



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2004 043 988 B3** 2006.05.11

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2004 043 988.5**

(22) Anmeldetag: **11.09.2004**

(43) Offenlegungstag: –

(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **11.05.2006**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **H01F 6/06** (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 2 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:  
**Bruker BioSpin GmbH, 76287 Rheinstetten, DE**

(74) Vertreter:  
**Kohler Schmid Möbus Patentanwälte, 70565  
Stuttgart**

(72) Erfinder:  
**Roth, Gerhard, Dr., 76287 Rheinstetten, DE;  
Niemann, Volker, Dr., 75334 Straubenhardt, DE;  
Schlenga, Klaus, Dr., 76351  
Linkenheim-Hochstetten, DE**

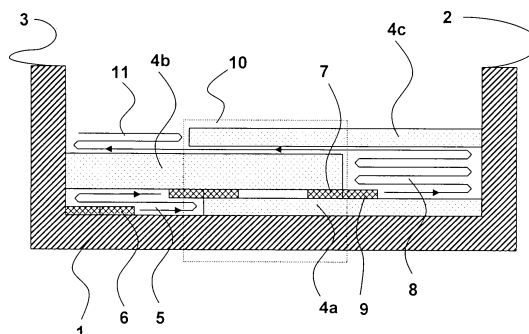
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

**DE 39 23 456 C2**

**US 52 93 524**

(54) Bezeichnung: **Supraleitfähige Magnetspulenordnung**

(57) Zusammenfassung: Eine supraleitfähige Magnetspulenordnung mit zumindest einer Sektion aus supraleitfähigem Bandleiter, welche in einer zylindrischen Wickelkammer (1) zwischen zwei Endflanschen (2, 3) mehrlagig, solenoidartig durchgehend gewickelt ist, ist dadurch gekennzeichnet, dass die Sektion einen axialen Bereich reduzierter Stromdichte (= Notch-Bereich (10)) aufweist, dass die Wickellagen (6, 9) axial unterschiedlich lange, mit Füllmaterial ausgefüllte, hohlzylindrische Blindbereiche (4a, 4b, 4c) aufweisen und dass radial aufeinander folgende Blindbereiche (4a, 4b, 4c) abwechselnd an jeweils einen der beiden Endflansche (2, 3) anliegen und jeweils durch mindestens eine durchgehende Wickellage (7) radial voneinander getrennt sind, wobei der axiale Überlappungsbereich der Blindbereiche (4a, 4b, 4c) den Notch-Bereich (10) bildet. Die erfindungsgemäße Vorrichtung realisiert somit eine Magnetspulenordnung mit einem Bandleiter, die zur Korrektur von Inhomogenitäten einen Notch-Bereich aufweist und bei der die mechanische Belastung auf den Bandleiter möglichst gering gehalten wird.



**Beschreibung****Aufgabenstellung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine supraleitfähige Magnetspulenordnung mit mindestens einer Sektion aus supraleitfähigem Bandleiter, welche in einer zylindrischen Wickelkammer zwischen zwei Endflanschen mehrlagig, solenoidartig durchgehend gewickelt ist.

**[0002]** Eine derartige Magnetspulenordnung ist aus dem Stand der Technik bekannt.

**[0003]** In Magnetspulenordnungen mit Tieftemperatursupraleitern (LTS) werden zur Homogenisierung kompakter Hochfeldmagnete häufig Notches zur Feldkorrektur eingesetzt. Ein herkömmlicher Notch-Bereich wird ausgeführt, indem zunächst die erste Notch-Wicklung auf einer Seite des Notches vollständig gewickelt wird. Anschließend wird der Draht scharf umgebogen und axial durch den Notch geführt. Auf der anderen Seite wird schließlich die zweite Notch-Wicklung gewickelt.

