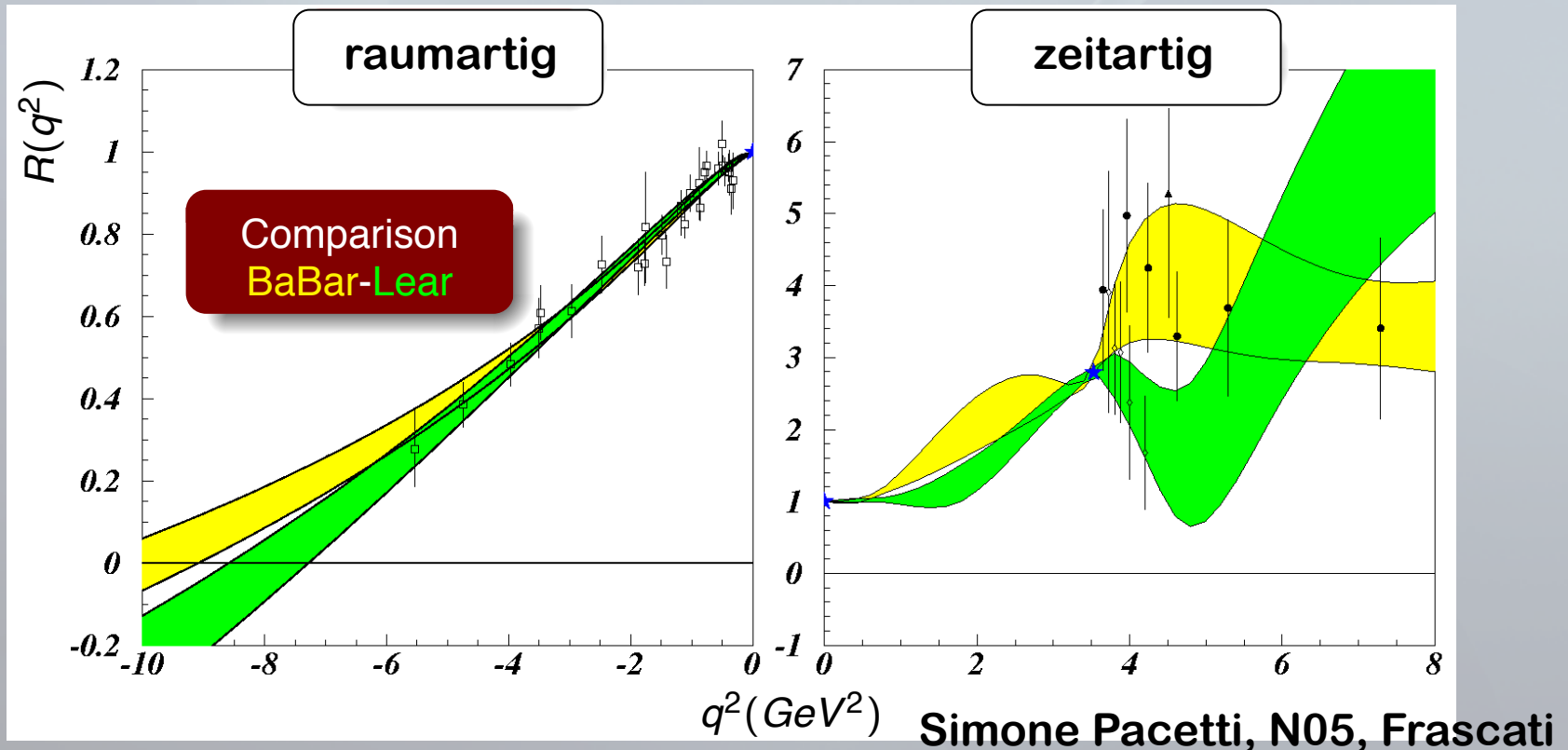
In Annihilation oder Produktion  
eines Proton-Antiproton-Paares  
unerreichbarer Bereich

# $G_E/G_M$ Fits



- Dispersionsrelation

- Ausschl. Doppel-Pol.-Daten im raumartigen Bereich
- Große Ungewissheiten im zeitartigen Bereich

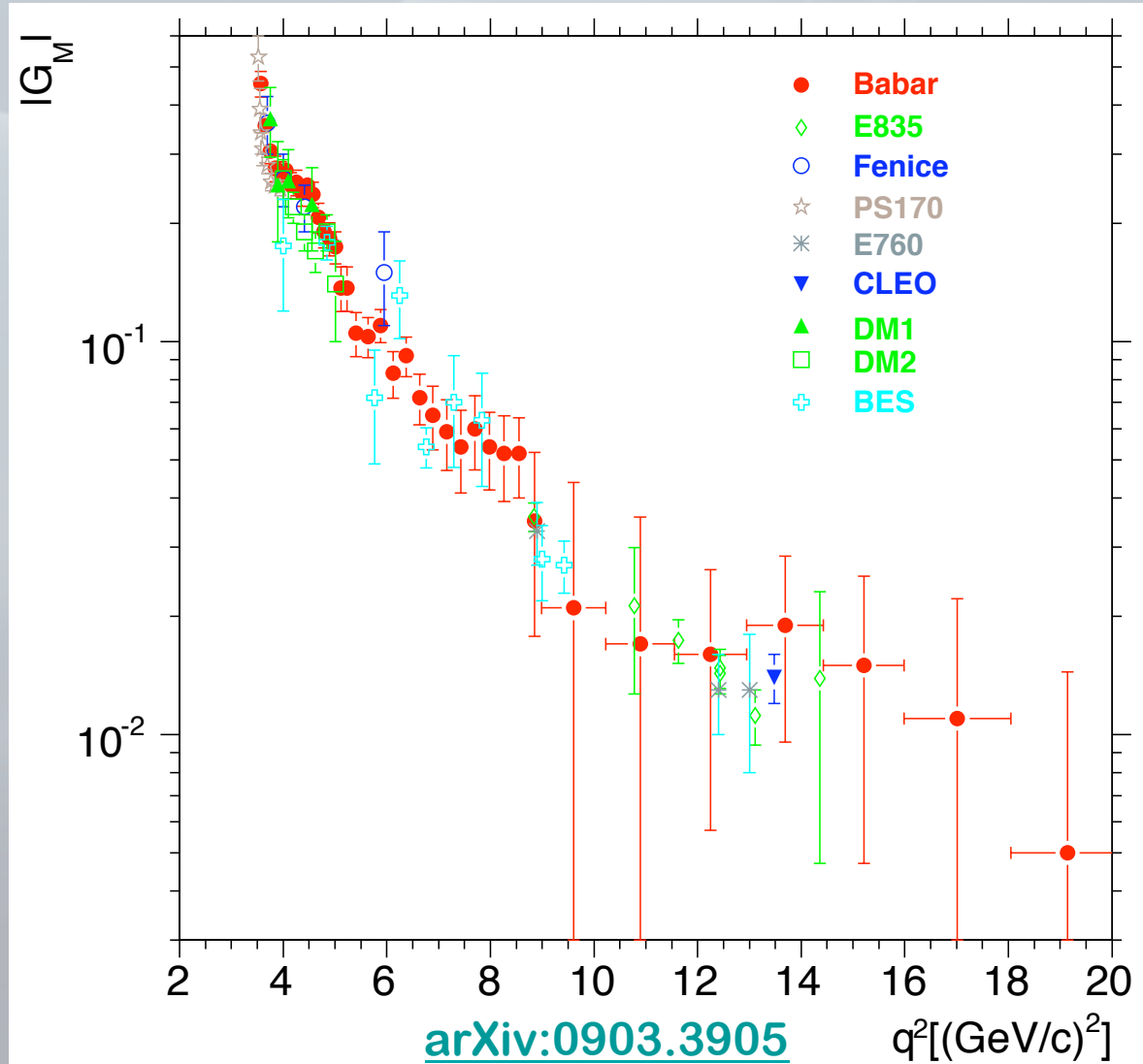


# $G_M$ zeitartig

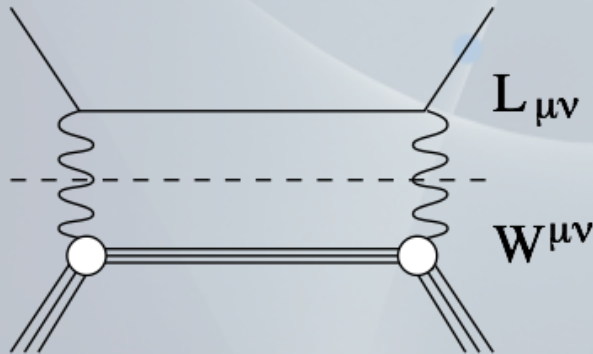
- Extraktion unter der simplen Annahme

$$|G_M| = |G_E|$$

- Künftige Messungen sollten
  - $G_M$  und  $G_E$  trennen,
  - präzisere Ergebnisse bei  $q^2 > 10 (\text{GeV}/c)^2$  liefern.



# Strukturfunktionen



in tiefinelastischer Streuung (DIS)

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE'} = \frac{\alpha^2}{2MQ^4} \frac{E'}{E} L_{\mu\nu} W^{\mu\nu}$$

$$L_{\mu\nu} = 2[k_\mu k'_\nu + k'_\mu k_\nu - g_{\mu\nu}(k \cdot k' - m^2) - i\epsilon_{\mu\nu\alpha\beta} s_l^\alpha q^\beta]$$

Dirac, Pauli FF

$$W_{\mu\nu} = F_1 \left(-g_{\mu\nu} + \frac{q_\mu q_\nu}{p \cdot q}\right) + \frac{F_2}{p \cdot q} \left(p_\mu - \frac{p \cdot q}{q^2} q_\mu\right) \left(p_\nu - \frac{p \cdot q}{q^2} q_\nu\right)$$

Spinabhängige SF

$$+ \frac{i g_1}{p \cdot q} \epsilon_{\mu\nu\lambda\sigma} q^\lambda s_h^\sigma + \frac{i g_2}{(f \cdot q)^2} \epsilon_{\mu\nu\lambda\sigma} q^\lambda (p \cdot q s_h^\sigma - s_h \cdot q p^\sigma)$$

Im Quark-Parton Modell:

$$F_1(x, Q^2) = \frac{1}{2} \sum_i e_i^2 q_i(x, Q^2)$$

$$F_2(x, Q^2) = \frac{1}{2} \sum_i e_i^2 x q_i(x, Q^2)$$

Partonen-Verteilungsfunktionen (PDFs)

# Spinstruktur des Nukleons

- Naives Bild

- 3 Valenz-Quarks richten sich aus, d.h.:

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma$$

- Spinkrise – EMC

- $\Delta\Sigma \approx 0.114 \pm 0.012 \pm 0.026$

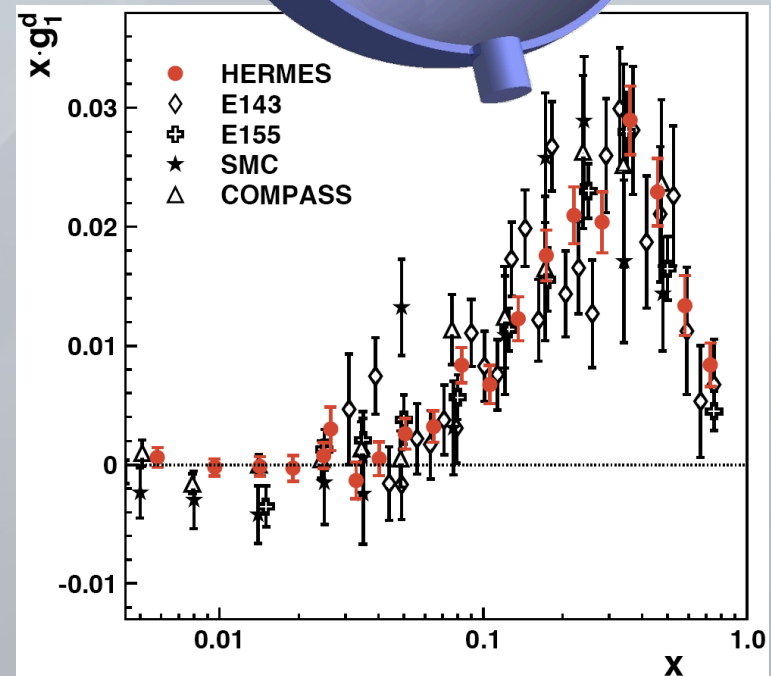
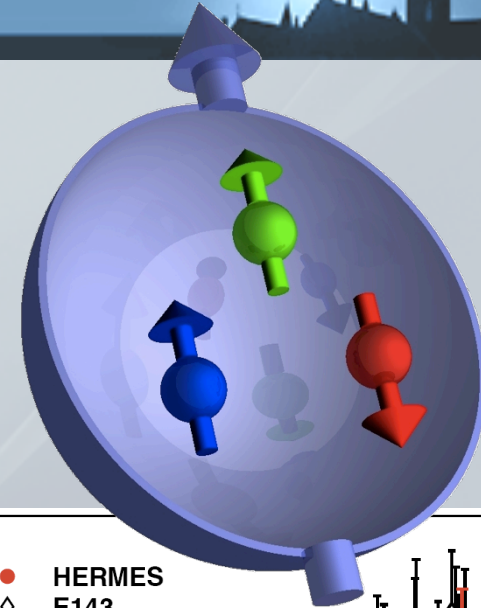
- Spinrätsel - HERMES

- Ca. 1/3 dieses Spins tragen die Quarks.

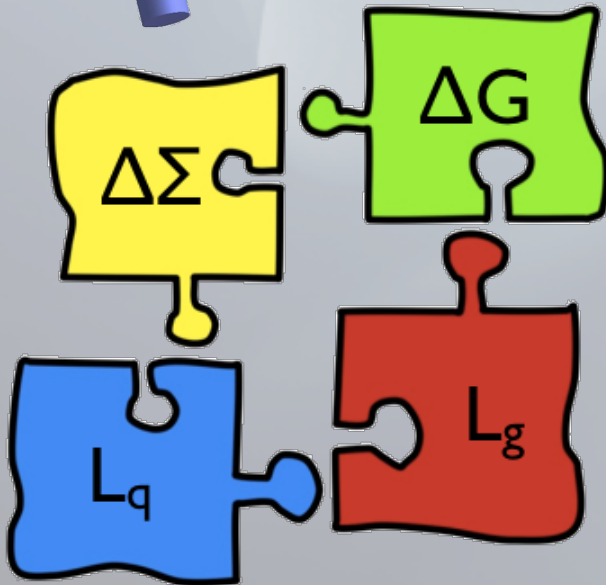
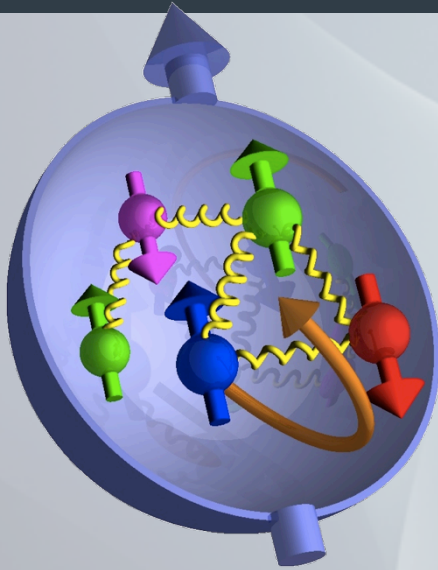
$$\Delta\Sigma = 0.330 \pm 0.011(\text{theo.}) \pm 0.025(\text{exp.}) \pm 0.028(\text{evol.})$$

A. Airapetian et al, Phys. Rev. D75(2007)012007

- **Wo bleibt der Rest?**



# Spinstruktur des Nukleons



- Proton Spin

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

- $\Delta\Sigma$  : Quark-Spin

- Anteil ca. 1/3

- $\Delta G$  : Gluonen-Spin

- erste Ergebnisse

- $L_q$  : Quark-Drehimpuls

- unbekannt

- $L_g$  : Gluonen-Drehimpuls

- unbekannt

# Spinstruktur des Nukleons



## ■ Ji Summenregel:

$$J_q = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 x dx [H_q + E_q]$$

GPDs

## • Proton Spin

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

## • $\Delta\Sigma$ : Quark-Spin

- Anteil ca. 1/3

## • $\Delta G$ : Gluonen-Spin

- erste Ergebnisse

## • $L_q$ : Quark-Drehimpuls

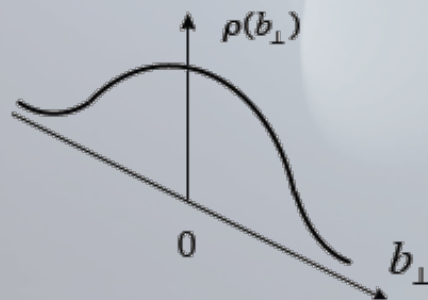
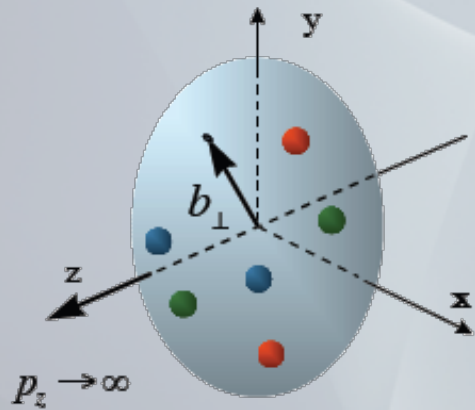
- unbekannt

## • $L_g$ : Gluonen-Drehimpuls

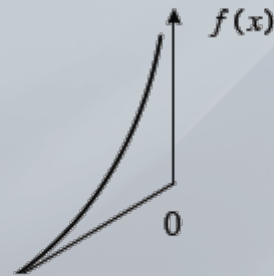
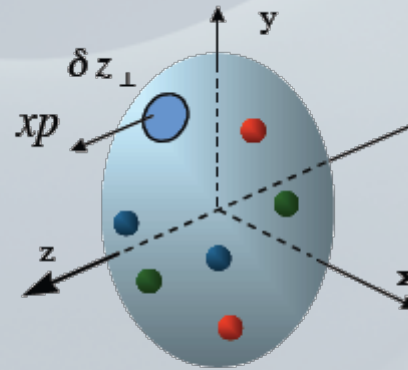
- unbekannt



# Was sind GPDs?

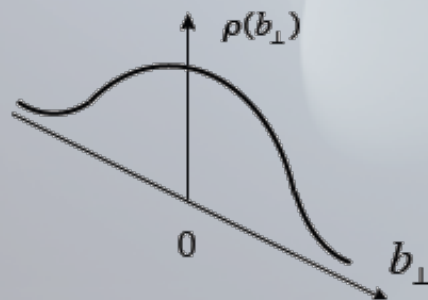
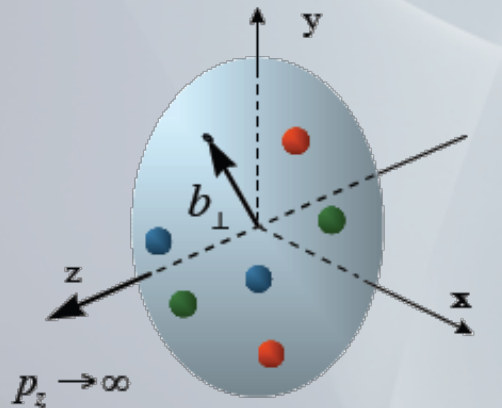


Formfaktoren

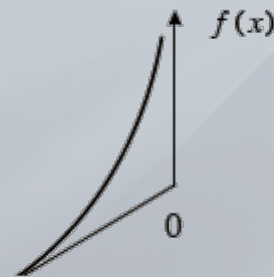
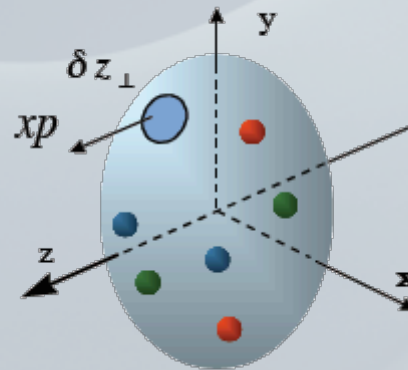


Partonen-  
Verteilungsfunktion

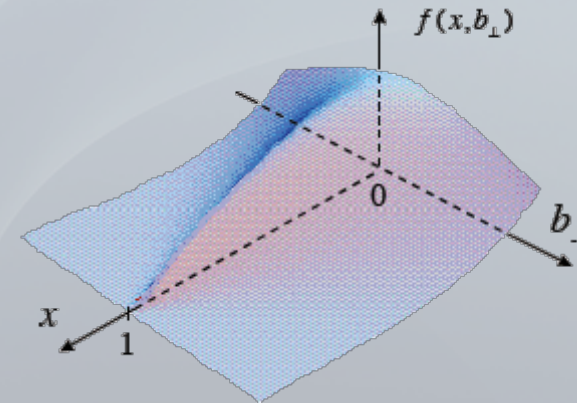
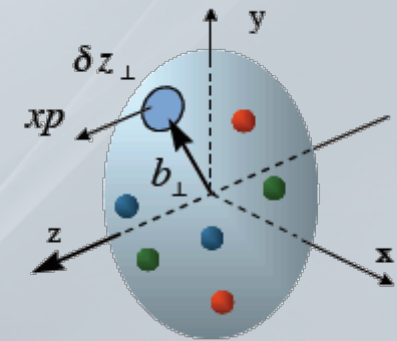
# Generalisierte Partonen-Verteilungen



Formfaktor

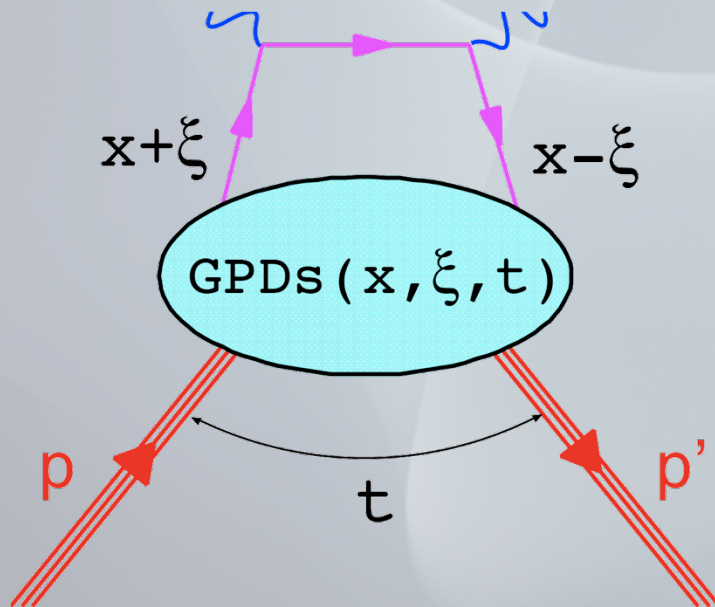


Partonen-  
Verteilungsfunktion



Generalisierte  
Partonen-  
Verteilung  
(GPD)

# Generalisierte Partonen-Verteilungen



- Funktionen von
  - Impulsanteil des Partons  $x$
  - skewedness  $\xi$
  - $p$  Impulstransfer  $t$
- 4 (chiralitätserhaltende)

## Quark GPDs

- unpolarisiert

$$H(x, \xi, t), E(x, \xi, t),$$

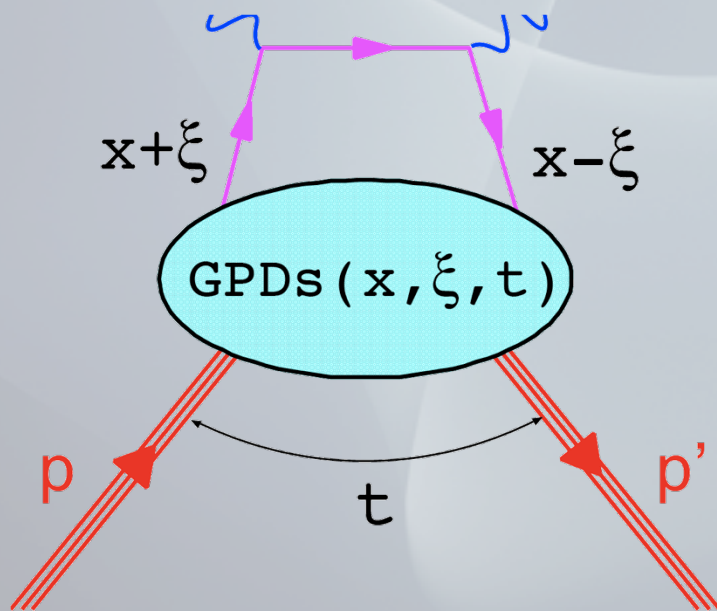
- polarisiert

$$\tilde{H}(x, \xi, t), \tilde{E}(x, \xi, t)$$

gerade (Spin)

ungerade (Spin)

