

19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 **Offenlegungsschrift**
11 **DE 3531 770 A 1**

51 Int. Cl. 4:
H01 B 12/10
C 22 C 9/00

21 Aktenzeichen: P 35 31 770.1
22 Anmeldetag: 6. 9. 85
43 Offenlegungstag: 19. 3. 87



DE 3531 770 A 1

71 Anmelder:
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, 7500
Karlsruhe, DE

72 Erfinder:
Flükiger, Rene, Dr., 7500 Karlsruhe, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 **Multifilament-Supraleiterdrähte, bestehend aus mit Kupfer oder mit Kupfer-Legierung umgebenen Filamenten aus Nb₃Sn oder V₃Ga mit Zusätzen sowie Verfahren zu deren Herstellung**

Die Erfindung betrifft Multifilament-Supraleiterdrähte, bestehend aus mit Kupfer oder mit Kupferlegierung umgebenen Filamenten, die aus supraleitenden, intermetallischen Verbindungen Nb₃Sn oder V₃Ga, jeweils mit A15-Struktur, mit Zusätzen aus der Gruppe Seltene Erdmetalle, Th, U, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, Fe, Co, Ni, Pd, Cu, Ag, Al, Pt, aufgebaut sind. Aufgabe der Erfindung ist es, verbesserte Multifilament-Supraleiterdrähte der genannten Art bereitzustellen und herzustellen, welche in Magnetfeldern im Bereich unterhalb 12 T erhöhte Stromdichte-Werte um mehr als 10% oder höher gegenüber den bisher mit den genannten Materialien erreichbaren Werten gewährleisten. Dies wird dadurch erreicht, daß mindestens ein Zusatzelement innerhalb der A15-Phase an den Korngrenzen der Kristalle und/oder an den Grenzflächen der A15-Phase zum Kupfer oder zur Kupferlegierung oder zu einer weiteren Fremdphase im Draht als gleichmäßig und fein verteilte, ungelöste oder zumindest zum Teil ungelöste Einschlüsse vorliegt.

DE 3531 770 A 1

Patentansprüche

1. Multifilament-Supraleiterdrähte, bestehend aus mit Kupfer oder mit Kupferlegierung umgebenen Filamenten, die aus supraleitenden, intermetallischen Verbindungen Nb₃Sn oder V₃Ga, jeweils mit A15-Struktur, mit Zusätzen aus der Gruppe Seltene Erdmetalle, Th, U, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, Fe, Co, Ni, Pd, Cu, Ag, Al, Pt; aufgebaut sind, **dadurch gekennzeichnet**, daß mindestens ein Zusatzelement innerhalb der A15-Phase an den Korngrenzen der Kristalle und/oder an den Grenzflächen der A15-Phase zum Kupfer oder zur Kupferlegierung oder zu einer weiteren Fremdphase im Draht als gleichmäßig und fein verteilte, ungelöste oder zumindest zum Teil ungelöste Einschlüsse vorliegt.
2. Multifilament-Supraleiterdrähte nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Zusatzelement im Einschluß unregelmäßig in elementarer Form oder nach Reaktion mit der Umgebung in Form einer separaten Phase vorliegt.
3. Multifilament-Supraleiterdrähte nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Einschlüsse radiale Abmessungen von 0,5 µm oder kleiner aufweisen.
4. Multifilament-Supraleiterdrähte nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Einschlüsse radiale Abmessungen von < 0,1 µm aufweisen.
5. Multifilament-Supraleiterdrähte nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Einschlüsse achsenparallel ausgebildet sind.
6. Multifilament-Supraleiterdrähte nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Summe der Zusätze in den Einschlüssen einer Konzentration im Bereich von 0,1 Gew.-% bis 50 Gew.-%, bezogen auf den Nb-Anteil der A15-Phase im Falle von Nb₃Sn und bezogen auf den V-Anteil der A15-Phase im Falle von V₃Ga, entspricht.
7. Verfahren zur Herstellung von Multifilament-Supraleiterdrähten gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß man
 - a) ein metallisches Pulver aus einem oder mehreren der genannten Zusatzmetalle oder aus einer oder mehreren Legierungen aus mindestens zwei der Zusatzmetalle mischt mit einem Pulver
 - a₁) aus Niob, oder
 - a₂) aus einer oder mehreren Nb-Legierungen aus der Gruppe Nb-Ta, Nb-Ti, Nb-Zr oder
 - a₃) aus Vanadium oder
 - a₄) aus einer oder mehreren V-Legierungen aus der Gruppe V-Ta, V-Nb, V-Ti, V-Zr,
 wobei alle Pulver Korngrößen aufweisen im Bereich zwischen 0,1 µm und 400 µm Durchmesser und der Anteil y des bzw. der Zusatzmetalle im Pulvergemisch einem Gewichtsprozentwert innerhalb der Grenzen $0,1 \leq y \leq 50$ entspricht,
 - b) das aus a) erhaltene Pulvergemisch in einen kompaktierbaren und evakuierbaren Behälter aus Kupfer oder aus einer Kupferlegierung einfüllt, die eingeschlossene Luftmenge entfernt und danach das Pulvergemisch mit dem geschlossenen Behälter durch einfaches oder isostatisches Pressen gemeinsam kompaktiert bis zu einer Pulverdichte von

