

11.1 Formfaktoren des Nukleons (1 Punkt)

Der Wirkungsquerschnitt der elastischen Streuung $e^- + p \rightarrow e^- + p$ wird durch die Rosenbluth-Formel beschrieben:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4E^2 \sin^4(\frac{\theta}{2})} \frac{E'}{E} \left(\frac{G_E^2(Q^2) + \tau G_M^2(Q^2)}{1 + \tau} \cos^2 \frac{\theta}{2} + 2\tau G_M^2(Q^2) \sin^2 \frac{\theta}{2} \right).$$

Hier sind E und E' die Energie des ein- und auslaufenden Elektrons; $\tau = Q^2/(4m_p^2 c^2)$, sowie $G_E(Q^2)$ und $G_M(Q^2)$ der elektrische und magnetische Formfaktor des Protons.

- a) Schreiben Sie die Rosenbluth-Formel als Funktion von $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}}$ auf, wobei der Mott-Wirkungsquerschnitt mit

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}} = \frac{\alpha^2 (\hbar c)^2}{4E^2 \sin^4(\frac{\theta}{2})} \frac{E'}{E} \cos^2 \frac{\theta}{2}$$

bezeichnet ist und interpretieren Sie Ihr Ergebnis.

- b) Das Verhältnis

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) / \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}}$$

ist linear in $\tan^2(\theta/2)$. Drücken Sie Steigung und Achsenabschnitt als Funktionen von $G_E(Q^2)$ und $G_M(Q^2)$ aus.

- c) Bestimmen Sie Werte für $G_E(0.292 \text{ GeV}^2)$ und $G_M(0.292 \text{ GeV}^2)$ aus Abb. 1
- d) Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit dem magnetischen Moment und der elektrischen Ladung Protons.

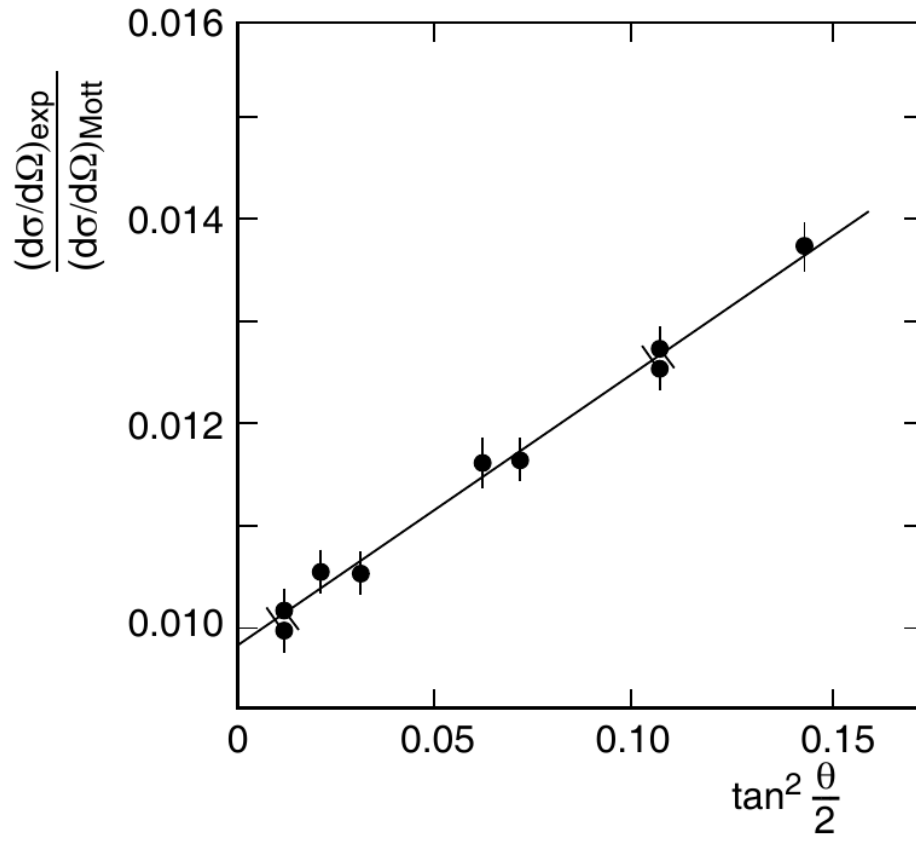


Abbildung 6.1. Quotient aus gemessenem und Mott-Wirkungsquerschnitt $\sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{Mott}}$ als Funktion von $\tan^2 \frac{\theta}{2}$ bei einem Viererimpulsübertrag von $Q^2 = 2.5 \text{ GeV}^2/c^2$ [Ta67]

