



(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **102 41 966.3**
(22) Anmeldetag: **10.09.2002**
(43) Offenlegungstag: **30.04.2003**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **10.11.2016**

(51) Int Cl.: **H01F 6/00 (2006.01)**

Innerhalb von neun 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. 1 Patentkostengesetz).

(30) Unionspriorität:
01218460 10.09.2001 GB

(73) Patentinhaber:
Oxford Instruments Nanotechnology Tools Limited, Abingdon, Oxon, GB

(74) Vertreter:
Grünecker Patent- und Rechtsanwälte PartG mbB, 80802 München, DE

(72) Erfinder:
Biltcliffe, Michael Norfolk, Oxon, GB; Lakrimi, M'hamed, Oxford, GB; Bircher, Paul Antony, Oxfordshire, GB

(56) Ermittelter Stand der Technik:

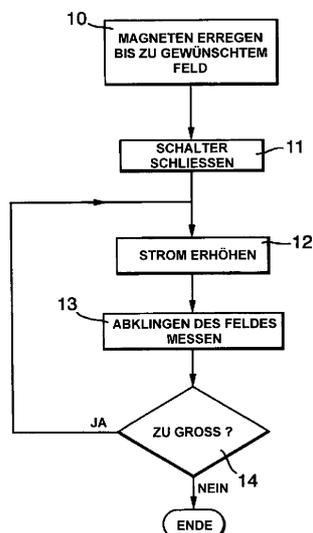
DE	39 23 456	A1
US	4 788 502	A
US	5 361 055	A

MORI, K. [et al.]: Current Distribution Characteristics of Superconducting Parallel Circuits. IEEE Transactions on Magnetics, 30, 1994, 4, 1919 - 1922. IEEE Xplore [online]. DOI: 10.1109/20.305638,

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Betreiben einer supraleitenden Magnetanordnung**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Erregen einer supraleitenden Magnetanordnung mit einem supraleitenden Magneten (1), welcher unter Arbeitsbedingungen ein Magnetfeld in einem Arbeitsvolumen erzeugt, wobei der supraleitende Magnet parallelgeschaltet ist zu einem supraleitenden Schalter (3), wobei der Schalter und der Magnet so ausgelegt sind, dass sie parallel mit einer Stromquelle (4) verbunden sind, wodurch unter Arbeitsbedingungen, wenn der Schalter offen ist, der Magnet durch die Stromquelle erregt werden kann, um ein gewünschtes Magnetfeld in dem Arbeitsvolumen zu erzeugen, woraufhin der Schalter (3) geschlossen wird, wobei die Anordnung ferner einen Widerstand (5) umfasst, der mit dem Schalter (3) in Serie verbunden ist, und wobei der Widerstand und der Schalter sowohl zu dem Magneten (1) als auch zu der Stromquelle (4) parallelgeschaltet sind, wobei das Verfahren gekennzeichnet ist durch die Schritte,
(10) dass der Magnet (1) von der Stromquelle (4) bis zu einem normalen Betriebsstrom erregt wird, wobei der Schalter (3) offen ist,
(11) dass der Schalter (3) geschlossen wird, und
(12) dass die Stromzufuhr von der Stromquelle (4) so verändert wird, dass die Drift in dem in dem Arbeitsvolumen erzeugten Magnetfeld vermindert wird, indem der Strom bis zu dem Punkt erhöht wird, bei dem der zusätzliche Strom durch den Widerstand (5) eine gleiche Spannung, jedoch

von entgegengesetzter Polarität erzeugt, die innen in dem Magneten (1) erzeugt wird.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer supraleitenden Magnetanordnung.

[0002] Die Druckschriften US 5 361 055 A, DE 39 23 456 A1, US 4 788 502 A und MORI, K. et al: Current Distribution Characteristics of Superconducting Parallel Circuits, IEEE Transactions on Magnetics, 30, 1994, 4, 1919–1922, offenbaren supraleitende Magnetanordnungen und Verfahren zum Betreiben von supraleitenden Magnetanordnungen.

