
Strukturfunktionen

Lars Kolk

5. Juni 2019

Fakultät Physik

Einführung

Motivation

- Das Proton
- Das Rutherford Experiment
- Elektronstreuung
- Ladungsverteilung und Formfaktoren

Struktur des Protons

- Inelastische Streuung
- Tief-inelastische Streuung
- Proton-PDF

Hera am DESY

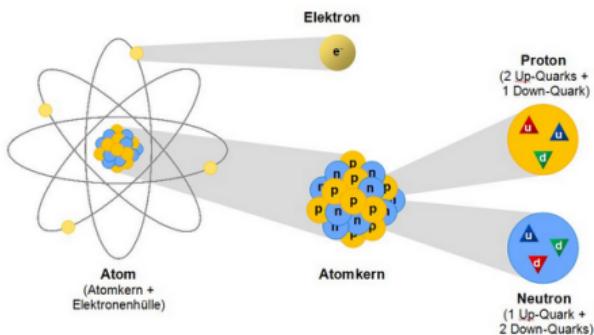
- Der ZEUS-Detektor
- Der H1-Detektor

Ergebnisse

Weitere Experimente

Zusammenfassung

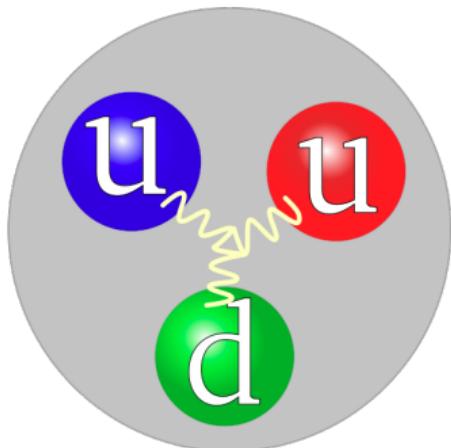
Das Proton



Protonen:

- bilden zusammen mit Neutronen den Atomkern
- sind Baryonen
- haben eine einfach positive Ladung
- haben eine Masse von $938,272081 \pm 0,000006$ MeV
- besteht aus zwei Up- und einem Downquark (Valenzquarks)

Die Valenzquarks



Das Up-Quark:

- $m_u = 2,16^{+0.49}_{-0.26} \text{ MeV}$
- $q_u = \frac{2}{3} e$

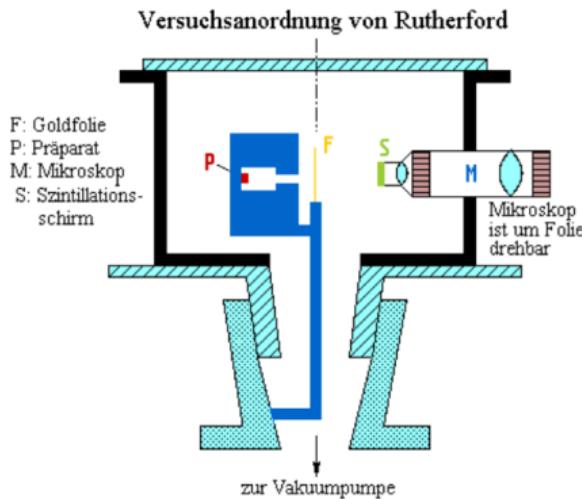
Das Down-Quark:

- $m_d = 4,67^{+0.48}_{-0.17} \text{ MeV}$
- $q_d = -\frac{1}{3} e$

Gesamt:

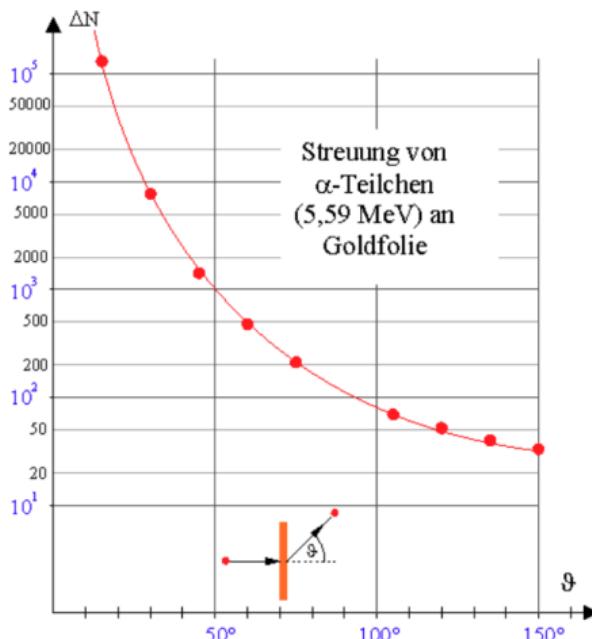
- $m_{\text{ges}} = 8,99^{+1,09}_{-0.55} \text{ MeV}$
- $q_{\text{ges}} = e$

