

Die Hochtemperaturphase der Yang-Mills-Theorie in Landau-Eichung

Axel Maas

1. Dezember 2004

Übersicht

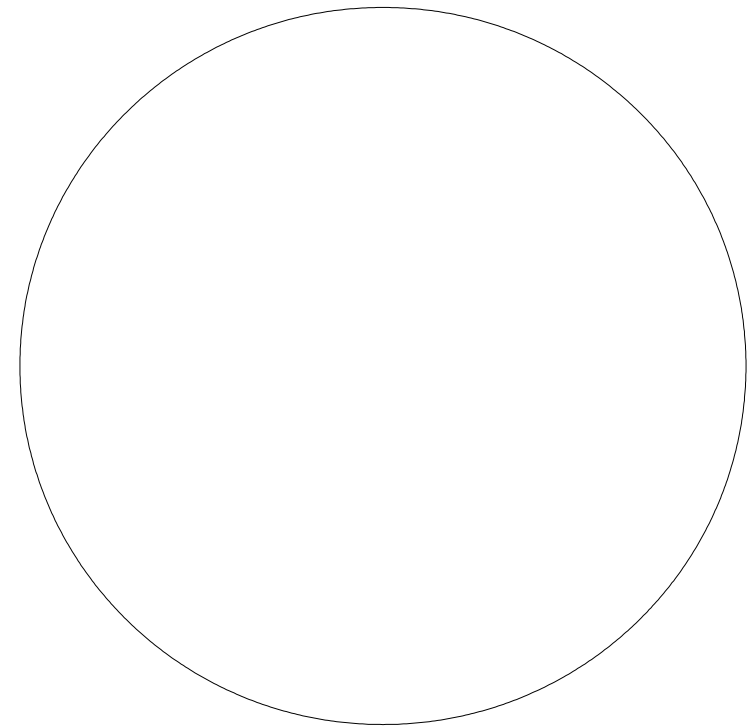
- **Einführung**
 - QCD, Yang-Mills-Theorie und "Confinement"
- **Methode**
 - Propagatoren und
Dyson-Schwinger-Gleichungen
- **Ergebnisse**
- **Schlußfolgerungen und Zusammenfassung**

[Teilweise veröffentlicht in EPJ C37, p335, 2004;

weitere relevante Teilergebnisse in hep-ph/0408282 und hep-ph/0411052]

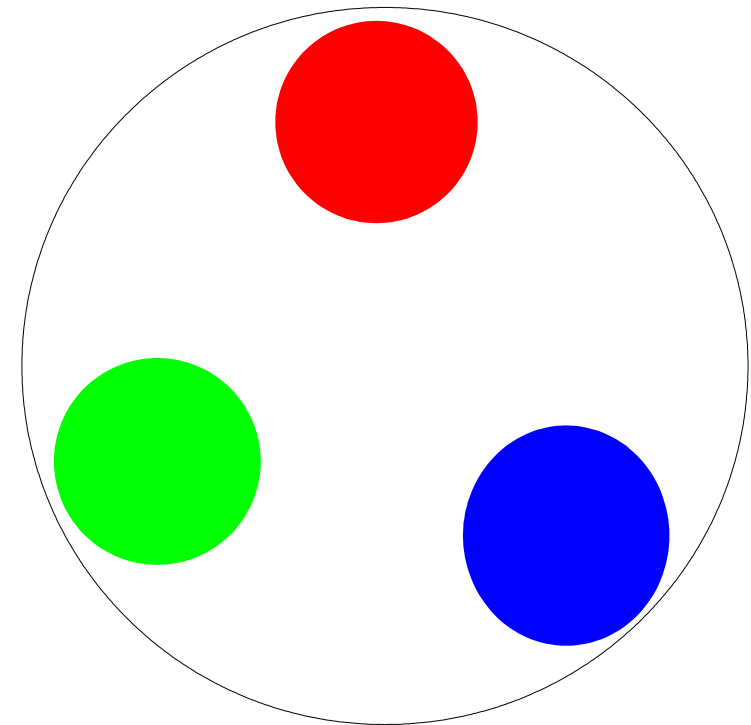
Quantenchromodynamik (QCD)

- QCD beschreibt Aufbau der Hadronen und Kerne



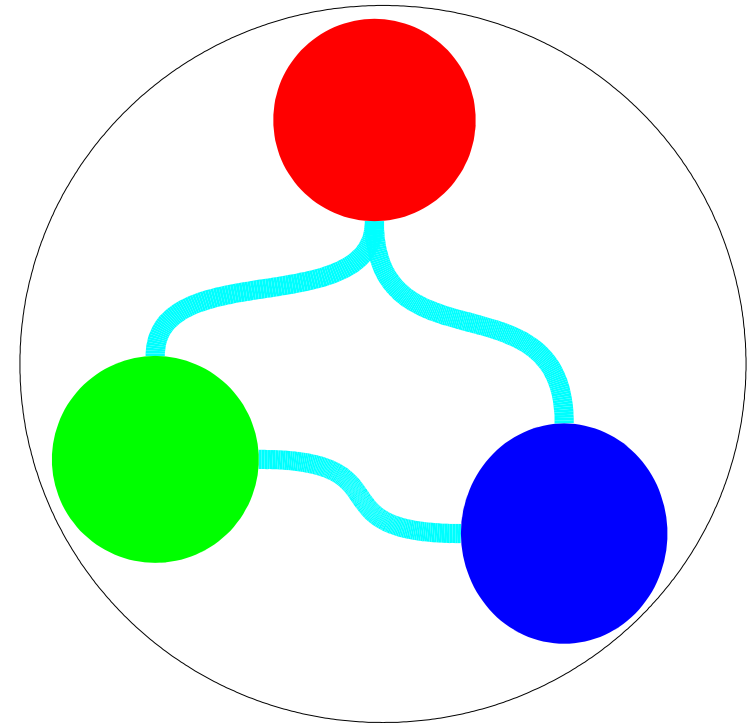
Quantenchromodynamik (QCD)

- QCD beschreibt Aufbau der Hadronen und Kerne
- Elementare Freiheitsgrade sind **Quarks**



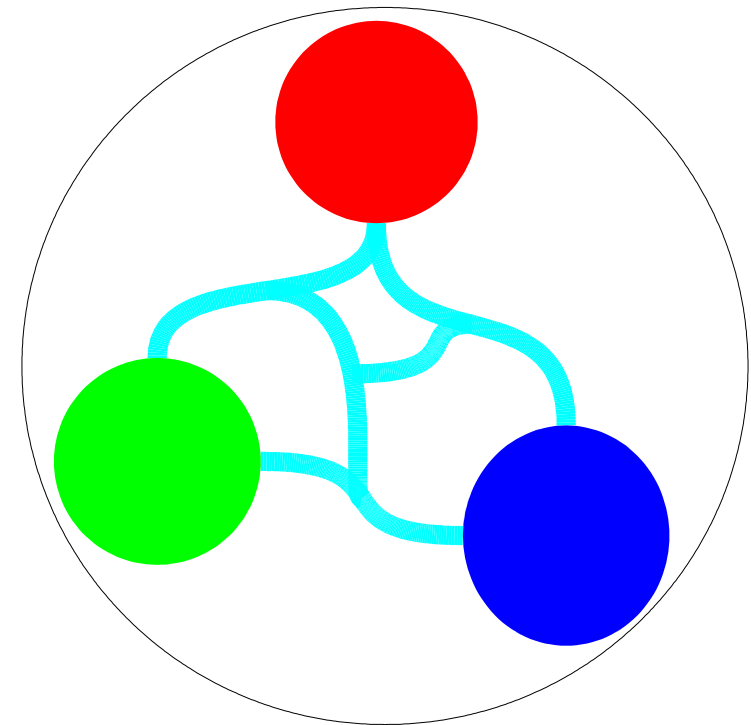
Quantenchromodynamik (QCD)

- QCD beschreibt Aufbau der Hadronen und Kerne
- Elementare Freiheitsgrade sind **Quarks** und **Gluonen**



Quantenchromodynamik (QCD)

- QCD beschreibt Aufbau der Hadronen und Kerne
- Elementare Freiheitsgrade sind **Quarks** und **Gluonen**
 - **Gluonen** sind selbst geladen



Eigenschaften der QCD I

- **Schwach wechselwirkend** bei hohen Energien ($>$ einige GeV)
 - Asymptotische Freiheit
 - Störungstheoretisch zugänglich

Eigenschaften der QCD I

- **Schwach wechselwirkend** bei hohen Energien ($>$ einige GeV)
 - Asymptotische Freiheit
 - Störungstheoretisch zugänglich
- **Stark wechselwirkend** bei niedrigen Energien
 - Störungstheorie versagt
 - Nicht-störungstheoretische Effekte

Eigenschaften der QCD II

- **Chirale Symmetriebrechung**
 - Nukleonenmasse von $\sim 1 \text{ GeV}$
 - Besteht aber aus drei Quarks mit Massen $\sim 5\text{-}10 \text{ MeV}$

Eigenschaften der QCD II

- **Chirale Symmetriebrechung**
 - Nukleonenmasse von $\sim 1 \text{ GeV}$
 - Besteht aber aus drei Quarks mit Massen $\sim 5\text{-}10 \text{ MeV}$
- **Farbeinschluß ("Confinement")**
 - Keine freien Quarks und Gluonen beobachtbar
 - Für Quarks gemessen bis zu $1:10^{30}\text{-}10^{40}$

QCD Thermodynamik I

- Ursprung dieser Effekte?

QCD Thermodynamik I

- Ursprung dieser Effekte?
- Können sich diese
Eigenschaften ändern?

