

**Investigation of the vortex dynamics
in the high-temperature
superconductors $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$,
 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$ and $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

TIZIANO TERUZZI

Dipl. Phys. ETH

born on the 29th December 1964

citizen of Locarno (Ticino)



accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A. C. Mota, examiner

Prof. Dr. J. Blatter, co-examiner

Abstract

In order to study the low field dynamics of vortices in the mixed state of the high-temperature oxides, we have performed an extensive investigation of the time relaxation of the remanent magnetization in powdered samples of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ ($T_c \approx 95$ K), $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($T_c \approx 92$ K, $\delta \approx 0.04$) and $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ ($T_c \approx 82$ K). All samples consist of randomly oriented grains. Contrary to sintered materials, in which both inter- and intragranular currents exist, in the investigated powders only the intragranular current contributes, because of the extremely weak coupling between the superconducting grains, to the magnetic response of the sample.

The starting point of this thesis work has been the construction of a SQUID-magnetometer especially designed for this investigation. The experimental arrangement allows very precise DC and AC magnetic measurements in the temperature range $4 \text{ K} \leq T \leq 200 \text{ K}$ and up to a magnetic field of 1 kGauss. During magnetic relaxation measurements, which can be recorded for a period of time as long as 3 days, the temperature of the sample can be stabilized to better than 30 mK over its whole range. The good thermal stability is guaranteed by an automatic exchange gas regulating system supported by an electronic temperature controller. In order to avoid problems related to inhomogeneities of the magnet, and contrary to commercially available magnetometers, the sample is not moved inside the pick-up coil. A specially designed low noise current supply allows to sweep the magnetic field continuously. The flux resolution is of about $2\Phi_0$ ($\approx 4 \times 10^{-7} \text{ Gcm}^2$).

In the investigated powdered samples the time dependence of the remanent flux $\Delta\Phi_R$ strongly deviates, in the experimental time window $1 \leq t \leq 10^5$ sec, from the logarithmic behavior predicted within the

Anderson's theory of flux creep. Indeed, the time dependence of the remanent flux is observed to follow a power law of the form $\Delta\Phi_R(t) = \Delta\Phi_R(\infty) + \Delta\Phi_o(t/\Delta t_{obs})^{-\alpha}$ with $\Delta t_{obs} \approx 1$ sec and with the exponent α ranging between 0.01 and 0.11. In all samples the temperature dependence of the normalized creep rate $S = -d(\ln \Delta\Phi_R(t))/d \ln t$ displays an anomalous maximum at some temperature T_{peak} , with $T_{peak} \approx 16$ K for $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$, $T_{peak} \approx 40$ K for $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ and $T_{peak} \approx 30$ K for $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$. Our data of S are in good qualitative agreement with values obtained by other groups for single crystals oriented with their c -axis parallel to the external field ($H \parallel c$).

The drop of the normalized creep rate S above T_{peak} points to the existence of a crossover in the low field dynamics of vortices. According to the weak collective pinning theory, with increasing temperature a crossover in the dimensionality of pinning is predicted when the thermal energy $k_B T$ of the vortices becomes comparable to their collective pinning energy U_c . The crossover is predicted to be from 0D-pinning (isolated pancake vortices) to 2D-pinning (collectively pinned pancakes) for layered superconductors while it is from 1D-pinning (isolated flux lines) to 3D-pinning (flux line bundles pinning) in continuous anisotropic materials. For all the investigated samples the values of the pinning energies U_c/k_B calculated from the theory are in good agreement with the temperature where the change of the vortex dynamics occurs.

We also discuss the temperature dependence of the remanent flux $\Delta\Phi_R$. In particular we find that in all the investigated samples and in the temperature regime where the distribution of $\Delta\Phi_R$ is fully critical, the $\Delta\Phi_R$ data decrease with temperature following a law of the form $\Delta\Phi_R(T) = \Delta\Phi_R(0) \exp[-T/T_o]$ with $T_o \approx 15-25$ K. From a quantitative analysis based on an extension of the Bean's critical state model to the case of a sample consisting of isolated, randomly oriented, anisotropic grains we estimate the in-plane component of the intragranular critical current density. The estimated values at $T = 30$ K are: $j_c^c \approx 3.5 \times 10^6$ A/cm² for BSCCO-2212, $j_c^c \approx 5.5 \times 10^5$ A/cm² for YBCO-123 and $j_c^c \approx 1 \times 10^5$ A/cm² for YBCO-124.

Kurzfassung

Um die Niederfelddynamik von Vortizes im gemischten Zustand von Hochtemperatur-Supraleitern zu studieren, haben wir eine extensive Untersuchung der zeitlichen Relaxation der remanenten Magnetisierung in drei pulverförmigen Proben von $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ ($T_c \approx 95$ K), $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ ($T_c \approx 82$ K) und $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ($T_c \approx 92$ K, $\delta \approx 0.04$) durchgeführt. Alle drei Proben bestehen aus zufällig orientierten Körnern. Im Gegensatz zu gesinterten Proben, in denen sowohl inter- als auch intragranulare Ströme existieren, tragen in den untersuchten Pulverproben wegen der extrem schwachen Kopplung zwischen den supraleitenden Körnern nur intragranulare Ströme zur magnetischen Antwort der Probe bei.

