

Quantum Criticality

Theoretische Festkörperphysik SS16

Lucas Habeney

05.07.2016

Outline

- Motivation
- Klassische Phasenübergänge
- Quanten-Phasenübergänge
 - Quanten-Ising-Modell
 - Phasendiagramme
 - Unterschiede zum klassischen Phasenübergang
- Vorkommen in der Natur

Motivation

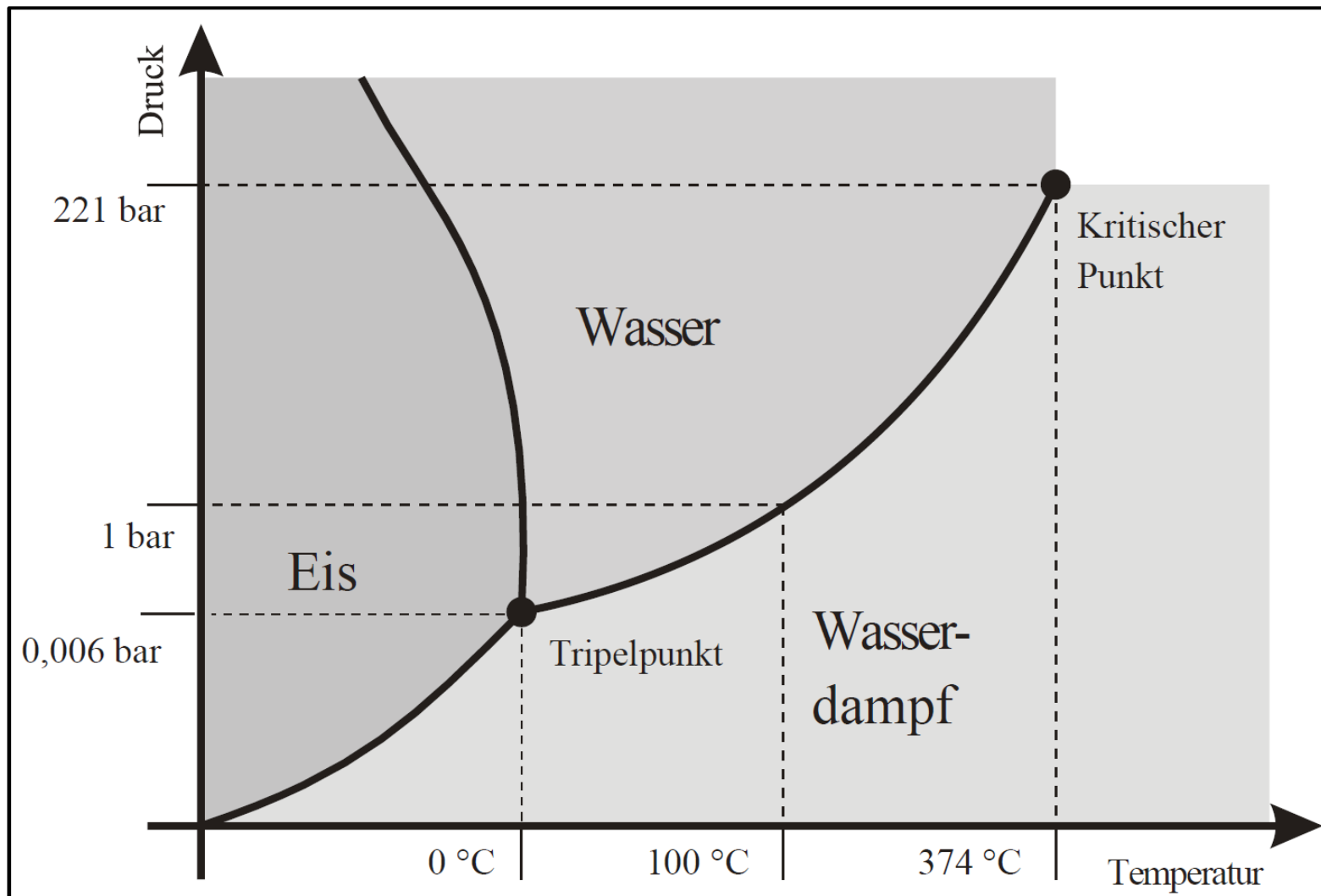
- Vorgriff: Quanten-Phasenübergänge nur für $T=0\text{K}$ relevant
- Trotzdem mehr als rein akademische Relevanz
- Erklärt unter anderem den QSH und spielt eine Rolle in der Hochtemperatursupraleitung