Rückblick: Das Rutherford Experiment



- Streuung von α -Teilchen an Goldfolie
- Durchgeführt:
 - 1908-1913
 - von Hans Geiger und Ernest Marsden unter Führung von Ernest Rutherford
- Beobachtung:
 - Ein Großteil der α -Teilchen fliegt durch die Folie hindurch
 - Bei einigen wenigen α -Teilchen kam es zu einer Streuung
- Folgerung:
 - Das Thomson'sche Atommodell ist nicht vollständig
 - Masse des Atoms muss in einem Kern konzentriert sein
 - Atom größtenteils leer

Rutherford-Streuformel

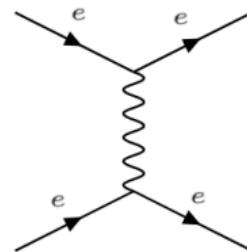


- Plot zeigt wie viele Teilchen ΔD pro Streuwinkel θ auftreten
- Es lässt sich die Rutherford-Streuformel finden:
- $$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{16\pi\epsilon_0 E_{\text{kin}}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$
- $Z_1 \hat{=} \text{Anzahl der Ladungsträgern des gestreuten Teilchen}$,
 $Z_2 \hat{=} \text{Ordnungszahl des Targets}$

Elektronstreuung

Betrachtung von Elektronstreuung

- ab den 1950ern können Elektronen leicht erzeugt und beschleunigt werden
- $E_{\text{kin}} = 100 \text{ MeV} \rightarrow \lambda = 12 \text{ fm}$
- Einfluss von Spin-Bahn-Kopplung → Modifikation der Rutherford-Streuformel
 - $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Ruth}} \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \sin^2 \frac{\theta}{2}\right)$



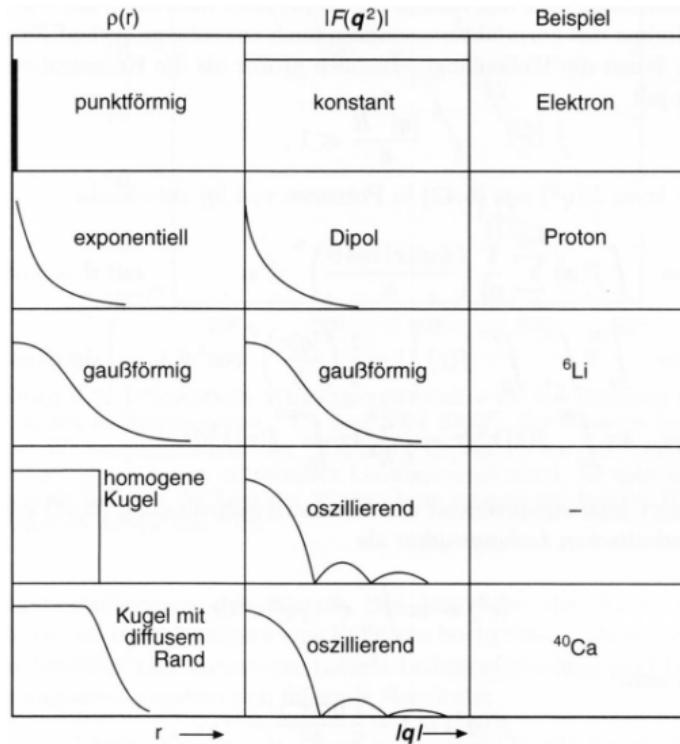
Ladungsverteilung und Formfaktoren

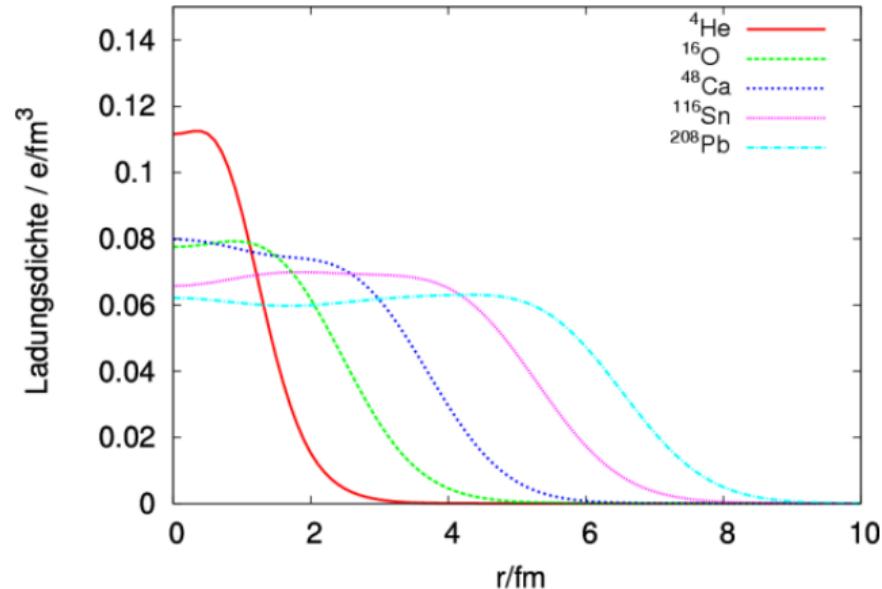
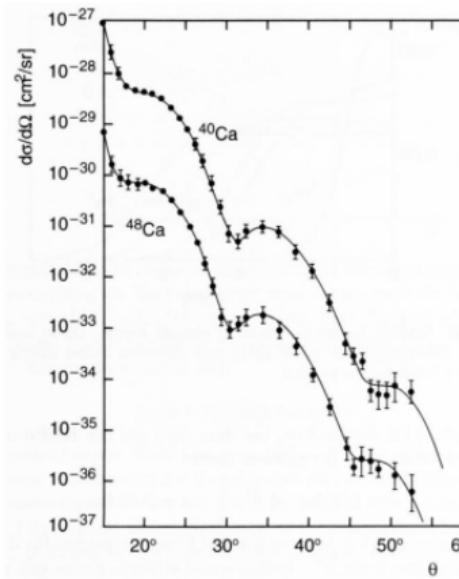
- Bisher: Punktförmige Ladung
- Nun: Ladungsverteilung → (erneute) Modifikation des Wirkungsquerschnittes

