

# Kerne und Teilchen

**Moderne Experimentalphysik III**  
**Vorlesung 8**

MICHAEL FEINDT  
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

## Quarks, Gluonen, Hadronen

# Quarks im Standardmodell

- Nukleonen bestehen aus geladenen, pkt.förmigen Teilchen mit Spin  $\frac{1}{2}$ . Baue Eigenschaften der Nukleonen aus den Konstituenten auf:

## Quarks

		u	d	p	n
Ladung	z	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	<b>1</b>	<b>0</b>
Isospin	l	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	$l_3$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$
Spin	s	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$

↑ erfordert mindestens 3 Quarks im Nukleon

**uud**   **udd**

Drittelzahlige Ladungen korrekt, aber noch nicht eindeutig.

Weitere Hinweise:

$$\Delta^{++} = uuu$$

$$\Delta^+ = uud$$

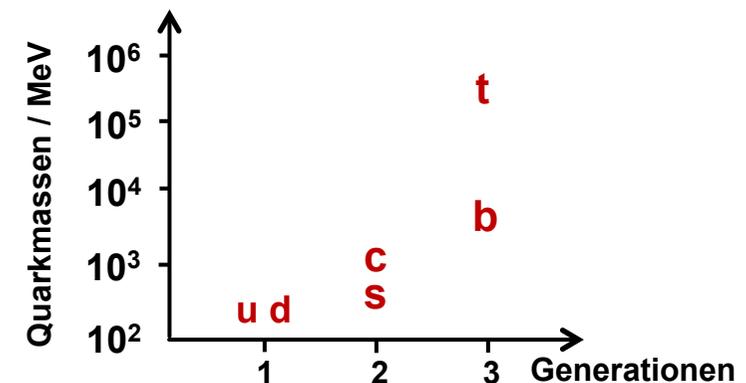
$$\Delta^0 = udd$$

$$\Delta^- = ddd$$

~~$\Delta^{--}$~~  existiert nicht

- Es gibt insgesamt **6 Quarks**

$Z_f = +\frac{2}{3}$	<b>u</b>	<b>c</b>	<b>t</b>
$Z_f = -\frac{1}{3}$	<b>d</b>	<b>s</b>	<b>b</b>
Familie	1.	2.	3.



# Strukturfunktionen und Quarkladungen

$$F_2^{e p}(x) = x \cdot [ 1/9 (\mathbf{d}_v^p + d_s + \bar{d}_s) + 4/9 (\mathbf{u}_v^p + u_s + \bar{u}_s) + 1/9 (s_s + \bar{s}_s) ]$$

$$F_2^{e n}(x) = x \cdot [ 1/9 (\mathbf{d}_v^n + d_s + \bar{d}_s) + 4/9 (\mathbf{u}_v^n + u_s + \bar{u}_s) + 1/9 (s_s + \bar{s}_s) ]$$

**v** : Valenzquarks

Isospin – Symmetrie:  $p \leftrightarrow n$  entspricht  $u \leftrightarrow d$  – Vertauschung

also:  $\mathbf{u}_v^p = \mathbf{d}_v^n$

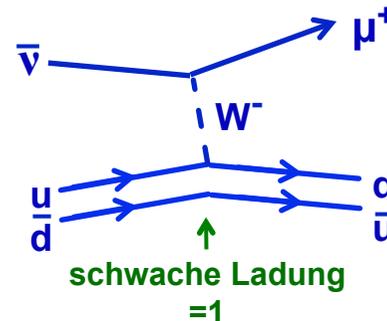
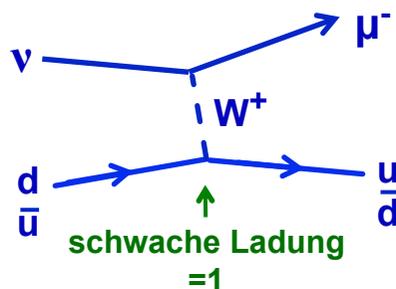
$\mathbf{d}_v^p = \mathbf{u}_v^n$

$$\begin{aligned} F_2^{eN}(x) &= \frac{1}{2} (F_2^{ep} + F_2^{en}) \\ &= \frac{1}{2} x \cdot [ \frac{1}{9} \mathbf{d}_v^p + \frac{1}{9} d_s + \frac{1}{9} \bar{d}_s + \frac{4}{9} \mathbf{u}_v^p + \frac{4}{9} u_s + \frac{4}{9} \bar{u}_s \\ &\quad + \frac{1}{9} \mathbf{u}_v^p + \frac{1}{9} d_s + \frac{1}{9} \bar{d}_s + \frac{4}{9} \mathbf{d}_v^p + \frac{4}{9} u_s + \frac{4}{9} \bar{u}_s + \frac{2}{9} (s_s + \bar{s}_s) ] \\ &= \frac{1}{2} x \cdot [ \frac{1}{9} (d + \bar{d}) + \frac{4}{9} (d + \bar{d}) + \frac{1}{9} (u + \bar{u}) + \frac{4}{9} (u + \bar{u}) + \frac{2}{9} (s + \bar{s}) ] \\ &= \frac{5}{18} x \cdot \underbrace{[ u + \bar{u} + d + \bar{d} ]}_{\text{Valenz- und See-Quarks}} + \frac{1}{9} x \cdot \underbrace{[ s + \bar{s} ]}_{\text{klein nur See-Quarks}} \end{aligned}$$

# Strukturfunktionen

- s-Quarks vernachlässigen  $\Rightarrow F_2^{eN}(x) = \boxed{5/18} \times \Sigma(q(x)+\bar{q}(x))$   
 $\langle z_f^2 \rangle = \frac{1}{2}(z_u^2 + z_d^2) = \frac{1}{2}\left(\left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2\right)$  mit  $f = u, d$

- vgl. Neutrino-Streuung + Antineutrino-Streuung:



$$F_2^{\nu, \bar{\nu} N}(x) \approx \frac{18}{5} \cdot F_2^{eN}(x)$$

$\Rightarrow$  siehe später : schwache WW

- $q_v(x)$  hat Maximum bei  $x \approx 0.17$

mittlerer Impulsanteil eines Valenzquarks:  $\langle x_v \rangle \approx 0.12$

mittlerer Impulsanteil eines Seequarks:  $\langle x_s \rangle \approx 0.04$

$$\int_0^1 F_2^{\nu N}(x) dx \approx \frac{18}{5} \int_0^1 F_2^{eN}(x) dx \approx 0.5$$

d.h. weitere 50% des Nukleonimpulses wird von Teilchen getragen, die keine elektrische und keine schwache Ladung tragen.

$\Rightarrow$  **Glukonen tragen die Hälfte des Nukleonimpulses**

# Strukturfunktionen

- Bilde  $F_2^n / F_2^p$  und untersuche Grenzfälle:

$$x \rightarrow 0 : \quad F_2^n / F_2^p = 1 \quad \Leftrightarrow \text{Seequarks dominieren} \\ \text{sind gleich in p und n}$$

$$x \rightarrow 1 : \quad F_2^n / F_2^p = \frac{1}{4} = z_d^2 / z_u^2 \quad , \text{ nicht } = \frac{2}{3} = \frac{2z_d^2 + z_u^2}{z_d^2 + 2z_u^2}$$

⇒ Quarks spielen nicht die gleiche Rolle im Nukleon; das  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$ , das  $\begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}$  unterscheidet, hat eine Sonderrolle (mehr Impuls).  
Die Zusammenhänge sind noch nicht sehr gut verstanden.

