

Ursprung und Auswirkungen von Teilchenmassen

O. Biebel
MPI f. Physik
22.06.2001

- Einführung
- Spontane Symmetriebrechung & Higgsmechanismus
- b-Quarkmasse
- Exkurs: Silizium-Vertexdetektoren
- t-Quarkphysik und mehr
- Zusammenfassung

Einführung: Teilchen im Standardmodell

- "Materie"-Teilchen: Fermionen

Quarks: u c t
 d s b

Leptonen: ν_e ν_μ ν_τ
 e^- μ^- τ^-

- "Kraftvermittler"-Teilchen: Bosonen

γ, Z, W^\pm Gluon

elektromagn. u.
schwache starke

Wechselwirkung

$U(1) \otimes SU(2) \otimes SU(3)$

Struktur der Eichgruppe des Standardmodells
effektiv masselose Theorie

Einführung: Teilchenmassen

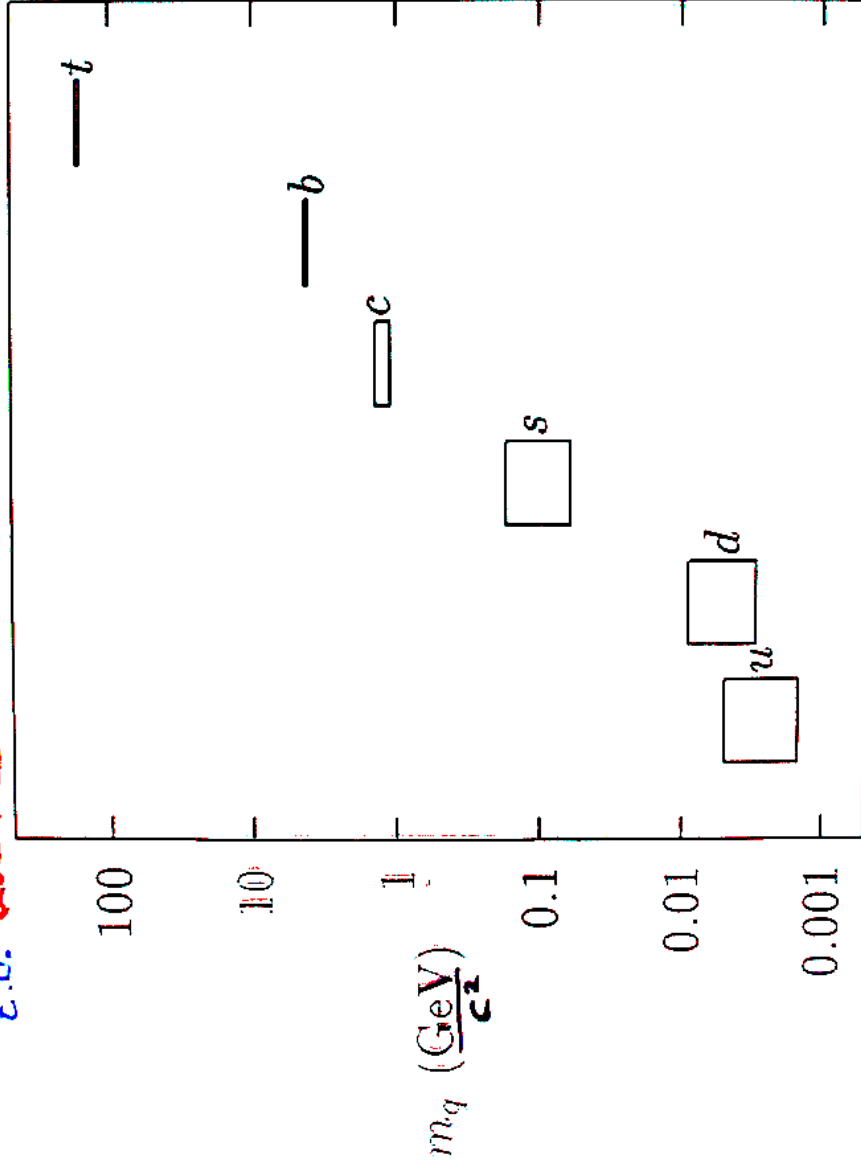
- beobachtete Teilchen sind massiv!

z.B. Quarks:


und auch W^\pm, Z -Bosonen:

$$m_W \approx 80.4 \text{ GeV}/c^2$$

$$m_Z \approx 91.2 \text{ GeV}/c^2$$



Einführung: Standardmodell & Teilchenmassen

- Standardmodell \longleftrightarrow  Teilchenmassen

jedoch:

- ▶ für Fermionmassen reparabel:

Massenterme "von Hand" in Theorie einfügen

- ▶ für W,Z-Bosonmassen ...

explizite Massenterme machen Theorie

nicht berechenbar!

Einführung: Standardmodell & Teilchenmassen

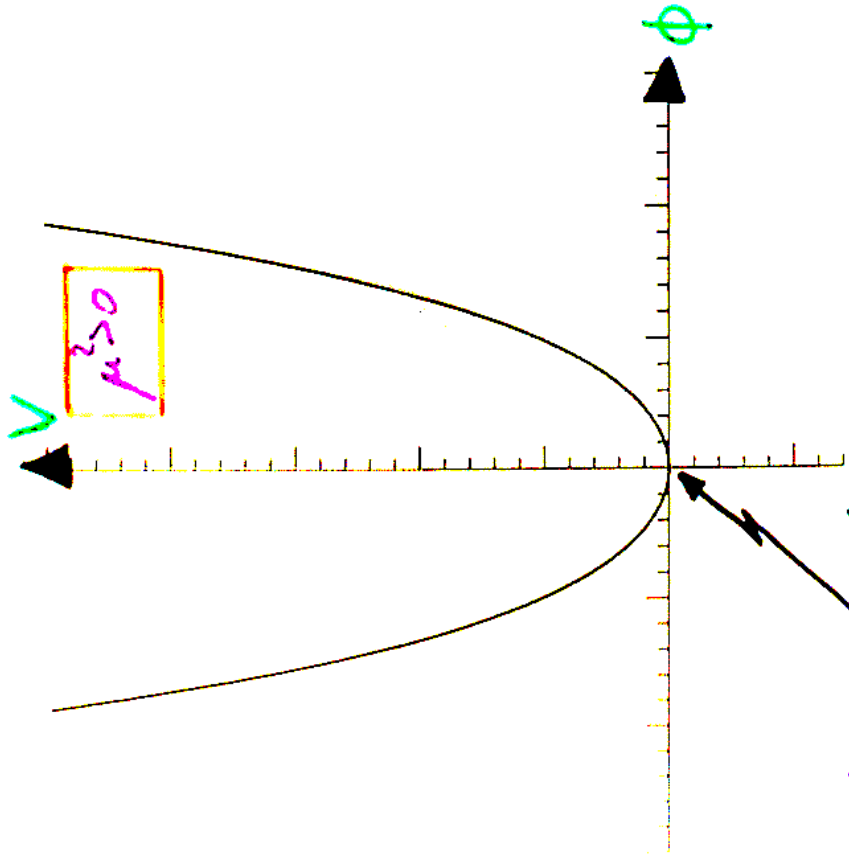
ein Ausweg aus Dilemma:

- neues skalares Hintergrundfeld:
füllt den Raum zu allen Zeiten und überall
- Spontane Symmetriebrechung:
im Potential des Hintergrundfeldes,
damit verknüpft:
 $U(1) \otimes SU(2)$ -Symmetrie \longrightarrow $U(1)_{\text{el. magn.}}$ -Sym.
elektroschwache Sym. \longrightarrow el. magn. Sym.
- Higgs-Mechanismus:
verleiht Teilchen Masse
durch Wechselwirkung mit Hintergrundfeld

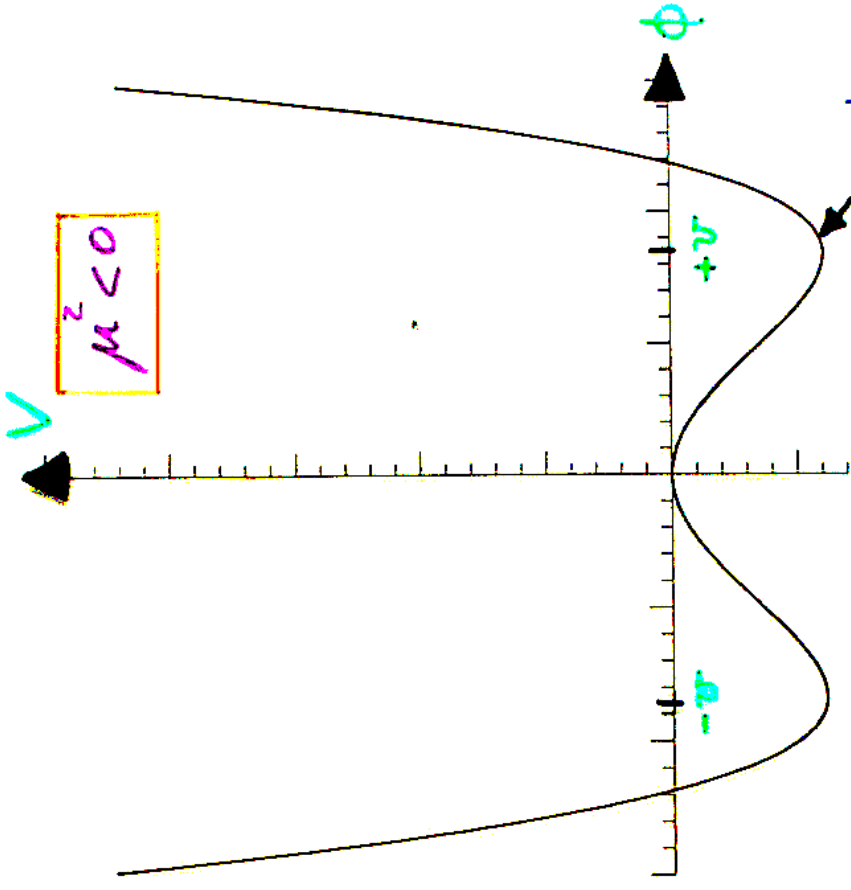
NB: skalares Hintergrundfeld & spont. Sym. brechung & Higgsmechanismus explizit und ausschließlich eingeführt, um mathemat. Konsistenz des Standardmodells zu verbessern

Spontane Symmetriebrechung

- ▶ Lagrange-Fkt. des Higgsgrundfeldes: $\mathcal{L} = T - V = \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi)^2 - \left(\frac{1}{2}\mu^2 \phi^2 + \frac{1}{4}\lambda^2 \phi^4 \right)$



im Minimum: $\langle |\phi| \rangle = 0$, $\phi \mapsto -\phi$ Sym.



$\langle |\phi| \rangle = \pm v$, keine Symmetrie

- Analogien: z.B. Ferromagnetismus ober-/unterhalb Curie-Temperatur

Spontane Symmetriebrechung

- Analogiebeispiel: Ferromagnetismus

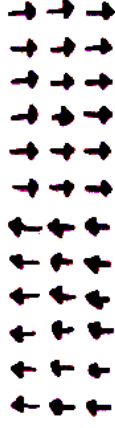
$$T > T_{\text{Curie}}$$

$$T < T_{\text{Curie}}$$



$$\langle \vec{B}\text{-Feld} \rangle = 0$$

Rotationssymmetrie



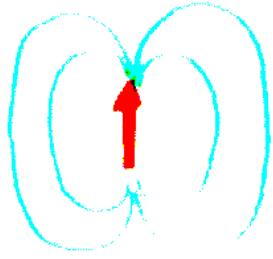
$$\langle \vec{B}\text{-Feld} \rangle \neq 0$$

keine Rotationssym.

Spontane Symmetriebrechung und Higgsmechanismus

- Analogiebeispiel: Ferromagnetismus

$$T > T_{\text{Curie}}$$



Hintergrundfeld

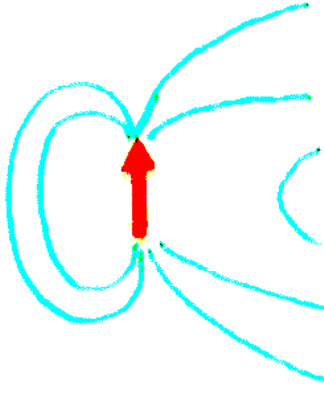
$$\langle B\text{-Feld} \rangle = 0$$

Rotationssymmetrie

keine Wechselwirkung mit Hintergrundfeld

→ pot. Energie = 0

$$T < T_{\text{Curie}}$$



Hintergrundfeld

$$\langle B\text{-Feld} \rangle \neq 0$$

keine Rotationssym.

