

# Kern- und Teilchenphysik

Johannes Blümer

**SS2012**

Vorlesung-Website

V13, 5.6.2012

KIT-Centrum Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik KCETA



## ■ Von Nukleonen zu den Quarks

### ■ Kernphysik *recap*

- elastische, inelastische Streuung

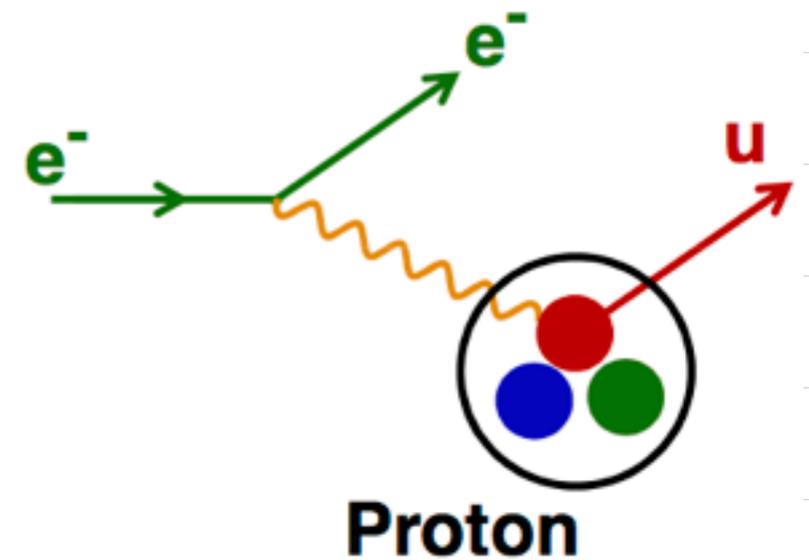
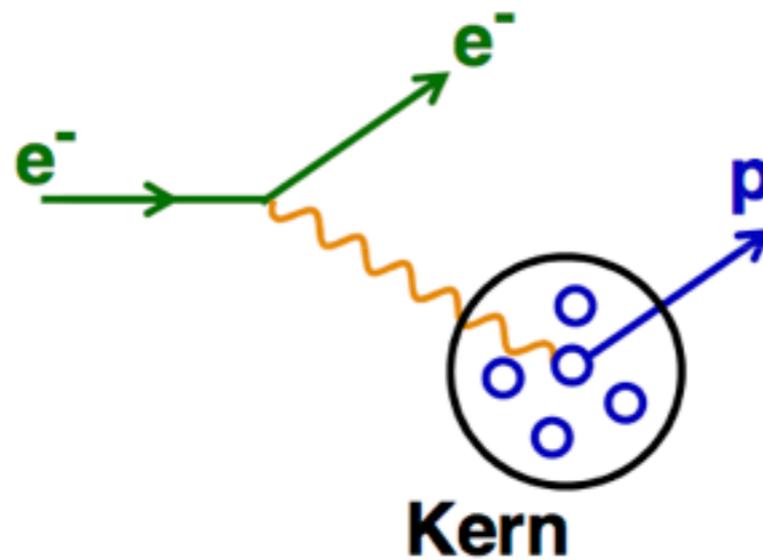
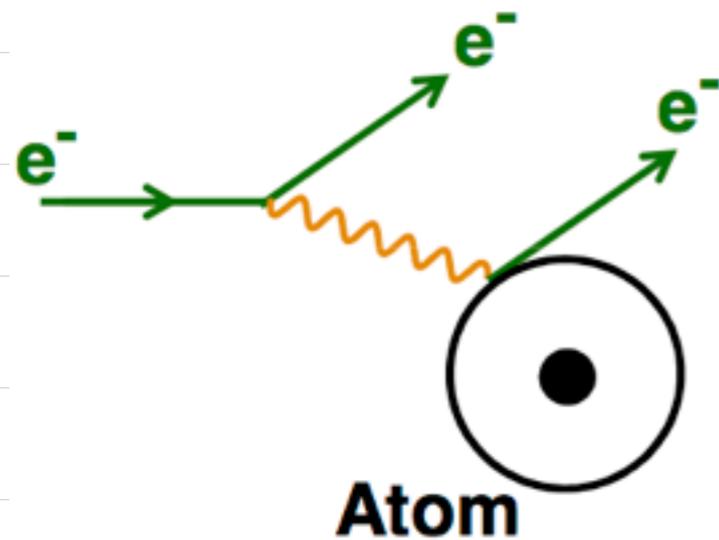
### ■ Elastische Streuung am Nukleon

- Formfaktoren des Nukleons
- Quasielastische Streuung
- Ladungsradius von  $\pi$ , K

### ■ Tiefinelastische Streuung

- Nukleonanregungen
- Strukturfunktionen
- Partonen
- Quarks

# Streuexperimente



höhere Energien  $\rightarrow$  kleinere Strukturen werden aufgelöst

eV... keV

MeV

GeV.. (?)

# Elastische und inelastische Streuung

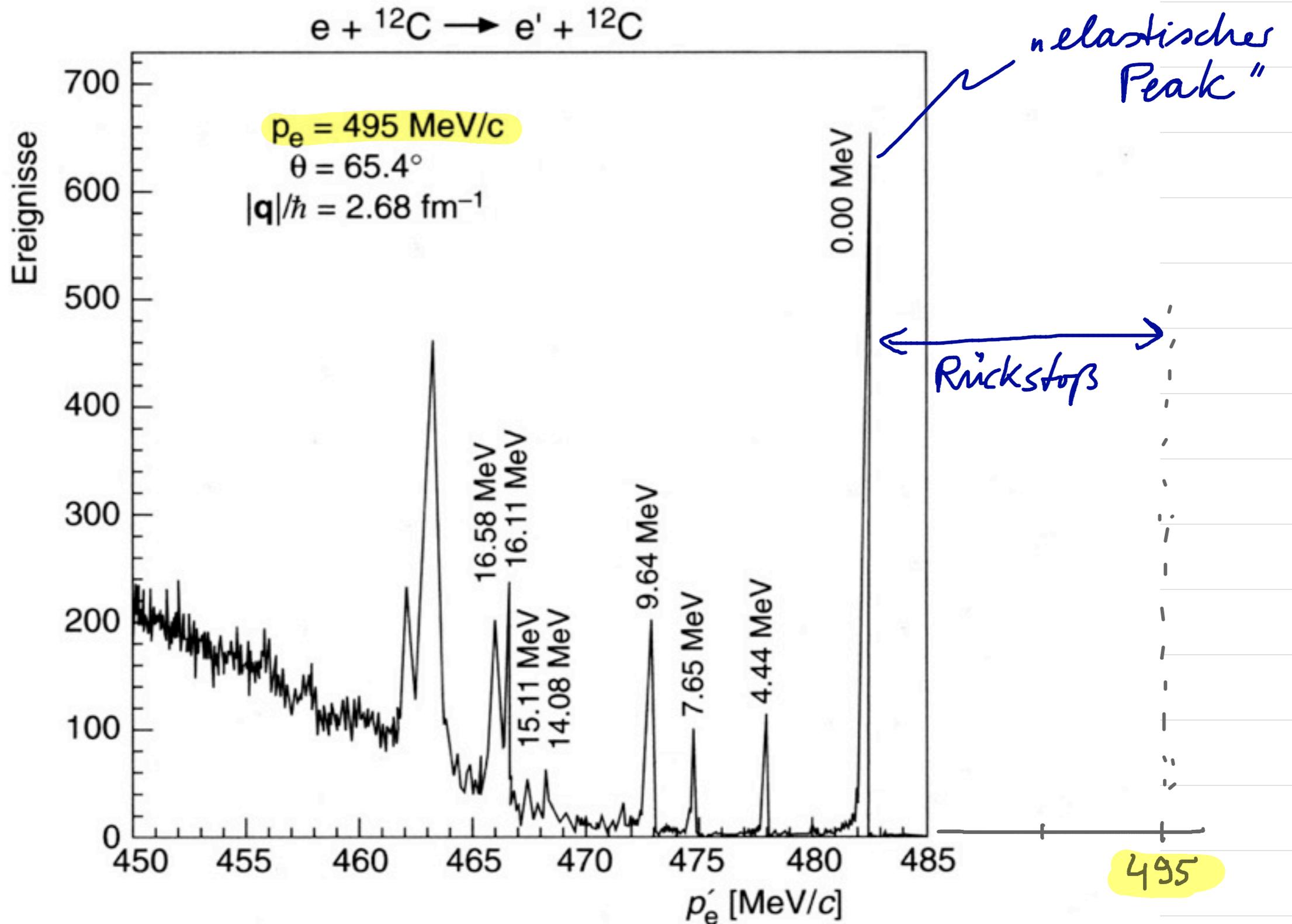


Abb. 5.9. Spektrum aus der Streuung von Elektronen an  ${}^{12}\text{C}$ . Die scharfen Maxima