# Quarks in Hadronen



- Experimenteller Befund: Anzahl der Baryonen - Anzahl der Antibaryonen ist bei jeder Reaktion konstant.

$$N_B - N_{\bar{B}} = \text{konstant}$$

- Def. Baryonenzahl:
 

B = +1 für Baryonen	B = -1 für Antibaryonen
= +1/3 für q	= -1/3 für $\bar{q}$

Baryonenzahlerhaltung:  $\Sigma B = \text{konstant}$

Bsp.: Protonenzerfall "verboten", da p = leichtestes Baryon mit B=1

# leichte Hadronen

- leichteste Hadronen: Pionen
  - Mesonen mit  $m \approx 140$  MeV
  - Isospin-Triplett (  $I=1$  ) :  $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$

Zerfall nur in Leptonen oder Photonen möglich:

$\pi^+$	$=$	$u \bar{d}$	$\rightarrow$	$\mu^+ \nu$	<b>schwach</b>
$\pi^-$	$=$	$\bar{u} d$	$\rightarrow$	$\mu^- \nu$	<b>schwach</b>
$\pi^0$	$=$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$	$\rightarrow$	$\gamma \gamma$	<b>e.m.</b>

$\uparrow$   
 Flavour – Wellenfunktion  
 (Quark-Zusammensetzung)

- Isoskalarer Partner des  $\pi^0$  :  $\eta^8 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d})$   
 ist ein anderes Teilchen (andere Masse, Lebensdauer, Zerfallsmoden etc.)
- Mesonen haben Baryonenzahl 0 :  $B = 3 \cdot (\#q + \#\bar{q}) = 0$

# Quark – Gluon – Wechselwirkung

- Betrachte Pauli – Prinzip für 3-Quark-Systeme

z.B.:  $\Delta^{++}$ ,  $J^P = 3/2^+$ ,  $m = 1230$  MeV:

$\Rightarrow$  leichtestes Baryon mit diesen Quantenzahlen  $\Rightarrow$  Grundzustand: Bahndrehimpuls  $L=0$   $\Rightarrow$  Ortswellenfunktion symmetrisch

- Spinwellenfunktion:  $\uparrow\uparrow\uparrow$  symmetrisch
- Flavour – Wellenfunktion:  $uuu$  symmetrisch

$\Rightarrow$  Gesamtwellenfunktion symmetrisch unter Austausch zweier Quarks?  
 Aber  $J=3/2$  : Verstoß gegen Pauli-Prinzip

- Betrachte WQ für Reaktion  $e^+ e^- \rightarrow q_f \bar{q}_f$ , vgl. mit WQ ( $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$ )  
 (f = u,d,s,c...)

$$R = \frac{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \text{Hadronen})}{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-)} = \frac{\sum_f \sigma(e^+ e^- \rightarrow q_f \bar{q}_f)}{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-)} = n_c \cdot \sum_f z_f^2$$

exp:  $n_c = 3$

außerhalb von Resonanzen alle Hadronen in  $\Sigma_f$  mitnehmen, die kinematisch erlaubt sind (nicht zu schwer sind)

$\Downarrow$   
**Quarks gibt es in 3 unterscheidbaren Arten**

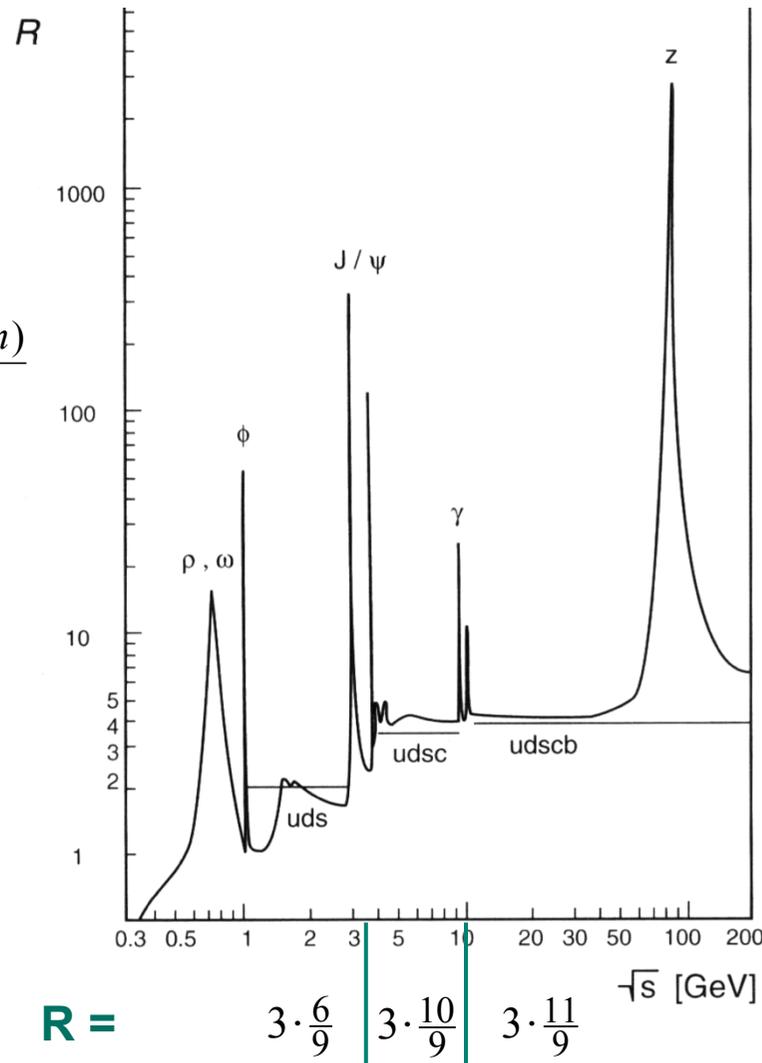
# Evidenz für 3 Farben

Referenz für  
Streuung punkt-  
förmiger Teilchen:  
 $\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$

