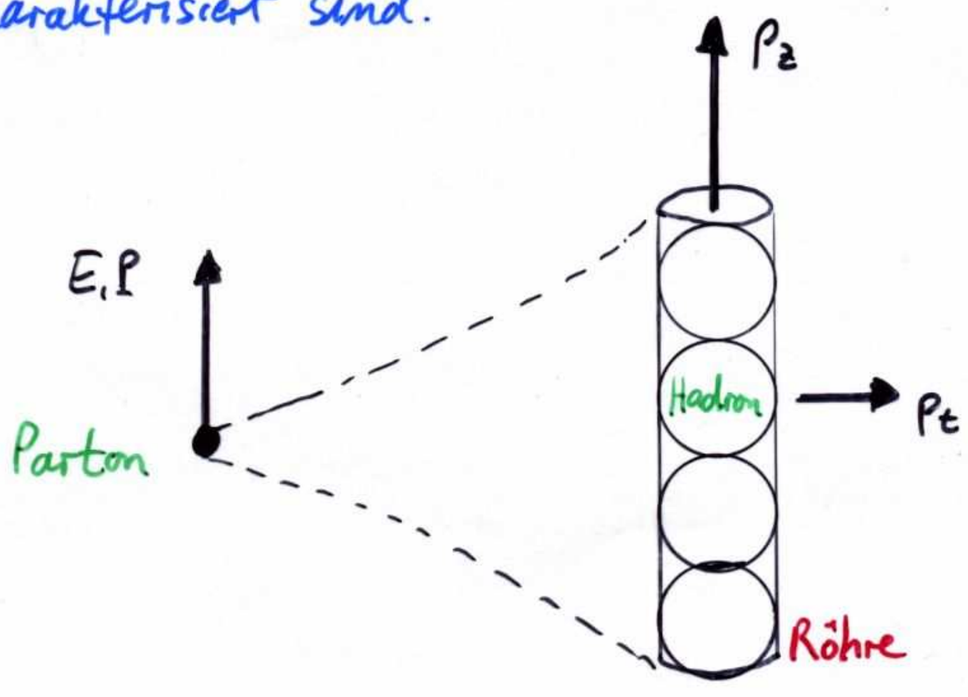
Phänomenologie der Hadronisierung

Phänomenolog. Hadronisierungsmodelle in Form von umfangreichen Computerprogrammen sind zu komplex, um einfach Aussagen über die Konsequenzen bzw. Auswirkungen der Hadronisierung auf Meßgrößen, die für QCD-Studien relevant sind, gewinnen zu können. Solch qualitative Aussagen über Hadronisierungseffekte kann man mit dem longitudinalen Phasenraum bzw. Röhren-Modell (engl.: tube model) sehr einfach gewinnen. In diesem Modell erzeugt jedes Parton einen Jet aus leichten Hadronen, welche durch Rapidität y und transversalem Impuls p_t charakterisiert sind.



Rapidität:

$$y := \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z}$$

Hadronisierung im Röhren-Modell

Jedes Hadron in der Röhre beansprucht Platz in der (y, p_t)-Ebene. Der Transversalimpuls stammt aus der Hadronisierung, ist also mit der Hadronisierungsskala λ verknüpft:

$$\lambda = \int d^2 p_t \cdot \rho(p_t) \cdot p_t$$

wobei $\rho(p_t)$ die Hadrondichte in der Röhre ist.

Die Wahl der Größe Rapidität

$$y := \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z} \approx \frac{1}{2} \ln \frac{E + p}{E - p}$$

hat den Vorteil, dass:

$$\cosh y = E_{Hadron} / m_{Hadron}$$

$$\sinh y = p_{Hadron} / m_{Hadron}$$

Damit können Energie E und Impuls P einer Röhre der Rapiditätslänge Y berechnet werden (für $m_{Hadron} \simeq \lambda$):

