

Diss.ETH Nr. 7876

Spatial Structures of the Intermediate
State Between Superconductivity and
Ferromagnetism

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

Peter Andreas Stampfli

dipl.Phys.ETH

born June 14, 1958

citizen of Solothurn, Aeschi (Kt.Solothurn)
and Büren (Kt.Solothurn)

accepted on the recommendation of

Prof.Dr. T.M. Rice, examiner

Prof.Dr. W. Baltensperger, co-examiner

1985

ZUSAMMENFASSUNG

Ferromagnetische Supraleiter sind bei tiefen Temperaturen supraleitend, aber unterhalb einer gewissen Temperatur werden sie ferromagnetisch und die Supraleitung bricht zusammen. In einem Zwischenzustand wird Koexistenz von Supraleitung und Magnetisierung beobachtet. Wir benützen ein verallgemeinertes Ginzburg Landau Mean Field Modell um die Supraleitung, die Magnetisierung und ihre gegenseitige Konkurrenz zu beschreiben.

Zwischen Supraleitung und Magnetisierung gibt es eine elektromagnetische Wechselwirkung und eine Austauschwechselwirkung. Die elektromagnetische Wechselwirkung wird durch das magnetische Feld der magnetischen Momente verursacht. Es ist stark genug um die Supraleitung zu zerstören. Die Koexistenz von Supraleitung und Magnetisierung wird erst durch räumliche Strukturen möglich. Nur die elektromagnetische Wechselwirkung kann konsistent im Mean Field Modell eingebaut werden. Die Austauschwechselwirkung wird nicht exact behandelt.

Die elektromagnetische Wechselwirkung ist sehr nichtlokal und verursacht komplizierte Strukturen. Bisher wurde meist nur räumliche Struktur entweder in der Magnetisierung oder in der Supraleitung aber nicht beides kombiniert untersucht. Wir studieren neue Strukturen die topologische Struktur in Magnetisierung und Supraleitung kombinieren. Sie werden aus den Instabilitäten einfacherer Strukturen entwickelt da sie nicht direkt gefunden werden können. Die magnetische Anisotropie des Materials wird wichtig. Wir unterscheiden Anisotropie vom Typ "leichte Ebene" und "leichte Achse" .

Die Ginzburg Landau Gleichungen zu lösen ist zu schwierig und numerisch instabil. Stattdessen benützen wir die Symmetrien der Strukturen um die Ordnungsparameter zu charakterisieren und suchen dann direkt das Minimum der freien Energie. Dies ist numerisch stabil und wohldefiniert. Wir erhalten so Strukturen, die deutliche Minima der freien Energie sind.

Eine neue alternierende Vortex Gitter Struktur für Materialien mit "leichter Ebene" Anisotropie so wie ErRh_4B_4 hat besondere Eigenschaften. Eine Komponente der Magnetisierung ist periodisch eingeteilt in entgegengesetzte Domänen. Jede Domäne enthält eine Reihe von Vortexlinien oder

Antivortexlinien von entgegengesetzter Polarität. Die Magnetisierung verschwindet nicht in den Bloch Wänden, sondern es hat dort eine Magnetisierung senkrecht zur Magnetisierung in den Domänen. Diese Magnetisierung hat eine oszillierende Struktur wegen der Wechselwirkung mit der Supraleitung. Sie ist sinusartig oszillierend und nicht eine Spiralwelle, unabhängig von jeder Anisotropie innerhalb der leichten Ebene. Ein grosser Anteil der Magnetisierung ist oszillierend.

Die kryptoferromagnetische Struktur, bestehend aus einer oszillierenden Magnetisierung koexistierend mit der üblichen Supraleitung, und die ferromagnetische Vortex Gitter Struktur, bestehend aus Ferromagnetismus koexistierend mit Typ II Supraleitung mit Vortex Linien, können beide nicht die Eigenschaften des Zwischenzustandes von ErRh_4B_4 erklären. Insbesondere erklären sie nicht vollständig die Existenz von ferromagnetischer Magnetisierung und oszillierender Magnetisierung koexistierend mit Supraleitung. Die neue alternierende Vortex Gitter Struktur kann die meisten der Eigenschaften des Zwischenzustandes von ErRh_4B_4 erklären.