Wechselwirkung mit Hintergrundfeld

→ pot. Energie $\neq 0$

Spontane Symmetriebrechung und Higgsmechanismus

- Analogiebeispiel: Ferromagnetismus

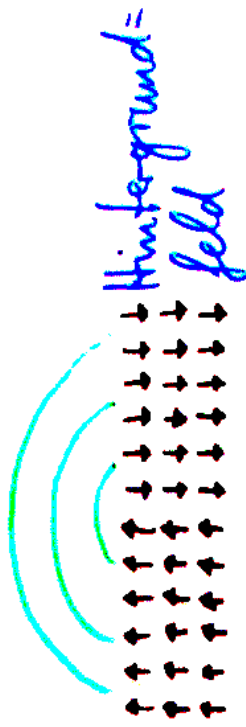
$$T > T_{\text{Curie}}$$

$$T < T_{\text{Curie}}$$



$$\langle \beta\text{-Feld} \rangle = 0$$

Rotationssymmetrie

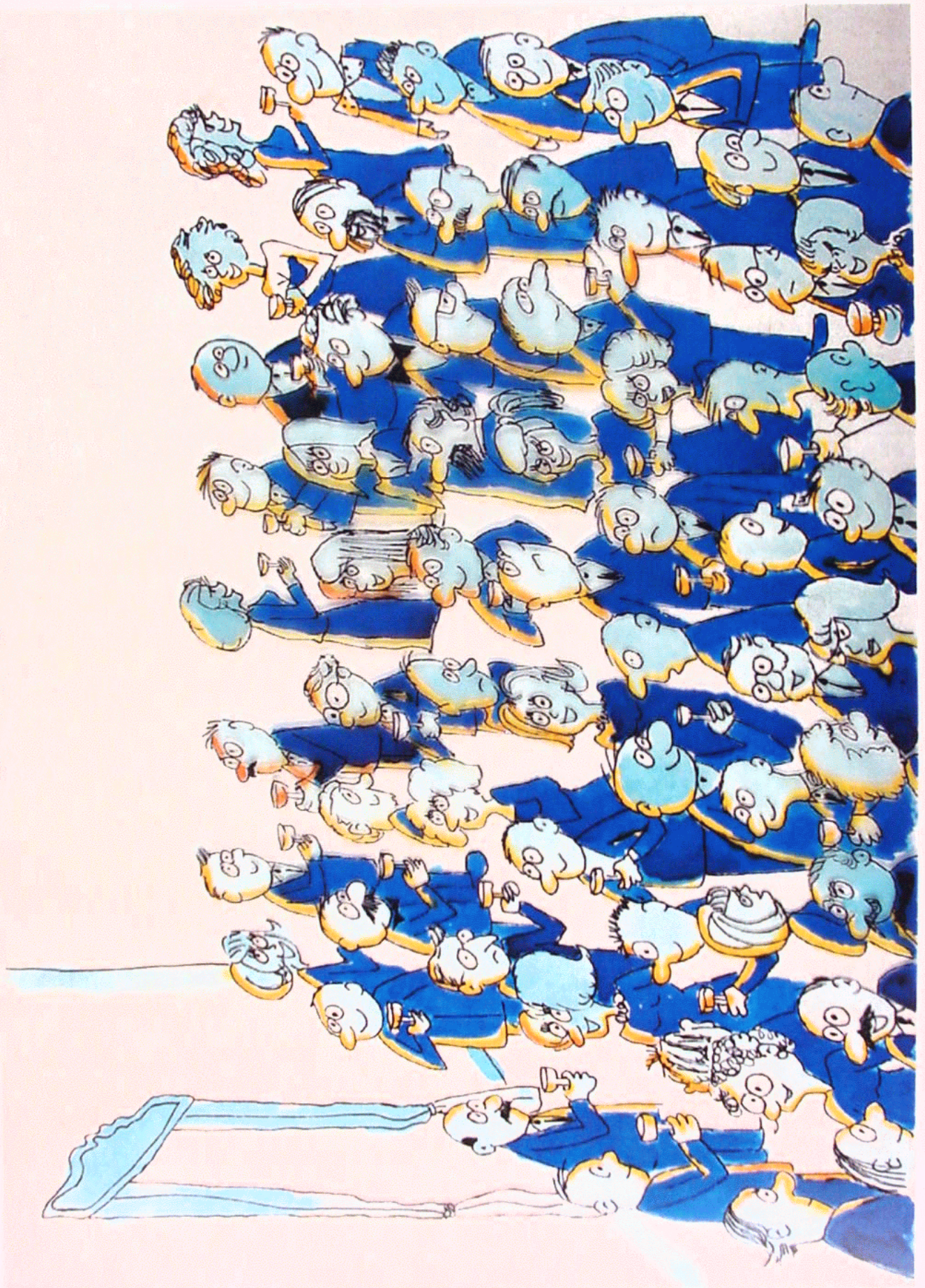


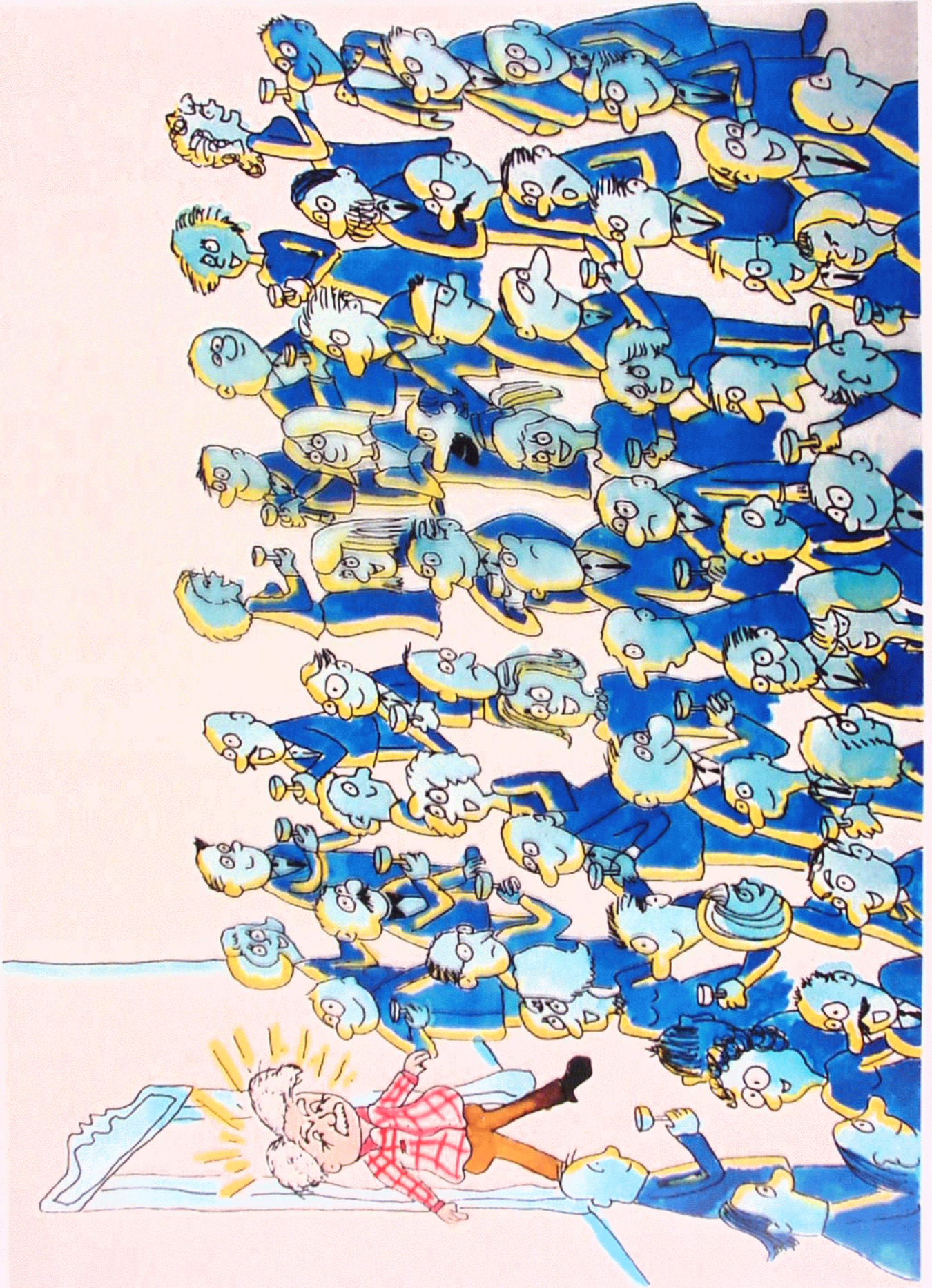
$$\langle \beta\text{-Feld} \rangle \neq 0$$

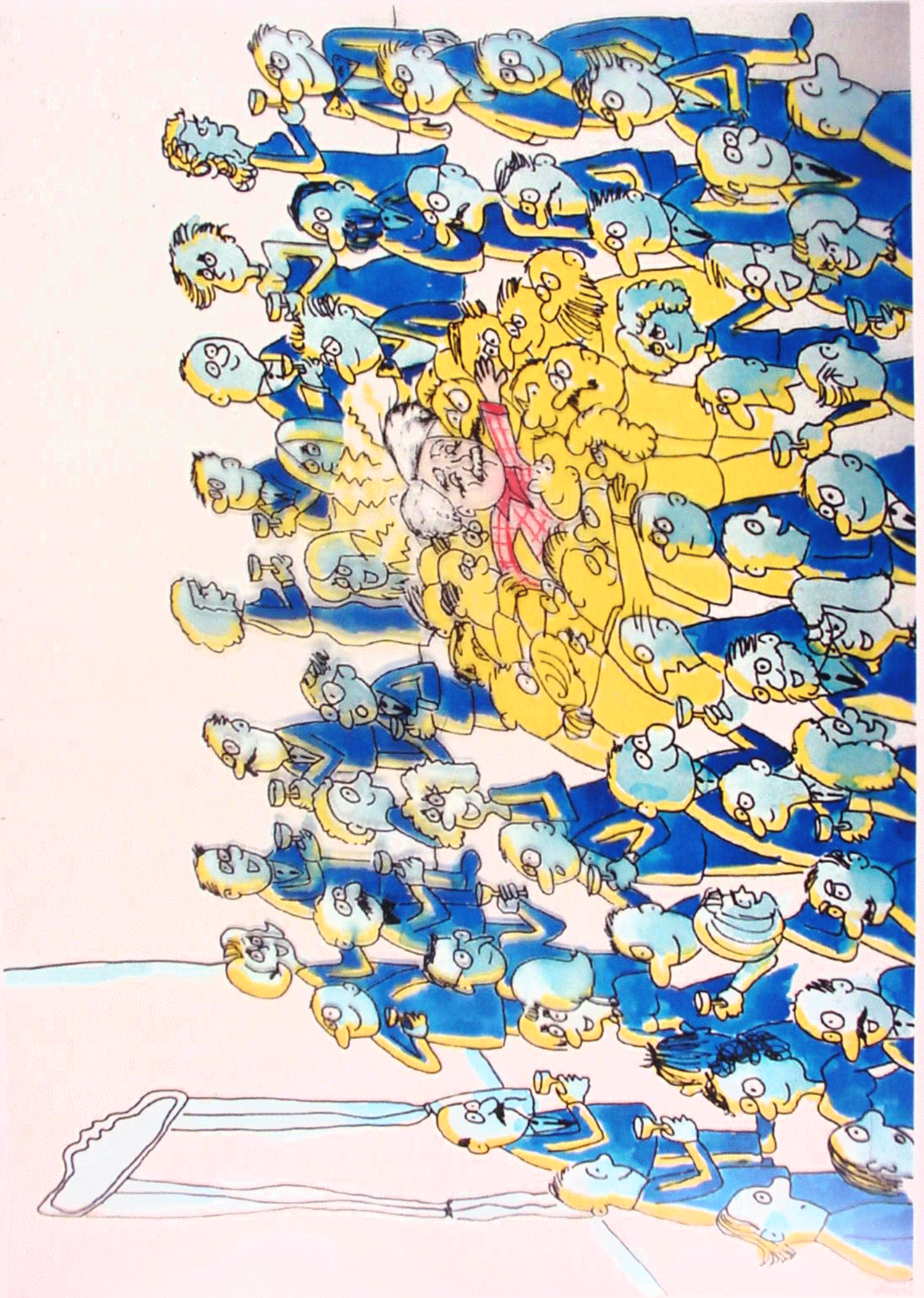
keine Rotationssym.