**[0004]** Höchste Feldstärken werden durch den Einsatz von Bandleitern aus Hochtemperatursupraleiter (HTS)-Material in den innersten Magnetspulenwindungen erzielt. Wegen der hohen mechanischen Empfindlichkeit dieser Bandleiter ist jedoch die Ausführung eines Notches nach herkömmlicher Technik in diesem Bereich nicht möglich. Insbesondere die Überführung des Bandleiters von einer Seite des Notches auf die andere mittels der oben beschriebenen scharfen Biegung mit entsprechend kleinem Krümmungsradius ist mit einem HTS-Bandleiter nicht realisierbar. Die mechanische Empfindlichkeit von Bandleitern ist hinsichtlich der Ausbildung eines Notch-Bereichs besonders deshalb problematisch, weil eine Beschädigung des HTS-Materials einen Defekt der gesamten Magnetspulenordnung nach sich ziehen würde und somit mit einem hohen Kostenaufwand verbunden wäre. Die Kompensation unerwünschter Inhomogenitäten bei HTS-Spulen muss daher mittels separater Korrekturspulen erfolgen.

**Stand der Technik**

**[0005]** Aus DE 39 23 456 C2 ist eine supraleitende Hochmagnetfeldspule bekannt, bei der im axialen Endbereich die Stromdichte derart verringert ist, dass die auf die Windungen wirkenden Kräfte klein gehalten werden.

**[0006]** US 5,293,524 beschreibt eine supraleitende Spulenordnung mit mehreren durch Abstandselemente getrennte Windungssektionen, wobei die Überführung des Drahtes von einer Sektion in eine benachbarte durch eine schräge Drahtführung erfolgt.

**[0007]** Aufgabe der Erfindung ist es daher, eine Magnetspulenordnung mit einem Bandleiter vorzuschlagen, die zur Korrektur von Inhomogenitäten einen Notch-Bereich aufweist, und bei der die mechanische Belastung auf den HTS-Bandleiter möglichst gering gehalten wird.

**[0008]** Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass die Sektion einen axialen Bereich reduzierter Stromdichte (= Notch-Bereich) aufweist, dass die Wicklungslagen axial unterschiedlich lange, mit Füllmaterial ausgefüllte, hohlzylindrische Blindbereiche aufweisen, und dass radial aufeinander folgende Blindbereiche abwechselnd an jeweils einen der beiden Endflansche anliegen und jeweils durch mindestens eine durchgehende Wickellage radial voneinander getrennt sind, wobei der axiale Überlappungsbereich der Blindbereiche den Notch-Bereich bildet.

**[0009]** Durch die abwechselnde Anordnung der Blindbereiche an einem der beiden Endflansche werden die Windungen jeweils nur in einem Wickelbereich links beziehungsweise rechts vom Notch-Bereich gewickelt. Diese Wicklungen in den verschiedenen Wicklungsbereichen werden jeweils mittels einer durchgehenden Wickellage miteinander verbunden, so dass die gesamte Notch-Wicklung durchgewickelt sein kann und keine Joints benötigt werden. Da sich im Überlappungsbereich der Blindbereiche lediglich die die Wicklungsbereiche verbindenden durchgehenden Wicklungen befinden, ist in diesem Bereich die Stromdichte gegenüber den Wicklungsbereichen reduziert und bildet einen Notch-Bereich, wobei eine Biegung des Bandleiters mit einem kleinen Krümmungsradius zur Überführung desselben von einem Wicklungsbereich in den nächsten vermieden wird.

**[0010]** Eine bevorzugte Ausführungsform sieht vor, dass der supraleitfähige Bandleiter ein Hochtemperatursupraleiter (=HTS) ist, und vorzugsweise silberstabilisiertes Bi-Sr-Ca-Cu-Oxid oder YBCO enthält. Hierbei kommen die Vorteile der erfindungsgemäßen Magnetspulenordnung besonders gut zur Geltung, da HTS-Leiter extrem spröde und daher besonders empfindlich gegenüber Verbiegungen mit keinen Krümmungsradien sind, die mit der vorliegenden Erfindung vermieden werden.

**[0011]** Um eine möglichst symmetrische Feldverteilung zu erreichen, ist bei einer besonders bevorzugte Ausführungsform der Magnetspulenordnung der Notch-Bereich gegenüber einer symmetrischen Anordnung derart axial verschoben, dass die durch die durchgehende Wickellage, welche Blindbereiche trennt, erzeugten Feldeffekte in den niedrigen Ordnungen, insbesondere in erster Ordnung ausgeglichen werden. Dabei werden die Längen der Blindbe-

reiche derart gewählt, dass die niedrigsten Ordnungen der asymmetrischen Feldfehler verschwinden.

