

(19)



(11)

EP 3 176 795 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
26.01.2022 Patentblatt 2022/04

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
H01F 6/06^(2006.01) H01F 41/04^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **16200176.2**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
H01F 6/06; H01F 41/048

(22) Anmeldetag: **23.11.2016**

(54) **MAGNETSPULENANORDNUNG MIT ANISOTROPEM SUPRALEITER**

SOLENOID ASSEMBLY WITH ANISOTROPIC SUPERCONDUCTOR

SYSTÈME DE BOBINES MAGNÉTIQUES COMPRENANT UN SUPRACONDUCTEUR ANISOTROPE

(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

(30) Priorität: **02.12.2015 DE 102015223991**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
07.06.2017 Patentblatt 2017/23

(73) Patentinhaber: **Bruker Switzerland AG**
8117 Fällanden (CH)

(72) Erfinder:
• **Günter, Kenneth**
8050 Zürich (CH)
• **Vonlanthen, Patrik**
8603 Schwerzenbach (CH)
• **Schauwecker, Robert**
8004 Zürich (CH)

(74) Vertreter: **Kohler Schmid Möbus Patentanwälte Partnerschaftsgesellschaft mbB**
Gropiusplatz 10
70563 Stuttgart (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
GB-A- 2 519 811 JP-A- H 065 414
JP-A- S6 165 411 US-A- 5 914 647

- **CHEN XIAO Y ET AL: "Evaluation of Step-Shaped Solenoidal Coils for Current-Enhanced SMES Applications", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, IEEE SERVICE CENTER, LOS ALAMITOS, CA, US, Bd. 24, Nr. 5, 1. Oktober 2014 (2014-10-01), Seiten 1-4, XP011560034, ISSN: 1051-8223, DOI: 10.1109/TASC.2014.2356572 [gefunden am 2014-09-25]**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

EP 3 176 795 B1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine supraleitfähige, gestufte Magnetspulenordnung mit einer hohlen Spule mit konstantem Innenradius zur Erzeugung eines Betriebsmagnetfeldes in einem Arbeitsvolumen um eine Symmetrieachse, wobei die Spule Wicklungen aus einem anisotropen Supraleiter umfasst, dessen supraleitende Stromtragfähigkeit in einem Magnetfeld senkrecht zur Stromrichtung im Leiter sowohl von der Feldamplitude als auch von der Feldrichtung innerhalb einer Ebene senkrecht zur Stromrichtung abhängt, wobei die radial aufsummierte Anzahl der Windungen entlang der Symmetrieachse zum Rand hin in diskreten Stufen oder quasi-kontinuierlich reduziert ist.

[0002] Eine solche Magnetspulenordnung ist bekannt aus Referenz [11].

[0003] Speziell kann eine derartige Magnetspulenordnung ausgestaltet sein mit einer Schnittebene, welche die Symmetrieachse enthält und die Spule schneidet, wobei die Spule einen rechteckigen Spulenquerschnitt in der Schnittebene aufweist, der definiert ist durch einen radial inneren und radial äußeren sowie einen axial ersten und axial zweiten Spulenrand, definiert durch die Position einer radial innersten und einer radial äußersten Windung der Spule mit dem kleinsten bzw. größten Abstand zur Symmetrieachse, und durch die Position einer axial ersten und einer axial letzten Windung der Spule mit der kleinsten bzw. größten Koordinate entlang der Symmetrieachsenrichtung, und wobei die Spule aufweist:

einen ersten radial begrenzten rechteckigen Spulenbereich, welcher den Spulenquerschnitt entlang der Symmetrieachsenrichtung vollständig überdeckt und keine in axialer Richtung vollgewinkelte Lage enthält,

einen zweiten radial begrenzten rechteckigen Spulenbereich innerhalb des ersten Spulenbereichs, welcher den ersten Spulenbereich radial vollständig und entlang der Symmetrieachsenrichtung zu 10% überdeckt und den axial ersten oder zweiten Spulenrand einschließt,

einen dritten radial begrenzten rechteckigen Spulenbereich innerhalb des ersten Spulenbereichs, welcher den ersten Spulenbereich radial vollständig und entlang der Symmetrieachsenrichtung zu 40% überdeckt und an den zweiten Spulenbereich anschließt, wobei die Anzahl der Windungen des anisotropen Supraleiters im dritten Spulenbereich mehr als das Viereinhalbfache der Anzahl der Windungen des anisotropen Supraleiters im zweiten Spulenbereich beträgt, einen vierten und fünften rechteckigen Spulenbereich innerhalb des Spulenquerschnitts, welche den Spulenquerschnitt radial vollständig und entlang der Symmetrieachsenrichtung je zu 10 % überdecken und den axial ersten bzw. zweiten Spulenrand einschließen mit einer ersten und zweiten Spulenrandwindungszahl, gegeben durch die Anzahl Windungen des anisotropen Supraleiters im vierten bzw. im fünften Spulenbereich und mit einer maximalen Spulenrandwindungszahl, gegeben durch den Quotienten aus der Querschnittfläche des vierten oder fünften Spulenbereichs und der Querschnittfläche des anisotropen Supraleiters.

Eine solche Magnetspulenordnung ist bekannt aus Referenz [0]

Hintergrund der Erfindung

[0004] Supraleitende Magnetspulen ermöglichen eine äußerst energieeffiziente Erzeugung von starken und zeitlich konstanten Magnetfeldern, da sie völlig ohne oder zumindest mit sehr geringen ohmschen Verlusten betrieben werden können.

[0005] Die elektrische Stromtragfähigkeit eines Supraleiters ist durch seinen kritischen Strom I_c gegeben. Übersteigt der elektrische Strom im Leiter den Wert von I_c , so findet ein Phasenübergang zu einem normalleitenden Zustand statt, in welchem der Strom nicht mehr widerstandslos fließt.

[0006] In einem isotropen Supraleiter hängt die Stromtragfähigkeit von der Stärke des Magnetfeldes ab, welchem er ausgesetzt ist, nicht aber von der Richtung des Magnetfeldes. Bei einem anisotropen Supraleiter hingegen wird die Stromtragfähigkeit auch vom Winkel des Magnetfeldes zum Leiter beeinflusst. Dies ist beispielsweise bei Hochtemperatursupraleitern (HTS) wie (RE)BCO oder Bi-2223 der Fall, deren zugrunde liegende Kupferoxidstruktur einen zweidimensionalen Charakter hat. So ist der kritische Strom eines HTS-Bandleiters in einem Magnetfeld, welches senkrecht zur Banebene steht, typischerweise niedriger als in einem Feld parallel zur Banebene.

[0007] In einer aus HTS-Bandleiter gewickelten zylindersymmetrischen Magnetspule führt dies normalerweise dazu, dass die Stromtragfähigkeit der Spule an den axialen Enden limitiert ist, da dort die Radialkomponente des Magnetfeldes am größten ist.

[0008] Im Folgenden betrachten wir eine aus anisotropem Supraleiter lagengewickelte zylindersymmetrische Magnetspule, deren Stromtragfähigkeit durch die von der Spule erzeugte Feldkomponente in radialer Richtung stärker unterdrückt ist als durch diejenige in axialer Richtung. Mit "lagengewickelt" ist gemeint, dass entlang des Supraleiters aufeinanderfolgende Windungen hauptsächlich lagenweise entlang der Symmetrieachse nebeneinander gewickelt sind, wobei einer Lage jeweils ein konstanter Radius zugeordnet werden kann. Dies steht im Gegensatz zu sogenannten Pancake-Spulen, bei denen aufeinanderfolgende Windungen hauptsächlich radial übereinander gewickelt sind.

Stand der Technik

[0009] In den Referenzen [1] und [2] wird die Stromtragfähigkeit der Spule an den axialen Enden erhöht, indem für die entsprechenden Wicklungen ein Supraleiter mit höherer Stromtragfähigkeit (größerer Leiterquerschnitt, siehe Referenz [1] oder Supraleiterart mit höherer kritischer Stromdichte siehe Referenz [2]) verwendet wird. Ein Nachteil dieser Lösung liegt darin, dass in der Spule kein einheitlicher Supraleiter verwendet werden kann und dass die unterschiedlichen Leiterstücke für einen Betrieb in Serienschaltung gezwungenermaßen niederohmig verbunden werden müssen. Außerdem werden in den genannten Referenzen keine lagengewickelten Spulen betrachtet, sondern solche, die aus mehreren entlang der Achse axial positionierten Sektionen oder Pancakes bestehen.

[0010] Eine weitere bekannte Möglichkeit, die Stromtragfähigkeit zu erhöhen, ist in Referenz [3] beschrieben: Ferromagnetische Flansche an den Spulenden leiten den magnetischen Fluss um den Supraleiter herum und reduzieren dort die maximale Radialkomponente des Magnetfeldes. Die relativ schwache Magnetisierung von Ferromagneten schränkt die Effizienz dieser Methode jedoch deutlich ein.

[0011] In Referenz [4] ist eine Anordnung offenbart, bei welcher die Windungszahl an den axialen Spulenden reduziert ist. Allerdings handelt es sich bei dieser bekannten Spule um eine Anordnung aus mehreren Doppel-"Pancake"-Spulen und nicht um eine lagengewickelte Solenoid-Spule der eingangs definierten Art. Außerdem wird mit dieser Anordnung nicht beabsichtigt, die radiale Feldkomponente an den Spulenden zu verringern.

