



(11) **EP 2 495 741 A2**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
05.09.2012 Patentblatt 2012/36

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

(21) Anmeldenummer: **12156440.5**

(22) Anmeldetag: **22.02.2012**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME

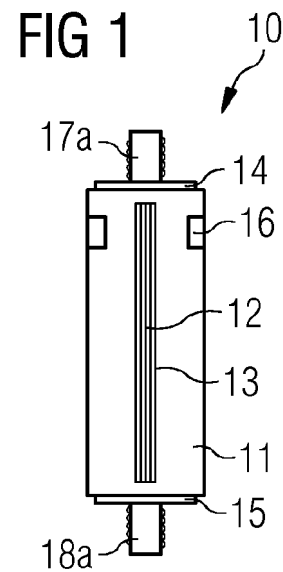
(30) Priorität: **02.03.2011 DE 102011004956**

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

(72) Erfinder:
• **Batz, Otto**
91359 Leutenbach (DE)
• **Bayer, Dietmar**
91336 Heroldsbach (DE)
• **Frank, Michael**
91080 Uttenreuth (DE)
• **Kummeth, Peter**
91074 Herzogenaurach (DE)

(54) **Supraleitende Spulenanordnung mit mehreren miteinander elektrisch leitend verbundenen Spulen**

(57) Die Erfindung betrifft eine supraleitende Spulenanordnung mit einer ersten und einer zweiten supraleitenden Spule, welche in einem Kaltraum angeordnet sind und über ein ebenfalls in dem Kaltraum angeordnetes Verbindungselement (10) elektrisch leitend miteinander verbunden sind. Das Verbindungselement (10), welches ein massives Trägerstück (11) aus einem elektrisch leitenden Material umfasst, ist auf und/oder in dem zumindest einen supraleitenden Leiterstück (12) angeordnet.



EP 2 495 741 A2

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine supraleitende Spulenordnung mit einer ersten und einer zweiten supraleitenden Spule, welche in einem Kaltraum angeordnet sind und über ein ebenfalls in dem Kaltraum angeordnetes Verbindungselement elektrisch leitend miteinander verbunden sind.

[0002] Supraleiter sind Materialien, deren elektrischer Widerstand beim Unterschreiten einer sogenannten Sprungtemperatur auf Null fällt und die externe Magnetfelder aus ihrem Inneren verdrängen. Die Sprungtemperatur ist dabei materialabhängig. Supraleitende Spulen werden heutzutage auch aus keramischen Hochtemperatursupraleitern hergestellt. Als Hochtemperatursupraleiter (HTS) werden Materialien bezeichnet, deren Sprungtemperatur über der von klassischen Supraleitern liegt. Je höher die Sprungtemperatur ist, desto kostengünstiger kann eine Kühlung erfolgen. Beispielsweise weist Yttrium-Barium-Kupferoxid, das auch als YBCO bezeichnet wird, eine Sprungtemperatur von 93 K auf, so dass eine Kühlung mit Stickstoff möglich ist. Insbesondere der Einsatz bei solchen Anwendungen, bei denen die Supraleiter hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt sind, lässt sich daher nur schwer realisieren. Supraleitende Bandleiter sind bei der Verarbeitung und beim Betrieb gewissen Belastungsgrenzen hinsichtlich Zug, Druck und zulässigem Biegeradius unterworfen.

[0003] Zum Verschalten mehrerer supraleitender Spulen, insbesondere aus einem hochtemperatursupraleitenden Bandleiter, werden daher typischerweise Kupferverbindungen aus Kupferblech oder Kupferlitzen verwendet, welche mit den supraleitenden Spulen durch Lötung verbunden werden. Problematisch ist dabei der ohmsche Widerstand der Verbindung. Der ohmsche Widerstand macht sich insbesondere dann besonders nachteilig bemerkbar, wenn in den supraleitenden Spulen Ströme von 1000 A oder mehr fließen. Entsprechend der Stromtragfähigkeit der supraleitenden Spulen sind entsprechende Kupferquerschnitte für die Verbindung zweier Spulen zu wählen. Dies kann zu mechanischen und eventuell räumlichen Problemen führen. Weiterhin können sich die Kupferverbindungen aufgrund ihres Widerstands signifikant erwärmen. Dies kann wiederum zu einer Erwärmung der kontaktierten supraleitenden Spulen führen, wodurch deren kritische Stromdichte sinkt. Im Bereich der supraleitenden Spulenenden, d.h. den mit den Kupferverbindungen kontaktierten Enden, besteht dann eine erhöhte Quenchgefahr. Diese kann lokal zu einer Beschädigung der Spule führen.

