

---

## Strukturfunktionen

---

Lars Kolk

**6. 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

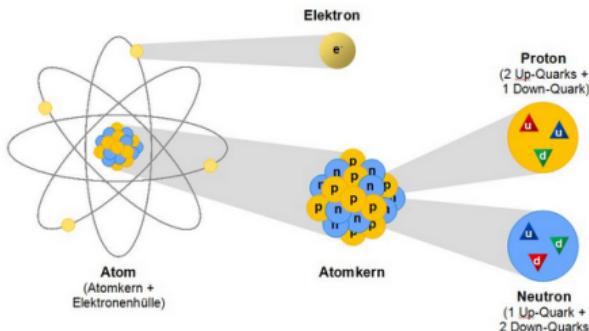
- Der ZEUS-Detektor
- Der H1-Detektor

### Ergebnisse

### Weitere Experimente

### Zusammenfassung

## Das Proton

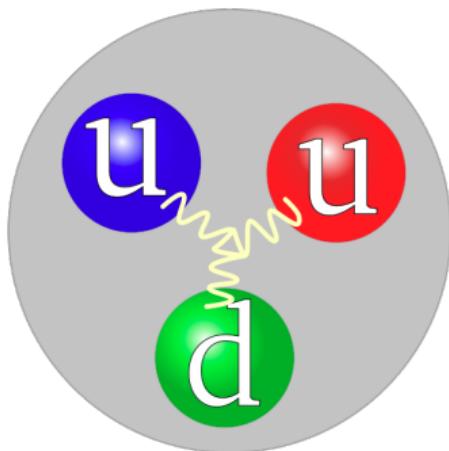


Protonen:

- 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)

Abbildung: entnommen aus [11].

## Die Valenzquarks



Das Up-Quark:

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

Das Down-Quark:

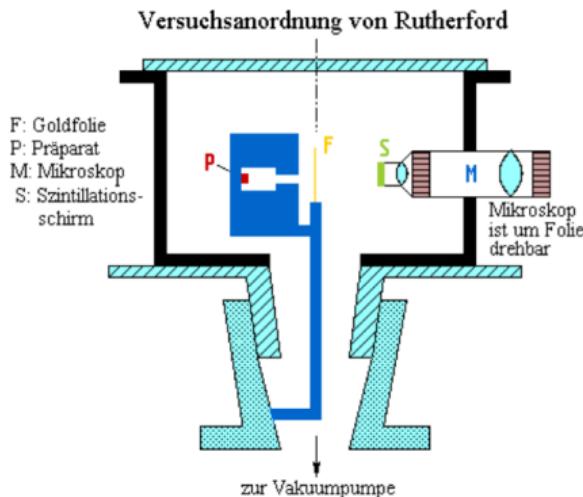
- $m_d = 4,67^{+0.48}_{-0.17} \text{ MeV}$
- $q_d = -\frac{1}{3}e$

Gesamt:

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

Abbildung: entnommen aus [13].

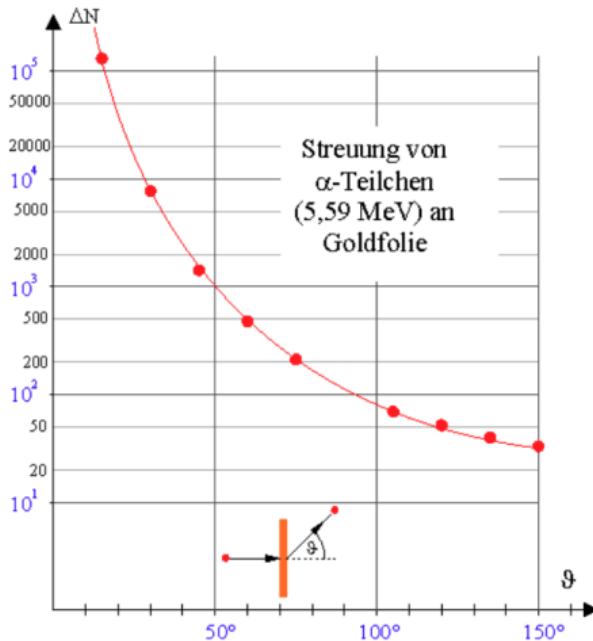
## Rückblick: Das Rutherford Experiment



- Streuung von  $\alpha$ -Teilchen an Goldfolie
- Durchgeführt:
  - 1908-1913
  - von Hans Geiger und Ernest Marsden unter Führung von Ernest Rutherford
- Beobachtung:
  - Ein Großteil der  $\alpha$ -Teilchen fliegt durch die Folie hindurch
  - Bei einigen wenigen  $\alpha$ -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

Abbildung: entnommen aus [11].

