



(10) **DE 10 2014 221 013 A1** 2016.04.21

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2014 221 013.5**

(22) Anmeldetag: **16.10.2014**

(43) Offenlegungstag: **21.04.2016**

(51) Int Cl.: **H01F 6/06 (2006.01)**

H01F 41/04 (2006.01)

G01R 33/3815 (2006.01)

(71) Anmelder:
Siemens Aktiengesellschaft, 80333 München, DE

(72) Erfinder:
Batz, Otto, 91359 Leutenbach, DE; Bayer, Dietmar, 91336 Heroldsbach, DE; Krämer, Hans-Peter, 91058 Erlangen, DE; Kuhnert, Anne, 90765 Fürth, DE; Kummeth, Peter, 91074 Herzogenaurach, DE

(56) Ermittelte Stand der Technik:

DE 10 2010 041 595 A1

DE 10 2012 223 366 A1

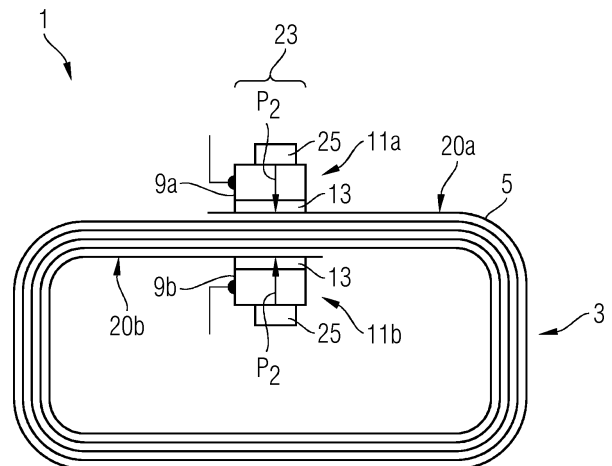
US 4 314 123 A

Rechercheantrag gemäß § 43 Abs. 1 Satz 1 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Supraleitende Spuleneinrichtung mit Spulenwicklung und Kontaktstück sowie Verfahren zu deren Herstellung**

(57) Zusammenfassung: Es wird eine supraleitende Spuleneinrichtung (1) mit wenigstens einer Spulenwicklung (3) mit wenigstens einem supraleitenden Leiter (5) angegeben, wobei der Leiter (5) wenigstens einen ersten Kontaktbereich (7a) aufweist. Die Spuleneinrichtung (1) umfasst weiterhin wenigstens ein erstes Kontaktstück (9a) zur Verbindung der Spuleneinrichtung (1) mit einem äußeren Stromkreis, wobei der erste Kontaktbereich (7a) des Leiters (5) über einen ersten Druckkontakt (11a) mit dem ersten Kontaktstück (9a) elektrisch leitend verbunden ist. Weiterhin wird ein Verfahren zur Herstellung einer solchen supraleitenden Spuleneinrichtung (1) angegeben.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine supraleitende Spuleneinrichtung, umfassend wenigstens eine Spulenwicklung mit wenigstens einem supraleitenden Leiter, wobei der Leiter wenigstens einen ersten Kontaktbereich aufweist, und wenigstens ein erstes Kontaktstück zur Verbindung der Spuleneinrichtung mit einem äußeren Stromkreis. Weiterhin betrifft die Erfindung ein Herstellungsverfahren für eine solche supraleitende Spuleneinrichtung.

[0002] Auf dem Gebiet der supraleitenden Maschinen und der supraleitenden Magnetspulen sind Spuleneinrichtungen bekannt, bei denen supraleitende Drähte oder Bandleiter in Spulenwicklungen gewickelt werden. Klassische Niedertemperatursupraleiter wie NbTi und Nb₃Sn werden in Anwendungen üblicherweise als Leiter in Drahtform verwendet. Die Hochtemperatursupraleiter oder auch Hoch-T_c-Supraleiter (HTS) sind dagegen supraleitende Materialien mit einer Sprungtemperatur oberhalb von 25 K und bei einigen Materialklassen oberhalb von 77 K. Diese HTS-Leiter liegen typischerweise in Form von flachen Bandleitern vor, die ein bandförmiges Substratband und eine auf dem Substratband angeordnete Supraleiterschicht aufweisen. Zusätzlich weisen die Bandleiter oft noch weitere Schichten wie Stabilisierungsschichten, Kontaktschichten, Pufferschichten und in manchen Fällen auch Isolationsschichten auf. Die wichtigste Materialklasse der sogenannten HTS-Leiter zweiter Generation (2G-HTS) sind Verbindungen des Typs REBa₂Cu₃O_x, wobei RE für ein Element der seltenen Erden oder eine Mischung solcher Elemente steht.

[0003] Das Substratband besteht typischerweise entweder aus Stahl, einer Nickel-Wolfram-Legierung oder aus der Legierung Hastelloy. Der elektrische Kontakt zu einem äußeren Stromkreis wird meist über eine normalleitende Deckschicht aus Kupfer oder Silber hergestellt, wobei diese Deckschicht entweder einseitig über der Supraleitungsschicht aufgebracht wird oder als umhüllende Schicht den gesamten Bandleiter umgeben kann. Zur Herstellung des Kontakts wird die Deckschicht typischerweise durch einen Lötprozess mit einem Kontaktstück aus Kupfer verbunden, wobei dieses Kontaktstück mit weiteren Elementen des äußeren Stromkreises in elektrisch leitender Verbindung steht. Typischerweise liegen für jede solche Spuleneinrichtung zwei solche Lötkontakte zur Verbindung mit zwei Kontaktstücken vor, so dass die gesamte Spulenwicklung über zwei Endbereiche in einen Stromkreis eingebunden werden kann und beispielsweise so an eine äußere Stromquelle angeschlossen werden kann.