QCD Thermodynamik I

- Ursprung dieser Effekte?
- Können sich diese Eigenschaften ändern?
- Alte Idee: QCD wird schwach gekoppelt bei hohen Temperaturen
 - Störungstheorie
 - Chirale Restaurierung und “Deconfinement”

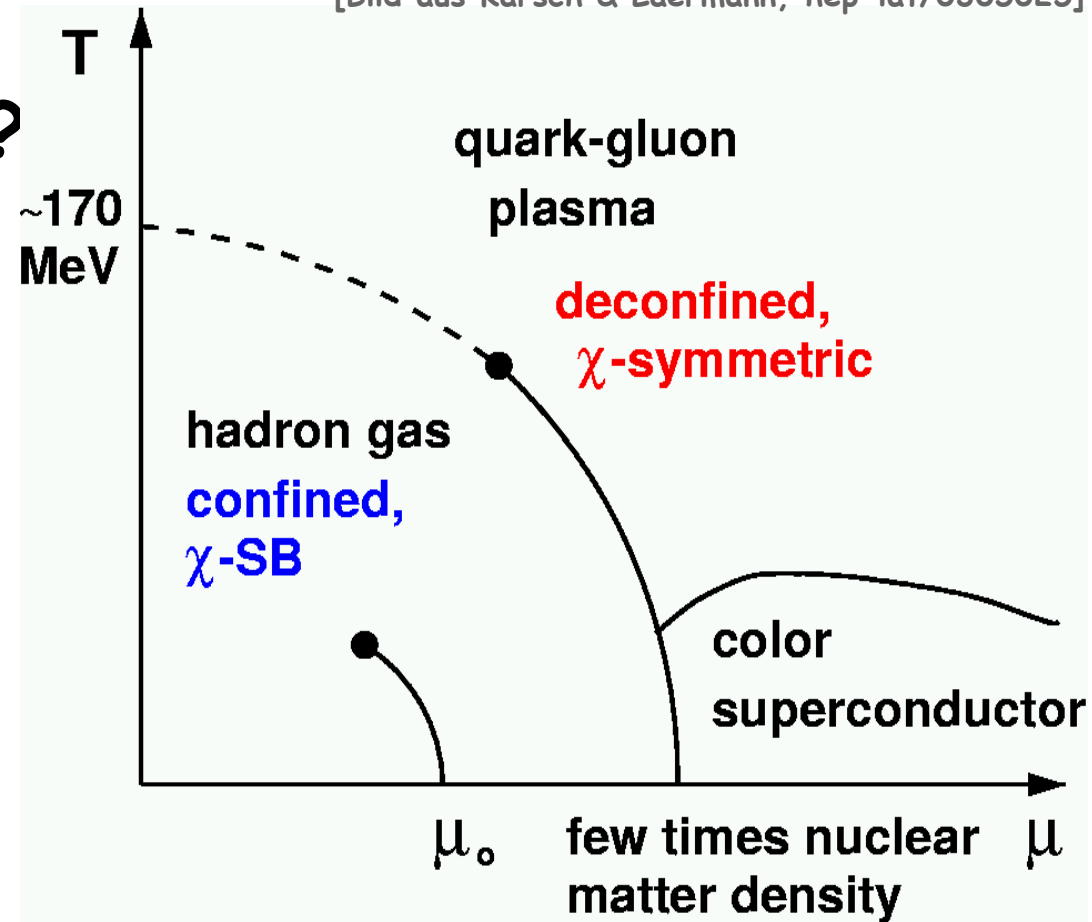
QCD Thermodynamik I

- Ursprung dieser Effekte?
- Können sich diese Eigenschaften ändern?
- Alte Idee: QCD wird schwach gekoppelt bei hohen Temperaturen
 - Störungstheorie
 - Chirale Restaurierung und “Deconfinement”
- Phasendiagramm der QCD
 - Phasenübergänge bei hohen Temperaturen und Dichten

QCD Thermodynamik I

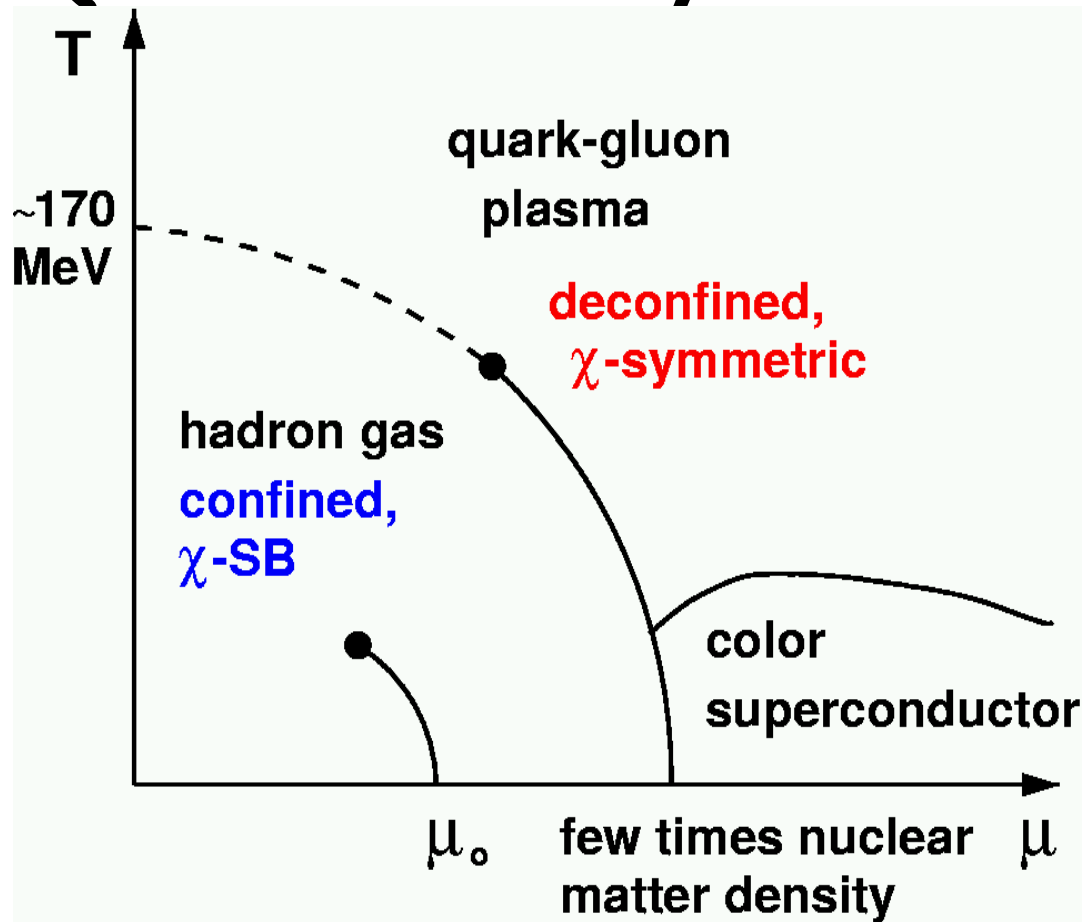
[Bild aus Karsch & Laermann, hep-lat/0305025]

- Ursprung dieser Effekte?
- Können sich diese Eigenschaften ändern?
- Alte Idee: QCD wird schwach gekoppelt bei hohen Temperaturen



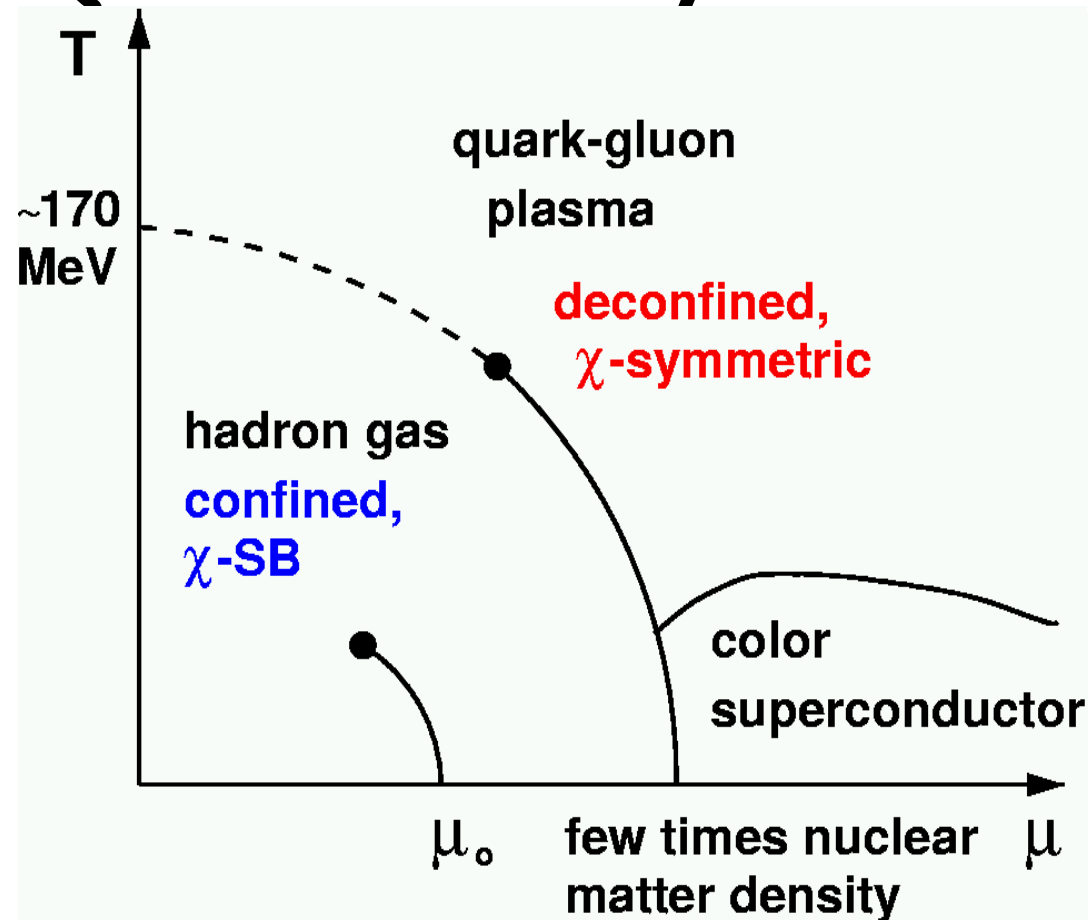
- Störungstheorie
- Chirale Restaurierung und "Deconfinement"
- Phasendiagramm der QCD
 - Phasenübergänge bei hohen Temperaturen und Dichten

QCD Thermodynamik II

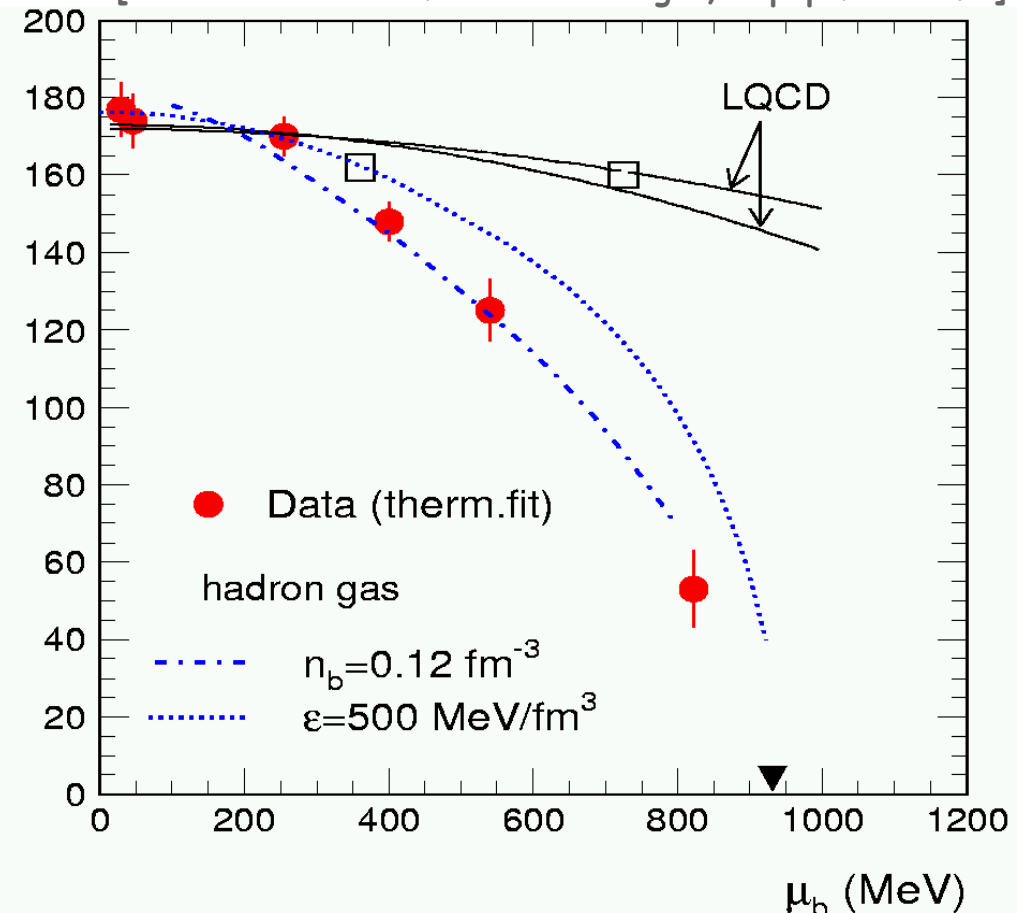


- Relevant für frühes Universum, Neutronensterne (?)
- Experimentell untersucht in Schwerionenstößen

