

Die Erforschung der **Quark-Gluonstruktur der Hadronen** mit der elektromagnetischen Sonde Neue Ansätze und ihre experimentelle Realisierbarkeit

Dietrich Harrach
Institut für Kernphysik der Universität Mainz
Plenarvortrag auf der DPG - Tagung in Erlangen

am 22.März 2001

Inhaltsübersicht

- QCD und die Struktur der Hadronen
- Aktuelle Fragestellungen in der Hadronstrukturphysik
- Experimente heute und Anforderungen für zukünftige Experimente
- Prioritäten und Schlussfolgerungen

- **QCD und die Struktur der Hadronen**
 - Starke QCD
 - Sonden: Leptonstreuung vs. Hadronspektroskopie

- **Aktuelle Fragestellungen in der Hadronstrukturphysik**
 - Der Spin des Nukleons - Gluonen und Bahndrehimpuls
 - Harte, exklusive Prozesse und verallgemeinerte Partonverteilungen
 - Transversale Quarkimpulse und transversaler Spin in Fragmentation
 - Skalenverhalten in der Nähe des QCD-Skalenparameters Λ_{QCD}
 - Natur des Baryon Spektrums
 - Existenz und Struktur von Mesonen mit gluonischen Anregungen
 - Hohe Partondichten in kalter Kernmaterie:
nichtlineare Evolution und Jet-Attenuation

- **Experimente heute und Anforderungen für zukünftige Experimente**
 - Experimentelle Basis heute:
MAMI, ELSA, CEBAF, HERMES, SLAC, COMPASS, RHIC, HERA
 - Tief virtuelle exklusive Streuung (DVES): ELFE
 - “GPD und QCD Exotics”: CEBAF @ 12_GeV
 - Spin-Flavour separierte Partonverteilungen, Transversalität: TESLA-N
 - EIC

- **Prioritäten und Schlussfolgerungen**

Starke QCD

- QCD ist **nicht** perturbative QCD
- QCD bei starker Kopplung ($Q < \Lambda_{QCD}$) ist ein ungelöstes Problem
- Hadronen
 - wechselwirkende Vielteilchensysteme von Quarks und Gluonen
 - Realisierung einer nicht-abelschen Feldtheorie
 - topologische Feldfluktuationen und QCD Vakuumkondensate
 - Chirale Symmetriebrechung - Masse der Hadronen, GS-Bosonen
 - Confinement
- Theoretischer Rahmen
 - Gittereichtheorie
 - * chiraler Limes
 - * Seebeiträge ('quenched'), Zerfälle
 - * Gitterartefakte
 - Modelle: $N_c \rightarrow \infty$, CBM, "fluxtube", CQM etc.
 - exakte Limites (χPT , PQCD)
- **Experimente** sind notwendig um
 - unterschiedliche Aspekte der hadronischen Wellenfunktion herauszuprojizieren
 - effektive Freiheitsgrade ('Pionwolke', 'Konstituentenquark', 'diquarks') als Objekte der Dynamik hadronischer Prozesse zu identifizieren

Streuung und Spektroskopie

Historisch:

- **Hadronspektroskopie**

- Quarkmodell erklärt die Symmetrien der Hadronspektren
- “Konstituentenquarkmodell” beschreibt erfolgreich elektroschwache Momente und Übergänge
- Wenn die Vorhersagen nicht stimmen ist das eine “**Krise**”

- **Streuexperimente mit Leptonstrahlen**

- Skalenverhalten und Quark-Parton Phänomenologie
- Skalenverletzung und Kopplungskonstante der QCD
- Summenregeln erlauben Verbindung mit spektroskopischen Daten

Heutige Situation:

- Hadronspektroskopie

- Rein hadronische Formations- und Zerfallsprozesse sind derzeit nur parametrisierbar ($\chi - PT$) bzw. modellierbar (z.B. 3P_0)
- Mischungsszenarien und Kopplung von Zerfallskanälen sind nicht entscheidbar
- Diskussionen um die Glueball- und Hybridkandidaten bleiben offen:
Die Sonde und das Objekt sind gleich komplex.

- Streuexperimente

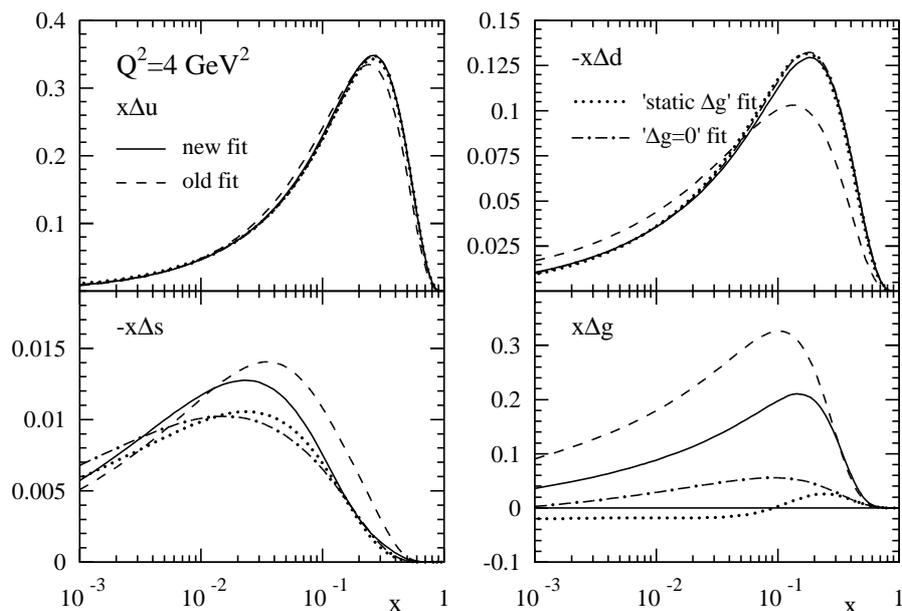
- Die Streuung von Leptonen bei hohen Impulsüberträgen bestimmt Erwartungswerte von wohldefinierten Operatoren, die hierarchisch in Potenzen der Auflösungsskala $1/Q$ organisiert werden können
- Spin und Flavour der Partonen können entweder durch die Sonde (γ^* , Z^0 , W^\pm) oder die Beobachtung des hadronischen Endzustands selektiert werden.
- QCD selbst wird im “schwach” koppelnden Bereich zur Sonde. Erfordert Faktorisierung und Beherrschung der PQCD “Technologie” in NN...LO
- Operatoren mit Twist-3 und höher messen q-G und q-q Korrelatoren

Der Spin des Nukleons

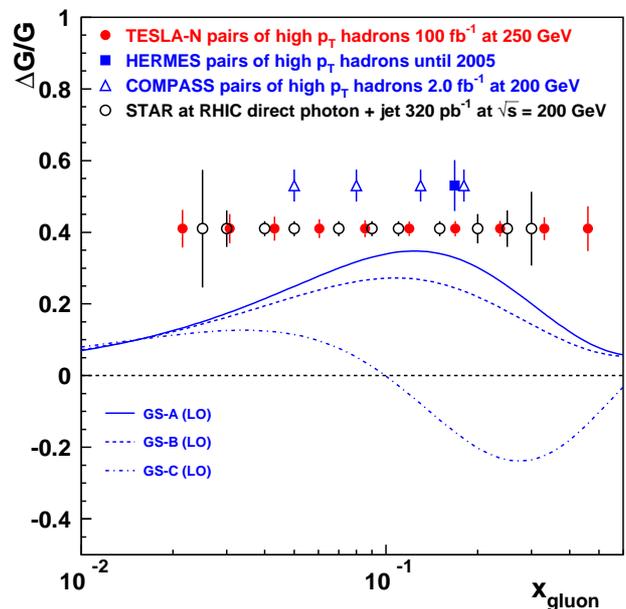
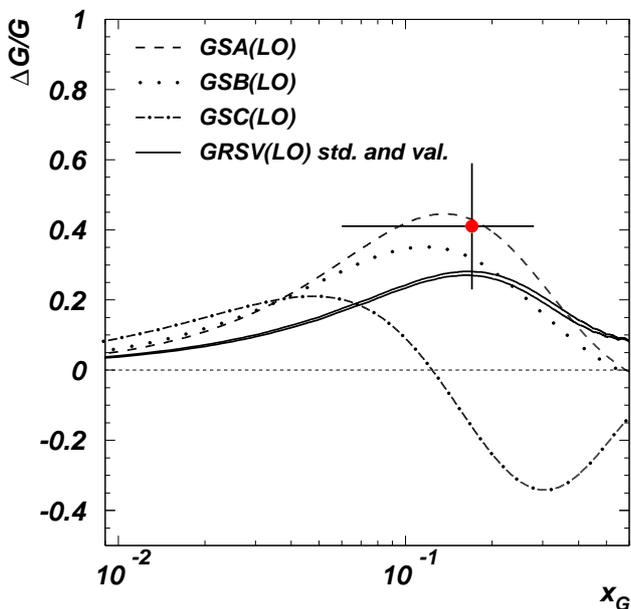
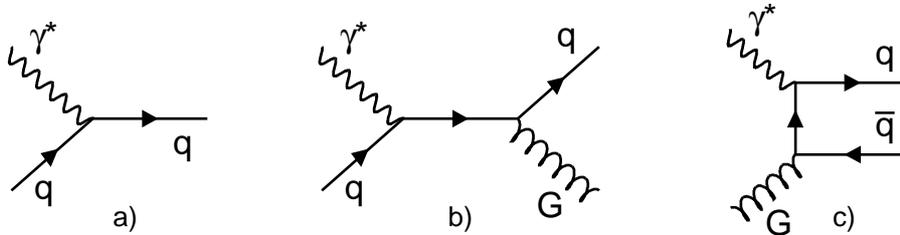
Glukonen und Bahndrehimpuls