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{Mott}} \cdot |F(\vec{q})|^2$$

$$F(\vec{q}) = \int \exp\left(\frac{i}{\hbar} \vec{x} \cdot \vec{q}\right) \rho(\vec{x}) d\vec{x}$$

■ \vec{q} ≈ Impulsbeitrag, ρ ≈ Ladungsverteilung





Warum ist das wichtig?

- Bereits kleine Energien liefern Aussage über Ladungsverteilung
- Können bei größeren Energien Aussagen über die Struktur von Proton getroffen werden?
 - Kurze Antwort: Ja!

Struktur des Protons

- Bisher:

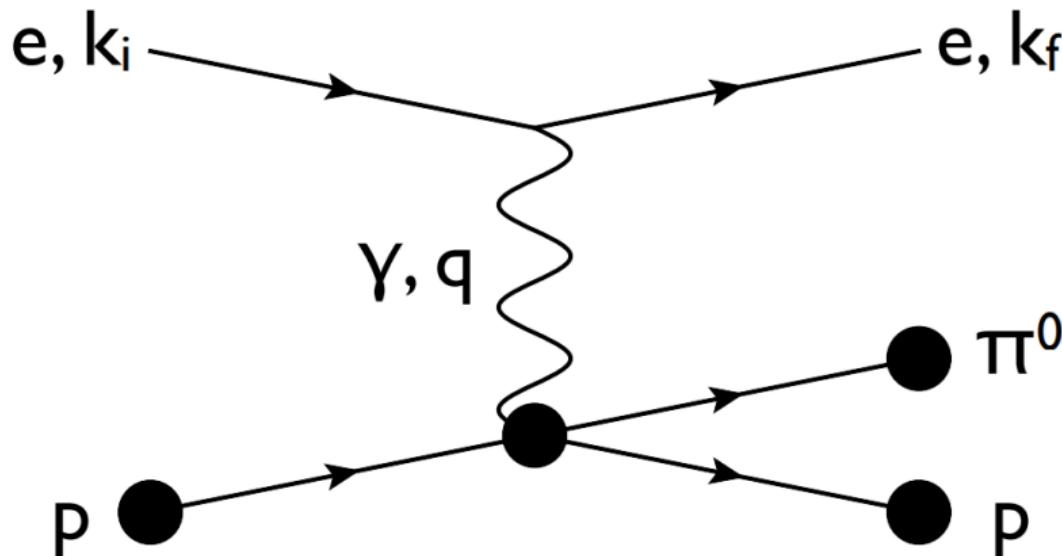
- Energien im **MeV**-Bereich
- Elastische Streuung
- Aussage über Ladungsverteilung

- Nun:

- Energien im **GeV**-Bereich
- (Tief-)inelastische Streuung
- Aussage über die Struktur des Protons

