

(19)



(11)

EP 2 885 792 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des
Hinweises auf die Patenterteilung:
04.09.2019 Patentblatt 2019/36

(51) Int Cl.:
H01F 6/06 (2006.01) H01F 41/04 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **13779543.1**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2013/071152

(22) Anmeldetag: **10.10.2013**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2014/067759 (08.05.2014 Gazette 2014/19)

(54) **SUPRALEITENDE SPULENEINRICHTUNG MIT SPULENWICKLUNG**

SUPERCONDUCTING COIL DEVICE COMPRISING A COIL WINDING

DISPOSITIF FORMANT BOBINE SUPRACONDUCTRICE POURVU D'UN ENROULEMENT

(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: **31.10.2012 DE 102012219899**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
24.06.2015 Patentblatt 2015/26

(73) Patentinhaber: **Siemens Aktiengesellschaft
80333 München (DE)**

(72) Erfinder: **OOMEN, Marijn Pieter
91056 Erlangen (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:
DE-A1-102011 118 465 JP-A- 2010 267 835

EP 2 885 792 B1

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).

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Spuleneinrichtung mit einer Spulenwicklung aus einem supraleitenden Bandleiter.

[0002] Auf dem Gebiet der supraleitenden Maschinen und der supraleitenden Magnetspulen sind Spuleneinrichtungen bekannt, bei denen supraleitende Drähte oder Bandleiter in Spulenwicklungen gewickelt werden. Für klassische Niedertemperatursupraleiter wie NbTi und Nb₃Sn werden üblicherweise Leiter in Drahtform verwendet. Die Hochtemperatursupraleiter oder auch Hoch-T_c-Supraleiter (HTS) sind dagegen supraleitende Materialien mit einer Sprungtemperatur oberhalb von 25 K und bei einigen Materialklassen oberhalb von 77 K. Diese HTS-Leiter liegen typischerweise in Form von flachen Bandleitern vor, die ein bandförmiges Substratband und eine auf dem Substratband angeordnete Supraleitungsschicht aufweisen. Zusätzlich weisen die Bandleiter oft noch weitere Schichten wie Stabilisierungsschichten, Pufferschichten und in manchen Fällen auch Isolationschichten auf.

[0003] Die wichtigste Materialklasse der sogenannten HTS-Leiter zweiter Generation (2G-HTS) sind Verbindungen des Typs RE-Ba₂Cu₃O_x, wobei RE für ein Element der seltenen Erden oder eine Mischung solcher Elemente steht. Viele supraleitende Bandleiter mit solchen keramischen supraleitenden Schichten sind sehr empfindlich gegenüber mechanischen Belastungen und müssen daher sowohl während der Herstellung als auch während des Betriebes der supraleitenden Spulen vor mechanischen Belastungen wie Zug-, Druck- oder Scherspannungen geschützt werden.

[0004] Werden elektrische Spulen aus supraleitenden Bandleitern hergestellt, dann werden aufeinanderfolgende Wicklungen der Bandleiter typischerweise entweder bereits beim Wickeln durch ein Imprägnierharz miteinander verklebt, oder die fertig gewickelte Spule wird anschließend mit einem Vergussmittel vergossen. Typische Vergussmittel sind hier Epoxidharze, mit denen die Spule beispielsweise mit einem Vakuumvergussverfahren vergossen werden kann. Die Verklebung oder der Verguss der Spulenwindungen bewirkt, dass die fertige Spule vor mechanischen Belastungen beispielsweise aufgrund von Lorentzkraften in starken Magnetfeldern und / oder aufgrund von Fliehkräften bei schneller Rotation geschützt wird.

[0005] Ein Problem bei der Verwendung von supraleitenden Spulen liegt in der unterschiedlichen thermischen Kontraktion der verschiedenen Materialien in den Spulen bei der Abkühlung auf Betriebstemperatur. Bei der Abkühlung auf eine Betriebstemperatur von beispielsweise 30 K bis 70 K unterliegen vor allem die polymeren Bestandteile des Klebemittels und / oder der Vergussmasse sowie von eventuell vorhandenen Isolatormaterialien einer stärkeren thermischen Schrumpfung als die metallischen und keramischen Bestandteile des Bandleiters. Die unterschiedliche thermische Kontraktion führt bei

und nach der Abkühlung zur Ausbildung von Spannungen, die eine Schädigung der supraleitenden Schicht zur Folge haben können. Auch die Verwendung eines Wicklungsträgers mit einer größeren thermischen Kontraktion als der des Bandleiters kann die Ausbildung von radialen Zugspannungen senkrecht zur Ebene des Bandleiters und damit eine Kompression der supraleitenden Schicht bewirken. Vor allem die radialen Zugspannungen führen wesentlich leichter als eventuelle radiale Druckspannungen zu einer Schädigung der supraleitenden Eigenschaften bis hin zu einer Delamination der Supraleitungsschicht vom Substrat des Bandleiters. Ein radialer Zug bewirkt, dass innen liegende Lagen der Spulenwicklung in Richtung zum Spuleninneren gezogen werden, und dass dadurch der Bandleiter in Längsrichtung gestaucht wird. Die Schädigungen hierdurch können zu einer Abnahme des maximalen Betriebsstroms von bis zu 60 % führen, was die herkömmlichen Wickelverfahren für supraleitende Spulen mit den heutigen 2G-HTS-Materialien untauglich macht.

[0006] In der nicht vorveröffentlichten Anmeldung mit dem amtlichen Aktenzeichen 102011077457.2 (veröffentlicht als DE 10 2011 077 457 A1) wird eine Spulenwicklung beschrieben, bei der ein supraleitender Bandleiter so auf einen Wicklungsträger gewickelt wird, dass sowohl bei Raumtemperatur als auch bei einer Betriebstemperatur der Spule ein positiver radialer Druck zwischen den Lagen der Spulenwicklung besteht. Dies kann durch geeignete Wahl des Wicklungsträgers und des Wickelzugs erreicht werden sowie durch eine schwach ausgebildete Verbindung von Wicklung und Wicklungsträger. Doch auch mit entsprechend hergestellten Spulen, bei denen der Wicklungsträger nicht zur Ausbildung von Zugspannungen beiträgt, können alleine durch die Unterschiede in den thermischen Kontraktionen der verschiedenen Materialien in der Wicklung ungünstige Zugspannungen entstehen. Insbesondere bei großen Wicklungen mit mehr als beispielsweise 100 Windungen können durch diesen Effekt große Zugspannungen entstehen, die die supraleitenden Eigenschaften der Spule stark beeinträchtigen.