Die polarisierte Glukonstrukturfunktion $\Delta G(x)$

- Die unpolarisierte Glukonstrukturfunktion ist aus direkten und indirekten Messungen gut bekannt
- Glukonen tragen bei Skalen von 0.1 fm (2 GeV/c) ca. 50% des Impulses des Protons
Vermutlich tragen sie bei gleichen Skalen auch ca. 50% des Gesamtdrehimpulses $\mathbf{J}=\mathbf{L}+\mathbf{S}$
- Drehimpulserhaltung fordert $\frac{1}{2} = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + L_q + \Delta G + L_G$
 $\Delta\Sigma$ wurde in (doppelt)polarisierter Lepton-Nukleon Streuung gemessen
- ΔG könnte von der Größenordnung 1 und darüber sein



- Das COMPASS Experiment wird $\Delta G(x)$ im Bereich $0.05 < x_g < 0.2$ messen.
- RHIC hat ein Programm zur Messung von $\Delta G(x)$ in $\vec{p} \vec{p}$ Stößen
- HERMES (A. Airapetian et al, PRL. 84 (2000) 2584) hat erste Messergebnisse als Evidenz für ein großes ΔG interpretiert



Spinstruktur anderer Hadronen

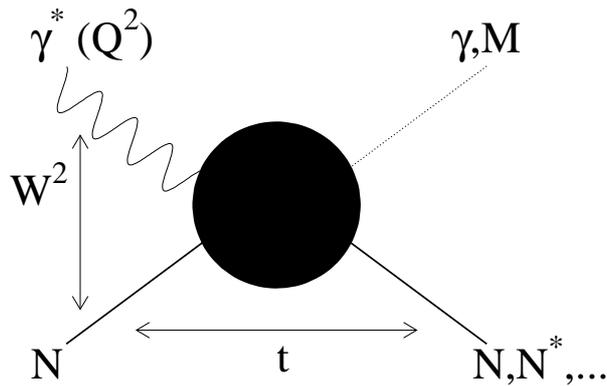
- Spinstruktur des Δ^{++} [$\uparrow\uparrow\uparrow$] und anderer N^*
- Hybride haben eine interessante Spinstruktur:

nichtexotische Hybride $0^{-+}[\downarrow\downarrow\uparrow]$ und $1^{--}[\downarrow\uparrow\uparrow]$
sollten mischen mit $\pi 0^{-+}[\uparrow\downarrow]$ $\rho\omega 1^{--}[\uparrow\uparrow]$

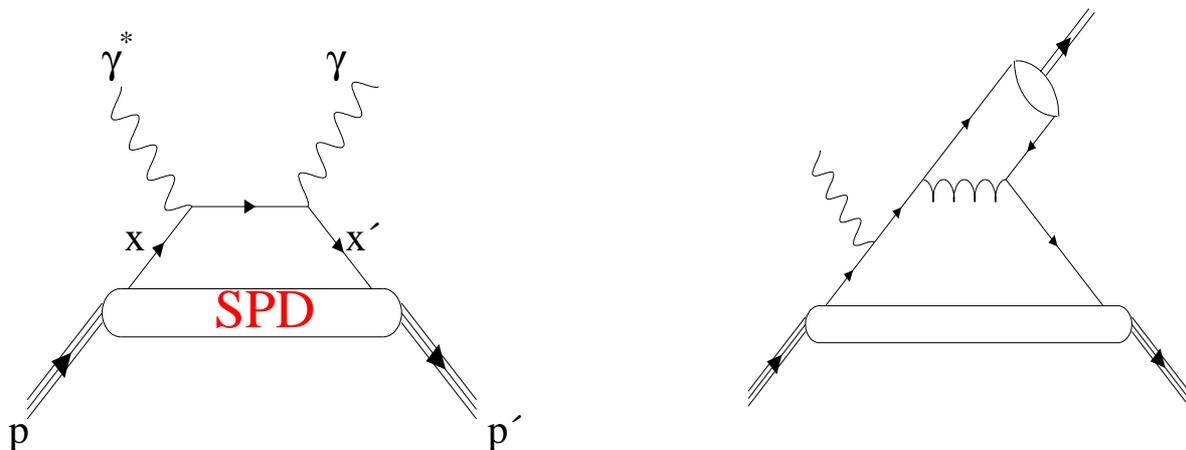
- Suche nach einem experimentellen Zugang zur Spinstruktur von instabilen Baryonen?
Spinstruktur von Mesonen (Hybriden und Gluebällen)?
Spinstruktur von Spin-0 Objekten?

Harte exklusive Prozesse

- Tief virtuelle Comptonstreuung (DVCS) und der verwandte Prozess, die tief virtuelle Mesonproduktion (DVES)

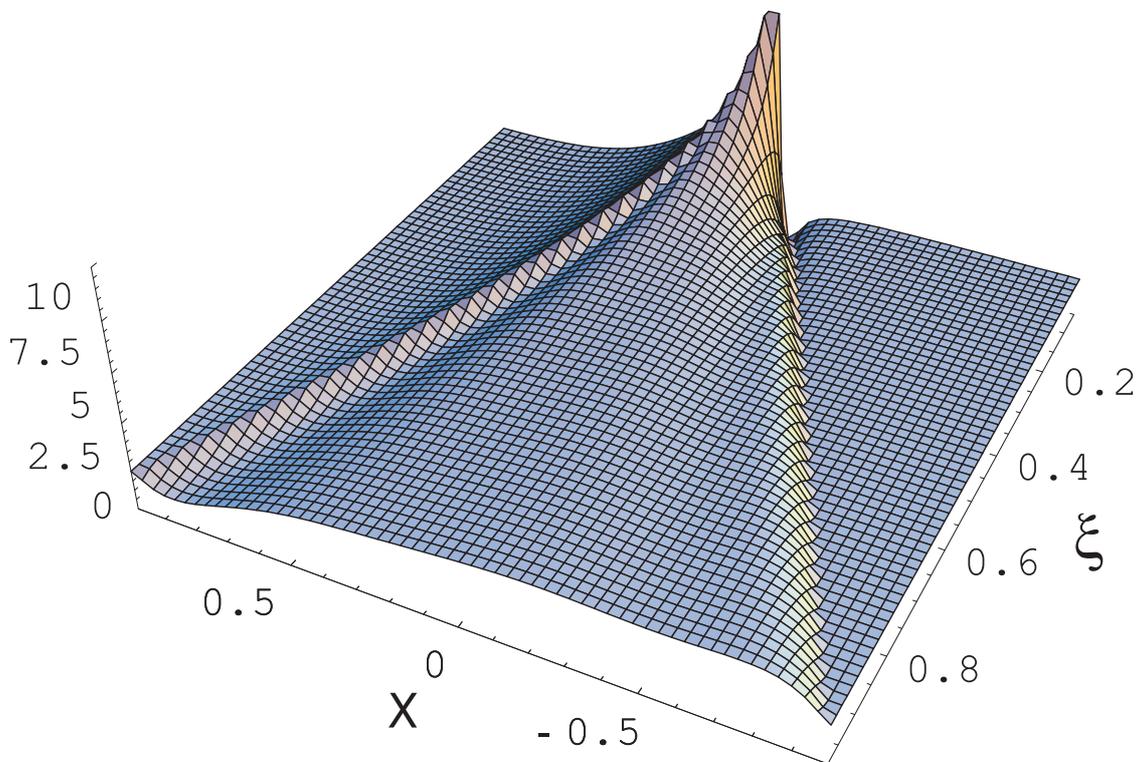


- Bei hoher Virtualität des Photons Q^2 und kleinen t :
Theoretische Beschreibung durch
verallgemeinerte Partonverteilungen (SPD's)
 $H(x, \xi, t)$, $E(x, \xi, t)$ und $\tilde{H}(x, \xi, t)$, $\tilde{E}(x, \xi, t)$
 $(H(x, \xi, t) \leftrightarrow F_1(Q^2) \& F_2(x, Q^2), E(x, \xi, t) \leftrightarrow F_2(Q^2))$