$$= n_c \cdot \sum_{f(\sqrt{s})} z_f^2$$

↑  
zugänglicher Bereich je  
nach Schwerpunktsenergie

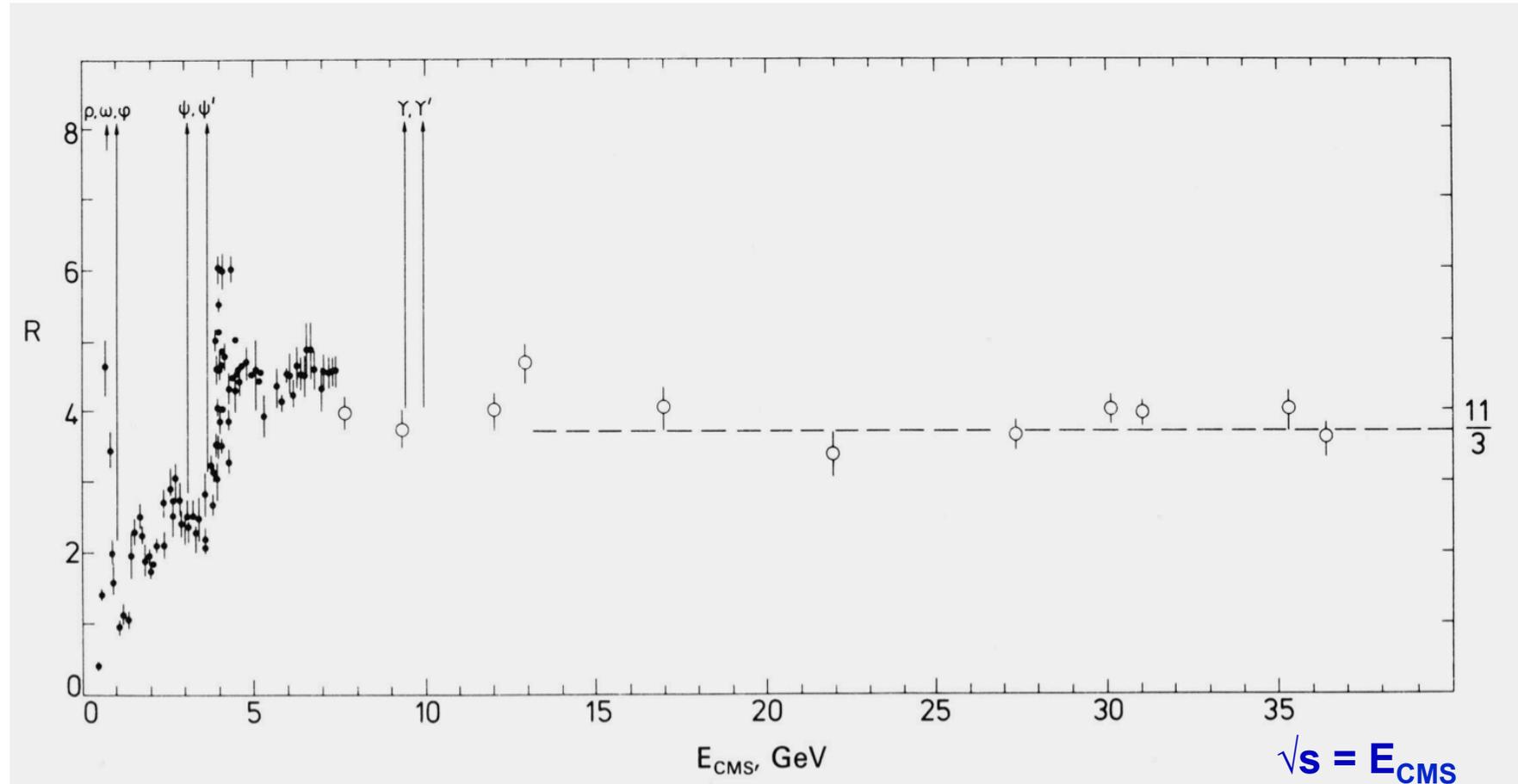


- $e^+e^- \rightarrow$  Hadronen = inkohärente Summe von unterscheidbaren Endzuständen  
 $e^+e^- \rightarrow q_{f,c} \bar{q}_{f,c}$
- Fragmentation (Hadronisation)  
 $q \rightarrow$  Hadronen mit Wahrscheinlichkeit 100%

⇒ Anzahl der Farben (N-colour):  
 **$N_c = 3$**

[Quelle: Povh, Teilchen und Kerne]

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = n_c \cdot \sum_{f(\sqrt{s})} z_f^2$$



# Quarks und Farbe

- Mit 3 farbigen Quarks kann eine antisymmetrische Wellenfunktion konstruiert werden:

**r      g      b**

Quarks tragen Farbe (Triplet  $\mathbb{3}$ )

Antiquarks tragen Antifarbe (Anti-Triplet  $\bar{\mathbb{3}}$ )

Alle beobachteten Hadronen sind farblos (Farb-Singletts)

Mesonen:  $\mathbb{3} \times \bar{\mathbb{3}} \rightarrow \mathbb{1} + \mathbb{8}$

Baryonen:  $\mathbb{3} \times \mathbb{3} \times \mathbb{3} \rightarrow \mathbb{1} + \mathbb{8} + \mathbb{8} + \mathbb{10}$

**SU(3) - Gruppentheorie**

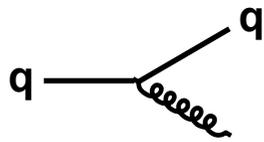
- 8 Gluonen tragen Farbe und Antifarbe (Colour – Oktett  $\mathbb{8}$ )

z.B.  $r\bar{g}$ ,  $r\bar{b}$ ,  $g\bar{b}$ ,  $g\bar{r}$ ,  $b\bar{r}$ ,  $b\bar{g}$ ,  $\frac{r\bar{r} - g\bar{g}}{\sqrt{2}}$ ,  $\frac{r\bar{r} + g\bar{g} - 2b\bar{b}}{\sqrt{6}}$

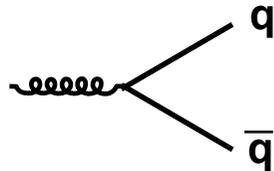
Können untereinander koppeln, weil sie selbst geladen sind.

Sonst analog zum Photon: masselos,  $J^P = 1^-$  (Vektorboson)

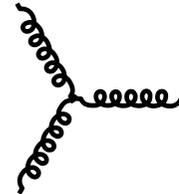
# Wechselwirkungen zw. Quarks und Gluonen



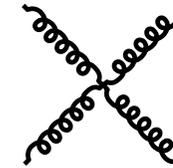
Gluon-Abstrahlung vom Quark  
 $q \rightarrow qg$



Gluon-Aufspaltung  
 $g \rightarrow qq$

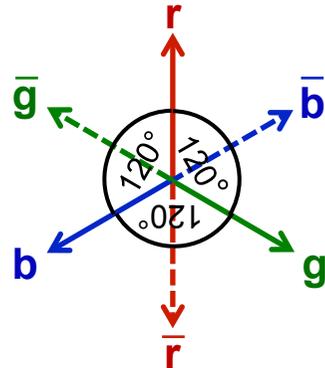


3-Gluon-Vertex  
 $g \rightarrow gg$



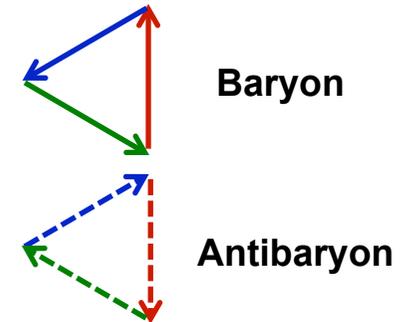
4-Gluon-Vertex  
 $gg \rightarrow gg$

Darstellung in 2D (120°-Winkel):



farbloses Objekt:

$$\text{Meson: } |\pi^+\rangle = \begin{cases} u_r \bar{d}_{\bar{r}} \\ u_g \bar{d}_{\bar{g}} \\ u_b \bar{d}_{\bar{b}} \end{cases}$$

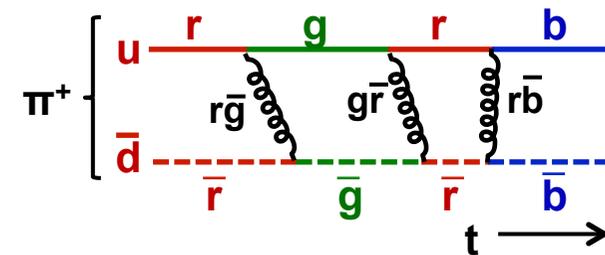


Verboten, da nicht farbneutral:  $qq$   $qq\bar{q}$

Aber:

$gg$ ,  $q\bar{q}q$ ,  $q\bar{q}q\bar{q}$ ,  $qqqq\bar{q}$  können farbneutral sein.