[0007] DE 10 2011 118 465 A1 betrifft eine supraleitende Spule. Nicht kreisförmige Spulenschichtabschnitte sind einander an Grenzabschnitten mit einer Haftkraft, die kleiner gesetzt ist als diejenige in anderen Abschnitten, benachbart. JP 2010 267 835 A1 offenbart eine zylindrische supraleitende Spule aus koaxialen supraleitenden Segmenten, die durch Bereiche mit reduzierter Haftung voneinander getrennt sind.

[0008] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine supraleitende Spuleneinrichtung anzugeben, die die genannten Nachteile vermeidet.

[0009] Diese Aufgabe wird durch die in Anspruch 1 beschriebene Spuleneinrichtung gelöst. Die erfindungsgemäße Spuleneinrichtung umfasst wenigstens einen supraleitenden Bandleiter, der ein bandförmiges Substratband und eine auf dem Substratband angeordnete Supraleitungsschicht aufweist. Die Spuleneinrichtung ist in

mehrere Segmente unterteilt, wobei innerhalb jedes Segmentes benachbarte Windungen miteinander vergossen oder verklebt sind und wobei im Zwischenbereich zwischen zwei benachbarten Segmenten mindestens in einem Teilbereich die benachbarten Windungen höchstens schwach miteinander verbunden oder verklebt sind.

[0010] Hierdurch wird bewirkt, dass die erfindungsgemäße Spuleneinrichtung bei Abkühlung auf ihre Betriebstemperatur eine wesentlich reduzierte radiale Zugspannung des Bandleiters aufweist. Für geeignete Geometrien und Materialien bewirkt die Unterteilung in Segmenten, dass die erfindungsgemäße Spulenwicklung bei ihrer Betriebstemperatur eine wesentlich reduzierte Zugspannung in dem Bandleiter aufweist, die vorteilhaft im Bereich der Zugspannung liegt, die der Bandleiter einer Spule mit der Windungszahl eines einzelnen Segmentes aufweisen würde. Die Erfindung beruht also auf der Erkenntnis, dass die durch thermische Schrumpfung verursachte Spannung mit der Zahl der Windungen steigt, und dass dieser Anstieg durch eine Unterteilung in schwach verbundene Segmente reduziert werden kann. Die Betriebstemperatur des Supraleiters liegt dabei beispielsweise zwischen 25 K und 77 K.

[0011] Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der erfindungsgemäßen Spuleneinrichtung gehen aus den Unteransprüchen hervor. Demgemäß kann die Spuleneinrichtung zusätzlich folgende Merkmale aufweisen:

Im Zwischenbereich zwischen zwei benachbarten Segmenten können die benachbarten Windungen mindestens in einem Teilbereich mit einem so schwachen Klebemittel verbunden sein, dass die Verbindung bei einer Spannung unterhalb von 10 MPa aufgetrennt wird. In dieser Ausführungsform ist die schwache Verbindung in dem Teilbereich so ausgelegt, dass eine bei Abkühlung des Supraleiters auf seine Betriebstemperatur auftretende radiale Zugspannung zu einer Auftrennung der Verbindung in diesem Teilbereich führt, bevor die Zugspannung eine Schädigung oder gar Delamination der supraleitenden Schicht bewirken kann. Vorteilhaft kann die Auftrennung der Verbindung auch schon bei 5 MPa, besonders vorteilhaft bei 3 MPa erfolgen. Derzeit verwendete 2G-HTS-Materialien können eine Zugspannung von einigen MPa aushalten.

[0012] Im Zwischenbereich zwischen zwei benachbarten Segmenten kann im Zwischenraum zwischen benachbarten Windungen mindestens ein Teilbereich frei von Verklebung oder Vergussmasse sein. Sind die benachbarten Windungen der Segmente in dem Teilbereich also in dieser Ausführungsform gar nicht verbunden, so können sich die Segmente in diesem Teilbereich von Anfang an unabhängig voneinander verformen. Schon bei geringen radialen Zugspannungen verhalten sich die einzelnen Segmente zumindest in den Teilbereichen wie einzelne, unabhängig voneinander thermisch schrumpfende Einheiten.

[0013] In einer weiteren Ausführungsform kann die Spuleneinrichtung eine Vergussmasse umfassen, die

die benachbarten Windungen innerhalb der Segmente umhüllt. Diese Vergussmasse kann vorteilhaft ein Epoxid sein. Dieselbe Vergussmasse kann auch zwischen den Segmenten in denjenigen Abschnitten vorhanden sein, die außerhalb der Teilbereiche mit höchstens schwach verbundenen benachbarten Windungen liegen.

[0014] In einer weiteren Ausführungsform kann die Spuleneinrichtung mindestens in einem Teilbereich des Zwischenbereichs zwischen zwei benachbarten Segmenten eine Beschichtung mit einem Trennmittel oder ein eingelegtes Band aus einem Trennmittel aufweisen. Die Beschichtung oder das eingelegte Band aus einem Trennmittel verhindern dann vorteilhaft die Benetzung mit der Vergussmasse oder dem Klebemittel in diesen Bereichen, so dass dann der Verguss oder die Verklebung entweder vollständig verhindert wird oder die Verklebung im Vergleich zu anderen Bereichen der Wicklung nur äußerst schwach ausgeprägt ist. Das Trennmittel kann vorteilhaft PTFE sein.

[0015] In einer weiteren Ausführungsform kann im Zwischenbereich zwischen zwei benachbarten Segmenten der Bandleiter mindestens in einem Teilbereich mit einer zusätzlichen Schicht versehen sein, die aus einem Material mit einem kleineren thermischen Ausdehnungskoeffizienten als dem effektiven thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Bandleiters ausgebildet ist. Vorteilhaft ist es, wenn die thermische Schrumpfung der zusätzlichen Schicht durch die Abkühlung auf die Betriebstemperatur unterhalb von 0,3% liegt, besonders vorteilhaft unter 0,1%. In dieser Ausführungsform entsteht zwischen den benachbarten Segmenten in dem genannten Teilbereich kein Hohlraum, denn der Bereich zwischen den unverbundenen oder schwach verbundenen Bandleitern wird nun durch die weniger stark schrumpfende Zwischenschicht ausgefüllt. Diese Zwischenschicht verhält sich im Vergleich zu den anderen Materialien wie eine sich effektiv ausdehnende Schicht und hat also bei und nach der Abkühlung einen erhöhten relativen Platzbedarf. Dies führt dazu, dass keine Hohlräume entstehen und bewirkt somit eine größere mechanische Stabilität der Spulenwicklung nach Abkühlung. Beispielsweise kann die zusätzliche Schicht aus Graphit ausgebildet sein, das einen sehr niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten besitzt. Besonders vorteilhaft hat das Material für die zusätzliche Schicht einen negativen thermischen Ausdehnungskoeffizienten.

