



Doctoral Thesis

Vortex pinning in high-temperature superconductors

Author(s):

Wagner, Orlando Sébastien Paulin

Publication Date:

1998

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-002007817> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 12809

Vortex Pinning in High-Temperature Superconductors

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
(ETH Zürich)

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by
ORLANDO SÉBASTIEN PAULIN WAGNER

Dipl. Phys. ETH
born October 10, 1970
Luxembourgish citizen

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. J.W. Blatter, examiner
Dr. T. Giamarchi, co-examiner

1998

Abstract

In this thesis we study the pinning of vortex lattices in the high-temperature copper-oxide superconductors by quenched disorder due to randomly distributed point-like material defects. This problem is not only physically interesting, but also relevant from a technological point of view, especially because pinning gives rise to a finite critical current density j_c below which an electric current can flow essentially without dissipation. The main goal of our study is to learn more about this subject and to obtain quantitative results for j_c .

The high-temperature superconductors have a layered structure and are uniaxially anisotropic. As long as the anisotropy is weak, the layering can be neglected and the vortex lattice is appropriately modeled in terms of an elastic manifold characterized by a set of elastic moduli. Throughout this work we assume the defect disorder to be weak and short-range correlated. In this case, the pinning properties at small length scales are well described by the weak collective pinning theory according to which quenched disorder breaks the vortex system up into collectively pinned domains. On the other hand, for strongly anisotropic materials, the layered structure becomes important. With the magnetic field perpendicular to the layers the vortex lines divide up into weakly coupled “pancake vortices”. This opens the possibility for pinning of individual or bundles of pancake vortices. Under these strong-pinning conditions the weak collective pinning theory loses its validity and a different approach has to be developed.

Taking into account both the electromagnetic interactions and the Josephson coupling between the layers, we map out the B - T (magnetic induction–temperature) pinning diagram for the case where the applied magnetic field is perpendicular to the layers, using simple dimensional estimates and perturbative methods. The various regimes in this diagram give the size R_c and L_c as well as the geometry of the collectively pinned domains in the vortex matter. We find the regimes of single-pancake-vortex (0D), single-vortex (1D), pancake-vortex-bundle (2D) and vortex-bundle (3D) pinning, and determine the collective pinning lengths R_c and L_c , the pinning energy U_c , and the critical current density j_c in each of the regimes. In particular, we present a detailed analysis of the phenomenon of strong pinning which leads to two distinct nonlinear features in the current–voltage characteristic in the 0D regime. Introducing the new concept of variable-range thermal smoothing of the pinning potential, we describe the suppression of the strong pinning of individual pancake vortices by thermal fluctuations. We show how the thermal depinning of (pancake) vortices proceeds in a sequence of steps until the weak collective pinning situation is recovered at high temperatures. Furthermore, we predict that for strongly anisotropic materials the combination of layering and electromagnetic interactions leads to sharp crossovers

between the 0D and 1D as well as between the 2D and 3D regimes. Finally, we discuss the evolution of the pinning diagram as the disorder strength and the anisotropy (i.e., the Josephson coupling) of the material is changed and demonstrate how to go over from strongly anisotropic superconductors such as BiSCCO to more isotropic materials like YBCO.

A major complication in the calculations is the strong dispersion (nonlocality) of the elastic moduli of the vortex lattice. In the marginal subregion of the 3D regime which borders on the 2D regime (“small-bundle” pinning regime) the method of dimensional estimates breaks down and the perturbation calculation yields imprecise results. We show that in this regime the vortex system is effectively four-dimensional. For a simple case study we therefore first consider a four-dimensional elastic manifold with N transverse degrees of freedom and nondispersive elastic constants, subject to quenched uncorrelated disorder [(4+ N) model]. Using a real-space functional renormalization group (RG) approach, we derive a RG equation for the pinning-energy correlation function in a two-loop approximation. The solution of this equation provides us with an expression for the zero-temperature collective pinning radius R_c , thus refining the imprecise lowest-order perturbation result. We then apply this technique to the more complicated vortex problem and determine R_c in the small-bundle pinning regime to two-loop accuracy.

The RG approach can also be used to investigate the dynamic properties of the vortex lattice. We derive a two-loop RG equation in the zero-temperature limit for the effective viscosity that appears when driving the vortex system with an external current and arrive at an improved description of the dynamics in the regime where the current–voltage characteristic is strongly nonlinear due to pinning.

Kurzfassung

In der vorliegenden Dissertation untersuchen wir das Festhalten von magnetischen Flussliniengittern in den Kupferoxid-Hochtemperatur-Supraleitern durch zufällig verteilte punktförmige Materialdefekte. Dieses Problem ist nicht nur physikalisch interessant, sondern auch von technologischer Relevanz, insbesondere da das Haften der Flusslinien (auch Wirbellinien genannt) eine endliche kritische Stromdichte j_c verursacht, unterhalb derer ein elektrischer Strom praktisch widerstandslos fließen kann. Hauptziel dieser Untersuchung ist es, mehr über dieses Thema in Erfahrung zu bringen und quantitative Resultate für j_c zu erhalten.