[0004] Die elektrische Verbindung zweier supraleitenden Spulen über ein Kupferblech oder Kupferlitzen ist damit auf solche Spulen eingeschränkt, in denen Ströme von wenigen 100 A auftreten. Spulen, bei denen größere Ströme fließen, können aus oben genannten Gründen nicht auf diese Weise elektrisch miteinander verbunden werden.

[0005] Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine

supraleitende Spulenordnung anzugeben, bei welcher eine serielle elektrische Verschaltung zweier supraleitender Spulen auch bei Strömen von deutlich mehr als 100 A ermöglicht ist.

[0006] Diese Aufgabe wird gelöst durch eine supraleitende Spulenordnung gemäß den Merkmalen des Patentanspruchs 1. Vorteilhafte Ausgestaltungen ergeben sich aus den abhängigen Patentansprüchen.

[0007] Die Erfindung schafft eine supraleitende Spulenordnung mit einer ersten und einer zweiten supraleitenden Spule, welche in einem Kaltraum angeordnet sind und über ein ebenfalls in dem Kaltraum angeordnetes Verbindungselement elektrisch leitend miteinander verbunden sind. Erfindungsgemäß umfasst das Verbindungselement ein massives Trägerstück aus einem elektrisch leitenden Material, auf und/oder in dem zumindest ein supraleitendes Leiterstück, insbesondere ein HTS-Leiterstück, angeordnet ist.

[0008] Erfindungsgemäß ist somit vorgesehen, die elektrische Verbindung zwischen zwei supraleitenden Spulen zumindest teilweise über ein supraleitendes Leiterstück zu führen. Hierdurch kann die elektrische Verbindung verlustarm ausgeführt werden. Insbesondere lässt sich durch das erfindungsgemäß vorgesehene Verbindungselement über den bislang eingesetzten Kupferblechen oder Kupferlitzen der Widerstand der Verbindung deutlich verringern. Hierdurch erwärmt sich die Spulenverbindung weniger stark. In Folge dessen wird die Gefahr des Quenchens der miteinander elektrisch verbundenen supraleitenden Spule aufgrund lokaler Erwärmungen reduziert. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Gesamtverluste der Spulenordnung, die aus mehreren einzelnen Spulen zusammengesetzt ist, verringert werden. Dadurch, dass die Verbindung zwischen zwei supraleitenden Spulen aufgrund des geringen ohmschen Widerstands einen im Vergleich zum Stand der Technik kleineren Querschnitt aufweisen kann, wird der benötigte Bauraum reduziert. Dies hat geringere Massen zur Folge, so dass sich das erfindungsgemäß vorgeschlagene Verbindungselement in rotierenden Maschinen einsetzen lässt. Auf dieses wirken dann geringe Kräfte ein.

[0009] In einer zweckmäßigen Ausgestaltung sind die erste und die zweite Spule aus Hochtemperatursupraleitern gebildet. Hierbei können prinzipiell alle bekannten Materialien in Hochtemperatursupraleitern zum Einsatz kommen. Prinzipiell ist die erfindungsgemäße Spulenordnung auch nicht auf Hochtemperatursupraleiter beschränkt. Vielmehr kann die erfindungsgemäße Spulenordnung mit jeder Art von supraleitendem Material realisiert werden.

[0010] In einer weiteren zweckmäßigen Ausgestaltung ist das zumindest eine Leiterstück des Verbindungselements ein YBCO-Bandleiter, der mit der Oberfläche derjenigen Hauptseite auf dem Trägerstück angeordnet ist, bei der eine HTS (hochtemperatursupraleitende)-Schicht des Bandleiters näher an der Oberfläche des Bandleiters ist. Hierdurch wird ein geringstmöglicher

Übergangswiderstand bereitgestellt. Der Strom braucht dabei nicht durch das im Vergleich schlechter leitfähige Trägerstück fließen, um die supraleitende Schicht des Leiterstücks zu erreichen.