# Generalisierte Partonen-Verteilungen



- Grenzfälle der GPDs:
  - Partonen-Verteilungsfunktionen (PDFs)

$$q(x) = H_q(x, 0, 0)$$

$$\Delta q(x) = \tilde{H}_q(x, 0, 0)$$

- Formfaktoren

$$F_1^q(t) = \int_{-1}^1 dx H^q(x, \xi, t)$$

$$F_2^q(t) = \int_{-1}^1 dx E^q(x, \xi, t)$$

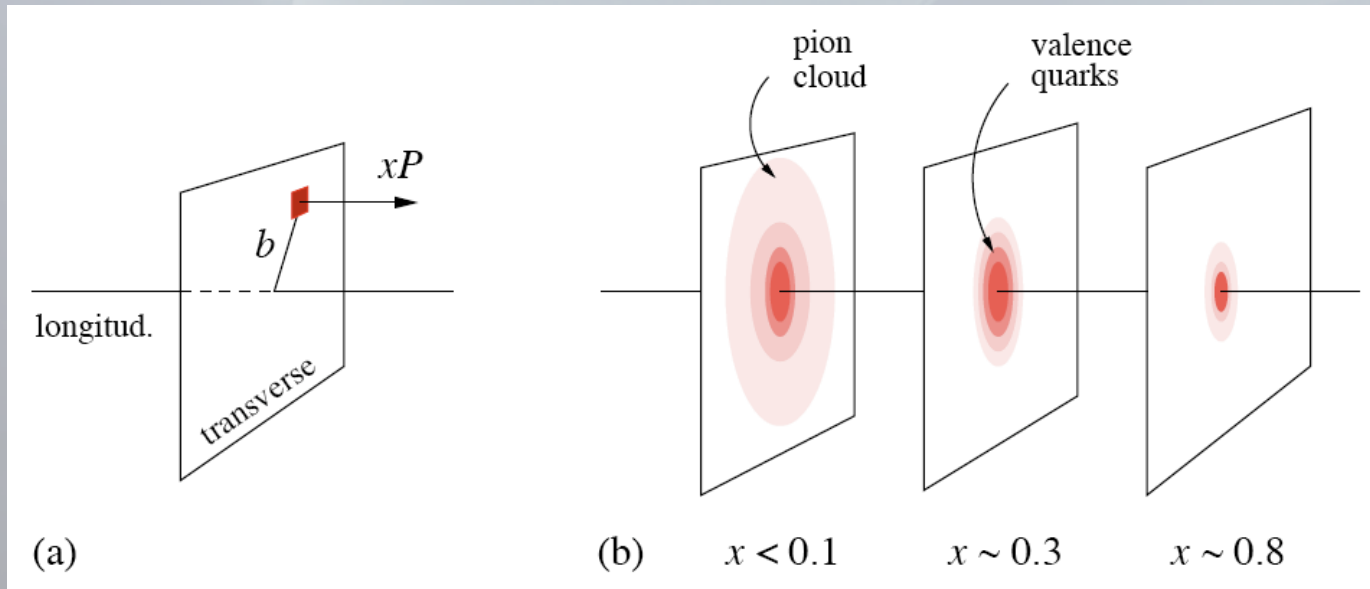
$$g_a^q(t) = \int_{-1}^1 dx \tilde{H}^q(x, \xi, t)$$

$$h_a^q(t) = \int_{-1}^1 dx \tilde{E}^q(x, \xi, t)$$

# Interpretation der GPDs

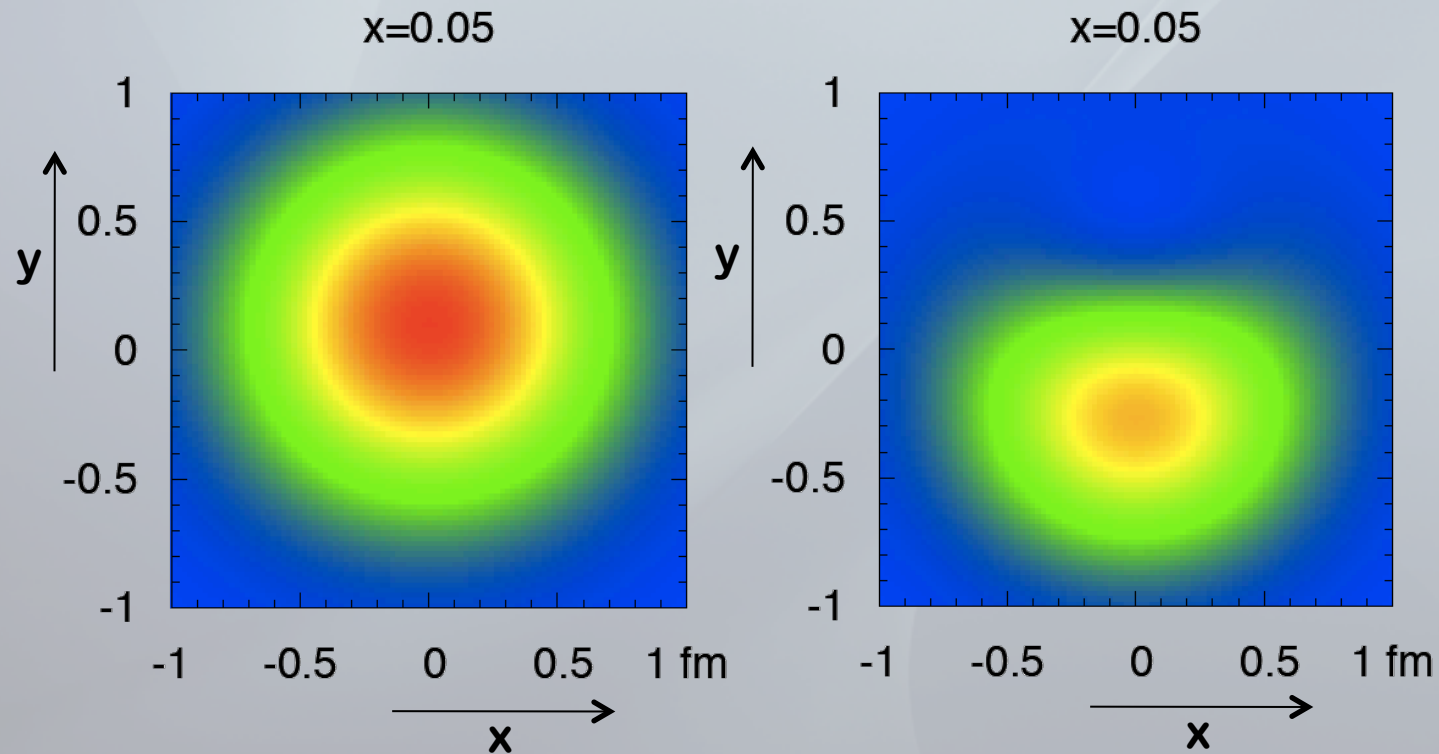
- Die Fouriertransformation von GPDs bei  $\xi=0$  führt zu einem 2+1 dimensionalen Bild des Nukleons
  - d.h. longitudinal im Impulsanteil und transversal im Stoßparameterraum

$$q(x, b_{\perp}) = \int \frac{d^2 \Delta_{\perp}^2}{(2\pi)^2} H(x, 0, -\Delta_{\perp}^2) e^{-i\Delta_{\perp} \cdot b_{\perp}}$$



# Modellrechnungen

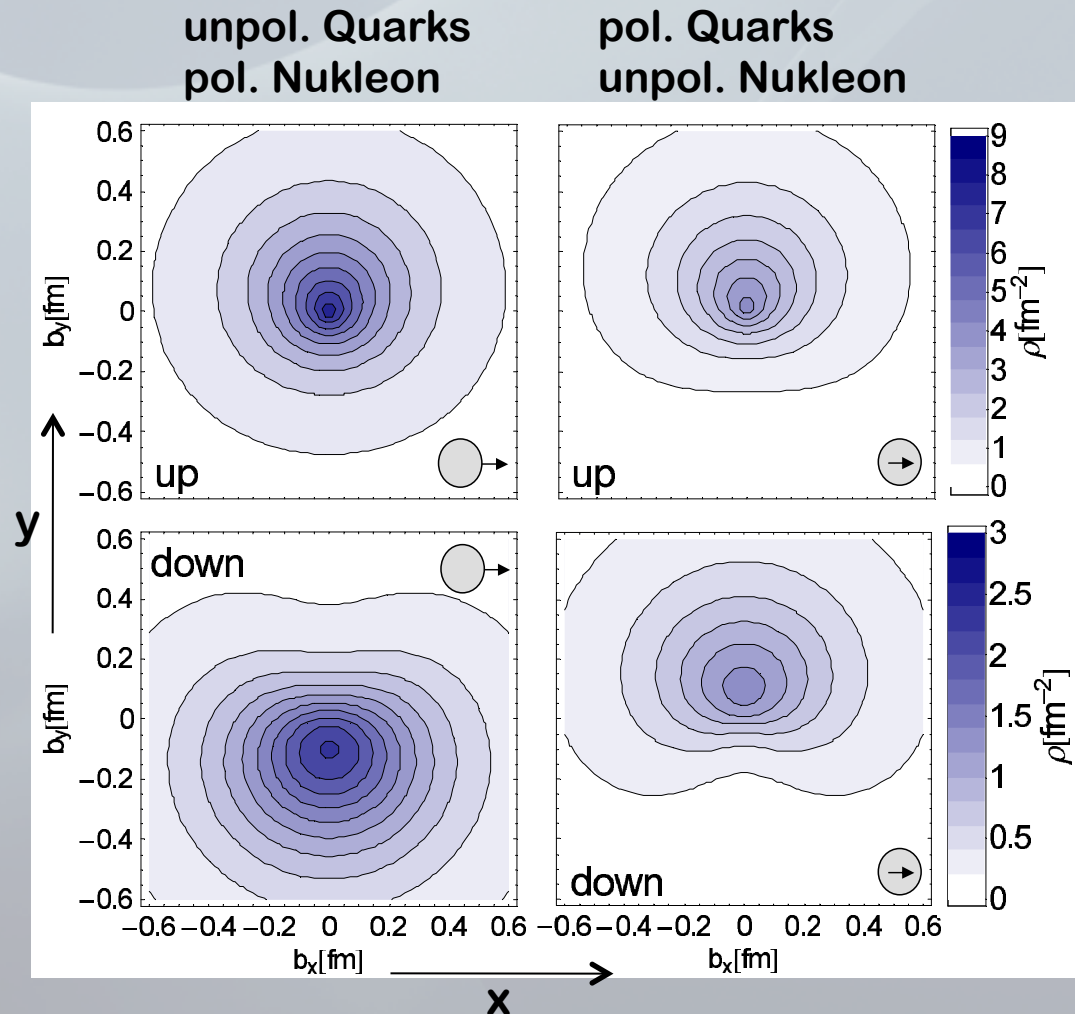
- GPD Modell beschränkt durch experimentelle Formfaktor-Daten [P.Kroll, AIP Conf.Proc.904:76-86,2007]



- Dichteverteilung in der Stoßparameterenebene für u- (links) und d-Quark (rechts). Proton entlang  $x$ -Achse polarisiert.

# QCD Gitterrechnungen

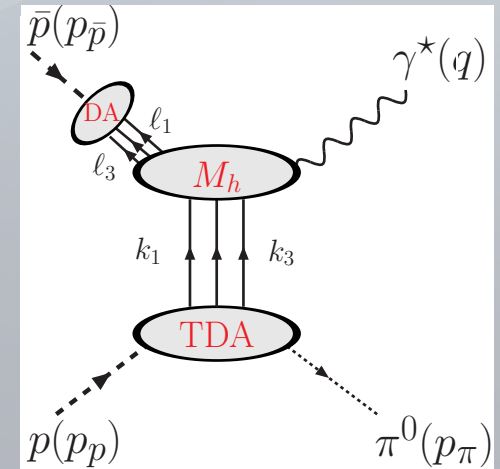
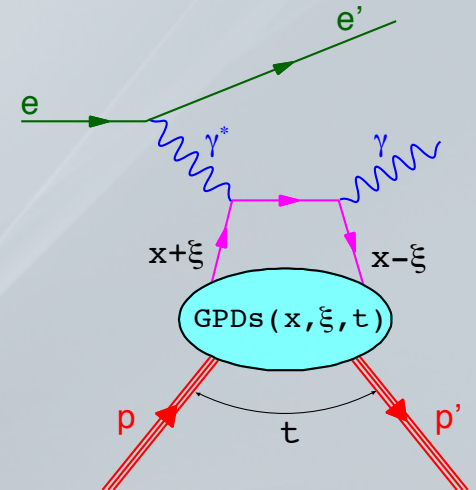
- Niedrigstes Moment der transversalen Dichte



M. Goeckeler et al., Phys.Rev.Lett.98:222001,2007

# Zeitartige Modelle

- Raumartige Modelle
  - Faktorisieren in harten und GPD Anteil
- Zeitartige Modelle
  - Zeitartige GPDs
  - Generalisierte Verteilungsamplituden (GDAs)
  - A. Afanasev, et al., arXiv:0903.4188
  - M. Diehl, et al., Phys. Rev. Lett. 81(1998)1782
  - Übergangs-Verteilungsamplituden (TDAs)
  - B. Pire, L. Szymanowski, Phys. Lett. B622:83-92,2005



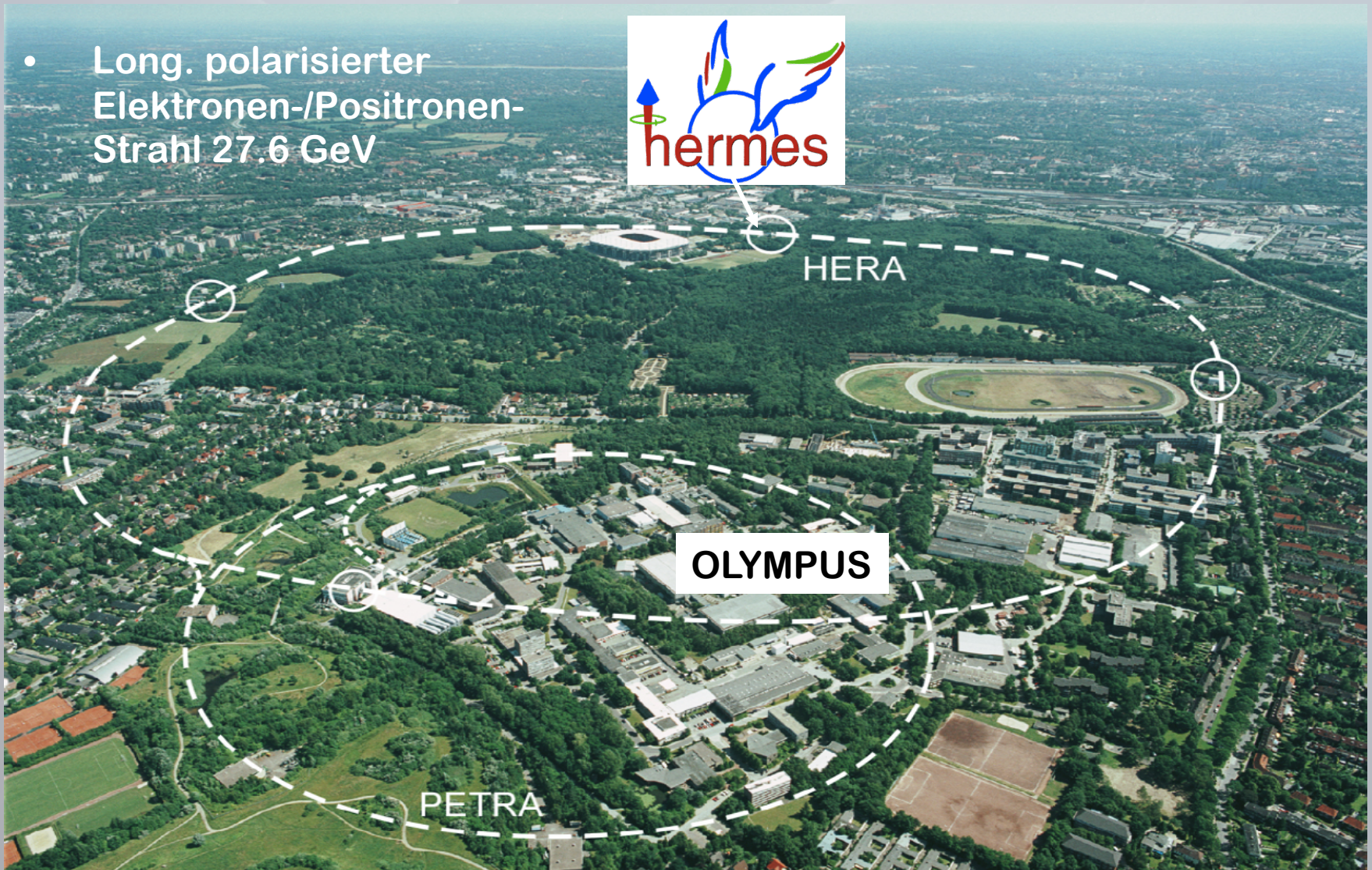




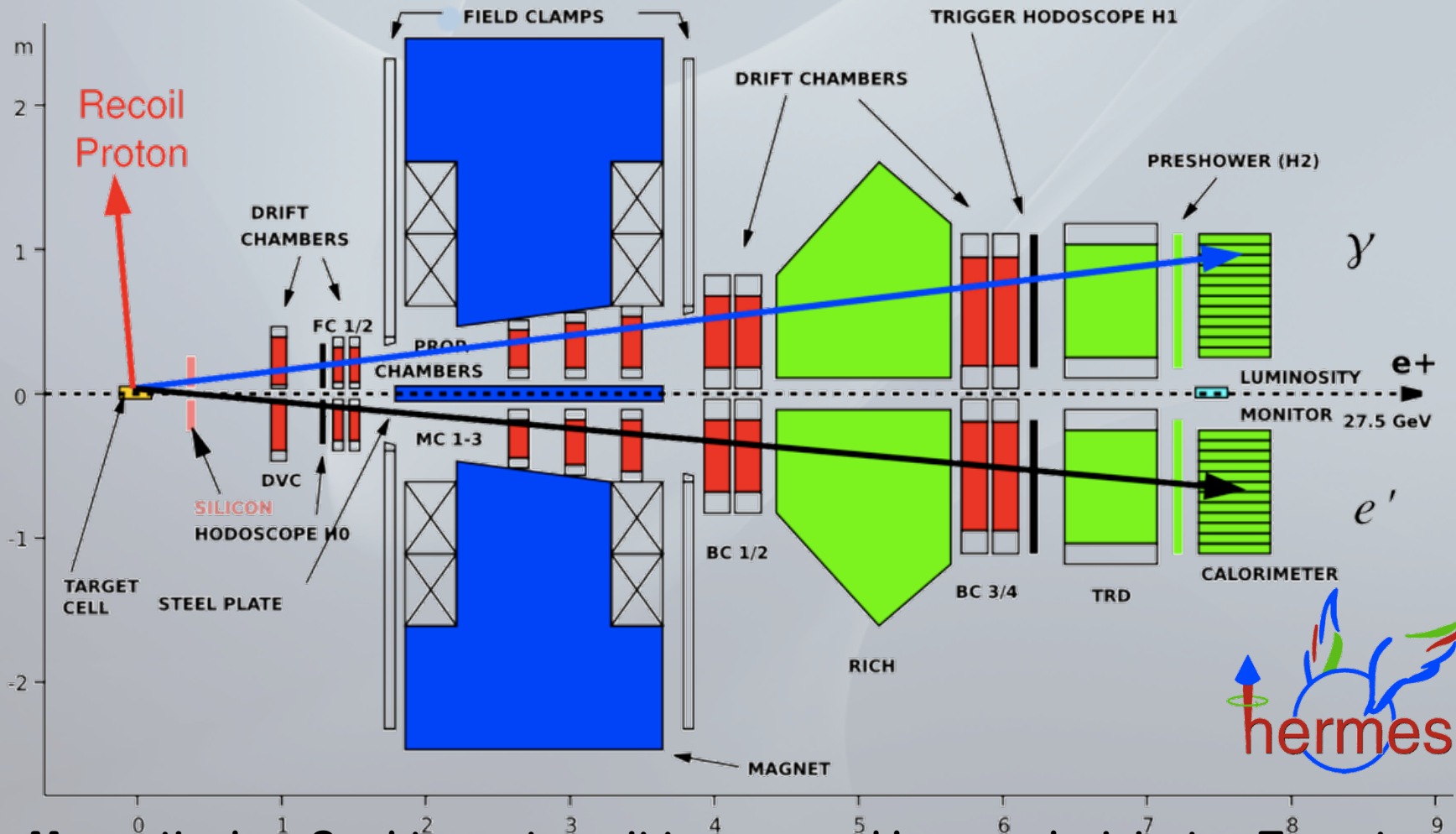
# Bisherige Messungen

# HERMES an HERA, DESY

- Long. polarisierter Elektronen-/Positronen-Strahl 27.6 GeV

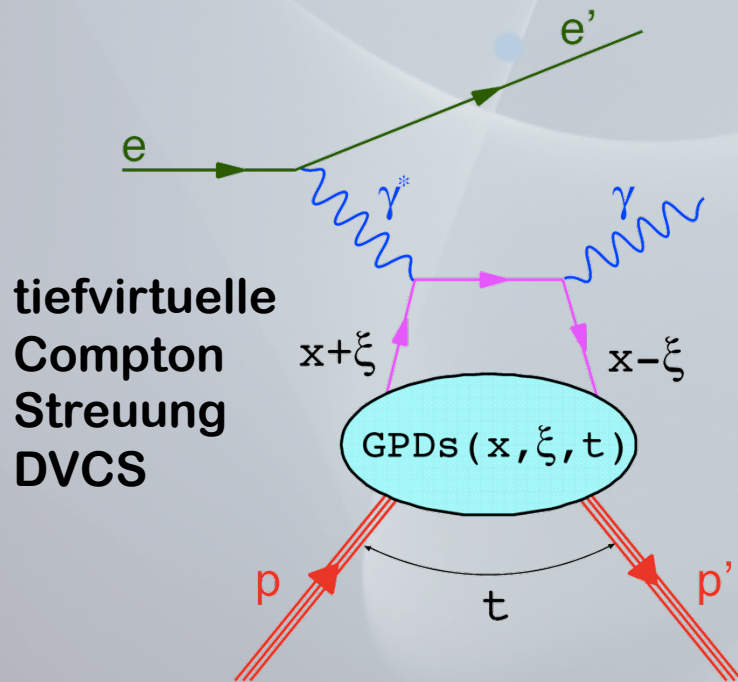


# HERMES an HERA, DESY

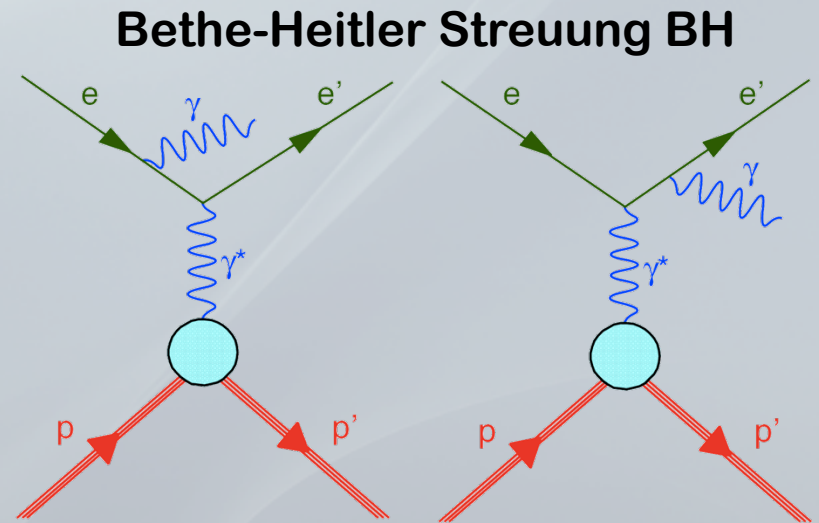
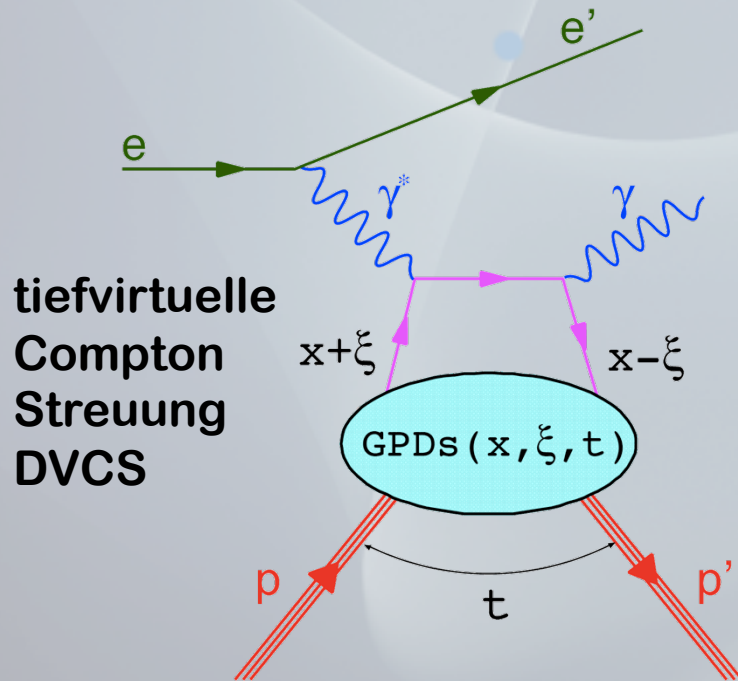