mehr als 90% T.D. und
 c) den kompaktierten Behälter in an sich bekannter Weise zu einem Draht mit einem Durchmesser im Bereich von 0,5 mm bis 15 mm verformt und nach Entfernen der äußeren Cu- oder Cu-Legierungsschicht nach einer der bekannten Verfahrensweisen zu Nb₃Sn-Drähten oder zu V₃Ga-Drähten weiterverarbeitet.

8. Verfahren zur Herstellung von Multifilament-Supraleiterdrähten gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß man

a) Stäbe und/oder Drähte aus einem oder mehreren der genannten Zusatzmetalle und/oder aus einer oder mehreren Legierungen aus mindestens zwei der Zusatzmetalle in Rohre

a₁) aus Niob, oder

a₂) aus einer oder mehreren Nb-Legierungen aus der Gruppe Nb-Ta, Nb-Ti, Nb-Zr oder

a₃) aus Vanadium oder

a₄) aus einer oder mehreren V-Legierungen aus der Gruppe V-Ta, V-Nb, V-Ti, V-Zr

einführt, wobei der Anteil z des bzw. der Zusatzmetalle im Gesamtverbund Stäbe/Drähte-Rohre einem Gewichtsprozentwert innerhalb der Grenzen $0,1 \leq z \leq 50$ entspricht,

b) die gefüllten Rohre zu hexagonalen Querschnitten in an sich bekannter Weise plastisch verformt,

c) die hexagonalen Rohre bündelt zu einer dichten Packung, diese in ein Rohr aus Cu oder aus einer Cu-Legierung einsetzt, Letztere in bekannter Weise zu runden Stäben verformt, die äußere Schicht aus Cu oder Cu-Legierungen vollständig oder teilweise entfernt und nach einer der bekannten Verfahrensweisen zu Nb₃Sn-Drähten oder zu V₃Ga-Drähten weiterverarbeitet.

Beschreibung

Die Erfindung betrifft Multifilament-Supraleiterdrähte, bestehend aus mit Kupfer oder mit Kupferlegierung umgebenen Filamenten, die aus supraleitenden, intermetallischen Verbindungen Nb₃Sn oder V₃Ga, jeweils mit A15-Struktur, mit Zusätzen aus der Gruppe Seltene Erdmetalle, Th, U, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, Fe, Co, Ni, Pd, Cu, Ag, Al, Pt, aufgebaut sind. Weiterhin betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Herstellung solcher Supraleiterdrähte.

Multifilament-Supraleiterdrähte auf der Basis Bronze-Nb₃Sn mit ternären oder quaternären Zusätzen von beispielsweise Uran, Titan, Zirkonium, Hafnium, Vanadium, Tantal, Eisen, Nickel, Palladium, Aluminium oder andere sind aus der Veröffentlichung der europäischen Patentanmeldung Nr. 00 48 313 A1 bekannt. Diese Zusätze dienen dort der Vermeidung des sogenannten Prestress-Effektes und wurden dem Niob und/oder dem Kupfer bzw. der Bronze zulegiert. Durch die in der europäischen Offenlegungsschrift beschriebenen Legierungszusammensetzungen und zur Herstellung der Supraleiterdrähte erforderlichen Maßnahmen wird die vor allem bei hohen Magnetfeldern auftretende Verschiebung der kritischen Stromstärke zu niedrigeren Werten im Vergleich zu dem maximalen Wert stark verringert bzw. verhindert.

