

(19)



(11)

EP 1 872 377 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
19.10.2016 Patentblatt 2016/42

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

(21) Anmeldenummer: **06743321.9**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2006/061640

(22) Anmeldetag: **18.04.2006**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2006/111527 (26.10.2006 Gazette 2006/43)

(54) **SATTELFÖRMIGE SPULENWICKLUNG UNTER VERWENDUNG VON SUPRALEITERN UND VERFAHREN ZU IHRER HERSTELLUNG**

SADDLE-SHAPED COIL WINDING USING SUPERCONDUCTORS, AND METHOD FOR THE PRODUCTION THEREOF

BOBINE ENROULEE EN FORME DE SELLE COMPRENANT DES SUPRACONDUCTEURS ET PROCEDE DE PRODUCTION DE CETTE BOBINE

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE FR GB

(56) Entgegenhaltungen:
JP-A- 52 139 955 US-A- 4 554 731
US-A1- 2002 149 453

(30) Priorität: **20.04.2005 DE 102005018370**
28.02.2006 DE 102006009250

- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN** Bd. 016, Nr. 326 (E-1235), 16. Juli 1992 (1992-07-16) & JP 04 097506 A (MITSUBISHI ELECTRIC CORP), 30. März 1992 (1992-03-30)
- **AIZED D ET AL: "Status of the 1,000 hp HTS Motor Development" IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, IEEE SERVICE CENTER, LOS ALAMITOS, CA, US, Bd. 9, Nr. 2, Juni 1999 (1999-06), XP011082230 ISSN: 1051-8223 in der Anmeldung erwähnt**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
02.01.2008 Patentblatt 2008/01

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

(72) Erfinder:

- **LEGHISSA, Martino**
91369 Wiesenthau (DE)
- **PRÖLSS, Norbert**
90530 Wendelstein (DE)

EP 1 872 377 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 Erfindung bezieht sich auf eine sattelförmige Spulenwicklung unter Verwendung von Supraleitern auf einer Rohrmantelfläche mit axial verlaufenden, geraden Wicklungsabschnitten und dazwischen an gegenüberliegenden Stirnseiten gebogenen, Wickelköpfe bildenden Wicklungsabschnitten. Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zur Herstellung einer derartigen Spulenwicklung. Ein entsprechendes Verfahren zur Herstellung einer solchen Spulenwicklung ist der JP 06-196314 A zu entnehmen.

[0002] Auf dem Gebiet der Supraleitungstechnik werden sattelförmige Spulenwicklungen seit langem auf dem Gebiet der Hochenergie- und Teilchenphysik oder der elektrischen Maschinen vorgesehen. Hierbei kommen im Allgemeinen Leiter mit klassischem, metallischem Supraleitermaterial mit niedriger Sprungtemperatur T_c , so genanntes Low- T_c -Supraleitermaterial (Abkürzung: LTS-Material) zur Anwendung. Entsprechende Leiter lassen sich nämlich verhältnismäßig leicht und ohne Einbußen an ihren supraleitenden Eigenschaften in die Sattelform mit axial verlaufenden, geraden Wicklungsabschnitten und dazwischen an gegenüberliegenden Stirnseiten gebogenen, Wickelköpfe bildenden Wicklungsabschnitten biegen. Oder ihre supraleitenden Eigenschaften werden nach der so genannten "Wind-and-React"-Technik erst nach der endgültigen Formgebung der Leiter in der Wicklung ausgebildet bzw. eingestellt.

[0003] Seit Bekannt werden der oxidischen Supraleitermaterialien mit hoher Sprungtemperatur T_c , dem so genannten High- T_c -Supraleitermaterial (Abkürzung: HTS-Material), wird versucht, entsprechende Wicklungen auch mit Leitern aus diesen Materialien herzustellen. Ein entsprechender Vorschlag geht aus der eingangs genannten JP 06-196314 A hervor. Auch in der JP 2003-255032 A ist die Möglichkeit einer Verwendung solcher Leiter für sattelförmige Spulenwicklungen erwähnt. Hierbei ist jedoch das Problem gegeben, dass Leiter unter Verwendung derartiger Materialien mit hinreichender Stromtragfähigkeit bzw. kritischer Stromdichte J_c sich bisher praktisch nur in Bandform fertigen lassen, fertige Bandleiter jedoch sehr dehnungsempfindlich sind und deshalb sich wegen der Gefahr einer Einbuße an Stromtragfähigkeit bzw. kritischer Stromdichte I_c nur in sehr geringem Masse biegen lassen. Man hat deshalb in weitem Umfang auf die Herstellung von sattelförmigen Spulenwicklungen mit derartigen bandförmigen HTS-Leitern verzichtet und stattdessen so genannte "Rennbahnsolen" (englisch: "race track coils") eingeplant.

[0004] Rennbahnsolen sind flache Wicklungen, bei denen die Windungen stets innerhalb einer Wicklungsebene liegen. Stapelt man solche Rennbahnsolen aufeinander, besitzt der Stapel in Längsrichtung somit keine Öffnung (so genannte "Apertur"). In rotierenden Maschinen mit durchlaufender Welle müssen deshalb die Rennbahnsolen oberhalb und unterhalb eines zentralen Bereiches angebracht werden (vgl. z. B. DE 199 43 783 A1). Es ergibt sich deshalb in den axial verlaufenden, geraden Wicklungsabschnitten der Spulenwicklung ein freier, nicht durch die Wicklung besetzter Raum, der zu einer entsprechenden Reduzierung der nutzbaren Feldstärke führt. Durch den Einsatz von Sattelsolen, d.h. Spulenwicklungen mit stirnseitig hochgebogenen Wickelköpfen, entsteht eine Apertur. Damit ist ein effektiverer Einsatz der supraleitenden Wicklungen z. B. in rotierenden Maschinen verbunden, vorausgesetzt dass die Supraleiter ohne Einbußen bzgl. ihrer supraleitenden Eigenschaften entsprechend verformbar sind.

[0005] Flache Spulenwicklungen vom Rennbahntyp für einen HTS-Motor und die Herstellung entsprechender Spulenwicklungen sind z. B. auch in "IEEE Trans. Appl. Supercond.", Vol. 9, No. 2, Juni 1999, Seiten 1197 bis 1200 beschrieben.

[0006] Es wurden auch konisch geformte Spulenwicklungen mit bandförmigen HTS-Leitern vorgeschlagen (vgl. WO 01/08173 A1). Bei dieser Spulengeometrie ist zwar die Wicklung gewölbt; jedoch befinden sich auch hier die Leiter der einzelnen Windungen an den geraden Strecken und in den Wickelkopfbereichen jeweils innerhalb einer gemeinsamen Ebene. Die flachen Seiten der Leiter liegen dabei parallel zur Achse, welche senkrecht aus der Spulenwicklung heraustritt.

[0007] Es sind auch Versuche zur Herstellung von sattelförmigen Spulenwicklungen mit bandförmigen HTS-Leitern bekannt (vgl. "IEEE Trans. Appl. Supercond.", Vol. 9, No. 2, Juni 1999, Seiten 293 bis 296). Das dort beschriebene Wicklungsdesign ermöglicht jedoch für einen Quadrupolmagneten nur kleine Aperturen; solche Aperturen sind jedoch für Dipolwicklungen, wie sie z. B. für zweipolige Rotorwicklungen von Maschinen vorzusehen sind, nicht ausreichend.

[0008] Ein für Spulenwicklungen aus dehnungsempfindlichen Supraleitern bekanntes Herstellungsverfahren beruht darauf, dass die supraleitenden Eigenschaften der Leiter der Spulenwicklung erst nach dem Wickelvorgang in ihrer endgültigen Form ausgebildet werden (so genannte "Wind-and-React"-Technik; vgl. z. B. EP 1 471 363 A1). Dies erfordert jedoch in der Regel aufwendige Wickelvorrichtungen, die für eine kostengünstige Herstellung von Spulenwicklungen zum Ersatz in rotierenden Maschinen wenig geeignet sind.

[0009] JP 52 139955 A zeigt eine Sattelförmige Spulenwicklung, die aus einer ebenen Spulenform vom Rennbahntyp auf eine Rohrmantelfläche geformt ist.

[0010] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es deshalb, eine sattelförmige Spulenwicklung mit den eingangs genannten Merkmalen anzugeben, bei der die vorstehend angesprochenen Probleme reduziert sind. Insbesondere soll auch ein Herstellungsverfahren angegeben werden, welches zur Herstellung nicht-ebener Spulenwicklungen unter Verwendung bereits fertig gestellter bandförmiger Leiter wie Hoch- T_c -Supraleiter geeignet ist, die insbesondere dehnungsempfindlich sind.

[0011] Die sich auf die sattelförmige Spulenwicklung beziehende Aufgabe wird mit den in Anspruch 1 angegebenen

Maßnahmen gelöst. Demgemäß soll die sattelförmige Spulenwicklung aus einer ebenen Spulenform vom Rennbahntyp auf eine Rohrmantelfläche derart geformt sein, dass sie axial verlaufende, längsseitige Wicklungsabschnitte und dazwischen verlaufende stirnseitige, Wickelköpfe bildende Wicklungsabschnitte aufweist, wobei die Windungen der Spulenwicklung

- mit wenigstens einem bandförmigen Supraleiter gebildet sind, der mit seiner Schmalseite der Rohrmantelfläche zugewandt ist,
- und in der Sattelform jeweils eine Umlauflänge aufweisen, die praktisch unverändert gegenüber der in einer ebenen Spulenform ist, so dass auf der Rohrmantelfläche der wenigstens eine bandförmige Leiter in den Windungen im Bereich der Scheitel der stirnseitigen Wicklungsabschnitte mit seiner Flachseite um einen Neigungswinkel gegenüber einer Normalen auf der Mantelfläche in Richtung auf das Wicklungszentrum der Spulenwicklung geneigt angeordnet ist, wobei der Neigungswinkel bei einer innen liegenden Windung kleiner als bei einer außen liegenden Windung ist.