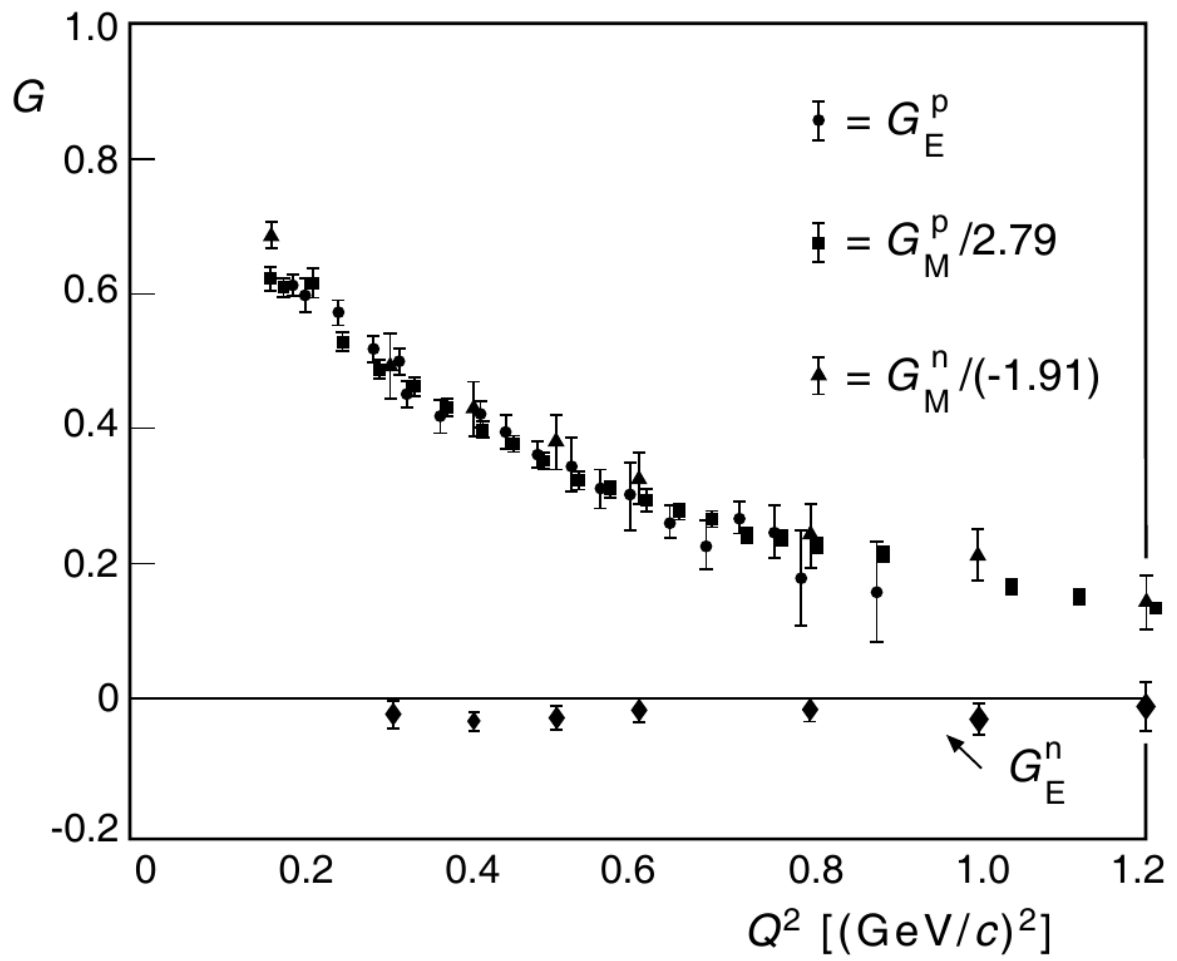


Abbildung 6.2. Elektrischer und magnetischer Formfaktor von Proton und Neutron, aufgetragen gegen Q^2 . Die Datenpunkte sind mit den angegebenen Faktoren skaliert und liegen dann übereinander, so dass das globale Dipolverhalten deutlich wird [Hu65].