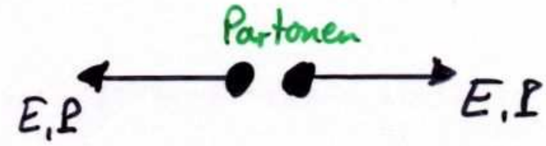
$$E = \int_0^Y dy\ \lambda \cdot \cosh y = \lambda \cdot \sinh Y$$

$$P = \int_0^Y dy\ \lambda \cdot \sinh y = \lambda \left(\cosh Y - 1\right)$$

Für große $Y \gg 1$ gilt dann: $P \simeq E - \lambda$

Hadronisierungseffekt im Röhren-Modell

Betrachte 2-Jetkonfiguration



mit Gesamtenergie Q, d.h. jedes (masselose) Parton hat die Energie $E = \frac{1}{2} Q$, also

$$x_{\text{Parton}} := \frac{E}{\frac{1}{2} Q} = 1$$

Für die Hadronen in der Röhre ergibt sich jedoch:

$$x_{\text{tube}} = \frac{P}{\frac{1}{2} Q} \approx \frac{2(E-\lambda)}{Q}$$

Damit folgt für z.B. die Topologiemeßgröße Thrust:

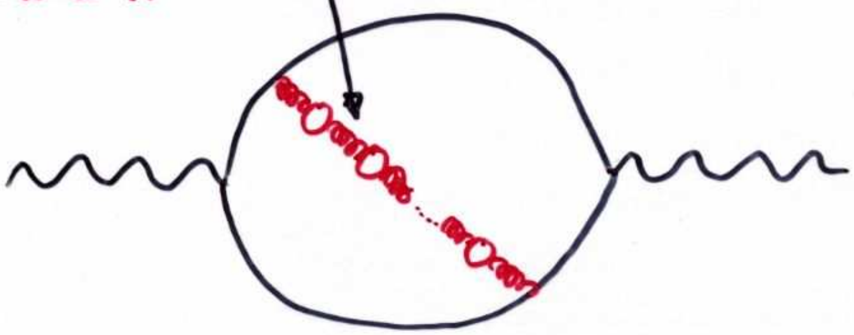
$$T := \max \left(x_q , x_{\bar{q}} , x_G \right)$$

- $T_{\text{Parton}} = \max \left(x_{\text{Parton}} \right) = 1$
- $T_{\text{Hadron}} = \max \left(x_{\text{tube}} \right) \approx 1 - \frac{2\lambda}{Q}$

Solche Korrekturen von Typ $1/Q$, $1/Q^2$, ... sind typisch für Hadronisierungseffekte. Sie werden allgemein als Energiepotenzkorrekturen (engl.: power corrections) bezeichnet.

Formalisierung der Energiepotenzkorrektur

Energiepotenzkorrekturen sind nicht perturbativ berechenbar, trotzdem können quantitative Aussagen über die Struktur dieser Korrekturen gemacht werden. Ein sehr theoretischer Ansatz ist das Konzept der infraroten Renormalonen.



Formal wird dabei die divergente Potenzreihe in α_s für das Renormalon (Gluon mit unendlich vielen Quarkschleifen) durch Konvergenz erzeugende Faktoren (i.w. Faktoren der Art $1/n!$) in eine konvergierende Reihe umgewandelt. Aus dieser Reihe kann die ursprüngliche Reihe bis auf Ambi= guitäten zurückgewonnen werden. Das Verfahren basiert auf der sog. Borel-Summation. Es liefert die Struktur der nicht-perturbativen (NP) Korrektur:

$$\frac{d\sigma^{NP}}{\sigma} \sim \frac{\ln^q Q}{Q^p}$$

, d.h. die Potenzen p und q können damit berechnet werden sowie i.A. auch die Proportionalitätskonstante.

Formalisierung der Potenzkorrektur

Ein phänomenolog. motivierter Ansatz nutzt Momente der starken Kopplungskonst. im Bereich kleinster Energieskalen

$$\alpha_{p-1}(\mu_I) := \frac{p}{\mu_I^p} \int_0^{\mu_I} dk_\perp \, \alpha_s(k_\perp^2) \cdot k_\perp^{p-1}$$

(z.B. $\mu_I = 2\,\text{GeV}$), worin sich die Idee verbirgt, dass die physikalische Kopplung für observable Größen frei von Polen (insbesondere: Landau-Pol bei Λ in $\alpha_s(Q^2) = 1/\beta_0 \ln Q^2/\Lambda^2$) sein muß.