Selbstwechselwirkung
im Hintergrundfeld

→ pot. Energie $\neq 0$







Spontane Sym.brechung u. Higgsmechanismus

für elektroschwache Theorie $U(1) \otimes SU(2)$:

- ▶ Dublett komplexwertiger Skalarfelder

$$\phi = \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix} / \sqrt{2}$$

- ▶ drei der vier Freiheitsgrade

Massen der W^+ , W^- , Z -Bosonen

- ▶ verbleibender Freiheitsgrad

skalares Teilchen: Higgs-Boson

NB: Higgs-Masse nicht berechenbar, da μ, λ unbekannt

- ▶ Fermionmassen aus

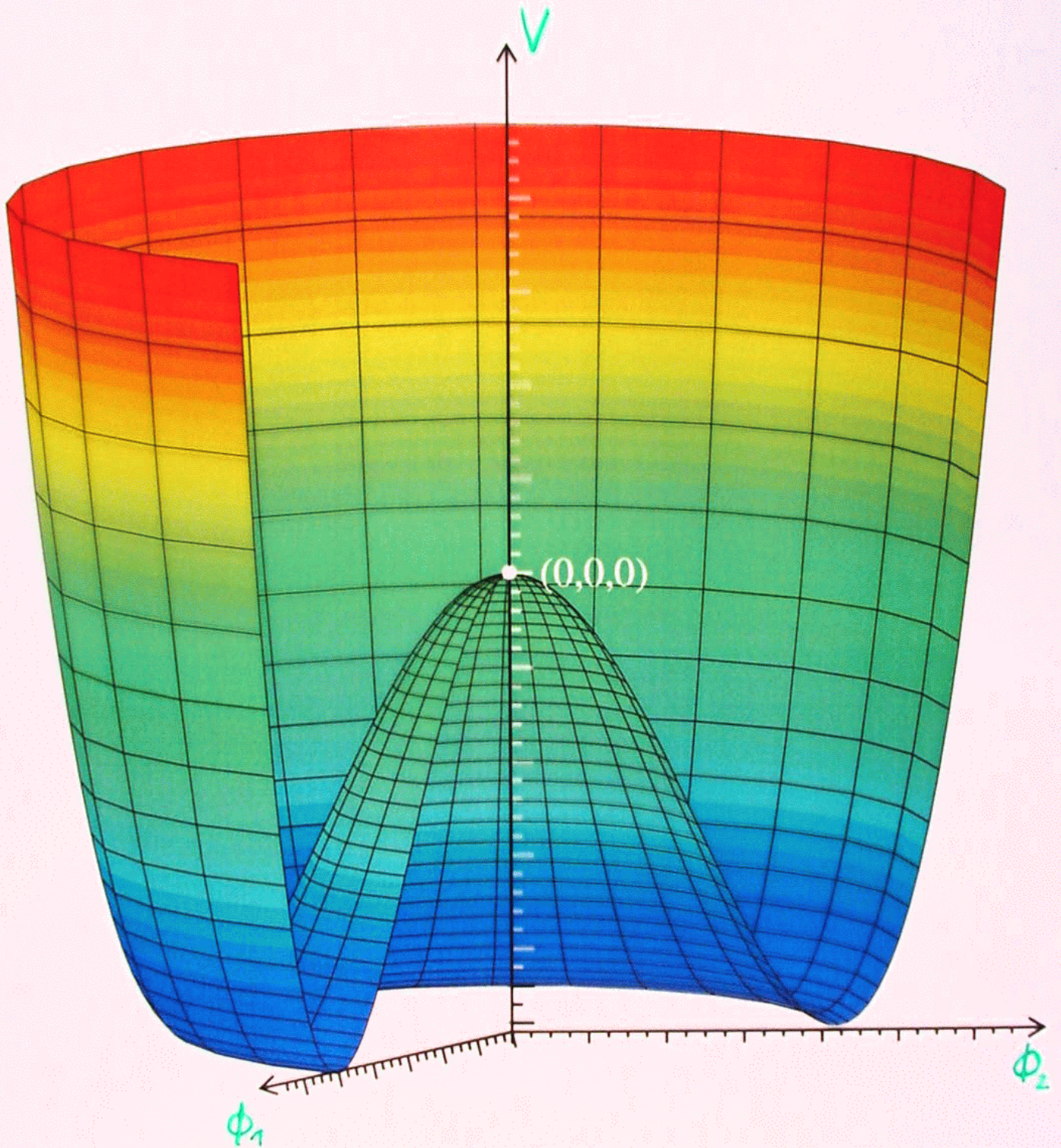
"Yukawa-Kopplung" zw. Higgs und Fermionen

NB: Kopplungsstärke unbekannt, daher

Fermionmassen nicht berechenbar

⇒ Fermionmassen experimentell bestimmen

"Mexican hat" - Potential



Fermionmassen

Bestimmung für

- Leptonen: einfach ✓
- Quarks: ?

Quarks immer in Hadronen eingeschlossen!

Ansätze für Quarkmassen:

- ▶ Konstituentenmasse von Hadronen

$$\text{Proton} \hat{=} \text{⊙} \rightsquigarrow m_{\text{Konstit.}} = \frac{1}{3} m_{\text{Proton}}$$

ABER: Protonmasse i.w. Bindungsenergie

- ▶ Polmasse

behandle Quarks als freie Teilchen

ABER: große, nicht berechenbare Korrekturen aus Bindungszuständen

- ▶ renormierte Quarkmasse

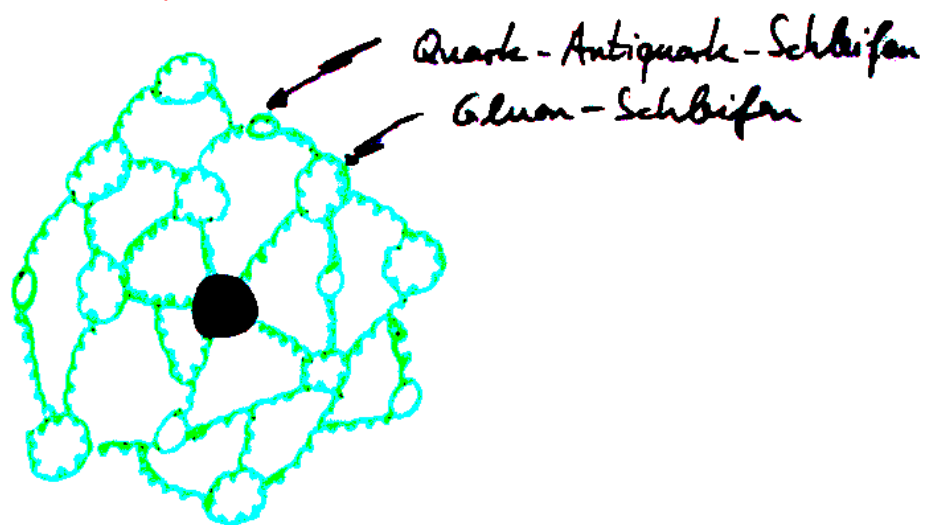
≙ Masse in Lagrangefunktion

ABER: Masse hängt von Renormierungsskala ab

Vakuumpolarisation und Renormierung

- Ein Teilchen ist im Vakuum von einer "Wolke" virtueller Teilchen umgeben

z.B. **Vakuumpolarisation** durch ein Quark



- Vakuumpolarisation beeinflusst Wechselwirkungen
ABER: Summation der Beiträge aller Schleifen ergibt: unendlich
- **Renormierung** von (Farb-)Ladung und Masse des Teilchen liefert endliche Werte
KONSEQUENZ: Ladung (\rightarrow Kopplung) und Masse des Teilchens hängen von der Skala der Renormierung ab

QCD im Schnelldurchgang

- 1973: Quanten Chromo Dynamik

Theorie d. Wechselwirkung zwischen Quarks & Gluonen mit Farbladung

- ▶ Renormierung (Skala μ)

$$\Rightarrow \mu^2 \frac{d\alpha_s}{d\mu^2} = -\beta_0 \cdot \alpha_s^2 - \dots$$

und $\beta_0 = \frac{33 - 2n_f}{12\pi} > 0 \quad (n_f < 17)$

\Rightarrow "Laufen" d. renormierten Kopplung
& asymptotische Freiheit

$$\alpha_s \rightarrow 0 \quad \text{wenn} \quad \mu^2 \rightarrow \infty$$

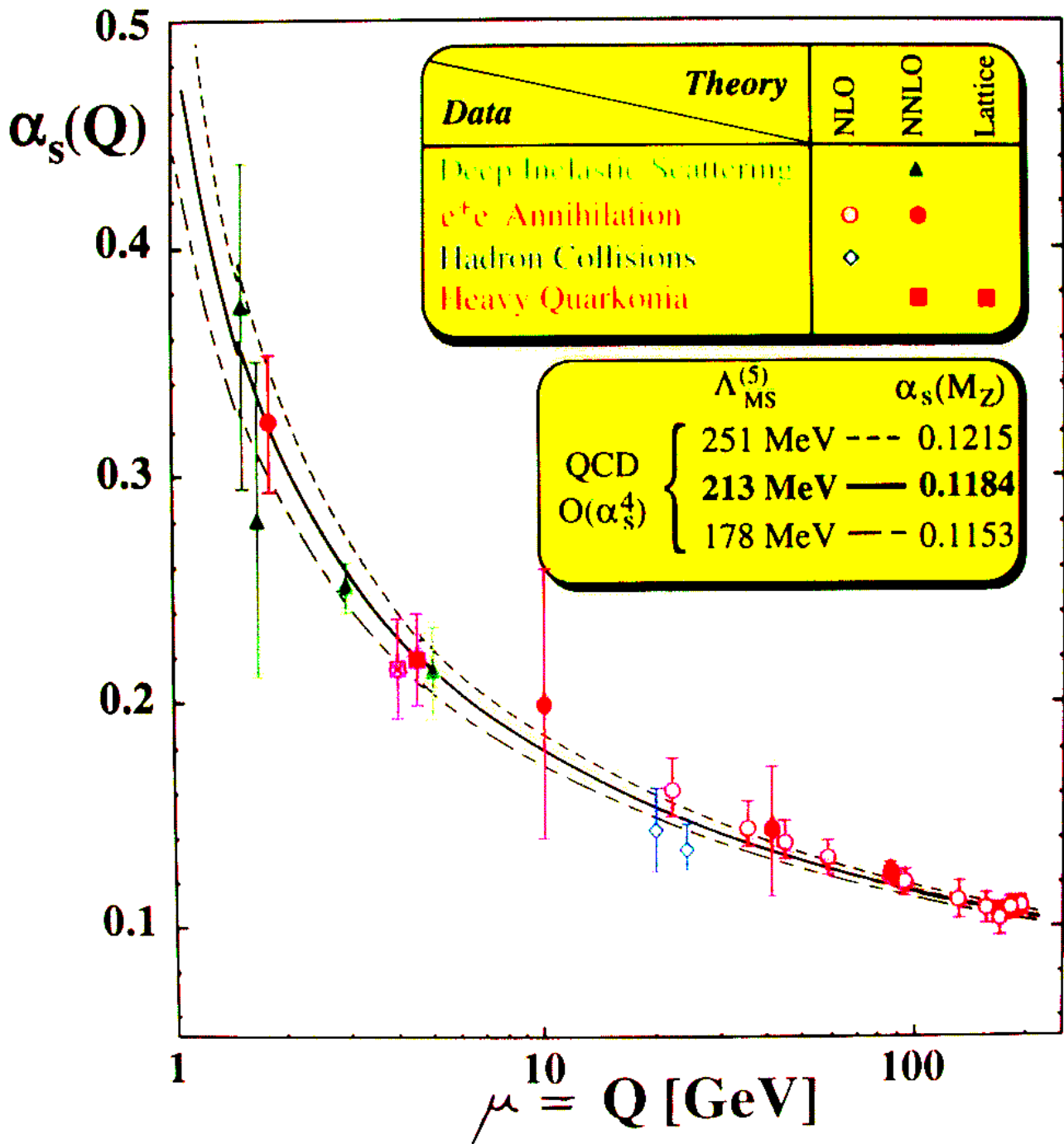
$$\Rightarrow \frac{1}{m} \frac{dm}{d\ln\mu^2} = -\gamma_{m,0} \cdot \alpha_s - \dots$$