[0004] Nachteilig bei solchen Spuleneinrichtungen mit Lötkontakten ist, dass die hochtemperatursupraleitenden Schichten der gewickelten Bandleiter sehr

empfindlich gegenüber Delamination sind. Bei einer mechanischen oder thermischen Belastung des Schichtstapels des Bandleiters tritt sehr leicht eine Delamination auf, was die supraleitenden Eigenschaften unmittelbar beeinträchtigt und sogar zu einer Zerstörung des Bandleiters führen kann. Diese Gefahr der Delamination der supraleitenden Schicht und/oder der normalleitenden Deckschicht ist sowohl während des Herstellens des Lötkontakts durch die hierbei vorgenommene Erwärmung gegeben als auch bei der Abkühlung und beim Betrieb der durch Löten kontaktierten Spulenwicklung. Der Bandleiter der Spulenwicklung wird beim Löten zumindest im Bereich der Kontaktstelle auf eine Temperatur von typischerweise in der Nähe von 130–180°C gebracht. Dies liegt sehr nah bei der thermischen Belastungsgrenze von üblichen Bandleitern, die meist in der Nähe von 200°C liegt.

[0005] Ein weiterer Nachteil der bekannten Lötkontakte ist, dass hiermit ein Anbringen eines stabilen Kontakts meist nur auf der normalleitenden Deckschicht möglich ist, die typischerweise aus Kupfer oder Silber besteht. Wenn der Bandleiter ein Substratband aus Stahl aufweist und nur einseitig auf der Seite der supraleitenden Schicht mit einer Silber- bzw. Kupfer-Deckschicht versehen ist, dann kann er auf der Substratseite nicht durch Verlöten mit einem Kupfer-Kontaktstück stabil kontaktiert werden.

[0006] Bei herkömmlichen Spuleneinrichtungen ist daher meist nur einer der beiden benötigten Kontakte auf einer frei zugänglichen Seite der Wicklung angebracht. Dies ist meist die innere Seite der Wicklung. Auf der Außenseite wird häufig eine komplexe Anordnung angebracht, bei der die zur Wicklung orientierte, innenliegende Seite des Bandleiters mit einem Kontaktstück verlötet wird. Zum Teil werden dazu aufwändige Abstandshalter mit geometrisch relativ großen Aufstiegszonen für den Leiter vorgesehen, so dass schließlich ein Kontaktstück von innen an die äußerste Windung der Spule gelötet werden kann.

[0007] Aufgabe der Erfindung ist es daher, eine Spuleneinrichtung anzugeben, welche die genannten Nachteile vermeidet. Insbesondere soll eine Spuleneinrichtung angegeben werden, bei der der Leiter der Spulenwicklung durch die Kontaktierung möglichst wenig belastet wird. Eine weitere Aufgabe der Erfindung ist es, ein Herstellungsverfahren für eine solche Spuleneinrichtung anzugeben.

[0008] Diese Aufgabe wird durch die in Anspruch 1 beschriebene Spuleneinrichtung sowie das in Anspruch 12 beschriebene Verfahren gelöst.

[0009] Die erfindungsgemäße Spuleneinrichtung umfasst wenigstens eine Spulenwicklung mit wenigstens einem supraleitenden Leiter, wobei der Leiter wenigstens einen ersten Kontaktbereich aufweist.

Sie umfasst weiterhin ein erstes Kontaktstück zur Verbindung der Spuleneinrichtung mit einem äußeren Stromkreis. Der erste Kontaktbereich des Leiters ist über einen Druckkontakt mit dem ersten Kontaktstück elektrisch leitend verbunden.

[0010] Unter einem Druckkontakt soll hierbei allgemein ein durch Druck vermittelter oder mittels Druck hergestellter elektrischer Kontakt verstanden werden, der insbesondere frei von Lötstellen ist. Durch die Aufbringung des Drucks kann hierbei auch ein zwischen den zu kontaktierenden Teilen angebrachtes Kontaktmittel stellenweise zum Fließen gebracht werden, aber es soll dabei kein durch Erhitzen verursachtes Schmelzen eines solchen Kontaktmittels zum Einsatz kommen.

[0011] Ein wesentlicher Vorteil der erfindungsgemäßen Spuleneinrichtung ist, dass der supraleitende Leiter nicht durch die Erhitzung während eines Lötprozesses belastet oder geschädigt wird. Weiterhin wird die Schaffung einer mechanisch empfindlichen Stelle durch einen solchen Lötprozess vermieden. Somit kann eine robustere Spuleneinrichtung zur Verfügung gestellt werden.

[0012] Das erfindungsgemäße Verfahren dient zur Herstellung einer erfindungsgemäßen Spuleneinrichtung. Das erfindungsgemäße Verfahren ist gekennzeichnet durch das Kontaktieren des ersten Kontaktbereichs des Leiters mit einem ersten Kontaktstück zur Verbindung der Spuleneinrichtung mit einem äußeren Stromkreis durch Herstellung eines elektrisch leitenden ersten Druckkontakts.

[0013] Die Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens ergeben sich analog zu den vorab beschriebenen Vorteilen der erfindungsgemäßen Spuleneinrichtung. Insbesondere soll bei der Herstellung des elektrisch leitenden ersten Druckkontakts die Temperatur des Leiters im Bereich der Umgebungstemperatur, vorteilhaft bei höchstens 50°C, insbesondere bei höchstens 30°C liegen. Der Kontakt zwischen dem Kontaktbereich des Leiters und dem Kontaktstück soll also durch die Aufbringung des Drucks und nicht durch eine signifikante Erwärmung der Kontaktstelle gebildet werden.

[0014] Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung gehen aus den von den Ansprüchen 1 und 12 abhängigen Ansprüchen hervor. Dabei können die beschriebenen Ausgestaltungen der Spuleneinrichtung und des Herstellungsverfahrens allgemein vorteilhaft untereinander kombiniert werden.

[0015] Der Leiter der supraleitenden Spuleneinrichtung kann einen zweiten Kontaktbereich aufweisen, welcher über einen zweiten Druckkontakt mit einem zweiten Kontaktstück elektrisch leitend verbunden

ist. Eine solche Ausführungsform ist besonders vorteilhaft, um die elektrische Spulenwicklung an beiden Enden in einen insgesamt geschlossenen Stromkreis einzubinden, ohne dabei einen nachteiligen Einfluss auf den Leiter auszuüben. Insbesondere kann über zwei solche Kontakte ein Strom aus einer äußeren Stromquelle in die Spulenwicklung eingespeist werden. Allgemein kann dabei der zweite Druckkontakt auch vorteilhaft wenigstens einen Teil der Merkmale aufweisen wie bei den beschriebenen vorteilhaften Ausgestaltungen des ersten Druckkontakts.