[0011] Wahlweise ist das massive Trägerstück aus Elektro-Kupfer oder Messing gebildet. Diese Materialien weisen einen erwünschten, kleinen ohmschen Widerstand auf.

[0012] Vorzugsweise ist das zumindest eine supraleitende Leiterstück mit dem Trägerstück mittels eines Weichlots oder eines Niedertemperatur-Lots verlötet. Die Verwendung eines Niedertemperatur-Lots stellt bei der Herstellung des Verbindungselements sicher, dass die HTS-Schicht durch den Lötvorgang nicht beschädigt wird. Insbesondere sollten während des Lötvorganges keine wesentlich höheren Temperaturen als 200 Grad Celsius erreicht werden. Dies kann mittels bekannter Weichlote, insbesondere Niedertemperatur-Lote z.B. In, 97In3Ag, 98.5In1.5Ag sichergestellt werden.

[0013] In einer weiteren zweckmäßigen Ausgestaltung ist das Trägerstück ein zylinderförmiger Bolzen mit runden oder polygonalen, insbesondere vier- oder sechseckigem, Querschnitt. Ein bolzenförmiges Trägerstück stellt sicher, dass das supraleitende Leiterstück unter Vermeidung von Biegungen auf/oder in dem Trägerstück angeordnet werden kann. Dies ist insbesondere bei der bevorzugten Verwendung eines keramischen Hochtemperatur Supraleiters in Gestalt eines YBCO-Bandleiters von Vorteil, da diese anfällig gegenüber Biegungen sind. Insbesondere kann hierdurch auch sicher gestellt werden, dass das oder die supraleitenden Leiterstücke auch bei rotierenden Anwendungen keinerlei Biegebelastungen ausgesetzt sind.

[0014] In einer ersten Variante ist das zumindest eine supraleitende Leiterstück auf eine Oberfläche des Trägerstücks, insbesondere eine Mantelfläche des Trägerstücks aufgebracht. In einer alternativen oder zusätzlichen Ausgestaltungsvariante ist das zumindest eine supraleitende Leiterstück in einer Nut des Trägerstücks angeordnet. Das Trägerstück kann dabei wahlweise eine oder mehrere Nuten aufweisen, in welcher jeweils ein oder mehrere supraleitende Leiterstücke eingebracht sind.

[0015] Die Anzahl der in einem erfindungsgemäßen Verbindungselement verwendeten Leiterstücken wird vorzugsweise in Abhängigkeit eines zu tragenden Stroms gewählt. Je höher der durch die Spulenordnung zu tragende Strom ist, desto mehr supraleitende Leiterstücke werden in bzw. auf dem Trägerstück vorgesehen. Die Anzahl der Leiterstücke kann dabei durch die Gestalt des Trägerstücks festgelegt werden. Je größer die Oberfläche des Trägerstücks ist, desto mehr Leiterstücke können auf dieser angeordnet werden. Im Falle des Vorsehens einer oder mehrerer Nuten kann durch die Größe jeweiliger Nuten festgelegt werden, wie viele der Leiterstücke parallel nebeneinander in eine jeweilige Nut eingebracht werden.

[0016] Gemäß einer weiteren zweckmäßigen Aus-

gestaltung ist auf die Stirnseiten des Trägerstücks je eine Folie aus Indium aufgebracht. Hierdurch kann bei einer kraftschlüssigen Verbindung von Verbindungselement und jeweiliger supraleitender Spule ein guter Kontaktübergang hergestellt werden. Vorzugsweise erfolgt die Herstellung einer elektrischen Verbindung zwischen Verbindungselement und jeweiliger supraleitender Spule über die Stirnseiten des Verbindungselementes durch eine Verschraubung und Verpressung. Hierbei kann die aus Indium bestehende Folie bis an Ihre Fließgrenze mit Druck beaufschlagt werden, so dass sich eine Verbindung ähnlich einer Kaltverschweißung ergibt.

