



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT  
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

⑤① Int. Cl. 3: H 01 B 12/00  
H 01 B 13/00

**Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein**

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑫ **PATENT SCHRIFT** A5

⑪

**643 969**

⑫① Gesuchsnummer: 7293/78

⑦③ Inhaber:  
Vacuumschmelze GmbH, Hanau (DE)

⑫② Anmeldungsdatum: 04.07.1978

⑫③ Priorität(en): 11.08.1977 DE 2736157

⑦② Erfinder:  
Dr. Hans Hillmann, Rodenbach 1 (DE)  
Dr. Engelbert Springer, Rodenbach 1 (DE)

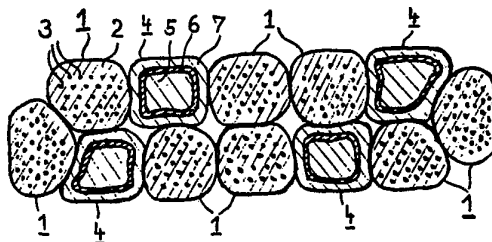
⑫④ Patent erteilt: 29.06.1984

⑫⑤ Patentschrift  
veröffentlicht: 29.06.1984

⑦④ Vertreter:  
Moinas & Cie, Genève

**⑤④ Supraleitender Verbundleiter und Verfahren zu dessen Herstellung.**

⑤⑦ Der supraleitende Verbundleiter besteht aus mehreren Strängen (1) mit einer aus wenigstens zwei Elementen bestehenden supraleitenden intermetallischen Verbindung und wenigstens einem Strang (4) aus gut thermisch und elektrisch leitendem, bei der Betriebstemperatur des Verbundleiters elektrisch normalleitendem Stabilisierungsmetall. Die Stränge (1) enthalten je wenigstens einen wenigstens an seiner Oberfläche eine Schicht aus der Verbindung aufweisenden Kern (3) aus wenigstens einem höherschmelzenden Element der Verbindung, der in eine Legierung (2) aus wenigstens einem niedrigerschmelzenden Element der Verbindung und einem Trägermetall eingebettet ist. Der Strang (4) aus dem Stabilisierungsmetall ist mit den benachbarten, die supraleitende Verbindung enthaltenden Strängen (1) durch Diffusion wenigstens eines niedrigerschmelzenden Elementes der Verbindung verbunden und enthält wenigstens einen durch eine die Diffusion hemmende Schicht (6) umschlossenen, sich entlang des Stranges erstreckenden Bereich (5). Der Verbundleiter eignet sich insbesondere für Supraleitungsspulen zur Erzeugung starker Magnetfelder.



## PATENTANSPRÜCHE

1. Supraleitender Verbundleiter aus mehreren Strängen mit einer aus wenigstens zwei Elementen bestehenden supraleitenden intermetallischen Verbindung und wenigstens einem Strang aus gut thermisch und elektrisch leitendem, bei der Betriebstemperatur des supraleitenden Verbundleiters elektrisch normalleitendem Stabilisierungsmetall, wobei die Stränge mit der supraleitenden Verbindung je wenigstens einen wenigstens an seiner Oberfläche eine Schicht aus der Verbindung aufweisenden Kern aus wenigstens einem höherschmelzenden Element der Verbindung eingebettet in eine Legierung aus wenigstens einem niedrigerschmelzenden Element der Verbindung und einem Trägermetall enthalten, dadurch gekennzeichnet, dass der Strang (4) aus dem Stabilisierungsmetall mit den benachbarten, die supraleitende Verbindung enthaltenden Strängen (1) durch Diffusion wenigstens eines niedrigerschmelzenden Elementes der Verbindung verbunden ist und wenigstens einen durch eine die Diffusion hemmende Schicht (6) umschlossenen, sich entlang des Stranges erstreckenden Bereich (5) enthält.

2. Verbundleiter nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass jeder Strang (1) mit der supraleitenden Verbindung mit wenigstens einem Strang (4) aus Stabilisierungsmetall verbunden ist.

3. Verbundleiter nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass er als Flachseil ausgebildet ist.

4. Verbundleiter nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Stränge (1) mit der supraleitenden Verbindung und die Stränge (4) aus Stabilisierungsmetall den gleichen Querschnitt haben.

5. Verbundleiter nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Stränge (1) mit der supraleitenden Verbindung eine Vielzahl von in eine Matrix (2) aus der Legierung eingelagerten fadenförmigen Kernen (3) mit einer Schicht aus der Verbindung wenigstens an deren Oberfläche aufweisen.

6. Verbundleiter nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass das höherschmelzende Element der supraleitenden Verbindung eines der Metalle Niob und Vanadin und das niedrigerschmelzende Element eines der Elemente Zinn und Gallium ist.

7. Verbundleiter nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass das Trägermetall der Legierung und das Stabilisierungsmetall Kupfer ist.

