



Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

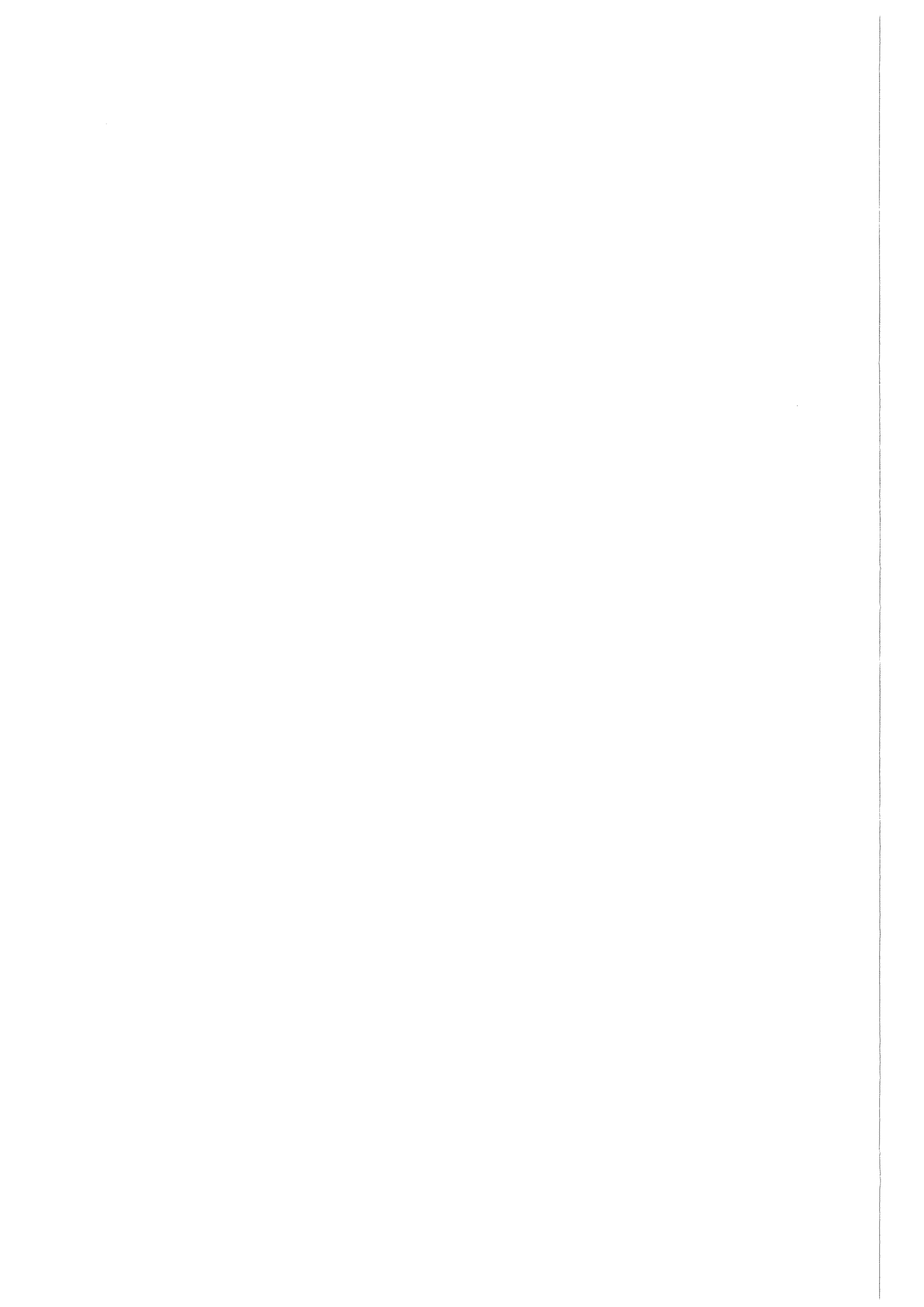
Wissenschaftliche Berichte
FZKA 6360

Ein induktives Verfahren zur Charakterisierung der Stromtragfähigkeit langer Bi-2223 Bandsupraleiter

H.-P. Schiller

Institut für Technische Physik

September 1999



Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 6360

Ein induktives Verfahren zur Charakterisierung der Stromtragfähigkeit langer Bi-2223 Bandsupraleiter*

Heinz-Peter Schiller
Institut für Technische Physik

*Von der Fakultät für Physik der Universität (TH) Karlsruhe
genehmigte Dissertation

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
1999

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

**Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)**

ISSN 0947-8620

Ein induktives Verfahren zur Charakterisierung der Stromtragfähigkeit langer Bi-2223 Bandsupraleiter

Zusammenfassung:

In dieser Arbeit wurde ein induktives und damit berührungsfreies Meßverfahren zur Qualitätskontrolle von filamentisierten Bi-2223 Bandleitern großer Längen untersucht. In einem kontinuierlichen Durchzugsverfahren wurde mit einer einzelnen Hallsonde oder einer Hallsondenkette das Magnetfeld von im Supraleiter induzierten Abschirmströmen bestimmt. Das Magnetfeldprofil entlang des Leiters dient zur Beurteilung der Längshomogenität der Stromtragfähigkeit und zur Lokalisierung von Defekten im Bandleiter, Querprofile machen Aussagen über den Kopplungszustand der Filamente.

Der Magnetfeldverlauf wurden mit der resistiv bestimmten Stromtragfähigkeit entlang des Bandleiters verglichen. Resistive Kontrollmessungen sind an kurzen Bandleiterstücken mit einer maximalen Länge von 0,5 m durchgeführt worden und dienten hauptsächlich zur Beurteilung der Tauglichkeit des induktiven Verfahrens.

Messungen an multifilamentären Bandleitern unterschiedlichen Typs zeigten eine Übereinstimmung des Magnetfeldverlaufes mit dem resistiv ermittelten kritischen Strom, wenn aufgrund der experimentellen Bedingungen (dB/dt) bei der induktiven Messung die Filamente gekoppelt sind. Damit konnte nachgewiesen werden, daß der Magnetfeldverlauf der induzierten Abschirmströme zur Beurteilung der Homogenität der Stromtragfähigkeit herangezogen werden kann.

Angewandt wurde das Verfahren auf Bandleiter größerer Länge (bis 16 m) mit verdrehten und unverdrehten Filamenten. Als typische Defektstrukturen zeigten sich Blasen und Schwankungen der Stromtragfähigkeit, die durch das während der Herstellung der Leiter durchgeführte Walzen verursacht sind.

An inductive method for the characterisation of the critical current of long length Bi-2223 tape superconductors

Abstract:

In this work an inductive contactless method for the quality control of long length filamentary Bi-2223 tape superconductors is investigated. In a continuous process, the magnetic field of induced shielding currents is determined with a single Hall probe or a Hall probe array. The magnetic field along the length of the conductor is used to investigate the length homogeneity of the critical current and to locate defects in the tape, the cross profile gives information about the filament coupling.

The magnetic field along the length of the conductor is compared with the resistively determined critical current. Resistiv measurements on short tape sections with a length up to 0.5 m, are used to demonstrate the suitability of the inductive method.

Measurements on different types of tape conductors show a correspondence between the magnetic field variation along the length and the resistively determined critical current. This proves that the magnetic field of the induced shielding currents is suitable to determine the homogeneity of the critical current, if filaments are coupled due to the experimental conditions (dB/dt).

The method was applied to long tapes (up to 16 m) with twisted and untwisted filaments. The typical defect structures which are observed are bubbles and variations of the critical current, caused by the rolling process during the tape production.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	3
2	GRUNDLAGEN	5
2.1	Einige für Anwendungen relevante Eigenschaften von Hochtemperatursupraleitern	5
2.2	Das „powder-in-tube“ (PIT) –Herstellungsverfahren von Bandsupraleitern	8
2.3	Stromsysteme im Supraleiter	10
2.3.1	Intra-Korn- und Inter-Korn Stromsystem	10
2.3.2	Stromsysteme in Bandleitern mit mehreren Filamenten	13
3	DAS INDUKTIVE MESSPRINZIP	17
4	DIE APPARATUR	21
4.1	Kryostat	22
4.2	Rollensystem	22
4.3	Kupfermagnet	22
4.4	Hallsonden und Bandführung	23
4.5	Meßelektronik	27
4.5.1	Gradientenverfahren.	27
4.5.2	Wechselfeldverfahren	28

5	TRANSPORTSTROMMESSUNGEN	33
5.1	Multikontaktmessungen	33
5.2	Schleifkontaktmessungen	34
5.3	Messungen des Magnetfeldes des Transportstroms	43
6	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	47
6.1	Induktive Messungen an kurzen Bandleitern	47
6.1.1	Induktive Messungen an kurzen Bandleitern mit unverdrillten Filamenten	47
6.1.2	Induktive Messungen an kurzen Bandleitern mit verdrillten Filamenten	57
6.1.3	Zusammenfassung der Ergebnisse an kurzen Bandleitern	62
6.2	Induktive Messungen an langen Bandleitern	63
6.2.1	Induktive Messungen an langen Bandleitern mit unverdrillten Filamenten.	63
6.2.2	Induktive Messungen an langen Bandleitern mit verdrillten Filamenten	70
6.2.3	Die Belastung des Bandleiters durch die Messung	73
6.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse an langen Bandleitern	74
7	ZUSAMMENFASSUNG	77
8	LITERATURVERZEICHNIS	81

1 Einleitung

Das Anwendungspotential der vor nunmehr über 10 Jahren entdeckten Hochtemperatursupraleiter ist sehr vielfältig. Dementsprechend groß sind die Anstrengungen in Forschungseinrichtungen, Universitäten und Industrie, um Produkte aus diesen Materialien bis zur Einsatzreife zu entwickeln. Die Hauptschwerpunkte bilden Entwicklungen für die Energie- und Magnettechnik und die Herstellung supraleitender Bauelemente für elektronische Schaltungen. Anwendungen aus dem erstgenannten Gebiet sind z.B. Energiespeicher (SMES) zum Ausgleich von Netzschwankungen, Energieübertragungskabel, Generatoren, Motoren und Transformatoren sowie Hochfeldmagnete, magnetische Lagerungen und Stromzuführungen. Im zweitgenannten Gebiet sind es Anwendungen im Bereich der Hochfrequenztechnik und Sensorik, z.B. supraleitende Feldeffekttransistoren (SuFET) und Filter bzw. SQUID's.

Die Anforderungen, die in den einzelnen Anwendungsbereichen an das supraleitende Material gestellt werden, sind sehr unterschiedlich. So wendet sich das Interesse im Bereich der Energietechnik auf die Herstellung von supraleitenden Drähten und Bandleitern. Diese Leiter werden z.B. zu Transformatoren oder Energieübertragungskabeln gewickelt. Da eine Verbindung der Anschlußstellen zweier Drähte mit einer Resistivität oder zumindest mit einer Verschlechterung der supraleitenden Eigenschaften verknüpft ist, sollen diese Leiter in möglichst großen Längen im Kilometerbereich gefertigt werden, um solche Verbindungen soweit wie möglich zu vermeiden. Die Drähte müssen zudem noch eine ausreichend große mechanische Stabilität besitzen, damit sie in einem maschinellen Fertigungsprozeß eingesetzt werden können, bzw. den Kräften, welche während ihres Betriebes auftreten, z.B. den Lorentzkräften innerhalb eines Magneten, ohne Degradation ihrer Eigenschaften standhalten. Für supraleitende elektronische Bauelemente werden dagegen großflächige Dünnschichten im Bereich von 3-5 Zoll Durchmesser benötigt. Aus diesen werden mit Hilfe eines Strukturierungsprozesses die entsprechenden Bauelemente gefertigt.

Allen Anwendern gemeinsam ist der Wunsch nach größtmöglicher Homogenität des verwendeten Materials. Der wichtigste Parameter für die Beurteilung eines Supraleiters ist dabei, neben seiner Sprungtemperatur, der kritische Strom I_c (der Strom, bei dem „nennenswerte“ Dissipation einsetzt, üblicherweise definiert über den Strom, bei dem das

elektrisches Feld $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ überschreitet). Lokale, durch Materialdefekte verursachte Schwankungen der Eigenschaften einer Dünnschicht können zur völligen Unbrauchbarkeit des auf ihr strukturierten Bauelements führen.

Defekte in einem Draht, die mit einer Abnahme der kritischen Stromdichte verknüpft sind, führen lokal zu erhöhter Dissipation und können sich durch eine resultierende Temperaturerhöhung negativ auf den Betrieb, z.B. die Stabilität eines Magneten auswirken. Um die Qualität eines Drahtes bzw. Bandleiters zu beurteilen, ist damit ein Verfahren erwünscht, mit dem im Prinzip Leiter beliebiger Länge bezüglich ihrer Stromtragfähigkeit charakterisiert werden können.

Der direkte Weg ist eine resistive Methode zur Bestimmung der kritischen Stromdichte und der Homogenität des Leiters. Sie erfordert ein Kontaktieren des Bandleiters mit Stromzuführungen und Spannungsabgriffen. Dieses Verfahren ist für lange Bandleiter sehr aufwendig und begrenzt das räumliche Auflösungsvermögen, mit dem Defekte erkannt werden können, auf den Abstand der Spannungskontakte. Schleifkontakte zum Spannungsabgriff können eine Alternative sein, bergen aber Kontaktprobleme in sich.

Eleganter sind diesbezüglich berührungsfreie, induktive Verfahren. Bei ihnen wird durch Induktion ein Abschirmstrom innerhalb des zu untersuchenden Leiters erzeugt. Das Magnetfeld, welches aus diesen Abschirmströmen resultiert, wird mit Hilfe eines Spulensystems oder, wie in der vorliegenden Arbeit, mit einer Hallsonde bestimmt. Die Größe dieses Magnetfeldes ist ein Maß für die Stromtragfähigkeit des Supraleiters.

Die Motivation dieser Arbeit war, ein berührungsfreies, induktives Verfahren für die Qualitätskontrolle von aus Hochtemperatursupraleitern hergestellten langen Bandleitern zu untersuchen. Der interessierende Parameter ist dabei der den supraleitenden Transportstrom begrenzende kritische Strom. Der Vergleich des resistiv ermittelten kritischen Stroms mit dem Magnetfeld der induzierten Abschirmströme ist daher unabdingbar und letztlich das entscheidende Kriterium zur Beurteilung des induktiven Verfahrens bezüglich seiner Anwendungstauglichkeit.

2 Grundlagen

2.1 Einige für Anwendungen relevante Eigenschaften von Hochtemperatursupraleitern

Die für Anwendungen wichtigsten Vertreter der Hochtemperatursupraleiter (HTSL) sind die Bi-Verbindungen $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$ (Bi-2212, $T_c \approx 90$ K), $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi-2223, $T_c \approx 110$ K) und die sogenannten 123-Verbindungen ($\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, $T_c \approx 92$ K; $\text{Nd}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, $T_c \approx 96$ K). Die Attraktivität der Materialien ist natürlich in ihrer hohen kritischen Temperatur T_c begründet, bei welcher der Übergang von Normal- zur Supraleitung stattfindet. Sie ermöglicht den Einsatz kostengünstiger Kühlmittel wie flüssigen Stickstoff (LN_2).

Für die technische Anwendung der Materialien ist der kritische Strom I_c entscheidend. Ein äußeres Magnetfeld größer als B_{c1} dringt in Form eines Flußschlauchsystems in diese Typ II Supraleiter ein. Die Stromdichte J im Supraleiter bewirkt eine Lorentzkraft $F = J \times B$ auf die Flußschläuche und führt in einem idealen Supraleiter zu ihrer Bewegung. Entsprechend der Geschwindigkeit v der Flußschläuche tritt ein elektrisches Feld $E = v \times B$ auf und damit Energiedissipation [1]. Die Bewegung der Flußschläuche kann verhindert werden, indem die Flußschläuche an Materialinhomogenitäten verankert werden. Materialinhomogenitäten üben Haftkräfte auf die Flußschläuche aus. Solange die Haftkraft größer als die Lorentzkraft ist, bleiben die Flußschläuche verankert. Oberhalb der kritischen Stromdichte J_c übersteigt die Lorentzkraft die Verankerungskraft. Die Flußschläuche reißen sich los, und es entsteht ein elektrisches Feld. Aufgrund von thermischer Aktivierung können die Flußschläuche auch schon unterhalb der kritischen Stromdichte das Verankerungspotential der Haftzentren überwinden [1]. Die thermische Aktivierung führt zum Flußkriechen und damit auch schon unterhalb der kritischen Stromdichte zum Auftreten eines elektrischen Feldes. Die hohe thermische Energie, die bei einer angestrebten Betriebstemperatur der HTSL von 77 K vorliegt, ist dadurch mit verstärktem Flußkriechen verbunden. Der Übergang von $J < J_c$ zu $J > J_c$ zeigt sich dann nicht mehr durch das abrupte Auftreten eines elektrischen Feldes, sondern es findet auch schon unterhalb von J_c ein Anwachsen des elektrischen Feldes mit zunehmender Stromdichte statt.

Durch Einbringen von Materialdefekten wird die kritische Stromdichte J_c erhöht. Das Einbringen von geeigneten Materialdefekten in HTSL gestaltet sich aufgrund der kleinen Kohärenzlänge weitaus schwieriger als in konventionellen Supraleitern. Wirken Korngrenzen in Tieftemperatursupraleitern wie Nb_3Sn als Verankerungszentren [2], so haben sie in HTSL einen negativen Effekt auf die Transporteigenschaften. Die Korngrenze in Verbindung mit der kleinen Kohärenzlänge, die liegt in der Größenordnung der Gitterkonstanten, führt in den HTSL zu einer schwachen Kopplung supraleitender Bereiche und zeigt das Verhalten eines Josephson-Kontaktes (weak-link) [3]. Die Stromtragfähigkeit ist reduziert, und eine starke Abhängigkeit von Magnetfeldern tritt auf. Genaue Untersuchungen der Eigenschaften von Korngrenzen an auf bikristallinen Substraten hergestellten HTSL-Schichten zeigen, daß sich eine exponentielle Abnahme der Stromtragfähigkeit vom Fehlorientierungswinkel der benachbarten Körner ergibt [4]. Diese Eigenschaft der Korngrenzen hat große Auswirkungen auf den Fertigungsprozeß der Materialien. Die Bildung von Korngrenzen muß vermieden werden, oder die Körner müssen eine möglichst gute Textur aufweisen (Kleinwinkel-Korngrenzen). Da Einkristalle typische Abmessungen im Bereich einiger Millimeter bis Zentimeter haben und somit für die meisten Anwendungen zu klein sind, können Korngrenzen nicht vermieden werden. Wünschenswert ist daher eine möglichst gute Texturierung der Körner zu erzielen. Ein in dieser Beziehung erfolgreiches Verfahren ist die Schmelztexturierung, wie sie z.B. zur Herstellung von Massivsupraleitern aus $Y_1Ba_2Cu_3O_x$ und $Nd_1Ba_2Cu_3O_x$ angewandt wird [5,6]. Zur Herstellung der in dieser Arbeit untersuchten Bi-2223 Bandleitern erweist sich das sogenannte „powder-in-tube“-Verfahren als erfolgreich [7,8], das im nächsten Unterkapitel näher erläutert wird.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist das Irreversibilitätsfeld B_{irr} . Oberhalb dieses Magnetfeldes verschwindet die kritische Stromdichte. Es liegt zwar bei Temperaturen von 4,2 K über den Feldern, die mit konventionellen Supraleitern wie NbTi, Nb_3Sn oder Nb_3Al erreicht werden können [9], doch aufgrund der ausgeprägten Temperaturabhängigkeit dieser Größe ist die Verwendung der HTSL bei 77 K in äußeren

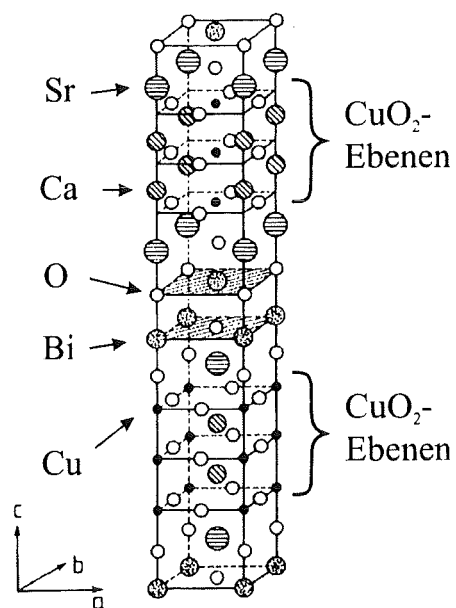


Abb. 1: Elementarzelle der $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ Verbindung

Magnetfeldern beschränkt. Speziell in der hier untersuchten Bi-2223 Verbindung bleibt eine Anwendung mit Kühlung durch LN₂ (77 K) auf das Eigenfeld bzw. auf Felder kleiner als 0,3 T beschränkt, trotz der recht hohen kritischen Temperatur von 110 K [8]. Die Ursache der drastischen Abnahme des Irreversibilitätsfeldes mit zunehmender Temperatur ist der Anisotropie bzw. der Schichtstruktur der Materialien zuzuschreiben. Abbildung 1 zeigt die Elementarzelle der Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀-Verbindung. Für die Supraleitung in den HTSL sind die CuO₂ Ebenen entscheidend. In den Ebenen kondensieren die supraleitenden Ladungsträger. Im Fall der Bi-2223 Verbindung bilden drei dicht beieinander liegende Ebenen einen Stapel (Drei-Schichter). Sie sind durch Ebenen, gebildet aus BiO und SrO, über einen größeren Abstand getrennt. Der Abstand der Stapel (ca. 12 Å) ist im Vergleich zur Kohärenzlänge ($\xi_c < 1 \text{ Å}$; Abschätzung auf der Grundlage der für Bi-Verbindungen typischen Werte von $\xi_{ab} \approx 20 \text{ Å}$ und $\gamma = \xi_{ab}/\xi_c \approx 150$ [10]) so groß, daß nur eine schwache Kopplung zwischen ihnen resultiert [11]. Die schwache Kopplung verändert die Eigenschaften des Flußschlauchsystems, das durch ein äußeres Magnetfeld erzeugt wird. Die Flußschläuche sind nicht mehr in Richtung des Magnetfeldes als kontinuierliche Objekte anzusehen, sondern werden aus scheibenförmigen Flußwirbeln (sogenannte „pancake vortices“) aufgebaut [12]. Ein solcher Flußwirbel läßt sich sehr leicht aus dem Verbund der anderen Flußwirbel auslenken. Die thermische Bewegung der Flußwirbel ist erhöht und führt schon weit unterhalb der kritischen Temperatur zu ihrer völligen Entkopplung und zum Schmelzen des Flußwirbelsystems [11,13]. Dabei verschwindet die kritischen Stromdichte und ein niedriges Irreversibilitätsfeld resultiert.

Aus anwendungsbezogener Sicht sind damit Materialien interessant, die sich durch eine geringe Anisotropie auszeichnen. Hierbei nimmt das Y₁Ba₂Cu₃O_x eine Sonderstellung aufgrund seiner im Vergleich zu anderen HTSL geringeren Anisotropie ein. Die Herstellung von Drähten und Bandleitern aus diesem Material scheiterte bisher jedoch an den mangelhaften Eigenschaften der Korngrenzen (Textur und Verunreinigungen) in solchen Leitern [14]. Zur Überwindung dieses Korngrenzenproblems werden Herstellungsverfahren aus der Dünnschicht-Technik angewendet. Bei ihnen soll in einem kontinuierlichen Prozeß eine HTSL-Dünnschicht auf eine Metallfolie aufgebracht werden. Die für die Transporteigenschaften wichtige Textur des aufgetragenen Supraleiters wird dabei durch eine texturierte, auf das Metallband aufgetragene Pufferschicht auf den Supraleiter übertragen (IBAD) [15] oder soll durch die während des Walzprozesses induzierte Textur des Metallsubstrates (RABiTS) [16] erfolgen. Diese Entwicklung befindet sich momentan noch in

den Anfangsstadien. Derzeit stehen nur Bi-2212 und Bi-2223 Leiter, hergestellt mit dem „powder-in-tube“-Verfahren, in den für Anwendungen ausreichenden Längen zur Verfügung. Die Bi-2212 Phase ist metallurgischer Vorläufer bei der Bi-2223 Herstellung. Sie eignet sich gut zur Draht- und Bandleiterherstellung, ist jedoch wegen ihres niedrigen T_c ($\sim 80\text{ K}-90\text{ K}$) nur für den Einsatz bei tiefen Temperaturen anwendbar.

2.2 Das „powder-in-tube“ (PIT) –Herstellungsverfahren von Bandsupraleitern

Die HTSL zeichnen sich durch eine große Sprödigkeit aus. Zur Herstellung von Drähten oder Bandleitern müssen daher Verfahren angewandt werden, die den empfindlichen Supraleiter mechanisch unterstützen. Im „powder-in-tube“-Verfahren [7,8] wird dies erreicht, indem der Supraleiter von einer metallischen Hülle umgeben wird. Sie übernimmt (teilweise) die auftretenden mechanischen Belastungen und schützt den Supraleiter vor sonst schon bei geringer Belastung auftretender Ribildung. Die metallische Hülle ist üblicherweise aus Silber, da sich dieses Metall sehr inert bei der Bildung des Supraleiters verhält und eine für die Phasenbildung nötige O_2 -Durchlässigkeit besitzt [17]. Um die mechanische Belastbarkeit zu erhöhen, werden auch durch Dispersionshärtung verstärkte Hüllen aus einer Ag-Legierung, z.B. AgMg, verwendet [18].

Abbildung 2 zeigt den Prozessverlauf zur Herstellung der Bandleiter.

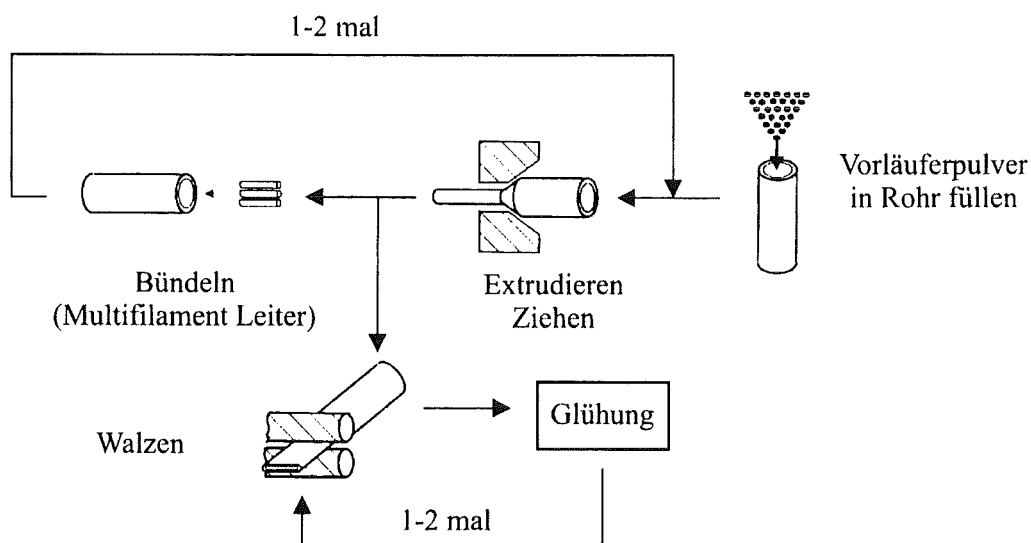


Abb. 2: Prozessverlauf beim „powder-in-tube“-Verfahren [19]

Ein Vorläuferpulver in der entsprechenden stöchiometrischen Zusammensetzung der Bi-2223 Phase wird dabei in eine Rohr gefüllt. Hergestellt wird nicht die reine Bi-2223 Phase, sondern ein durch Pb stabilisiertes BiPb-2223 System. Das Pulver besteht üblicherweise aus Bi-2212, Ca_2PbO_4 und CuO [7].

Gewonnen wird das Vorläuferpulver aus einer Mischung von Bi_2O_3 -, PbO-, SrCO_3 -, CaCO_3 - und CuO-Pulvern. Diesem entzieht man in einem Kalzinierungsschritt den Kohlenstoff. Das mit dem Vorläuferpulver gefüllte Rohr wird verschlossen und durch anschließende Verformungsschritte wie Extrudieren, Ziehen und Walzen auf den gewünschten bandförmigen Querschnitt geformt. Erst jetzt erfolgt in einem thermomechanischen Prozeß die Phasenbildung des Supraleiters.

Der Walzprozeß zur Formung des bandförmigen Querschnittes führt zu einer Textur der plättchenförmigen Bi-2212 Körner des Vorläuferpulvers. Diese Textur überträgt sich auf die gebildete BiPb-2223 Phase und ist, wie sich gezeigt hat, Bedingung für eine hohe Stromtragfähigkeit [20].

Der thermomechanische Prozeß besteht aus mehreren aufeinanderfolgenden Glüh- und Walzprozessen. Die zwischen den Glühprozessen durchgeführten Walzprozesse sorgen dabei für eine Verdichtung des Supraleiters und bewirken eine weitere Texturierung der BiPb-2223 Körner [21]. Aus der Verdichtung des Supraleiters resultiert eine bessere Verbindung der Körner untereinander, die mit einer höheren Stromtragfähigkeit verbunden ist. Typischerweise werden ein bis zwei Walzprozesse zwischen den Glühungen durchgeführt. Die Glühungen erfolgen in Luft oder einem Ar- O_2 -Gemisch bei ca. 820 °C bis 850 °C und dauern ca. 100 h. Durch Bündeln einzelner Leiter zwischen den Verformungsschritten können multifilamentäre Bandleiter hergestellt werden. Abbildung 3 zeigt einen für diese Arbeit typischen Bandleiter. Er ist aus 55 Filamenten aufgebaut, ist 3,7 mm breit und hat eine Dicke von 0,27 mm. Der Anteil des Supraleiters an der gesamten Fläche beträgt ca. 26 %.



Abb. 3: Schliffbild der Querschnittsfläche eines 55 filamentären Bandsupraleiters, Breite = 3,7 mm, Dicke = 0,27 mm

2.3 Stromsysteme im Supraleiter

2.3.1 Intra-Korn- und Inter-Korn Stromsystem

In dieser Arbeit soll aus dem von Abschirmströmen hervorgerufenen magnetischen Feld auf die den Transportstrom begrenzende Stromtragfähigkeit geschlossen werden. Die Abschirmströme werden im Supraleiter durch ein sich änderndes äußeres Magnetfeld induziert. Um aus dem Magnetfeld oder dem magnetischen Moment auf die Stromtragfähigkeit zu schließen, muß das induktiv erzeugte Abschirmstromsystem mit dem durch eine äußere Stromquelle aufgeprägten Transportstromsystem vergleichbar sein. Die in Bi-2223 Bandleitern vorliegenden Materialinhomogenitäten, wie Korngrenzen, Fremdphasen, Risse etc., können die Stromsysteme auf unterschiedlichste Weise beeinflussen.

Von besonderer Bedeutung sind die Korngrenzen. Sie können zu einem granularen Verhalten des Supraleiters führen. Granularität bedeutet, daß nicht von einem einheitlichen, den Supraleiter durchsetzenden Stromsystem ausgegangen werden kann. Vielmehr sind zwei Stromsysteme zu betrachten, ein über die Korngrenzen fließender Strom, der zur Ausbildung eines Inter-Korn-Stromsystem führt und ein innerhalb der Körner vorhandenes Intra-Korn-Stromsystem [22]. Für die Beurteilung der Transportstromeigenschaften und der resistiv ermittelten kritischen Stromdichte ist der über die Körner fließende Strom und damit das Inter-Korn-Stromsystem maßgebend. Zum durch Abschirmströme erzeugten Magnetfeld des Supraleiters tragen jedoch beide Stromsysteme bei. Der zusätzliche Beitrag des Intra-Korn-Stromsystems zum Magnetfeld des Supraleiters läßt erwarten, daß aus induktiven Messungen nicht mehr direkt auf Transportstromeigenschaften geschlossen werden kann.

Das granulare Verhalten eines Supraleiters ist durch das Verhältnis der Stromtragfähigkeiten von Inter-Korn-Strom zu Intra-Korn-Strom bestimmt. Beide Stromtragfähigkeiten haben verschiedene Ursachen:

- Der Strom innerhalb der Körner (Intra-Korn-Strom) wird durch das Flußverankerungsverhalten innerhalb der Körner limitiert.
- Der Strom zwischen den Körnern (Inter-Korn-Strom) wird durch das Kopplungsverhalten der Körner limitiert.