SPD's und Drehimpuls

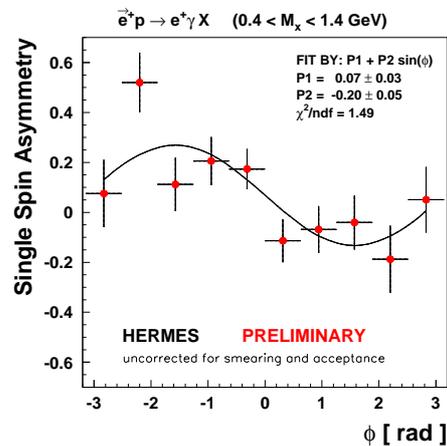
- $\Rightarrow X. Ji: J_q = \frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} dx x \{H(x, \xi, t = 0) + E(x, \xi, t = 0)\}$
Gesamtdrehimpuls der Quarks im Nukleon
- Modellierung von $E(x, \xi, t)$, $H(x, \xi, t)$ im chiralen Soliton Modell (Petrov et. al '98)



- SPD's sind im Bereich $|x| > |\xi|$ verallgemeinerte Partonverteilungen $\rightarrow u(x), \bar{u}(x)$
- Der Bereich $|x| < |\xi|$ ist neuartig und beschreibt $q\bar{q}$ Korrelationen

Erste Evidenzen für DVCS

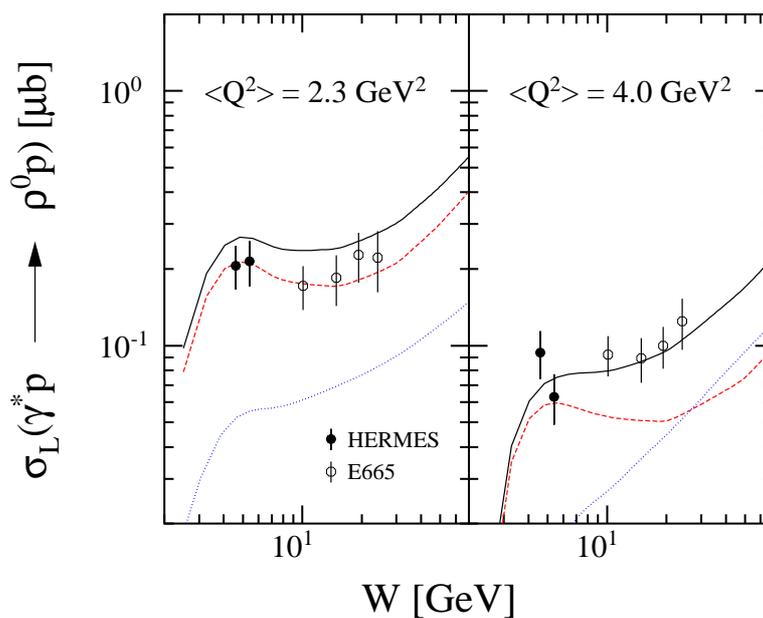
- Interferenz mit Bethe-Heitler: Azimuthale Spin Asymmetrie



- H1 & Zeus sehen DVCS Beiträge

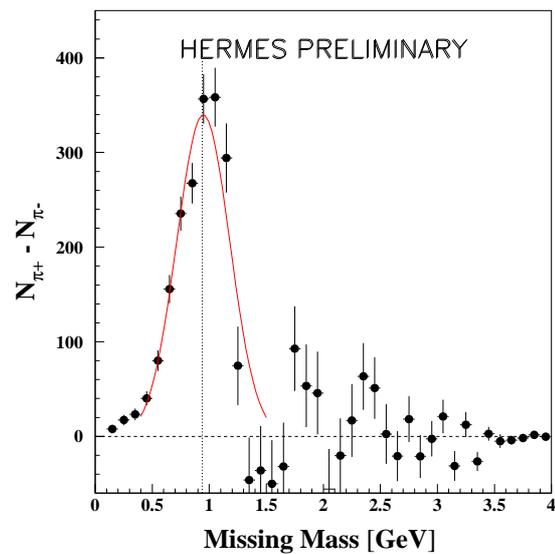
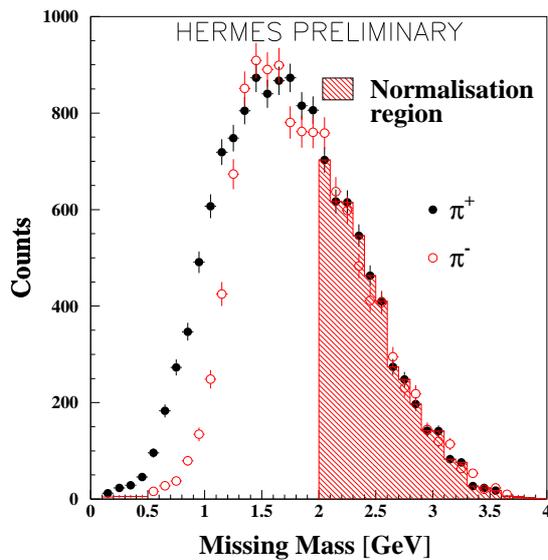
Evidenzen für DVES

- HERMES Daten für 'exklusive' ρ Produktion



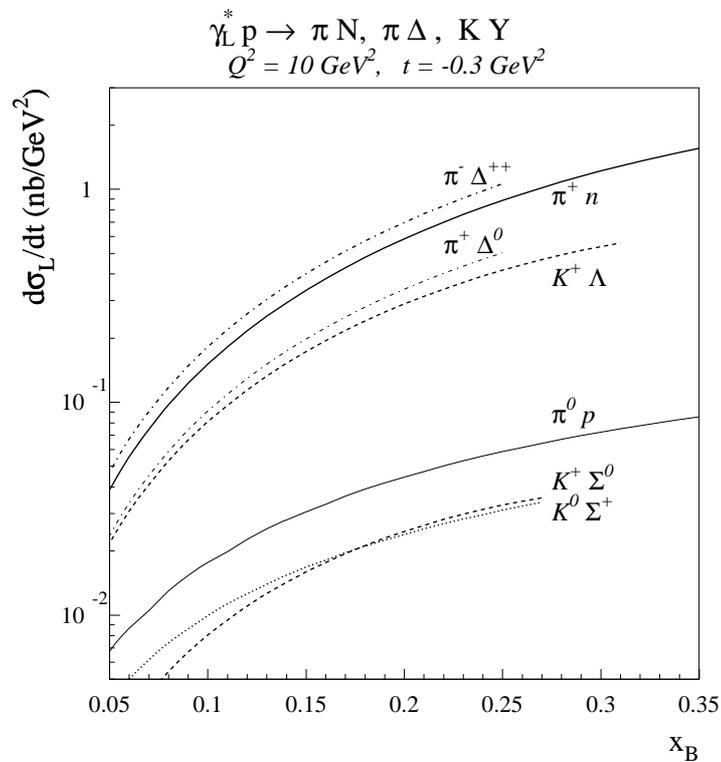
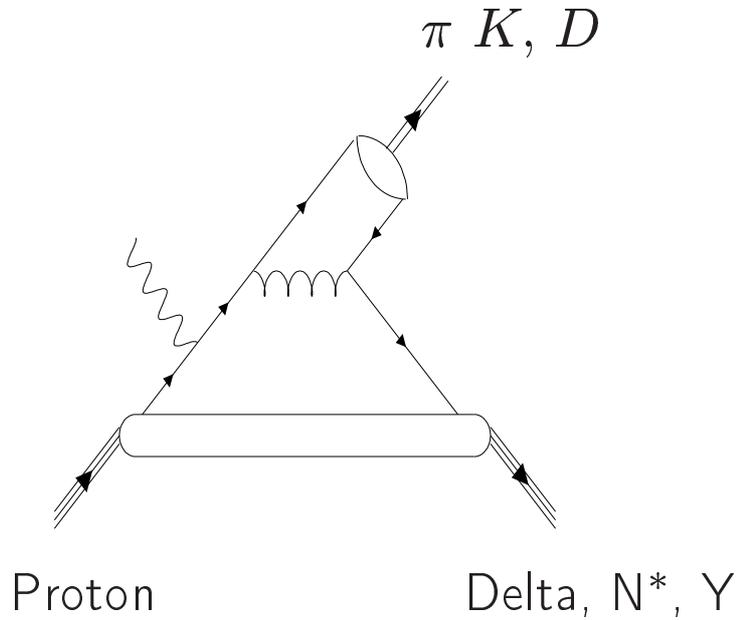
Kinematische Auflösung und “Neue Spektroskopie”