[0012] Referenzen [8] bis [10]:

Bei diesen Publikationen wurde zwar erkannt, dass durch Reduzieren des Radialfeldes am Rand einer HTS Spule das Betriebsfeld im Arbeitsvolumen erhöht werden kann, doch wurden als Lösung zur Reduktion des Radialfeldes jeweils Spulen unterschiedlicher Längen vorgeschlagen. Die Erhöhung der Betriebsfelder im Arbeitsvolumen aufgrund dieser Maßnahme ist jedoch gering. Zudem sind bei den bekannten Anordnungen notwendigerweise jeweils zusätzliche Wickelkörper erforderlich.

[0013] Referenz [5] offenbart eine supraleitfähige Magnetspulenordnung mit mindestens einer Sektion aus supraleitfähigem Bandleiter, die in einer zylindrischen Wickelkammer zwischen zwei Endflanschen mehrlagig, solenoidartig durchgehend gewickelt ist, und die sich dadurch auszeichnet, dass die Sektion einen axialen Bereich reduzierter Stromdichte bzw. Notch-Bereich aufweist.

[0014] Referenz [6] beschreibt eine *supraleitende homogene Hochfeldmagnetspule*, bei der im axialen Endbereich die Stromdichte derart verringert ist, dass die auf die Windungen wirkenden Kräfte klein gehalten werden können.

[0015] Die Referenz [7] offenbart eine *supraleitfähige Magnetspulenordnung*, die zumindest eine Sektion aus supraleitfähigem Bandleiter enthält, welche in einer zylindrischen Wickelkammer zwischen zwei Endflanschen mehrlagig, solenoidartig durchgehend gewickelt ist. Die bekannte Anordnung zeichnet sich dadurch aus, dass die Sektion einen axialen Bereich reduzierter Stromdichte (= "Notch"-Bereich) aufweist. Allerdings ist die Windungszahl an den Spulenträndern gegenüber dem Inneren dieses axialen Bereichs nicht reduziert, wodurch keine Reduktion des Radialfeldes erreicht wird.

[0016] Gestufte Supraleiterspulen sind auch bekannt aus Referenz [12], wo jedoch kein randständig zusammenhängender Teil offenbart ist, oder aus Referenz [13], wo aber mit dem isolierenden Tape keine Wickellage ersetzt wird.

[0017] Aus der bereits oben zitierten Referenz [11] ist eine gattungsgemäße gestufte Spulengeometrie mit den eingangs definierten Merkmalen bekannt, bei welcher der Innendurchmesser der Wicklungen am Spulenende aufgeweitet wird, um den Einfluss der vertikalen Feldkomponente auf die kritische Stromdichte zu vermindern. Bei dieser Anordnung wird unter anderem der innere Spulenradius axial variiert, was aus verschiedenen Gründen nicht besonders vorteilhaft ist und dem entsprechenden Merkmal einer gattungsgemäßen Spule diametral entgegengesetzt ist. Außerdem ist ein Mitwickeln von nicht-supraleitendem Material in einer bezogen auf die Symmetrieachse z zylindersymmetrisch lagengewickelten Spule nicht einmal andeutungsweise offenbart.

[0018] Die ebenfalls bereits oben zitierte Referenz [0] schließlich beschreibt eine *supraleitfähige, gestufte Magnetspulenordnung*, handelt aber ausschließlich von Pancake-Spulen, nicht jedoch von auf die Symmetrieachse z zylindersymmetrisch lagengewickelten Spulen, wobei auch ein Mitwickeln von nicht-supraleitendem Material nicht offenbart ist.

Aufgabe der Erfindung

[0019] Der vorliegenden Erfindung liegt demgegenüber die Aufgabe zugrunde, eine supraleitfähige Magnetspulenordnung der eingangs definierten Art sowie ein Verfahren zu deren Design mit besonders einfachen technischen Mitteln so zu modifizieren, dass die oben diskutierten Einschränkungen von derartigen supraleitfähigen Magnetspulenordnungen, welche typischerweise an den axialen Enden der Spule auftreten, deutlich abgemildert werden und die Stromtragfähigkeit der Spule erheblich erhöht wird. Insbesondere soll mit der Erfindung eine generische gestufte Supraleiterspule bereitgestellt werden, die einfach herzustellen ist und minimale Lagenwechsel aufweist.

Kurze Beschreibung der Erfindung

[0020] Diese Aufgabe wird auf einfach zu realisierende, wirkungsvolle Weise mit ohne Weiteres zur Verfügung stehenden technischen Mitteln durch eine supraleitfähige Magnetspulenordnung der eingangs definierten Art gelöst, welche sich dadurch auszeichnet, dass die Spule bezogen auf die Symmetrieachse zylindersymmetrisch lagengewickelt ist, wobei ein sich nur von einem axialen Spulenende erstreckender zusammenhängender Teil einer innenliegenden Wickellage mit nicht-supraleitendem Material gewickelt ist.

Wirkungsweise der Erfindung und weitere Vorteile gegenüber dem Stand der Technik

[0021] Unter gewissen Umständen ist die Stromtragfähigkeit von Spulen, die aus anisotropem Supraleiter gewickelt sind, an den axialen Enden durch die Magnetfeldkomponente in radialer Richtung limitiert. Die vorliegende Erfindung schlägt eine supraleitfähige Magnetspulenordnung vor, welche es ermöglicht, diese Feldkomponente abzuschwächen und die Stromtragfähigkeit der Spule zu erhöhen.

[0022] Die Stromtragfähigkeit des Supraleiters an den axialen Spulenenden wird *erhöht, indem die radiale Komponente des Magnetfeldes abgeschwächt wird*. Dies wird erfindungsgemäß durch eine Absenkung der Windungszahl in Bereichen an den Spulenenden erreicht, wobei sowohl der Querschnitt als auch die Art des verwendeten Supraleiters unverändert bleiben können.

[0023] Die geringere Windungszahl in der Nähe der axialen Spulenenden führt dazu, dass der radiale magnetische Fluss axial über einen größeren Bereich verteilt wird und die Radialkomponente des Magnetfeldes lokal kleiner wird. Dadurch wiederum wird dort die Stromtragfähigkeit des Supraleiters und folglich der gesamten Spule erhöht.

[0024] Ein Vorteil dieser erfindungsgemäßen Anordnung besteht in der gleichmäßigeren Verteilung der Stromtragfähigkeit des Supraleiters in der gesamten Spule. Dadurch wird der Supraleiter für den Stromfluss besser ausgenutzt, die Spule kann bei einem höheren Strom betrieben werden. Die benötigte Menge an Supraleitermaterial und somit die Herstellungskosten sind folglich geringer als bei vergleichbaren herkömmlichen Anordnungen.

[0025] Andererseits kann mit derselben Supraleitermenge ein höheres Magnetfeld im Spulenzentrum erzeugt werden.

[0026] Im Gegensatz zu Anordnungen, bei welchen das Radialfeld passiv, also beispielsweise mit ferromagnetischen Elementen, beeinflusst wird, ist die erfindungsgemäße Anordnung durch die bewusste Wahl der Windungsverteilung in der Spule deutlich effizienter. Außerdem sind zur Realisierung der Anordnung keine zusätzlichen Wickelkörper notwendig, was räumlichen Platz und Materialkosten spart.

[0027] Besonders vorteilhaft gegenüber dem Stand der Technik ist die Möglichkeit der Verwendung eines einheitlichen Supraleiters in der gesamten Spule. Sind nämlich verschiedene Supraleiter notwendig, z.B. aus unterschiedlichem supraleitendem Material oder verschiedener Geometrie, so müssen diese zwangsläufig untereinander verbunden sein, damit der elektrische Strom die Leiterstücke in Serie durchfließen kann. Das Verbinden verschiedener Supraleiter kann technisch sehr herausfordernd und aufwändig sein.

[0028] Das zusammen mit dem Supraleitermaterial zum Rand hin mitgewickelte nicht-supraleitende Material dient als Füllmaterial und trägt zur mechanischen Stabilität des Wickelpakets bei.

[0029] Insbesondere kann die Spule derart ausgelegt sein, dass das erzeugte Magnetfeld eine Feldkomponente B_r senkrecht zur Stromrichtung und zur Symmetrieachse aufweist, deren Maximum im Spulenvolumen mindestens um 5% kleiner ist als wenn, bei gleichem Betriebsfeld der Spule im Zentrum des Arbeitsvolumens, die Ausdehnungen des vierten und fünften Spulenbereichs entlang der Symmetrieachsenrichtung zur Spulenmitte hin verkürzt wären, wobei die relative Verkürzung der Ausdehnungen dem Verhältnis von erster Spulenrandwindungszahl zur maximalen Spulenrandwindungszahl im vierten Spulenbereich sowie dem Verhältnis von zweiter Spulenrandwindungszahl zur maximalen Spulenrandwindungszahl im fünften Spulenbereich entspricht, bei gleich bleibender Anzahl Windungen des anisotropen Supraleiters in der Spule, dass das Minimum der supraleitenden Stromtragfähigkeit des anisotropen Supraleiters in der Spule mindestens 3% höher ist als wenn, bei gleichem Betriebsfeld der Spule im Arbeitsvolumen, die Ausdehnungen des vierten und fünften Spulenbereichs entlang der Symmetrieachsenrichtung zur Spulenmitte hin verkürzt wären, wobei die relative Verkürzung der Ausdehnungen dem Verhältnis von erster Spulenrandwindungszahl zur maximalen Spulenrandwindungszahl im vierten Spulenbereich sowie dem Verhältnis von zweiter Spulenrandwindungszahl zur maximalen Spulenrandwindungszahl im fünften Spulenbereich entspricht, bei gleich bleibender Anzahl Windungen des anisotropen Supraleiters in der Spule, und dass im ersten Spulenbereich entlang der Symmetrieachse zum Rand hin zusammen mit dem Supraleitermaterial auch

[0030] Wenn bei der Magnetspulenordnung im vierten und/oder im fünften Spulenbereich die radial aufsummierte Anzahl der Windungen entlang der Symmetrieachse z zum Rand hin in einer oder mehreren diskreten Stufen reduziert ist, kann die Radialfeldkomponente in den Spulenenden reduziert und die Stromtragfähigkeit deutlich gesteigert werden.