Klassische Phasenübergänge

- Überführung eines thermodynamischen Systems in eine neue Phase durch Veränderung eines externen Parameters (meist Temperatur T)
- Qualitative Änderung der Eigenschaften des Systems
- Unterscheidung je nach latenter Wärme
 - Unkontinuierlicher Phasenübergang (mit latenter Wärme): Phasenübergang 1. Ordnung
 - Kontinuierlicher Phasenübergang (ohne latente Wärme): Phasenübergang 2. Ordnung

$$\Delta Q = T_c(S_2 - S_1)$$

Klassisches Phasendiagramm



Phasendiagramm von Wasser (mit Anomalie und Tripelpunkt) [3]

Ordnungsparameter

- Systemspezifischer Parameter, der
- In der ungeordneten Phase 0 ist
- In der geordneten Phase ungleich 0 ist
- Beispiele: Magnetisierung für Spin-Systeme, Cooper-Paar-Konzentration für supraleitende Übergänge
- Fluktuationen des Ordnungsparameters allerdings auch in ungeordneter Phase ungleich 0
- Kohärenzlänge und Lebensdauer der Fluktuationen divergieren am kritischen Punkt

$$\begin{aligned}\xi &\propto t^{-\nu} \\ \tau_c &\propto \xi^2 \propto t^{-2\nu} \\ t &= \frac{|T - T_c|}{T_c}\end{aligned}$$

Wie wichtig ist die Quantenmechanik?

- Divergenz von Kohärenzlänge und Zeit am kritischen Punkt → quantenmechanische Energieskala $E = \hbar\omega_c$ verschwindet am kritischen Punkt
- Nur bei $T=0K$, völlig ohne thermische Fluktuationen der Größenordnung kBT , sind Quanteneffekte von Bedeutung
- Differenzierung: Quantenmechanik erklärt zwar das mikroskopische Verhalten eines Systems am kritischen Punkt, der Phasenübergang ist trotzdem thermisch!

Das Quanten-Ising-Modell

- Regelmäßige geometrische Anordnung von Spins
- Je nach Vorzeichen von J : Grundzustand ferro – oder antiferromagnetisch
- Betrachte Lithiumholmiumfluorid (ferromagnetisch)
- Klassisch: thermische Fluktuationen flippen Spins
- Quantenmodell: Spins tunneln in anderen Zustand

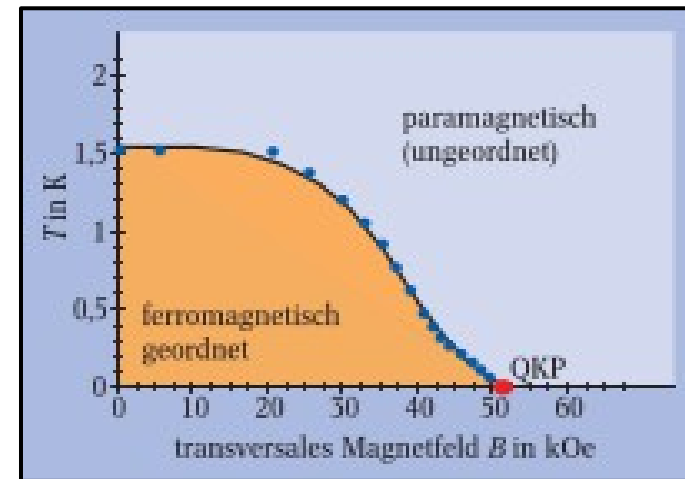


Abb.1: Phasendiagramm des Quanten-Ising-Modells mit äußerem Magnetfeld [1]

$$H_{Heis} = -J \sum_{\langle i,j \rangle} \vec{S}_i \vec{S}_j - B_{ext} \sum_i \vec{S}_i$$

Doppelmuldenpotential

- Konkurrierende Grundzustände
- Erhöhung der Temperatur führt System Energie auf der Skala kBT zu
→ thermisches Hüpfen
- Unschärferelation ermöglicht andererseits Tunneln durch die Barriere!