[0016] Der erste Druckkontakt kann vorteilhaft ein flächiger Kontakt sein. Mit anderen Worten kann ein flächiger erster Kontaktbereich mit einer Oberfläche des ersten Kontaktstücks durch Druck kontaktiert sein. Der Druck kann dazu zweckmäßig eine Richtungskomponente senkrecht zu diesen Kontaktflächen aufweisen. Die beiden Kontaktflächen können dabei vorteilhaft im Wesentlichen parallel zueinander verlaufen. Der Druck wirkt dabei so, dass der flächige erste Kontaktbereich und die Oberfläche des ersten Kontaktstücks aneinander gepresst werden.

[0017] Nach Herstellung des Kontakts kann im Bereich des Druckkontakts ein permanenter Druck anliegen, insbesondere ein Druck von wenigstens 1 MPa. Insbesondere kann dieser Druck bei einem flächigen Kontakt auf dem gesamten flächigen Kontaktbereich anliegen. Unter einem permanenten Druck soll hierbei ein Druck verstanden werden, der nach Herstellung des Druckkontakts, also bei der bereits fertig gestellten Spuleneinrichtung und auch bei deren Betrieb vorliegt. Ein solcher permanenter Druck kann beispielsweise durch eine Umwicklung, Umklammerung und/oder Verschraubung des Kontaktbereichs aufrechterhalten werden. Durch einen solchen permanenten Druck kann der elektrische Kontakt auch nach der eigentlichen Herstellung des Druckkontakts zuverlässig aufrechterhalten werden. Weiterhin kann der Leiter durch diesen permanenten Druck vor der Auswirkung von in anderen Richtungen wirkenden Kräften wirksam geschützt werden. Der so unter Druck gehaltene Kontaktbereich ist also mechanisch robuster.

[0018] Alternativ zu den vorab genannten Ausführungsformen mit einem permanenten Druck im Kontaktbereich, kann auch der Druck nach Herstellung in der Nähe von 0 MPa liegen und dabei bevorzugt im leicht positiven Bereich zwischen 0 MPa und 1 MPa liegen. Mit anderen Worten werden durch diesen minimalen Druck Zugkräfte auf den Kontakt vermieden.

[0019] Zwischen dem ersten Kontaktbereich und dem ersten Kontaktstück kann eine Zwischenlage angeordnet sein, die Indium enthält. Beispielsweise kann die Zwischenlage eine Indium enthaltende metallische Legierung sein. Die Zwischenlage kann Indium als Hauptbestandteil aufweisen oder sogar voll-

ständig aus Indium bestehen. Allgemein ist eine solche Zwischenlage vorteilhaft elektrisch gut leitfähig, um den elektrischen Kontakt zwischen dem Kontaktbereich des Leiters und dem Kontaktstück zu vermitteln.

[0020] Indium und indiumhaltige Legierungen weisen vorteilhaft eine hohe Verformbarkeit unter Druck auf. Sie können bereits bei relativ niedrigem Druck und bei Temperaturen im Bereich der Raumtemperatur zum Fließen gebracht werden, was die Ausbildung eines niederohmigen flächigen Kontakts wesentlich begünstigt.

[0021] Der Leiter kann vorteilhaft ein Bandleiter mit einem Substrat und einer hochtemperatursupraleitenden Schicht sein. Besonders vorteilhaft kann die hochtemperatursupraleitende Schicht einen Hochtemperatursupraleiter der zweiten Generation umfassen, insbesondere eine der oben genannten Verbindungen des Typs $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$. Hochtemperatursupraleiter der zweiten Generation sind besonders vorteilhaft, da sie eine höhere Zugfestigkeit sowie eine höhere kritische Stromdichte als HTS-Materialien der ersten Generation aufweisen. Alternativ zu solchen oxidkeramischen Supraleitern kann die hochtemperatursupraleitende Schicht auch Magnesiumdiborid aufweisen.

[0022] Alternativ zu den möglichen Ausgestaltungen des Leiters als Bandleiter kann der Leiter auch vorteilhaft als Bündel aus Einzelleitern, also als sogenannter Multifilamentleiter vorliegen. Es kann beispielsweise ein Leiter eingesetzt werden, der mehrere auf Magnesiumdiborid basierende Filamente enthält. Magnesiumdiborid ist vor allem mechanisch deutlich stabiler als die oxidkeramischen Supraleiter und eignet sich daher besonders zur Herstellung solcher gebündelten Multifilamentleiter.

[0023] Das Substrat des Bandleiters kann vorteilhaft Stahl oder eine nickelhaltige Legierung wie beispielsweise Hastelloy aufweisen. Es kann sich allgemein unabhängig von der genauen Materialwahl um ein elektrisch normalleitendes Substrat handeln, über das der Bandleiter auch auf seiner von der Supraleitungsschicht abgewandten Rückseite kontaktiert werden kann.

[0024] Die hochtemperatursupraleitende Schicht kann von einer elektrisch normalleitenden Kontaktschicht bedeckt sein, und der erste Druckkontakt kann diese normalleitende Kontaktschicht mit dem ersten Kontaktstück verbinden. Diese Ausführungsform ist besonders vorteilhaft, da zum einen die meist empfindliche supraleitende Schicht auch im Kontaktbereich von der normalleitenden Deckschicht, die hier als Kontaktschicht wirkt, geschützt ist. Zum anderen erlaubt eine Kontaktierung über diese der supraleitenden Schicht direkt benachbarte Schicht eine

insgesamt vergleichsweise niederohmige elektrische Verbindung. Die normalleitende Kontaktschicht kann bevorzugt aus Kupfer gebildet sein oder ein kupferhaltiges Material aufweisen. Alternativ oder zusätzlich kann die Kontaktschicht ein anderes gut leitfähiges Material wie beispielsweise Gold oder Silber aufweisen. Die Kontaktschicht kann beispielsweise durch Auflöten, Laminieren oder durch elektrolytische Abscheidung oder Sputtern auf der supraleitenden Schicht aufgebracht sein.

[0025] Auch das wenigstens eine Kontaktstück kann vorteilhaft ein elektrisch gut leitfähiges Metall wie beispielsweise Kupfer, Messing, Aluminium, Gold oder Silber aufweisen, beispielsweise kann das wenigstens eine Kontaktstück mehrheitlich aus Kupfer bestehen.