[0031] Alternativ kann im vierten und/oder im fünften Spulenbereich die radial aufsummierte Windungszahl entlang der Symmetrieachse z zum Rand hin quasi-kontinuierlich reduziert sein. Dies ermöglicht eine noch feinere Modellierung der Radialfeldkomponente entlang den axialen Spulenenden und eine bessere Optimierung der Stromtragfähigkeit.

Bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung

[0032] Besonders bevorzugt sind Ausführungsformen der Erfindung, bei denen die Wicklungen im ersten radial begrenzten rechteckigen Spulenbereich aus einem einzigen ununterbrochenen Supraleiterstück gewickelt sind, d.h. ohne sogenannte Joints, welche verschiedene Leiterstücke untereinander verbinden. Somit wird der elektrische Widerstand in der Spule sehr gering gehalten. Joints zwischen HTS-Supraleitern weisen normalerweise einen gewissen elektrischen Widerstand auf und führen zu einer Drift des Magnetfeldes, wenn die Spule nicht mit einer Stromquelle gestützt wird. Joints, welche im Wickelpaket der Spule untergebracht sind, können außerdem die Feldhomogenität im Arbeitsvolumen verschlechtern. Nicht zuletzt hat das Wickeln eines einzigen Leiterstücks auch produktionstechnische Vorteile.

[0033] Weitere vorteilhafte Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Magnetspulenordnung zeichnen sich dadurch aus, dass der zweite Spulenbereich mit mindestens 20%, insbesondere mit 40% bis 60%, vorzugsweise mit etwa 50% weniger Leiterwindungen gewickelt ist als ein axial anschließender Spulenbereich gleicher Geometrie. Durch eine Reduktion der Windungszahl in diesem Größenbereich ist die Radialfeldkomponente an den axialen Spulenenden besonders stark reduziert und die Stromtragfähigkeit der Spule deutlich erhöht.

[0034] Ganz besonders bevorzugt ist eine Klasse von Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Spulenordnung, bei denen das von der Spule erzeugte Magnetfeld eine Feldkomponente B_r senkrecht zur Stromrichtung und zur Symmetrieachse z aufweist, deren Maximum im Spulenvolumen mindestens um 10%, vorzugsweise um bis zu 50%, kleiner ist, als wenn -bei gleichem Betriebsfeld der Spule im Zentrum des Arbeitsvolumens- die Ausdehnungen des vierten und fünften Spulenbereichs entlang der Symmetrieachsenrichtung zur Spulenmitte hin verkürzt wären, wobei die relative Verkürzung der Ausdehnungen dem Verhältnis von erster und zweiter Spulenrandwindungszahl zur maximalen Spulenrandwindungszahl entspricht bei gleich bleibender Anzahl Windungen des anisotropen Supraleiters in der Spule. Bei einer solch starken Reduktion der Radialkomponente B_r ist die Erhöhung der Stromtragfähigkeit der Spule besonders lohnenswert.

[0035] Vorteilhaft sind auch Ausführungsformen der Erfindung, die sich dadurch auszeichnen, dass das Minimum der supraleitenden Stromtragfähigkeit des anisotropen Supraleiters in der Spule mindestens 5%, insbesondere bis 30%, vorzugsweise bis zu 50% höher ist, als wenn -bei gleichem Betriebsfeld der Spule im Zentrum des Arbeitsvolumens- die Ausdehnungen des vierten und fünften Spulenbereichs entlang der Symmetrieachsenrichtung zur Spulenmitte hin verkürzt wären, wobei die relative Verkürzung der Ausdehnungen dem Verhältnis von erster und zweiter Spulenrandwindungszahl zur maximalen Spulenrandwindungszahl entspricht bei gleich bleibender Anzahl Windungen des anisotropen Supraleiters in der Spule. Je größer die Stromtragfähigkeit der Spule ist, umso größere Magnetfelder können erzeugt werden, bzw. umso weniger Supraleitermaterial wird zur Erzeugung einer gegebenen Feldstärke im Arbeitsvolumen benötigt.

[0036] Vorteilhafte Weiterbildungen dieser Ausführungsformen sind dadurch gekennzeichnet, dass das mitgewickelte nicht-supraleitende Material Folieneinlagen umfasst. Folien lassen sich besonders gut zwischen den supraleitenden Windungen unterbringen und können auf einfache Weise in der gewünschten Geometrie zugeschnitten werden.

[0037] In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform wird die Reduktion der Windungszahl an den axialen Spulenenden dadurch bewerkstelligt, dass an den Spulenrändern über mehrere direkt übereinanderliegende Lagen keine Windungen gewickelt werden.

[0038] In den Rahmen der vorliegenden Erfindung fällt auch ein Verfahren zur Auslegung einer supraleitfähigen Magnetspulenordnung der oben beschriebenen, erfindungsgemäßen Art, welches sich dadurch auszeichnet, dass eine aus anisotropem Supraleiter bezogen auf die Symmetrieachse zylindersymmetrisch gewickelte Spule, bei welcher im ersten Spulenbereich entlang der Symmetrieachse zum Rand hin zusammen mit dem Supraleitermaterial auch nicht-supraleitendes Material mitgewickelt wird, wobei die Stromtragfähigkeit der Spule, welche anfänglich an den axialen Enden durch die radiale Magnetfeldkomponente begrenzt wird, durch Verringerung der Windungszahl in den axialen Endbereichen derart optimiert wird, dass ihre supraleitende Stromtragfähigkeit erhöht wird. Bei der Optimierung wird die maximale radiale Magnetfeldkomponente reduziert, indem folgende Parameter variiert werden:

- die Größe der Optimierungsbereiche an den axialen Spulenenden, in welchen die Windungszahl verringert wird
- die Anzahl Windungen in den Optimierungsbereichen und
- die Verteilung der Windungen innerhalb der Optimierungsbereiche.

[0039] Die Optimierungsbereiche können dabei auch über die Spulenenden der Ausgangsspule hinausragen, d.h. die optimierte Spule kann axial durchaus länger sein als die Ausgangsspule. Die genaue Windungsverteilung in den Optimierungsbereichen kann ferner so gewählt werden, dass sie in Bezug auf die Kräfte im Wickelpaket und/oder wickeltechnisch vorteilhaft ist.

[0040] Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass es zu einem Spulendesign führt, welches eine erhöhte Stromtragfähigkeit aufweist und dass die Spule für den Betrieb bei einer gegebenen Magnetfeldstärke eine insgesamt geringere Supraleitermenge benötigt wird als für die Ausgangsspule.

Detaillierte Beschreibung der Erfindung und Zeichnung

[0041] Die Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert. Es zeigen:

- Fig. 1 eine schematische Schnitt-Darstellung durch eine erste Ausführungsform der erfindungsgemäßen Magnetspulenordnung in einer die Symmetrieachse z enthaltenden Ebene mit der relativen geometrischen Anordnung der fünf definierten Spulenbereiche in einer ersten Ausführungsform (aus Symmetriegründen ist nur eine Hälfte der Spule dargestellt);
- Fig. 2a-d schematische Schnittdarstellungen weiterer Ausführungsformen von Magnetspulenordnungen; wobei Fig. 2a, Fig. 2c jeweils die Wickel-Anordnung und Fig. 2b, Fig. 2d jeweils die zugehörigen die Spulenbereiche einer zweiten beziehungsweise dritten Ausführungsform zeigen und nur die erfindungsgemäße Magnetspulenordnung darstellen;
- Fig. 2c+d die erfindungsgemäße Magnetspulenordnung darstellen;
- Fig. 3a,b eine schematische Wickelanordnung (Fig. 3a) sowie die zugehörigen Spulenbereiche (Fig. 3b) einer vierten Ausführungsform;
- Fig. 4a,b einen schematischen Vergleich der randseitigen Radial-Felder bei einer herkömmlichen (Fig. 4a) und bei einer erfindungsgemäß modifizierten (Fig. 4b) Magnetspulenordnung; und
- Fig. 5a,b einen schematischen Vergleich des Verlaufs der magnetischen Feldlinien bei einer erfindungsgemäßen (Fig. 5a) und bei einer herkömmlichen (Fig. 5b) Magnetspulenordnung nach dem Stand der Technik.

[0042] Figur 1 veranschaulicht schematisch eine erste Ausführungsform der erfindungsgemäßen Magnetspulenordnung.

[0043] Im Wickelpaket der Spule sind die Spulenbereiche 1 bis 5 innerhalb des rechteckigen Spulenquerschnitts definierbar, die den bestimmten, erfindungsgemäßen Anforderungen genügen, wie im Folgenden beschrieben wird.

[0044] Die Windungszahl an den axialen Enden der Spule ist reduziert, daher ist mindestens eine Wickellage nicht mit Supraleiter vollgewickelt. Folglich lässt sich ein **erster radial begrenzter rechteckiger Spulenbereich 1** definieren, welcher den Spulenquerschnitt radial teilweise und entlang der **Symmetrieachse z** vollständig überdeckt und keine vollgewickelte Wickellage enthält. Der erste Spulenbereich 1 enthält zudem zwei Unterbereiche, welche die Reduktion der Windungszahl an einem axialen Ende des ersten Spulenbereichs charakterisieren: Ein **zweiter Spulenbereich 2**, der vom Spulenrand her den ersten Spulenbereich 1 entlang der Symmetrieachse auf 10% seiner Länge überdeckt, und ein **dritter Spulenbereich 3**, der an den zweiten Spulenbereich 2 anschließt und den ersten Spulenbereich 1 entlang der Symmetrieachse auf 40% seiner Länge überdeckt. Der zweite und dritte Bereich 2, 3 sind dadurch ausgezeichnet, dass die Anzahl Windungen im zweiten Spulenbereich 2 mindestens viereinhalbmal kleiner ist als jene im dritten Spulenbereich 3.