8. Verbundleiter nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die diffusionshemmende Schicht (6) aus einem der Metalle Tantal, Niob und Vanadin besteht.

9. Verbundleiter nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass er wenigstens einen zusätzlichen Strang (33) aus einem Verstärkungsmaterial enthält.

10. Verfahren zum Herstellen eines supraleitenden Verbundleiters nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Stränge (1), die wenigstens einen Kern (3) aus wenigstens einem höherschmelzenden Element der supraleitenden Verbindung eingebettet in eine Legierung (2) aus einem Trägermetall und wenigstens einem niedrigerschmelzenden Element der Verbindung enthalten, und wenigstens ein Strang (4), der wenigstens einen von einer diffusionshemmenden Schicht (6) umschlossenen, sich entlang des Stranges erstreckenden Bereich (5) enthält, zu einem Leiter zusammengefügt werden, wobei wenigstens eine Art von Strängen mit einer Schicht wenigstens eines niedrigerschmelzenden Elementes der Verbindung überzogen ist, und dass der Leiter zum Verbinden der Stränge durch Diffusion und zur Herstellung der supraleitenden intermetallischen Verbindung wärmebehandelt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet,

dass zum Verbinden der Stränge durch Diffusion eine erste Wärmebehandlung bei einer Temperatur unterhalb der Bildungstemperatur der supraleitenden Verbindung und zur Herstellung der supraleitenden Verbindung eine zweite Wärmebehandlung oberhalb dieser Temperatur vorgenommen wird.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Wärmebehandlung mit einer Warmverformung zur Kalibrierung des Leiters verbunden ist.

13. Verfahren nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass die zweite Wärmebehandlung erst nach der endgültigen Formgebung des Leiters vorgenommen wird.

Die Erfindung betrifft einen supraleitenden Verbundleiter aus mehreren Strängen mit einer aus wenigstens zwei Elementen bestehenden supraleitenden intermetallischen Verbindung und wenigstens einem Strang aus gut thermisch und elektrisch leitendem, bei der Betriebstemperatur des supraleitenden Verbundleiters elektrisch normalleitendem Stabilisierungsmetall, wobei die Stränge mit der supraleitenden Verbindung je wenigstens einen wenigstens an seiner Oberfläche eine Schicht aus der Verbindung aufweisenden Kern aus wenigstens einem höherschmelzenden Element der Verbindung eingebettet in eine Legierung aus wenigstens einem niedrigerschmelzenden Element der Verbindung und einem Trägermetall enthalten.

Derartige supraleitende Verbundleiter sind in Form von Seilen, Litzen oder Flachseilen aus der DT-AS 23 45 779, insbesondere Spalte 6, Zeile 16 bis Spalte 8, Zeile 51 und der DT-OS 26 54 924, insbesondere Seite 30, Abs. 1 und Seite 64, letzter Absatz bis Seite 67, Abs. 2 bekannt.

Ausgehend von einem Vorprodukt, das aus einer Legierung aus einem Trägermetall und wenigstens einem niedrigerschmelzenden Element der supraleitenden Verbindung und einem oder mehreren in die Legierung eingelagerten Kernen aus wenigstens einem höherschmelzenden Element der Verbindung besteht, wird die intermetallische supraleitende Verbindung bei derartigen Leitern durch eine Wärmebehandlung gebildet, bei der das niedrigerschmelzende Element der Verbindung in den Kern aus dem höherschmelzenden Element eindiffundiert und mit dem Kernmaterial unter Bildung der Verbindung reagiert. Je nach der Zusammensetzung der Legierung, den Abmessungen des Vorproduktes und der Dauer der Wärmebehandlung kann dabei eine oberflächenschicht des Kernes oder auch der gesamte Kern in die supraleitende Verbindung umgewandelt werden.

In der Praxis werden derzeit insbesondere die intermetallischen supraleitenden Verbindungen  $Nb_3Sn$  und  $V_3Ga$  verwendet, die beide A15-Kristallstruktur besitzen. Beide Verbindungen haben sehr gute Supraleitungseigenschaften und zeichnen sich insbesondere durch eine hohe Sprungtemperatur, ein hohes kritisches Magnetfeld und eine hohe kritische Stromdichte aus. Zur Herstellung von Supraleitern mit diesen Verbindungen geht man in der Regel von einem Vorprodukt aus einer Matrix aus einer Kupfer-Zinn- bzw. Kupfer-Gallium-Legierung aus, in die eine Vielzahl von Niob- bzw. Vanadinkernen eingelagert sind. Dieses Vorprodukt wird zunächst querschnittsverringert bearbeitet, wobei die Kerne zu dünnen Fäden ausgezogen werden. Anschließend erfolgt die Wärmebehandlung zur Bildung der Verbindung. Ausser den beiden genannten Verbindungen sind aber auch noch andere zwei- oder mehrkomponentige Verbindungen mit der gleichen Kristallstruktur, wie z.B.  $Nb_3Ga$ ,  $Nb_3Al$ ,  $V_3Ga$ ,  $V_3Si$  oder  $Nb_3(Al_{0,8}Ge_{0,2})$ , sowie intermetallische supraleitende Verbindungen mit anderen Kristallstrukturen von Interesse.