Mit den bekannten Methoden zur Herstellung von Nb₃Sn- oder V₃Ga-Multifilament-Supraleiterdrähten erhält man Produkte, welche bei mittleren Magnetfeldern (12 T) kritische Stromdichtewerte um 10⁵ A/cm² aufweisen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, verbesserte Multifilament-Supraleiterdrähte, bestehend aus mit Kupfer oder mit Kupferlegierung umgebenen Filamenten, die aus supraleitenden intermetallischen Verbindungen Nb_3Sn oder V_3Ga , jeweils mit A15-Kristallstruktur, mit Zusätzen aufgebaut sind, bereitzustellen und herzustellen, welche in Magnetfeldern ihres Anwendungsbereiches, vor allem in Magnetfeldern im Bereich unterhalb 12 T, erhöhte Stromdichte-Werte um mehr als 10% oder höher gegenüber den bisher mit den genannten Materialien erreichbaren Werten gewährleisten.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch Multifilament-Supraleiterdrähte, bestehend aus mit Kupfer oder mit Kupferlegierung umgebenen Filamenten, die aus supraleitenden, intermetallischen Verbindungen Nb_3Sn oder V_3Ga , jeweils mit A15-Struktur, mit Zusätzen aus der Gruppe Seltene Erdmetalle, Th, U, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, Fe, Co, Ni, Pd, Cu, Ag, Al, Pt aufgebaut sind, welche dadurch gekennzeichnet sind, daß mindestens ein Zusatzelement innerhalb der A15-Phase an den Korngrenzen der Kristalle und/oder an den Grenzflächen der A15-Phase zum Kupfer oder zur Kupferlegierung oder zu einer weiteren Fremdphase im Draht als gleichmäßig und fein verteilte, ungelöste oder zumindest zum Teil ungelöste Einschlüsse vorliegt.

Das Zusatzelement im Einschluß kann unreakt in elementarer Form oder nach Reaktion mit der Umgebung in Form einer separaten Phase vorliegen. Mit den genannten Zusätzen können sowohl binäre Leiter (z. B. Nb_3Sn - oder V_3Ga -Leiter) als auch multinäre Leiter (das sind solche, die ternäre oder quaternäre etc. Legierungsbestandteile in der A15-Struktur aufweisen) versehen sein, wenn diese Zusätze Einschlüsse, d. h. separate Phasen, bilden. Die Einschlüsse weisen allgemein radiale Abmessungen von 0,5 μm oder kleiner auf. In einer vorteilhaften Ausbildung der Erfindung weisen die Einschlüsse radiale Abmessungen von weniger als 0,1 μm auf. Für die Erfindung ist es ebenfalls von Vorteil, wenn die Einschlüsse achsenparallel ausgebildet sind. Die Summe der Zusätze in den Einschlüssen kann einer Konzentration im Bereich von 0,1 Gew.-% bis 50 Gew.-%, bezogen auf den Nb-Anteil der A15-Phase im Falle von Nb_3Sn und bezogen auf den V-Anteil der A15-Phase im Falle von V_3Ga , entsprechen.

Der Teil der Aufgabe, der sich mit der Herstellung der erfindungsgemäßen Multifilament-Supraleiterdrähte befaßt, wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß man

a) ein metallisches Pulver aus einem oder mehreren der genannten Zusatzmetalle oder aus einer oder mehreren Legierungen aus mindestens zwei der Zusatzmetalle mischt mit einem Pulver

- a₁) aus Niob, oder
- a₂) aus einer oder mehreren Nb-Legierungen aus der Gruppe Nb-Ta, Nb-Ti, NbZr oder
- a₃) aus Vanadium oder
- a₄) aus einer oder mehreren V-Legierungen aus der Gruppe V-Ta, V-Nb, V-Ti, V-Zr,

wobei alle Pulver Korngrößen aufweisen im Bereich zwischen 0,1 μm und 400 μm Durchmesser und der Anteil y des bzw. der Zusatzmetalle im Pulvergemisch einem Gewichtsprozentwert innerhalb der Grenzen $0,1 \leq y \leq 50$ entspricht,

b) das aus a) erhaltene Pulvergemisch in einen kompaktierbaren und evakuierbaren Behälter aus Kupfer oder aus einer Kupferlegierung einfüllt, die eingeschlossenen Luftmenge entfernt und danach das Pulvergemisch

mit dem geschlossenen Behälter durch einfaches oder isostatisches Pressen gemeinsam kompaktiert bis zu einer Pulverdichte von mehr als 90% T.D. und

c) den kompaktierten Behälter in an sich bekannter Weise zu einem Draht mit einem Durchmesser im Bereich von 0,5 mm bis 15 mm verformt und nach Entfernen der äußeren Cu- oder Cu-Legierungs-Schicht nach einer der bekannten Verfahrensweisen zu Nb_3Sn -Drähten oder zu V_3Ga -Drähten weiterverarbeitet.