[0012] Dabei wird unter einer Umlauflänge die Länge eines geschlossenen Umlaufs um 360° des Supraleiters um ein Wicklungszentrum, z. B. einen Wickelkern verstanden. Bei Verwendung eines Bandleiters definieren dabei die beiden Kanten des Bandes jeweils eine Umlauflänge. Im Falle der ebenen Wicklung sind diese beiden Umlauflängen von Natur aus gleich. Die Sattelspule ist derart gestaltet, dass beide Umlauflängen im Fall der dreidimensional geformten Spule höchstens einen Unterschied von 0,4 % (vorzugsweise 0,3 % oder noch besser 0,2 %) Längenänderung zu der Umlauflängen der ebenen Spule sowie auch relativ zueinander besitzen. Dieser Unterschied ist abhängig von dem jeweiligen Supraleiteraufbau und dessen Änderung der Supraleitungseigenschaften beim Biegen bzw. Dehnen. Er kann folglich auch noch unter dem angegebenen Wert liegen. Dabei lässt sich gewährleisten, dass auch über den ganzen Umlauf gesehen die lokale Dehnung bzw. Stauchung des Bandleiters im Vergleich zur ebenen Spule höchstens 0,4 % (vorzugsweise 0,3 % oder noch besser 0,2 %) beträgt. Dies ist notwendig, um die Stromtragfähigkeit des Bandleiters in der Sattelspule nicht zu verringern.

[0013] Die mit dieser Ausgestaltung der Spulenwicklung verbundenen Vorteile sind insbesondere darin zu sehen, dass eine effektive feldmäßige Nutzung des Supraleitermaterials von bereits fertigen Bandleitern zu erreichen ist, weil die geraden Teile der Wicklung in einem Bereich liegen, in dem mehr Leistung bei gleichem mengenmäßigen Einsatz an Bandleitermaterial erreicht werden kann. Außerdem wird eine kompakte Anordnung der Wicklungen ermöglicht, so dass entsprechend kleinere Durchmesser des die Rohrmantelfläche bildenden Bereichs erreicht werden können.

[0014] Die erfindungsgemäße Spulenwicklung zeichnet sich insbesondere auch dadurch aus, dass ihr wenigstens einer Leiter im Bereich der stirnseitigen Wicklungsabschnitte mit seiner Flachseite gegenüber einer Normalen auf der Mantelfläche in Richtung auf das Wicklungszentrum der Spulenwicklung in besonderer Weise geneigt angeordnet ist. Mit einer derartigen Ausrichtung des Leiters kann vermieden werden, dass es bei der Formung der Wicklung zu unzulässigen Überdehnungen des Leiters kommt.

[0015] Vorteilhafte Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Spulenwicklung gehen aus den zugeordneten abhängigen Unteransprüchen hervor. Dabei kann die Ausführungsform der Spulenwicklung mit den Merkmalen eines dieser Unteransprüche oder vorzugsweise auch denen aus mehreren zugeordneten Unteransprüchen kombiniert werden.

[0016] So kann die Spulenwicklung besonders vorteilhaft mit jedem dehnungsempfindlichen bandförmigen Supraleiter ausgebildet sein. Unter einem dehnungsempfindlichen Supraleiter sei in diesem Zusammenhang jeder vorgefertigte Supraleiter verstanden, der nach seiner Herstellung beim Aufbau einer Sattelspule nach bekannten Verfahren einer Dehnung bzw. Biegung unterworfen würde, die zu einer merklichen Verschlechterung seiner supraleitenden Eigenschaften, insbesondere seiner kritischen Stromdichte I_c , um mindestens 5% gegenüber dem ungedehnten Zustand führen würde. Eine entsprechende Gefahr ist insbesondere bei den neuen oxidkeramischen Hoch- T_c -Supraleitern gegeben. Die Spulenwicklung kann deshalb bevorzugt mit wenigstens einem Hoch- T_c -Supraleiter mit BPSCCO- oder YBCO-Material ausgebildet sein.

[0017] Stattdessen kann der wenigstens eine bandförmige Supraleiter auch mit MgB_2 -Supraleitermaterial ausgebildet sein.

[0018] Vorteilhaft kann der wenigstens eine bandförmige Supraleiter zum Aufbau der Spulenwicklung ein Aspektverhältnis (Breite w /Dicke d) von mindestens 3, vorzugsweise mindestens 5 aufweisen. Gerade mit solchen Supraleitern sind nunmehr Spulenwicklungen mit ausgeprägter Sattelform herstellbar, ohne dass eine Beeinträchtigung ihrer supraleitenden Eigenschaften zu befürchten ist.

[0019] Von der rohrförmigen Mantelfläche kann ein Rohr mit einem kreisförmigen oder elliptischen Querschnitt, insbesondere eine Zylindermantelfläche (konkret oder fiktiv) gebildet werden.

[0020] Dabei kann die Rohrmantelfläche von einem die Wicklung tragenden rohrförmigen Körper gebildet sein. Stattdessen kann die Spulenwicklung auch selbsttragend ausgebildet sein. In letzterem Falle handelt es sich bei der Rohrmantelfläche also nur um eine fiktive, gedachte Fläche.

[0021] Gegebenenfalls kann von der rohrförmigen Mantelfläche auch ein Rohr mit einer gekrümmten Achse (konkret

oder fiktiv) gebildet werden, ohne dass es zu unzulässigen Überdehnungen des Leiters zu kommen braucht. D.h., die erfindungsgemäßen Maßnahmen sind nicht auf Sattelspulenwicklungen mit geraden seitlichen Wicklungsabschnitten beschränkt.

[0022] Im Hinblick auf eine Vermeidung unzulässiger Dehnungen/Biegungen des Supraleiters wird vorteilhaft vorgesehen, dass sich die jeweilige Umlauflänge in der Sattelform von der in der ebenen Spulenform um höchstens 0,4 %, vorzugsweise um höchstens 0,3 % unterscheidet. Unterhalb dieses Wertes ist eine Degradation bzgl. der Supraleitungseigenschaften des Leiters nicht zu befürchten.

[0023] Im Allgemeinen weist die Spulenwicklung eine radiale Höhe auf die mindestens 10 % des Rohrdurchmessers auf, um eine ausgeprägte Sattelform zu besitzen. Vorzugsweise beträgt die radiale Höhe mindestens 30 % des Rohrdurchmessers.

[0024] Bevorzugt kann die Spulenwicklung in einer rotierenden Maschine oder in einem Magneten eines Beschleunigers wie einem Gantry-Beschleunigermagneten angeordnet sein oder einen Teil dieser Vorrichtung bilden. Gerade für diese Vorrichtungen werden nämlich Wicklungen mit ausgeprägter Sattelform gefordert.

[0025] Die sich auf die Herstellung der Spulenwicklung beziehende Aufgabe wird mit den aus Anspruch 15 zu entnehmenden Maßnahmen gelöst. Demgemäß sollen die folgenden Schritte vorgesehen werden, nämlich

- Ausbildung der ebenen Spulenform aus dem wenigstens einen vorgefertigten bandförmigen Supraleiter,
- Verformung auf die rohrförmige Mantelfläche einer Biegevorrichtung zu der Sattelform mittels Pressens,
- Fixierung der Windungen in der Sattelform.

[0026] Das angegebene Herstellungsverfahren mit den Merkmalen des Wickelns einer flachen Spulenwicklung und anschließenden Formens zu einer Sattelspulenwicklung ist mit den Vorteilen verbunden, dass die ebene Wickeltechnik auf einfache Weise durchführbar ist. Entsprechende Wickelmaschinen benötigen nur eine Drehachse. Demgegenüber wären bei einer direkten Erstellung von gebogenen Sattelspulenwicklungen aufwendigere Wickelmaschinen mit mindestens zwei Drehachsen notwendig. Das Verfahren ermöglicht deshalb eine kostengünstige Wicklungsfertigung.

[0027] Vorteilhaft kann das Verfahren zur Herstellung einer entsprechenden Spulenwicklung zusätzlich noch folgendermaßen ausgestaltet sein:

So können bei der Ausbildung der ebenen Spulenform im Bereich der stirnseitigen Wicklungsabschnitte zwischen benachbarten Windungen Abstände vorgesehen werden derart, dass bei der und nach der Verformung jeweils die praktisch unveränderte Umlauflänge der einzelnen Windungen gegeben ist.

[0028] Außerdem können für die Ausbildung der ebenen Spulenform zur Beabstandung der benachbarten Windungen Abstandshalter eingebracht werden, die vor dem Verformungsschritt wieder entfernt werden. Durch die Verwendung von Abstandshaltern bei der Ausbildung der ebenen Spulenform können die Umlauflängen der einzelnen Windungen so eingestellt werden, dass deren Änderung bei der Verformung zur Sattelspulen die oben angegebenen Grenzwerte nicht überschreiten.

[0029] Zur Fixierung werden die Windungen zweckmäßig vergossen oder verklebt.