# Formfaktoren des Nukleons (ep-Streuung)

Erinnerung:  $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}}^* \cdot \frac{E'}{E}$  mit Rückstoß

Energieverlust des Elektrons! Verwende 4-Impulsübertrag

$$q^2 = (p - p')^2 = 2m_e^2 c^2 - 2EE'/c^2 + 2\vec{p}\vec{p}' \cos\theta \approx \frac{-4EE'}{c^2} \sin^2 \frac{\theta}{2} ; Q^2 = -q^2$$

$m_e$  vernachlässigbar gegen  $E$

Berücksichtige zusätzlich zu den Ladungen von  $e, p$  auch die WW zwischen  $e$ -Strom und magn. Moment des Nukleons

Dirac-Spin  $\frac{1}{2}$ -Teilchen:  $\mu = g \frac{e}{2M} \cdot \frac{\hbar}{2}$   
 $g = 2$

magn. WW flappt N-Spin um  $\rightarrow \theta = 0^\circ$  unterdrückt,  $\theta = 180^\circ$  bevorzugt, zusätzl. Term  $\sin^2 \frac{\theta}{2} \rightarrow = \cos^2 \frac{\theta}{2} \cdot \tan^2 \frac{\theta}{2}$

$\hookrightarrow$  schon in  $d\sigma/d\Omega$  enthalten, ausklammern

$$\curvearrowleft \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{Punkt Spin } 1/2} = \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{Mott}} \cdot \left( 1 + 2\tau \tan^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\text{mag. WW} \propto \mu \propto \frac{1}{M}$$

$\propto$  B-Feld am Ort der Streuung

$L \propto$  Ablenkung  $\propto Q$

} in WW quadratisch, also  $\frac{Q^2}{M^2}$

$$L \tau = \frac{Q^2}{4M^2 c^2}$$

$g_e = g_\mu = 2$  mit q.m. verstandeneren Abweichungen ("g-2")

$g_p, g_n$  ergeben sich aus der Substruktur!  $\mu_p = \frac{g_p}{2} \mu_N = +2.79 \mu_N$

$$\mu_n = \frac{g_n}{2} \mu_N = -1.91 \mu_N$$

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2M_p} = 3.1 \times 10^{-14} \text{ MeV/T}$$

Kernmagneton

Beschreibe Streuung durch Formfaktoren : je 1 für el., magn. WW

Rosenbluth-Gleichung: 
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mohr}} \cdot \left[ \frac{G_E^2 + \tau G_M^2}{1 + \tau} + 2\tau G_M^2 \cdot \tan^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

$G_{EM} = G_{EM}(Q^2)$  ! sind die

elektrischen und magnetischen Formfaktoren

↳ räumliche Verteilung von Ladung u. magn. Moment für  $Q^2 \rightarrow 0$ :

↳ el. Ladung/e                      ↳  $\mu/\mu_N$

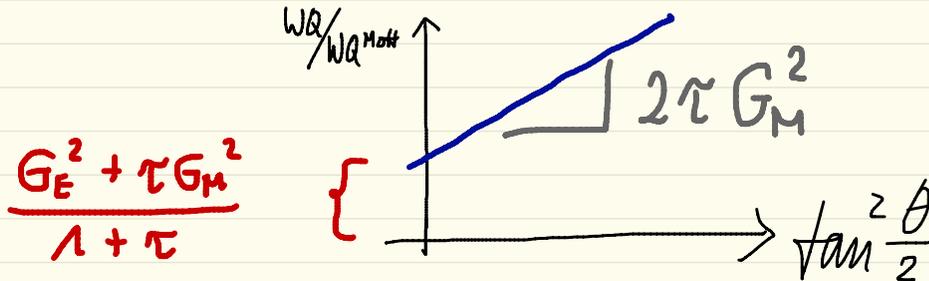
$$\left\{ \begin{array}{ll} G_E^p = 1 & G_E^n = 0 \\ G_M^p = 2.79 & G_M^n = -1.91 \end{array} \right.$$

Messung:

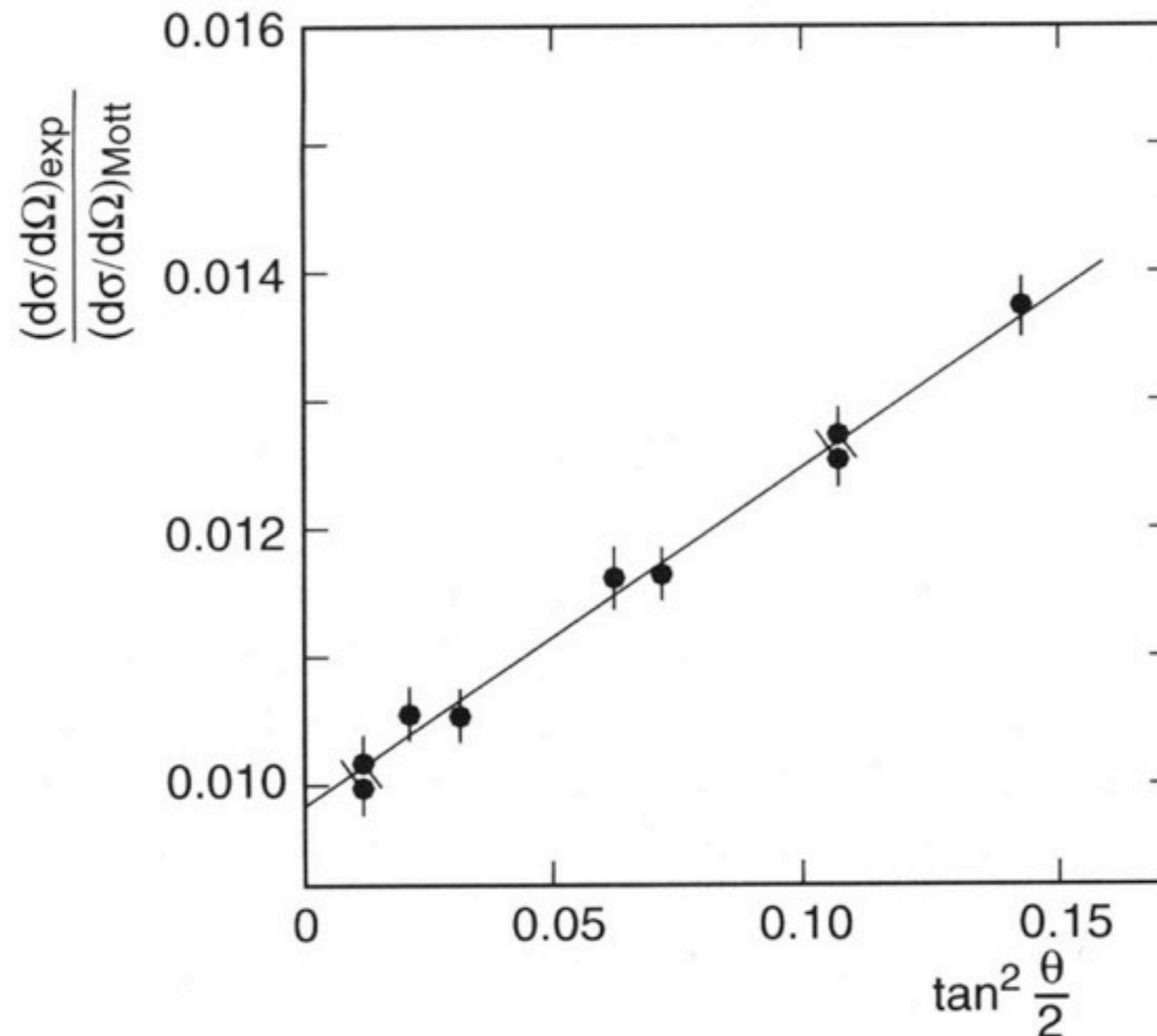
WQ für feste  $Q^2$  bei versch.  $\theta$  messen

