Kapitel 1

Einleitung

Die Entdeckung von Supraleitern mit besonders hohen kritischen Temperaturen auf der Basis von Kupferoxid-Keramiken [1] markiert einen Meilenstein in der langen Geschichte der Supraleitung, insbesondere seit der Entdeckung von $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO), das selbst bei der Siedetemperatur des flüssigen Stickstoffs Strom verlustfrei transportieren kann. Diese neuartigen Materialien gehören zu der Klasse von Supraleitern zweiter Art. Einem genügend großen Magnetfeld erlauben diese Supraleiter das Eindringen in Form quantisierter Filamente magnetischen Flusses, sogenannter Vortizes. Bestimmt durch die intrinsischen Eigenschaften und die Mikrostruktur der Hochtemperatursupraleiter zeigen die Vortizes ein breites Spektrum fester und flüssiger thermodynamischer Phasen.

Bereits das Verhalten der neuen Hochtemperatursupraleiter in Abwesenheit eines externen Magnetfeldes hat viele bis heute ungeklärte Fragen aufgeworfen. So zeigte sich in Hochfrequenzmessungen der Oberflächenimpedanz von YBCO Kristallen und Filmen ein Maximum im Realteil der Leitfähigkeit $\sigma'(T)$ [2, 3]. Dies wurde interpretiert im Rahmen eines Kohärenzeffekts innerhalb des BCS-Modells. In der Folge wurden andere Erklärungen für dieses Maximum der Leitfähigkeit vorgeschlagen, die Inhomogenitäten der Supraleiter und thermische Fluktuationen berücksichtigen. Widersprüchlich sind auch die Ergebnisse bisheriger Untersuchungen der Dynamik der Fluktuationen im Nullfeld. Klärungsbedarf besteht insbesondere in Bezug auf eine genaue Bestimmung der kritischen Temperatur T_c in diesen von starken thermischen Fluktuationen geprägten Supraleitern.

Der Effekt thermischer Fluktuationen des supraleitenden Ordnungsparameters wird noch bedeutsamer bei Gegenwart extern induzierter Vortizes. Bei tiefen Temperaturen bewirkt die Vortex-Vortex-Wechselwirkung ein hexagonales Gitter aus Vortizes. Mit zunehmender Temperatur schmilzt dieses Vortexgitter durch räumliche Fluktuationen der Vortizes und eine Flüssigkeit aus nichtlokalisierten Vortexlinien entsteht. Sowohl die Phase des Vortexgitters wie die der Vortexflüssigkeit hat einen endlichen linearen

Widerstand, $\rho > 0$. Während jedoch bei herkömmlichen Tieftemperatursupraleitern das Schmelzen des Vortexgitters meist unbeobachtbar nahe dem oberen kritischen Feld B_{c2} stattfindet, besteht bei Hochtemperatursupraleitern genügend thermische Energie, um das Vortexgitter deutlich unterhalb von $B_{c2}(T)$ zu schmelzen. In defektarmen, unverzwillingten YBCO Kristallen wird entlang einer quasi-universellen Schmelzlinie $B_m(T)$ ein Phasenübergang erster Ordnung beobachtet [4].

Zusätzlich zur Vortexwechselwirkung wirken auf die Vortizes Defekte im supraleitenden Material auf Grund der Reduktion der Kondensationsenergie. Diese anziehende Vortex-Defekt-Wechselwirkung erzeugt Deformationen des geordneten Vortexgitters und kann bei genügender Defektdichte eine glasartige Tieftemperaturphase mit verschwindendem linearen Widerstand, $\rho = 0$, induzieren. Der Übergang aus der flüssigen Vortexphase in das Vortexglas wird als Phasenübergang zweiter Ordnung entlang einer Glaslinie $B_g(T)$ erwartet [5].

Diese Phasenübergänge der Vortexmaterie sind beobachtet worden in Transportmessungen des linearen Widerstandes $\rho(T)$ [6] und der nichtlinearen Strom-Spannungs-Kennlinien [7]. Mittels des linearen ac-Widerstandes $\rho(\omega)$ wurde vor kurzem mit der in dieser Arbeit verwendeten Methode der thermodynamische Phasenübergang in das Vortexglas an einem dünnen YBCO Film [8] und einem verzwillingten Kristall [9] gefunden. Die Glaslinie des Kristalls im Magnetfeld-Temperatur-Phasendiagramm, Abb. 1.1, liegt deutlich niedriger als die des Films. Auch liegen beide Glaslinien *unterhalb* der Schmelzlinie defektarmer Kristalle, Ref. [4], sowohl für Magnetfelder $\vec{B}$ parallel zu der c-Achse von YBCO, wie auch für $\vec{B} \perp \vec{c}$, wobei hier die Schmelzlinie um den Wert der Anisotropie von YBCO, $\gamma \simeq 6.0$, gegenüber der parallelen Orientierung erhöht ist.