QCD Thermodynamik II

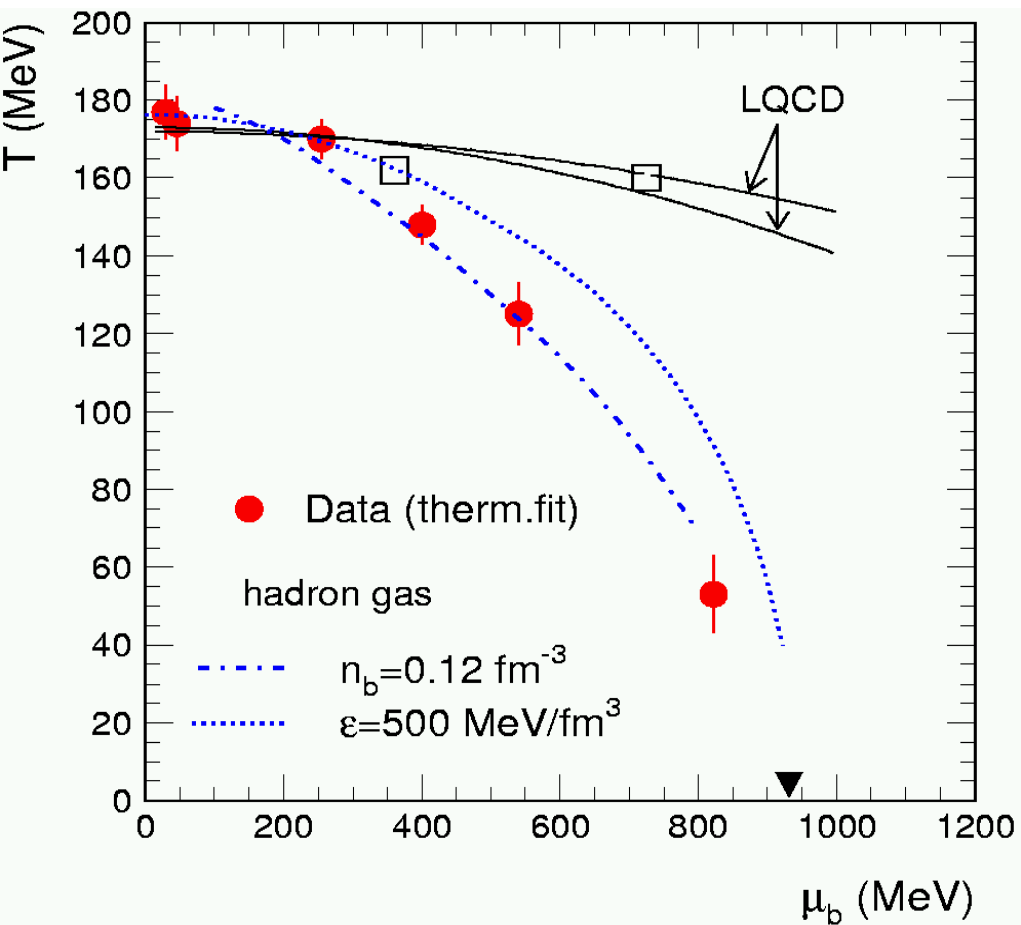


[Bild aus Andronic & Braun-Munzinger, hep-ph/0402291]

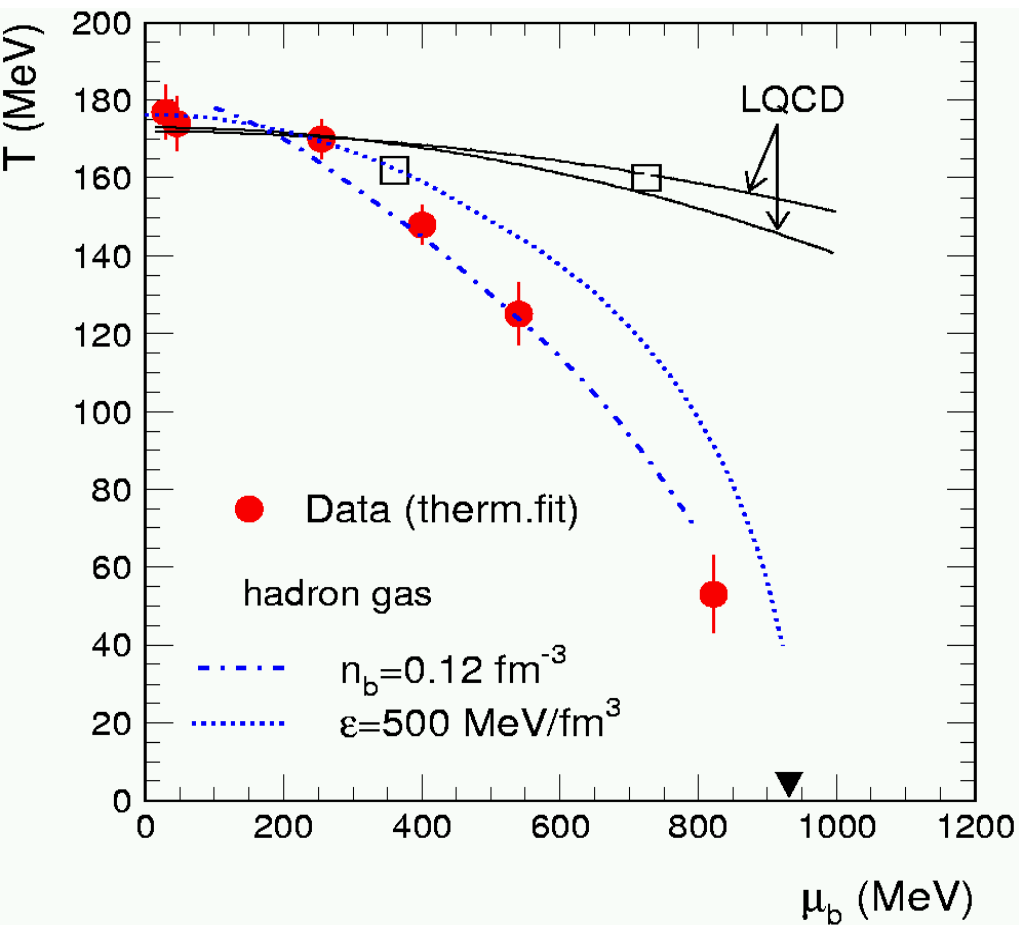


- Relevant für frühes Universum, Neutronensterne (?)
- Experimentell untersucht in Schwerionenstößen