- HERMES Daten zeigen Evidenz für exclusive π^+ -Produktion



- Inelastische Pion Produktion nicht getrennt :
 $\sigma_{miss-mass} \approx 200 \text{ MeV}$
- Kunstgriff durch $\sigma(\pi^+) - \sigma(\pi^-)$ am Proton
- Bei einer Auflösung $\sigma_{m-m} \approx m_{\pi}/3 \approx 50 \text{ MeV}$ könnte man die inelastischen Kanäle z.B. $\gamma^* + p \rightarrow N^* + \pi$ trennen.

- Theoretisch vorhergesagte Wirkungsquerschnitte für Oktet und Dekuplet Baryonen sind groß
L.Frankfurt et al. PRL 84(2000)2589



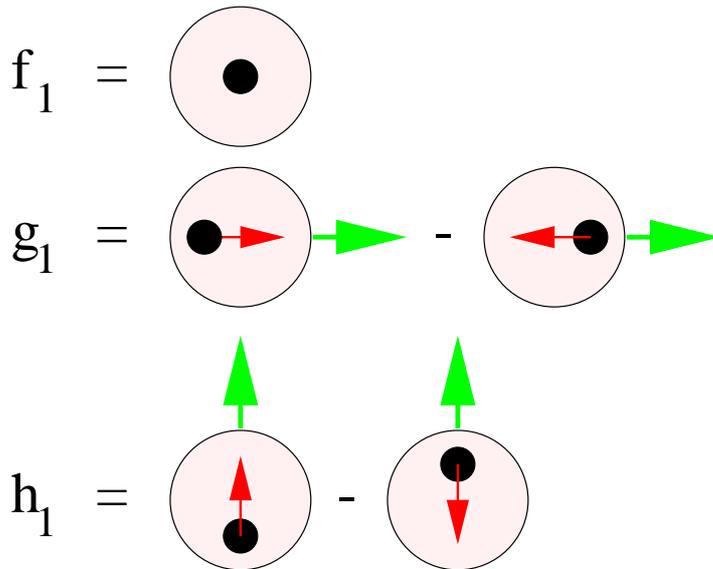
- Bei geeigneter **Auflösung** wird neue Strukturinformation zugänglich:
- Instabile Baryonen; z.B. Spinstruktur des Δ oder auch Struktur von $N^*1440, 1520, 1535(1/2^-)$ $Y^*1405(1/2^-), 1520$
- Die Struktur der beteiligten Mesonen geht durch ihre Lichtkegel Verteilungsamplituden ein \rightarrow Mesonspektroskopie

Achtung:

- Alle diese neuen Konzepte $L_q, x < \xi$, '*neue Spektroskopie*' sind derzeit in schneller Entwicklung begriffen
- An den Korrekturen (QCD Evolution, höhere Twistbeiträge) wird intensiv gearbeitet
- Die wenigen verfügbaren Daten stützen viele Annahmen, aber Probleme wie bei der Behandlung von Formfaktoren bei hohen Q^2 - können noch nicht ausgeschlossen werden

Transversaler Spin

- Es gibt neben $f_1(x, Q^2)$ (Impulsverteilung) und g_1 (Helizitätsverteilung) eine weitere (T-2) Strukturfunktion: $h_1(x, Q^2)$ (Transversalität)



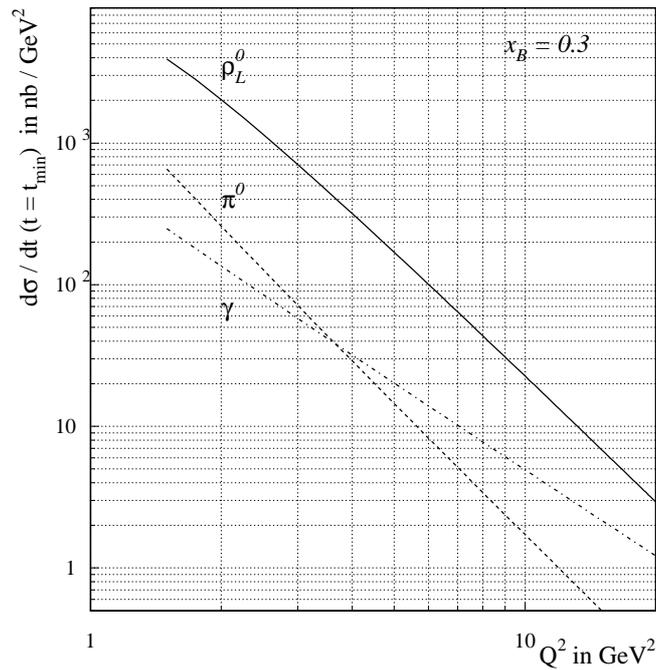
- Nicht identisch mit g_1
Gluonen können nicht in höherer Ordnung beitragen
- Neue Summenregel für die **Tensorladung** $\delta\Sigma$
- Die Struktur ist chiral-ungerade.
Wegen Helizitätserhaltung **nicht** in inklusiver DIS beobachtbar
- Vorschläge für Messungen:
 - Drell-Yan Prozess in transversal polarisierten Protonen (RHIC)
 - Azimuthale Asymmetrien in semi-inklusive DIS (SIDIS) am **transversal** polarisierten Proton (HERMES, COMPASS)

- Erste Ergebnisse von SMC(trans. Pol.)) und HERMES (long. Pol.)
zeigen gute Analysierstärke H_1/D_1
- $H_1^\perp(1)(z, k_\perp)$ Fragmentationsfunktion von transversal polarisier-
ten Quarks
- Weitere Fragmentationsfunktionen die vom transversalen Quar-
kimpuls abhängen
(transversaler Impuls \leftrightarrow nichtperturbative transversale Skalen)
- Die vereinfachende Annahme einer Faktorisierung von SIDIS
 $\frac{d^2\sigma}{dx dz} \propto f(x) \cdot D(z)$ ist bei höheren Energien besser realisiert

ELFE

- Exklusive Photon- und Meson- Wirkungsquerschnitte fallen mit hohen Potenzen von $(1/Q)^{4\dots 6}$ ab

$$\gamma^* + p \rightarrow M + p : (M = \rho_L^0, \pi^0, \gamma)$$



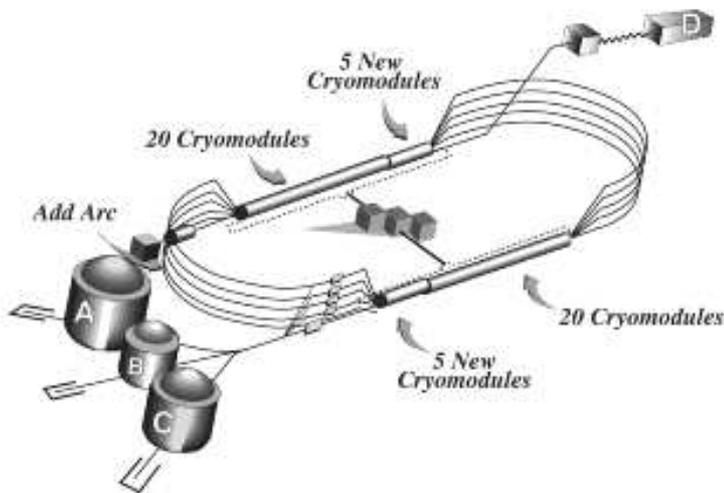
- Kinematische Auflösung von $\sigma_{m-m} < m_\pi$ ist notwendig um exklusive Kanäle zu isolieren
- Instantane Luminositäten bis etwa $10^{36} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ können (und müssen) genutzt werden