Zu Beginn dieser Doktorarbeit ist ein speziell für diese Untersuchung ausgelegtes SQUID-Magnetometer entwickelt worden. Die experimentelle Anordnung erlaubt magnetische DC- und AC-Messungen im Temperaturbereich von 4 K bis etwa 200 K und in einem Magnetfeld von bis zu 1 kGauss. Während der magnetischen Relaxationsmessungen, die für eine Dauer von bis zu 3 Tagen aufgezeichnet werden können, kann die Temperatur der Probe mit einer Genauigkeit von besser als 30 mK über den ganzen Bereich stabilisiert werden. Die gute thermische Stabilität wird durch ein automatisches Austauschgas-Regulationssystem, das durch eine elektronische Temperaturkontrolleinheit unterstützt wird, gewährleistet. Um Probleme im Bezug auf Inhomogenitäten des Magneten zu vermeiden, wird in unserer Anordnung im Gegensatz zu kommerziell erhältlichen Magnetometern die Probe nicht innerhalb der Pick-up-Spule bewegt. Eine speziell entwickelte rauscharme Stromquelle ermöglicht eine kontinuierliche Veränderung des Magnetfeldes. Die Flussauflösung beträgt ungefähr $2\Phi_0$ ($\approx 4 \times 10^{-7}$ Gcm²).

In den untersuchten Pulverproben weicht die Zeitabhängigkeit des

remanenten Flusses $\Delta\Phi_R$ im beobachteten Zeitraum $1 \text{ sec} \leq t \leq 10^5 \text{ sec}$ stark vom logarithmischen Verhalten ab, das in der Andersonschen Theorie über Flusskriechen vorausgesagt wird. Die tatsächlich beobachtete Zeitabhängigkeit gehorcht einem Potenzgesetz der Form $\Delta\Phi_R(t) = \Delta\Phi_R(\infty) + \Delta\Phi_o (t / \Delta t_{obs})^{-\alpha}$ mit $\Delta t_{obs} \approx 1 \text{ sec}$ und dem Exponent α , der zwischen 0.01 und 0.11 beträgt. In allen drei Proben weist die Temperaturabhängigkeit der normierten Zerfallsrate $S = -d(\ln \Delta\Phi_R(t)) / d \ln t$ ein anomales Maximum bei einer Temperatur T_{peak} auf, wobei $T_{peak} \approx 16 \text{ K}$ für $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$, $T_{peak} \approx 40 \text{ K}$ für $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ und $T_{peak} \approx 30 \text{ K}$ für $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ sind. Unsere Daten für S stimmen qualitativ gut mit Werten überein, die von anderen Gruppen für Einkristalle mit der c -Achse parallel zum äusseren Feld erhalten wurden ($H \parallel c$).

Der Abfall der normierten Zerfallsrate S oberhalb von T_{peak} weist auf die Existenz eines Überganges in der Niederfelddynamik der Vortizes hin. Von der Theorie des schwachen kollektiven Pinnings wird bei steigender Temperatur ein Übergang in der Dimensionalität des Pinnings vorhergesagt, wenn die thermische Energie $k_B T$ der Vortizes mit der kollektiven Pinnenergie U_c vergleichbar wird. In geschichteten Supraleitern wird ein Übergang vom 0D-Pinning (isolierte Pancake-Vortizes) zum 2D-Pinning (kollektiv gepinnte Pancakes) vorhergesagt, während man in kontinuierlichen anisotropen Materialien einen Übergang vom 1D-Pinning (isolierte Flusslinien) zum 3D-Pinning (Pinning von Flusslinienbündeln) erwartet. Für alle untersuchten Proben stimmen die mit Hilfe der Theorie berechneten Werte für die Pinnenergie U_c/k_B gut mit der Temperatur überein, bei der die Änderung der Vortexdynamik auftritt.

Wir diskutieren auch die Temperaturabhängigkeit des remanenten Flusses $\Delta\Phi_R$. Insbesondere finden wir, dass in allen untersuchten Proben und in dem Temperaturbereich, in dem die Verteilung von $\Delta\Phi_R$ vollständig kritisch ist, die $\Delta\Phi_R$ -Daten gemäss einem Gesetz der Form $\Delta\Phi_R(T) = \Delta\Phi_R(0) \exp[-T / T_o]$ mit der Temperatur abnehmen, wobei $T_o \approx 15\text{-}25 \text{ K}$ ist. Mit einer quantitativen Analyse, die auf einer Erweiterung des Beanschen Modells des kritischen Zustandes auf den Fall

einer aus isolierten, zufällig orientierten, anisotropen Körnern bestehenden Probe, basiert, geben wir eine Abschätzung der intragranularen kritischen Stromdichte. Bei $T = 30$ K erhalten wir: $j_c^c \approx 3.5 \times 10^6$ A/cm² für BSCCO-2212, $j_c^c \approx 5.5 \times 10^5$ A/cm² für YBCO-123 and $j_c^c \approx 1 \times 10^5$ A/cm² für YBCO-124.