[0026] Bei typischen Wicklungsformen, beispielsweise bei Scheibenwicklungen ist die bevorzugte Kontaktseite des Bandleiters, also die Seite des Substrats mit der supraleitenden Schicht, zumindest auf einer Seite der Wicklung frei zugänglich. Bei dieser Seite kann es sich alternativ entweder um die radial innenliegende Seite oder um die radial außenliegende Seite der Wicklung handeln. Bei speziellen Wicklungstypen oder weiteren innerhalb der Wicklung angebrachten Kontakten kann auch auf beiden Seiten der Wicklung die Seite der supraleitenden Schicht frei zugänglich sein. In solchen Fällen ist es vorteilhaft, gegebenenfalls auch zwei Druckkontakte auf dieser Seite des Bandleiters anzubringen, die die supraleitende Schicht trägt.

[0027] Alternativ zu der vorab genannten Ausführungsform kann zumindest einer der Wicklungskontakte auch auf der der supraleitenden Schicht abgewandten Rückseite des Bandleiters ausgebildet sein. So kann das Substrat elektrisch normalleitend sein, und wenigstens ein Druckkontakt kann das Substrat mit einem Kontaktstück verbinden. Diese Ausführungsform ist besonders vorteilhaft, wenn die Seite der supraleitenden Schicht nur auf einer Seite der Wicklung frei liegt und auf der anderen Seite der Wicklung nur die Substratseite frei zugänglich ist. Durch die Ausbildung eines Druckkontaktes anstelle eines herkömmlichen Lötkontaktes kann vorteilhaft auch ein aus Edelstahl und/oder einer nickelhaltigen Legierung gebildetes Substrat stabil kontaktiert werden. Die Notwendigkeit von komplexen Anstiegsbereichen mit aufwändigen Einschubstücken im Endbereich der Wicklung kann somit vorteilhaft vermieden werden.

[0028] Die Spuleneinrichtung kann wenigstens zwei Druckkontakte aufweisen, die an einer gleichen Umfangsposition der Spulenwicklung angeordnet sind. Beispielsweise kann es sich hierbei um einen Druckkontakt auf der Innenseite der Wicklung und um einen weiteren Druckkontakt auf der Außenseite der Wick-

lung handeln. Diese beiden Kontakte können sich also an der gleichen Umfangsposition radial gegenüberliegend befinden.

[0029] Vorteilhaft können dann beide Druckkontakte über eine gemeinsame Vorrichtung unter Druck gehalten werden. Beispielsweise können die wenigstens zwei Druckkontakte durch eine gemeinsame Umwicklung und/oder Umklammerung unter einem permanenten Druck gehalten werden. Die radial dazwischenliegenden Teile der Wicklung können also zusammen mit den beiden Druckkontakten als Ganzes in diese Umklammerung und/oder Umwicklung eingeklemmt sein. Dies dient besonders vorteilhaft zu einer einfachen mechanischen Stabilisierung der Wicklung, insbesondere im Bereich der Druckkontakte. Der Leiter, insbesondere ein Bandleiter, ist so vor einer Delamination in diesen Bereichen geschützt, und der permanente Druck an diesen Stellen wirkt den Auswirkungen weiterer, in anderen Richtungen wirkender Kräfte, beispielsweise beim Abkühlen der Spuleneinrichtung oder bei deren Betrieb, entgegen.

[0030] Eine solche gemeinsame Umwicklung und/oder Umklammerung kann ein Material aufweisen oder aus einem Material bestehen, das bei der Abkühlung der Spuleneinrichtung auf ihre Betriebstemperatur eine stärkere Schrumpfung aufweist als die Spulenwicklung. Insbesondere kann das Material der Umwicklung und/oder Umklammerung eine stärkere Schrumpfung aufweisen als der gesamte Schichtstapel des Bandleiters, insbesondere in einer Richtung senkrecht zur Hauptfläche des Bandleiters. Hierdurch kann vorteilhaft erreicht werden, dass bei einer Abkühlung der Spulenwicklung auf ihre Betriebstemperatur der permanente Druck an den Druckkontakten sich nicht abgeschwächt, sondern im Gegenteil sogar noch erhöht wird. Damit sind der Bandleiter und seine Kontakte trotz der zusätzlichen mechanischen Belastung bei der Abkühlung trotzdem wirksam geschützt.

[0031] Die Spuleneinrichtung kann eine Kühlvorrichtung zur Kühlung der Spuleneinrichtung auf ihre Betriebstemperatur aufweisen, wobei das wenigstens eine Kontaktstück thermisch stärker an die Kühlvorrichtung angekoppelt sein kann als die Spulenwicklung. Mit anderen Worten kann das Kontaktstück oder können die Kontaktstücke auch zum Kühlen der Spulenwicklung verwendet werden. Da die Kontaktstücke zweckmäßig aus thermisch gut leitendem Material ausgeführt sind und zum Abtransport der durch ohmsche Verluste entstehenden Wärme ohnehin sinnvollerweise an die Kühlvorrichtung angekoppelt sind, können die Kontaktstücke somit auch zu einer thermischen Ankopplung der übrigen Teile der Spulenwicklung an die Kühlvorrichtung genutzt werden.

[0032] Die Spulenwicklung kann vorteilhaft als Scheibenwicklung, insbesondere als Rennbahnspu-

le, als Rechteckspule oder als kreisförmige Scheibenwicklung ausgebildet sein. Wenn die Spulenwicklung als ebene Rechteckspule mit vier geraden Abschnitten und vier dazwischen angeordneten abgerundeten Ecken ausgebildet ist, dann können die Kontaktbereiche vorteilhaft auf den geraden Abschnitten der Rechteckspule angeordnet sein.

[0033] Die Spulenwicklung kann vorteilhaft einen Stapel aus mehreren nebeneinander geführten Leitern aufweisen, von denen jeder Leiter über wenigstens einen Druckkontakt mit einem Kontaktstück elektrisch verbunden ist. Insbesondere kann jeder Leiter des Stapels über zwei solche Druckkontakte mit zwei Kontaktstücken elektrisch verbunden sein.

