


Diss. ETH Nr. 8316

Über den Einfluss der Dehnung auf die elektrischen Eigenschaften von A15-Supraleitern

Abhandlung
zur Erlangung des Titels eines
Doktors der Technischen Wissenschaften
der
Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

vorgelegt von
Jean Jacques ALFF
Dipl. El. Ing. ETH
geboren am 5. Juli 1956
von Luxemburg
Grossherzogtum Luxemburg

Angenommen auf Antrag von
PD Dr. H. Brechna, Referent
Prof. Dr. W. Zaengl, Korreferent


9.10.87.

Abstract

Influence of strain on the electrical properties of A15 superconductors

The measurements presented here fall into two main groups:

- Sensitive measurements of the electrical field strength of bronze process superconductors strained by bending.
- Measurements of the critical current of different preparation stages of external-tin SIN superconductors.

The results of the measurements of the electrical field strength can be well described by a function derived from the statistical spatial distribution of the maximum superconducting current density. This function possesses only a few parameters which have, however, a clear physical meaning.

The measurements of the critical current of uniaxially strained conductors lead to the conclusion that the whole strain *tensor* is of significance and not only the *longitudinal* strain of the superconducting material. For a given type of conductor and a given cross section all the strain components vary uniformly with the longitudinal strain; thus it appears as if the longitudinal strain was the only variable. Extrapolations of the measurements of uniaxially strained conductors to similar conductors with different cross sections or even to conductors strained by bending (with a non-uniform strain over the section) are of limited value, because the coupling of the different components of the three-dimensional strain depends on the geometry. The slope of the critical current as a function of the uniaxial strain is similar for external tin conductors and for bronze process conductors. The mechanical properties (breaking strain, ϵ_{irrev} , stress/strain curve) are comparable for both types of conductors.

Late in 1985 a measurement configuration for the precise straining of long samples in an high magnetic field was published. A helical spring with the superconductor soldered to the outer surface is used. By applying different amounts of torque to such a spring, a long sample can be exposed to positive and negative strains. A setup using this configuration could no longer be provided for the present series of measurements, but a discussion of the advantages and the disadvantages of the different known methods for measuring

strained samples suggests the provision of new installations with a torque spring because this is the only way to obtain simultaneously a precise straining of the sample and a sensitive measurement of the electrical field strength without errors by fringe effects. The measurements reported here lead to the expectation that such a procedure might disclose a source of information so far untapped, because the parameters describing the field strength as a function of the current for uniaxially strained conductors have a physical meaning as already mentioned. The values of these parameters can only be determined by a sensitive measurement of the current-dependence of the electrical field strength along a sample of adequate length; measuring a critical current merely defined in terms of a single field strength value is clearly insufficient.

(Deutsche Zusammenfassung siehe Kap. 3)

3 Zusammenfassung

Die Anwendung von supraleitenden Magneten in den verschiedenen Bereichen der Energietechnik setzt Leiter voraus, die unter anderem eine hohe Stromdichte in einem hohen Magnetfeld zulassen. Aus diesem Grund konzentriert sich weltweit das Interesse bei der Entwicklung von Leitern für Magnete auf Materialien mit der sogenannten A15 Kristallstruktur, die trotz vielen Schwierigkeiten bei der technischen Herstellung die vorher genannte Bedingung am ehesten erfüllen. Eine der Schwierigkeiten bei Supraleitern aus dieser Kristallklasse ist die starke Beeinflussung der kritischen Stromdichte durch mechanische Verformung.

In der Schweiz werden am SIN (Schweizerisches Institut für Nuklearforschung) Leiter für Fusionsmagnete nach der Methode der externen Zinneindiffusion entwickelt. Bei dieser Methode diffundiert bei der Reaktion (Glühung) das galvanisch aufgetragene Zinn von der Drahtoberfläche durch das Matrixkupfer zu den Nb-Filamenten und bildet dort den A15-Supraleiter Nb_3Sn . Der Querschnitt eines technischen Leiters muss vor der Reaktion in mehreren Verseilstufen aufgebaut werden, weil der Durchmesser des Grunddrahtes wegen den zulässigen Diffusionslängen recht klein gehalten werden muss. Weil dieser Leitertyp erst nach der Reaktion in die endgültige Magnetform gewickelt werden soll, wurde in der vorliegenden Arbeit der Einfluss der mechanischen Verformung auf die elektrischen Eigenschaften von Nb_3Sn untersucht. Dabei wurden zwei verschiedene Gruppen von Messungen ausgeführt. Einerseits wurde am SIN eine Zugapparatur aufgebaut, mit der die kritischen Ströme des Grunddrahtes und der ersten Verseilstufe (bestehend aus sieben Grunddrähten) bei verschiedenen Dehnungen und Magnetfeldern ausgemessen werden konnten. Andererseits wurden an der ETH-Zürich, Fachgruppe Hochspannungstechnik, empfindliche Messungen der elektrischen Feldstärke an Leiterproben in Funktion des Leiterstromes ausgeführt. Bei diesen Messungen wurden Nb_3Sn -Leiter nach dem Bronze-Prozess mit unterschiedlichen Twistlängen der Filamente und unterschiedlichen Biegedehnungen eingesetzt.

Die Zusanlage am SIN war für gerade Proben mit einer dehnbaren Probenlänge von 42mm und je 15mm Einlötlänge ausgelegt.