## Rutherford-Streuformel



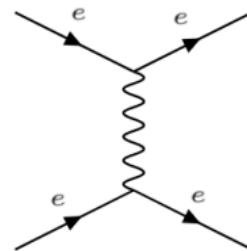
- Plot zeigt wie viele Teilchen  $\Delta D$  pro Streuwinkel  $\vartheta$  auftreten
  - Es lässt sich die Rutherford-Streuformel finden:
- $$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{16\pi\epsilon_0 E_{\text{kin}}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sin^4 \frac{\vartheta}{2}}$$
- $Z_1 \hat{=} \text{Anzahl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

Abbildung: entnommen aus [11].

## 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  $\rightarrow$  Modifikation der Rutherford-Streuformel
  - $$\left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{Mott}} = \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{Ruth}} \cdot \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \sin^2 \frac{\vartheta}{2} \right)$$



## Ladungsverteilung und Formfaktoren

- Bisher: Punktförmige Ladung
- Nun: Ladungsverteilung → (erneute) Modifikation des Wirkungsquerschnittes
  - $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}} \cdot |F(\vec{q})|^2$
  - $F(\vec{q}) = \int \exp\left(\frac{i}{\hbar} \vec{x} \vec{q}\right) \rho(\vec{x}) d\vec{x}$
  - $\vec{q} \hat{=} \text{Impulsbeitrag}, \rho \hat{=} \text{Ladungsverteilung}$

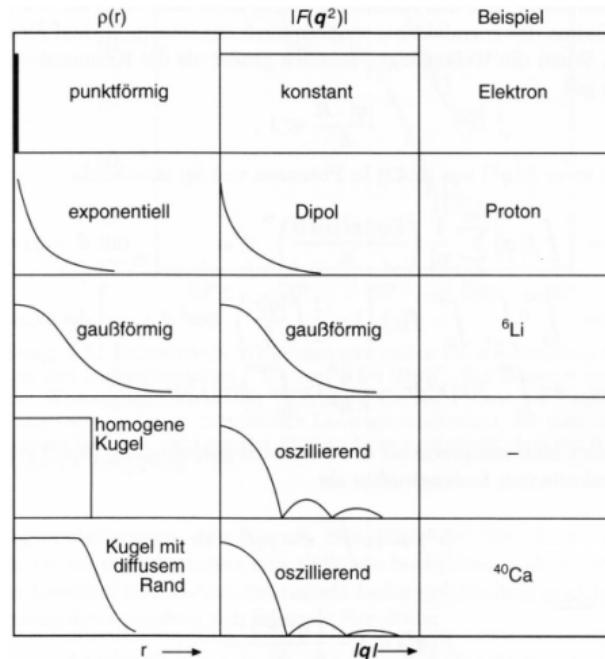


Abbildung: entnommen aus [8].