[0030] Die Erfindung wird nachfolgend an Hand der Zeichnung noch weiter erläutert, in der bevorzugte Ausführungsformen erfindungsgemäßer Spulenwicklungen bzw. einer Vorrichtung zu ihrer Herstellung angedeutet sind. Dabei zeigen jeweils in leicht schematisierter Form

- deren Figur 1 in Schrägansicht eine Rennbahnsulenwicklung als Ausgangsform erfindungsgemäßer Sattelspulenwicklungen,
- deren Figur 2 in Schrägansicht eine Anordnung mit zwei Sattelspulenwicklungen in ihrer Endform,
- deren Figuren 3 und 4 eine erste Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Sattelspulenwicklung in Querschnitts- bzw. Längsansicht,
- deren Figuren 5 und 6 in den Figuren 3 und 4 entsprechender Darstellung eine weitere Ausführungsform einer solchen Spulenwicklung,
- deren Figur 7 einen Wickelkopf der in der Figur 4 angedeuteten Sattelspulenwicklung in vergrößerter Ansicht,
- deren Figur 8 in einem Diagramm die Abhängigkeit des Verkippungswinkels von Leitern am Wickelkopf gemäß Figur 7 von dem Polwinkel sowie
- deren Figuren 9 und 10 eine Biegevorrichtung zur Herstellung einer erfindungsgemäßen Sattelspulenwicklung in Aufsicht bzw. im Querschnitt.

[0031] Dabei sind sich entsprechende Teile in den Figuren jeweils mit denselben Bezugszeichen versehen.

[0032] Erfindungsgemäß soll bei der Herstellung einer sattelförmigen Spulenwicklung von einer ebenen bzw. flachen

Spulenform vom Rennbahntyp ausgegangen werden. Entsprechende Spulenformen sind allgemein bekannt (vgl. z. B. DE 199 43 783 A1); ein Ausführungsbeispiel zeigt Figur 1. Die dort mit 2' bezeichnete Spulenwicklung hat gegenüberliegende längsseitige Wicklungsabschnitte 2a' und 2d' sowie dazwischen verlaufende stirnseitige, gebogene Wicklungsabschnitte 2b' und 2c'. Die Wicklung 2' soll mit einem oder mehreren bandförmigen Supraleitern erstellt sein. Zur Ausbildung der Spulenwicklung wird der jeweilige bandförmige Leiter hochkant, d.h. mit seiner Schmalseite zur Wicklungsebene um ein Wickel- bzw. Wicklungszentrum Z, beispielsweise um einen zentralen Wickelkern, gewickelt. Eine Umlauflänge des Leiters innerhalb einer beliebigen Windung einmal um 360° um das Zentrum Z herum bzw. einmal durch jeden der beiden längsseitigen Wicklungsabschnitte 2a', 2d' und der stirnseitigen Wicklungsabschnitte 2b', 2c' verlaufend soll in der Figur durch eine mit U bezeichnete gestrichelte Linie angedeutet sein. Bei Verwendung eines Bandleiters definieren dabei die beiden Kanten des Bandes jeweils eine Umlauflänge U1 bzw. U2. Im Falle der ebenen Wicklung sind diese beiden Umlauflängen von Natur aus gleich.

[0033] Im Folgenden wird zur Vereinfachung nur von der Umlauflänge U gesprochen, wobei aber stets die Umlauflängen U1 und U2 der Kanten gemeint sind.

[0034] Als Leitermaterial kommen prinzipiell alle Supraleitermaterialien in Frage, insbesondere solche, die dehnungsempfindlich sind. So kann z. B. der wenigstens eine bandförmige Supraleiter mit MgB_2 -Supraleitermaterial ausgebildet sein. Für das bevorzugte Ausführungsbeispiel ist eines der bekannten HTS-Materialien ausgewählt. Die Wicklung 2' ist deshalb mit einem oder mehreren bandförmigen HTS-Leitern ausgebildet, insbesondere vom $(\text{BiPb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{CuO}_x$ -Typ (Abkürzung: BPSCCO) oder vom $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ -Typ (Abkürzung: YBCO). Die HTS-Leiter haben dabei eine Breite w, die typisch größer 3 mm beträgt und meistens zwischen 3 und 5 mm liegt. Ihre Dicke d ist dabei sehr viel kleiner als die Breite w und liegt typisch unter 0,5 mm. Bevorzugt werden HTS-Leiter mit einem Aspektverhältnis (Breite w/Dicke d) von mindestens 3, vorzugsweise mindestens 5, verwendet.

[0035] Ausgehend von der ebenen Spulenform ist die erfindungsgemäße Sattelspulenwicklung nun so gestaltet, dass beide Umlauflängen U1 und U2 im Fall der dreidimensionalen Spulenwicklungsform höchstens einen Unterschied von 0,4 %, vorzugsweise 0,3 % oder noch besser 0,2 %, Längenänderung zu der Umlauflängen der ebenen Spule sowie auch relativ zueinander besitzen. Dieser Unterschied ist abhängig von dem jeweiligen Supraleiteraufbau und dessen Änderung der Supraleitungseigenschaften beim Biegen bzw. Dehnen. Er kann folglich auch noch unter dem angegebenen Wert liegen. Dabei lässt sich gewährleisten, dass auch über den ganzen Umlauf gesehen die lokale Dehnung bzw. Stauchung des Bandleiters im Vergleich zur ebenen Spule höchstens 0,4 %, vorzugsweise 0,3 % oder noch besser 0,2 % beträgt. Da erfindungsgemäß die Umlauflänge U des Leiters in den einzelnen Windungen gegenüber der aus der ebenen Rennbahnsulenwicklung zu formenden Sattelspulenwicklung praktisch unverändert bleiben soll, bedeutet dies eine konkrete Vorgabe der einzelnen Umlauflängen U für die Rennbahnsulenwicklung. D.h., dass bei der erfindungsgemäßen Spulenwicklung die konkret zu wählenden Umlauflängen für den oder die Leiter in den einzelnen Windungen durch die entsprechende Länge der jeweiligen Windung in der Sattelform vorgegeben ist und davon abhängig die Umlauflänge für die einzelnen Windungen in der ebenen Rennbahnsulenform festgelegt ist. Das hat zur Folge, dass in der Rennbahnsulenform die Leiterwindungen im Bereich der stirnseitigen Wicklungsabschnitte 2b', 2c' verhältnismäßig locker nebeneinander liegen müssen, also nicht starr miteinander verbunden sein dürfen.

[0036] Bei der in Figur 2 gezeigten Anordnung mit zwei Sattelspulen 2 und 3 wird von bekannten Ausführungsformen von Dipolmagneten ausgegangen, wie sie z. B. für Strahlführungsmagnete in Beschleunigeranlagen der Hochenergiephysik zum Einsatz kommen. Eine entsprechende Anordnung ist auch für einen Rotor einer elektrischen Maschine von Vorteil. Die einzelnen sattelförmigen Spulenwicklungen befinden sich dabei auf einer Zylindermantelfläche Mf, die beispielsweise durch einen Hohlzylinder 4 gebildet wird. Falls auf einen derartigen Hohlzylinder als Träger für die Spulenwicklungen verzichtet werden kann, ist die Mantelfläche Mf als nur "gedachte Mantelfläche" anzusehen. Jede der Spulenwicklungen 2 und 3 weist dabei in Richtung der Hohlzylinderachse A verlaufende, gerade Wicklungsabschnitte 2a, 2d (nicht sichtbar) bzw. 3a, 3d (nicht sichtbar) sowie gebogene, Wickelköpfe bildende Wicklungsabschnitte 2b, 2c bzw. 3b, 3c an gegenüberliegenden Stirnseiten.

[0037] Nachfolgend werden Größen von Ausführungsformen solcher Sattelspulenwicklungen zugrunde gelegt, die aus den Figuren 3 bis 7 hervorgehen. Gemäß den Figuren 3 und 4 enthält z. B. die ausgewählte Spulenwicklung 3 gerade Spulenabschnitte 3a der axialen Länge G und dreidimensional gebogene Wickelköpfe in stirnseitigen Wicklungsabschnitten 3b und 3c jeweils der axialen Länge L. Die Spulenwicklung befindet sich dabei auf einer Zylindermantelfläche Mf des Durchmessers D. Dabei unterscheiden sich die Ausführungsformen nach den Figurenpaaren 3, 4 und 5, 6 im Wesentlichen durch die Höhe h der sattelförmigen Spulenwicklung 3. Die Größe h stellt dabei den maximalen Wert dar, um den sich die Wickelköpfe aus der Ebene der ursprünglichen Rennbahnsulenwicklung bzw. aus der Ebene der längsseitigen Wicklungsteile vor und nach der Ausbildung der Sattelform erheben. Dieser Wert sollte im Allgemeinen mindestens 10 % des Durchmessers D des Rohres mit der Rohrmantelfläche Mf ausmachen und kann beispielsweise mindestens 40 % dieser Größe betragen. Gemäß dem Ausführungsbeispiel nach den Figuren 3 und 4 ist $h \approx \frac{1}{2}D$; d.h., die Wicklung liegt mit ihrer äußersten Windungen W_i in der Mitte, d.h. am Äquator der Zylinderfläche. Demgegenüber ist gemäß den Figuren 5 und 6 die Zylindermantelfläche Mf mit den Leitern mit 13 bezeichneten Sattelspulenwicklung nur soweit bewickelt, dass ihre äußersten Windungen W_i oberhalb der Äquatorebene des Zylinders liegen. Hier ist

demnach die radiale Wicklungshöhe h kleiner als D/2. Bevorzugt sollte eine radiale Höhe h von mindestens 10 % des Rohrdurchmessers D gewählt werden.

[0038] In dem Ausschnitt zu den beiden Figurenpaaren 3, 4 und 5, 6 ist der bandförmige HTS-Leiter mit 5 bezeichnet. Mit ihm ist die jeweilige Sattelspulenwicklung so erstellt, dass seine Schmalseite 5a der Zylindermantelfläche M_f zugewandt ist (vgl. insbesondere die Figuren 3 und 5).

[0039] Wie aus den Figuren 3 bis 6 ferner hervorgeht, stehen die einzelnen HTS-Leiter im Scheitelpunkt der stirnseitigen Wicklungsabschnitte 3b, 3c bzw. der Wickelköpfe nicht exakt senkrecht auf der Zylindermantelfläche M_f, sondern sind gegenüber der Normalen N auf dieser Fläche um einen Neigungswinkel β nach innen auf das Wickelzentrum Z zu geneigt. Dies ist eine Folge der erfindungsgemäßen Ausbildung der Spulenwicklung.