Magnetisches Spektrometer mit transv. and long. polarisierten Targets

# DVCS, Zugang zu GPDs



# DVCS, Zugang zu GPDs



- Ununterscheidbar and Wirkungsquerschnitt dominiert durch BH
  - Extraktion aus deren Interferenz

$$d\sigma(eN \rightarrow eN\gamma) \propto |\mathcal{T}_{BH}|^2 + |\mathcal{T}_{DVCS}|^2 + \mathcal{T}_{BH}\mathcal{T}_{DVCS}^* + \mathcal{T}_{BH}^*\mathcal{T}_{DVCS}$$

BH: Bekannt aus QED

DVCS: Zugang zu GPDs

# Asymmetriemessungen

- **Strahl-Spin-Asymmetrie**

$$A_{LU} = \frac{d\sigma(\mathbf{e}^{\rightarrow}, \phi) - d\sigma(\mathbf{e}^{\leftarrow}, \phi)}{d\sigma(\mathbf{e}^{\rightarrow}, \phi) + d\sigma(\mathbf{e}^{\leftarrow}, \phi)} \propto \Im m(\mathcal{H}) \sin(\phi)$$

- **Strahl-Ladungs-Asymmetrie**

$$A_C = \frac{d\sigma(\mathbf{e}^+, \phi) - d\sigma(\mathbf{e}^-, \phi)}{d\sigma(\mathbf{e}^+, \phi) + d\sigma(\mathbf{e}^-, \phi)} \propto \Re e(\mathcal{H}) \cos(\phi)$$

- **Longitudinal-Target-Spin-Asymmetrie**

$$A_{UL} = \frac{d\sigma(\mathbf{p}^{\rightarrow}, \phi) - d\sigma(\mathbf{p}^{\leftarrow}, \phi)}{d\sigma(\mathbf{p}^{\rightarrow}, \phi) + d\sigma(\mathbf{p}^{\leftarrow}, \phi)} \propto \Im m(\tilde{\mathcal{H}}) \sin(\phi)$$

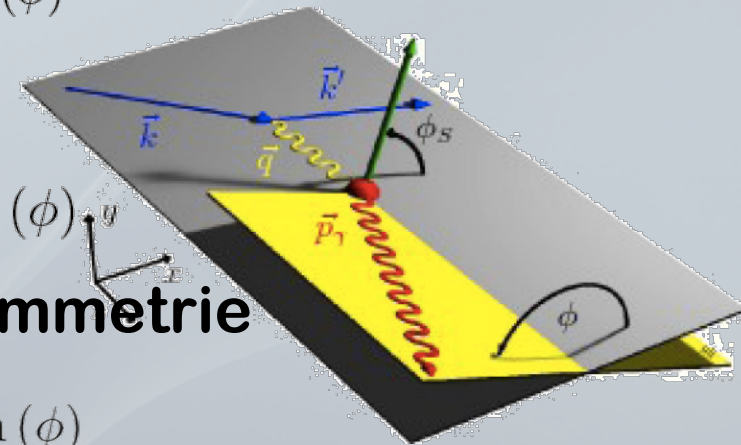
- **Transversal-Target-Spin-Asymmetrie**

$$A_{UT} = \frac{d\sigma(\mathbf{p}^{\uparrow}, \phi) - d\sigma(\mathbf{p}^{\downarrow}, \phi)}{d\sigma(\mathbf{p}^{\uparrow}, \phi) + d\sigma(\mathbf{p}^{\downarrow}, \phi)} \propto f(\mathcal{H}, \mathcal{E}, \tilde{\mathcal{H}}, \tilde{\mathcal{E}}, \phi, \phi_S)$$

- **Imaginär- und Realteile der Compton-Formfaktoren**

$\mathcal{H}, \mathcal{E}, \tilde{\mathcal{H}}, \tilde{\mathcal{E}}$  sind direkt mit GPDs verknüpft

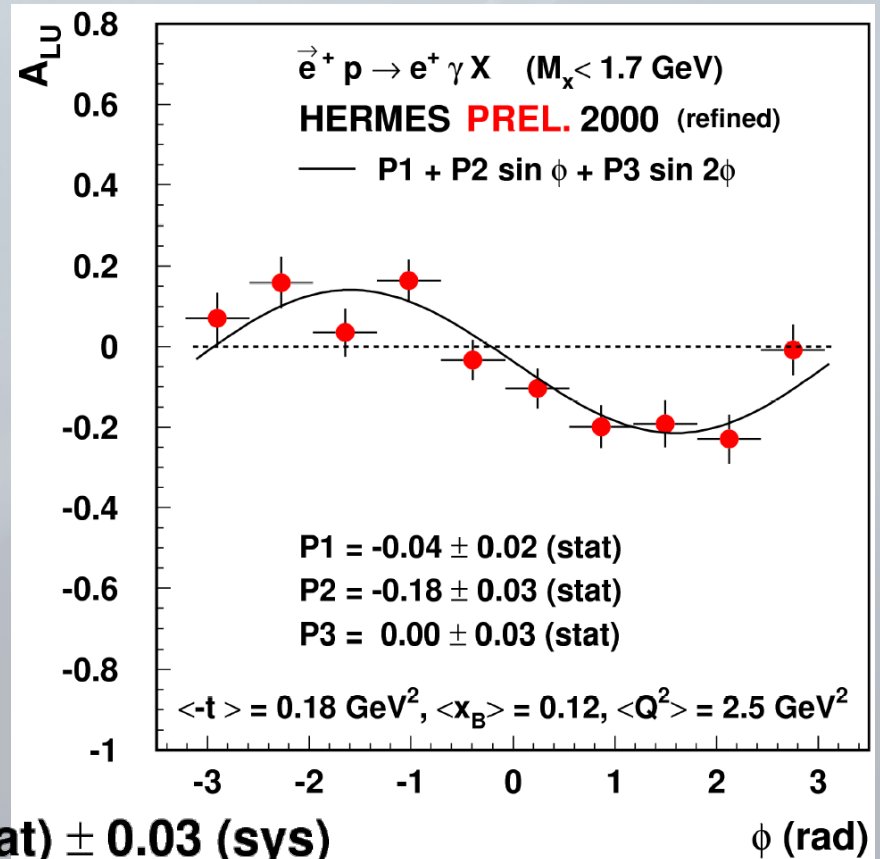
$$\Im \mathcal{F}(\xi, t, Q^2) = \pi \sum_q e_q^2 [F^q(\xi, \xi, t, Q^2) \mp F^q(-\xi, \xi, t, Q^2)]$$



# DVCS Asymmetrien: Strahl-Spin

$$A_{LU} = \frac{d\sigma(e^{\rightarrow}, \phi) - d\sigma(e^{\leftarrow}, \phi)}{d\sigma(e^{\rightarrow}, \phi) + d\sigma(e^{\leftarrow}, \phi)} \propto \Im m(\mathcal{H}) \sin(\phi)$$

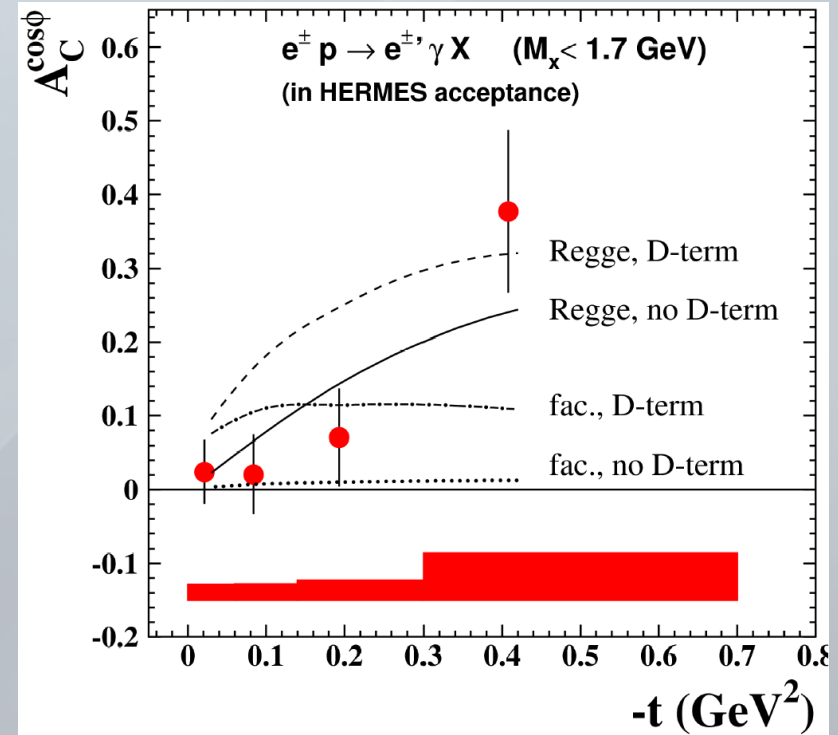
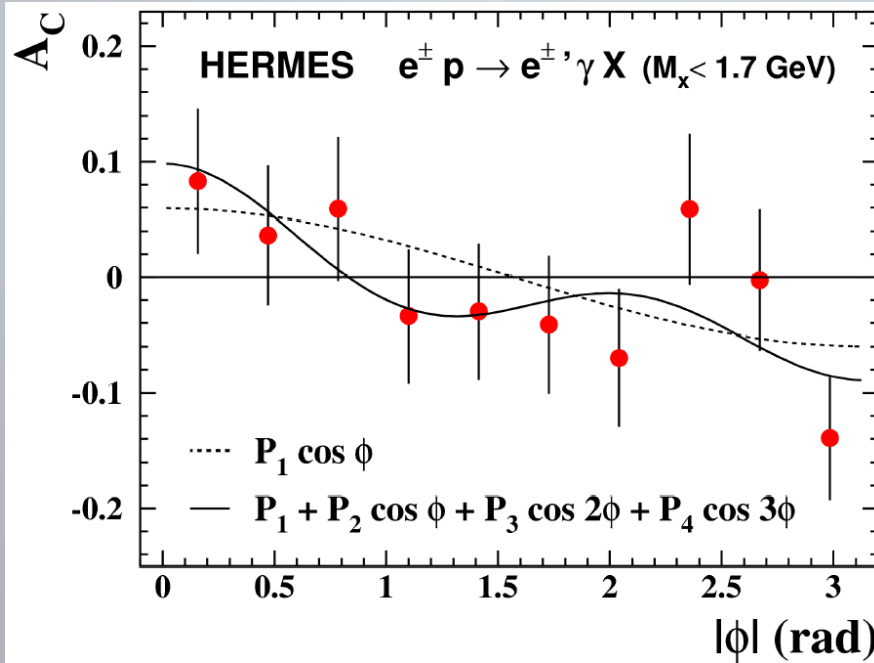
- Erste Messungen der DVCS Asymmetrien:
  - **Strahl-Spin-Asymmetry**  
HERMES und CLAS, beide in PRL87(2001)
- Präzisierte Analyse:
  - **Konsistentes Ergebnis**
- Beschränkt GPD H



$$A_{LU}^{\sin \phi} \Big|_{M_x < 1.7 \text{ GeV}} = -0.18 \pm 0.03 \text{ (stat)} \pm 0.03 \text{ (sys)}$$

# DVCS Asymmetrien: Strahl-Ladung

$$A_C = \frac{d\sigma(e^+, \phi) - d\sigma(e^-, \phi)}{d\sigma(e^+, \phi) + d\sigma(e^-, \phi)} \propto \Re(\mathcal{H}) \cos(\phi)$$



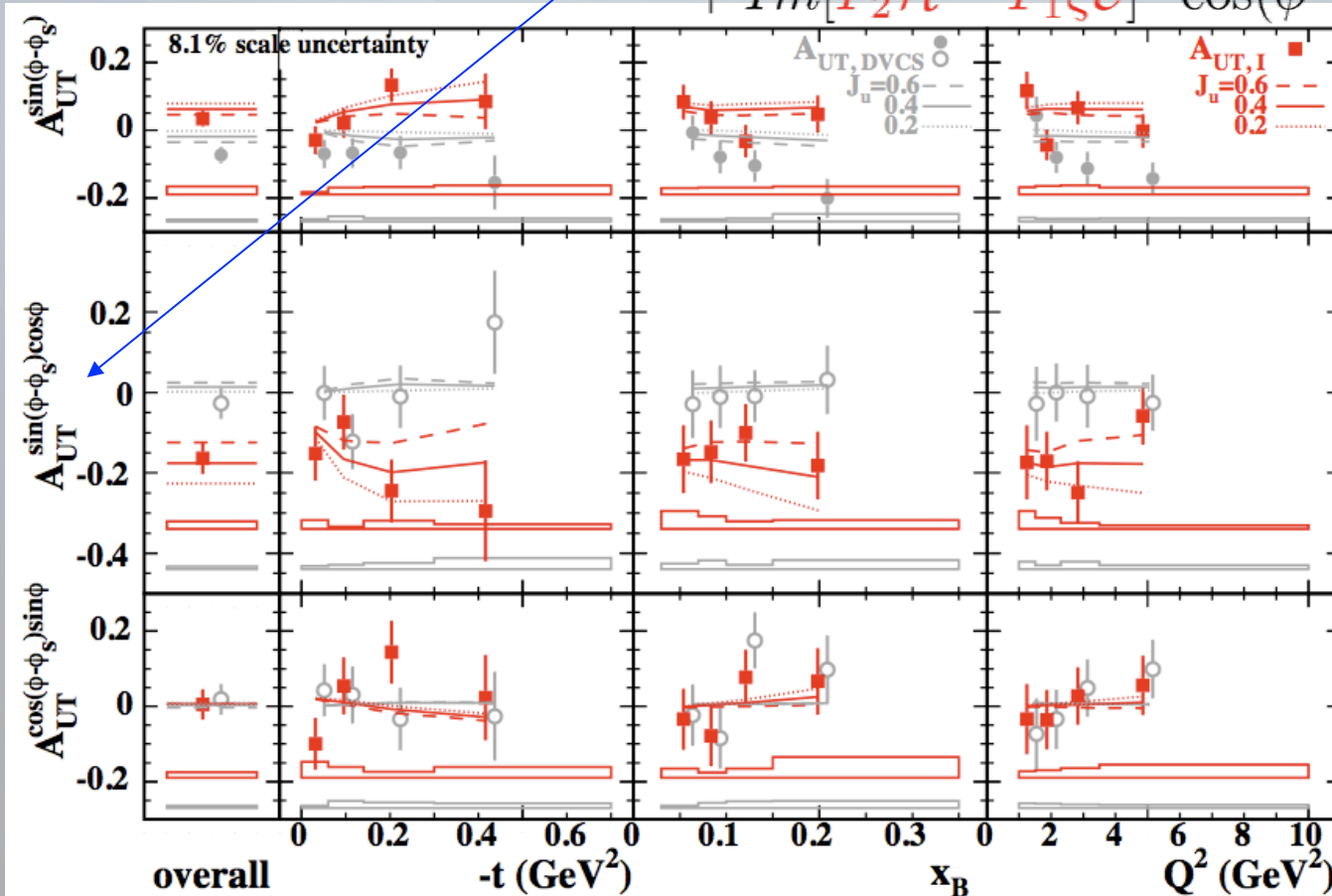
$$A_C^{\cos \phi} = 0.063 \pm 0.029(\text{stat.}) \pm 0.026(\text{sys.})$$

- Beschränkt GPD H
- $t$ -Abhängigkeit schränkt Modelle ein



# DVCS Asymmetrien: Transvers. Target

$$A_{UT} = \frac{d\sigma(\mathbf{p}^\uparrow, \phi) - d\sigma(\mathbf{p}^\downarrow, \phi)}{d\sigma(\mathbf{p}^\uparrow, \phi) + d\sigma(\mathbf{p}^\downarrow, \phi)} \times \left( \text{Im}[F_2\mathcal{H} - F_1\mathcal{E}] \cdot \sin(\phi - \phi_S) \cdot \cos\phi + \text{Im}[F_2\tilde{\mathcal{H}} - F_1\xi\tilde{\mathcal{E}}] \cdot \cos(\phi - \phi_S) \cdot \sin\phi \right)$$

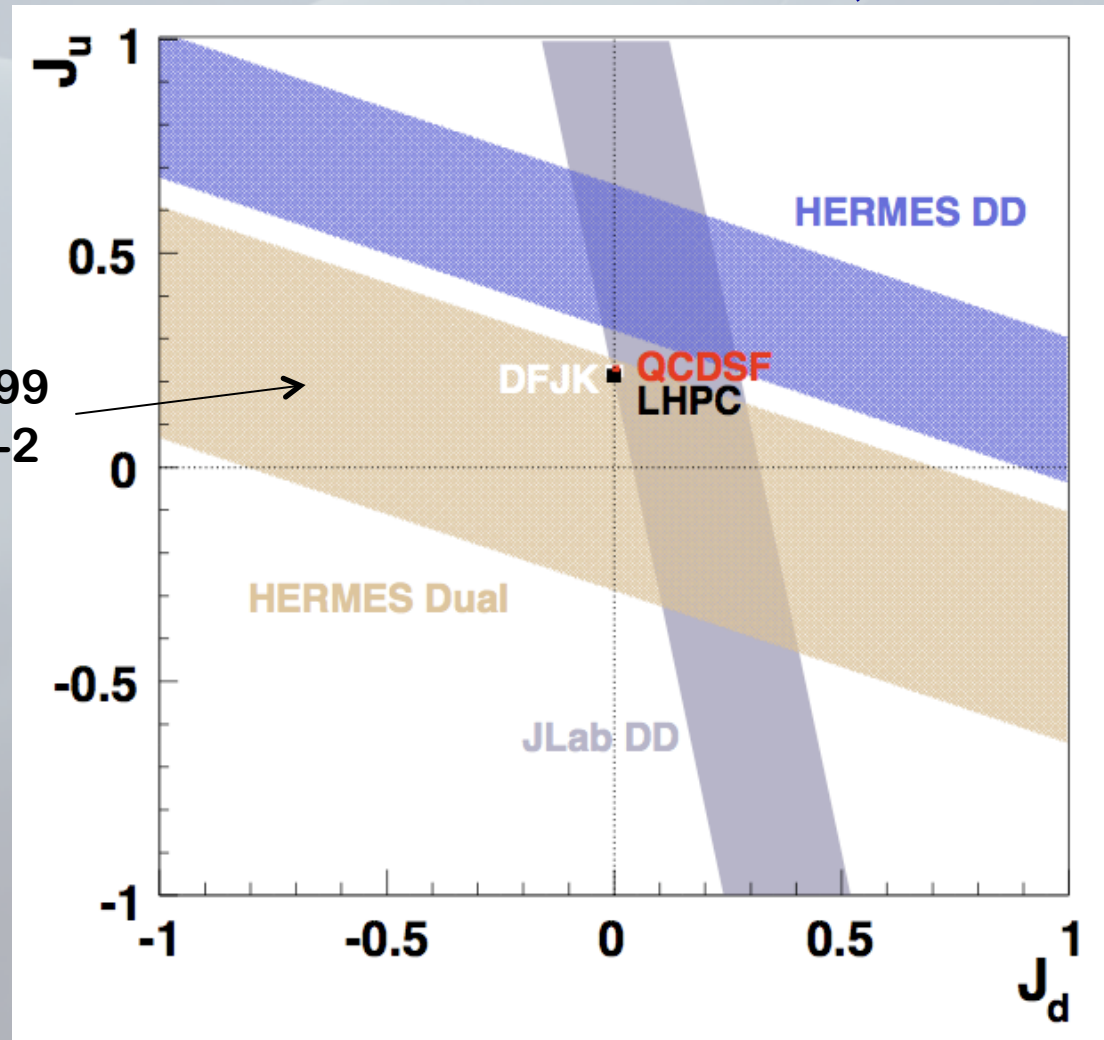


JHEP 0806:066,2008

# Globales Bild: $J_u/J_d$

- Veröffentlichtes HERMES Resultat [JHEP 0806:066,2008](#)