[0017] In einer weiteren zweckmäßigen Ausgestaltung umfasst das Verbindungselement mehrere Teilstücke, welche miteinander verschraubt und verpresst sind. Es versteht sich, dass in einem jeweiligen Verbindungsbereich zur Herstellung einer möglichst niederohmigen Verbindung die eben beschriebenen Folien aus Indium vorgesehen sind. In einem jeweiligen Verbindungsbereich sind dabei keine supraleitenden Leiterstücke vorgesehen.

[0018] Zweckmäßigerweise umfasst zumindest eines der Teilstücke wenigstens eine isolierte Teilfläche für den Anschluss eines Kühlelements. Hierdurch kann, sofern erforderlich, in dem Verbindungselement entstehende Verlustwärme über ein Kühlelement abgeführt werden. Auch hierdurch wird die Gefahr des Quenchens verringert. Die Spulenverbindungen, die aufgrund der Einkopplänge des Stroms einen geringen verbleibenden ohmschen Widerstand besitzen, können durch die thermische Anbindung an ein Kühlsystem gekühlt und auf einem vorgegebenen Temperaturniveau gehalten werden. Damit braucht die Kühlung der elektrischen Verbindungen nicht über die supraleitenden Spulen und deren Kühlanbindung erfolgen.

[0019] Die Erfindung umfasst weiterhin die Verwendung eines Verbindungselements mit einem massiven Trägerstück aus einem elektrisch leitenden Material, auf und/oder in dem zumindest ein supraleitendes Leiterstück angeordnet ist, in einem Kaltraum einer Spulenordnung zur Verbindung zweier supraleitender Spulen.

[0020] Die Erfindung wird nachfolgend näher anhand von Ausführungsbeispielen in der Zeichnung beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 ein erstes Ausführungsbeispiel eines Verbindungselements in einer erfindungsgemäßen Spulenordnung,

Fig. 2A, 2B ein zweites Ausführungsbeispiel eines Verbindungselements für eine erfindungsgemäße Spulenordnung in einer Seitenansicht und in einer Draufsicht,

Fig. 3A, 3B ein drittes Ausführungsbeispiel eines Verbindungselements für eine erfindungsgemäße Spulenordnung in einer Seitenansicht und in einem Querschnitt, und

Fig. 4 ein viertes Ausführungsbeispiel eines Verbindungselements für einen erfindungsgemäße Spulenanordnung, bei der das Verbindungselement aus einer Mehrzahl an Teilstücken gebildet ist.

[0021] Fig. 1 zeigt ein erstes Ausführungsbeispiel eines Verbindungselements 10 zur elektrischen Verbindung zweier supraleitender Spulen (nicht dargestellt). Sowohl das Verbindungselement 10 als auch die über das Verbindungselement 10 elektrisch miteinander verbundenen supraleitenden Spulen sind dabei miteinander in einem Kaltraum angeordnet.

[0022] Das Verbindungselement 10 besteht aus einem massiven Trägerstück 11, welcher beispielhaft als zylindrischer Bolzen mit kreisrundem Querschnitt ausgeführt ist. Das Trägerstück 11, das in einer Draufsicht dargestellt ist, weist eine Nut 13 auf. In die Nut 13 ist (lediglich beispielhaft) eine Mehrzahl an parallel verlaufenden supraleitenden Leiterstücken 12 eingebracht. Die Nut 13 durchdringt das bolzenförmige Trägerstück 13 vorzugsweise nicht vollständig, so dass zunächst die supraleitenden Leiterstücke 12 in die mit Lötmedium versehene Nut eingebracht und dann mit Lötzinne verlötet werden können.

[0023] In einer alternativen, nicht dargestellten Ausgestaltung könnte das Trägerstück 12 auch eine größere Anzahl an Nuten aufweisen, in die jeweils ein oder mehrere supraleitende Leiterstücke eingebracht sind.

[0024] Die Leiterstücke 12 sind vorzugsweise als YBCO-Bandleiter ausgebildet, können aber auch aus anderen HTS-Bandleitern wie z.B. BSCCO 2223 ausgebildet sein. Bei diesem YBCO-Bandleiter befindet sich eine hochtemperatursupraleitende Schicht (HTS-Schicht) auf einem Substrat aus schlecht-leitfähigen Metallbändern, wie z. B. Stahl oder Hastelloy. Ein solcher Bandleiter weist eine Dicke von ca. 0,2 mm und eine Breite von 10 bis 12 mm auf. Die HTS-Schicht ist auf der Oberfläche einer der Hauptseiten aufgewachsen und lediglich wenige μm dick.