Glueball Hybrid 4-Quark Pentaquark ← exotisch, einige Kandidaten, aber noch umstritten



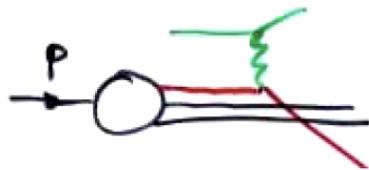
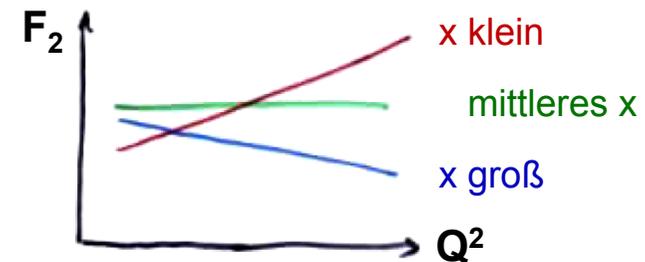


# Skalenbrechung

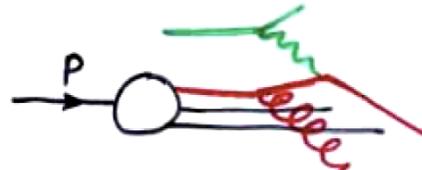
$F_2$  hängt bei hohen  $Q^2$  doch von  $Q^2$  ab (für große und kleine  $x$ )

⇒ doch endl. Ausdehnung der Quarks?

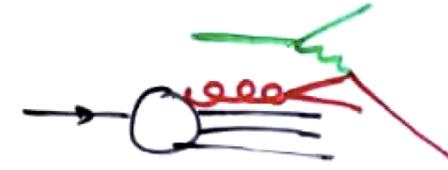
NEIN: Auflösung von **virtuellen Substrukturen** im Quarkverbund: ein Quark "besteht" aus Quarks und Gluonen, ein Gluon "besteht" aus Quarks und Antiquarks.



"normal"



Quark mit Impuls  $y \cdot P$  strahlt Gluon ab und trägt danach Impuls  $x \cdot P$  (kleiner!)



Gluon "zerfällt" in  $q\bar{q}$ , von denen eines vom Photon getroffen wird.

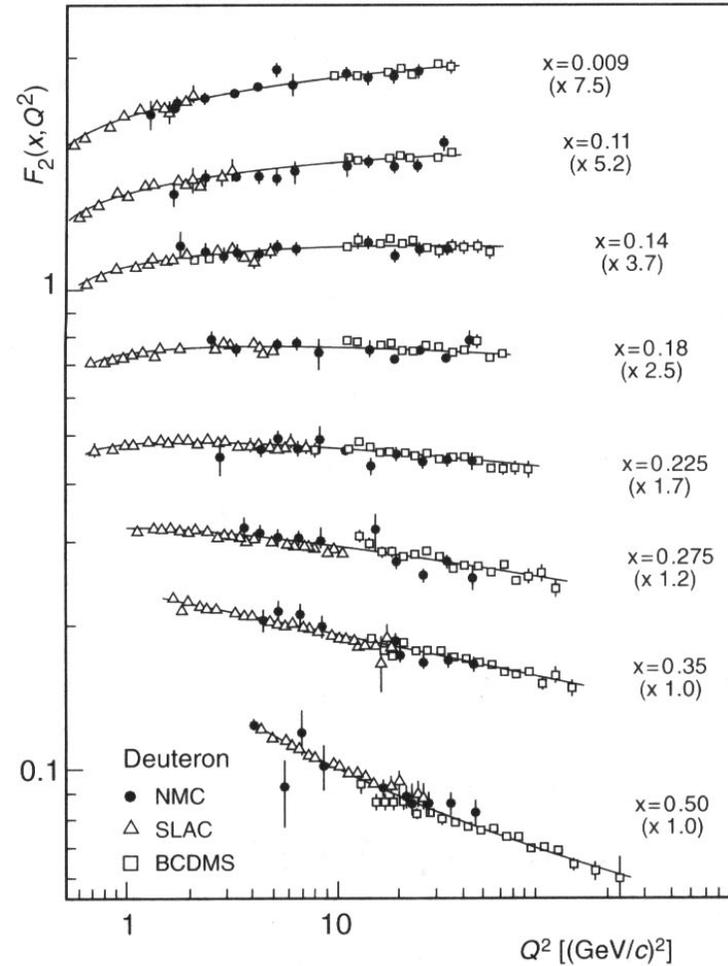
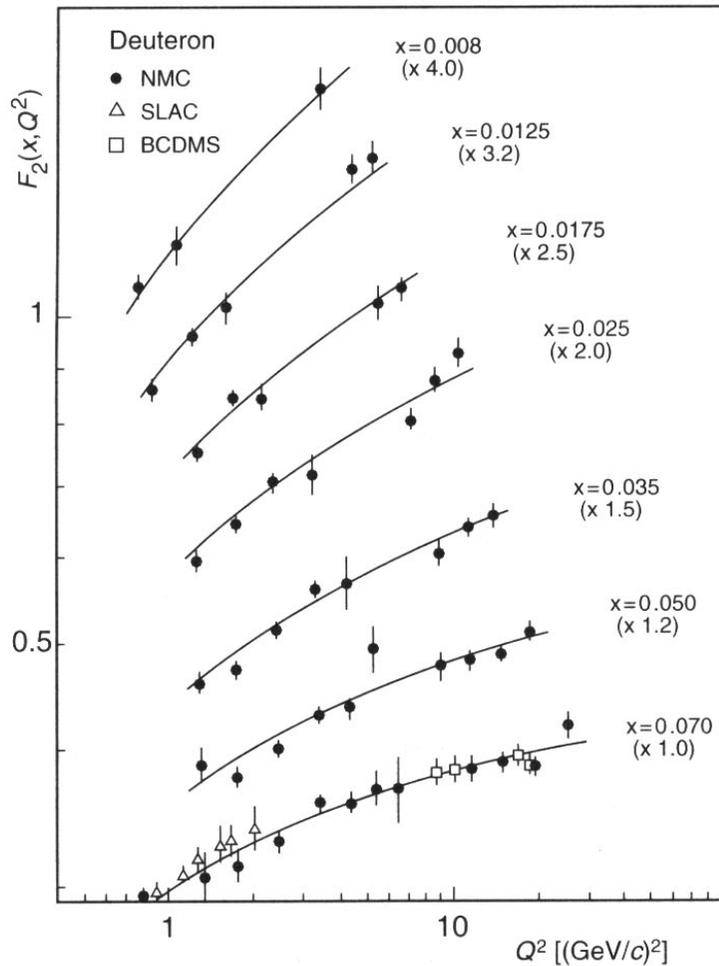
Je höher  $Q^2$ , desto häufiger können Aufspaltungsprozesse stattfinden.