[0003] Es gibt viele Anordnungen, in welchen supraleitende Magnete dazu verwendet werden, ein stabiles magnetisches Feld in einem Arbeitsvolumen herzustellen. Beispiele umfassen MRI, NMR, ICR und Zyklotrone, in welchen der Magnet in dem sogenannten "beharrenden (persistent) Modus" betrieben wird. Dies umfasst das Anschließen einer Verbindung von nahezu Null Ohm zwischen dem Anfang und Ende eines Magneten, sobald er eingeschaltet worden ist. Die Methoden, um dies zu erzielen, sind allgemein bekannt. Die resultierende Feldstabilität wird dann bestimmt durch die Zeitkonstante der magnetischen Induktivität und den gesamten Schaltkreiswiderstand.

[0004] Die Zeitkonstante ist definiert als L/R , worin L die magnetische Induktivität in Henry bedeutet, R den gesamten Schaltkreiswiderstand in Ohm bedeutet und die Zeitkonstante in Sekunden gemessen wird.

[0005] Wenn nicht $L = \text{unendlich}$ oder $R = \text{Null}$ ist, dann ist also die resultierende Zeitkonstante endlich, was zu einem exponentiellen Abklingen sowohl des magnetischen Flusses als auch des Feldes mit der Zeit führt.

[0006] Je nach der Anwendung ist es erstrebenswert, die Abklinggeschwindigkeit so nahe bei Null wie möglich zu halten, typisch hätte die NMR-Anwendung es gern, dass die Abklinggeschwindigkeit kleiner als $0,01 \cdot 10^{-6}/\text{Stunde}$ (ppm/hour) ist.

[0007] Für die meisten Systeme ist die magnetische Induktivität fixiert durch die Geometrie, die zum Erzeugen des sehr hochhomogenen Feldes benötigt wird, und den benötigten Betriebsstrom. Daher wird praktisch der Schaltkreiswiderstand des Magneten die Feld-Abklinggeschwindigkeit bestimmen.

[0008] Bis jetzt ist diese Felddrift ein akzeptiertes Problem gewesen, und die einzige Lösung hat darin bestanden, den Magneten neu zu erregen.

[0009] Gemäß einem erläuternden Beispiel umfasst eine supraleitende Magnetanordnung einen supraleitenden Magneten, welcher unter Arbeitsbedingungen

ein Magnetfeld in einem Arbeitsvolumen erzeugt, wobei der supraleitende Magnet parallelgeschaltet ist zu einem supraleitenden Schalter, wobei der Schalter und der Magnet so ausgelegt sind, dass sie parallel mit einer Stromquelle verbunden sind, wodurch unter Arbeitsbedingungen, wenn der Schalter offen ist, der Magnet durch die Stromquelle erregt werden kann, um ein gewünschtes Magnetfeld in dem Arbeitsvolumen zu erzeugen, woraufhin der Schalter geschlossen wird, wobei die Anordnung ferner einen Widerstand umfasst, der mit dem Schalter in Serie verbunden ist, wobei der Widerstand und der Schalter sowohl zu dem Magneten als auch zu der Stromquelle parallelgeschaltet sind.

[0010] Gemäß der vorliegenden Erfindung umfasst ein Verfahren zum Erregen einer supraleitenden Magnetanordnung die Merkmale nach Anspruch 1.

[0011] Das oben in Verbindung mit der Magnetfelddrift umrissene Problem wird überwunden durch Hinzufügen eines Widerstandes in Reihe mit dem Schalter. Dies ermöglicht es, die algebraische Summe der Spannungen in dem Schaltkreis, der durch den Magneten, den Schalter und den Widerstand definiert ist, auf Null oder nahezu Null einzustellen, welches die Bedingung ist, die für die Null-Magnetfelddrift benötigt wird.