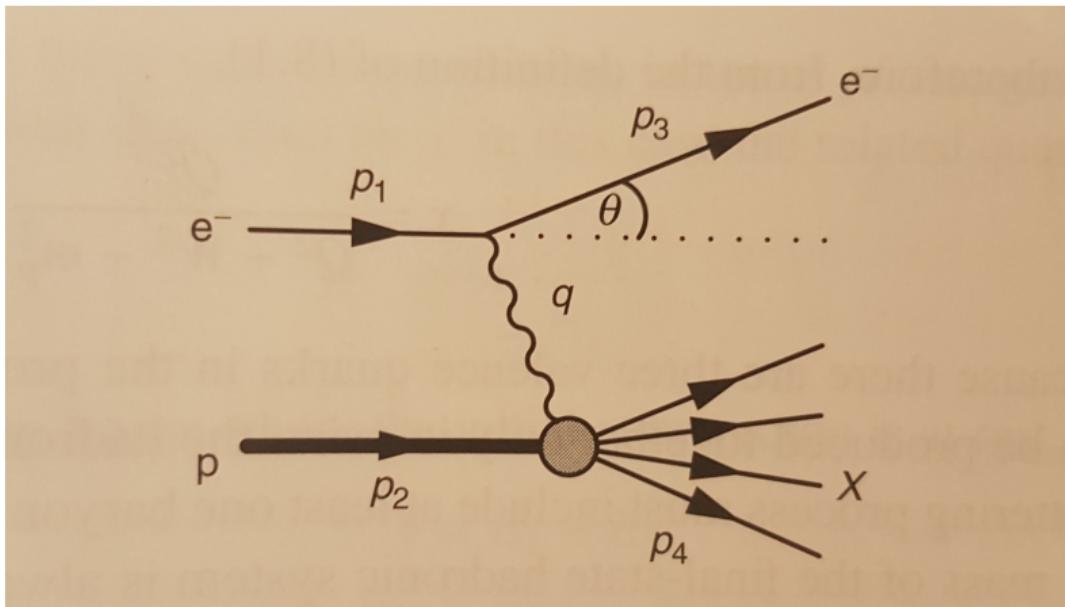
Inelastische Streuung

Beispiel:



Gut, aber noch keine Information über Quark-Struktur

Tief-inelastische Streuung



Wirkungsquerschnitt

- Ansatz über Rosenbluth, da:

- relativistisch gerechnet werden muss
 - Vierervektoren statt Vektoren

- Rosenbluth:

- $$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4E_1^2 \sin^4 \frac{\theta}{2}} \cdot \frac{E_3}{E_1} \left(\frac{G_E^2 + \tau G_M^2}{1+\tau} \cos^2 \frac{\theta}{2} + 2\tau G_M^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

- $$\tau = \frac{Q^2}{4m_p}$$

- $$Q^2 = -(p_1 - p_3)^2$$

- $$y = 1 - \frac{E_3}{E_1}$$

- G_i ≈ Formfaktoren, die die Verteilung der Ladung und des magnetischen Moments beschreiben

- Rosenbluth kann umgeschrieben und verallgemeinert werden zu:

- $$\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} = \frac{4\pi a^2}{Q^4} \left[\left(1 - y - \frac{m_p^2 y^2}{Q^2} \right) \frac{F_2(x, Q^2)}{x} + \frac{1}{2} y^2 F_1(x, Q^2) \right]$$

- F_i ≈ Formfaktoren

- F_1 ≈ Magnetischer Formfaktor
 - Spin = 0 → $F_1 = 0$

- $$x \approx \text{Bjorken } x \equiv \frac{Q^2}{2p_2 q}$$

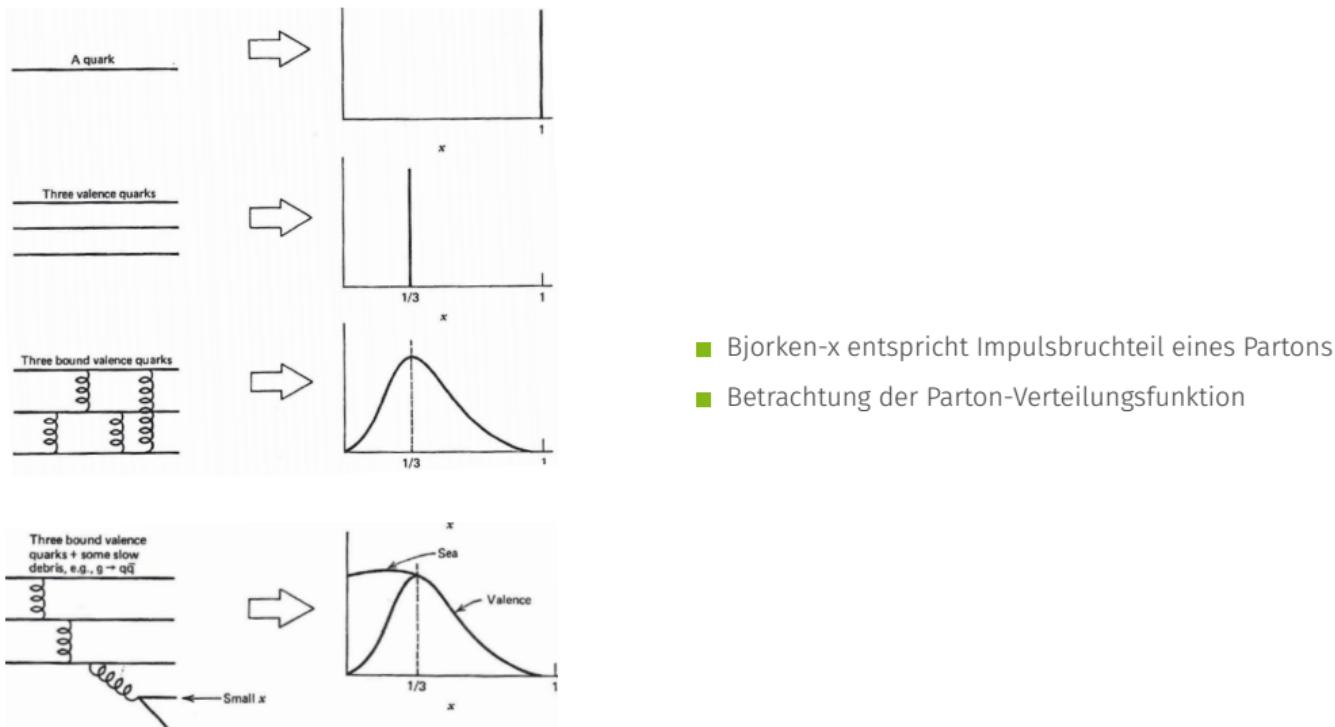
- tief-inelastische Streuung → $Q^2 \gg m_p^2 y^2$