**[0012]** Bei einer weiteren Ausführungsform ist der radial innerste Blindbereich einstückig mit der Wickelkammer ausgeführt ist. Hierdurch entfällt das Fixieren des radial innersten Blindbereichs an der Wickelkammer.

**[0013]** Eine besonders bevorzugte Ausführungsform der Erfindung sieht vor, dass radial außerhalb und/oder radial innerhalb des Notch-Bereichs Wicklungslagen zwischen den Endflanschen durchgewickelt sind. Das Gesamtmagnetfeld kann somit auf die gewünschte Stärke eingestellt werden. Bei radial innerhalb des Notch-Bereichs durchgewickelten Wicklungslagen kann der radial innerste Blindbereich jedoch nicht einstückig mit der Wickelkammer ausgeführt sein.

**[0014]** Vorzugsweise sind die axialen Längen der Blindbereiche auf ganzzahlige Vielfache der Windungen des Bandleiters abgestimmt. Somit umfasst eine Wicklungslage immer eine volle Anzahl an Windungen.

**[0015]** Für eine optimale Homogenisierung der Feldverteilung ist es vorteilhaft, wenn die Blindbereiche unterschiedliche axiale Längen und/oder radiale Dicken aufweisen. Die durch die einzelnen Blindbereiche bewirkte Kompensation kann so genau auf die Feldfehler des Gesamtmagneten abgestimmt werden.

**[0016]** Eine Ausführungsform der erfindungsgemäßen Magnetspulenordnung beinhaltet, dass die Blindbereiche als Hohlzylinder aus massivem Material ausgeführt sind. Abgesehen von dem radial innersten Blindbereich, der bereits einstückig mit der Wickelkammer ausgeführt sein kann, müssen in diesem Fall die weiteren Blindbereiche nachträglich aufgeschoben werden.

**[0017]** Eine alternative Ausführungsform sieht vor, dass die Blindbereiche als Teilschalen, vorzugsweise Halbschalen von Hohlzylindern ausgeführt sind. Dies ist insofern vorteilhaft, da derartige Halbschalen nach Aufwickeln der Wicklungen in einem Wickelbereich auf die entsprechende durchgehende Wicklung einfach aufgelegt werden können, ohne einen der die Wicklungsbereiche begrenzenden Endflansche zu entfernen.

**[0018]** Bei einer weiteren Ausführungsform der erfindungsgemäßen Magnetspulenordnung bestehen die Blindbereiche aus gewickelten Bändern. Dabei kann es sich beispielsweise um Blindwicklungen aus HTS-Material handeln.

**[0019]** Der für die Wicklungen verwendete supraleit-

fähige Bandleiter ist vorteilhafterweise aus elektrisch parallel geschalteten, gestapelten Leiterbändern aufgebaut, da ein einzelnes Leiterband für die gewünschten Anwendungen nicht genügend Strom tragen kann. Die Stromtragfähigkeit der Bandleiterwicklung wird durch diese Maßnahme erhöht.

**[0020]** Vorzugsweise ist die erfindungsgemäße Magnetspulenordnung supraleitend kurzgeschlossen, so dass ein magnetischer Fluss eingefroren werden kann.

**[0021]** Bei der erfindungsgemäßen Magnetspulenordnung handelt es sich bevorzugt um einen NMR-Hochfeldmagneten, in dessen Zentrum ein extrem homogenes Magnetfeld erzeugt wird.

**[0022]** Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und den Zeichnungen. Ebenso können die vorstehend genannten und die weiter aufgeführten Merkmale je für sich oder zu mehreren in beliebigen Kombinationen Verwendung finden. Die gezeigten und beschriebenen Ausführungsformen sind nicht als abschließende Aufzählung zu verstehen, sondern haben vielmehr beispielhaften Charakter für die Schilderung der Erfindung.