Gewisse Schwierigkeiten treten bei Supraleitern mit supraleitenden intermetallischen Verbindungen dadurch auf, dass die supraleitenden Verbindungen verhältnismässig spröde sind. Die Biegsamkeit der fertigen Leiter ist daher in der Regel geringer als beispielsweise die von vergleichbaren Leitern, die Kerne aus supraleitenden Legierungen, beispielsweise Niob-Titan, enthalten. Man ist daher bestrebt, die Schichten aus den supraleitenden Verbindungen an der Oberfläche der Kerne und auch die Kerne selbst möglichst dünn auszubilden. Da hierzu starke Querschnittsverringerungen der Vorprodukte erforderlich sind, besitzen die Leiterstränge, welche die Kerne enthalten, in der Regel auch selbst einen verhältnismässig geringen Querschnitt. Dies hat den Vorteil, dass die Kerne innerhalb eines Leiterstranges beim Biegen des Leiters, etwa beim Wickeln zu einer Spule, relativ nahe an der neutralen Faser liegen, so dass sich die in den Verbindungsschichten auftretenden mechanischen Zug- und Druckspannungen auch noch bei verhältnismässig kleinen Biege-  
radien in Grenzen halten lassen. Wenn hohe Stromstärken erzielt werden sollen, müssen dann allerdings eine Reihe von dünnen Einzelsträngen zu einem Leiter grösseren Querschnitts zusammengefasst werden, von dessen neutraler Faser die supraleitenden Schichten der einzelnen Leiterstränge wie-  
der weiter entfernt liegen.

Ein weiteres Problem stellt bei Supraleitern mit intermetallischen Verbindungen die elektrische Stabilisierung der Supraleiter dar, zu der bekanntlich gut thermisch und elektrisch leitendes, bei der Betriebstemperatur des Supraleiters elektrisch normalleitendes Metall erforderlich ist. Im Gegensatz zu Supraleitern, bei denen beispielsweise dünne fadenförmige Kerne aus Niob-Titan in eine Kupfermatrix eingelagert sind, lässt sich das die Kerne umgebende Legierungsmaterial nur schlecht zur Stabilisierung ausnutzen. Da das Legierungsmaterial auch nach der Bildung der supraleitenden Verbindung noch Reste des niedrigerschmelzenden Elementes bzw. mehrere solcher Elemente der Verbindung enthält, besitzt es nämlich bei der Betriebstemperatur des Supraleiters, die unterhalb der kritischen Temperatur des jeweiligen Supraleitermaterials, d.h. in der Regel zwischen etwa 1 und 20 K, liegt, einen wesentlichen höheren elektrischen Widerstand als etwa reines Kupfer. Um eine bessere Stabilisierung zu erreichen, sind bei den eingangs erwähnten, aus der DT-AS 23 45 779 und der DT-OS 26 54 924 bekannten supraleitenden Verbundleitern zusätzlich zu den Strängen mit der supraleitenden Verbindung Stränge aus Stabilisierungsmetall, beispielsweise Kupfer, vorgesehen. Um auch nach der Wärmebehandlung zur Bildung der supraleitenden Verbindung noch eine möglichst grosse Flexibilität des Leiters zu erzielen, ist jedoch bei diesen bekannten Leitern zwischen den einzelnen Strängen ein Trennmittel angeordnet, welches ein Aneinanderhaften benachbarter Stränge, insbesondere infolge einer Diffusion während der Wärmebehandlung, verhindert. Folglich entsteht zwischen den Strängen mit der supraleitenden Verbindung und den Strängen aus dem Stabilisierungsmetall kein enger elektrischer und thermischer Kontakt, was sich wiederum sehr ungünstig auf die Stabilisierungswirkung der Stränge aus dem Stabilisierungsmetall auswirken kann. Bei den bekannten Verbundleitern ist daher zur weiteren Verbesserung der Stabilisierung die Möglichkeit vorgesehen, innerhalb der einzelnen Stränge mit der supraleitenden Verbindung zusätzliche Bereiche aus Stabilisierungsmetall anzuordnen, die sich entlang des jeweiligen Stranges erstrecken und von einer diffusionshemmenden Schicht, beispielsweise aus Niob, Vanadin oder Tantal, umschlossen sind. Diese diffusionshemmende Schicht dient dazu, um während der Wärmebehandlung ein Eindiffundieren des niedrigerschmelzenden Elementes der Verbindung in das Stabilisierungsmetall und damit eine Erhöhung des elektrischen Widerstandes des Sta-

bilisierungsmetalls zu verhindern (vgl. z.B. DT-AS 23 45 779, Spalte 8, Zeile 55 bis Spalte 10, Zeile 40 und DT-OS 26 54 924, Seite 28, Absatz 3 bis Seite 29, letzte Zeile).