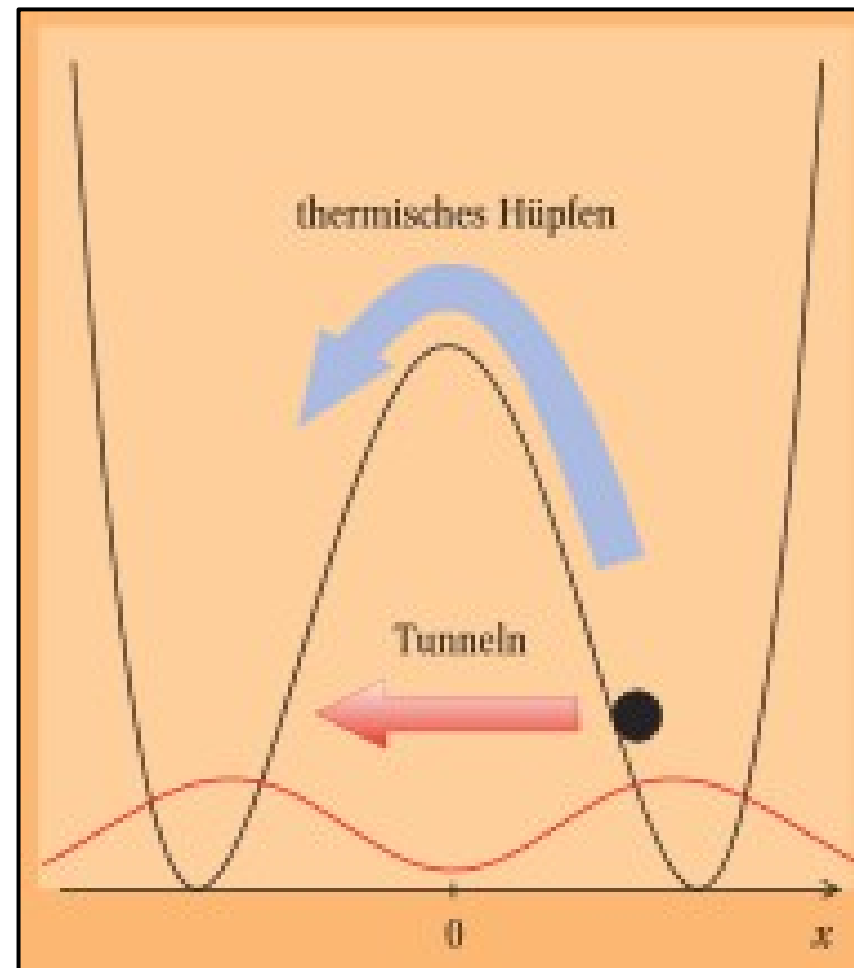


Abb. 2: Durchdringen der Potentialbarriere (thermisch und qm.) [1]

Die quantenkritische Phase

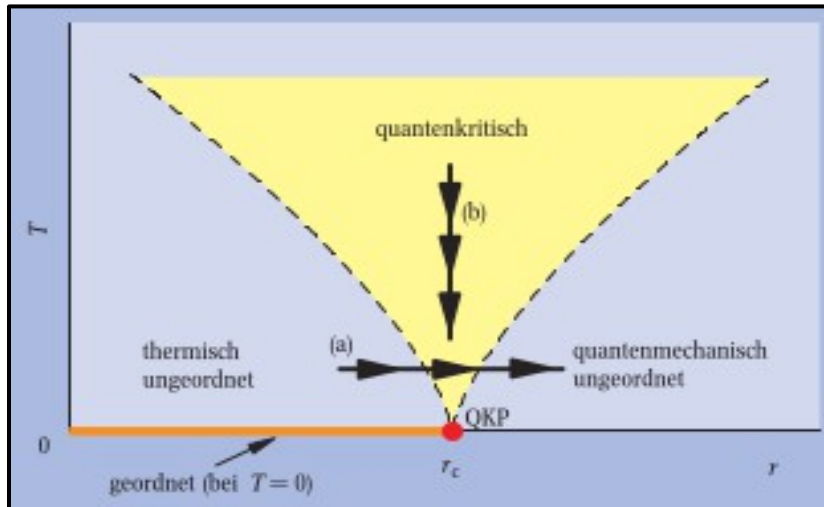


Abb. 3a: Phasendiagramm eines Systems ohne makroskopische Ordnung für $T > 0\text{K}$ [1]