#### Ausführungsbeispiel

**[0023]** Es zeigen:

**[0024]** [Fig. 1](#) eine erfindungsgemäße Magnetspulenordnung mit gleich großen Blindbereichen; und

**[0025]** [Fig. 2](#) eine erfindungsgemäße Magnetspulenordnung mit unterschiedlich großen Blindbereichen;

**[0026]** [Fig. 1](#) zeigt eine erfindungsgemäße Magnetspulenordnung mit einer zylinderförmigen Wickelkammer **1**, die von zwei Endflanschen **2**, **3** begrenzt wird und in der Blindbereiche **4a**, **4b** angeordnet sind. Die Blindbereiche **4a**, **4b** bestehen aus einem Füllmaterial und sind in Form eines Hohlzylinders oder Hohlzylinderschalen ausgeführt. Ebenso ist es denkbar, die Blindbereiche **4a**, **4b** als offene Spule beispielsweise aus Ausschuss-HTS-Material zu wickeln (Blindwicklungen). Der erste Blindbereich **4a** liegt am rechten Endflansch **2** an und kann einstückig mit der Wickelkammer ausgeführt, beispielsweise ausgefräst, sein, er kann aber auch als separates Teil auf die Wickelkammer aufgeschraubt oder anderweitig befestigt sein. Zusammen mit dem linken Endflansch **3** begrenzt der Blindbereich **4a** einen ersten Wicklungsbereich **5**, in dem der Bandleiter bis zur Höhe des ersten Blindbereichs **4a** gewickelt ist. Die so geformten Wicklungen **6** sind in [Fig. 1](#) zwecks einer besseren Übersicht lediglich an einzelnen ausgewählten Stellen gezeigt. Die mit Pfeilen versehene Schlangenlinie deutet den weiteren Verlauf der Wick-

lungen des Bandleiters an. Die Pfeile zeigen dabei in eine Richtung, die sich im Wesentlichen senkrecht zur Längsachse des Bandleiters erstreckt. Durch eine durchgehende Wickellage **7** wird der Bandleiter über die bestehenden Wickellagen **6** sowie über das Füllmaterial des ersten Blindbereichs **4a** hinweg in einen zweiten Wicklungsbereich **8** überführt, der von dem rechten Endflansch **2** und dem zweiten Blindbereich **4b** begrenzt wird. Der zweite Blindbereich **4b** kann dabei in Form der oben beschriebenen Hohlzylinderschalen nach Wicklung der Wickellagen **6** des ersten Wicklungsbereichs **5** aufgesetzt werden. Im Falle eines vollhohlzylindrischen zweiten Blindbereichs **4b** wird dieser über die durchgehende Wickellage **7** gestülpt, wobei der linke Endflansch **3** erst nachträglich angebracht werden kann. Der zweite Wicklungsbereich **8** wird ebenso mit Wickellagen **9** des Bandleiters bestückt, so dass, falls gewünscht, eine weitere Überführung des Bandleiters in einen weiteren Wicklungsbereich erfolgen kann. Die die Wicklungsbereiche **5**, **8** einseitig begrenzenden Blindbereiche **4a**, **4b** sind alternierend an den Endflanschen **2**, **3** befestigt und überlappen sich axial. Dieser axiale Überlappungsbereich der Blindbereiche **4a**, **4b** stellt in radialer Richtung einen Bereich reduzierter Stromdichte dar und bildet somit einen Notch-Bereich **10**. Um eine möglichst kompakte und gut stabilisierte Anordnung zu realisieren, beträgt die Dicke  $D$  der Blindbereiche ein ganzzahliges Vielfaches der radialen Dicke  $d$  des Bandleiters. Aus demselben Grund weisen die einzelnen Windungen der Notch-Wicklung vorzugsweise alle die gleiche Steigung auf, da ein Steigungswechsel innerhalb der Wicklung mit Freiräumen innerhalb der Wicklungsbereiche verbunden wäre, die wiederum eine ungewollte Verschiebung des Bandleiters bewirken könnten.

**[0027]** Die beiden in [Fig. 1](#) gezeigten Blindbereiche **4a**, **4b** sind gleich groß und liegen jeweils abwechselnd an einen der Endflansche **2**, **3** an. Daraus ergibt sich, dass die Wicklungsradien im ersten Wicklungsbereich **5** kleiner und die Feldstärke dementsprechend höher sind als im zweite Wicklungsbereich **8**. Dies hat jedoch eine leicht asymmetrische Feldverteilung zur Folge. Durch geringfügige Variation der Windungszahlen beziehungsweise der axialen Ausdehnung der Blindbereiche **4a**, **4b** und somit der axialen Position der Wickelpakete lassen sich die durch die erfindungsgemäße Magnetspulenordnung auftretenden antisymmetrischen Feldfehler mit hoher Genauigkeit korrigieren. Durch eine derartige Anpassung der Wickellängen beziehungsweise der axialen Positionen der Wicklungsbereiche **5**, **8** im Notch-Bereich **10** kann die Homogenität der Magnetspulenordnung mit derselben Genauigkeit wie bei einem gleichwertigen herkömmlichen Notch eingestellt werden. Auf diese Weise können eventuell auftretende Feldfehler kompensiert werden.