Derartige Stabilisierungsbereiche innerhalb der Leiterstränge haben jedoch einmal den Nachteil, dass sie den Strangquerschnitt vergrössern, wodurch zumindest bei zentral angeordnetem Stabilisierungsbereich der Abstand der Kerne und damit auch der Abstand der Schichten aus der intermetallischen supraleitenden Verbindung von der neutralen Faser des Leiterstranges vergrössert wird. Zum anderen ist auch die Herstellung derartiger Leiterstränge infolge der unterschiedlichen Materialeigenschaften von Kernen, Legierungsmantel, Diffusionshemmer und Stabilisierungsmetall mit grossen Problemen verbunden. Insbesondere können in der diffusionshemmenden Schicht leicht Risse auftreten, durch welche das niedrigerschmelzende Element der Verbindung in das Stabilisierungsmetall eindringen kann. In einem solchen Fall wird dann der ganze Leiterstrang einschliesslich des Supraleitermaterials unbrauchbar.

Aufgabe der Erfindung ist es, die elektrische Stabilisierung der eingangs erwähnten Verbundleiter zu verbessern, wobei möglichst Bereiche aus Stabilisierungsmetall innerhalb der einzelnen Stränge mit der supraleitenden intermetallischen Verbindung vermieden werden sollen.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäss dadurch gelöst, dass der Strang aus dem Stabilisierungsmetall, mit den benachbarten, die supraleitende Verbindung enthaltenden Strängen durch Diffusion wenigstens eines niedrigerschmelzenden Elementes der Verbindung verbunden ist und wenigstens einen durch eine diffusionshemmende Schicht umschlossenen, sich entlang des Stranges erstreckenden Bereich enthält.

Im Gegensatz zu den bekannten Verbundleitern, bei denen eine Verbindung durch Diffusion zwischen den einzelnen Strängen ausdrücklich vermieden werden soll, wird also beim erfindungsgemässen Leiter eine solche zu einem engen thermischen und elektrischen Kontakt führende Verbindung zwischen den Strängen mit der supraleitenden Verbindung und den Strängen mit dem Stabilisierungsmetall mit Absicht herbeigeführt. Es hat sich nämlich wider Erwarten gezeigt, dass die Biegsamkeit des Verbundleiters trotz der Diffusionsverbindung zwischen den Strängen völlig für die üblichen Anwendungen des Verbundleiters, beispielsweise für das Wickeln von Supraleitungsmagnetspulen, ausreicht. Im übrigen besteht auch die Möglichkeit, die Diffusionsverbindung zwischen den Leitersträngen erst nach der endgültigen Formgebung des Leiters, beispielsweise nach dem Wickeln des Leiters zu einer Spule, herzustellen. Um die Bildung der supraleitenden Verbindung nicht etwa durch Zusätze eines fremden Elementes zu stören, werden zur Herstellung der Diffusionsverbindung zwischen den Strängen ein niedrigerschmelzendes Element der Verbindung bzw. mehrere solcher Elemente verwendet. Das niedrigerschmelzende Element kann dabei nur in eine Oberflächenschicht des Stranges aus Stabilisierungsmetall eindiffundieren, während dessen innerer Bereich durch die diffusionshemmende Schicht vor einer Diffusion geschützt wird und folglich seine hohe thermische und elektrische Leitfähigkeit behält. Im Normalfall wird man nur einen solchen Bereich in einem Strang aus Stabilisierungsmetall vorsehen; in Sonderfällen können die Stränge aber auch mehrere derartige Bereiche enthalten. Da die Stränge mit der supraleitenden Verbindung und die Stränge aus dem Stabilisierungsmetall bis zu ihrer Zusammenfassung zu einem Leiter in getrennten Bearbeitungsgängen hergestellt werden können, sind die technischen Schwierigkeiten bei der Leiterherstellung erheblich reduziert.

Besonders günstig für eine gute Stabilisierungswirkung ist es, wenn jeder Strang mit der supraleitenden Verbindung mit

wenigstens einem Strang aus Stabilisierungsmetall verbunden ist.

Insbesondere bei grösseren Leiterquerschnitten bzw. beim Aufbau des Verbundleiters aus zahlreichen Leitersträngen ist es weiter vorteilhaft, den Verbundleiter als Flachseil auszubilden. In einem solchen Flachseil liegen nämlich in einer Biegerichtung die einzelnen Kerne wesentlich näher an der neutralen Faser des Leiters als bei einem Rundseil entsprechenden Querschnitts.