[0016] In einer weiteren Ausführungsform kann im Zwischenbereich zwischen zwei benachbarten Segmenten der Bandleiter mindestens in einem Teilbereich mit einer zusätzlichen Schicht versehen sein, die aus einem flexiblen Material mit einer Zugfestigkeit von unter 10 MPa ausgebildet ist. In dieser Ausführungsform können die Spannungen zwischen den Segmenten durch Nachgeben des flexiblen Materials der zusätzlichen Schicht ausgeglichen werden. Sind die benachbarten Bandleiter in diesem Bereich noch schwach verbunden, so kann die schwache Verbindung vorteilhaft auch nach Abkühlung bestehen bleiben. In dieser Ausführungsform ist die Spu-

lenwicklung mechanisch stabiler als bei völligem Fehlen einer Verbindung und bei der Ausbildung von Hohlräumen.

[0017] Die Spulenwicklung ist in einer ersten erfindungsgemäßen Ausbildung als Rennbahnspule oder als Rechteckspule ausgebildet.

[0018] Ist die Spulenwicklung als Rennbahnspule oder als Rechteckspule ausgebildet, dann liegen mehrere Teilbereiche mit höchstens schwacher Verbindung der benachbarten Windungen benachbarter Segmente innerhalb der gekrümmten Bereiche der Rennbahn- oder Rechteckspule. Insbesondere können die Teilbereiche mit höchstens schwacher Verbindung vorteilhaft in den vier Ecken der Rennbahn- oder Rechteckspule liegen. Diese Ausführungsform hat den Vorteil, dass auf den geraden Abschnitten der Spule, die einen großen Anteil an der gesamten Länge der Wicklung bilden, alle Windungen miteinander vergossen oder verklebt sein können. Dies führt zu einer deutlich verbesserten mechanischen Stabilität der Spulenwicklung. Dieser Ausführungsform liegt die Erkenntnis zugrunde, dass die durch thermische Schrumpfung entstehenden Zugspannungen vorrangig in den gekrümmten Bereichen entstehen und also auch dort am besten durch die Unterteilung in Segmente reduziert werden können. In den geraden Abschnitten einer Rechteck- oder Rennbahnspule kann die Wicklung relativ spannungsarm schrumpfen. Dies ist vergleichbar mit der thermischen Schrumpfung eines ebenen Stapels von Bandleitern, bei dem Unterschiede in den thermischen Expansionskoeffizienten der verschiedenen Materialien durch unterschiedlich starke Kontraktion in der Bandleiterebene und senkrecht zur Bandleiterebene ausgeglichen werden können.

[0019] In einer alternativen, nicht erfindungsgemäßen Ausführungsform können die Teilbereiche mit höchstens schwacher Verbindung der benachbarten Windungen benachbarter Segmente innerhalb der Bereiche liegen, die die gekrümmten Bereiche der Spulenwicklung und jeweils beidseitig angrenzende Übergangsbereiche umfassen. In dieser Ausführungsform sind also noch an die gekrümmten Bereiche angrenzende, gerade Übergangsbereiche vorgesehen, in denen zwischen den Segmenten höchstens eine schwache Verbindung vorliegt. Dies birgt den Vorteil, dass dort, wo die starke Verbindung der Segmente in eine schwache Verbindung der Segmente übergeht, noch keine großen radialen Zugspannungen durch die Abkühlung vorliegen. Es wird also ein Abknicken des Bandleiters in dem Bereich vermieden, wo die starke Verbindung der Segmente in eine schwache Verbindung der Segmente übergeht.

[0020] In einer weiteren erfindungsgemäßen Ausbildung ist die Spulenwicklung als annähernd zylindrische Wicklung ausgebildet und die Segmente sind als radiale Segmente ausgebildet.

[0021] Ist die Spuleneinrichtung als zylindrische Wicklung mit radialen Segmenten ausgebildet, dann können sich die Teilbereiche mit höchstens schwacher Verbindung der benachbarten Windungen in einer nicht erfin-

dungsgemäßen Ausführungsform über jeweils mindestens eine ganze Windung von 360 Grad erstrecken. Diese Ausführungsform birgt den Vorteil, dass eine zwischen den Segmenten durch Abkühlung entstehende radiale Zugspannung möglichst weitgehend ausgeglichen wird. Die effektive Zugentlastung durch die schwache Verbindung zwischen den Segmenten ist überall dort besonders wirkungsvoll, wo die Spulenwicklung gekrümmt ist, bei einer zylindrischen Spule also auf dem gesamten Umfang der Wicklung.

[0022] Erfindungsgemäß ist die annähernd zylindrische Spule auch aus miteinander abwechselnden geraden Bereichen und gebogenen Bereichen ausgebildet. Je nach Anzahl der insgesamt vorliegenden Bereiche oder Winkelsegmente ist die zylindrische Form dann nur mehr oder weniger näherungsweise gegeben. In dieser Ausführungsform liegen vorteilhaft die Teilbereiche mit höchstens schwacher Verbindung der benachbarten Windungen benachbarter radialer Segmente im Bereich der gebogenen Bereiche. Es soll aber nicht ausgeschlossen sein, dass sich die Teilbereiche mit höchstens schwacher Verbindung in Übergangsbereiche zu beiden Seiten der gebogenen Bereiche erstrecken, so dass ein Abknicken des Bandleiters vorteilhaft vermieden wird.

[0023] Die Supraleitungsschicht der Spuleneinrichtung kann einen Hochtemperatursupraleiter der zweiten Generation, insbesondere $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ umfassen.

[0024] Die Spuleneinrichtung kann ein Kühlsystem umfassen, wobei die Segmente der Spulenwicklung jeweils einzeln an das Kühlsystem angekoppelt sein können. Diese Ausgestaltung ist besonders vorteilhaft, wenn die Segmente entweder über den gesamten Umfang der Spule hinweg oder über relativ große Teilbereiche höchstens schwach miteinander verbunden sind. Dann ist es besonders wichtig, sicherzustellen, dass die einzelnen Segmente thermisch gut an das Kühlsystem zur Abkühlung auf die Betriebstemperatur des Supraleiters angekoppelt sind.