[0034] Bei dem Verfahren zur Herstellung der Spuleneinrichtung kann zur Herstellung des wenigstens einen Druckkontakts ein Anpressdruck von wenigstens 5 MPa angewendet werden. Besonders vorteilhaft kann der Anpressdruck im Bereich von 7 MPa bis 10 MPa liegen. Der Anpressdruck kann jedoch auch vorteilhaft oberhalb von 10 MPa liegen. Durch einen Anpressdruck innerhalb der genannten Wertebereiche kann erreicht werden, dass sich ein stabiler und elektrisch gut leitfähiger Kontakt ausbildet. Besonders bei einer Ausführungsform mit einer Indium enthaltenden Zwischenlage kann erreicht werden, dass das Material dieser Zwischenlage zumindest in einem Teilbereich zu fließen beginnt, was die Ausbildung eines stabilen und niederohmigen Kontakts fördert. Dies kann vorteilhaft bei Temperaturen in der Nähe der Raumtemperatur ohne zusätzliche Erwärmung erreicht werden.

[0035] Nach der Herstellung des ersten Druckkontakts kann im Bereich dieses Druckkontakts ein permanenter Druck aufrechterhalten werden, der niedriger liegt als der Anpressdruck bei der Herstellung des Kontakts. Insbesondere kann der permanente Druck dabei trotzdem oberhalb von 1 MPa liegen. Die Vorteile dieser Ausführungsform ergeben sich analog zu der entsprechenden Ausführungsform der Spuleneinrichtung.

[0036] Die Spulenwicklung kann vor dem Kontaktieren durch Wickeln des Leiters in mehreren Windungen hergestellt werden, wobei die Spulenwicklung nach dem Wickeln und/oder während des Wickelns mit einem Gießharz versehen werden kann. Mit anderen Worten kann es sich um einen Trocken-Wickelprozess mit anschließendem Verguss oder um einen Nass-Wickelprozess handeln. In beiden Fällen kann das Gießharz nach dessen Aufbringung ausgehärtet werden, so dass die Spulenwicklung eine erhöhte mechanische Festigkeit erhält. Vorteilhaft kann bei diesen Ausführungsformen der wenigstens eine Kontaktbereich vor einer Benetzung mit Gießharz geschützt werden. Dies ist zweckmäßig, um eine saubere und elektrisch gut leitende Oberfläche für die

Ausbildung des Druckkontakts zu erhalten. Beispielsweise kann der Kontaktbereich des Bandleiters durch ein Trennfett und/oder eine Ummantelung mit einem von Gießharz nicht leicht zu benetzenden Material geschützt werden. Ein solches nicht leicht zu benetzendes Material ist beispielsweise Polytetrafluorethylen, wobei eine Umwicklung mit einem Polytetrafluorethylen-Band besonders einfach zu realisieren ist. Es kann aber auch nur die für die Kontaktierung benötigte Oberfläche des Bandleiters mit einem Stück aus Polytetrafluorethylen oder anderem schlecht zu benetzenden Material abgedeckt oder überzogen beziehungsweise besprüht werden.

[0037] Bei Anwendung eines Trockenwickel-Prozesses, bei dem die Spulenwicklung erst nach dem Wickeln mit Gießharz versehen wird, kann das Gießharz vorteilhaft eine Vergussmasse sein, die in eine um die Spulenwicklung angeordnete Vergussform gegossen werden kann. Bei Anwendung eines Nasswickel-Prozesses, bei dem die Spulenwicklung schon während des Wickelns oder kurz vor dem Wickeln mit einem Gießharz versehen wird, kann das Gießharz vorteilhaft ein Klebmittel, beispielsweise ein durch Erwärmung aushärtbares Klebmittel sein.

[0038] Nachfolgend wird die Erfindung anhand einiger bevorzugter Ausführungsbeispiele unter Bezugnahme auf die angehängten Zeichnungen beschrieben, in denen:

[0039] Fig. 1 einen schematischen Querschnitt eines Bandleiters **15** nach einem ersten Ausführungsbeispiel zeigt,

[0040] Fig. 2 einen schematischen Querschnitt eines Bandleiters **15** nach einem zweiten Ausführungsbeispiel zeigt,

[0041] Fig. 3 eine Detailansicht eines ersten Druckkontakts **11a** nach einem dritten Ausführungsbeispiel zeigt und

[0042] Fig. 4 einen schematischen Querschnitt einer Spuleneinrichtung **1** nach einem vierten Ausführungsbeispiel zeigt.

[0043] Fig. 1 zeigt einen Querschnitt eines supraleitenden Bandleiters **15** für eine Spuleneinrichtung nach einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung, bei dem der Schichtaufbau schematisch dargestellt ist. Der Bandleiter **15** umfasst in diesem Beispiel ein Substrat **17**, das hier ein **100** µm dickes Substratband aus einer Nickel-Wolfram-Legierung ist. Alternativ sind auch Stahlbänder oder Bänder aus einer Legierung wie z.B. Hastelloy verwendbar. Über dem Substrat **17** ist eine **0,5** µm dicke Pufferschicht **18** angeordnet, die hier die oxidischen Materialien CeO_2 und Y_2O_3 enthält. Darüber folgt eine hochtemperatursupraleitende Schicht **19**, hier eine **1** µm di-

cke Schicht aus $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, die wiederum mit einer **50** µm dicken Kontaktschicht **21** aus Kupfer abgedeckt ist. Die freiliegende Seite dieser Kontaktschicht **21** wird im Folgenden als Vorderseite **20a** des Bandleiters **15** bezeichnet. Zwischen der supraleitenden Schicht **19** und dem Kupfer kann sich zusätzlich beispielsweise noch eine Silberdeckschicht befinden. Alternativ zu dem Material $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ können auch die entsprechenden Verbindungen $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ anderer seltener Erden RE verwendet werden. Auf der gegenüberliegenden Seite des Substrats **17**, die im Folgenden als Rückseite **20b** bezeichnet wird, ist hier eine weitere **50** µm dicke Kontaktschicht **21** aus Kupfer angeordnet. Alternativ zu dem in Fig. 1 gezeigten Schichtaufbau kann eine solche Kontaktschicht **21** die übrigen Schichten des Bandleiters auch im Querschnitt vollständig umhüllen.

