

Abstract:

In the last years the impressive progress on the experimental side led to a variety of new experiments allowing to address systems out of equilibrium. In this way the behavior of such systems far from equilibrium is no longer a purely theoretical issue but indeed observable. New experimental techniques, like particles trapped in optical lattices, render a realization of quantum systems with nearly arbitrary system parameters possible and provide a possibility to study their time evolution. Systems out of equilibrium are characterized by the fact, that these systems are in highly excited states giving rise to totally new fascinating properties.

In the present thesis one- and two-dimensional fermionic Hubbard models out of equilibrium are discussed. The system is taken out of equilibrium by a so-called interaction quench. At the beginning the system is prepared in the groundstate of the non-interacting Hamiltonian. At a time t the interaction between the fermions is suddenly turned on so that the time evolution is governed by the whole, interacting Hamiltonian. Hence the system is prepared in the groundstate of one Hamiltonian but evolves according to a different Hamiltonian. Consequently the system ends up in a highly excited state.

To describe such a system a method based on an expansion of the Heisenberg equations of motion to highest order possible is developed in this thesis. This method provides an exact description of the time evolution on short and intermediate time scales after the quench. As the method reveals exact results and does not rely on any perturbative assumption, a study of arbitrarily large interaction strengths is possible. Besides, the method is one of the few methods capable of two-dimensional systems.

In the following the method used in this thesis is explained and advantages and disadvantages of the approach are thematized. For this purpose the results of the developed iterated equation of motion approach are compared to results obtained in calculation up to second order in the interaction. Then the dynamics of the onedimensional

model is discussed with a focus on the relation of the results derived by the iterated equations of motion approach to results obtained by bosonization theory, the behavior for strong interactions and the dynamical transition from the weak to the strong quench regime.

Furthermore, the Hubbard model is studied on a two-dimensional square lattice.

This model is fundamentally different from the one-dimensional model: In contrast to the one-dimensional model the two-dimensional model is not integrable allowing a true relaxation of the system. For this system a calculation up to second order in the interaction is performed and compared to the results of the iterated equation of motion approach. Besides, the time evolution of the momentum distribution and the influence of doping on the dynamics is studied. Moreover, a first estimate for relaxation times is provided without relying on the assumption of a mixed state.

Zusammenfassung:

In den letzten Jahren wurden vielfältige neue Experimente entwickelt, die es erlauben,

Systeme jenseits des Gleichgewichtes zu betrachten. Dadurch ist das Verhalten dieser Systeme im Nicht-Gleichgewicht nicht länger eine rein theoretische Fragestellung sondern tatsächlich beobachtbar. Neue experimentelle Techniken, wie Teilchen in optischen Gittern, ermöglichen es Systeme mit nahezu beliebigen Systemparametern zu realisieren und deren Zeitentwicklung zu studieren.

Systeme jenseits des Gleichgewichts zeichnen sich dadurch aus, dass sich diese in hochangeregten Zuständen befinden, wodurch sich völlig neue, faszinierende Eigenschaften ergeben.

In der vorliegenden Arbeit werden Hubbard-Modelle in ein und zwei Dimensionen jenseits des Gleichgewichtes betrachtet. Das System wird dabei durch einen sogenannten Wechselwirkungs-Quench aus dem Gleichgewicht gebracht. Zunächst befindet sich das System im Grundzustand des wechselwirkungsfreien Hamiltonoperators. Zur Zeit t wird die Wechselwirkung zwischen den Fermionen plötzlich eingeschaltet, sodass die Zeitentwicklung durch den gesamten, wechselwirkenden

Hamiltonoperator bestimmt wird. Somit ist das System im Grundzustand eines Hamiltonoperators präpariert, entwickelt sich jedoch gemäß eines anderen. Dadurch wird das System in einen hochangeregten Zustand versetzt. Zur Beschreibung eines solchen Systems wird in dieser Arbeit eine Methode basierend auf einer Entwicklung der Heisenbergschen Bewegungsgleichung zu möglichst hoher Ordnung entwickelt. Die Methode erlaubt es, die Zeitentwicklung des Systems auf kurzen und mittleren Zeitskalen nach dem Quench exakt zu beschreiben. Da die Methode exakte Ergebnisse liefert und ihr keinerlei störungstheoretische Annahmen zu Grunde liegen, ist es möglich beliebige Wechselwirkungsstärken

zu betrachten. Außerdem ist diese Methode eine der wenigen Methoden, die auf zweidimensionale Systeme anwendbar sind.

Im Folgenden wird zunächst die genutzte Methode erläutert und deren Vor- und Nachteile diskutiert. Hierzu werden die Ergebnisse mit denen einer Rechnung bis zur quadratischen Ordnung in der Wechselwirkung U verglichen. Anschließend wird die Dynamik des eindimensionalen Modells diskutiert. Dabei wird der Bezug der Ergebnisse zur Bosonisierung, das Verhalten für besonders große U sowie der dynamische Übergang zwischen schwachen und starken Quenches thematisiert. Des Weiteren wird das Modell auf einem zweidimensionalen Gitter betrachtet. Dieses System unterscheidet sich grundsätzlich von dem eindimensionalen System: Im Gegensatz zum eindimensionalen System ist das zweidimensionale System nicht integrabel, sodass eine Relaxation möglich ist. Auch für dieses System wird eine Rechnung zweiter Ordnung in U durchgeführt. Außerdem wird die Zeitentwicklung der Impulsverteilung betrachtet sowie der Einfluss der Dotierung auf die Dynamik studiert. Darüberhinaus wird eine erste Abschätzung der Relaxationszeiten gegeben ohne auf die Annahme eines Gemisches zu vertrauen.