Die unterschiedliche Temperatur- und Magnetfeldabhängigkeit der auf unterschiedlichen Mechanismen basierenden Stromtragfähigkeiten führt dazu, daß nicht in allen Temperatur-

und Magnetfeldbereichen mit dem gleichen Stromsystem als dem dominierenden zu rechnen ist [22].

Vergleicht man den induktiv erzeugten Abschirmstrom mit einem Transportstrom, wird die Bedeutung beider Stromtragfähigkeiten deutlich:

- Ist die Stromtragfähigkeit der Kornverbindungen gering, zeigt der Supraleiter granulares Verhalten. Ein induktiv erzeugter Abschirmstrom fließt nicht homogen über den ganzen Supraleiter. Die Abschirmströme im Supraleiter sind hauptsächlich auf die Körner oder auf kleine Inseln, gebildet aus mehreren stark gekoppelten Körner, beschränkt. Das magnetische Moment und das Magnetfeld sind weitgehend durch das Intra-Korn-Stromsystem bestimmt. Ein Transportstrom muß dagegen den ganzen Supraleiter durchlaufen und über die Kornverbindungen fließen können (Inter-Korn-Strom). Soll das magnetische Moment oder das Magnetfeld zur Beurteilung der Stromtragfähigkeit herangezogen werden, führt dies zu einer Diskrepanz mit der aus Transportstrommessungen bestimmten Stromtragfähigkeit.

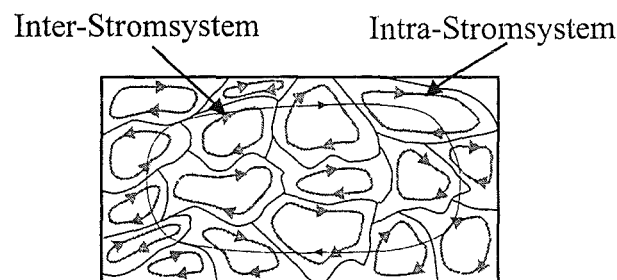


Abb. 4: Stark ausgeprägtes granulares Verhalten

- Ist die Stromtragfähigkeit der Korngrenzen groß, zeigt der Supraleiter keine bzw. nur geringe Granularität. In diesem Fall liegt eine starke Vernetzung der Körner untereinander vor. Das Abschirmstromsystem kann das ganze Volumen durchsetzen. Abschirmstromsystem und Transportstromsystem werden vergleichbar.

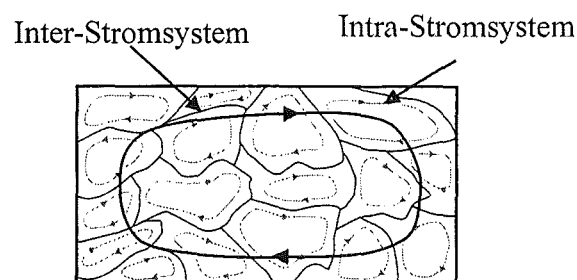


Abb. 5: Schwach ausgeprägtes granulares Verhalten

Ein möglichst schwach ausgeprägtes granulares Verhalten ist somit eine Bedingung, um aus einem induktiven Experiment direkt Aussagen über den Transportstrom zu erhalten. Der über die Körner fließende Strom (Inter-Korn-Stromsystem) muß auf das Magnetfeld oder die Magnetisierung den bestimmenden Einfluß haben. Der Beitrag des Intra-Korn-Stromsystems zum Magnetfeld muß möglichst vernachlässigbar sein.

Die Bedeutung des Inter-Korn- und Intra-Korn-Stromsystems auf das von Bi-2223 Bandleitern erzeugte Magnetfeld wurde eingehend von Paasi et al. [23] und Koblischka et al. [24] untersucht. Paasi et al. untersuchten Bandleiter verschiedener Qualität, die sich in unterschiedlichen kritischen Strömen ausdrückt. Bei Bandleitern mit geringer Stromtragfähigkeit stellten sie unterhalb von 60 K den zusätzlichen Beitrag des Intra-Korn-Stromsystems auf das Magnetfeld des Supraleiters fest. Bei 77 K beobachteten sie, daß der Beitrag des Intra-Korn-Stromsystems auf das Magnetfeld der induzierten Abschirmströme zu vernachlässigen ist. In Bandleitern mit höherer Stromtragfähigkeit wird das Magnetfeld der Leiter im gesamten Temperaturbereich vom Inter-Korn-Stromsystem bestimmt [23]. Koblischka et al. [24] führten magnetooptische Untersuchungen an monofilamentären Bi-2223 Bandleitern in Abhängigkeit von der Temperatur durch. Aus ihren Untersuchungen ergab sich, daß unterhalb von 50 K die Stromtragfähigkeit des Intra-Korn-Stromsystems größer wird als die des Inter-Korn-Stromsystems. Dies führt mit sinkender Temperatur zu einem zunehmenden granularen Verhalten des Supraleiters [24].

Hieraus kann für diese Arbeit der wichtige Schluß gezogen werden, daß in induktiven Messungen an Bi-2223 Bandleitern bei 77 K das Magnetfeld der induzierten Abschirmströme hauptsächlich durch das Inter-Korn-Stromsystem verursacht ist, also gerade durch das Stromsystem, das auch für Transportstrommessungen entscheidend ist.

Die Feldabhängigkeit des Inter-Korn-Stromes war Gegenstand mehrerer Untersuchungen. So zeigten magnetooptisch aufgezeichnete Flußstrukturen von monofilamentären Bi-2223 Bandleitern eine mit zunehmendem Magnetfeld inhomogeneres Stromsystem [25].

Auch Dhalle et al. [26] stellten in monofilamentären Bi-2223 Bandleitern ein mit zunehmendem Magnetfeld inhomogeneres Stromsystems fest. Durchsetzt der Abschirmstrom bei kleinen Magnetfeldern noch den ganzen Supraleiter, so findet bei höheren Magnetfeldern eine Änderung des Stromsystems in immer kleiner werdende Kreisströme statt. Die Ursache für dieses Verhalten liegt in der unterschiedlichen Kopplung der Körner. Nicht alle Kornverbindungen sind gleich, es muß vielmehr von einer feldabhängigen Verteilung der Kopplungsstärke zwischen den Körnern ausgegangen werden. Mit zunehmendem Magnetfeld

fallen die als schwache Brücken wirkenden Kornverbindungen (weak-links) für den Stromtransport aus. Dieser Prozeß führt so weit, bis nur noch ein Gerüst von stark gekoppelten Körnern den Supraleiter durchzieht. Dieses Gerüst aus stark gekoppelten Kornverbindungen (strong-links) bildet dann den Strompfad für den Transportstrom und wird durch eine weitere Erhöhung des Magnetfeldes nicht weiter aufgebrochen.

Wird der Transportstrom durch ein Gerüst aus starken Brücken getragen, dann ist auch hier zwischen resistiven und induktiven Messungen ein Unterschied zu erwarten. Der Transportstrom kann in diesem Fall entlang Pfaden verlaufen, welche den Supraleiter durchziehen. Da diese Pfade nicht unbedingt miteinander vernetzt sein müssen, kann der induktiv erzeugte Abschirmstrom davon nicht profitieren. Es kann sich kein geschlossenes Abschirmstromsystem ausbilden, welches das Volumen des Supraleiters einschließt.

Um aus induktiven Messungen Aussagen über den Transportstrom zu erhalten, muß eine zu starke Fragmentierung des Stromsystems durch das Magnetfeld verhindert werden. Die Messungen sollten daher in nicht zu großen äußeren Magnetfeldern durchgeführt werden.

2.3.2 Stromsysteme in Bandleitern mit mehreren Filamenten

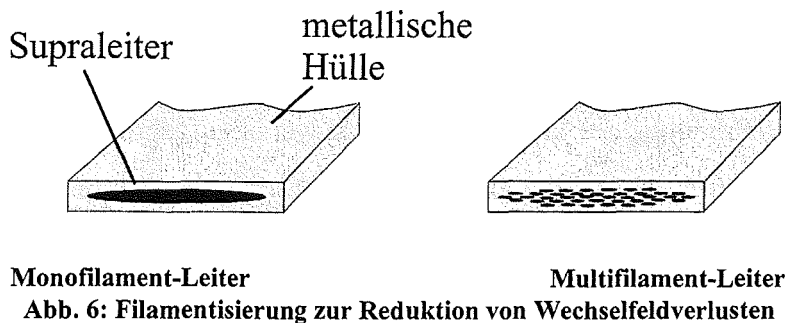
Für Anwendungen in der Energietechnik müssen die Wechselfeldeigenschaften des Supraleiters berücksichtigt werden. Der Supraleiter transportiert in diesem Anwendungsfall einen Wechselstrom und ist dabei, z.B. in einem Transformator, auch einem äußeren Wechselfeld von typischerweise 50 Hz ausgesetzt.

Das Wechselfeld bewirkt eine ständige Ummagnetisierung des Supraleiters. Die durch die Ummagnetisierung verursachte Flußbewegung innerhalb des Supraleiters führt zu Energiedissipation, den sogenannten Hystereseverlusten. Pro Zyklus ist die dissipierte Energie durch die von der Magnetisierungskurve eingeschlossene Fläche gegeben [27]:

$$W = \mu_0 \oint M dH \quad \text{Gl. 1}$$

Die Wechselfeldverluste können verringert werden, indem die Magnetisierung des Supraleiters verringert wird. Die Magnetisierung ist proportional zur kritischen Stromdichte J_c und einem Faktor der durch die Geometrie des Supraleiters bestimmt ist. Für Drähte sind z.B. die Hystereseverluste pro Zyklus und Volumeneinheit proportional zum Drahtdurchmesser [28]. Durch Verkleinerung der Abmessungen des Supraleiters wird der Geometriefaktor reduziert. Die Magnetisierung eines Bandleiters wird daher durch Aufteilung des Supraleiters

in feine Filamente verkleinert (Abb. 6). Entsprechend Gl. 1 sind dann auch geringere Wechselfeldverluste zu erwarten.



Der Supraleiter kann aber hinsichtlich seiner Hystereseverluste nur von der Filamentisierung profitieren, solange die Filamente als unabhängig voneinander anzusehen sind. Die supraleitenden Filamente sind in einer metallischen, leitfähigen Matrix eingebettet. Die zwischen den Filamenten auftretende Änderung des magnetischen Flusses induziert Ströme. Die Stromsysteme der Filamente sind nicht mehr unabhängig voneinander, sondern durch diese Ströme gekoppelt. Anhand eines vereinfachten Modells (Abb. 7) läßt sich der Einfluß dieser Kopplungsströme verdeutlichen.

In diesem Modell werden die supraleitenden Filamente durch zwei Scheiben beschrieben, die parallel zum äußeren Magnetfeld ausgerichtet sind [19]. Die durch die Flußänderung zwischen den Filamenten induzierte Umlaufspannung fällt allein über der metallischen Matrix ab. Für das elektrische Feld in der metallischen Matrix ergibt sich die Beziehung:

$$E(x) = -x \cdot w \cdot \dot{B}_z \tag{Gl. 2}$$

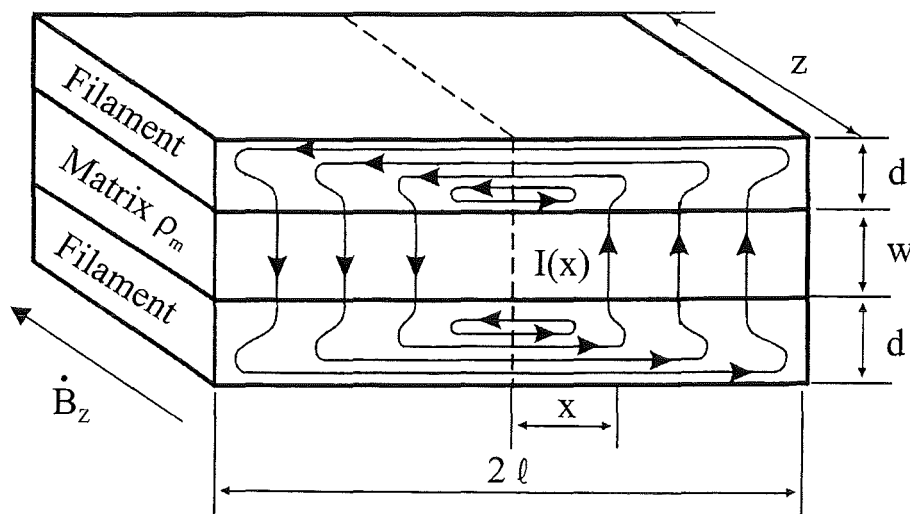


Abb. 7: Kopplungsströme zwischen den Filamenten [19]

Den zwischen den Filamenten fließende Gesamtstrom erhält man durch Integration der Stromdichte über die Querschnittsfläche der metallischen Matrix:

$$I = \int_0^1 \frac{E(x)}{\rho_m} \cdot z \cdot dx = -\frac{\dot{B}_z \cdot \ell^2}{2 \cdot \rho_m} \cdot z \quad \text{Gl. 3}$$

Ist der Strom, der über die Matrix fließt, sehr klein im Vergleich zum kritischen Strom der Filamente, dann sind die Stromsysteme innerhalb der Filamente unbeeinflusst. Die Filamente sind voneinander unabhängig. Es liegt in jedem ein in sich abgeschlossenes Stromsystem vor. Wird der Strom über die Matrix im Grenzfall gleich dem kritischen Strom, findet eine Kopplung der Stromsysteme statt. Innerhalb der Filamente bilden sich keine abgeschlossenen Stromsysteme aus, sondern es liegt ein einheitliches, beide Filamente erfassendes Stromsystem vor, das über die metallische Matrix geschlossen wird. Der Supraleiter kann von der Filamentisierung nicht profitieren. Das Stromsystem ist dem eines monofilamentären Leiters vergleichbar. Aus der Bedingung für vollständige Kopplung $I = I_c$ erhält man die Beziehung:

$$I_c = J_c \cdot d \cdot z = I = -\frac{\dot{B}_z \cdot \ell_c^2}{2 \cdot \rho_m} \cdot z \quad \text{Gl. 4}$$

$$\ell_c^2 = \frac{2 \cdot \rho_m \cdot J_c \cdot d}{\dot{B}_z}$$

Aus Gl. 4 ist abzulesen, daß für jeden Supraleiter eine kritische Länge ℓ_c existiert, oberhalb derer die Filamente vollständig gekoppelt sind. Jeder Bandleiter, der diese Länge überschreitet, verhält sich wie ein monofilamentärer, kompakter Bandleiter. Die Filamentisierung ist unwirksam. Damit lange Bandleiter trotzdem von der Filamentisierung profitieren können, werden die Filamente verdrillt (getwistet) (Abb. 8).

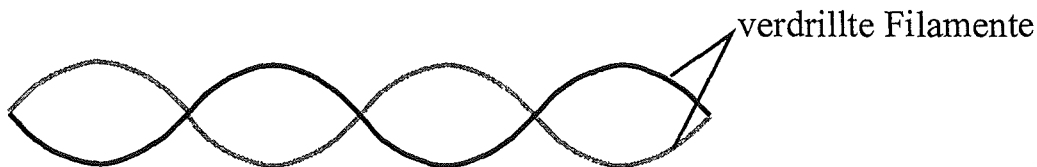


Abb. 8: Verdrillung der Filamente zur Reduktion von Wechselfeldverlusten

Die Fläche, die zwischen den Filamenten eingeschlossen ist, wird dadurch verringert. Innerhalb einer Periode hebt sich die Wirkung des magnetischen Flusses auf. Die induzierte Spannung zwischen den Filamenten wird verkleinert.

Ist die Verdrillungslänge deutlich kleiner als die Kopplungslänge ℓ_c , dann sind die in der Matrix induzierten Abschirmströme zu klein, um eine Kopplung der Filamente zu bewirken. Die Filamente können als unabhängig voneinander betrachtet werden.

Die Bedeutung dieser Stromsysteme für die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen wird in den entsprechenden Abschnitten näher erläutert.

3 Das induktive Messprinzip

Zur berührungsfreien Charakterisierung eines Supraleiters sind induktive Verfahren weit verbreitet. Bei ihnen wird durch ein sich änderndes äußeres Magnetfeld ein Abschirmstrom im Supraleiter induziert. Entsprechend dem Modell des kritischen Zustandes fließen diese Abschirmströme mit der kritischen Stromdichte J_c [29]. Die Abschirmströme erzeugen ein Magnetfeld. Das durch die Abschirmströme verursachte Magnetfeld kann auf vielfältige Weise bestimmt werden. Die am häufigsten durchgeführten Methoden zur Bestimmung des Magnetfeldes sind magnetooptische Meßverfahren [30] und die in dieser Arbeit angewandte einfachere Methode der Feldbestimmung durch Hallsonden [31]. Der Zusammenhang zwischen der Stromdichte J im Supraleiter und dem Magnetfeld der Abschirmströme B_s ist durch das Gesetz von Biot-Savart gegeben:

$$\vec{B}_s(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{J}(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} d^3r' \quad \text{Gl. 5}$$

Mit einer Hallsonde wird nur eine Komponente des Feldes bestimmt, üblicherweise die Komponente, die senkrecht auf der breiten Seite und der Länge des Bandleiters steht.

Mit Hilfe des Gesetzes von Biot-Savart kann bei Kenntnis der Geometrie des Stromsystems aus der Magnetfeldverteilung auf die Stromdichte innerhalb des Supraleiters geschlossen werden. Im Fall einer von vornherein bekannten Stromverteilung, wie bei einer Scheibe oder einem Ring, ergibt sich eine einfache Beziehung (Proportionalität) zwischen Stromdichte und Magnetfeld. Nicht immer kann allerdings von einer bekannten Geometrie der Stromverteilung ausgegangen werden. Ist mit einem granularen Verhalten (siehe Kap. 2.3.1) des Supraleiters zu rechnen oder werden wie in dieser Arbeit multifilamentäre Bandleiter (siehe Kap. 2.3.2) betrachtet, dann ist es nicht von vornherein möglich, das Stromsystem als bekannt vorauszusetzen. In welchem Zusammenhang das Magnetfeld des Bandleiters mit der Stromtragfähigkeit steht, läßt sich daher in solchen Fällen am sichersten durch vergleichende Transportstrommessungen feststellen.

Die Messung des Magnetfeldes der induzierten Abschirmströme erfolgt mit einer meßtechnisch bedingten Ortsauflösung. Wird die Hallsonde über den zu untersuchenden Supraleiter geführt, erhält man eine räumliche Verteilung des Magnetfeldes der induzierten Abschirmströme. Die Variation des Magnetfeldes über dem Supraleiter in Längs- und

Querrichtung soll über lokale Schwankungen der Stromtragfähigkeit Aufschluß geben und helfen, diese zu lokalisieren.

Lahtinen et al. [32] berechneten den Einfluß von Defekten auf den Verlauf des Magnetfeldes der induzierten Abschirmströme entlang des Bandleiters. Die an Defekten auftretende Änderung des Stromsystems führt zu Einbrüchen des Magnetfeldes. Die Defekte lassen sich damit durch die Messung des Magnetfeldes der Abschirmströme lokalisieren. Die Autoren führten Messungen des Magnetfeldverlaufs durch und korrelierten sie mit der durch Elektronenmikroskopie beobachteten Mikrostruktur des Bandleiters.

Messungen wie die von Lahtinen et al. [32] oder in vergleichbarer Weise auch von Kawano et al. [33,34] werden an Bandleitern von einigen Zentimetern Länge ausgeführt. Dabei wird die Hallsonde über den ruhenden Leiter bewegt.

Die in dieser Arbeit untersuchten Leiter sind Bi-2223 Bandleiter von mehreren Metern Länge. Es bietet sich daher an, nicht die Hallsonde zu bewegen, sondern den Leiter in geringem Abstand an der Hallsonde, oder an einer Anordnung von mehreren Hallsonden, vorbeizuziehen, um kontinuierlich das Magnetfeld der induzierten Abschirmströme in Richtung der Länge des Bandleiters zu bestimmen. Der Hauptunterschied zu den üblichen mit Hallsonden durchgeführten induktiven Meßverfahren besteht daher in der Verwendung eines solchen Durchzugsverfahrens, mit dem es im Prinzip möglich ist, beliebig lange Bandleiter kontinuierlich zu untersuchen. Bevor der Leiter an der Hallsonde vorbeigezogen wird, muß in ihm ein Stromsystem erzeugt, muß er also aufmagnetisiert werden. Hierzu bieten sich zwei Verfahren an (Abb. 9):

- Der Leiter wird in einem inhomogenen Magnetfeld bewegt. Die Feldänderung, die von dem Leiter registriert wird, hängt von seiner Geschwindigkeit v und von der Inhomogenität $dB_{\text{ext}}/dx_{\text{Magnet}}$ des zeitunabhängigen äußeren Feldes ab: Dieses Verfahren wird im folgenden als Gradientenverfahren bezeichnet

$$\frac{dB}{dt} = v \cdot \frac{dB_{\text{ext}}}{dx_{\text{Magnet}}} \quad \text{Gl. 6}$$

- Der Leiter wird einer zeitlichen Änderung des äußeren Magnetfeldes ausgesetzt, im folgenden als Wechselfeldverfahren bezeichnet.

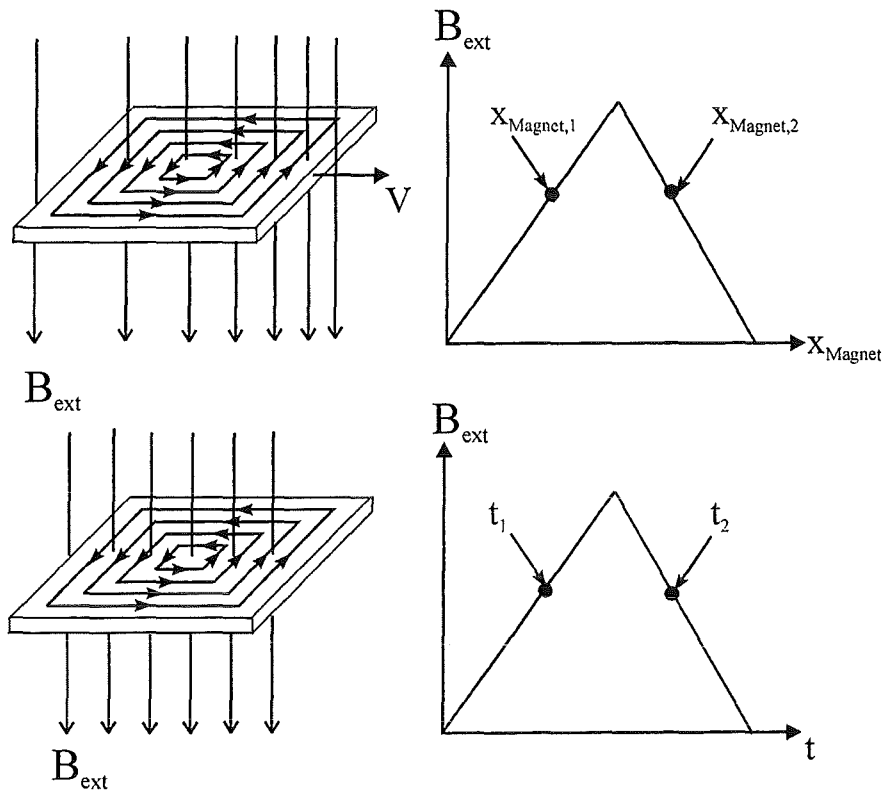


Abb. 9: Auf- und Abmagnetisieren des Supraleiters
 oben: durch Bewegung in einem inhomogenen Magnetfeld
 unten: durch ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld

Ist der Leiter einem Feldverlauf, wie er in Abb. 9 skizziert ist, ausgesetzt, dann durchläuft die Magnetisierung bzw. das Magnetfeld der induzierten Abschirmströme eine Hysterese, wobei der Parameter der Hystereseschleife im ersten Fall der Ort des Leiters im inhomogenen Magnetfeld und im zweiten Fall die Zeit ist (Abb. 10).

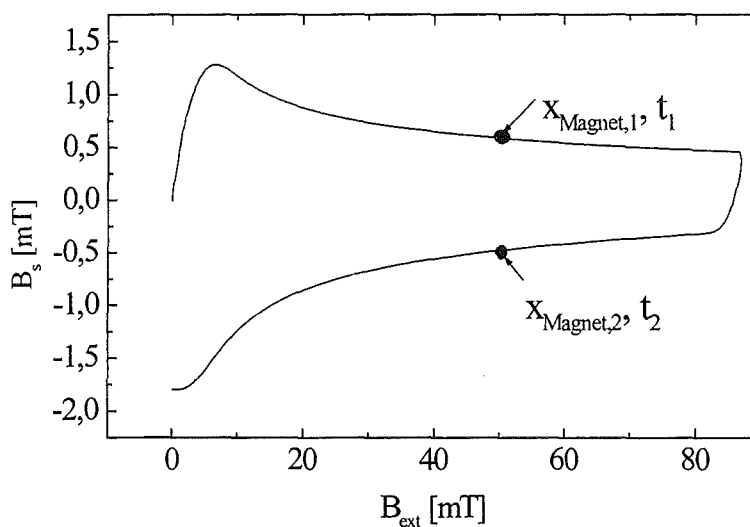


Abb. 10: Hysterese des Magnetfeldes der induzierten Abschirmströme

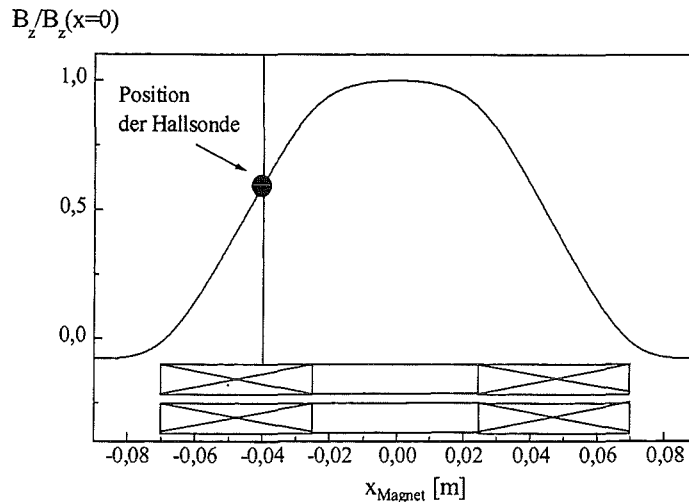


Abb. 11: Feldkonfiguration in der Mittelebene (Spalt) des Magneten

Ein inhomogenes Magnetfeld mit einem nahezu konstanten Gradienten kann sehr einfach realisiert werden. Der Feldverlauf im Spalt zweier übereinander gelegter Spulen („split-coil“-Anordnung, Abb. 11) zeigt zwischen den Wickelungen des Magneten einen nahezu konstanten Gradienten. Wird die Position der Hallsonde zwischen den Wickelungen gewählt, erfährt der Bandleiter, während er über die Hallsonde gezogen wird, eine konstante Feldänderung dB/dt . Die Messung des im Bandleiter induzierten Magnetfeldes mit einer im konstanten Feldgradienten positionierten Hallsonde erfolgt entsprechend dem Induktionsgesetz $E \propto dB/dt = dB/dx_{\text{Magnet}} \cdot v$ bei konstantem elektrischen Feld, das über die Durchzugsgeschwindigkeit v des Bandleiters verändert werden kann.

Wird die Spule hingegen nicht mit konstantem Strom betrieben, sondern das von ihr erzeugte Feld periodisch geändert (Wechselfeldverfahren), so ist die Feldänderung dB/dt durch die Frequenz $\omega/(2\pi)$ und die Amplitude des Feldhubes B_{max} bestimmt. Ist die Bandgeschwindigkeit gering genug oder die Frequenz entsprechend hoch, kann während einer Periode der Bandleiter als ruhend angesehen werden. Somit lässt sich auch mit dieser Methode eine kontinuierliche Messung des Magnetfeldes bzw. der ganzen Hystereseurve entlang des Bandleiters durchführen. Die Feldänderung dB/dt liegt bei geeignet gewählter Frequenz höher als im erst genannten Fall. Dadurch werden höhere elektrische Felder $E \propto dB/dt \sim \omega \cdot B_{\text{max}}$, als mit der ersten Methode (Gradientenverfahren) erreicht.

4 Die Apparatur

Der Versuchsaufbau zur Durchführung der induktiven Messungen ist in Abb. 12 dargestellt.

Er besteht aus folgenden Komponenten:

- Kryostat
- Rollensystem zum Auf- und Abwickeln des Bandleiters mit der dazugehörigen Motorsteuerung
- Magnet (Kupferspule in „split-coil“-Anordnung) zur Induktion von Abschirmströmen im Bandleiter
- Hallsonden und Bandführung

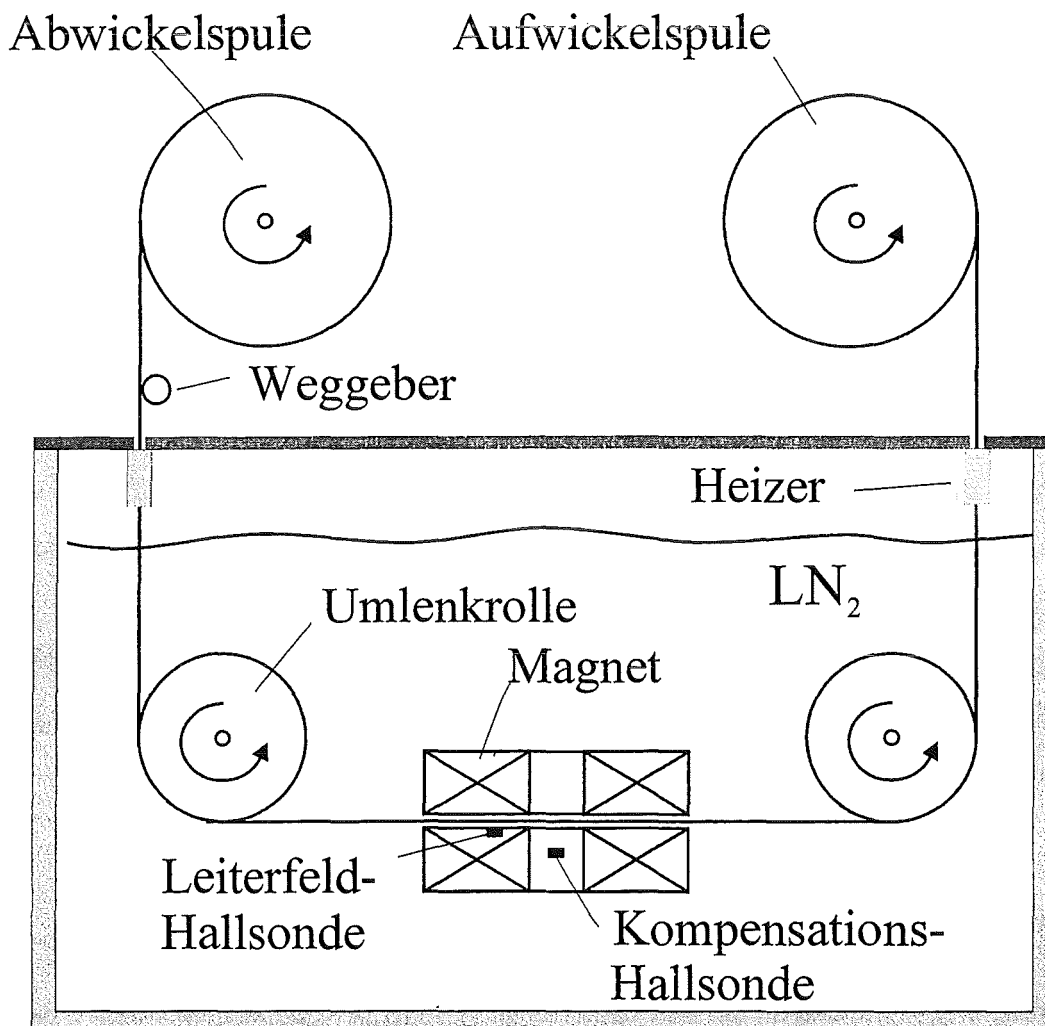


Abb. 12: Die Apparatur

4.1 Kryostat

Der Kryostat hat einen Durchmesser von 80 cm und wird mit LN_2 als Kühlmittel gefüllt. Auf dem Abschlußdeckel des Kryostaten sind Vorratsrollen montiert, die dem Auf- bzw. Abwickeln des Bandleiters dienen. Durch zwei Öffnungen im Deckel wird der Bandleiter in das Innere des Kryostaten geführt und mit LN_2 abgekühlt. Direkt unterhalb der Öffnungen des Abschlußdeckels, im Inneren des Kryostaten, befinden sich beheizte Röhren, durch die der Bandleiter gezogen wird. Der Bandleiter wird damit vor dem Verlassen des Kryostaten in N_2 -Atmosphäre aufgewärmt. Ein Betauen des kalten Leiters wird vermieden.