[0044] Fig. 2 zeigt einen schematischen Querschnitt eines alternativen Bandleiters **15** für eine Spuleneinrichtung nach einem zweiten Ausführungsbeispiel der Erfindung. Auch dieser zweite Bandleiter weist ein Substrat **17** auf, auf dem eine hochtemperatursupraleitende Schicht **19** abgeschieden ist. Diese Schicht **19** kann beispielsweise den Supraleiter Magnesiumdiborid umfassen, welcher ohne die Notwendigkeit einer darunterliegenden Pufferschicht direkt auf dem Substrat **17** abgeschieden sein kann. Alternativ kann der Bandleiter aber auch eine oxidkeramische supraleitende Schicht ähnlich wie im vorherigen Beispiel aufweisen. Auch hier ist die supraleitende Schicht **17** auf der Vorderseite **20a** mit einer normalleitenden Kontaktschicht **21** versehen. Im Unterschied zum vorherigen Beispiel liegt jedoch auf der Rückseite **20b** das Substrat **17** offen und ist nicht mit einer solchen Kontaktschicht bedeckt. Zur Kontaktierung des Bandleiters in einer elektrischen Spulenwicklung kann hier also auf dieser Seite ein elektrischer Kontakt beispielsweise direkt auf dem Substrat angebracht werden.

[0045] Die supraleitenden Bandleiter **15** der beiden in Fig. 1 und Fig. 2 gezeigten Ausführungsbeispiele können zu Spulenwicklungen gewickelt sein, die in Spuleneinrichtungen gemäß der vorliegenden Erfindung zum Einsatz kommen können. Dazu können solche oder ähnliche Bandleiter oder aber alternativ auch Leiter mit rundem Querschnitt, zum Beispiel MgB₂-Filament-Leiter, in mehreren Windungen aufgewickelt sein und beispielsweise an ihren bezüglich der Wicklung inneren und äußeren Endbereichen über Kontaktstücke mit einem äußeren Stromkreis elektrisch in Verbindung stehen. Zur elektrischen Isolierung der Windungen gegeneinander können zwischen den einzelnen Wicklungslagen zusätzliche Isolationsbänder eingewickelt sein, oder die Bandleiter **15** können mit in den Fig. 1 und Fig. 2 nicht gezeigten zusätzlichen Isolationsschichten versehen sein, die beispielsweise nur im Bereich der elektrischen Kontakte entfernt sein können beziehungsweise

se nicht aufgebracht sein können. Alternativ zu einer Wicklung mit einem einzigen Bandleiter können auch Wicklungen mit Stapeln aus mehreren parallel verlaufenden, also übereinanderliegenden Bandleitern gewickelt sein.

[0046] In Fig. 3 ist eine Detailansicht eines elektrischen Kontakts einer solchen Spuleneinrichtung in schematischer Querschnittsdarstellung gezeigt. Gezeigt ist ein erster Kontaktbereich **7a** im Endbereich eines Bandleiters **15**, der auf seiner Vorderseite **20a** über einen ersten Druckkontakt **11a** mit einem ersten Kontaktstück **9a** kontaktiert ist. Diese Vorderseite **20a** weist analog zu den beiden vorab beschriebenen Beispielen der Bandleiter **15** eine hier nicht gezeigte normalleitende Kontaktschicht auf. Im ersten Kontaktbereich **7a** ist diese Kontaktschicht über einen flächigen Kontakt elektrisch mit dem ersten Kontaktstück **9a** verbunden. Dieser elektrische Kontakt wird über eine zwischen dem Bandleiter **15** und dem ersten Kontaktstück **9a** angeordneten Zwischenlage **13** vermittelt. Diese Zwischenlage ist hier eine Folie aus einem indiumhaltigen Material, die elektrisch leitfähig ist und sich unter Druck leicht verformt. Zur Ausbildung des Druckkontakts **11a** werden das erste Kontaktstück **9a**, die Zwischenlage **13** und der Bandleiter **15** mit einem Anpressdruck p_1 aneinandergedrückt, also durch eine entsprechende über die ganze Kontaktfläche wirkenden Anpresskraft. Dieser Anpressdruck kann beispielsweise bei der Herstellung des Druckkontakts **11a** bei etwa **10 MPa** liegen. Die Temperatur des Kontakts kann dabei im Bereich der Umgebungstemperatur liegen, beispielsweise etwa bei Raumtemperatur. Durch die Einwirkung des Drucks p_1 kommt die indiumhaltige Zwischenlage **13** zumindest teilweise zum Fließen, was die Ausbildung eines elektrisch gut leitenden flächigen Kontakts erleichtert. Das erste Kontaktstück **9a** ist elektrisch mit einem hier nicht näher gezeigten äußeren Stromkreis verbunden, über den die Spulenwicklung beispielsweise mit einem Strom beaufschlagt werden kann.

[0047] In Fig. 4 ist eine schematische Querschnittsdarstellung einer supraleitenden Spuleneinrichtung **1** nach einem weiteren Ausführungsbeispiel der Erfindung gezeigt. Gezeigt ist eine Spulenwicklung **3** aus einem Leiter **5**, der ein supraleitender Bandleiter **15** ähnlich den Beispielen der Fig. 1 und Fig. 2 sein kann. In der Fig. 4 sind nur beispielhaft vier Windungen dieses Leiters **5** gezeigt, wobei in realen Spuleneinrichtungen typischerweise eine wesentlich höhere Anzahl von Windungen zum Einsatz kommen kann. Die Spulenwicklung **3** weist im gezeigten Beispiel die Form einer flachen Rechteckspule auf mit vier geraden Wicklungsabschnitten und vier dazwischen angeordneten abgerundeten Ecken. Der Leiter **5** der Spulenwicklung **3** ist auf der Außenseite der Wicklung über einen ersten Druckkontakt **11a** und auf der Innenseite der Wicklung über einen zweiten Druckkontakt **11b** mit einem hier nicht näher gezeigten äußeren

Stromkreis verbunden. Hierzu ist durch jeden der beiden Druckkontakte eine flächige elektrische Verbindung des Leiters **5** mit einem Kontaktstück **9a** beziehungsweise **9b** hergestellt. Die beiden Druckkontakte **11a** und **11b** sind auf derselben Umfangsposition **23** der Spulenwicklung **3** angeordnet.

