

5. Das Proton und seine innere Struktur

• Einleitung

- ▷ nochmals: Proton im statischen Quarkmodell
- ▷ Prinzip der Strukturuntersuchung

• Elastische Streuung

- ▷ Rutherford-Streuung
- ▷ Formfaktoren und Ladungsdichteverteilung im Teilchen

• Unelastische Streuung

- ▷ Kinematik beim unelastischen Stoß
- ▷ Strukturfunktionen und ihre Bedeutung
- ▷ Strukturfunktion des Protons
- ▷ Strukturfunktion des Photons
- ▷ Spinstruktur des Protons

Proton im statischen Quarkmodell

Aus dem statischen Quarkmodell ergibt sich, daß die **Konstituenten des Protons** (u und d) sind. Berücksichtigen muß man noch der Spin $\frac{1}{2}$, wozu man die Flavour-Wellenfkt. $\Psi(\text{flavour})$ mit der Spinwellenfkt. $\Psi(\text{spin})$ kombinieren muß.

Es ist:

$$\Psi(\text{flavour}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\overbrace{(uud - duu)}^{1 \leftrightarrow 3} + \overbrace{(udu - duu)}^{1 \leftrightarrow 2} + \overbrace{(uud - udu)}^{2 \leftrightarrow 3} \right]$$

$$\Psi(\text{spin}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\overbrace{(\uparrow\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow\uparrow)} + \overbrace{(\uparrow\downarrow\uparrow - \downarrow\uparrow\uparrow)} + \overbrace{(\uparrow\uparrow\downarrow - \uparrow\downarrow\uparrow)} \right]$$

$$\Rightarrow |p \uparrow\rangle = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[\Psi_{12}(\text{spin}) \cdot \Psi_{12}(\text{flavour}) + \Psi_{23}(\text{spin}) \cdot \Psi_{23}(\text{flavour}) + \Psi_{13}(\text{spin}) \cdot \Psi_{13}(\text{flavour}) \right]$$

$$\Rightarrow |p \uparrow\rangle = \frac{1}{3\sqrt{2}} \left(2u\uparrow u\uparrow d\downarrow + 2d\downarrow u\uparrow u\uparrow + 2u\uparrow d\downarrow u\uparrow - u\downarrow d\uparrow u\uparrow - u\uparrow u\downarrow d\uparrow - u\downarrow u\uparrow d\uparrow - d\uparrow u\downarrow u\uparrow - u\uparrow d\uparrow u\downarrow - d\uparrow u\uparrow u\downarrow \right)$$

Ist symmetrisch unter Vertauschungen $1 \leftrightarrow 2, 1 \leftrightarrow 3, 2 \leftrightarrow 3$!
Wird antisym. durch Hinzufügen von $\Psi(\text{colour})$!

Proton im statischen Quarkmodell

Die antisymmetrische Farbwellenfkt. $\Psi(\text{colour})$ für Baryonen ist

$$\Psi(\text{colour}) = [(rgb - rbg) + (gbr - grb) + (brg - bgr)] / \sqrt{6}$$

$\Rightarrow |p_{\uparrow}^{\uparrow}\rangle$ hat $9 \times 6 = 54$ Terme der Form

$$u_{\uparrow}^{\uparrow} u_{\uparrow}^{\uparrow} d_{\downarrow}^{\downarrow} - u_{\uparrow}^{\uparrow} u_{\downarrow}^{\downarrow} d_{\uparrow}^{\uparrow} + \dots$$

ist aber insgesamt antisymmetrisch unter Vertauschung zweier beliebiger Komponenten: $1 \leftrightarrow 2, 1 \leftrightarrow 3, 2 \leftrightarrow 3$

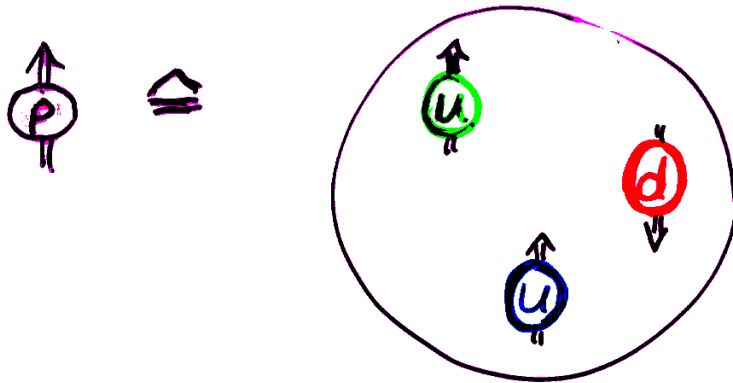
Wellenfkt. ist länglicher Ausdruck, aber im Prinzip nicht kompliziert. Glücklicherweise braucht man für unpolarisiert Protonen nur

$|p\rangle = \Psi(\text{flavour}) = (i \text{ und } -i \text{ dau}) / \sqrt{2} + \text{Permutationen}$
bei polarisierten Protonen ist allerdings schon

$|p_{\uparrow}^{\uparrow}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (2 u_{\uparrow}^{\uparrow} u_{\uparrow}^{\uparrow} d_{\downarrow}^{\downarrow} - u_{\uparrow}^{\uparrow} u_{\downarrow}^{\downarrow} d_{\uparrow}^{\uparrow} - u_{\downarrow}^{\downarrow} u_{\uparrow}^{\uparrow} d_{\uparrow}^{\uparrow}) + \text{Permutationen}$
erforderlich

Proton im statischen Quarkmodell

Aus dem statischen Quarkmodell erwächst ein Vorurteil über den Aufbau des Protons:



wobei die Quarks untereinander durch Gluon-
austausch gebunden sind und ^{sich} gegenseitig
umkreisen (wie drei Sonnen)

→ Untersuchung der inneren Struktur des Protons

Prinzip der Strukturuntersuchung

Man mache eine Art "Röntgenbild" des Protons, wobei man Röntgenphotonen sehr geringer Wellenlänge benötigt.

Optik: Auflösungsvermögen beträgt $\approx \lambda/2$

⇒ Um die innere Struktur des Protons auflösen zu können, werden Wellenlängen von

$$\lambda \ll \sigma_{\text{Proton}}$$

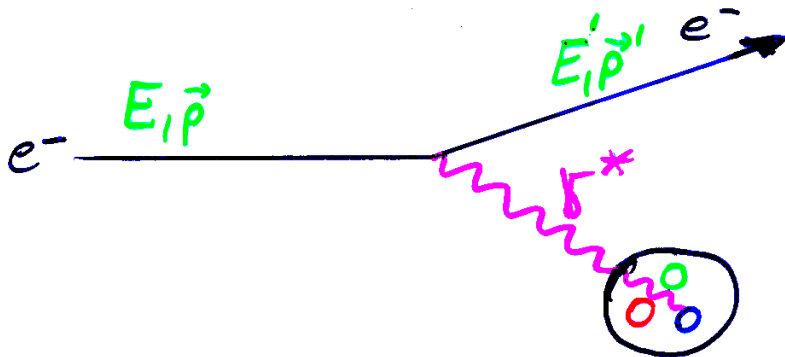
benötigt, wobei $\sigma_{\text{Proton}} \approx 10^{-15} \text{ m} \hat{=} 1 \text{ fm}$.

$$\Rightarrow \lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{h \cdot c}{h \nu} = \frac{h \cdot c}{E_{\text{photon}}} \hat{=} \frac{1.24 \text{ fm}}{E_{\text{photon}} [\text{GeV}]}$$

⇒ Für Photonenergien oberhalb $\sim 1 \text{ GeV}$ schaut man auf die innere Struktur des Protons

Prinzip der Strukturuntersuchung

Photonenquelle? z.B. ein Elektronenstrahl:



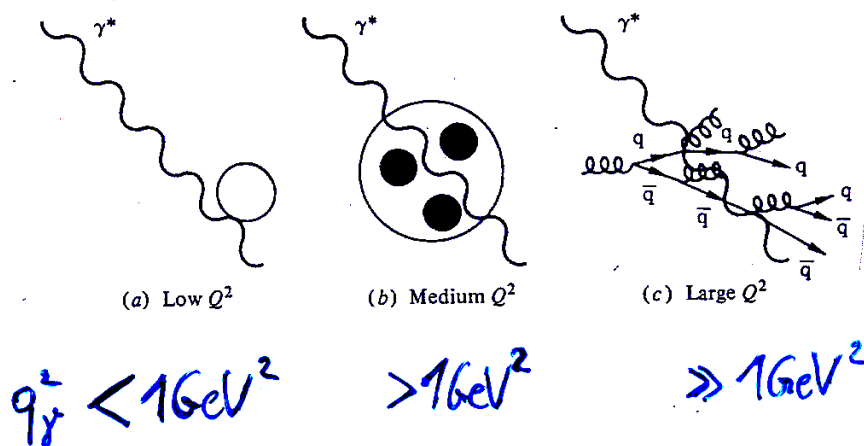
Dabei ist das Photon aber i.a. virtuell, d.h.

$$q_\gamma = \begin{pmatrix} E_\gamma \\ \vec{p}_\gamma \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \underline{q_\gamma^2 = E_\gamma^2 - (\vec{p}_\gamma)^2 < 0}$$

und zwar < 0 , weil meist $E' \approx E$ aber $|\vec{p}'| = |\vec{p}' - \vec{p}| \gg 0$
(Reelle Photonen haben $q_\gamma^2 = m_\gamma^2 = 0$.)

Auch für virtuelle Photonen gilt: $\lambda \approx \frac{1.24 \text{ fm}}{\sqrt{|q_\gamma^2|} [\text{GeV}^2]}$

Fig. 7.14 Schematic diagram showing the change in the resolution of the virtual photon with increasing Q^2 .



Rutherford-Streuung

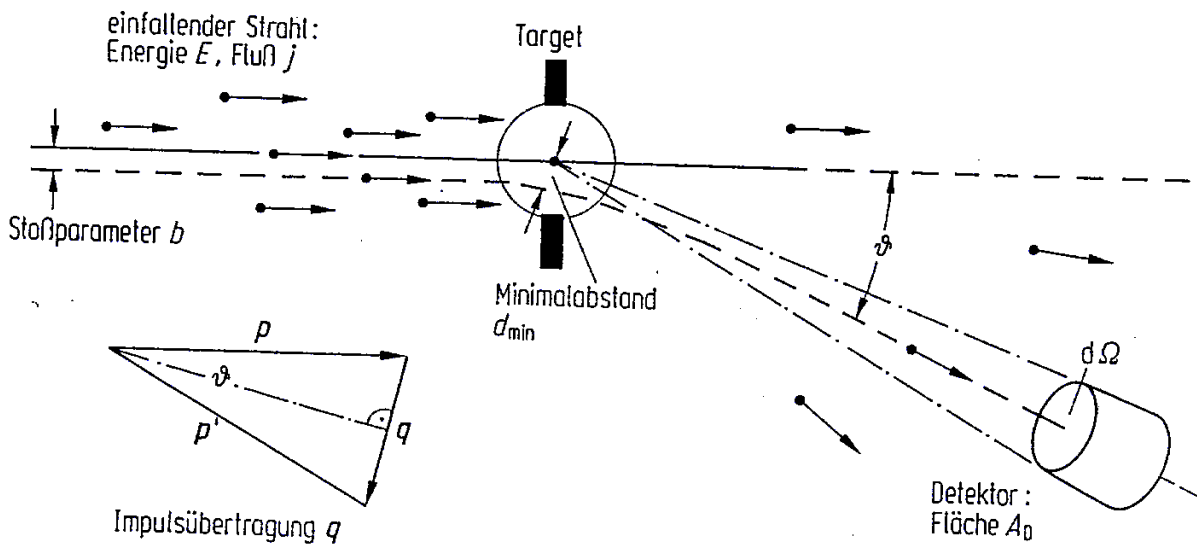


Abb. 2.5 Prinzipskizze zur elastischen Streuung von α -Teilchen. Eine Rutherford-Trajektorie mit Stoßparameter b , Minimalabstand d_{\min} , Streuwinkel ϑ , Impulsübertrag q und Detektor-Raumwinkel $d\Omega$ ist eingezeichnet.

Unter Verwendung vieler vereinfachender Annahmen, wesentlich: spinlose Teilchen und Target viel massiver als Projektil, kann man im Falle der Coulomb-Streuung mittels klassischer Mechanik die **Rutherford-Streuformel** herleiten (z.B. in Bergmann-Schaefer, Bd. 4) :

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R = \left(\frac{Z_{\text{Projektil}} \cdot Z_{\text{Target}} \cdot dte}{4E}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sin^4 \frac{\vartheta}{2}}$$

$$(E = \frac{1}{2}mv^2)$$

Elektron - Streuung

Sreuung relativistischer Elektronen mit Spin $\frac{1}{2}$ an einer (spinlosen) Punktladung Ze wird durch den Mott-Streuquerschnitt beschrieben:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Punkt}} \equiv \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}} \cdot \left(\frac{Z_{\text{Target}} \cdot d t h c}{2 \cdot E}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sin^4 \frac{\vartheta}{2}} \cdot \left(1 - \beta^2 \sin^2 \frac{\vartheta}{2}\right)$$

E : relativ. Energie

$$\left[\begin{array}{l} E = \gamma m c^2 = p \cdot \beta c ; \quad \beta \equiv \frac{v}{c} \\ p = \gamma m v ; \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \end{array} \right]$$

Wechselwirkung des magnet. Spinnmoments des Elektrons mit Magnetfeld des Targets aus Vorbeiflug

Im Grenzübergang $\beta \rightarrow 0$ folgt aus Mott-Streuquerschnitt wieder die Rutherford-Streuformel.

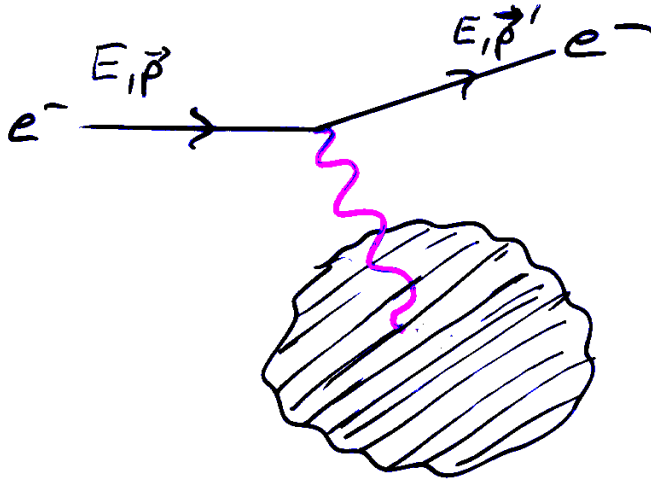
Details dieser Formel sind im folgenden nicht relevant, aber der Term:

$$\left(\frac{d t h c}{2 E \sin^2 \frac{\vartheta}{2}}\right)^2$$

erscheint in allen Formel, die elastische oder unelastische Streuwirkungsquerschnitte beschreiben!

Formfaktoren und Ladungsdichteverteilung

Was passiert, wenn man (unpolarisierte) Elektronen an einer ausgedehnten Ladungsverteilung streut?



Ladungsverteilung mit
Gesamtladung $Z \cdot e$
und Ladungsdichtever-
teilung $\rho(\vec{x})$
($\int_V \rho(\vec{x}) d^3x = 1$)

⇒ Streuwirkungsquerschnitt:

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

Impulsübertrag
 $\vec{q} = \vec{p}' - \vec{p}$

mit Formfaktor $F(\vec{q})$:

$$F(\vec{q}) = \text{Fourier-transformierte der Ladungsdichte } \rho$$
$$= \int \rho(\vec{x}) e^{i\vec{q} \cdot \vec{x} / \hbar} d^3x$$

Beispiele für Formfaktoren

Tab. 2.1 Modell-Ladungsverteilungen und Formfaktoren.