Erratum: [arXiv:0810.3899](#)  
Modellfehler Faktor 1.5-2



# Überblick

- Asymmetrien aus Messungen tiefvirtueller Compton-Streuung an HERMES
  - Zusammenhang mit Real- und Imaginärteilen der Compton-Formfaktoren
  - D.h. Rückschlüsse auf GPDs möglich
- Viele weitere Messungen, u.a.
  - F2: kleines  $x$ , mittl.  $Q^2$
  - SSA in DIS –  $2\gamma$
  - Kern-Attenuation

$$A_C^{\cos(0\phi)}$$

$$A_C^{\cos\phi}$$

$$A_C^{\cos(2\phi)}$$

$$A_C^{\cos(3\phi)}$$

$$A_{LU,I}^{\sin\phi}$$

$$A_{LU,DVCS}^{\sin\phi}$$

$$A_{LU,I}^{\sin(2\phi)}$$

$$A_{UT,I}^{\sin(\phi-\phi_s)}$$

$$A_{UT,DVCS}^{\sin(\phi-\phi_s)}$$

$$A_{UT,I}^{\sin(\phi-\phi_s)\cos\phi}$$

$$A_{UT,I}^{\cos(\phi-\phi_s)\sin\phi}$$

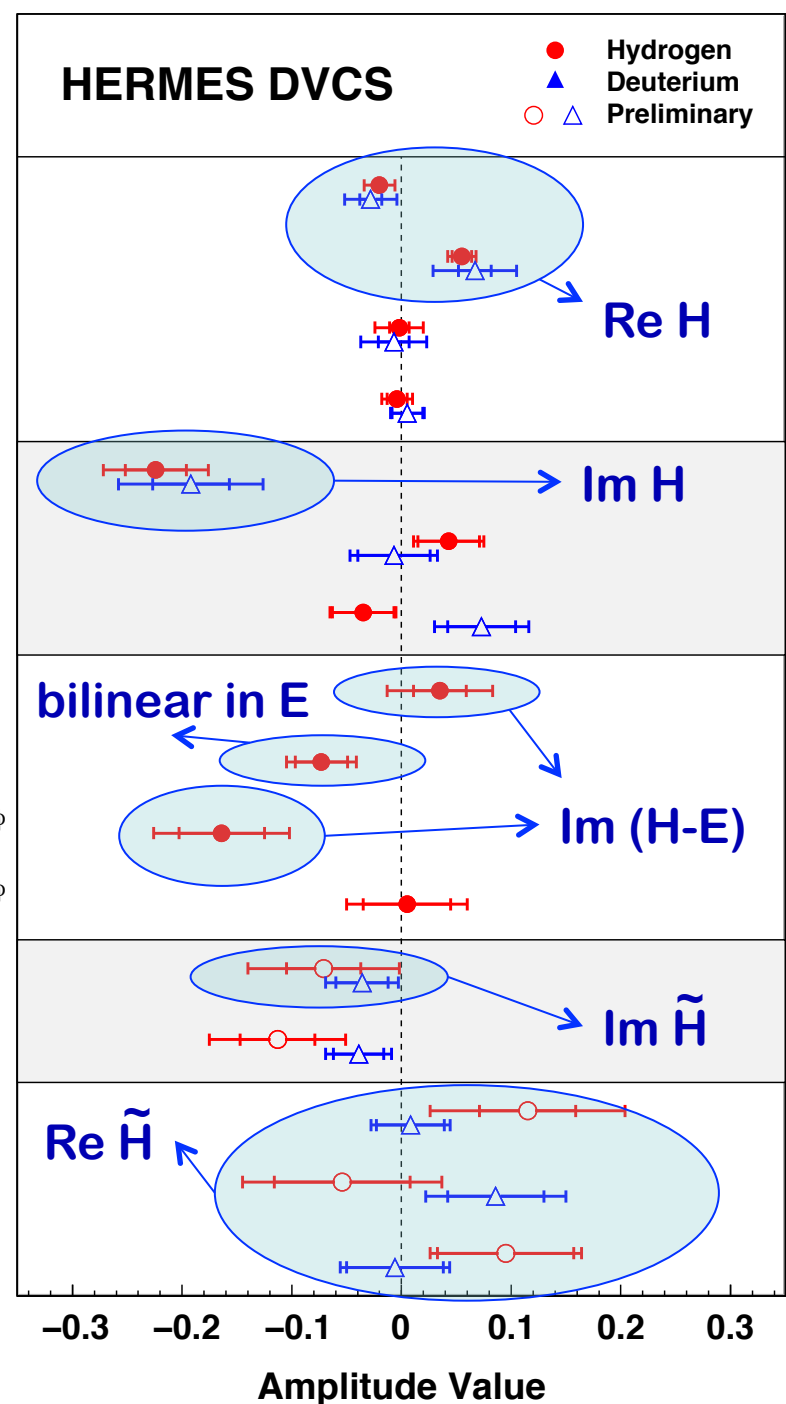
$$A_{UL}^{\sin\phi}$$

$$A_{UL}^{\sin(2\phi)}$$

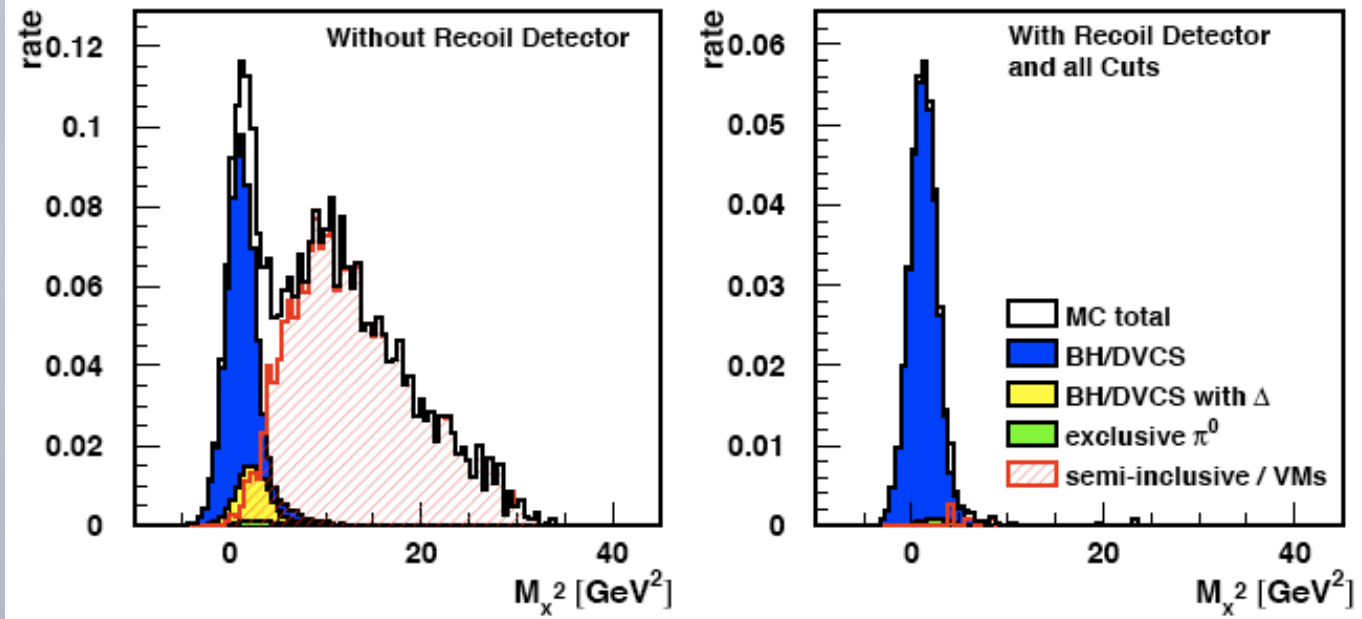
$$A_{LL}^{\cos(0\phi)}$$

$$A_{LL}^{\cos\phi}$$

$$A_{LL}^{\cos(2\phi)}$$

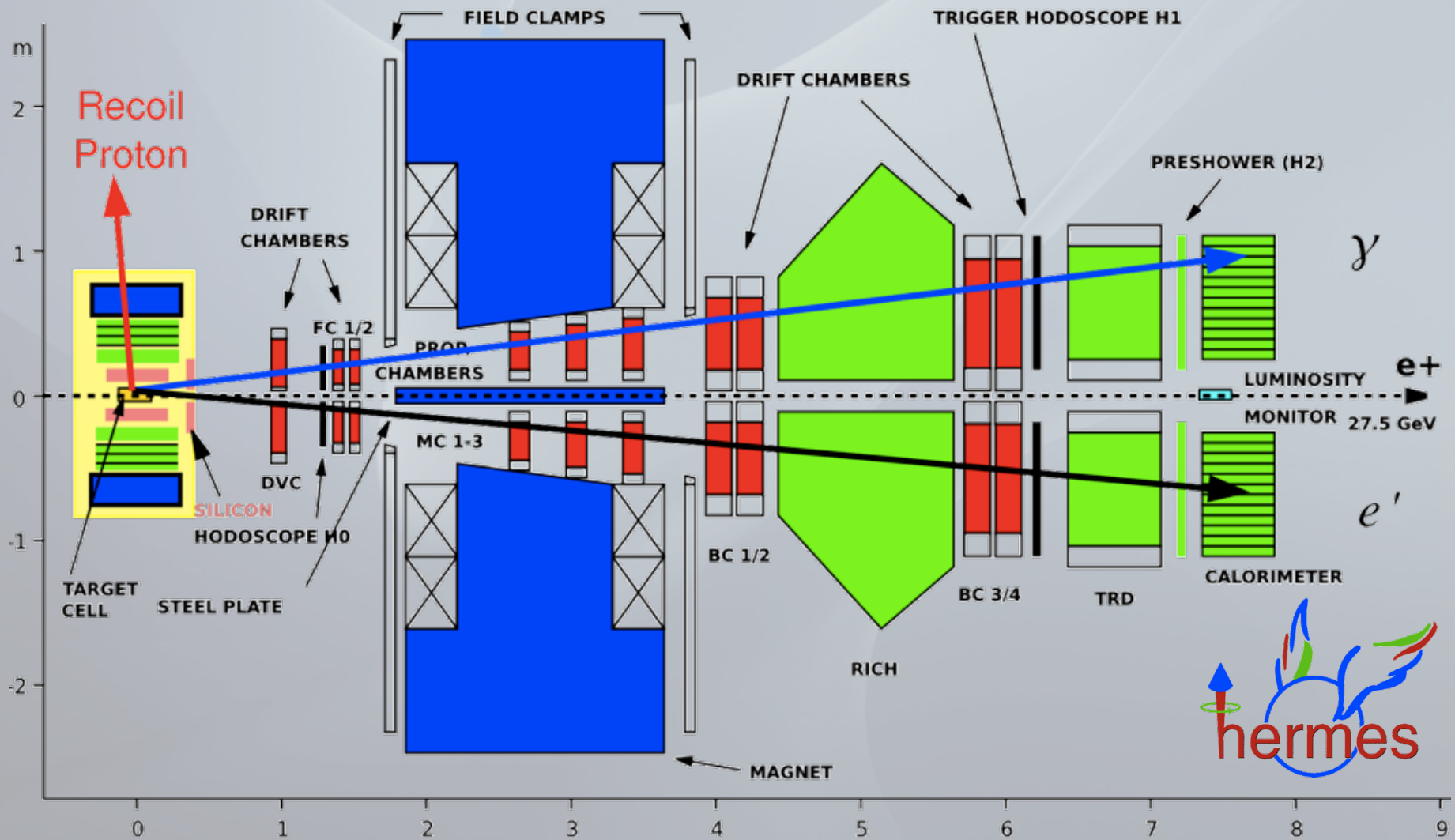


# HERMES Targetspektrometer



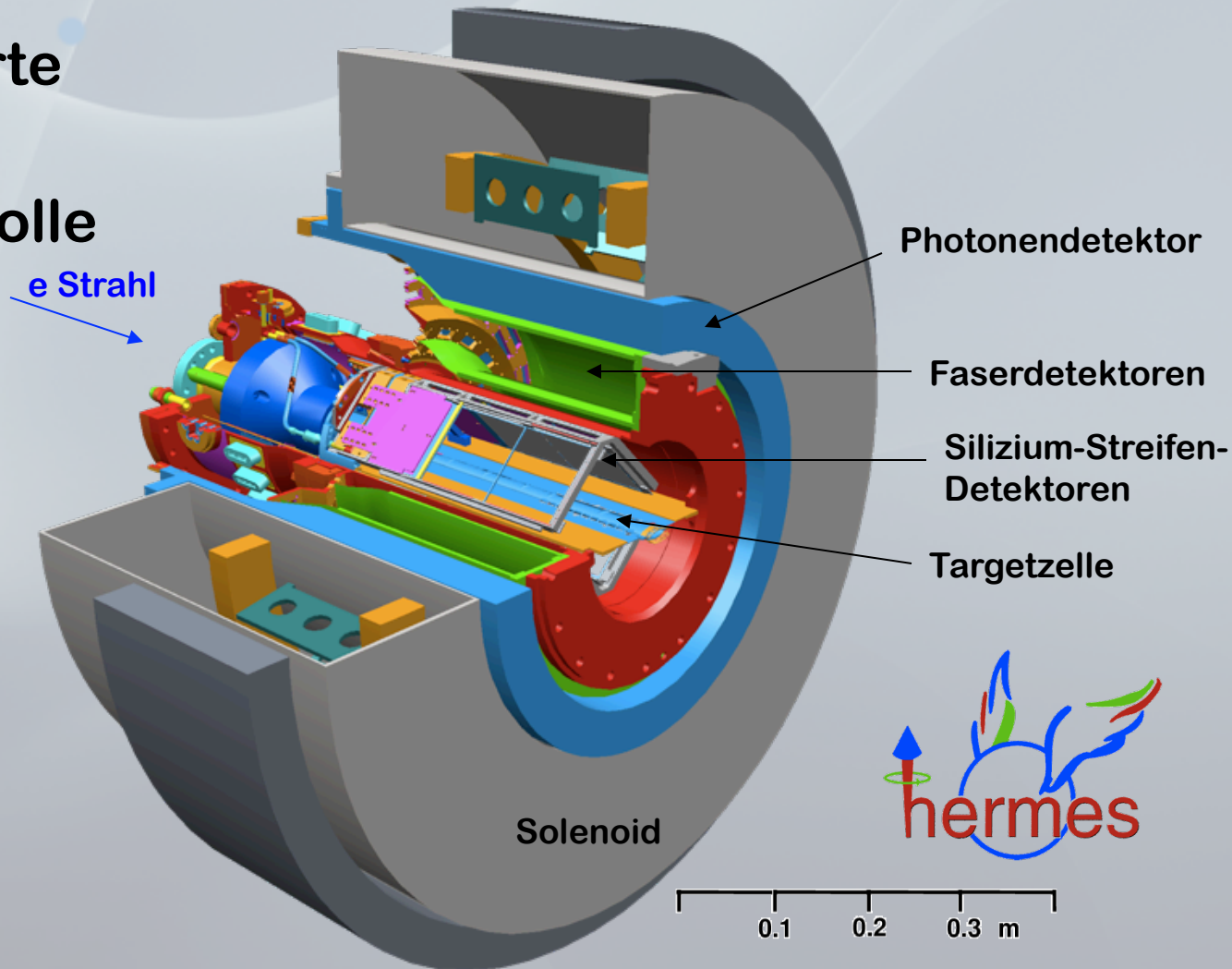
- Untergrundreduktion (insbes. assoziierte BH/DVCS Prozesse mit  $\Delta$ -Resonanzen und andere semiinklusive Prozesse)
  - Reduktion von einem Anteil von 17% auf ca. 1%
- Verbesserung der Auflösung in  $t$  bei kleinen  $t$  (mit Si-Detektor)
- Hohe Luminosität durch unpolarisiertes Target

# Targetspektrometer an HERMES



# HERMES Targetspektrometer

- Unpolarisierte Gastargets
- Anspruchsvolle Detektoren

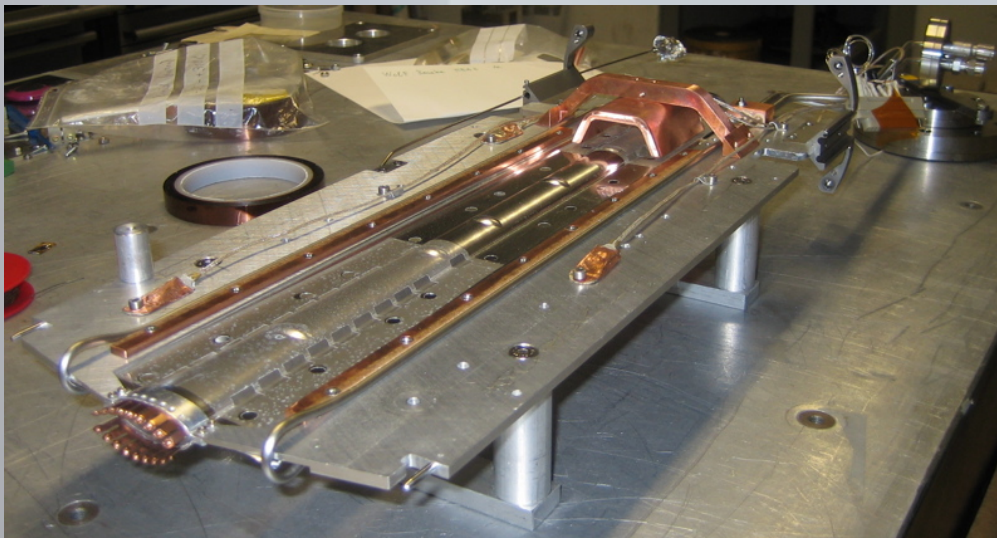
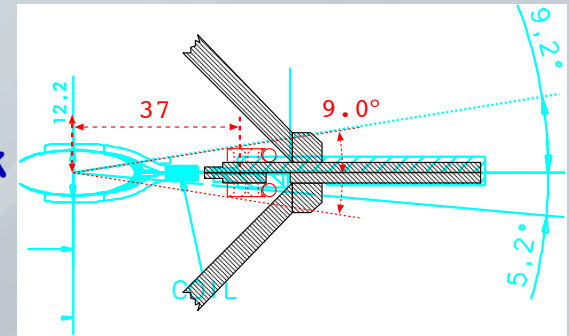


# Anlaufschwierigkeiten

- Löcher in der Targetzelle – Überhitzung?
- Siliziumdetektoren funktionsuntüchtig
- Ursachen?
- Lösungsansatz
  - **RF-Shield für Si-Detektoren & Elektronik**
  - **Strahlrohrmodifikation**

# Anlaufschwierigkeiten

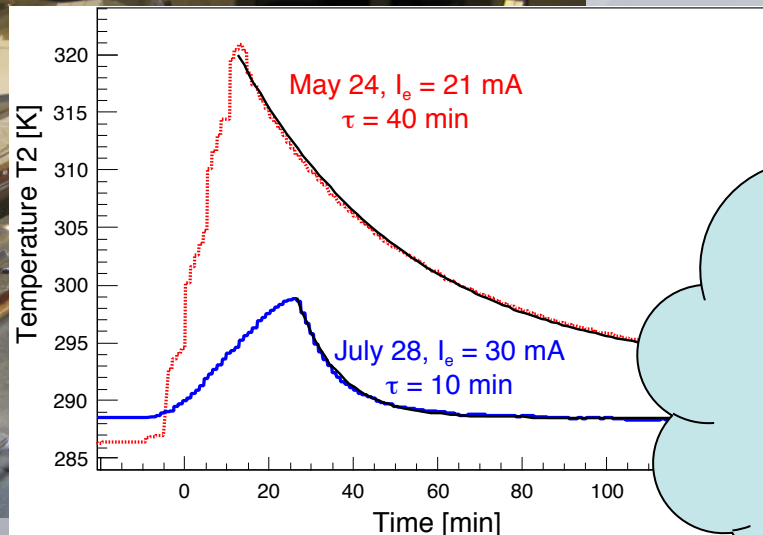
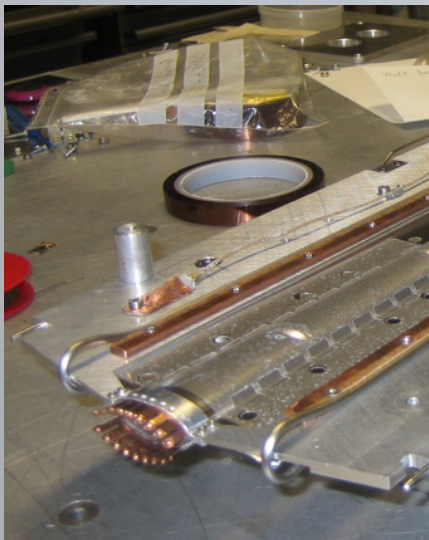
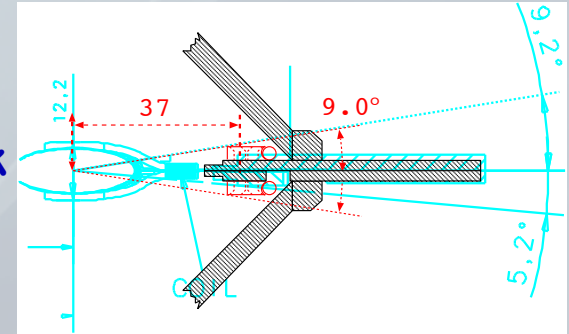
- Löcher in der Targetzelle – Überhitzung?
- Siliziumdetektoren funktionsuntüchtig
- Ursachen?
- Lösungsansatz
  - RF-Shield für Si-Detektoren & Elektronik
  - Strahlrohrmodifikation
  - Neue Targetkühlung





# Anlaufschwierigkeiten

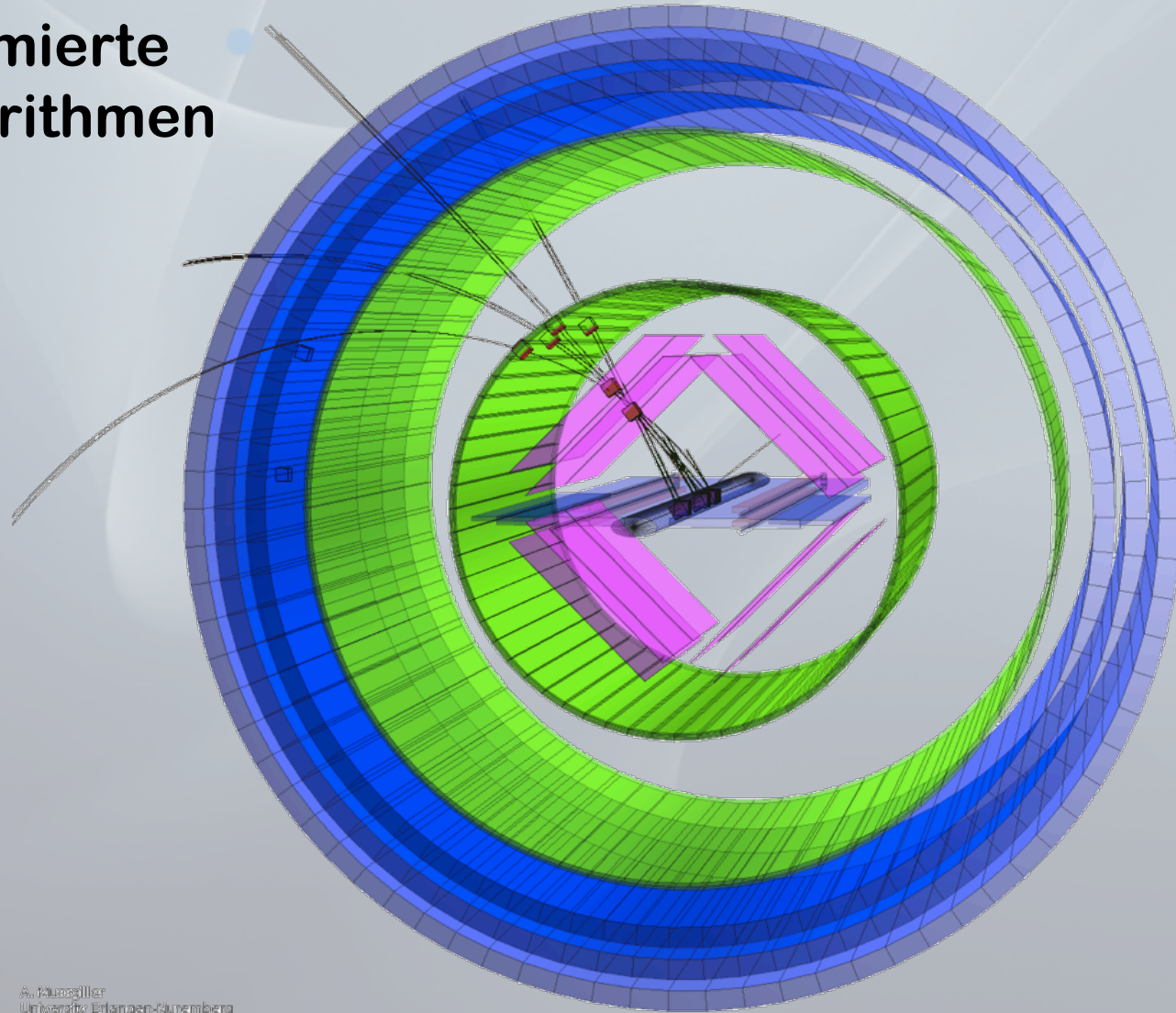
- Löcher in der Targetzelle – Überhitzung?
- Siliziumdetektoren funktionsuntüchtig
- Ursachen?
- Lösungsansatz
  - RF-Shield für Si-Detektoren & Elektronik
  - Strahlrohrmodifikation
  - Neue Targetkühlung



Erfolgreiche  
Datennahme

# Spurrekonstruktion

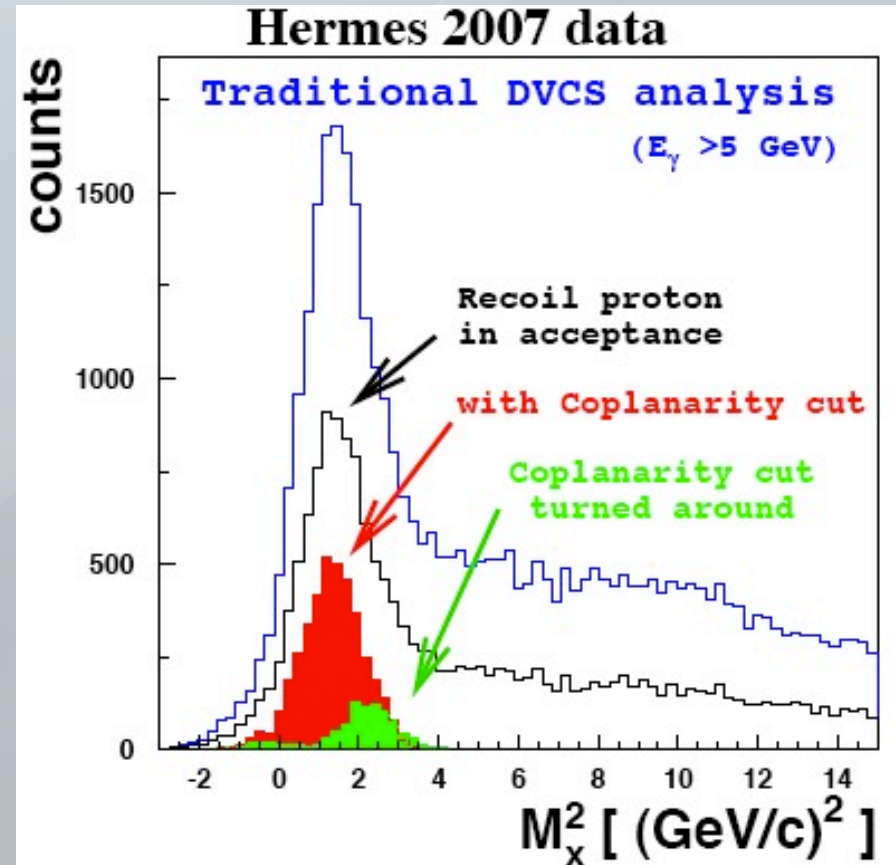
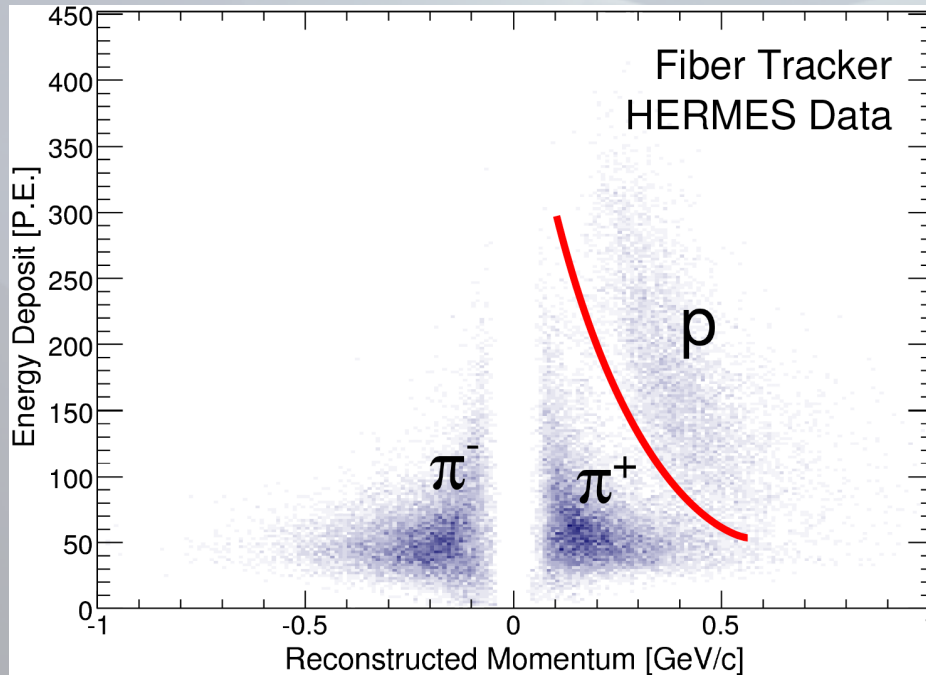
- Optimierte Algorithmen