und $\gamma_{m,0} = \frac{1}{\pi} > 0$

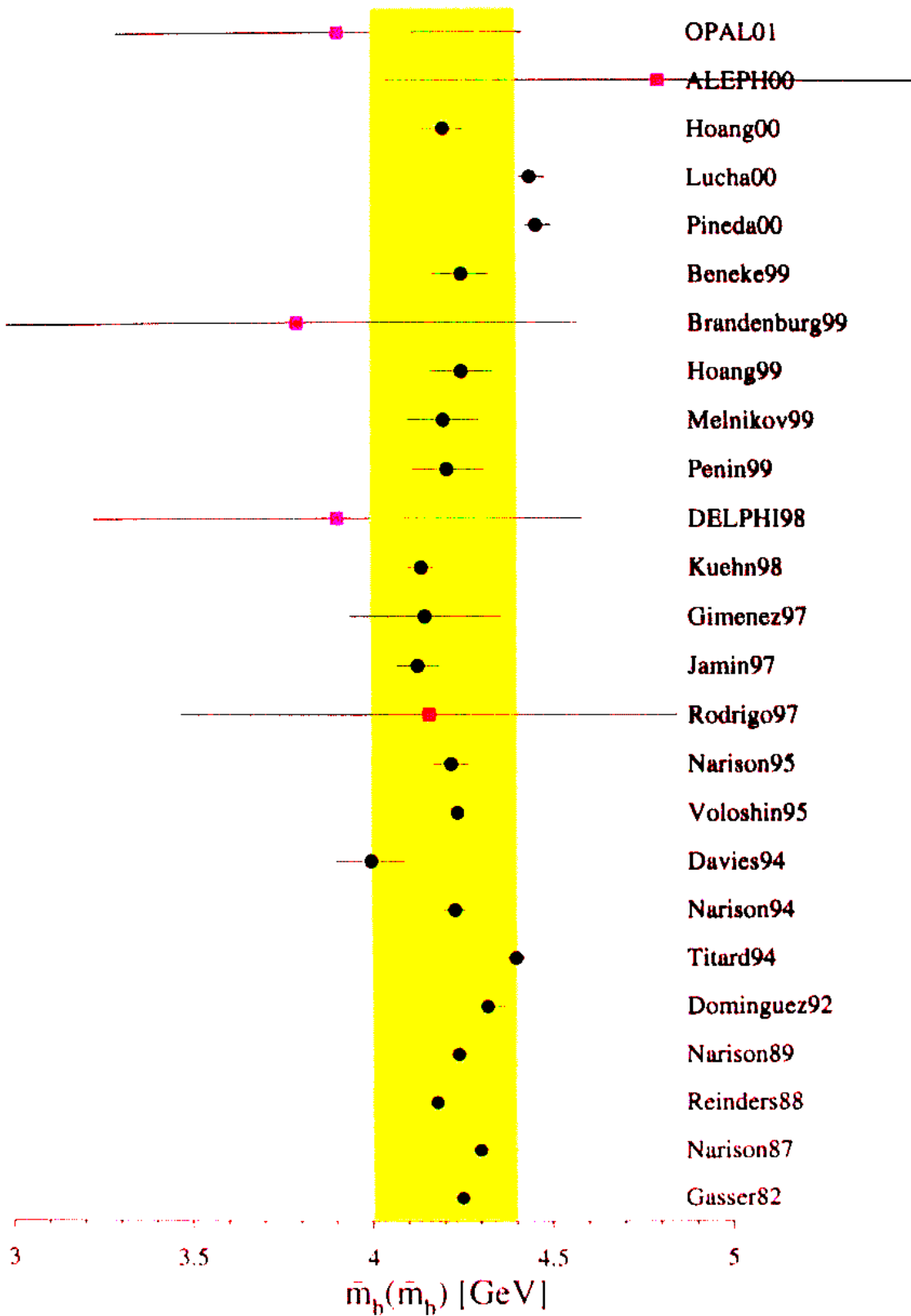
\Rightarrow "Laufen" d. renormierten Quarkmassen

(Renormierungs-)Skalenabhängigkeit der

Kopplungskonstanten der starken Ww.



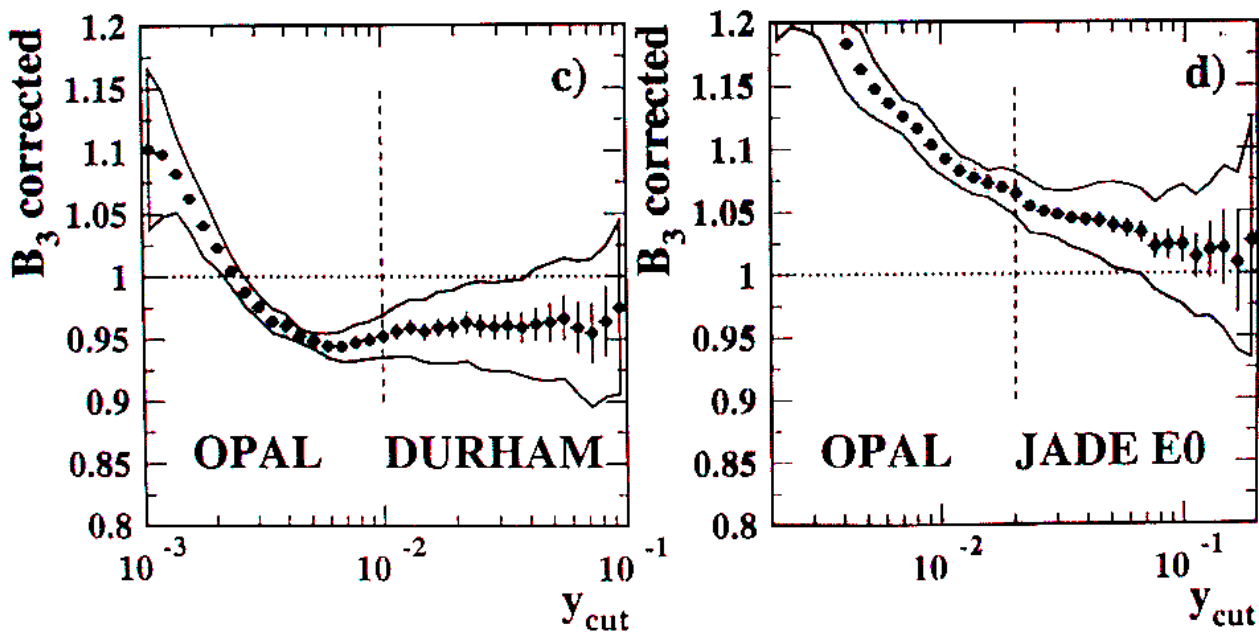
Masse des b-Quarks



- Theorie-Massenbestimmungen (i.w. aus Υ , Υ' -Spektroskopie)
- exp. Massenbestimmung von Z Bosonmassen

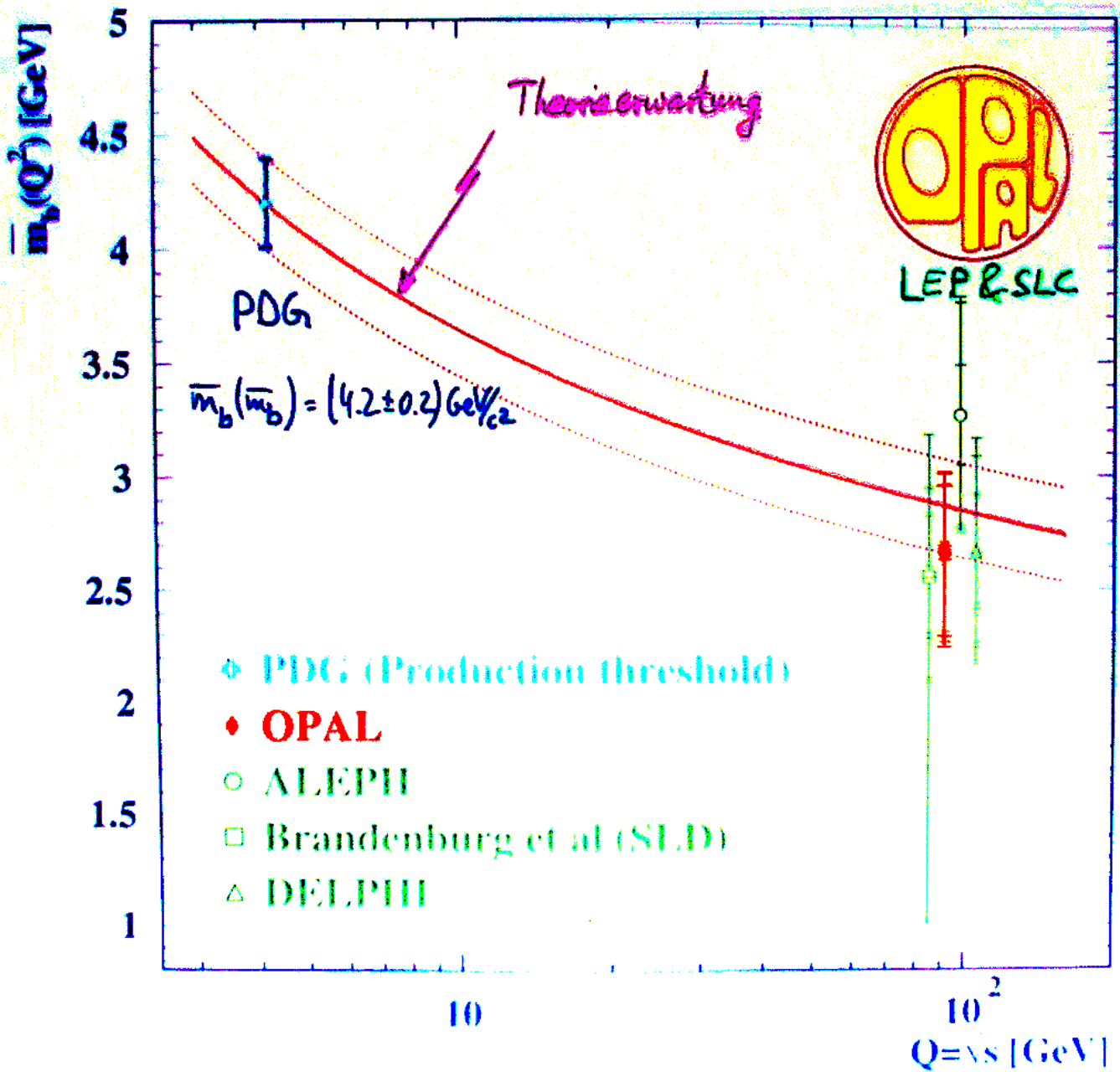
Bestimmung der b-Quarkmasse @ m_Z

- **Ansatz:** Gluonabstrahlung ist abhängig v. q-Masse (vgl. γ -Bremsstrahlung von Elektron \leftrightarrow Myon)
- **Konzept:**
$$B_3 := \frac{\# \text{ harte Gluonbremsstr. v. b-Quark}}{\# \text{ " " " v. udsc-Quarks}}$$
- **Methode:** Identifikation von $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$ bzw. leichte Quarks
Bestimmung der Rate von $q\bar{q}g$ -Endzuständen
(als Fkt. eines Jetauflösungsparameters y_{cut})



- **Bestimmung** der b-Quarkmasse mittels Theorie =
Vorhersage in 2. Ordnung in α_s
(Bernreuther et al., Rodrigo et al., Alinari et al. : 1997)