[0040] Der gezeigten Spulengeometrie sei ein rechtwinkliges x-y-z-Koordinatensystem zugeordnet, wobei die x-Achse in der Äquatorialebene, die y-Achse senkrecht dazu und die z-Achse in axialer Richtung der Zylindermantelfläche gerichtet sind (vgl. Figuren 3 und 4).

[0041] Nachfolgend werden nähere Ausführungen zu einer mathematischen Beschreibung einer entsprechenden Spulengeometrie gegeben:

Die Form der Wickelköpfe ist dadurch gegeben, dass die dreidimensionale Raumkurve des Bandleiters dadurch definiert ist, dass eine Halbellipse (allgemeiner Fall) bzw. ein Halbkreis (spezieller Fall einer Halbellipse mit zwei gleichen Halbachsen) auf die Zylinderoberfläche des Durchmessers D abgerollt wird. Die Halbellipse ist genau die Form des Wickelkopfs der ebenen Spule vor dem Biegen. Dadurch wird die Einhaltung der Umlauflängen gewährleistet.

[0042] Für einen Leiter, der in den geraden Teilen um einen Winkel Θ vom Pol (Richtung der y-Achse) entfernt ist, beträgt die erste Halbachse der Ellipse

$$a_i = \frac{\Theta \cdot D_i}{2}, \quad (\text{Gleichung 1})$$

die zweite Halbachse sei b = L_i (im Spezialfall des Halbkreises gilt a = b, d.h. L_i = Θ · D_i/2). Im Allgemeinfall kann dies in Form von

$$b_i = L_i = e \cdot \frac{\Theta \cdot D_i}{2} \quad (\text{Gleichung 2})$$

ausgedrückt werden, wobei der Faktor e das Verhältnis der beiden Halbachsen beschreibt. Dies gilt für die innere Kante des Leiters (Index "i"), die sich auf dem Zylinderdurchmesser D_i befindet. Die Leiterlänge für die Innenkante beträgt damit näherungsweise

$$L_i \approx \frac{\pi}{2} \cdot (a_i + b_i) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Theta \cdot D_i}{2} \cdot (1+e) \quad (\text{Gleichung 3})$$

[0043] Die äußere Kante des gleichen Bandleiters (Index "a") befindet sich an den geraden Stücken auf dem Zylinderdurchmesser

$$D_a \approx D_i + 2w, \quad (\text{Gleichung 4})$$

wobei w die Breite des Bandleiters ist.

[0044] Dieser größere Zylinderdurchmesser entspricht einer ersten Halbachse von

$$A_a = \frac{\Theta \cdot D_a}{2} \approx \frac{\Theta \cdot (D_i + 2w)}{2} \quad (\text{Gleichung 5})$$

[0045] Bei gleicher zweiter Halbachse (b_a = b_i) würde dies zu einem längeren Weg der äußeren Kante gegenüber der

inneren Kante führen, d.h. der Bandleiter würde unzulässig überdehnt werden. Die unzulässige Dehnung wird vermieden, indem im Wickelkopf der Bandleiter um einen Winkel β nach innen hin auf das Wicklungszentrum Z verkippt bzw. geneigt wird. Dies verkürzt die zweite Halbachse auf

$$b_a = L_a = b_i - w \cdot \sin \beta \quad (\text{Gleichung 6})$$

[0046] Der Verkipps- oder Neigungswinkel β stellt sich dabei so ein, dass die Außenkante annähernd keine Längung gegenüber der Innenkante erfährt.

[0047] Unter Vernachlässigung der Biege- und Torsionssteifigkeiten beträgt der dafür berechnete Verkippswinkel

$$\beta_{\text{theo}} = \arccos \left[\frac{4 - \Theta^2}{4 + \Theta^2} \right] \quad (\text{Gleichung 7})$$

[0048] Dies hat zur Folge, dass sich der Verkipps- oder Neigungswinkel β an den stirnseitigen Wickelköpfen von Windung zu Windung ändert, und zwar vom Zentrum Z der Windung nach außen hin leicht zunehmend. Aus Figur 7 ist dieser Sachverhalt ersichtlich, in dieser Figur ist ein Ausschnitt eines stirnseitigen Wicklungsabschnittes bzw. Wickelkopfes 3b der in Figur 4 gezeigten Wicklung 3 ersichtlich. Aus zeichnerischen Gründen ist wie in Figur 4 die Anzahl der dargestellten Leiter-Windungen W_j (mit $j = 1 \dots 4$) auf die Zahl "4" beschränkt, wobei die innerste Leiterwindung mit W_1 und die äußerste mit W_4 bezeichnet sind. Im Scheitelpunkt des stirnseitigen Wicklungsabschnittes 3b ist dabei der Neigungswinkel β_1 der inneren Leiterwindung W_1 kleiner als der Neigungswinkel β_4 der äußeren Leiterwindung W_4 .

[0049] Die Verkipfung des Bandleiters wird nun dadurch erreicht, dass der Leiter im Wickelkopf entlang seiner Längsachse toridiert wird. Diese Torsion tritt neben der Biegung als zusätzliche mechanische Belastung des Leiters auf.

[0050] Die Biege- und Torsionssteifigkeiten bekannter HTS-Bandleiter können mit Hilfe eines Korrekturfaktors $k \approx 0,5$ bis 1,5 - vorzugsweise $k \approx 0,5$ bis 1,0 - berücksichtigt werden. Der berechnete Verkippswinkel beträgt dann

$$\beta_{\text{theo}} = k \cdot \arccos \left[\frac{4 - \Theta^2}{4 + \Theta^2} \right] \quad (\text{Gleichung 8})$$

[0051] Die Figur 8 zeigt in einem Diagramm mit Gleichung 8 berechnete Verkippswinkel β_{theo} und den an verschiedenen Sattelspulenwicklungen gemessenen Verkippswinkel β jeweils in Abhängigkeit von dem Polwinkel Θ . Dabei liegt der durchgezogenen Linie I die Berechnung mit einem Korrekturfaktor $k = 1$, der gestrichelten Linie II die Berechnung mit einem Korrekturfaktor $k = 0,7$ und der strichpunktierten Linie III die Berechnung mit einem Korrekturfaktor $k = 0,5$ zugrunde. Die Messwerte sind als quadratische Punkte $\blacksquare$ eingetragen.

[0052] Die geometrische Auslegung der Spulenwicklung (Zylinderdurchmesser D, Polwinkel Θ für die Windungen, Halbachsenverhältnis e) erfolgt dabei so, dass die jeweils leiterspezifischen Grenzbelastungen

- kritischer Krümmungsradius R_c bzw. Krümmungsdehnung ε_{cR}
- kritische Torsion θ_c bzw. Torsionsdehnung $\varepsilon_{c\theta}$ nicht überschritten werden. Als Beispiele sollen folgende Grenzbelastungen für einen kommerziellen BPSCCO-Leiter gelten:
- kritische Biegebelastung: $R_c \approx 3 \text{ cm}$ bzw. $\varepsilon_c \approx 0,4 \%$
- kritische Torsionsbelastung: $\theta_c \approx 2500^\circ/\text{m}$ bzw. $\varepsilon_{c\theta} \approx 0,2 \%$.

[0053] Unter Zugrundelegung einer entsprechenden Spulengeometrie weist eine sattelförmige Spulenwicklung nach der Erfindung folgende charakteristische Eigenschaften auf:

- Die dreidimensionale Krümmung der Wickelköpfe wird durch Biegung der Bandleiter für die flache Kante (so genannte "gute" Biegerichtung) und Torsion des Leiters entlang der Leiterachse erzielt.
- Die lokal auftretenden Biegeradien und Torsionen liegen innerhalb der kritischen Belastungsgrenzen, ab denen eine irreversible Schädigung der supraleitenden Eigenschaften auftritt.
- Alle Windungen W_j der Spulenwicklung liegen in den Wickelköpfen oberhalb einer gewissen Mindesthöhe h, wodurch

eine große Apertur erreicht wird. Die Höhe h hängt von dem Bewicklungsgrad der Spulenwicklung ab (siehe Unterschiede zwischen den Figurenpaaren 3, 4 und 5, 6).

- In den geraden Abschnitten der Wicklung liegen die flachen Seiten der Bandleiter annähernd in radialer Richtung mit Bezug auf die zylindrische Form der Spulenwicklung.
- In den Wickelköpfen besitzen die Bandleiter eine gewisse Neigung um einen Winkel β nach innen (siehe Figuren 3 bis 7). Diese Neigung variiert für die unterschiedlichen Windungen. Durch diese Neigung wird erreicht, dass die "äußere Kante" des Bandleiters gegenüber den "inneren Kante" des Bandleiters keine unzulässige Dehnung erfährt, welche wiederum zu einer irreversiblen Schädigung der supraleitenden Eigenschaften führen würde.
- Auf ihrem Weg über den Wickelkopf beschreiben die HTS-Bänder der einzelnen Windungen eine dreidimensionale Raumkurve. Für die innere Kante ist diese dreidimensionale Raumkurve dadurch definiert, dass eine Halbellipse (allgemeiner Fall) bzw. ein Halbkreis (spezieller Fall) auf die Zylinderoberfläche abgerollt wird.