Ladungsverteilung	Formfaktor	Beispiel
$\delta(r)$	1	<u>Punktladung</u> , Quark
$\exp(-r/b)$	$(1 + b^2 q^2 / \hbar^2)^{-1}$	<u>Nukleon</u>
$\exp(-r^2/b^2)$	$\exp(-b^2 q^2 / 4 \hbar^2)$	Proton-Proton-Streuung
$\rho_c(r) = \begin{cases} \rho_0 & r \leq R \\ 0 & r > R \end{cases}$	$3(\sin x - x \cos x) / x^2$ mit $x \equiv qR/\hbar$	homogen geladene Kugel

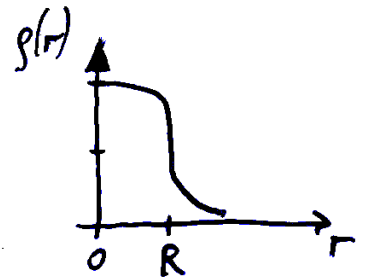
- Für Atomkerne findet man:

$$\rho(r) = \rho(0) \cdot \frac{1}{1 + \exp[(r-R)/a]}$$

mit: $R \approx 1,18 \cdot \sqrt[3]{A} - 0,48 \text{ fm}$

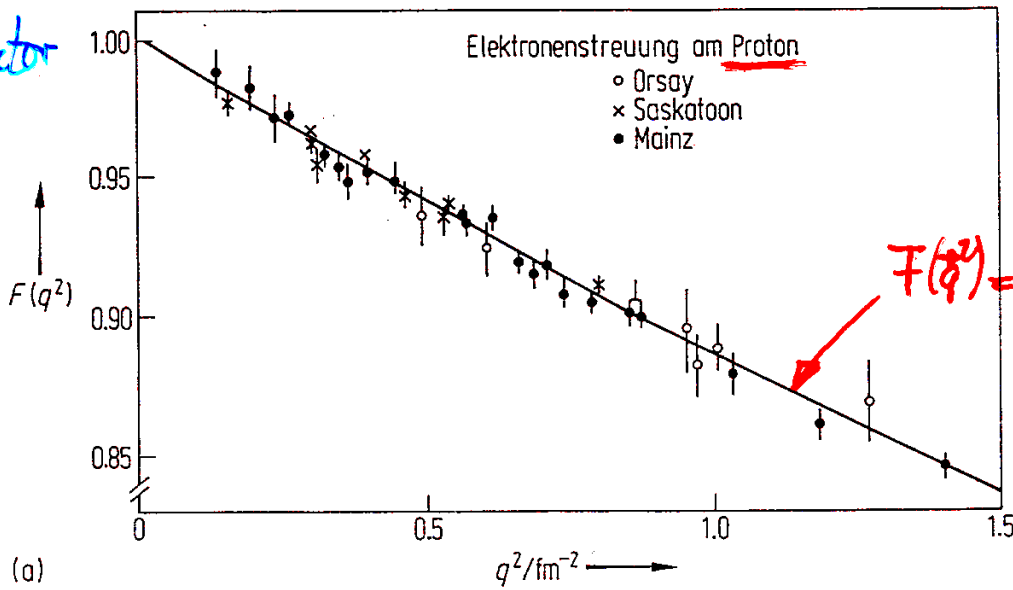
$a \approx 0,55 \text{ fm}$

$\rho(0) \approx 0,07 \text{ fm}^{-3}$



Formfaktoren für Proton & Neutron

Formfaktor



$F(q^2) \neq \text{const.}$

$F(q^2) = \frac{1}{1 + q^2 / (0.71 (\text{GeV}/c)^2)}$

Ladungsdichte

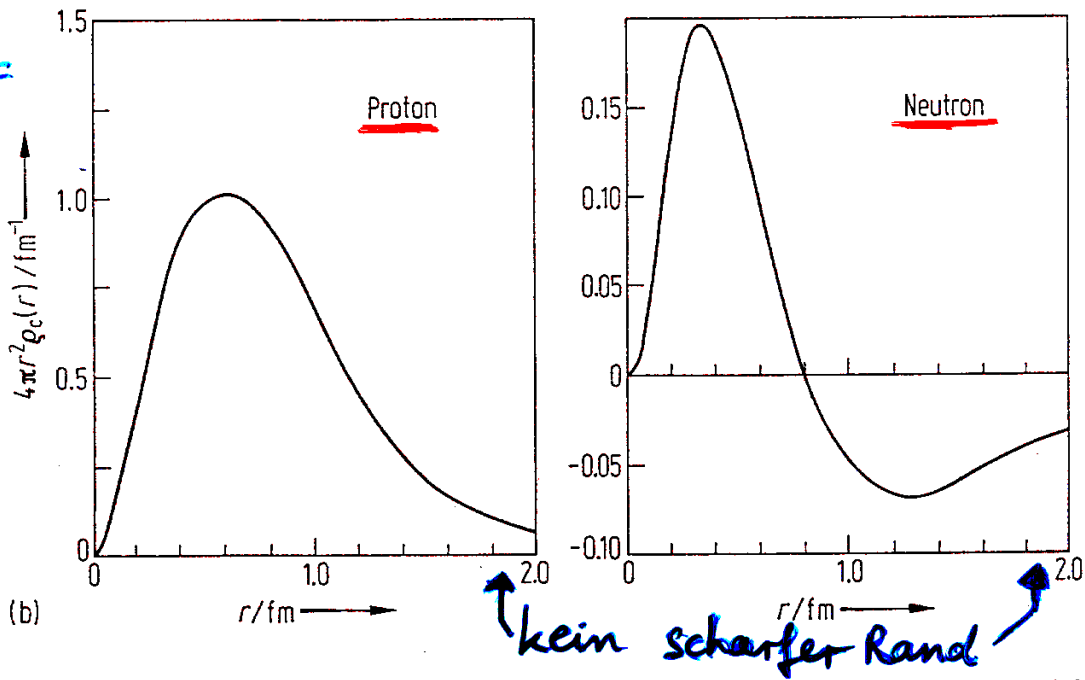
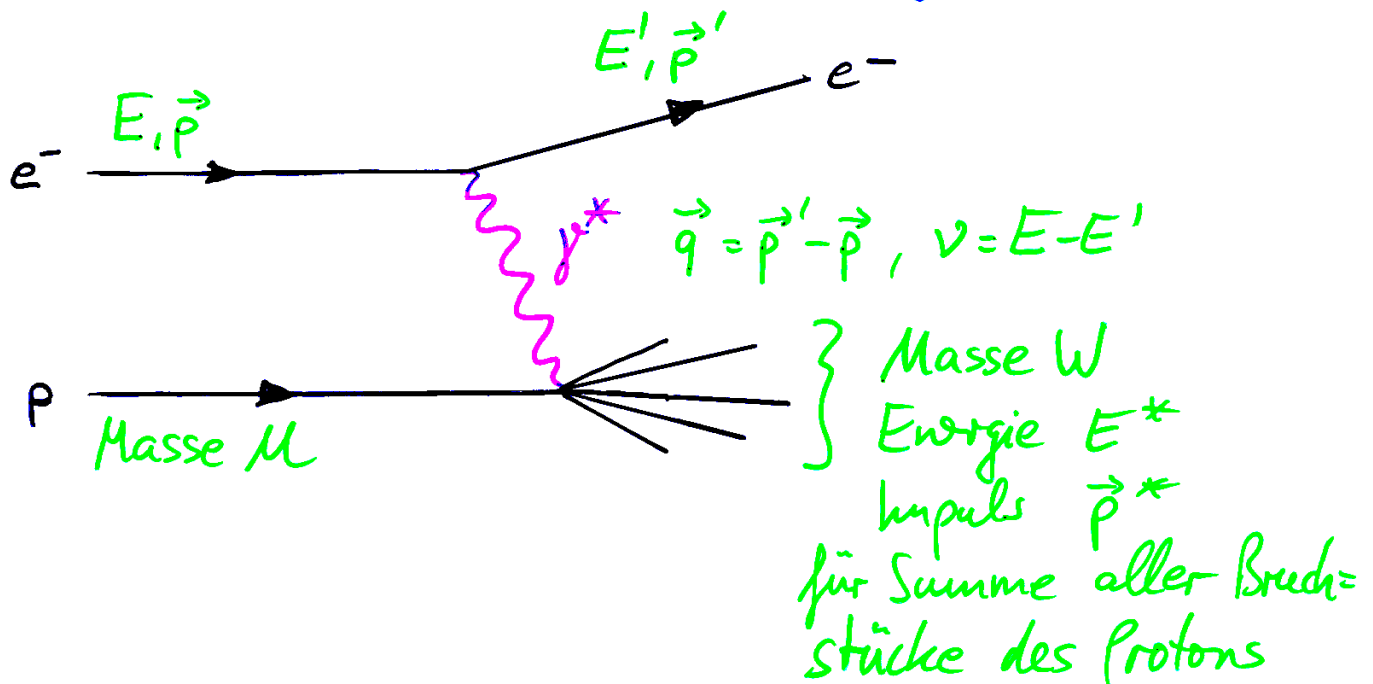


Abb. 2.22 (a) Elektrischer Formfaktor $F(q^2)$ des Protons als Funktion des quadrierten Impulsübertrages q^2 . (b) Ladungsdichten $4\pi r^2 \rho_c(r) dr$ von Proton und Neutron [60].

Proton: $\rho(r) = \rho(0) \exp(-\frac{r}{a})$ mit $a = \frac{\hbar}{0.71 (\text{GeV}/c)^2} \approx 0.23 \text{ fm}$

Unelastische Streuung

- Bisher war $E' = E$ angenommen, ein- und auslaufendes Elektron haben die gleiche Energie.
- Bei einem Streuprozess kann jedoch auch Energie vom Elektron auf das Proton übertragen werden:



In einem solchen Prozess kann das Proton:

- unbeschädigt mit Impuls & Energie aus Stoß verbleiben (elast. Stoß)
 - in einen angeregten Zustand versetzt werden
→ Resonanzen (Teilchen, die nach wenigen 10^{-20} Sekunden wieder zerfallen)
 - komplett zerstört und in andere Hadronen umgewandelt werden
- inelast. Stöße

Beispiel für Stöße mit $E' < E$

Resonanzen

elastischer Peak

... $N(1520)$ $\Delta(1232)$



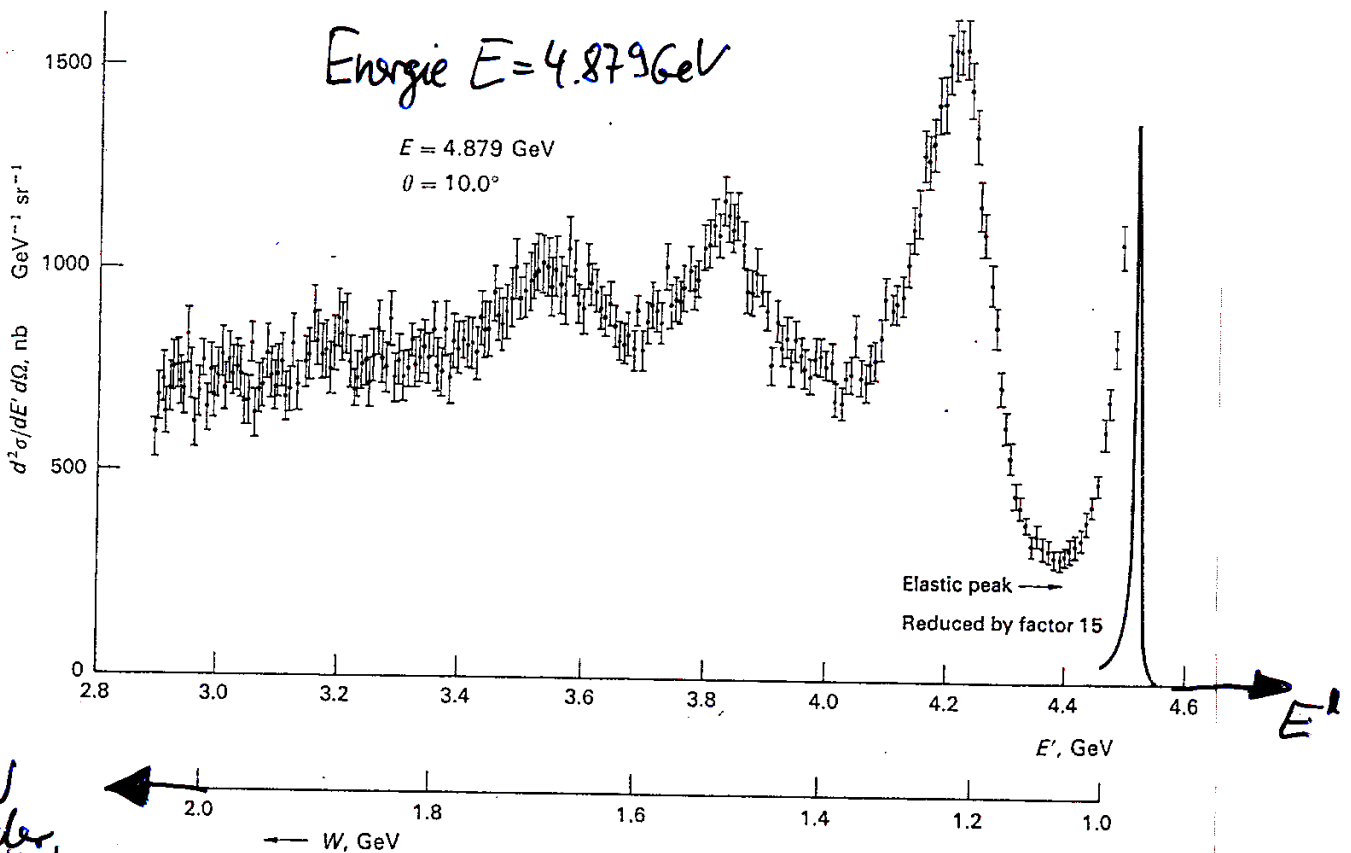
$N \rightarrow p\pi$

$\Delta^+ \rightarrow p\pi^0$

Energie $E = 4.879 \text{ GeV}$

$E = 4.879 \text{ GeV}$

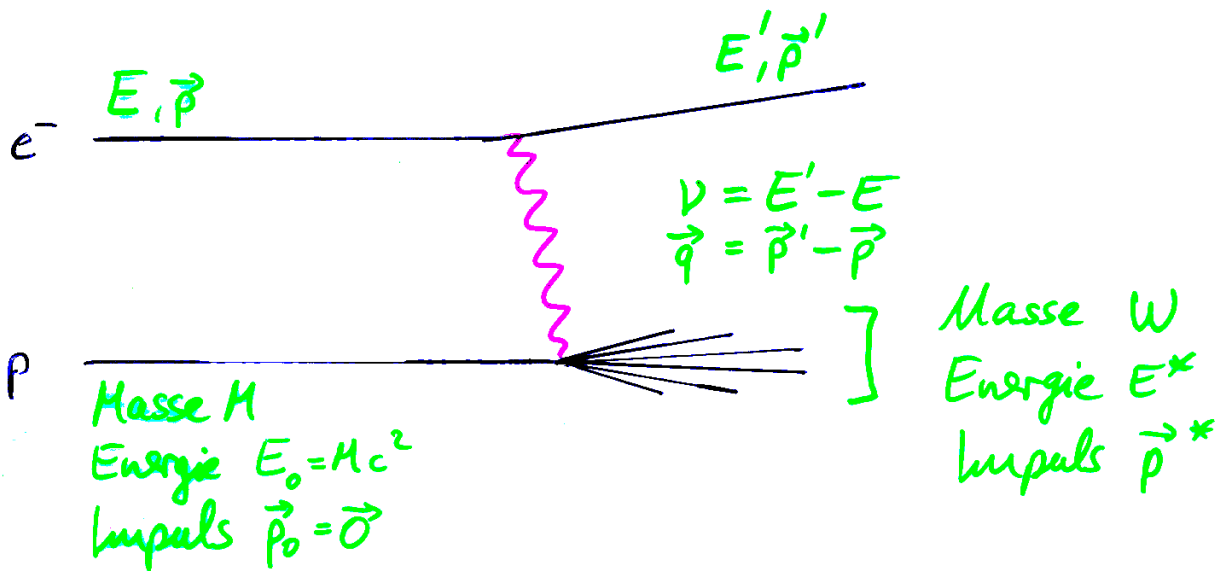
$\theta = 10.0^\circ$



W
Masse der
Bruchstücke

Fig. 7.15 Excitation curve of inelastic ep scattering, obtained at the DESY electron accelerator (Bartel *et al.* 1968). E and E' are the energies of the incident and the scattered electron, and W is the mass of the recoiling hadronic state. The peaks due to the pion-nucleon resonances of masses 1.24, 1.51, and 1.69 GeV are clearly visible.