[0025] Die Erfindung wird nachfolgend anhand zweier bevorzugter Ausführungsbeispiele unter Bezugnahme auf die angehängten Zeichnungen beschrieben, in denen:

Fig. 1 einen schematischen Querschnitt eines supraleitenden Bandleiters zeigt,

Fig. 2 einen Ausschnitt einer Spulenwicklung gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel zeigt und

Fig. 3 eine Spulenwicklung gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel in schematischer Draufsicht zeigt.

[0026] Fig. 1 zeigt einen Querschnitt eines supraleitenden Bandleiters 1, in dem der Schichtaufbau schematisch dargestellt ist. Der Bandleiter umfasst in diesem Beispiel ein Substratband 2, das hier ein 100 μm dickes Substrat aus einer Nickel-Wolfram-Legierung ist. Alterna-

tiv sind auch Stahlbänder oder Bänder aus einer Legierung wie z.B. Hastelloy verwendbar. Über dem Substratband 2 ist eine 0,5 μm dicke Pufferschicht 4 angeordnet, die hier die oxidischen Materialien CeO_2 und Y_2O_3 enthält. Darüber folgt die eigentliche Supraleitungsschicht 6, hier eine 1 μm dicke Schicht aus $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, die wiederum mit einer 50 μm dicken Deckschicht 8 aus Kupfer abgedeckt ist. Alternativ zu dem Material $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ können auch die entsprechenden Verbindungen $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ anderer seltener Erden RE verwendet werden. Auf der gegenüberliegenden Seite des Substratbandes 2 ist hier eine weitere 50 μm dicke Deckschicht 8 aus Kupfer angeordnet, gefolgt von einem Isolator 10, der in diesem Beispiel als 25 μm dickes Kaptonband ausgebildet ist. Der Isolator 10 kann aber auch aus anderen isolierenden Materialien wie beispielsweise anderen Kunststoffen aufgebaut sein. In dem gezeigten Beispiel ist die Breite des Isolators 10 etwas größer als die Breite der übrigen Schichten des Bandleiters 1, so dass bei einer Wicklung der Spuleneinrichtung übereinander zu liegen kommende Windungen W_i , W_{i+1} zuverlässig gegeneinander isoliert sind. Alternativ zu dem gezeigten Beispiel kann der Bandleiter 1 auch auf beiden Außenflächen Isolatorschichten umfassen, oder es können auch die seitlichen Bereiche des supraleitenden Bandleiters 1 zusätzlich durch isolierende Schichten geschützt sein. Es ist weiterhin möglich, ein Isolatorband erst bei der Herstellung der Spulenwicklung als separates Band in die Spuleneinrichtung einzuwickeln. Dies ist besonders vorteilhaft, wenn mehrere Bandleiter parallel gewickelt werden, die nicht gegeneinander isoliert werden müssen. Dann kann beispielsweise ein Paket von 2 bis 6 übereinanderliegenden Bandleitern ohne eigene Isolatorschicht zusammen mit einem zusätzlich eingelegten Isolatorband in gemeinsamen Windungen gewickelt werden.

[0027] Typischerweise erfahren das Substratband 2, die Pufferschicht 4, die Supraleitungsschicht 6 und die Deckschichten 8 in ihrer Gesamtheit bei der Abkühlung von etwa 300 K auf etwa 30 K eine thermische Kontraktion von etwa 0,3 %. Für übliche Materialien des Isolators 10 und der als Vergussmasse oder Klebmasse eingesetzten Epoxide liegt die thermische Kontraktion dagegen wesentlich höher, bei etwa 1,2 %. Bei ebenen Stapeln von Bandleitern und auf den geraden Abschnitten einer Spulenwicklung können diese Unterschiede durch unterschiedliche Schrumpfung in der Ebene und senkrecht zur Ebene des Bandleiters ausgeglichen werden. In den gekrümmten Bereichen dagegen führen sie zu der Ausbildung von radialen Zugspannungen. In den folgenden beiden Ausführungsbeispielen wird gezeigt, wie die radialen Zugspannungen durch die Unterteilung in Segmente reduziert werden können. Besonders vorteilhaft ist es, wenn dabei die Schichten mit hoher thermischer Kontraktion vor allem in den gekrümmten Bereichen möglichst dünn ausgebildet sind. Der in Fig. 1 dargestellte Bandleiter soll für beide nachfolgenden Ausführungsbeispiele als Wicklungsmaterial zugrunde gelegt sein.

Hier ist der Isolator 10 mit 25 μm vorteilhaft relativ dünn im Vergleich zur übrigen Gesamtdicke des Bandleiters 1 ausgestaltet.