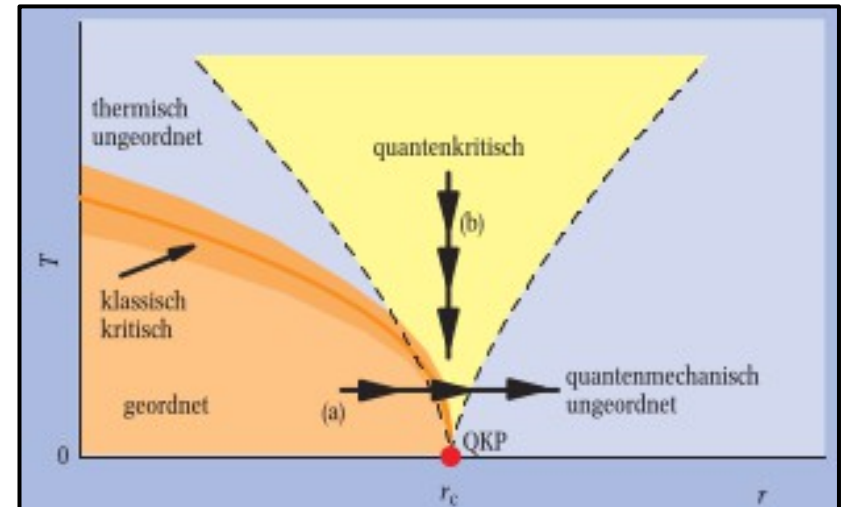
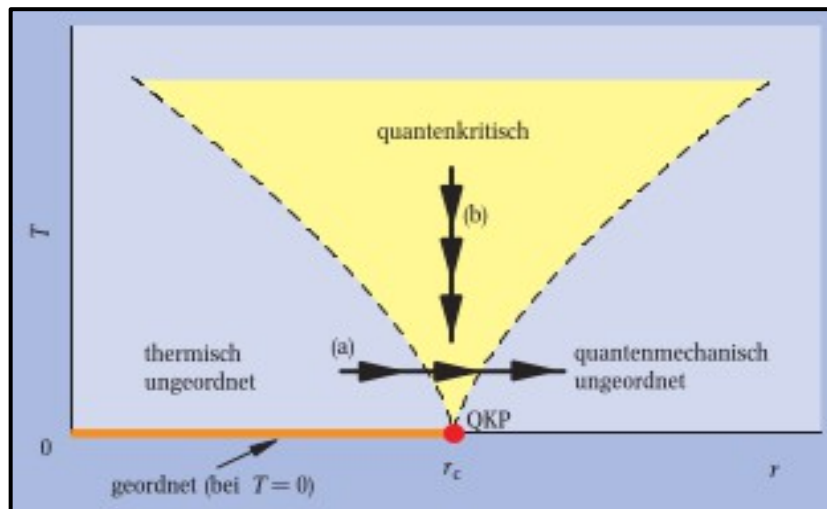


Abb. 3b: Phasendiagramm eines Systems mit makroskopischer Ordnung für $T > 0\text{K}$ [1]