Bjorken-Scaling

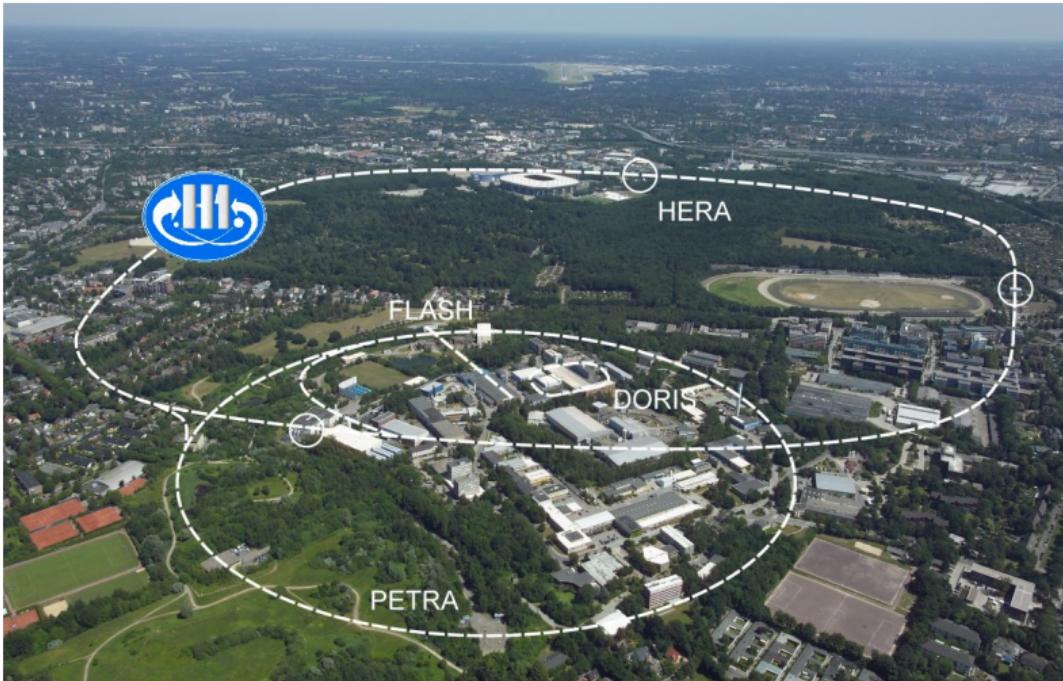
- Erste Studien am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) in Californien
- Untersucht:
 - inelastische Elektron-Proton-Streuung
 - $E_e = (5 - 20) \text{ GeV}$
 - Elektronen wurden auf flüssiges Wasserstoff-Target geschossen
- Beobachtung:
 - $F_1(x, Q^2)$ und $F_2(x, Q^2)$ sind unabhängig von Q^2
 - Callan-Gross-Beziehung:
$$F_1(x, Q^2) = 2x F_2(x, Q^2)$$
- Folgerung:
 - Das Proton besteht aus punktförmigen Spin $\frac{1}{2}$ - **Teilchen**



Proton-PDF

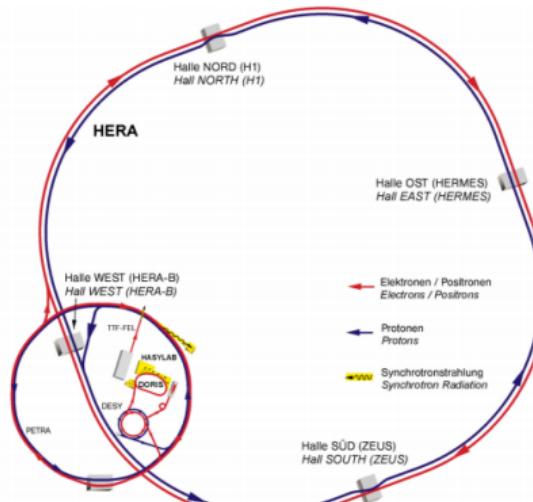


Hera am DESY



Zahlen und Fakten zum HERA-Beschleuniger:

- befindet sich am DESY in Hamburg, Deutschland
- Elektron-Proton-Speicherring
- Umfang: 6336 m
- lief von 1992 bis 2007
- Experimente: H1, ZEUS, Hermes
- Elektronen(30 GeV) und Protonen(820 GeV) treffen aufeinander
- Schwerpunktsenergie: $\sqrt{s} = 320 \text{ GeV}$
- Datenauswertung: Bis heute