[0025] Die Herstellung der elektrischen Verbindung des Verbindungselements 10 mit den supraleitenden Spulen erfolgt über an den gegenüberliegenden Stirnseiten vorgesehenen Außengewinden 17a, 18a. Hierzu sind an den Stirnseiten des Trägerstücks 11 weiterhin Folien oder Scheiben 14, 15 aus Indium aufgebracht. Die Herstellung der Verbindung erfolgt demgemäß über eine Verschraubung. Um diese mit hoher Kraft vornehmen zu können, sind Schlüsselflächen 16 (Einkerbungen) an der Außenseite des Trägerstücks vorgesehen, wodurch zur Herstellung der Verschraubung ein Schraubenschlüssel verwendet werden kann.

[0026] Bei der Verschraubung mit den supraleitenden Spulen werden die jeweiligen Folien bzw. Scheiben 14, 15 aus Indium bis an ihre Fließgrenze verpresst, so dass sich ein Kontakt ähnlich einer Kaltverschweißung ergibt. Dieser weist eine hohe elektrische Leitfähigkeit mit geringem Übergangswiderstand auf.

[0027] Die Figuren 2A, 2B zeigen ein zweites Ausführungsbeispiel eines Verbindungselements 10. Fig. 2A zeigt dieses dabei in einer Seitenansicht, Fig. 2B in einer Draufsicht. Das Trägerstück 11 ist hier in Gestalt eines Bolzens mit sechseckigem Querschnitt ausgebildet. Auf jeder der sechs Teilflächen ist beispielhaft jeweils ein supraleitendes Leiterstück 12 aufgebracht. Auf zumindest manchen der Teilflächen könnten auch mehrere der Leiterstücke angeordnet sein.

[0028] Die Leiterstücke 12 erstrecken sich dabei vorzugsweise über die gesamte Länge des Trägerstücks 11. Wie im vorangegangenen Ausführungsbeispiel sind die Leiterstücke 12 durch eine Lötung auf das Trägerstück 11 aufgebracht. Um während des Lötvorganges eine Beschädigung der HTS-Schicht zu verhindern, wird hierzu vorzugsweise ein Niedertemperatur-Lot eingesetzt, dass bei Temperaturen von beispielsweise unterhalb 200 Grad Celsius zum Schmelzen gebracht werden kann.

[0029] Dabei ist das als YBCO-Bandleiter ausgebildete Leiterstück mit der Oberfläche derjenigen Hauptseite auf dem Trägerstück angeordnet, bei der die HTS-Schicht des Bandleiters näher an der Oberfläche des Bandleiters ist. Hierdurch braucht der Strom gegebenenfalls nicht erst durch das schlechter leitfähige Metallband fließen, um die supraleitende Schicht des Leiterstücks zu erreichen. Hierdurch kann die Einkoppellänge für den elektrischen Strom klein gehalten werden.

[0030] Im Gegensatz zum vorangegangenen Ausführungsbeispiel ist das Trägerstück 11 an Stelle von Außengewinden mit Innengewinde 17b, 18b, versehen. In diesem Fall weisen die supraleitenden Spulen entsprechende Bolzen mit Außengewinden auf, welche in die Innengewinde 17a, 17b eingeschraubt werden können. Um auch bei dieser Ausgestaltungsvariante eine niederohmige Verbindung zwischen dem Verbindungselement und supraleitenden Spulen erzielen zu können, sind an den Stirnseiten wiederum die Scheiben bzw. Folien 14, 15 aus Indium vorgesehen.

[0031] Aufgrund der sechseckigen, allgemein polygonalen, Querschnittsgestalt des Trägerstücks 11 braucht bei dieser Ausgestaltungsvariante keine Schlüsselfläche vorgesehen sein. Die Gestalt des Trägerstücks ermöglicht die Herstellung der Schraubverbindung unter Verwendung eines Schraubenschlüssels.