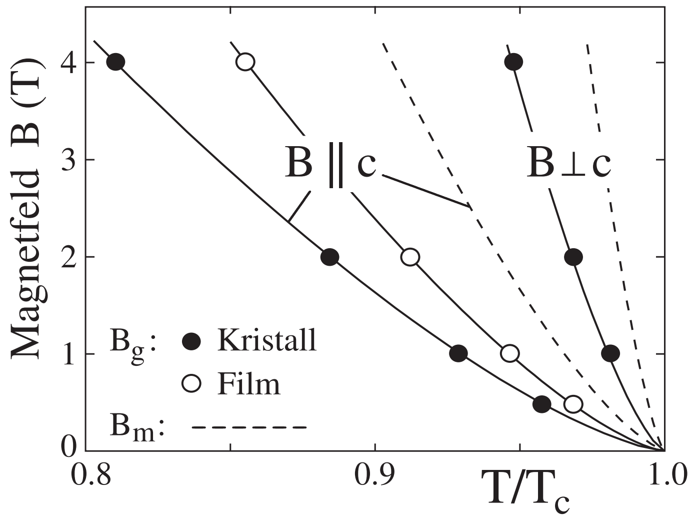

Abb. 1.1: *Vortexglas-Linien $B_g(T)$ des YBCO Kristalls und des Films sowie die Schmelzlinien $B_m(T)$ nach Ref. [4].*

In dieser Arbeit soll die Möglichkeit stabiler thermodynamischer Supraleitung im magnetischen Nullfeld und in der Gegenwart hoher Magnetfelder untersucht werden. Insbesondere soll dem Einfluß korrelierter, d.h. entlang der Flußlinien ausgedehnter Defekte auf die supraleitenden Eigenschaften des Hochtemperatursupraleiters YBCO nachgegangen werden. Korrelierte Defekte können intrinsisch, d.h. bei der Herstellung des Supraleiters entstanden sein oder künstlich durch Bestrahlung mit hochenergetischen schweren Ionen induziert werden. Während intrinsische Defekte kaum gezielt beeinflußt werden können, bietet die Schwerionenbestrahlung die einzigartige Möglichkeit, korrelierte Defekte bekannter Größe und Dichte in den Supraleiter einzubringen. Für dominantes Haften an diesen starken Defekten ist die Existenz eines thermodynamischen Phasenübergangs und einer Boseglas-Phase mit $\rho = 0$ vorausgesagt worden [10], bei der Vortizes an den kolumnaren Defekten lokalisiert sind. Von besonderem Interesse sind in diesem Zusammenhang folgende Fragen:

- Wie kann die kritische Temperatur T_c in Gegenwart starker Fluktuationen, bei $B = 0$, definiert werden? Wodurch wird der Widerstand in der Nähe von T_c bestimmt?
- Welchen Effekt hat ein externes Magnetfeld auf die Fluktuationen? Durch welchen Mechanismus ist die Lage des Übergangs zu stabiler Supraleitung im Phasendiagramm bestimmt?
- Können kolumnare Defekte die Glaslinie erhöhen und die postulierte Boseglas-Phase induzieren? Welchen Einfluß haben die unvermeidbaren intrinsischen Defekte des Supraleiters auf die Boseglas-Phase?
- Ist YBCO ungeachtet der moderaten Anisotropie in seinen elektrischen und magnetischen Eigenschaften ein isotroper dreidimensionaler Supraleiter oder muß dessen intrinsische zweidimensionale Schichtstruktur berücksichtigt werden?

Um diesen Fragen nachzugehen, wird die magnetische ac-Suszeptibilität dünner Filme und eines Kristalls als Funktion der Frequenz und der Temperatur in statischen Magnetfeldern, ausgehend vom kompensierten Erdmagnetfeld bis 19 T, gemessen. Mittels der komplexen Eindringfunktion des ac-Feldes in den Supraleiter [11] wird aus diesen Messungen der dynamische elektrische Widerstand $\rho(\omega, T, \vec{B}) = \rho' - i\rho''$ des Supraleiters ermittelt. Besonders intensiv untersucht werden dünne Filme, da diese das Grundelement vieler Anwendungen der Mikrowellentechnologie und von supraleitenden Quanteninterferometern (SQUID) sind. Außerdem können in diese leicht kolumnare Defekte eingebracht werden.

Die Arbeit ist folgendermaßen gegliedert: Im Kapitel 2 werden die thermodynamischen Phasen der Vortexmaterie in YBCO vorgestellt. Im Kapitel 3 werden die Proben charakterisiert und die Mittel dargelegt, um den dynamischen Widerstand über einen weiten Frequenz-, Magnetfeld- und Temperaturbereich zu messen. Der Phasenübergang im magnetischen Nullfeld wird im Kapitel 4 untersucht und ein phänomenologisches Modell des Widerstandes in der Nähe von T_c vorgestellt werden. Im Kapitel 5 wird die Vortexglas-Supraleitung in endlichen Magnetfeldern beschrieben. Der Einfluß korrelierten Vortexhaftens auf die supraleitenden Eigenschaften wird anhand des intrinsischen Haftens der CuO_2-Ebenen und durch Schwerionenbestahlung induzierter kolumnarer Defekte im Kapitel 6 untersucht. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse im Kapitel 7.