⇒ Entwicklung in der QCD vorhersagbar.

**Altarelli – Parisi – Gleichungen** (gekoppelte Differential-/Integralgleichungen)

# Skalenbrechung

## ■ Impulsverteilungen im Nukleon $\Rightarrow \alpha_s, \Lambda_{\text{QCD}}$



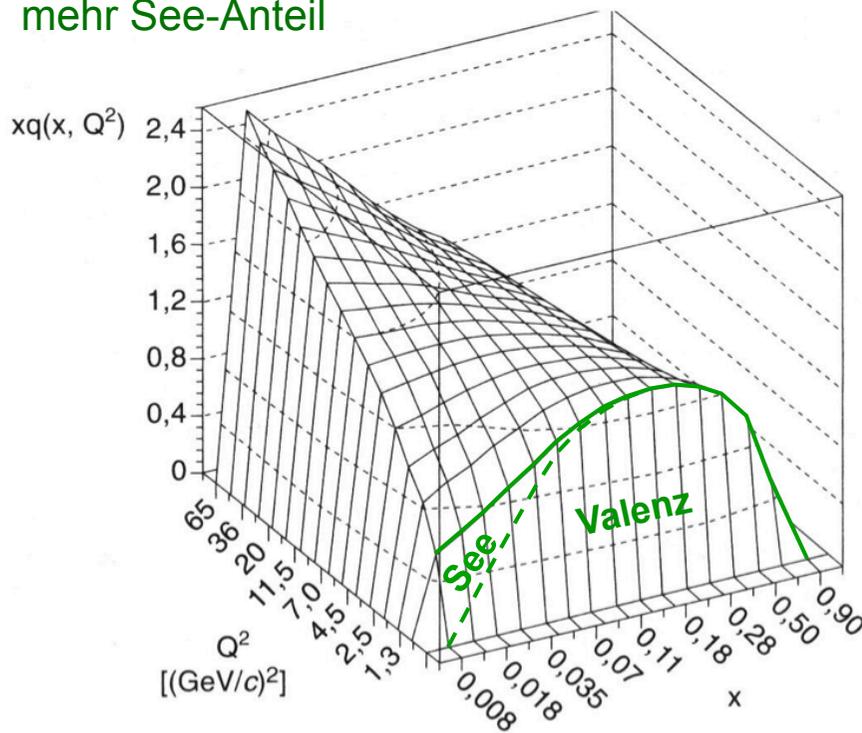
[Quelle: Povh, Teilchen und Kerne]

# Q<sup>2</sup>-Evolution von Quark- und Gluon-Verteilungen

## Quark-Verteilung

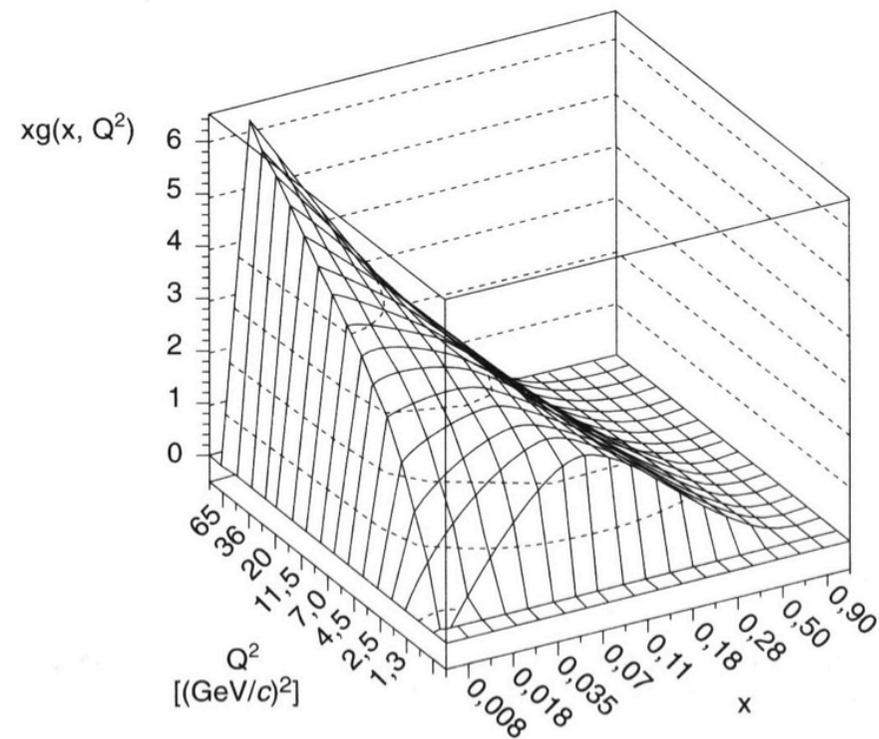
hohes Q<sup>2</sup>:  
weniger Valenzanteil  
mehr See-Anteil

viele Quarks  
bei kleinem x



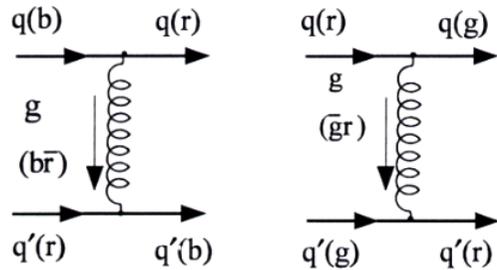
$$x \cdot q(x) = \sum_f x \cdot (q_f(x) + \bar{q}_f(x)) \approx \frac{18}{5} F_2^d$$

## Gluon-Verteilung

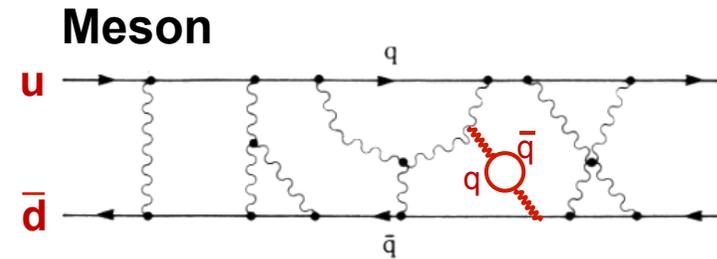


$$G(x, Q^2) = x \cdot g(x)$$

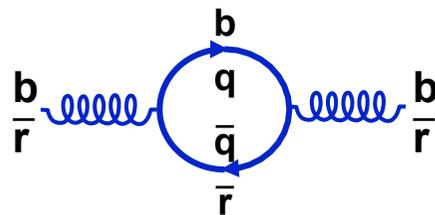
# Gluonenaustausch in der Starke WW



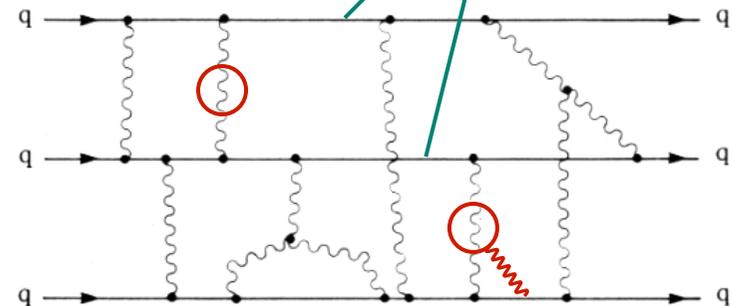
zb.  $\pi^+$



Starke Wechselwirkung durch Gluonenaustausch ( $q, q' =$  Quarks,  $g =$  Gluon;  $(r), (g), (b)$  steht für die Farbladungen rot, grün und blau); symbolische Darstellung in Anlehnung an *Feynman*-Graphen  
 [Quelle: Hilscher, Elementare Teilchenphysik]