[0032] Die Figuren 3A und 3B zeigen ein drittes Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Verbindungselements 10. Dieses ist aus insgesamt drei Teilstücken 10a, 10b, 10c gebildet. Jedes der Teilstücke 10a, 10b, 10c weist - wie aus Fig. 3B ersichtlich - beispielhaft einen rechteckigen Querschnitt auf. Die Seitenlängen des Rechtecks sind dabei derart bemessen, dass eine jeweilige Oberfläche möglichst vollständig durch ein oder mehrere Leiterstücke vollständig bedeckt werden kann. An den kurzen Seitenflächen ist beispielhaft jeweils ein Leiterstück 12 angeordnet. Auf den längeren Seitenflächen sind lediglich beispielhaft zwei Leiterstücke nebeneinander angeordnet.

[0033] Die beiden äußeren Leiterstücke 10a, 10c sind identisch aufgebaut. Der Übersichtlichkeit halber wurde deshalb auch lediglich das Teilstück 10c mit Bezugszeichen versehen. Wie in dem in Verbindung mit Figur 2A, 2B beschriebenen Ausführungsbeispiel weist das Teilstück 10c an seinen gegenüberliegenden Stirnseiten ein Innengewinde 17b, 18b auf. Ebenfalls sind auf den Stirnseiten die bereits beschriebenen Folien bzw. Scheiben 14, 15 aus Indium vorgesehen.

[0034] Das mittlere Teilstück 10b verbindet die Teilstücke 10a, 10c miteinander. Über das freie Ende des Teilstücks 10a erfolgt die Herstellung der elektrischen Verbindung zu einer ersten supraleitenden Spule, über das freie Ende des Teilstücks 10c die Herstellung einer elektrischen Verbindung zu einer zweiten supraleitenden Spule.

[0035] Die Herstellung der elektrischen Verbindung erfolgt unter Verwendung jeweiliger Schrauben 19, die durch eine nicht näher dargestellte Bohrung des Teilstücks 10b hindurch in das Innengewinde 17b des betreffenden Teilstücks 10a, 10c eingeschraubt werden können. Die zur Verschraubung verwendete Schraube 19 besteht vorzugsweise aus Messing. Um eine sichere und niederohmige Verbindung herzustellen, ist darüber hinaus eine Unterlegscheibe 20, ebenfalls aus Messing, vorgesehen.

[0036] Durch Variation der Länge des mittleren Teilstücks 10b kann eine mehr oder minder beliebige Länge bei der Verschaltung zweier Spulen überbrückt werden. Beispielsweise ist es mit einem derartigen Verbindungselement möglich, in einer Anordnung jede zweite oder jede dritte Spule elektrisch miteinander zu verbinden, so dass ein bzw. zwei dazwischen liegende Spulen "übersprungen" werden.

[0037] Die drei Teilstücke 10a, 10b, 10c bestehen jeweils aus einem massiven Trägerstück, auf und/oder in dem zumindest ein supraleitendes Leiterstück angeordnet ist. Die Leiterstücke 12 des Teilstücks 10b sind schraffiert dargestellt. Die Leiterstücke der Teilstücke 10a, 10c sind nicht näher dargestellt, wobei der Aufbau analog dem Teilstück 10b ist. Es ist ersichtlich, dass im Bereich der mechanischen und elektrischen Kontaktierung des Teilstücks 10b mit den Teilstücken 10a und 10c kein Leiterstück 12 vorgesehen ist. Das, aus Sicht des Betrachters untere Leiterstück 12 ist gegenüber den anderen verkürzt ausgebildet.

[0038] In dem in Fig. 3A, 3B gezeigten Ausführungsbeispiel sind die supraleitenden Leiterstücke auf der Oberfläche der massiven Teilstücke angeordnet. Prinzipiell könnte auch eine Mischung der beiden Ausführungsvarianten erfolgen. Beispielsweise könnten die kurzen Teilstücke 10a, 10c mit einer oder mehreren Nuten mit darin befindlichen Leiterstücken ausgebildet sein, während das Teilstück 10b die Leiterstücke auf seiner Oberfläche aufweist oder umgekehrt. Ebenso könnte eines der Leiterstücke sowohl eine Nut mit darin befindlichen Leiterstücken als auch auf der Oberfläche angeordnete Leiterstücke aufweisen.