- Rot: Elektronen
- Blau: Protonen

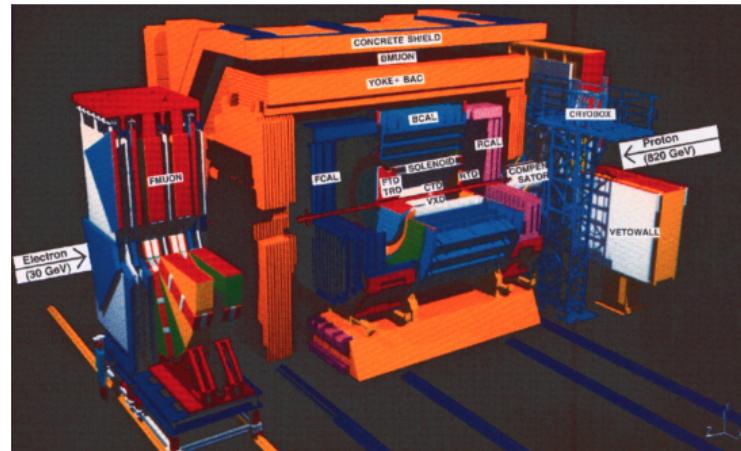
Der ZEUS-Detektor

Eckdaten:

- befindet sich in der Süd-Halle von HERA
- Maße: **12 m × 10 m × 19 m**
- Gewicht: **3600 Tonnen**
- Aufgabe: Entschlüsselung der Struktur des Protons

Aufbau

- Uran Szintillator Kalorimeter (CAL)
 - Misst Energie und Richtung der Teilchen
 - Es umschließt verschiedene Spurdetektoren
 - Energie, die nicht völlig absorbiert wurde, wird im Begleit-Kalorimeter absorbiert
- Vetowand
 - Detektiert Hintergrunds-Ereignisse
- Proton-Kalorimeter
- Luminositätsmonitor
 - Detektiert Elektronen und Photonen aus Elektronenstrahlen
- Solenoid (1.8 T)





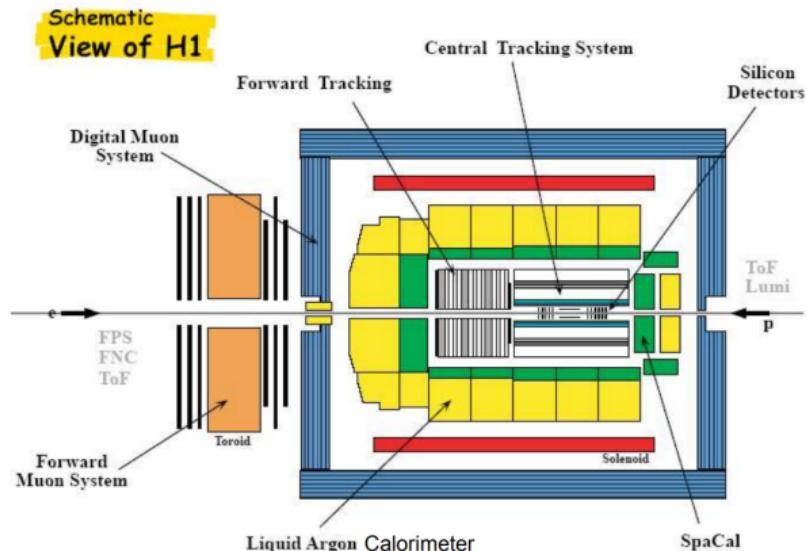
Der H1-Detektor

Eckdaten:

- befindet sich in der Nord-Halle von HERA
- Maße: **12 m × 10 m × 15 m**
- Gewicht: **2800 Tonnen**
- Aufgabe: Entschlüsselung der Struktur des Protons