4.2 Rollensystem

Das Rollensystem besteht aus einer Auf- und Abwickelspule außerhalb des Kryostaten sowie aus zwei Umlenkrollen, die den Bandleiter durch den Spalt des Magneten führen. Ihr Radius beträgt 10 cm und ist damit groß genug, um eine Schädigung des Supraleiters durch einen zu kleinen Biegeradius zu vermeiden [35].

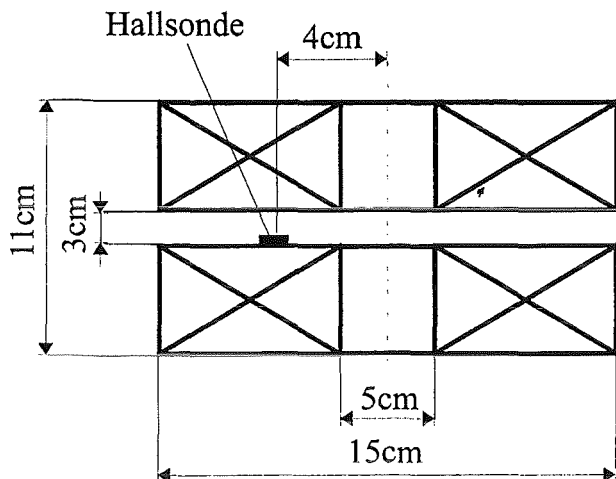
Die Aufwickelspule wird von einem Motor angetrieben. Die Motorsteuerung regelt die Bandgeschwindigkeit auf einen konstanten Wert, zudem kann mit ihr die Anfahrrampe und Abbremsrampe eingestellt werden. Die Abwickelspule, auf der vor dem Beginn der Messung der Leiter aufgewickelt wurde, wird ebenfalls mit einem Motor betrieben. Dieser liefert ein konstantes Bremsmoment, das zu einer Zugspannung des Leiters führt. Damit wird ein gleichmäßiger Lauf des Bandleiters gewährleistet. Die Zugspannung im Leiter darf allerdings nicht zu hoch gewählt werden, da sie, wie ein zu kleiner Biegeradius, ebenfalls zu einer Schädigung des Leiters führen kann [35]. Die typischerweise verwendete Zugkraft beträgt ca. 20 N. Damit ergibt sich eine Zugspannung von 20 MPa, die unterhalb der für diesen Leitertyp gegebenen Beanspruchungsgrenze liegt [36].

4.3 Kupfermagnet

Während der Arbeit wurden zwei aus Kupferdraht gewickelte Magnetspulen verwendet. Beide Magnete bestehen aus zwei Hälften und bilden zusammen ein sogenanntes „split-coil“-Solenoid. Zwischen dem oberen und unteren Wickelungspaket besteht ein Spalt, der zwischen 1 cm bis 3 cm variiert werden kann. In diesem ist die Hallsonde zur Messung

des Magnetfeldes der induzierten Abschirmströme (Leiterfeld) und ein Führung des Bandleiters untergebracht.

Abbildung 13 zeigt die während dieser Arbeit vorwiegend verwendete Spulenkonfiguration mit der Magnetfeldkonstanten und dem normierten Feldgradienten am Ort der Hallsonde.



Magnetkonstante am Ort
der Hallsonde: 7,4 mT / A

Normierter Feldgradient am Ort
der Hallsonde:

$$\frac{1}{B_{\text{ext}}} \cdot \frac{dB_{\text{ext}}}{dx_{\text{Magnet}}} = 3,2 \cdot 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$$

Abb. 13: Kupferspule zur Erzeugung des äußeren Magnetfeldes

4.4 Hallsonden und Bandführung

Innerhalb der Apparatur befinden sich zwei Hallsonden. Eine ist zwischen den Wicklungspaketen des Magneten unterhalb des Bandleiters angebracht. Der Abstand der Hallsonde zum Bandleiter beträgt 0,4 mm (s.S. 26). Mit dieser Hallsonde wird das Magnetfeld der induzierten Abschirmströme und das vom Kupfermagneten erzeugte Feld gemessen. Mit einer zweiten Hallsonde (Kompensationssonde), die sich im Abstand von 2 cm vom Bandleiter in der Bohrung des Kupfermagneten befindet (s. Abb. 12), wird das Feld des Magneten bestimmt. Die Kompensationssonde ist hinreichend weit vom Bandleiter entfernt, so daß der Einfluß des Leitermagnetfeldes vernachlässigbar ist. Das von der Kupfer-Spule erzeugte Magnetfeld am Ort der Kompensationssonde ist proportional zu dem Magnetfeld zwischen den Wicklungspaketen. Über eine Differenzmessung beider Hallsondensignale und durch das Einstellen des Hallsondenstroms der Kompensationssonde, entsprechend den unterschiedlichen Feldwerten der Kupferspule an den beiden Sondenpositionen und den unterschiedlichen Empfindlichkeiten der Hallsonden, kann das äußere Magnetfeld aus dem Meßsignal eliminiert werden. Die Magnetfelder der Bandleiter liegen im Bereich von

$B_s \approx 1 \text{ mT}$ bei einem äußeren Feld von maximal $B_{\text{ext}} \approx 100 \text{ mT}$. Das Magnetfeld des Bandleiters ist somit nur ein bis zwei Größenordnungen kleiner als das äußere Magnetfeld. Deshalb ist eine vollständige Kompensation des äußeren Magnetfeldes nicht notwendig.

Zur Bestimmung des Leiter-Magnetfeldes wurden zwei Typen von Hallsonden verwendet. Eine einzelne Hallsonde und eine Sondenkette bestehend aus 19 benachbarten Hallsonden, die entlang einer Geraden angeordnet sind. Die einzelne Hallsonde ist aus InSb gefertigt und hat eine aktive Fläche von $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$. Ihre Empfindlichkeit beträgt $38 \mu\text{V/mT}$ bei einem Hallstrom von 10 mA . Die Hallsondenkette ist aus GaAs gefertigt. Die aktive Fläche der Hallsonden beträgt ebenfalls $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$. Die Hallsonden haben einen Abstand von $250 \mu\text{m}$ untereinander. Die Hallsondenkette besitzt eine Gesamtlänge von $4,5 \text{ mm}$. Ihre Empfindlichkeit beträgt $180 \mu\text{V/mT} \pm 20 \%$ bei einem gemeinsamen Hallstrom von $100 \mu\text{A}$.

Die Hallsondenkette ist quer zur Länge des Bandleiters angeordnet (Abb. 14). Während der Bandleiter in x-Richtung an den Hallsonden vorbeigezogen wird, kann durch ein hinreichend schnell, aufeinanderfolgendes Messen der einzelnen Hallspannungen ein zweidimensionaler Feldverlauf über dem Leiter bestimmt werden.

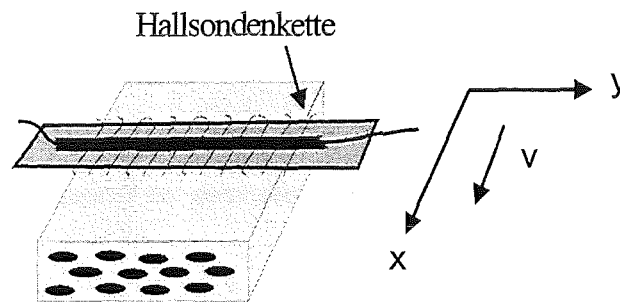


Abb. 14: Position der Hallsondenkette; zur Verdeutlichung ist die Hallsondenkette über dem Leiter eingezeichnet.

Wird statt der Hallsondenkette nur eine einzelne Hallsonde verwendet, so ist diese über der Mitte des Bandes positioniert.

Während der Bandleiter über die Hallsonde gezogen wird, muß der Abstand zur Sonde konstant gehalten werden. Eine Abstandsänderung von $0,1 \text{ mm}$, dies entspricht ungefähr der halben Dicke des Bandleiters, würde zu einer Signaländerung von 10% führen und muß daher unterschritten werden. Zur Verdeutlichung der Abstandsabhängigkeit ist in Abb. 15 ein berechnetes Feldprofil (y-Richtung) für zwei unterschiedliche Abstände ($0,5 \text{ mm}$; $0,6 \text{ mm}$) von der Sonde aufgetragen. Der Rechnung liegt ein Rechteck-Leiter mit einer Breite von 3 mm und einer Dicke von $0,2 \text{ mm}$ zugrunde.

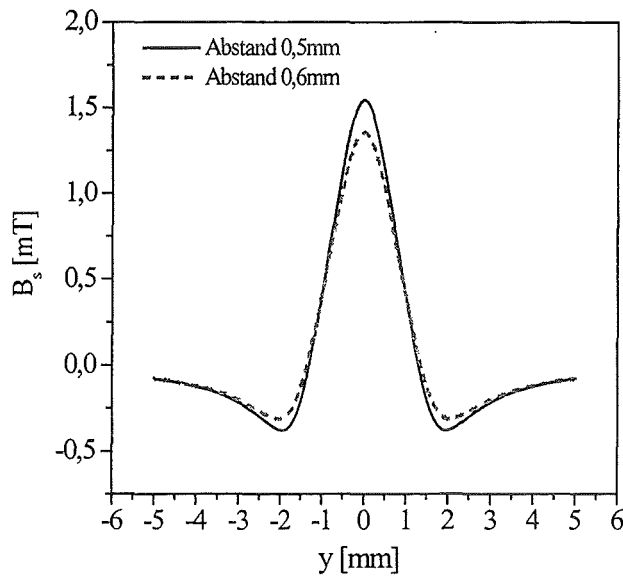


Abb. 15: Abstandsabhängigkeit des Feldprofils

Neben Abstandsänderungen müssen auch ein seitliches Ausweichen des Leiters vermieden werden. Der steile Feldanstieg, der zur Mitte des Leiters erfolgt, würde sonst auch durch seitliches Bewegen zu Signalveränderungen führen.

Die Position des Leiters über der Hallsonde wird mit der in Abb. 16 gezeigten Bandführung fixiert. Über der Hallsonde ist eine 0,25 mm dünne Saphirscheibe angebracht. Die Scheibe schützt die Hallsonde und dient gleichzeitig als Auflagefläche für den Bandleiter. Der Bandleiter wird mit einem Federstempel auf die Auflagefläche gedrückt. Seitliches Ausweichen wird ebenfalls mit einem Federstempel verhindert. Dieser drückt den Leiter gegen eine feststehende Andruckfläche.

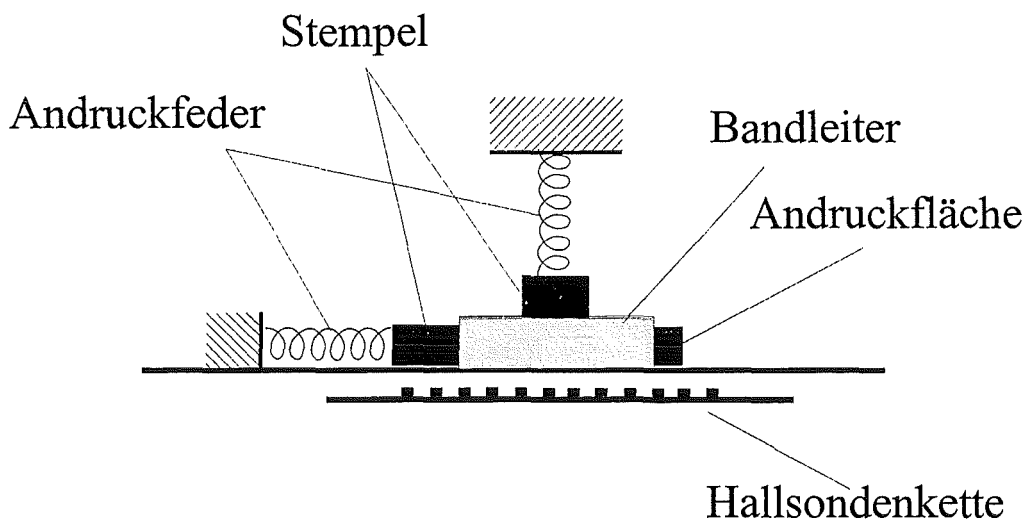
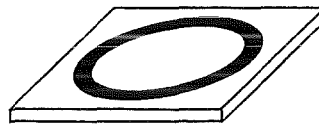


Abb. 16: Bandführung des Leiters

Alle Stempel und Auflageflächen sind aus poliertem Saphir hergestellt. Die Andruckfedern sind Blattfedern aus Kupferberyllium.

Zur quantitativen Auswertung des Leitermagnetfelds ist der Abstand von der Hallsonde zum Bandleiter wichtig. Bestimmt werden kann der Abstand der Hallsondenkette zur Auflagefläche des Leiters, indem anstelle des Bandleiters ein System mit bekannter Stromverteilung über die Hallsonde bewegt und das resultierende Magnetfeldprofil gemessen wird. Aus dem Vergleich des gemessenen Feldprofils mit den für unterschiedliche Abstände berechneten Feldprofilen kann der Abstand ermittelt werden.

Eine definierte Stromverteilung ist mit Hilfe einer supraleitenden Schicht herstellbar. Hierzu wird eine ca. 300 nm dicke $Y_1Ba_2Cu_3O_x$ -Dünnschicht, die durch Kathodenzerstäubung auf ein $SrTiO_3$ -Substrat aufgebracht wurde, in einem photolithographischen Prozeß zu einem Ring strukturiert (Abb. 17). Die so strukturierte Schicht wird auf ein Kupferband geklebt und an der Hallsonde vorbeigezogen.



Radius = 1,5mm
Breite = 200µm

Abb. 17: $Y_1Ba_2Cu_3O_x$ -Ring zur Abstandsbestimmung

Abbildung 18 zeigt das gemessene Feldprofil im Vergleich zu berechneten

Feldprofilen. Bei Annahme eines Abstandes von 0,4 mm ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem berechneten und gemessenen Feldverlauf. Zudem demonstriert die Messung die räumliche Auflösung, mit der das Magnetfeldprofil bestimmt werden kann.

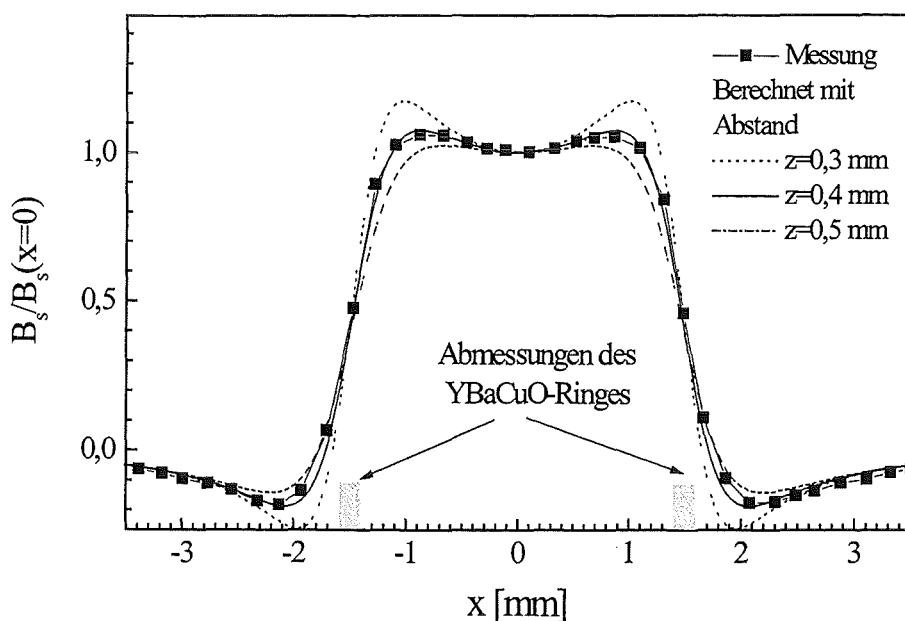


Abb. 18: Vergleich der berechneten mit dem gemessenen Feldprofil

4.5 Meßelektronik

Die in Kap. 4.2 beschriebene Motorsteuerung erlaubt das Einstellen der Bandgeschwindigkeiten und der Anfah- bzw. Abbremsrampe. Ein sanftes Anfahren des Bandes, besonders bei höheren Bandgeschwindigkeiten, empfiehlt sich, da sonst eine ruckartige Beanspruchung verbunden mit einer möglichen Schädigung erfolgen kann. Die sinnvoll nutzbare Bandgeschwindigkeit liegt zwischen 1 mm/s bis 100 mm/s. Sie richtet sich hauptsächlich nach der Geschwindigkeit der Meßwertaufnahme, die in Verbindung mit der Bandgeschwindigkeit den Abstand zwischen zwei Messungen entlang des Leiters festlegt.

Als Weggeber wird ein inkrementaler Drehgeber verwendet. Pro Umdrehung liefert er 5000 Pulse. Er besitzt zwei Spuren zur Bestimmung der Drehrichtung. Die Pulse werden einem Zähler im Meßrechner zugeführt. Entsprechend der Drehrichtung wird aufwärts bzw. abwärts gezählt. Eine Andruckrolle setzt die Längsbewegung des Bandleiters in eine für den Geber nötige Drehbewegung um.

Im folgenden soll erst auf den Meßaufbau des Gradientenverfahrens eingegangen werden, woran sich dann eine Beschreibung der für das Wechselfeldverfahren nötigen Änderungen anschließt.

4.5.1 Gradientenverfahren.

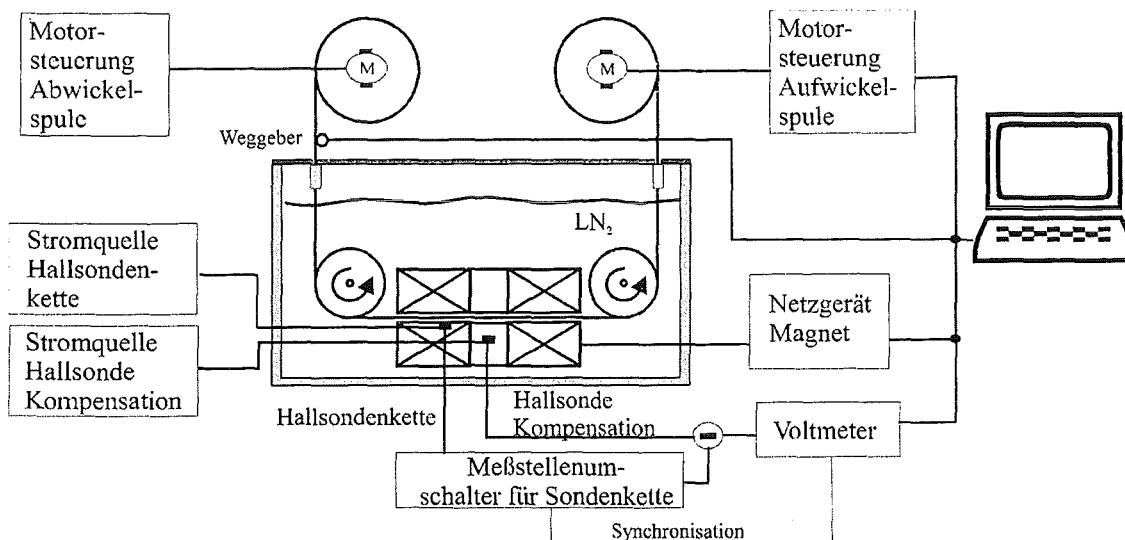


Abb. 19: Meßaufbau des Gradientenverfahrens

Die Hallsonde bzw. die Hallsondenkette wird mit zwei Konstantstromquellen versorgt. Das Voltmeter bestimmt die Hallspannung mit einer Auflösung von ca. 500 nV. Mit einem

Meßstellenumschalter werden die entsprechenden Hallsonden der Hallsondenkette ausgewählt.

Wird nur eine Hallsonde ausgelesen, dann ergibt sich bei einer Geschwindigkeit von 100 mm/s und einer Meßwertaufnahme von 10 pro Sekunde ein räumlicher Abstand zwischen zwei Messungen von 10 mm. Dieser Abstand ist für lange Bandleiter im Bereich von 100 m sicher ausreichend gering, insbesondere, wenn man an die produzierte Datenmenge einer solchen Messung denkt. Bei der Bandgeschwindigkeit von 100 mm/s beträgt die auf den Bandleiter wirkende Feldänderung dB/dt maximal $dB/dt = 200 \text{ mT/s}$ entsprechend einem elektrischen Feld von $E < 5 \mu\text{V/cm}$.

Werden alle Hallsonden ausgelesen, liegt die Meßgeschwindigkeit, mit der ein ganzes Profil quer zum Bandleiter ausgemessen wird, bei ca. 1,5 s. Zur Erhöhung der Meßgeschwindigkeit erfolgt die Messung eines Profils quer zum Bandleiter, und damit das Auslesen der 19 Hallsonden, unabhängig vom Meßrechner über einen Zwischenspeicher.

Über die Steuerleitung findet eine gegenseitige Synchronisation (Triggerung) des Meßstellenumschalters und des Voltmeters statt. Nach beendetem Meßvorgang des Voltmeters wird der Meßstellenumschalter über die Steuerleitung getriggert, den Meßkanal auf die nächste Hallsonde umzustellen. Der Meßstellenumschalter leitet daraufhin über die Signalleitung eine Messung des Voltmeters ein. Die Meßwerte der 19 Hallsonden werden im Voltmeter zwischengespeichert und nach Beendigung der Messung aller 19 Hallsonden an den Meßrechner weitergegeben. Daraufhin startet ein neuer Zyklus.

4.5.2 Wechselfeldverfahren

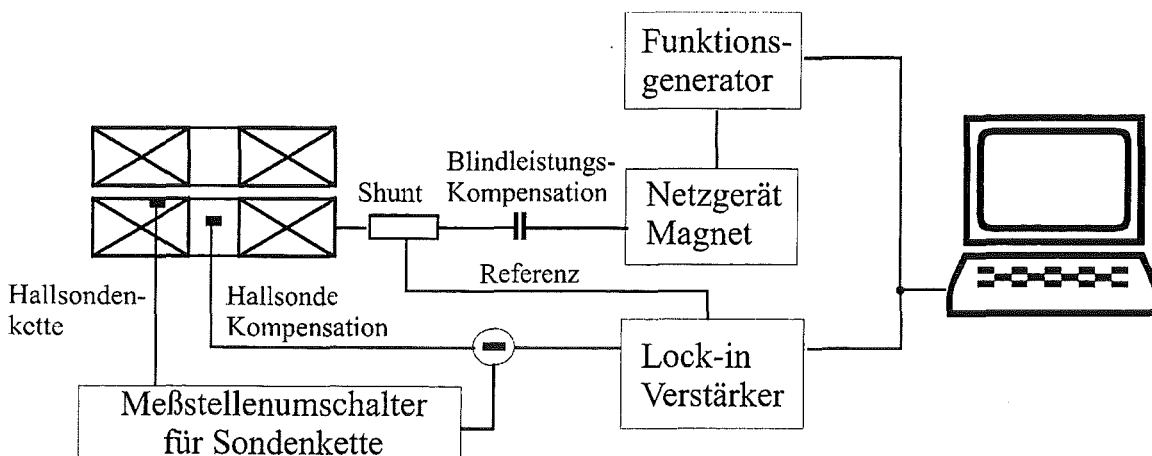


Abb. 20: Meßaufbau des Wechselfeldverfahrens

Bei dieser Meßart wird mit dem Kupfer-Magneten ein Wechselfeld mit einer Frequenz von 71,7 Hz erzeugt. Aufgrund der Induktivität der Spule von 120 mH und der damit verbundenen Impedanz von 54Ω können Spannungen bis 400 V an der Spule auftreten. Um die Spannung an dem die Spule versorgenden

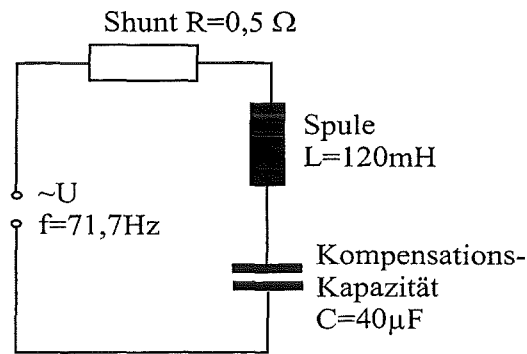


Abb. 21: Blindleistungskompensation

Netzgerät zu vermindern, wurde eine Blindleistungskompensation durchgeführt. Eine Kapazität der gleichen Impedanz wird in Reihe zur Spule geschaltet [37]. Der Kreis mit Spule und Kapazität (Abb. 21) bildet einen Reihenschwingkreis, der mit der Resonanzfrequenz betrieben wird. Die Impedanz dieser Anordnung ist nur noch durch den ohmschen Widerstand bestimmt. Damit läßt sich die Spannung am Netzgerät auf 20 V beschränken. Aufgrund der Blindleistungskompensation kann der Magnet nur bei einer festen Frequenz harmonisch erregt werden.

Der Meßaufbau ist weitgehend identisch mit einem Aufbau zur Bestimmung ac-Suszeptibilität [38]. Der Unterschied besteht in der Verwendung einer Hallsonde anstatt einer über dem Supraleiter positionierten Aufnehmerspule. Dies ist schon von Gilchrist et al. [39] zur Bestimmung der „ac-Suszeptibilität“ von $Y_1Ba_2Cu_3O_x$ und Bi-2212 -Kristallen und -Schichten angewandt worden. Bentzon et al. [40,41] schlugen ein solches Verfahren zur Charakterisierung von Bandleitern vor und realisierten es kürzlich.

Ein Lock-in-Verstärker mißt den fundamentalen Anteil des periodischen Magnetfeldes $B_s(t)$ der induzierten Abschirmströme. Als Referenzsignal für den Lock-in-Verstärker dient dabei die Spannung von einem in den Stromkreis geschalteten Widerstand von $0,5 \Omega$. Das Netzgerät wird in diesem Fall mit Hilfe eines Funktionsgenerators zur Erzeugung des sinusförmigen Stromes angesteuert. Bei dieser Anregungsart des Magneten können verglichen mit dem Gradientenverfahren um zwei bis drei Größenordnungen höhere Feldänderungsraten (dB/dt) bis ca. 10 T/s erreicht werden, woraus dementsprechend höhere elektrische Felder $E < 250 \mu\text{V/cm}$ resultieren.

Da mit dem Lock-in-Verstärker der fundamentale Anteil des Magnetfeldes $B_s(t)$ gemessen wird, findet also eine Auswertung der gesamten, während einer Periode des äußeren Magnetfeldes $B_{\text{ext}}(t)$ durchlaufenen Hysteresekurve statt. Im Gegensatz dazu wird beim

Gradientenverfahren nur das Magnetfeld des Leiters bei einem bestimmten äußeren Magnetfeld aufgenommen, so daß nur ein Punkt auf der Hysteresekurve ausgewertet wird.

In Analogie zur Messung der ac-Suszeptibilität mit einer Aufnehmerspule wird das Magnetfeld des Leiters $B_s(t)$ in eine Fourierreihe entwickelt.

$$B_s(t) = B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (B'_{s,n} \cdot \sin(n\omega t) + B''_{s,n} \cdot \cos(n\omega t)) \quad \text{Gl.7}$$

$$B_{\text{ext}}(t) = B_{\text{ext,max}} \cdot \sin(\omega t)$$

Der Lock-in-Verstärker bestimmt die Fundamentale des Magnetfeldes, also die Entwicklungskoeffizienten $B'_{s,1}$ und $B''_{s,1}$.

Die Entwicklungskoeffizienten sind durch folgende Beziehungen gegeben:

$$B'_{s,1} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} B_s(t) \cdot \sin(\omega t) \cdot d(\omega t) \quad \text{Gl. 8}$$

$$B''_{s,1} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} B_s(t) \cdot \cos(\omega t) \cdot d(\omega t)$$

Ähnlich wie bei der ac-Suszeptibilität [42] lassen sich diese Beziehungen umschreiben:

$$B'_{s,1} = \frac{1}{\pi \cdot B_{\text{ext,max}}} \cdot \int_{-B_{\text{ext,max}}}^{B_{\text{ext,max}}} (B_s^+(B) + B_s^-(B)) \cdot \frac{B}{\sqrt{B_{\text{ext,max}}^2 - B^2}} \cdot dB \quad \text{Gl. 9}$$

$$B''_{s,1} = \frac{1}{\pi \cdot B_{\text{ext,max}}} \cdot \int_{-B_{\text{ext,max}}}^{B_{\text{ext,max}}} (B_s^+(B) - B_s^-(B)) \cdot dB$$

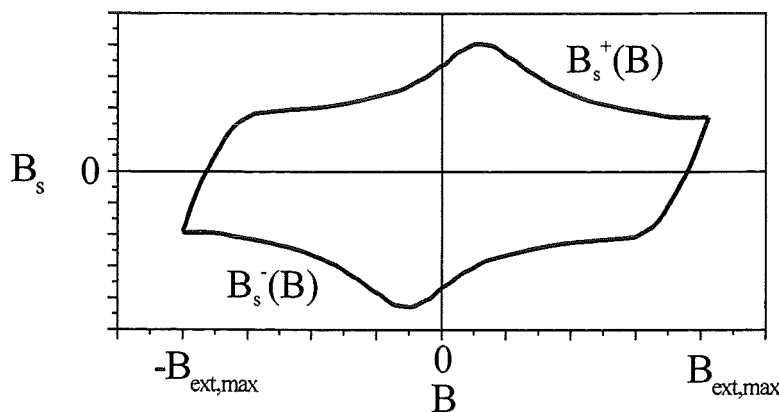


Abb. 22: Skizzierte Hysterese des Leiterfeldes B_s
 $B_s^+(B)$: oberer Ast der Magnetfeldhysterese
 $B_s^-(B)$: unterer Ast der Magnetfeldhysterese

$B_s^+(B)$ ist der obere Ast der Magnetfeldhysterese des Leiters. Dieser Zweig wird beim Erhöhen des äußeren Magnetfeldes B_{ext} durchlaufen. $B_s^-(B)$ ist der untere Ast der Magnetfeldhysterese. Er wird beim Erniedrigen des äußeren Magnetfeldes B_{ext} durchlaufen (Abb. 22).

Gemäß Gl. 9 kann der Anteil des Leiterfeldes, der in Phase mit dem äußeren Magnetfeld ist ($B'_{s,l}$, Realteil), auf den Mittelwert des Magnetfeldes der induzierten Abschirmströme beim Durchlaufen der Magnetfeldhysterese zurückgeführt werden. Der Anteil des Magnetfeldes der Phasen verschoben ist ($B''_{s,l}$, Imaginärteil), stellt die von der Magnetfeldhysterese eingeschlossene Fläche dar. Er beschreibt daher die Aufspaltung der Hysteresekurve.

5 Transportstrommessungen

Der kritische Strom I_c und dessen Homogenität entlang des Bandleiters wurde mit zwei Methoden ermittelt.

- Multikontaktmessungen
- Schleifkontaktmessungen

Die Transportstrommessungen wurden nur an Kurzproben mit einer Länge von maximal 50 cm vorgenommen.

5.1 Multikontaktmessungen

Bei dieser Variante wird ein bis zu 50 cm langes Stück des Bandleiters mit Spannungsabgriffen im Abstand von 1 cm kontaktiert (Abb. 23). Die Stromzuführungen sind an den Enden des Bandleiters angelötet, die Spannungskontakte mit Leitsilber auf der Ag-Hülle des Bandleiters angebracht. Die Messung erfolgte ohne äußeres Magnetfeld bei einer Temperatur von 77 K (LN₂-Bad).