**[0028]** Es fällt auf, dass die erfindungsgemäße Kon-

struktion des Notch-Bereichs **10** verglichen mit herkömmlichen Notch-Konstruktionen relativ viel Platz in Anspruch nimmt, da jeweils nur auf einer Seite des Notch-Bereichs Wickellagen **6**, **9** vorgesehen sind und daher die Wicklungsdichte wesentlich geringer ist (ca. halbe Dichte). Um beispielsweise einen gewöhnlichen vier-lagigen Notch durch einen erfindungsgemäßen Notch-Bereich **10** zu ersetzen, werden, wie in [Fig. 1](#) gezeigt beispielsweise zweimal vier Wickellagen benötigt. Da HTS-Bandleiter jedoch eine hohe Stromdichte aufweisen, ist der Platzbedarf nicht so kritisch.

**[0029]** [Fig. 2](#) zeigt eine besonders vorteilhafte Möglichkeit einen gewöhnlichen vier-lagigen Notch durch einen erfindungsgemäßen Notch-Bereich **10** zu ersetzen. Dabei sind drei Wickelpakete wechselseitig angeordnet. Die ersten beiden Wickellagen **6** werden im ersten Wicklungsbereich **5** gewickelt. Als nächstes folgt eine durchgehende Wickellage **7** über die bestehenden Wickellagen **6**, sowie über den Blindbereich **4a**. Im zweiten Wicklungsbereich **8** sind vier Wickellagen vorgesehen, die wiederum von einer durchgehenden Wickellage umwickelt sind, welche den Bandleiter in einen dritten Wicklungsbereich **11** überführt. Dieser dritte Wicklungsbereich **11** wird von einem Blindbereich **4c** und dem Endflansch **3** begrenzt und nimmt zwei weitere Wickellagen auf. Durch Wahl der Breite des Notch-Bereichs **10** lässt sich wie bei konventionellen Notches eine Feldkorrektur durchführen. Die durch die unterschiedlichen Wickelradien bedingten antisymmetrischen Feldfehler werden dadurch ausgeglichen, dass die axiale Ausdehnung der Blindbereiche **4a**, **4b**, **4c** unterschiedlich groß gewählt werden.

**[0030]** Die erfindungsgemäße Wicklung des Bandleiters in Wicklungsbereichen **5**, **8**, **11**, welche bezüglich der Wickelkammer alternierend angeordnet sind, ermöglicht die Konstruktion eines Notch-Bereichs **10** innerhalb einer HTS-Materialien enthaltenden supraleitenden Magnetspulenordnung, und somit die Homogenisierung eines kompakten Hochfeldmagneten.

#### Bezugszeichenliste

<b>1</b>	Wickelkammer
<b>2</b>	Endflanschen
<b>3</b>	Endflanschen
<b>4a, b, c</b>	Blindbereiche
<b>5</b>	erster Wicklungsbereich
<b>6</b>	Wickellage
<b>7</b>	durchgehende Wickellage
<b>8</b>	zweiter Wicklungsbereich
<b>9</b>	Wickellage
<b>10</b>	Notch-Bereich
<b>11</b>	dritter Wicklungsbereich
<b>d</b>	Dicke des Bandleiters
<b>D</b>	Dicke der Blindbereiche