Kinematik im (un-)elastischen Stoß



$$q = \left(\frac{v/c}{\vec{q}} \right) \Rightarrow q^2 = \left(\frac{v}{c} \right)^2 - \vec{q}^2$$

Der Viererimpuls q ist aber auch durch Protonenanzugs- und Endzustand gegeben:

$$q = \left(\frac{v/c}{\vec{q}} \right) = \left(\frac{E^*/c - Mc^2/c}{\vec{p}^* - \vec{0}} \right)$$

$$\Rightarrow q^2 = \left(\frac{E^*}{c} - Mc \right)^2 - (\vec{p}^* - \vec{0})^2$$

$$v = E^* - Mc^2$$

$$W^2 c^2 = \left(\frac{E^*}{c} \right)^2 - (\vec{p}^*)^2$$

$$\Rightarrow q^2 = -2vM + W^2 c^2 - M^2 c^2 =: -Q^2$$

z.B. elast. Stoß:
 $W^2 = M^2$

$$q_{\text{elast}}^2 = -2vM$$

Dimensionslose Variablen

$$x := \frac{Q^2}{2\nu M} = \frac{-q^2}{2\nu M}$$

$$\in [0, 1]$$

$$y := \frac{\nu}{E} = \frac{E' - E}{E}$$

$$\in [0, 1]$$

Alle Wirkungsquerschnitte werden in diesen Variablen geschrieben
(elast. Streuung $\Rightarrow x = 1$)

Kinematisch erlaubter Bereich für $ep \rightarrow eX$:

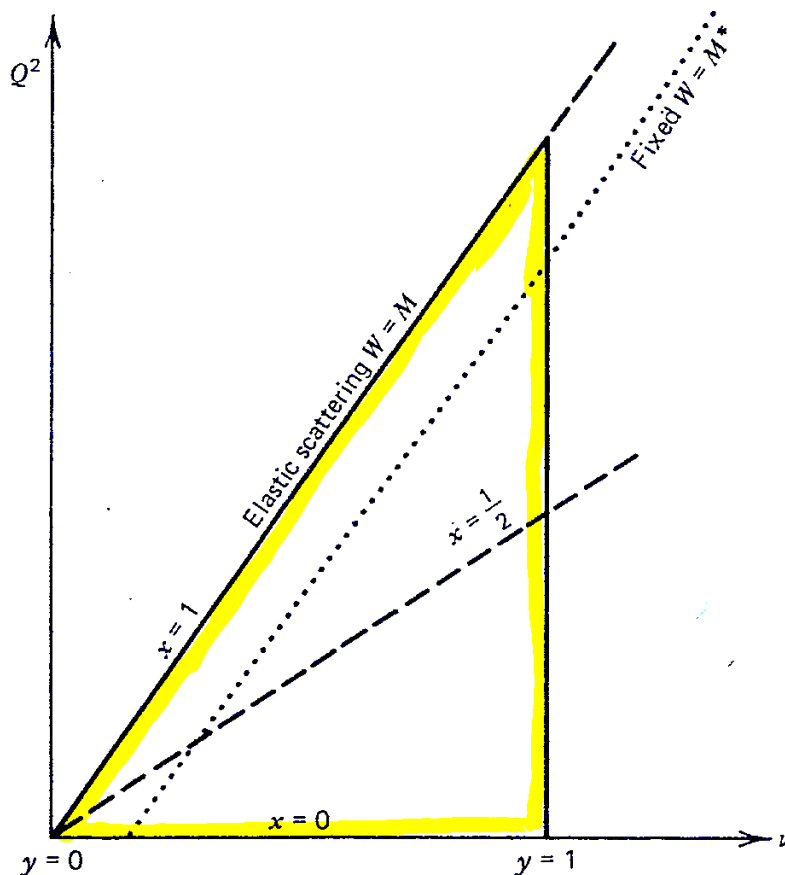
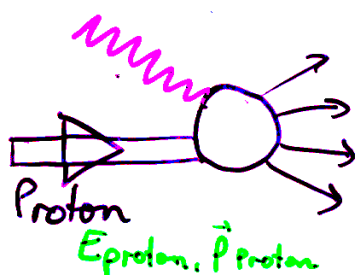


Fig. 9.3 The triangle is the allowed kinematic region for $ep \rightarrow eX$. $\nu_{\max} = E$ in the laboratory frame. W is the invariant mass of the hadronic state X , see (8.29).

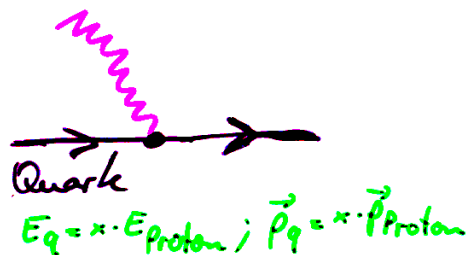
Alle Prozesse, ob elastisch oder unelastisch liegen innerhalb dieses Dreiecks. Beispielsweise kann die Erzeugung einer Resonanz mit der Masse M^* nur entlang der gepunkteten Linie sein, wodurch eine feste Relation zwischen Energie E' und Winkel ν des gestreuten Elektrons besteht.

Zur Bedeutung von x : Bjorken Scaling

Da das Proton aus (punktförmigen) Quarks aufgebaut ist, sollte bei hoher Auflösung ($\hat{=}$ großem Q^2) die inelastische Elektron-Proton Streuung wie einfache elastische Elektron-Quark Streuung erscheinen, wobei das Quark wie ein freies Teilchen betrachtet werden kann, da die starke Kopplung α_s für große Q^2 sehr gering wird (asymptot. Freiheit)



Q^2 groß



\Rightarrow "Formfaktor" sollte dem eines punktförmigen Teilchens entsprechen: $F(Q^2) = \text{const}$ für festes x , insbesondere ist dies unabhängig von Q^2 .

Das ist das sog. Bjorken Scaling, das J.D. Bjorken 1967 als Hypothese formulierte. Dabei trägt das Quark gerade den Bruchteil x der Protonenergie und -impuls:

$$E_q = x \cdot E_{\text{Proton}} \quad / \quad P_{L,q} = x \cdot P_{L,\text{Proton}} \quad / \quad P_{T,q} = P_{T,\text{Proton}} = 0$$

Bjorken Scaling

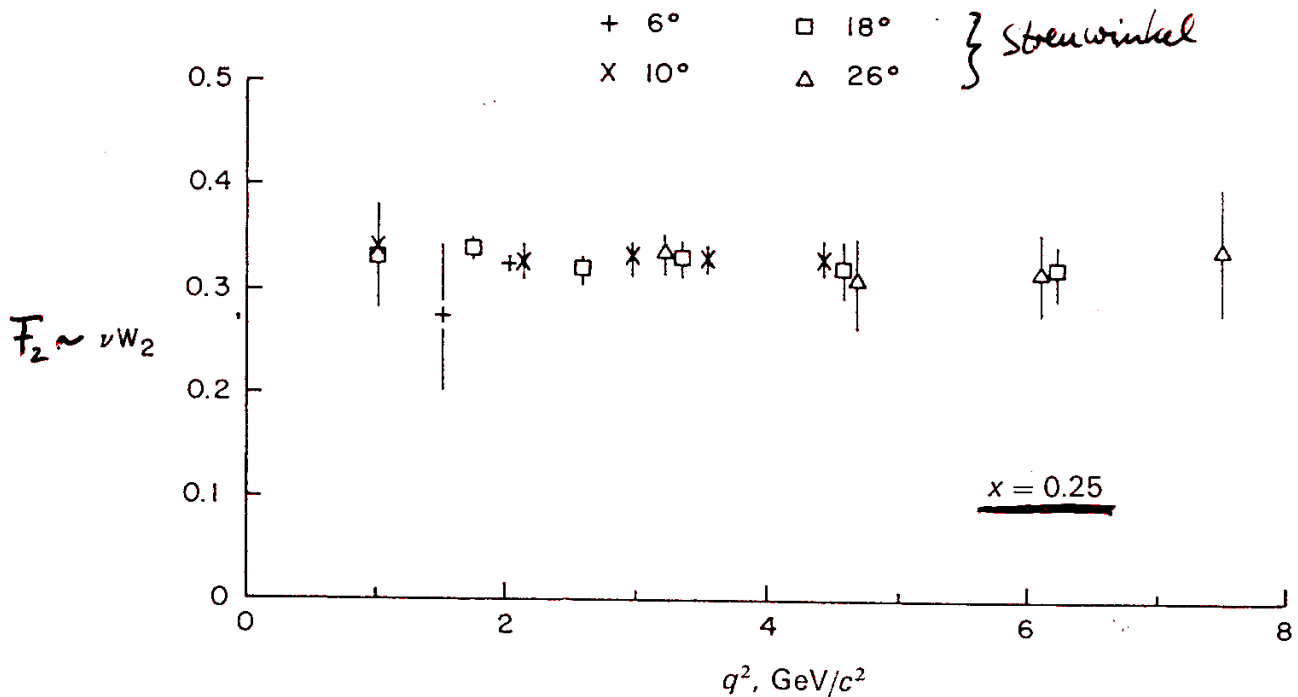


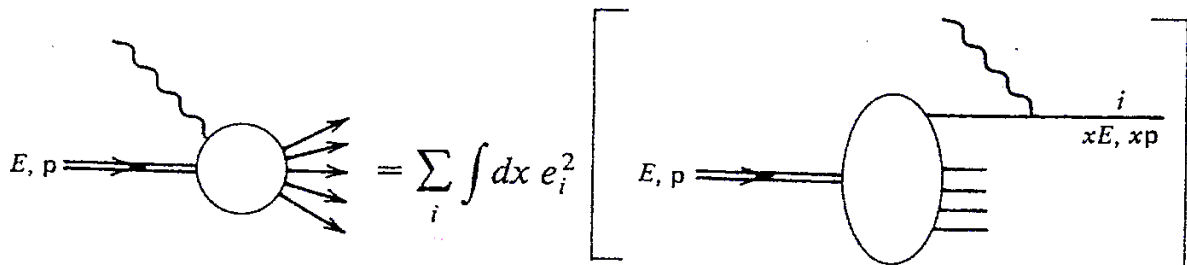
Fig. 7.17 νW_2 (or F_2) as a function of q^2 at $x = 0.25$. For this choice of x , there is practically no q^2 -dependence, that is, exact "scaling". (After Friedman and Kendall 1972.)

Prinzipiell hängt der "Formfaktor" bei unelastischer Streuung von $Q^2 = -q^2$ und x ab. Da damit die Struktur des Protons beschrieben wird, nennt man diese Funktion $F(Q^2, x)$ Strukturfunktion, wobei man zwei Funktionen F_1, F_2 unterscheidet durch die transversale oder longitudinale Polarisation des virtuellen Photons.

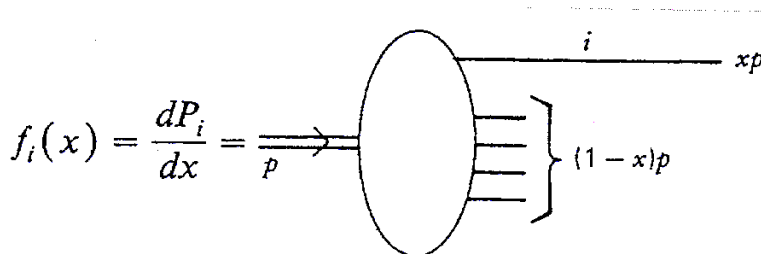
Die experimentelle Beobachtung des Bjorken Scalings belegt die Existenz punktförmiger Konstituenten (Quarks) im Proton.

Interpretation der Strukturfunktion

Mit dem Bild punktförmiger Konstituenten im Proton kann man die Strukturfunktion als eine Überlagerung ansehen:



Und zwar der punktförmigen Partonen i , die das Proton aufbauen ($i = u, d, \dots$, mit Ladung e_i) und jeweils einen Bruchteil x des Protonenimpulses und -energie tragen. Die Impulsverteilung dieser Partonen ist durch



gegeben. $f_i(x)$ ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein getroffenes Parton den Bruchteil x des Protonimpulses trägt. Damit folgt die wichtige Relation des Partonmodells:

$$2x F_1(x) = F_2(x) = \sum_i e_i^2 x f_i(x)$$

(Callan-Gross Relation
zwischen F_1 und F_2)

Veranschaulichung der Strukturfunktion

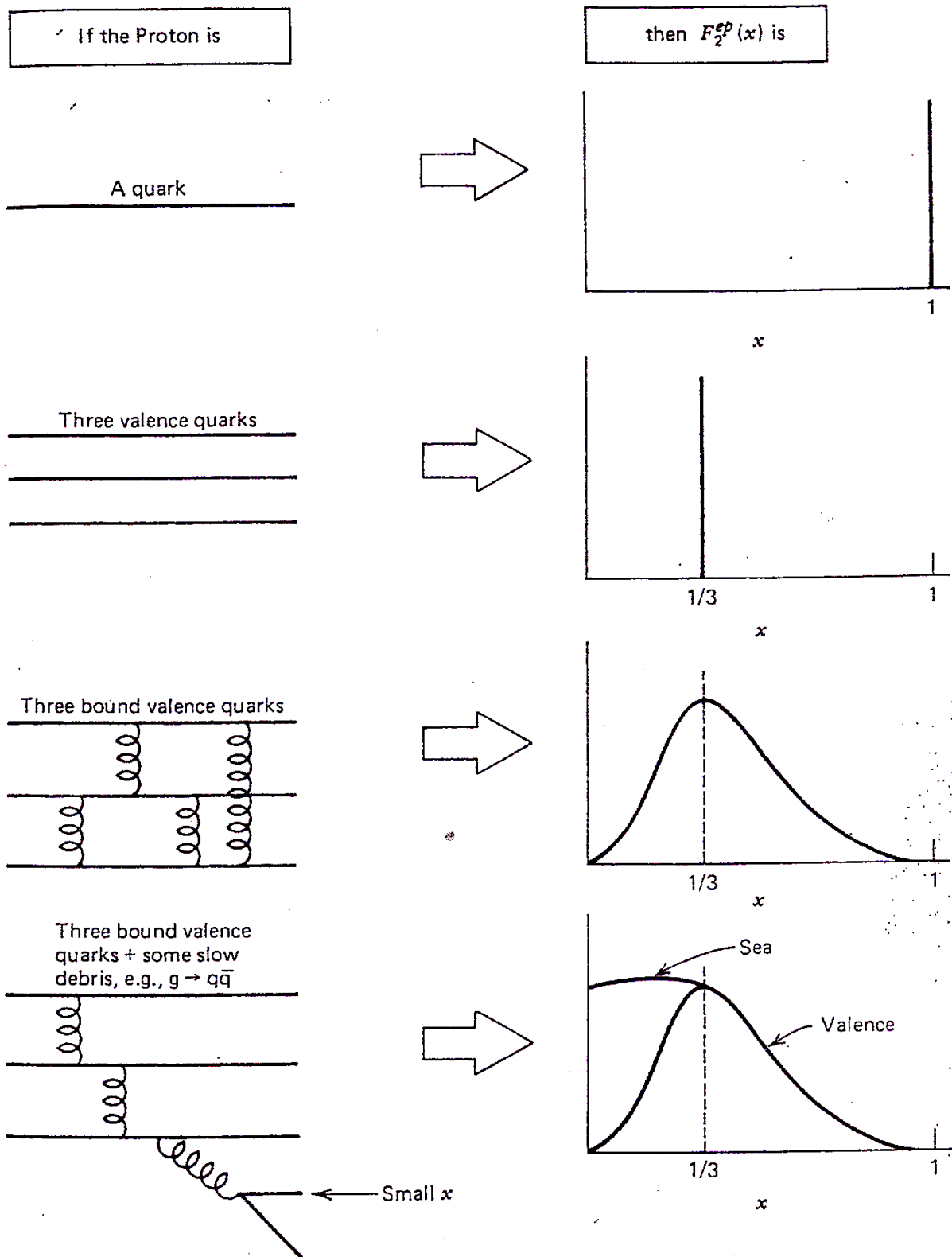


Fig. 9.7 The structure function pictured corresponding to different compositions assumed for the proton.