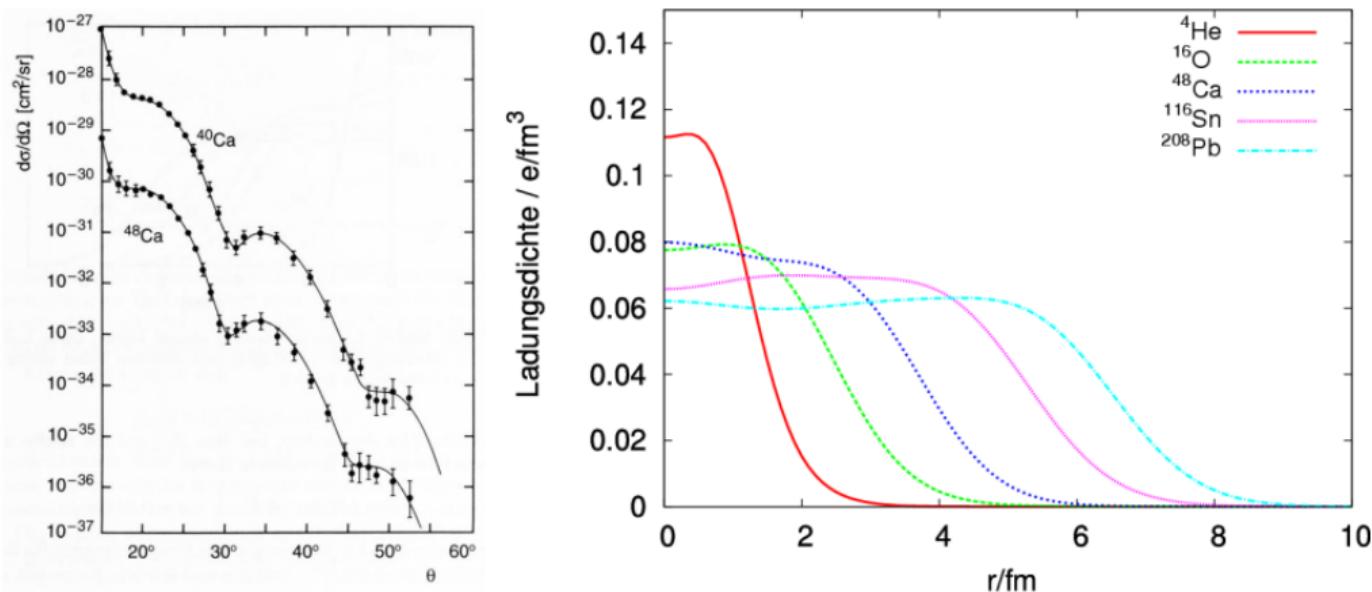


Abbildung: entnommen aus [8].

## 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:

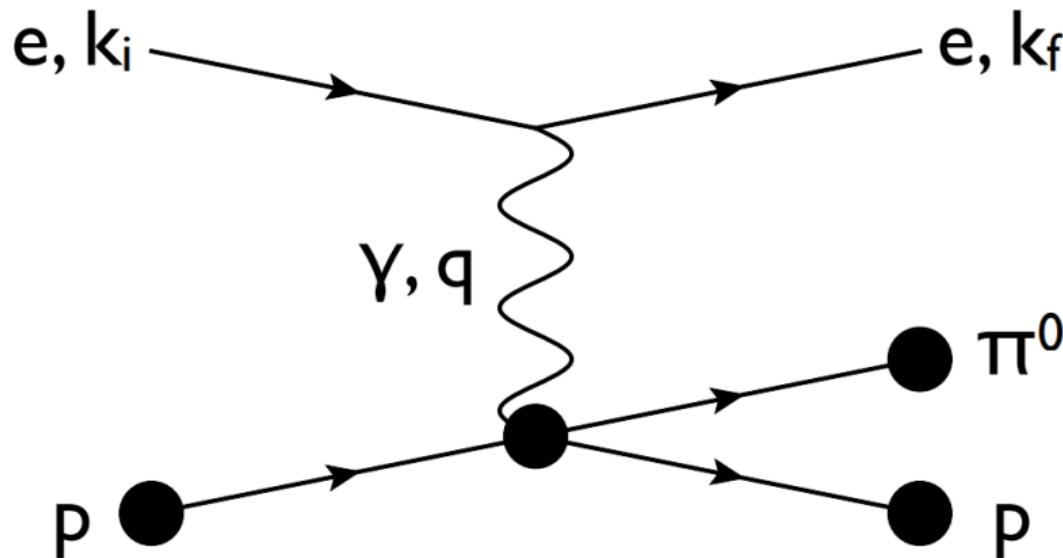


Abbildung: entnommen aus [6].