[0045] Die Reduktion der Windungszahl an den axialen Spulenenden führt in der erfindungsgemäßen Magnetspulenordnung zu einer Reduktion der maximalen Radialfeldkomponente und infolgedessen zu einer Erhöhung der Stromtragfähigkeit, welche durch den Vergleich mit einer modifizierten Anordnung charakterisiert sind. Dazu werden ein **vierter Spulenbereich 4** und ein **fünfter Spulenbereich 5** definiert, welche den Spulenquerschnitt radial komplett und axial von je einem der beiden Spulenränder her 10% entlang der Symmetrieachse z überdecken. In der Vergleichsanordnung sind der vierte und der fünfte Spulenbereich 4, 5 entlang der Symmetrieachsenrichtung zur Spulenmitte hin verkürzt, sodass bei gleichbleibender Supraleitermenge keine weiteren Windungen mehr Platz finden würden. Die erfindungsgemäße Anordnung zeichnet sich nun dadurch aus, dass ihre maximale Radialfeldkomponente mindestens um 5% kleiner und ihre Stromtragfähigkeit um mindestens 3% größer ist als in der Vergleichsanordnung.

[0046] Im folgenden Ausführungsbeispiel wird eine erfindungsgemäße Spulenordnung beschrieben und mit einer herkömmlichen Spule mit folgenden Eigenschaften verglichen:

Geometrie des anisotropen Supraleiters: 2 mm x 0.2 mm (Querschnitt)
 Radius des radial inneren Spulenrandes: 20 mm
 Radius des radial äußeren Spulenrandes: 36 mm
 Spulenlänge in axialer Richtung: 192 mm (96 Windungen pro Wickellage)
 Anzahl Wickellagen: 80; alle Lagen sind vollgewickelt.

[0047] Die erfindungsgemäße Spulenordnung ist aus demselben Supraleiter gewickelt und durch folgende Eigenschaften charakterisiert:

Radius des radial inneren / äußeren Spulenrandes: 20 mm / 32.8 mm Spulenlänge 240 mm
 64 Lagen alternierend vollgewickelt (120 Windungen) - nicht vollgewickelt (z.B. gemäß schematischer Darstellung Fig. 2a), wobei jede nicht vollgewickelte Lage beginnend vom einen Spulenrand entlang der Symmetrieachse wie

folgt aufgebaut ist:

48 mm ohne Windungen, 144 mm mit 72 Windungen, 48 mm ohne Windungen.

[0048] Zur Überprüfung der Eigenschaften der erfindungsgemäßen Spulenordnung kann als erster Spulenbereich 1 eine beliebige nicht vollgewickelte Lage (z.B. die radial innerste) definiert werden. Der darin enthaltene dritte Spulenbereich 3 beinhaltet dann 84 und somit 7mal (also mehr als viereinhalbmals) so viele Windungen wie der zweite Spulenbereich 2 mit 12 Windungen. Weiter erhält man nach Verkürzung des vierten bzw. fünften Spulenbereichs 4,5 gemäß der Erfindungsbeschreibung die Vergleichsspule, welche in der folgenden Tabelle aufgeführt ist:

	herkömmlich	erfindungsgemäß	Vergleich
Magnetfeld	4.7 T	4.7 T	4.7 T
Betriebsstrom	97.4 A	122.0 A	121.9 A
Supraleiterlänge	1351 m	1019 m	1019 m
max. Radialfeld	1.8 T	1.0 T	1.7 T
Stromtragfähigkeit	100.5 A	125.2 A	107.9 A
Stromauslastung	97%	97%	113%

[0049] Das maximale Radialfeld der erfindungsgemäßen Spulenordnung ist um rund 40% kleiner als dasjenige der Vergleichsspule. Entsprechend ist die Stromtragfähigkeit um 16% erhöht.

[0050] Im Vergleich zur herkömmlichen Spule kann die im Beispiel berechnete erfindungsgemäße Spule dank der erhöhten Stromtragfähigkeit bei einem höheren Strom betrieben werden. Für die Erzeugung desselben Feldes im Arbeitsvolumen (4.7 T) und bei gleicher Stromauslastung (Verhältnis Betriebsstrom zu Stromtragfähigkeit) reduziert sich die zum Wickeln benötigte Supraleitermenge um 25%.

[0051] Die Figuren 2a bis 2d zeigen Ausführungsformen, bei welchen alle Windungen im ersten Spulenbereich aus einem einzigen ununterbrochenen Supraleiterstück gewickelt sind. Die kontinuierlichen Linien im Wickelpaket der Figuren 2a und 2c stellen schematisch den Supraleiter dar, und die gestrichelten Linien nicht-supraleitendes Füllmaterial. In den Figuren 2b und 2d sind die den Figuren 2a und 2c entsprechenden **Spulenbereiche 1'; 1'' 2'; 2'' 3'; 3''** sowie 4 und 5, respektive, dargestellt.

[0052] Der Spulenbereich 1' (Fig. 2b) beinhaltet beispielsweise die radial drittinnerste, nicht vollgewickelte Lage.

[0053] Der Spulenbereich 1'' (Fig. 2d) beinhaltet erfindungsgemäß die drei radial innersten, nicht vollgewickelten Lagen.

[0054] Die Figuren 3a und 3b zeigen eine Ausführungsform, bei welcher die Reduktion der Windungszahl an den axialen Spulenenden dadurch erreicht wird, dass an den Spulenrändern über mehrere direkt übereinanderliegende Lagen keine Windungen gewickelt werden. Die kontinuierlichen Linien im Wickelpaket der Figur 3a stellen schematisch die Lagenbereiche dar, welche mit Supraleiter gewickelt sind. In der Figur 3b sind die in der Figur 3a entsprechenden **Spulenbereiche 1''' 2''' 3'''** sowie 4 und 5 dargestellt.

[0055] Es ist zu beachten, dass die axialen Grenzen der Spulenbereiche 2 bis 5 nicht unbedingt den Grenzen zwischen vollgewickelten und nicht vollgewickelten Bereichen in der Spule entsprechen müssen.

[0056] Die Figuren 4a und 4b zeigen in einer Gegenüberstellung die randseitigen Radial-Felder bei einer herkömmlichen und bei einer erfindungsgemäß modifizierten Magnetspulenordnung. Dargestellt sind jeweils zylindersymmetrische Magnetspulen (Schnitt durch eine die Symmetrieachse z enthaltende Ebene) sowie die Isofeldlinien der Radialkomponente des Magnetfeldes. Die äußerste Linie entspricht 0.25 T, und mit jeder Linie Richtung Maximum nimmt das Feld um 0.25 T zu.

[0057] Bei der erfindungsgemäß modifizierten Anordnung in Fig. 4b ist die Windungszahl an den axialen Enden reduziert. Bei der in Fig. 4a gezeigten herkömmlichen Anordnung nach dem Stand der Technik ist eine Referenzspule mit homogener Windungszahl dargestellt, die den gleichen Innen- und Außenradius wie die erfindungsgemäße Anordnung aufweist, wobei die Spulenlänge entlang der Symmetrieachse so gewählt ist, dass dieselbe Leitermenge wie bei der erfindungsgemäßen Spule gewickelt ist. In der herkömmlichen Magnetspulenordnung erreicht das maximale Radialfeld eine Stärke von ungefähr 1.75 T, während dieses bei der erfindungsgemäßen Anordnung bei gleicher Magnetfeldstärke im Zentrum des Arbeitsvolumens nur ca. 1.0 T beträgt.

[0058] Bei gleicher Stromauslastung, aber höherem Strom, erzeugt die erfindungsgemäße Spule in ihrem Zentrum ein größeres Magnetfeld als die herkömmliche Referenzspule, da ihre Stromtragfähigkeit größer ist als diejenige der Referenzspule.

[0059] In den Figuren 5a und 5b schließlich sind die Feldlinien des jeweils erzeugten Magnetfeldes bei einer zylindersymmetrischen erfindungsgemäßen Magnetspulenordnung (Fig. 5a) beziehungsweise bei einer Anordnung nach dem Stand der Technik (Fig. 5b) in einem schematischen Schnitt durch eine die Symmetrieachse z enthaltende Ebene

dargestellt.

[0060] Bei der in Fig. 5a dargestellten erfindungsgemäßen Anordnung, ist die Windungszahl des Supraleiters an den axialen Randbereichen gegenüber dem zentralen Bereich reduziert. Die Feldlinien stellen den magnetischen Fluss dar, wobei deren Dichte der magnetischen Feldstärke entspricht. Aufgrund der stufenweise reduzierten Windungszahl verteilt sich der um die Spulenden fließende magnetische Fluss über in axialer Richtung längere Randbereiche und ist deutlich verdünnt. Die magnetische Feldstärke weist folglich eine relativ kleine Komponente in radialer Richtung auf (Pfeile).

[0061] Fig. 5b zeigt eine zylindersymmetrische Spule mit homogener (voller) Stromdichte nach dem Stand der Technik mit einer konstanten Windungszahl entlang der Symmetrieachse. Im Vergleich zur erfindungsgemäßen Anordnung gemäß Fig. 5a sind die axialen Enden zur Spulenmitte hin verkürzt, so dass die Gesamtwindungszahl der Spule gleich groß ist. Außerdem erzeugt die bekannte Spule im Zentrum dieselbe Feldstärke wie die erfindungsgemäße Spule. Wegen der abrupt abfallenden Windungszahl konzentriert sich der magnetische Fluss jedoch an den axialen Spulenden. Diese

[0062] Flusskonzentration führt zu einer größeren radialen Magnetfeldkomponente mit einem Maximum an diesen Stellen (Pfeile).