Messung der Protonstrukturfunktion F_2

- Nach Umschreiben des differentiellen Wirkungsquerschnitts für die Variablen Q^2 und x :

$$\begin{aligned}\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} &\stackrel{y \ll 1}{=} 4\pi \left(\frac{d\sigma}{dQ^2} \right)_{\text{Mott}} \cdot \left[(1-y) \cdot \frac{F_2(x, Q^2)}{x} + \frac{y^2}{2} \cdot \frac{2xF_4(x, Q^2)}{x} \right] \\ &= \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4} \cdot \left[\frac{1}{2} (1 + (1-y)^2) \cdot \frac{F_2(x, Q^2)}{x} \right]\end{aligned}$$

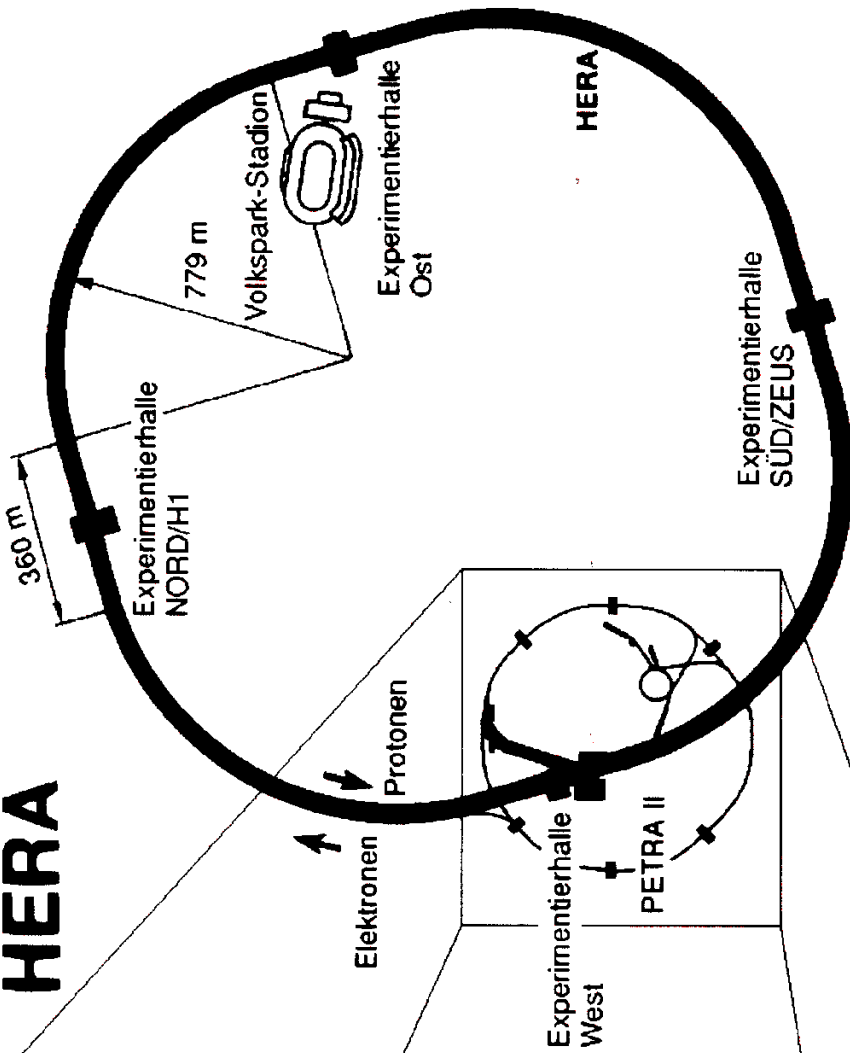
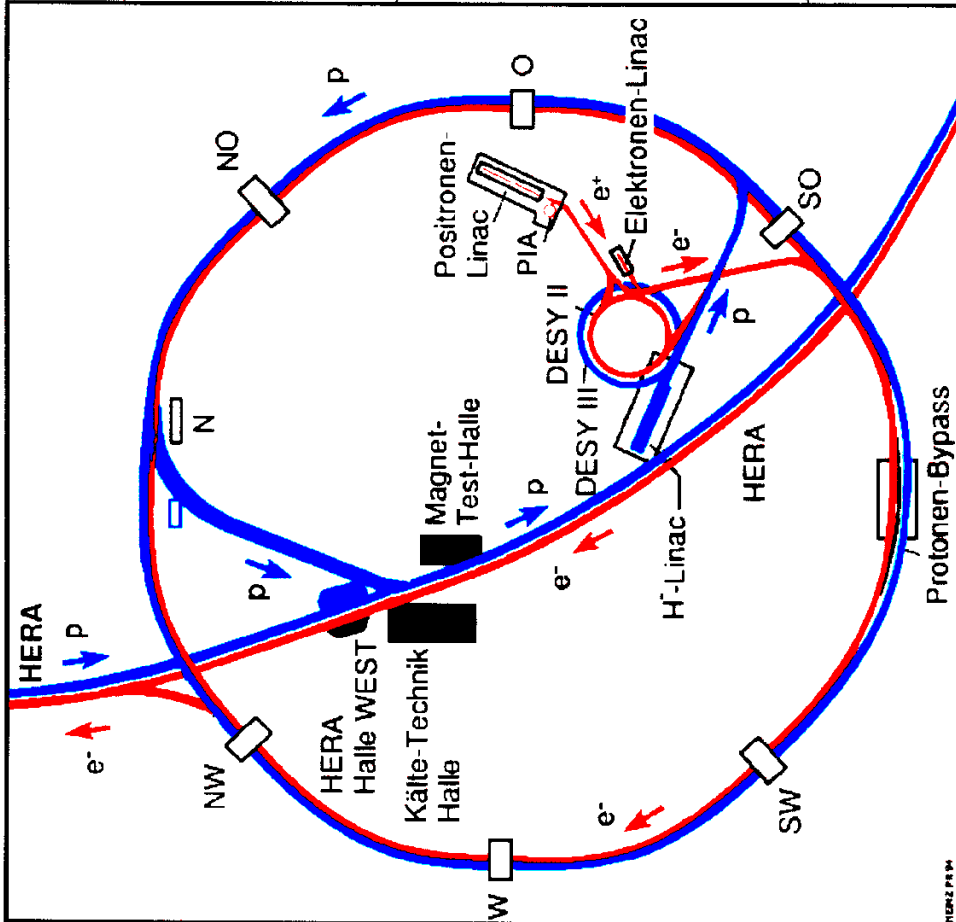
Strukturfunktion F_2 ergibt sich durch Messung von $\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2}$ für Wertepaare (x, Q^2) , die sich aus dem beobachtbaren Endzustand ermitteln lassen. (Q^2 aus Streuwinkel θ und Energie E des Elektrons, x aus Q^2 und Masse des Endzustandes W)

- Viele verschiedene Experimente, aktuellste am **HERA - Ringbeschleuniger**

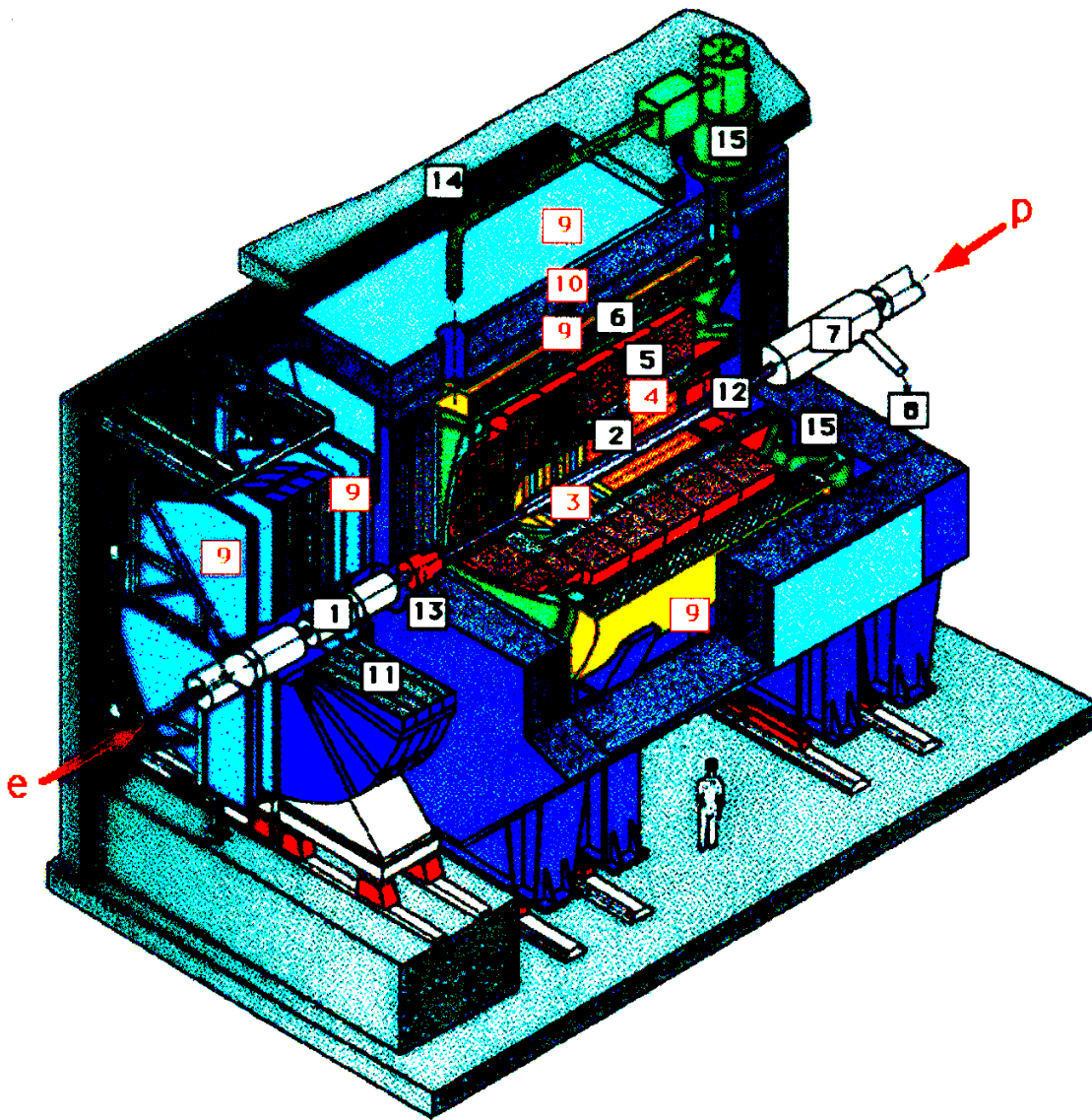
$$E_{\text{Proton}} \approx 820 \text{ GeV} \quad ; \quad E_{\text{Elektron}} = 30 \text{ GeV}$$

⇒ maximale Energie im Stoß: $\sqrt{s} = \sqrt{4E_p E_e} \approx 314 \frac{\text{GeV}}{c^2}$
entspricht auch max. Impulsübertrag $\sqrt{q^2}$

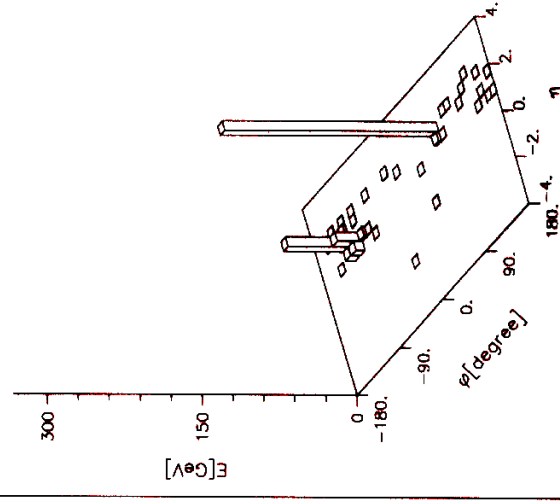
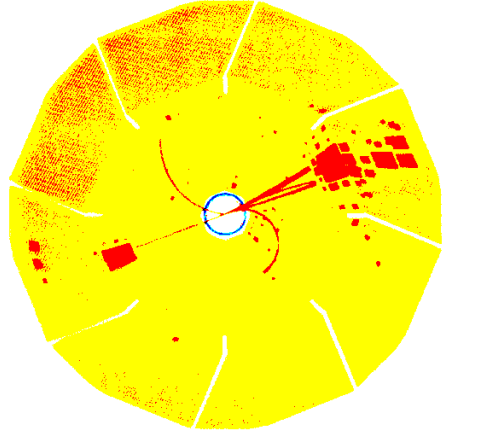
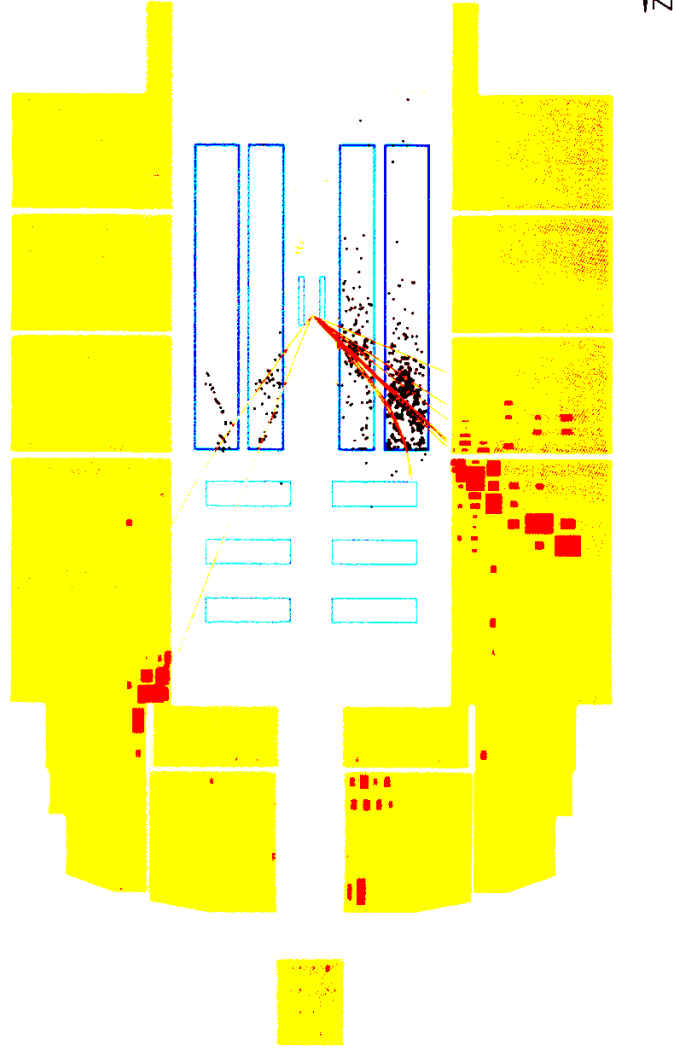
HERA