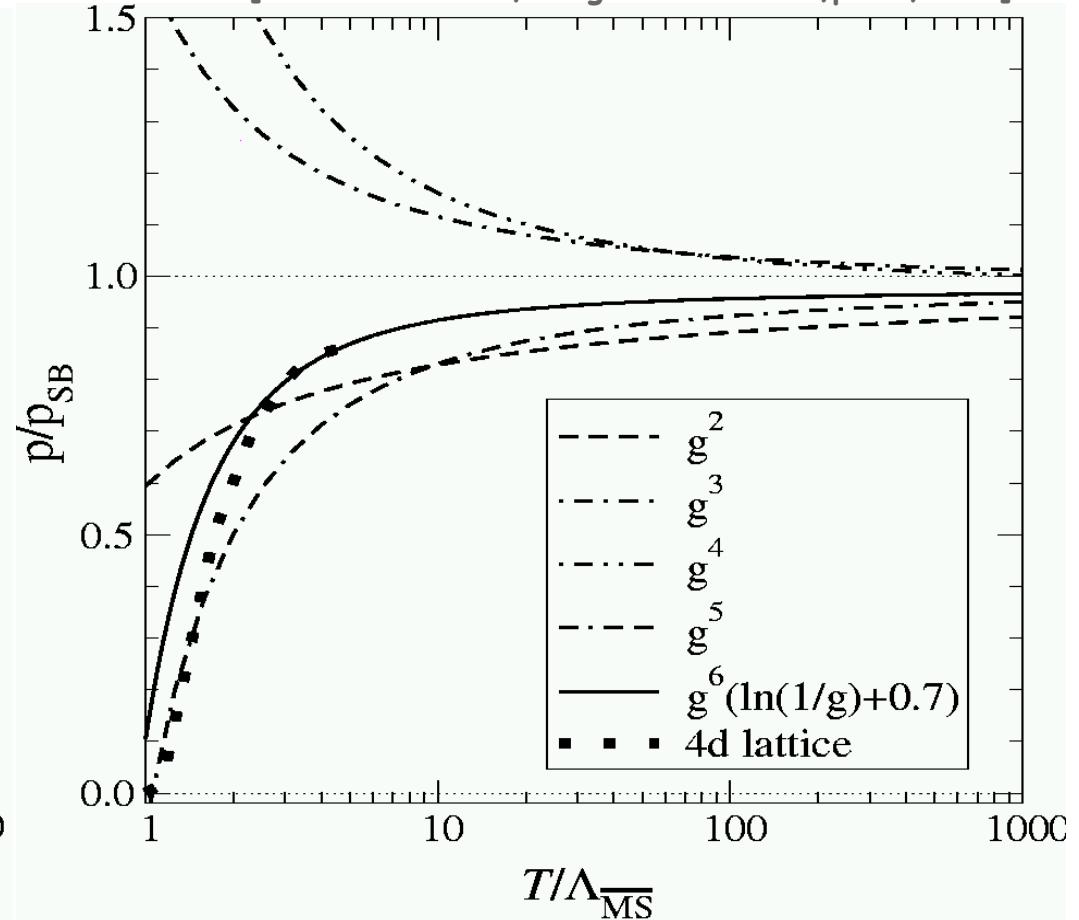
Widersprüche



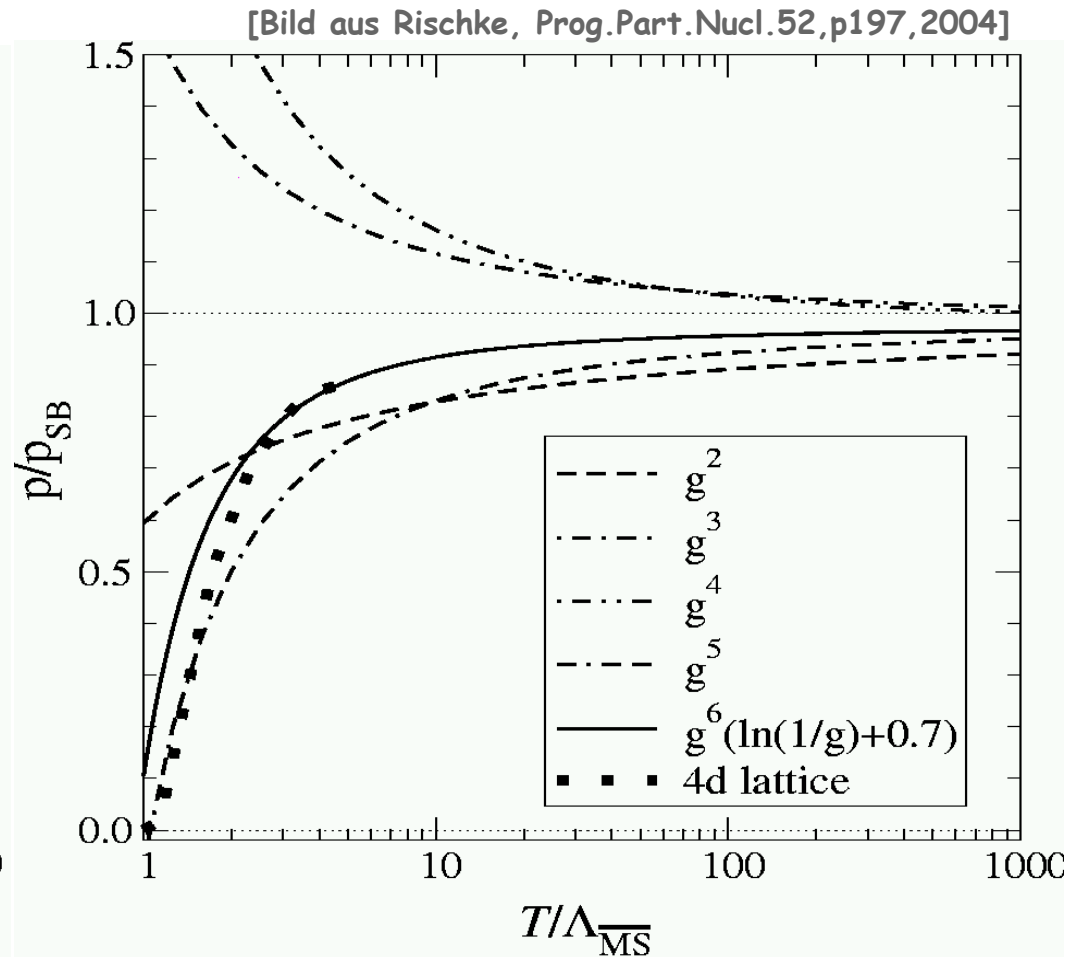
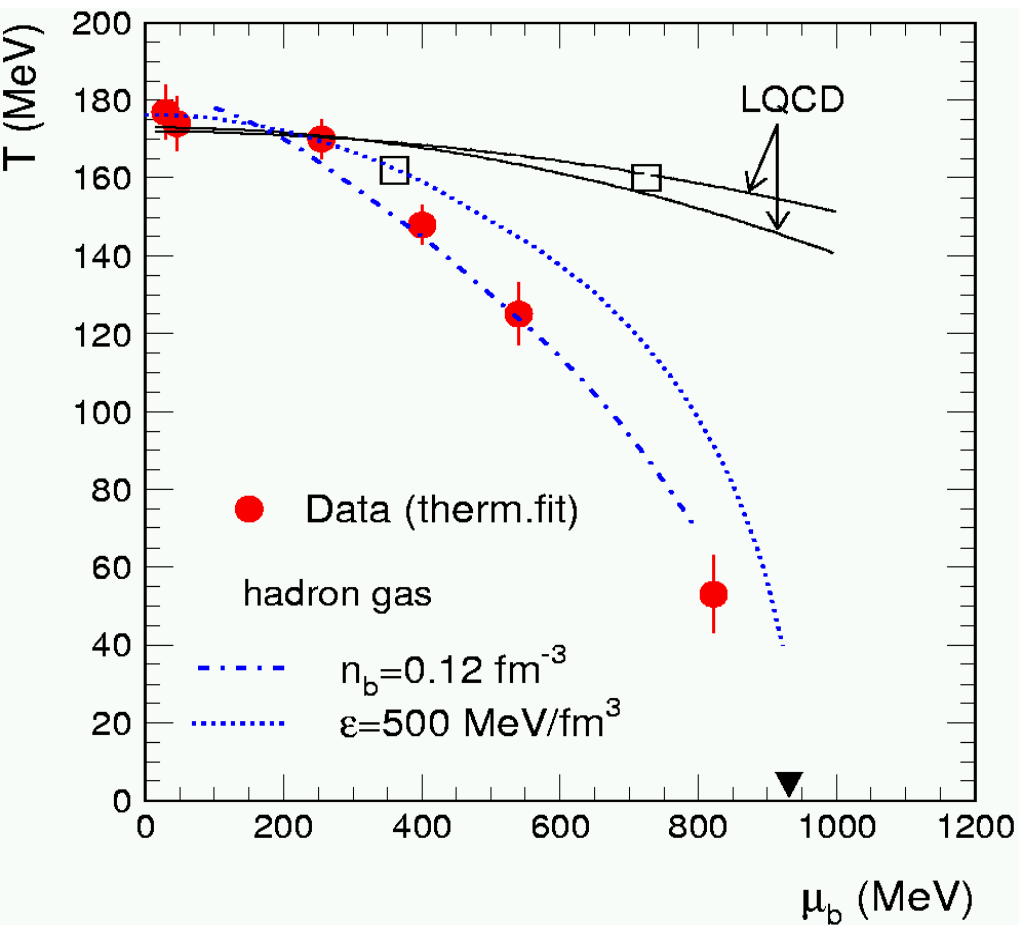
Widersprüche



[Bild aus Rischke, Prog.Part.Nucl.52,p197,2004]

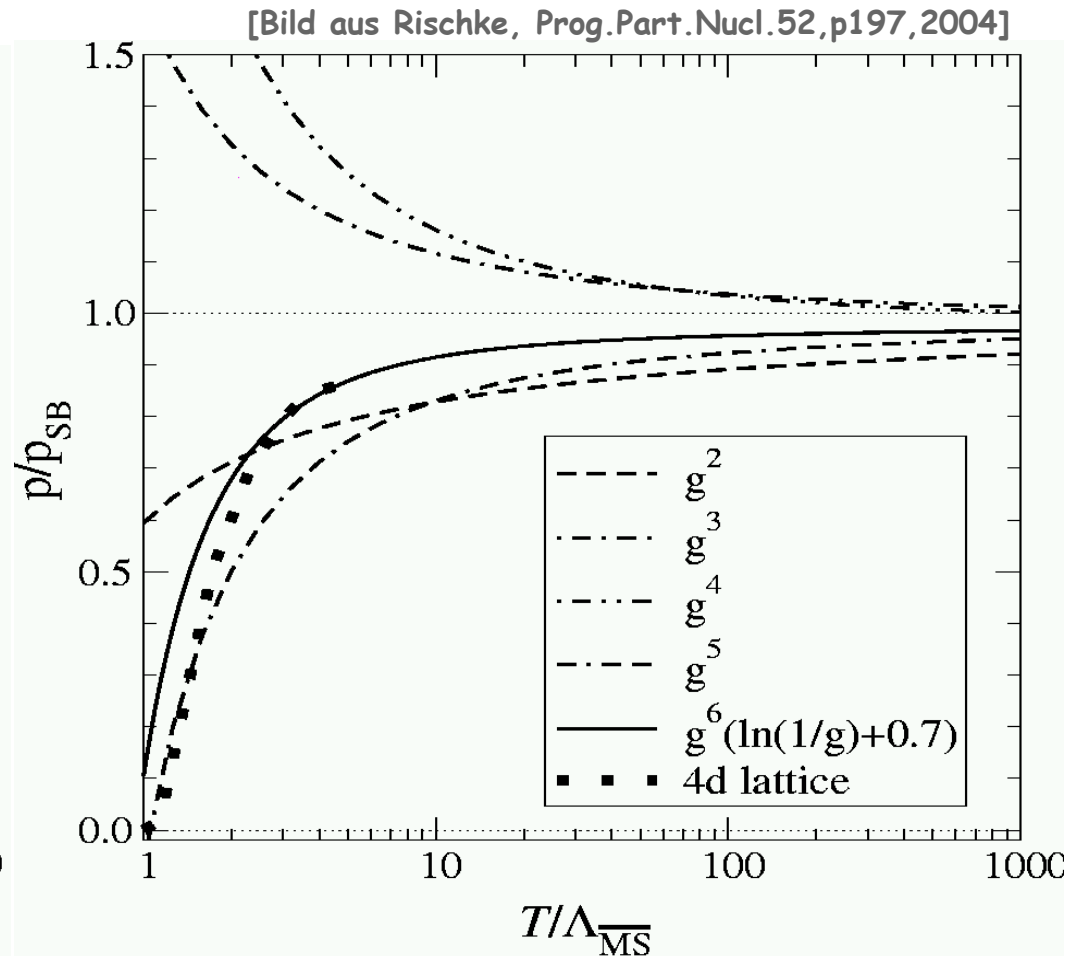
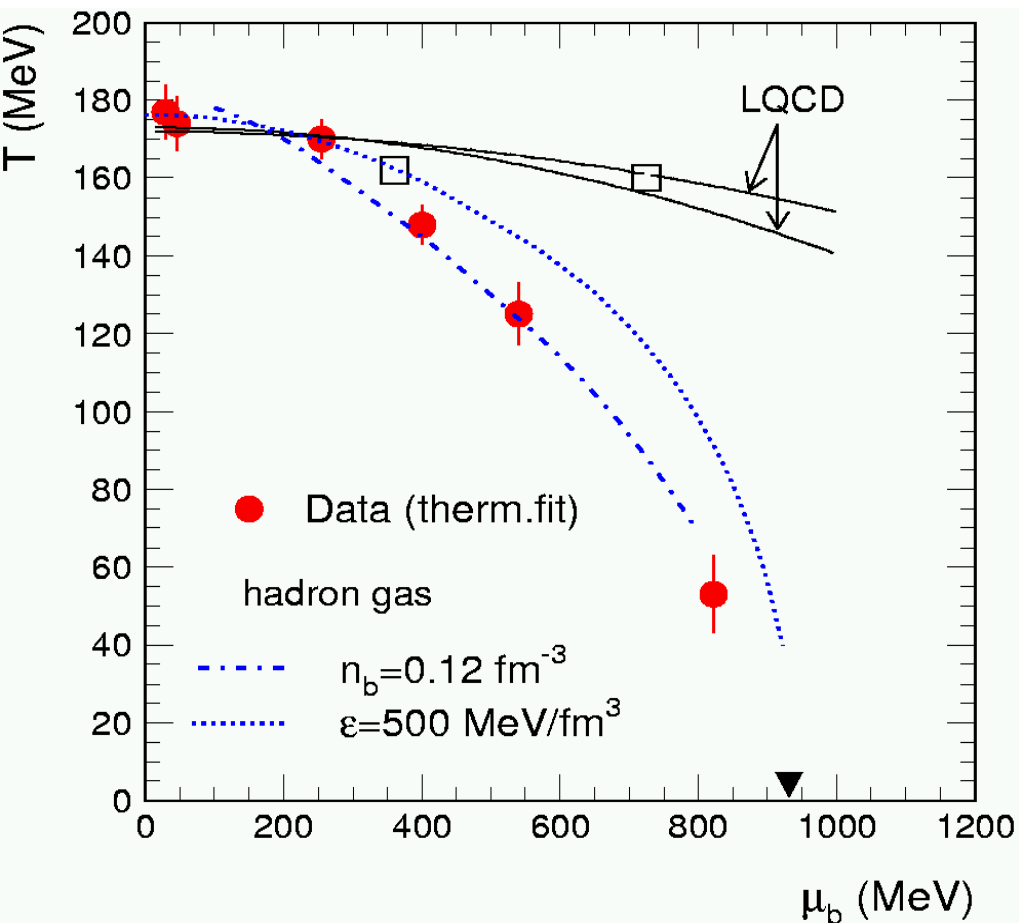