Weiterhin kann man den Verbundleiter vorteilhaft derart ausbilden, dass die Stränge mit der supraleitenden Verbindung und die Stränge aus Stabilisierungsmetall den gleichen Querschnitt haben. Man kann dann ohne Schwierigkeiten die Stränge beider Arten innerhalb des Leiters mischen.

Vorzugsweise wird man als Stränge mit der supraleitenden Verbindung solche Stränge verwenden, die eine Vielzahl von in eine Matrix aus der Legierung eingelagerten fadenförmigen Kernen mit einer Schicht aus der supraleitenden Verbindung wenigstens an deren Oberflächen aufweisen.

Besonders günstig als supraleitende Verbindung sind beim erfindungsgemässen Verbundleiter die Verbindungen  $Nb_3Sn$  und  $V_3Ga$ . Dabei ist das höherschmelzende Element der supraleitenden Verbindung eines der Metalle Niob und Vanadin und das niedrigerschmelzende Element eines der Elemente Zinn und Gallium.

Als Trägermaterialien für die Legierung, die die Kerne enthält, eignen sich prinzipiell alle Metalle, die mit den niedrigerschmelzenden Elementen der Verbindung eine verformbare Legierung bilden und die Bildung der Verbindung während der Wärmebehandlung nicht nachteilig beeinflussen, beispielsweise Kupfer, Silber, Nickel oder Legierungen dieser Metalle. Auch für das Stabilisierungsmetall sind prinzipiell alle bei der Betriebstemperatur des Supraleiters normalleitenden gut thermisch und elektrisch leitenden Metalle geeignet, welche die Bildung der supraleitenden Verbindung nicht stören. Besonders günstig ist Kupfer sowohl als Trägermetall der Legierung als auch als Stabilisierungsmetall.

Für die diffusionshemmenden Schichten innerhalb der Stränge aus Stabilisierungsmetall eignen sich besonders die Metalle Tantal, Niob oder Vanadin, die insbesondere eine Diffusion von Zinn und Gallium verhindern. Wenn dabei die Gefahr besteht, dass während einer Wärmebehandlung so viel Zinn oder Gallium in die Stabilisierungsleiter eindiffundiert, dass sich an der Oberfläche der diffusionshemmenden Schichten aus Niob oder Vanadin selbst wieder intermetallische supraleitende Verbindungen bilden, so kann man, wie dies aus der DT-OS 25 43 613, insbesondere Seite 7, Abs. 2 bis Seite 10, Abs. 1 bekannt ist, zusätzliche diffusionshemmende Schichten vorsehen, um die Bildung einer geschlossenen, den verbleibenden Bereich aus Stabilisierungsmetall allseitig umschliessenden Schicht aus der supraleitenden Verbindung zu verhindern. Eine solche das Stabilisierungsmetall allseitig umschliessende supraleitende Schicht kann nämlich wegen ihrer Abschirmwirkung die Stabilisierungswirkung ungünstig beeinflussen.

Zur mechanischen Verstärkung des Verbundleiters, insbesondere zur Aufnahme von Zugkräften kann man ferner innerhalb des Leiters einen oder mehrere Stränge aus einem Verstärkungsmaterial, beispielsweise Edelstahl, vorsehen. In der Regel sollten diese Stränge eine höhere Zugfestigkeit besitzen als die übrigen Stränge des Verbundleiters.

Den erfindungsgemässen Verbundleiter kann man vorteilhaft derart herstellen, dass mehrere Stränge, die wenigstens einen Kern aus wenigstens einem höherschmelzenden Element der supraleitenden Verbindung eingebettet in eine Legierung aus einem Trägermetall und wenigstens einem niedrigerschmelzenden Element der Verbindung enthalten, und wenigstens ein Strang, der wenigstens einen von einer

diffusionshemmenden Schicht umschlossenen, sich entlang des Stranges erstreckenden Bereich enthält, zu einem Leiter zusammengefügt werden, wobei wenigstens eine Art von Strängen mit einer Schicht wenigstens eines niedrigerschmelzenden Elementes der Verbindung überzogen ist, und dass der Leiter zum Verbinden der Stränge durch Diffusion und zur Herstellung der supraleitenden intermetallischen Verbindung wärmebehandelt wird. Die auf die Stränge mit den Elementen der supraleitenden Verbindung oder auf die Stränge aus Stabilisierungsmetall oder auf beide aufzubringende Schicht wenigstens eines niedrigerschmelzenden Elementes der Verbindung gewährleistet eine gute Diffusionsverbindung zwischen den Leitern und vermeidet, dass niedrigerschmelzende Elemente der Verbindung aus den Strängen mit den Kernen aus den höherschmelzenden Elementen der Verbindung, wo sie in erster Linie zur Bildung der supraleitenden Verbindung gebraucht werden, in die Stränge aus dem Stabilisierungsmetall diffundieren.