[0028] Fig. 2 zeigt einen Ausschnitt einer ersten Spulenwicklung 12 gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel. In diesem Beispiel ist die Spulenwicklung 12 als Rechteckspule ausgestaltet. Der Ausschnitt in Fig. 2 zeigt dabei einen Bereich um eine der vier gekrümmten Ecken der Rechteckspule. Dabei stellt Fig. 2 nur einen Teil der Spulenwicklung 12 dar, nämlich einen Abschnitt der Wicklung mit sechs übereinanderliegenden Windungen aus Bandleitern 1, die jeweils gemäß dem Beispiel in Fig. 1 aufgebaut sind. Dabei sind drei der Windungen Teil eines inneren Segmentes S_i , und drei der dargestellten Windungen sind Teil eines äußeren Segmentes S_{i+1} . Wie angedeutet, umfasst jedes Segment noch mehr als die drei beispielhaft dargestellten Windungen. Beispielsweise kann jedes Segment zwischen 10 und 200 Windungen umfassen, besonders vorteilhaft zwischen 50 und 100 Windungen. Die gesamte Spulenwicklung kann beispielsweise zwischen 2 und 50 solcher Segmente umfassen, besonders vorteilhaft zwischen 5 und 10 Segmente. Innerhalb jedes Segmentes S_i , S_{i+1} sind in diesem Ausführungsbeispiel alle Windungen W_i mit einer Vergussmasse 14 aus Epoxid vergossen. Die Vergussmasse 14 ist in diesem Ausführungsbeispiel nach dem Wickeln der Spule (sogenanntes Dry Winding) mittels Vakuumverguss eingebracht worden. Alternativ kann auch bereits beim Wickeln der Spulenwicklung ein Imprägnierharz oder ein Klebemittel eingebracht werden (sogenanntes Wet Winding), wobei der Bandleiter vor dem Wickeln typischerweise auf beiden Seiten mit dem Imprägnierharz oder Klebemittel benetzt wird. Auch in den Zwischenbereichen 20 zwischen den Segmenten S_i , S_{i+1} sind die benachbarten Windungen W_{i-1} , W_i in diesem Ausführungsbeispiel in mehreren Teilabschnitten miteinander vergossen. Von den vier geraden Teilabschnitten 28 der Rechteckspule sind in Fig. 2 zwei schematisch dargestellt. Innerhalb dieser Teilabschnitte 28 sind alle Windungen W_i der gesamten Spule mit der Vergussmasse 14 fest miteinander verbunden, auch im Zwischenbereich 20 zwischen zwei benachbarten Segmenten S_i , S_{i+1} . In den gekrümmten Bereichen 24, von denen die gesamte Rechteckspule vier umfasst, sind dagegen die benachbarten Windungen W_{i-1} , W_i unterschiedlicher Segmente S_i , S_{i+1} nicht durch Vergussmasse 14 miteinander verbunden. Dasselbe gilt für die sich an jeden gekrümmten Bereich 24 beidseitig anschließenden Übergangsbereiche 26, in denen auch keine Vergussmasse 14 zwischen den benachbarten Windungen W_{i-1} , W_i unterschiedlicher Segmente S_i , S_{i+1} angeordnet ist. Stattdessen ist in diesem gesamten Teilbereich 22 zwischen den Segmenten S_i , S_{i+1} ein PTFE-Band 16 eingelegt, welches verhindert, dass bei dem Vergießen der gewickelten Spule dieser Teilbereich 22 mit Vergussmasse 14 aufgefüllt wird. In diesem Beispiel hat das PTFE-Band 16 eine ähnliche Schichtdicke wie die mittlere Dicke der beim Verguss eingebrachten Vergussmasse, hier eine

Dicke von 25 μm . Das eingelegte PTFE-Band 16 verhindert so vorteilhaft die Verklebung der Bandleiter 1 benachbarter Windungen W_{i-1} , W_i mit der Vergussmasse 14 im genannten Teilbereich 22, da das zwischengelegte PTFE-Band 16 nicht von der Vergussmasse 14 benetzt wird. Damit wird außerdem die Ausbildung einer starken Verbindung der benachbarten Bandleiter 1 in diesem Teilbereich 22 vermieden. In diesem Ausführungsbeispiel ist gar keine chemische Klebeverbindung in diesem Teilbereich 22 ausgebildet. Alternativ zu diesem Beispiel kann im Teilbereich 22 der Bandleiter auch mit einem Trennmittel wie beispielsweise PTFE beschichtet sein. Je nach Eigenschaften der Beschichtung kann dann auch entweder gar keine Klebeverbindung oder nur eine schwache Klebeverbindung zwischen den benachbarten Bandleitern 1 ausgebildet sein. Alternativ oder zusätzlich zu dem hier dargestellten Trennmittel 16 kann auch eine weitere Schicht in dem Zwischenbereich 20 eingefügt sein. Das Material dieser weiteren Schicht kann entweder einen geringen oder sogar negativen thermischen Expansionskoeffizienten aufweisen, und / oder die Schicht kann ein flexibles Material mit einer Zugfestigkeit von unter 10 MPa aufweisen. In beiden Ausgestaltungen trägt die weitere Schicht dazu bei, dass radiale Zugspannungen in dem Zwischenbereichen 20 reduziert werden, und dass die mechanische Festigkeit der Spule in den gekrümmten Bereichen 24 und den angrenzenden Übergangsbereichen 26 erhöht wird.

[0029] Allen obenstehend beschriebenen Varianten ist gemeinsam, dass durch die höchstens schwache Verbindung der benachbarten Bandleiter 1 in den Teilbereichen 22 die Zugspannung auf den Windungen W_i der gesamten Spule reduziert wird. Durch die höchstens schwache Verbindung in diesen Teilbereichen 22 verhält sich die maximale Zugspannung auf dem Bandleiter 1 durch thermische Kontraktion der verschiedenen Materialien annähernd so wie in einer Spulenwicklung, die nur die Windungszahl eines einzelnen Segmentes S_i aufweist. Die Rechteckspule des gezeigten Ausführungsbeispiels weist vier relativ lange gerade Bereiche 32 und vier relativ kurze gekrümmte Bereiche 24 mit jeweils beidseitig angrenzenden Übergangsbereichen 26 auf. Für die Reduktion der Zugspannung auf dem Bandleiter ist vor allem eine mechanische Entkopplung und Zugentlastung der Segmente in den gekrümmten Bereichen 24 effektiv. Daher kann die Rechteckspule in den geraden Bereichen 32 wie bei herkömmlichen Verfahren vollständig vergossen werden und behält dadurch einen Großteil der mit diesen Verfahren erreichten mechanischen Stabilität. Vorteilhaft liegt die höchstens schwache Verbindung der benachbarten Bandleiter 1 zwischen zwei benachbarten Segmenten S_i , S_{i+1} neben den gekrümmten Bereichen 24 auch noch in beidseitig angrenzenden Übergangsbereichen 26 vor, damit sich beim Übergang der geraden Bereiche 32 in die gekrümmten Bereiche 24 und beim Übergang der stark verbundenen zu den schwach verbundenen Zwischenbereichen keine zu hohen Zug-, Druck- oder Scherspannungen ausbil-

den.