[0054] Zur Herstellung der oben beschriebenen Sattelspulenwicklung kann vorteilhaft folgendes Verfahren mit den einzelnen Verfahrensschritten 1. bis 5. angewandt werden:

1. In einem ersten Schritt wird zunächst eine ebene Rennbahnsulenwicklung gewickelt. Der Wickelprozess wird "trocken", d.h. ohne Zugabe von Vergussmaterial, durchgeführt. In den Wickelköpfen können dabei zwischen den Windungen je nach Bedarf Abstandshalter (z. B. biegsame Folien) mit einer Dicke A eingebracht werden. Aufgabe dieser Abstandshalter ist die Zunahme der Drahtlänge von einer Windung zur nächsten gezielt einzustellen. Befindet sich eine innere erste Windung auf dem Radius R , so beträgt die Leiterlänge in einem 90° Bogen $L_1 = \pi \cdot R$. Wickelt man nun auf diese erste Windung eine zweite Windung darauf und legt einen Abstandshalter der Dicke D ein, so beträgt die Länge der zweiten Windung nun $L_2 = \pi \cdot (R + \Delta + d)$. Die Längenänderung zwischen den Windungen beträgt damit $L_2 - L_1 = \pi(\Delta + d)$. Bei gegebener Dicke d der Bandleiter erlauben damit die Abstandshalter die gezielte Einstellung der Längenänderung.

2. Die Spulenwicklung wird in einem zweiten Schritt aus der Wickelmaschine entnommen und in eine Biegevorrichtung eingesetzt. Die Biegevorrichtung geht aus den Figuren 9 und 10 hervor und ist allgemein mit 7 bezeichnet. Sie weist einen Biegezyylinder 8 mit einem Polstück 9 auf, auf dem zunächst die flache Spulenwicklung 2' aufgesetzt wird, sowie an die Form der Mantelfläche M_f des Biegezyinders angepasste Pressstücke 11, 12 zum Formen der Spulenwicklung 2. Vor dem Biegen werden zunächst die Abstandshalter aus den Wickelköpfen entfernt.

3. In einem dritten Schritt werden nun die Presswerkzeuge auf die flache Spulenwicklung 2' abgesenkt. Die Presswerkzeuge verformen nun die anfänglich flache Spulenwicklung und drücken diese unter Anwendung von Biegekräften K auf die Oberfläche des Biegezyinders. Dadurch erreicht man die gewünschte Spulengeometrie in Sattelform.

4. In einem vierten Schritt muss die Spulenwicklung nun in ihrer gebogenen Form fixiert werden. Dies kann zum Beispiel durch Verguss der Spulenwicklung geschehen. Um ein Verkleben der Spulenwicklung in der Biegevorrichtung zu verhindern, besteht die Oberfläche der Biegevorrichtung z. B. aus Teflon, welches sich nicht mit Vergussmaterialien verbindet. Die Fixierung der Spulenwicklung könnte alternativ auch durch geeignet geformte Hilfswerkzeuge geschehen, die z. B. an die Spulenwicklung angeklemt oder geklebt werden. Damit könnte z. B. ein Verguss später außerhalb der Biegevorrichtung durchgeführt werden.

5. Die Spulenwicklung kann schließlich aus der Biegevorrichtung entfernt werden.

[0055] Bei einer nach diesem Verfahren mit bekanntem BPSCCO-Bandleitermaterial von der flachen Scheibenspulenwicklung bis hin zur fertig vergossenen und aus der Biegevorrichtung entnommenen Sattelspulenwicklung konnte keine Schädigung des Leiters festgestellt werden.

[0056] Ebenso gut kann nach diesem Verfahren eine erfindungsgemäße sattelförmige Spulenwicklung auch mit beschichteten YBCO-Leitern hergestellt werden. Es ist auch möglich, dass die Technologie auf zusammengesetzte Verbundleiter, insbesondere vom Röbbelleitertyp, angewandt wird, falls größere Spulenwicklungen erforderlich sind.

[0057] Bei den vorstehenden Ausführungsbeispielen wurde davon ausgegangen, dass sich die erfindungsgemäße Sattelspulenwicklung auf einer gegebenenfalls nur gedachten Mantelfläche M_f eines lang gestreckten Hohlzylinders wie z. B. des Rotors einer elektrischen Maschine wie eines Motors oder Generators befindet. Auch kann es sich um die Mantelfläche eines Magneten z. B. der Hochenergiephysik handeln. Die Ausgestaltung einer erfindungsgemäßen Sat-

telspulenwicklung und deren Herstellungsverfahren sind jedoch nicht unbedingt auf eine entsprechende Form der Mantelfläche beschränkt. So sind auch von der exakten Kreisform des Querschnitts eines Hohlzylinders abweichende Querschnittsformen wie z. B. eine mehr elliptische Querschnittsform ebenso gut möglich, ohne dass es zu einer unzulässigen Überdehnung der Supraleiter kommen muss. Auch ein gerader Verlauf der Achse A des Rohres mit der Mantelfläche Mf ist nicht zwingend einzuhalten. Es ist nämlich auch eine Rohrform mit gekrümmter Achse bekannt, die mit Sattelspulenwicklungen versehen sein können, die erfindungsgemäß ausgeführt sein können. So kommen bei bestimmten Beschleunigermagneten, z. B. Magneten für so genannte "Gantrys" von Beschleunigern zur Krebstherapie, gekrümmte Spulenwicklungen zum Einsatz. In diesem Fall sind die längsseitigen, für die vorstehenden Ausführungsbeispiele gerade angenommenen Wicklungsabschnitte in der Spulenebene gebogen, damit der Teilchenstrahl auf einer Kreisbahn laufen kann. D.h., die Achse A der rohrförmigen Mantelfläche, welche mit der Sattelspulenwicklung belegt ist, kann gegebenenfalls auch gekrümmt sein.

Patentansprüche

1. Sattelförmige Spulenwicklung (2, 3, 13), die aus einer ebenen Spulenform (2') vom Rennbahntyp auf eine Rohrmantelfläche (Mf) geformt ist, so dass sie axial verlaufende, längsseitige Wicklungsabschnitte (2a, 2d; 3a, 3d) und dazwischen verlaufende stirnseitige, Wickelköpfe bildende Wicklungsabschnitte (2b, 2c; 3b, 3c) aufweist, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Windungen (W_i) der Spulenwicklung
 - mit wenigstens einem bandförmigen Supraleiter (5) gebildet sind, der mit seiner Schmalseite (5a) der Rohrmantelfläche (Mf) zugewandt ist,
 - und in der Sattelform jeweils eine Umlauflänge aufweisen, die praktisch unverändert gegenüber der in einer ebenen Spulenform (2') ist, so dass auf der Rohrmantelfläche (Mf) der wenigstens eine bandförmige Leiter (5) in den Windungen (W_i) im Bereich der Scheitel der stirnseitigen Wicklungsabschnitte (2b, 2c; 3b, 3c) mit seiner Flachseite um einen Neigungswinkel (β) gegenüber einer Normalen (N) auf der Mantelfläche (Mf) in Richtung auf das Wicklungszentrum (Z) der Spulenwicklung geneigt angeordnet ist, wobei der Neigungswinkel (β_1) bei einer innen liegenden Windung (W_1) kleiner als bei einer außen liegenden Windung (W_4) ist.
2. Spulenwicklung nach Anspruch 1, **gekennzeichnet durch** eine Ausbildung mit wenigstens einem dehnungsempfindlichen bandförmigen Supraleiter (5).
3. Spulenwicklung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** der wenigstens eine bandförmige Supraleiter (5) mit Hoch- T_c -Supraleitermaterial ausgebildet ist.
4. Spulenwicklung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** der wenigstens eine Hoch- T_c -Supraleiter (5) mit BPSCCO-oder YBCO-Material ausgebildet ist.
5. Spulenwicklung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** der wenigstens eine bandförmige Supraleiter (5) mit MgB_2 -Supraleitermaterial ausgebildet ist.
6. Spulenwicklung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** wenigstens einen bandförmigen Supraleiter (5) mit einem Aspektverhältnis (Breite w/Dicke d) von mindestens 3, vorzugsweise mindestens 5.
7. Spulenwicklung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** von der rohrförmigen Mantelfläche (Mf) ein Rohr mit einem kreisförmigen oder elliptischen Querschnitt gebildet ist.
8. Spulenwicklung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Rohrmantelfläche (Mf) eine Zylindermantelfläche ist.
9. Spulenwicklung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** von der rohrförmigen Mantelfläche (Mf) ein Rohr mit einer gekrümmten Achse gebildet ist.
10. Spulenwicklung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Rohrmantelfläche (Mf) von einem die Wicklung tragenden rohrförmigen Körper gebildet ist.
11. Spulenwicklung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich die jeweilige Umlauflänge (U) in der Sattelform von der in der ebenen Spulenform um höchstens 0,4 %, vorzugsweise um höchstens

tens 0,3 % unterscheidet.

12. Spulenwicklung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** eine radiale Höhe (h), die mindestens 10 % des Rohrdurchmessers (D) beträgt.

13. Spulenwicklung nach Anspruch 12, **gekennzeichnet durch** eine radiale Höhe (h), die mindestens 30 % des Rohrdurchmessers (D) beträgt.

14. Spulenwicklung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** eine Anordnung in einer rotierenden Maschine oder in einem Magneten eines Beschleuniger wie einem Gantry-Beschleunigermagneten.

15. Verfahren zur Herstellung einer Spulenwicklung nach einer der vorangehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** die folgenden Schritte, nämlich

- Ausbildung der ebenen Spulenform (2') aus dem wenigstens einen vorgefertigten bandförmigen Supraleiter (5),
- Verformung auf die rohrförmige Mantelfläche (Mf) einer Biegevorrichtung (7) zu der Sattelform mittels Pressens,
- Fixierung der Windungen (W_i) in der Sattelform.

16. Verfahren nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei der Ausbildung der ebenen Spulenform (2') im Bereich der stirnseitigen Wundlungsabschnitte (2b', 2c') zwischen benachbarten Windungen Abstände vorgesehen werden derart, dass bei der und nach der Verformung die praktisch unveränderte Umlauflänge (U) der einzelnen Windungen (W_i) gegeben ist.