## Baryon



**Bild 32.5** Die Quarks im Hadron sind durch fortwährenden Austausch von Gluonen aneinander gebunden.

[Quelle: Dodd, Elementarteilchen]

# "Running $\alpha_s$ "

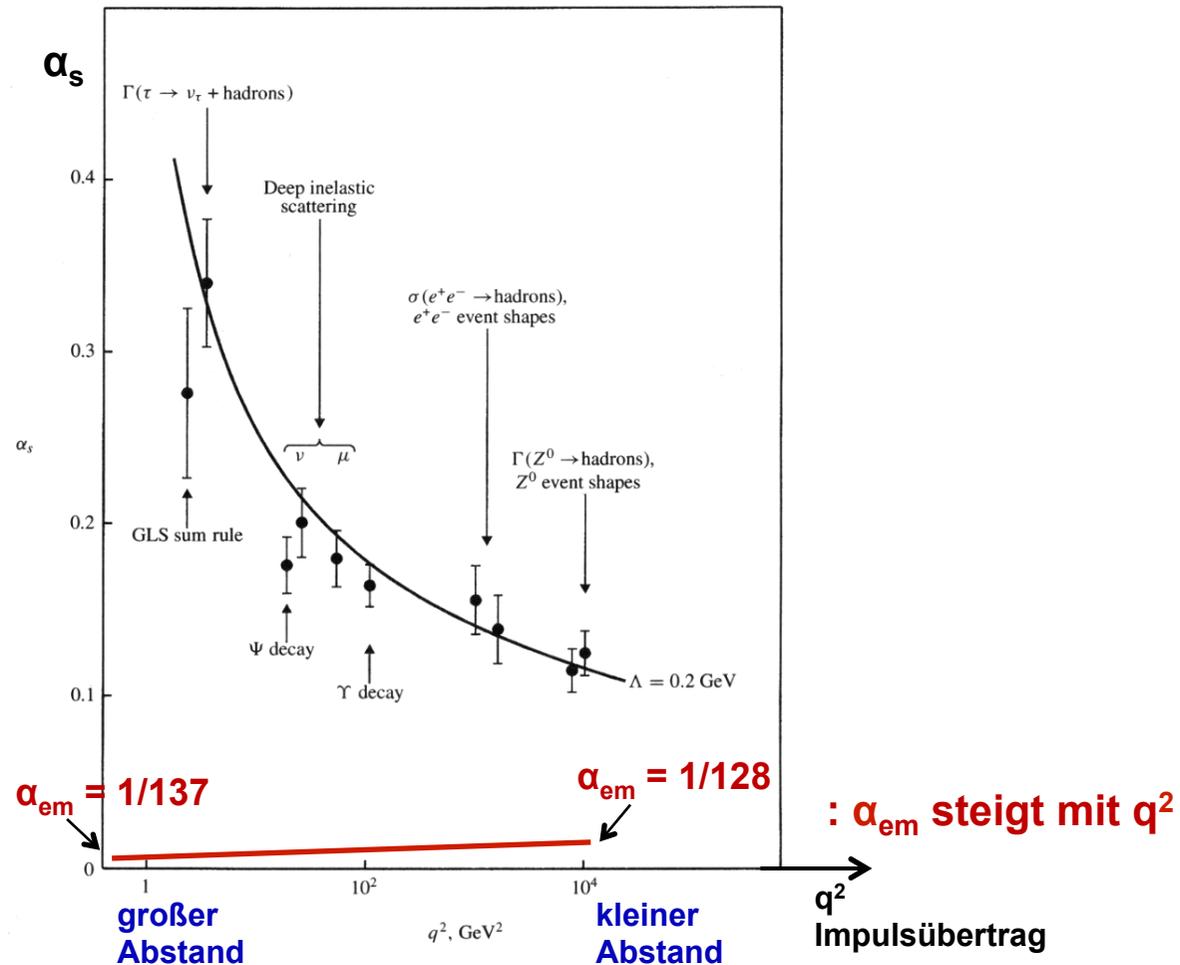
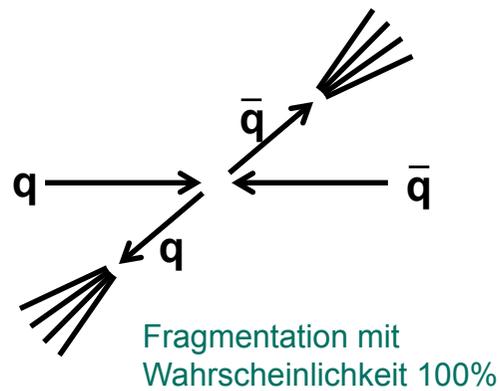