Eine andere Version des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, daß man

a) Stäbe und/oder Drähte aus einem oder mehreren der genannten Zusatzmetalle und/oder aus reiner oder mehreren Legierungen aus mindestens zwei der Zusatzmetalle in Rohre

- a₁) aus Niob, oder
- a₂) aus einer oder mehreren Nb-Legierungen aus der Gruppe Nb-Ta, Nb-Ti, Nb-Zr oder
- a₃) aus Vanadium oder

a₄) aus einer oder mehreren V-Legierungen aus der Gruppe V-Ta, V-Nb, V-Ti, V-Zr

eingführt, wobei der Anteil z des bzw. der Zusatzmetalle im Gesamtverbund Stäbe/Drähte-Rohre einem Gewichtsprozentwert innerhalb der Grenzen $0,1 \leq z \leq 50$ entspricht,

b) die gefüllten Rohre zu hexagonalen Querschnitten in an sich bekannter Weise plastisch verformt,

c) die hexagonalen Rohre bündelt zu einer dichten Packung, diese in ein Rohr aus Cu oder aus einer Cu-Legierung einsetzt, letztere in bekannter Weise zu runden Stäben verformt, die äußere Schicht aus Cu oder Cu-Legierungen vollständig oder teilweise entfernt und nach einer der bekannten Verfahrensweisen zu Nb_3Sn -Drähten oder zu V_3Ga -Drähten weiterverarbeitet.

Das Vorliegen gleichmäßig und fein verteilter ungelöster oder zumindest zum Teil ungelöster Einschlüsse aus den genannten Zusatzelementen bzw. Zusatzmetallen im Multifilament-Supraleiterdraht bringen folgende Veränderungen mit sich:

- 40 Verringerung der Korngrößen
- Erhöhung der Dichte der Haftzentren (pinning centers)
- Erhöhung der Grenzflächensumme
- Erhöhung der kritischen Stromdichte bei mittleren Magnetfeldern.

Bei der Reaktion zur supraleitenden Verbindung bzw. zur A15-Struktur gegen Ende des Herstellungsprozesses im Temperaturbereich zwischen 550 und 800°C werden die genannten Einschlüsse nicht oder nur teilweise in der A15-Struktur gelöst, oder ein Teil des Einschlußmaterials formt mit Matrix- oder Kern-Materialien des Drahtes neue Verbindungen, welche zusätzliche Phasen bilden.

Magnetfelder bis zu einer Feldstärke von 15 Tesla können heute in kommerziellen supraleitenden Laborspulen bei Temperaturen von 4,2 K erreicht werden. Neuere Entwicklungen haben Magnetfelder von 18 T (bei 1,8 K sogar 20 T) in den Bereich des Möglichen gerückt. Um diese Felder zu erzeugen, müssen Materialien wie Nb_3Sn , V_3Ga (beide mit A15-Kristallstruktur) verwendet werden. Diese sind alle sehr spröde, mit einer Bruchdehnung um 0,1%. Um mit dieser ungünstigen Eigenschaft fertig zu werden, wurde eine Vielzahl z. T. recht komplexer Verfahren zur Herstellung der entsprechenden Supraleiterdrähte entwickelt. Bei allen diesen Verfahren werden Teilelemente, die noch nicht die endgültigen supraleitenden Eigenschaften haben, aber noch duktil sind, mechanisch zu einem Draht mit den Endabmessungen verformt. Dieser wird dann einer Re-

aktionsglühung zwischen 550 und 800°C unterzogen um die supraleitende Phase zu bilden. Ein typischer Supraleiterdraht von ca. 1 mm Durchmesser besteht aus mehreren tausend Filamenten, die aus den o. g. A15-Materialien bestehen. Diese Filamente haben Durchmesser (oder charakteristische Abmessungen bei Abweichungen von der Kreisform) unterhalb 5 µm, wobei einzelne Herstellungsmethoden sogar typische Filamentabmessungen < 1 µm aufweisen.