Widersprüche



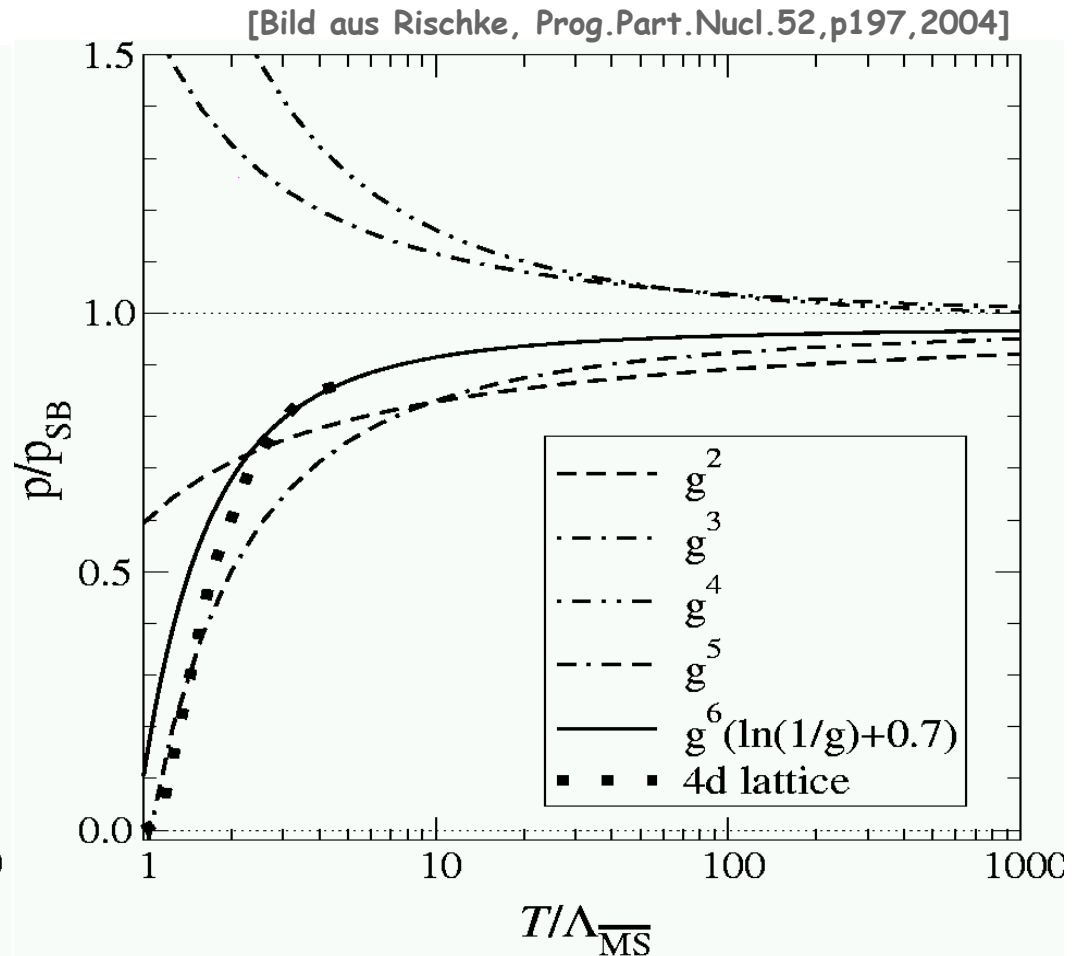
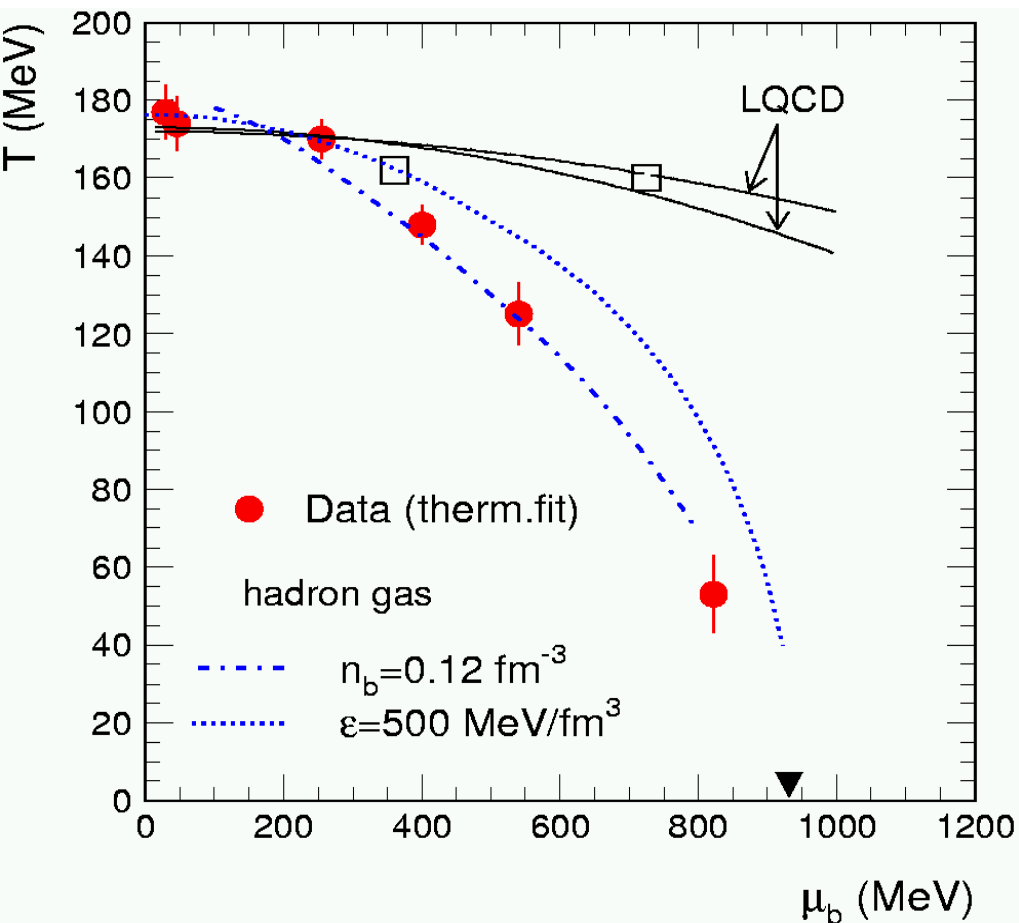
- Keine Störungstheorie möglich

Widersprüche



- **Keine Störungstheorie möglich**
- **Trotzdem Beobachtung (nahezu) idealen Gasverhaltens**

Widersprüche



- **Keine Störungstheorie möglich**
- Trotzdem Beobachtung (nahezu) idealen Gasverhaltens
- Was ist der Grund? **Ansatzpunkt?**

Yang-Mills-Theorie I

- Viele Hinweise für Ursprung der Niederenergiephänomene in der **Glusonselfwechselwirkung**
- Reine Gluontheorie interessant: **Yang-Mills-Theorie**
- Keine Quarks: Nur Temperatur
- Nur (Gluon-)“Confinement” relevant

Yang-Mills-Theorie II

- Eichtheorie: Wähle **Landau-Eichung**

$$L = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{\mu\nu,a} - \bar{c}^a \partial^\mu D_\mu^{ab} c^b$$

$$F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c$$

$$D_\mu^{ab} = \delta^{ab} \partial_\mu - g f^{abc} A_\mu^c$$

- **Freiheitsgrade:**

– A_μ^a **Gluonen**

– c^a, \bar{c}^a **Geister** (Reine Quantenfluktuationen)

Greensche Funktionen

- Greensche Funktionen beschreiben eine Theorie vollständig
- **Propagatoren** sind die (Inversen) 2-Punkt-Funktionen
- Volle **Propagatoren** enthalten nicht-störungstheoretische Informationen

Geist- und Gluon-Propagatoren

- Gleichgewichtsphysik: Matsubara-Formalismus

- Geist

$$D_G(p_0^2, \vec{p}^2) = \frac{-G(p_0^2, \vec{p}^2)}{p^2}$$

- Gluon

$$D_{\mu\nu}(p_0^2, \vec{p}^2) = P_{\mu\nu}^T \frac{Z(p_0^2, \vec{p}^2)}{p^2} + P_{\mu\nu}^L \frac{H(p_0^2, \vec{p}^2)}{p^2}$$

– Bei $T=0$: $Z=H$

– Bei T unendlich: Z : chromomagnetisch und
 H : chromoelektrisch

– p_0 diskret, $p_0=0$: weich, $p_0 \sim T$: hart

“Confinement” in Propagatoren

- **Hinreichendes Kriterium:**

$$D(p^2=0)=0$$

- D ist der Propagator eines Teilchens (Gluons)
- Masselose Teilchen: Keine “on-shell”-Propagation

“Confinement” in Propagatoren

- **Hinreichendes Kriterium:**

$$D(p^2=0)=0$$

- D ist der Propagator eines Teilchens (Gluons)
- Masselose Teilchen: Keine “on-shell”-Propagation