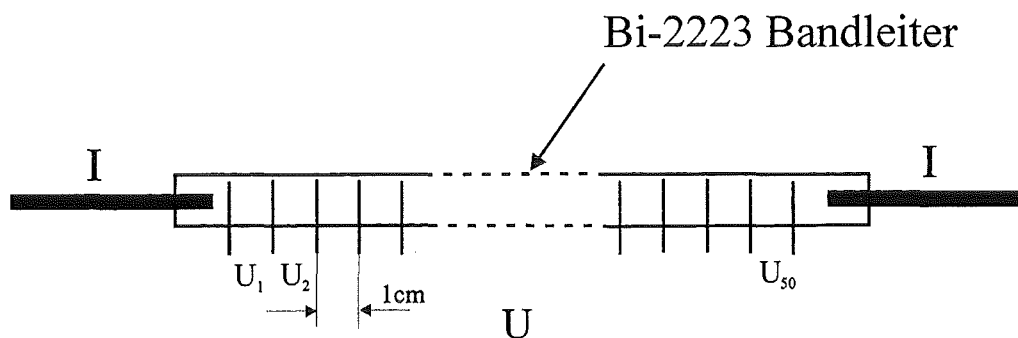


Abb. 23: Multikontaktverfahren

Für jedes Paar benachbarter Spannungsabgriffe wurde eine Strom-Spannungskennlinie aufgenommen. Der kritische Strom eines betrachteten Abschnittes des Bandleiters ist bestimmt als der Transportstrom, bei dem ein Spannungsabfall von $1 \mu\text{V}$ auftritt. Dies entspricht einem elektrischen Feldkriterium von $E = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$. Der Einfluß der Ag-Hülle, die einen parallelen Strompfad zum Supraleiter bildet, kann bei diesem elektrischen Feld vernachlässigt werden, da der über die Hülle fließende Strom kleiner als ein Prozent des Gesamtstromes ist.

5.2 Schleifkontaktmessungen

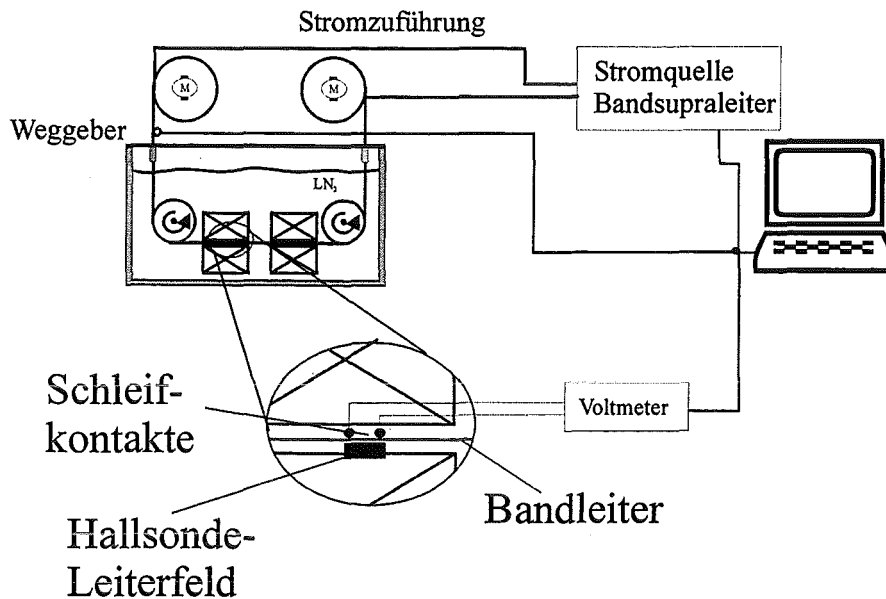


Abb. 24: Schleifkontaktverfahren

Im Verlauf der Arbeit wurde noch eine zweite resistive Methode angewandt. Diese Variante wird in der für die induktiven Messungen benutzten Apparatur (Abb. 12) durchgeführt. Es sind somit auch resistive Messungen im Magnetfeld möglich. Als Spannungskontakte dienen in diesem Fall Schleifkontakte.

Der Bandleiter wird an den Enden mit einem Kupferband verlötet, über das der Strom in den Bandleiter eingespeist wird. Die Enden des Kupferbandes sind auf die Vorratsrollen außerhalb des Kryostaten aufgewickelt. An dieser Stelle sind sie auch mit der Stromquelle verbunden. Mit Hilfe des Rollensystems wird der Bandleiter unter den Schleifkontakten durchgezogen (Abb. 24). Während des Durchzuges mißt man einen kontinuierlichen Spannungsverlauf entlang des Leiters, wenn der konstante Meßstrom den kritischen Strom an jeder Stelle des Leiters überschreitet.

Es befinden sich zwei Paare von Schleifkontakten innerhalb der Apparatur. Eines ist direkt über der Hallsonde angebracht, die zur Bestimmung des Magnetfeldes der induzierten Abschirmströme dient (Abb. 24). Der Abstand dieser Kontakte beträgt 18 mm. Das zweite Paar ist symmetrisch zur Mittelachse der Magnetspule auf der gegenüberliegenden Seite des Magneten angeordnet. Das zweite Schleifkontaktpaar befindet sich somit in demselben von der Kupferspule erzeugten Magnetfeld wie das erste Schleifkontaktpaar. Der Abstand der Schleifkontakte beträgt hier 3 mm.

Im Fall der Multikontaktmessungen wird der kritische Strom I_c bei einem festen, vorgegebenen elektrischen Feld bestimmt. Bei der in diesem Abschnitt beschriebenen Variante liegt der umgekehrte Fall vor. Vorgegeben wird nicht das elektrische Feld, sondern der Transportstrom im Supraleiter. Schwankungen des kritischen Stromes entlang des Leiters zeigen sich in der Variation der mit den Schleifkontakten bestimmten Spannung. Ein Defekt im Bandleiter, der mit einer Abnahme des kritischen Stromes verknüpft ist, zeigt sich demnach in einer Zunahme der Spannung an den Schleifkontakten.

Abbildung 25 zeigt die an den Schleifkontakten abfallende Spannung für unterschiedliche Meßströme. Der Abstand der Schleifkontakte beträgt bei dieser Messung 3 mm. Der Bandleiter hat eine Länge von 23 cm. Der Spannungsanstieg für $x < 0$ cm und $x > 23$ cm ist durch den Spannungsabfall an den zur Stromeinspeisung benötigten Kupferbändern bedingt und zeigt den Anfang bzw. das Ende des Bandleiters an.

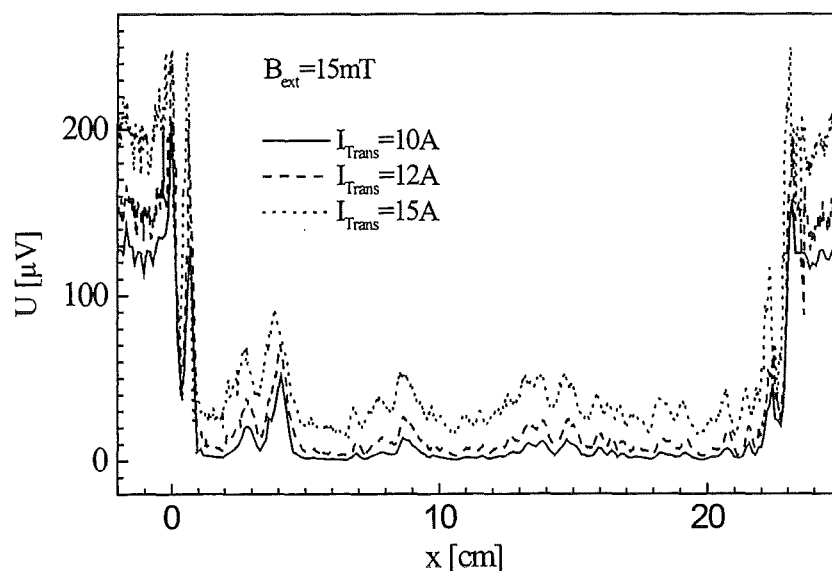


Abb. 25: Spannungsvariation entlang des Bandleiters für unterschiedliche Meßströme.
Abstand der Schleifkontakte: 3 mm.

Wie zu erwarten ist, nimmt der Spannungsabfall an den Schleifkontakten mit größerem Meßstrom zu. Die Spannungen entlang des Leiters variieren bei allen Meßströmen in vergleichbarer Weise. Ein erhöhter Spannungsabfall zeigt eine verringerte Stromtragfähigkeit an.

In Abb. 26 ist eine weitere Messung aufgetragen. Bei dieser Messung wurde der Transportstrom konstant gehalten, aber die Durchzugsrichtung des Bandleiters geändert. Die

Variation der Spannung ist bei beiden Durchzugsrichtungen vergleichbar. Allerdings ist der Spannungsabfall für eine Durchzugsrichtung (Abwickelrichtung) im Vergleich mit der entgegengesetzten Richtung insgesamt höher. Die Ursache für dieses Verhalten ist in der $I_c(B)$ -Hysterese des Supraleiters zu suchen (Abb. 26 rechts). Der kritische Strom hängt nicht nur von dem äußeren Magnetfeld ab, sondern auch von der Vorgeschichte des Leiters [43]. Wird der kritische Strom gemessen, während das äußere Magnetfeld erhöht wird, sind kleinere Stromtragfähigkeiten zu beobachten, verglichen mit Messungen, die während des Erniedrigens des Magnetfeldes durchgeführt werden.

Wenn der Bandleiter durch den Kupfermagneten gezogen wird, durchläuft er einen Feldzyklus $B = 0 < B_{\max} > B_{\text{Kontakt}} > B = 0$ in der einen Zugrichtung und in umgekehrter Feld-Reihenfolge in der anderen Zugrichtung (s. Abb. 11, S. 20; die 3 mm Schleifkontakte liegen symmetrisch zur Hallsonde bei $x = +0,04$ m). -Während des Aufwickelns durchläuft der Bandleiter, bevor er die Schleifkontakte passiert, also die Mitte der Spule. Dort ist das Magnetfeld am größten, daher findet der Bandleiter bei seinem weiteren Weg ein sich erniedrigendes Magnetfeld vor. Die resistive Messung findet demnach während des Erniedrigens des äußeren Magnetfeldes statt. Die Stromtragfähigkeit ist erhöht und es wird eine dementsprechend geringere Spannung am Bandleiter gemessen. Beim Abwickeln passiert der Bandleiter die Schleifkontakte vor der Spulenmitte. Die Messung findet daher beim Erhöhen des äußeren Feldes statt. Die Stromtragfähigkeit ist im Vergleich zum ersten Fall verringert und somit ist eine höhere Spannung am Supraleiter meßbar.

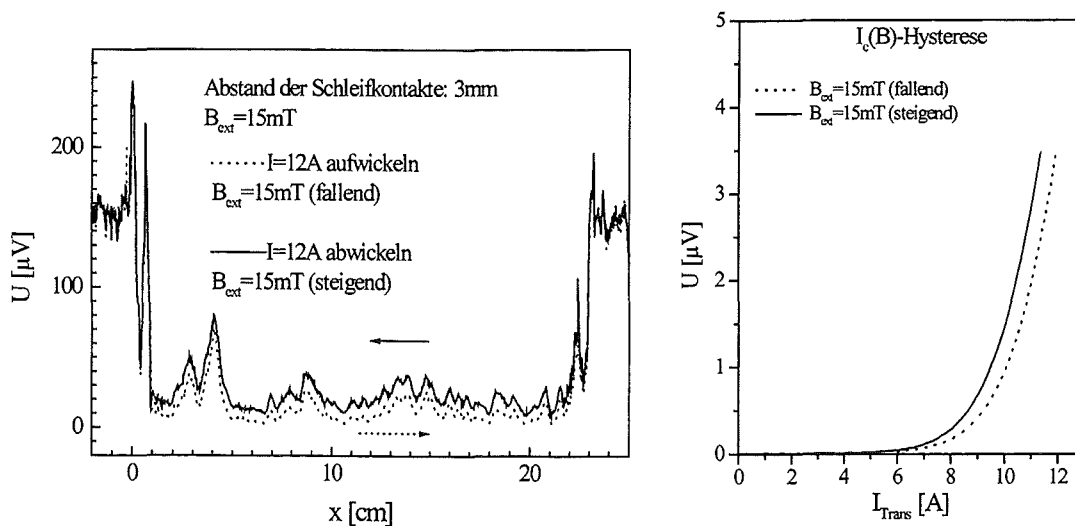


Abb. 26:
links: Spannungsvariation bei Änderung der Durchzugsrichtung
rechts: U-I Kennlinie bei verschiedener Vorgeschichte des Leiters

Die Ursache dieser Hysterese wird auf die Beeinflussung der Transporteigenschaften der Korngrenzen durch die Magnetisierung innerhalb der Körner zurückgeführt [44]. Das durch die Magnetisierung der Körner verursachte Magnetfeld überlagert sich in den Korngrenzen dem äußeren Magnetfeld. Beim Hochfahren des Magnetfeldes zeigt die Magnetisierung der Körner diamagnetisches Verhalten. Die Flußverdrängung aus den Körnern bewirkt in den Korngrenzen eine Magnetfelderhöhung. Hieraus resultiert eine verminderte Stromtragfähigkeit der Korngrenze. Beim Herunterfahren des Magnetfeldes erfolgt eine Ummagnetisierung des Korns. Es zeigt jetzt paramagnetisches Verhalten. In den Korngrenzen ergibt sich eine Schwächung des äußeren Magnetfeldes. Der kritische Strom der Korngrenze wird erhöht.

Dieses Verhalten zeigt sich in der Strom-Spannungskennlinie (U-I Kennlinie) des Supraleiters (Abb. 26 rechts). Während der Erhöhung ($B_{\text{ext}} = 0 \text{ mT} \rightarrow B_{\text{ext}} = 15 \text{ mT}$) des Magnetfeldes liegt die U-I Kennlinie links von der, die während des Erniedrigens des Magnetfeldes ($B_{\text{ext}} = 100 \text{ mT} \rightarrow B_{\text{ext}} = 15 \text{ mT}$) gemessen wird. Dies ist gleichbedeutend mit einem niedrigeren kritischen Strom.

Abbildung 27 zeigt einen Vergleich von Messungen mit einem Abstand der Schleifkontakte von 3 mm und 18 mm.

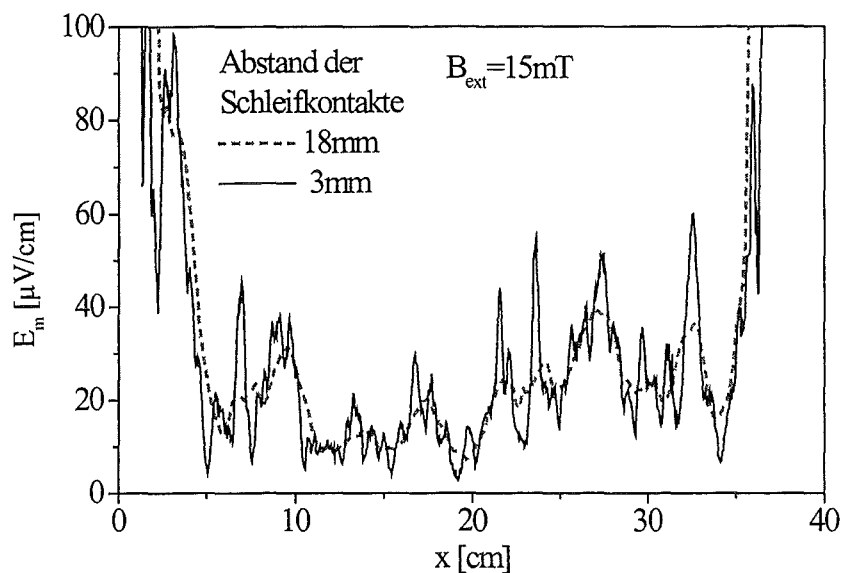


Abb. 27: Mittleres elektrisches Feld für verschiedene Abstände der Schleifkontakte

Aufgetragen ist in diesem Fall nicht die Spannung, sondern das aus dem Abstand der Kontakte berechnete elektrische Feld: genauer, das über den Abstand der Kontakte gemittelte

elektrische Feld E_m . Die Durchzugsrichtung ist bei beiden Fällen so gewählt, daß der Bandleiter beim Passieren der Schleifkontakte jeweils die gleiche Vorgeschichte erfahren hat. Deutlich zeigt sich der Mittelungseffekt bei einem großen Abstand der Schleifkontakte. Der Bandleiter erscheint homogener als er in Wirklichkeit ist. Um die aus resistiven Messungen ermittelte Homogenität eines Leiter zu beurteilen, muß immer der Abstand der Spannungsabgriffe in Betracht gezogen werden. Zur Bestimmung der Homogenität großer Längen von Bandleitern werden häufig fixierte Spannungsabgriffe im Abstand von einigen Metern gewählt [45]. Derartige Messungen bieten keinen zutreffenden Eindruck über die Homogenität des Leiters, da selbst ein inhomogener Leiter über solche Abstände betrachtet als homogen erscheinen wird.

Die Schleifkontaktmethode gibt verglichen mit den fest fixierten Spannungsabgriffen einen besseren Eindruck von der Inhomogenität des Bandleiters, da hier ein deutlich geringerer Abstand der Kontakte gewählt werden kann, ohne den Aufwand einer Messung zu erhöhen. Die Schleifkontaktmethode hat leider auch einen Nachteil. Er besteht darin, daß der kritische Strom nicht direkt angegeben werden kann. Aus der gemessenen Spannung entlang des Leiters kann nur bei Kenntnis der U-I Kennlinie auf den kritischen Strom I_c und dessen Variation geschlossen werden. Die U-I Kennlinie ist aus der alleinigen Bestimmung des Spannungsverlaufs entlang des Leiters nicht bekannt. Es kann nur eine Abschätzung des kritischen Stromes erfolgen, die auf einer Annahme des Kennlinienverlaufs beruht.

In doppellogarithmischer Auftragung sind die Kennlinien häufig in guter Näherung als Geraden darstellbar. Als Annahme hinsichtlich des Verlaufs der U-I Kennlinie wird deshalb ein Potenzgesetz verwendet. Die an einem festen Ort gemessene Spannung ist dann durch folgende Beziehung gegeben:

$$U(x) = U_c \cdot \left(\frac{I}{I_c(x)} \right)^{n(x)} \quad \text{Gl. 10}$$

Bei einem konstanten Meßstrom I ist die Variation der an den Schleifkontakten abfallenden Spannung $U(x)$ durch zwei Faktoren bestimmt: durch die Variation des kritischen Stromes $I_c(x)$ und durch die Variation des Exponenten $n(x)$ der Kennlinie entlang des Bandleiters. Der Vorfaktor U_c variiert nicht, sondern ist über die Wahl des elektrischen Feldkriteriums E_c bestimmt. Für U_c gilt $U_c = E_c \cdot \ell$ (ℓ : Abstand der Schleifkontakte).

Wird Gl. 10 nach $I_c(x)$ aufgelöst, kann aus dem Spannungsverlauf $U(x)$ auf den kritischen Strom $I_c(x)$ geschlossen werden:

$$I_c(x) = I \cdot \left(\frac{U(x)}{U_c} \right)^{-\frac{1}{n(x)}} \quad \text{Gl. 11}$$

Berücksichtigt werden muß noch, daß der Supraleiter in einer metallischen Matrix (Ag-Hülle) eingebettet ist. Sie bildet einen zum Supraleiter parallelen Strompfad. Der aufgeprägte Meßstrom I teilt sich auf $I = I_{Ag} + I_s$ (Abb. 28).

Der in der Ag-Hülle fließende Strom kann im Gegensatz zur Multikontaktmethode nicht vernachlässigt werden. Die

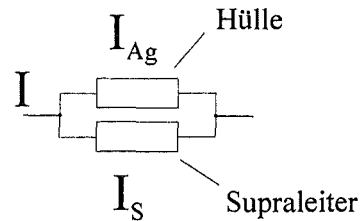


Abb. 28: Stromaufteilung zwischen Hülle und Filament

elektrischen Felder sind bei dieser Meßvariante deutlich größer als $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ (siehe Abb. 27) und führen zu einem nicht mehr vernachlässigbaren Beitrag des Stroms der Ag-Hülle zum Gesamtstrom. Aus dem gemessenen Spannungsabfall $U(x)$ ergibt sich der Anteil des Stromes, der von der Ag-Hülle transportiert wird $I_{Ag} = U(x)/R_{Ag}$. Unter Berücksichtigung des Stromes in der Ag-Hülle wird Gl. 11 modifiziert zu:

$$I_c(x) = (I - I_{Ag}) \cdot \left(\frac{U(x)}{U_c} \right)^{-\frac{1}{n(x)}} \quad \text{Gl. 12}$$

$$I_c(x) = \left(I - \frac{U(x)}{R_{Ag}} \right) \cdot \left(\frac{U(x)}{U_c} \right)^{-\frac{1}{n(x)}}$$

Zur Bestimmung des kritischen Stromes muß, wie aus Gl. 12 ersichtlich, der Exponent $n(x)$ bekannt sein. Der Exponent der U-I Kennlinie ist nicht nur durch intrinsische Eigenschaften wie die Flußverankerung beeinflusst. Herstellungsbedingte Inhomogenitäten (Defekte) ändern ebenso die Kennlinie. Filamentisierte NbTi-Drähte zeigen eine z.B. durch Filamenteinschnürungen („sausaging“) verursachte Abnahme des Exponenten der U-I Kennlinie [46]. Defekte im Bandleiter führen zu einer Stromumverteilung zwischen dem Supraleiter und der Ag-Hülle. Polák et al. [47] stellten in der Kennlinie von Bi-Bandleitern lineare Abschnitte fest, die sie auf die an Defekten auftretenden Stromumverteilungen zwischen der Hülle und dem Supraleiter zurückführen. Die Stromaufteilung zwischen Supraleiter und metallischer Hülle läßt eine Abnahme des Exponenten der Kennlinie erwarten [48]. Mit einer Variation der kritischen Stromdichte muß somit eine durch Stromumverteilung bewirkte Änderung des Exponenten der U-I Kennlinie erwartet werden. Diese Stromumverteilungen können nicht durch eine einfache Berücksichtigung eines zum Supraleiter parallelen Strompfades (Abb. 28) beschrieben werden. Die an einer Stelle verringerter Stromtragfähigkeit vorliegende Stromumverteilung müßte durch eine für jeden

Defekt spezifische Reihen- und Parallel- Schaltung von Supraleiter und Hülle modelliert werden.

Die U-I Kennlinie und ihr Exponent $n(x)$ entlang des Bandleiters ist aus dem Spannungsverlauf bei einem konstanten eingepprägten Strom nicht bestimmbar. Der Exponent $n(x)$ in Gl.12 ist also nicht bekannt. Sein Verlauf könnte allerdings aus dem Spannungsverlauf für verschiedene Meßströme, wie dies in Abb. 25 dargestellt ist, abgeschätzt werden. Da das Verfahren sehr aufwendig ist, wurde zur Auswertung die Näherung gemacht, daß der Exponent der U-I Kennlinie entlang des Leiters konstant ist. Seine Ermittlung erfolgt an einem Ort mit hoher Stromtragfähigkeit durch eine getrennte Messung der U-I Kennlinie bei ruhendem Band. Damit ergibt sich folgende Beziehung zur Bestimmung des kritischen Stromes:

$$I_c(x) = \left(I - \frac{U(x)}{R_{Ag}} \right) \cdot \left(\frac{U(x)}{U_c} \right)^{-\frac{1}{n}} \quad \text{Gl. 13}$$

Der Widerstand der Ag-Hülle R_{Ag} ist durch Auswertung von Schliffbildern der Querschnittsfläche ermittelt worden. Für die Ag-Hülle wurde ein spezifischer Widerstand von $\rho_{Ag} = 0,25 \mu\Omega\text{cm}$ [49] angenommen.

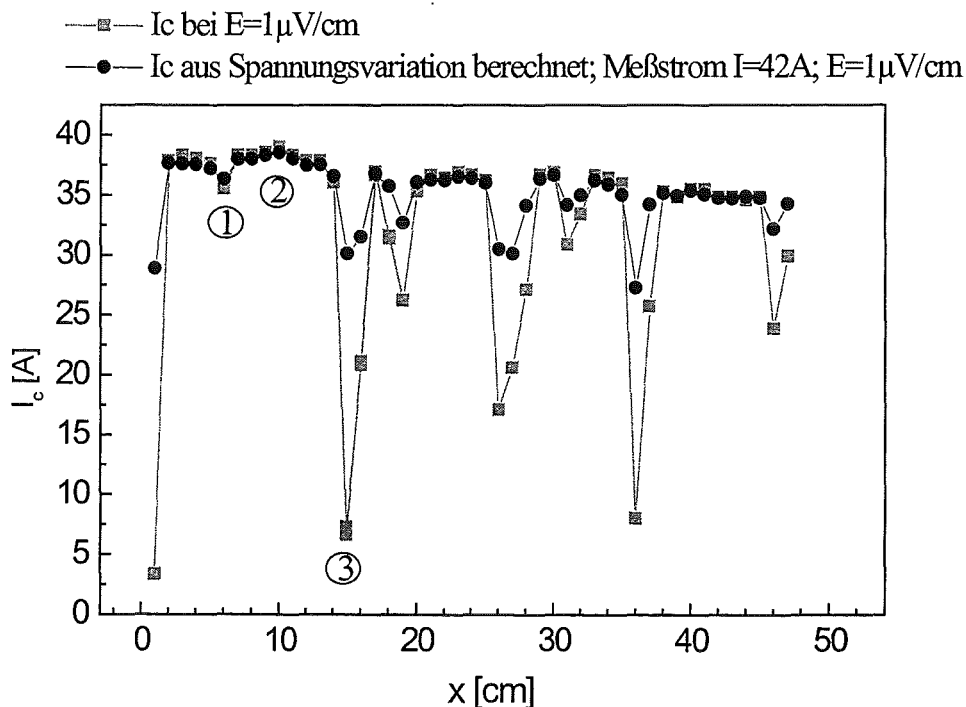


Abb. 29: Vergleich der aus unterschiedlichen Auswerteverfahren berechneten kritischen Ströme

Der mit der Näherung $n = \text{const.}$ verbundene Fehler soll anhand eines Vergleiches des über ein elektrisches Feldkriterium ermittelten kritischen Stroms mit dem aus der Variation der Spannung berechneten kritischen Strom deutlich gemacht werden.

Zum Vergleich beider Methoden werden mit dem Multikontaktverfahren die U-I Kennlinien entlang des Bandleiters im Abstand von 1cm gemessen. Die Kennlinie ist somit bekannt und eine Auswertung kann nach beiden Methoden erfolgen. Abbildung 29 zeigt den Vergleich der Ergebnisse beider Auswerteverfahren.

Abweichungen zeigen sich deutlich in Abschnitten, in denen die Stromtragfähigkeit stark reduziert ist. Der aus dem Spannungsverlauf bestimmte kritische Strom übertrifft den tatsächlichen, über ein elektrisches Feldkriterium erhaltenen kritischen Strom. In diesen Bereichen ist die Annahme über den Verlauf der Kennlinie mit konstantem n also falsch. Abbildung 30 zeigt die Kennlinien an den in Abb. 29 markierten Orten in doppellogarithmischer Auftragung. Der Exponent der Kennlinie ist als Steigung direkt erkennbar.

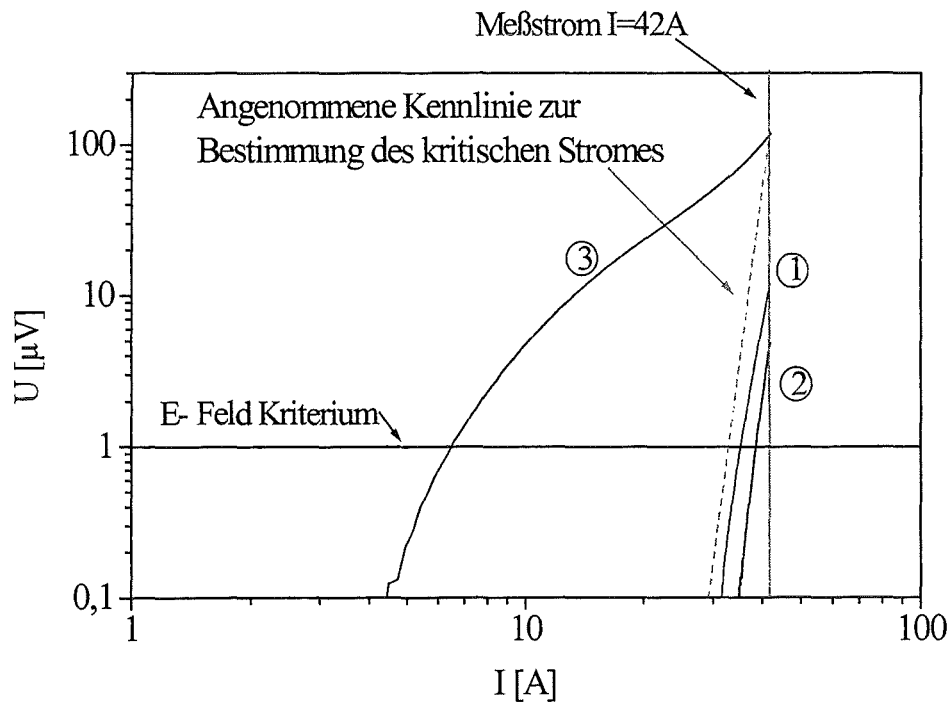


Abb. 30: Kennlinien an den in Abb. 29 markierten Orten

Die mit ① und ② gekennzeichneten Orte zeigen nur eine geringe Schwankung des Exponenten. Daraus resultiert eine gute Übereinstimmung beider Verfahren in diesen Bereichen, wie aus Abb. 29 ersichtlich. Der mit ③ markierte Ort zeigt eine viel flachere, nicht mit einem Exponenten beschreibbare Kennlinie. Wird bei dieser Kennlinie aus der bei einem

Strom von 42 A vorliegenden Spannung (ca. 100 μV) auf den bei 1 μV fließenden Strom, den kritischen Strom, geschlossen, ergibt sich ein großer Fehler. In Abb. 30 ist die im Auswerteverfahren angenommene Kennlinie als unterbrochene Linie eingezeichnet. Ihr Schnittpunkt mit der das elektrische Feldkriterium repräsentierenden horizontalen Linie ergibt den berechneten kritischen Strom. Der Schnittpunkt der gemessenen Kennlinie mit dieser Linie ergibt den tatsächlichen kritischen Strom. Der im Auswerteverfahren berücksichtigte Exponent wurde an jenem Ort des Supraleiters bestimmt, an dem eine hohe Stromtragfähigkeit vorliegt und n damit am größten ist. Defekte führen zu einer flacheren Kennlinie, also zu einem geringeren Exponenten. Abweichungen des berechneten kritischen Stromes vom tatsächlichen kritischen Strom ergeben sich somit in der Weise, daß die Stromtragfähigkeit an den geschädigten Stellen überschätzt wird. In Abb. 29 ist dies deutlich zu sehen. Das Auswerteverfahren führt zu einer Glättung des tatsächlichen kritischen Stromverlaufs.

Diese Eigenschaft des Auswerteverfahrens ist für die im nachfolgenden Text diskutierten Messungen zu beachten. Das Glättungsverhalten zeigt sich ausgeprägter, je größer der Unterschied des Exponenten in den geschädigten und den intakten Bandleiterabschnitten ist. Die Differenz kann um so größer ausfallen, je höher der Exponent in den intakten Bandabschnitten ist.

Die soeben diskutierte Messung fand ohne äußeres Magnetfeld statt. Der Exponent schwankt in diesem Fall zwischen Werten von $n = 19$ (Abschnitte hoher Stromtragfähigkeit) und $n \approx 3$ (Abschnitte stark reduzierter Stromtragfähigkeit). Werden Messungen im Magnetfeld durchgeführt, sind die Exponenten in den intakten Abschnitten kleiner ($n < 10$). Die Unterschiede der Exponenten zwischen den intakten und beschädigten Abschnitten sind dann geringer und infolgedessen ist das Glättungsverhalten schwächer ausgeprägt.

Schließlich soll noch erwähnt werden, daß die Anwendung des Schleifkontaktverfahrens eine metallische Bandoberfläche voraussetzt. Bei der Herstellung wird der Bandleiter jedoch i.a. mit einer Keramik-Schichte versehen, um ein Zusammenbacken aufgespulter Leiter bei den Glühprozessen zu verhindern. Diese isolierende Oberflächen-Schutzschicht muß vor der Schleifkontaktmessung entfernt werden, was die Praktikabilität des Verfahrens bei großen Leiterlängen begrenzt.

5.3 Messungen des Magnetfeldes des Transportstroms

Neben den in den vorangegangenen Unterkapiteln beschriebenen Transportstrommessungen, die zur resistiven Bestimmung des kritischen Stromes dienen, kann auch das durch den Transportstrom verursachte Magnetfeld mit Hilfe der Hallsonden aufgezeichnet werden.

Der Ablauf der Messung ist nahezu identisch mit dem Schleifkontaktverfahren. Gleichzeitig mit dem über die Schleifkontakte aufgenommenen Spannungsverlauf werden auch die Hallsonden ausgelesen. Ein Vergleich des über die Schleifkontakte bestimmten kritischen Strom mit dem Magnetfeld des Transportstroms ist dadurch möglich. Diese Messungen werden in den nachfolgenden Kapiteln diskutiert.