17. Verfahren nach Anspruch 16, **dadurch gekennzeichnet, dass** für die Ausbildung der ebenen Spulenform zur Beabstandung der benachbarten Windungen (W_i) Abstandshalter eingebracht werden, die vor dem Verformungsschritt wieder entfernt werden.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 15 bis 17, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Fixierung die Windungen (W_i) vergossen oder verklebt werden.

Claims

1. Saddle-shaped coil winding (2, 3, 13) which is formed from a flat coil shape (2') of the racetrack type on a tube outer surface (Mf) such that it has axially running winding sections (2a, 2d; 3a, 3d) on the longitudinal sides and winding sections (2b, 2c; 3b, 3c) which run between them at the end and form end windings, **characterized in that** the windings (W_i) of the coil winding

- are formed with at least one superconductor (5) in the form of a strip, whose narrow face (5a) faces the tube outer surface (Mf)
- and each have a circumferential length in the saddle shape which is virtually unchanged from that in a flat coil shape (2'), such that the at least one conductor (5) in the form of a strip is arranged on the tube outer surface (Mf), in the turns (W_i) in the area of the apex of the end winding sections (2b, 2c; 3b, 3c) with its flat face inclined through an inclination angle (β) with respect to a normal (N) on the outer surface (Mf) in the direction of the winding center (Z) of the coil winding, with the inclination angle (β_1) of an inner turn (W_1) being less than that of an outer turn (W_4).

2. Coil winding according to Claim 1, **characterized by** an embodiment with at least one strain-sensitive superconductor (5) in the form of a strip.

3. Coil winding according to Claim 1 or 2, **characterized in that** the at least one superconductor (5) in the form of a strip is formed using high- T_c superconductor material.

4. Coil winding according to Claim 3, **characterized in that** the at least one high- T_c superconductor (5) is formed using BPSCCO or YBCO material.

5. Coil winding according to Claim 1 or 2, **characterized in that** the at least one superconductor (5) in the form of a strip is formed using MgB_2 superconductor material.

6. Coil winding according to one of the preceding claims, **characterized by** at least one superconductor (5) in the form of a strip, with an aspect ratio (width w/thickness d) of at least 3, and preferably at least 5.
7. Coil winding according to one of the preceding claims, **characterized in that** a tube with a circular or elliptical cross section is formed from the tubular outer surface (Mf).
8. Coil winding according to one of the preceding claims, **characterized in that** the tube outer surface (Mf) is a cylindrical outer surface.
9. Coil winding according to one of Claims 1 to 7, **characterized in that** a tube with a curved axis is formed from the tubular outer surface (Mf).
10. Coil winding according to one of the preceding claims, **characterized in that** the tube outer surface (Mf) is formed by a tubular body to which the winding is fitted.
11. Coil winding according to one of the preceding claims, **characterized in that** the respective circumferential length (U) in the saddle shape is less by at most 0.4%, and preferably by at most 0.3%, than that in the flat coil shape.
12. Coil winding according to one of the preceding claims, **characterized by** a radial height (h) which is at least 10% of the tube diameter (D).
13. Coil winding according to Claim 12, **characterized by** a radial height (h) which is at least 30% of the tube diameter (D).
14. Coil winding according to one of the preceding claims, **characterized by** an arrangement in a rotating machine, or in a magnet of an accelerator such as a gantry accelerator magnet.
15. Method for production of a coil winding according to one of the preceding claims, **characterized by** the following steps, specifically
 - formation of the flat coil shape (2') from the at least one prefabricated superconductor (5) in the form of a strip,
 - deformation to the tubular outer surface (Mf) of a bending apparatus (7) to form the saddle shape by means of pressing,
 - fixing of the turns (W_i) in the saddle shape.
16. Method according to Claim 15, **characterized in that**, during the formation of the flat coil shape (2'), gaps are provided between adjacent turns in the area of the end winding sections (2b', 2c') such that, during and after the deformation, this results in the virtually unchanged circumferential length (U) of the individual turns (W_i).
17. Method according to Claim 16, **characterized in that** spacers are introduced in order to produce the gaps between the adjacent turns (W_i) for the formation of the flat coil shape, and are removed again before the deformation step.
18. Method according to one of Claims 15 to 17, **characterized in that** the turns (W_i) are encapsulated or adhesively bonded for fixing.

Revendications

1. Enroulement (2, 3, 13) de bobine en forme de selle, qui est formé d'une forme (2') plane de bobine du type piste sur une surface (Mf) tubulaire d'enveloppe, de manière à avoir des tronçons (2a, 2d; 3a, 3d) d'enroulement du côté longitudinal s'étendant axialement et s'étendant entre eux des tronçons (2b, 2c; 3b, 3c) d'enroulement du côté frontal formant des têtes de bobine, **caractérisé en ce que** les spires (W_i) de l'enroulement de bobine
 - sont formées d'au moins un supraconducteur (5) en forme de ruban, qui, par son petit côté (5a), est tourné vers la surface (Mf) tubulaire d'enveloppe,
 - et ont, dans la forme en selle, respectivement une longueur de tour, qui est pratiquement inchangée par rapport à la forme (2') plane de bobine, de sorte que, sur la surface (Mf) tubulaire d'enveloppe, le au moins un supraconducteur (5) en forme de ruban est, dans les spires (W_i) dans la région du sommet des tronçons (2b, 2c, 3b,

3c) d'enroulement du côté frontal, incliné par son côté plat d'un angle (β) d'inclinaison par rapport à une normale (N) à la surface (Mf) d'enveloppe dans la direction du centre (Z) de l'enroulement de bobine, l'angle (β_1) d'inclinaison pour une spire (W_1) se trouvant à l'intérieur étant plus petit que pour une spire (W_4) se trouvant à l'extérieur.

5

2. Enroulement de bobine suivant la revendication 1, **caractérisé en ce qu'il** est constitué d'au moins un supraconducteur (5) en forme de ruban sensible à la dilatation.

10

3. Enroulement de bobine suivant la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** le au moins un supraconducteur (5) en forme de ruban est en un matériau supraconducteur à T_c haute.

15

4. Enroulement de bobine suivant la revendication 3, **caractérisé en ce que** le au moins un supraconducteur (5) à T_c haute est en un matériau de BPSCCO ou d'YBCO.

20

6. Enroulement de bobine suivant l'une des revendications précédentes, **caractérisé par** au moins un supraconducteur (5) en forme de ruban ayant un rapport d'aspect (largeur w/épaisseur d) d'au moins 3, de préférence d'au moins 5.

25

7. Enroulement de bobine suivant l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'un** tube de section transversale circulaire ou elliptique est formé par la surface (Mf) tubulaire d'enveloppe.

8. Enroulement de bobine suivant l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la surface (Mf) tubulaire d'enveloppe est une surface cylindrique d'enveloppe.

30

9. Enroulement de bobine suivant l'une des revendications 1 à 7, **caractérisé en ce qu'un** tube ayant un axe incurvé est formé par la surface (Mf) tubulaire d'enveloppe.

35

10. Enroulement de bobine suivant l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la surface (Mf) tubulaire d'enveloppe est formée d'un corps tubulaire portant l'enroulement.

11. Enroulement de bobine suivant l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la longueur (U) de tour respective dans la forme en selle se différencie de celle dans la forme plane de bobine d'au plus 0,4 %, de préférence d'au plus 0,3%.

40

12. Enroulement de bobine suivant l'une des revendications précédentes, **caractérisé par** une hauteur (h) radiale, qui représente au moins 10% du diamètre (D) du tube.

13. Enroulement de bobine suivant la revendication 12, **caractérisé par** une hauteur (h) radiale, qui représente au moins 30% du diamètre (D) du tube.

45

14. Enroulement de bobine suivant l'une des revendications précédentes, **caractérisé par** un agencement dans une machine tournante ou dans un aimant d'un accélérateur, comme un aimant d'accélérateur de Gantry.

15. Procédé de fabrication d'un enroulement de bobine suivant l'une des revendications précédentes, **caractérisé par** les stades suivants, à savoir

50

- formation de la forme (2') plane de bobine en le au moins un supraconducteur (5) en forme de ruban préfabriqué,
- déformation sur la surface (Mf) tubulaire d'enveloppe d'un dispositif (7) de flexion en la forme de selle au moyen d'un pressage,
- immobilisation des spires (W_i) en la forme de selle.

55

16. Procédé suivant la revendication 15, **caractérisé en ce que**, dans la formation de la forme (2') plane de bobine dans la région des tronçons (2b', 2c') d'enroulement du côté frontal, il est prévu, entre des spires voisines, des intervalles, de manière à avoir, à la déformation et après la déformation, la longueur (U) de tour pratiquement inchangée des diverses spires (W_i).

17. Procédé suivant la revendication 16, **caractérisé en ce que**, pour la formation de la forme plane de bobine, on introduit, pour la mise à distance des spires (W_i) voisines, des entretoises, qui sont retirées avant le stade de déformation.

5 18. Procédé suivant l'une des revendications 15 à 17, **caractérisé en ce que**, pour l'immobilisation, on coule ou on colle les spires (W_i).