[0012] Im Gegensatz zu herkömmlichen Systemen, in welchen der dem Magnetschaltkreis zugeführte Strom auf Null vermindert wird, sobald der Schalter geschlossen worden ist, muss die Stromversorgung verbunden bleiben, aber es wird angenommen, dass der Vorteil, wesentlich längere Perioden eines stabilen Magnetfeldes zu erzielen, die Kosten der Aufrechterhaltung der Stromzufuhr überwiegt.

[0013] Typisch weist das Widerstandselement einen Widerstand auf, der wenigstens 10 bis 100 mal größer ist als der Widerstand des Magneten, obwohl ein Widerstand in dem Bereich des einfachen bis 1000-fachen des Magnetwiderstands möglich ist. Außerdem sollte das Widerstandselement im Wesentlichen keine Induktivität aufweisen.

[0014] Es gibt verschiedene Verfahren, durch welche der korrekte Strom bestimmt werden kann, um die Null-Magnetfelddrift zu erzielen.

[0015] In dem ersten Verfahren kann der Widerstand des Magneten bestimmt werden. Dies kann bequem erreicht werden durch Vorsehen eines zweiten supraleitenden Schalters parallel zu dem Magneten und der Stromversorgung, wobei der zweite Schalter geschlossen wird, sobald der zweite Magnet auf eine geforderte Feldstärke erregt worden ist, und dann das Abklingen des Magnetfeldes so gesteuert wird, dass ein Wert für den Magnetwiderstand erhalten wird. Die Abklinggeschwindigkeit = $1/\text{Zeitkonstante}$, und ferner

beträgt die Zeitkonstante L/R (worin L die magnetische Induktivität und R der Magnetwiderstand bedeuten). Also ist der Magnetwiderstand R gleich der Abklinggeschwindigkeit (in $10^{-6}/\text{Sek}$) multipliziert mit der magnetischen Induktivität L . Wenn zum Beispiel $L = 100$ Henry und die Abklinggeschwindigkeit $= 3,6 \cdot 10^{-6}/\text{Stunde}$ [3.6 ppm/hour] betragen, dann ergibt $3,6 \cdot 10^{-6}/3600 = 1 \cdot 10^{-9}/\text{Sekunden}$ der Induktivität $L = 100$ den Wert $R = 1 \cdot 10^{-7}$ Ohm [$1\text{E}-7$ Ohms].

[0016] In einem zweiten Ansatz könnte ein Voltmeter an dem Magneten angeschlossen werden und der Widerstand direkt bestimmt werden in Abhängigkeit von dem Durchgang eines bekannten Stromes.

[0017] In einem dritten Ansatz umfasst das Verfahren ferner

4) das Steuern des Abklings des Magnetfeldes und das Wiederholen der Schritte 3–4 mit einer unterschiedlichen Veränderung des Stromes in Schritt 3, um das Abklingen des Magnetfeldes zu vermindern. Diese iterative Methode vermeidet den Bedarf für zusätzliche Komponenten.

[0018] Der Magnet kann eine herkömmliche Konstruktion aufweisen, die entweder Tieftemperatur- oder Hochtemperatur-Supraleitungs-Materialien oder beide verwendet oder andere Materialien mit niedrigem spezifischen Volumenwiderstand. Da die Stromversorgung mit dem Magneten verbunden bleibt, werden bei Hochtemperatur supraleitende Stromzuleitungen bevorzugt, um die Wärmeleitung zu vermindern und Wärmeverluste in der Umgebung zu minimieren.

[0019] Im Folgenden wird die Erfindung anhand eines in der Zeichnung gezeigten Ausführungsbeispiels näher beschrieben. In der Zeichnung zeigen:

[0020] Fig. 1 ein schematisches Blockschaltbild der beispielhaften Vorrichtung, und

[0021] Fig. 2 ein Flussdiagramm, als ein Beispiel für das erfindungsgemäße Verfahren.