Struktur des Protons: Inelastische Streuung

## Tief-inelastische Streuung

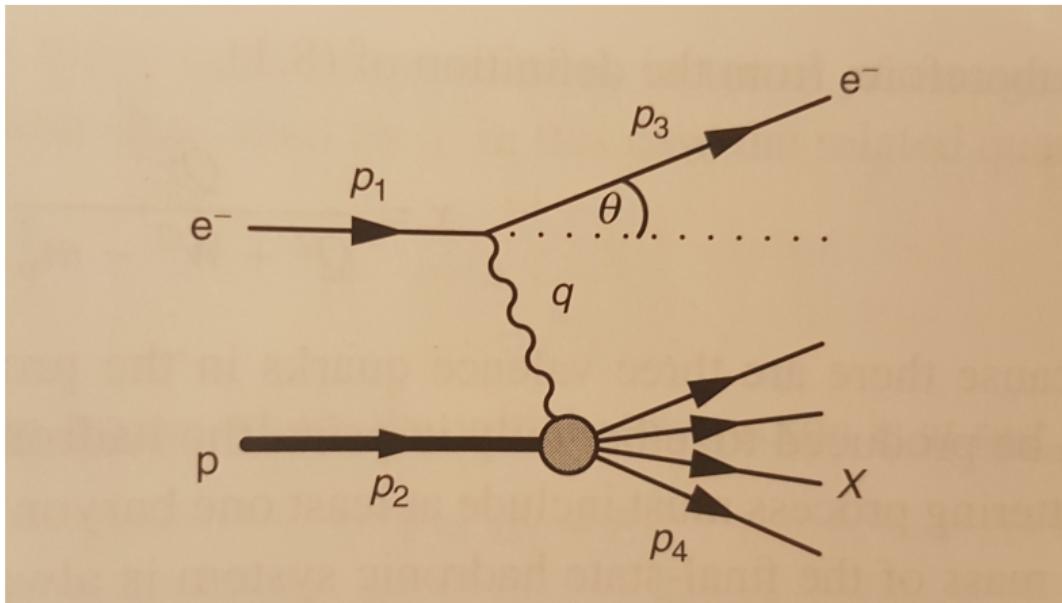


Abbildung: entnommen aus [7].

## Wirkungsquerschnitt

- Ansatz über Rosenbluth, da:
  - relativistisch gerechnet werden muss
  - Vierervektoren statt Vektoren
- Rosenbluth:
  - $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4E_1^2 \sin^4 \frac{\vartheta}{2}} \cdot \frac{E_3}{E_1} \left( \frac{G_E^2 + \tau G_M^2}{1+\tau} \cos^2 \frac{\vartheta}{2} + 2\tau G_M^2 \sin^2 \frac{\vartheta}{2} \right)$
  - $\tau = \frac{Q^2}{4m_p}$
  - $Q^2 = -(p_1 - p_3)^2$
  - $y = 1 - \frac{E_3}{E_1}$
  - $G_E \equiv F_1 - \frac{\kappa Q^2}{M^2} F_2$
  - $G_M \equiv F_1 \kappa F_2$

- Rosenbluth kann umgeschrieben und verallgemeinert werden zu:
  - $\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4} \left[ \left(1 - y - \frac{m_p^2 y^2}{Q^2}\right) \frac{F_2(x, Q^2)}{x} + \frac{1}{2} y^2 F_1(x, Q^2) \right]$
  - $F_i \hat{=} \text{Formfaktoren}$ 
    - $F_1 \hat{=} \text{Magnetischer Formfaktor}$
    - Spin = 0  $\rightarrow F_1 = 0$
    - $F_2 \hat{=} \text{Formfaktor mit magnetischen und elektrischen Beitrag}$
  - tief-inelastische Streuung  $\rightarrow Q^2 \gg m_p^2 y^2$
  - $x \hat{=} \text{Bjorken } x \equiv \frac{Q^2}{2p_2 q}$

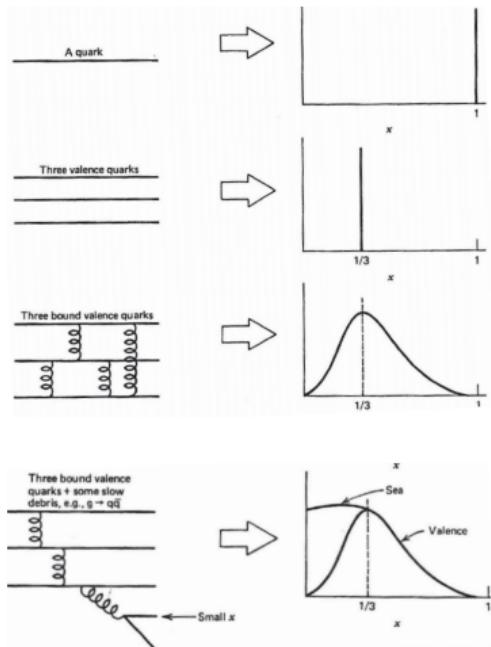
## Bjorken-Scaling

- 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  $\frac{1}{2} - \text{Teilchen}$



Abbildung: entnommen aus [2]

## Proton-PDF



- Bjorken- $x$  entspricht Impulsbruchteil eines Partons
- Betrachtung der Parton-Verteilungsfunktion
- Für verschiedene Impulsbruchteile lassen sich mit jeweils verschiedenen  $Q^2$  verschiedene Partondichten finden.
  - Impulsbruchteile auf  $0 \leq x \leq 1$  beschränkt
  - Energie ist dagegen nach oben offen.
  - Wird durch DGLAP-Gleichungen beschrieben

Abbildung: entnommen aus [6].