WQ<sup>exp</sup> / WQ<sup>Mohr</sup> gegen  $\tan^2 \frac{\theta}{2}$  auftragen

Rosenbluth-Diagramm

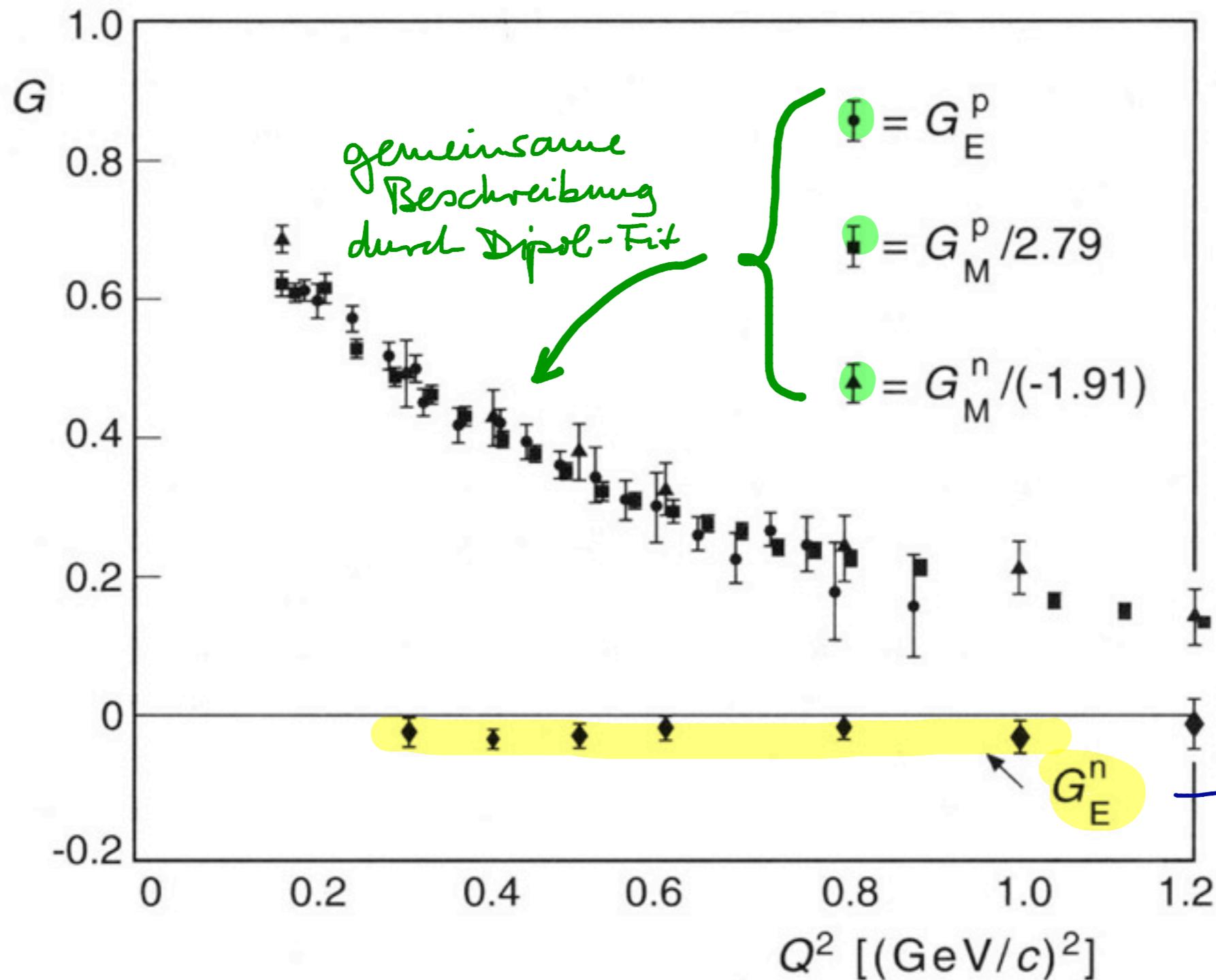


# Rosenbluth-Diagramm



**Abb. 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]

# Formfaktoren von p, n



$$G_E^p = \frac{G_M^p}{2.79}$$

$$= \frac{G_M^n}{-1.91}$$

$$= G^{\text{Dipol}}$$

mit

$$G^{\text{Dipol}}(Q^2) = \left(1 + \frac{Q^2}{0.71 (\text{GeV}/c)^2}\right)^{-2}$$

„klein“, n nach aussen neutral ✓

**Abb. 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].

Erinnerung „FF = FT (Ladungsverteilung)“

gilt noch für kleine  $Q^2$ , weil dann 4- und 3-Impulsüberträge gleich

↳ Dipol-FF → exp. abfallende Ladungsverteilung:

$$\rho(r) = \rho(0) \cdot e^{-ar} \quad \text{mit } a = 4.27 \text{ fm}^{-1}$$

Nukleonen sind ausgedehnte diffuse Objekte!

Die (mittl. quadrv.) Radien für Ladung im p, magn. Mom. in p, n sind ~ gleich groß!

(aus Dipolfit für  $Q^2 \rightarrow 0$  (Steigung von  $G_{EM}|_{Q^2=0}$ ):

$$\langle r^2 \rangle_{Di.} = -6\hbar^2 \frac{dG^{Di.}}{dQ^2} \Big|_{Q^2=0} = \frac{12}{a^2} = 0.66 \text{ fm}^2 \rightarrow \sqrt{\langle r^2 \rangle_{Di.}} = 0.81 \text{ fm}$$

mod. Wert 0.862 fm  
für  $\sqrt{\langle r^2 \rangle_p}$

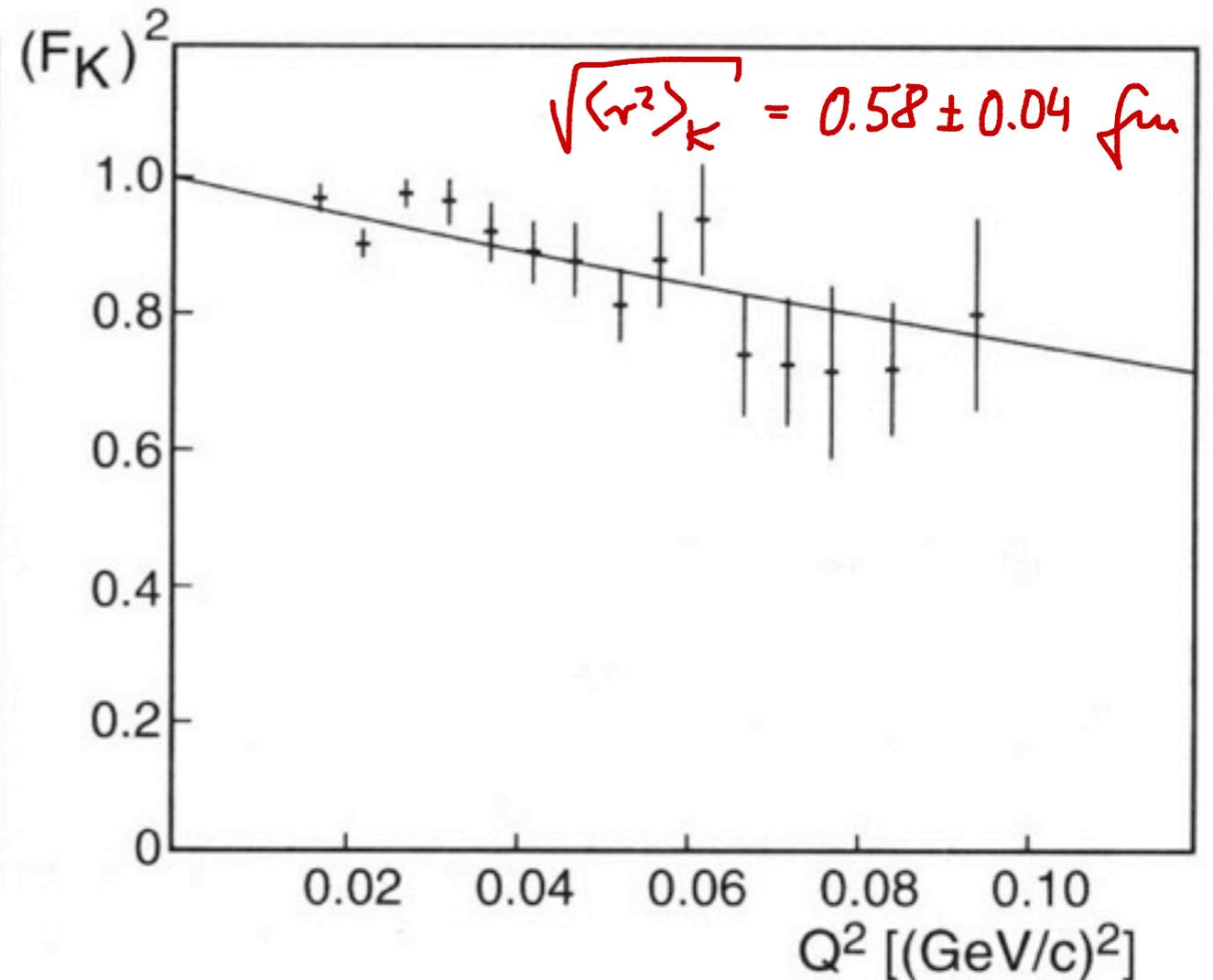
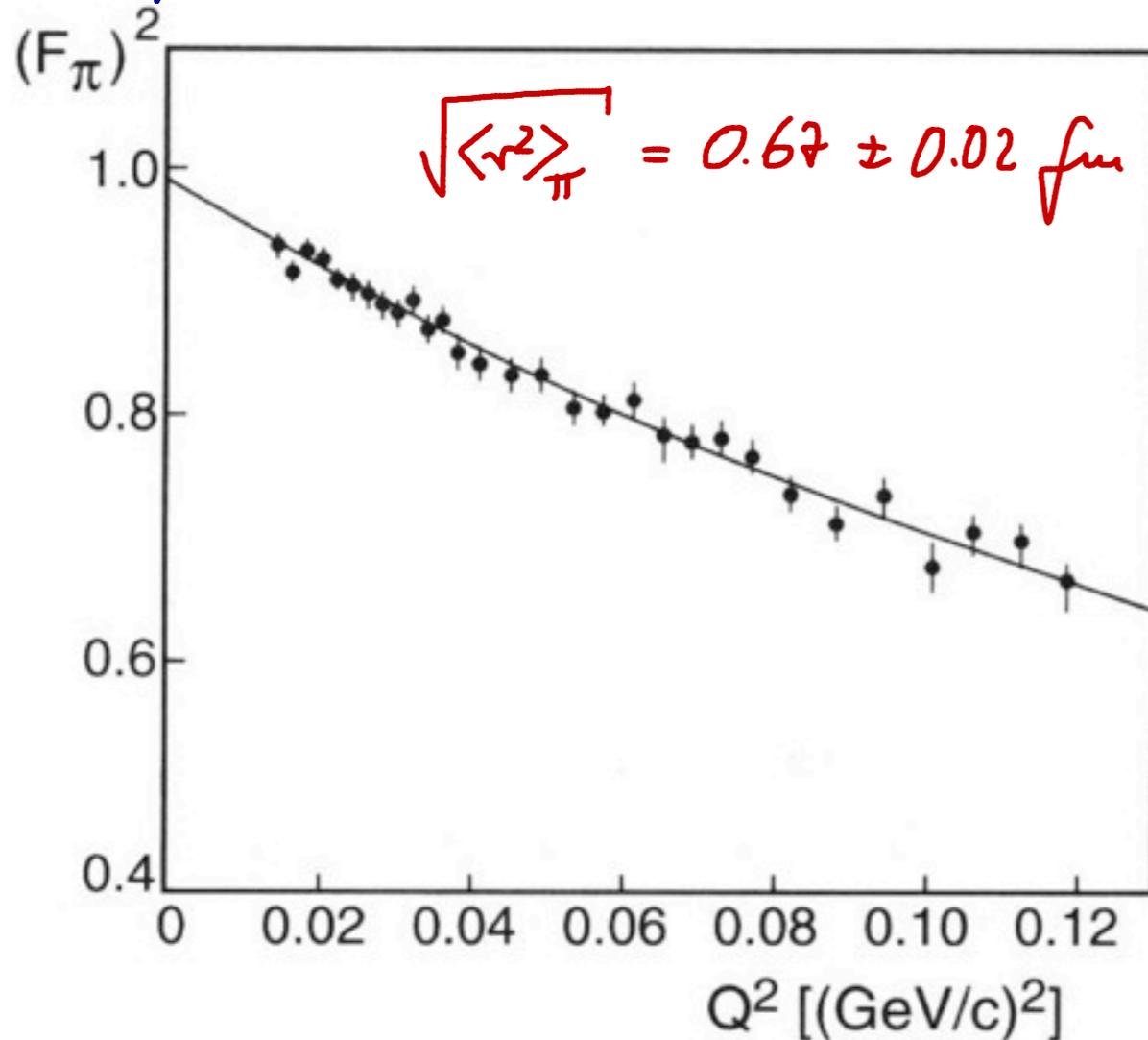
Neutronen: n e-Strahlung verwenden,  $\langle r^2 \rangle_n \approx -0.113 \pm 0.005 \text{ fm}^2$