11.2 Partonendichte im Nukleon (1 Punkt)

Nukleonen bestehen aus Quarks, Antiquarks und Gluonen. Die Impulsverteilung dieser Quarks, Antiquarks und Gluonen können in tief-inelastischen Streuprozessen gemessen werden. In tief-inelastischer Elektron-Proton Streuung kann z.B. die Strukturfunktion des Protons $F_2^{ep}(x)$ gemessen werden, die beschrieben wird durch

$$F_2^{ep}(x) = \left(\frac{2}{3}\right)^2 x[u(x) + \bar{u}(x)] + \left(\frac{1}{3}\right)^2 x[d(x) + \bar{d}(x)] + \left(\frac{1}{3}\right)^2 x[s(x) + \bar{s}(x)].$$

Die Funktion $u(x)$ bezeichnet die Anzahldichte, dass ein u-Quark im Nukleon gefunden wird mit Anteil des Nukleonimpulses im Bereich $[x, x+dx]$. Die Funktionen $d(x)$ und $s(x)$ bezeichnen die entsprechende Größe für die d-Quarks und s-Quarks. Die Beiträge der schweren c,b und t-Quarks werden hier vernachlässigt.

- a) In der oben aufgeführten Formel sind die Quarks nach ihrem Flavour klassifiziert.

Ordnen Sie die Formel nach Beiträgen der Valenzquarks $val(x)$ und der Seequarks $sea(x)$. Nehmen Sie an, dass die Form der Verteilungen nicht vom Quarkflavour abhängt, d.h. ein Valenzquark des Flavours u hat dieselbe Verteilung wie ein Valenzquark des Flavours d, also $val(x)$ 1 Wie lauten die Strukturfunktionen $F_2^{ep}(x)$ des Protons und $F_2^{en}(x)$ des Neutrons als Funktion von $val(x)$ und $sea(x)$?

Hinweis: Drücken sie $u(x)$, $d(x)$ und $s(x)$ durch die Valenzquarkdichte $val(x)$ und die Seequarkdichte $sea(x)$ aus und setzen diese in die Strukturfunktion ein.