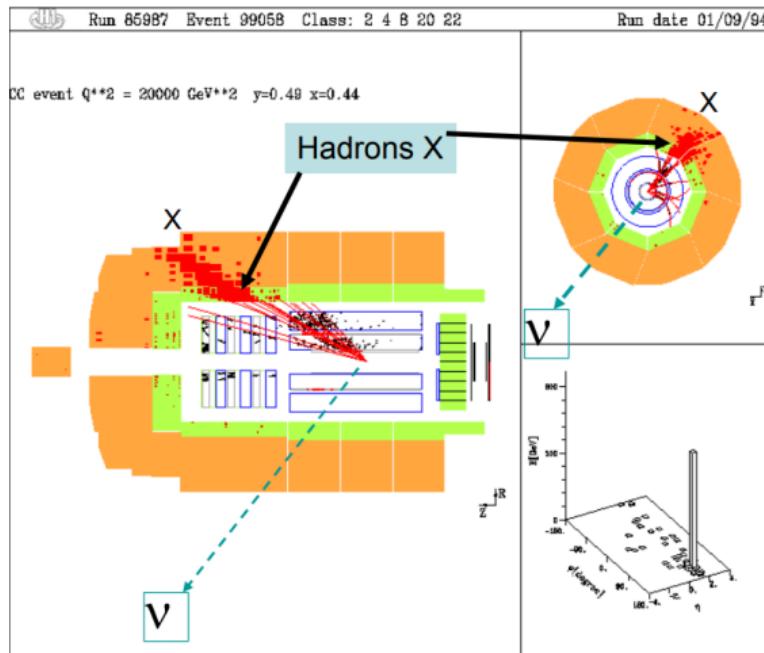
Aufbau

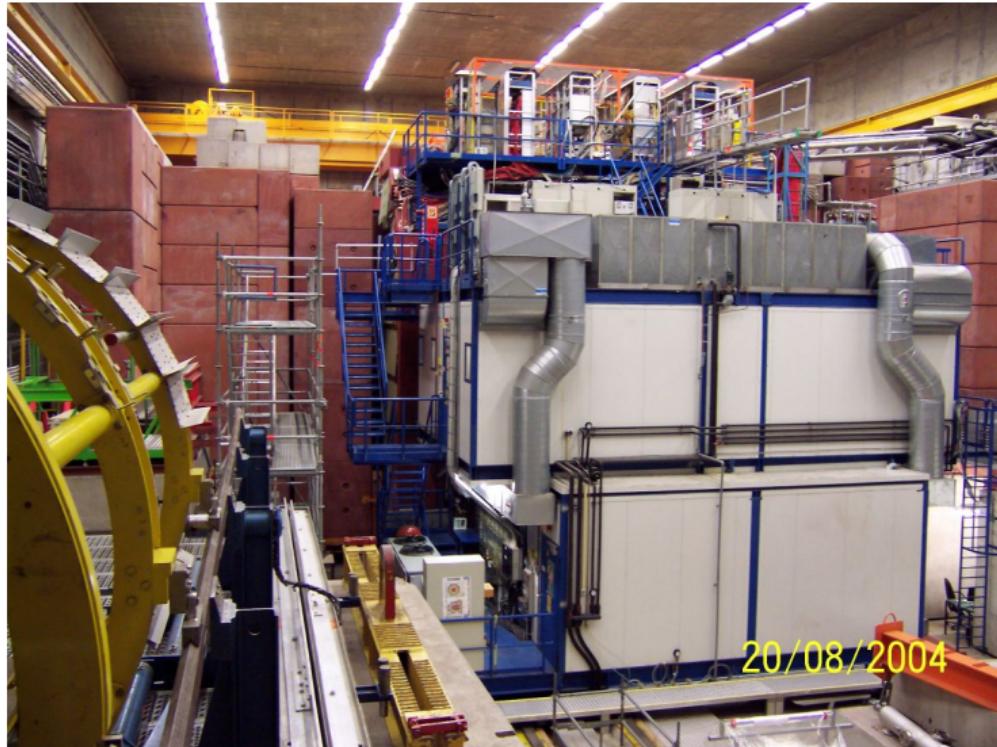
- Asymmetrischer Aufbau
- Aufbau besteht aus:
 - Spurenkammer
 - Hadronisches Kalorimeter
 - Elektromagnetisches Kalorimeter
 - Supraleitende Spule ($1,2\text{ T}$)
 - Myon-Kammer



