Kapitel 1

Einleitung

Supraleitung bei Temperaturen oberhalb des Siedepunktes von Stickstoff weckte Hoffnungen auf deren technische Anwendbarkeit, sowohl im Bereich der Mikroelektronik, als auch für den Transport hoher Ströme. Die Hochtemperatursupraleiter sind extreme Typ-II Supraleiter, in die magnetischer Fluß in Form von Vortizes mit sehr dünnem Kern eindringt. Deren große Beweglichkeit führt bei den hohen Temperaturen zu Dissipation und somit zu einer endlichen Leitfähigkeit für den Stromtransport.

Eine der bemerkenswertesten Eigenschaften der Hochtemperatursupraleiter ist deren ausgeprägte geschichtete Struktur, bestehend aus übereinander gestapelten CuO_2-Ebenen, in denen die supraleitende Ordnung einsetzt, getrennt durch isolierende

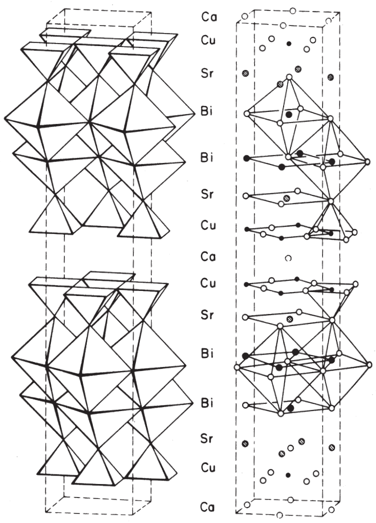

Abb. 1.1: *Kristallstruktur von $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ nach [1]. Die kleinen weißen Kreise symbolisieren die Sauerstoffatome.*

Zwischenschichten. Dieses ist am Beispiel der Kristallstruktur des in dieser Arbeit untersuchten $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ in Abbildung 1.1 dargestellt. Eine Kopplung zwischen den Ebenen führt zu einem Wechselspiel zweidimensionalen und dreidimensionalen Verhaltens in einem breiten Temperaturbereich. So sind thermische Fluktuationen in zweidimensionalen Systemen stark erhöht. In Abwesenheit eines äußeren Feldes sind dieses spontan in den supraleitenden Ebenen entstehende Vortex-Antivortex-Paare. Die drastische Absenkung der supraleitenden Übergangstemperatur T_c auf weniger als die Hälfte der Molekularfeldübergangstemperatur T_{c0} an einem einlagigen $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$-Film[2] wurde auf das Aufbrechen von Vortex-Antivortex-Paaren, wie es von der Kosterlitz-Thouless Theorie[3, 4] beschrieben wird, zurückgeführt. Die Frage, wie die supraleitende Ordnung in einer zweidimensionalen Schicht einsetzt, ist auch Gegenstand vieler experimenteller und theoretischer Arbeiten, beispielsweise an Josephson-Kontakt-Netzwerken, die ein Modellsystem für Untersuchungen der Vortex-Dynamik in der Umgebung des Supraleitungsübergangs in zwei Dimensionen darstellen sollen[5, 6]. Untersuchungen an dicken Proben sollen Aufschluß darüber geben, ob die Paarung auf einem intrinsischen Effekt der CuO_2-Ebenen beruht oder durch die Kopplung zwischen den Ebenen beeinflußt wird. So konnte die Erhöhung von T_c mit zunehmender Anzahl der bis zu 20 CuO_2-Ebenen an $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$-Filmen[7] durch Kosterlitz-Thouless-Paarung von Vortex-Antivortex-Linien, die über alle Ebenen hinweg korreliert waren, erklärt werden. Frühe Messungen von Strom-Spannungskennlinien an $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$-Kristallen[8] hingegen wurden als Kosterlitz-Thouless-Übergang in den einzelnen CuO_2-Ebenen interpretiert. Auch die Möglichkeit eines Übergangs von zwei- zu dreidimensionaler Dynamik der thermisch induzierten Vortizes bei Annäherung an T_c wird diskutiert[9].