[0022] Wie in Fig. 1 gezeigt, umfasst die Anordnung einen supraleitenden Magneten **1** herkömmlicher Form, wobei der Widerstand R_1 des Magneten getrennt bei **2** gezeigt ist. Der Magnet ist parallelgeschaltet zu einem supraleitenden Schalter **3** und einer Stromversorgung **4**. Die bisher beschriebenen Komponenten sind herkömmlich. In solch einem herkömmlichen System ist der Schalter **3** anfänglich offen, und der Magnet **1** wird erregt durch die Stromversorgung **4**, bis er das geforderte Magnetfeld in dem Arbeitsvolumen erzeugt. Der supraleitende Schalter **3** wird dann geschlossen, obwohl kein Strom durch diesen Schalter **3** zu fließen beginnt, bis die Stromversorgung **4** allmählich deaktiviert wird. Diese Deaktivierung bewirkt, dass in dem "beharrenden Modus"

Strom fließt durch die Reihenschaltung, die gebildet wird durch den Magneten **1** (einschließlich dem Widerstand R_1) und den Schalter **3**. Wie oben erläutert, wird jedoch aufgrund des inhärenten Widerstandes **2** (R_1) des Magneten **1** das durch den Magneten **1** in einem Arbeitsvolumen erzeugte Magnetfeld allmählich driften oder abklingen.

[0023] Dies wird überwunden durch Einfügen eines zusätzlichen Widerstandes **5** (R_2) in Reihe mit dem supraleitenden Schalter **3**.

[0024] Wie anhand von Fig. 2 erläutert, wird bei offenem Schalter **3** der Magnet **1** bis zu dem normalen Betriebsstrom I erregt (Schritt **10**), dann wird der Schalter **3** geschlossen (Schritt **11**), und dann wird der Strom weiter erhöht um ΔI (Schritt **12**) bis zu dem Punkt, bei dem der zusätzliche Strom durch den Widerstand **5** in Reihe mit dem Schalter **3** eine gleiche Spannung, jedoch von entgegengesetzter Polarität erzeugt, um genau die ohmsche Spannung auszugleichen (aufzuheben), die innen in dem Magneten **1** erzeugt wird, das heißt, die algebraische Summe der Schaltkreisspannungen ist Null.

[0025] Es versteht sich, dass der erhöhte Stromversorgungsstrom nicht durch den Magneten **1** fließt (bei geschlossenem Schalter **3**), sondern nur durch den Schalter **3** und den Widerstand **5**. Dies liegt daran, dass, sobald der Schalter **3** geschlossen worden ist, die Stromänderung in der Stromversorgung sich teilt und sowohl durch den Schalterkreis sowie durch den Magnetschaltkreis fließt. Das Verhältnis zwischen den zwei Strömen wird bestimmt durch das reziproke Verhältnis der Stromkreisinduktivität. Da der Magnet eine sehr große Induktivität aufweist (typisch 100 Henry) und die Schalterinduktivität sehr klein ist (typisch 100 nanoHenry), beträgt das Stromverhältnis $1 \cdot 10^{-9}$, also fließt für alle praktischen Erwägungen der gesamte Stromversorgungsstrom in dem Schalterkreis. Es ist auch zu beachten, dass hier im Unterschied zu dem beharrenden Modus während der Tätigkeit des Magneten **1** die Stromversorgungseinheit **4** verbunden bleibt und den Strom $I + \Delta I$ an den Schaltkreis liefert.

[0026] Die erwünschte Bedingung für Magnetfeldstabilität ist, wenn der Spannungsabfall an dem Magneten und dem Widerstand **5** gleich und entgegengesetzt sind um die Magnet-Schalter-Schleife, folgende.

$$IR (\text{Magnet}) = \Delta IR (\text{von Widerstand } 5). \quad (1)$$

[0027] Kleine Schwankungen in der Stromversorgung werden gefiltert durch die Zeitkonstante des Schaltkreiswiderstands und der Magnetinduktivität, so dass die resultierende zeitveränderliche Feldgeschwindigkeit um mehrere Größenordnungen niedriger sein kann, als es der Fall wäre bei Bestimmung

durch die Zeitkonstante des Magneten, der in dem "beharrenden Modus" betrieben wird oder direkt erregt wird durch die Stromversorgung, allein.