# Ladungsradius von $\pi$ und K (Einschub)

Spin 0

$\pi, K$ -Strahlen an Hüllen- $e$  von Wasserstoff-Target streuen

findet „Monopol-FF“  $G_E(Q^2) = (1 + Q^2/a^2\hbar^2)^{-1}$  mit  $a^2 = \frac{6}{\langle r^2 \rangle}$



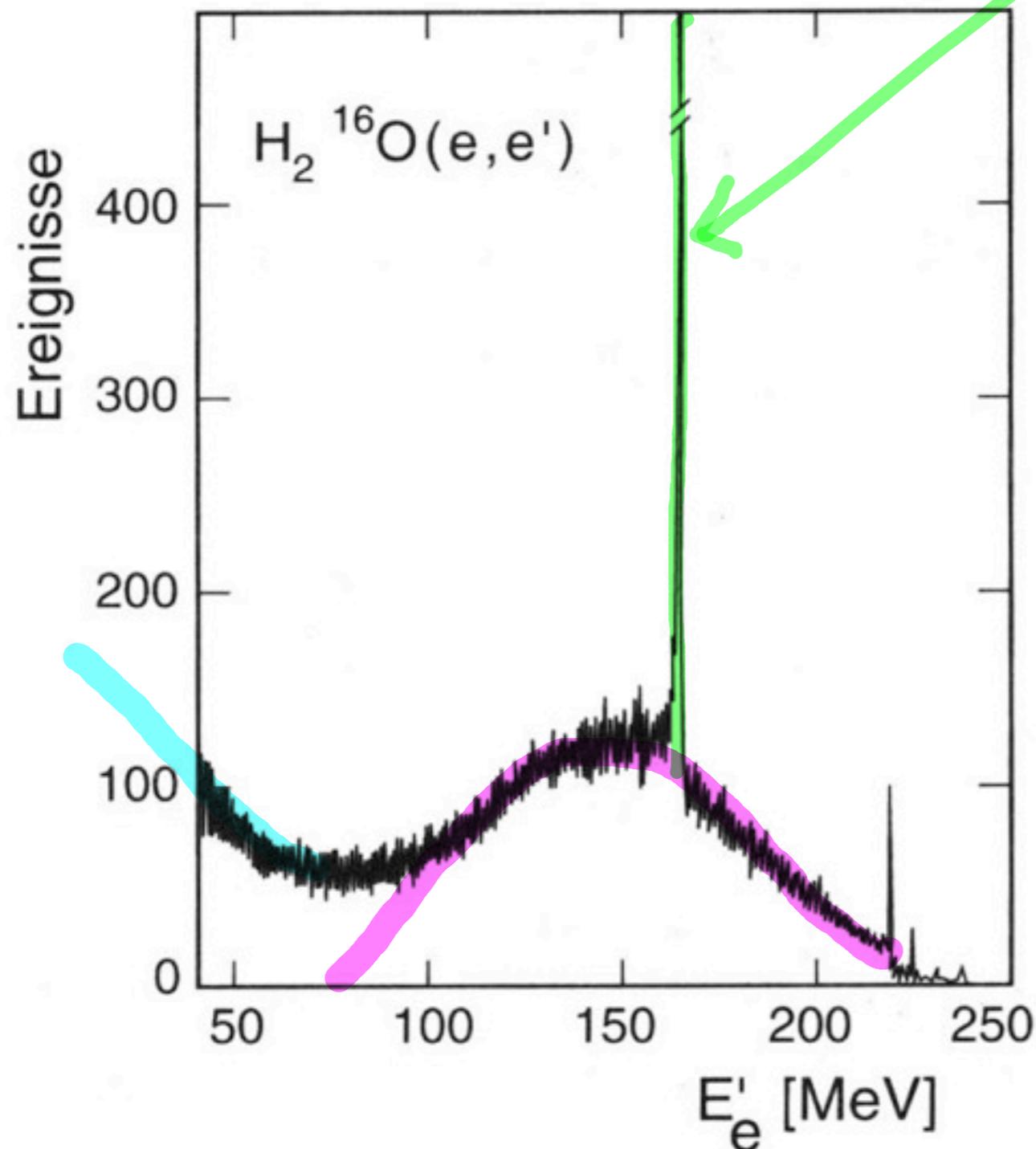
**Abb. 6.4.** Pion- und Kaon-Formfaktor als Funktion von  $Q^2$  (nach [Am84] und [Am86]). Die durchgezogenen Linien entsprechen einem Monopolformfaktor  $(1 + Q^2/a^2\hbar^2)^{-1}$ .

# Quasielastische Streuung

elastisch:

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{Mc^2} (1 - \cos \theta)}$$

nur 1 Target ...



**Abb. 6.3.** Energiespektrum von Elektronen, die an einem **H<sub>2</sub>O-Target** gestreut wurden. Die Daten wurden am Linearbeschleuniger MAMI-A in Mainz bei 246 MeV Strahlenergie unter einem Streuwinkel von 148.5° aufgenommen. (Dieses Bild wurde uns freundlicherweise von J. Friedrich (Mainz) überlassen.)