Man kann ferner vorteilhaft zum Verbinden der Stränge durch Diffusion eine erste Wärmebehandlung bei einer Temperatur unterhalb der Bildungstemperatur der supraleitenden Verbindung und zur Herstellung der supraleitenden Verbindung eine zweite Wärmebehandlung oberhalb dieser Temperatur vornehmen. Die erste Wärmebehandlung kann man dabei insbesondere mit einer Warmverformung der Stränge zur Kalibrierung des Leiters verbinden. Zwei Wärmebehandlungen sind insbesondere dann günstig, wenn die zweite Wärmebehandlung zur Herstellung der supraleitenden Verbindung erst nach der endgültigen Formgebung des Leiters vorgenommen wird, beispielsweise wenn der Leiter bereits zu einer Spule gewickelt ist. Durch die erste Wärmebehandlung haften dann die Leiterstränge bereits fest aneinander und können sich beim Wickeln der Spule nicht voneinander wegbiegen.

Anhand einiger Figuren und Ausführungsbeispiele soll die Erfindung noch näher erläutert werden.

Figuren 1 bis 3 zeigen schematisch verschiedene Ausführungsformen eines Verbundleiters gemäss der Erfindung im Querschnitt.

Bei dem in Figur 1 dargestellten Leiter sind acht Leiterstränge 1, die in einer aus einem Trägermetall und dem niedrigerschmelzenden Element einer intermetallischen supraleitenden Verbindung bestehenden Legierungsmatrix 2 eine Vielzahl von fadenförmigen Kernen 3 aus dem höherschmelzenden Element der Verbindung enthalten, mit vier Strängen 4 aus Stabilisierungsmetall derart zu einem Flachleiter verseilt, dass jeder Strang 1 mit einem Strang 4 in Berührung steht. Jeder Strang 4 enthält einen sich entlang des Stranges erstreckenden inneren Bereich 5, der von einer diffusionshemmenden Schicht 6 umschlossen ist. Diese ist nochmals von einer Aussenschicht 7 aus Stabilisierungsmetall umgeben.

Die Leiterstränge 1 kann man bekanntlich beispielsweise dadurch herstellen, dass man von einer Kupfer-Zinn-Hülle umgebene Niobstäbe bündelt und die so gewonnene Anordnung zunächst zur Herstellung eines engen metallurgischen Bondes zwischen den einzelnen Teilen warmverformt und anschliessend in einer Reihe von Kaltverformungsschritten, die von Zwischenglühungen zur Erholung des Gefüges der Legierungsmatrix unterbrochen sein können, zu einem dünnen Draht zieht. Gegen Ende der Verformung kann dieser Draht noch um seine Achse verdreht werden, so dass die fadenförmigen Kerne 3 auf Schraubenbahnen um die Achse des Drahtes verlaufen. Derart verdrehte Stränge haben den Vorteil, dass die fadenförmigen Kerne 3 innerhalb des verseilten Verbundleiters vollständig transponiert sind, d.h. entlang des Verbundleiters nacheinander jede mögliche Lage einnehmen.

Die Stränge 4 kann man in ähnlicher Weise herstellen,

indem man beispielsweise von einem Vorprodukt ausgeht, das aus einem mit einer Tantalhülle umgebenen Kupferstab besteht, der in ein Kupferrohr eingeschoben ist.

Zur weiteren Herstellung des Leiters nach Figur 1 kann man beispielsweise die Stränge 4 verzinnen und sie anschliesend mit den zweckmässigerweise mit einem Flussmittel versehenen Strängen 1 zu einem Flachseil verseilen. Das Flachseil kann dann zur Kalibrierung warmgewalzt werden, beispielsweise bei einer Temperatur unterhalb von 650 °C, bei der sich noch kein Nb<sub>3</sub>Sn bildet. Zweckmässig beginnt man bei etwa 200 °C, damit das Zinn nicht wegläuft, und heizt dann weiter auf. Bei dieser Warmbehandlung diffundiert Zinn von der Oberfläche der Stränge 4 sowohl in die ausserhalb der diffusionshemmenden Schicht 6 liegende Randzone 7 der Stränge 4 als auch in die Legierungsmatrix 2 der Stränge 1 ein und stellt zwischen den Strängen 1 und 4 eine enge Diffusionsverbindung her. Bei einer zweiten Wärmebehandlung bei etwa 700 °C werden dann die Nb<sub>3</sub>Sn-Schichten an der Oberfläche der Niobkerne 3 gebildet. Ferner wird dabei die Diffusionsbindung zwischen den Strängen 1 und 4 weiter verstärkt.