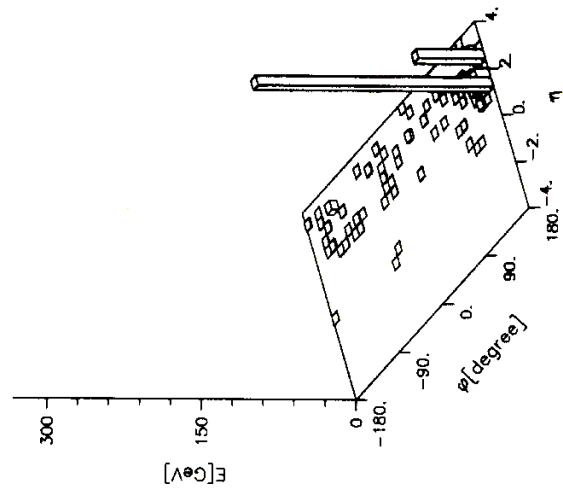
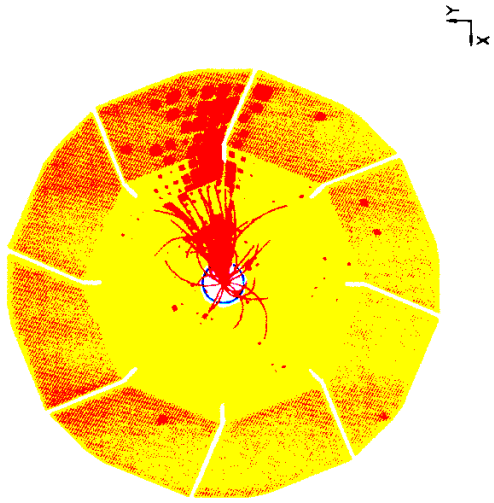
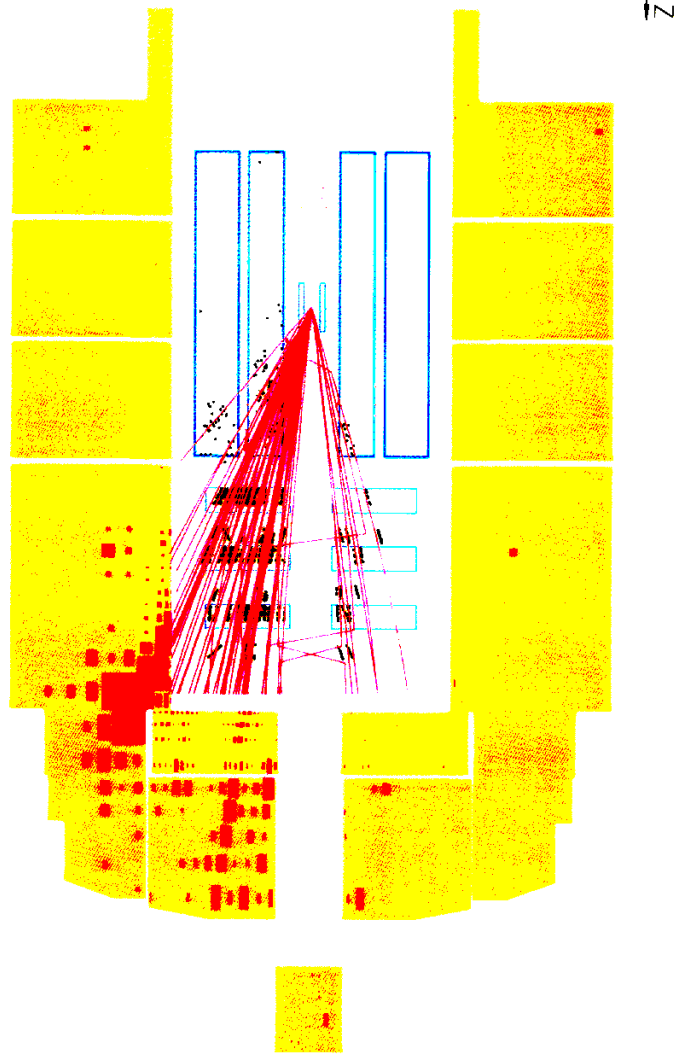
Das H1-Experiment



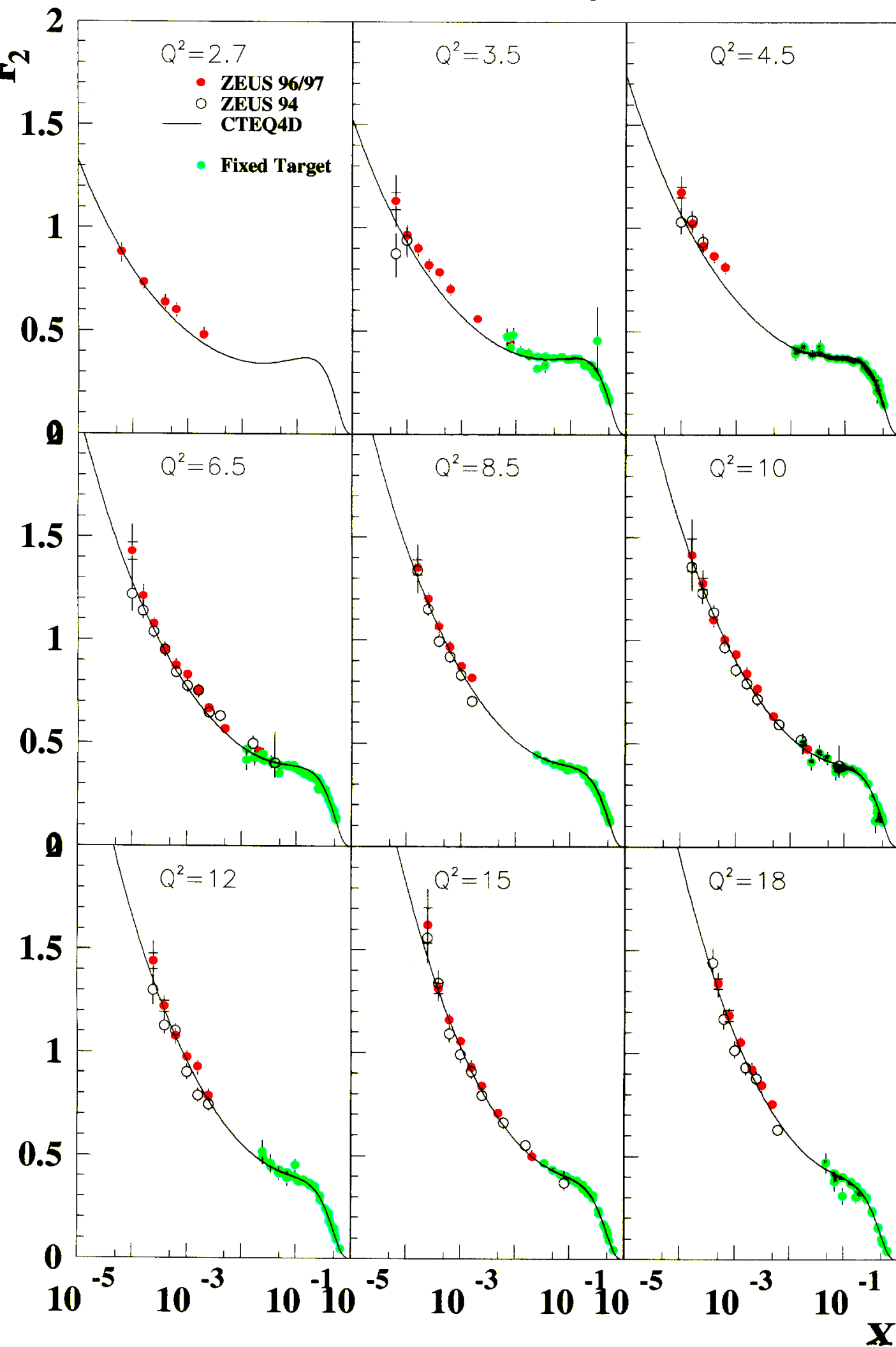
$Q^2 = 22068 \text{ GeV}^2, y = 0.74$



Pt=139 Q2=41067 x=0.77 y=0.53



ZEUS Preliminary 1996-97



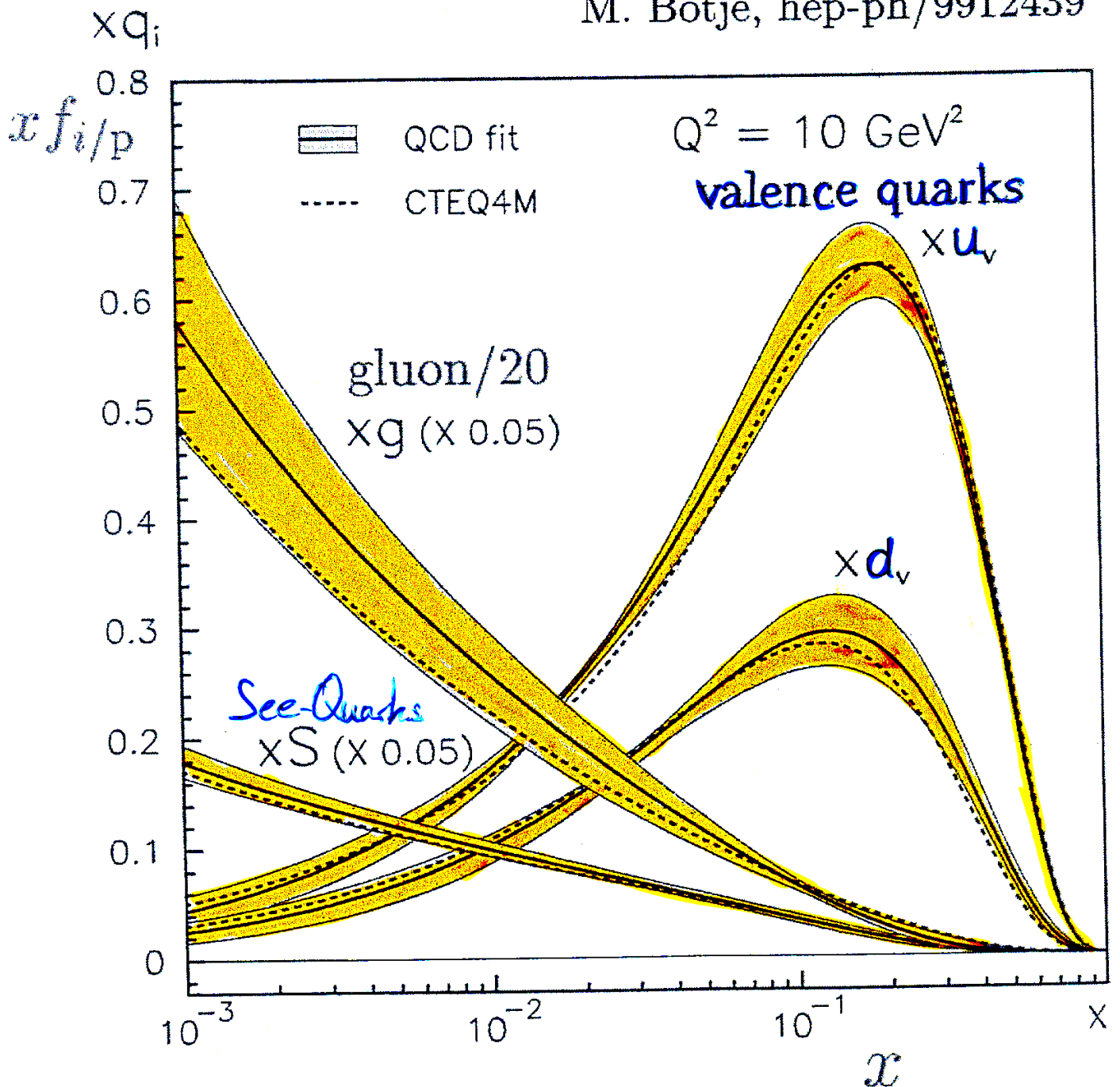
Partondichte im Proton

- ▶ Quarkdichten folgen aus:

$$F_2(x) = \sum_{i=u,d,s,c,b} e_i^2 \cdot f_i(x) + \sum_{i=\bar{u},\bar{d},\bar{s},\bar{c},\bar{b}}$$

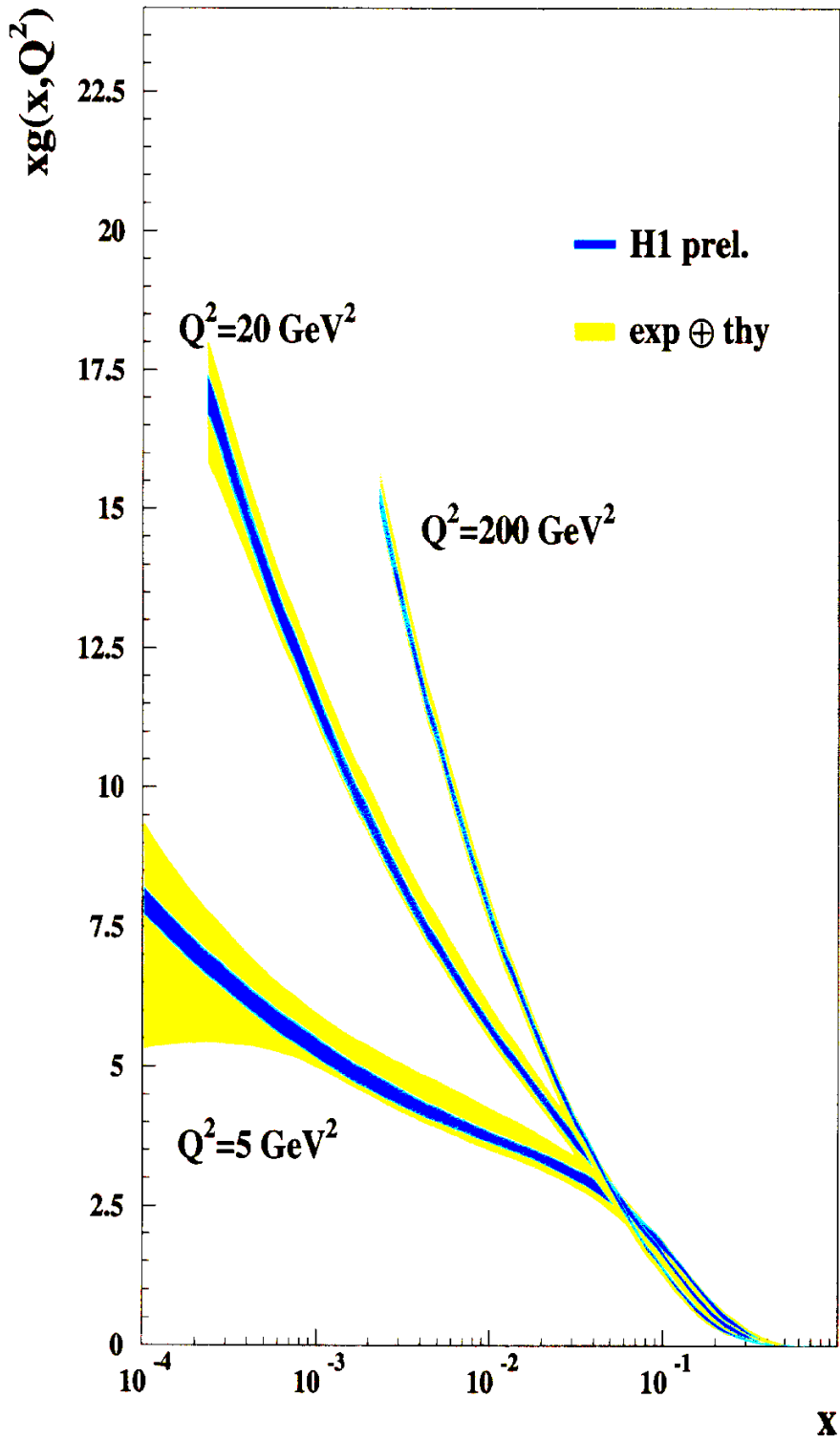
- ▶ Gluondichte ist schwieriger zu messen (nutzt $G \rightarrow c\bar{c}$ und Messung der charm Quarks)