A. Kussiller  
University Erlangen-Nuremberg

# Daten des Targetspektrometers

Spurrekonstruktion durch Ortsauflösung  
Teilchenidentifikation durch Energieverlust



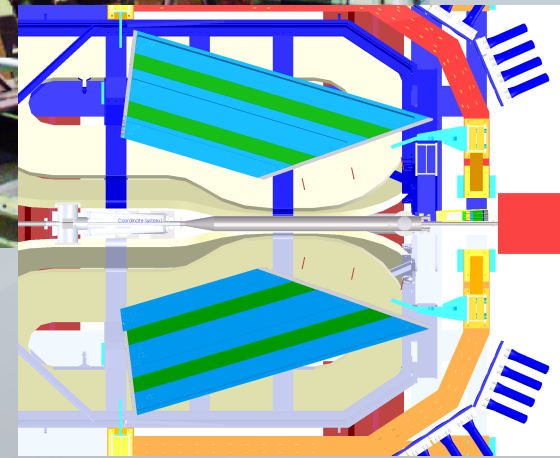
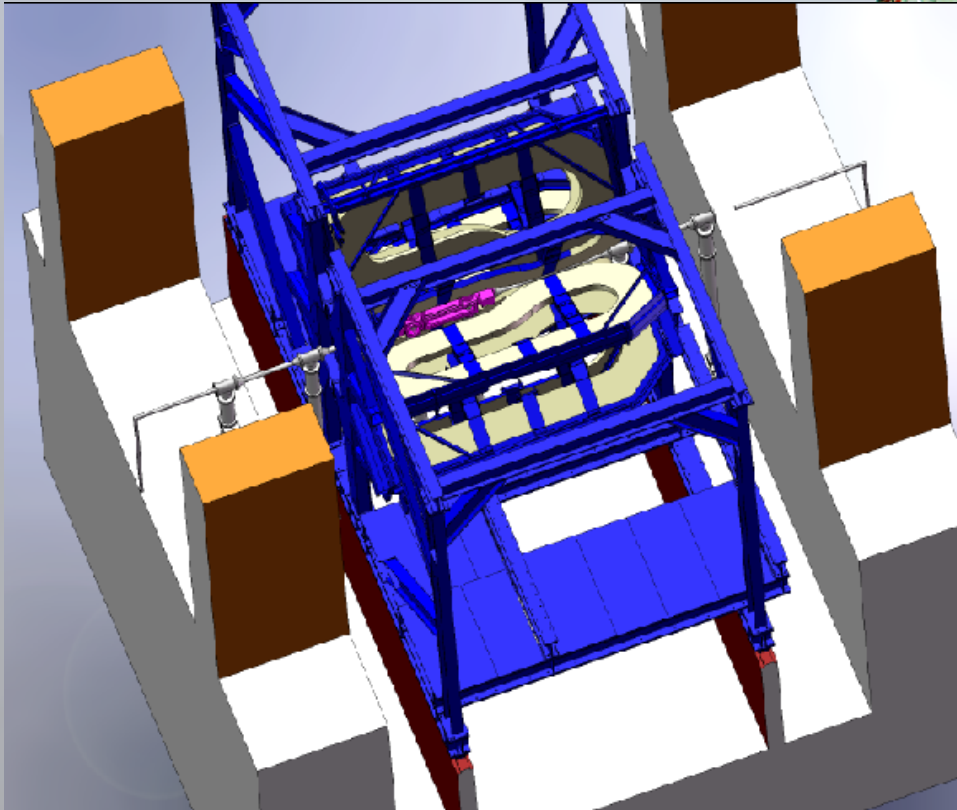
- **Exklusivität**
  - DVCS (Gamma)
  - DVCS  $\pi^0$  Produktion



# Zukünftige Messungen

# OLYMPUS

BLAST an BATES...

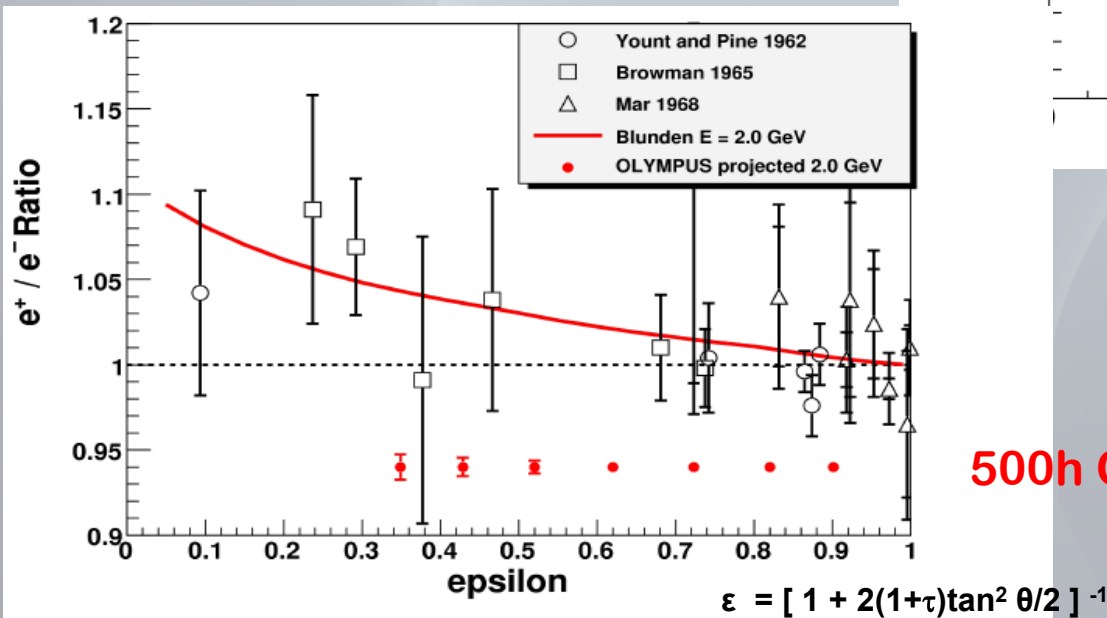
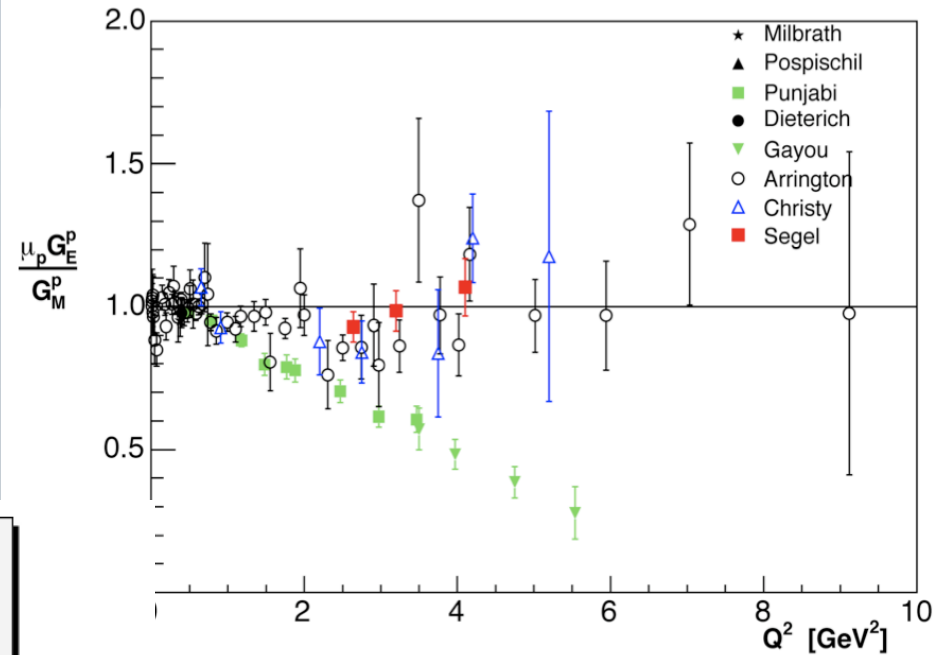


...am früheren ARGUS  
Platz an DORIS, DESY  
2GeV  $e^+$  und  $e^-$

Messung in 2011-12

# OLYMPUS

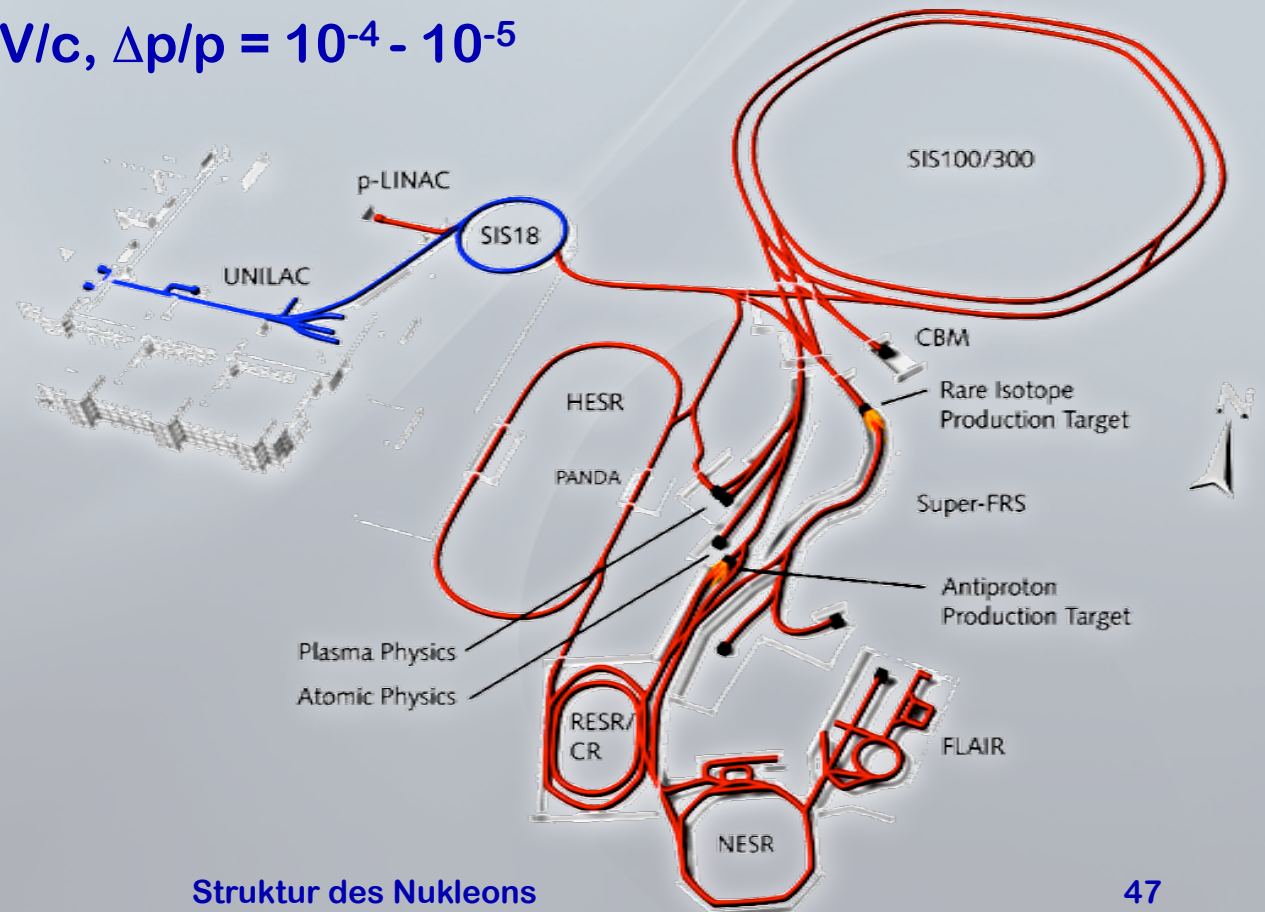
- Diskrepanz
  - Rosenbluth Ansatz
  - Polarisationsmessungen
- 2-Photonen-Austausch?
- $e^+/e^-$  Verhältnis bei  $Q^2=0.6-2.4(\text{GeV}/c)^2$



500h OLYMPUS Strahlzeit

# PANDA an FAIR

- Facility for Antiproton and Ion Research
- HESR an FAIR
  - Speicher- und Beschleunigerring für Antiprotonen
  - 1.5 - 15 GeV/c,  $\Delta p/p = 10^{-4} - 10^{-5}$

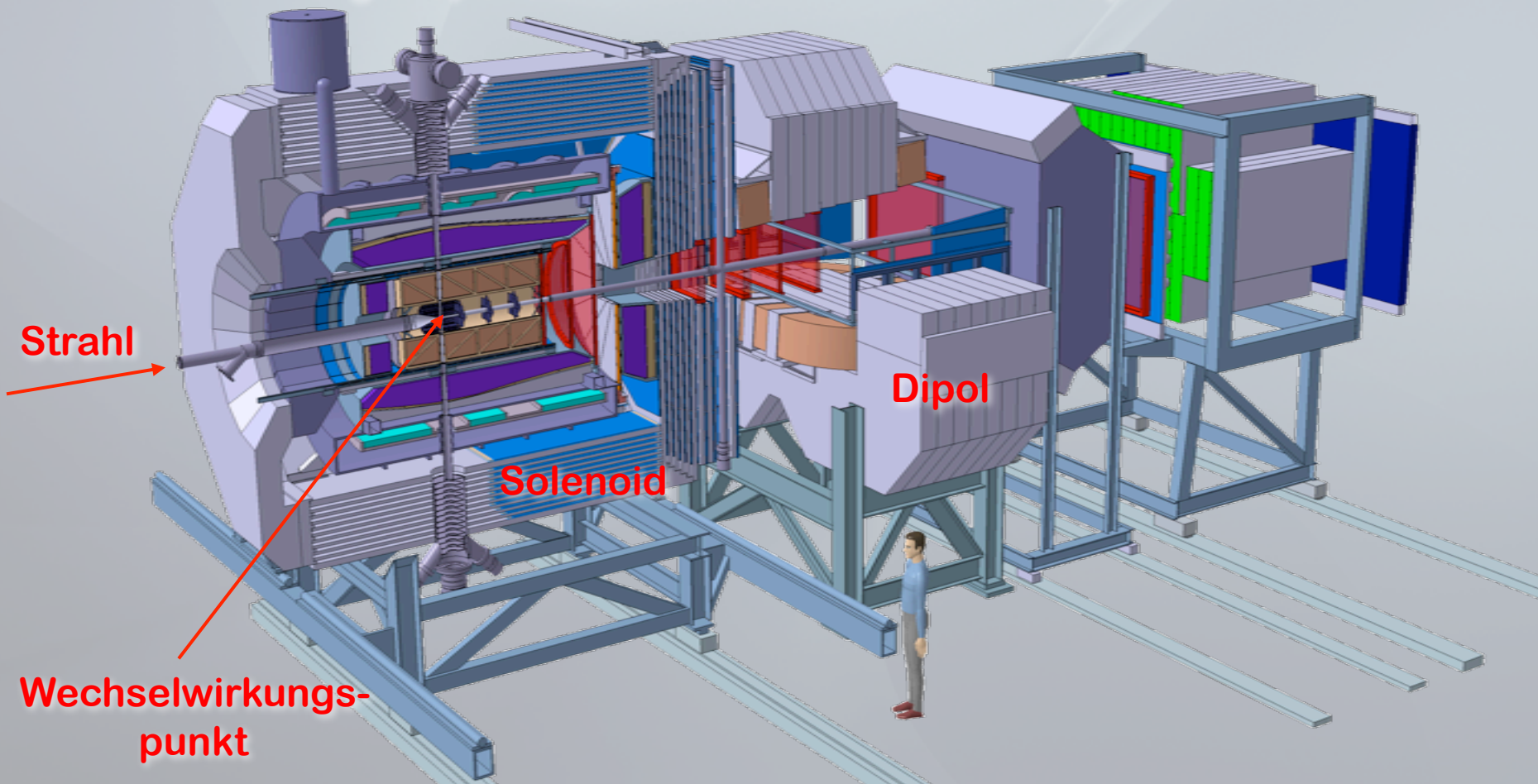


# PANDA-Detektor

- Doppel-Magnetspektrometer mit ruhendem Target

Target-Spektrometer

Forwärts-Spektrometer



Strahl

Solenoid

Dipol

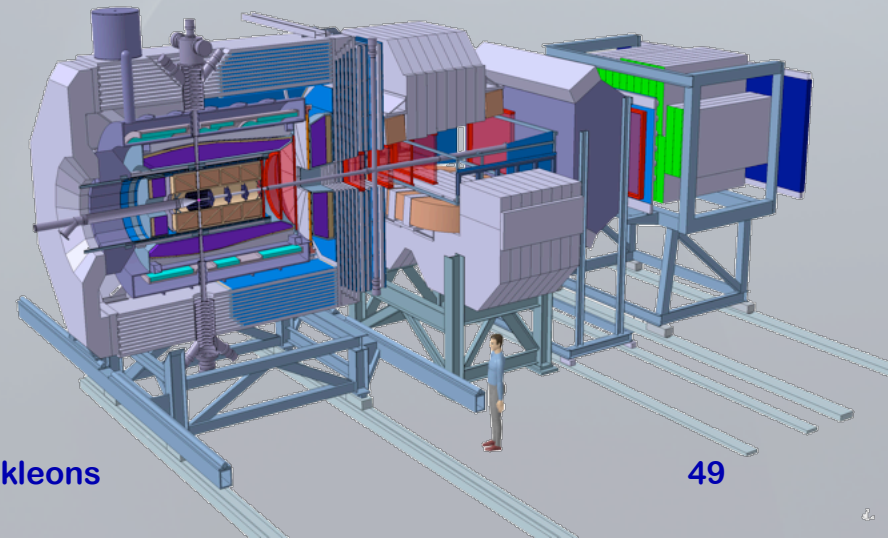
Wechselwirkungs-  
punkt



# PANDA Physikprogramm

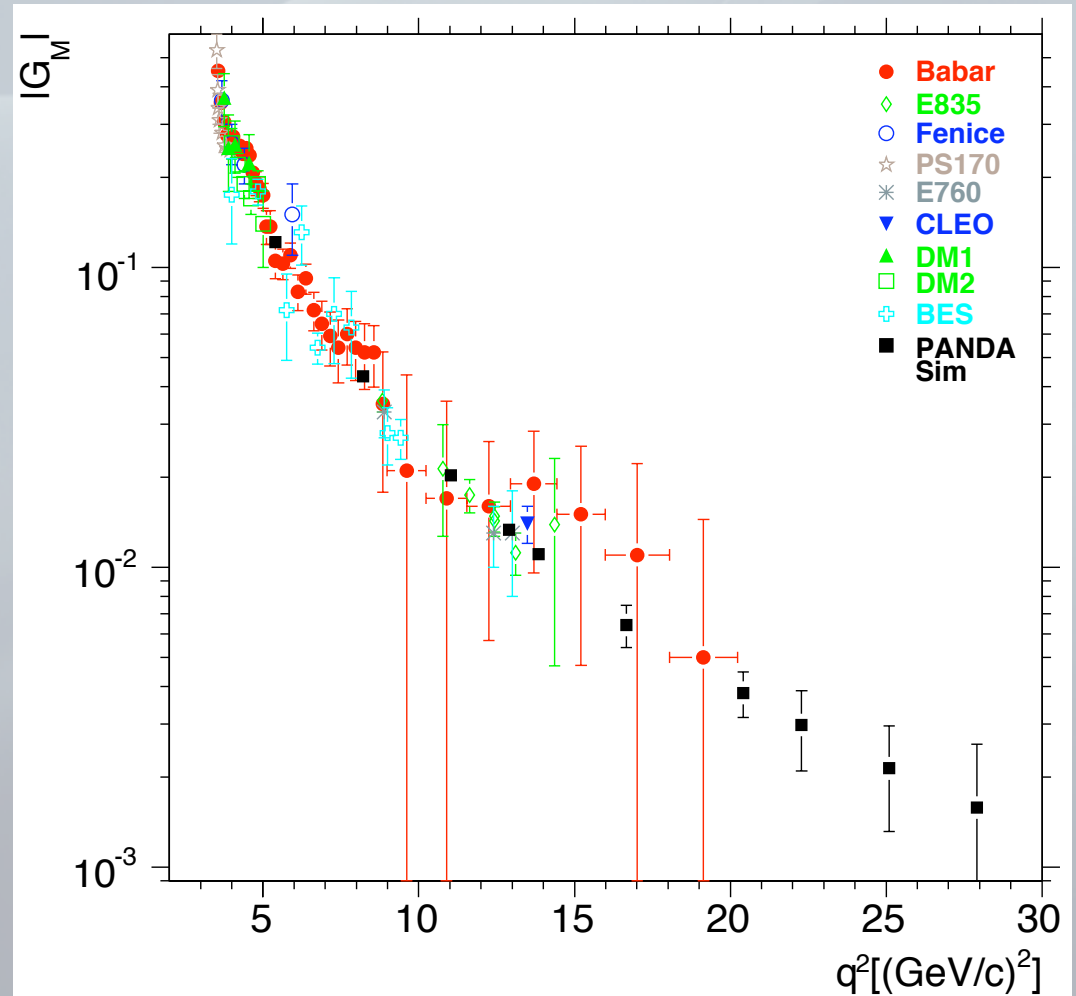
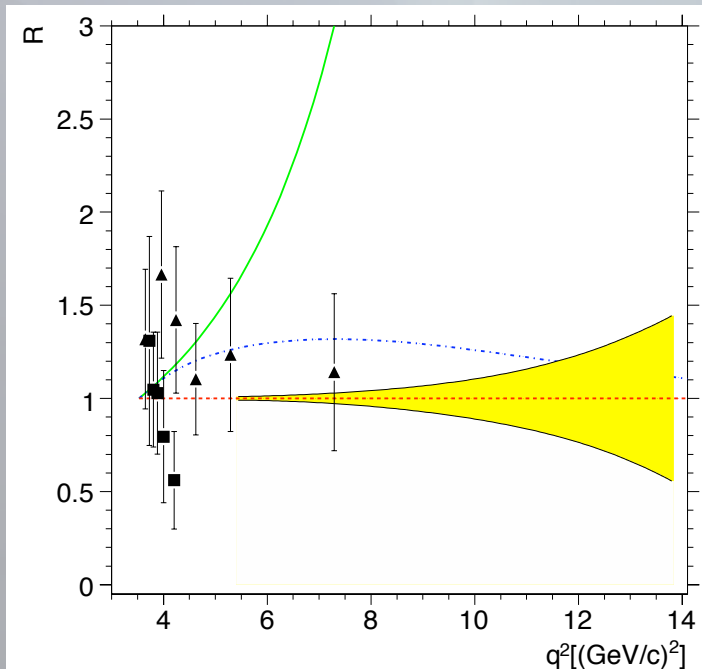
- Charmonium Spektroskopie
- Gluonische Anregungen (Hybride, Gluebälle)
- Hadronische Eigenschaften im Kern
- Baryonen mit Strangeness oder Charm
- $\gamma$ -Spektroskopie an Hyperkernen
- Struktur des Nukleons
  - Zeitartige GPDs, GDAs, TDAs
  - Zeitartige Formfaktoren
  - Drell-Yan-Prozesse
- ...