Bei einem Leiter gemäss Figur 1, bei dem der Durchmesser der einzelnen Stränge 0,4 mm betrug, enthielten die Stränge 1 1615 Niobfilamente 3 mit einem Durchmesser von jeweils etwa 4,7 µm in einer Kupfer-Zinn-Matrix. Die Stränge 4 hatten einen Kupferkern 5 mit einem Durchmesser von etwa 240 µm, eine diffusionshemmende Tantalschicht 6 mit einer Dicke von etwa 30 µm und einem äusseren Kupfermantel 7 mit einer Dicke von etwa 50 µm. Mit einem solchen Verbundleiter, dessen Gesamtquerschnitt etwa 0,74 × 2,7 mm<sup>2</sup> betrug, wurde bei einer Temperatur von 4,2 K ohne äusseres Feld ein kritischer Strom von etwa 1200 A und bei einer äusseren magnetischen Induktion von etwa 10 Tesla ein kritischer Strom von etwa 590 A erreicht. Diese Werte wurden sowohl bei kurzen Drahtproben als auch mit einem zu einer Spule entwickelten Leiter erreicht, bei dem die zweite Wärmebehandlung zur Bildung von Nb<sub>3</sub>Sn-Schichten nach dem Wickeln der Spule erfolgte.

Bei dem in Figur 2 dargestellten Leiter sind zwölf Stränge 21, die in einer Legierungsmatrix 22 eine Vielzahl von Kernen 23 enthalten, um einen bandförmigen Strang 24 aus Stabilisierungsmetall verseilt, der einen von einer diffusionshemmenden Schicht 25 umschlossenen Bereich 26 enthält. Der Strang 24 aus Stabilisierungsmetall wird dabei von jedem der Stränge 21 berührt. Die Herstellung des Leiters kann im einzelnen entsprechend dem zu Figur 1 Gesagten erfolgen. Mit einem Leiter nach Figur 2, dessen Stränge 21 den Strängen 1 des Leiters von Figur 1 entsprachen und dessen Strang 24 aus Kupfer einen Querschnitt von etwa 0,3 × 1,5 mm<sup>2</sup> hatte und wiederum eine Tantalschicht als Diffusionshemmer enthielt, wurde bei einer äusseren Induktion von 10 Tesla bei 4,2 K ein kritischer Strom von 930 A erreicht. Für kleine Biegeradien ist der Leiteraufbau nach Figur 2 allerdings weniger günstig als der nach Figur 1, weil die Filamente 23 weiter von der neutralen Faser des Leiters entfernt sind als die Filamente 3.

Figur 3 zeigt schematisch eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemässen Leiters, bei dem abwechselnd auf-

einanderfolgend Stränge 31 mit einer supraleitenden intermetallischen Verbindung und Stränge 32 aus Stabilisierungsmetall um einen bandförmigen Strang 33 aus einem Verstärkungsmaterial, beispielsweise Edelstahl, verseilt sind. Auch mit diesem Strang 33 aus Verstärkungsmaterial können die Stränge 31 und 32 gegebenenfalls durch eine Diffusionsverbindung oder durch Verlöten verbunden sein. Natürlich kann man auch Stränge aus Verstärkungsmaterial verwenden, die den gleichen Durchmesser haben wie die übrigen Stränge des Leiters, und sie beispielsweise zusammen mit den anderen Strängen in der in Figur 1 dargestellten Art verseilen.

Gegenüber den Beispielen kann man den erfindungsgemässen Leiter und seine Herstellung noch vielfach abwandeln. Beispielsweise kann man statt der einzelnen Stränge auch den fertigen, aber noch nicht wärmebehandelten Leiter mit einer Schicht eines oder mehrerer der niedrigerschmelzenden Elemente der Verbindung versehen. Statt die Stränge aus dem Stabilisierungsmetall mit einer Schicht eines oder mehrerer niedrigerschmelzenden Elemente zu versehen, kann man auch die äussere, die diffusionshemmende Schicht umgebende Hülle aus einer Legierung dieses Elementes bzw. dieser Elemente mit dem Stabilisierungsmetall herstellen. Bei einem solchen Strang wären dann z.B. ein Kupferkern von einer Tantalschicht und diese wiederum von einer Kupfer-Zinn- oder Kupfer-Gallium-Hülle umgeben.

Ferner kann man die Stränge statt sie zu verseilen beispielsweise auch zu einer Litze flechten. Ferner brauchen die in die Legierungsmatrix der Supraleiterstränge eingelagerten Kerne auch nicht aus einem einzigen Metall zu bestehen, sondern können gegebenenfalls auch Zusätze enthalten, beispielsweise können dem Niob oder dem Vanadin auch Titan oder Zirkon in Mengen bis zu etwa 30 Gewichts-% beige-mischt sein. In der Legierungsmatrix können beispielsweise die Elemente Zinn und Gallium auch nebeneinander vorliegen.