Wir benützen Fourier Reihen um die Ordnungsparameter darzustellen. Dies ist sogar für den supraleitenden Ordnungsparameter möglich trotz seiner Singularität an den Vortexlinien. Wir wählen Periodenlängen und Koeffizienten, die die freie Energie minimalisieren. Um die Anzahl der Variationsparameter zu verkleinern machten wir sorgfältige Approximationen, die die Anwendung des Rayleigh Ritz Prinzipes erlauben. Für die alternierende Vortex Gitter Struktur erhalten wir eine freie Energie, die immer etwas höher ist als die freie Energie entweder der kryptoferromagnetischen Struktur mit einer Magnetisierung als Spiralwelle oder der ferromagnetischen Vortex Gitter Struktur. Aber dies ist wahrscheinlich so wegen der Approximationen die im Mean Field inhärent sind.

ABSTRACT

Ferromagnetic superconductors are superconducting at low temperatures, but below a certain temperature they become ferromagnetic and the superconductivity breaks down. In an intermediate state coexistence of superconductivity and ferromagnetism is observed. We use a generalized Ginzburg Landau mean field model to describe the superconductivity, the magnetization and their mutual competition.

There is an electromagnetic and an exchange interaction between superconductivity and magnetization. The electromagnetic interaction is due to the magnetic field of the ordered magnetic moments which is large enough to destroy superconductivity. Coexistence of superconductivity and magnetization becomes only possible through spatial structure. Only the electromagnetic interaction can be included consistently in the mean field model. The exchange interaction is treated approximately.

The electromagnetic interaction has a very nonlocal character and can give rise to very complicated structures. Most theorists have only considered spatial structure in either the magnetization or the superconductivity but not in both together. We examine new structures which combine topological structure in both superconductivity and magnetization. They are developed from instabilities of simpler structures as they cannot be found directly. The magnetic anisotropy of the material becomes important. We treat easy axis and easy plane anisotropy separately.

To solve the Ginzburg Landau equations is very difficult and numerically instable. Instead, we use for each structure its symmetries to characterize the order parameters and directly search for the minimum of the free energy. This is numerically stable and well defined. We obtain structures which are distinct minima of the free energy.

A new alternating vortex lattice structure for materials with easy plane magnetic anisotropy such as ErRh_4B_4 has especially interesting properties. One component of the magnetization is periodically divided into large opposite domains. Each domain contains one row of vortex lines or antivortex lines with opposite polarity. The magnetization does not vanish in the Bloch walls, instead there is a magnetization which is

perpendicular to the magnetization in the domains and which has an oscillating structure because of the interaction with superconductivity. It is sinusoidally oscillating and not a spiral wave independent of any anisotropy in the easy plane. A large fraction of the magnetization is oscillating.

The cryptoferromagnetic structure, which consists of a spatially oscillating magnetization coexisting with the usual superconductivity, and the ferromagnetic vortex lattice structure, which consists of ferromagnetism coexisting with type II superconductivity with vortex lines, both fail to explain the properties of the intermediate phase of the ferromagnetic superconductor ErRh_4B_4 . They cannot fully explain the presence of both ferromagnetic and oscillating magnetization coexisting with superconductivity. The new alternating vortex lattice structure seems to be able to explain most of the properties of ErRh_4B_4 .

We use Fourier series to represent the order parameters. This is even possible for the superconducting order parameter in spite of its singularity at the vortex lines. We choose periods and Fourier coefficients which minimize the free energy. To reduce the number of variational parameters we made careful approximations which allow the use of the Rayleigh Ritz variational principle. We obtained a free energy for the alternating vortex lattice structure which is always slightly higher than the free energy of either the spiral wave cryptoferromagnetic structure or the ferromagnetic vortex lattice structure. But this is probably due to approximations inherent in the mean field model.