- **Verschiedene Szenarien**

- Kugo-Ojima und Gribov-Zwanziger sagen voraus

$$G(p^2=0)=\infty$$

- **Langreichweitige Korrelationen**
- **Geist:** Träger der einschließenden Wechselwirkung

Methoden

- Zweistufiges Verfahren
 - Limes unendlicher Temperatur
 - Endliche, aber hohe Temperaturen

Methoden

- **Zweistufiges Verfahren**
 - Limes unendlicher Temperatur
 - Endliche, aber hohe Temperaturen
- **Dyson-Schwinger-Gleichungen (DSE)**
 - (Unendliches) System gekoppelter Integralgleichungen
 - Erfordert Approximationen

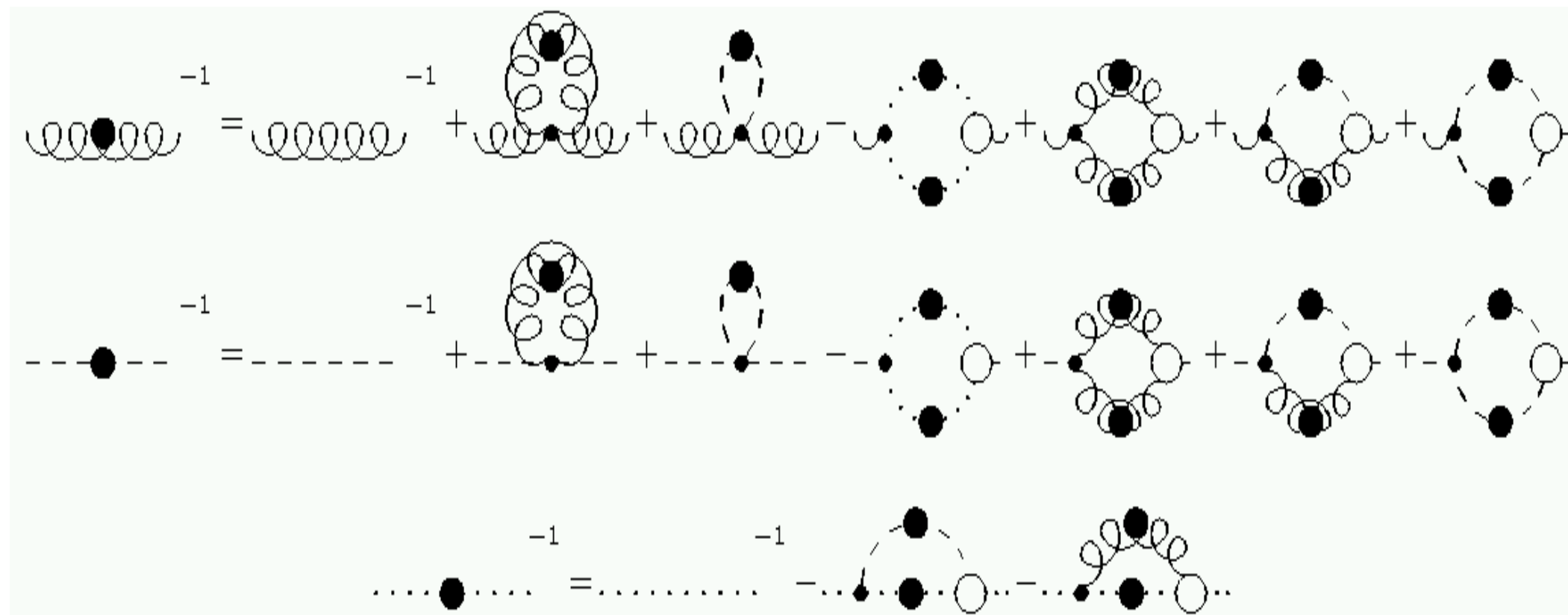
Methoden

- **Zweistufiges Verfahren**
 - Limes unendlicher Temperatur
 - Endliche, aber hohe Temperaturen
- **Dyson-Schwinger-Gleichungen (DSE)**
 - (Unendliches) System gekoppelter Integralgleichungen
 - Erfordert Approximationen
- **Analytische Lösungen** im IR und UV

Methoden

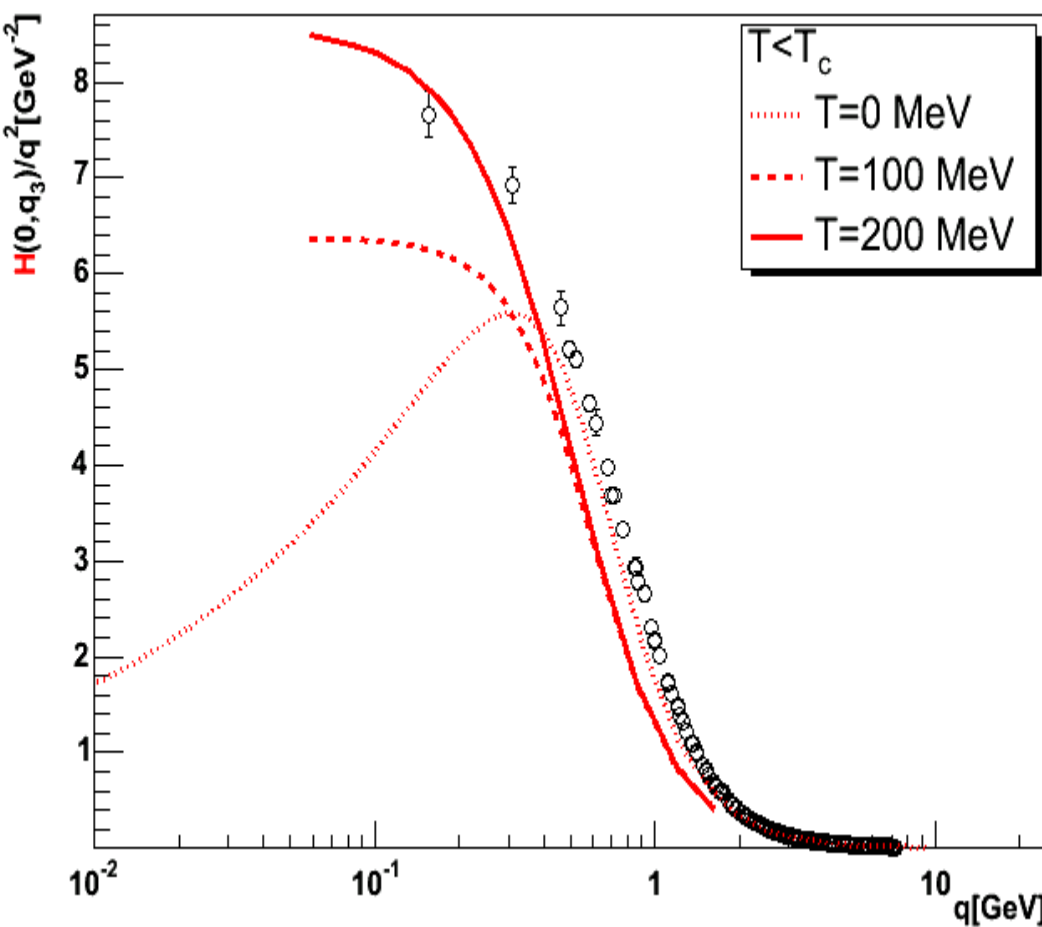
- **Zweistufiges Verfahren**
 - Limes unendlicher Temperatur
 - Endliche, aber hohe Temperaturen
- **Dyson-Schwinger-Gleichungen (DSE)**
 - (Unendliches) System gekoppelter Integralgleichungen
 - Erfordert Approximationen
- **Analytische Lösungen** im IR und UV
- **Numerische Lösung** bei mittleren Impulsen
 - Erweitertes, globales Verfahren entwickelt

(Abgeschnittene) Dyson-Schwinger Gleichungen



- **Abschneiden produziert diverse Probleme**
- Systematische Studien und Vergleiche mit anderen Methoden: **Unter Kontrolle**

Chromoelektrisches Gluon

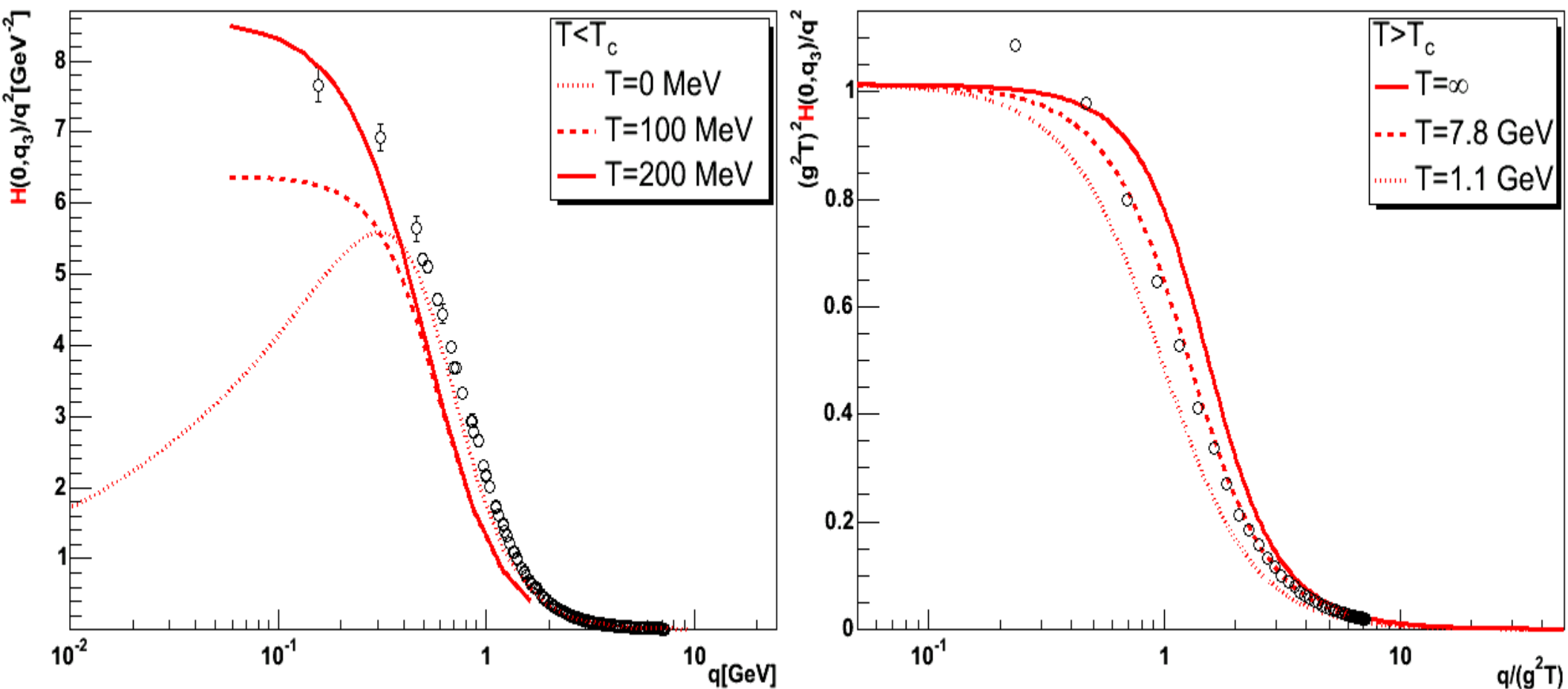


- **Eingeschlossen** bei kleinen Temperaturen

[$T=0$ DSE: Fischer et al., PLB, 2002,
 $T < T_c$: Grüter et al., 2004

Gitterdaten bei $T=0$: Bowman et al., 2004]