**Patentansprüche**

1. Supraleitfähige Magnetspulenordnung mit mindestens einer Sektion aus supraleitfähigem Bandleiter, welche in einer zylindrischen Wickelkammer (1) zwischen zwei Endflanschen (2, 3) mehrlagig, solenoidartig durchgehend gewickelt ist, **dadurch gekennzeichnet**,

dass die Sektion einen axialen Bereich reduzierter Stromdichte bzw. Notch-Bereich (10) aufweist, dass die Wickellagen (6, 9) axial unterschiedlich lange, mit Füllmaterial ausgefüllte, hohlzylindrische Blindbereiche (4a, 4b, 4c) aufweisen, und dass radial aufeinander folgende Blindbereiche (4a, 4b, 4c) abwechselnd an jeweils einen der beiden Endflansche (2, 3) anliegen und jeweils durch mindestens eine durchgehende Wickellage (7) radial voneinander getrennt sind, wobei der axiale Überlappungsbereich der Blindbereiche (4a, 4b, 4c) den Notch-Bereich (10) bildet.

2. Magnetspulenordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der supraleitfähige Bandleiter ein Hochtemperatursupraleiter ist, und vorzugsweise silberstabilisiertes Bi-Sr-Ca-Cu-Oxid oder YBCO enthält.

3. Magnetspulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Notch-Bereich (10) gegenüber einer symmetrischen Anordnung derart axial verschoben ist, dass die durch die durchgehende Wickellage (7), welche Blindbereiche (4a, 4b, 4c) trennt, erzeugten Feldeffekte in erster Ordnung ausgeglichen werden.

4. Magnetspulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der radial innerste Blindbereich (4a) einstückig mit der Wickelkammer (1) ausgeführt ist.

5. Magnetspulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass radial außerhalb und/oder radial innerhalb des Notch-Bereichs (10) Wicklungslagen zwischen den Endflanschen (2, 3) durchgewickelt sind.

6. Magnetspulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die axialen Längen der Blindbereiche (4a, 4b, 4c) auf ganzzahlige Vielfache der Windungen des Bandleiters abgestimmt sind.

7. Magnetspulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Blindbereiche (4a, 4b, 4c) unterschiedliche axiale Längen und/oder radiale Dicken aufweisen.

8. Magnetspulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Blindbereiche (4a, 4b, 4c) als Hohlzylinder

aus massivem Material ausgeführt sind.

9. Magnetspulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Blindbereiche (4a, 4b, 4c) als Teilschalen, vorzugsweise Halbschalen, von Hohlzylindern ausgeführt sind.

10. Magnetspulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Blindbereiche (4a, 4b, 4c) aus gewickelten Bändern bestehen.

11. Magnetspulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der supraleitfähige Bandleiter aus elektrisch parallel geschalteten, gestapelten Leiterbändern aufgebaut ist.

12. Magnetspulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Magnetspulenordnung supraleitend kurzgeschlossen ist.

13. Magnetspulenordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche zur Verwendung als NMR-Hochfeldmagnet, in dessen Zentrum ein extrem homogenes Magnetfeld erzeugt wird.