Bei einer weiteren Untersuchungsmethode wird bei ruhendem Bandleiter mit einer Hallsondenkette das Feldprofil des Transportstroms aufgenommen und gleichzeitig die Strom-Spannungskennlinie gemessen. Dies geschieht mit den Schleifkontakten direkt über der Hallsonde (Abb. 24). So kann das Magnetfeldprofil quer zum Bandleiter (y -Richtung) in Abhängigkeit vom Transportstrom mit der U - I Kennlinie in Beziehung gebracht werden. Dieses Meßverfahren wurde allerdings in der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt, daher soll nur kurz eine exemplarische Messung diskutiert werden. -Solche Messungen können zusätzlich zur Untersuchung der Längshomogenität Informationen über die Stromverteilung im Leiter liefern. Es ist z.B. möglich, das Magnetfeldprofil des Bandleiters beim Durchlaufen einer Periode eines Wechselstroms zu betrachten. Aus dem Magnetfeldprofil lassen sich dann Rückschlüsse auf die Stromverteilung im Inneren des Leiters ziehen.

In Abb. 31 (links) sind die durch den Transportstrom verursachten Magnetfeldprofile beim Durchlaufen eines Zyklus ($I = -20 \text{ A} \rightarrow I = 20 \text{ A} \rightarrow I = -20 \text{ A}$) abgebildet. Die Feldprofile, die sich beim Erhöhen ($I = -20 \text{ A} \rightarrow I = 20 \text{ A}$) des Transportstroms ergeben, sind schwarz abgebildet und grau die bei Erniedrigung ($I = 20 \text{ A} \rightarrow I = -20 \text{ A}$) des Transportstroms. In Abb. 31 (rechts) sind die elektrischen Felder, die im Leiter bei den entsprechenden Magnetfeldprofilen vorliegen, auf der E - I Kennlinie dargestellt. Beim Durchlaufen eines vollständigen Zyklus ($I = -20 \text{ A} \rightarrow I = 20 \text{ A} \rightarrow I = -20 \text{ A}$) zeigen die Feldprofile hysteretisches Verhalten (Vergleich der grauen und schwarzen Meßkurven). Der Transportstrom verteilt sich nicht gleichmäßig über den Bandleiter, sondern die Stromverteilung im Supraleiter hängt von der Vorgeschichte des Transportstromes ab.

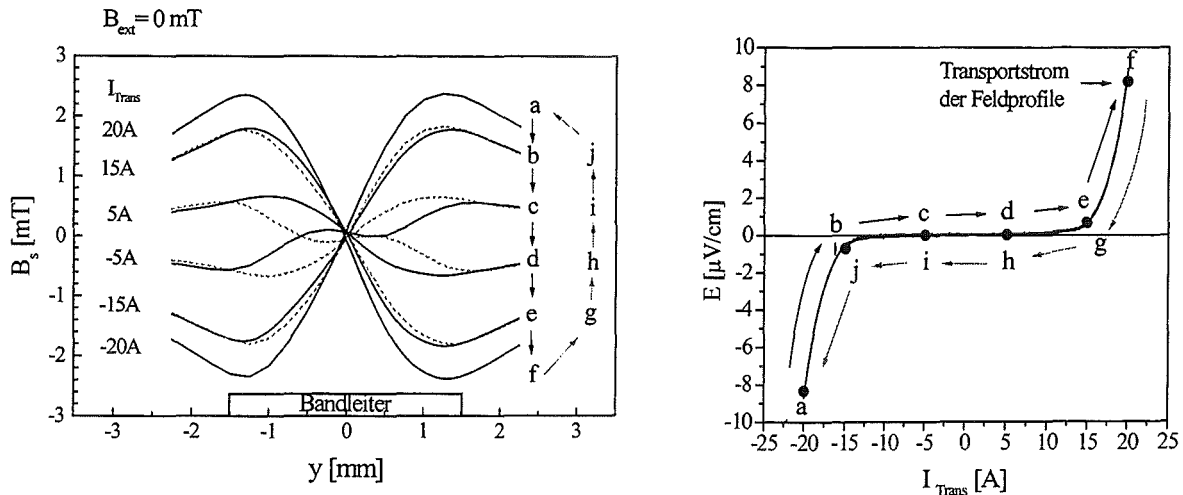


Abb. 31:

links: Magnetfeldprofile bei verschiedenen Transportströmen; Zyklus $-20A \rightarrow +20A \rightarrow -20A$,
entsprechend $a \rightarrow b \rightarrow \dots \rightarrow f \rightarrow g \rightarrow \dots \rightarrow a$

rechts: In der E-I Kennlinie sind mit einem Punkt die Transportströme der in der linken Abbildungen
gezeigten Feldprofile markiert. Die Pfeile geben die Richtung der Transportstromänderung der links
abgebildeten Feldprofile wieder.

Mit einem kritischen Zustandsmodell [50] kann das hysteretische Verhalten des Magnetfeldes beschrieben werden. Dieses Modell beschreibt die Verteilung des Transportstroms im Supraleiter beim Durchlaufen eines Zyklus. Solche Messungen sind z.B. von Oota et al. [51] und von Chesneau et al. [52] durchgeführt worden. Durch den Vergleich des gemessenen Feldprofils mit dem aus einem kritischen Zustandsmodell berechneten Feldprofil kann auf die Anwendbarkeit des Modells geschlossen werden, insbesondere kann der Einfluß der Geometrie und der Filamentisierung des Bandleiters untersucht werden [53,54]. Diese Informationen liefern einen zusätzlichen Beitrag zur Interpretation der Wechselstromverluste eines Bandleiters, da sie auf der Grundlage eines kritischen Zustandsmodells interpretiert werden [55,56].

Beim Erreichen des kritischen Stromes schließen sich die Hysteresen des Magnetfeldes (Kurven b und j Abb. 31, links). Nach dem kritischen Zustandsmodell ist der Supraleiter gleichmäßig vom Transportstrom durchflossen. In diesem Fall kann von einem bekannten Stromsystem ohne Abhängigkeit von einer Vorgeschichte ausgegangen werden und die gemessenen Feldprofile können mit berechneten verglichen werden. Abbildung 33 zeigt das Feldprofil für einen Transportstrom von 20 A, der oberhalb des durch das elektrische Feldkriterium von 1μ V/cm definierten kritischen Stromes liegt. In Abb. 32 ist das Schliffbild der Querschnittsfläche des Bandleiters dargestellt. Betrachtet man das gemessene Feldprofil (Abb. 33), so sind in ihm keine Strukturen, die auf die Filamentisierung des Leiters

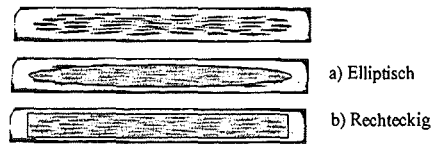


Abb. 32: Querschnittsfläche des Bandleiters mit den zur Berechnung zugrundegelegten Flächen

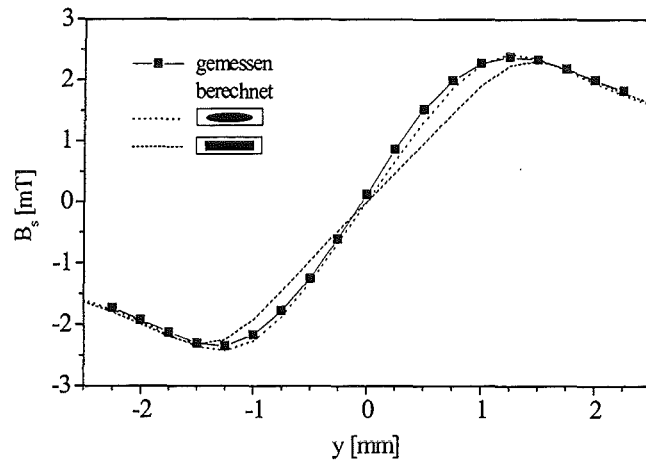


Abb. 33: Vergleich zweier berechneter und eines gemessenen Feldprofils bei einem Transportstrom von $I=-20$ A

zurückzuführen sind, sichtbar. Zur Beschreibung des supraleitenden Querschnittes wird daher die Filamentverteilung nicht berücksichtigt. Für die Rechnung werden die in Abb. 32 a) und b) eingezeichneten Flächen verwendet und mit einer konstanten Stromdichte belegt. Der gesamte Strom, der durch die zugrundegelegten Flächen fließt, ist der vorgegebene Transportstrom von $I=20$ A. Aus Abb. 33 ist ersichtlich, daß der Bandleiter in guter Übereinstimmung durch eine elliptische Querschnittsfläche beschrieben werden kann. Wird eine rechteckige Fläche angenommen, so ergeben sich deutliche Abweichungen zwischen dem berechneten und dem gemessenen Feldprofil. Aus einer Messung dieser Art läßt sich auf die Geometrie der vom Strom durchflossenen Fläche des Supraleiters schließen. Die Geometrie dieser Fläche wirkt sich auf die Abhängigkeit der Wechselstromverluste von der Amplitude des Transportstroms aus [50]. Sie zeigt sich in vergleichbarer Weise in der Abhängigkeit der Wechselfeldverluste von der Amplitude des äußeren Magnetfeldes [57]. Neben der Untersuchung der Längshomogenität bieten die dargestellten Messungen weitere Informationen zur Charakterisierung der Bandleiter. Ausführlichere Diskussionen sind in den angegebenen Literaturverweisen zu finden [50,51,52,53,54].

6 Ergebnisse und Diskussion

Im ersten Unterkapitel dieses Abschnitts werden Ergebnisse an Kurzproben (maximale Länge 0,5 m) diskutiert, um die Funktionsweise der Apparatur zu verdeutlichen (Kap. 6.1).

Im zweiten Unterkapitel (Kap. 6.2) erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse von langen Bandleitern bis zu einer Länge von ca. 16 m, wobei auf die Defektstruktur der Bandleiter eingegangen wird.

6.1 Induktive Messungen an kurzen Bandleitern

6.1.1 Induktive Messungen an kurzen Bandleitern mit unverdrillten Filamenten

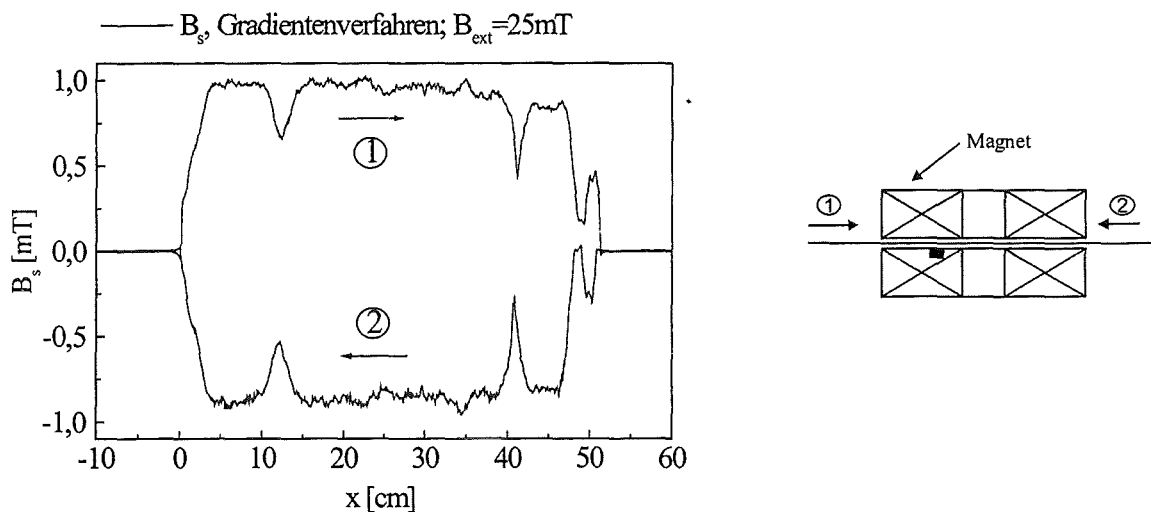


Abb. 34: Magnetfeld der induzierten Abschirmströme mit dem Gradientenverfahren über der Mitte des Leiters bestimmt, aufgetragen für entgegengesetzte Durchzugsrichtungen des Leiters durch den Magneten

Abbildung 34 zeigt das Ergebnis einer mit dem Gradientenverfahren durchgeführten Messung. Der Leiter ist aus 55 Filamenten aufgebaut. Aufgetragen ist das Magnetfeld der induzierten Abschirmströme für entgegengesetzte Durchzugsrichtungen durch den Magneten. Der Magnetfeldverlauf wurde über der Mitte des Bandleiters in Längs (x)-Richtung bestimmt.

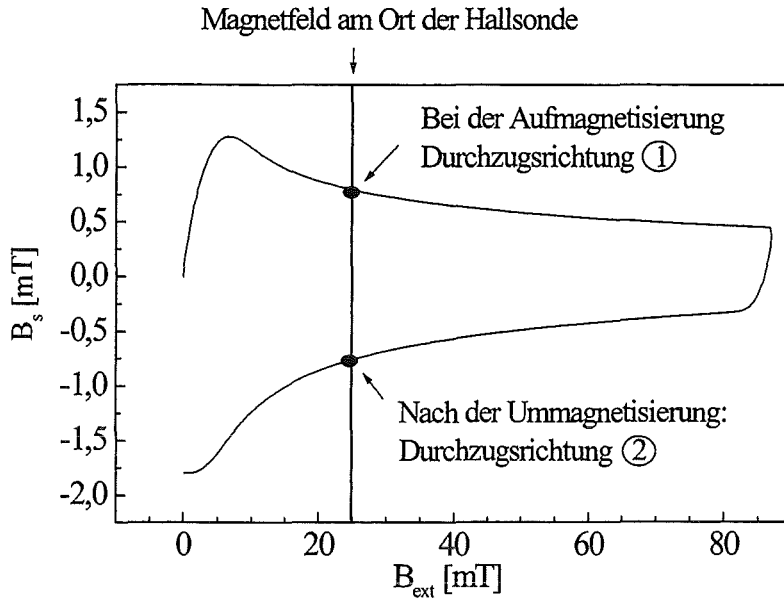


Abb. 35: Magnetfeldhysterese der induzierten Abschirmströme

Abbildung 34 zeigt einen spiegelsymmetrischen Verlauf des Magnetfeldes entlang des Leiters. Wird die mit ① gekennzeichnete Durchzugsrichtung gewählt, erreicht der Leiter die Hallsonde bevor er die Mitte des Magneten durchlaufen hat. Das Magnetfeld der induzierten Abschirmströme wird bei der Aufmagnetisierung des Leiters bestimmt. Es erfolgt eine Messung auf dem oberen Ast der in Abb. 35 dargestellten Magnetfeldhysterese. In der entgegengesetzten Durchzugsrichtung ② passiert der Bandleiter die Hallsonde, nachdem er die Mitte des Magneten durchlaufen hat. Dann wird von ihm auf seinem weiteren Weg ein sich verringerndes Magnetfeld wahrgenommen. Nach dem Passieren der Mitte fand ein Ummagnetisieren des Leiters statt. Man erhält das Magnetfeld auf dem unteren Ast der Magnetfeldhysterese (Abb. 35). Der spiegelsymmetrische Feldverlauf in Abb. 34 läßt auf einen vernachlässigbar kleinen reversiblen Magnetisierungsbeitrag schließen.

Bei den Positionen $x = 10$ cm und $x = 40$ cm sind deutliche Einbrüche im Magnetfeld des Leiters zu erkennen (Abb. 34). Sie deuten auf eine Änderung der Stromtragfähigkeit hin. In welcher Weise diese Einbrüche des Magnetfeldes B_s auf tatsächliche Veränderungen der Stromtragfähigkeit zurückzuführen sind, zeigt eine vergleichende resistive Bestimmung des kritischen Stromes mit dem Multikontaktverfahren (Abb. 36). Die Auftragung erfolgt durch die geeignete Wahl eines Skalierungsfaktors zwischen dem Magnetfeld $B_s(x)$ und dem kritischen Strom $I_c(x)$ derart, daß beide Messungen zur Deckung gebracht werden. Aus Abb. 36 ist eine sehr gute örtliche Übereinstimmung zwischen dem Magnetfeldverlauf des Leiters und dem über die resistive Messung erhaltenen kritischen Strom $I_c(x)$ ersichtlich. Das

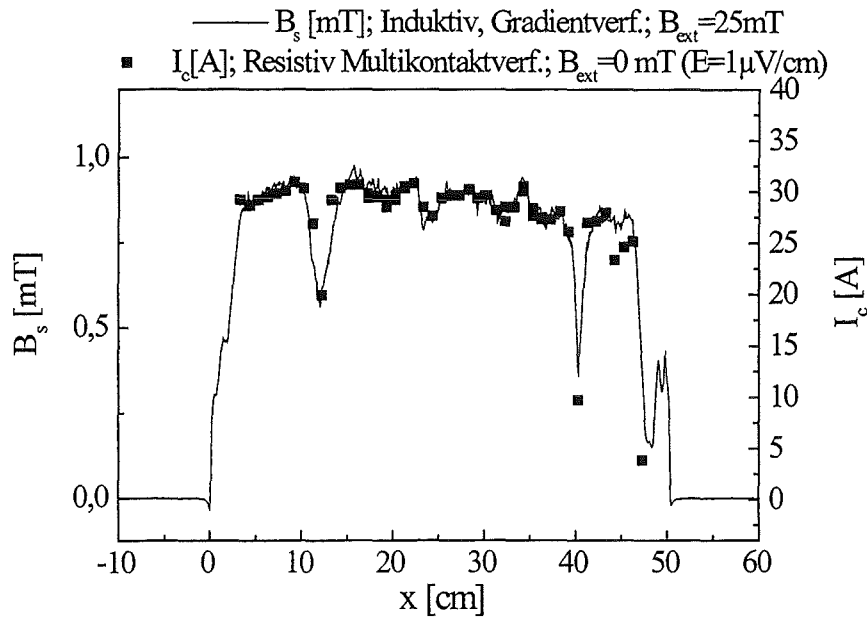


Abb. 36: Vergleich des Magnetfeldes der induzierten Abschirmströme und des kritischen Stromes

Magnetfeld der induzierten Abschirmströme $B_s(x)$ entlang des Leiters ist daher zur Beurteilung der Transportstromeigenschaften und damit des kritischen Stromes geeignet. Das Magnetfeld des Leiters wird durch das auch für die Transportstromeigenschaften entscheidende Inter-Korn-Stromsystem bestimmt.

Die in Abb. 36 dargestellten Messungen fanden in unterschiedlichen Magnetfeldern statt. Die resistive Bestimmung des kritischen Stromes wurde ohne äußeres Magnetfeld durchgeführt. Bei der induktiven Messung lag ein Magnetfeld von $B_{\text{ext}} = 25 \text{ mT}$ vor. Die unterschiedlichen äußeren Magnetfelder scheinen keinen Einfluß auf das Stromsystem, im Bandleiter zu haben. Dies bestätigt, eine in Abb. 37 (links) wiedergegebene Abhängigkeit des induzierten Magnetfeldes von verschiedenen äußeren Magnetfeldern. Mit zunehmendem äußeren Magnetfeld nimmt das Magnetfeld der induzierten Abschirmströme ab. Dies ist auch zu erwarten, da der kritische Strom bei größerem äußeren Magnetfeld geringer ist. Der Verlauf des Magnetfeldes der induzierten Abschirmströme $B_s(x)$ bleibt jedoch unter Berücksichtigung der verringerten Stromtragfähigkeit bei allen äußeren Magnetfeldern vergleichbar. Die unterschiedlichen äußeren Magnetfelder führen zu keiner Änderung des Stromsystems im Supraleiter. Eine Granularität des Bandleiters tritt in dem in dieser Arbeit zugänglichen Magnetfeldbereich nicht auf bzw. beeinträchtigt die Beurteilung der Stromtragfähigkeit aus dem Magnetfeld des Leiters $B_s(x)$ nicht.

Der Einfluß der Durchzugsgeschwindigkeit und damit der Feldänderungsrate dB/dt soll anhand der in Abb. 37 (rechts) dargestellten Messung diskutiert werden. Mit zunehmender

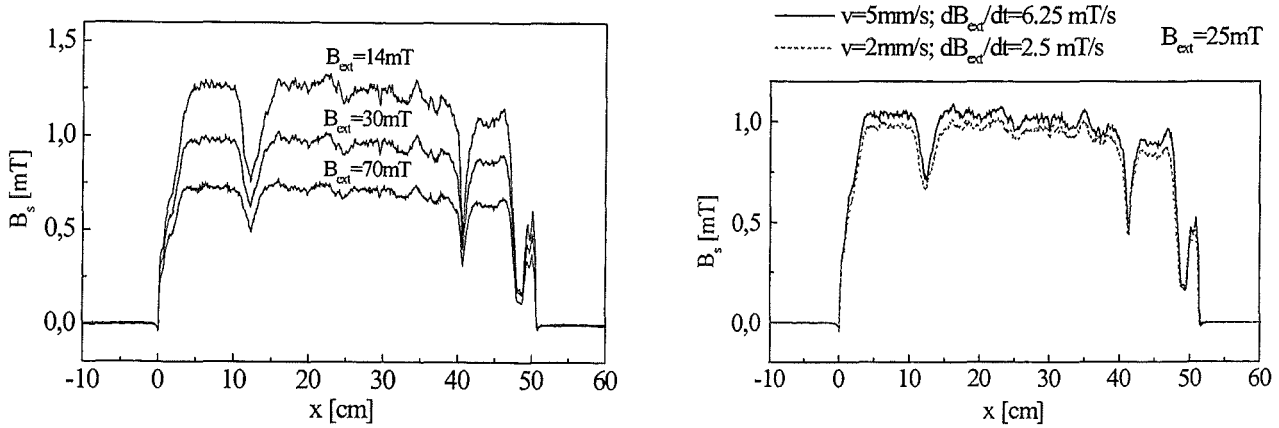


Abb. 37: Magnetfeldverlauf für unterschiedliche
links: äußere Magnetfelder **rechts: Durchzugsgeschwindigkeiten**

Geschwindigkeit wird die Feldänderungsrate $dB/dt = v \cdot dB/dx_{\text{Magnet}}$ höher. Hieraus resultiert ein größeres induziertes elektrisches Feld. Entsprechend der Strom-Spannungskennlinie des Supraleiters ergeben sich größere Stromdichten im Supraleiter, die wie aus Abb. 37 (rechts) ersichtlich, zu einem größeren Magnetfeld führen.

Die Untersuchten Bandleiter sind aus 55 Filamenten aufgebaut (Abb. 3). Die Auswirkungen der Filamentstruktur des Leiters auf das Magnetfeld der induzierten Abschirmströme B_s soll anhand des in Abb. 38 dargestellten Feldprofils erläutert werden.

Abbildung 38 zeigt das mit dem Gradientenverfahren gemessene, durch die Abschirmströme bei einem äußeren Magnetfeld von $B_{\text{ext}} = 30 \text{ mT}$ verursachte Feldprofil $B_s(y)$ (quer zum Bandleiter). Verglichen wird das gemessene Feldprofil mit berechneten Profilen.

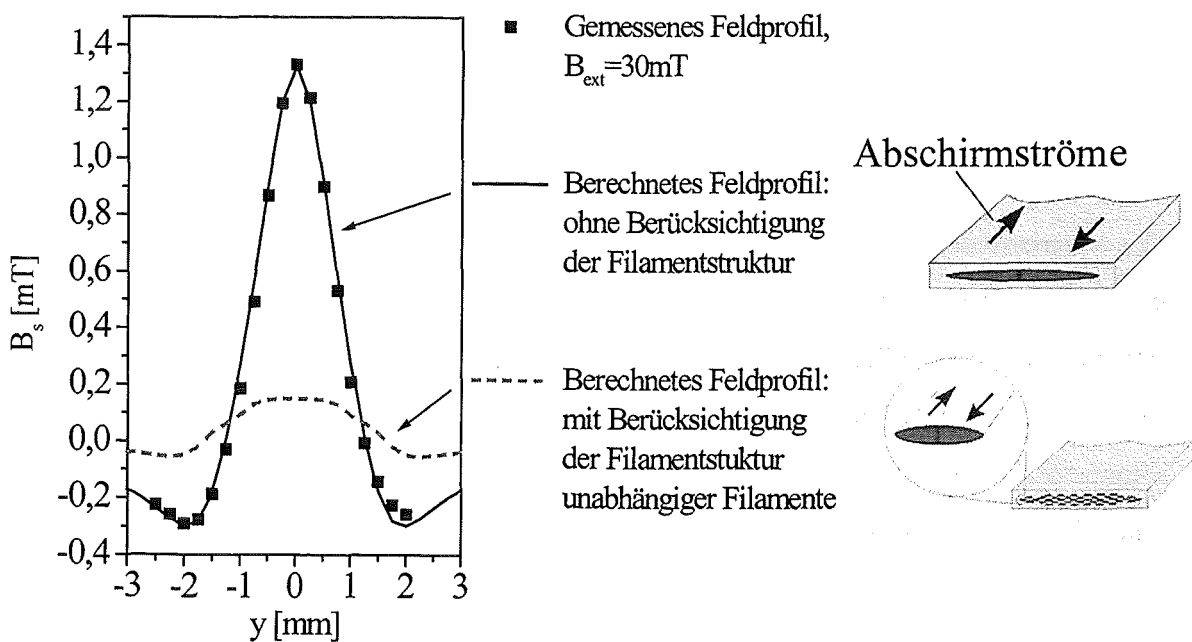


Abb. 38: Vergleich berechneter Feldprofile mit dem gemessenen Profil

Berechnet wurde das Feldprofil unabhängiger Filamente und vollständig gekoppelter Filamente. Im Fall unabhängiger Filamente wurde in jedem Filament ein geschlossenes Abschirmstromsystem angenommen. Im zweiten Fall der gekoppelten Filamente liegt ein einheitliches, alle Filamente umfassendes Abschirmstromsystem vor. Eine Berücksichtigung der Filamentstruktur fand nicht statt. Beiden Rechnungen liegt ein kritischer Strom des Bandleiters von $I_c = 10 \text{ A}$ zugrunde. Dieser Strom liegt nur geringfügig unter dem durch eine resistive Messung bestimmten kritischen Strom von $I_c = 11 \text{ A}$ bei einem äußeren Magnetfeld von $B_{\text{ext}} = 30 \text{ mT}$. Die verschiedenen Feldprofile resultieren also nur aus den unterschiedlichen Abschirmstromsystemen und nicht aus einer geänderten Stromtragfähigkeit. Abbildung 38 zeigt, daß sich eine gute Übereinstimmung zwischen dem berechneten Feldprofil ohne Berücksichtigung der Filamentstruktur des Leiters und dem gemessenem Feldprofil ergibt. Das Feldprofil für unabhängige Filamente liegt deutlich unter dem gemessenem Feldprofil.

Der Leiter verhält sich wie ein monofilamentärer Leiter. Für dieses Verhalten können zwei Gründe verantwortlich sein. Es kann ein direkter Kontakt der Filamente untereinander bestehen. Die Filamente sind nicht durch die Ag-Hülle voneinander getrennt, sondern es existieren Verbindungen zwischen ihnen [58]. Zum anderen können die zwischen den Filamenten induzierten Ströme (Kap. 2.3.2) die Filamente koppeln. In beiden Fällen wird die Filamentisierung unwirksam. Der Leiter erscheint wie ein monofilamentärer Leiter. Abbildung 39 zeigt ein Schliffbild der Querschnittsfläche des Leiters. Dort sind direkte Verbindungen zwischen einzelnen Filamenten zu erkennen, insbesondere im inneren Bereich. Ein Kontakt der gesamten Filamentstruktur untereinander läßt sich nicht erkennen.

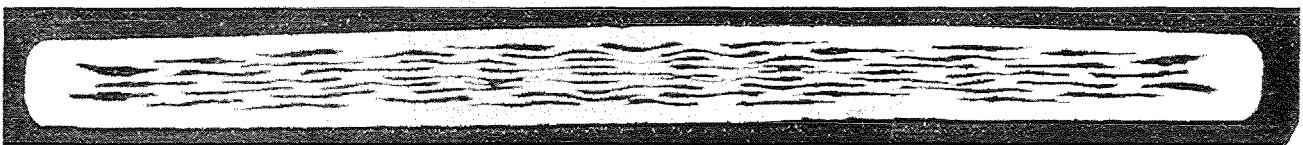
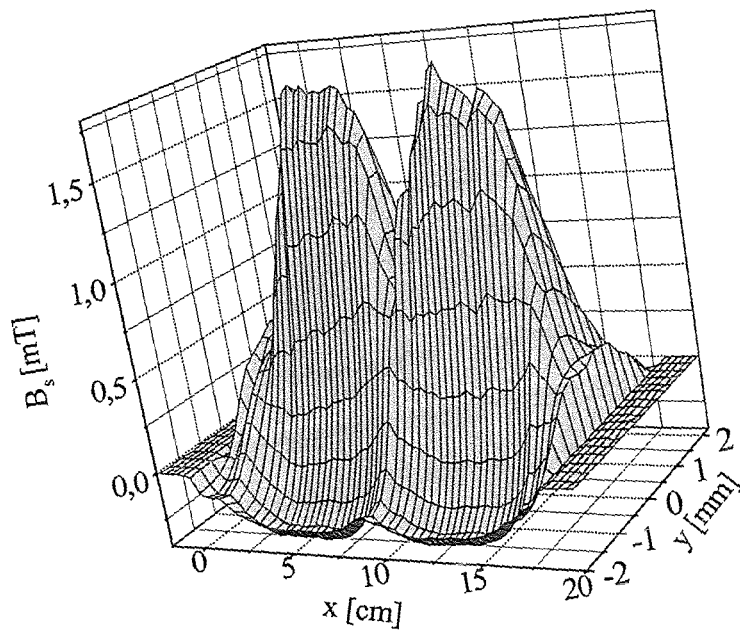
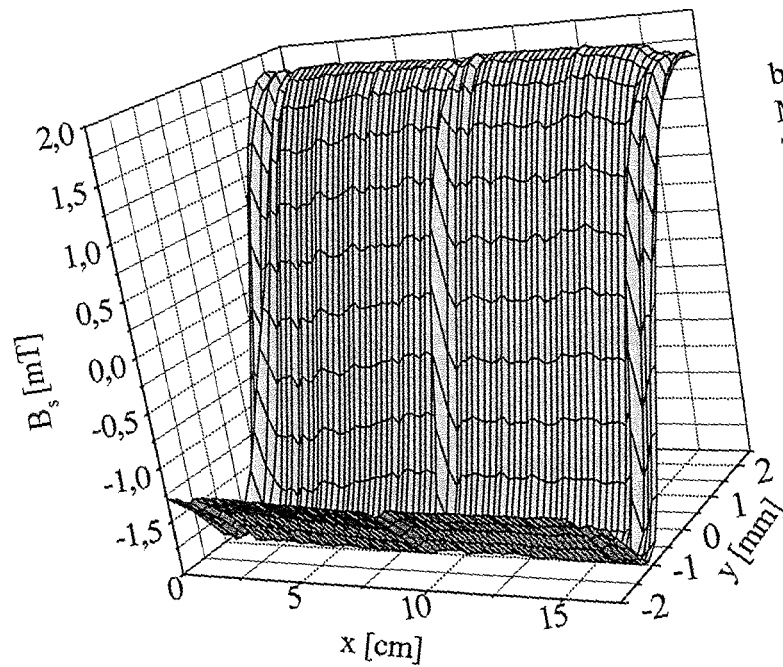


Abb. 39: Schliffbild der Querschnittsfläche des Bandleiters

Welchen Beitrag die zwischen den Filamenten induzierten Ströme liefern um den Bandleiter wie einen monofilamentären Leiter erscheinen zu lassen, soll anhand der Stromumverteilung die an einem Defekt auftritt näher erläutert werden. Die Stromumverteilung ist davon abhängig, ob ein eingepprägter Transportstrom oder ein Abschirmstrom vorliegt.



a)
Magnetfeldprofil
Gradientenverfahren
 $B_{\text{ext}} = 15 \text{ mT}$



b)
Magnetfeldprofil
Transportstrom
 $I = 17 \text{ A}$
 $B_{\text{ext}} = 15 \text{ mT}$

Abb. 40: Magnetfeldverlauf
a) Gradientenverfahren
b) Transportstrom

Abbildung 40 a) zeigt das mit dem Gradientenverfahren ermittelte Feldprofil der induzierten Abschirmströme. Am Ort $x = 10$ cm ist ein deutlicher Einbruch im Magnetfeld des Bandleiters zu beobachten. Abbildung 40 b) zeigt das durch einen Transportstrom von $I = 17$ A ($B_{\text{ext}} = 15$ mT) verursachte Feldprofil. Am Ort $x = 10$ cm ist im Verlauf des Feldes keine ebenso deutliche Veränderung zu erkennen. An diesem Ort zeigt sich der Defekt nur durch eine geringe Verzerrung im Feldprofil. Die räumliche Ausdehnung ist im Vergleich mit der durch das Gradientenverfahren ermittelten Abnahme des Magnetfeldes kleiner. Der Defekt tritt im Magnetfeld der induzierten Abschirmströme deutlicher hervor.