[0048] Dieses Umfangssegment befindet sich auf einem der vier geraden Abschnitte der Rechteckspule, in diesem Beispiel mittig auf einem der geraden Abschnitte. Eine Anordnung auf einem solchen geraden Abschnitt ist für die Ausbildung eines flächigen Druckkontakts besonders vorteilhaft. Prinzipiell ist aber auch die Ausbildung eines Druckkontakts in einem gekrümmten Abschnitt des Leiters **5** möglich.

[0049] Die beiden Druckkontakte **11a** und **11b** sind beispielsweise jeweils ähnlich wie in dem in Fig. 3 gezeigten Ausführungsbeispiel ausgeführt. So ist auch hier jeweils zwischen dem Leiter **5** und dem Kontaktstück **9a** oder **9b** eine indiumhaltige Zwischenlage **13** angeordnet, die den elektrischen Kontakt vermittelt und die Ausbildung eines niederohmigen Kontakts unter Druck erleichtert. Auch hier können beide Druckkontakte **11a** und **11b** mit einem relativ hohen Anpressdruck p_1 oberhalb von **10 MPa** hergestellt sein. Nach der eigentlichen Herstellung dieser Kontakte werden die Druckkontakte weiterhin unter einem permanenten Druck p_2 gehalten, der beispielsweise etwas niedriger liegen kann als der bei der Herstellung aufgebrauchte Anpressdruck p_1 . Dieser permanente Druck p_2 wird im Beispiel der Fig. 4 durch eine gemeinsame Umklammerung **25** im Bereich der beiden Druckkontakte aufrechterhalten. Diese Ausgestaltung wird durch die Anordnung auf einem gemeinsamen Umfangssegment **23** der Spulenwicklung ermöglicht. Die Umklammerung **25** kann beispielsweise aus solchen Materialien gebildet sein, die in radialer Richtung der Spulenwicklung bei einer Abkühlung der Spulenwicklung **3** auf eine Betriebstemperatur des Supraleiters eine stärkere thermische Schrumpfung aufweisen als die thermische Schrumpfung des Schichtstapels des Bandleiters in dieser Richtung. Bei dieser Ausführungsform wird der permanente Druck p_2 durch die Abkühlung noch weiter verstärkt. Beispielsweise kann die Umklammerung **25** der Druckkontakte glasfaserverstärkte Kunststoffe, Metalle oder metallische Legierungen sowie elektrische Isolationsmaterialien aufweisen. Eine solche Auslegung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten ist in analoger Weise auch für Ausführungsformen möglich, bei denen die beiden Druckkontakte durch getrennte Vorrichtungen unter Druck gehalten werden.

[0050] Der Leiter **5** der in Fig. 4 gezeigten Spulenwicklung kann wiederum ein supraleitender Bandleiter sein. Da im gezeigten Beispiel die Orientierung des Bandleiters bezüglich des Zentrums in der Spulenwicklung nicht verändert wird, sind im Be-

reich der beiden Kontakte unterschiedliche Oberflächen des Bandleiters frei zugänglich. Wenn umständliche Maßnahmen wie die Einführung von Kontaktstücken unter die äußerste Wicklungslage vermieden werden sollen, muss der Bandleiter daher auf unterschiedlichen Oberflächen kontaktiert werden. Im gezeigten Beispiel ist durch den außenliegenden ersten Druckkontakt **11a** ein elektrischer Kontakt mit der Vorderseite **20a** und durch den innenliegenden zweiten Druckkontakt ein elektrischer Kontakt mit der Rückseite **20b** des Bandleiters gebildet. Die Orientierung kann jedoch alternativ auch genau anders herum ausgebildet sein. Wesentlich für dieses Ausführungsbeispiel ist, dass ein Bandleiter durch die Kontaktierung mittels Druckkontakten auf einfache Weise auf seinen beiden gegenüberliegenden Oberflächen kontaktiert werden kann, selbst wenn auf seiner Rückseite **20b** für die Kontaktierung nur ein elektrisch leitfähiges Substrat **17** zur Verfügung steht und keine spezielle Kontaktschicht **21**.