Beispiel

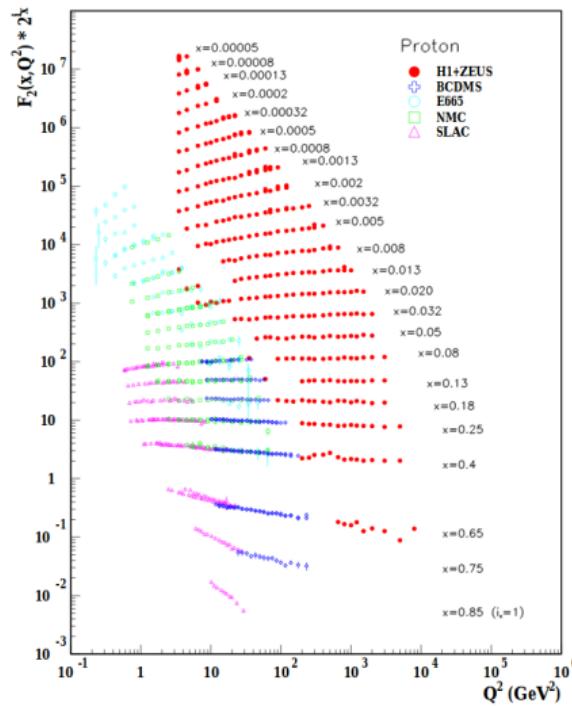
$e p \rightarrow \nu X$





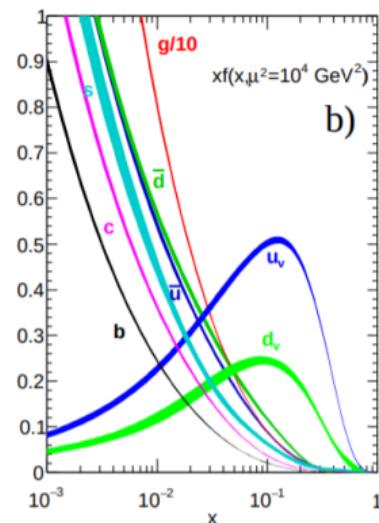
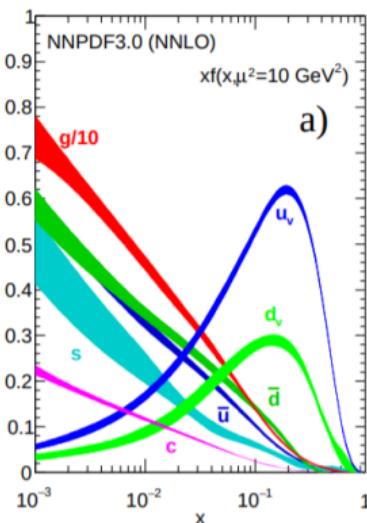
Skalenbrechung

- Plot zeigt $F_2 - Q^2$ -Diagramm
- Darstellung mit verschiedenen x -Werten
- Ergebnisse verschiedener Experimente vereint
- Beobachtung:
 - Für kleine x steigt F_2
 - Für große x sinkt F_2



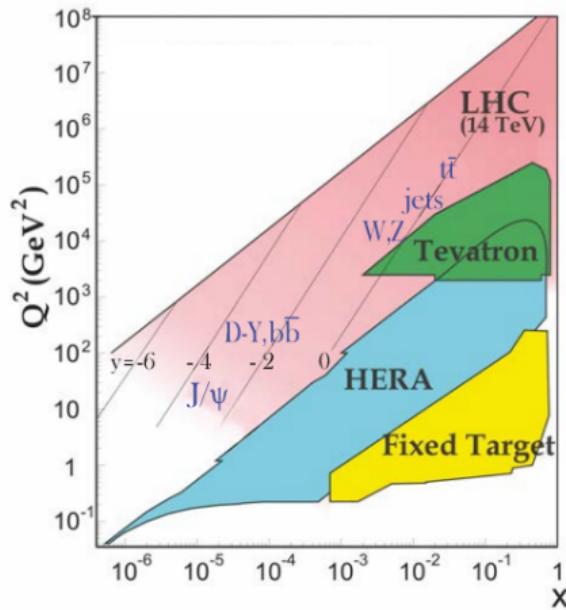
Ergebnisse

Proton PDF



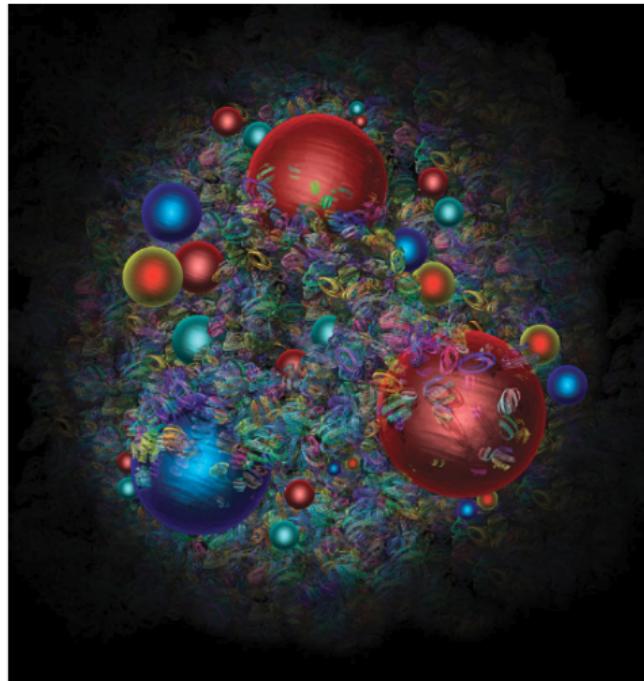
- Das Proton besteht nicht nur Valenzquarks, es sind auch See-Quarks und Gluonen zu finden
- Es lässt sich beobachten:
 - $\int_0^1 u_v dx = 2$ und $\int_0^1 d_v dx = 1$
 - $\int_0^1 x [u(x) + \bar{u}(x) + d(x) + \bar{d}(x) + s(x) + \bar{s}(x)] dx = 1 - \frac{p_g}{p}$ beobachten
- Struktur doch nicht unabhängig von Q^2 .
- Größeres $Q^2 \rightarrow$ mehr Quarks mit kleinem x

Weitere Experimente und was sie abdecken



Zusammenfassung

- H1 und ZEUS liefern hohe Präzision über den Inhalt des Protons
- Proton besteht nicht nur aus den 3 Valenzquarks
 - es besteht ebenfalls aus See-Quarks
 - und Gluonen
- Masse kommt aus QCD
- Struktur ist abhängig von Q^2
- Wissen über Proton Struktur wichtig für weitere Experimente wie LHC



Vielen Dank für Eure Aufmerksamkeit!