Mit diesem Verfahren findet man quantitative Aussagen für Mittelwerte von Topologiemeßgrößen, z.B.

$$\langle 1-T \rangle = A_T \cdot \frac{\alpha_s}{2\pi} + \mathcal{O}(\alpha_s^2) + a_{1-T} \cdot \mathcal{P}$$

mit

$$a_{1-T} = 2$$

$$\mathcal{P} = \frac{4 C_F \mathcal{M}}{\pi^2} \cdot \frac{\mu_I}{Q} \cdot \left\{ \alpha_0(\mu_I) - \alpha_s(\mu_R^2) \cdots \right\}$$

und für differentielle Verteilungen

$$\frac{d\sigma(\mathcal{F})}{d\mathcal{F}} = \frac{d\sigma^{PT}(\mathcal{F} - a_\mathcal{F} \cdot \mathcal{P})}{d\mathcal{F}}$$

(d.i. eine einfache Verschiebung der perturbativen (PT) Verteilung um $a_\mathcal{F} \cdot \mathcal{P}$)

Beide Vorhersagen (Mittelwerte u. Verteilungen) führen zu guten Beschreibungen experimenteller Daten (α_0 und α_s müssen angepaßt werden)

Energiepotenzkorrekturen f. Mittelwerte

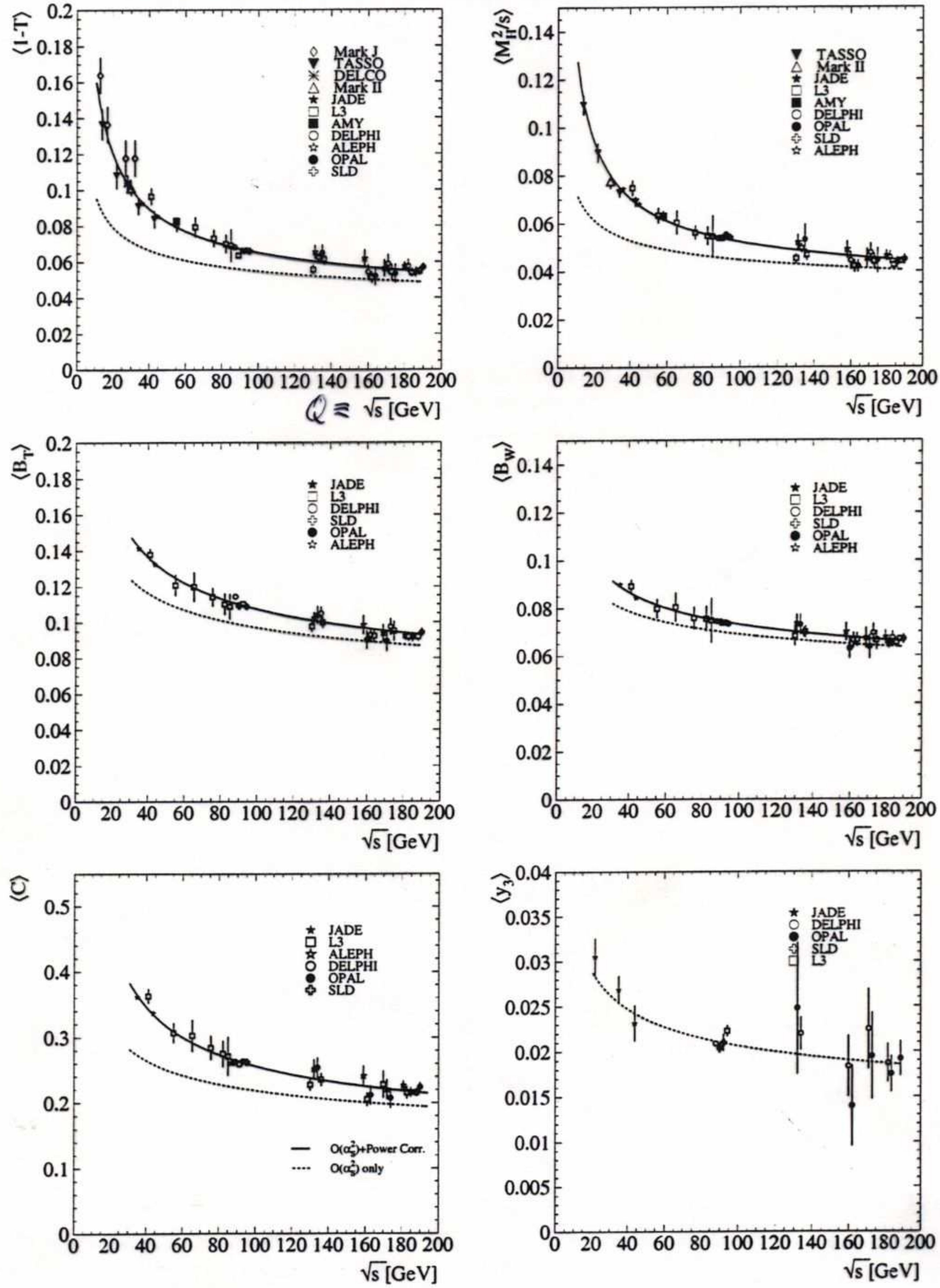
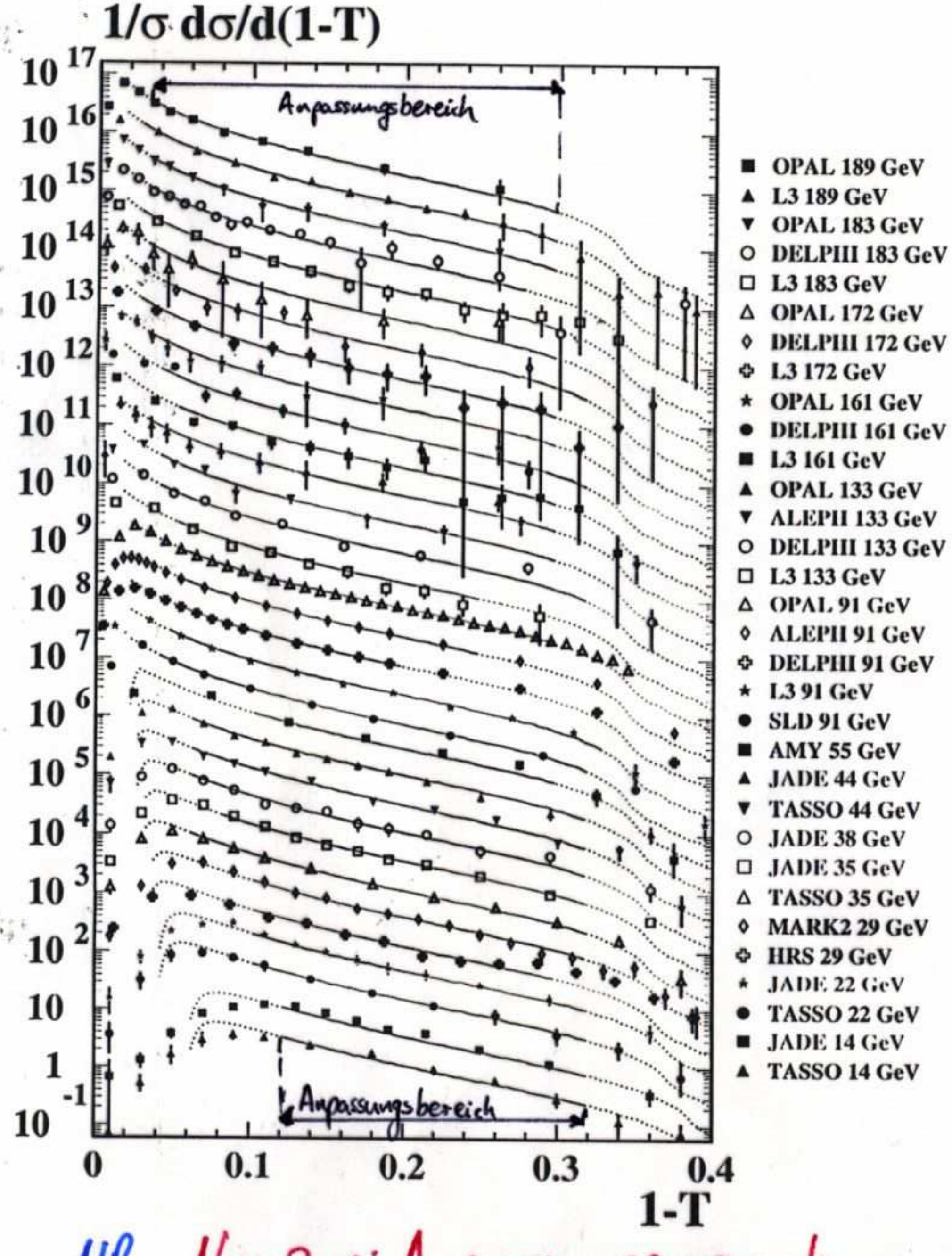
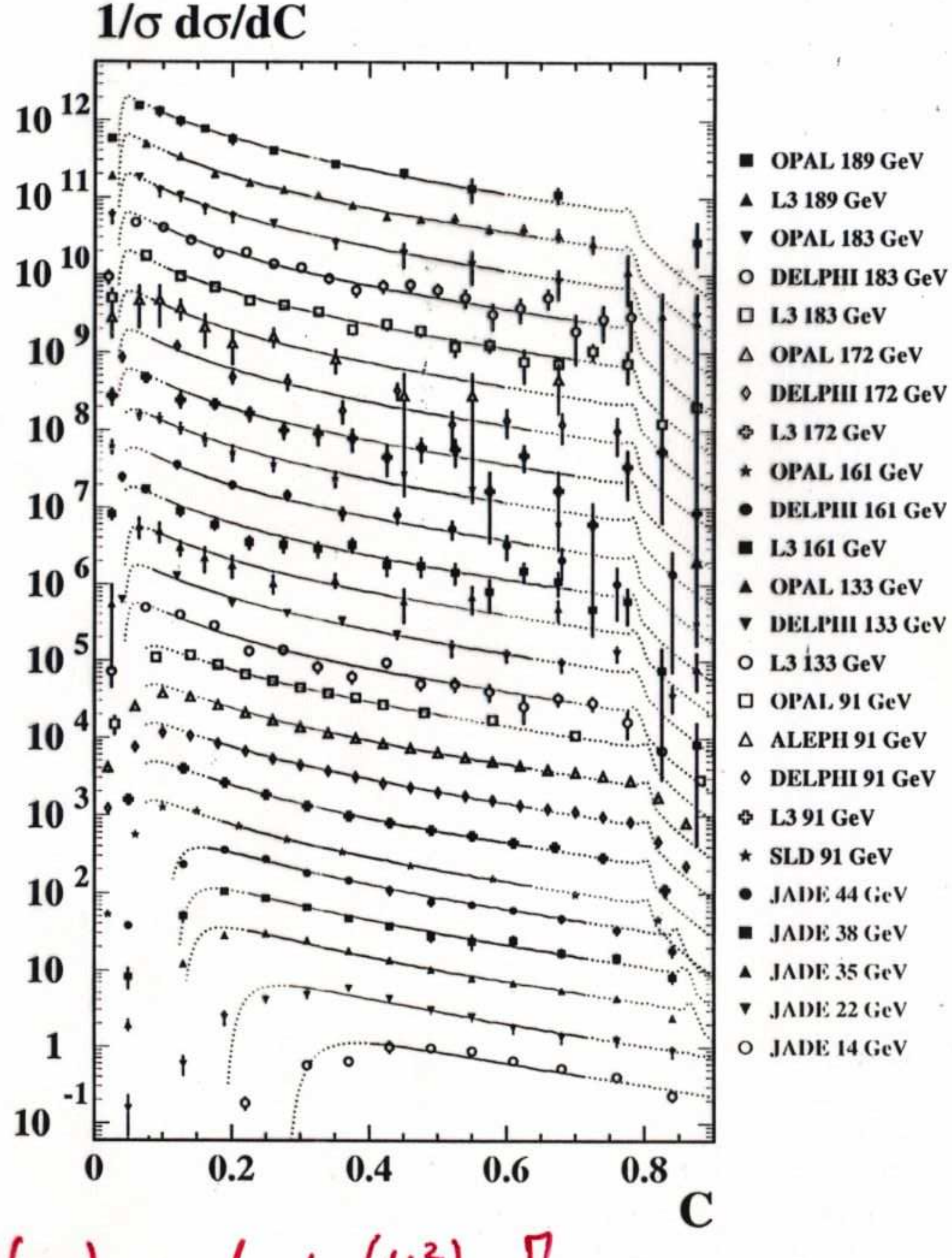