[0028] Typische Werte könnten sein:

Magnetinduktivität = 100 Henry

Magnetwiderstand = $1 \cdot 10^{-7}$ Ohm

Widerstand **5** = $1 \cdot 10^{-6}$ Ohm

Stromversorgung I = 100 Ampere

Überstrom ΔI = 10 Ampere

[0029] Der in dem normalen "beharrenden Modus" betriebene Magnet zeigt eine Zeitkonstante von $1 \cdot 10^9$ Sekunden oder eine Abklinggeschwindigkeit von $3,6 \cdot 10^{-6}$ /Stunde.

[0030] Der gleiche Magnet, betrieben in dem "quasi-beharrenden Modus", welcher den Widerstand **5** wie oben beschrieben verwendet, zeigt eine Feldstabilität von $3,6 \cdot 10^{-4}$ /Stunde für eine Stromversorgungsschwankung von $1 \cdot 10^{-5}$ und eine Feldstabilität von $3,6 \cdot 10^{-3}$ /Stunde für eine Stromversorgungsschwankung von $1 \cdot 10^{-4}$. Es ist daher die Instabilität des Stromversorgungstromes, welche die Feldstabilität in diesem letzteren Modus bestimmt. Wenn übrigens die Stromversorgung in dem beharrenden Modus angeschlossen bliebe, leuchtet es ein, dass eine viel größere Feldinstabilität erzeugt würde im Vergleich zu dem quasi-beharrenden Modus, da die Zeitkonstante des Schaltkreises kleiner wäre.

[0031] Um an diesem gewünschten Null-Abklingzustand anzukommen, ist es erforderlich, die Stromänderung ΔI korrekt einzustellen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, mit denen dies erreicht werden könnte.

[0032] In dem ersten Ansatz könnte ein zusätzlicher supraleitender Schalter **6** parallel zu dem Schalter **3** und dem Widerstand **5** angeschlossen sein. Anfänglich wird die Stromversorgung **4** aktiviert, um den Magneten **1** bis zu der gewünschten Feldstärke zu erregen, der Schalter **6** wird geschlossen und die Stromversorgung wird deaktiviert. Der Magnetfeldabfall wird dann kontrolliert unter Verwendung einer beispielsweise herkömmlichen NMR-Methode, und daraus kann die Magnetinduktivität errechnet werden durch Messen der NMR-Resonanzfrequenz, um die Änderungsrate des Feldes mit der Zeit zu bestimmen. Wenn man die Magnetinduktivität und den Magneten-Betriebsstrom kennt, kann die äquivalente ohmsche Spannung des Magneten berechnet werden. Die ohmsche Spannung des Magneten wird dann geteilt durch den Wert des Widerstandes **5**, um den Wert für den erhöhten Strom ΔI aus der Stromzufuhr unter Verwendung der obigen Gleichung (1) zu ergeben. Der Schalter **6** wird dann geöffnet, und nach dem Schließen des Schalters **3** wird der oben beschriebene Prozess durchgeführt, wobei der vorberechnete zusätzliche Strom ΔI angelegt wird.

[0033] In einem zweiten Ansatz könnte ein Voltmeter (nicht gezeigt) an dem Magneten **1** angebracht sein, um den Widerstand **2** zu bestimmen.

[0034] In einem dritten Ansatz wird ein grober Wert für ΔI zugeführt (Schritt **12**), und es wird das Abklingen des Feldes oder die Drift in Schritt **13** gemessen. Wenn diese Drift zu groß ist (Schritt **14**), wird die Stromzufuhr erhöht und der Prozess der Schritte **12** und **13** wiederholt. Dieser Satz von Schritten kann wiederholt werden, bis der geforderte Feldabfall erreicht wird.