Die Stränge mit der supraleitenden Verbindung können auch noch zusätzliche, von diffusionshemmenden Schichten umgebene Bereiche aus Stabilisierungsmetall enthalten. Im allgemeinen wird dies jedoch wegen der guten Stabilisierungswirkung der mit diesen Strängen verbundenen Stränge aus Stabilisierungsmetall nicht erforderlich sein. Ferner braucht man als Ausgangskörper für die Stränge mit der supraleitenden Verbindung auch nicht unbedingt eine Legierung aus einem Trägermetall und wenigstens einem niedrigerschmelzenden Element der Verbindung zu verwenden, in die wenigstens ein Kern aus wenigstens einem höherschmelzenden Element der Verbindung eingelagert ist. Man kann vielmehr auch von einem Strang aus dem Trägermetall allein ausgehen, der einen oder mehrere Kerne enthält, und die niedrigerschmelzenden Elemente erst während der Wärmebehandlung des aus den Strängen aufgebauten Verbundleiters in das Trägermetall eindiffundieren. Dies kann man z.B. dadurch erreichen, dass man einen Strang mit Niobkernen in einer Kupfermatrix vor oder nach dem Verseilen verzinnt und dann glüht. Ferner besteht die Möglichkeit, das Zinn während der Wärmebehandlung aus der Dampf- oder Gasphase zuzuführen.

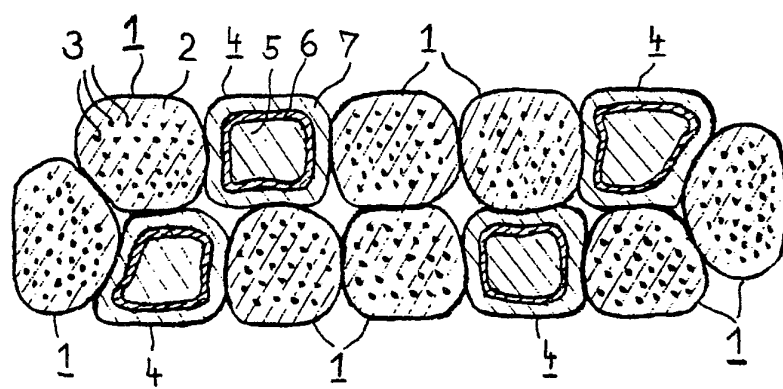


Fig. 1

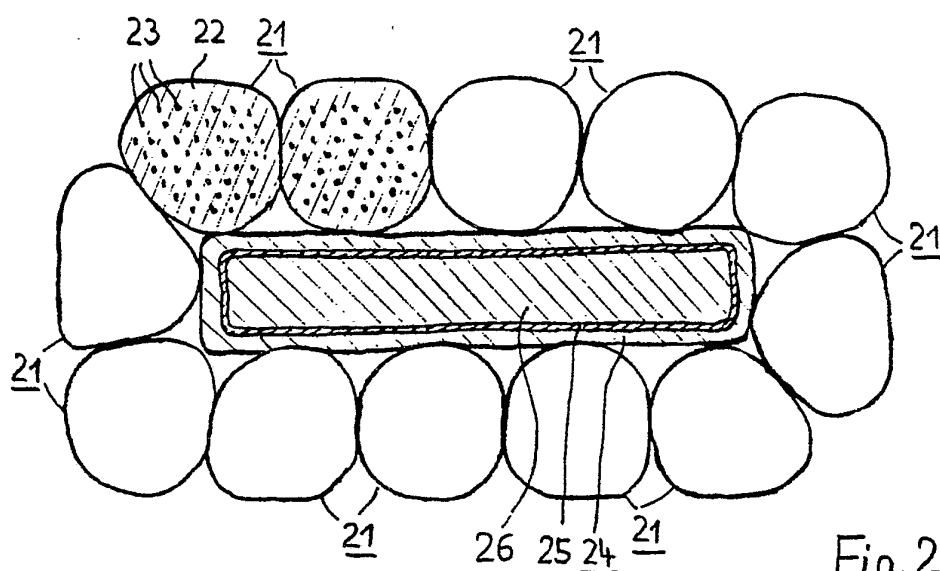


Fig. 2

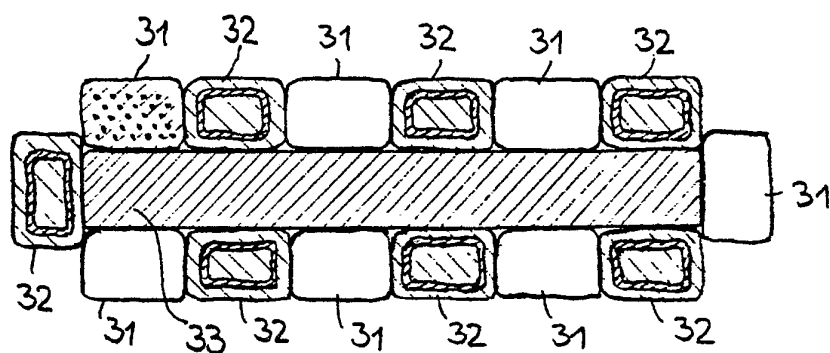


Fig. 3