Zur thermischen Stabilisierung besteht die äußere Hülle (oder der Kern) eines Supraleiterdrahtes aus reinem Kupfer, das durch eine Nb- oder Ta-Barriere von der Kupferbronze oder vom Supraleitermaterial getrennt ist, um Verunreinigungen bei der Reaktionsglühung zu vermeiden. Zur Verringerung der Wechselstromverluste ist der Draht um die eigene Achse verdrillt, mit einer Ganghöhe von ca. 20 mm.

Die zur Zeit gebräuchlichsten Methoden zur Herstellung von Nb₃Sn- oder V₃Ga-Multifilamente-Supraleiterdrähten (Verfahrensschritt c) sind:

a) das Bronzeverfahren (A. R. Kaufmann and J. J. Pickett, J. Appl. Phys. 42, 58 (1971))

b) die externe Sn-Diffusion: für Nb₃Sn (M. Suenaga and W. B. Sampson, Appl. Phys. Lett., 20, 443 (1972))

c) die externe Ga-Diffusion: für V₃Ga (R. Bormann and H. C. Freyhardt, IEEE, Trans. Magn., Mag-17, 270 (1981))

d) die interne Sn-Diffusion: für Nb₃Sn (Y. Hashimoto, K. Yoshizaki und M. Tanaka, 5th. Int. Cryogenics Eng. Conf. Proc., IPC Science und Technology Press, London, P. 332, 1974)

e) die kalte pulvermetallurgische Methode: für Nb₃Sn und für V₃Ga (R. Flükiger, IEEE Trans. Magn., MAG-16, 1236 (1980))

f) die Modified Jelly Roll-Methode: für Nb₃Sn und für V₃Ga (W. K. McDonald, C. W. Curtis, R. M. Scanlan, D. C. Larbalestier, K. Marten und D. B. Smathers, IEEE Trans. Magn. MAG-19, 1124 (1983))

g) die Infiltrationsmethode: für Nb₃Sn (K. Hemachalam and M. R. Pickus, IEEE Trans. Magn., MAG-13, 466 (1977))

h) die ECN-Methode: für Nb₃Sn (H. Veringa, P. Hoggendahn and A. C. A. Van Wees, IEEE Trans. Magn., MAG-19, 773 (1983))

i) die "In situ" Methode: für V₃Ga (C. C. Tsuei, Science, 180 57 (1983))

Von allen bis heute bekannten Methoden zur industriellen Herstellung von Nb₃Sn-Vielkerndrähten haben drei die größte Verbreitung gefunden, nämlich die "Bronze-Methode", die "Modified Jelly Roll"-Methode und die Methode der "Internen Sn-Diffusion". Diese Methoden haben ein wesentliches gemeinsames Merkmal: bei der Reaktionsglühung am Ende des Drahtziehprozesses (typisch 3 Tage bei 700°C) entsteht die A15-Phase durch eine Diffusionsreaktion, d. h. Sn diffundiert aus der Cu-Sn-Bronze (welche erst zu Beginn der gewünschten Reaktion gebildet wird) und reagiert mit Nb zu Nb₃Sn.

Die Bronzemethode hat bis heute die größte Verbreitung gefunden, hat aber den Nachteil, daß die Cu-13 Gew.-% Sn-Bronze bei der Kaltverformung sehr stark härtet, was Erholungsglühungen nach jeweils 50% Flächenreduktion notwendig macht. Total werden also pro Draht 15 bis 20 Glühungen von ca. 1 Stunde bei 500°C erforderlich, was den Herstellungsprozeß erheblich verlangsamt. Bei der "Modified Jelly Roll"-Methode wird von dünnen Nb und Cu-Sn-Bronzefolien ausgegangen, die um einen Kupferkern gewickelt und anschließend

stranggepreßt werden. Wegen der geringen Foliendicke kommt man mit weniger Erholungsglühungen aus als bei der Bronze-Methode. Wird die Cu-Sn-Folie durch Sn ersetzt, so ergibt sich dieselbe Situation wie bei der dritten oben genannten Methode, der "internen Sn-Diffusion", bei der die Erholungsglühungen ganz wegfallen, was sich als zeitsparend und kostengünstig auswirkt. Der Umstand, daß die Kombination der Elemente Cu und Sn wesentlich einfacher zu verformen ist als die Cu-13 Gew.-% Sn-Bronze, ist ein weiterer Vorteil für die interne Sn-Diffusionsmethode, der deswegen gute Zukunftsaussichten eingeräumt werden.