[0035] Natürlich wird in diesem Fall angenommen, dass eine Erhöhung des Stromes erforderlich ist, um das geforderte Abklingen des Feldes oder die Drift zu erzielen, aber es kann sein, dass eine Verminderung des Stromes benötigt wird, und dann würde der Schritt **12** entsprechend reguliert.

[0036] Der quasi-beharrende Modus wird nun mehr im Einzelnen erläutert.

[0037] Gewöhnlich wird gemäß dem bekannten Verfahren in dem beharrenden Modus das Abklingen in dem Magneten beherrscht durch den Magnetwiderstand **2** (R_1) in Reihe mit dem Magneten. In dieser Situation ist der Spannungsabfall an der Magnetspule auf Grund einer Veränderung des Stromes darin gleich dem Spannungsabfall an dem Magnetwiderstand **2**, das heißt:

$$L \frac{\Delta I}{\Delta t} = R_1 I_1 \quad [2]$$

worin L die magnetische Induktivität, I den durch den Magneten fließenden Strom und R_1 den Magnetwiderstand **2** bedeuten

[0038] Daraus folgt, dass für einen bestimmten Magneten, da die NMR-Protonenfrequenz proportional zu dem Strom in dem Magneten ist, der Abfall Δf in der Operations-Protonenfrequenz f des Magneten gegeben ist durch

$$\Delta f = \frac{\Delta t \cdot R_1 \cdot f}{L} \quad [3]$$

[0039] Zum Beispiel würde dies bei einer Frequenz $f = 400$ MHz, einem Magneten mit $L = 58$ Henry und einem nominalen $R_1 = 4 \mu\Omega$ eine theoretische Rate in der Frequenz von etwa 100.000 Hz/Stunde ergeben (wobei "Hz/Stunde" einen Abfall in der Protonenresonanzfrequenz bezeichnet).

[0040] Im Gegensatz zu dem Obigen bleibt gemäß dem quasi-beharrenden Modus die Stromversorgung **4** mit dem Magneten verbunden, und der Schalter **3** wird geschlossen, so dass Strom sowohl durch den Magneten **1** als auch parallel dazu durch den Schalter **3** und den Widerstand **5** fließt. Da die Stromversorgung angeschlossen bleibt, liefert sie einen Gleich-

strom I_2^0 durch den Widerstand **5** (der einen Widerstandswert R_2 aufweist) zusätzlich zu dem Gleichstrom I_1^0 , der durch den Magnetwiderstand **3** fließt (der hier einen mit R_1 bezeichneten Widerstandswert aufweist). In dem statischen Modus sollte die an dem Widerstand R_2 erzeugte Spannung die gleiche sein wie die an dem Magnetwiderstand R_1 . Daraus folgt auf Grund dessen, dass die Spannungen gleich sind:

$$I_2^0 = \frac{R_1}{R_2} I_1^0 \quad [4]$$

[0041] Jede Veränderung δI_2 in dem Strom $I_2(t) (= I_2^0 + \delta I_2)$ in dem Schalter **3** und dem Widerstand **5** wird begleitet oder ausgeglichen durch eine zeitveränderliche Änderung δI_1 in dem Strom $I_1(t) (= I_1^0 + \delta I_1)$. Die Stromzufuhr wird in Betrieb gehalten, und daher ist der entscheidende Faktor bei der Bestimmung der Abklingrate die Stabilität der Stromversorgung. Um dies weiter zu betrachten, wird nun eine kleine mathematische Notation angenommen.

[0042] Als Ergebnis einer kleinen Änderung des Stromes aus der leichten Instabilität der Stromversorgung **4**, durch eine Spannungsausgleichsberechnung:

$$L \frac{\delta I_1}{\delta t} + R_1 (I_1^0 + \delta I_1) = R_2 (I_2^0 + \delta I_2) = L \frac{\delta I_1}{\delta t} + R_2 I_2^0 + R_1 \delta I_1 \quad [5]$$