Hier stellt sich die Frage, welche Auswirkungen ein Defekt auf das Stromsystem und damit auf das Magnetfeld des Bandleiters hat. Die Länge, auf der die Stromumverteilung auftritt, bestimmt die Ausdehnung, mit der sich der Defekt im Magnetfeld des Bandleiters zeigt. Die Abbildungen 41 und 42 zeigen das durch den Transportstrom (Abb. 41) verursachte Magnetfeld und das mit dem Gradientenverfahren ermittelte Magnetfeld der induzierten Abschirmströme (Abb. 42) über der Mitte des Bandleiters ($y = 0$). Verglichen wird der Feldverlauf jeweils mit dem über Schleifkontakte ermittelten kritischen Strom $I_c(x)$.

Zuerst soll auf das Magnetfeld, verursacht durch einen Transportstrom, eingegangen werden. Wird dem Leiter ein Transportstrom aufgeprägt, dann muß durch jede Querschnittsfläche des Leiters der gleiche Strom fließen. An einem Defekt im Supraleiter, der die Stromtragfähigkeit verkleinert, findet ein Stromtransfer vom Supraleiter in die Ag-Hülle statt. Dies wird durch ein entsprechend hohes elektrisches Feld ermöglicht. Durch die Konstanz des Stromes ist auch keine deutliche Veränderung in dem in Abb. 40 b) dargestellten Magnetfeldprofil zu sehen. Es sind nur Verzerrungen bzw. Verschiebungen des Feldprofils zu erwarten.

Die räumliche Ausdehnung der Verzerrung ist einerseits durch die Größe des Defektes bestimmt, und zum anderen durch die charakteristische Länge (in x -Richtung) für den Stromtransfer zwischen Supraleiter und Ag-Hülle. Polák et al. [47] bestimmten die Stromtransferlänge für Bi-2223 Bandleiter bei $T = 77$ K. Sie erhielten einen Wert von ca. 0,3 mm. Der sehr kleine Wert der Stromtransferlänge bedeutet, daß die räumliche Ausdehnung der Änderung im Magnetfeld im wesentlichen durch die Größe des Defektes festgelegt ist. Dies wird im Vergleich des Magnetfeldes, verursacht durch einen Transportstrom, mit dem durch eine Schleifkontaktmessung bestimmten kritischen Strom deutlich (Abb. 41). Im kritischen Strom sind unterhalb von $x = 10$ cm zwei nahe beieinander liegende Defekte sichtbar. Der linke, der zu einem stärkeren Einbruch des kritischen Stroms führt, bewirkt eine deutliche Änderung des Magnetfeldverlaufs. Die Länge der Veränderung

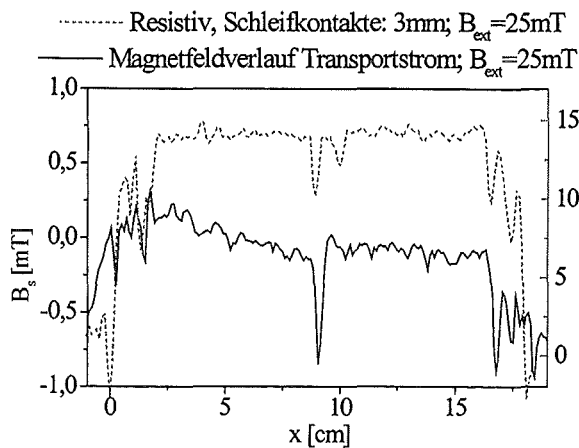


Abb. 41: Durch einen Transportstrom verursachtes Magnetfeld über der Mitte des Bandleiters im Vergleich mit dem über Schleifkontakte bestimmten kritischen Strom

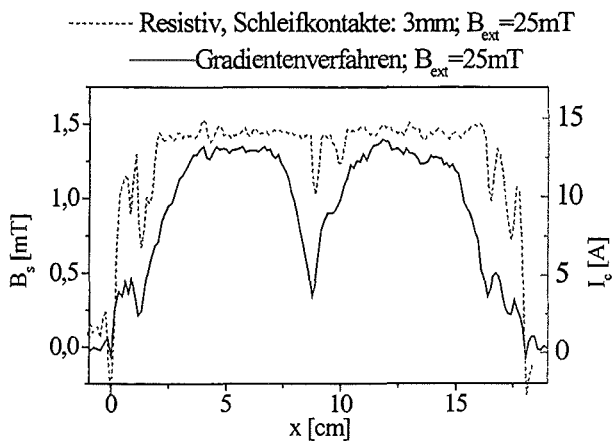


Abb. 42: Mit dem Gradientenverfahren ermitteltes Magnetfeld über der Mitte des Bandleiters im Vergleich mit dem über Schleifkontakte bestimmten kritischen Strom

im Magnetfeld ist dabei in guter Übereinstimmung mit dem resistiv ermittelten kritischen Strom (3 mm Abstand der Schleifkontakte) und gibt die obere Grenze der Ausdehnung des Defektes an.

Wird das mit dem Gradientenverfahren bestimmte Magnetfeld des Leiters betrachtet (Abb. 42) und mit dem resistiv bestimmten kritischen Strom verglichen, so ist ersichtlich, daß die Länge des Einbruchs im Magnetfeld deutlich größer ist als die Ausdehnung des Defektes im Bandleiter. Der Defekt führt offenbar zu einer ausgedehnteren Veränderungen im System der Abschirmströme. Dies soll anhand eines einfachen Modells erläutert werden. Hierfür wird die Filamentstruktur des Leiters zunächst nicht in Betracht gezogen, da gemäß Abb. 38 der Leiter sich wie ein monofilamentärer Leiter verhält. Abbildung 43 a) zeigt das induzierte Abschirmstromsystem. In Abbildung 43 b) wird ein Defekt angenommen, der den Stromfluß entlang des Leiters (x-Richtung) unterbricht. Ein solcher Defekt könnte z.B. ein Riß quer zum Bandleiter sein. Das Abschirmstromsystem muß sich nicht über den Defekt schließen. Liegt eine Leitfähigkeit quer zum Leiter (y-Richtung) vor, so kann sich das Stromsystem über diesen Weg schließen. Der Riß führt zur Ausbildung von zwei abgeschlossenen Abschirmstromsystemen. Die Ausdehnung der an dem Defekt auftretenden Stromumverteilung, ist dabei von der Leitfähigkeit bzw. der Stromtragfähigkeit quer zum Leiter abhängig. Ist sie nur gering, so ist eine entsprechend große Ausdehnung des Bereiches nötig, um den Strom quer zum Leiter zu transportieren (Abb. 43 c)). Wird das Magnetfeld entlang des Leiters gemessen, dann sind Änderungen bzw. Einbrüche zu erwarten, deren räumliche Ausdehnung in etwa der Länge entspricht, die zum Stromtransport quer zum Leiter benötigt wird.

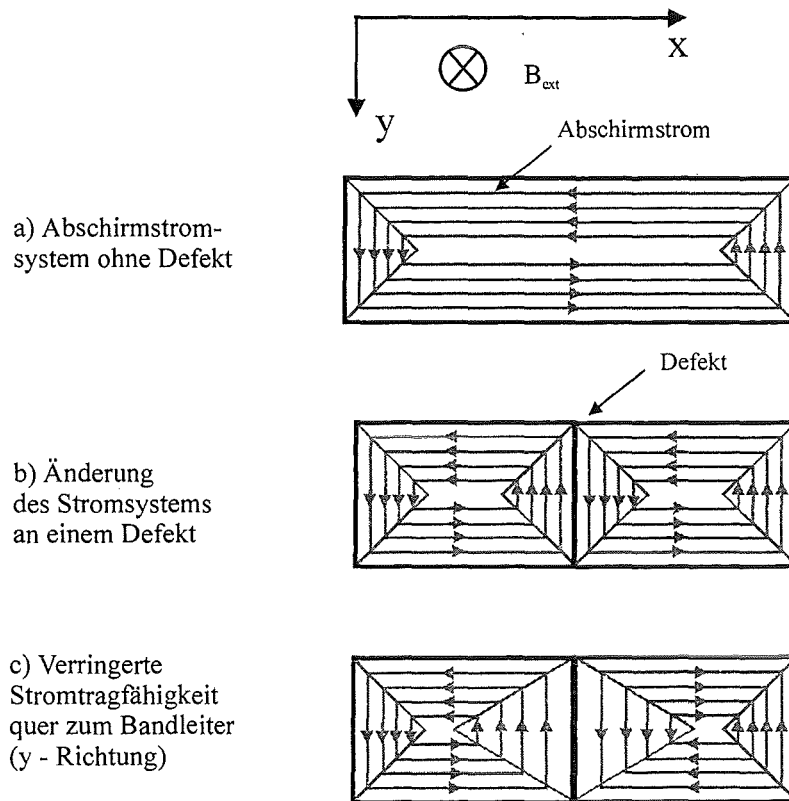


Abb. 43: Änderung des Stromsystems an einem Defekt

Hierbei zeigt sich der Einfluß der Filamentisierung des Bandleiters. Sie beeinflusst die Länge über die der Strom quer zum Leiter fließt, und damit die Ausdehnung, längs derer ein Defekt im Magnetfeldverlauf sichtbar wird. Diese Länge entspricht in etwa der Kopplungslänge ℓ_c , wenn der Stromtransport durch die über die Ag-Hülle induzierten Ströme (Kap. 2.3.2) verursacht wird. Die Kopplungslänge ist ein Maß für die Leiterlänge, die zum Stromtransport zwischen den Filamenten und damit quer zum Leiter benötigt wird. Eine Abschätzung soll mit der in Kap. 2.3.2 (Gl. 4) erhaltenen Beziehung erfolgen:

$$\ell_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_m \cdot j_c \cdot d}{B}} \quad \text{Gl. 14}$$

Die Änderungsrate des äußeren Magnetfeldes für die in Abb. 42 aufgeführte Messung beträgt $dB/dt = 2 \text{ mT/s}$. Der spezifische Widerstand der Ag-Hülle ist $\rho_m = 0,25 \mu\Omega\text{cm}$, $d = 0,3 \text{ mm}$ ist die Breite der Filamente. Die Abbildungen 41 und 42 zeigen, daß im Magnetfeld $B_{\text{ext}} = 30 \text{ mT}$ von einem kritischen Strom $I_c = 14 \text{ A}$ ausgegangen werden kann. Die gesamte Filamentfläche des Leiters beträgt $0,27 \text{ mm}^2$. Daraus resultiert eine kritische Stromdichte von $j_c = 5,3 \text{ kA/cm}^2$.

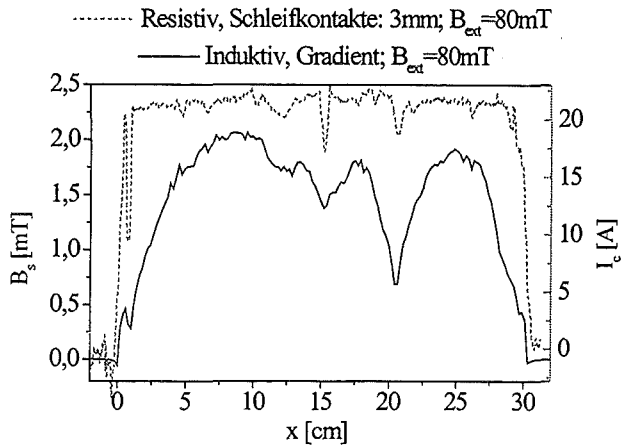


Abb. 44: Magnetfeldverlauf, bestimmt mit dem Gradientenverfahren, im Vergleich mit dem kritischen Strom

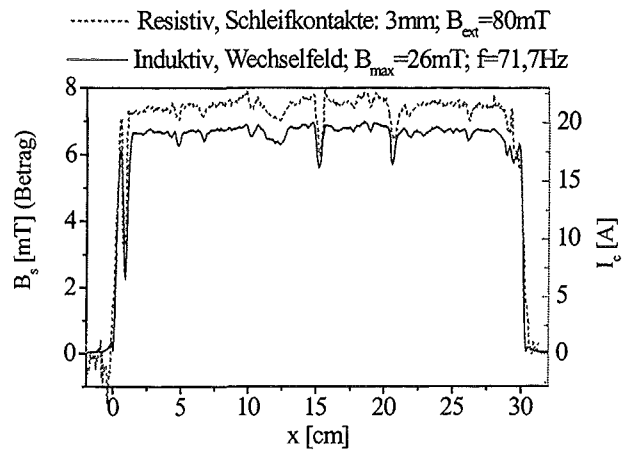


Abb. 45: Magnetfeldverlauf, bestimmt mit dem Wechselfeldverfahren, im Vergleich mit dem kritischen Strom

Für die durch Gl. 14 gegebene Kopplungslänge erhält man damit 20 cm. Betrachtet man die gemessene Ausdehnung der an einem Defekt auftretende Magnetfeldänderung $B_s(x)$ und damit die Ausdehnung der Stromumverteilung, stellt man fest, daß diese im Bereich von ca. 3 cm liegt. Sie ist deutlich kleiner als die Abschätzung der Kopplungslänge ℓ_c . Damit ist anzunehmen, daß bei der niedrigen Feldänderungsrate des äußeren Magnetfeldes ein großer Teil des Stromtransports quer zum Leiter über direkte Verbindungen zwischen den Filamenten erfolgt.

Wird die Änderungsrate des äußeren Magnetfeldes erhöht, so kann der Strom über immer kleiner werdende Längen quer zum Leiter fließen. Die Längen, mit denen sich der Defekt im Magnetfeldverlauf $B_s(x)$ abzeichnet, sollten deutlich kleiner werden, da das große zwischen den Filamenten induzierte elektrische Feld einen Stromtransport über kurze Strecken erlaubt.

Abbildung 44 zeigt das mit dem Gradientenverfahren bestimmte Magnetfeld des Leiters $B_s(x)$ im Vergleich mit dem über eine Schleifkontaktmessung bestimmten kritischen Strom. Deutlich ist die längere Ausdehnung des Defektes im Magnetfeldverlauf zu sehen.

Abbildung 45 zeigt eine Messung mit dem Wechselfeldverfahren. Aufgetragen ist mit B_s der Betrag der Fundamental des Magnetfeldes der induzierten Abschirmströme. Die Feldänderungsrate beträgt bei dieser Messung $\frac{dB_{ext}}{dt} = \omega \cdot B_{max} = 12 \text{ T/s}$ und ist erheblich größer als die Änderungsrate von $\frac{dB_{ext}}{dt} = 12 \text{ mT/s}$ im Fall der Messung mit dem Gradientenverfahren. Die große Feldänderungsrate erlaubt einen Stromtransport quer zum Leiter über kurze Strecken. Die berechnete Kopplungslänge beträgt in diesem Fall nur $\ell_c = 3 \text{ mm}$. Die an den Defekten auftretenden Schwankungen des Magnetfeldes haben daher eine räumlich kleinere Ausdehnung. In Abb. 45 ist deutlich zu sehen, daß der resistiv

ermittelte Verlauf des kritischen Stromes bei der Messung mit dem Wechselfeldverfahren nahezu exakt wiedergeben wird.

6.1.2 Induktive Messungen an kurzen Bandleitern mit verdrehten

Filamenten

In diesem Unterkapitel werden Magnetfeldverläufe $B_s(x)$ von Bandleitern mit einer Verdrehung („twist“) der Filamente diskutiert. Die Verdrehung bewirkt eine Verkleinerung der zwischen den Filamenten eingeschlossenen, vom magnetischen Fluß durchsetzten Fläche. Wächst sie bei unverdrehten Bandleitern mit der Länge des Bandleiters an, hebt sich im Fall des verdrehten Bandleiters der zwischen ihnen induzierte magnetische Fluß innerhalb einer Periode der Verdrehung auf. Das Verdrehen soll die Kopplungströme zwischen den Filamenten unterdrücken. Ein Bandleiter mit der Verdrehungsperiode („twist-Länge“) ℓ_p ist -vereinfacht ausgedrückt- einem „zerhackten“ Bandleiter mit unverdrehten Filamenten der Länge $\ell_p/2$ in vielen Eigenschaften äquivalent. Ist die Verdrehungslänge deutlich kleiner als die Kopplungslänge ($\ell_p \ll \ell_c$), können die Filamente als unabhängig, d.h. entkoppelt angesehen werden.

Abbildung 46 zeigt den mit dem Gradientenverfahren ermittelten Magnetfeldverlauf der induzierten Abschirmströme an einem Leiter mit 55 verdrehten Filamenten. Die Verdrehungslänge ℓ_p beträgt 12 mm, die Hülle besteht aus Ag. Verglichen wird der mit dem Gradientenverfahren ermittelte Feldverlauf $B_s(x)$ mit dem resistiv bestimmten kritischen Strom $I_c(x)$. Das Magnetfeld $B_s(x)$ zeigt zwei Auffälligkeiten.

Ein Unterschied zu den in dem vorherigen Unterkapitel 6.1.1 diskutierten Ergebnissen ist ein deutlich kleineres Magnetfeld des Leiters. Die mit dem Schleifkontaktverfahren bestimmte Stromtragfähigkeit ist aber nicht wesentlich geringer. Ein Vergleich mit dem in Abb. 42 dargestellten Magnetfeldverlauf $B_s(x)$ macht dies deutlich. Trotz vergleichbaren Stromtragfähigkeiten ist das in Abb.46 dargestellte Magnetfeld $B_s(x)$ erheblich kleiner. Dies läßt darauf schließen, daß die Filamente weitgehend isoliert (entkoppelt) voneinander sind. Es bildet sich also kein Stromsystem aus, welches alle Filamente umfaßt und dazu führt, daß der Leiter sich wie ein monofilamentärer Leiter verhält. Ein weitere Auffälligkeit ist, daß der Verlauf des Magnetfeldes entlang des Leiters starke Schwankungen aufweist. Sie sind, wie der Vergleich mit dem kritischen Strom zeigt, nicht mit Änderungen der Stromtragfähigkeit verknüpft (Abb. 46 links).

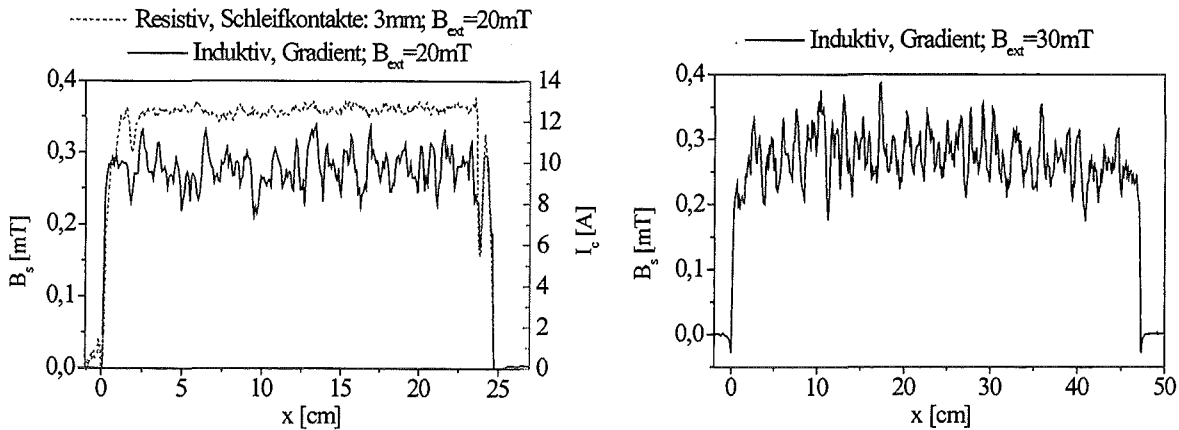


Abb. 46: Magnetfeldverlauf eines verdrehten Multifilament-Leiters, mit dem Gradientenverfahren bestimmt
links: im Vergleich mit dem kritischen Strom
rechts: Magnetfeldverlauf an einem längeren Leiter gleichen Typs

Die Schwankungen des Magnetfeldes müssen also aus Änderungen des Stromsystems entlang des Leiters resultieren. Hierauf weisen auch Beobachtungen des Feldverlaufs supraleitender Magnete hin, wie im folgenden kurz skizziert wird.

Räumliche Schwankungen des Magnetfeldes werden in supraleitenden Magneten von Teilchenbeschleunigern beobachtet [59,60]. Sie haben eine Periode, die der Verdrillungslänge der supraleitenden Kabelstränge entspricht [60,61]. Verursacht werden die Schwankungen durch Stromsysteme, welche durch eine entlang der verdrehten Kabelstränge auftretende Variation der Feldänderungsrate $\frac{dB_{ext}}{dt}$ induziert werden. Wird ein Bandleiter betrachtet dann müssen nicht Stromsystem über mehrere Kabelstränge betrachtet werden, sondern Stromsysteme über mehrere Filamente. In einem verdrehten Bandleiter erleichtern direkte Verbindungen der Filamente die Ausbildung eines solchen Stromsystems. Der Strom der über die Filamente fließt ist dann nur durch den kritischen Strom der supraleitenden Verbindung limitiert. Selbst kleine Änderungen bzw. Inhomogenitäten des magnetischen Flusses entlang des Bandleiters führen dazu, daß ein Stromsystem mit dem kritischen Strom der Verbindung über die Filamente zirkuliert. Die sich über vereinzelte Verbindungen schließenden Stromschleifen können im Zusammenwirken mit der Verdrillung der Filamente zu einem sehr inhomogen Stromsystem entlang des Leiters führen, so wie es in Abb. 46 beobachtet wurde, und im folgenden näher erläutert wird.

In Abbildung 47 werden zwei Filamente, die eine direkte Verbindung besitzen, über mehrere Halbperioden der Verdrillung betrachtet. Die Orientierung der Fläche, die von dem Filament Paar eingeschlossen wird, zeigt jede Halbperiode in die entgegengesetzte Richtung. Wird über

die direkten Verbindungen ein Stromsystem induziert, das sich über mehrere Halbperioden erstreckt, dann wechselt das resultierende Magnetfeld alle halbe Periode sein Vorzeichen (Abb. 47).

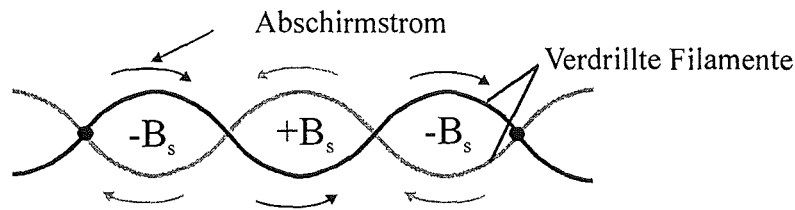


Abb. 47: Stromsystem und Magnetfeld zwischen zwei verdrehten Filamenten das sich über direkte Verbindungen schließt

Die resultierende Stromverteilung kann daher zu Schwankungen des Magnetfeldes entlang der Länge des Leiters führen. Eine Periodizität der Schwankungen des Magnetfeldes ist der Abb. 46 (links) und deutlicher der Abb. 46 (rechts) an einem längeren Leiter gleichen Typs zu entnehmen. Sie tritt mit Abständen von 12 mm bis 18 mm auf und liegt im Bereich der Verdrillungsperiode von 12 mm. Aufgrund der Unregelmäßigkeit der Verbindungen zwischen den Filamenten und in Anbetracht der Vielzahl der Filamente ist aber eine strenge Periodizität, wie sie in supraleitenden Magneten beobachtet wird, nicht unbedingt zu erwarten.

Die Schwankungen des Magnetfeldes deuten darauf hin, daß ein undefiniertes Stromsystem im Leiter vorliegt. Durch eine Kopplung der Filamente läßt sich ein definiertes Stromsystem im Leiter erreichen. Mit dem Wechselfeldverfahren kann die Kopplung der Filamente über die Ag-Hülle aufgrund der wesentlich höheren Feldänderungsrate erzwungen werden. Die Verdrillung und Filamentisierung des Leiters wird dadurch aufgehoben. Der Leiter verhält sich wie ein monofilamentärer Leiter. Abbildung 48 zeigt das mit dem Wechselfeldverfahren bestimmte Magnetfeld der induzierten Abschirmströme (Betrag der Fundamentalen) im Vergleich mit dem kritischen Strom. Deutlich zu sehen ist das größere Magnetfeld des Leiters im Vergleich mit dem aus dem Gradientenverfahren erhaltenen (Abb. 46). Dies weist darauf hin, daß ein alle Filamente umfassendes Abschirmstromsystem analog dem eines monofilamentären Leiters erzwungen wurde. Die Schwankungen des Magnetfeldes treten nicht mehr auf. Es ist eine gute Übereinstimmung mit dem kritischen Strom sichtbar. Das neunfach höhere Magnetfeld des Leiters in Abb. 48 deutet auf eine Änderung des Stromsystems im Bandleiter hin. Eine alleinige Zunahme der Stromdichte im Supraleiter aufgrund des größeren induzierten elektrischen Feldes läßt nur ein ca. dreifach höheres Magnetfeld erwarten.

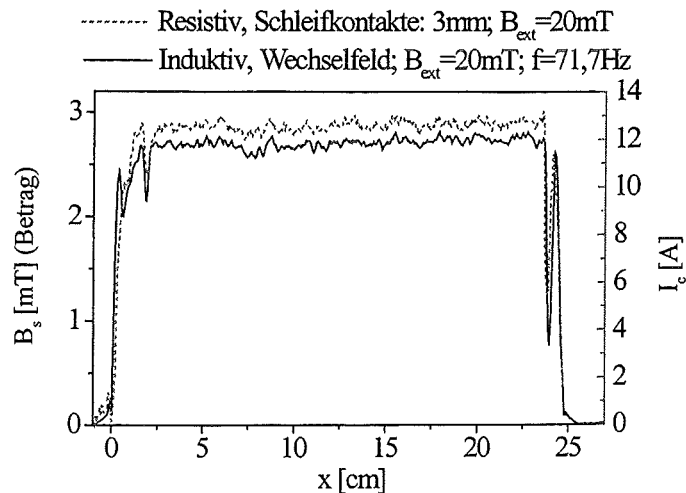


Abb. 48: Magnetfeldverlauf mit dem Wechselfeldverfahren bestimmt im Vergleich mit einer resistiven Messung.

Dies wird aus dem mit beiden Verfahren (Gradienten–Wechselfeldverfahren) ermittelten Magnetfeldverlauf $B_s(x)$ eines Bandleiters mit unverdrillten Filamenten (Abb. 44 und Abb. 45) ersichtlich. Bei unverdrillten Bandleitern kann in beiden Verfahren von vollständig gekoppelten Filamenten ausgegangen werden. Das im Vergleich zum Gradientenverfahren (Abb. 44) dreifach größere Magnetfeld B_s des Leiters im Fall des Wechselfeldverfahrens (Abb. 45) resultiert dann nur aus der höheren induzierten Stromdichte im Supraleiter und nicht aus der Änderung des Abschirmstromsystems.

Die Schwankungen des Magnetfeldes bei einem zu kleinen elektrischen Feld (Gradientenverfahren) führen dazu, daß Bereiche mit verminderter Stromtragfähigkeit im Magnetfeldverlauf kaum noch erkennbar sind. Abbildung 49 und Abbildung 50 zeigen die Magnetfeldverläufe der induzierten Abschirmströme eines verdrillten Leiters mit Defekten, bestimmt durch das Gradientenverfahren (Abb. 49) und das Wechselfeldverfahren (Abb. 50). Verglichen werden die Magnetfeldverläufe des Bandleiters mit dem über die Schleifkontakte erhaltenen kritischen Strom.

Im kritischen Strom des Leiters ist deutlich die verringerte Stromtragfähigkeit an den Stellen $x = 26, 28, 30$ cm sichtbar. Der mit dem Gradientenverfahren bestimmte Magnetfeldverlauf $B_s(x)$ zeigt keinen eindeutigen Einbruch an dieser Stelle. Erst wenn mit dem Wechselfeldverfahren eine Kopplung der Filamente erzwungen wird, zeichnen sich die Stellen verringerter Stromtragfähigkeit im Magnetfeldverlauf ab (Abb. 50). Die Messungen an Bandleitern mit verdrillten Filamenten zeigen, daß zur Beurteilung der Stromtragfähigkeit aus dem Magnetfeldverlauf entlang des Leiters ein definiertes Stromsystem im Leiter erzeugt

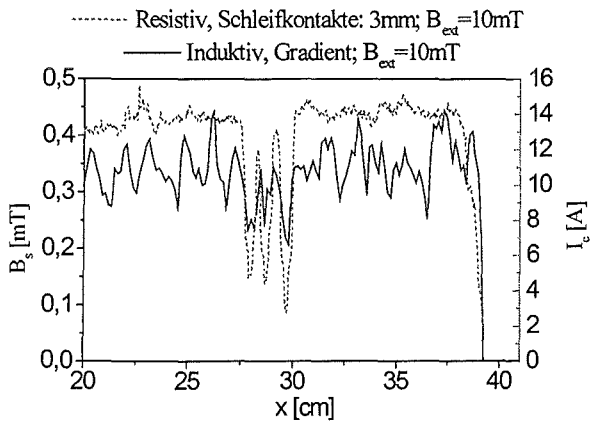


Abb. 49: Magnetfeldverlauf bestimmt mit dem Gradientenverfahren, im Vergleich mit dem resistiv bestimmten kritischen Strom.

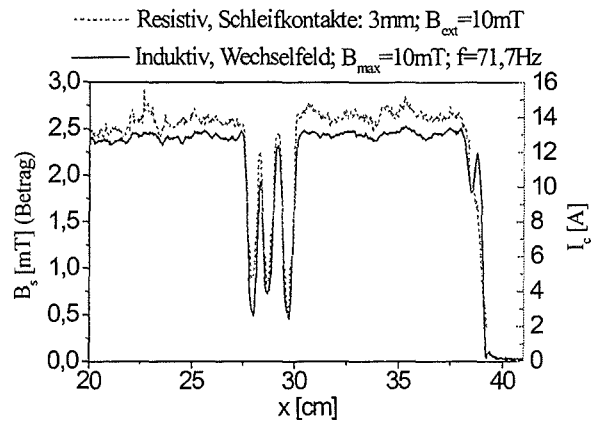


Abb. 50: Magnetfeldverlauf bestimmt mit dem Wechselfeldverfahren, im Vergleich mit dem resistiv bestimmten kritischen Strom.

werden muß. Das erfolgt, indem die Kopplung der Filamente über die zwischen den Filamenten induzierten Ströme erzwungen wird. Die Verdrillung und die Filamentisierung werden unwirksam gemacht [62,63]. Ein solches Stromsystem kann, wie von Bentzon et al. [40] beobachtet, durch eine entsprechend hohe Änderungsrate des äußeren Magnetfeldes bewirkt werden. Die über die Ag-Hülle induzierten Ströme führen dazu, daß der Leiter sich wie ein monofilamentärer Leiter verhält.