Es folgt ein Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

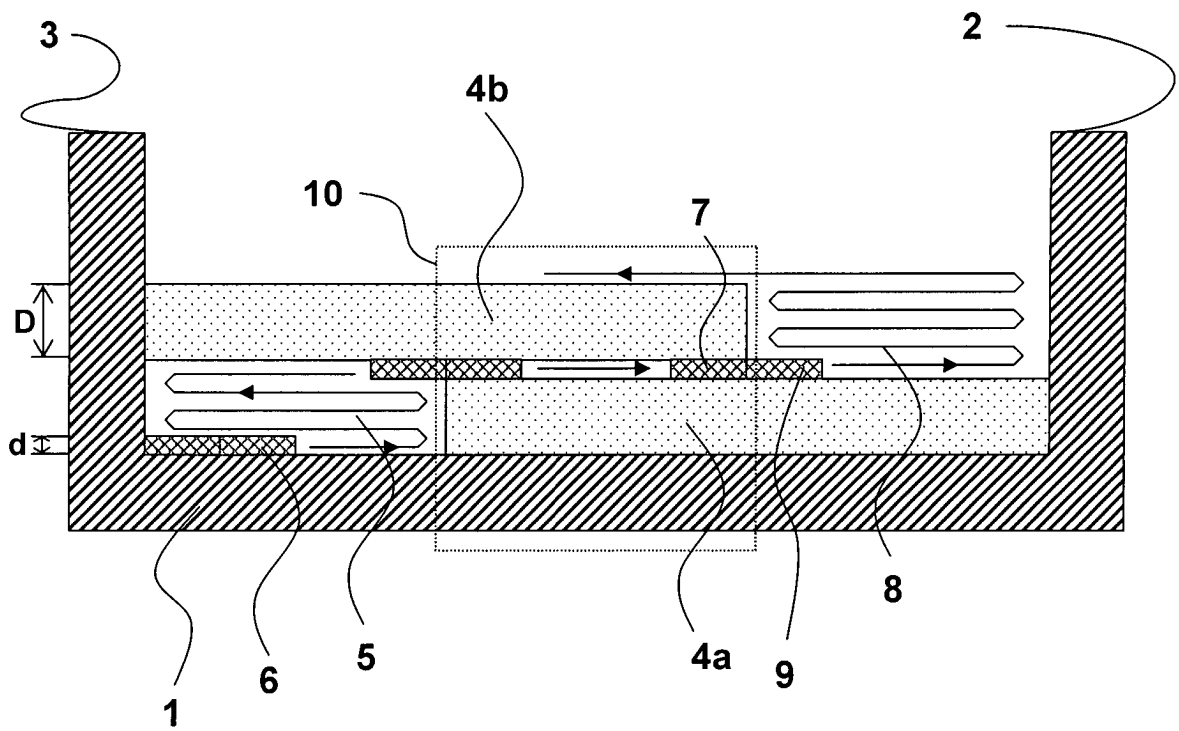


Fig. 1

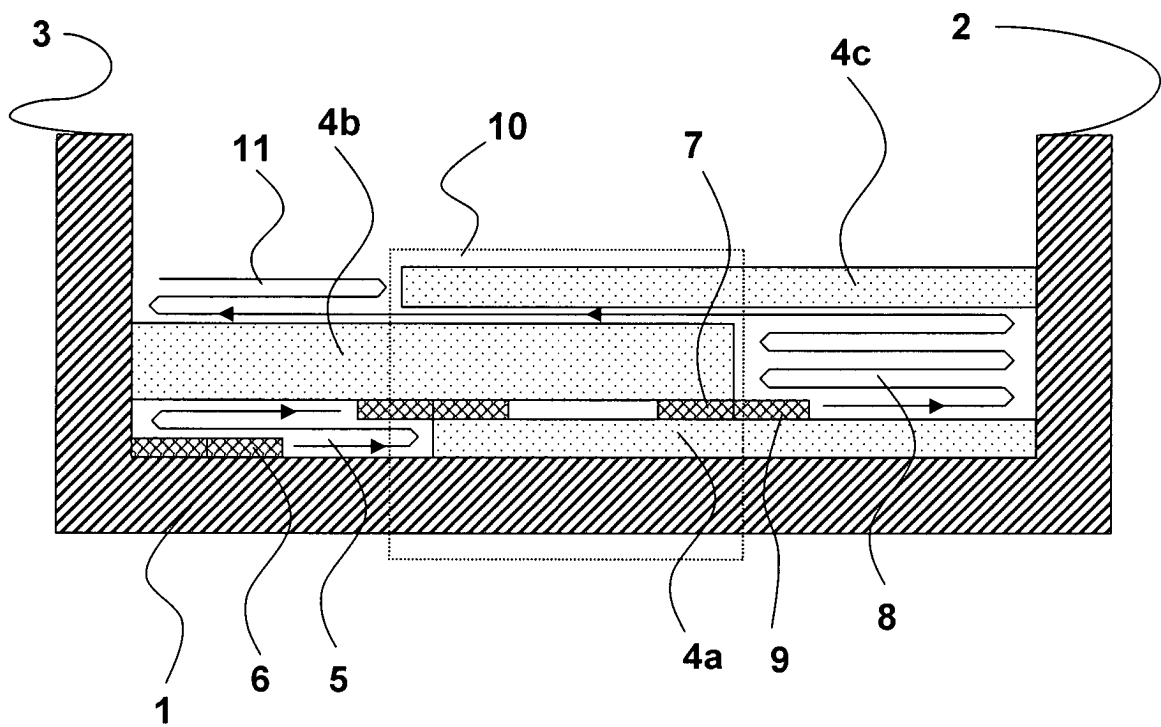


Fig. 2