Laufende b - Quarkmasse

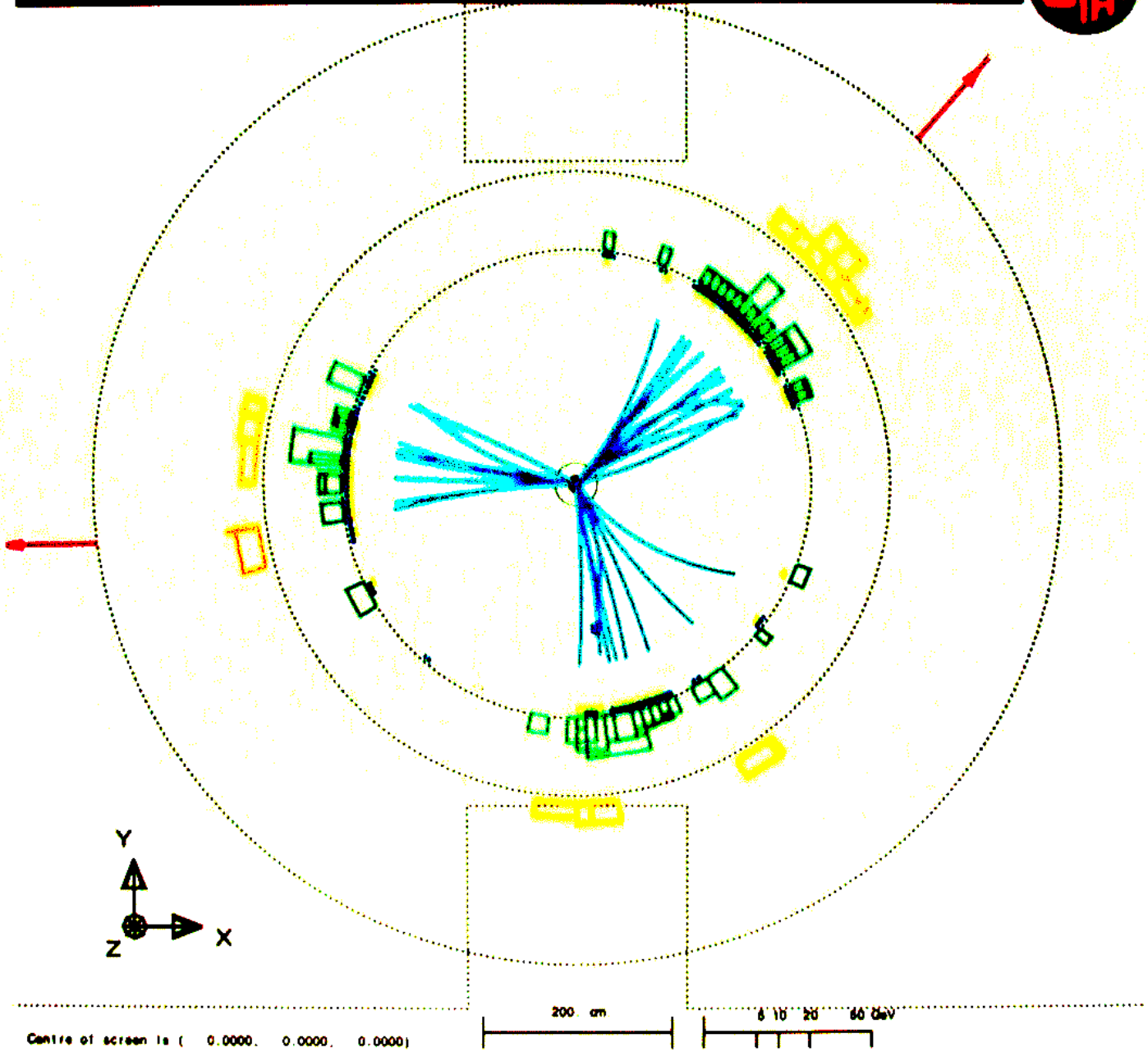


Exkurs: b-Quark-Identifikation & Si-Detektoren

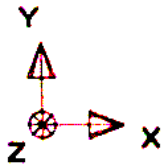
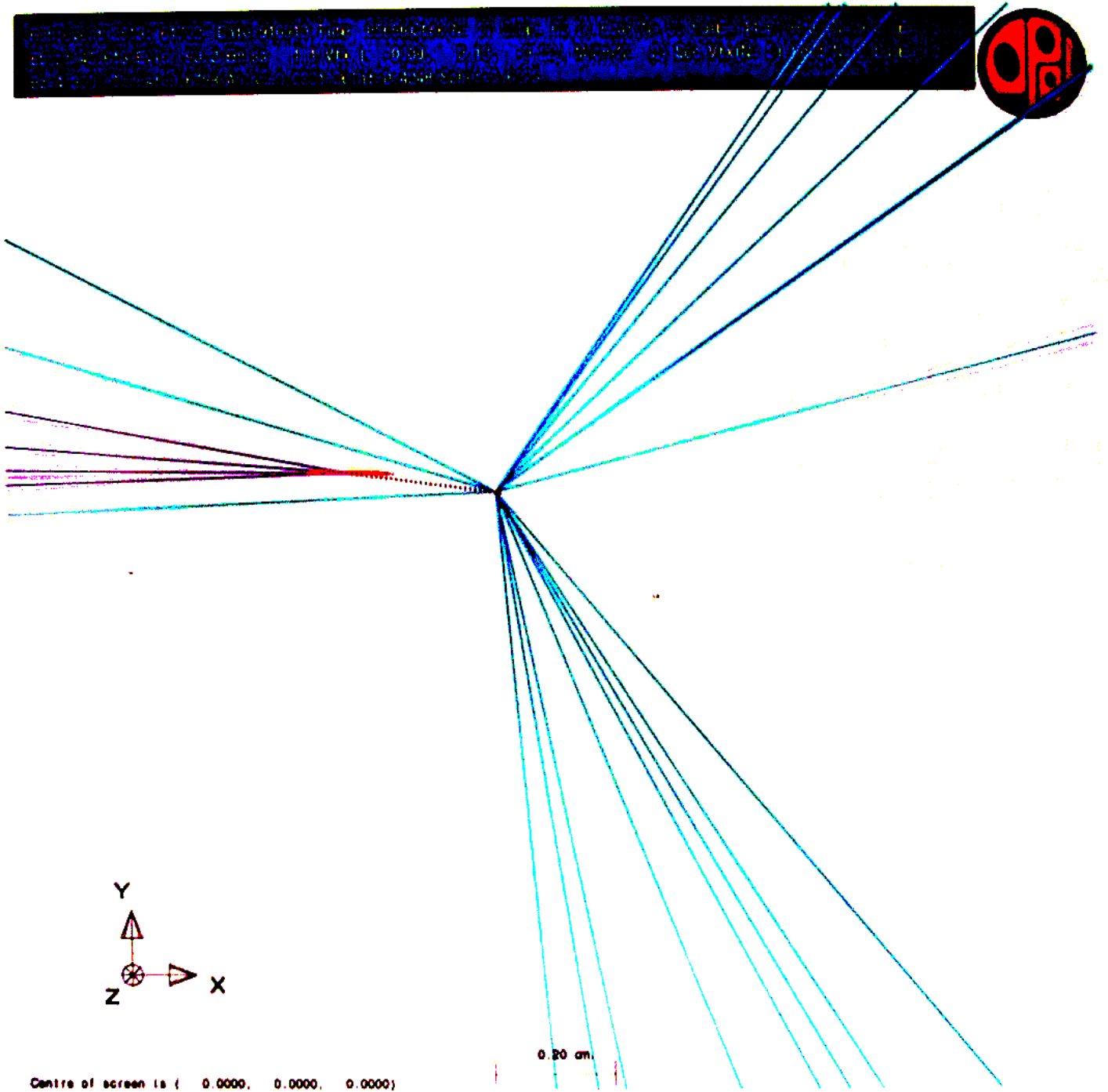
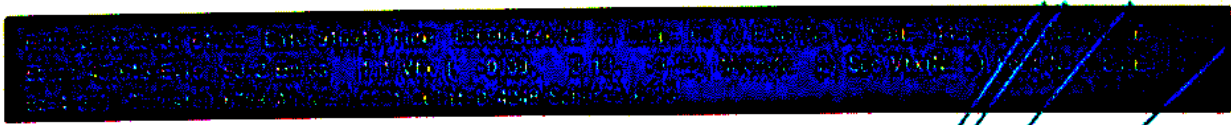
- **b-Quark-Identifikation**
 - nutzt lange Lebensdauer von B-Hadronen
 - Beobachtung v. Zerfallsvertices
- **Silizium-Vertexdetektoren**
 - präzise Ortsmessung von Teilchen (typ. 10 μm)
 - Rekonstruktion v. Zerfallsvertices
- **Strahlungsbelastung nahe Wechselwirkungspkt.**
 - genaue Auflösung eines Zerfallsvertex
 - Si-Detektoren nah am Ww.-Punkt
 - u.U. extremer Strahlenbelastung ausgesetzt
 - Beeinträchtigung d. Meßgenauigkeit
 - aktive & schnelle Schutzsysteme
 - z.B. kontrollierte schnelle Extraktion von e^+ & e^- -Strahl bei ersten Anzeichen von Instabilitäten und beginnender exzessiver Bestrahlung

bbg 3-Jetendzustand

Run: 20110101 09:00:00
Run: 20110101 09:00:00
Run: 20110101 09:00:00



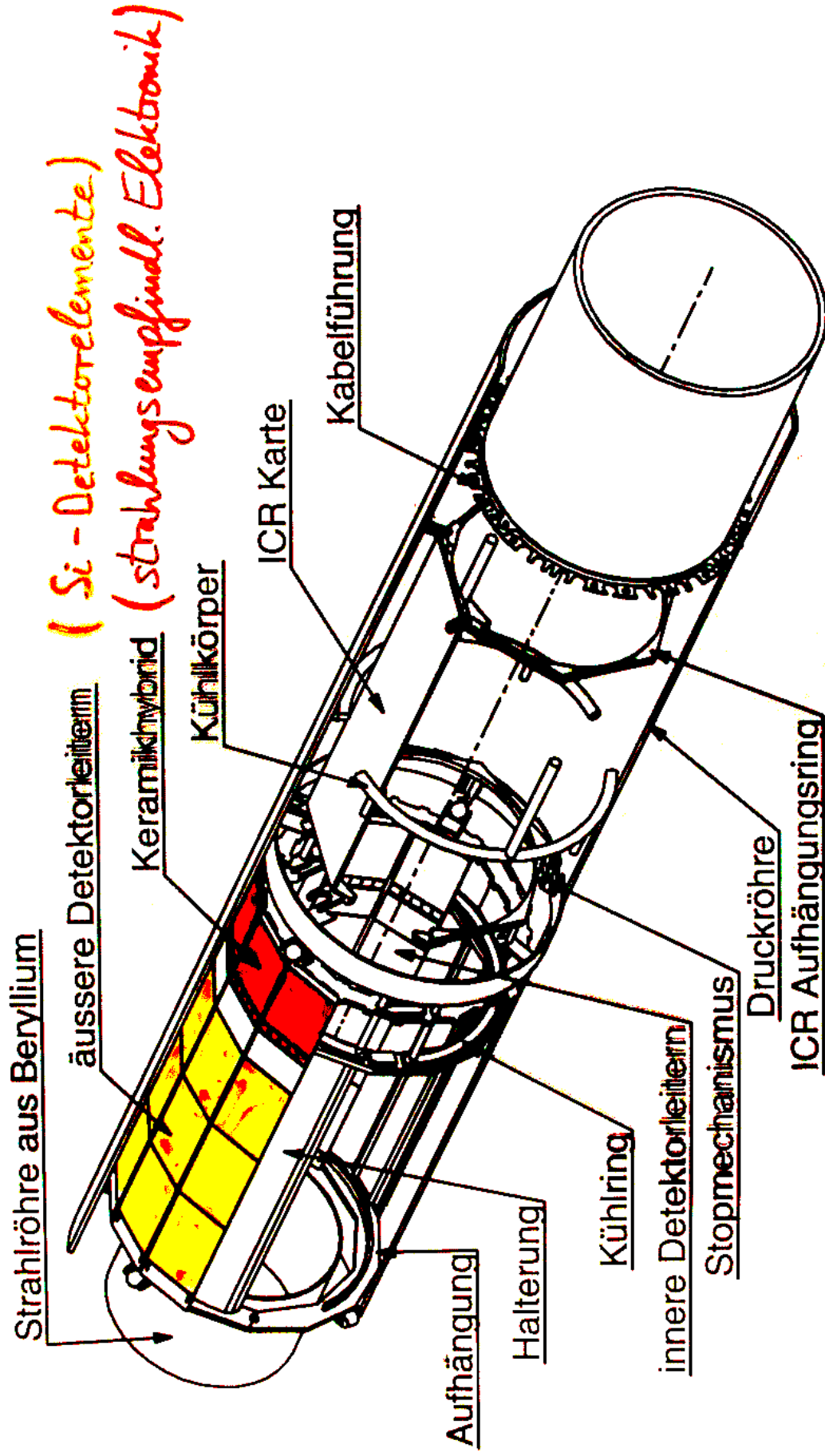
Zoom an Ww-Punkt des bbg-3-Jetendzustands



Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

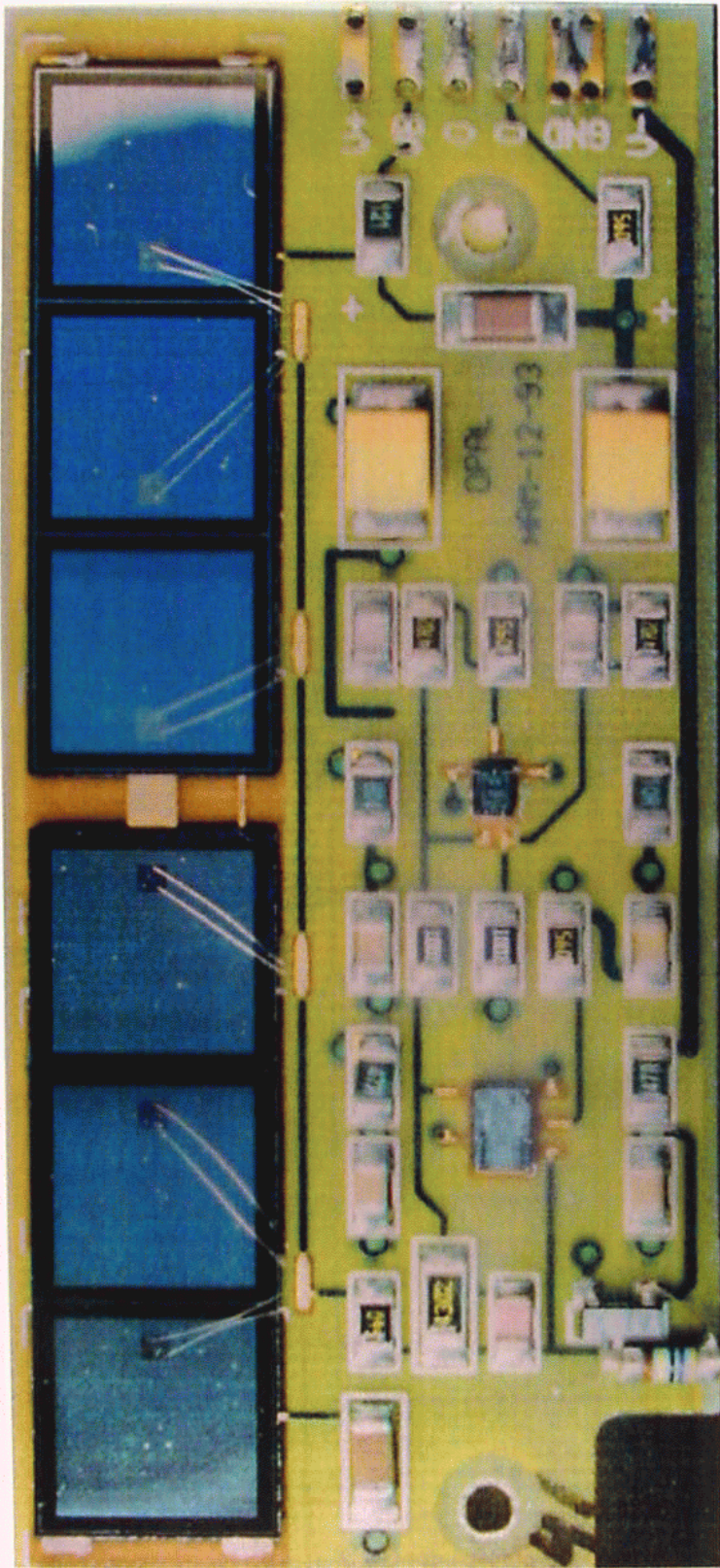
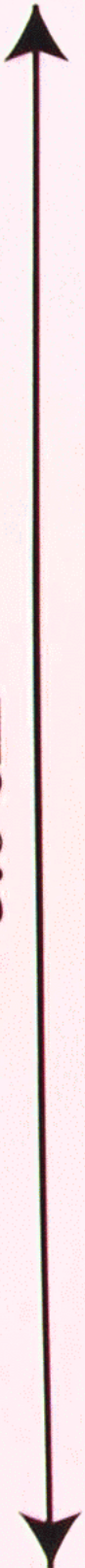
0.20 m