Patentansprüche

1. Supraleitende Spuleneinrichtung (1), umfassend
 - wenigstens eine Spulenwicklung (3) mit wenigstens einem supraleitenden Leiter (5), wobei der Leiter (5) wenigstens einen ersten Kontaktbereich (7a) aufweist
 - und wenigstens ein erstes Kontaktstück (9a) zur Verbindung der Spuleneinrichtung (1) mit einem äußeren Stromkreis,**dadurch gekennzeichnet**, dass der erste Kontaktbereich (7a) des Leiters (5) über einen ersten Druckkontakt (11a) mit dem ersten Kontaktstück (9a) elektrisch leitend verbunden ist.
2. Spuleneinrichtung (1) nach Anspruch 1, bei der der Leiter (5) einen zweiten Kontaktbereich aufweist, welcher über einen zweiten Druckkontakt (11b) mit einem zweiten Kontaktstück (9b) elektrisch leitend verbunden ist.
3. Spuleneinrichtung (1) nach einem der Ansprüche 1 oder 2, bei der der erste Druckkontakts (11a) ein flächiger Druckkontakt ist, bei dem ein permanenter Druck (p_2) von wenigstens 1 MPa anliegt.
4. Spuleneinrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der zwischen erstem Kontaktbereich (7a) und erstem Kontaktstück (9a) eine Zwischenlage (13) angeordnet ist, die Indium enthält.
5. Spuleneinrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der der Leiter (5) ein Bandleiter (15) mit einem Substrat (17) und einer hochtemperatursupraleitenden Schicht (19) ist.
6. Spuleneinrichtung (1) nach Anspruch 5, bei der die hochtemperatursupraleitende Schicht (19) von einer elektrisch normalleitenden Kontaktschicht (21) bedeckt ist und der erste Druckkontakt (11a) die normalleitende Kontaktschicht (21) mit dem ersten Kontaktstück (9a) verbindet.
7. Spuleneinrichtung (1) nach einem der Ansprüche 5 oder 6, bei der das Substrat (17) elektrisch normalleitend ist und wenigstens ein Druckkontakt (11b) das Substrat (17) mit einem Kontaktstück (9b) verbindet.
8. Spuleneinrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, die wenigstens zwei Druckkontakte (11a, 11b) aufweist, die an einer gleichen Umfangsposition (23) der Spulenwicklung (3) angeordnet sind.
9. Spuleneinrichtung (1) nach Anspruch 8, bei der die wenigstens zwei Druckkontakte (11a, 11b) durch eine gemeinsame Umwicklung und/oder Umklammerung (25) unter einem permanenten Druck (p_2) gehalten werden.
10. Spuleneinrichtung (1) nach Anspruch 9, bei der die gemeinsame Umwicklung und/oder Umklammerung (25) aus einem Material besteht, das bei der Abkühlung der Spuleneinrichtung (1) auf ihre Betriebstemperatur eine stärkere Schrumpfung aufweist als die Spulenwicklung (3).
11. Spuleneinrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche mit einer Kühlvorrichtung zur Kühlung der Spuleneinrichtung (1) auf ihre Betriebstemperatur, wobei das wenigstens eine Kontaktstück (9a) thermisch stärker an die Kühlvorrichtung angekopfelt ist als die Spulenwicklung (3).
12. Verfahren zur Herstellung einer Spuleneinrichtung (1), wobei die Spuleneinrichtung (1) wenigstens eine Spulenwicklung (3) mit wenigstens einem supraleitenden Leiter (5) mit wenigstens einem ersten Kontaktbereich (7a) aufweist, gekennzeichnet durch das Kontaktieren des ersten Kontaktbereichs (7a) des Leiters (5) mit einem ersten Kontaktstück (9a) zur Verbindung der Spuleneinrichtung (1) mit einem äußeren Stromkreis durch Herstellung eines elektrisch leitenden ersten Druckkontakts (11a).
13. Verfahren nach Anspruch 12, bei dem zur Herstellung des ersten Druckkontakts (11a) ein Anpressdruck (p_1) von wenigstens 5 MPa angewendet wird.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 oder 13, bei dem nach der Herstellung des ersten Druckkontakts (11a) im Bereich dieses Druckkontakts ein permanenter Druck (p_2) von wenigstens 1 MPa aufrechterhalten wird.
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 bis 14, bei dem die Spulenwicklung (3) vor dem Kontak-

tieren durch Wickeln des Leiters (5) in mehreren Windungen hergestellt wird, wobei die Spulenwicklung nach dem Wickeln und/oder während des Wickelns mit einem Gießharz versehen wird, und wobei der wenigstens eine Kontaktbereich (7a) vor der Aufbringung des Gießharzes vor einer Benetzung mit Gießharz geschützt wird.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1

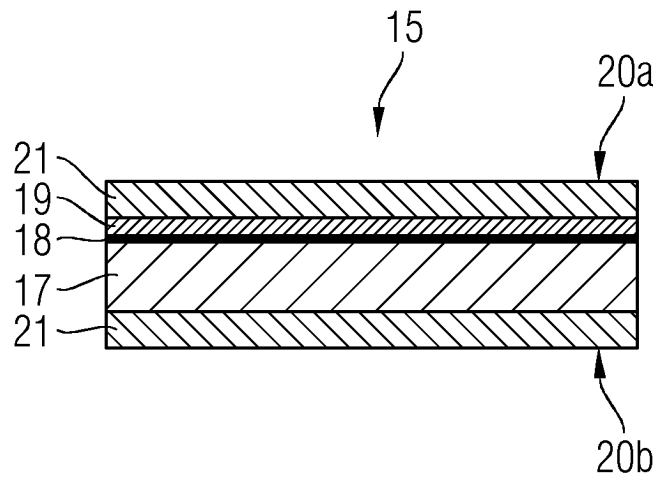


FIG 2

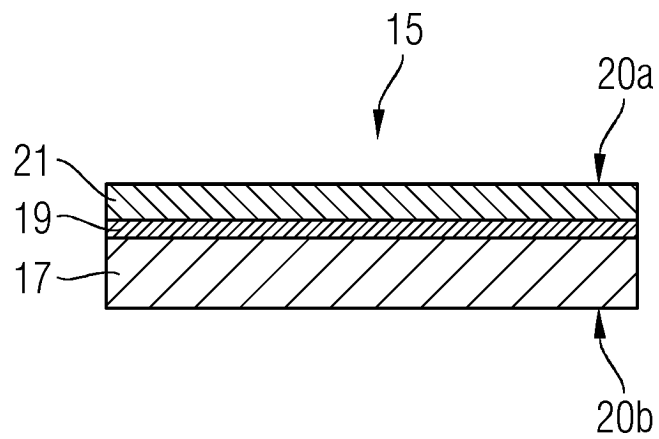


FIG 3

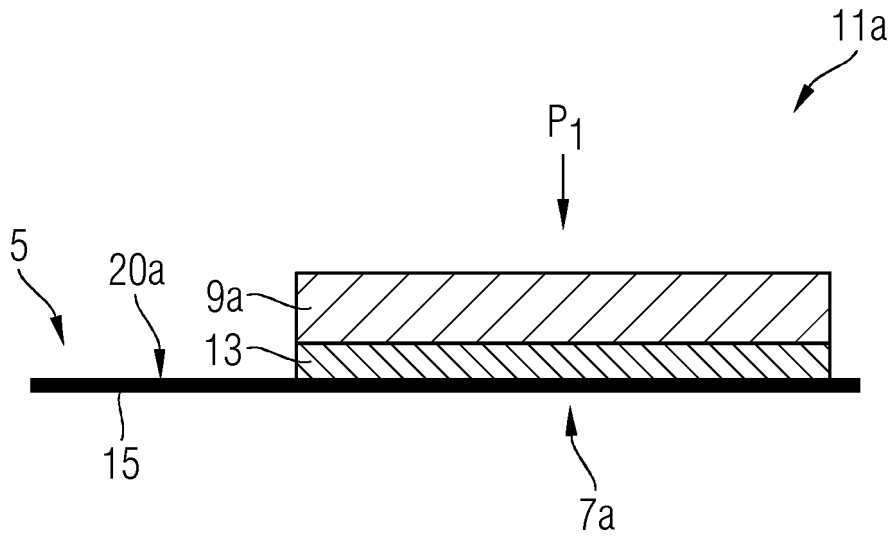


FIG 4