M. Botje, hep-ph/9912439

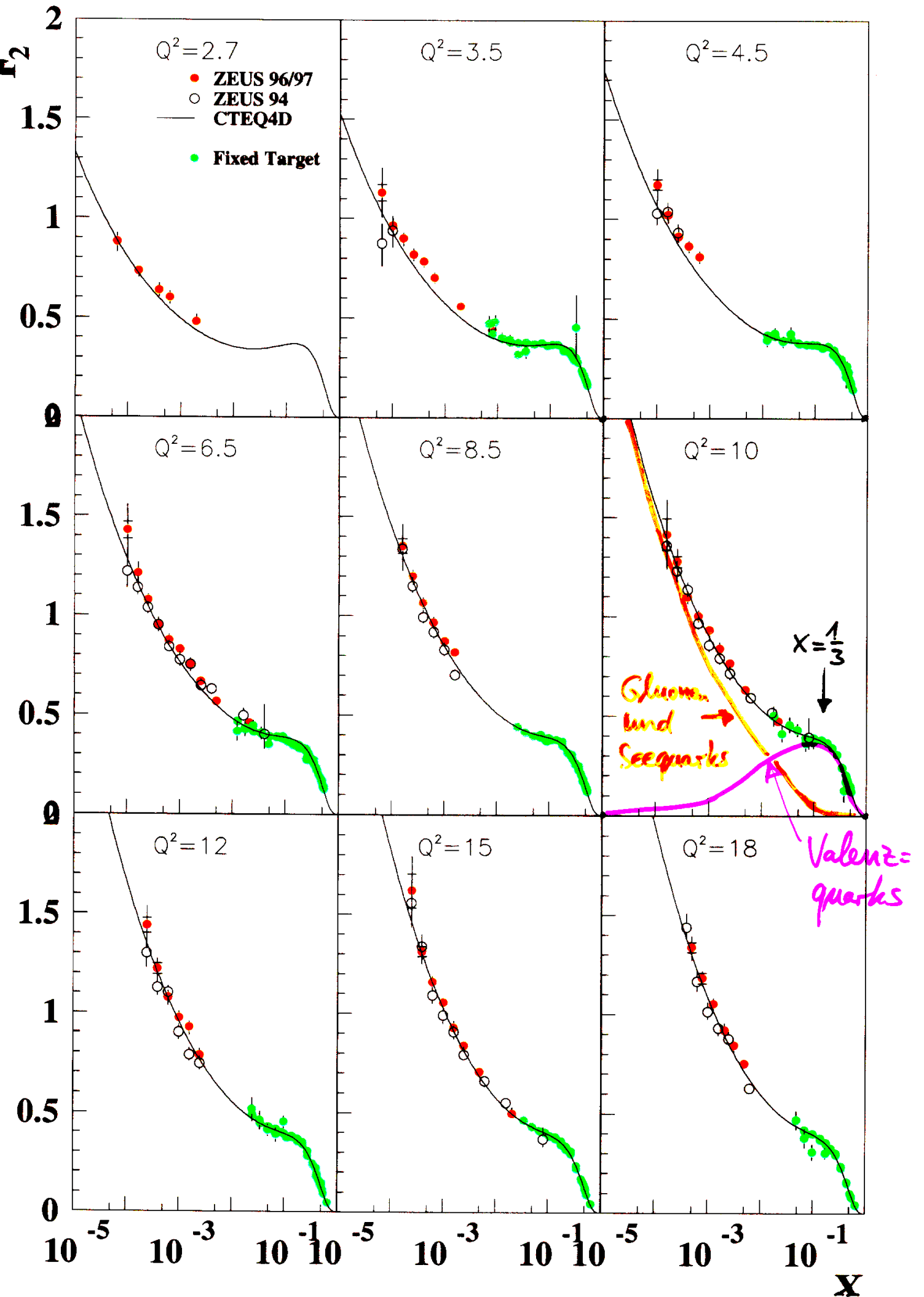


Gluonendichte im Proton

H1 96-97



ZEUS Preliminary 1996-97



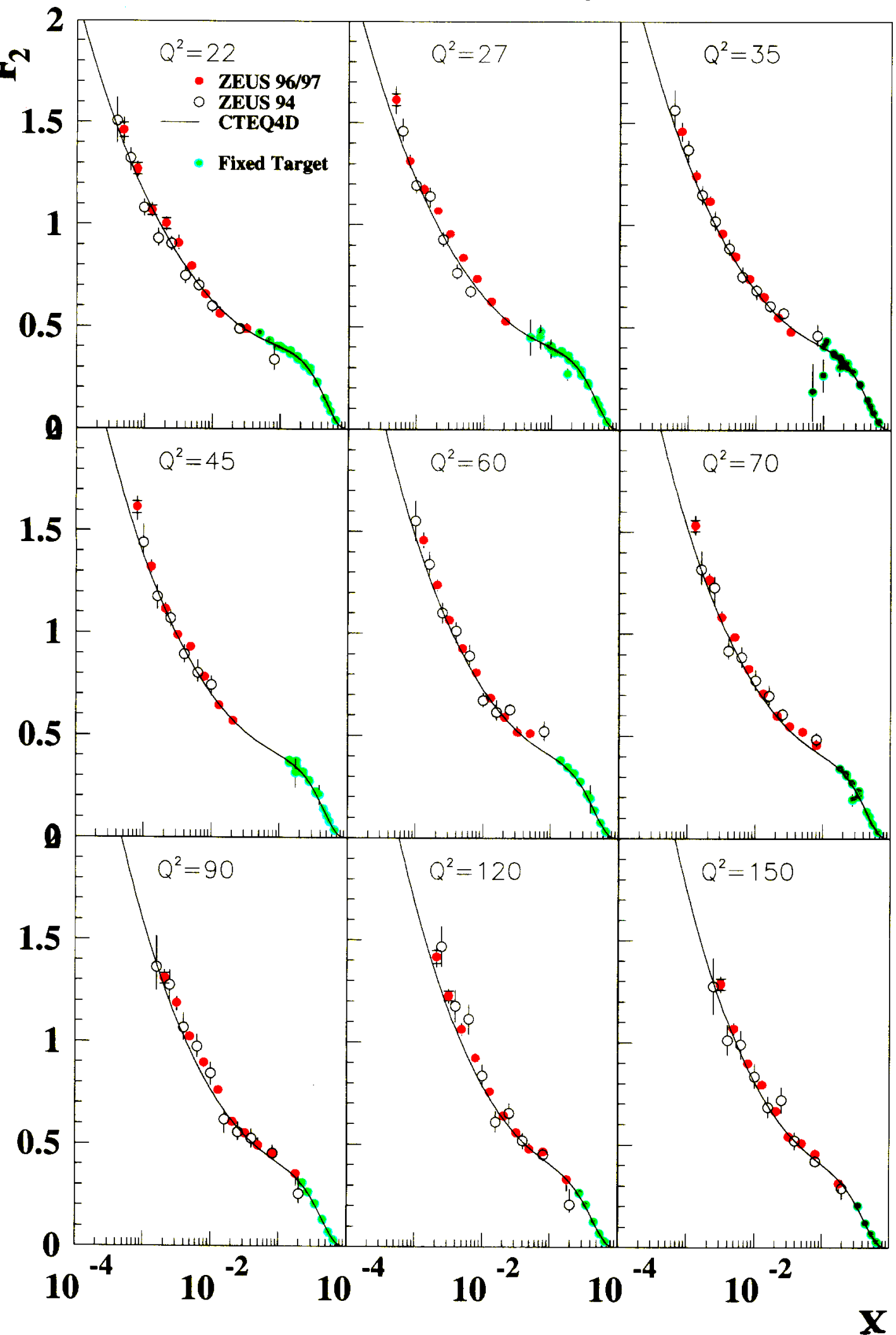
Konsequenzen aus Partondichten

- $\int dx \ x \cdot (u_v(x) + d_v(x)) = 0.59$

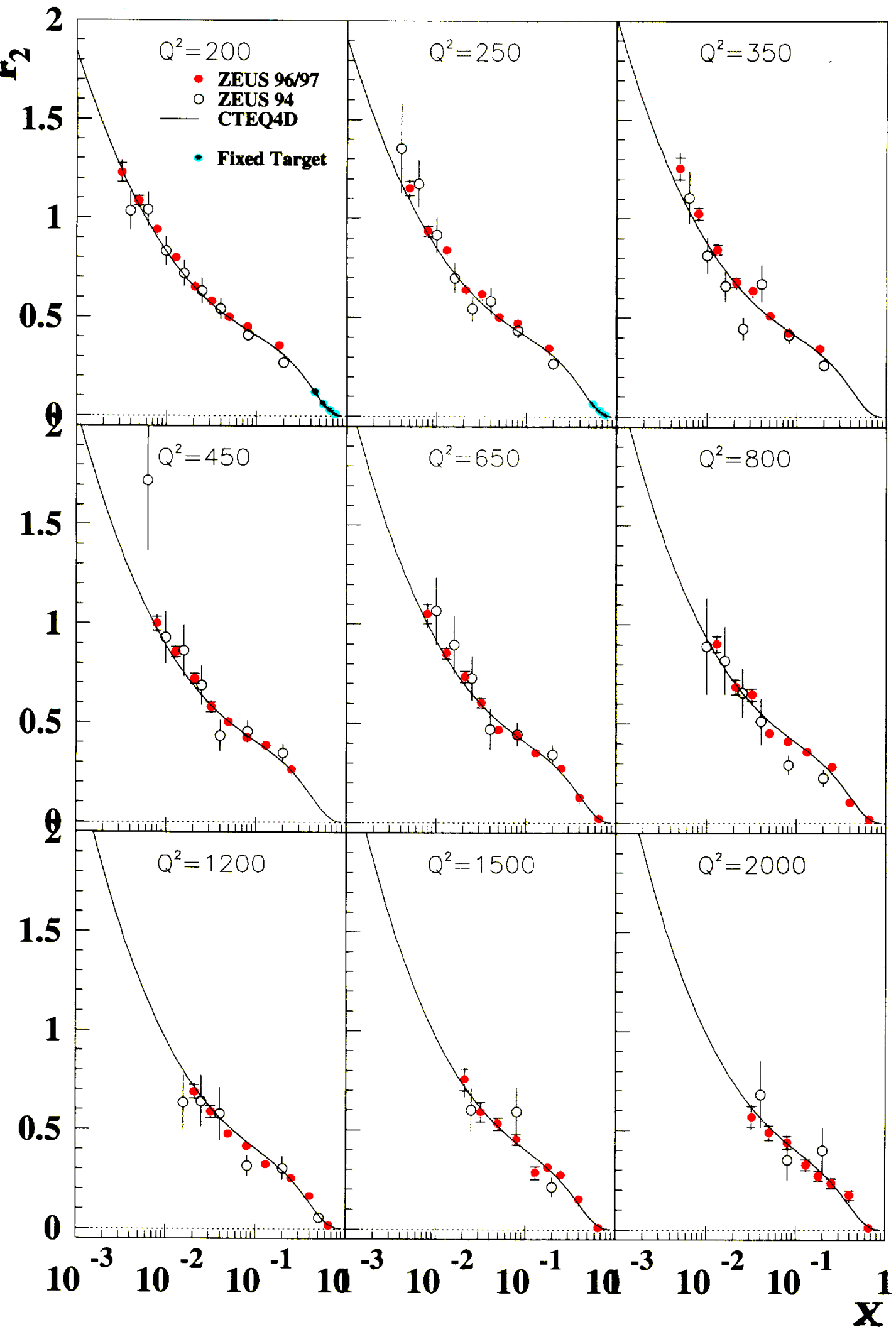
- $\int dx \ x \cdot g(x) = 0.41$

- ⇒ ■ Die Quarks tragen ca. 60% des Proton-
Impulses & -Energie
- Die Gluonen tragen ca. 40% von Proton-
Impuls & -Energie

ZEUS Preliminary 1996-97



ZEUS Preliminary 1996-97



Interpretation der Strukturfkt.