OPAL Mikrovertex



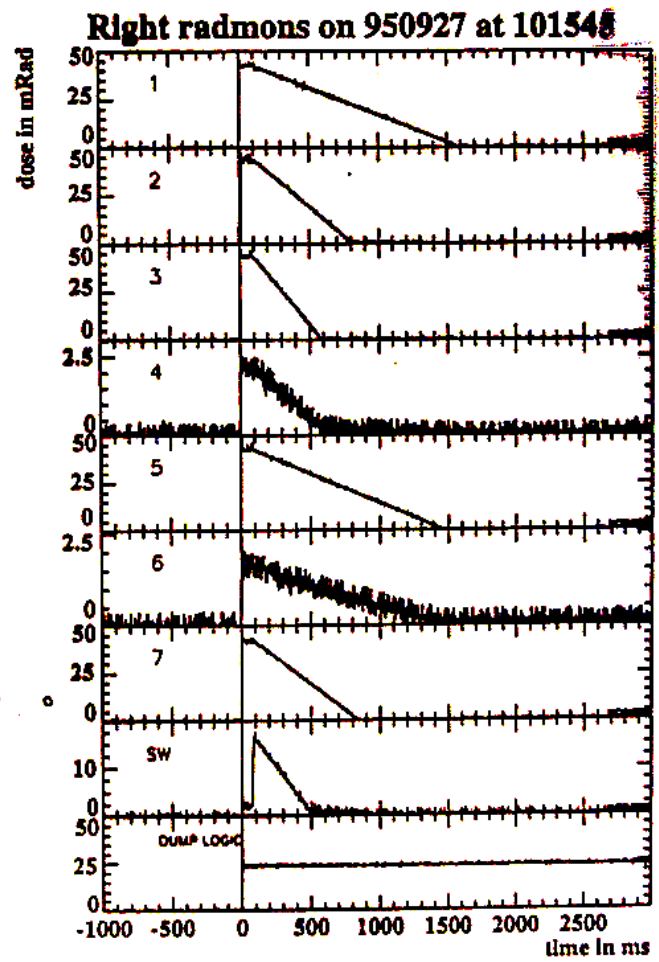
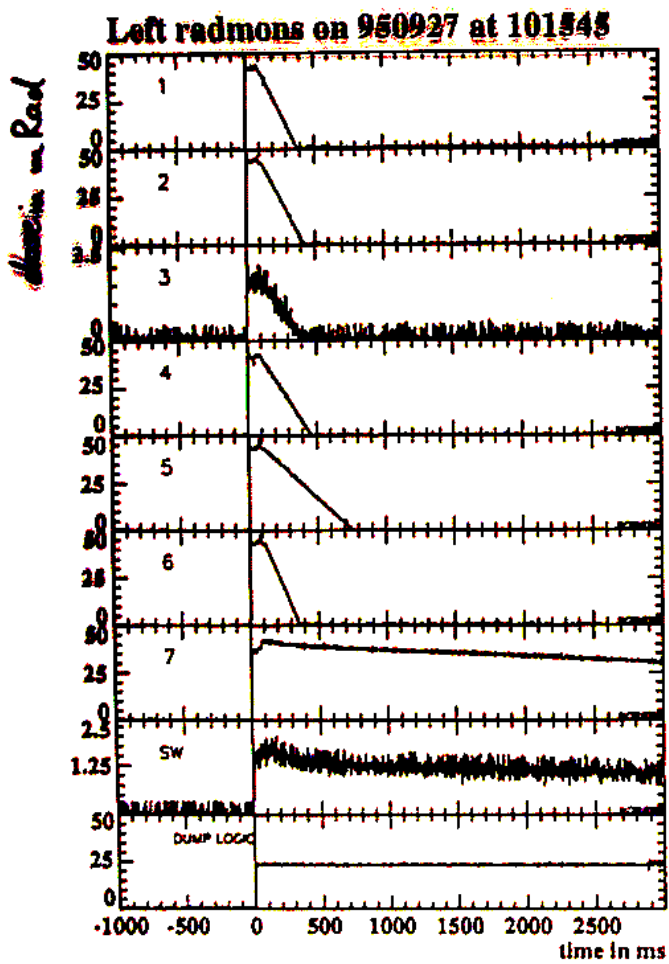


5.6 cm




Strahlungsmonitor modul des OPAL - Si - Detektors

Beispiel für Strahlverlust



Physik des t -Quarks

- t -Quarkmasse $m_t = (174.3 \pm 5.1) \text{ GeV}/c^2$
Fundamentaler Parameter im Standardmodell
 t -Higgs Yukawa-Kopplung ≈ 1
- t -Lebensdauer $\approx 1/m_t^2 < 10^{-24} \text{ s}$
zu kurz, um t -Hadronen bilden zu können
ABER: bisher experimentell noch nicht ausgeschlossen
- Helizität im t -Zerfall (Massendiff. t - b -Quark)


The diagram shows a horizontal line representing a quark transition. On the left, a green arrow labeled 'b' points to the right, with a pink arrow below it also pointing right and labeled '+1/2'. In the middle, a black dot labeled 't' is connected to the line. On the right, a green arrow labeled 'W+' points to the right, with a pink arrow below it also pointing right and labeled '+1'. The text 'ist nicht möglich' is written to the right of the W+ arrow.

\Rightarrow keine rechtshändigen W -Bosonen im Z -Zerfall

t-Quark und Physik außerhalb des Standard Modells

- Erweiterter Higgs-Sektor (2 Higgs-Doublets)

$$t \rightarrow H^+ b \quad \text{geladene Higgs-Bosonen}$$

- Supersymmetry (SUSY) zw. Bosonen u. Fermionen

$$t \rightarrow \tilde{t} + \tilde{\chi}^0 \quad \text{leichtes skalares } \tilde{t}$$

\downarrow
 $b \text{ oder } \nu$

$$\tilde{g} \rightarrow t + \tilde{t}$$

⇒ beobachtet erhöhte t-Produktionsrate

- Alternative Modelle zum Higgsmechanismus

z.B. Erweiterte Technicolor (ETC)

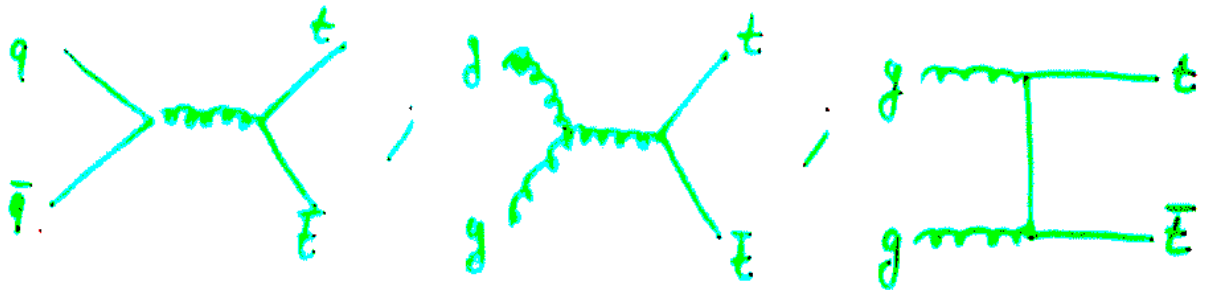
hat anstelle des Higgs Bosons ein

$T\bar{T}$ -Kondensat aus Techni-t-Quarks

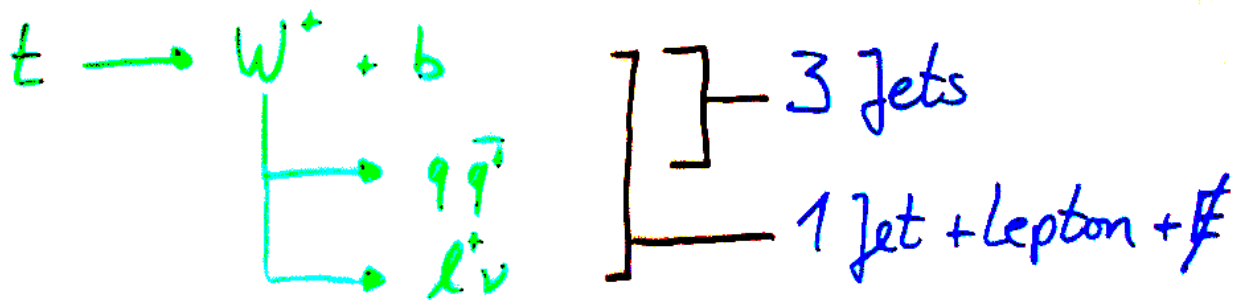
⇒ Teilchenmassen $\sim \langle T\bar{T} \rangle$

t-Produktion & -Zerfall

- **t-Produktion** in $p\bar{p}$ -Kollisionen



- **t-Zerfall**



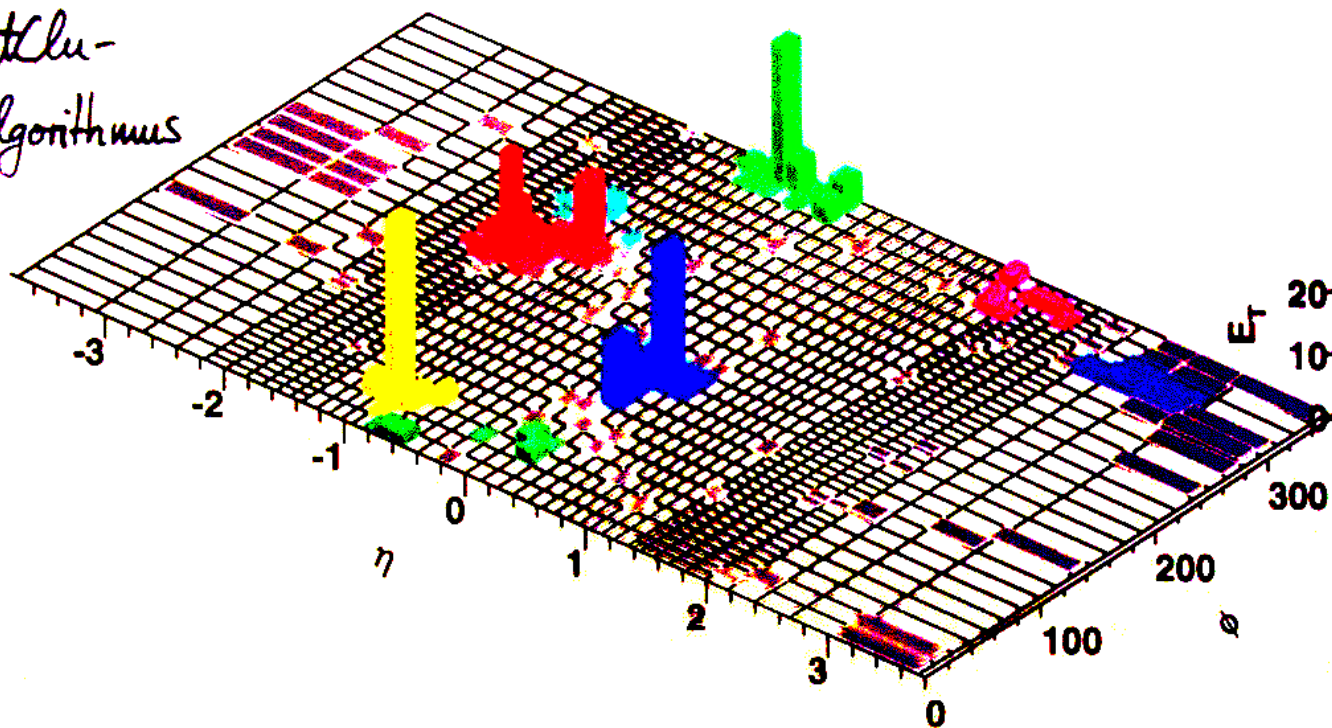
⇒ bei t \bar{t} -Produktion bis zu 6 Jets!