# ep-Streuung: Nukleonresonanzen

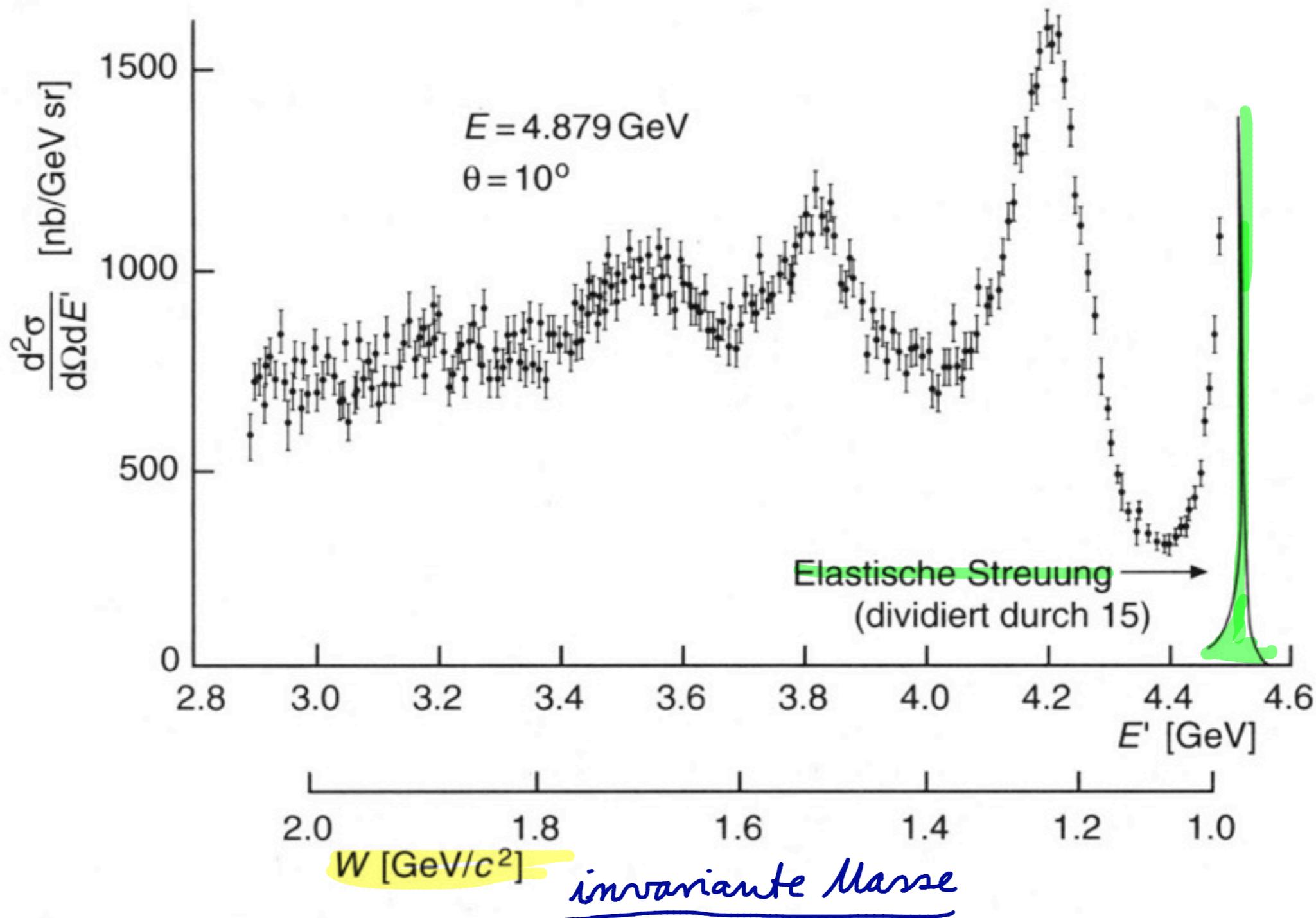
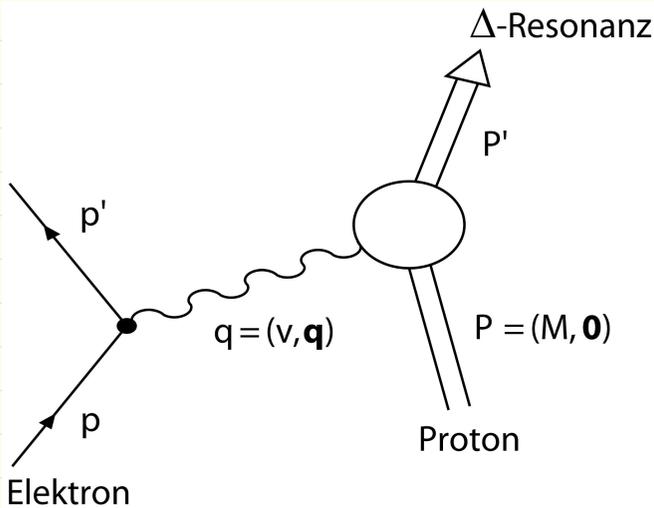


Abb. 7.1. Spektrum der gestreuten Elektronen bei Elektron-Proton-Streuung, aufgenommen bei einer Elektronenenergie  $E = 4.9$  GeV unter einem Streuwinkel  $\theta = 10^\circ$  (nach [Ba68])

# Invariante Masse, Nukleon-Resonanzen



Invariante Masse:

$$W^2 c^2 = P'^2 = (P + q)^2$$

$$= M^2 c^2 + 2Pq + q^2$$

$$= M^2 c^2 + 2Mv - Q^2$$

mit Lorentz-invar. "Energieübertrag"

$$v = \frac{Pq}{M}$$

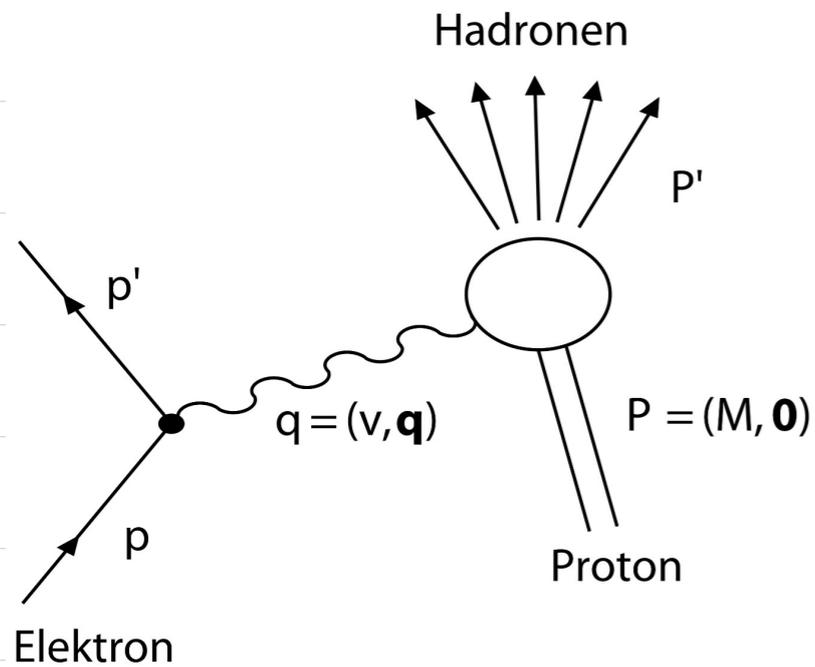
Labv:  $P = (Mc, \vec{0})$ ,  $q = ((E-E')/c, \vec{q})$