[0063] Fig. 5a zeigt im Vergleich dazu eine erfindungsgemäße Spule, bei welcher die Stromdichte an den axialen Enden reduziert wurde. Die Magnetfeldstärke, die der Dichte der Feldlinien entspricht, ist an den Enden der erfindungsgemäßen Spule deutlich reduziert.

[0064] Ein wesentlicher Vorteil der erfindungsgemäßen Anordnung besteht unter anderem in der gleichmäßigeren Verteilung der Stromtragfähigkeit des Supraleiters in der gesamten Spule. Dadurch wird der Supraleiter besser ausgenutzt und die Spule kann bei einem höheren Strom betrieben werden. Die benötigte Supraleitermenge und damit die Materialkosten sind geringer bzw. mit derselben Supraleitermenge kann ein höheres Magnetfeld im Spulenzentrum erzeugt werden.

[0065] Besonders vorteilhaft gegenüber dem Stand der Technik ist die Verwendung eines einheitlichen Supraleitermaterials in der gesamten Spule.

Bezugszeichenliste:

[0066]

- | | |
|-----------------|--|
| 1; 1'; 1"; 1''' | erster radial begrenzter rechteckiger Spulenbereich |
| 2; 2'; 2"; 2''' | zweiter radial begrenzter rechteckiger Spulenbereich |
| 3; 3'; 3"; 3''' | dritter radial begrenzter rechteckiger Spulenbereich |
| 4 | vierter rechteckiger Spulenbereich |
| 5 | fünfter rechteckiger Spulenbereich |
| z | Symmetrieachse der Magnetspulenordnung |

Referenzliste:

[0067] Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften

[0] CHEN, X.Y., JIN, J.X.: Evaluation of Step-Shaped Solenoidal Coils for Current-Enhanced SMES Applications. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 24, 2014, No. 5, S. 1-4. IEEE Xplore [online]. D01: 10.1109/TASC.2014.2356572

[1] US-A 5,525,583

[2] US 2015/0213930 A1

[3] US-A 5,659,277

[4] US-A 5,581,220.

[5] DE 102004043987 B3

[6] DE 39 23 456 C2

[7] DE 10 2004 043 988 B3

[8] "Factors determining the magnetic field generated by a solenoid made with a superconductor having current anisotropy", M. Däumling and R. Flükiger, (1995) Cryogenics, Vol. 35. pp. 867-870

[9] "Effects of conductor anisotropy on the design of BiSCCO sections of 25 T solenoids", H.W. Weijers et al. (2003), Supercond. Sci. Technol. Vol. 16, pp. 672-681

[10] "Radial magnetic field reduction to improve critical current of HTS solenoid", J. Kang et al, Physica. C., 2002, vol. 372-76 (3), pp. 1368-1372.

[11] JP H06- 5 414 A

[12] JP S61 65411 A

[13] US 5914647 A

Patentansprüche

1. Supraleitfähige, gestufte Magnetspulenordnung mit einer hohlen Spule mit konstantem Innenradius zur Erzeugung eines Betriebsmagnetfeldes in einem Arbeitsvolumen um eine Symmetrieachse (z), wobei die Spule Wicklungen aus einem anisotropen Supraleiter umfasst, dessen supraleitende Stromtragfähigkeit in einem Magnetfeld senkrecht zur Stromrichtung im Leiter sowohl von der Feldamplitude als auch von der Feldrichtung innerhalb einer Ebene senkrecht zur Stromrichtung abhängt, wobei die radial aufsummierte Anzahl der Windungen entlang der Symmetrieachse (z) zum Rand hin in diskreten Stufen oder quasi-kontinuierlich reduziert ist,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Spule bezogen auf die Symmetrieachse (z) zylindersymmetrisch in mehreren Lagen gewickelt ist, wobei ein sich nur von einem axialen Spulenende erstreckender zusammenhängender Teil einer innenliegenden Wickellage mit nicht-supraleitendem Material gewickelt ist.
2. Spulenordnung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie einen ersten radial begrenzten rechteckigen Spulenbereich (1; 1' 1"; 1''') enthält, welcher den Spulenquerschnitt entlang der Symmetrieachsenrichtung vollständig überdeckt und keine in axialer Richtung vollgewickelte Lage enthält, und die Wicklungen im ersten radial begrenzten rechteckigen Spulenbereich (1; 1'; 1"; 1''') aus einem einzigen ununterbrochenen Supraleiterstück gewickelt sind.
3. Spulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie einen zweiten radial begrenzten rechteckigen Spulenbereich (2; 2'; 2"; 2''') innerhalb des ersten Spulenbereichs (1; 1' 1"; 1''') enthält, welcher den ersten Spulenbereich (1; 1'; 1"; 1''') radial vollständig und entlang der Symmetrieachsenrichtung zu 10% überdeckt und den axial ersten oder zweiten Spulenrand einschließt, und der zweite Spulenbereich (2; 2'; 2"; 2''') mit mindestens 20% weniger Leiterwindungen gewickelt ist als ein axial anschließender Spulenbereich gleicher Geometrie.
4. Spulenordnung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** der zweite Spulenbereich (2; 2'; 2"; 2''') mit 40% bis 60% weniger Leiterwindungen gewickelt ist als ein axial anschließender Spulenbereich gleicher Geometrie.
5. Spulenordnung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** der zweite Spulenbereich (2; 2'; 2"; 2''') mit etwa 50% weniger Leiterwindungen gewickelt ist als ein axial anschließender Spulenbereich gleicher Geometrie.
6. Spulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie einen vierten und fünften rechteckigen Spulenbereich (4 bzw. 5) enthält, innerhalb des Spulenquerschnitts, welche den Spulenquerschnitt radial vollständig und entlang der Symmetrieachsenrichtung je zu 10 % überdecken und den axial ersten bzw. zweiten Spulenrand einschließen mit einer ersten und zweiten Spulenrandwindungszahl, gegeben durch die Anzahl Windungen des anisotropen Supraleiters im vierten bzw. im fünften Spulenbereich (4 bzw. 5) und mit einer maximalen Spulenrandwindungszahl, gegeben durch den Quotienten aus der Querschnittfläche des vierten oder

fünften Spulenbereichs (4 bzw. 5) und der Querschnittfläche des anisotropen Supraleiters, und das von der Spule erzeugte Magnetfeld eine Feldkomponente B_r senkrecht zur Stromrichtung und zur Symmetrieachse (z) aufweist, deren Maximum im Spulenvolumen mindestens um 10% kleiner ist, als wenn -bei gleichem Betriebsfeld der Spule im Zentrum des Arbeitsvolumens- die Ausdehnungen des vierten und fünften Spulenbereichs (4 bzw. 5) entlang der Symmetrieachsenrichtung zur Spulenmitte hin verkürzt wären, wobei die relative Verkürzung der Ausdehnungen dem Verhältnis von erster und zweiter Spulenrandwindungszahl zur maximalen Spulenrandwindungszahl entspricht bei gleich bleibender Anzahl Windungen des anisotropen Supraleiters in der Spule.

7. Spulenanordnung nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** das von der Spule erzeugte Magnetfeld eine Feldkomponente B_r senkrecht zur Stromrichtung und zur Symmetrieachse (z) aufweist, deren Maximum im Spulenvolumen um bis zu 50%, kleiner ist, als wenn -bei gleichem Betriebsfeld der Spule im Zentrum des Arbeitsvolumens- die Ausdehnungen des vierten und fünften Spulenbereichs (4 bzw. 5) entlang der Symmetrieachsenrichtung zur Spulenmitte hin verkürzt wären, wobei die relative Verkürzung der Ausdehnungen dem Verhältnis von erster und zweiter Spulenrandwindungszahl zur maximalen Spulenrandwindungszahl entspricht bei gleich bleibender Anzahl Windungen des anisotropen Supraleiters in der Spule.

8. Spulenanordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Minimum der supraleitenden Stromtragfähigkeit des anisotropen Supraleiters entlang der Leitertrajektorie in der Spule mindestens 5% höher ist, als wenn -bei gleichem Betriebsfeld der Spule im Zentrum des Arbeitsvolumens- die Ausdehnungen des vierten und fünften Spulenbereichs (4 bzw. 5) entlang der Symmetrieachsenrichtung zur Spulenmitte hin verkürzt wären, wobei die relative Verkürzung der Ausdehnungen dem Verhältnis von erster und zweiter Spulenrandwindungszahl zur maximalen Spulenrandwindungszahl entspricht bei gleich bleibender Anzahl Windungen des anisotropen Supraleiters in der Spule.

9. Spulenanordnung nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Minimum der supraleitenden Stromtragfähigkeit des anisotropen Supraleiters entlang der Leitertrajektorie in der Spule bis 30% höher ist, als wenn -bei gleichem Betriebsfeld der Spule im Zentrum des Arbeitsvolumens- die Ausdehnungen des vierten und fünften Spulenbereichs (4 bzw. 5) entlang der Symmetrieachsenrichtung zur Spulenmitte hin verkürzt wären, wobei die relative Verkürzung der Ausdehnungen dem Verhältnis von erster und zweiter Spulenrandwindungszahl zur maximalen Spulenrandwindungszahl entspricht bei gleich bleibender Anzahl Windungen des anisotropen Supraleiters in der Spule.