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

FIG 1

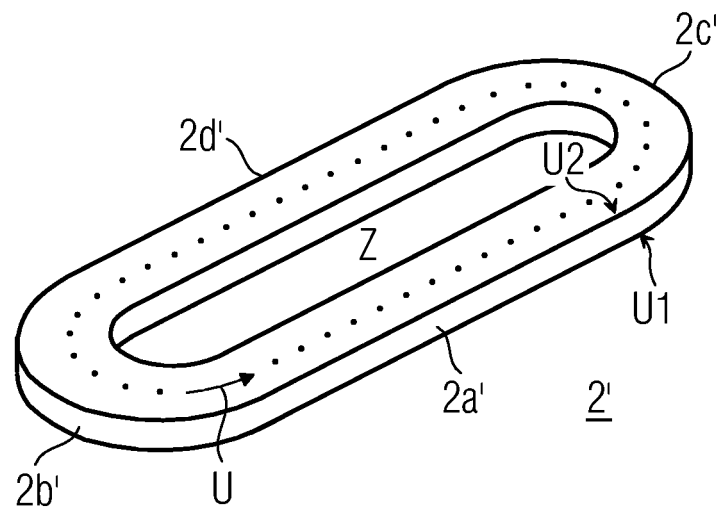


FIG 2

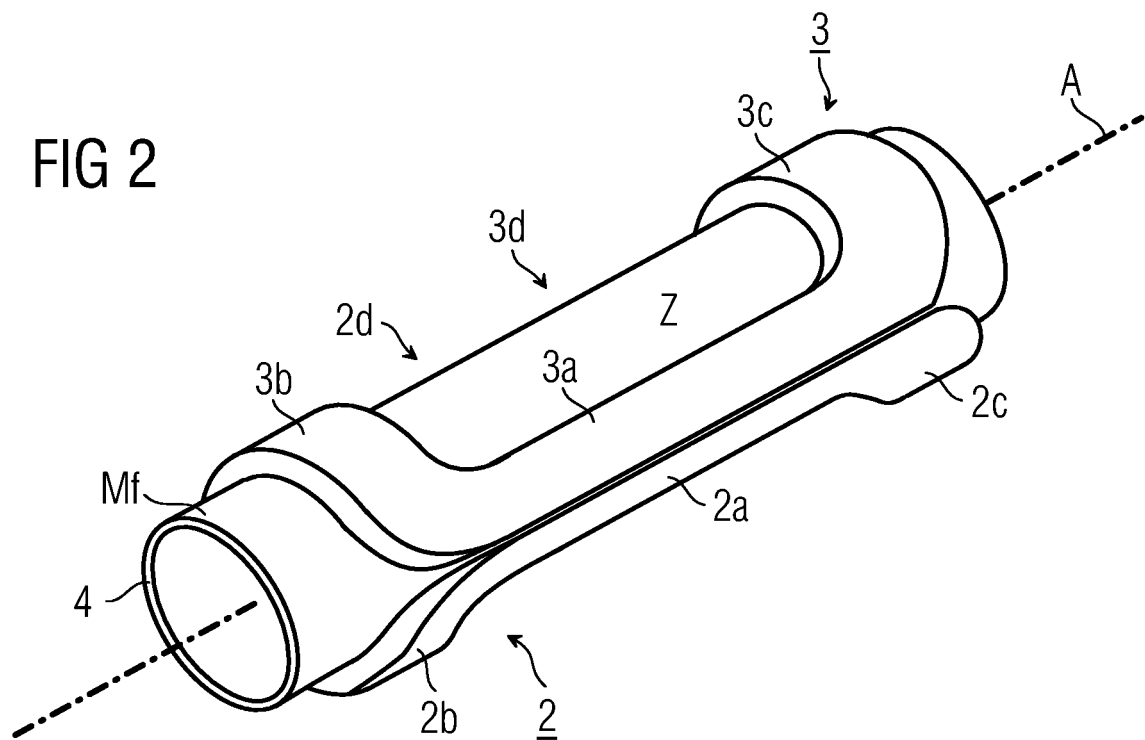


FIG 3

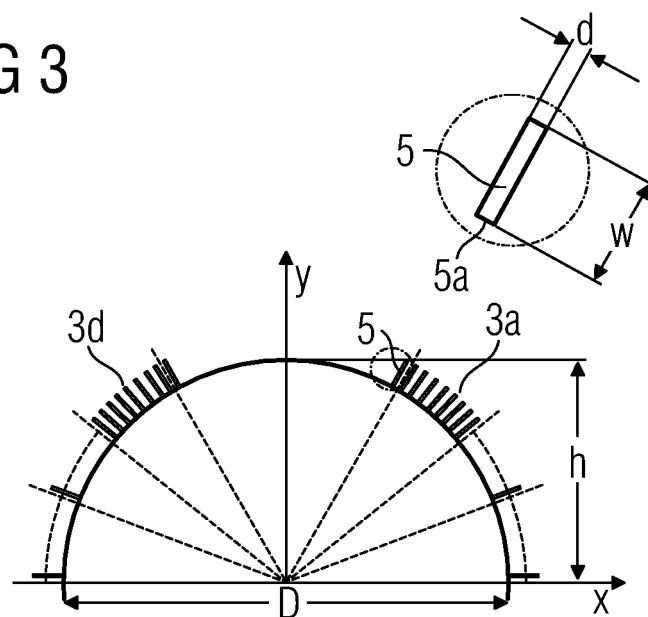


FIG 4

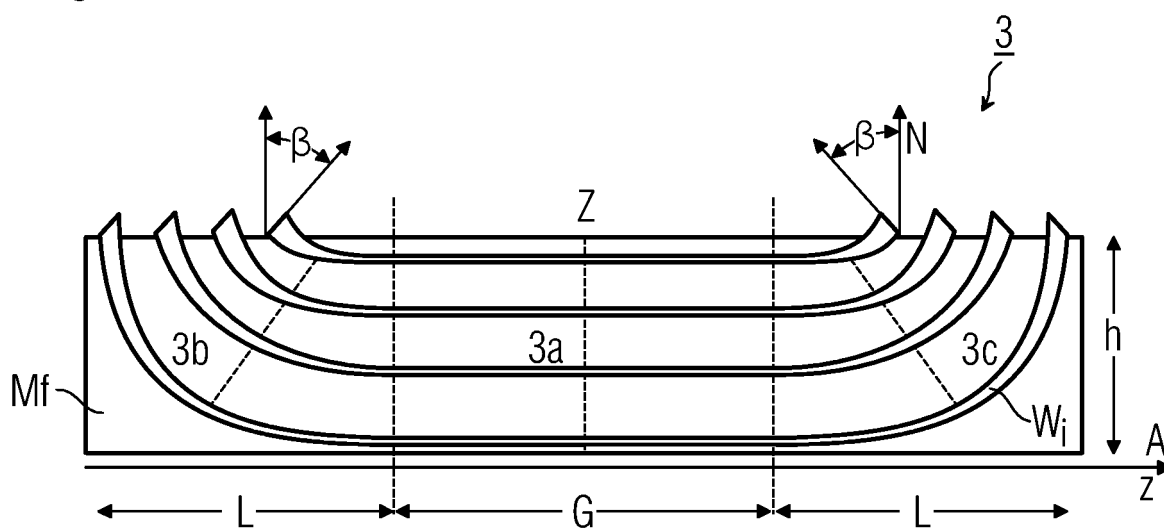


FIG 5

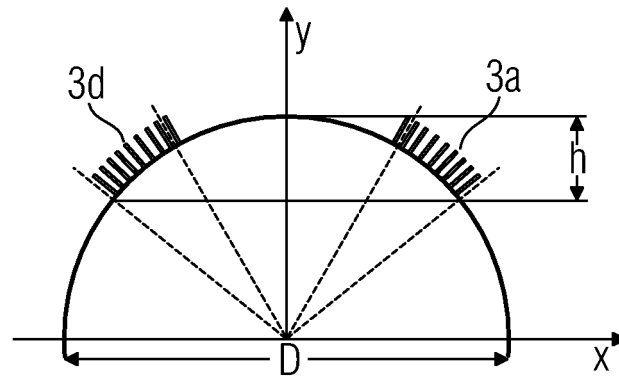


FIG 6

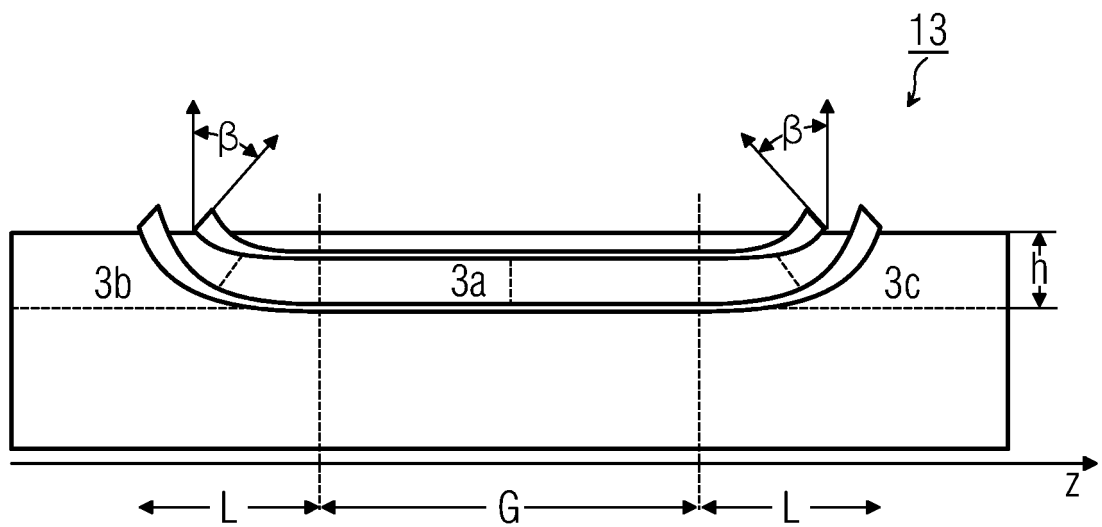


FIG 7

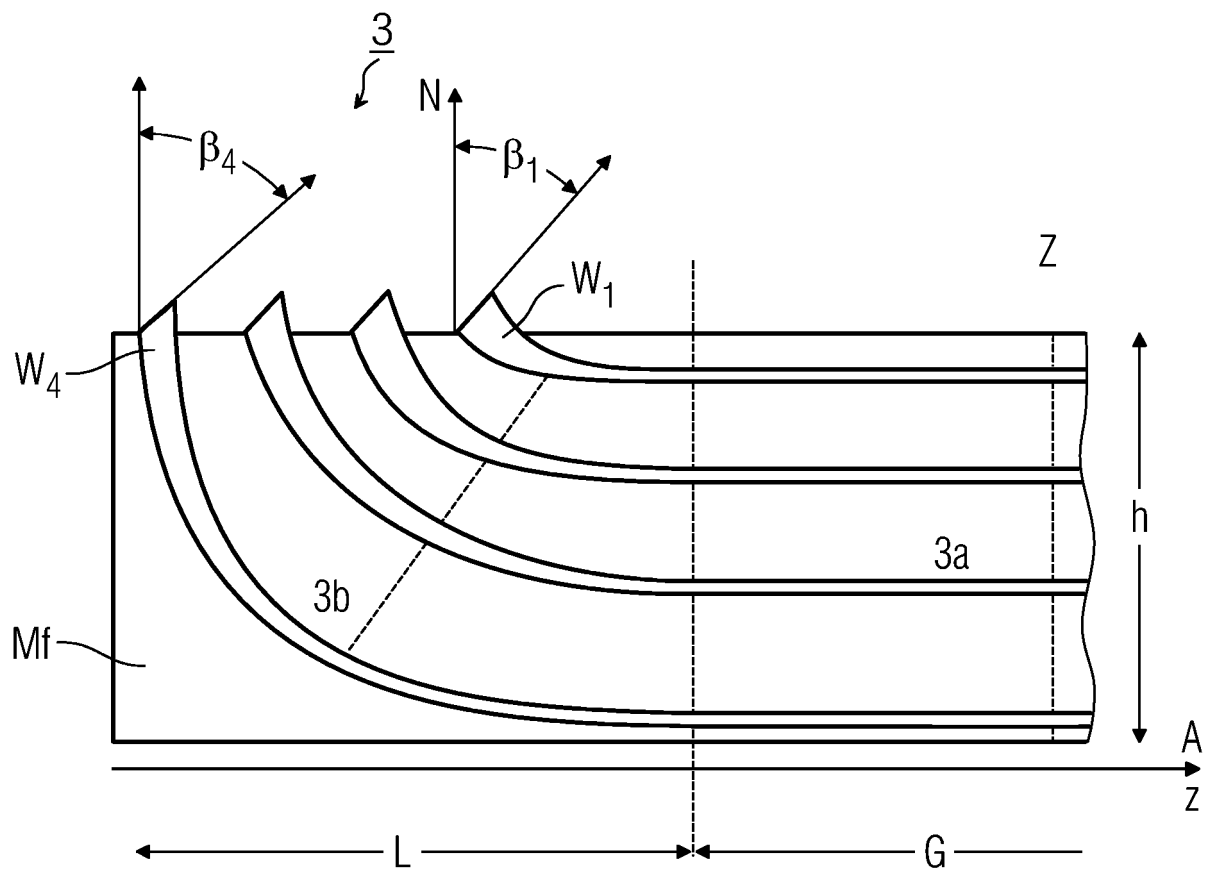


FIG 8

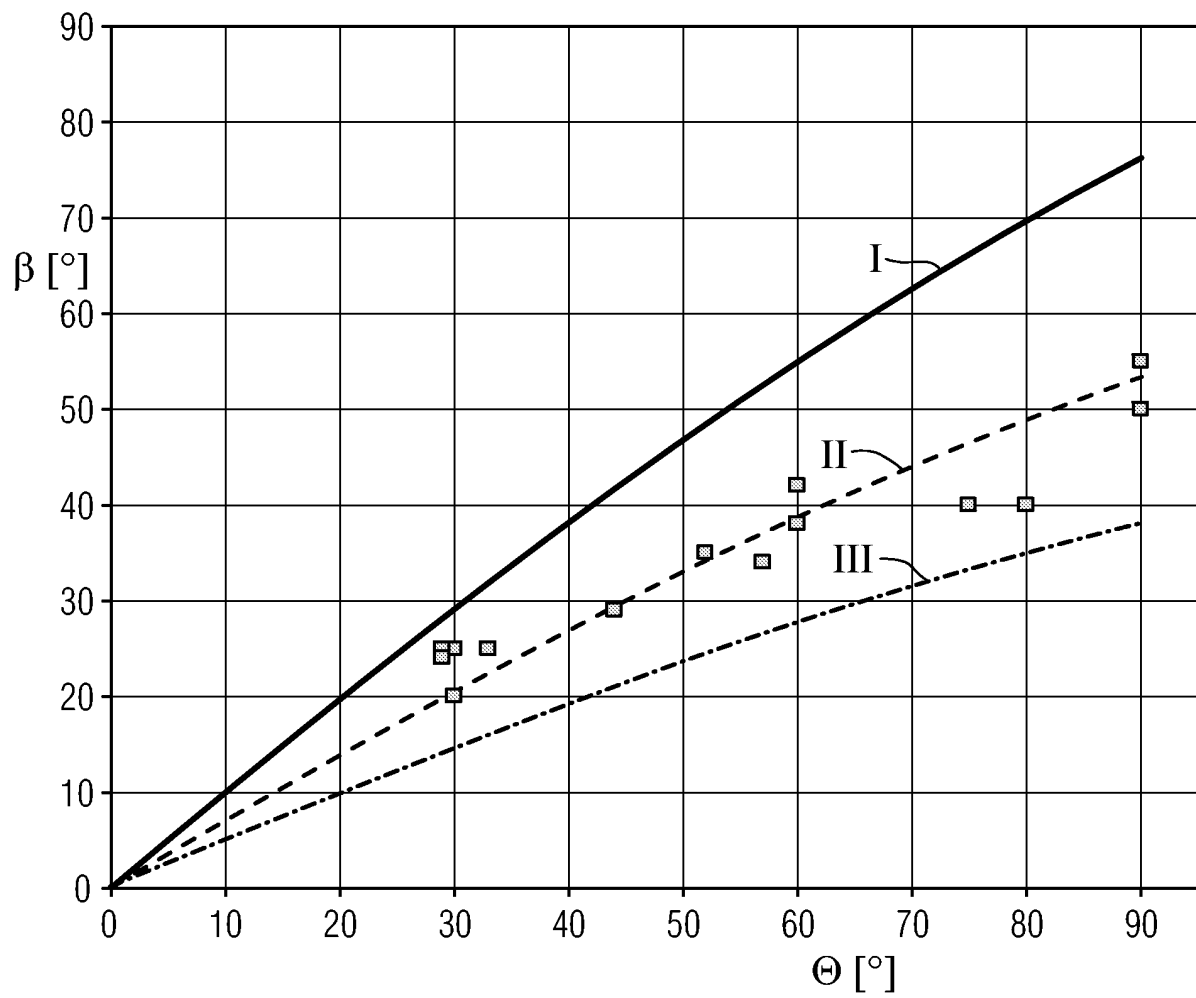


FIG 9