↳  $v = E - E'$  Energie, die das virtuelle Photon auf das Proton überträgt

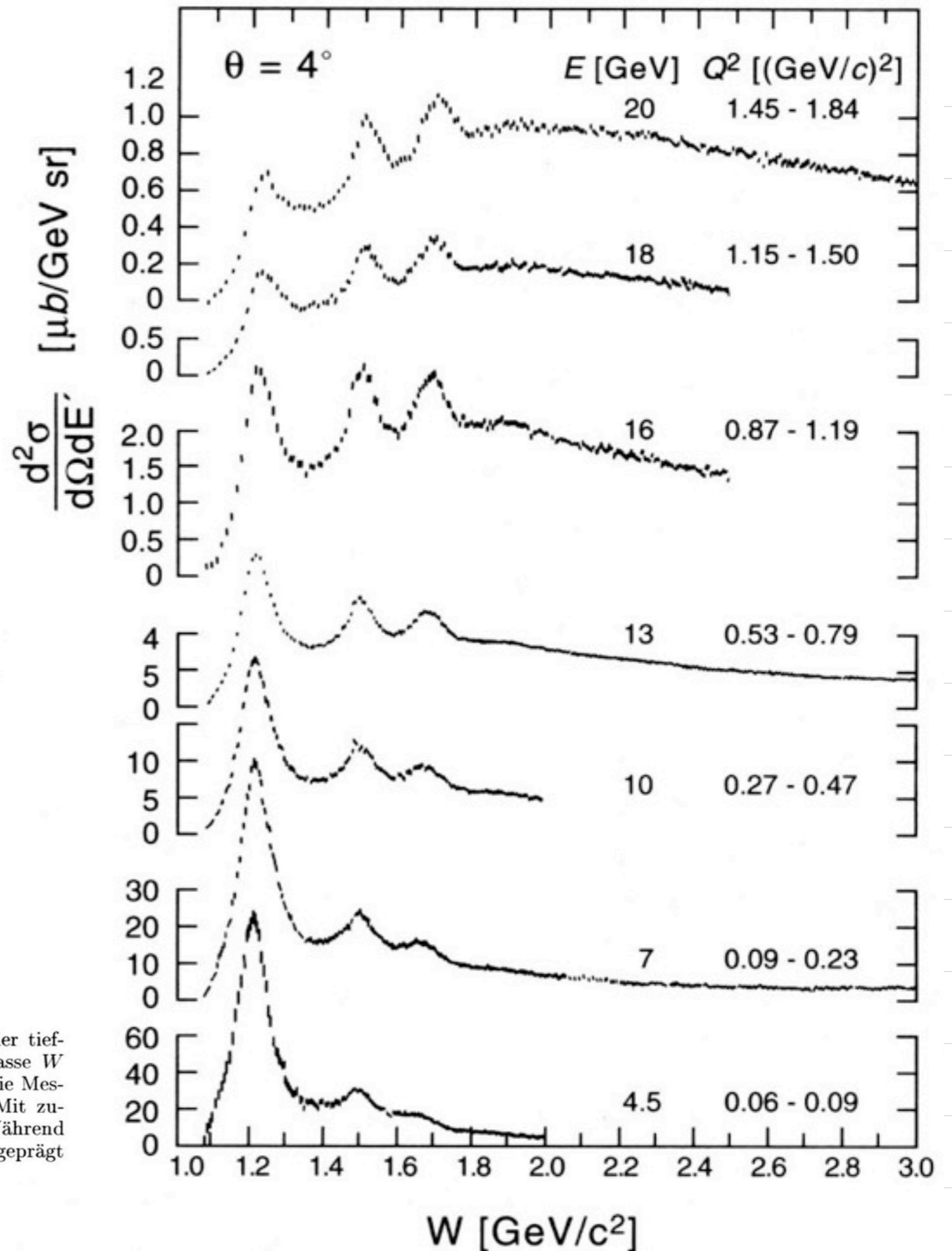
Breite des " $\Delta(1232)$ " ist  
ca 120 MeV  $\hookrightarrow \tau = \frac{\hbar}{\Gamma} = \frac{66 \cdot 10^{-22} \text{ MeVs}}{120 \text{ MeV}}$   
 $= 55 \cdot 10^{-24} \text{ s}$   
typ. st. WW

Zerfälle:  $\Delta^+ \rightarrow p\pi^0$  oder  $n\pi^+$

# ep-Streuung: Anregungsspektren

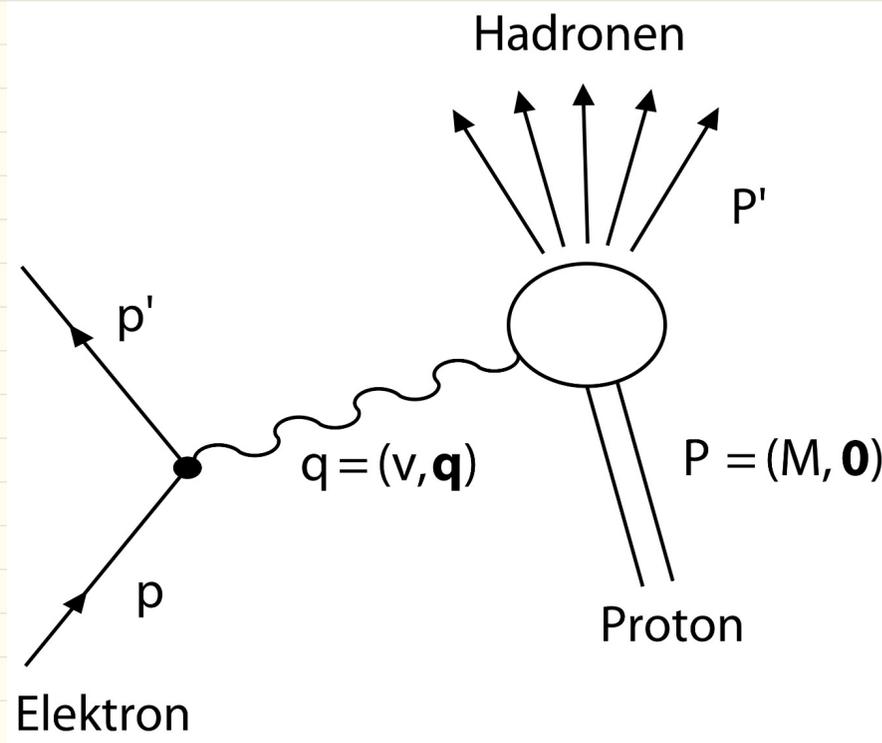


**Abb. 7.2.** Elektron-Proton-Streuung: gemessene Anregungsspektren in der tiefinelastischen Elektron-Nukleon-Streuung als Funktion der invarianten Masse  $W$  [St75]. Man beachte die unterschiedlichen Skalen an der Ordinatenachse. Die Messungen wurden bei einem festen Streuwinkel von  $\theta = 4^\circ$  durchgeführt. Mit zunehmender Einfallenergie  $E$  wächst der mittlere  $Q^2$ -Bereich der Daten. Während insbesondere die erste Resonanz ( $W = 1.232 \text{ GeV}/c^2$ ) immer weniger ausgeprägt wird, nimmt das Kontinuum ( $W \gtrsim 2.5 \text{ GeV}/c^2$ ) nur geringfügig ab.



# Strukturfunktionen

"inelastische Verallgemeinerung von Formfaktoren"



$W_1, W_2$

elastisch:  $\theta$  legt  $E'$  fest  
 $W = M$   
 $2M\nu - Q^2 = 0$

inelastisch:  $\oplus$  Anregungsenergie!  
↙

brauche 2 unabhängige Parameter, z. B.

$(E', \theta)$  oder  $(Q^2, \nu)$

$W > M \rightarrow 2M\nu - Q^2 > 0$

Muss von Rosenbluth-ff. zu  $d^2\sigma/d\Omega dE'$  übergehen, el. & magn. WW-Terme

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE'} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}}^* \cdot \left[ W_2 + W_1 \cdot \tan^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

elekt.
magn. WW,  $W_{1,2} = W_{1,2}(Q^2, \nu)$  !

Interpretation der ep-Ausregungsspektren ? ↴

WQ fällt im Bereich der Resonanzen schnell mit  $Q^2$  ab

Darüber:  $W > 2 \text{ GeV}/c^2$  : Zählrate, WQ zeigt nur schwache  $Q^2$ -Abh.  
vgl.  $1/Q^2$  bei Dipolfid...

↳  $W_1, W_2$  hängen in tiefinelastischer Streuung für feste Werte von  $W$  kaum von  $Q^2$  ab