## Hera am DESY

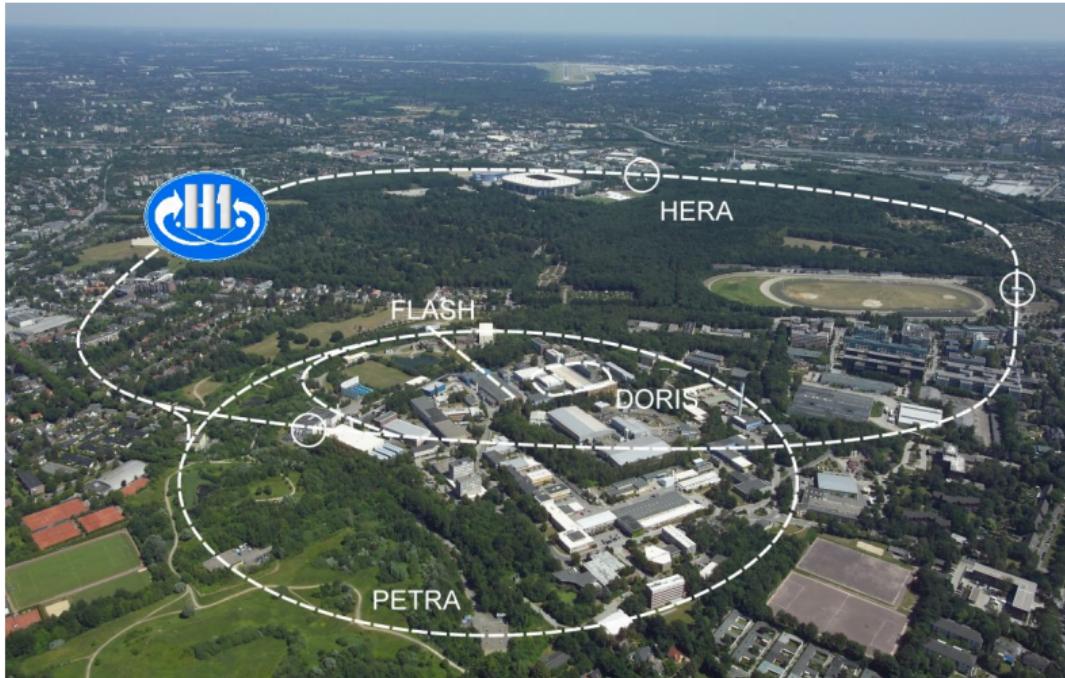


Abbildung: entnommen aus [4].  
Hera am DESY

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

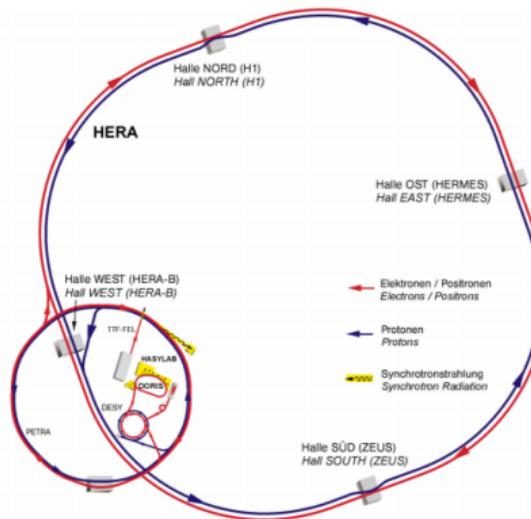


Abbildung: entnommen aus [9].