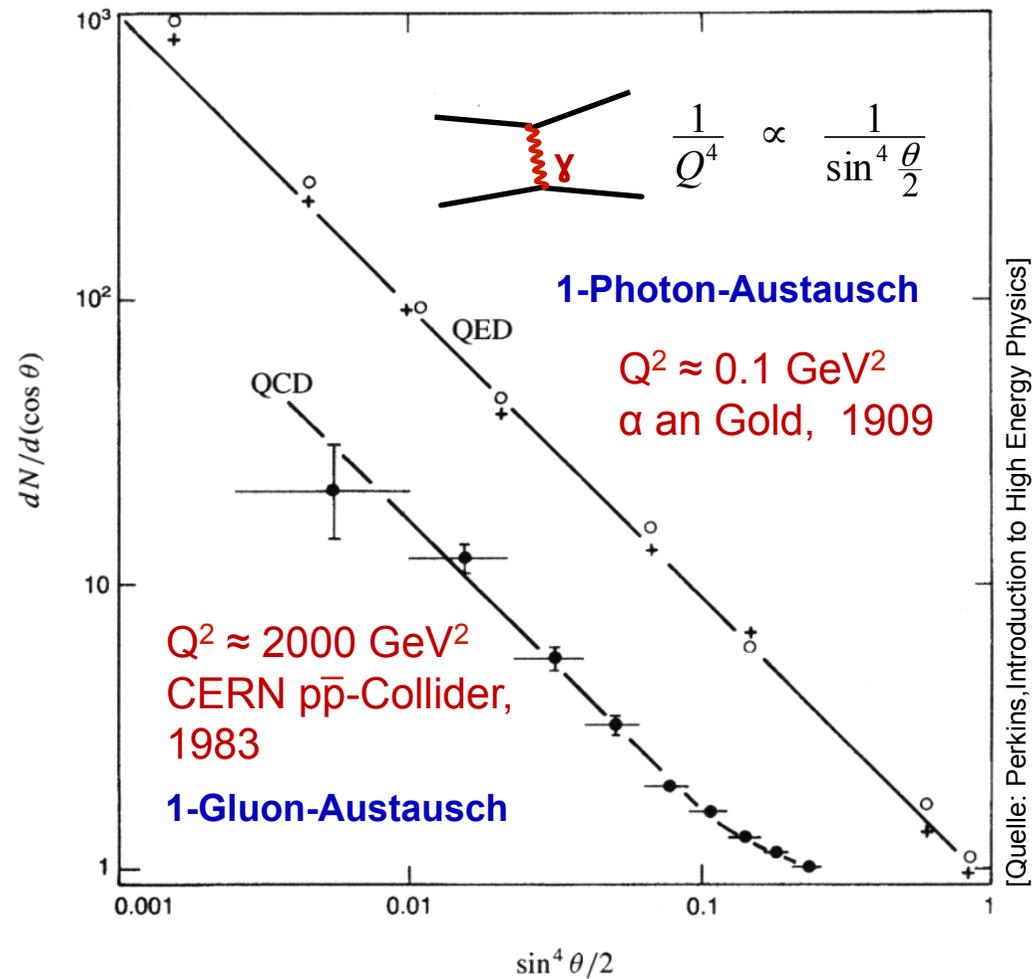
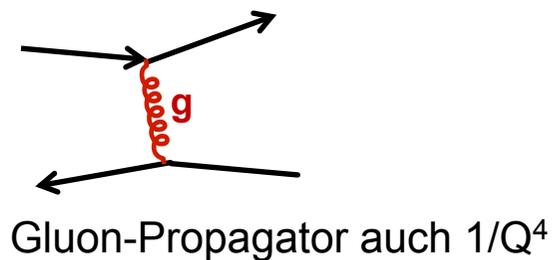
Fig. 6.12. Variation of the QCD coupling parameter  $\alpha_s$  with  $q^2$ . The data come from various sources, as described in the text. The curve is the prediction (6.23) for  $\Lambda \simeq 200 \text{ MeV}$ .  
[Quelle: Perkins, Introduction to High Energy Physics]

# Asymptotische Freiheit

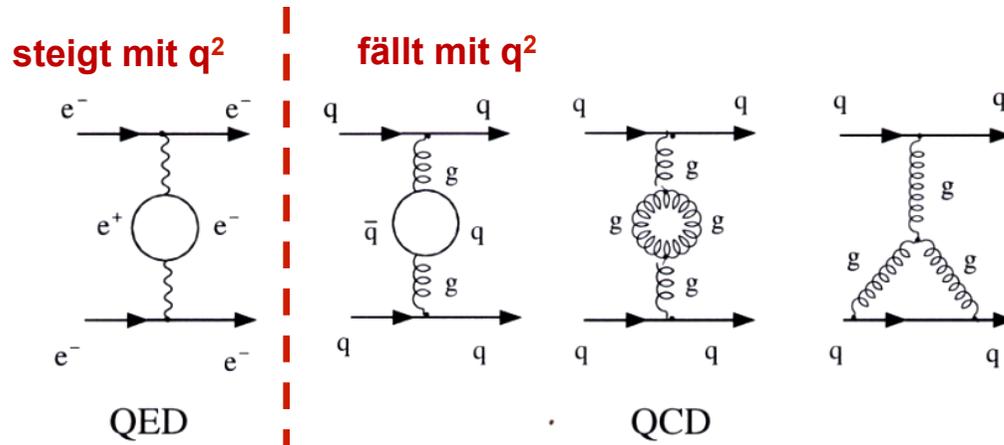
- bei hohen  $Q^2$  ist  $\alpha_s$  klein ; Quarks  $\approx$  frei ; 1-Gluon – Austausch



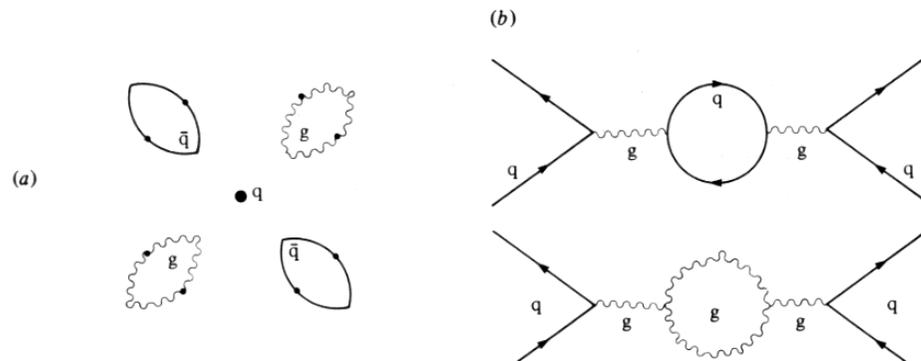
## 2-Jet-Produktion



# Vakuumpolarisation in QED und QCD



**Abb. II.29:** Vakuumpolarisationsdiagramme der QED und QCD  
 [Quelle: Hilscher, Elementare Teilchenphysik]

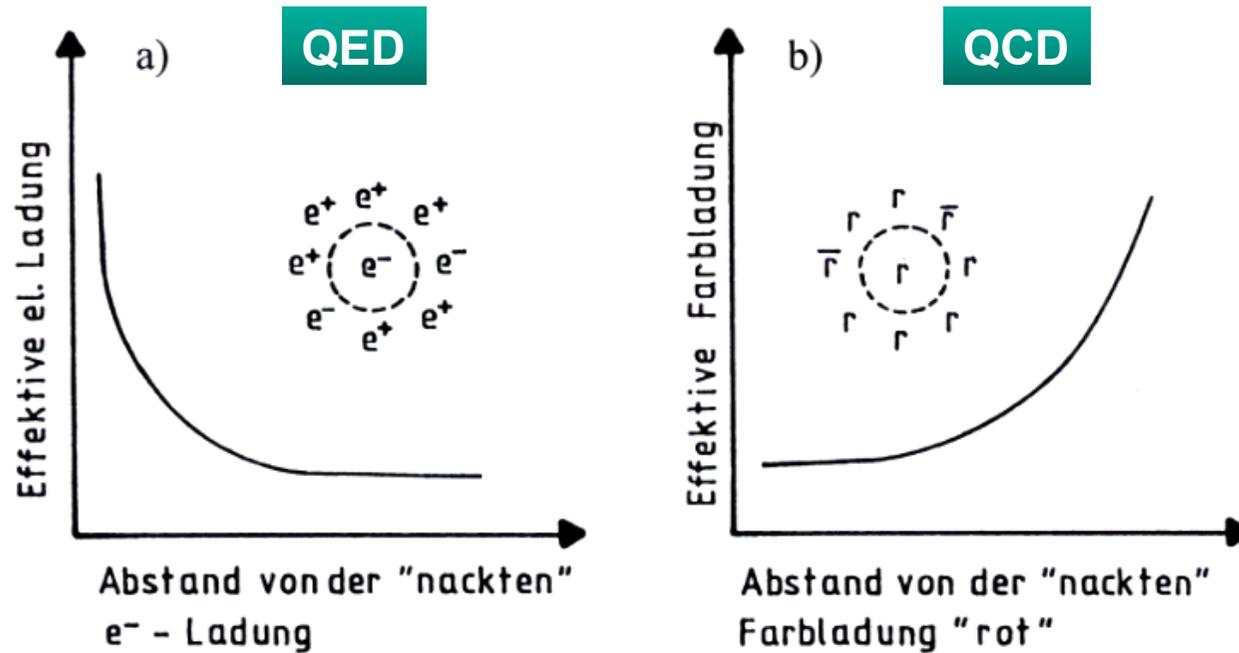


**Bild 33.3** (a) Virtuelle Quark-Antiquark-Paare und Gluonen *verstärken* die Farbladung eines Quarks. Dieser Effekt wird durch Feynman-Diagramme wie in (b) beschrieben.