The logo for the PANDA experiment, featuring the word "panda" in a stylized, lowercase font. The letter "a" is significantly larger and contains a colorful graphic of a particle detector's cross-section. The letters "p", "n", "d", and "a" are smaller and positioned to the left of the large "a".



# PANDA: Zeitartige Formfaktoren

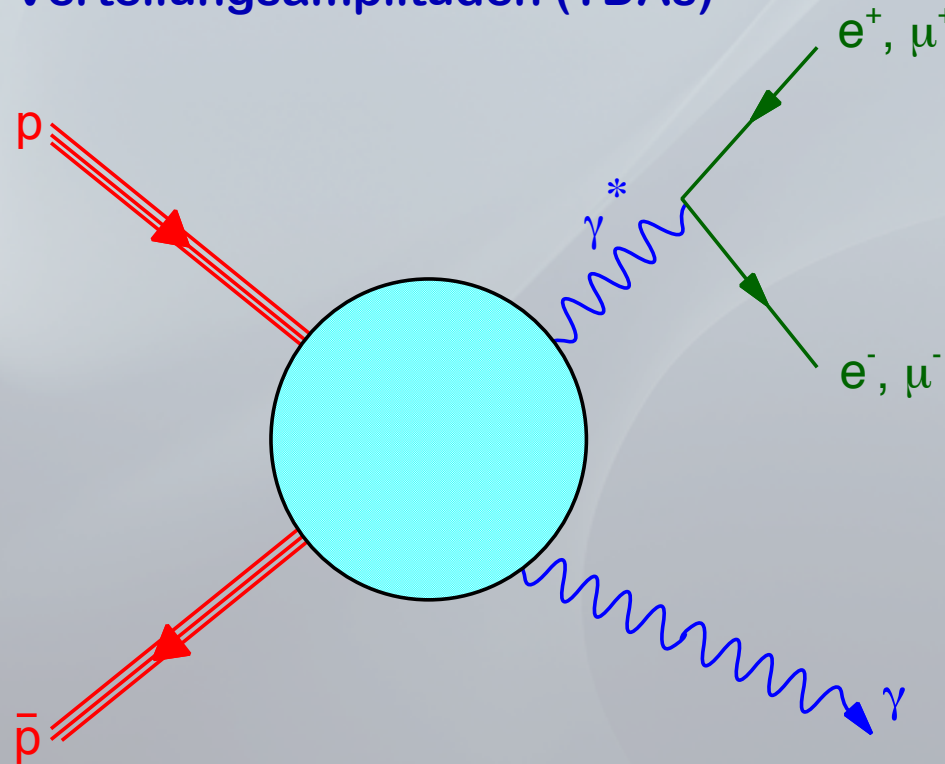
- PANDA
  - $R=|G_E|/|G_M|$  mit höchster Präzision
  - $|G_M|$  absolut bis  $30(\text{GeV}/c)^2$



PANDA Physics Performance Report: [arXiv:0903.3905](https://arxiv.org/abs/0903.3905)

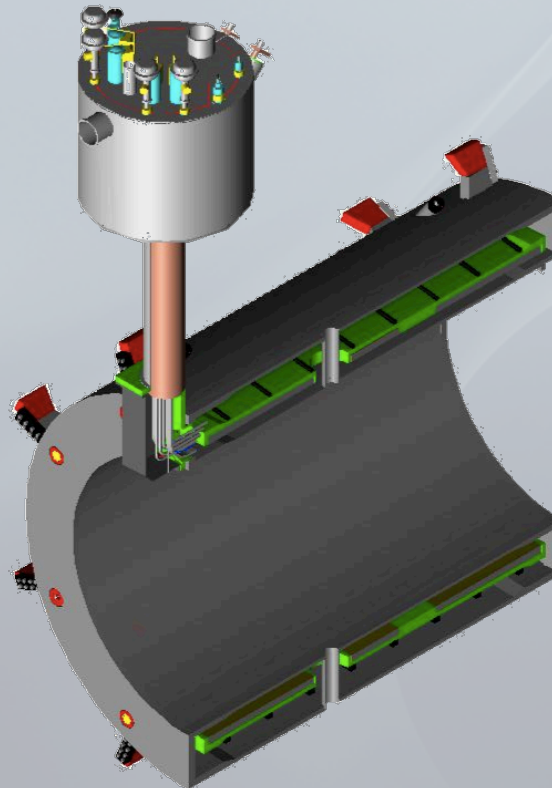
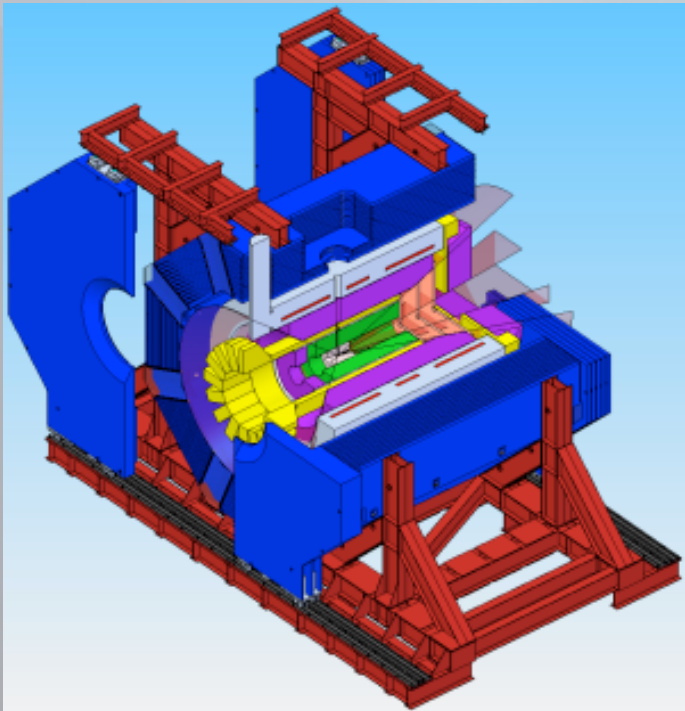
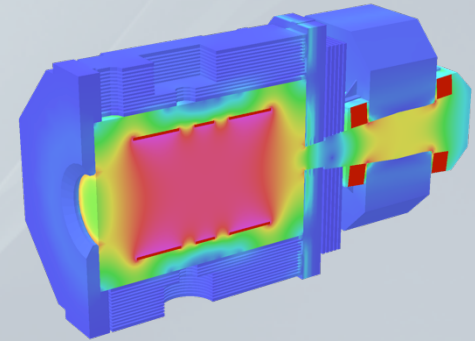
# PANDA: Zeitartige Verteilungsfunktionen

- Zeitartige Version von GPDs
  - zeitartige generalisierte Partonen-Amplituden (time-like GPDs)
  - generalisierte Verteilungsamplituden (GDAs)
  - Übergangs-Verteilungsamplituden (TDAs)



# PANDA Magnetdesign

- Solenoid Design
  - Zusammenarbeit Dubna, Genua, Krakau

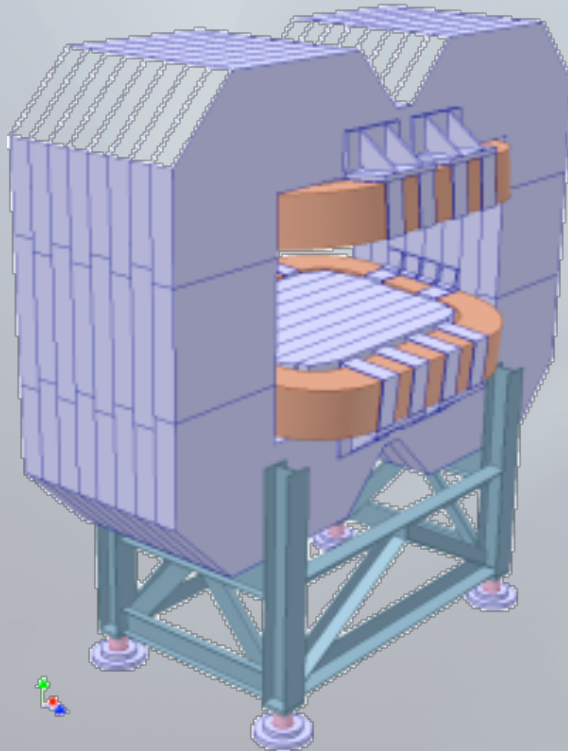
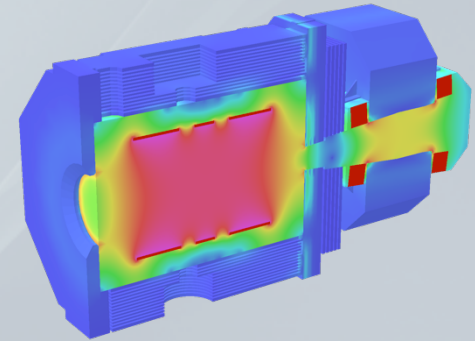


<i>Central field</i>	2.0 T
<i>Field homogeneity</i>	$\leq 2\%$
<i>Norm. radial field integral</i>	$\leq 2$ mm
<i>Inner bore</i>	1.9 m
<i>Cold mass parameters</i>	
<i>Length</i>	2.7 m
<i>Energy</i>	20 MJ
<i>Current</i>	5000 A
<i>Weight</i>	4.5 t
<i>Cable cross section</i>	3.4 x 2 mm
<i>Current density</i>	59 A/mm
<i>Yoke parameters</i>	
<i>Length</i>	4.9 m
<i>Outer radius</i>	2.30 m
<i>Iron layers</i>	13
<i>Total weight</i>	300 t

# PANDA Magnetdesign



- Dipol Design
  - Projektmanagement
  - Finanzierung erstritten...

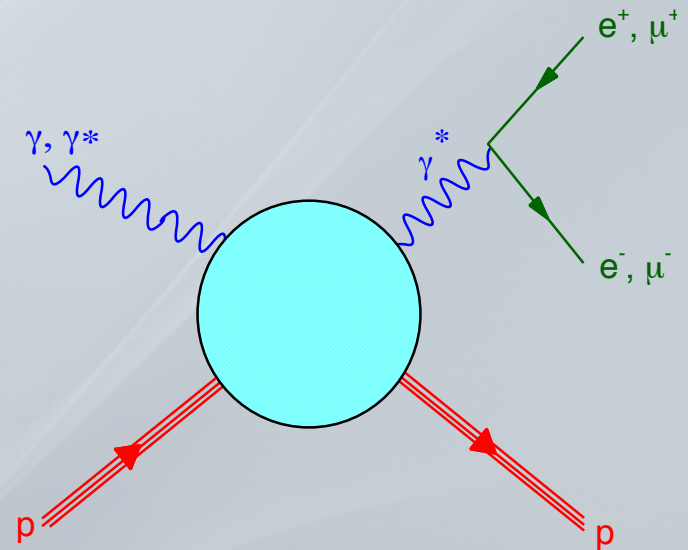


<i>Field integral</i>	2 Tm
<i>Bending variation</i>	$\leq \pm 15\%$
<i>Vertical Acceptance</i>	$\pm 5^\circ$
<i>Horizontal Acceptance</i>	$\pm 10^\circ$
<i>Ramp speed</i>	1.25%/s
<i>Total dissipated power</i>	360 kW
<i>Total Inductance</i>	0.87 H
<i>Stored energy</i>	2.03 MJ
<i>Weight</i>	220 t
<i>Dimensions (H x W x L)</i>	3.88 x 5.3 x 2.5 m
<i>Gap opening (H x W)</i>	0.80 – 1.01 x 3.10 m

Magnet TDR (begutachtet Mai 2009): [arXiv:0907.0169](https://arxiv.org/abs/0907.0169)

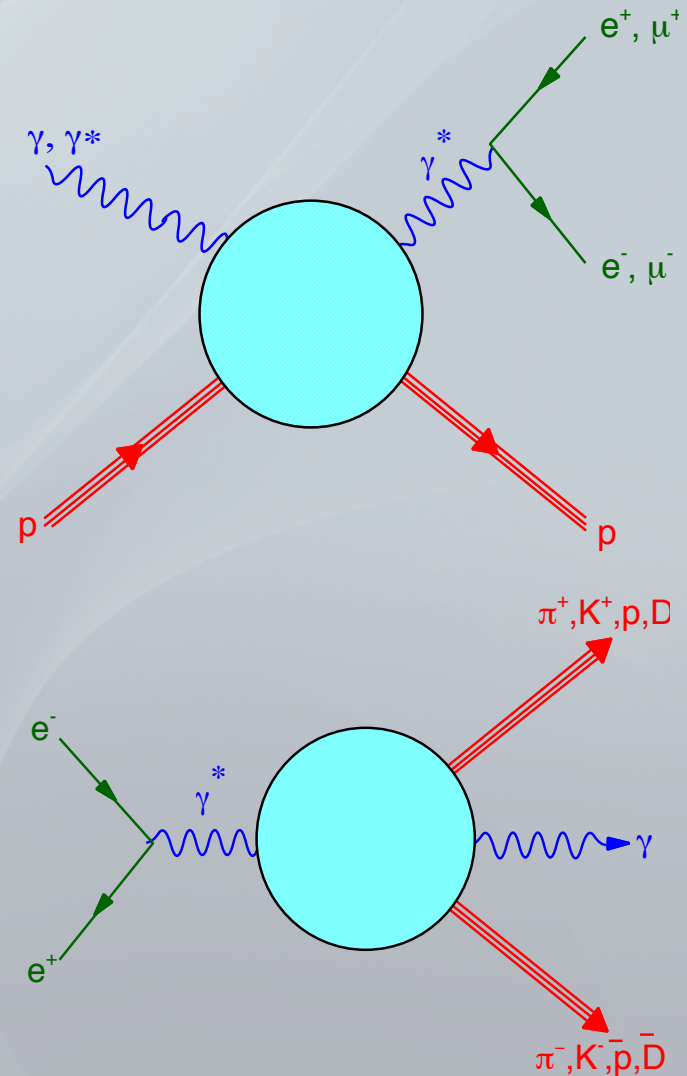
# Weitere Ideen

- Photoinduzierte Dilepton-Produktion
  - Zeitartiger FF im Ausgangskanal
  - Messung bei  $q^2 < 4M_p^2$ 
    - „unphysikalischer Bereich“
  - Beitrag von Bethe-Heitler
  - Machbar an MAMI?
    - virtuell oder reell?



# Weitere Ideen

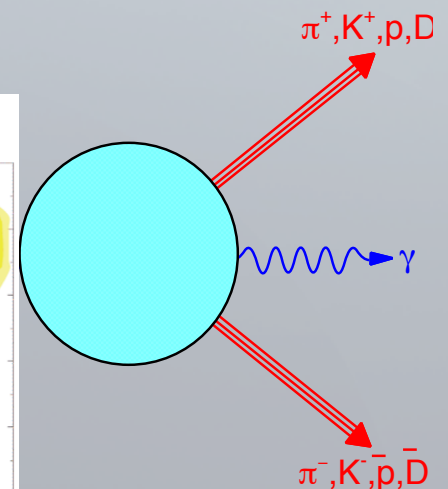
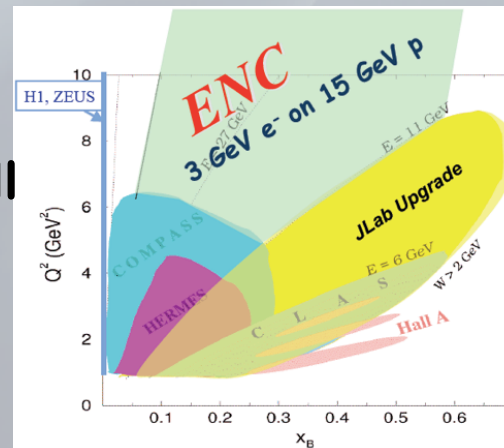
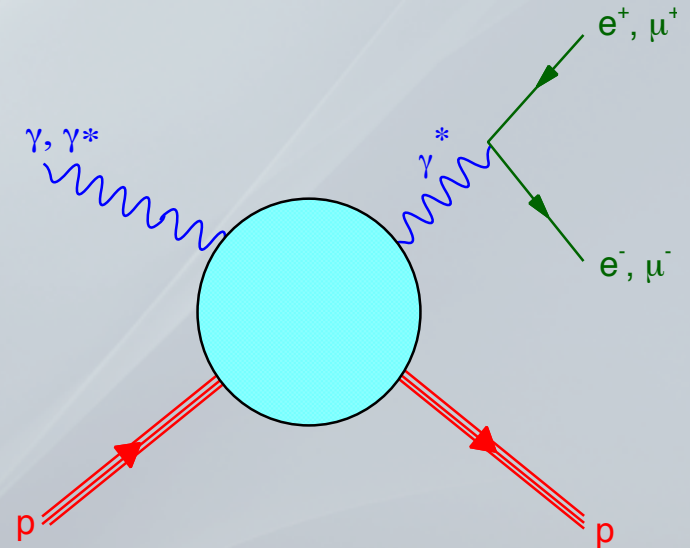
- Photoinduzierte Dilepton-Produktion
  - Zeitartiger FF im Ausgangskanal
  - Messung bei  $q^2 < 4M_p^2$ 
    - „unphysikalischer Bereich“
  - Beitrag von Bethe-Heitler
  - Machbar an MAMI?
    - virtuell oder reell?
- Elektron-Positron-Vernichtung
  - BESIII



# Weitere Ideen

- Photoinduzierte Dilepton-Produktion
  - Zeitartiger FF im Ausgangskanal
  - Messung bei  $q^2 < 4M_p^2$ 
    - „unphysikalischer Bereich“
  - Beitrag von Bethe-Heitler
  - Machbar an MAMI?
    - virtuell oder reell?
- Elektron-Positron-Vernichtung
  - BESIII
- Erweiterung der DVCS-Kinematik, doppel-virtuell
  - ENC

M. Vanderhaeghen,  
ENC/EIC Workshop GSI,  
29.May 2009





# Zusammenfassung

- Struktur des Nukleons noch unverstanden
- Raumartige Proton-Formfaktoren
  - Viel-Photonen-Beiträge?
- Zeitartige Proton-Formfaktoren
  - Formfaktoren bei kleinem  $q^2 < 4M_p^2$
  - Magnetischer FF bei  $q^2 > 10(\text{GeV}/c)^2$
  - Daten für Dispersionsansätze
- Neutron-Formfaktoren
  - Noch weitgehend unergründet
- Kombination zeit- und raumartiger Messungen
  - Mit Hilfe neuer theoretische Ansätze (GPDs, GDAs, TDAs)

# Zusammenfassung

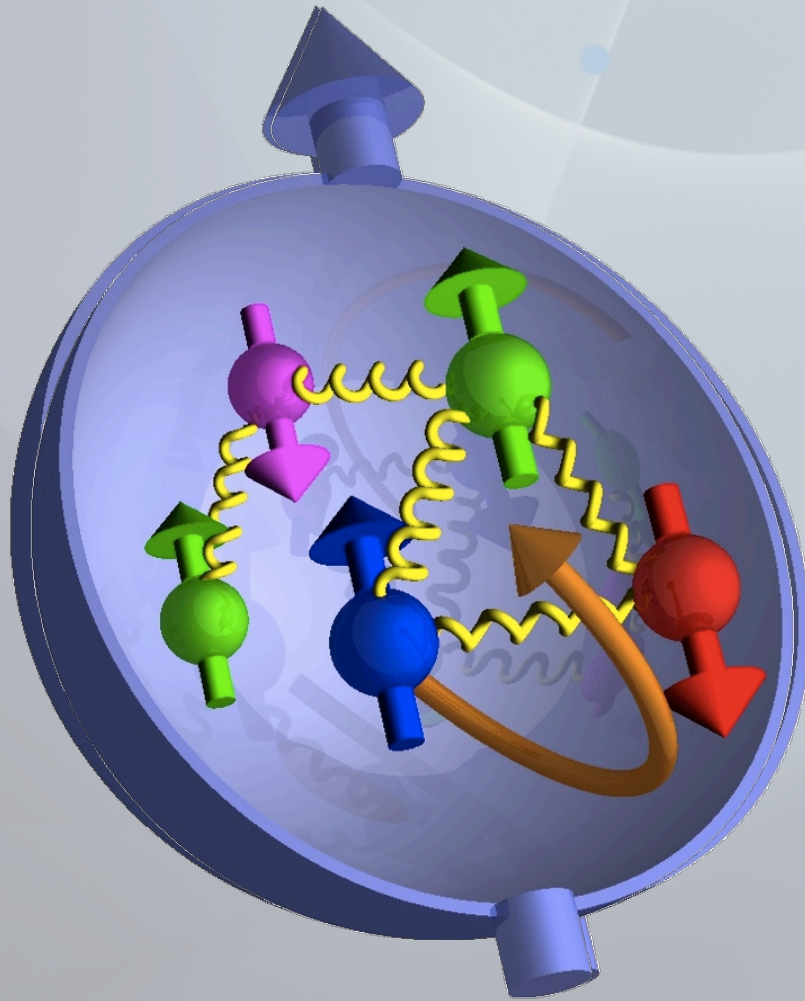
- Struktur des Nucleons noch unverstanden
- Raumartige Proton-Formfaktoren
  - Viel-Photonen-Beiträge?
- Zeitartige Proton-Formfaktoren
  - Formfaktoren bei kleinem  $q^2 < 4M_p^2$
  - Magnetischer FF bei  $q^2 > 10(\text{GeV}/c)^2$
  - Daten für Dispersionsansätze
- Neutron-Formfaktoren
  - Noch weitgehend unbekannt
- Kombination zeitlicher und räumlicher Messungen
  - Mit Hilfe neuer Techniken (z.B. TDA, GDAs, ...)

Multidimensionales Bild  
des  
Nucleons?