- Rot: Elektronen
- Blau: Protonen

## Der ZEUS-Detektor

Eckdaten:

- befindet sich in der Süd-Halle von HERA
- Maße:  $12\text{ m} \times 10\text{ m} \times 19\text{ m}$
- 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)

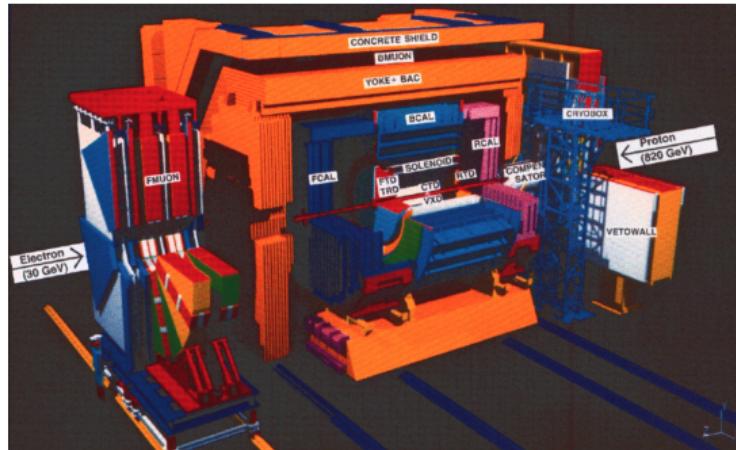


Abbildung: entnommen aus [5].



Abbildung: entnommen aus [14].

Hera am DESY: Der ZEUS-Detektor

## Der H1-Detektor

Eckdaten:

- befindet sich in der Nord-Halle von HERA
- Maße:  $12\text{ m} \times 10\text{ m} \times 15\text{ m}$
- 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

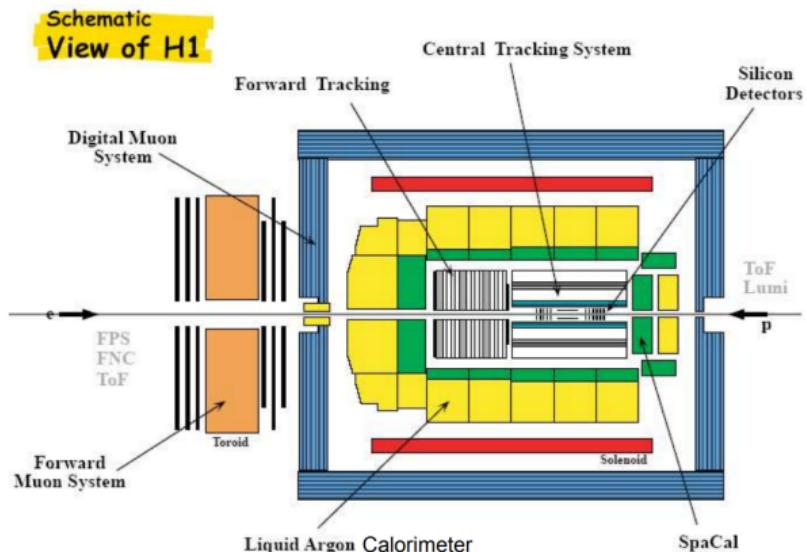


Abbildung: entnommen aus [4].

## Beispiel

$e^- p \rightarrow e^- p$

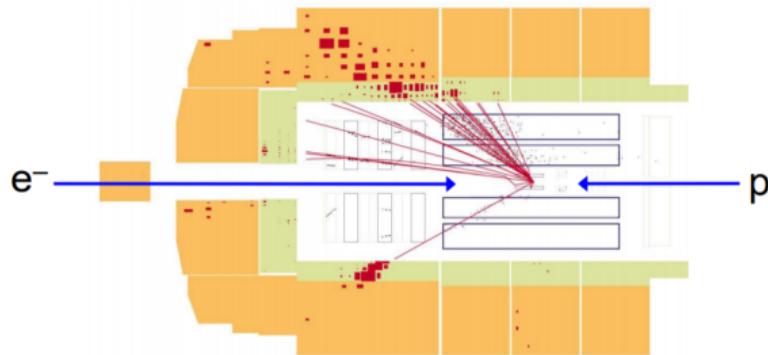


Abbildung: entnommen aus [10]



Abbildung: entnommen aus [12].

## 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  $F_2$

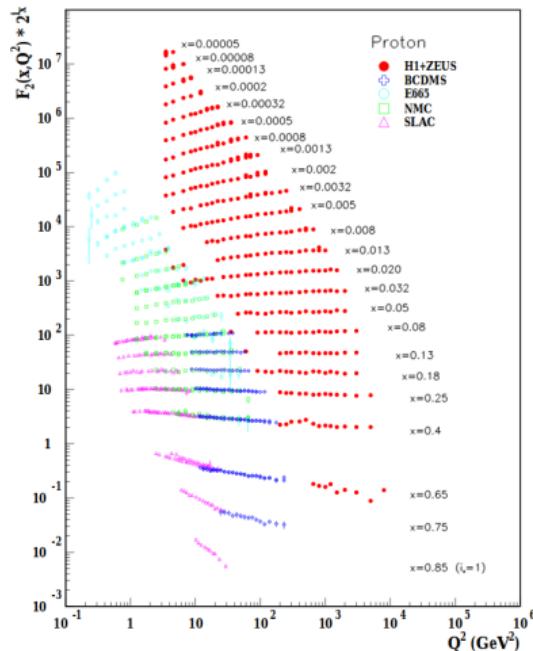


Abbildung: entnommen aus [1].