Chromoelektrisches Gluon

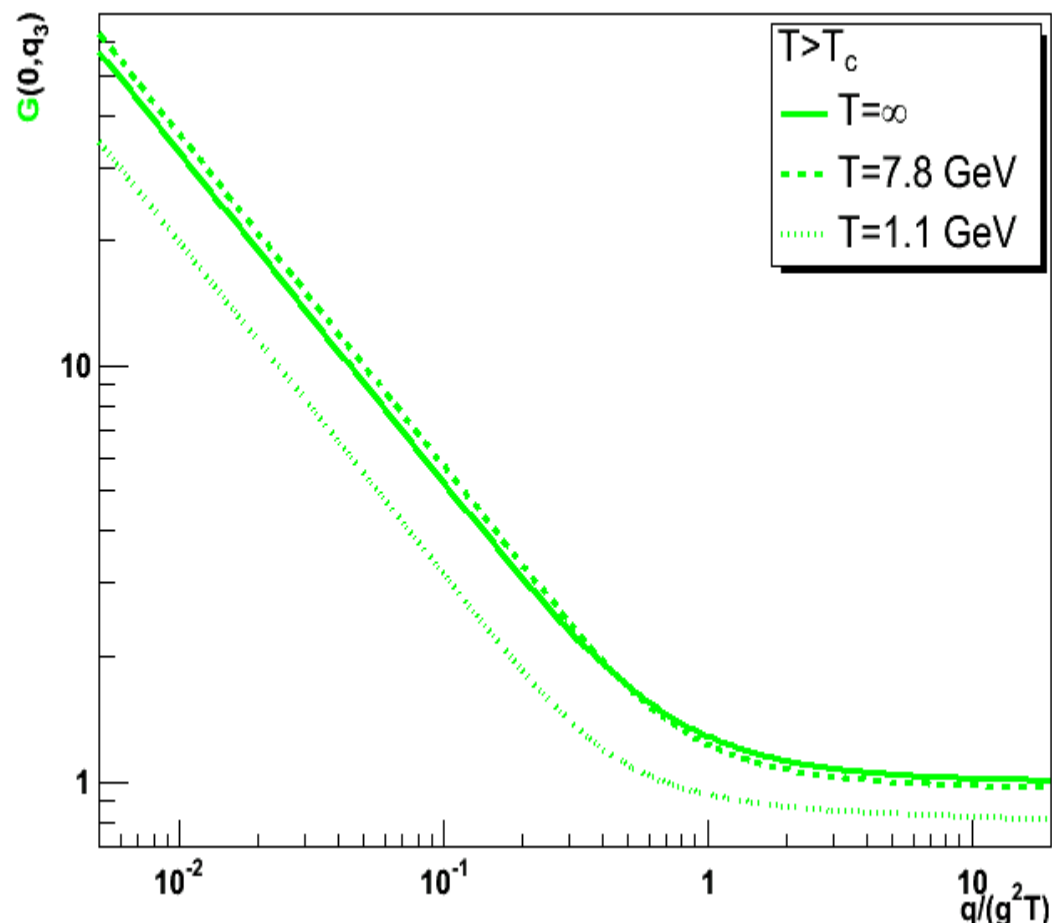
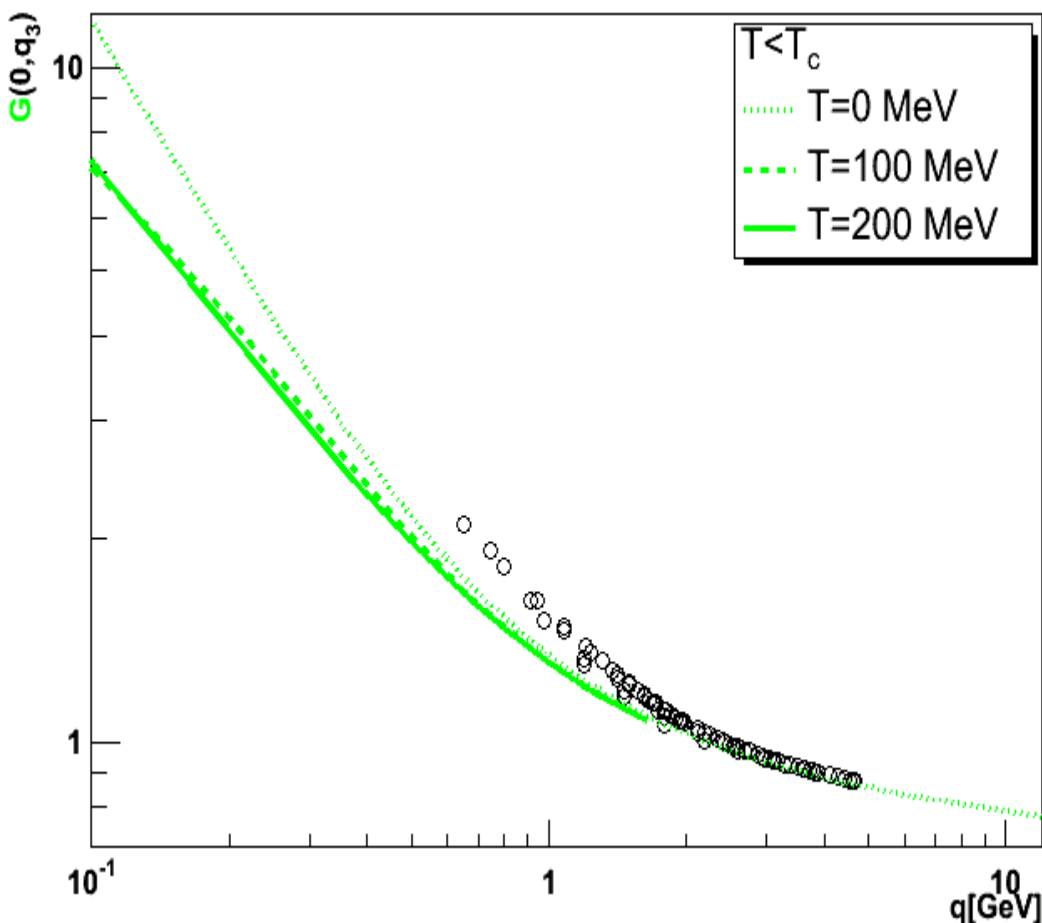


- **Eingeschlossen** bei kleinen Temperaturen
- **Abgeschirmt** bei hohen Temperaturen
- **Nicht trivial**, eingeschlossen (?)

[$T=0$ DSE: Fischer et al., PLB 2002,
 $T < T_c$ DSE: Grüter et al., 2004

Gitterdaten bei $T=0$: Bowman et al., 2004
 Gitterdaten für T unendlich:
 Cucchieri et al., PRD 2001]

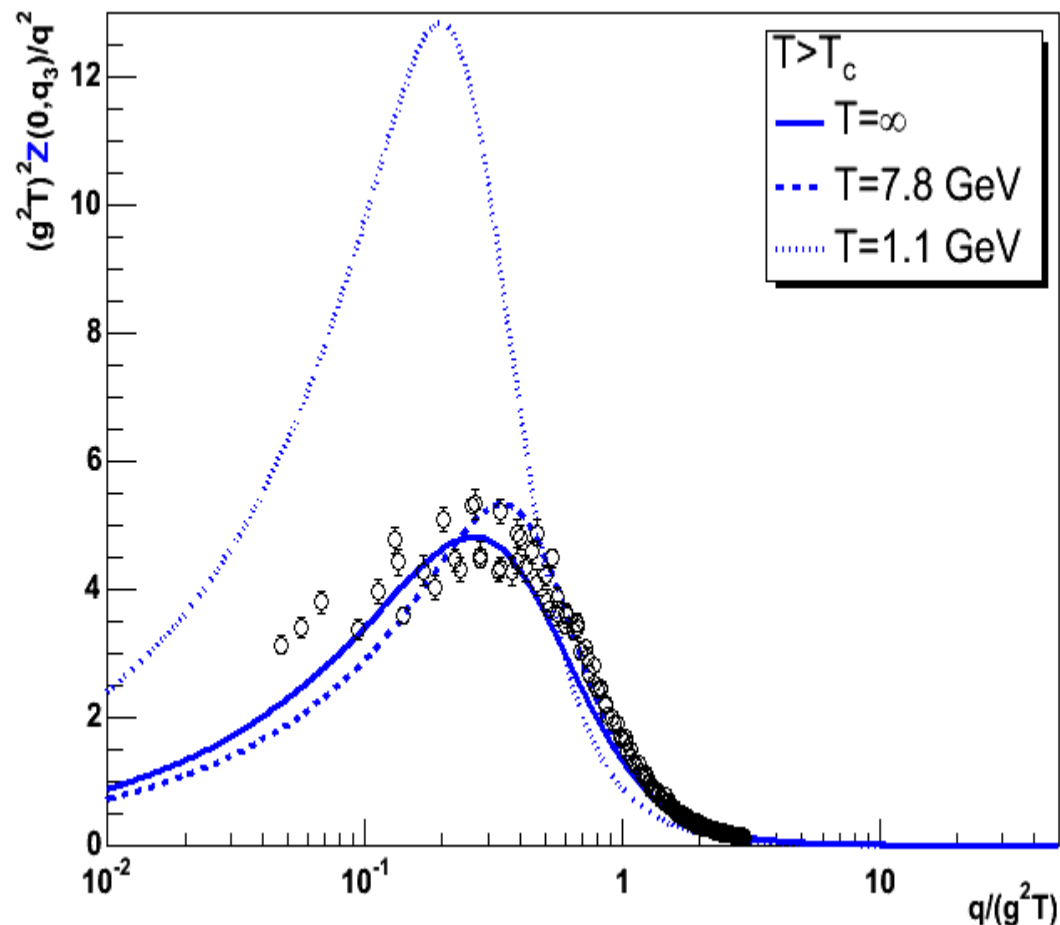
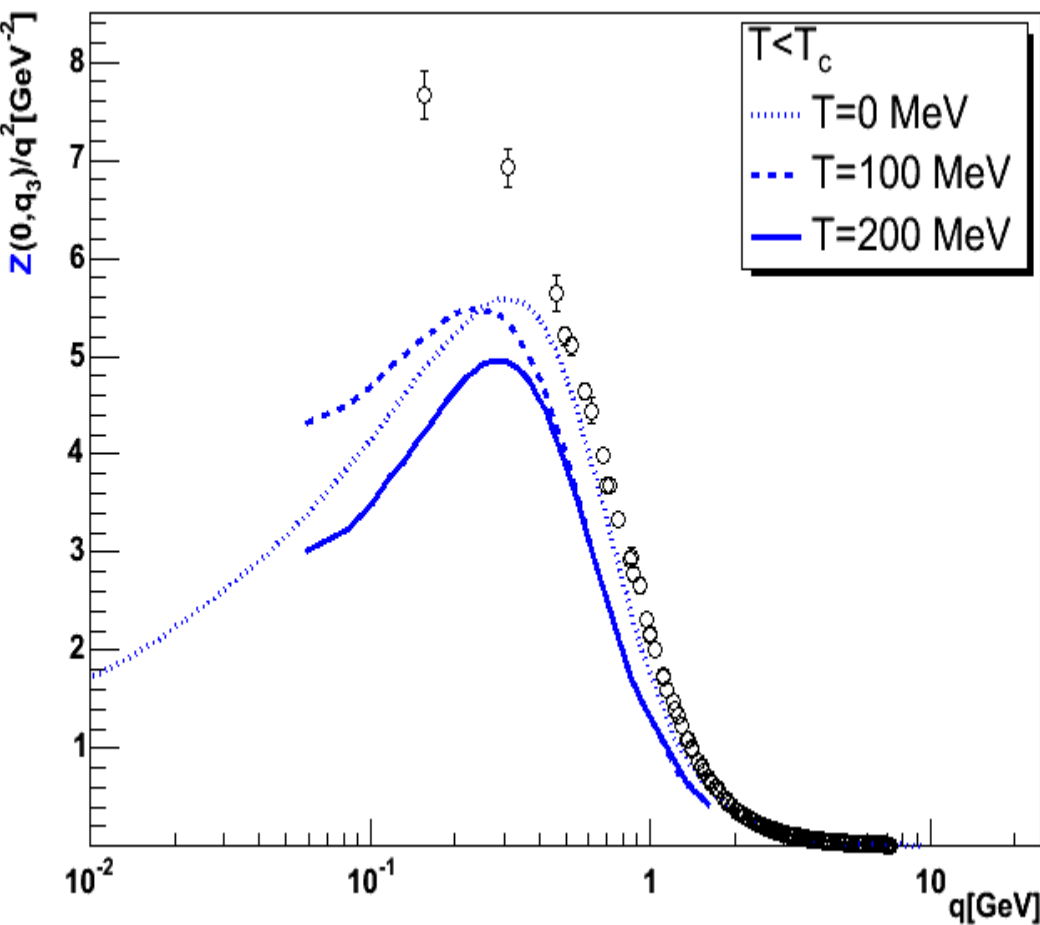
Geist