- Eine 30 GeV Elektronmaschine ($s=60 \text{ GeV}^2$)
 - mit Tastverhältnis ≈ 1
 - Energieschärfe $\sigma_E/E \approx 1/2 \times 10^{-3}$ ($\sigma_E = 30 \text{ MeV}$)
 - hochauflösendes Detektorsystem $\sigma_p/p \approx 10^{-3}$
 - DVES bei $Q^2 \geq 5 \text{ GeV}^2$ bis hinab zu $x=0.1$

→ ideale Voraussetzungen zum Studium von DVCS und DVES

- Eine viel höhere Strahlenergie
 - würde das Studium bei kleineren x erlauben
 - jedoch keine Erweiterung des Q^2 -Bereichs mit sich bringen
wg. Luminositätsgrenzen des Beschleunigers bzw, des Detektors
 - kinematische Auflösung $\sigma_{m-m} < m_\pi$ nicht erreichbar
->Exklusivität durch Antikoinzidenz im hermetischen Detektor

CEBAF @ 12 GeV



THE HALL D PROJECT

AT JEFFERSON LAB

PHOTOPRODUCTION OF UNUSUAL MESONS

Detector

Project Overview

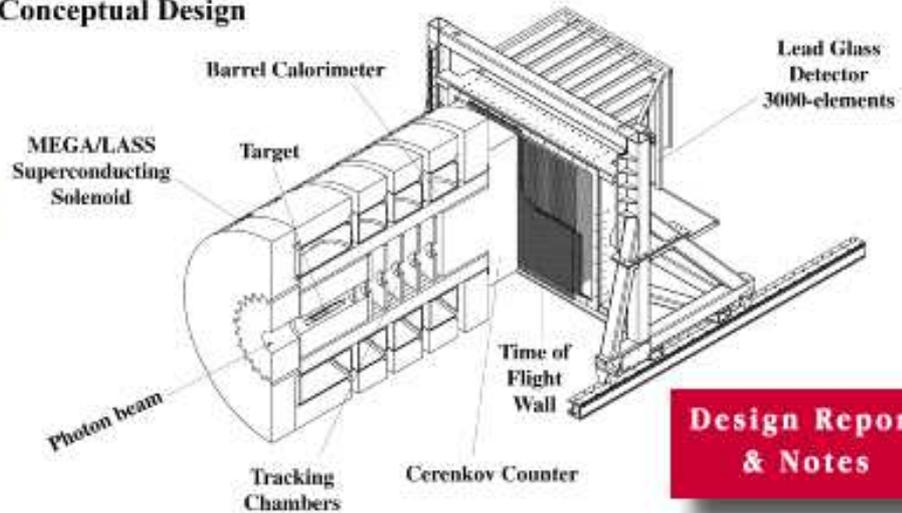
Physics Overview

NEW

The Collaboration

The Latest News

The Hall D Spectrometer Conceptual Design



Design Report & Notes

Hall D Institution Links

Hall D Institution Links

Working Documents for White Paper Committee

Special PAC 18 Review of the Science Driving the 12 GeV Upgrade

- **Generalized Parton Distributions**
- **Photoproduction of QCD Exotics**
- A_1^n for Valence Quarks
- Super High Momentum Spectrometer (SHMS)
- Quark-Hadron Duality: The Resonance-Scaling Transition
- Hadrons in Nuclear Medium
- Charm at Threshold
- Precision Measurements of the Electromagnetic Properties of Pseudoscalar Mesons at 11 GeV via the Primakoff Effect
- Nucleon Elastic and Transition Form Factors with the CEBAF at 12 GeV Upgrade
- Measurement of F_n^2/F_p^2 and d/u in Deep Inelastic Electron scattering off ^3H and ^3He
- High- Q^2 Few-Body Form Factors

TESLA



500 - 800 GeV e^+e^- Linear Collider with an
X-Ray Free Electron Laser Laboratory

Colloquium

Scientific Perspectives and Technical Realisation of

TESLA

23 / 24 March, 2001

DESY Hamburg,
Germany

International Adv. Committee

M. Danilov (ITEP, Moscow)
E. Iarocci (INFN)
G. Margaritondo (EPF Lausanne)
D. Miller (UC London)
D. Moncton (ANL/APS and ORNL)
F. Richard (LAL Orsay)
M. Tigner (Cornell Univ.)
E. Umbach (Univ. Würzburg)
A. Wagner (DESY)