Ergebnisse

## Proton PDF

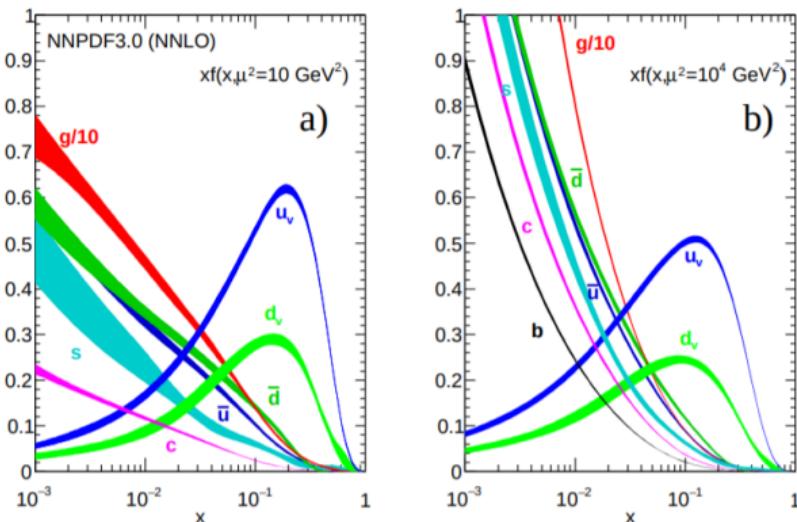


Abbildung: entnommen aus [1].

- Das Proton besteht nicht nur Valenzquarks, es sind auch See-Quarks und Gluonen zu finden
- Callan-Gross für Protonen:
  - $F_2(x) = 2xF_1(x) = x \left( \frac{4}{9}u(x) + \frac{1}{9}\bar{u}(x) + \frac{4}{9}d(x) + \frac{1}{9}\bar{d}(x) \right)$
- Es lässt sich beobachten:
  - $\int_0^1 u_v dx = 2$  und  $\int_0^1 d_v dx = 1$
  - $\int_0^1 x \left[ u(x) + \bar{u}(x) + d(x) + \dots \right] dx = 1 - \frac{p_g}{p}$
- Struktur doch nicht unabhängig von  $Q^2$ .
- Größeres  $Q^2 \rightarrow$  mehr Quarks mit kleinem  $x$

## Weitere Experimente und was sie abdecken

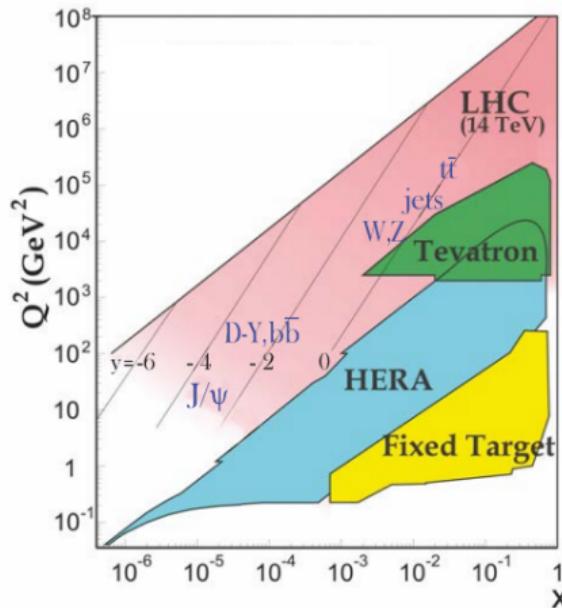


Abbildung: entnommen aus [1].