Die Anwesenheit eines magnetischen Feldes hat großen Einfluß auf den Supraleitungsübergang. Die Wechselwirkung der thermisch induzierten Vortex-Antivortex-Paare mit den feldinduzierten Vortizes begünstigt deren Aufbrechen und destabilisiert damit die topologische Ordnung. In konventionellen Supraleitern arrangieren sich die Vortizes unterhalb des oberen kritischen Feldes B_{c2} zu einem hexagonalen Gitter[10]. Die aufgrund der Schichtstruktur und der kleinen Korrelationslänge wesentlich flexibleren Vortizes in den Hochtemperatursupraleitern sind starken Fluktuationen um ihre Gleichgewichtslage ausgesetzt. Diese führen dazu, daß das Vortex-Gitter bereits deutlich unterhalb von B_{c2} schmelzen kann und die resultierende Flüssigkeit flexibler Vortizes in einem weiten Magnetfeld- und Temperaturbereich experimentellen Untersuchungen zugänglich ist. Die Natur der zu erwartenden Übergänge im reichhaltigen Phasendiagramm für Hochtemperatursupraleiter ist wesentlich durch die Anisotropie und durch die mikrostrukturelle Unordnung in den Materialien beeinflußt.

Nach Vorhersagen von Glazman und Koshelev[11] trennt ein von der Anisotropie bestimmtes Übergangsfeld B_{2D} einen Bereich dreidimensionaler Fluktuationen bei kleinen Feldern von einem Bereich zweidimensionaler Fluktuationen für $B > B_{2D}$. Es ist umstritten, ob entlang der an $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$-Kristallen für $B \leq 100\,\mathrm{mT}$ gefundenen Irreversibilitätslinie[12, 13], die als Phasenübergang erster Ordnung interpretiert wurde, das Schmelzen des Vortex-Gitters in eine Linien-Flüssigkeit oder ein Entkoppeln der Vortex-Linien stattfindet. Oberhalb von B_{2D} sollen in einem weiten Bereich des Phasendiagramms freie Punktvortizes in den Ebenen ein Vortex-Gas bilden.

Durch Einbau von Defekten in das supraleitende Material ist es möglich, die viskose Bewegung der Vortizes in der Flüssigkeit zu behindern. Die Vortizes werden wegen des Gewinns an Kondensationsenergie durch das Haften an einem Defekt von diesem angezogen. Anders als am schwach anisotropen $YBa_2Cu_3O_7$[14, 15] ($\gamma = \xi_{ab}/\xi_c \approx 5$) gibt es am $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ ($\gamma \gtrsim 100$) keine klaren Hinweise auf die Existenz von Vortex-Glas-artigen Phasenübergängen $T_g(B)$ zur Supraleitung, die Skalierungsanalysen des Widerstandes oberhalb *und* unterhalb von T_g umfassen[16]. Es hat sich herausgestellt, daß zusätzlich eingebaute punktförmige Defekte in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ aufgrund der geringen Schersteifigkeit der Vortizes deren Bewegung nicht effektiv behindern können[17]. Hingegen haben sich durch Beschuß mit schweren Ionen im Supraleiter erzeugte kolumnare Defekte als sehr wirkungsvolle Haftzentren für die Vortizes erwiesen. Sie führen gerade in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$-Kristallen zur starken Unterdrückung der Vortex-Fluktuationen und zu einer drastischen Erhöhung der Irreversibilitätslinie[18].

In dieser Arbeit wird die Entstehung stabiler Supraleitung im stark anisotropen Hochtemperatursupraleiter $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ untersucht. Es soll die Frage geklärt werden, welche Fluktuationen den Phasenübergang unter verschiedenen äußeren Bedingungen dominieren. Dazu wird an Kristallen und an Filmen mit Dicken zwischen $L_z = 130\,\mu$m (10^5 CuO_2-Ebenen) und $L_z = 0.2\,\mu$m (100 CuO_2-Ebenen) der Einfluß der Kopplung zwischen den Ebenen (unterschiedliche elektronische Anisotropie), der Einfluß der Mikrostruktur sowie der Einfluß des Magnetfeldes und der strukturellen Unordnung in Form kolumnarer Defekte auf die Entwicklung supraleitender Ordnung untersucht.