Bjorken'sche Skalensvariable:  $x = \frac{Q^2}{2Pq} = \frac{Q^2}{2M\nu}$

als Maß für die Inelastizität des Prozesses

elastisch:  $W=M$ ,  $x=1$

inelastisch:  $2M\nu - Q^2 > 0$

$$0 < x < 1$$

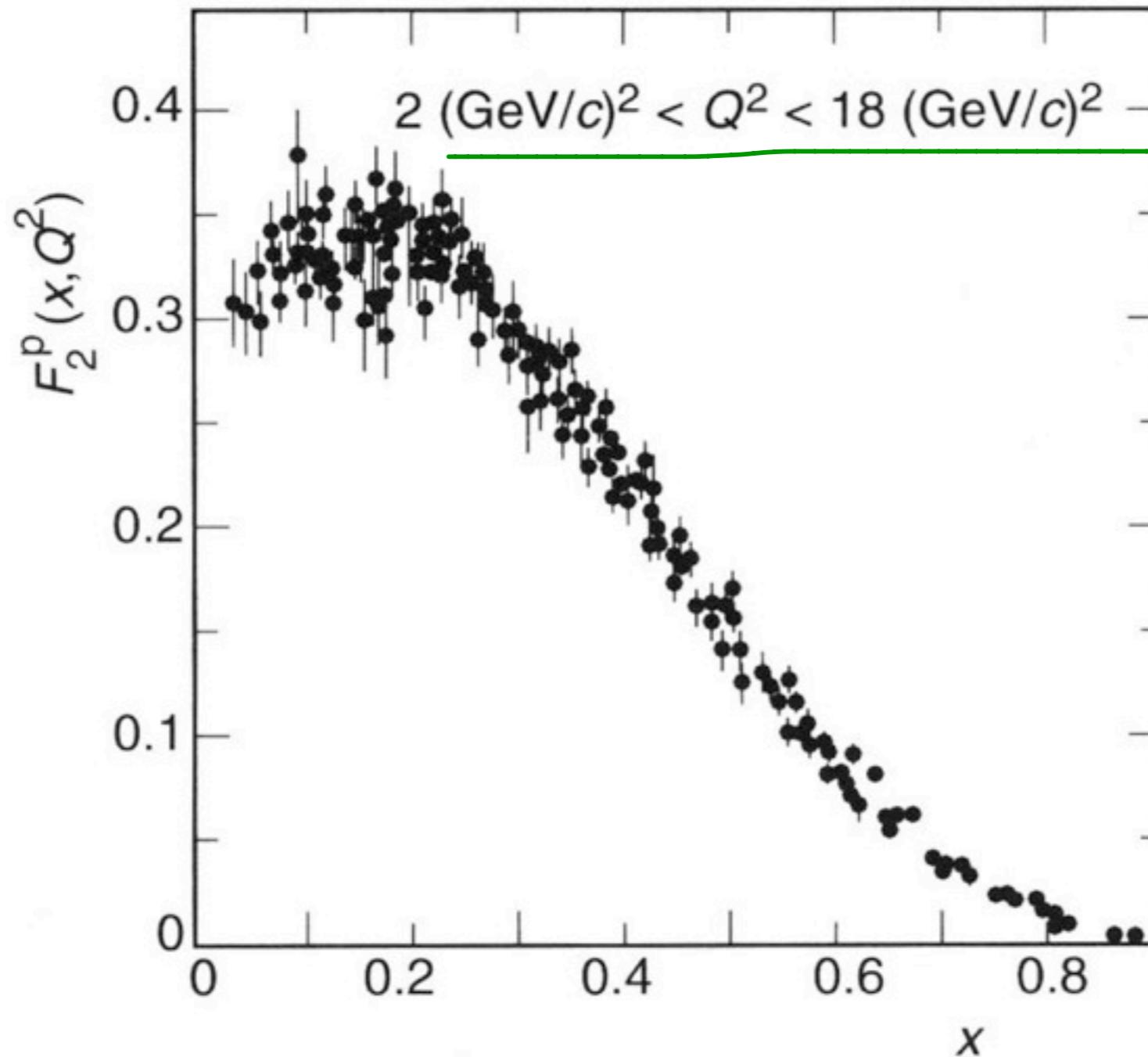
Verwende dimensionslose Struflu:

$$F_1(x, Q^2) = Mc^2 W_1(Q^2, \nu)$$

$$F_2(x, Q^2) = \nu W_2(Q^2, \nu)$$

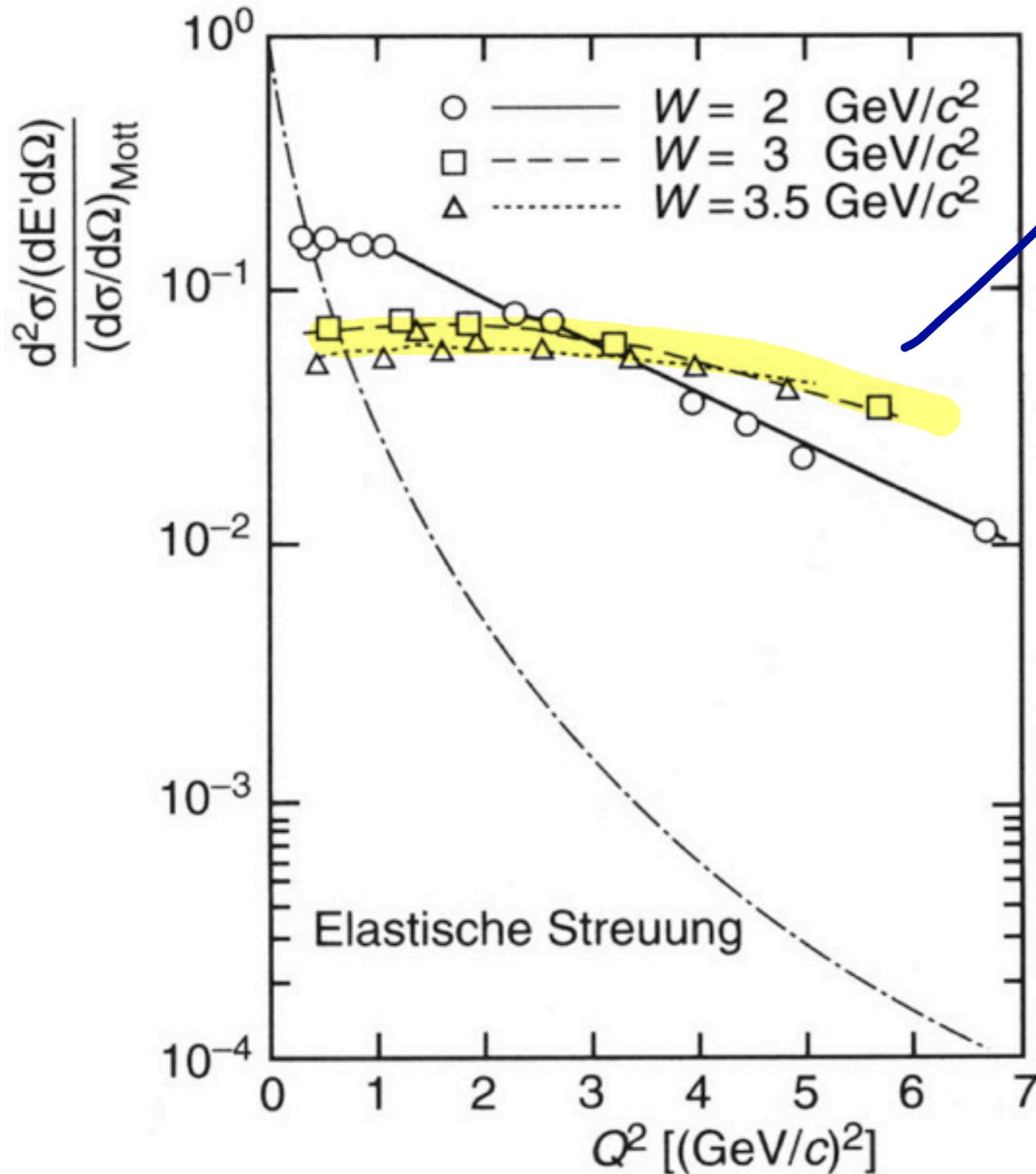
magn. WW
elekt. WW

# F2-Proton



**Abb. 7.4.** Die Strukturfunktion  $F_2$  des Protons als Funktion von  $x$  bei  $Q^2$ -Werten zwischen  $2 (\text{GeV}/c)^2$  und  $18 (\text{GeV}/c)^2$  [At82]

# ep-Streuung: WQ, Strukturfunktionen



Formfaktor ist  
 $\sim$  konstant ( $Q^2$ )