Parametrisierung:

$$F_2(x, Q^2) = a(x) \cdot \left[\ln \frac{Q^2}{\Lambda^2} \right]^{X(x)}$$

hadronische
Struktur

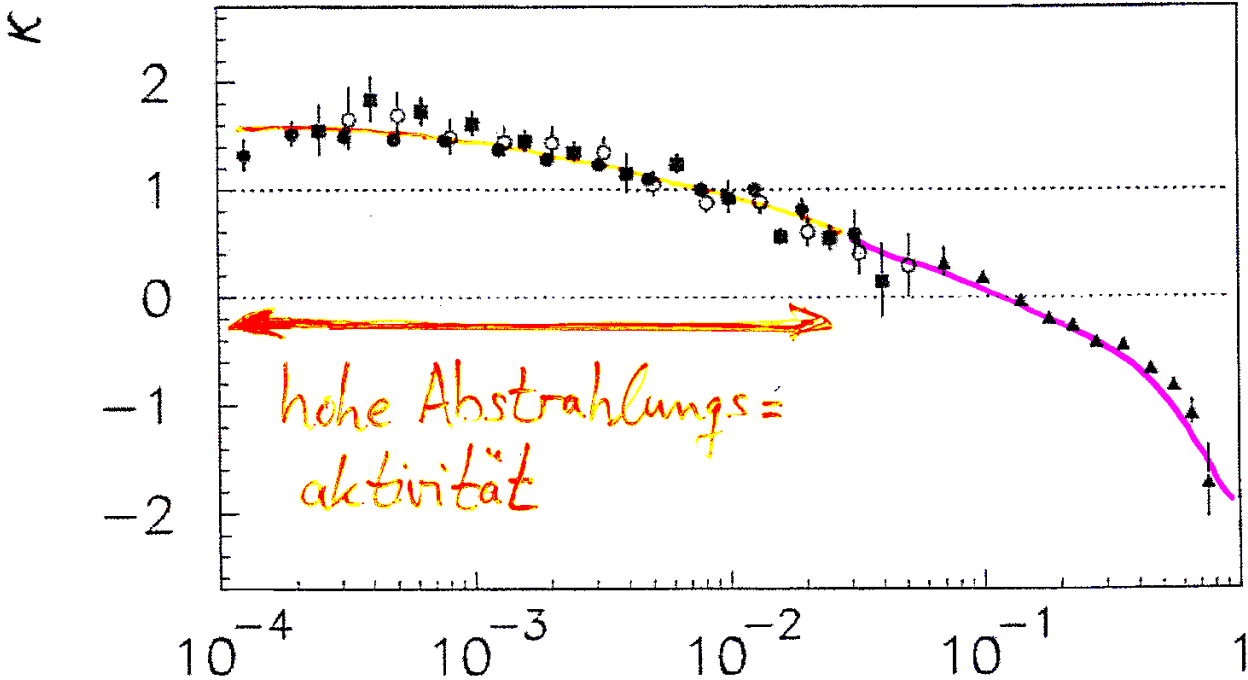
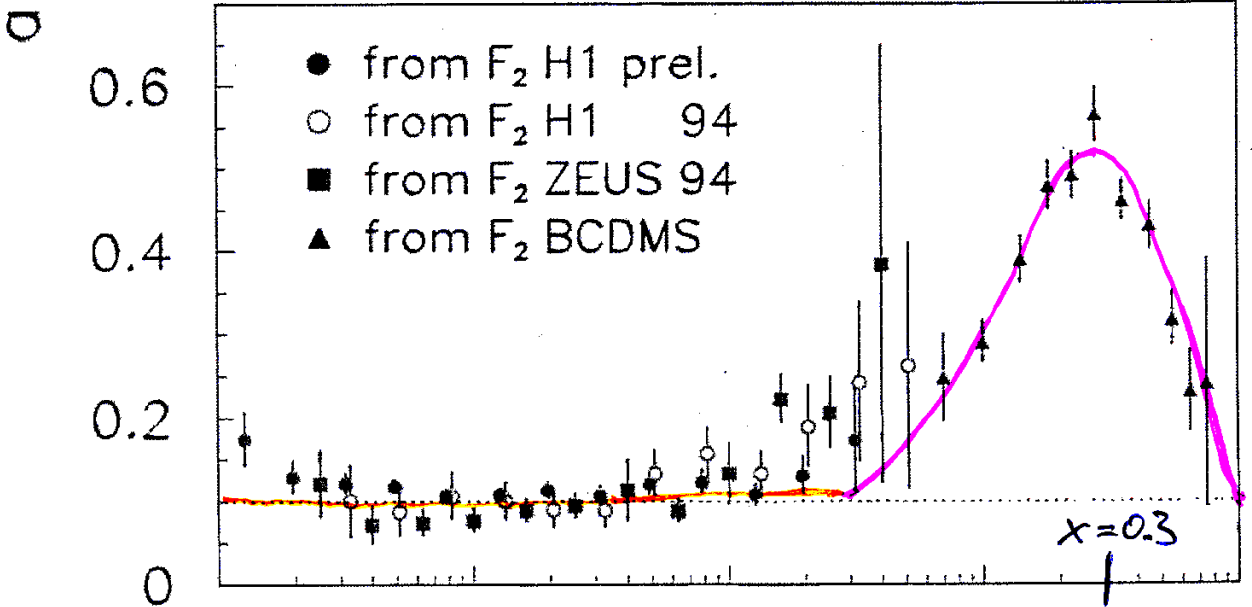
$$\sim \frac{1}{\alpha_s(Q^2)}$$

Strahlungs-
aktivität:



sea quarks

valence quarks



x

Photonstruktur

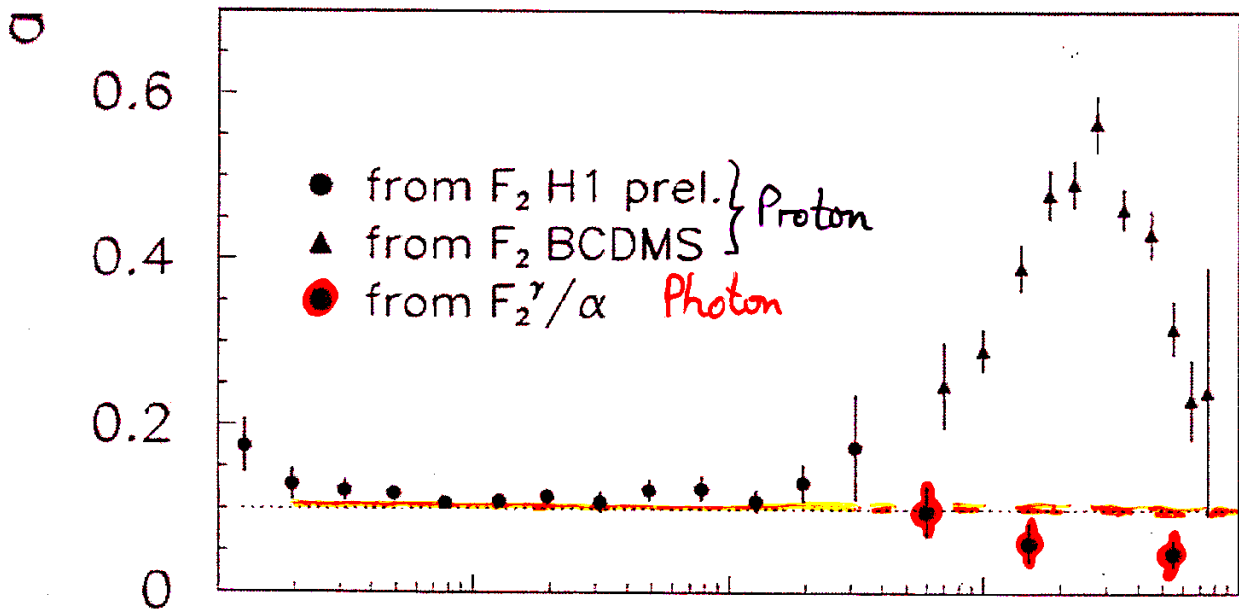
Photon:

$$|\gamma\rangle = |m\rangle + m \sum_{e^-} \frac{e^+}{e^-} |m\rangle + m \sum_{\bar{q}} \frac{q}{\bar{q}} |m\rangle + \dots$$

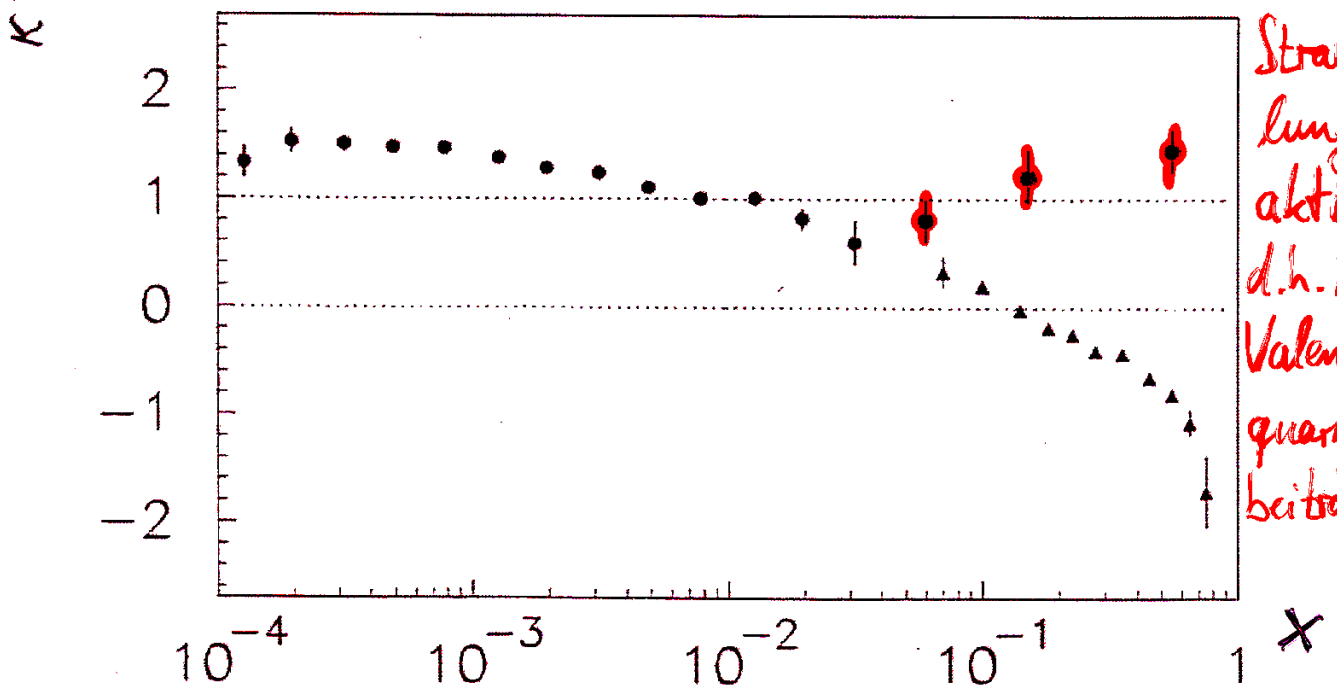
wird z.B. in e^+e^- -Streuung untersucht:



→ Photon-Strukturfunktion: $F_2^\gamma(x, Q^2) = a(x) \left[\ln \frac{Q^2}{\Lambda^2} \right]^{K(x)}$



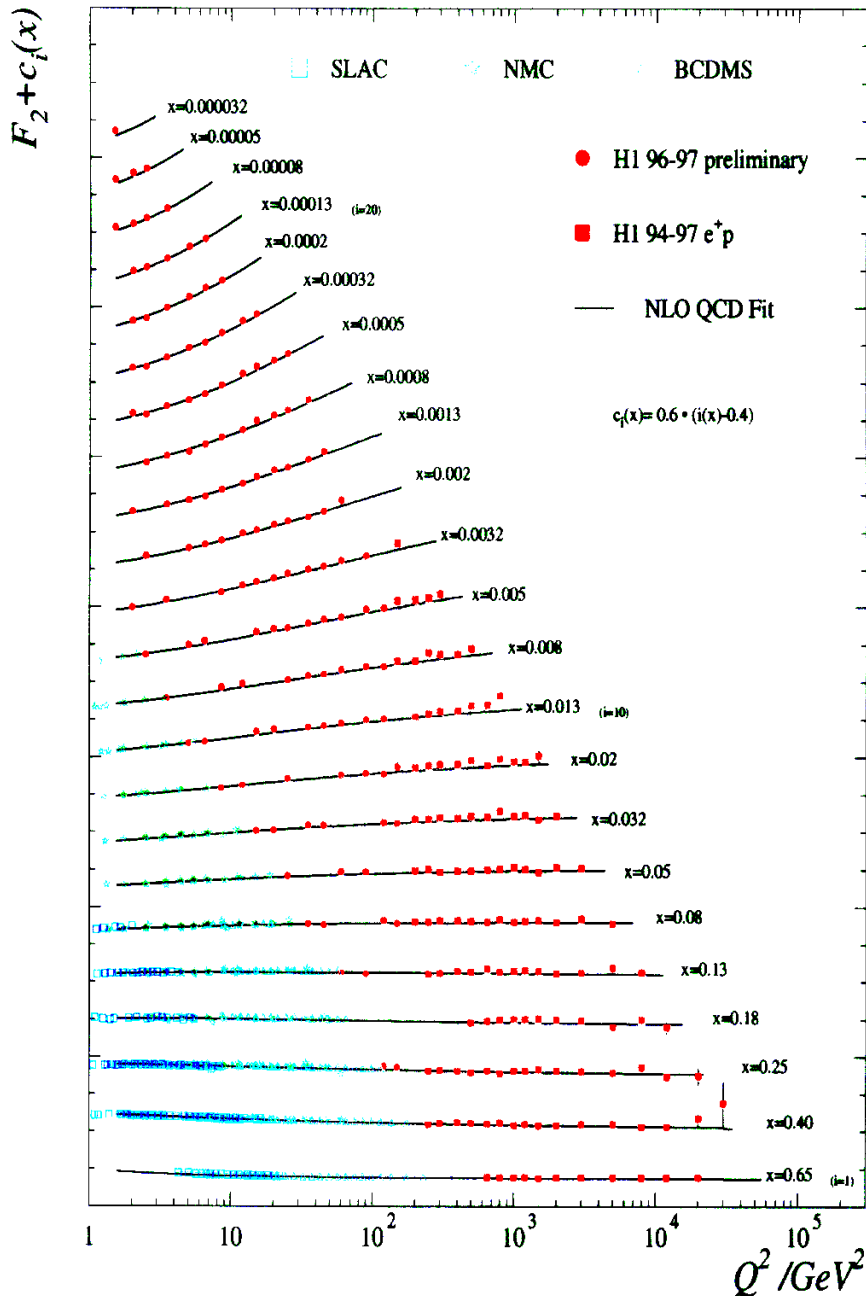
Photonstruktur stammt aus der Strahlungsaktivität, d.h. keine Valenzquarkbeiträge!



Verletzung des Bjorken Scalings

(und sehr groÙe)

Für sehr kleine x ist Bjorken Scaling
(= Unabhängigkeit der Strukturfkt. F von Q^2) verletzt:



⇒ Ursache der Verletzung ist die Energie =
abhängigkeit der Starken Kopplungs =
konstante $\alpha_s(Q)$, die so erstmals beobachtet
wurde.

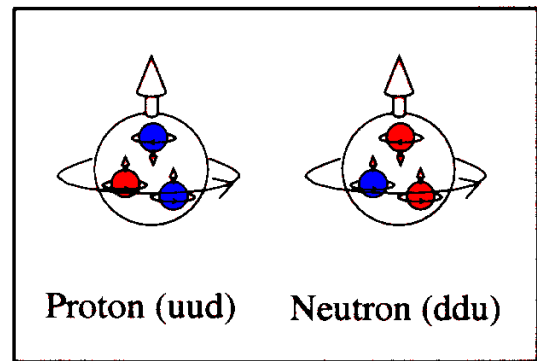
Spinstruktur des Protons

vgl. Erwartung des statischen Quarkmodells:

$$|p \uparrow\rangle = \frac{1}{\sqrt{18}} (2u \uparrow u \uparrow d \downarrow - u \uparrow u \downarrow d \uparrow - u \downarrow u \uparrow d \uparrow) + \text{Permutationen}$$

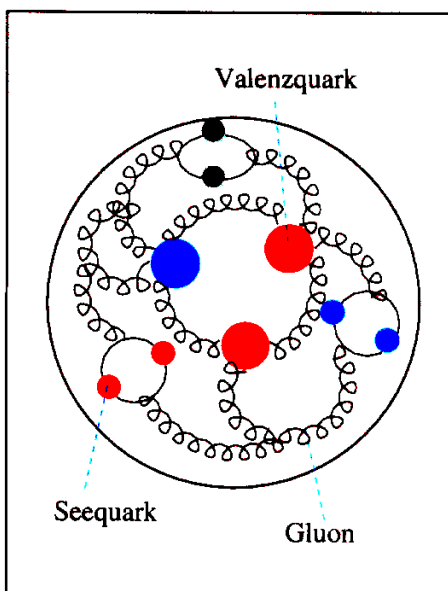
Auch Gluonen und See-Quarks können zum Gesamts spin beitragen. Tatsächlich zeigen Messungen, daß die Valenzquarks nur ca. 30% des Spins des Protons ausmachen, See-Quarks tragen fast gar nicht zum Proton spin bei. Der Gluonbeitrag ist noch nicht präzise gemessen worden, liegt aber bei ca. 0.4 * Gluondichte. Außerdem kann der Bahndrehimpuls der Valenzquarks zum Spin beitragen (⊙). Präzise Messungen werden derzeit vom HERMES Experiment am HERA-Beschleuniger erhofft.