10. Spulenanordnung nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Minimum der supraleitenden Stromtragfähigkeit des anisotropen Supraleiters entlang der Leitertrajektorie in der Spule bis zu 50% höher ist, als wenn -bei gleichem Betriebsfeld der Spule im Zentrum des Arbeitsvolumens- die Ausdehnungen des vierten und fünften Spulenbereichs (4 bzw. 5) entlang der Symmetrieachsenrichtung zur Spulenmitte hin verkürzt wären, wobei die relative Verkürzung der Ausdehnungen dem Verhältnis von erster und zweiter Spulenrandwindungszahl zur maximalen Spulenrandwindungszahl entspricht bei gleich bleibender Anzahl Windungen des anisotropen Supraleiters in der Spule.

11. Verfahren zur Auslegung einer supraleitfähigen Magnetspulenanordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** ausgehend von einer supraleitfähigen Magnetspulenanordnung mit einer aus anisotropem Supraleiter bezogen auf die Symmetrieachse (z) zylindersymmetrisch lagengewickelten Spule, bei welcher im ersten Spulenbereich (1; 1'; 1''; 1''') entlang der Symmetrieachse (z) zum Rand hin zusammen mit dem Supraleitermaterial auch nicht-supraleitendes Material mitgewickelt wird, wobei die Stromtragfähigkeit der Spule an den axialen Enden durch die radiale Magnetfeldkomponente begrenzt wird, durch Verringerung der Windungszahl in den axialen Endbereichen der Spule (= "Optimierungsbereiche") die maximale radiale Magnetfeldkomponente reduziert wird, wobei durch Variation der Parameter

- Größe der Optimierungsbereiche, in welchen die Windungszahl verringert wird
- Anzahl Windungen in den Optimierungsbereichen
- Verteilung der Windungen innerhalb der Optimierungsbereiche die supraleitende Stromtragfähigkeit der Spule erhöht wird.

Claims

1. Superconductive stepped magnet coil assembly comprising a hollow coil having a constant internal radius for gen-

erating an operating magnetic field in a working volume about an axis of symmetry (z), the coil comprising windings of an anisotropic superconductor whose superconducting current carrying capacity in a magnetic field perpendicular to the current direction in the conductor depends on both the field amplitude and the field direction within a plane perpendicular to the current direction, wherein the radially summed number of windings along the axis of symmetry (z) towards the edge is reduced in discrete steps or quasi continuously,

characterized in that

the coil is wound cylindrically symmetrically with respect to the axis of symmetry (z) in several layers, wherein a continuous part of an inner winding layer, which extends only from one axial coil end, is wound with non-superconducting material.

2. Coil arrangement according to claim 1, **characterized in that** it contains a first radially limited rectangular coil region (1; 1'; 1"; 1''') which completely covers the coil cross-section along the symmetry axis direction and does not contain a layer which is fully wound in the axial direction, and the windings in the first radially limited rectangular coil region (1; 1'; 1"; 1''') are wound from one single uninterrupted superconductor piece.

3. Coil arrangement according to one of the preceding claims, **characterized in that** it comprises a second radially limited rectangular coil region (2; 2'; 2"; 2''') within the first coil region (1; 1'; 1"; 1'''), which covers the first coil region (1; 1'; 1"; 1''') radially completely and along the axis of symmetry to 10% and includes the axially first or second coil edge, and the second coil region (2; 2'; 2"; 2''') is wound with at least 20% fewer conductor windings than an axially adjoining coil region of the same geometry.

4. Coil arrangement according to claim 3, **characterized in that** the second coil region (2; 2'; 2"; 2''') is wound with 40% to 60% fewer conductor windings than an axially adjoining coil region of the same geometry.

5. Coil arrangement according to claim 4, **characterized in that** the second coil region (2; 2'; 2"; 2''') is wound with about 50% fewer conductor windings than an axially adjoining coil region of the same geometry.

6. Coil arrangement according to one of the preceding claims, **characterized in that** it comprises a fourth and a fifth rectangular coil region (4 and 5, respectively) within the coil cross-section, which cover the coil cross-section radially completely and along the symmetry axis direction to 10% each and enclose the axially first and second coil edge, respectively, with a first and second coil edge winding number given by the number of windings of the anisotropic superconductor in the fourth and in the fifth coil region (4 and 5, respectively) and with a maximum coil edge winding number given by the quotient of the cross-sectional area of the fourth or fifth coil region (4 and 5, respectively) and the cross-sectional area of the anisotropic superconductor, and

the magnetic field generated by the coil has a field component B_r perpendicular to the direction of current and to the axis of symmetry (z),

the maximum of which in the coil volume is at least 10% smaller than if - with the same operating field of the coil in the centre of the working volume - the expansions of the fourth and fifth coil regions (4 and 5, respectively) along the direction of the axis of symmetry towards the coil centre were shortened, wherein the relative shortening of the expansions corresponds to the ratio of the first and second coil edge winding number to the maximum coil edge winding number with a constant number of windings of the anisotropic superconductor in the coil.

7. Coil arrangement according to claim 6, **characterised in that** the magnetic field generated by the coil has a field component B_r perpendicular to the direction of current and to the axis of symmetry (z), the maximum of which in the coil volume is smaller by up to 50% than if - with the same operating field of the coil in the centre of the working volume - the expansions of the fourth and fifth coil regions (4 and 5, respectively) would be shortened along the symmetry axis direction towards the centre of the coil, wherein the relative shortening of the expansions corresponds to the ratio of the first and second coil edge winding number to the maximum coil edge winding number with the same number of windings of the anisotropic superconductor in the coil.

8. Coil arrangement according to any one of the preceding claims, **characterized in that** the minimum of the superconducting current carrying capacity of the anisotropic superconductor along the conductor trajectory in the coil is at least 5% higher than if - with the same operating field of the coil in the centre of the working volume - the expansions of the fourth and fifth coil region (4 and 5, respectively) along the direction of the axis of symmetry towards the centre of the coil would be shortened, wherein the relative shortening of the expansions corresponds to the ratio of the first and second coil edge winding number to the maximum coil edge winding number with a constant number of windings

of the anisotropic superconductor in the coil.

9. Coil arrangement according to claim 8, **characterized in that** the minimum of the superconducting current carrying capacity of the anisotropic superconductor along the conductor trajectory in the coil is up to 30% higher than if - with the same operating field of the coil in the centre of the working volume - the expansions of the fourth and fifth coil regions (4 and 5, respectively) along the direction of the axis of symmetry towards the centre of the coil would be shortened, wherein the relative shortening of the expansions corresponds to the ratio of the first and second coil edge winding number to the maximum coil edge winding number with the same number of windings of the anisotropic superconductor in the coil.
10. Coil arrangement according to claim 9, **characterized in that** the minimum of the superconducting current carrying capacity of the anisotropic superconductor along the conductor trajectory in the coil is up to 50% higher than if - with the same operating field of the coil in the centre of the working volume - the expansions of the fourth and fifth coil regions (4 and 5, respectively) along the direction of the axis of symmetry were shortened towards the centre of the coil, wherein the relative shortening of the expansions corresponds to the ratio of the first and second coil edge winding number to the maximum coil edge winding number with a constant number of windings of the anisotropic superconductor in the coil.
11. Method of designing a superconductive magnet coil arrangement according to one of the preceding claims, **characterized in that**, starting from a superconductive magnet coil arrangement having a coil which is layer-wound from an anisotropic superconductor in a cylindrically symmetrical manner with respect to the axis of symmetry (z), in which coil in the first coil region (1; 1'; 1''; 1''') along the axis of symmetry (z) towards the edge, non-superconducting material is also co-wound together with the superconductor material, the current-carrying capacity of the coil at the axial ends being limited by the radial magnetic field component, the maximum radial magnetic field component being reduced by reducing the number of windings in the axial end regions of the coil ("optimization regions"), wherein through variation of the following parameters
 - size of the optimization regions in which the winding number is reduced
 - number of windings in the optimization regions
 - distribution of the windings within the optimization regions the superconducting current carrying capacity of the coil is increased.

Revendications

1. Agencement de bobine magnétique étagée supraconductrice comportant une bobine creuse de rayon intérieur constant conçue pour générer un champ magnétique de fonctionnement dans un volume de travail autour d'un axe de symétrie (z), la bobine comprenant des enroulements constitués d'un supraconducteur anisotrope dont la capacité de transport de courant supraconducteur dans un champ magnétique perpendiculaire à la direction du courant dans le conducteur dépend à la fois de l'amplitude du champ et de la direction du champ dans un plan perpendiculaire à la direction du courant, dans lequel le nombre additionné radialement des spires le long de l'axe de symétrie (z) est réduit vers le bord par pas discrets ou de façon quasi-continue, **caractérisé en ce que** la bobine est enroulée en plusieurs couches de manière cylindriquement symétrique par rapport à l'axe de symétrie (z), dans lequel une partie continue d'une couche d'enroulement intérieure s'étendant seulement à partir d'une extrémité de bobine axiale est enroulée avec un matériau non supraconducteur.
2. Agencement de bobine selon la revendication 1, **caractérisé en ce qu'il** comprend une première zone de bobine rectangulaire délimitée radialement (1 ; 1' ; 1'' ; 1''') qui recouvre complètement la section transversale de bobine dans la direction de l'axe de symétrie et ne comprend pas de couche complètement enroulée dans la direction axiale, et les enroulements dans la première zone de bobine rectangulaire délimitée radialement (1 ; 1' ; 1'' ; 1''') sont enroulés à partir d'une seule pièce supraconductrice ininterrompue.
3. Agencement de bobine selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'il** comprend une deuxième zone de bobine rectangulaire délimitée radialement (2 ; 2' ; 2'' ; 2''') à l'intérieur de la première zone de bobine (1 ; 1' ; 1'' ; 1'''), laquelle recouvre la première zone de bobine (1 ; 1' ; 1'' ; 1''') complètement radialement et à 10 % dans la direction de l'axe de symétrie et entoure le premier ou le deuxième bord de bobine dans la direction axiale, et la deuxième zone de bobine (2 ; 2' ; 2'' ; 2''') est enroulée avec au moins 20 % de spires de conducteur en moins

qu'une zone de bobine axialement adjacente de même géométrie.