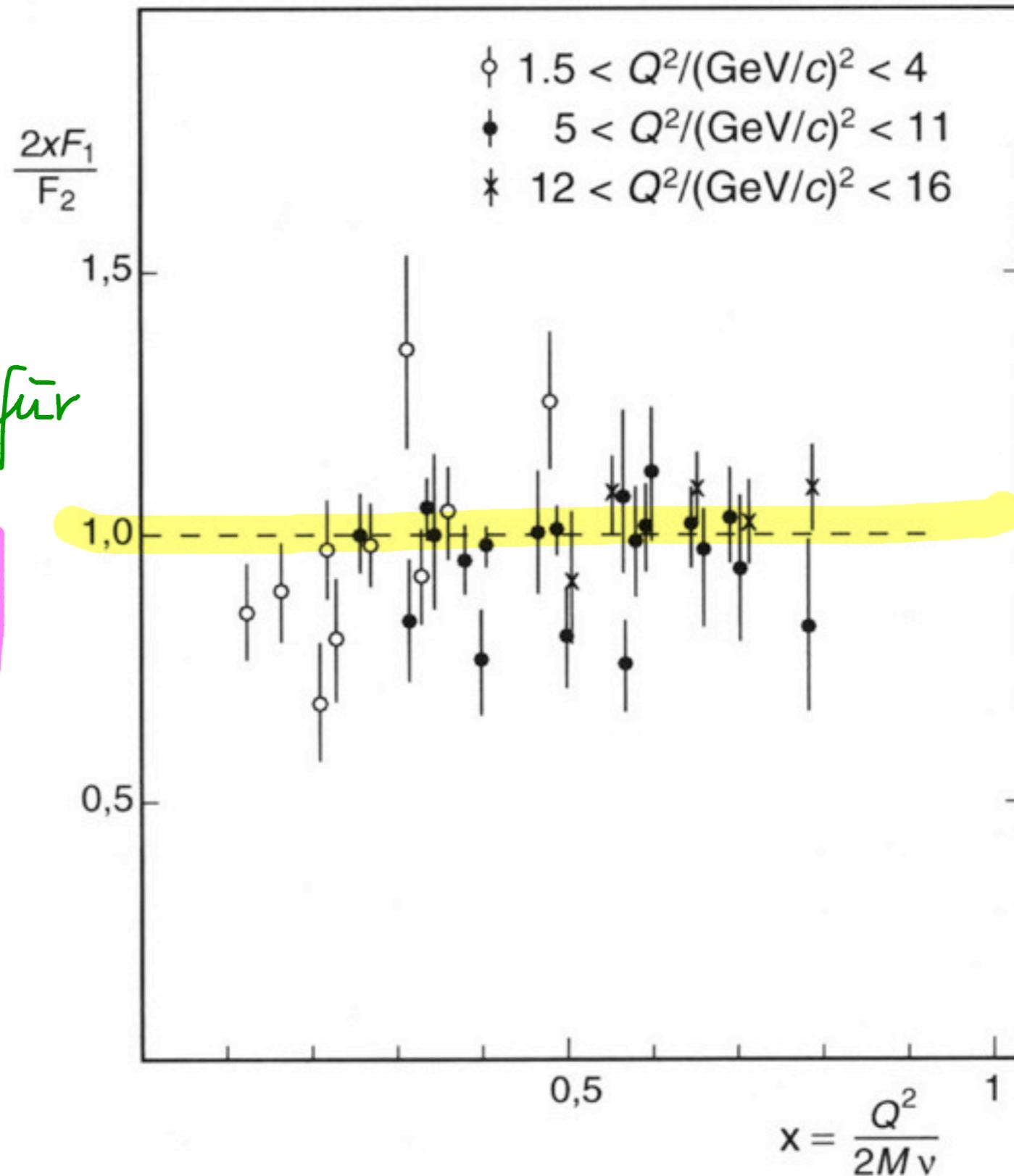


**Abb. 7.3.** Elektron-Proton-Streuung: gemessener Wirkungsquerschnitt normiert auf den Mott-Wirkungsquerschnitt als Funktion von  $Q^2$  für verschiedene Werte der invarianten Masse  $W$  [Br69]

# 2xF1/F2

„Callan-Gross-Relation“

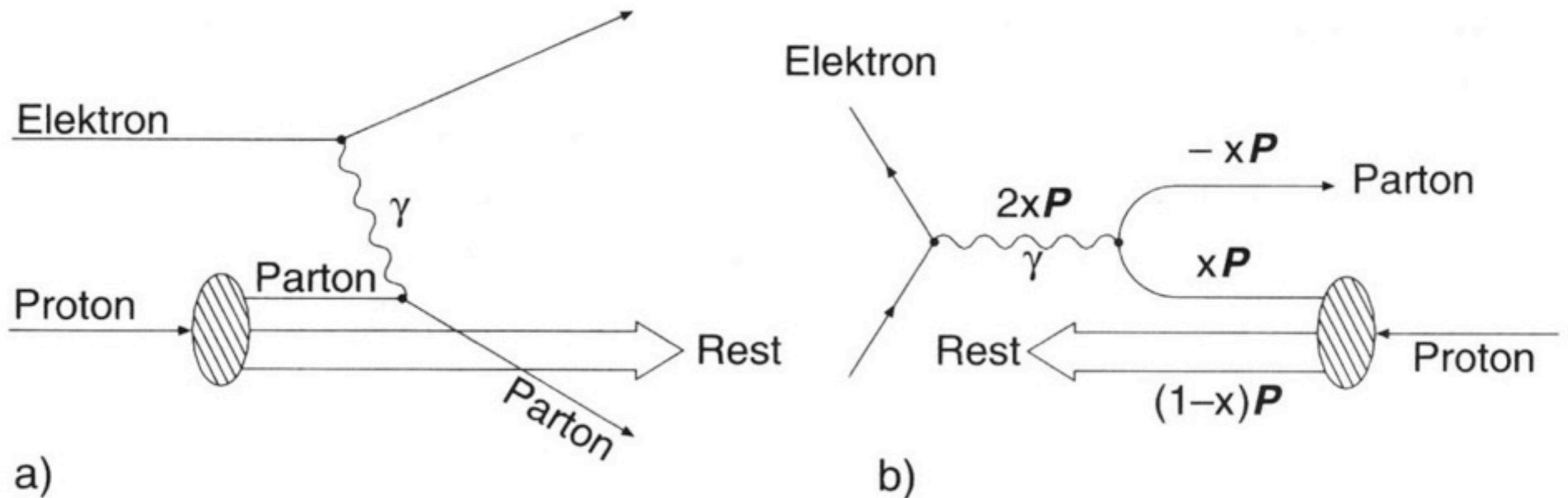
$2xF_1(x) = F_2(x)$  gilt für Spin $1/2$ -Teilchen



**Abb. 7.5.** Verhältnis der Strukturfunktionen  $2xF_1(x)$  und  $F_2(x)$ . Die Daten stammen aus Experimenten am SLAC (nach [Pe87]). Wie man sieht, ist der Quotient etwa konstant Eins.

# Partonen, Breit-System

↳ Konstituentenmodell; heute: geladene Konstituenten = Quarks  
 neutrale - " - = Gluonen

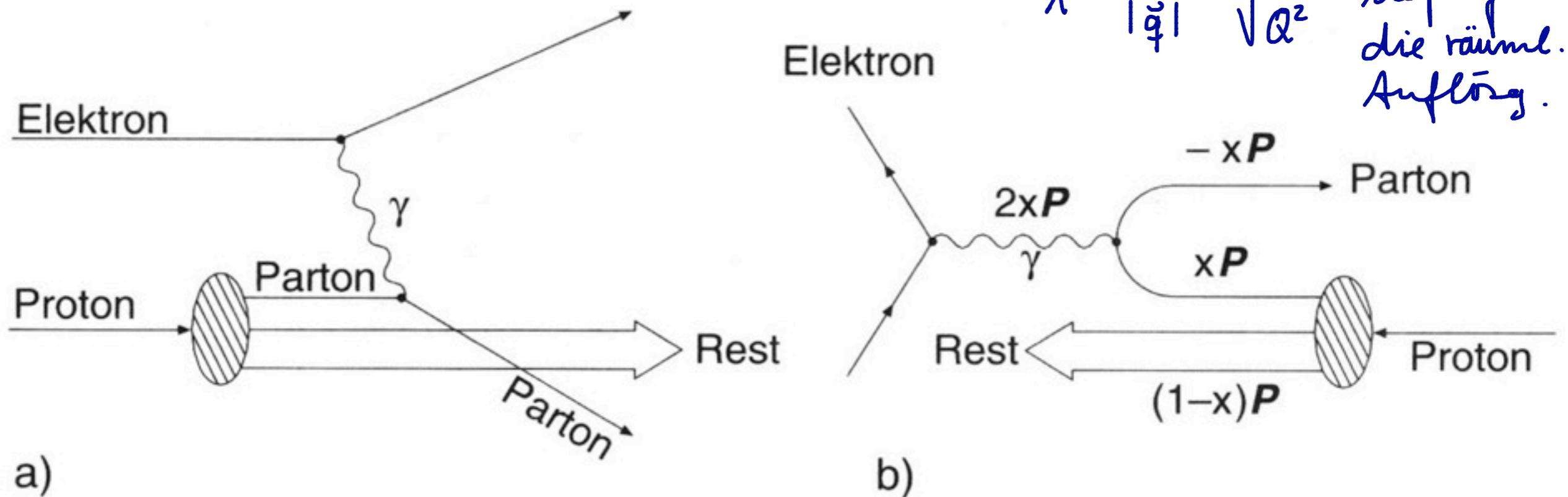


**Abb. 7.6.** Schematische Darstellung der tiefinelastischen Elektron-Proton-Streuung im Partonmodell im Laborsystem (a) und einem schnell bewegten System (b). In dieser Skizze haben wir eine Darstellung in zwei Ortsdimensionen gewählt; die Pfeile geben die Impulsrichtungen an. Skizze (b) stellt den Streuprozess im Breit-System dar, in dem der Energieübertrag des virtuellen Photons Null ist. Der Impuls des getroffenen Partons kehrt sich daher um, bleibt im Betrag aber unverändert.

# Partonen, Breit-System $Q^2 \gg M^2 c^2$ , Parton-Massen klein

↳ anschaul. Interpretation von  $x$ : Parton trägt 4-Impulsanteil  
 Breit-System:  $q_0 = 0$ ,  $x$  auch 3-Impulsanteil und  $xP$

$$\lambda = \frac{\hbar}{|\vec{q}|} = \frac{\hbar}{\sqrt{Q^2}} \quad \text{Maß für die räuml. Auflösg.}$$



**Abb. 7.6.** Schematische Darstellung der tiefinelastischen Elektron-Proton-Streuung im Partonmodell im Laborsystem (a) und einem schnell bewegten System (b). In dieser Skizze haben wir eine Darstellung in zwei Ortsdimensionen gewählt; die Pfeile geben die Impulsrichtungen an. Skizze (b) stellt den Streuprozess im Breit-System dar, in dem der Energieübertrag des virtuellen Photons Null ist. Der Impuls des getroffenen Partons kehrt sich daher um, bleibt im Betrag aber unverändert.