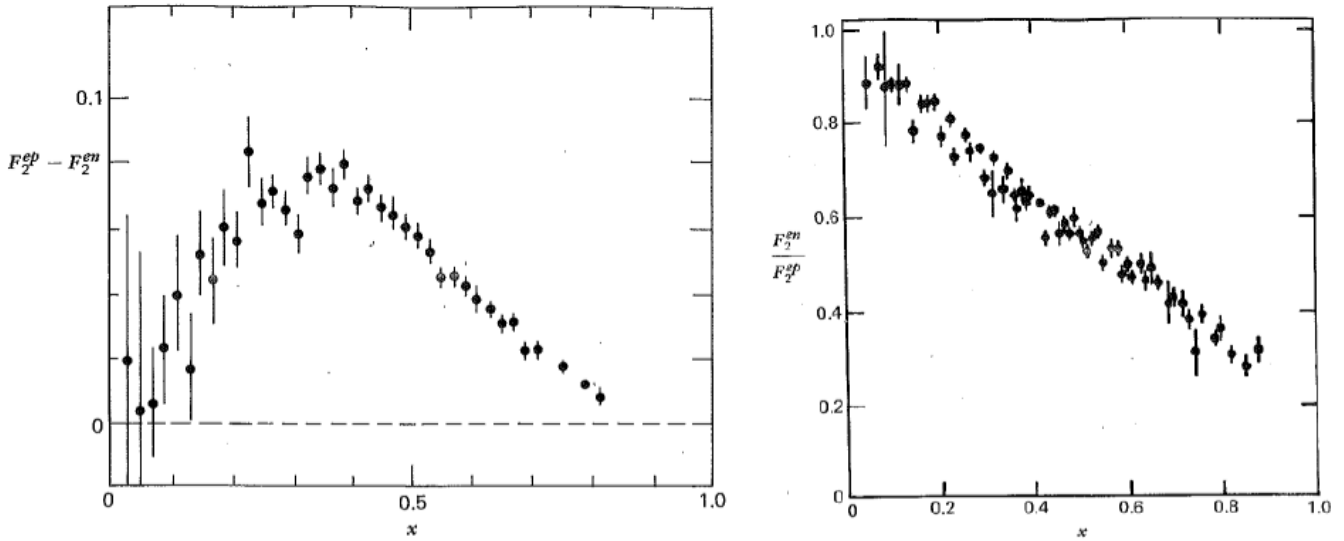


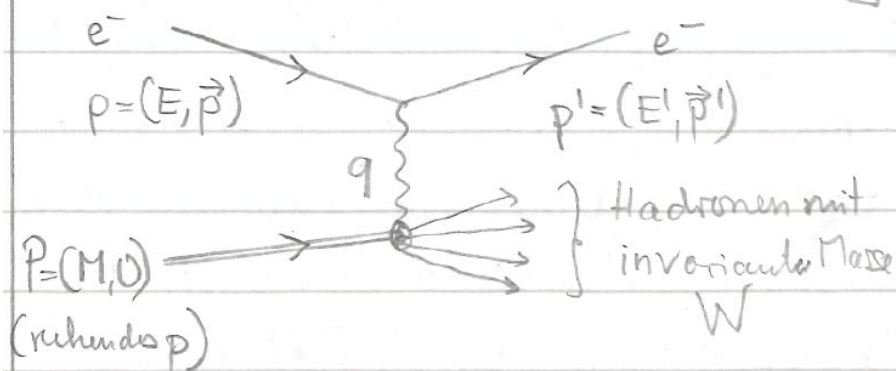
Abb. 2: Links die Differenz $F_2^{ep} - F_2^{en}$, rechts das Verhältnis F_2^{en}/F_2^{ep} .

- b) Das Bild links in Abb. 2 zeigt die gemessene Differenz $F_2^{ep}(x) - F_2^{en}(x)$. Bestimmen Sie die Valenzquarkverteilung $val(x)$ aus dieser Differenz. Zeichnen Sie die Funktionswerte $val(x)$ im Bereich $0.2 \leq x \leq 0.8$ in Schritten von 0.1.
- c) Das Bild rechts in Abb. 2 zeigt das gemessene Verhältnis $F_2^{en}(x)/F_2^{ep}(x)$. Dieses Verhältnis nähert sich dem Wert eins für $x \rightarrow 0$. Welche Folgerung kann man daraus ableiten?
- d) Gewisse Integrale der Quarkverteilungen haben eine einfache Interpretation. Solche Integrale und deren Werte sind als Summenregeln bekannt. Die Größe $\varepsilon_u = \int_0^1 xu(x)dx$, zum Beispiel, kennzeichnet den Anteil des Nukleonimpulses, der von den u-Quarks getragen wird.
- Was bedeuten die folgenden Integrale, und welche Werte haben sie für Proton und Neutron? Verwenden Sie dazu das Ergebnis aus Teilaufgabe a).

¹das ist eine Approximation für $x \ll 1$!

4.1 Kinematik inelastischer Streuung

Achtung: Herleitung und Formeln benutzen $c=1$



$$*) \quad \left. \begin{aligned} q &= (E - E', \vec{p} - \vec{p}') \\ P &= (M, 0) \end{aligned} \right\} P_q = Mv$$

- Energieübertrag: $\nu = E - E'$
- Inv. Masse: $W^2 = (P + q)^2 = M^2 + 2Pq + q^2$

• mit $2Pq = 2M\nu$ (*)

folgt: $q^2 = W^2 - M^2 - 2M\nu =: -Q^2$
 (**): $Q^2 < 0$

(i) elastische Streuung: $W = M$ und aus Q(**) folgt $\frac{Q^2}{2M\nu} = 1$

(ii) inelastische Streuung: $W > M \rightarrow 2M\nu - Q^2 > 0$ bzw.

$$x := \frac{Q^2}{2M\nu} \quad \text{mit } 0 < x < 1 \quad (\leftarrow 1 = \text{elastisch})$$