4. Agencement de bobine selon la revendication 3, **caractérisé en ce que** la deuxième zone de bobine (2 ; 2' ; 2'' ; 2''') est enroulée avec 40 % à 60 % de spires de conducteur en moins qu'une zone de bobine axialement adjacente de même géométrie.
5. Agencement de bobines selon la revendication 4, **caractérisé en ce que** la deuxième zone de bobine (2 ; 2' ; 2'' ; 2''') est enroulée avec environ 50 % de spires de conducteur en moins qu'une zone de bobine axialement adjacente de même géométrie.
6. Agencement de bobine selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'il** comprend, à l'intérieur de la section transversale de bobine, une quatrième et une cinquième zone rectangulaire de bobine (respectivement 4, 5), qui recouvrent la section transversale de bobine complètement radialement et à 10 % chacune dans la direction de l'axe de symétrie et qui entourent le premier et le deuxième bord de bobine dans la direction axiale avec un premier et un deuxième nombre de spires de bord de bobine, donnés par le nombre de spires du supraconducteur anisotrope dans la quatrième et la cinquième zone de bobine (respectivement 4, 5), et avec un nombre maximal de spires de bord de bobine, donné par le quotient de la surface de section transversale de la quatrième ou de la cinquième zone de bobine (respectivement 4, 5) et de la surface de section transversale du supraconducteur anisotrope, et le champ magnétique généré par la bobine présente une composante de champ Br perpendiculaire à la direction du courant et à l'axe de symétrie (z), dont le maximum dans le volume de bobine est inférieur d'au moins 10 % à ce qu'il serait si - pour un même champ de fonctionnement de la bobine au centre du volume de travail - les étendues des quatrième et cinquième zones de bobine (respectivement 4, 5) étaient raccourcies dans la direction de l'axe de symétrie vers le centre de bobine, le raccourcissement relatif des étendues correspondant au rapport entre le premier et le deuxième nombre de spires de bord de bobine et le nombre maximal de spires de bord de bobine, le nombre de spires du supraconducteur anisotrope dans la bobine restant constant.
7. Agencement de bobine selon la revendication 6, **caractérisé en ce que** le champ magnétique généré par la bobine présente une composante de champ Br perpendiculaire à la direction du courant et à l'axe de symétrie (z), dont le maximum dans le volume de bobine est inférieur de jusqu'à 50 % à ce qu'il serait si - pour un même champ de fonctionnement de la bobine au centre du volume de travail - les étendues des quatrième et cinquième zones de bobine (respectivement 4, 5) étaient raccourcies dans la direction de l'axe de symétrie vers le centre de bobine, le raccourcissement relatif des étendues correspondant au rapport entre le premier et le deuxième nombre de spires de bord de bobine et le nombre maximal de spires de bord de bobine, le nombre de spires du supraconducteur anisotrope dans la bobine restant constant.
8. Agencement de bobine selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le minimum de la capacité de transport de courant supraconducteur du supraconducteur anisotrope le long de la trajectoire du conducteur dans la bobine est plus élevé d'au moins 5 % que si - pour un même champ de fonctionnement de la bobine au centre du volume de travail - les étendues des quatrième et cinquième zones de bobine (respectivement 4, 5) étaient raccourcies dans la direction de l'axe de symétrie vers le centre de bobine, le raccourcissement relatif des étendues correspondant au rapport entre le premier et le deuxième nombre de spires de bord de bobine et le nombre maximal de spires de bord de bobine, le nombre de spires du supraconducteur anisotrope dans la bobine restant constant.
9. Agencement de bobine selon la revendication 8, **caractérisé en ce que** le minimum de la capacité de transport de courant supraconducteur du supraconducteur anisotrope le long de la trajectoire du conducteur dans la bobine est plus élevé de jusqu'à 30 % que si - pour un même champ de fonctionnement de la bobine au centre du volume de travail - les étendues des quatrième et cinquième zones de bobine (respectivement 4, 5) étaient raccourcies dans la direction de l'axe de symétrie vers le centre de bobine, le raccourcissement relatif des étendues correspondant au rapport entre le premier et le deuxième nombre de spires de bord de bobine et le nombre maximal de spires de bord de bobine, le nombre de spires du supraconducteur anisotrope dans la bobine restant constant.
10. Agencement de bobine selon la revendication 9, **caractérisé en ce que** le minimum de la capacité de transport de courant supraconducteur du supraconducteur anisotrope le long de la trajectoire du conducteur dans la bobine est plus élevé de jusqu'à 50 % que si - pour un même champ de fonctionnement de la bobine au centre du volume de travail - les étendues des quatrième et cinquième zones de bobine (respectivement 4, 5) étaient raccourcies dans la direction de l'axe de symétrie vers le centre de bobine, le raccourcissement relatif des étendues correspondant au rapport entre le premier et le deuxième nombre de spires de bord de bobine et le nombre maximal de spires de

bord de bobine, le nombre de spires du supraconducteur anisotrope dans la bobine restant constant.

11. Procédé de conception d'un agencement de bobine magnétique supraconductrice selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que**, en partant d'un agencement de bobine magnétique supraconductrice comportant une bobine enroulée en couches de manière cylindriquement symétrique par rapport à l'axe de symétrie (z) et constituée d'un supraconducteur anisotrope, dans laquelle, dans la première zone de bobine (1 ; 1' ; 1'' ; 1''') le long de l'axe de symétrie (z) vers le bord, un matériau non supraconducteur est également enroulé avec le matériau supraconducteur, la capacité de transport de courant de la bobine étant limitée aux extrémités axiales par la composante de champ magnétique radiale, en diminuant le nombre de spires dans les zones d'extrémité axiales de la bobine (= « zones d'optimisation »), on réduit la composante de champ magnétique radiale maximale, dans lequel, en faisant varier les paramètres suivants :

- taille des zones d'optimisation dans lesquelles on diminue le nombre de spires,
- nombre de spires dans les zones d'optimisation,
- répartition des spires à l'intérieur des zones d'optimisation,

on augmente la capacité de transport de courant supraconducteur de la bobine.