[0030] Fig. 3 zeigt eine zweite Spulenwicklung 30 gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel in schematischer Draufsicht. Diese zweite Spulenwicklung 30 ist als annähernd zylindrische Wicklung ausgebildet, wobei in diesem Beispiel die zylindrische Form nur näherungsweise aus geraden Bereichen 32 und gekrümmten Bereichen 24 zusammengesetzt ist. Im hier gezeigten Beispiel umfasst die Spulenwicklung jeweils acht gerade Bereiche 22 und acht gekrümmte Bereiche 24, allerdings kann die Zahl der einzelnen Bereiche auch noch wesentlich größer sein. Im gezeigten zweiten Ausführungsbeispiel umfasst die Spulenwicklung nur zwei Segmente S_i und S_{i+1} . Die Zahl der Segmente kann allerdings auch wesentlich größer sein, beispielsweise kann sie zwischen 2 und 50 und besonders vorteilhaft zwischen 5 und 10 liegen. Im gesamten vergossenen Bereich 34 des gezeigten zweiten Ausführungsbeispiels sind alle benachbarten Windungen durch Vergussmasse fest miteinander verbunden, auch über die Grenze 36 der beiden Segmente hinweg. Nur in den acht Teilbereichen 22 an der Grenze 36 der Segmente ist die Vergussmasse zwischen den benachbarten Bandleitern 1 unterbrochen. In diesem zweiten Ausführungsbeispiel sind die an die Teilbereiche 22 angrenzenden Bandleiter 1 mit dem Trennmittel PTFE beschichtet, das für die Vergussmasse entnetzend wirkt und dadurch bewirkt, dass sich in den Teilbereichen 22 Hohlräume ohne Vergussmasse ausbilden. In den Teilbereichen 22 sind also die benachbarten Halbleiter in diesem Beispiel nicht miteinander verbunden, und die Ausbildung der Hohlräume bewirkt effektiv eine Zugentlastung der in den gekrümmten Bereichen 24 verstärkt auftretenden radialen Zugspannungen. Durch ein Aufspreizen oder eine Kompression der Hohlräume bei Änderungen der Temperatur können sowohl Zug- als auch Druckspannungen auf den Bandleitern 1 der Spulenwicklung 30 reduziert werden.

Patentansprüche

1. Supraleitende Spuleneinrichtung mit einer Spulenwicklung (12, 30) aus mehreren Windungen (W_i) umfassend wenigstens einen supraleitenden Bandleiter (1), der ein bandförmiges Substratband (2) und eine auf dem Substratband (2) angeordnete Supraleitungsschicht (6) aufweist, wobei die Spulenwicklung (12, 30) in mehrere Segmente (S_i) unterteilt ist, wobei innerhalb jedes Segmentes (S_i) benachbarte Windungen (W_i , W_{i+1}) miteinander vergossen oder verklebt sind und wobei im Zwischenbereich (20) zwischen zwei benachbarten Segmenten (S_i , S_{i+1}) mindestens in einem Teilbereich (22) benachbarte Windungen (W_{i-1} , W_i) höchstens schwach miteinander verbunden oder verklebt sind, wobei die Spulenwicklung (12) entweder als Rennbahnschleife oder Rechteckspule, wobei mehrere Teilbereiche (22) mit höchstens schwacher Verbindung der benachbar-

ten Windungen (W_{i-1} , W_i) benachbarter Segmente (S_i , S_{i+1}) innerhalb der gekrümmten Bereiche (24) der Rennbahn- oder Rechteckspule liegen, oder als annähernd zylindrische Wicklung, bei der die Segmente (S_i) als radiale Segmente (S_i) ausgebildet sind und die aus miteinander abwechselnden geraden Bereichen (32) und gekrümmten Bereichen (24) ausgebildet ist, wobei die Teilbereiche (22) mit höchstens schwacher Verbindung der benachbarten Windungen (W_{i-1} , W_i) benachbarter radialer Segmente (S_i) im Bereich der gekrümmten Bereiche (24) liegen, ausgebildet ist.

2. Spuleneinrichtung nach Anspruch 1, wobei im Zwischenbereich (20) zwischen zwei benachbarten Segmenten (S_i , S_{i+1}) mindestens in einem Teilbereich (22) die benachbarten Windungen (W_{i-1} , W_i) höchstens mit einem so schwachen Klebemittel verbunden sind, dass die Verbindung bei einer Spannung unterhalb von 10 MPa aufgetrennt wird.
3. Spuleneinrichtung nach Anspruch 1, wobei im Zwischenbereich (20) zwischen zwei benachbarten Segmenten (S_i , S_{i+1}) im Zwischenraum zwischen benachbarten Windungen mindestens ein Teilbereich (22) frei von Verklebung oder Vergussmasse ist.
4. Spuleneinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche mit einer Vergussmasse (14), die die benachbarten Windungen (W_i , W_{i+1}) innerhalb der Segmente (S_i) umhüllt.
5. Spuleneinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, die mindestens in einem Teilbereich (22) des Zwischenbereichs (20) zwischen zwei benachbarten Segmenten (S_i , S_{i+1}) eine Beschichtung mit einem Trennmittel (16) oder ein eingelegtes Band aus einem Trennmittel (16) aufweist.
6. Spuleneinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Zwischenbereich (20) zwischen zwei benachbarten Segmenten (S_i , S_{i+1}) der Bandleiter (1) mindestens in einem Teilbereich (22) mit einer zusätzlichen Schicht versehen ist, die aus einem Material mit einem kleineren thermischen Ausdehnungskoeffizienten als dem effektiven thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Bandleiters (1) ausgebildet ist.
7. Spuleneinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Zwischenbereich (20) zwischen zwei benachbarten Segmenten (S_i , S_{i+1}) der Bandleiter (1) mindestens in einem Teilbereich (22) mit einer zusätzlichen Schicht versehen ist, die aus einem flexiblen Material mit einer Zugfestigkeit von unter 10 MPa ausgebildet ist.

8. Spuleneinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Supraleitungsschicht (6) einen Hochtemperatursupraleiter der zweiten Generation, insbesondere $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, umfasst.

9. Spuleneinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, umfassend ein Kühlsystem, wobei die Segmente (S_i) der Spulenwicklung (12, 30) jeweils einzeln an das Kühlsystem angekoppelt sind.

Claims

1. Superconducting coil device comprising a coil winding (12, 30) consisting of a plurality of turns (W_i) comprising at least one superconducting tape conductor (1), which has a strip-shaped substrate tape (2) and a superconducting layer (6) arranged on the substrate tape (2), wherein the coil winding (12, 30) is subdivided into a plurality of segments (S_i), neighboring turns (W_i , W_{i+1}) within each segment (S_i) being encapsulated together or adhesively bonded to one another, and, in the intermediate region (20) between two neighboring segments (S_i , S_{i+1}), neighboring turns (W_{i-1} , W_i) being at most weakly connected or adhesively bonded to one another at least in a subregion (22), wherein the coil winding (12) is configured either as a racetrack coil or a rectangular coil, wherein a plurality of subregions (22) having at most a weak connection of the neighboring turns (W_{i-1} , W_i) of neighboring segments (S_i , S_{i+1}) lie within the curved regions (24) of the racetrack or rectangular coil, or as an approximately cylindrical winding in which the segments (S_i) are configured as radial segments (S_i) and which is formed from straight regions (32) and curved regions (24) alternating with one another, the subregions (22) having at most a weak connection of the neighboring turns (W_{i-1} , W_i) of neighboring radial segments (S_i) lying in the region of the curved regions (24).
2. Coil device according to Claim 1, wherein, in the intermediate region (20) between two neighboring segments (S_i , S_{i+1}), the neighboring turns (W_{i-1} , W_i) are at most connected by an adhesive so weak that the connection is broken at a stress below 10 MPa at least in a subregion (22).
3. Coil device according to Claim 1, wherein, in the intermediate region (20) between two neighboring segments (S_i , S_{i+1}), at least one subregion (22) in the intermediate space between neighboring turns is free of adhesive bonding or encapsulation compound.
4. Coil device according to one of the preceding claims, having an encapsulation compound (14) which en-

closes the neighboring turns (W_i , W_{i+1}) within the segment (S_i).