Die Hochtemperatur-Supraleiter haben eine geschichtete Struktur und sind mit grosser Genauigkeit einachsig anisotrop. Solange die Anisotropie klein ist, kann die Schichtstruktur vernachlässigt werden und das Flussliniengitter kann als elastische Mannigfaltigkeit aufgefasst werden, welche durch einen Satz Elastizitätsmodule bestimmt ist. In dieser Arbeit nehmen wir an, dass die durch die Materialdefekte hervorgerufene Unordnung schwach und kurzreichweitig korreliert ist. In diesem Fall werden die Haftigenschaften auf kleinen Längenskalen bestens durch die sogenannte schwache kollektive Hafttheorie beschrieben, gemäss welcher das Flussliniensystem unter dem Einfluss von statischer Unordnung in elastisch unabhängige und kollektiv haftende Bereiche (Flusslinienbündel) unterteilt ist. Wenn andererseits das Material sehr anisotrop ist, lässt sich die Schichtstruktur nicht mehr vernachlässigen. Für ein zu den Schichten senkrecht angelegtes Magnetfeld, zerfallen die Wirbellinien in schwach gekoppelte "Scheibenwirbel". Diese können einzeln oder in Bündeln haften. Unter diesen Bedingungen verliert die schwache kollektive Hafttheorie ihre Gültigkeit und muss durch eine geeignetere Beschreibung ersetzt werden.

Unter Berücksichtigung sowohl der elektromagnetischen Wechselwirkung als auch der Josephsonkopplung zwischen den Schichten leiten wir das Haftphasendiagramm als Funktion der magnetischen Induktion B und der Temperatur T her für den Fall eines zu den Schichten senkrecht stehenden Magnetfeldes; wir benutzen dazu einfache Dimensionsbetrachtungen sowie störungstheoretische Methoden. Die verschiedenen Bereiche (Haftregime) in diesem Diagramm geben die Grössen R_c und L_c sowie die Geometrie der kollektiv haftenden Flusswirbeldomäne an. Wir finden vier Grundtypen solcher Haftregime, nämlich das Einzel-Scheibenwirbel- (0D), das Einzel-Wirbellinien- (1D), das Scheibenwirbel-Bündel- (2D) und das Wirbellinien-Bündel-Regime (3D). Wir bestimmen die kollektiven Haftlängen R_c und L_c , die Haftenergie U_c sowie die kritische Stromdichte j_c in jedem dieser Regime. Insbesondere untersuchen wir den Effekt der starken Haftung von einzelnen Scheibenwirbeln. Dieser äussert sich in zwei ausgeprägten Nichtlinearitäten in der Strom-Spannungs-Kennlinie im 0D Regime. Wir führen das neue Konzept der Abschwächung des Unordnungspotentials

durch thermisches “Hüpfen” der Scheibenwirbel ein und beschreiben damit die Unterdrückung der starken Haftung durch thermische Fluktuationen. Wir zeigen wie die thermische Enthftung der Scheibenwirbel/Wirbellinien in einzelnen Schritten erfolgt und bei hohen Temperaturen in die schwache kollektive Hafttheorie übergeht. Ein weiteres Ergebnis unserer Untersuchung ist, dass für sehr anisotrope Materialien die geschichtete Struktur in Verbindung mit der elektromagnetischen Wechselwirkung zu abrupten Übergängen zwischen dem 0D und 1D sowie zwischen dem 2D und 3D Regime führt. Schliesslich erörtern wir die Entwicklung des Haftdiagrammes in Abhängigkeit der Unordnungsstärke und der Anisotropie (d.h. der Stärke der Josephsonkopplung) und liefern die Haftdiagramme für das ganze Spektrum von den sehr anisotropen Supraleitern wie z.B. BiSCCO bis hin zu den weniger anisotropen Materialien wie YBCO.

Ein Hauptproblem bei den Rechnungen ist die starke Dispersion (Nichtlokalität) der Elastizitätsmodule des Flussliniengitters. Im marginalen Unterbereich innerhalb des 3D Regimes (Bereich “kleiner” Wirbellinienbündel) versagen Dimensionsbetrachtungen vollständig und die Störungsrechnungen liefern unpräzise Ergebnisse. Wir zeigen, dass sich das Wirbelliniengitter in diesem Bereich wie ein vierdimensionales System verhält. Deshalb betrachten wir zunächst das ModeSystem einer vierdimensionalen Mannigfaltigkeit mit N transversalen Freiheitsgraden und nichtdispersiven Elastizitätsmodulen, welches einer statischen unkorrelierten Unordnung unterworfen ist. Unter Benutzung einer funktionalen Renormierungsgruppenmethode (RG) leiten wir eine RG-Gleichung für die Haftenergie-Korrelationsfunktion in zweiter Ordnung her. Die Lösung dieser Gleichung liefert uns einen Ausdruck für die kollektive Haftlänge R_c bei verschwindender Temperatur. Dieses Resultat stellt eine Verbesserung gegenüber der ungenauen Störungsrechnung dar. In einem zweiten Schritt wenden wir diese Technik auf das kompliziertere Flusslinienproblem an und bestimmen R_c im Regime kleiner Wirbellinienbündel in zweiter Ordnung RG.

Die RG-Methode kann auch zur Untersuchung der dynamischen Eigenschaften des Flusswirbelgitters verwendet werden. Im Grenzfall verschwindender Temperatur leiten wir in zweiter Ordnung eine RG-Gleichung her für die Viskosität die entsteht, wenn das Flussliniensystem durch einen elektrischen Strom in Bewegung versetzt wird. Wir gelangen so zu einer verbesserten Beschreibung der Dynamik in demjenigen Strombereich, wo die Strom-Spannungs-Kennlinie wegen des Haftens der Wirbellinien stark nichtlinear ist.