Im einfachsten Bild, dem Quark-Parton-Modell, werden alle Eigenschaften des Nukleons dadurch erklärt, daß man es sich aus drei Quarks aufgebaut denkt, die man **Valenzquarks** nennt.



Das Proton (zwei u-Quarks, ein d-Quark) und das Neutron (zwei d-Quarks, ein u-Quark) verhalten sich fast wie Spiegelbilder. Der Spin jedes Quarks ist $\frac{1}{2}$. Wenn jeweils zwei davon gleich gerichtet sind, das dritte entgegen, summieren sie sich wie Vektoren zum Nukleonenspin von $\frac{1}{2}$.

Tatsächlich aber tragen die Valenzquarks wenig zum Spin der Nukleonen bei. Ihre Struktur ist komplizierter:

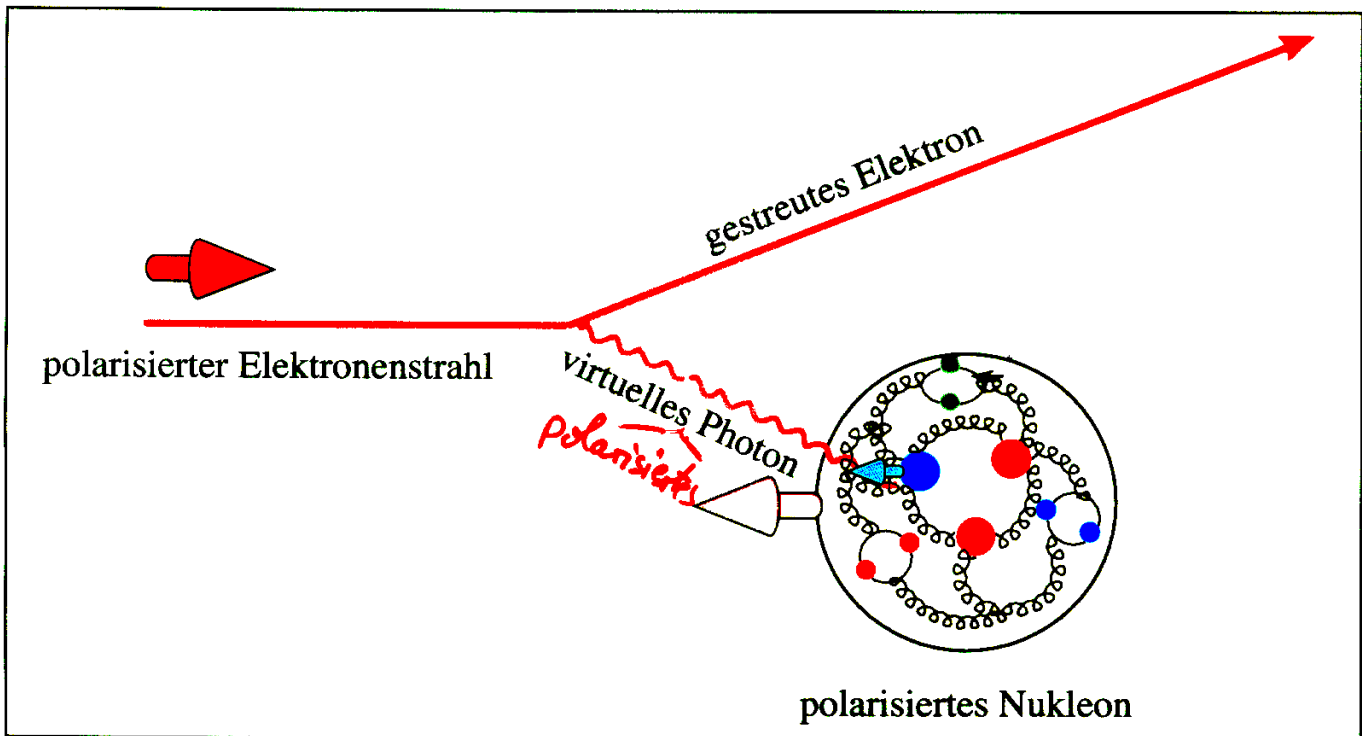


Die Valenzquarks schwimmen gewissermaßen in einem See aus kurzlebigen Quark-Antiquark-Paaren, zwischen denen starke Kräfte durch **Gluonen** vermittelt werden. Die **Valenzquarks**, die **Seequarks** und die **Gluonen** tragen jeweils ihren eigenen Spin. Zusätzlich können sie durch Bewegungen umeinander einen **Bahndrehimpuls** haben.

Aus all diesen Komponenten setzt sich der Spin eines Nukleons zusammen. Sie zu trennen und zu bestimmen ist das Ziel des HERMES Experimentes.

Tiefunelastische Streuung

Die Struktur der Nukleonen untersucht man in der sogenannten **tiefunelastischen Streuung**, die nicht am Nukleon als ganzen Objekt, sondern an einem seiner Quarks stattfindet. Die eigentliche Wechselwirkung geschieht durch ein **virtuelles Photon**, das zwischen Elektron und Quark ausgetauscht wird.

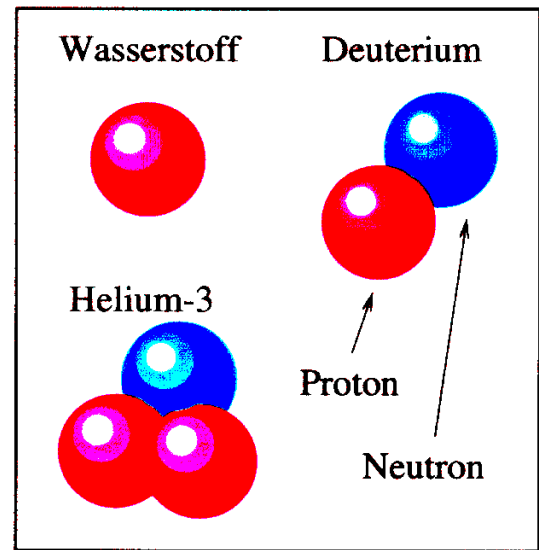


Das Elektron kann nur mit einem Quark wechselwirken, dessen Polarisation seiner eigenen entgegengerichtet ist. Durch das Aussenden des virtuellen Photons wird das Elektron von seiner Bahn abgelenkt und kann im **Spektrometer** nachgewiesen werden.

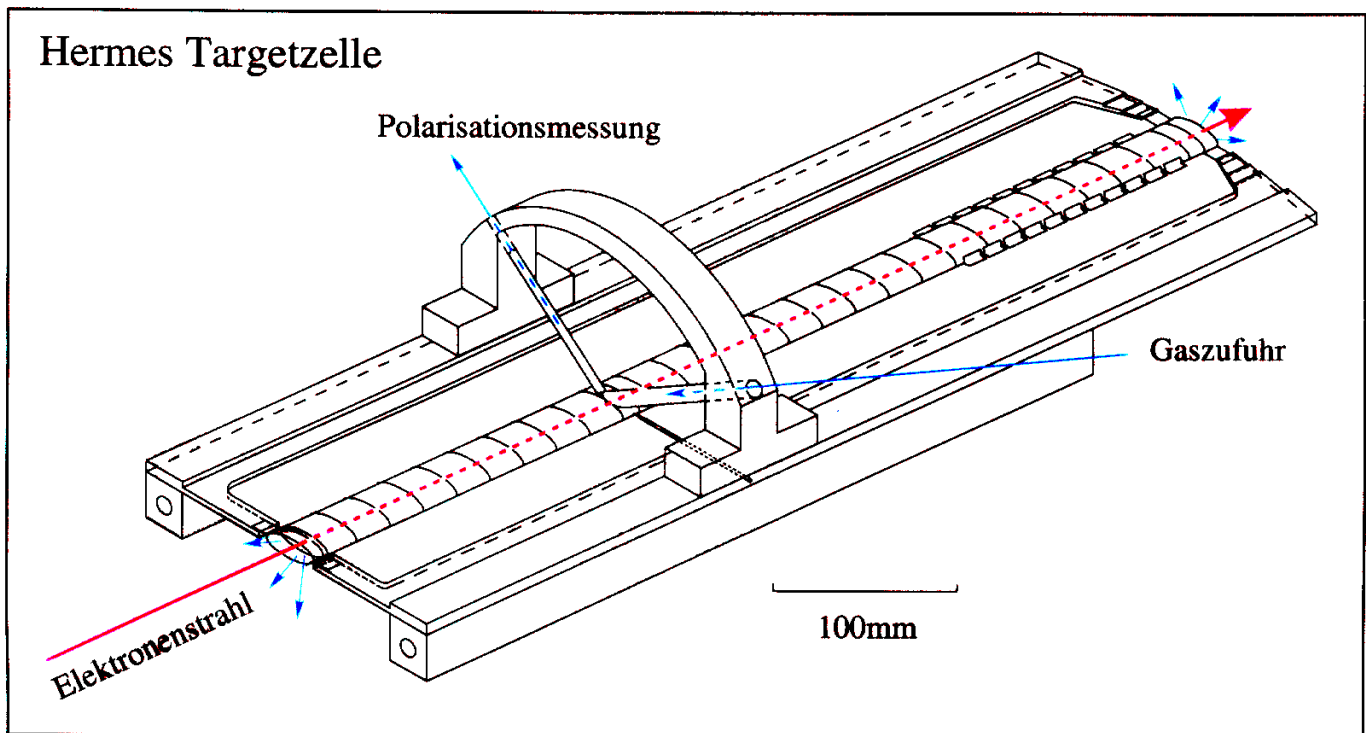
Dreht man die Targetpolarisation um, ändert sich die Wahrscheinlichkeit für die Streuung. So ergibt sich für die beiden Einstellungen der Targetpolarisation eine **spinabhängige Asymmetrie** der Meßwerte, die auf die Verteilung des Spins im Nukleon schließen läßt.

Das polarisierte Target

Um die Spinstruktur des Protons zu messen, verwendet HERMES ein Target aus polarisierten Wasserstoff, dessen Atomkern aus nur einem Proton besteht. Zur Bestimmung der Spinstruktur des Neutrons dienen Deuterium und Helium-3, die je ein Neutron und ein bzw. zwei Protonen enthalten.

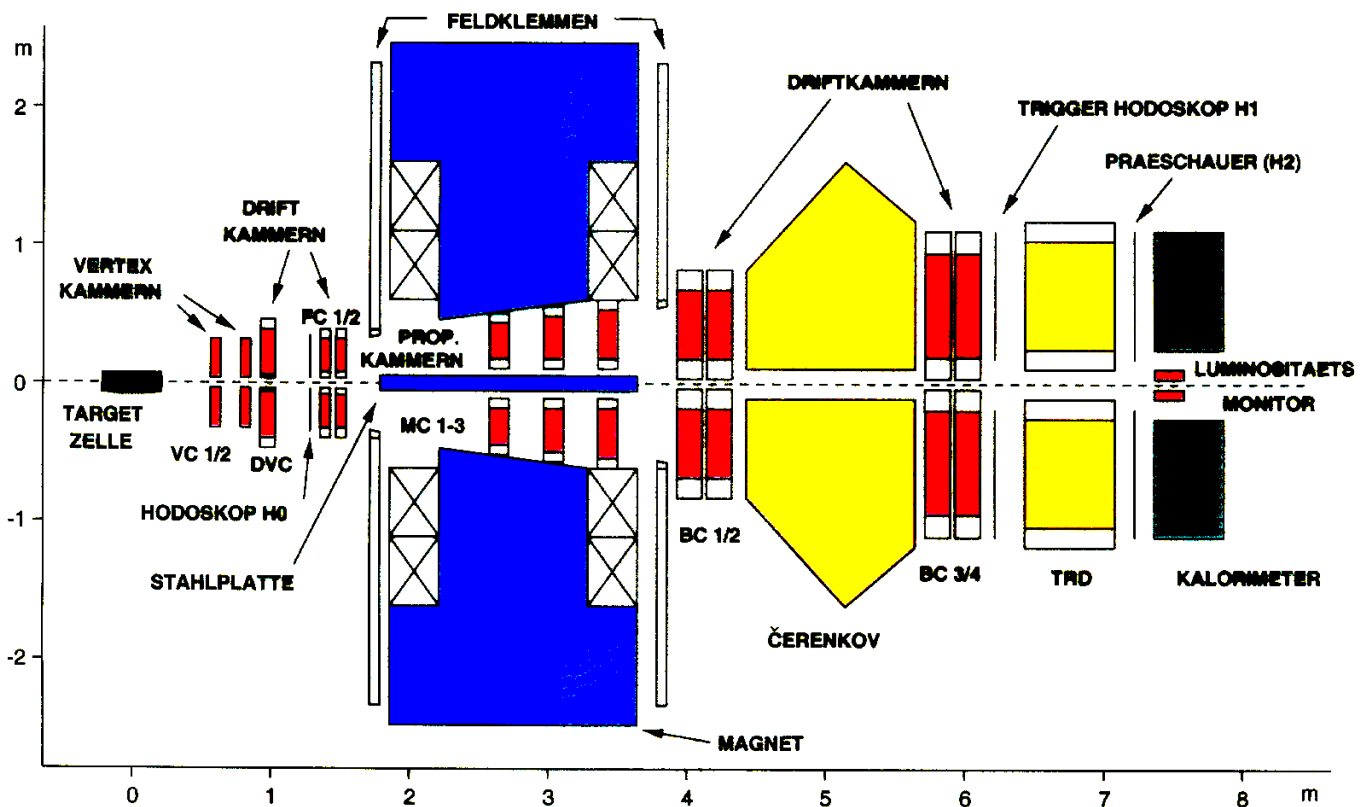


Die Gase werden in einer aufwendigen Apparatur polarisiert und mit sehr geringem Druck in die abgebildete fensterlose Targetzelle eingeleitet, die sich im Vakuum im Innern des HERA-Strahlrohres befindet und die vom Elektronenstrahl durchquert wird.



Nach einigen tausendstel Sekunden verlassen die Atome die Zelle durch die offenen Enden und werden abgepumpt. Im Betrieb muß darum für einen stetigen Gasfluß gesorgt werden.

Mit dem **Spektrometer** wird für jedes gestreute Elektron sein Streuwinkel, seine Ladung, sein Impuls und seine Energie gemessen. Da bei der Streuung auch weitere Teilchen entstehen können, erlauben spezielle Detektoren die Unterscheidung zwischen Elektronen und Hadronen³.



Jeder der Detektoren erfüllt eine der genannten Teilaufgaben:

- **Spurkammern** zur Vermessung der Teilchenbahn
- **Magnetfeld** zur Ladungs- und Impulsbestimmung
- **Kalorimeter** für die Energiemessung
- **Detektoren** zur Teilchenidentifikation
- **Schnelle Triggerdetektoren**

³Hadronen sind alle Teilchen, die sich aus Quarks zusammensetzen.

Fazit

Das Proton hat eine überaus reiche und komplizierte Struktur verglichen mit dem, was man vom statischen Quarkmodell erwartet hätte:

- Quarks tragen ~60% des Protonimpuls
- Gluonen tragen ~40%
- Das Proton ist mit sehr, sehr vielen niederenergetischen Gluonen aufgefüllt
- Auch niedrenergetische See-Quarks tragen erheblich zur Reichhaltigkeit der Protonstruktur bei
- Das Zustandekommen des Protonspins gibt noch Rätsel auf. Valenzquarks tragen mit ca 40% bei; See-Quarks gar nicht. Der Gluonbeitrag ist noch ungewiß. Auch eine kollektive Rotation der Valenzquarks könnte einen Beitrag zum Protonspin leisten.