Local Organisation

K. Flöttmann
R. Heuer
G. Materlik
G. Moortgat-Pick
T. Tschentscher

http://www.desy.de/tesla_colloquium

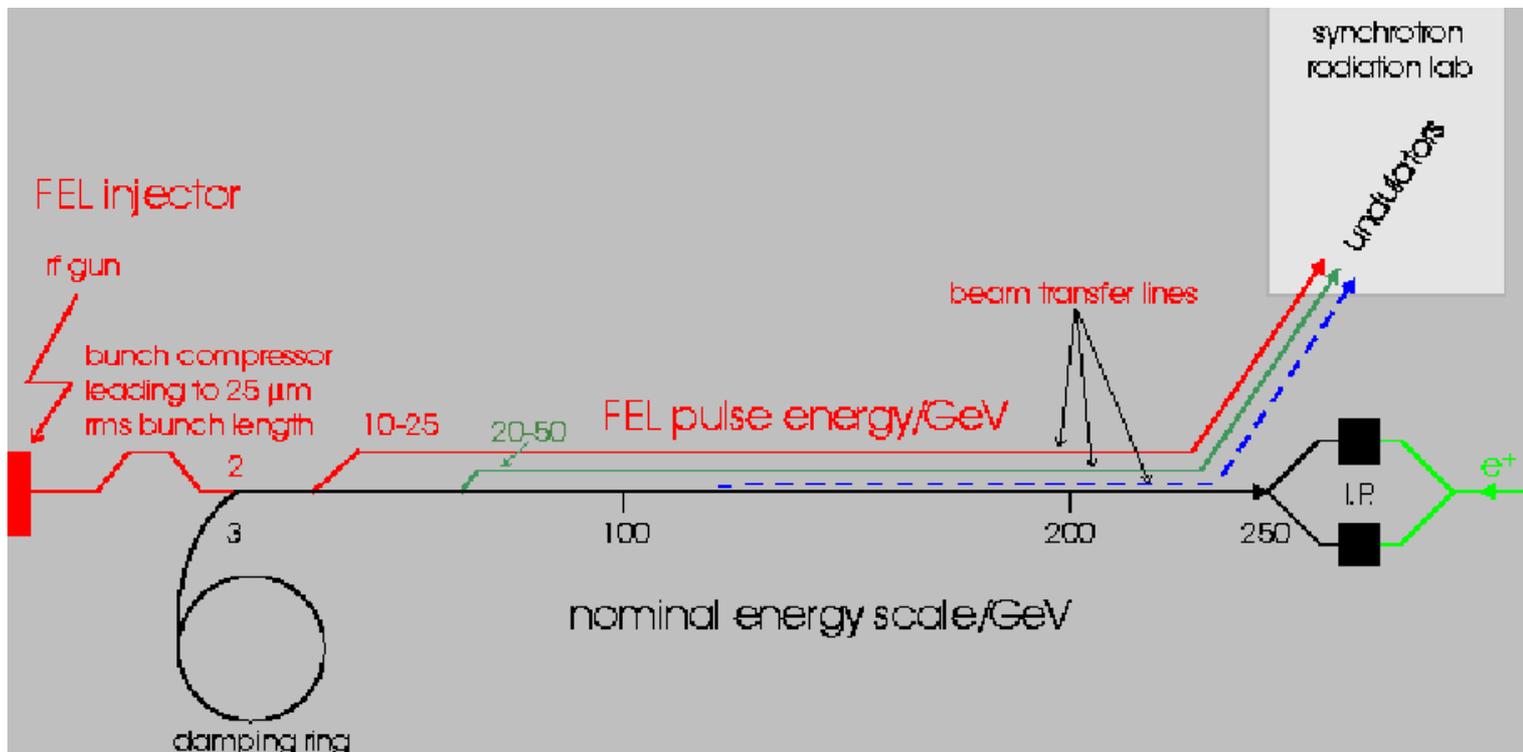
e-mail: tesla.colloquium@desy.de

TESLA

2 * 15 km SC-Linacs a 250 GeV mit SASE FEL $\lambda = 0.05-5$ nm

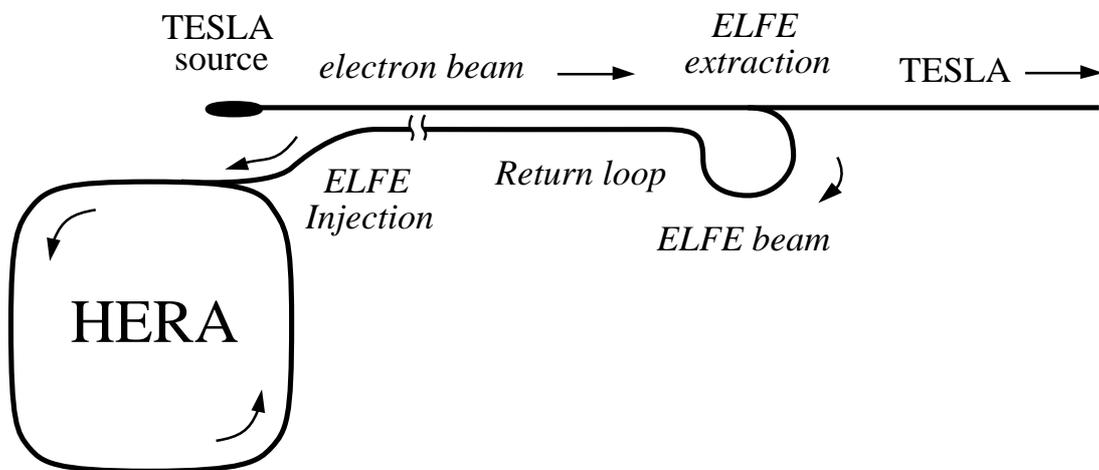


3 km Sektion (20-50 GeV) im e^- (Süd) Arm wir für FEL verwendet



ELFE @ DESY

TESLA injiziert bei 25 GeV in den HERA Elektron Ring, der als **Stretcher** verwendet wird.



ELFE@DESY	Stretcher-Version
Energiebereich	15-25 GeV
Max. Strom	30 μA
Tastverhältnis	88 %
Bunch Abstand	2.3 ns
Emittanz (hor.)	4 $\text{mm}\mu\text{rad}$ bei 15 GeV 12 $\text{mm}\mu\text{rad}$ bei 25 GeV
Energieschärfe	1.2×10^{-3} FWHM @ 15 GeV 2.2×10^{-3} FWHM @ 25 GeV

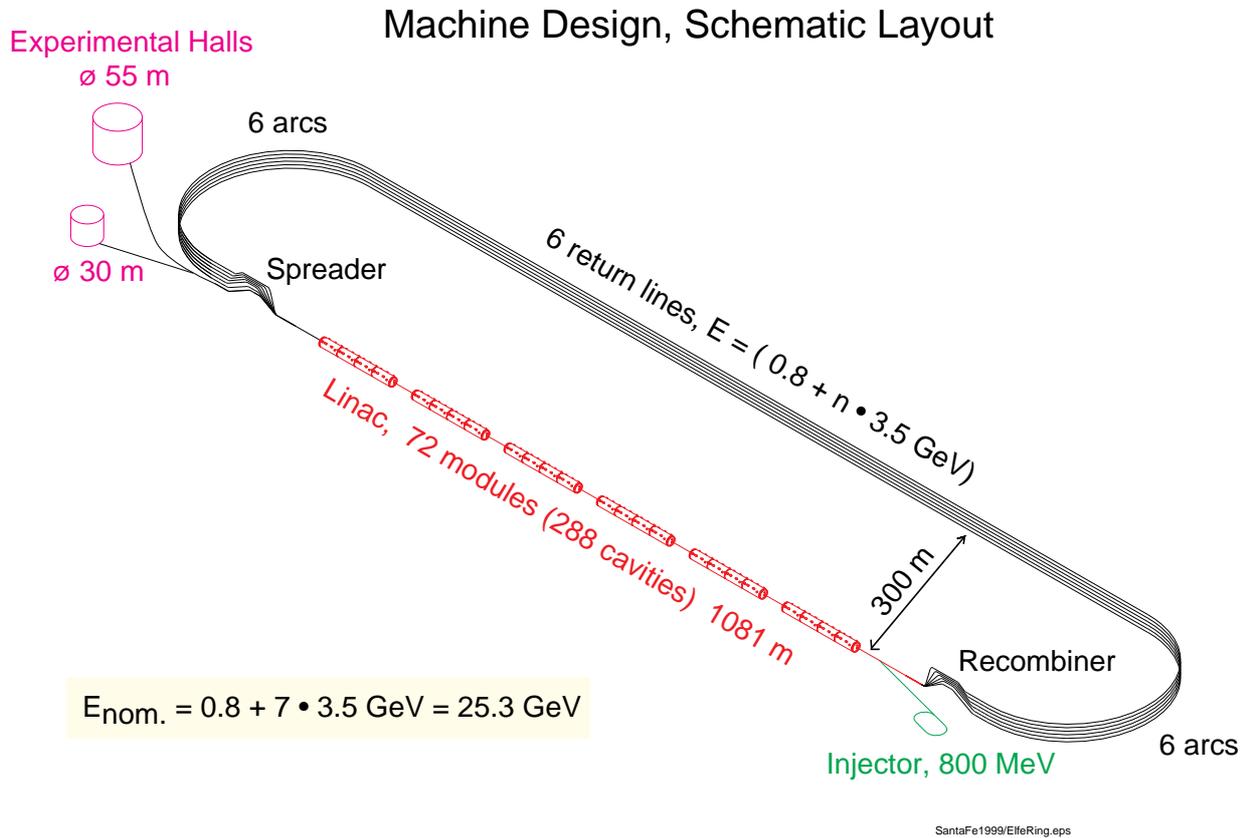
Aktualisierte Kostenschätzung für die Stretcherversion:

Kostenschätzung 16.3.01	
Baukosten: Verbindung TESLA->HERA	20 MDM
Baukosten: HERA->Strahlfänger + Strahlfänger	50 MDM
433 MHZ HF System	60 MDM
Strahlführung	30 MDM
Umkehrschleife	33 MDM
Modifikation der HERA Geradeaus-Sektionen	12 MDM
Polarisierte Quelle, Injektion, Extraktion, Regelsystem	15 MDM
Σ	220 MDM

- Kosten für Detektoren nicht berücksichtigt
- Energievariationen begrenzt möglich
- Longitudinale Elektronpolarisation an (externen) Target erfordert Aufwand