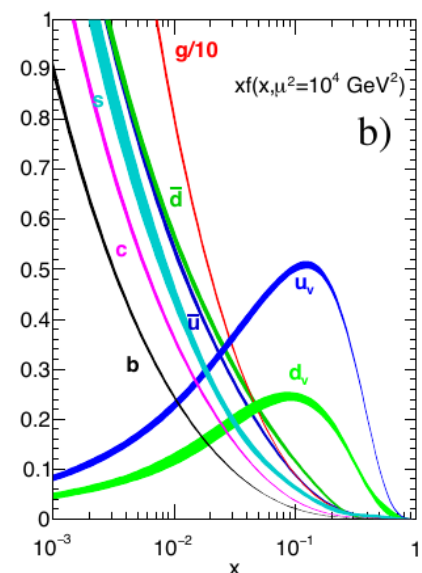
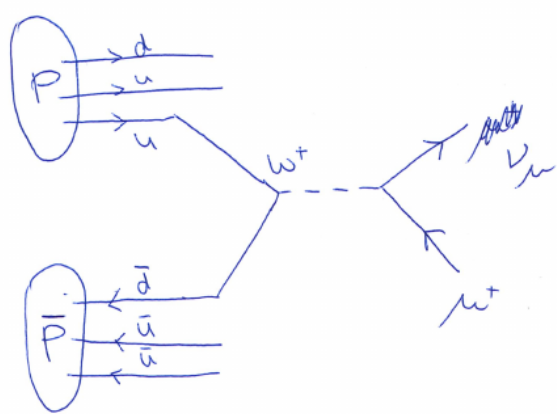
Die dimensionslose Variable x nennt man Scaling-Variable ($\rightarrow$ wird später klar) und ist ein Maß für die „Elastizität“ der Streuprozesse.

Im Falle inelastischer Streuung sind zur Festlegung der Streukinematik 2 Variablen notwendig, z.B.: (θ, E') , (Q^2, ν) , (Q^2, x)

11.3 Produktion von W- Bosonen in Proton- (Anti-) Proton-Kollisionen (1 Punkt)

Die W-Bosonen wurden im Glashow-Weinberg-Salam-Modell der vereinheitlichten elektroschwachen Wechselwirkung mit einer Masse von etwa 80 GeV vorhergesagt und 1983 von den Experimenten UA1 und UA2 am $p\bar{p}$ Speicherring $Sp\bar{p}S$ am CERN bei einer Schwerpunktennergie von 540 GeV entdeckt. Die Erzeugung und Beschleunigung von Antiprotonen war dafür entscheidend. Protonen und Antiprotonen hatten dabei eine Strahlenergie von jeweils 270 GeV.

Die untenstehende Abbildung links zeigt den dominanten Feynman Graphen für die Produktion von W-Bosonen und den anschließenden Zerfall in ein Myon und ein Myon-Neutrino: $u\bar{d} \rightarrow W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$.



- a) Berechnen Sie die Impulsanteile der einlaufenden Quarks unter der Annahme, dass die schweren W-Bosonen in Ruhe produziert werden.
- b) Betrachten Sie die Partondichte-Verteilungen von Protonen in Abb. 18.5b aus <http://pdg.lbl.gov/2018/reviews/rpp2018-rev-structure-functions.pdf>, hier rechts in der Abbildung wiedergegeben, und diskutieren Sie die Vorzüge von $p\bar{p}$ - gegenüber pp -Kollisionen.
- c) Berechnen Sie die Impulsanteile auch für den LHC, d.h. für pp -Kollisionen bei $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$.

11.4 Farbladung (1 Punkt)

Ursache der starken Wechselwirkung ist die Farbladung, welche von Quarks und Gluonen getragen wird. Zusätzlich stellt die Farbladung einen weiteren inneren Freiheitsgrad dar, der experimentell beobachtet wird.

- a) Skizzieren Sie den Feynman-Graphen für den “starken Zerfall” $\Delta^+ \rightarrow p\pi^0$. Betrachten Sie für eine gültige Farbkombination der beteiligten Quarks den Fluss der Farbladungen.
- b) Die große Masse des τ -Leptons erlaubt den schwachen Zerfall in hadronische Endzustände. Zeichnen Sie einen Feynman Graphen für den Zerfall des τ^+ -Leptons in leichte Quarks (u, d) bzw. nach $\mu^+ + \nu_\mu$. Schätzen Sie das Verhältnis der Zerfallsbreiten $R_{ud} = \Gamma_{ud}/\Gamma_{\mu\nu}$, ab. Vernachlässigen Sie dabei Unterschiede im Phasenraum.