Abbildung 7.13: Momente der Topologievariablen $\langle 1-T\rangle$, $\langle M_{\mathrm{H}}^2\rangle$, $\langle B_{\mathrm{T}}\rangle$, $\langle B_{\mathrm{W}}\rangle$, $\langle C\rangle$ und $\langle y_{23}\rangle$ als Funktion der Schwerpunktsenergie $\sqrt{s}$. Die durchgezogenen Kurven sind das Ergebnis einer Anpassung [92,159] von $\mathcal{O}(\alpha_{\mathrm{S}}^2)$-Rechnungen kombiniert mit Potenzkorrekturen des DMW-Modells. Die gestrichelten Linien geben den rein perturbativen Beitrag wieder.

NB: Nur zwei Anpassungsparameter: $\alpha_0(\mu_I)$ und $\alpha_s(M_Z^2)$!

Energiepotenzkorrekturen f. Verteilungen

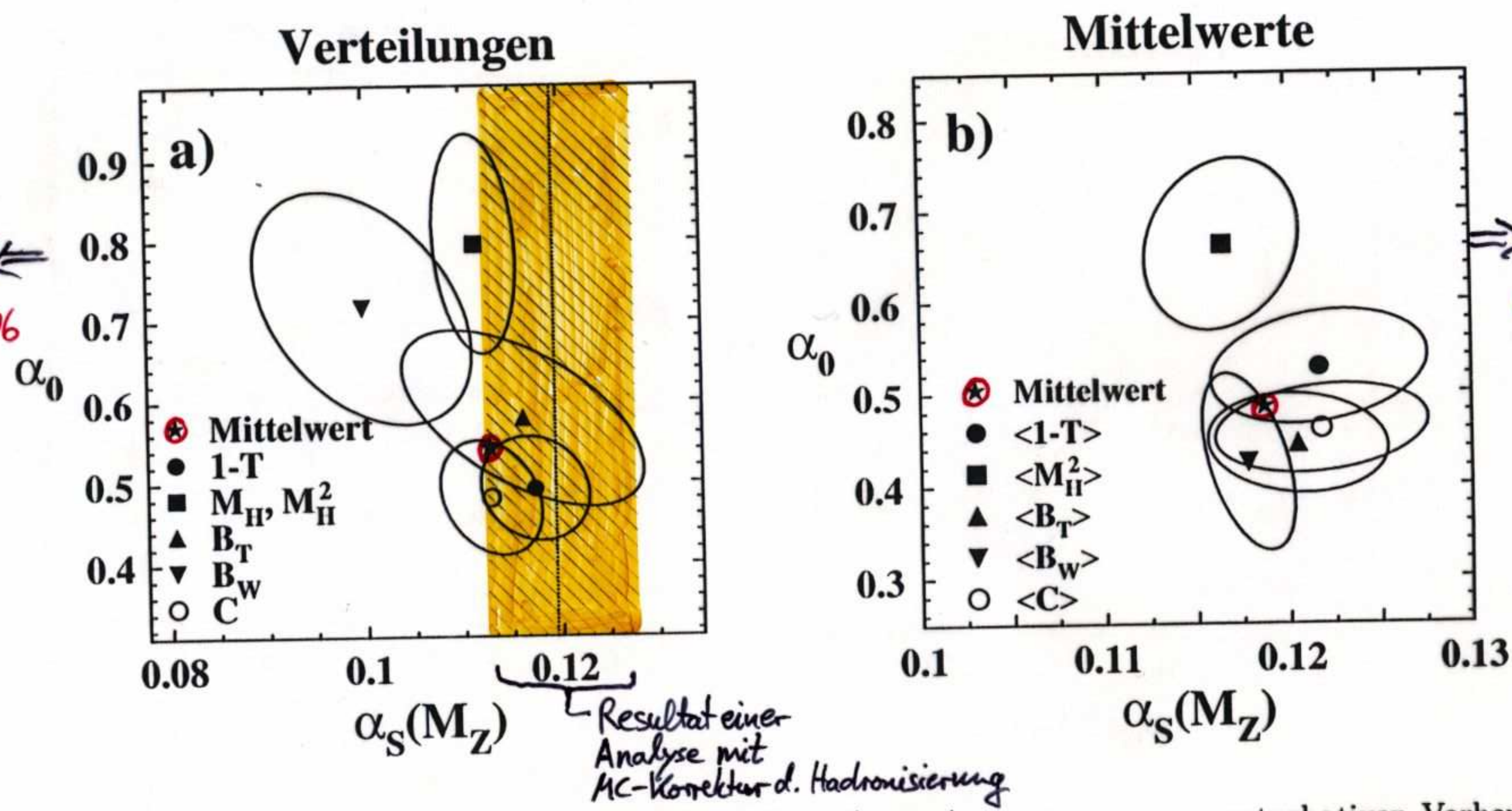




NB: Nur zwei Anpassungsparameter : $\alpha_0(\mu_I)$ und $\alpha_s(M_Z^2)$!