# Backup

# Eine kleine Historie...

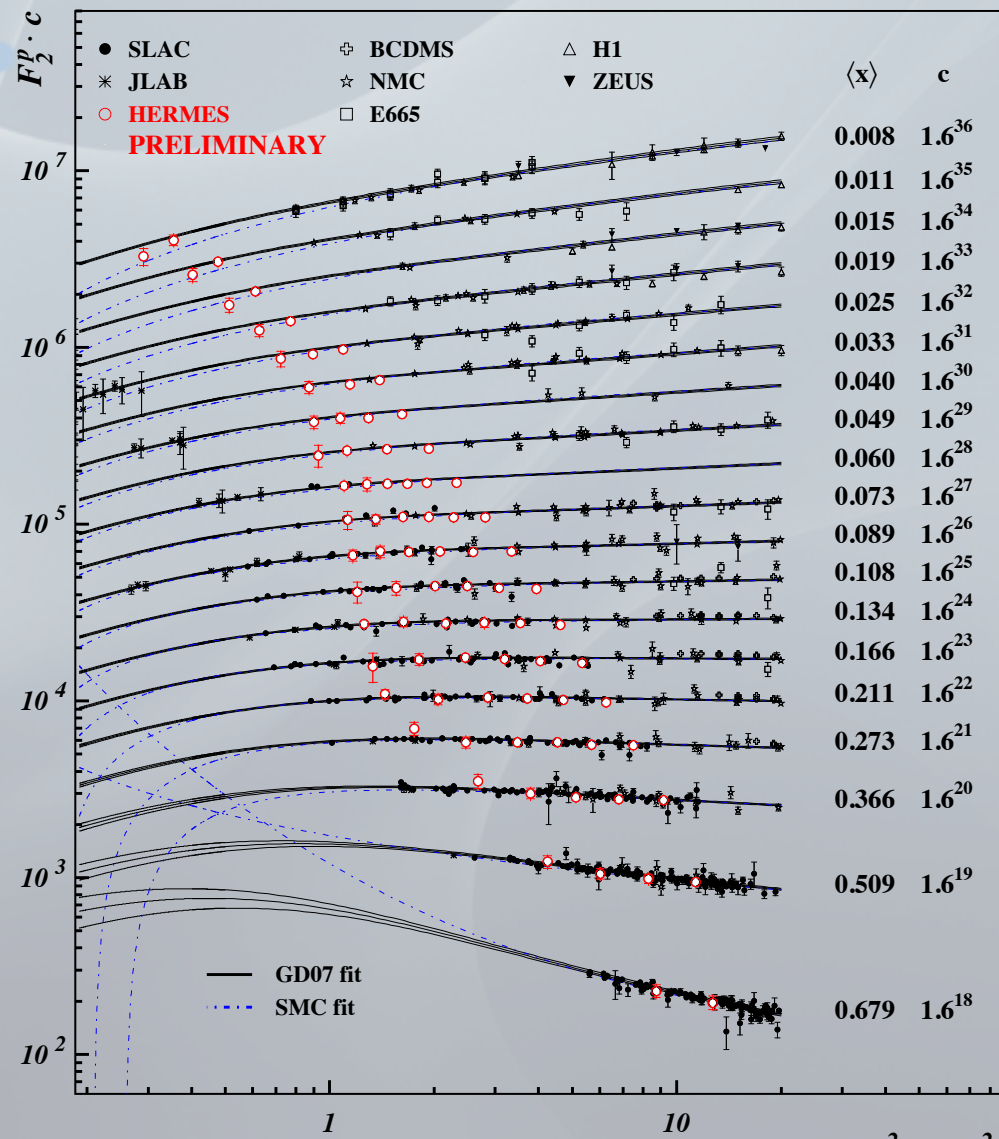


- Atomkerne (Rutherford)
- Proton (Gell-Mann, Zweig)
  - 3 Quarks
  - Gluonen und Seequarks (QCD)
- Partonen (Feynman/Bjorken)
- Proton Spin
  - $1/2$  (Quarks auch)
- Spinbeitrag durch Quarks
  - ca. 0: Spin Krise, EMC Effekt
  - $1/3$ : Spin Rätsel
- Viele Nobelpreise, zuletzt
  - 2004: Gross, Wilczek, Politzer
  - 2008: Kobayashi, Maskawa, Nambu

# HERMES F2

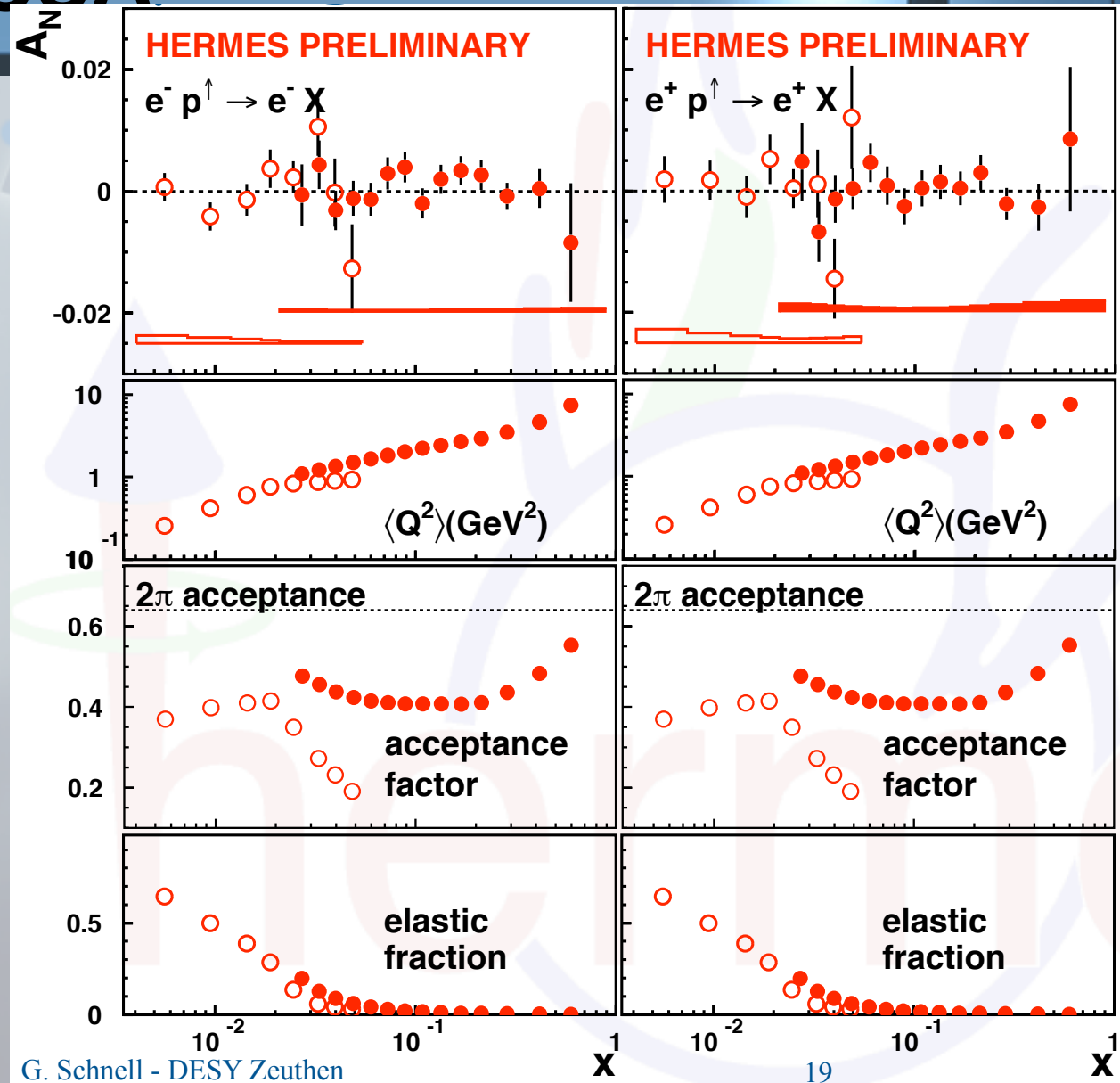


- F2 on proton



# HERMES SSA

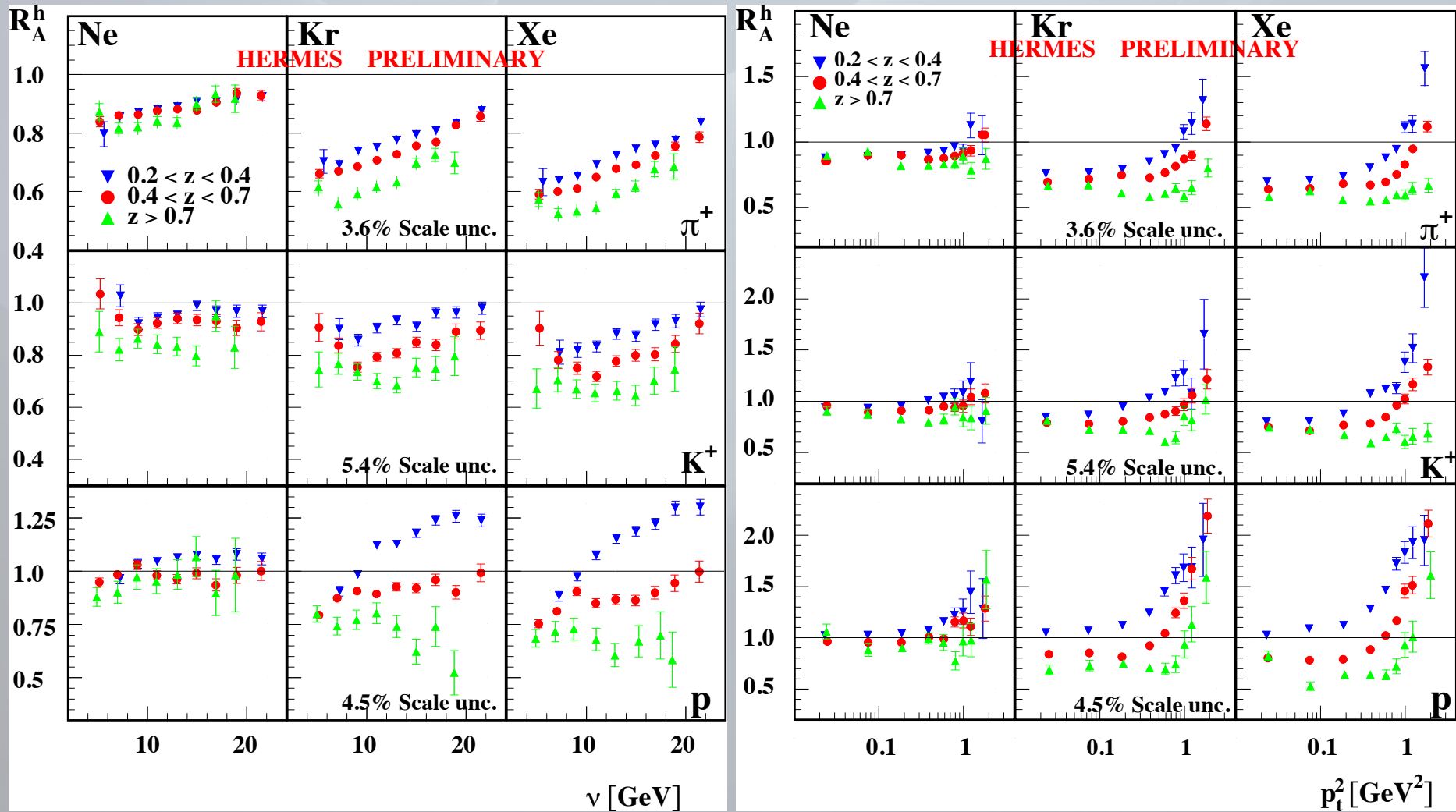
- SSA shows no 2-photon effects



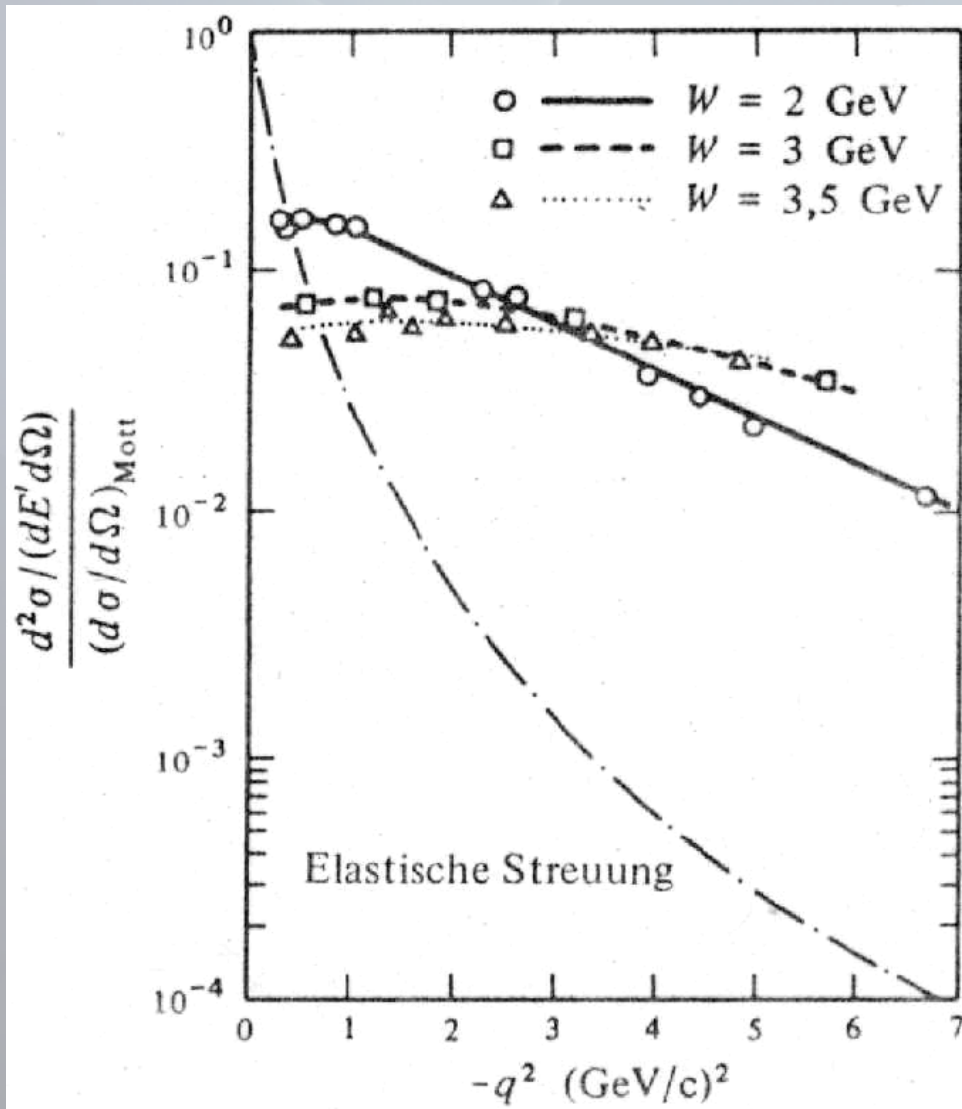
G. Schnell - DESY Zeuthen

19

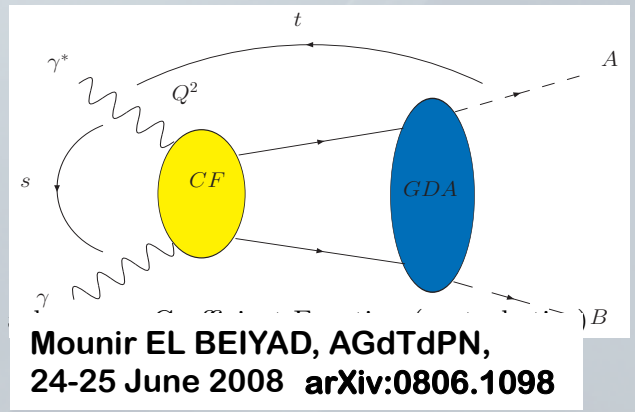
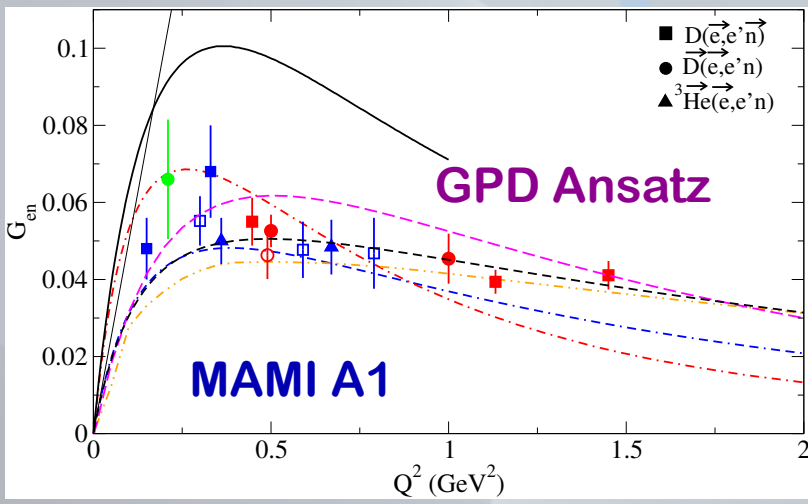
# HERMES Nucl. Attenuation



# Struktur des Nukleons







$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2 \cos^2 \frac{\theta_e}{2}}{4E_e^2 \sin^4 \frac{\theta_e}{2}} \frac{E_{e'}}{E_e} \left( \frac{1}{1+\tau} \right) \left[ G_{Ep}^2 + \frac{\tau}{\epsilon} G_{Mp}^2 \right]$$

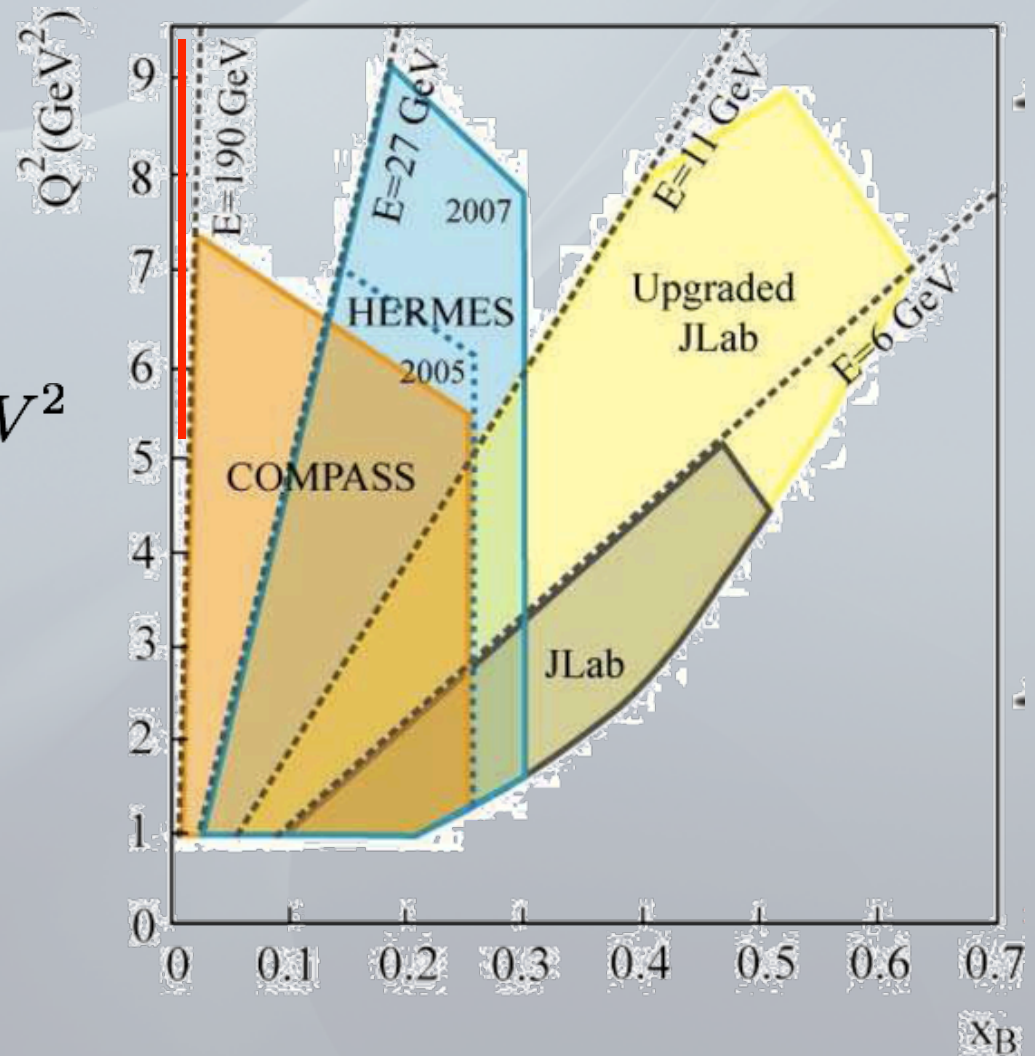
$$\epsilon = [1 + 2(1 + \tau) \tan^2 \frac{\theta_e}{2}]^{-1}$$

# Kinematical Coverage of DVCS Experiments

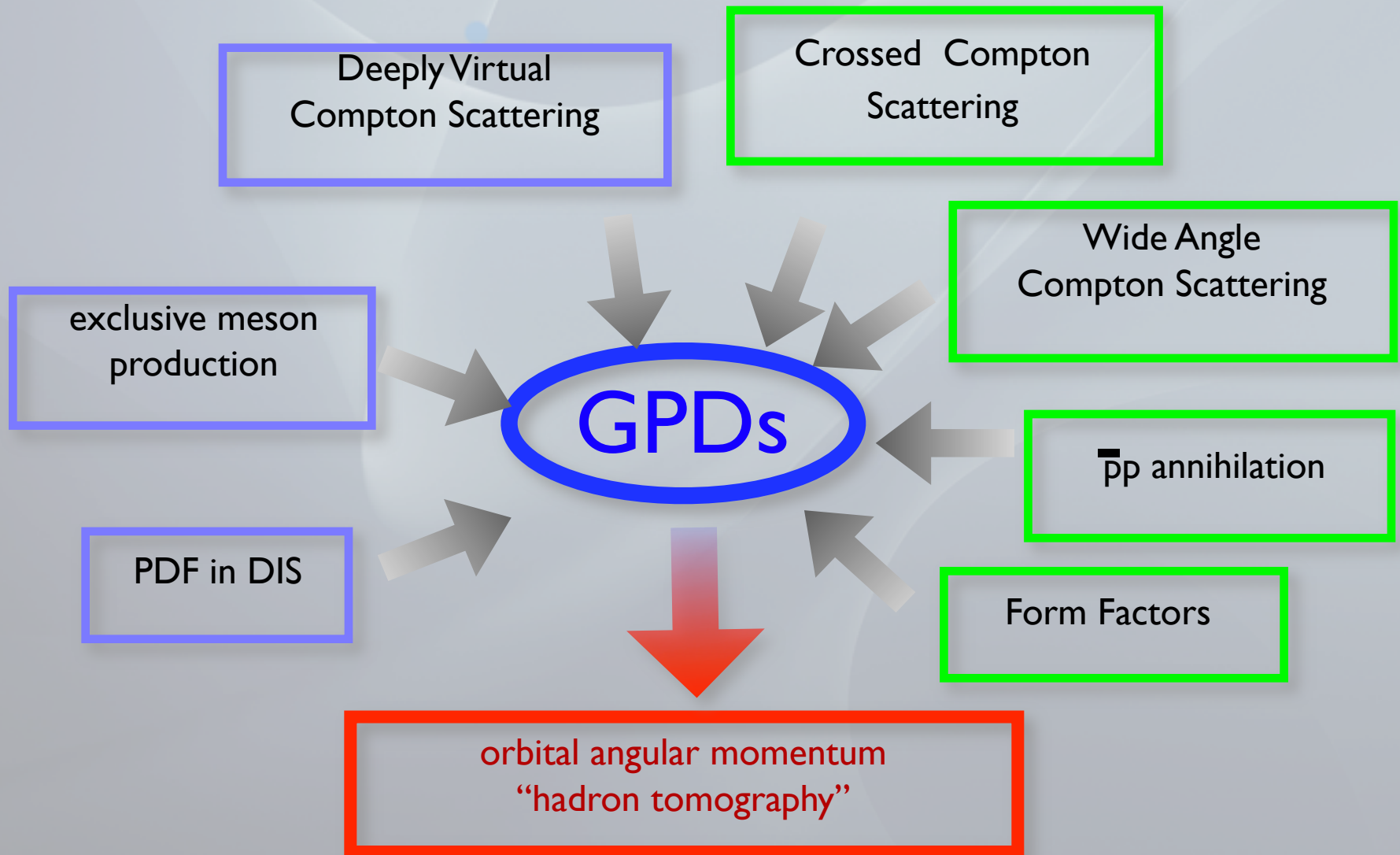
- HERA collider experiments H1 and ZEUS have small skewedness

$$x_B < 0.01 \quad Q^2 : 5 \dots 100 \text{ GeV}^2$$

- Fixed target experiments are crucial to explore GPDs !