Originalproben von SIN Leitern neigten bis zu dem maximalen Magnetfeld dieser Anlage von 12-Tesla zu vorzeitigem Übergang in den normalleitenden Zustand. Darum wurde versucht, diese Proben durch galvanische Verkupferung nach der Reaktion zu stabilisieren. Eine Kupferschicht mit konstanter Stärke entlang der Probe verursachte jedoch zwei Nachteile, nämlich eine zusätzliche mechanische Belastung der Proben durch die Längenänderung des Kupfers beim Abkühlen und eine grosse Stromtransferlänge an den Einlötstellen. Wegen diesem zweiten Nachteil konnten die kritischen Ströme von Proben mit gleichmässiger Verkupferung nur ungenau bestimmt werden. Als beste Lösung erwies sich, die Proben nur an beiden Enden zu verkupfern und in der Übergangszone zu der unverkupferten Messzone die Schichtdicke des Kupfers kontinuierlich zu reduzieren. Bei den derart vorbereiteten Proben traten weder mechanische noch elektrische Probleme auf.

Der Verlauf der kritischen Stromdichte in Funktion der Dehnung in Längsachse des Leiters ist bei den SIN-Leitern im Prinzip ähnlich wie bei in der Literatur beschriebenen Nb_3Sn -Leitern mit anderen Herstellungsmethoden. Die Messresultate an den SIN-Leitern und verschiedene Hinweise aus der Literatur lassen vermuten, dass die Dehnung in Achsenrichtung (=Stromrichtung) des Leiters nicht der einzige mechanische Einfluss auf die kritische Stromdichte darstellt, sondern alle Dehnungskomponenten (Dehnungstensor) gleichzeitig einen Einfluss ausüben. Je nach Leiterquerschnitt und Leiteraufbau verändert sich die Beziehung zwischen den verschiedenen Belastungskomponenten. Dies könnte auch die Erklärung dafür sein, weshalb die kritische Stromdichte in Funktion der Dehnung in Achsenrichtung bei dem Grunddraht und bei der ersten Stufe des SIN-Leiters nicht genau den gleichen Verlauf aufweisen, obwohl beide bis auf die Verseilung genau identisch aufgebaut sind und beide miteinander reagiert worden waren.

Man sollte also das "strain scaling" Gesetz von Ekin [1], bei dem nur die Leiterdehnung in Achsenrichtung zur Beschreibung der mechanischen Leiterbelastung herangezogen wird, nur mit Vorsicht bei Extrapolationen auf Leiterquerschnitte verwenden, die stark von den gemessenen Querschnitten abweichen. Auch Extrapolationen von Messresultaten der kritischen Stromdichte bei einachsiger gedehnten Leitern auf biegebelastete Leiter müssen als sehr gewagt bezeichnet

werden, denn hier liegt eine völlig andersartige Verteilung der mechanischen Belastung vor.

Bei der zweiten Gruppe von Messungen, nämlich den Messungen der elektrischen Feldstärke an biegebelasteten Leitern, war die Empfindlichkeit der Feldstärkemessung fast eintausendmal höher als bei Bestimmungen der kritischen Stromdichte üblich ist. Auch bei Stromdichten, die nur einen Bruchteil der kritischen Stromdichte betragen, konnte eine mehr oder weniger hohe Feldstärke nachgewiesen werden. Der Verlauf dieser Feldstärke kann bei allen Messresultaten in zwei Bereiche eingeteilt werden: Für Stromdichten nahe der kritischen Stromdichte (hier verwendetes Kriterium: $1\mu V/cm$) steigt die Feldstärke exponentiell mit der Stromdichte. Bei kleineren Stromdichten ist die elektrische Feldstärke jedoch wesentlich höher als eine Extrapolation des vorher erwähnten exponentiellen Verlaufs ergeben würde. Der Verlauf lässt sich im ganzen Bereich sehr befriedigend anpassen, wenn man von einem Modell mit zwei überlagerten Verteilungen der Pinningkraft oder der maximalen, supraleitenden Stromdichte ausgeht. In diesem Modell bestimmt eine statistische Extremwertverteilung auf mikroskopischer Ebene den exponentiellen Anstieg. Eine Verteilung der Zonen mit unterschiedlicher maximaler Stromdichte (verursacht durch unterschiedliche mechanische Belastung bei nach der Reaktion gebogenen A15-Leitern) ist für den Verlauf der elektrischen Feldstärke bei kleinen Stromdichten verantwortlich. Man darf somit vermuten, dass derart empfindliche Messungen der elektrischen Feldstärke in Funktion der Stromdichte Aussagen über die Homogenität und über die Verteilung der mechanischen Belastung von technischen Supraleitern erlauben.

Eine zu Beginn der vorliegenden Arbeit leider noch nicht bekannte Messmethode [96], die Messungen an sehr langen, nur in Achsenrichtung gedehnten Proben in relativ engen Magnetbohrungen zulässt, würde ähnlich empfindliche Messungen der elektrischen Feldstärke zulassen wie bei den eigenen Messungen an den biegebelasteten Bronze-Leitern erreicht wurden. Daraus könnte dann der Einfluss der Dehnung in Achsenrichtung auf die beiden Verteilungen der maximalen Stromdichte ermittelt und die oben erwähnte These weiter untermauert werden, dass alle Dehnungskomponenten gleichzeitig einen Einfluss auf die kritische Stromdichte ausüben. Ausserdem könnten mit solchen Messungen der elektrischen Feldstärke bei einem

Supraleiter nachgewiesen werden, ob verschiedene Phasen vorliegen. Empfindliche Messungen der elektrischen Feldstärke dürften also eine bis jetzt noch nicht genutzte Quelle an Informationen erschliessen und bei der Entwicklung und bei der Anwendung (Überwachung) von A15-Leitern und vielleicht auch anderen Supraleitern eine bedeutende Rolle spielen.