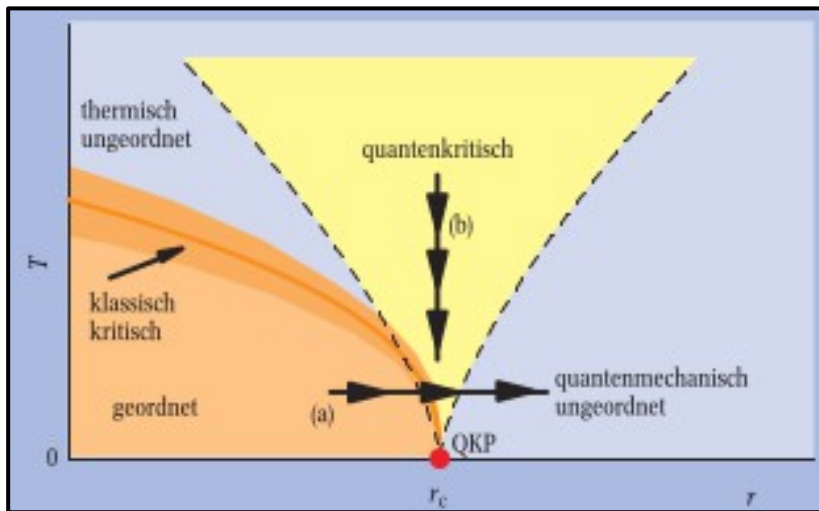
Makroskopisch ungeordnetes System

- Auf Weg (a) ist hier kein Phasenübergang zu beobachten
- System ist für $T > 0K$ immer ungeordnet
- Auf Weg (b) kann man die Temperaturabhängigkeit des quantenkritischen Zustandes beobachten



Makroskopisch geordnetes System

- Klarer Phasenübergang auf Weg (a) beobachtbar!
- Zusätzlich existiert die klassisch kritische Phasengrenze
- Quantenkritische Phase: System durch thermische Anregungen des quantenkritischen Zustands bestimmt



Crossovers

- Unscharfe Phasengrenzen zum quantenkritischen Bereich (gestrichelte Linien)
- Liegen im Bereich $\hbar\omega_c \approx k_B T \approx |r_c - r|^{+\nu_c}$
- Quantenkritisches Verhalten bei $T > 0\text{K}$!
- Für größere T werden thermische Anregungen immer wichtiger \rightarrow quantenkritischer Bereich weitet sich (unintuitiv) aus

Hochtemperatursupraleitung

- Unkonventionelle Supraleitung: keine einheitliche Theorie bekannt
- Ordnungsparameter: Lochdotterung
- Supraleitende Phase überlappt mit dem quantenkritischen Punkt

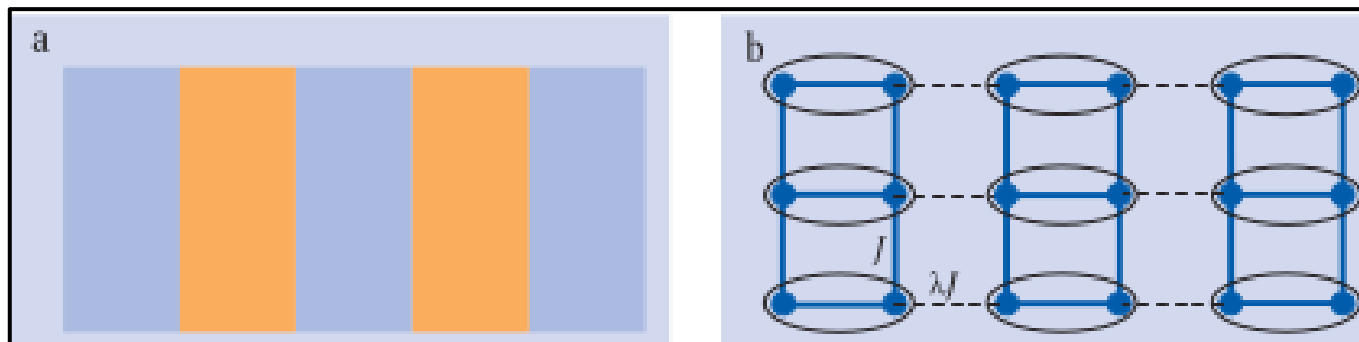


Abb. 4: a) System zerfällt in lochreiche und locharme Bereiche
b) Spins ordnen sich in bosonischen „Leitern“ an [1]

Vielen Dank für Eure Aufmerksamkeit!

References

[1] M. Vojta: „Quantenphasenübergänge – Schmelzen am Temperaturnullpunkt“, Physik Journal 1, 55 (2002)

[2] S. Subir, B. Keimer: „Quantum Criticality“, Physics Today vol. 64, 29 (2011) arXiv:1102.4628v2 [cond-mat.str-el]

[3]

<http://www.simplyscience.ch/teens-liesnach-archiv/articles/kocht-wasse>

[4] T. Vojta: „Von Ordnung zu Unordnung durch Quantenfluktuationen“, Physik in unserer Zeit 32, 38 (2001)