⇒ experimentelle Herausforderung,
Jets zu finden und
Jets richtig zuzuordnen!

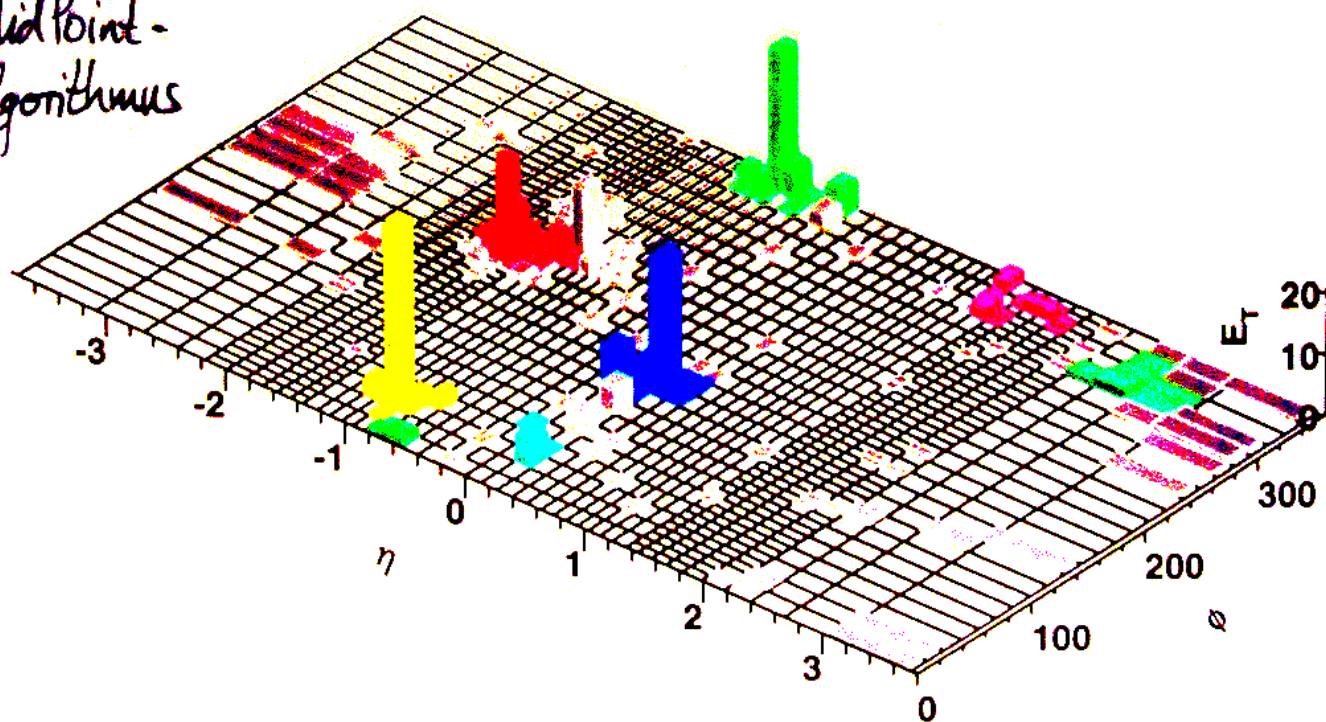
Simulierte $t\bar{t} \rightarrow 6$ Jet Reaktion

$\sqrt{s} = 2\text{TeV}$

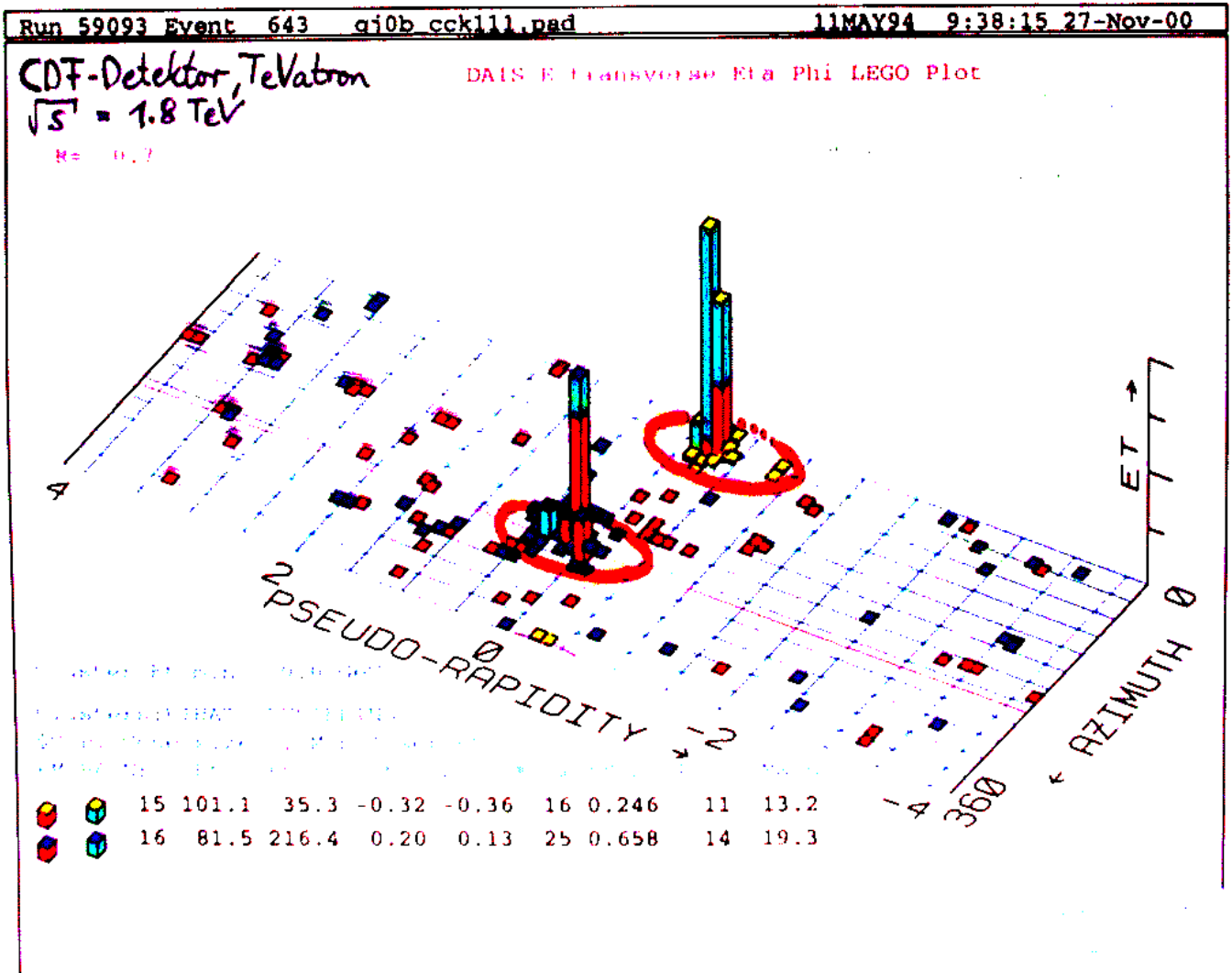
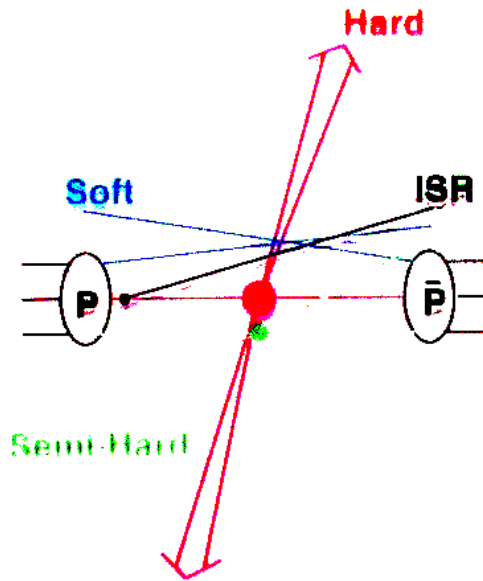
Jetclu-
Algorithmus



Midpoint-
Algorithmus

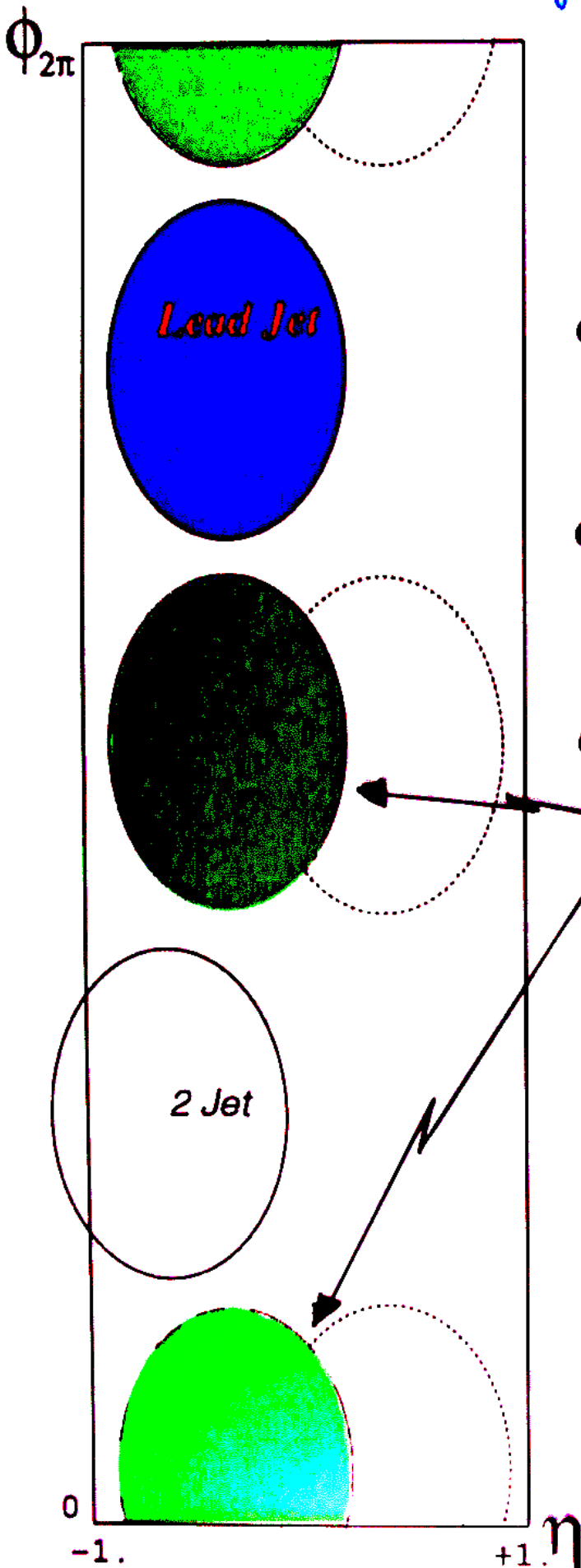


reale $p\bar{p}$ - Reaktionen



⇒ Zusätzl. Streuprozesse 2-Jetzustand überlagert!