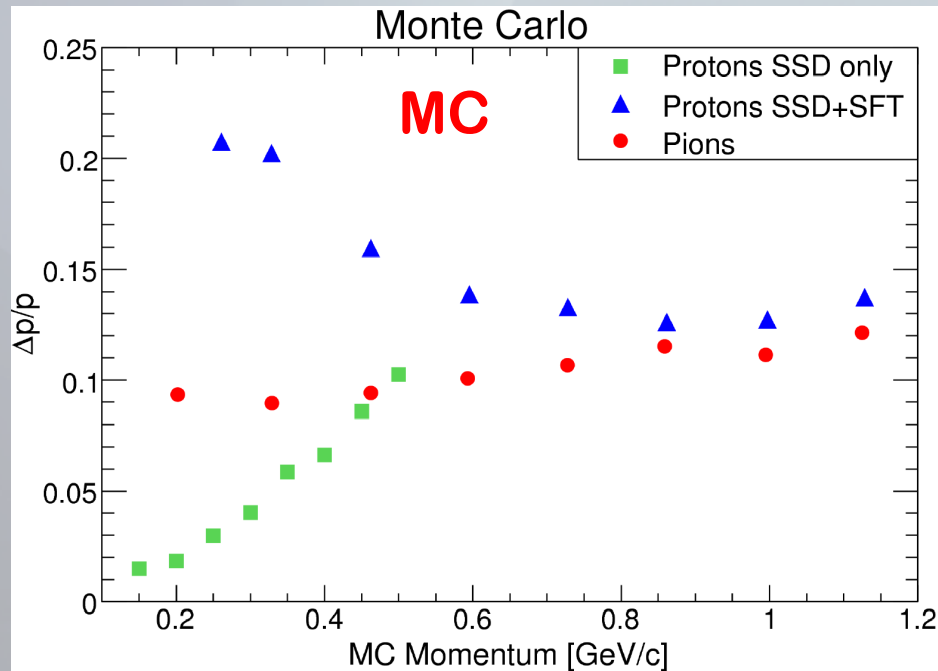


# The Role of GPDs

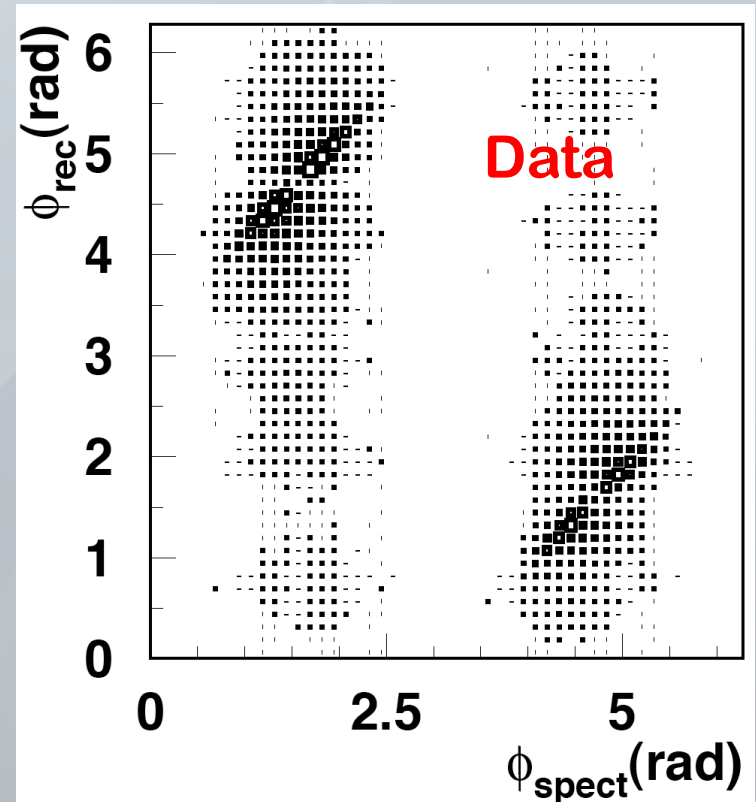


# First Results From the Recoil Detector

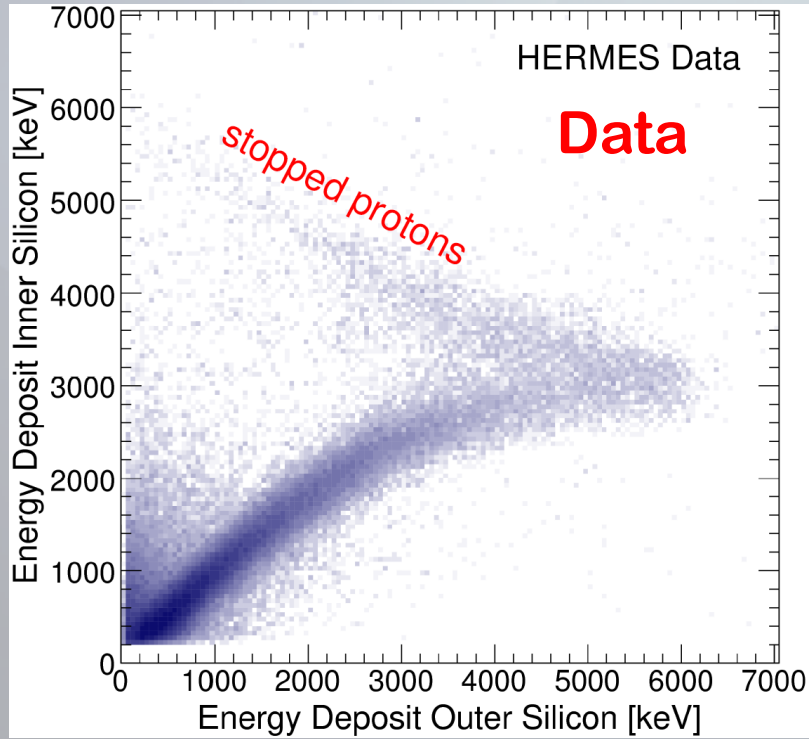
Momentum resolution:  
 $\Delta p/p = 1-15\%$  for protons



Elastic scattering:  
e and p back-to-back

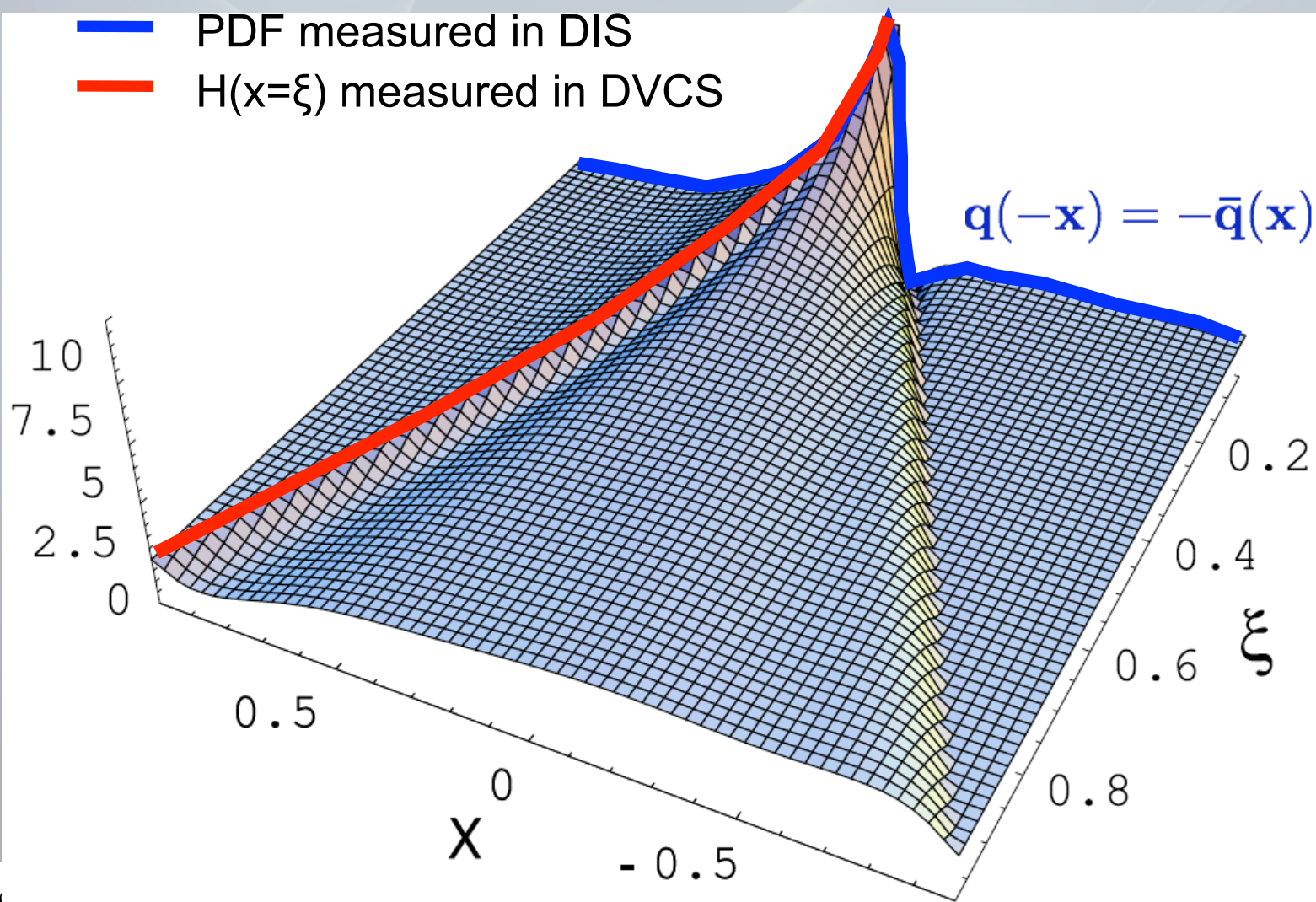


## Energy Deposit in Silicon Detectors

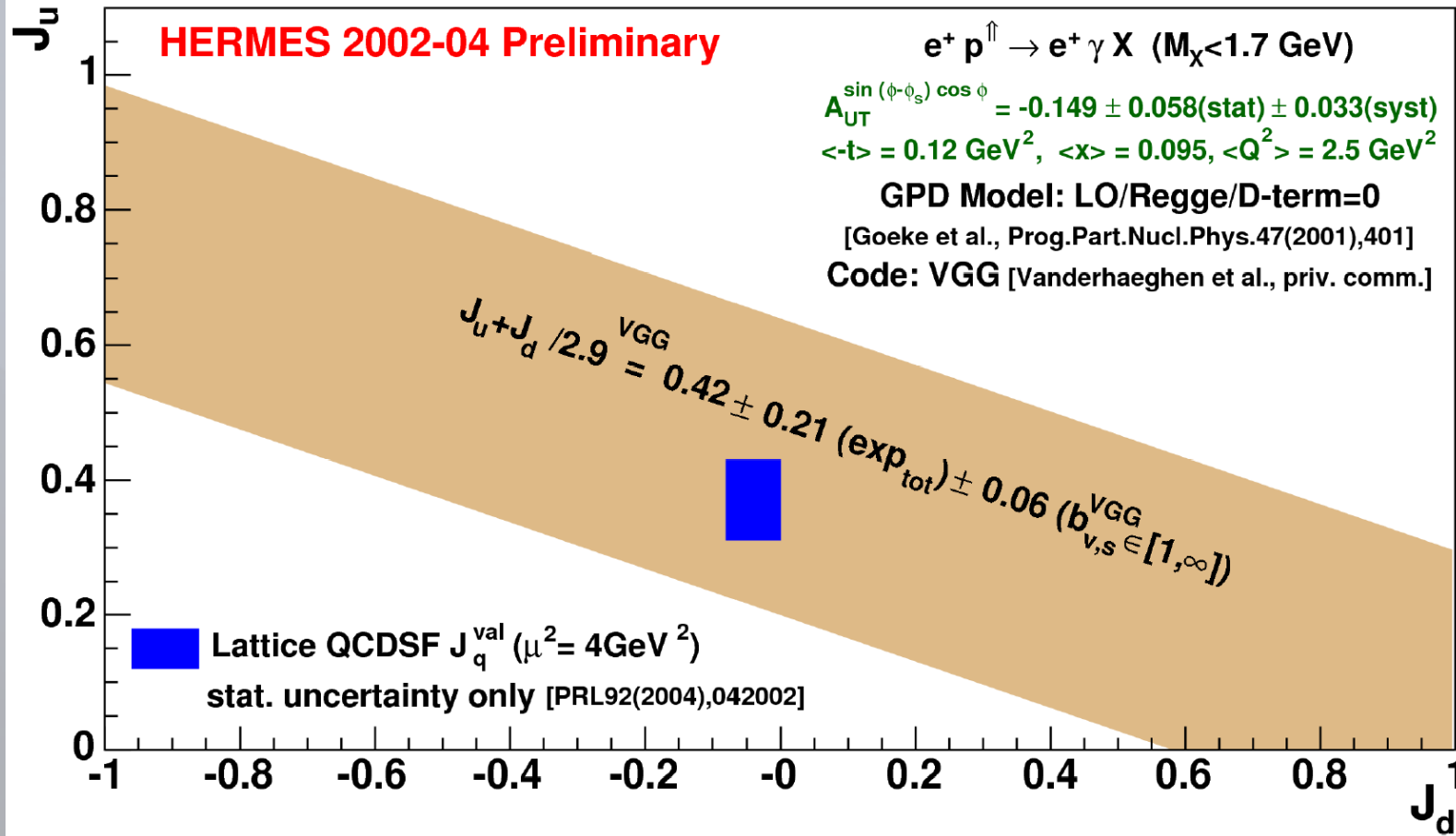




- PDF measured in DIS
- $H(x=\xi)$  measured in DVCS



# Erste Ergebnisse für $J_u/J_d$



# $J_u/J_d$ in Neutron-Asymmetrie

- An HERMES können wir  $A_{LU}$  messen

$$A_{LU} = \frac{d\sigma(e^{\rightarrow}, \phi) - d\sigma(e^{\leftarrow}, \phi)}{d\sigma(e^{\rightarrow}, \phi) + d\sigma(e^{\leftarrow}, \phi)}$$

$$A_{LU}^{\sin \phi} \propto \Im C_{\text{unpol}}^I = F_1^n(t) \Im \mathcal{H}^n(\xi, t, Q^2) + \frac{x_B}{2 - x_B} (F_1^n(t) + F_2^n(t)) \Im \tilde{\mathcal{H}}^n(\xi, t, Q^2) - \frac{t}{4m^2} F_2^n(t) \Im \mathcal{E}^n(\xi, t, Q^2)$$

Dominant am Proton

Dominant am Neutron

Leider an HERMES durch Proton-Asymmetrie überdeckt.

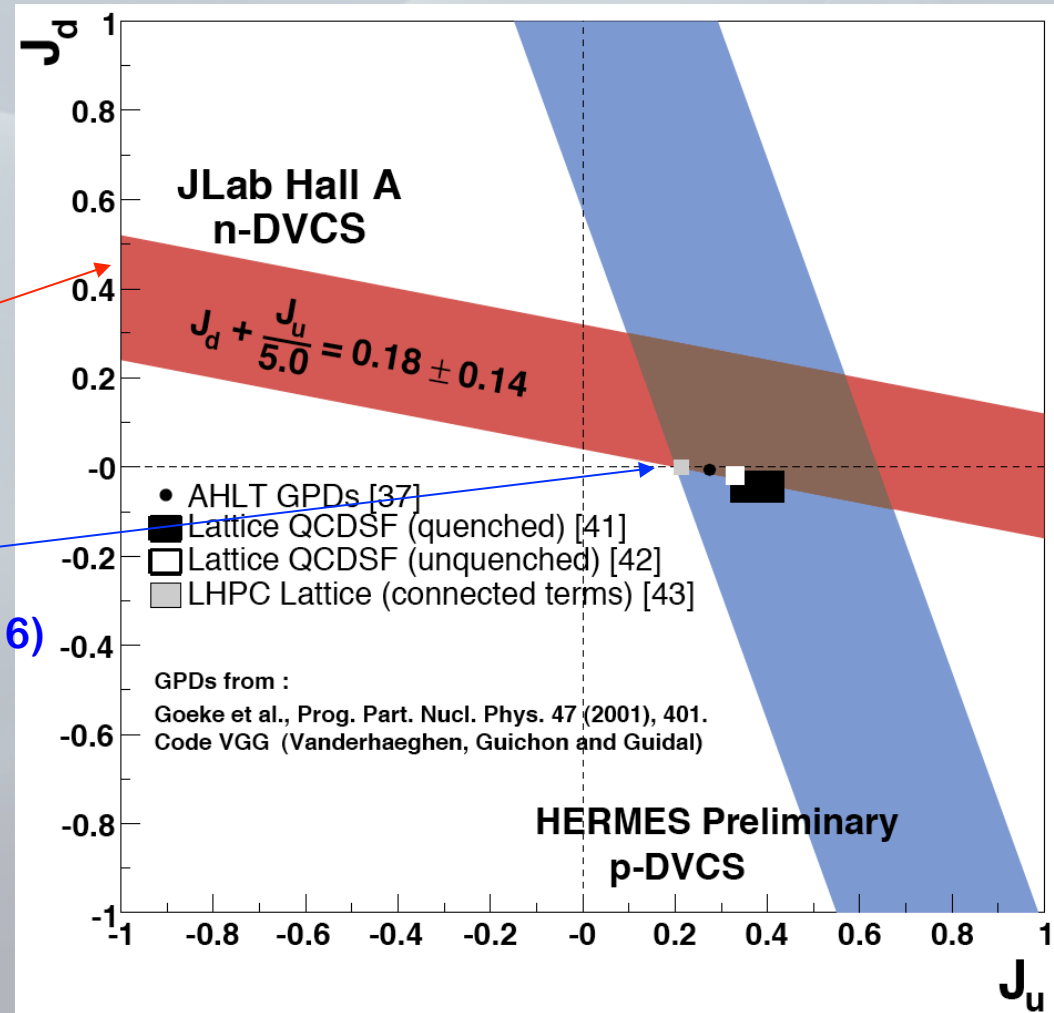
An HallA (JLab) werden abs. Wirkungsquerschnitte ermittelt, d.h. Proton-Beitrag läßt sich abziehen.



# Globales Bild: $J_u/J_d$

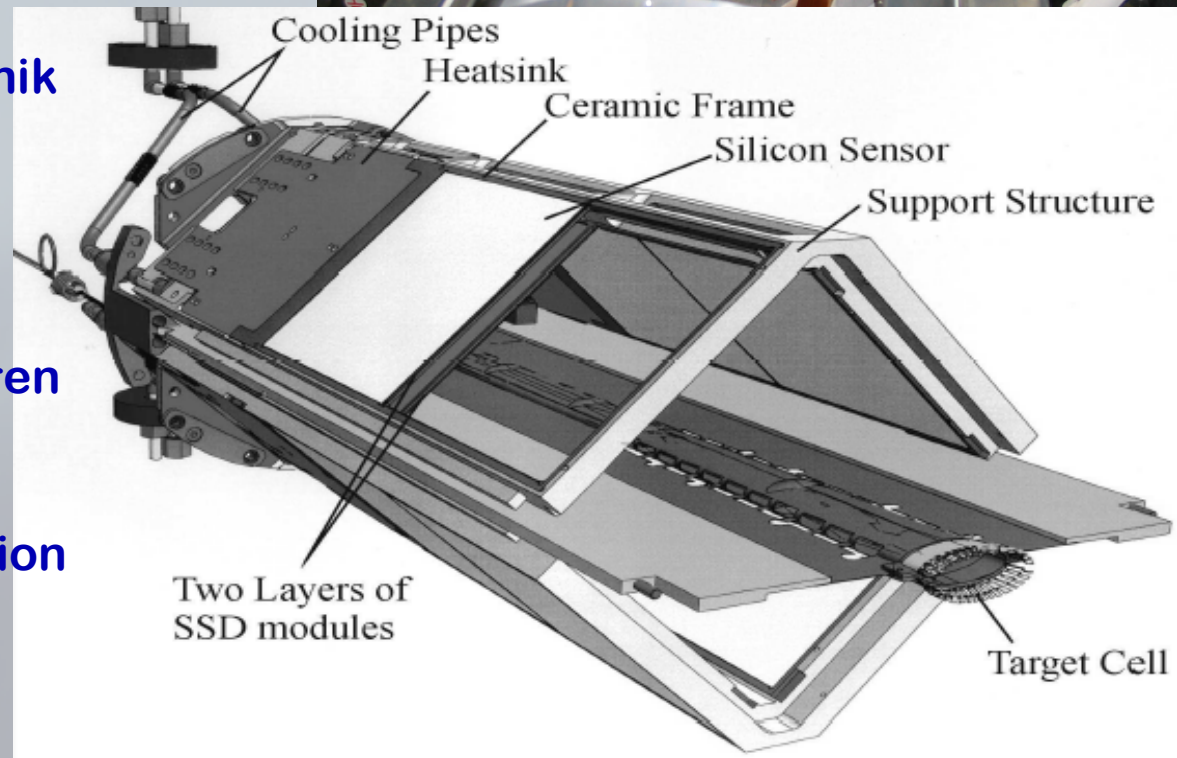
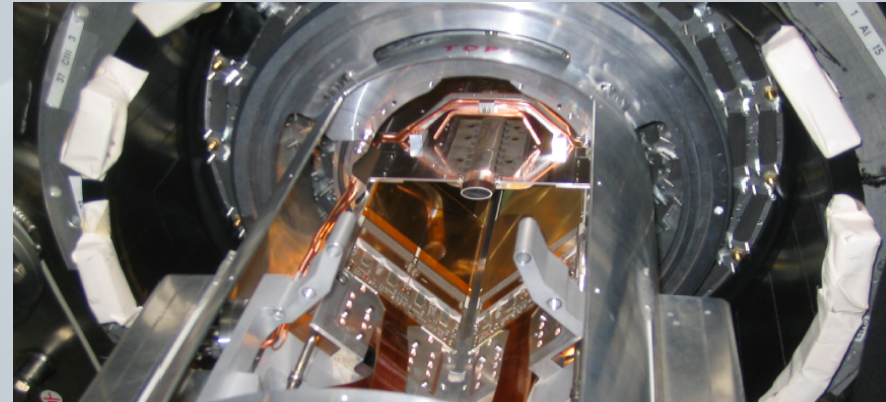
HallA Resultat  
am Neutron:  
M. Mazouz et al.  
arXiv:0709.0450 [nucl-ex]

QCD-Gitter-Punkt:  
 $J_u, J_d = 0.214(16), 0.001(16)$   
Ph. Haegler et al.  
arXiv:0705.4295 [hep-lat]



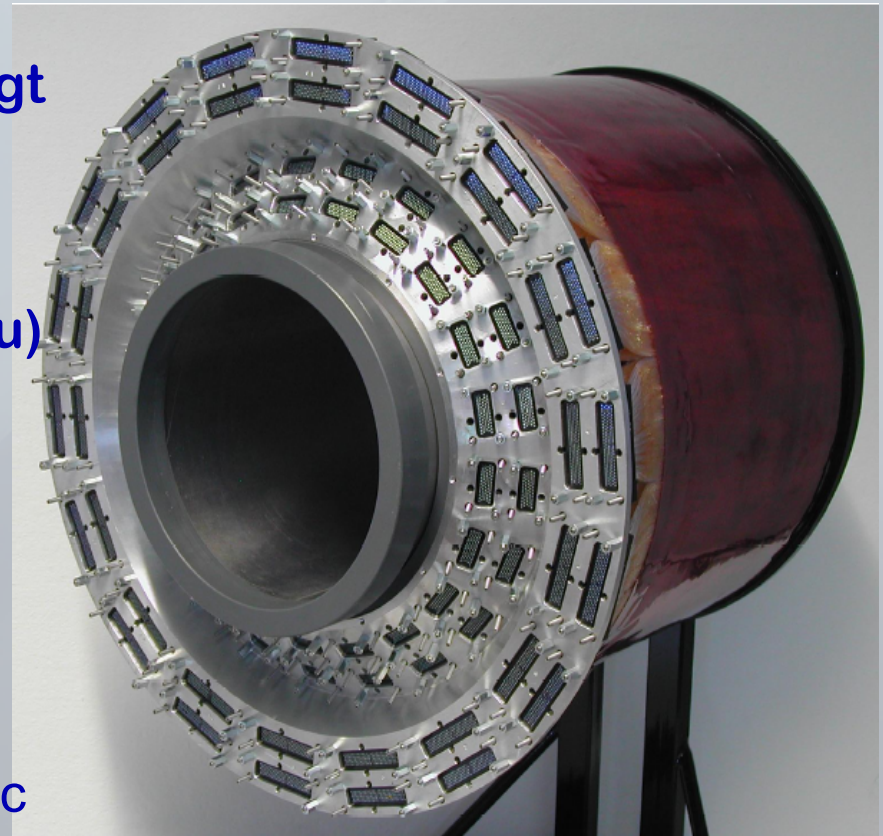
# Silizium-Streifendetektor

- 16 Silizium-Sensoren:
  - 10 x 10 cm<sup>2</sup> Fläche
  - 300µm Dicke
  - doppelseitige Streifen
- In 2 Lagen angeordnet
- Herausforderung
  - Detektor + Elektronik nahe am e Strahl
  - im HERA Vakuum
- Zweck
  - 135-500 MeV/c Protonen detektieren
  - Impuls- und Spur-Rekonstruktion
  - Teilchenidentifikation



# Szintillierende Fasern

- 2 Zylinder mit je
  - 2 Lagen parallel bzgl. der Strahlachse
  - 2 Lagen  $10^\circ$  dagegen geneigt
  - 6910 Fasern
- Auslese
  - 64-Kanal-PMTs (Hamamatsu)
  - insgesamt 5120 Kanäle
- Zweck
  - Impuls- und Spur-Rekonstruktion
  - Teilchenidentifikation
  - Bereich:  $p_p = 250\text{-}1200 \text{ MeV}/c$



# Photonendetektor

- 3 Lagen Wolfram and Szintillatorstäbe
  - 1. Lage parallel zum Strahl
  - 2. Lage +45° bzgl. des Strahls
  - 3. Lage -45° bzgl. des Strahls
- Zweck
  - Nachweis von Photonen aus  $\pi^0$ -Zerfällen (z.B.  $\Delta^+ \rightarrow \rho \pi^0$ )<sub>z=0</sub>
  - Teilchenidentifikation
  - Untergrundreduktion