Dieses geschieht durch die Analyse der linearen dynamischen Leitfähigkeit $\sigma(\omega)$, die mit Hilfe eines kontaktlosen Verfahrens bestimmt wurde. Hierzu wurde das durch ein magnetisches Wechselfeld induzierte magnetische Moment gemessen, das von den im Inneren der Probe parallel zu den CuO_2-Ebenen fließenden Abschirmströmen hervorgerufen wird. Die Frequenzabhängigkeit dieser Ströme liefert klare Hinweise auf das Einsetzen phasenkohärenter supraleitender Ordnung. Folgende Fragen standen bei den Untersuchungen im Vordergrund:

- Ist das Einsetzen der Supraleitung bei $H = 0$ ein intrinsischer Effekt der CuO_2-Ebenen oder wird dieser durch die Kopplung zwischen den Ebenen beeinflußt? Auf welche Weise setzt die supraleitende Ordnung ein, und wie steigt die superfluide Dichte n_s unterhalb von T_c an?

- Welchen Einfluß haben Magnetfelder auf den Supraleitungsübergang, wird dieser durch zusätzliche, von Vortizes verursachte Fluktationen unterdrückt? Welche Haftmechanismen kontrollieren und reduzieren die dissipative Bewegung der Vortizes in den CuO_2-Ebenen?

- Welchen Einfluß haben die CuO_2-Ebenen, die große Barrieren für Anregungen parallel zu den Ebenen orientierter Vortizes darstellen sollten, auf deren Dynamik?

- Können durch kolumnare Defekte die starken Fluktuationen der senkrecht zu den CuO_2-Ebenen orientierten Vortizes unterdrückt werden? Wird durch die kolumnaren Defekte ein Phasenübergang zur Supraleitung im Feld stabilisiert?

In Kapitel 2 werden die Grundlagen der Ginsburg-Landau-Theorie zu Beschreibung der Supraleitung und die Behandlung von Fluktuationen im Rahmen dieser Theorie dargestellt. Im Anschluß daran werden die für den Vortex-Zustand erwarteten und an $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$-Materialien beobachteten Phasenübergänge vorgestellt. Das Kapitel schließt mit der Beschreibung des Einflusses struktureller Unordnung, speziell in Form kolumnarer Defekte. In Kapitel 3 werden die Proben charakterisiert, das Meßverfahren der dynamischen Suszeptibilität $\chi(T, \omega, B)$ und die Inversionsroutine zu Bestimmung der dynamischen Leitfähigkeit aus χ erläutert. In Kapitel 4 wird der Supraleitungsübergang an den Kristallen und Filmen im Nullfeld untersucht und mit dem Phänomen der zweidimensionalen Supraleitung in Verbindung gebracht. Die fluktuationserhöhende Wirkung eines äußeren magnetischen Feldes und die damit verbundene Unterdrückung des Supraleitungsüberganges wird in Kapitel 5 betrachtet und die Dynamik des normalleitenden Vortex-Zustands beschrieben. In Kapitel 6 wird der Einfluß korrelierter Haftmechanismen auf die Dynamik feldinduzierter Vortizes in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$-Filmen untersucht. Das besondere Augenmerk gilt hier der Bedeutung des intrinsischen Haftmechanismus an den CuO_2-Ebenen für die Dynamik von parallel zu den Ebenen orientierten Vortizes sowie der Existenz eines durch kolumnare Defekte senkrecht zu den CuO_2-Ebenen induzierten Supraleitungsübergangs. Diese Arbeit schließt in Kapitel 7 mit einer Zusammenfassung der Resultate.