Vergleich mit ELFE@CERN

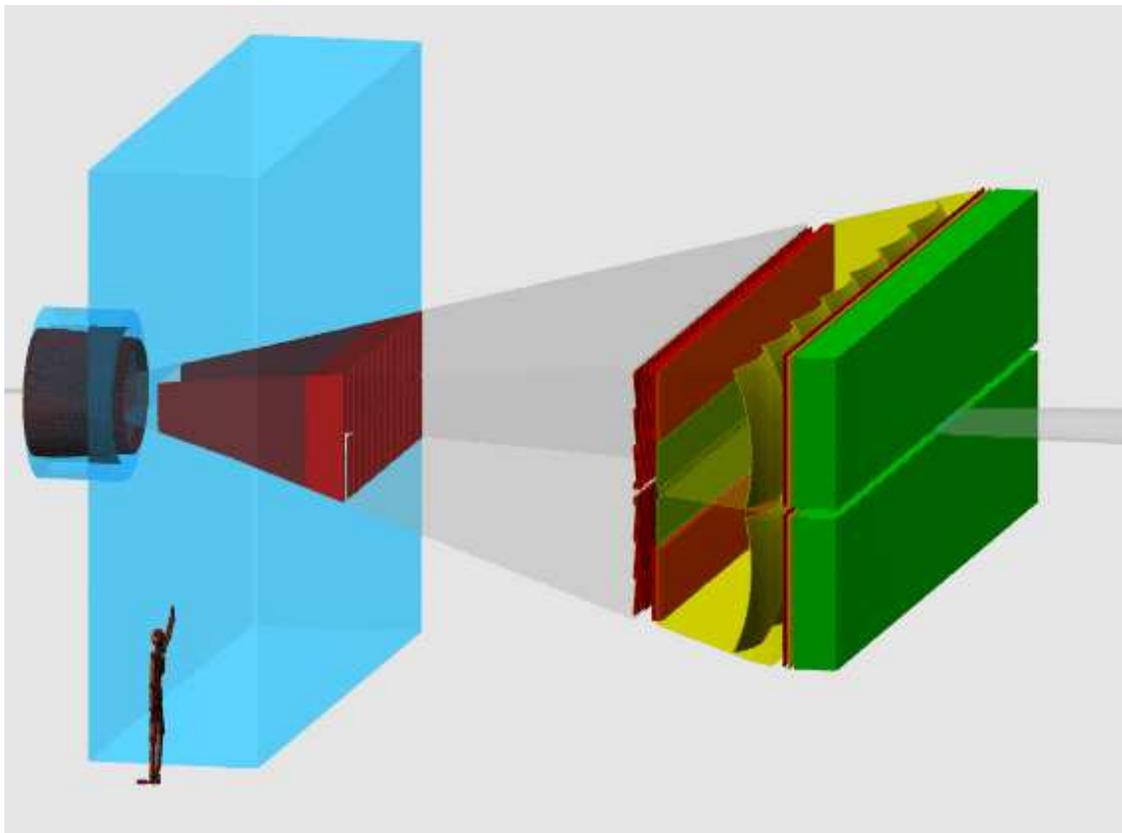
- Wiederverwendung der LEP Kavitäten in einem "CEBAF" Design



(CERN 99-10. ed. H. Burckhardt) Kosten 366.1 MSFR=440 MDM

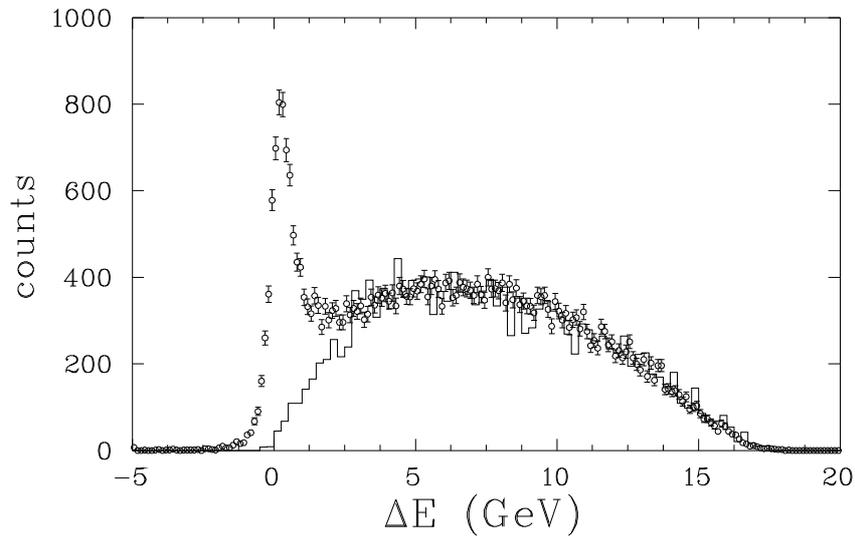
Vorschlag für einen ELFE Detektor

- Vorwärts Dipol-Spektrometer $\int \mathbf{B} dl = 5 \text{ Tm}$ mit instrumentierten Innenseiten
- Vakuumkammer • Fiber Detektoren $\delta x \approx 50 \mu\text{m}$ 0.5% X_0 Dicke;
- Rückwärts Solenoid Spektrometer • PbWO_4 Kristallkalorimeter
- RICH(C_4F_{10} +Aerogel)

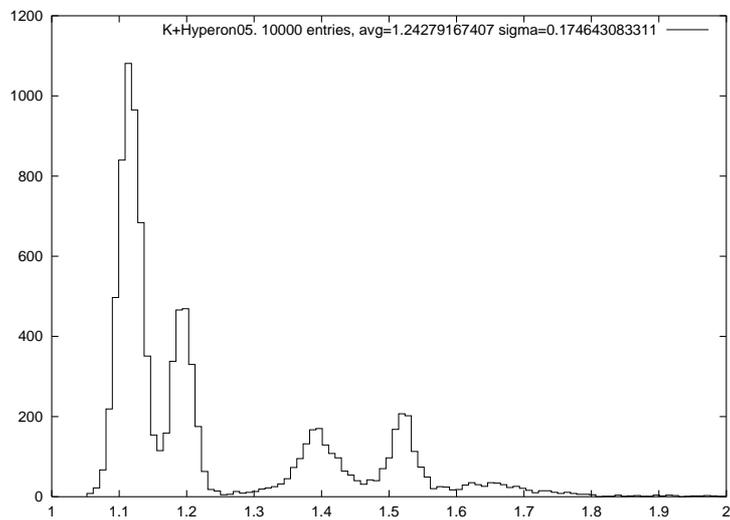


Detektorauflösung

- “Missing Mass” Auflösung des HERMES Detektors (ca 1%)
für exklusive Mesonproduktion

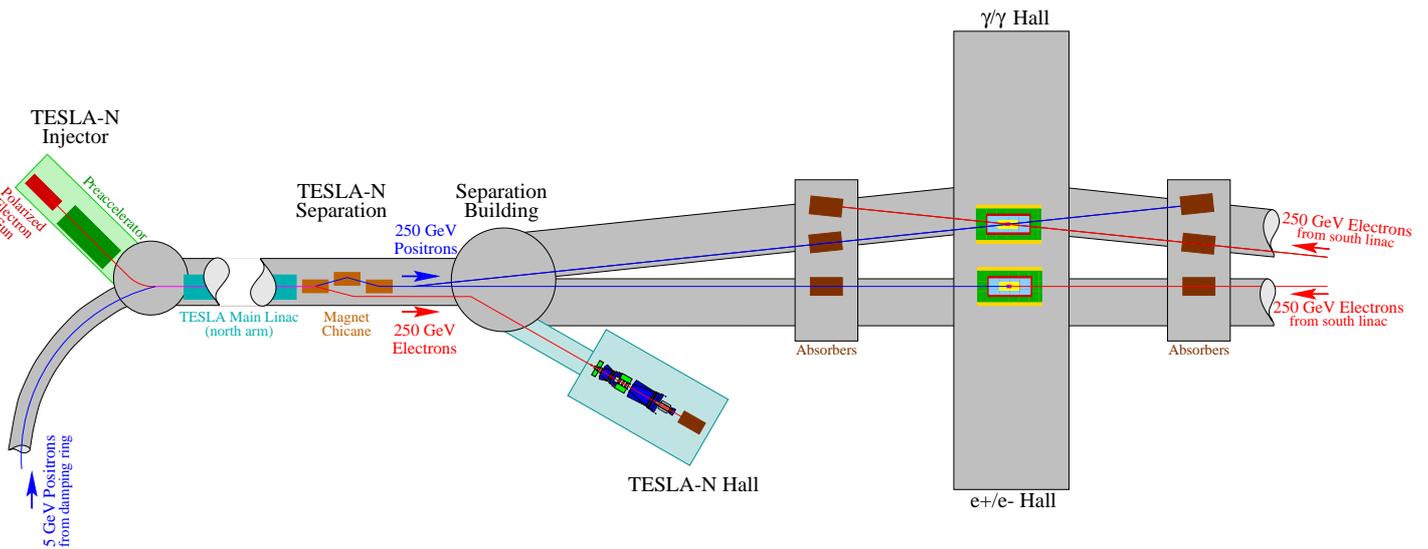


- Simuliertes Massenspektrum für $\gamma^* + p \rightarrow K^+ + \Lambda^{(*)}, \Sigma^{(*)}$