Ein entsprechendes Ergebnis liefern auch Messungen, die an einem anderen Typ von Bandleiter durchgeführt wurde. Bei ihm liegt eine Verdrillungslänge von 21 mm vor. Die Matrix besteht aus einer AgPd-Legierung (2 % at.). Zur mechanischen Verstärkung ist er durch eine äußere Hülle aus AgMg umgeben. Die AgPd-Matrix zeichnet sich durch einen deutlich größeren spezifischen Widerstand ($\rho_{AgPd} = 1,2 \mu\Omega\text{cm}$) aus verglichen mit einer Hülle aus reinem Ag ($\rho_{Ag} = 0,25 \mu\Omega\text{cm}$). Sie soll ähnlich wie die Verdrillung der Filamente zu einer

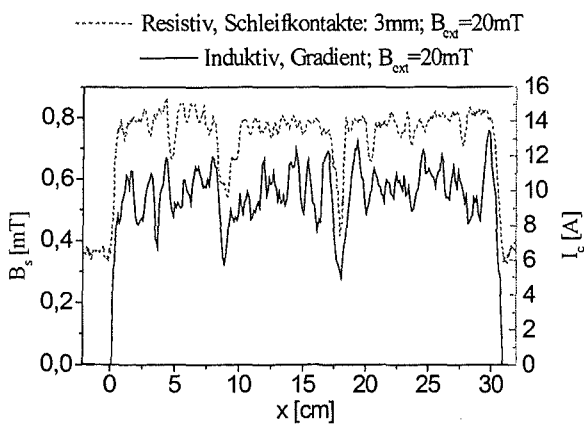


Abb. 51: Magnetfeldverlauf eines Leiter mit AgPd-Hülle, bestimmt mit dem Gradientenverfahren, im Vergleich mit dem kritischen Strom

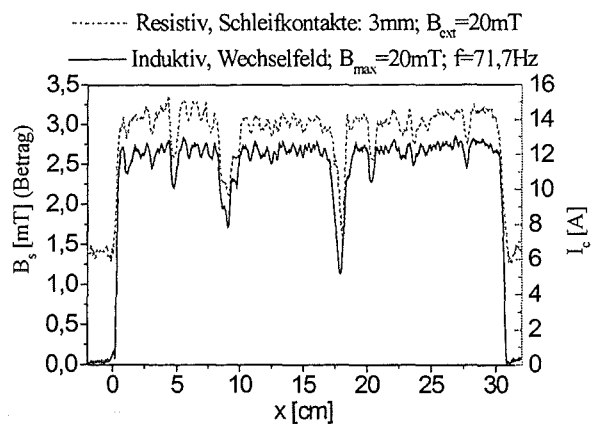


Abb. 52: Magnetfeldverlauf eines Leiter mit AgPd-Hülle, bestimmt mit dem Wechselfeldverfahren, im Vergleich mit dem kritischen Strom

Reduktion der zwischen den Filamenten induzierten Ströme führen und damit zur Reduktion von Wechselfeldverlusten beitragen. In den Abbildungen 51 und 52 werden die mit dem Gradienten- und Wechselfeld- Meßverfahren ermittelten Magnetfeldverläufe $B_s(x)$ verglichen. Der mit dem Gradientenverfahren erhaltene Magnetfeldverlauf, zeigt starke Schwankungen, die nicht im Verlauf des kritischen Stroms erkennbar sind (Abb. 51). Variationen der Stromtragfähigkeit lassen sich nicht eindeutig Schwankungen im Magnetfeld der induzierten Abschirmströme zuordnen. Mit dem Wechselfeldverfahren hingegen erhält man eine sehr gute Übereinstimmung der resistiv bestimmten Stromtragfähigkeit mit dem Magnetfeldverlauf entlang des Leiters.

6.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse an kurzen Bandleitern

Die in den vorherigen zwei Unterkapiteln diskutierten Ergebnisse machen deutlich, daß das Magnetfeld der induzierten Abschirmströme zur Beurteilung der Stromtragfähigkeit der Bandleiter geeignet ist. Der Verlauf des kritischen Stroms wird durch das Magnetfeld des Bandleiters reproduziert. Die Stromsysteme, die in beiden Meßmethoden (resistiv - induktiv) vorliegen, sind damit vergleichbar.

Die Größe des äußeren Magnetfeldes ist nur von untergeordneter Bedeutung. Sie führt nicht zu einer signifikanten Änderung des Stromsystems im Bandleiter. Die Messungen der Längshomogenität im Magnetfeld lassen sich daher auf Messungen ohne äußeres Magnetfeld übertragen. Eine quantitative Aussage über den Transportstrom kann durch eine einfache resistive „Eichmessung“ an einer Kurzprobe gewonnen werden. Aufwendige Berechnungen werden dadurch überflüssig.

Der Bereich, über dem Defekte im Magnetfeld beobachtbar sind, ist nicht nur von der Größe der Defekte abhängig, sondern wird auch durch die an einem Defekt auftretende Stromumverteilung bestimmt. Die Ausdehnung der Stromumverteilung ist durch eine Erhöhung der aufgeprägten Feldänderungsrate des äußeren Magnetfeldes B_{ext} verkleinerbar (Gradientenverfahren \rightarrow Wechselfeldverfahren). Bei unverdrillten Bandleitern führt dies zu einer höheren räumlichen Auflösung, mit der die Defekte erkannt werden können.

Bei verdrillten Bandleitern resultiert aus einer geringen Feldänderungsrate (Gradientenverfahren) ein undefiniertes Stromsystem im Leiter. Ein Zusammenhang des Magnetfeldverlaufs mit dem kritischen Strom wird nicht mehr beobachtet. Durch Erhöhung der Änderungsrate des äußeren Magnetfeldes (Wechselfeldverfahren) kann aber ein

definiertes Stromsystem im Leiter erzwungen werden. Die Längshomogenität des kritischen Stromes läßt sich dann in analoger Weise zu unverdrillten Bandleitern durch den Magnetfeldverlauf $B_s(x)$ beurteilen.

6.2 Induktive Messungen an langen Bandleitern

Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der untersuchten langen Bandleiter. Im Unterkapitel 6.2.1 werden die unverdrillten Bandleiter (Ag55a, Ag55b) besprochen, im Unterkapitel 6.2.2 werden die Bandleiter mit verdrillten Filamenten (Ag55v, AgPd55v) diskutiert.

Leiter	Filamente	Twist	Twist-Länge [mm]	Hülle/Matrix	Testlänge ca. [m]	I_c [A]	J_c [kA/cm ²]
Ag55a (Kap. 6.2.1)	55	Nein	-	Ag	16	35	13
Ag55b (Kap. 6.2.1)	55	Nein	-	Ag	8	60	23
Ag55v (Kap. 6.2.2)	55	Ja	12	Ag	6	26	≈10
AgPd55v (Kap. 6.2.2)	55	Ja	21	AgMg/ AgPd	7	26	≈10

Tab. 1: Zusammenstellung der untersuchten langen Bandleiter

6.2.1 Induktive Messungen an langen Bandleitern mit unverdrillten Filamenten.

In den Abbildungen 53 und 54 sind die Magnetfeldverläufe $B_s(x)$ von Bandleitern mit einer Länge von 16 m bzw. 8 m dargestellt. Beide Leiter haben 55 unverdrillte Filamente und eine Hülle aus reinem Ag. Das Magnetfeld der induzierten Abschirmströme wurde über der Mitte ($y = 0$) des Leiters in Richtung seiner Länge (x -Richtung) bestimmt. Entlang beider Leiter zeigt sich eine langwellige, periodische Variation des Magnetfeldes der induzierten Abschirmströme. Die Periode beträgt 1 m bis 1,5 m. Sie ist besonders deutlich am Leiter Ag55a zu erkennen (Abb. 53).

Induktiv, Gradient; $B_{\text{ext}} = 30\text{mT}$
Ag-Hülle; 55 unverdrillte Filamente

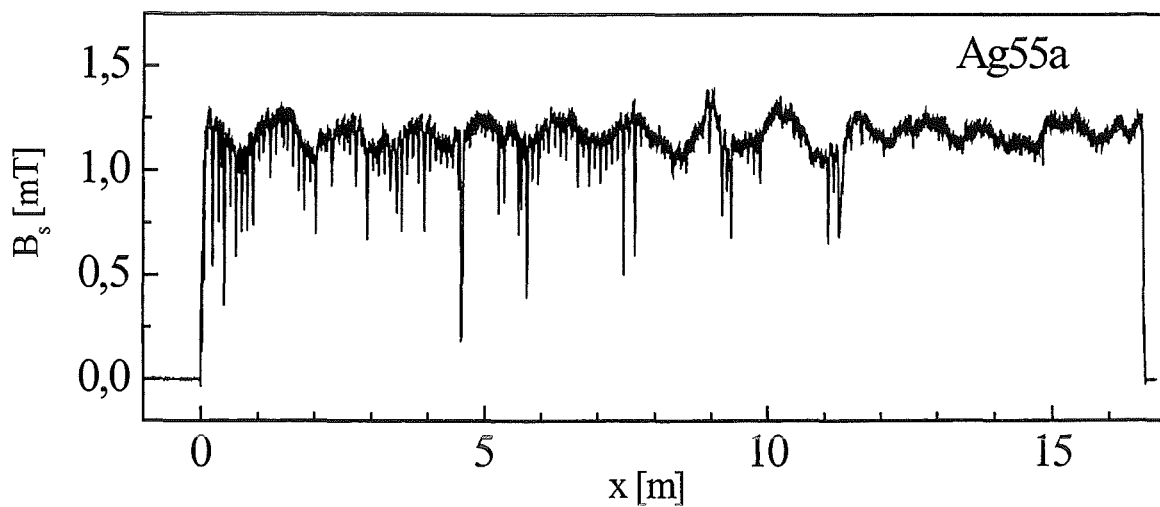


Abb. 53: Magnetfeld der induzierten Abschirmströme des Leiters Ag55a; ermittelt mit dem Gradientenverfahren über der Mitte des Leiters.

Induktiv, Wechselfeld; $B_{\text{max}} = 40\text{mT}$; $f = 71,7\text{Hz}$
Ag-Hülle; 55 unverdrillte Filamente

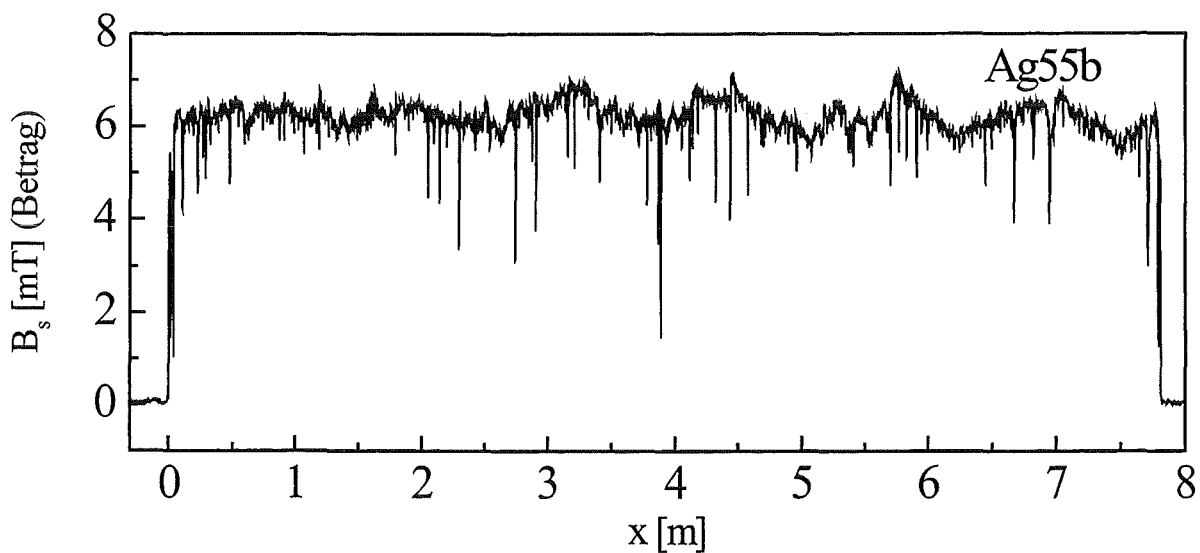


Abb. 54: Magnetfeld der induzierten Abschirmströme des Leiters Ag55b; ermittelt mit dem Wechselfeldverfahren über der Mitte des Leiters.

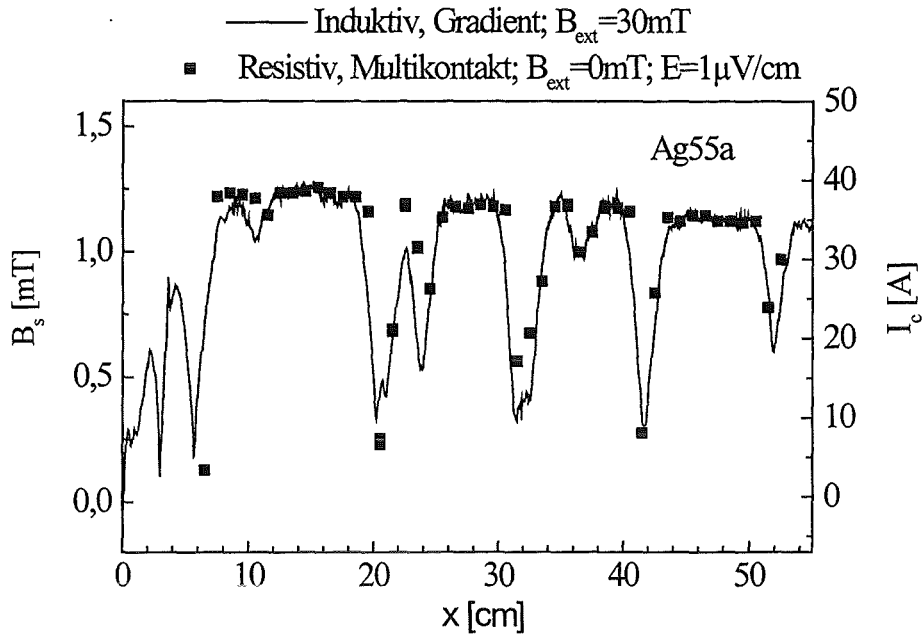


Abb. 55: Vergleich des Magnetfeldverlaufs des Leiters Ag55a mit dem resistiv bestimmten kritischen Strom

Eine weitere Auffälligkeit besteht in einer Vielzahl von nadelförmigen Einbrüchen des Magnetfeldes. Zuerst wird auf die langwellige Modulation des Magnetfeldes entlang des Leiters eingegangen, danach werden die nadelförmigen Einbrüche des Magnetfeldes betrachtet. Verantwortlich für die Modulation des Magnetfeldes kann eine reine Veränderung der Geometrie des Leiters sein. Verändert sich seine Breite, so ist auch eine Lageänderung über der Hallsonde zu erwarten. Zur Mitte des Leiters findet eine starke Zunahme des Magnetfeldes der induzierten Abschirmströme statt (s. Abb. 38). Eine seitliche Lageänderung bewirkt daher Schwankungen des Magnetfeldverlaufs. Inwieweit die langwellige Modulation des Magnetfeldes entlang des Leiters auf eine Variation des kritischen Stromes zurückzuführen ist, wurde mit einer vergleichenden resistiven Bestimmung des kritischen Stroms nachgeprüft. Das 50 cm lange Anfangsstück des in Abb. 53 dargestellten Leiters (Ag55a) wurde mit dem Multikontaktverfahren vermessen. Abbildung 55 zeigt, daß die Abnahme des Magnetfeldes der induzierten Abschirmströme auf eine Abnahme des kritischen Stroms zurückgeführt werden kann. Der kritische Strom nimmt über eine Länge von 50 cm um ca. 10 % (von 40 A auf 35 A) ab. Diese Strecke von 50 cm entspricht Abb. 53 zufolge ungefähr einer Drittel bis halben Periode der langwelligen Modulation. Aufgrund des unterschiedlichen Maßstabes in x-Richtung ist der Abfall der Stromtragfähigkeit in Abb. 55 stark gestreckt. Neben der langwelligen Modulation, die sich im kritischen Strom abzeichnet,

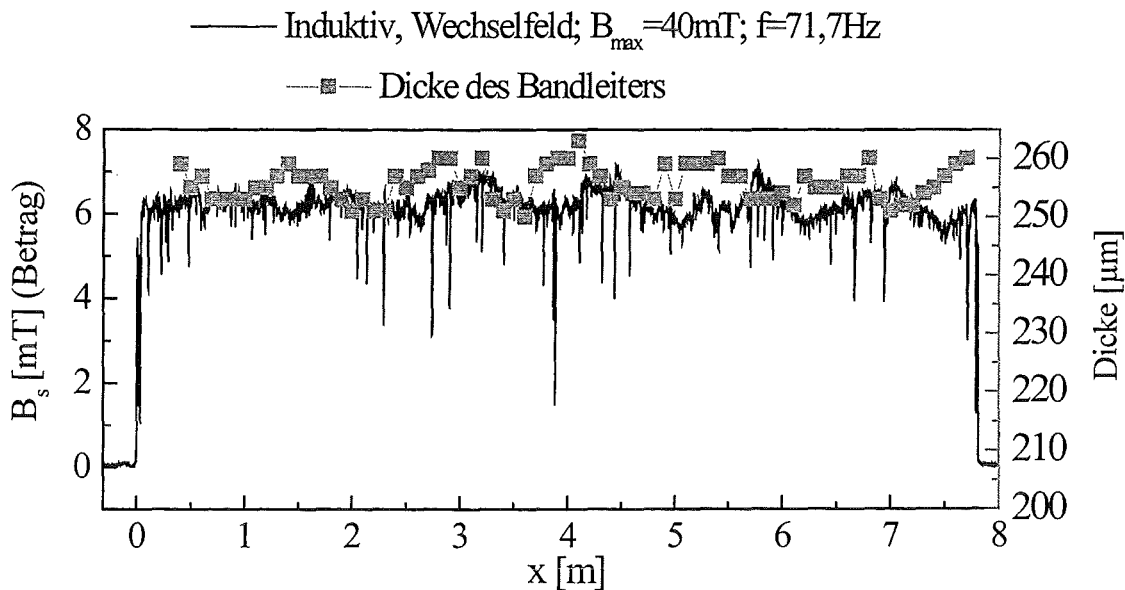


Abb. 56: Magnetfeldverlauf im Vergleich mit der Dicke des Bandleiters Ag55b.

zeigt Abb. 55 auch, daß die nadelförmigen Einbrüche im Magnetfeld des Leiters (Abb. 53) ebenfalls im kritischen Strom zu beobachten sind.

Die langwellige Variation des kritischen Stromes kann während des Fertigungsprozesses des Bandleiters entstehen. Die Herstellung des Leiters erfolgt in einem thermomechanischen Prozeß (Kap. 2.2). Zwischen den Glühungen erfolgt ein Walzprozeß. Der Durchmesser der Walze beträgt 40 cm. Eine Unregelmäßigkeit z.B. im Radius der Walze führt zu einer ungleichmäßigen Verformung des Bandleiters. Diese sollte dabei periodisch erfolgen, mit einer dem Umfang der Walze (ca. 1,2 m) entsprechenden Periode.

Abbildung 56 zeigt, daß der Abb. 54 zugrunde liegende Leiter (Ag55b), der ebenfalls eine I_c -Modulation von ca. 1,2 m Periodenlänge aufweist, in seiner Dicke variiert. Es sind deutliche periodische Variationen in der Dicke des Leiters von ca. 10 μm zu erkennen. Diese langwelligenen Schwankungen des Magnetfeldes entlang des Leiters und des kritischen Stromes sind offenbar auf den Walzprozeß zurückzuführen. In Abb. 56 ist zu erkennen, daß das Magnetfeld des Leiters in den Bereichen des Leiters zunimmt, in denen die Dicke abnimmt. Eine höhere Dichte in den Abschnitten des Leiters die stärker verformt sind, dürfte zu einer besseren Verbindung des Körner untereinander und damit zu einer höheren Stromtragfähigkeit führen. Neben dieser langwelligenen, periodischen Modulation des Magnetfeldes zeigen die Messungen eine Vielzahl von nadelförmigen Einbrüchen des Magnetfeldes.

Induktiv, Gradient; $B_{\text{ext}}=30\text{mT}$
 Ag-Hülle; 55 unverdrillte Filamente

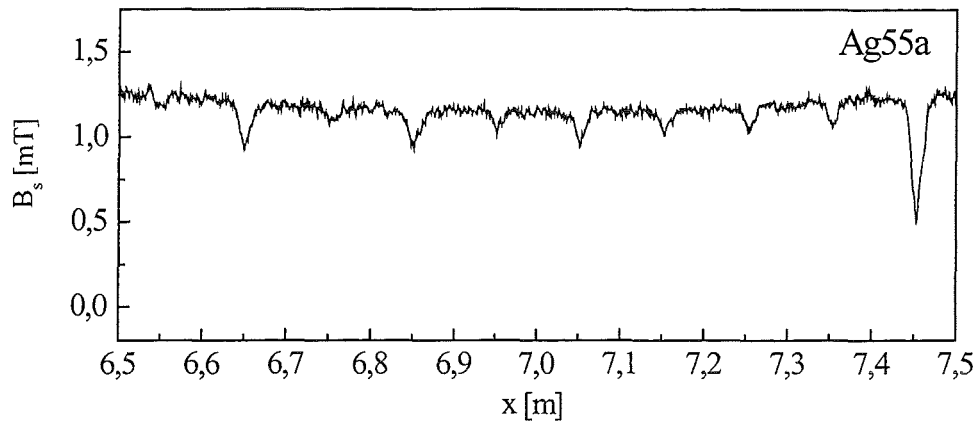


Abb. 57: Vergrößerter Ausschnitt der in Abb. 53 dargestellten Messung des Leiters Ag55a

Der Leiter Ag55b (Abb. 54) besitzt eine unregelmäßige Verteilung der Defekte. Beim Leiter Ag55a (Abb. 53) ist eine Regelmäßigkeit der Defektverteilung entlang des Leiters zu erkennen.

Abbildung 57 zeigt die Vergrößerung eines Abschnittes des in Abb. 53 (Leiter Ag55a) dargestellten Magnetfeldverlaufs. Aus dieser Auftragung ist ersichtlich, daß die Defekte, die in Abb. 53 als nadelförmige Einbrüche des Magnetfeldes erkennbar sind, in einem regelmäßigen Abstand auftreten. Der Abstand der Defekte beträgt ~ 10 cm und kann blasenförmigen Ausstülpungen der Ag-Hülle mit einem Durchmesser von 2 mm bis 5 mm zugeordnet werden.

Auch die nadelförmigen Einbrüche des Magnetfeldes in Abb. 54 (Leiter Ag55b) sind weitgehend auf diese Art von Defekt zurückzuführen. Hier führten die Defekte nur zu einer geringfügigen Verdickung der Leiteroberfläche. Abb. 58 zeigt einen solchen Defekt des Leiters Ag55b.

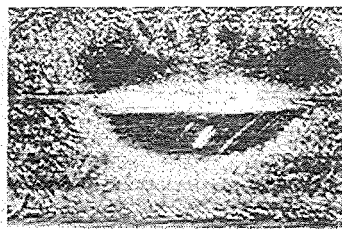


Abb. 58: Auf der Leiteroberfläche sichtbarer Defekt

Blasenbildung wird in Bandleitern, die nach dem „powder-in-tube“-Verfahren hergestellt sind, häufig beobachtet. Sie tritt sowohl in Bi-2212 als auch in Bi-2223 Leitern auf.

Zurückgeführt werden die Blasen auf einen während der Glühung des Leiter entstehenden Gasdruck in der Ag-Hülle. Verursacht werden kann der Gasdruck durch Verunreinigungen des Vorläuferpulvers bzw. durch Gase, die während der Befüllung der Rohre mit dem Vorläuferpulver eingeschlossen wurden. Im Vorläuferpulver absorbiertes H_2O kann ebenfalls zur Blasenbildung führen [64].

Verunreinigungen wie $SrCO_3$ zersetzen sich bei der Glühung und bilden CO_2 im Inneren des Leiters [65]. Die Ag-Hülle besitzt zwar eine Durchlässigkeit für O_2 , nicht aber für CO_2 [21] oder N_2 [66]. Im Leiter baut sich ein Gasdruck auf, der zur Verformung des Leiters und daher zur Blasenbildung führt. Während der Befüllung der Rohre eingeschlossene Gase, z.B. N_2 , können durch das bei der Reaktionsglühung erfolgende Aufheizen ebenfalls einen Gasdruck im Inneren erzeugen, der zur Verformung des Leiters führt [66].

Die Herstellung der Bi-2223 Leiter vollzieht sich in mehreren Glühschritten. Zwischen den Glühungen findet ein Walzprozeß des Leiters statt. Erfolgt die Blasenbildung im ersten Glühprozeß, dann führt der nachfolgende Walzprozeß zu einer Komprimierung der Blase. Auf der Leiteroberfläche ist dann nur noch eine leichte Verdickung (Abb. 58, Leiter Ag55b) zu erkennen.

Ist eine Verunreinigung des Vorläuferpulvers Ursache für die Defektbildung, dann ist eine unregelmäßige, statistische Defekt-Verteilung zu erwarten. Für den Leiter Ag55b (Abb. 54) trifft dies zu. Bei diesem Leiter kann die Defektbildung durch Verunreinigungen des Vorläuferpulvers verursacht sein.

Der Magnetfeldverlauf des Leiters Ag55a (Abb. 53) zeigt eine periodische Verteilung der Defekte (Blasen auf der Oberfläche) mit einem Abstand von ~ 10 cm. Ihre Ursache kann daher nicht auf Verunreinigungen des Vorläuferpulvers oder auf eingeschlossene Gase zurückgeführt werden. Eine regelmäßige Bildung von Blasen wurde auch von Patel et al. [67] an Bi-2212 Leitern beobachtet. Die Ursache der in regelmäßigen Abständen auftretenden Blasen wird aber nicht genannt.

Die gleichmäßigen Abstände der Blasen lassen eine auf dem Umformungsprozeß (Ziehen, Walzen) basierende Ursache vermuten. Entstehen während des Umformungsprozesses Risse oder Verletzungen der Ag-Hülle, dann besteht die Möglichkeit, daß beim Walzen oder Ziehen Verunreinigungen in das Innere des Leiters gelangen, die dann bei der Glühung zur Blasenbildung führen.

Eine Positionsbestimmung der Defekte ist nicht nur entlang des Leiters möglich. Über den Magnetfeldverlauf außerhalb der Mitte des Leiters kann eine bzgl. der Mitte asymmetrische

Lage der Defekte erkannt werden. Abbildung 59 zeigt das Magnetfeld über der Mitte des Bandleiters Ag55b (Markierung ②) im Vergleich mit dem Magnetfeldverlauf am Rand bei $y = \pm 0,75$ mm (Markierung ① und ③). Auch im Magnetfeldverlauf außerhalb der Mitte des Leiters ist die langwellige Modulation zu beobachten. Werden die Magnetfeldverläufe außerhalb der Mitte (Markierung ① und ③) miteinander verglichen, so zeigt sich, daß der mit ① markierte Magnetfeldverlauf, abgesehen von der langwelligeren Modulation, stärkere Schwankungen aufweist als der mit ③ markierte. Die Inhomogenitäten besitzen eine bzgl. der Mitte des Leiters asymmetrische Lage.

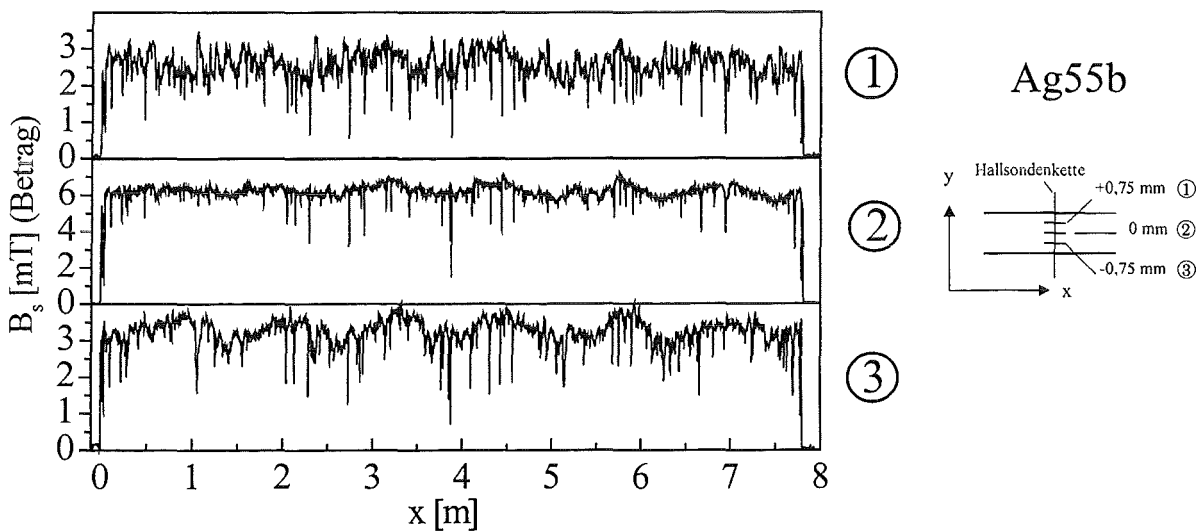


Abb. 59: Magnetfeldverlauf (Wechselverfahren) über der Mitte ($y = 0$ mm) des Leiters Ag55b, im Vergleich mit dem Feldverlauf bei $y = \pm 0,75$ mm

Abbildung 60 zeigt das zweidimensionale Magnetfeldprofil $B_s(x,y)$ von einem 30 cm langen Stück dieses Bandleiters Ag55b. Aufgetragen ist eine Höhenlinien-Darstellung des Magnetfeldprofils.

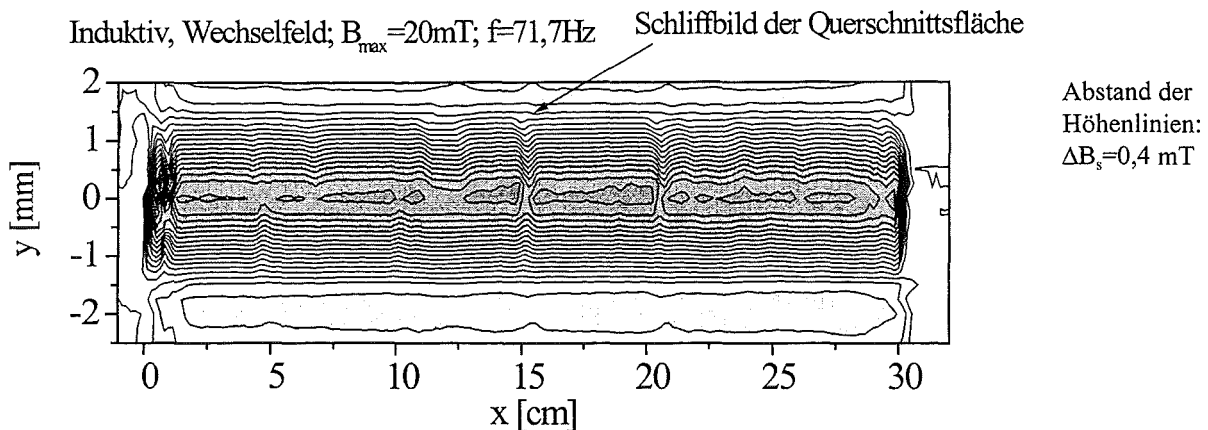


Abb. 60: Magnetfeldprofil in Höhenlinien-Darstellung

Das Magnetfeldprofil zeigt ein bzgl. der Mitte ($y = 0$) asymmetrischen Verlauf. In der oberen Halbebene ($y > 0$ mm) sind deutlichere Schwankungen zu beobachten. Am Ort $x = 15$ cm wurde ein Schliffbild (Abb. 61) der Querschnittsfläche des Leiters angefertigt.

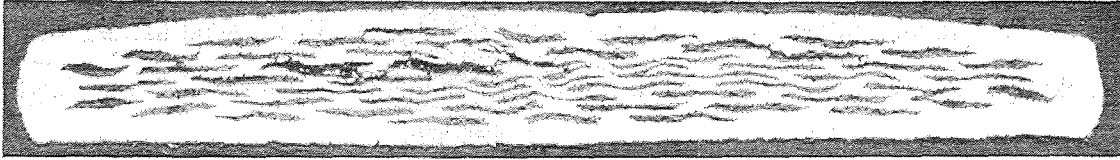


Abb. 61: Querschnittsfläche des Bandleiters mit asymmetrischer Lage des Defektes

Hier ist die asymmetrische Lage eines Defektes zu erkennen. Eine solche Asymmetrie kann durch einzelne verunreinigte oder strukturell geschädigte Filamente verursacht sein.

Die Bildung von Defekten wird dann nicht statistisch und dadurch symmetrisch bzgl. der Mitte erfolgen, sondern zu einer Häufung von Defekten auf der Seite des Leiters führen, auf der das geschädigte Filament verläuft.