5. Coil device according to one of the preceding claims, which has a coating of a separating medium (16) or an inlaid tape of a separating medium (16) at least in a subregion (22) in the intermediate region (20) between two neighboring segments (S_i , S_{i+1}). 5
6. Coil device according to one of the preceding claims, **characterized in that**, in the intermediate region (20) between two neighboring segments (S_i , S_{i+1}), the tape conductor (1) is provided at least in a subregion (22) with an additional layer which is formed from a material having a thermal expansion coefficient lower than the effective thermal expansion coefficient of the tape conductor (1). 10
7. Coil device according to one of the preceding claims, **characterized in that**, in the intermediate region (20) between two neighboring segments (S_i , S_{i+1}), the tape conductor is provided at least in a subregion (22) with an additional layer which is formed from a flexible material having a tensile strength of less than 10 MPa. 20
8. Coil device according to one of the preceding claims, **characterized in that** the superconducting layer (6) comprises a second-generation high-temperature superconductor, in particular $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$. 25
9. Coil device according to one of the preceding claims, comprising a cooling system, wherein the segments (S_i) of the coil winding (12, 30) are respectively coupled individually to the cooling system. 30

Revendications

1. Dispositif formant bobine supraconductrice, comprenant un enroulement (12, 30) de bobine composé de plusieurs spires (W_i), comprenant au moins un conducteur (1) en bande supraconducteur, qui a une bande (2) de substrat en forme de bande et une couche (6) de supraconduction disposée sur la bande (2) de substrat, l'enroulement (12, 30) de bobine étant subdivisé en plusieurs segments (S_i), dans lequel, au sein de chaque segment (S_i), des bobines (W_i , W_{i+1}) voisines sont coulées ou collées ensemble et dans lequel, dans la partie (20) intermédiaire, entre deux segments (S_i , S_{i+1}) voisins, au moins dans une sous-partie (22), des spires (W_{i-1} , W_i) voisines sont reliées ou collées ensemble, au plus légèrement, l'enroulement (12) de bobine étant sous la forme d'une bobine à piste ou d'une bobine rectangulaire, plusieurs sous-parties (22) ayant une liaison, au plus faible, entre les spires (W_{i-1} , W_i) voisines de segments (S_i , S_{i+1}) voisins, étant à l'intérieur des par-

ties (24) incurvées de la bobine à piste ou rectangulaire ou étant sous la forme d'un enroulement à peu près cylindrique, dans lequel les segments (S_i) sont constitués en segments (S_i) radiaux, et qui est constitué de parties (32) droites et de parties (24) incurvées alternant les unes avec les autres, les sous-parties (22) ayant une liaison, au plus faible, entre les spires (W_{i-1} , W_i) voisines de segments (S_i) radiaux voisins se trouvant dans la région des parties (24) incurvées.

2. Dispositif formant bobine suivant la revendication 1, dans lequel, dans la partie (20) intermédiaire entre deux segments (S_i , S_{i+1}) voisins, au moins dans une sous-partie (22), les spires (W_{i-1} , W_i) voisines sont reliées, au plus, par un adhésif si faible que la liaison se sépare sous une tension inférieure à 10 MPa.
3. Dispositif formant bobine suivant la revendication 1, dans lequel, dans la partie (20) intermédiaire entre deux segments (S_i , S_{i+1}) voisins, dans l'espace intermédiaire compris entre des spires voisines, au moins une sous-partie (22) est exempte de collage ou d'une masse de scellement.
4. Dispositif formant bobine suivant l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant une masse (14) de scellement, qui enrobe les spires (W_{i-1} , W_i) voisines au sein des segments (S_i).
5. Dispositif formant bobine suivant l'une quelconque des revendications précédentes, qui a, au moins dans une sous-partie (22) de la partie (20) intermédiaire entre deux segments (S_i , S_{i+1}) voisins, un revêtement d'un agent (16) de séparation ou une bande insérée en un agent (16) de séparation.
6. Dispositif formant bobine suivant l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que**, dans la partie (20) intermédiaire entre deux segments (S_i , S_{i+1}) voisins, le conducteur (1) en bande est pourvu, au moins dans une sous-partie (22), d'une couche supplémentaire, qui est en un matériau ayant un coefficient de dilatation thermique plus petit que le coefficient de dilatation thermique effectif du conducteur (1) en bande.
7. Dispositif formant bobine suivant l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que**, dans la partie (20) intermédiaire entre deux segments (S_i , S_{i+1}) voisins, le conducteur (1) en bande est pourvu, au moins dans une sous-partie (22), d'une couche supplémentaire constituée en un matériau souple ayant une résistante à la traction inférieure à 10 Mpa.
8. Dispositif formant bobine suivant l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce**

que la couche (6) de supraconduction comprend un supraconducteur à haute température de la deuxième génération, notamment du $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$.