J_c ist von der Haftzentren-Dichte an den Korngrenzen und somit von der Korngröße abhängig. Verschiedene Kornstrukturen wurden bis jetzt nachgewiesen: an der Nb-Grenze relativ große, säulenartige Körner (bis zu 1 µm Länge) mit starker Texturierung senkrecht zur Drahtachse, anschließend sehr feine Körner mit statistisch verteilten Orientierungen (800 bis 2000 Å nach einer Glühzeit von 3 Tagen bei 700°C), gefolgt von einer grobkörnigen Schicht (≥ 2000 Å) (W. Schauer and W. Schelb, IEEE Trans. Magn., MAG-17, 374 (1981)). Die sehr feinen Körner tragen am meisten zu J_c bei.

Im folgenden wird die Erfindung anhand der Beschreibung eines Durchführungsbeispiels näher erläutert:

Beispiel 1 (Bronze-Methode):

Zur Herstellung der Proben wurden Niobpulver mit Korngrößen zwischen 106 und 125 µm verwendet. Seine Vickershärte betrug ca. 85 kg/mm². Der Zusatzstoff war Nickelpulver (ca. 20 µm Durchmesser; $H_V = 70 - 85$ kg/mm²). Abgewogene Pulvermengen wurden gemischt und dann vorsichtig — damit sie sich nicht wieder entmischen — mit einem Trichter in ein unten verschlossenes Cu-Zr-Rohr geschüttet, dessen Länge ca. 7 cm und dessen Durchmesser 9 mm war. Um eine hohe Kompaktierung zu erreichen, wurde das Pulver schon bei Teilfüllungen des Rohrs mit ca. 200 MPa vorgepreßt. Zum Verschliessen wurde ein Cu-Zr-Stopfen mit ca. 300 MPa von oben eingepreßt.

Anschließend erfolgte die Drahtherstellung, größtenteils durch Hämmern, teilweise auch durch Walzen. Um die Einschlüsse auf eine Dimension von kleiner 0,1 µm zu bringen, ist eine Querschnittsflächenreduktion $R_s = 10^6$ erforderlich. Aufgrund der kleinen Probendurchmesser war es notwendig, den Leiter mehrfach zu bündeln. Dazu wurde bei ca. 1 mm Drahtdurchmesser das Hüllmaterial mit verdünnter Salpetersäure abgeätzt und dann 19 Stücke des Leiters wieder in ein Cu-Zr-Rohr gebündelt. Die zweite Bündelung erfolgte in ein Bronzerohr, welches dann auf den Enddurchmesser von 0,6 mm gehämmert wurde.

Die abschließende Reaktionsglühung, bei der die Nb₃Sn-A15-Struktur entstand, erfolgte bei 675°C und einer Glühdauer von 100 Stunden. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren wurde eine Erhöhung des J_c -Wertes erreicht, bei 6 T um 43,6%, bei 8 T um 41,5% und bei 10 T um 17,6% gegenüber den entsprechenden J_c -Werten für einen Nb₃Sn-Leiter mit 100 Gew.-% Nb in der A15-Struktur ohne Ni-Einschlüsse (siehe nachfolgende Figur). Kurve 1 wurde nach dem erfindungsgemäßen Verfahren mit einem Nb₃Sn-Leiter erhalten, in welchem 85 Gew.-% Nb und 15 Gew.-% Ni (als Einschlüsse), bezogen auf die Summe (Nb + Ni), enthalten war. Kurve 2 entstand aus den J_c -Werten des Nb₃Sn-Leiters mit 100 Gew.-% Nb (Vergleichsleiter ohne Ein-

schlüsse).

Die Verarbeitbarkeit der anderen angegebenen Materialien ist ähnlich der des Nickels. Verunreinigungen durch Sauerstoff, Kohlenstoff und Stickstoff in den Startmaterialien sind zu vermeiden. Die Vickershärte 5 der gemischten Pulver muß ungefähr gleich hoch sein, damit sich die beiden Pulversorten gleichmäßig verformen.

Das Herstellungsbeispiel wurde nach der Bronze-Methode durchgeführt, der gewünschte Supraleiterdraht 10 ließe sich aber auch nach den ähnlichen Verfahren der Internen-Zinndiffusion und der ECN-Methode produzieren.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

3531770

Nummer:

35 31 770

Int. Cl.4:

H 01 B 12/10

Anmeldetag:

6. September 1985

Offenlegungstag:

19. März 1987