[0043] Streichung von Termen ergibt:

$$L \frac{\delta I_1}{\delta t} + R_1 \delta I_1 = R_2 \delta I_2 \quad [6]$$

[0044] Da der gesamte Strom $I = I_1 + I_2$ ist, beträgt ferner die gesamte Änderung des Stromes

$$\delta I = \delta I_1 + \delta I_2 \quad [7]$$

[0045] Setzt man $\delta I_2 = \delta I - \delta I_1$ ein, ergibt dies

$$L \frac{\delta I_1}{\delta t} + R_1 \delta I_1 = R_2 (\delta I - \delta I_1) \quad [8]$$

[0046] Umstellung der Terme ergibt:

$$\delta I_1 = \delta I \frac{R_2}{(L/\delta t) + (R_1 + R_2)} \quad [9]$$

[0047] Die Bedeutung der Stabilität der Stromversorgung wird äußerst wichtig. Für eine Stromversorgung mit einer Stromstabilität von $1 \cdot 10^{-5}$ /Stunde wird die Änderung δI_1 vermindert auf $3,6 \cdot 10^{-4}$ /Stunde. Für Zeiten $\ll L/(R_1 + R_2)$ wird δI_1 wiedergegeben durch

$$\delta I_1 / \delta t = \delta I (R_2 / L) \quad [10]$$

[0048] Um die obige Analyse zu prüfen, wurde ein experimenteller supraleitender Magnet von nahezu Null-Widerstand und mit einer Induktivität von 57,52 Henry bewusst in Serie mit einem endlichen Nennwiderstand R_1 von $4 \mu\Omega$ angeordnet. Die Abklingrate wurde gemessen unter Arbeitsbedingungen sowohl

in dem beharrenden Modus als auch in dem quasi-beharrenden Modus.

[0049] In dem beharrenden Modus wurde der Magnet betrieben unter Verwendung eines Stromes von 95,5 A bei einer Protonenfrequenz von 400,419 MHz, was einen Spannungsabfall von 0,382 mV an dem $4\text{-}\mu\Omega$ -Widerstand erzeugte. Die resultierende Abfallrate wurde gemessen als 111.000 PHZ/Stunde.

[0050] In dem quasi-beharrenden Modus wurde ein Widerstand von $90 \mu\Omega$ (Widerstand **5** in Fig. 2) parallel zu dem Magneten (und daher in Reihe mit dem Schalter **3**) angeordnet. Ein erhöhter Strom von 99,256 A wurde verwendet, um den Parallelwiderstand zu berücksichtigen. Dies erzeugte eine gemessene Abfallrate von +49 PHZ/Stunde, was anzeigte, dass der Strom etwas größer als optimal war, und folglich bewegte sich die Protonenfrequenz nach oben. Jedoch ist zu erkennen, dass die gesamte Änderungsrate in der Protonenfrequenz wesentlich reduziert war. Ein verbesserter Wert kann daher erzielt werden durch die Verwendung eines etwas kleineren Stromes von 99,254 A. Dieses Ergebnis beweist, dass die (früher beschriebene) Abklingrate von $0,01 \cdot 10^{-6}$ /Stunde mit der vorliegenden Erfindung erzielbar ist, selbst mit einem hohen Magnetwiderstand von $4 \mu\Omega$

[0051] Unter Verwendung der obigen Gleichungen benötigt das Erzeugen einer Spannung von 0,382 mV an einem Widerstand von $90 \mu\Omega$ einen Strom von 4,24 A, was einen Gesamtstrom von 99,7 A ergibt.

[0052] Unter der Annahme einer Drift von $10 \cdot 10^{-6}$ /Stunde in dem Stromversorgungsstrom beträgt für einen Strom von 99,7 A (das heißt für einen angenäherten Strom für einen Betrieb bei 400 MHz) die erwartete Instabilität in der Stromzufuhr etwa 1 mA/Stunde.

[0053] Unter Verwendung von $\delta I / \delta t = 1 \text{ mA/Stunde}$ mit $R_1 = 90 \mu\Omega$ ergibt sich eine Veränderungsrate des Stromes in dem Magneten von $\delta I_1 / \delta t = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ A/Stunde}$. Dies entspricht einer Abfallrate von 23 PHZ/Stunde.