9. Dispositif formant bobine suivant l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant un système de refroidissement, des segments (S_i) de l'enroulement (12, 30) de bobine étant couplés chacun individuellement au système de refroidissement.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

FIG 1

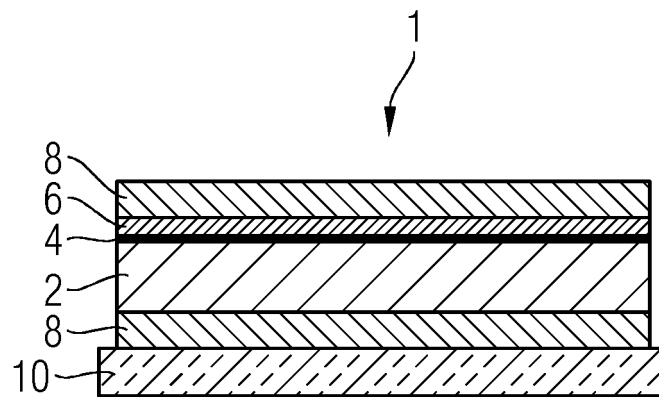


FIG 2

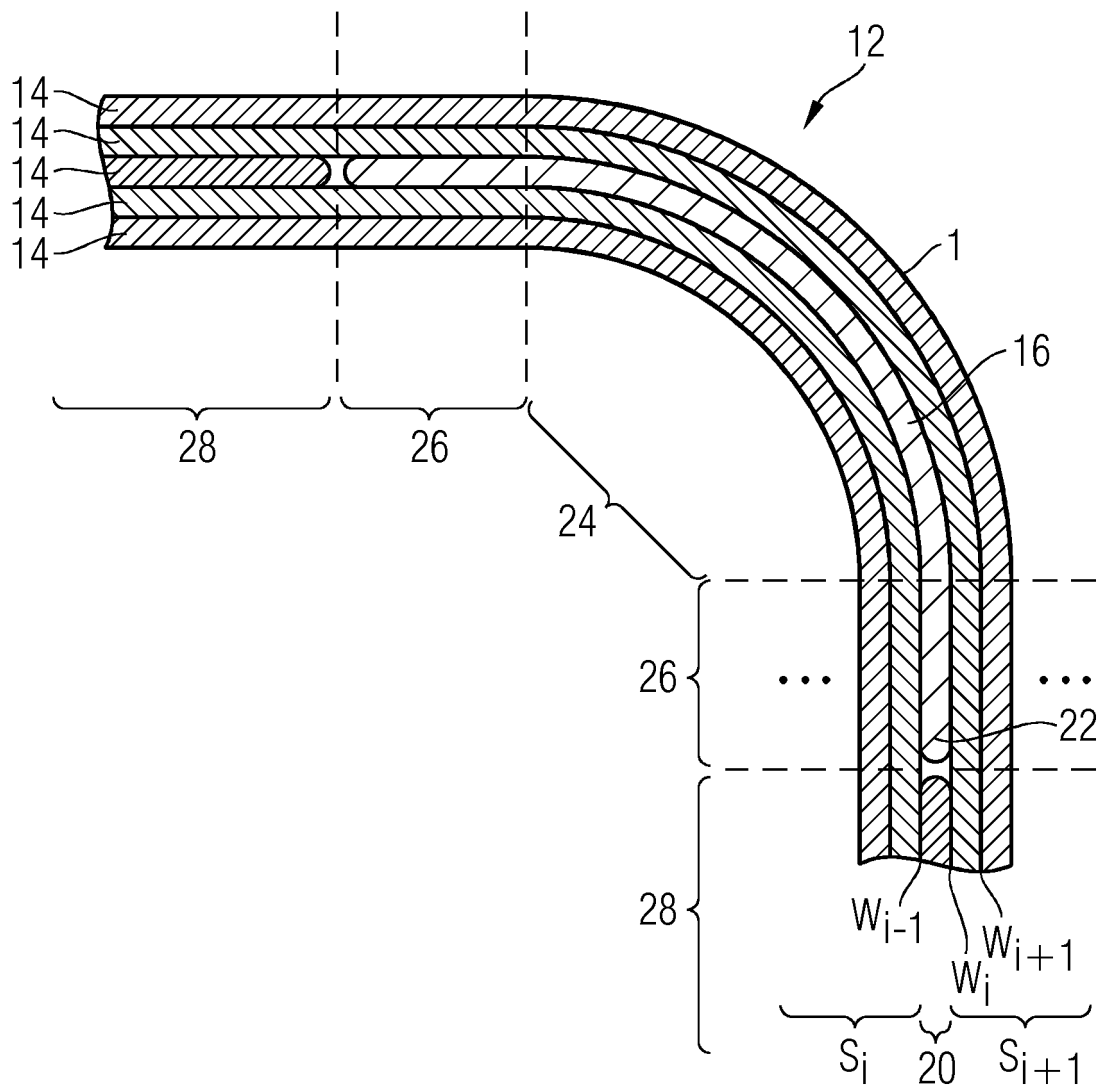
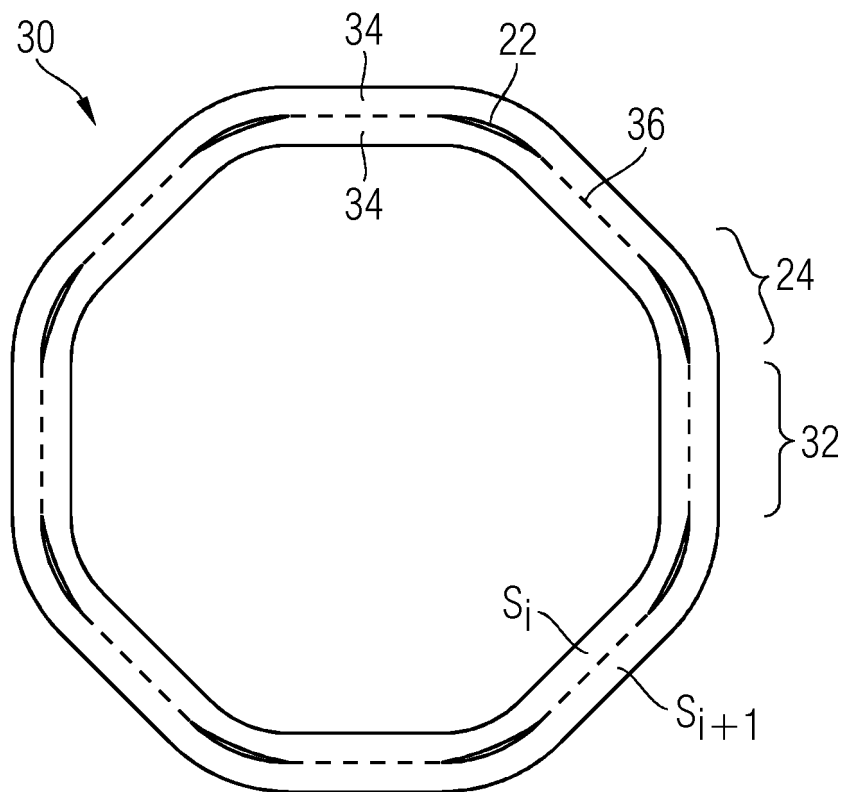


FIG 3



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

- DE 102011077457 [0006]
- DE 102011077457 A1 [0006]
- DE 102011118465 A1 [0007]
- JP 2010267835 A [0007]