[0039] Das vierte Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 4 basiert auf der in Verbindung mit Fig. 3A, 3B beschriebenen Variante. Dabei ist das massive Trägerstück 11 des mittleren Teilstücks 10b beidseitig nach außen verlängert. Im Bereich der verlängerten Abschnitte weist das massive Trägerstück 11 keine Leiterstücke auf. Die Verlängerungen dienen zur Anbindung einer Kühlung. Hierzu sind elektrisch isolierend (Isolationsschicht 21) Metallkontakte 22 für einen Kühlanschluss mit dem Trägerstück 11 des Teilstücks 10c gekoppelt. Die Metallkontakte 22 sind beispielsweise aus Kupfer gebildet. Sämtliche Metallkontakte sind vorzugsweise an einen gleichen Kältepunkt angeschlossen und sorgen für eine Wärmeableitung. Der Metallkontakt kann massiver Art sein oder in Gestalt von Kupferlitzen oder -Blechen ausgebildet sein.

[0040] Gegenüber herkömmlichen Verbindungselementen weisen die beschriebenen Verbindungselemente eine geringe Masse auf. Hierdurch können diese gut in rotierenden Anwendungen eingesetzt werden. Die Bauweise der Verbindungselemente sorgt dafür, dass auch keramische Hochtemperatursupraleiter für die Leiterstücke verwendet werden können, da diese im Rahmen ihrer Anwendung keinen Biegebelastungen ausgesetzt sind.

[0041] Die Verwendung von Verbindungselementen mit supraleitenden Leiterstücken ermöglicht eine deutliche Verringerung des Widerstands bei der Verbindung zweier supraleitender Spulen. Hierdurch reduziert sich die Erwärmung der Spulenverbindung stark, so dass die Gefahr eines Quenchens der Spulen aufgrund erwärmter Kontakte reduziert ist. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Gesamtverluste der Spulenordnung verringert sind. Aufgrund der hohen Leitfähigkeit der Verbindungselemente können diese vergleichsweise klein ausgeführt werden, wodurch der benötigte Bauraum reduziert ist.

Patentansprüche

1. Supraleitende Spulenordnung mit einer ersten und einer zweiten supraleitenden Spule, welche in einem Kaltraum angeordnet sind und über ein ebenfalls in dem Kaltraum angeordnetes Verbindungselement (10) elektrisch leitend miteinander verbunden sind, wobei das Verbindungselement (10) ein massives Trägerstück (11) aus einem elektrisch leitenden Material umfasst, auf und/oder in dem zumindest ein supraleitendes Leiterstück (12) angeordnet ist.
2. Spulenordnung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste und die zweite Spule aus Hochtemperatursupraleitern (HTS) gebildet sind.
3. Spulenordnung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch**

- gekennzeichnet, dass** das zumindest eine Leiterstück (12) des Verbindungselements (10) ein YBCO-Bandleiter ist, der mit der Oberfläche derjenigen Hauptseite auf dem Trägerstück (11) angeordnet ist, bei der eine HTS-Schicht des Bandleiters näher an der Oberfläche des Bandleiters ist.
4. Spulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das massive Trägerstück (11) aus Elektro-Kupfer oder Messing ist.
5. Spulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das zumindest eine supraleitende Leiterstück (12) mit dem Trägerstück (11) mittels eines Weichlots bzw. Niedertemperatur-Lots verlötet ist.
6. Spulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Trägerstück (10) ein zylinderförmiger Bolzen mit rundem oder polygonalem, insbesondere vier- oder sechseckigem, Querschnitt ist.
7. Spulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das zumindest eine supraleitende Leiterstück (12) auf eine Oberfläche des Trägerstücks (10), insbesondere eine Mantelfläche des Trägerstücks (10), aufgebracht ist.
8. Spulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das zumindest eine supraleitende Leiterstück (12) in einer Nut (13) des Trägerstücks (10) angeordnet ist.
9. Spulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Anzahl der Leiterstücke (12) in Abhängigkeit eines zu tragenden Stroms gewählt ist.
10. Spulenordnung nach einem der Ansprüche 6 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** auf die Stirnseiten des Trägerstücks (10) je eine Folie (14, 15) aus Indium aufgebracht ist.
11. Spulenordnung nach einem der Ansprüche 6 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Verbindungselement (10) über seine Stirnseiten mit der ersten der zweiten Spule verschraubt und verpresst ist.
12. Spulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Verbindungselement (10) mehrere Teilstücke (10a, 10b, 10c) umfasst, welche miteinander verschraubt und verpresst sind.
13. Spulenordnung nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Teilstücke (10a, 10b, 10c) im Bereich ihrer Verschraubung kein Leiterstück (11) aufweisen.
14. Spulenordnung nach Anspruch 12 oder 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** zumindest eines der Teilstücke (10a, 10b, 10c) wenigstens eine isolierte Teilfläche () für den Anschluss eines Kühlelements (20) umfasst.
15. Verwendung eines Verbindungselements mit einem massiven Trägerstück (11) aus einem elektrisch leitenden Material, auf und/oder in dem zumindest ein supraleitendes Leiterstück (12) angeordnet ist, in einem Kaltraum einer Spulenordnung zur Verbindung zweier supraleitender Spulen.