- IR wird **qualitativ** durch die Temperatur **nicht beeinflusst**
- Kann **langreichweitige Kräfte** vermitteln

[$T=0$ DSE: Fischer et al., PLB 2002
 $T < T_c$ DSE: Grüter et al., 2004
 Gitterdaten für $T=0$: Langfeld et al., 2002]

Chromomagnetisches Gluon



- **“Confined”** bei niedrigen Temperaturen
- **Ebenso bei hohen Temperaturen**
- **Nicht-triviale Phase: Immer $s(Q)GP$**

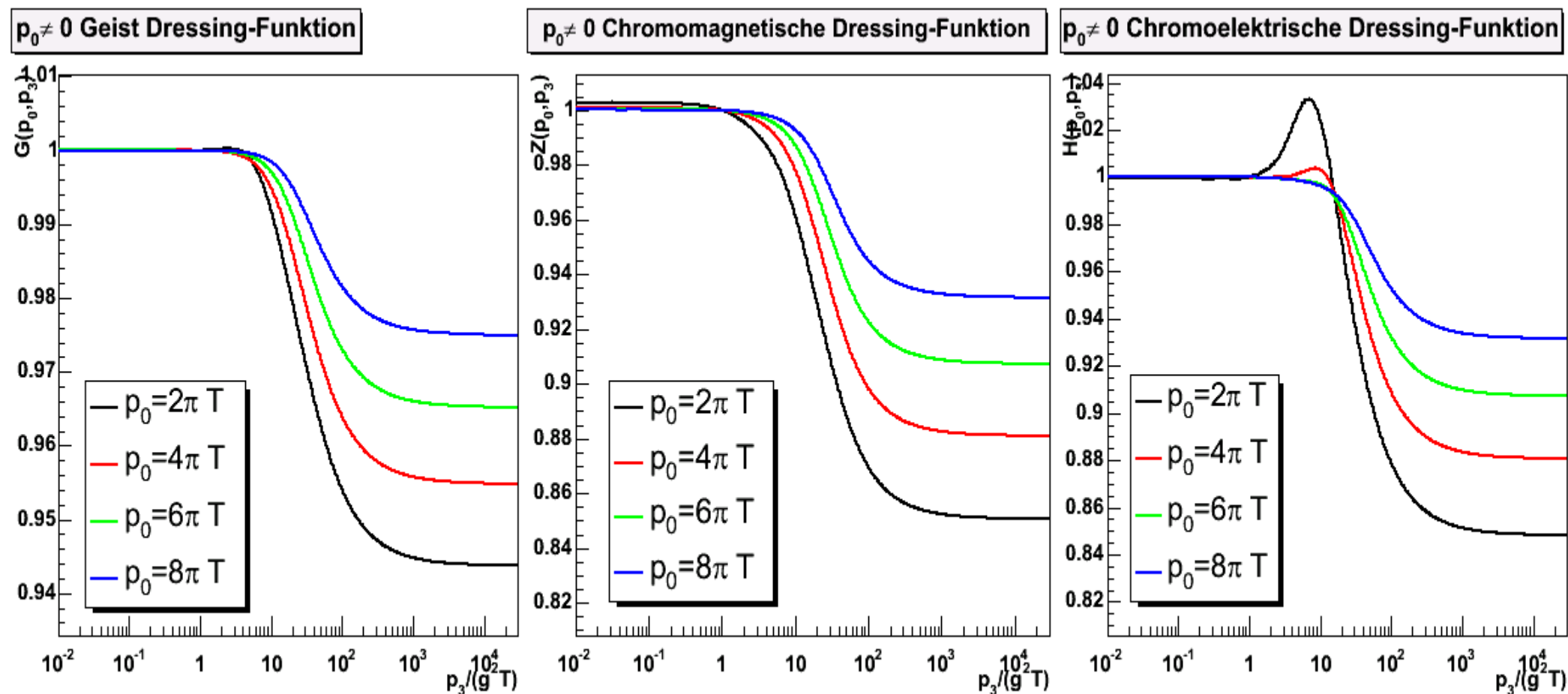
[$T=0$ DSE: Fischer et al., PLB 2002
 $T < T_c$ DSE: Grüter et al., 2004
 Gitterdaten für $T=0$: Bowman et al., 2004
 Gitterdaten für T unendlich: Cucchieri et al.,
 PRD 2001, 2003]

Harte Moden und Thermodynamik

- **Harte Moden** nahezu frei
 - Selbst in der Nähe des Phasenübergangs

Harte Moden und Thermodynamik

- **Harte Moden** nahezu frei
 - Selbst in der Nähe des Phasenübergangs



$T \sim 1.5 \text{ GeV}$

Harte Moden und Thermodynamik

- **Harte Moden** nahezu frei
 - Selbst in der Nähe des Phasenübergangs
 - Möglicherweise nicht-trivial

Harte Moden und Thermodynamik

- **Harte Moden** nahezu frei
 - Selbst in der Nähe des Phasenübergangs
 - Möglicherweise nicht-trivial
- **Thermodynamik** bei hohen Temperaturen dominiert durch harte Moden
 - Stefan-Boltzmann-artig in Übereinstimmung mit Gitter

Harte Moden und Thermodynamik

- **Harte Moden** nahezu frei
 - Selbst in der Nähe des Phasenübergangs
 - Möglicherweise nicht-trivial
- **Thermodynamik** bei hohen Temperaturen dominiert durch harte Moden
 - Stefan-Boltzmann-artig in Übereinstimmung mit Gitter
- Nicht-störungstheoretische Effekte bei experimentell zugänglichen Temperaturen [Zwanziger, hep-ph/0407103]

Zusammenfassung

- **Hochtemperaturphase ist nicht-trivial**

Zusammenfassung

- **Hochtemperaturphase ist nicht-trivial**
- **Weiche chromomagnetische Moden "confined"**
 - Status der harten und chromoelektrischen Moden unklar

Zusammenfassung

- **Hochtemperaturphase ist nicht-trivial**
- Weiche chromomagnetische Moden “confined”
 - Status der harten und chromoelektrischen Moden unklar
- Wechselwirkungen dominiert durch weiche Moden
 - Harte Moden nicht irrelevant

Zusammenfassung

- **Hochtemperaturphase ist nicht-trivial**
- Weiche chromomagnetische Moden “confined”
 - Status der harten und chromoelektrischen Moden unklar
- Wechselwirkungen dominiert durch weiche Moden
 - Harte Moden nicht irrelevant
- Thermodynamik dominiert durch harte Moden
 - Außer in der Nähe des Phasenübergangs

Zusammenfassung

- **Hochtemperaturphase ist nicht-trivial**
- Weiche chromomagnetische Moden “confined”
 - Status der harten und chromoelektrischen Moden unklar
- Wechselwirkungen dominiert durch weiche Moden
 - Harte Moden nicht irrelevant
- Thermodynamik dominiert durch harte Moden
 - Außer in der Nähe des Phasenübergangs
- Basis für eine **konsistente Beschreibung** der **Hochtemperaturphase**

Wie geht es weiter?

- **Zuverlässigkeit der Methode**

Wie geht es weiter?

- **Zuverlässigkeit der Methode**
- Phasendiagramm
 - Quarks und endliche Dichte?
 - Phasenübergang: Realzeit-Formalismus?

Wie geht es weiter?

- **Zuverlässigkeit der Methode**
- **Phasendiagramm**
 - Quarks und endliche Dichte?
 - Phasenübergang: Realzeit-Formalismus?
- **Vakuumstruktur**
 - Was sind die relevanten Freiheitsgrade?
 - Ändern sie sich in der Hochtemperaturphase?

Wie geht es weiter?

- **Zuverlässigkeit der Methode**
- Phasendiagramm
 - Quarks und endliche Dichte?
 - Phasenübergang: Realzeit-Formalismus?
- **Vakuumstruktur**
 - Was sind die relevanten Freiheitsgrade?
 - Ändern sie sich in der Hochtemperaturphase?
- Hadronen

Wie geht es weiter?

- **Zuverlässigkeit der Methode**
- Phasendiagramm
 - Quarks und endliche Dichte?
 - Phasenübergang: Realzeit-Formalismus?
- **Vakuumstruktur**
 - Was sind die relevanten Freiheitsgrade?
 - Ändern sie sich in der Hochtemperaturphase?
- Hadronen
- **Experimentelle Signaturen**