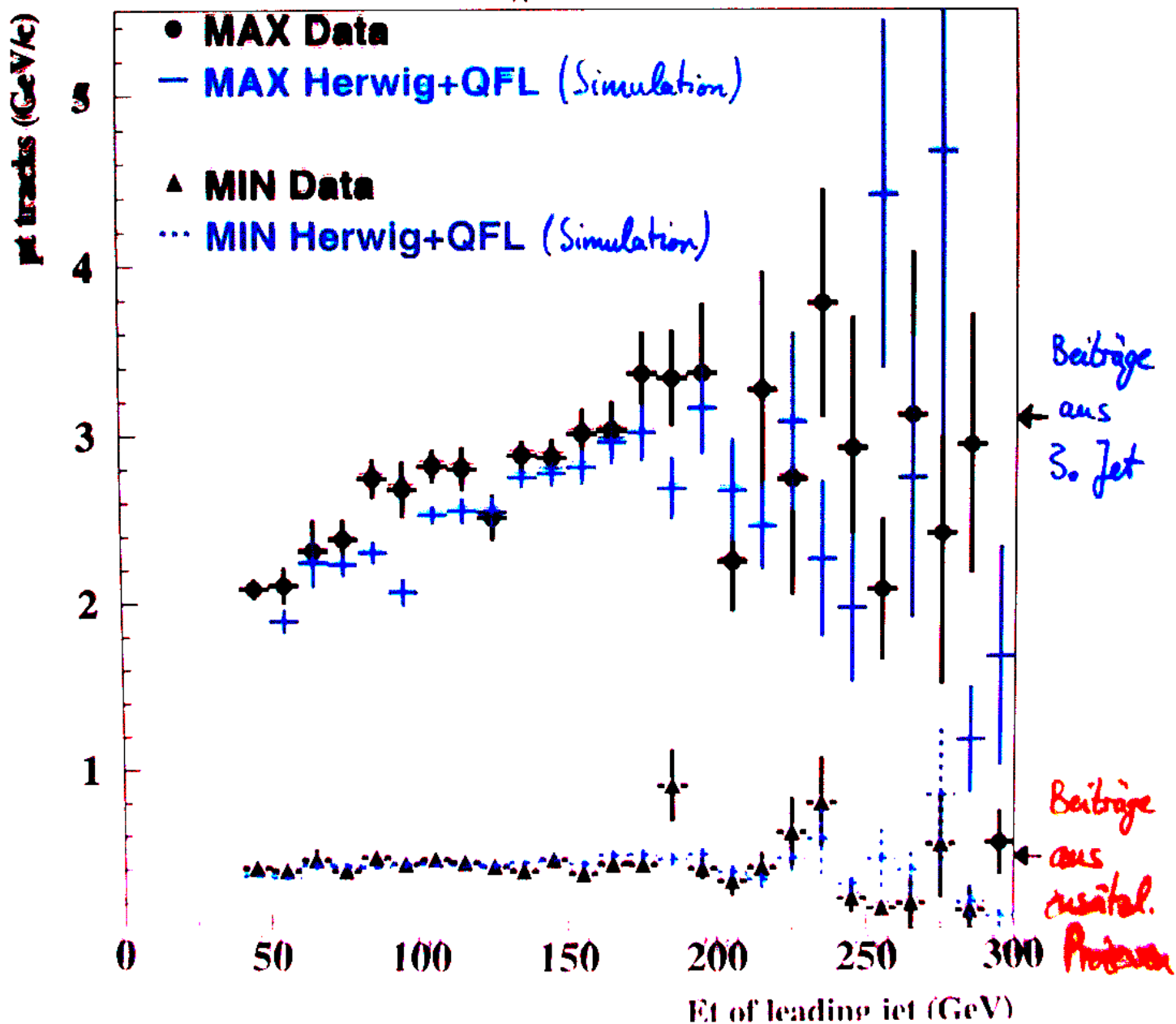
Studium der Beiträge aus zusätz. Streuprozessen



- Konus um höchsteenerget. Jet
- Konus um gegenüberliegend. Jet
- Messe Energiebeiträge in dazwischenliegenden Konen

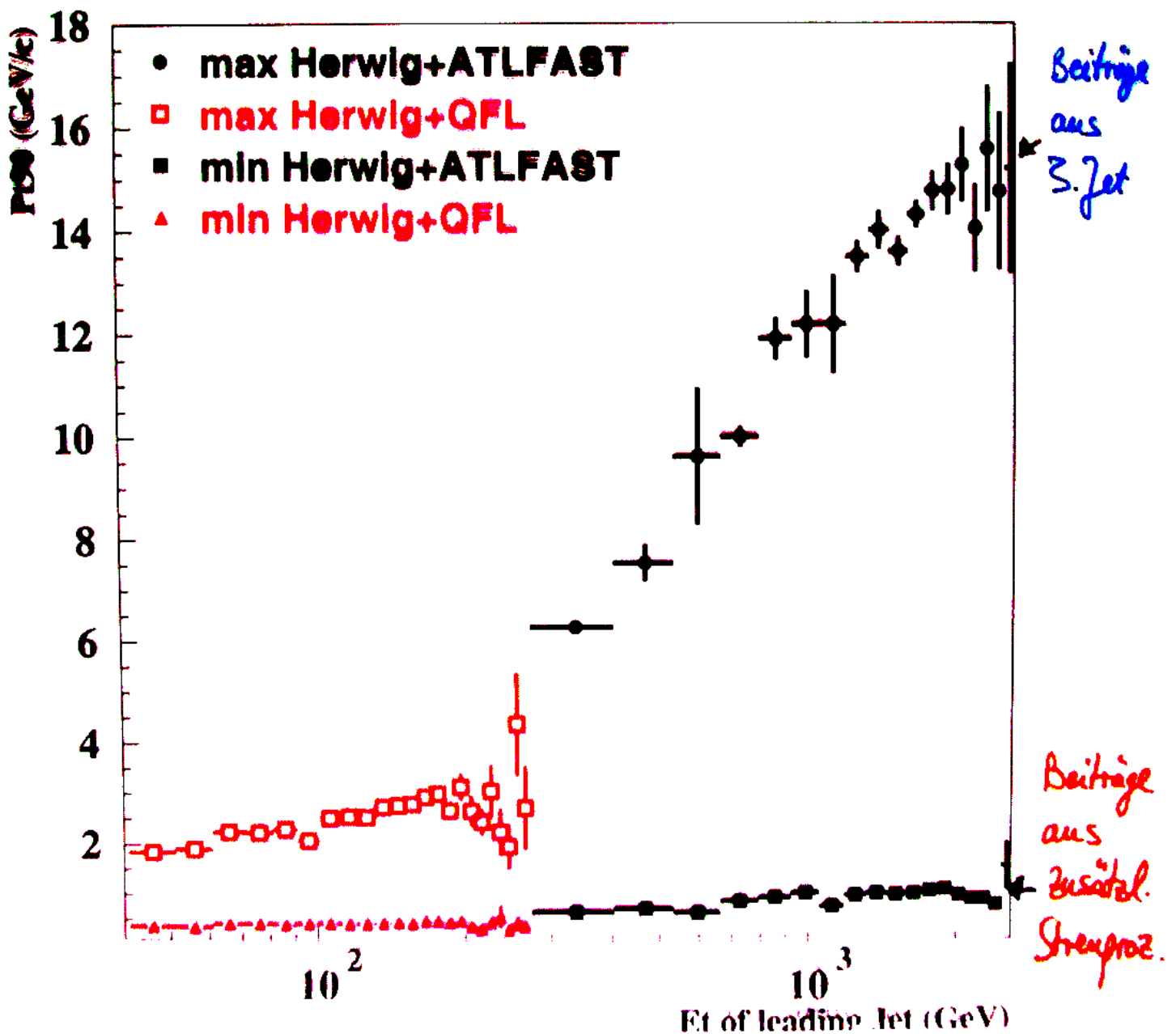
Energiebeiträge aus zusätzl. Streuprozessen
in Konen zwischen den Jets

Simulation okay!?



Extrapolation von Tevatron zu LHC

- Herwig-Simulation \approx okay für Tevatron ($\sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV}$)
- ⇒ Extrapolation zu LHC-Energie: $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$

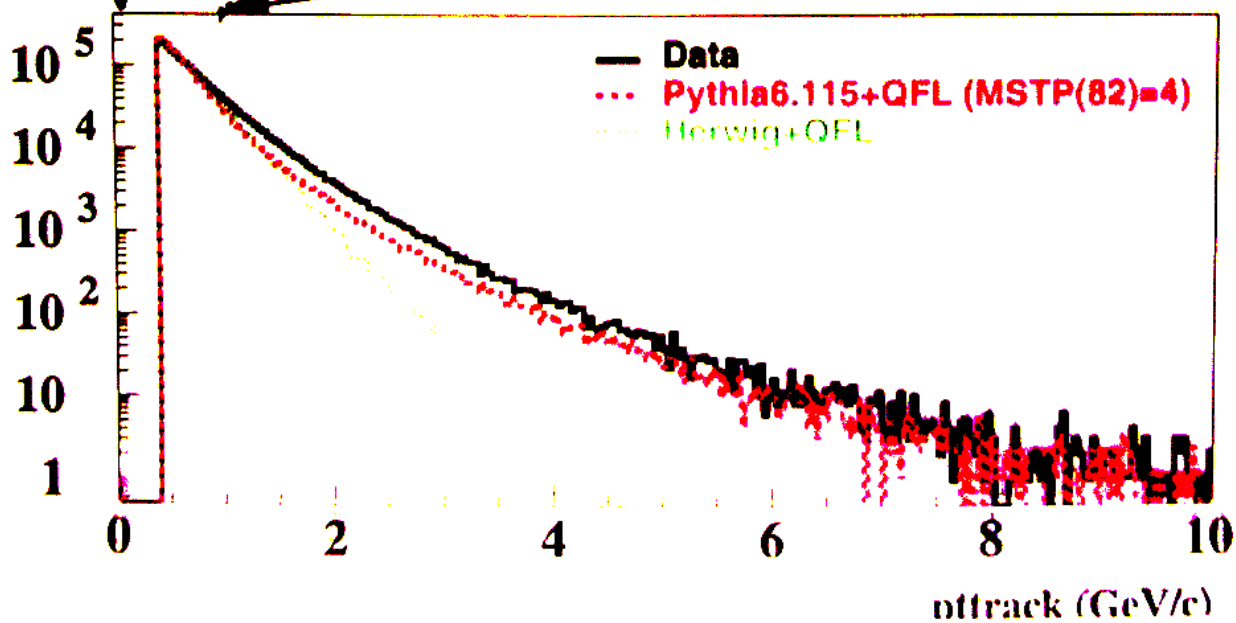
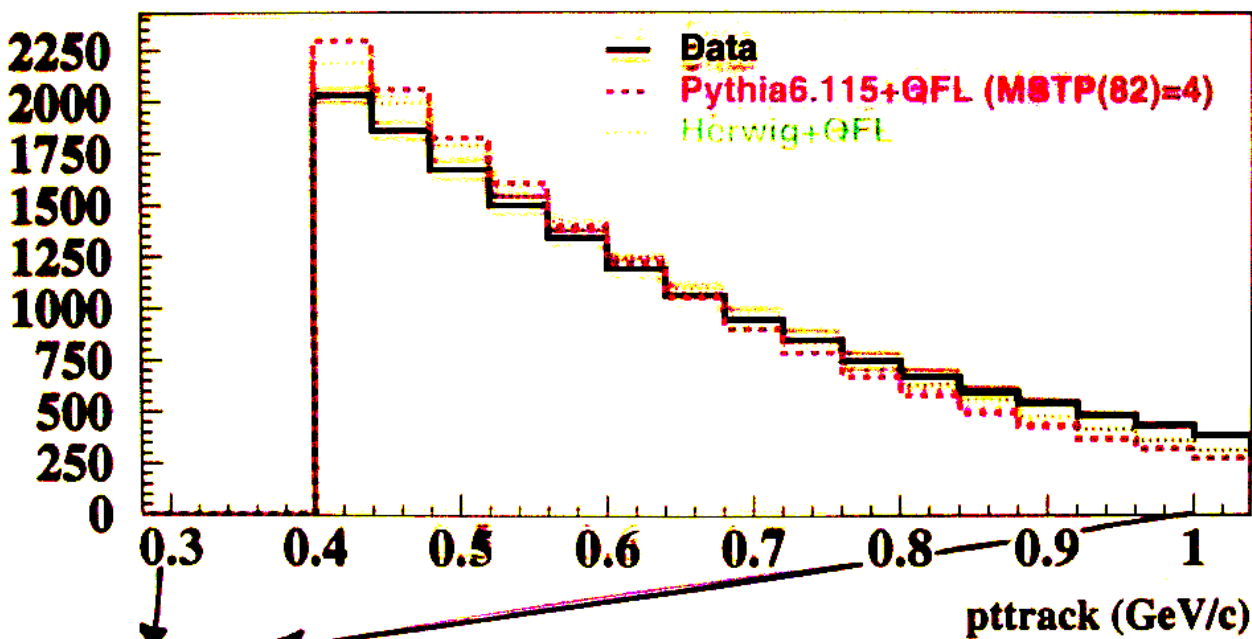


Simulationen: Nobody's perfect!

Impulsverteilung der geladenen Teilchen
in Konen zwischen Jets

→ bessere Simulationen erforderlich!

$\times 10^2$



Zusammenfassung

- Teilchenmassen werfen noch viele Fragen auf:
 - ▶ Ursprung aus Higgs mechanismus?
 - ▶ Massenhierarchie? (Neutrinos \approx masselos,
t-Quark: $175 \text{ GeV}/c^2$)
 - ▶ Massendefinition für Quarks
- ... und bieten Überraschungen:
 - ▶ "laufende" b-Quarkmasse
NB: auch Elektronen haben eine laufende renormierte Masse
- ... und sind der Zugang zu Verständnis
wie Erweiterungen d. Standardmodells
 - ▶ t-Quark einzig mit "natürlichem" Massenwert