[Quelle: Dodd, Elementarteilchen]

s

# Vakuumpolarisation in QED und QCD



**Abb. II.31:** Auswirkungen

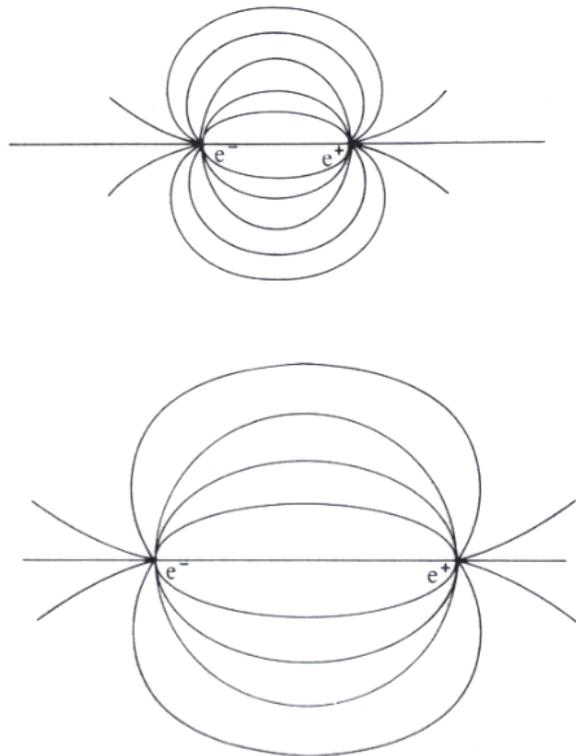
(a) der Vakuumpolarisation auf die effektive elektrische Ladung

(b) der Vakuumpolarisation und der Gluonen auf die effektive Farbladung

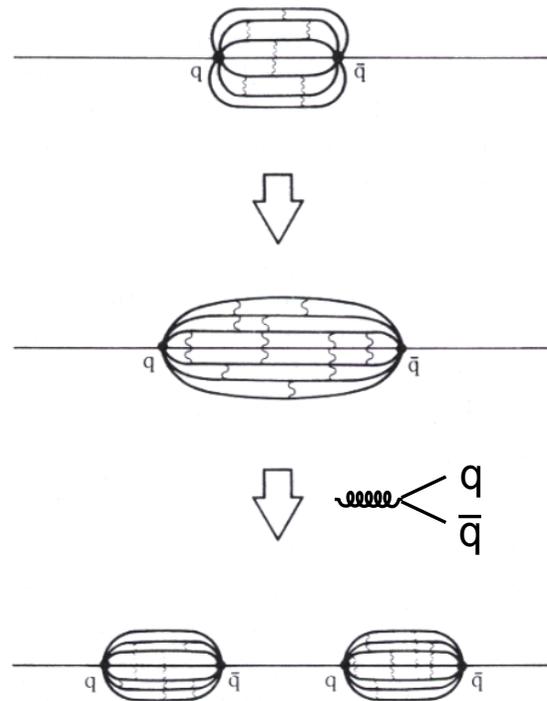
[Quelle: Hilscher, Elementare Teilchenphysik]

# Feldlinien in QED und QCD

## QED-Feldlinien



## QCD-Feldlinien



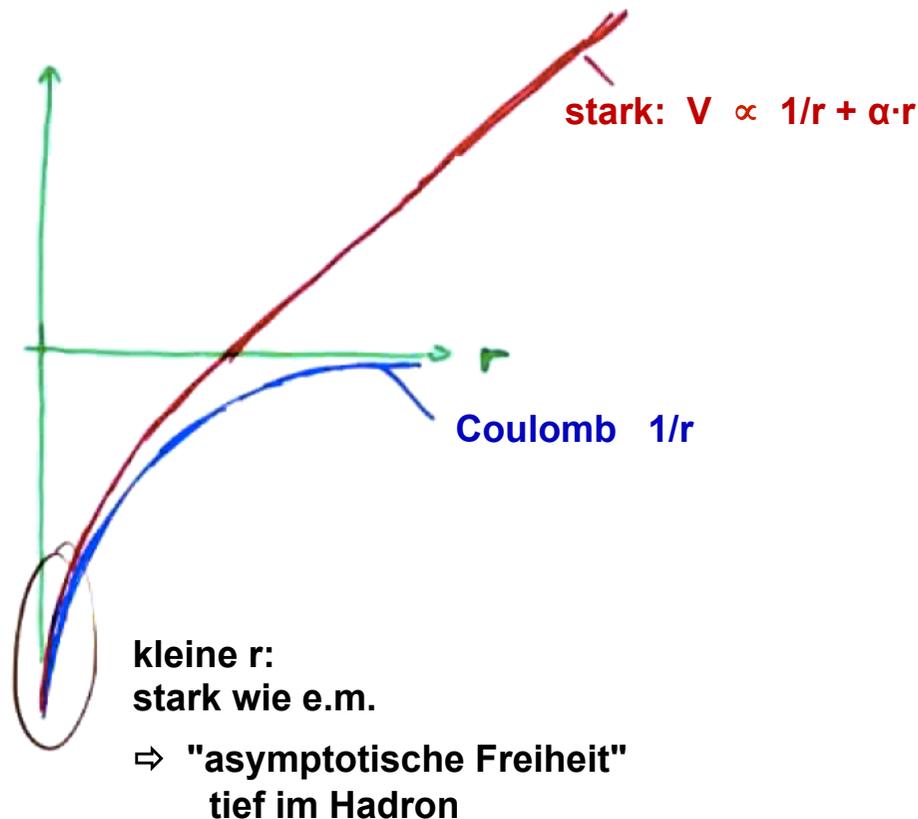
**"Schlauch"**  
**"String"**

quasi-eindimensional

Feldenergie wird größer  
 $E > m(q) + m(\bar{q})$   
 $\Rightarrow q\bar{q}$ -Paare aus Vakuum  
 $\Rightarrow$  2 Mesonen

# Confinement (Farbeinschluss)

" $q\bar{q}$  – Potential":



linear ansteigendes Potential  
bei großen Abständen



"Ionisation" nicht möglich



wenn man ein Quark aus  
einem Hadron entfernt, wird  
die Energie so groß, dass es  
günstiger ist, ein  **$q\bar{q}$ -Paar aus  
dem Vakuum** zu erzeugen,  
und dadurch zwei Hadronen  
mit kleinem  $q\bar{q}$ -Abstand zu  
erhalten



**Hadronisation,  
Jetbildung**