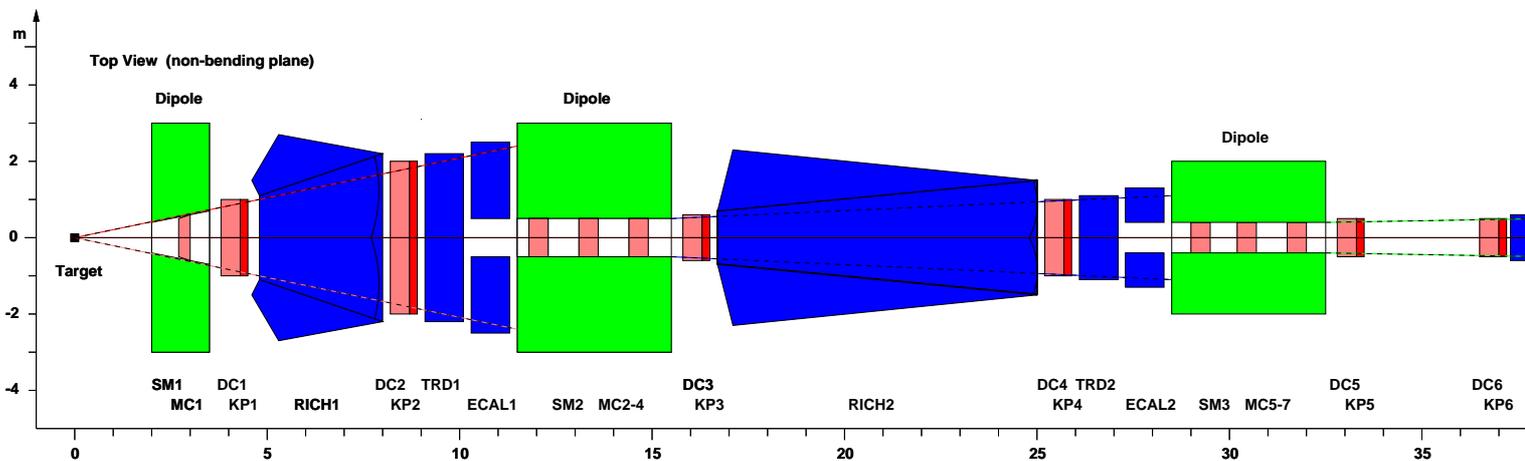
TESLA-N

- Semiinklusive DIS mit polarisierten Elektronen und Targets
- Nord (e^+) Arm von TESLA bei 250-400 GeV ($s=500-800 \text{ GeV}^2$)



TESLA-N Study Group hep-ph/0011299, DESY 00-160, TPR 00-20 31. November 2000

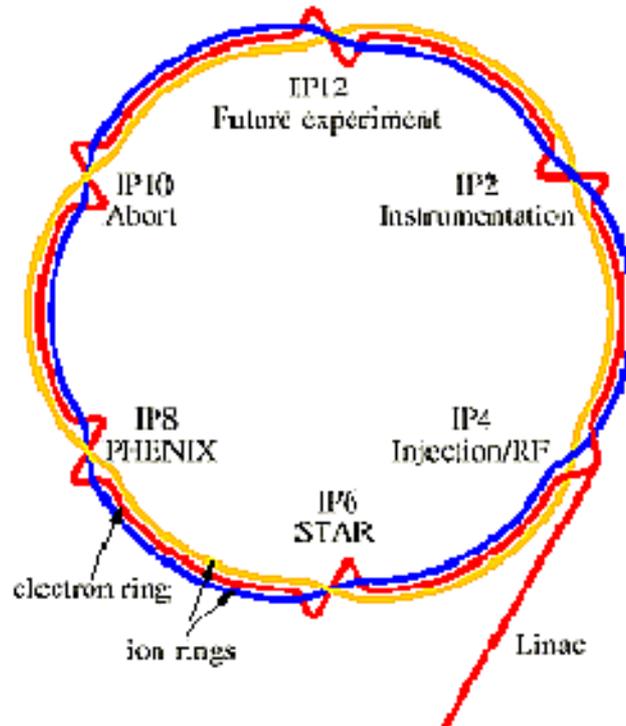
- Luminosität (10 Hz) $1.5 \cdot 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($300 \times \text{COMPASS}$) $DF = 1\%$
- Dreistufiges Detektorkonzept



EPIC + ERHIC=EIC

The Electron Ion Collider, Whitepaper submitted to NSAC March 2001

- Polarisierte p & e ; $s = 1000-10\ 000\ \text{GeV}^2$ (vergl. HERA $s=100\ 000\ \text{GeV}^2$)



Gold Energie/Nukleon	100 GeV/u
Max. Proton Energie	250 GeV
Electron Energie	10 GeV
Electron-Gold cm Energie/Nukleon	63 GeV/u
Elektron-Proton cm Energie	100 GeV
Umfang	3.8 km
Umlauffrequenz	78.3 kHz
Radius in Dipolen	243 m
Luminosität pro Nukleon	$10^{33}\ \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
x_{min} @10 GeV^2 e-Au	$1.6 \cdot 10^{-4}$
x_{min} @10 GeV^2 e-p	$1.0 \cdot 10^{-4}$

Physikprogramm des EIC “White Paper”

- Polarisierte $\vec{e} \vec{p}$ Streuung bei kleinem $s \approx 500 - 1000 \text{ GeV}^2$
 - transversale Partonimpulse in der Fragmentation
 - Spinabhängige Fragmentationsfunktionen
 - Targetfragmentation “fracture functions”
 - “tagged “ Strukturfunktionen des Deuterons, d/u
 - Transversity $h_1(x)$ in SIDIS
 - DVCS und DVES
 - “neue Spektroskopie”
- Polarisierte $\vec{e} \vec{p}$ Streuung bei großem $s \approx 5000 - 10000 \text{ GeV}^2$
 - Inclusive Spinstrukturfunktion bei kleinen $x \geq 10^{-4}$
 - Bjorken Summenregel auf 1%
 - ΔG aus der Skalenbrechung von $g_1(x, Q^2)$
 - $\Delta G(x)$ aus 2+1 Jet Ereignissen
 - Polarisierte Strukturfunktion de Photons
 - W^\pm Produktion, Bestimmung der PV Strukturfunktion g_5^\pm
 - Hochenergetische Limes der DHG Spinsummenregel.
- e·A Kollisionen
 - Strukturfunktionen und Skalenverhalten bei hohen Partondichten
 - harte diffraktive Prozesse “rapidity gap”
 - Messung der Gluonstrukturfunktion
 - Suche nach “Colored Glass Condensate”.

Dies ist: ENC \otimes HERA- $\vec{e} \vec{p}$ \otimes HERA-eA

Bei Subprozessen mit $\hat{s} = 10 \text{ GeV}^2$ in h-h Kollisionen sind Partonen mit $x_1 \cdot x_2 = \hat{s}/s$ also $x \approx \sqrt{\hat{s}/s}$ beteiligt.

$$\text{RHIC(Au+Au)100+100: } x_{\hat{s}=10 \text{ GeV}^2} = 1.6 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{LHC (Pb+Pb) 2700+2700: } x_{\hat{s}=10 \text{ GeV}^2} = 5.7 \cdot 10^{-4}$$

Prioritäten und Schlussfolgerungen

- Kernphysik heute ist "starke" QCD
- Exklusive Elektronenstreuung eröffnet neue Zugänge zu Hadronstruktur:
 1. Bahndrehimpulse von Quarks und "magnetische" Eigenschaften der Nucleonen
 2. Mesonische Struktur der Baryonen im neuen Bereich $|x| < |\xi|$
 3. "Neue Spektroskopie" durch Übergänge zu N^* und Mesonen
- Die Hadronstrukturphysik in Europa braucht dafür einen Elektronenbeschleuniger mit hohem Tastverhältnis und einer Energie $E \geq 25 \text{ GeV}$
- Wenn TESLA begonnen wird dann bestehen bei DESY hierfür die besten Voraussetzungen:
 - Das FEL Projekt hat ähnliche Anforderungen an die Strahlenergie. Zur Anpassung der Pulsstruktur kann man:
 - * Den HERA Ring als Stretcher verwenden oder
 - * Die Kryo-Anlage für einen Abschnitt aufstocken um ca. 10% Tastverhältnis zu erzielen
- Konzeption eines Detektors, der als
 - S-HERMES eingesetzt werden kann
 - als ELFE Detektor verwendet wird wenn der TESLA-FEL läuft
 - und auch als 1. Stufe eines TESLA-N Detektors dienen kann