## 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

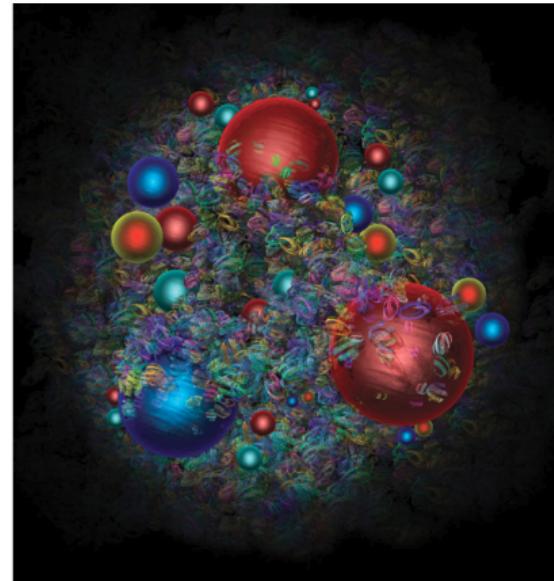


Abbildung: entnommen aus [3]

Vielen Dank für Eure Aufmerksamkeit!

## Quellen I

-  B. Foster et al. „Structure Functions“. In: Particle Data Group, Chin. Phys. C 40 (2016).
-  Vinod Kumar Bharadwaj. URL: [https://portal.slac.stanford.edu/sites/ard\\_public/ard\\_students/lcschool/PublishingImages/Forms/AllItems.aspx?SortField=Editor&SortDir=Asc&View=%7B25D42671-029C-4E7A-A514-0ACFF9A380DB%7D](https://portal.slac.stanford.edu/sites/ard_public/ard_students/lcschool/PublishingImages/Forms/AllItems.aspx?SortField=Editor&SortDir=Asc&View=%7B25D42671-029C-4E7A-A514-0ACFF9A380DB%7D) (besucht am 06.06.2019).
-  CERN COURIER. The proton laid bare. URL: <https://cerncourier.com/the-proton-laid-bare/> (besucht am 06.06.2019).
-  DESY. The H1 experiment at HERA. URL: <https://h1.desy.de/> (besucht am 06.06.2019).
-  DESY. The ZEUS Detector. URL: <https://www-zeus.desy.de/public/zeus.php3> (besucht am 06.06.2019).
-  Johannes Erdmann. Protonstruktur. URL: [https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/830891/mod\\_resource/content/1/chapter6\\_JE\\_ProtonStruktur.pdf](https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/830891/mod_resource/content/1/chapter6_JE_ProtonStruktur.pdf) (besucht am 06.06.2019).
-  Alan D. Martin Francis Halzen. Quark and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics. 1. Aufl. Wiley, 1984.

## Quellen II

-  Kevin Kröninger. Einführung in die Kern- und Elementarteilchenphysik. Vorlesung 2. URL: [https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/799742/mod\\_resource/content/1/Folien\\_2018.10.12.pdf](https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/799742/mod_resource/content/1/Folien_2018.10.12.pdf) (besucht am 06.06.2019).
-  PHYSICS LibreTexts. Main Experimental Facilities. URL:  
[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Particle\\_Physics/Book%3A\\_Nuclear\\_and\\_Particle\\_Physics\\_\(Walet\)/3%3A\\_\\_Experimental\\_Tools/3.3%3A\\_Main\\_Experimental\\_Facilities](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Particle_Physics/Book%3A_Nuclear_and_Particle_Physics_(Walet)/3%3A__Experimental_Tools/3.3%3A_Main_Experimental_Facilities) (besucht am 06.06.2019).
-  Katerina Lipka. Proton Structure Measurements at HERA. URL:  
[http://www.desy.de/~knegod/HGF/talks/katerina/Lipka\\_Seminar\\_Bonn.pdf](http://www.desy.de/~knegod/HGF/talks/katerina/Lipka_Seminar_Bonn.pdf) (besucht am 06.06.2019).
-  Leifi Physik. Rutherford-Experiment. URL:  
<https://www.leifiphysik.de/atomphysik/klassische-atommodelle/versuche/rutherford-experiment> (besucht am 06.06.2019).
-  Wikipedia. H1 (particle detector). URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/H1\\_\(particle\\_detector\)](https://en.wikipedia.org/wiki/H1_(particle_detector)) (besucht am 06.06.2019).
-  Wikipedia. Proton. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Proton> (besucht am 06.06.2019).

## Quellen III



Wikipedia. ZEUS (particle detector). URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/ZEUS\\_\(particle\\_detector\)](https://en.wikipedia.org/wiki/ZEUS_(particle_detector)) (besucht am 06.06.2019).