FIG 1

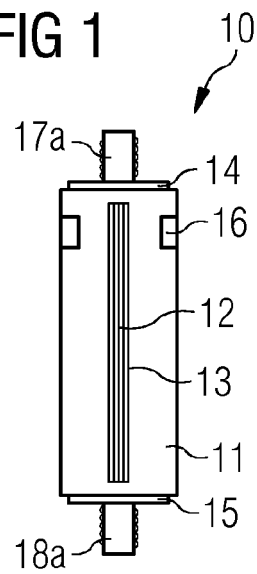


FIG 2A

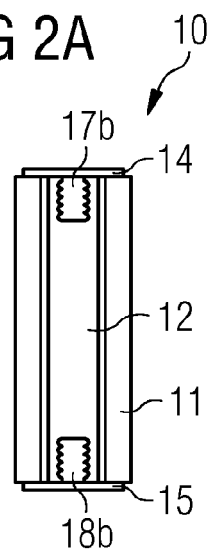


FIG 2B

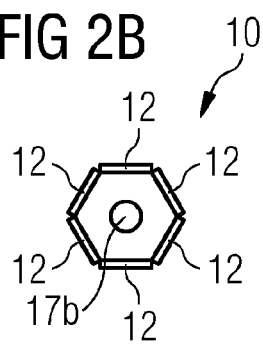


FIG 3A

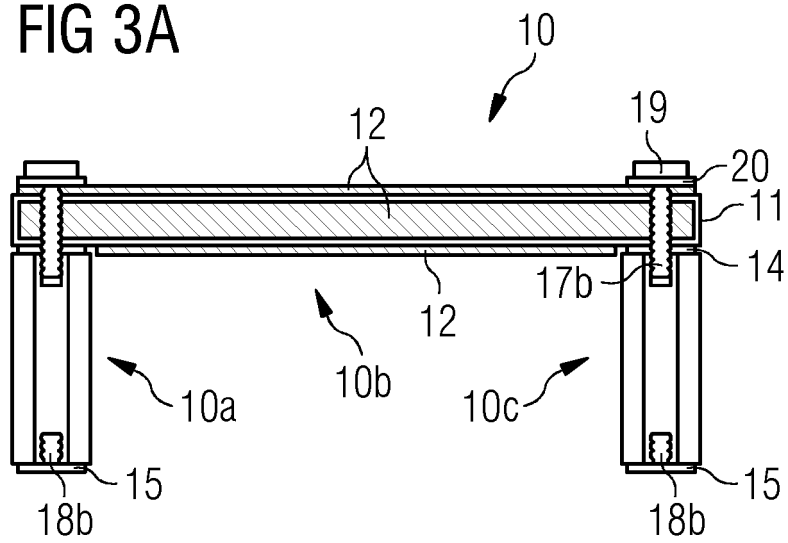


FIG 3B

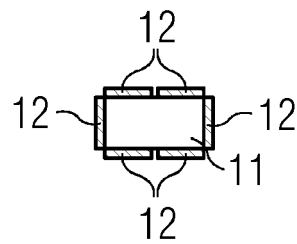


FIG 4