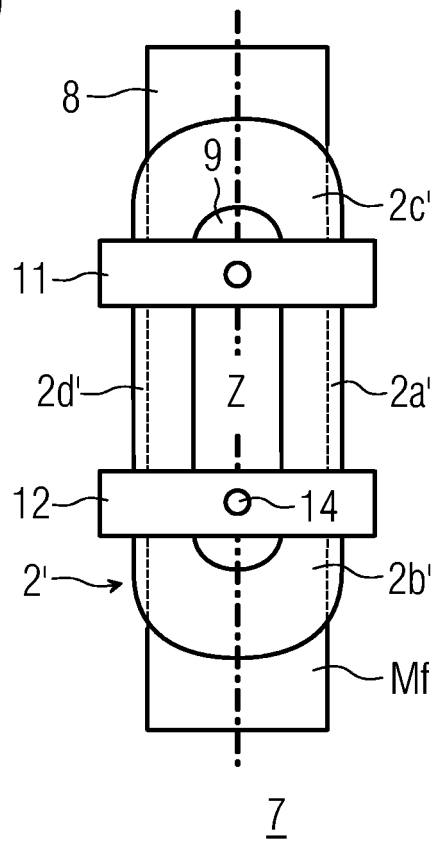
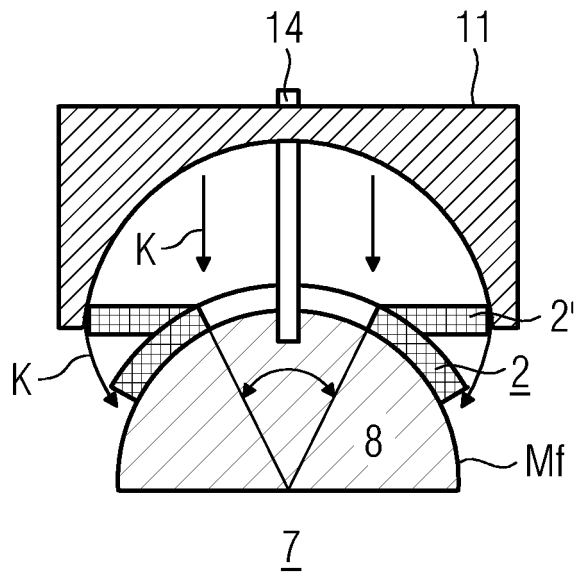


FIG 10



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

- JP 6196314 A [0001] [0003]
- JP 2003255032 A [0003]
- DE 19943783 A1 [0004] [0032]
- WO 0108173 A1 [0006]
- EP 1471363 A1 [0008]
- JP 52139955 A [0009]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Juni 1999, vol. 9 (2), 1197-1200 [0005]
- *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Juni 1999, vol. 9 (2), 293-296 [0007]