Test der Energiepotenzkorrekturen

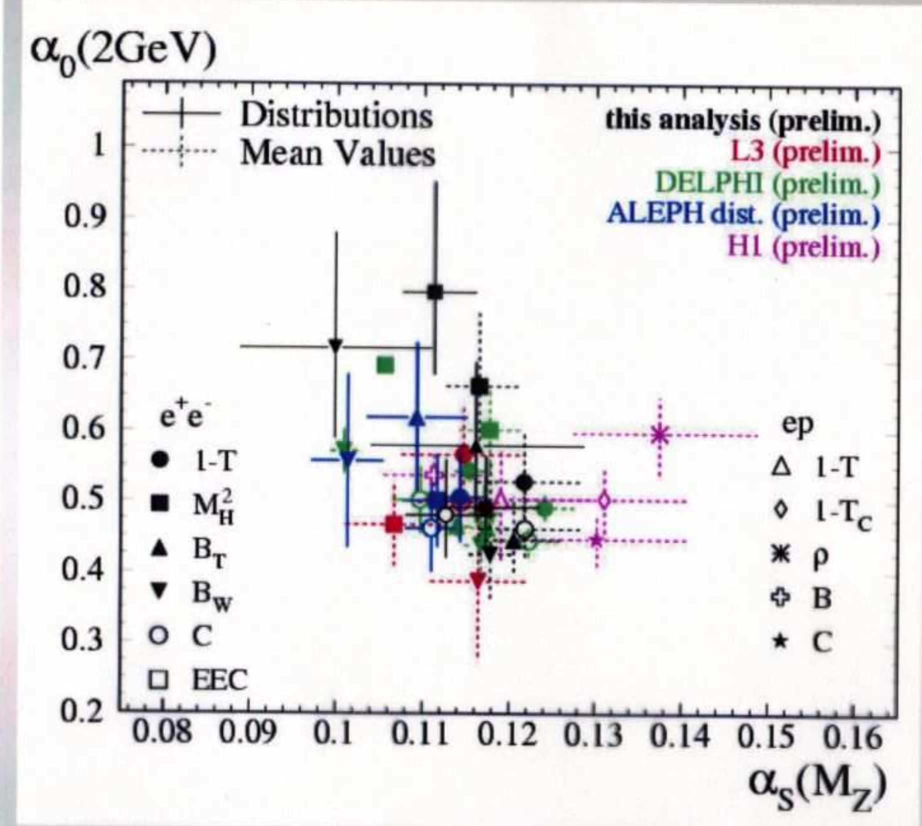
$\alpha_0 = 0.54 \pm 0.09$
$\alpha_s = 0.113 \pm 0.006$



$\Rightarrow \alpha_0 = 0.49 \pm 0.06$
$\alpha_s = 0.119 \pm 0.003$

Abbildung 7.12: Ergebnisse für $\alpha_S(M_{Z^0})$ und $\alpha_0(2\,\mathrm{GeV})$ aus Anpassungen von perturbativen Vorhersagen kombiniert mit Potenzkorrekturen des DMW-Modells a) an die differenziellen Verteilungen (diese Arbeit) und b) an die Mittelwerte [92, 159] von $1-T$, M_H or M_H^2, B_T, B_W und C. Die Fehlerellipsen entsprechen einem Konfidenzniveau der Messungen von 38%. Zum Vergleich ist in a) das kombinierte $\alpha_S(M_{Z^0})$-Ergebnis der „konventionellen“ Analyse aus Kapitel 6 als senkrechte Linie (Zentralwert) und schraffiertes Band (Gesamtfehler) dargestellt.

Conclusion (II)



- universality of α_0 confirmed within 20% confidence level
- SU(3) structure of QCD confirmed

$$\alpha_s(M_{Z^\circ})=0.1175^{+0.0031}_{-0.0021}$$
$$\alpha_0(2GeV)=0.503^{+0.066}_{-0.045}$$

- measurement of α_s with σ_L / σ_{tot}
- energy dependence of ln(1/x) spectra