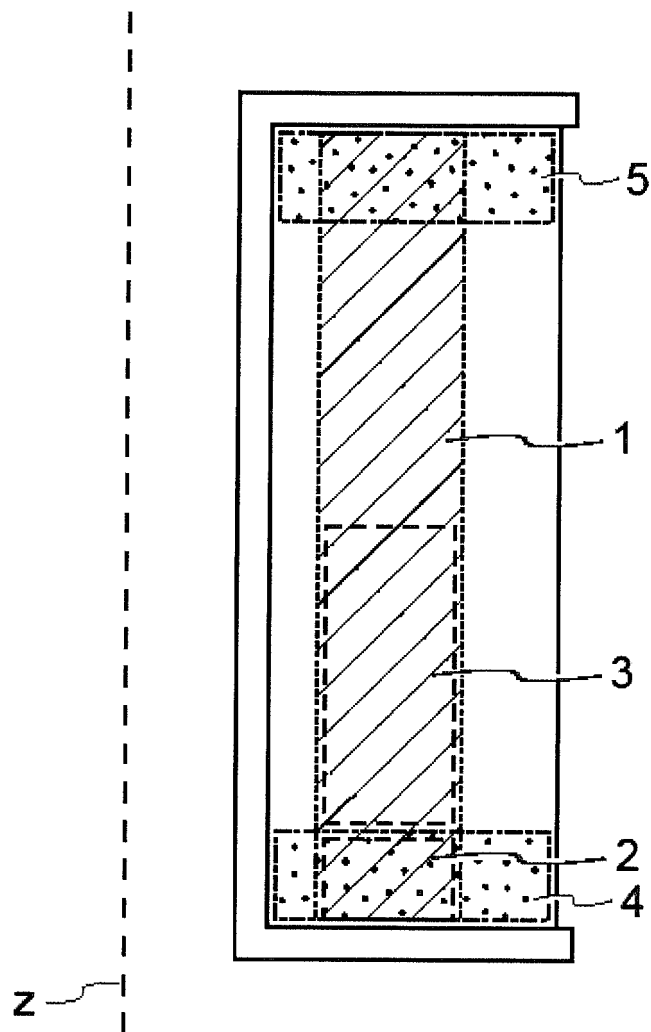


Fig. 1

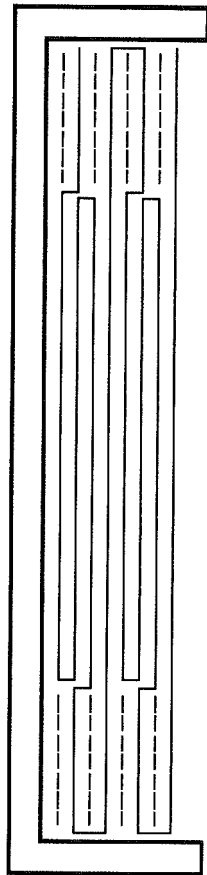


Fig. 2a

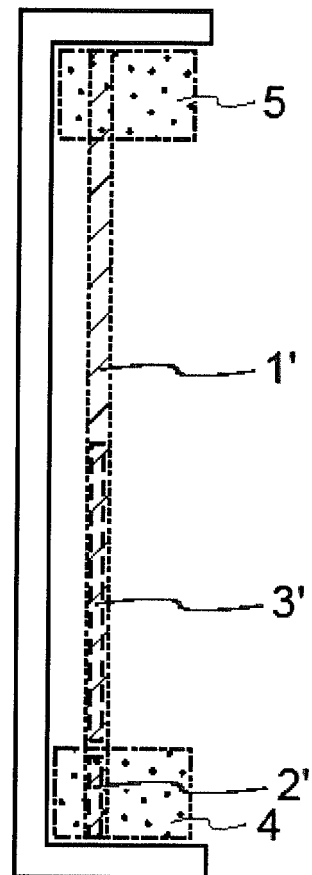


Fig. 2b

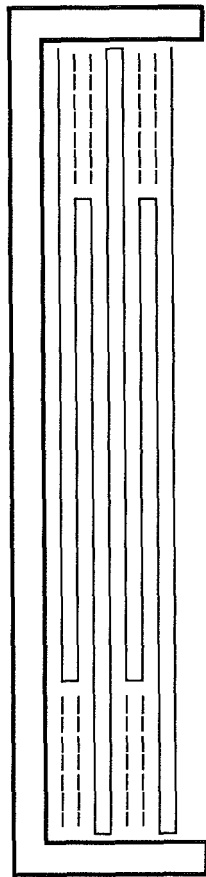


Fig. 2c

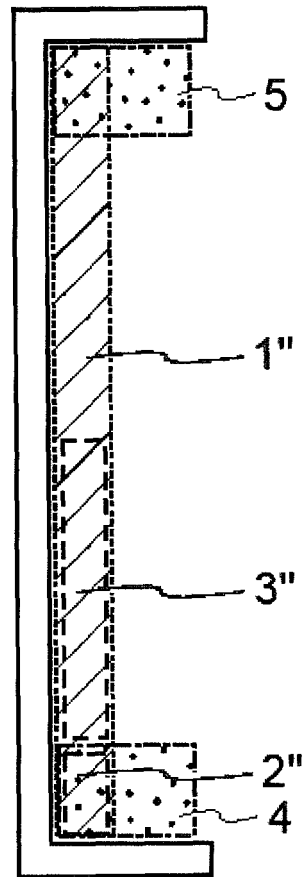


Fig. 2d

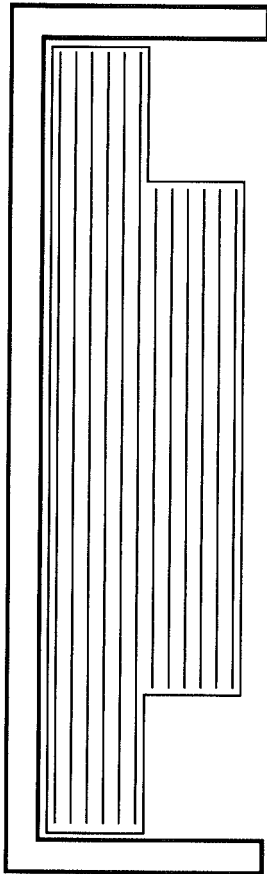


Fig. 3a

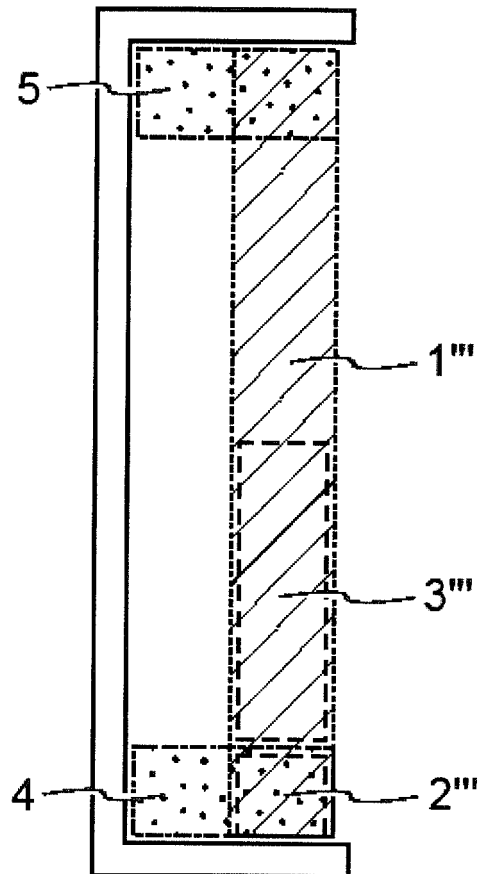


Fig. 3b

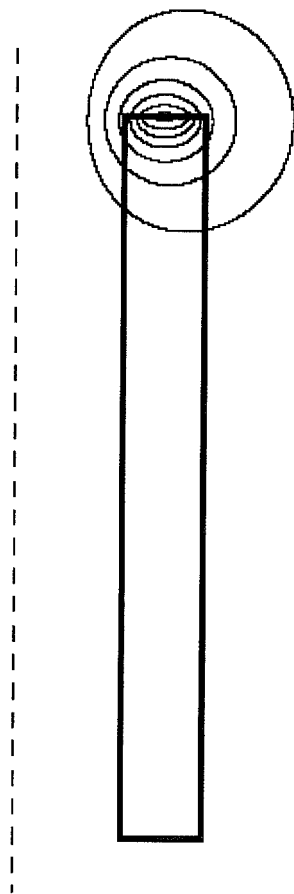


Fig. 4a

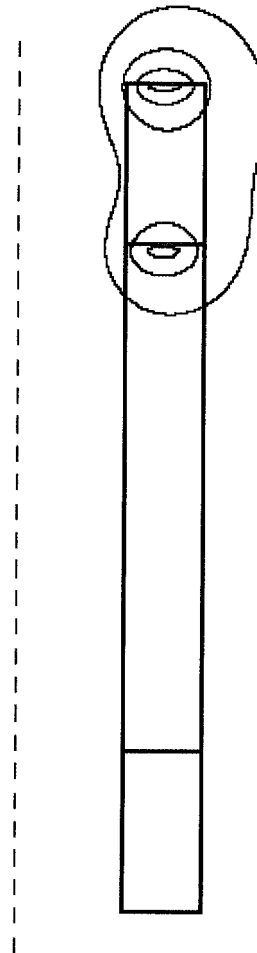


Fig. 4b

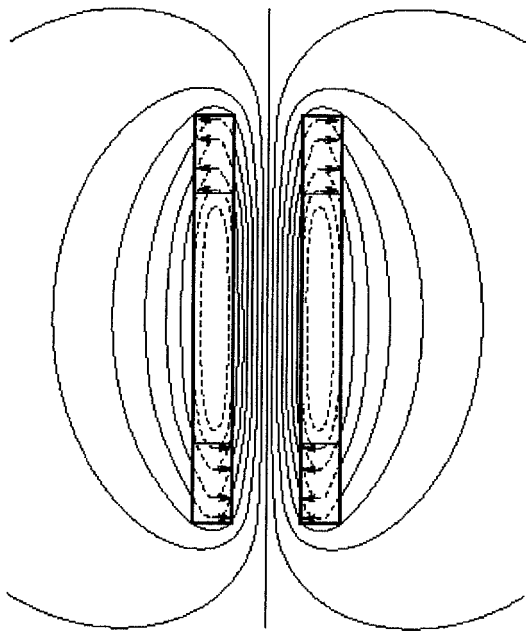


Fig. 5a

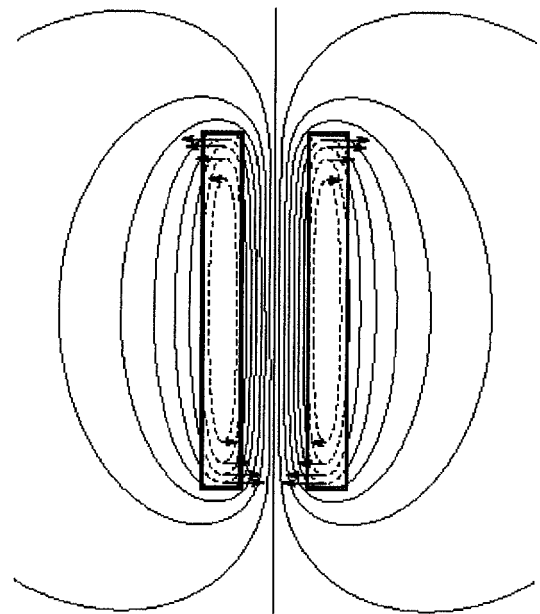


Fig. 5b

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- US 5525583 A [0067]
- US 20150213930 A1 [0067]
- US 5659277 A [0067]
- US 5581220 A [0067]
- DE 102004043987 B3 [0067]
- DE 3923456 C2 [0067]
- DE 102004043988 B3 [0067]
- JP H065414 A [0067]
- JP S6165411 A [0067]
- US 5914647 A [0067]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **CHEN, X.Y. ; JIN, J.X.** Evaluation of Step-Shaped Solenoidal Coils for Current-Enhanced SMES Applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2014, vol. 24 (5), 1-4 [0067]
- **M. DÄUMLING ; R. FLÜKIGER.** Factors determining the magnetic field generated by a solenoid made with a superconductor having current anisotropy. *Cryogenics*, 1995, vol. 35, 867-870 [0067]
- **H.W. WEIJERS et al.** Effects of conductor anisotropy on the design of BiSCCO sections of 25 T solenoids. *Supercond. Sci. Technol.*, 2003, vol. 16, 672-681 [0067]
- **J. KANG et al.** Radial magnetic field reduction to improve critical current of HTS solenoid. *Physica. C.*, 2002, vol. 372-76 (3), 1368-1372 [0067]