6.2.2 Induktive Messungen an langen Bandleitern mit verdrehten Filamenten

Im Folgenden werden zwei Leiter verglichen, beide sind aus 55 verdrehten Filamenten aufgebaut. Der Leiter Ag55v besitzt eine Verdrehungslänge von 12 mm und eine Hülle aus Ag. Bei Leiter AgPd55v beträgt die Verdrehungsperiode 21 mm. Die Filamenthülle besteht aus einer AgPd-Legierung mit einem Pd-Anteil von 2 % at.. Zur mechanischen Verstärkung ist der Leiter von einer äußeren AgMg-Hülle umgeben (s. Tabelle S. 63). Der Magnetfeldverlauf von Leiter Ag55v der in Abb. 62 dargestellt ist, zeigt keine deutlichen Auffälligkeiten. Eine langwellige Modulation des Magnetfeldes, wie sie bei den im vorangegangenen Unterkapitel 6.2.1 diskutierten Leitern beobachtet wurde, ist nicht ersichtlich. Er zeichnet sich zudem, durch eine gute Homogenität aus. Defekte, die lokal zu einer verminderten Stromtragfähigkeit führen, treten nicht auf. Die Stromtragfähigkeit dieses Leiters ist jedoch gering. Verglichen mit dem Leiter Ag55b (unverdrehte Filamente, $I_c = 60$ A) beträgt der kritische Strom nur $I_c = 26$ A. Dies ist auch aus dem direkten Vergleich des Magnetfeldes der induzierten Abschirmströme von Ag55b (Abb. 54) und Ag55v (Abb. 62) ersichtlich. Das Magnetfeld von Ag55v beträgt weniger als die Hälfte von dem des Leiters Ag55b.

Induktiv, Wechselfeld; $B_{\max} = 26 \text{ mT}$; $f = 71,7 \text{ Hz}$
 Ag-Hülle; 55 verdrehte Filamente

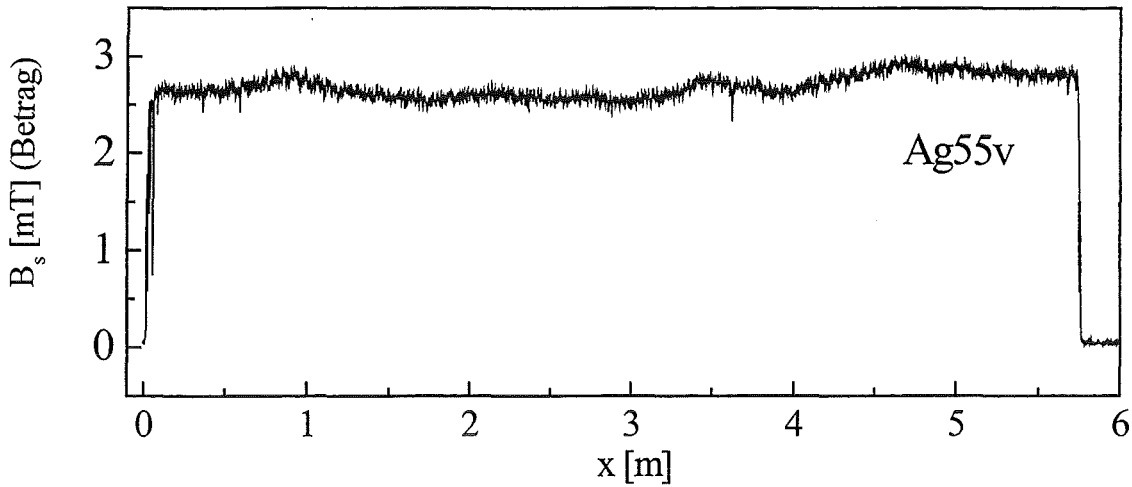


Abb. 62: Magnetfeldverlauf eines Bandleiters mit 55 verdrehten Filamenten über der Mitte des Leiters. Die Hülle besteht aus Ag. Die Verdrillungslänge beträgt 12mm.

Induktiv, Wechselfeld; $B_{\max} = 26 \text{ mT}$; $f = 71,7 \text{ Hz}$
 AgPd-Hülle; 55 verdrehte Filamente

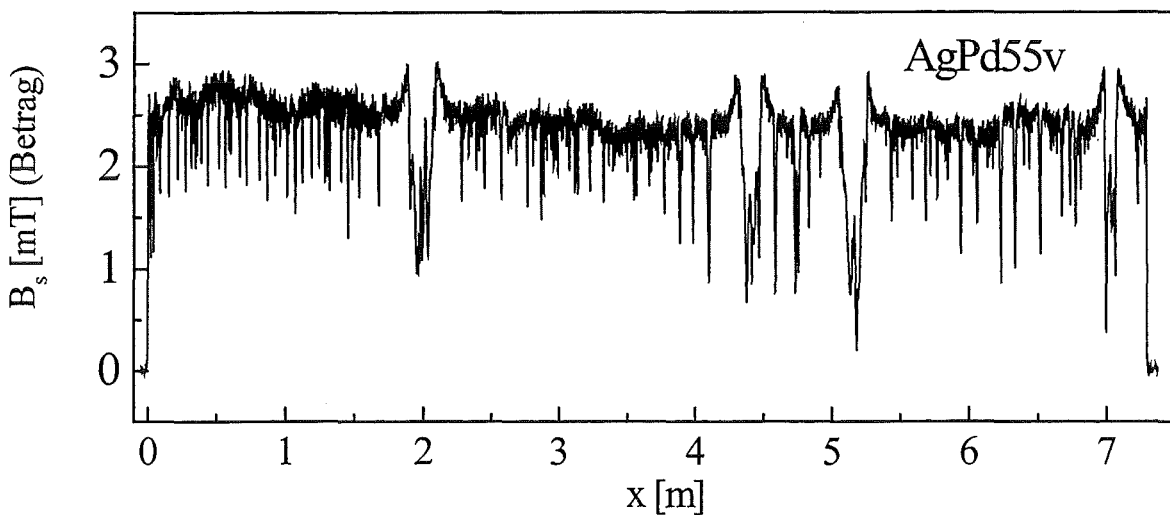


Abb. 63: Magnetfeldverlauf eines Bandleiters mit 55 verdrehten Filamenten über der Mitte des Leiters. Die Hülle besteht aus AgPd. Zur mechanischen Verstärkung ist der Leiter durch eine äußere Hülle aus AgMg umgeben. Die Verdrillungslänge beträgt 22mm.

Eine Reduktion des kritischen Stromes infolge Verdrillung der Filamente wird häufig beobachtet [68,69]. Neben der Verdrillung der Filamente des Leiters Ag55v können natürlich auch weitere Schritte während des thermomechanischen Prozesses der Leiterherstellung zu der starken Abnahme der Stromtragfähigkeit um über 50 % beitragen. Der Leiter Ag55v erwies sich als der homogenste von allen, die in dieser Arbeit untersucht wurden. Im Gegensatz zu ihm zeigt Leiter AgPd55v eine Fülle von Defekten (Abb. 63). Viele von ihnen, die zu den nadelförmigen Einbrüchen des Magnetfeldes führen, sind auch bei diesem Leiter auf Blasen zurückzuführen (Abb. 64).

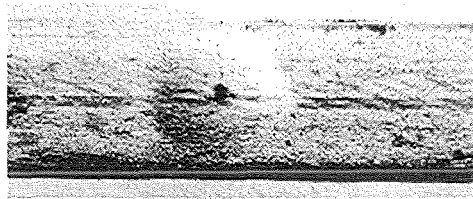


Abb. 64: Blase auf der Oberfläche des Leiters AgPd55v

Eine anderer Defekttyp, der bei keinem der vorherigen Leiter auftrat, sind Abschnitte von 10 cm bis zu 30 cm Länge mit stark verminderter Stromtragfähigkeit. Abbildungen 65 zeigt das Magnetfeld des Endstückes des Leiters AgPd55v im Vergleich mit dem resistiven ermittelten kritischen Strom. Deutlich sichtbar ist, daß in dem Bereich zwischen 20 cm und 35 cm die Stromtragfähigkeit stark vermindert ist. Vor und nach dem geschädigten Abschnitt nimmt sie in Richtung auf die Defektzone erstaunlicherweise geringfügig zu. Schliffbilder, die an der defekten Stelle hergestellt wurden, zeigen keine Auffälligkeiten. Die Filamentstruktur des Leiters in den geschädigten Stellen scheint intakt. Eine deutliche Veränderung der Geometrie des Leiters (Breite, Dicke), die auf eine durch die mechanische Verformung basierende Ursache deuten könnte, ist nicht ersichtlich. Eine Ursache, die zur Bildung dieser Defekte führt, kann nicht angegeben werden.

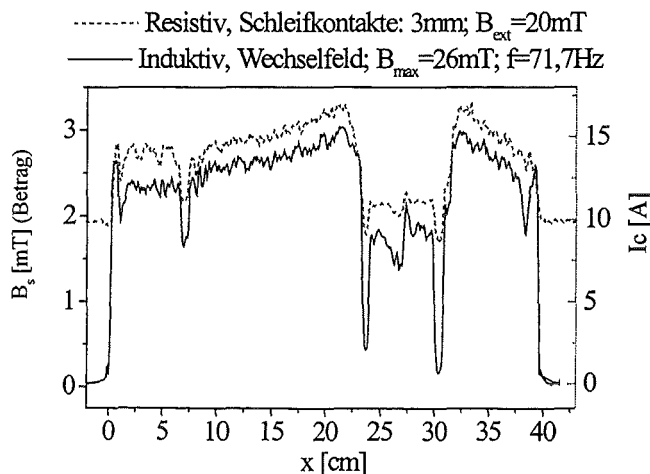


Abb. 65: Magnetfeldverlauf des Endstückes des Leiters AgPd55v im Vergleich mit einer resistiven Messung

6.2.3 Die Belastung des Bandleiters durch die Messung

Die Belastung und Schädigung des Bandleiters, die während der Messung auftritt, soll anhand der Abb. 66 verdeutlicht werden. Abbildung 66 zeigt, wie sich der Magnetfeldverlauf des Bandleiters Ag55b nach mehreren Meßdurchläufen verändert hat. Deutlich zu erkennen ist eine Abnahme des Magnetfeldes der induzierten Abschirmströme und damit der Stromtragfähigkeit nach dem 11. Durchzug des Leiters.

Die Abnahme des Magnetfeldes infolge einer bei der Messung entstandenen Schädigung des Leiters kann zwei Ursachen haben. Es kann eine Schädigung durch die mechanische Beanspruchung des Leiters (Zug- und Biegebeanspruchung) erfolgen, oder durch thermisches Zyklen [70]. Abbildung 67 zeigt den Magnetfeldverlauf eines kurzen Abschnittes des Bandleiters Ag55b, der zehnmal durch den Magneten gezogen wurde und sich dabei dauernd in LN_2 befand. Der Leiter wurde zwischen den Messungen nicht aufgewärmt. Die mechanische Belastung (Zug- und Biegebeanspruchung), die auftrat, ist mit der Messung der langen Bandleiter vergleichbar.

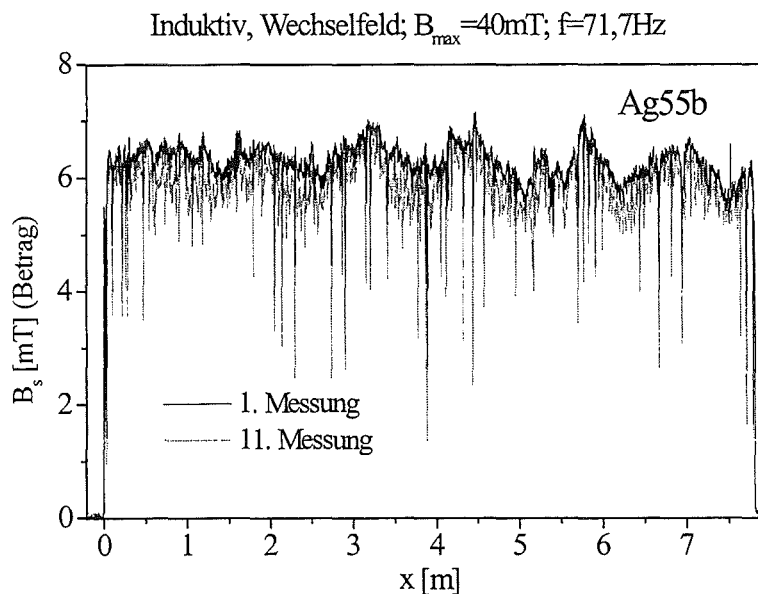


Abb. 66: Magnetfeldverlauf nach der 1 und 11 Messung

Es trat keine Abnahme des Magnetfeldes der induzierten Abschirmströme auf. Eine sichtbare Schädigung kann nicht beobachtet werden.

Die Hauptbeanspruchung des Leiters scheint durch das thermischen Zyklen des Leiters verursacht zu sein. Durch die unterschiedliche thermische Ausdehnung des Supraleiters und

der Matrix ergeben sich Spannungen im Leiter. Sie führen zu einer Erhöhung der durch die alleinige Zugspannung vorliegenden Belastung.

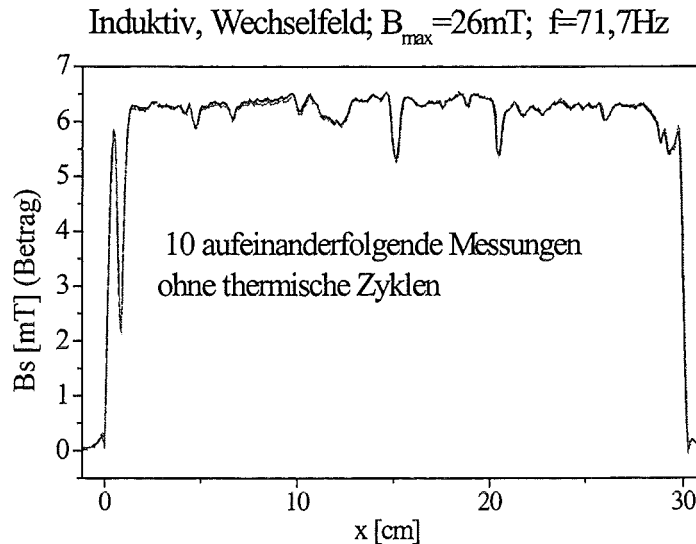


Abb. 67: Messung eines Abschnitts des in Abb.66 dargestellten Leitertyps ohne thermische Zyklen

Die aufgrund der thermischen Zyklen auftretende erhöhte Beanspruchung des Leiters ist nicht zu vermeiden.

Es kann keine generelle Aussage über eine Schädigung der Bandleiters gemacht werden, da sich die mechanischen und strukturellen Eigenschaften der Leiter durchaus unterscheiden. Sie hängen von der Filamentisierung des Leiters ab (mono- oder multifilamentär) und von dem verwendeten Matrixmaterial. Die Schädigungen, die ein Leiter bei einem Messdurchlauf erfährt, können daher je nach Leitertyp unterschiedlich sein; im günstigsten Fall treten sie gar nicht auf.

6.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse an langen Bandleitern

Die Messungen an langen Bandleitern unterschiedlichen Typs erbrachten eine Anzahl von Auffälligkeiten.

Es wurden an zwei Bandleitern langwellige Modulationen des Magnetfeldes der induzierten Abschirmströme festgestellt. Die Modulation war ebenfalls in der Stromtragfähigkeit beobachtbar. Die Wellenlänge der Modulation entsprach dem Umfang der beim Umformungsprozeß verwendeten Walze und zeigte sich als Dickenvariation entlang des Leiters.

Der am häufigsten festgestellte Defekt war eine Blasenbildung. Sie wurden entlang des Leiters sowohl in statistischer Verteilung als auch in einer periodischen Anordnung gefunden. Die unterschiedliche Verteilung legt nahe, daß keine einheitliche Ursache für ihre Bildung existiert.

Die Blasen, die im Bandleiter Ag55b beobachtet wurden, sind z.B. mit einer auf Verunreinigungen des Vorläuferpulvers beruhenden Ursache vereinbar. Die Periodizität der Blasen, die im Leiter Ag55a auftrat, ist hiermit nicht erklärbar. Die Periodizität legt eine durch den Umformungsprozeß bedingte Ursache nahe, z.B. eine periodische Verletzung der Hülle des Leiters durch den Umformungsprozeß.

Im Leiter Ag55v wurden keinerlei Defekte beobachtet, die zu einer starken Abnahme der Stromtragfähigkeit führten. Der Leiter zeigt, daß die Bildung von Defekten während der Herstellung nicht zwingend ist, sondern durchaus auch vermieden werden kann.

Der Leiter AgPd55v war der inhomogenste aller untersuchten Leiter. Neben einer sehr ausgeprägten Blasenbildung hatte er eine weitere Besonderheit aufzuweisen. Es traten ca. 10 cm lange Abschnitte auf, die eine stark erniedrigte Stromtragfähigkeit aufwiesen. Die Ursache dieser Defektart ist nicht bekannt.

Die Ergebnisse die an langen Bandleitern verschiedenen Typs mit unterschiedlichen Defektstrukturen erhalten wurden, macht die Aussagekraft des induktiven Verfahrens zur Beurteilung der Homogenität der Bandsupraleiter deutlich. Dieses Verfahren eignet sich daher in besonderer Weise zur Optimierung der Prozeßparameter bei der Leiterentwicklung, wie auch zur routinemäßigen Qualitätskontrolle bei der Produktion der Bandleiter.

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Eignung eines induktiven und damit berührungsfreien Meßverfahrens zur Qualitätskontrolle von Bi-2223 Bandleitern großer Längen untersucht. In einem kontinuierlichen Durchzugsverfahren wurde mit einer einzelnen Hallsonde oder einer Hallsondenkette das Magnetfeld von im Supraleiter induzierten Abschirmströmen bestimmt. Das mit Hallsonden aufgezeichnete Magnetfeldprofil entlang des Leiters dient zur Beurteilung der Längshomogenität der Stromtragfähigkeit und zur Lokalisierung von Defekten im Bandleiter.

Die Abschirmströme werden durch die Bewegung des Leiters in einem inhomogenen Magnetfeld (Gradientenverfahren) oder durch ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld (Wechselfeldverfahren) im Supraleiter induziert.

Der Magnetfeldverlauf wurden mit der resistiv bestimmten Stromtragfähigkeit entlang des Bandleiters verglichen. Resistive Kontrollmessungen sind an kurzen Bandleiterstücken mit einer maximalen Länge von 0,5 m durchgeführt worden und dienen hauptsächlich zur Beurteilung der Tauglichkeit des induktiven Verfahrens.

Messungen an kurzen Bandleitern zeigten eine Übereinstimmung des Magnetfeldverlaufes mit dem resistiv ermittelten kritischen Strom. Damit konnte nachgewiesen werden, daß der Magnetfeldverlauf der induzierten Abschirmströme zur Beurteilung der Stromtragfähigkeit des Leiters herangezogen werden kann. Durch die Verwendung von Schleifkontakten geringen Abstandes (3mm) wurde eine hohe Ortsauflösung bei der Bestimmung des kritischen Stromes erreicht. An unverdrillten Bandleitern, die mit dem Gradientenverfahren untersucht wurden, zeigte sich, daß die Einbrüche im Magnetfeldverlauf eine räumlich größere Ausdehnung aufweisen als die mit Schleifkontakten bestimmte Variation des kritischen Stromes. Hier zeigte sich deutlich, daß die Änderungen im Magnetfeldverlauf durch die an einem Defekt auftretende Stromumverteilung bestimmt ist. Durch Erhöhung der zeitlichen Feldänderungsrate des äußeren Magnetfeldes kann eine Stromumverteilung auf kürzeren Längen erreicht werden. Ein Vergleich des Magnetfeldverlaufes, bestimmt durch das Wechselfeldverfahren, mit dem über die Schleifkontakte erhaltenen kritischen Strom macht dies deutlich.

Die Magnetfeldverläufe an verdrehten und unverdrehten Bandleitern zeigen ein vergleichbares Verhalten, wenn eine Kopplung der Filamente durch eine große Feldänderungsrate des äußeren Magnetfeldes herbeigeführt wird. Liegt diese Kopplung nicht vor, dann resultiert ein undefiniertes Stromsystem im Leiter. Der Zusammenhang zwischen dem Magnetfeldverlauf und dem resistiv bestimmten kritischen Strom geht verloren. Wird eine Kopplung der Filamente durch ein hohes elektrisches Feld über die Ag-Matrix erzwungen, resultiert ein zu den Messungen an unverdrehten Bandleitern vergleichbares Stromsystem. Die Homogenität der Leiter kann dann in analoger Weise über den Magnetfeldverlauf der induzierten Abschirmströme beurteilt werden.

Die Magnetfeldverläufe von langen Bandleitern mit einer Länge bis ca. 16 m ergaben eine sehr unterschiedliche Defektstruktur. Es zeigte sich, daß der während des thermomechanischen Prozesses der Leiterherstellung durchgeführte Walzprozeß zu einer Modulation der Stromtragfähigkeit mit einer dem Umfang der Walze entsprechenden Periode führen kann. Der am häufigsten aufgetretene Defekt war eine während des Herstellungsprozesses erfolgte Blasenbildung. Sie war mit zum Teil starken Einbrüchen der Stromtragfähigkeit verbunden. Die Blasen zeigten sich in einer unterschiedlichen räumlichen Verteilung entlang der Leiter, so daß von keinem einheitlichen Mechanismus ihrer Bildung ausgegangen werden kann.

Das untersuchte induktive Verfahren stellte sich als sehr aussagekräftig zur Charakterisierung von Bandleitern großer Längen dar. Der Vorteil dieses Verfahrens im Vergleich mit den üblicherweise durchgeführten resistiven Messungen ist in der räumlichen Auflösung, mit dem Defekte erkannt werden können, begründet. Resistive Messungen an Bandleitern großer Längen werden mit an dem Supraleiter fixierten Spannungsabgriffen im Abstand von bis zu 1 m durchgeführt. Dieser große Abstand der Spannungsabgriffe führt zu einem Mittlungsprozeß der Eigenschaften des Leiters. Ein inhomogener Leiter kann über solche Abstände als homogen erscheinen. Mit dem induktiven Verfahren können hingegen große Längen mit einer räumlich deutlich höheren Auflösung untersucht werden. Defekte werden auf 1 cm genau lokalisiert. Dies zeigt der Vergleich mit dem durch das Schleifkontaktverfahren bestimmten kritischen Strom. Mit der in dieser Arbeit untersuchten induktiven Methode kann daher ein realistisches Bild der Inhomogenität des Leiters erhalten werden. Als Konkurrent zu dem induktiven Verfahren kann das resistive Schleifkontaktverfahren betrachtet werden. Hier treten allerdings an langen Bandleitern

Kontaktprobleme (Stromeinspeisung, Spannungsabgriffe, isolierende Schutzschicht) auf, die mit einem berührungsfreien Verfahren umgangen werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] M. Tinkham; In: Introduction to Superconductivity, Mc Graw-Hill, New York, 1996, zweite Auflage
- [2] A. M. Campbell, J. E. Evetts; Adv. Phys. **72** (1972) 199
- [3] G. Deutscher, K. H. Müller; Phys. Rev. Lett. **59** (1987) 1745
- [4] J. Alarco, Yu. Boikov, G. Brorsson, T. Claeson, G. Daalmans, J. Edstam, Z. Ivanov, V. K. Kaplunenko, P-A. Nilsson, E. Olsson, H.K. Olsson, J. Ramos, E. Stepantsov, A. Tzalenchuk, D. Winkler, Y-M. Zhang;
In: Materials and Crystallographic Aspects of HTc-Superconductors
ed. E.Kaldis, Kluwer Academic Publisher, 1994, 471
- [5] S. Jin, T. H. Tiefel, R. C Sherwood, M. E. Davis, R. B. van Dover, G. W. Kammlott, R. A. Fastnacht, H. D. Keith; Appl. Phys. Lett **52** (1988) 2074
- [6] M. Murakami, N. Sakai, T. Higuchi, S. I. Yoo; Supercond. Sci. Technol. **9** (1996) 1015
- [7] S. X. Dou, H.K. Liu; Supercond. Sci. Technol. **6** (1993) 297
- [8] R. Flükiger, G. Grasso, J. C. Grivel, F. Marti, M. Dhalle, Y. Huang;
Supercond. Sci. Technol. **10** (1997) A68
- [9] R. Flükiger; Supercond. Sci. Technol. **10** (1997) 872
- [10] G. Blatter, M. V. Feigel'mann, V. B. Geshkenbein, A. I. Larkin, V. M. Vinokur;
Review of Modern Physics, **66** (1994) 1125
- [11] P. H. Kes; Supercond. Sci. Technol. **5** (1992) S41
- [12] J. R. Clem; Phys. Rev. B **43** (1991) 7837
- [13] E. H. Brandt; Physica C **195** (1992) 1
- [14] S. Jin; In: Processing of long lengths of Superconductors, ed. by U. Balachandran, E.W. Collings, A. Goyal; Proceedings of the symposium on Processing of Long Lengths of Superconductors, Pennsylvania, 1993; The Minerals Metals & Materials Society, 1994, 3
- [15] A. Knierim; Dissertation, Universität Karlsruhe 1997
- [16] A. Goyal, F. A. List, J. Mathis, M. Parantham, E. D. Specht, D. P. Norton, C. Park, D. F. Lee, D. M. Kroeger, D. K. Christen, J. D. Budai, P. M. Martin;
Journal of Superconductivity **11** (1998) 481

- [17] Y. Yamada; In: Bismuth-Based High-Temperature Superconductors, ed. H. Maeda, K. Togano, Marcel Dekker, 1996, 289
- [18] J. Keßler, S. Blüm, U. Wildgruber, W. Goldacker; *J. All. Comp.* **195** (1993) 511
- [19] P. Komarek; In: Hochstromanwendungen der Supraleitung, Teubner Studienbücher Angewandte Physik, Stuttgart 1995
- [20] G. Grasso, A. Perin, R. Flükiger; *Physica C* **250** (1995) 43
- [21] R. Flükiger, G. Grasso, B. Hemsel, M. Däumling, R. Gladyshevskii, A. Jeremie, J. C. Grivel, A. Perin; In: Bismuth-Based High-Temperature Superconductors ed. H. Maeda, K. Togano, Marcel Dekker, 1996, 289
- [22] H. Küpfer, I. Apfelstedt, R. Flükiger, C. Keller, R. Meier-Hirmer, B. Runtsch, A. Turowski, U. Wiech, T. Wolf; *Cryogenics* **28** (1988) 650
- [23] J. Paasi, P. Kottman, M. Polák; *Physica C* **249** (1995) 350
- [24] M. R. Koblichka, T. H. Johansen, H. Bratsberg, P. Vase; *Supercond. Sci. Technol.* **12** (1999) 113
- [25] A. E. Pashitski, A. Polyanskii, A. Gurevich, J. A. Parrell, D. C. Larbalestier; *Physica C* **246** (1995) 133
- [26] M. Dhalle, M. Cuthbert, M. D. Johnston, J. Everett, R. Flükiger, S. X. Dou, W. Goldacker, T. Beales, A. D. Caplin; *Supercond. Sci. Technol.* **10** (1997) 21
- [27] K.-H. Müller, C. Andrikidis, H. K. Liu, S. X. Dou; *Physica C* **247** (1995) 74
- [28] H. Brechna; In: Superconducting Magnet Systems; Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 1973
- [29] C. P. Bean; *Phys. Rev. Lett.* **8** (1962) 250
- [30] M. R. Kobischka, T. H. Johansen, H. Bratsberg, L. Pust, A. Galkin, P. Nalevaka, M. Marysko, M. Jirsa, M. Bentzon, P. Bodin, P. Vase, T. Freltoft; *J. Appl. Phys.* **83** (1998) 6798
- [31] C. V. Windte; Dissertation, Universität Karlsruhe (1992)
- [32] M. Lathinen, J. Paasi, J. Sarkaniemi, Z. Han, T. Freltoft; *Physica C* **244** (1995) 115
- [33] K. Kawano, S. Isoda, A. Oota; *Physica C* **282** (1997) 2289
- [34] K. Kawano, A. Oota; *Physica C* **275** (1997) 1
- [35] B. Ullman, A. Gäbler, M. Quilitz, W. Goldacker; *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7** (1997) 2042
- [36] T. Arndt; Prospekt der Firma Vakuum Schmelze GmbH Hanau

- [37] R. E. Tarter; Solid state power conversion handbook; Wiley interscience, New York, 1993
- [38] J. Franz; Diplomarbeit, Universität Karlsruhe 1992
- [39] J. Gilchrist, M. Konczykowski; *Physica C* **212** (1993) 43
- [40] M. D. Bentzon, D. Suchon, P. Bodin, P. Vase; In: Applied Superconductivity, ed. H. Rogalla, D.H. Blank, IOP Publishing Ltd, Bristol and Philadelphia, **158**, 1997, 1635
- [41] M. D. Bentzon, Conference of Applied Superconductivity Palm Desert 1998 Vorabdruck, wird veröffentlicht in IEEE Trans. Appl. Supercond.
- [42] S. Senussi, *J. Phys. III France* **2** (1992) 1041
- [43] O. Betz, Diplomarbeit 1995, Universität Karlsruhe
- [44] J. E. Evetts, B. A. Glowacki; *Cryogenics* **28** (1988) 641
- [45] A. Otto, L. J. Masur, C. Craven, D. Daly, E. R. Podtburg, J. Schreiber; IEEE Trans. Appl. Supercond. **5** (1995) 1154
- [46] M. Garber, M. Suenaga, W. B. Sampson, R. L. Sabatini; *Adv. Cryo. Eng.* **32** (1985) 707
- [47] M. Polák, W. Zhang, J. Parrell, X. Y. Cai, A. Polyanskii, E. E. Hellstrom, D. C. Larbalestier, M. Majoros; *Supercond. Sci. Technol.* **10** (1997) 769
- [48] S. Takacs; *Cryogenics* **28** (1988) 375
- [49] D. N. Matthews, K.-H. Müller, C. Andrikidis, H. K. Liu, S. X. Dou; *Physica C* **229** (1994) 403
- [50] W. T. Norris; *J. Physics D* **3** (1970) 489
- [51] A. Oota, K. Kawano, T. Fukunaga; *Physica C* **291** (1997) 188
- [52] E. C. L. Chesneau, B. A. Glowaki, J. Kvitkovic, M. Majoros, K. van Beek, M. Konczykowski; Conference of Applied Superconductivity Palm Desert 1998 Vorabdruck, wird veröffentlicht in IEEE Trans. Appl. Supercond.
- [53] M. D. Johnston, J. Everett, M. Dhale, A. D. Caplin, C. M. Friend, L. Lelay, T. B. Beales, G. Grasso, R. Flükiger; IEEE Trans Appl. Supercond. **7** (1997) 1339
- [54] J. Herrmann, N. Savvides, K.-H. Müller, R. Zhao, G. McCaughey, F. Darmann, M. Apperley; *Physica C* **305** (1998) 114
- [55] Y. Yang, T. Hughes, C. Beduz, D. M. Spiller, R. G. Scurlock, W. T. Norris; *Physica C* **256** (1996) 378
- [56] H. Eckelmann, M. Däumling, M. Quilitz, W. Goldacker; *Physica C* **295** (1998) 198

- [57] E. H. Brandt, M. V. Indenbom, A. Forkel; *Europhys. Lett.* **22** (1993) 735
- [58] S. P. Ashworth, B. A. Glowacki, M. Ciszek, E. C. L. Chesneau;
IEEE Trans. Appl. Supercond. **7** (1997) 1662
- [59] W. B. Sampton, A. K. Ghosh; *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** (1995) 1036
- [60] L. Krempasky, C. Schmidt; *J. Appl. Phys.* **78** (1995) 5800
- [61] A. A. Ahmetov, K. Kuroda, K. Ono, M. Takeo; *Cryogenics* **35** (1995) 495
- [62] F. Gömöry, L. Gheradi, R. Mele, D. Morin, G. Crotti; *Physica C* **279** (1997) 39
- [63] M. Sugimoto, A. Kimura, M. Mimura, Y. Tanaka, H. Ishii, S. Honjo, Y. Iwata;
Physica C **279** (1997) 225
- [64] V. Beilin, A. Goldgrish, M. Schieber, H. Harel; *Supercond. Sci. Technol.* **9** (1996) 549
- [65] S. Patel, T. Haugan, D. T. Shaw; *Cryogenics* **34** (1994) 1031
- [66] H.-W. Neumüller, M. Wilhelm, K. Fischer, A. Jenovelis, M. Schubert, Chr. Rodig;
Adv. Cryo. Eng. **40** (1994) 139
- [67] S. Patel, T. Haugau, S. Chen, F. Wong, E. Narumi, D. T. Shaw;
Cryogenics **34** (1994) 537
- [68] C. J. Christopherson, G. N. Riley; *Appl. Phys. Lett.* **66** (1995) 2277
- [69] W. Goldacker, H. Eckelmann, M. Quilitz, B. Ullmann;
IEEE Trans Appl. Supercond. **7** (1997) 1670
- [70] N. Savvides, J. Hermann, D. Reilly, K.-H. Müller, F. Darmann, G. McCaughey, R. Zhao,
M. Apperley; *Physica C* **306** (1998) 129