[0054] Es ist daher zu erkennen, dass das Vorsehen des Parallelwiderstands R_2 und die Verwendung der Stromversorgung während des Betriebs des Magneten die Feldstabilität wesentlich verbessern kann.

[0055] Als ein weiterer Test, der das experimentelle Magnetsystem verwendet, wurde der Strom um 2 mA vermindert, um eine Veränderung des Stromversorgungsstromes zu simulieren.

[0056] Keine entsprechende Stufenevidenz dieser Änderung wurde in dem Abklingverlauf gefunden, nur eine kleine Änderung von 34 PHZ/Stunde in der Ab-

fallneigung, und dieses Ergebnis stimmt überein mit der großen Zeitkonstante des Magnetschaltkreises.

dass die Schritte (12) bis (13) mit einer unterschiedlichen Änderung des Stromes wiederholt werden, um das Abklingen des Magnetfeldes zu vermindern.

[0057] In einigen supraleitenden Magneten ist der Widerstand des Magneten selbst (R_1) sehr klein, zum Beispiel $1 \cdot 10^{-10} \Omega$ bis $1 \cdot 10^{-13} \Omega$, wodurch sehr lange Zeitkonstanten für den Magnetschaltkreis in dem beharrenden Modus erzeugt werden. Jedoch weisen andere supraleitende Magnete höhere Widerstandswerte auf. Ein spezielles Beispiel dafür sind Hochtemperatur-Supraleiter, welche oft einen "endlichen" Widerstand aufweisen, und daher sind solche Magnete anfällig für größere Instabilität in ihren Magnetfeldern. Herstellprozesse können auch Erhöhungen in dem Widerstand der traditionelleren Niedrigtemperatur-Supraleitungsmaterialien verursachen. Für diese Typen von Magneten mit endlichen Widerstandswerten ist die Erfindung besonders geeignet, da die Zeitkonstanten der Magnetschaltkreise wesentlich vermindert werden können.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Patentansprüche

1. Verfahren zum Erregen einer supraleitenden Magnetanordnung mit einem supraleitenden Magneten (1), welcher unter Arbeitsbedingungen ein Magnetfeld in einem Arbeitsvolumen erzeugt, wobei der supraleitende Magnet parallelgeschaltet ist zu einem supraleitenden Schalter (3), wobei der Schalter und der Magnet so ausgelegt sind, dass sie parallel mit einer Stromquelle (4) verbunden sind, wodurch unter Arbeitsbedingungen, wenn der Schalter offen ist, der Magnet durch die Stromquelle erregt werden kann, um ein gewünschtes Magnetfeld in dem Arbeitsvolumen zu erzeugen, woraufhin der Schalter (3) geschlossen wird, wobei die Anordnung ferner einen Widerstand (5) umfasst, der mit dem Schalter (3) in Serie verbunden ist, und wobei der Widerstand und der Schalter sowohl zu dem Magneten (1) als auch zu der Stromquelle (4) parallelgeschaltet sind, wobei das Verfahren gekennzeichnet ist durch die Schritte, (10) dass der Magnet (1) von der Stromquelle (4) bis zu einem normalen Betriebsstrom erregt wird, wobei der Schalter (3) offen ist, (11) dass der Schalter (3) geschlossen wird, und (12) dass die Stromzufuhr von der Stromquelle (4) so verändert wird, dass die Drift in dem in dem Arbeitsvolumen erzeugten Magnetfeld vermindert wird, indem der Strom bis zu dem Punkt erhöht wird, bei dem der zusätzliche Strom durch den Widerstand (5) eine gleiche Spannung, jedoch von entgegengesetzter Polarität erzeugt, die innen in dem Magneten (1) erzeugt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch den Schritt (13) dass das Abklingen des Magnetfeldes gesteuert wird, und

Anhängende Zeichnungen

Fig.1.

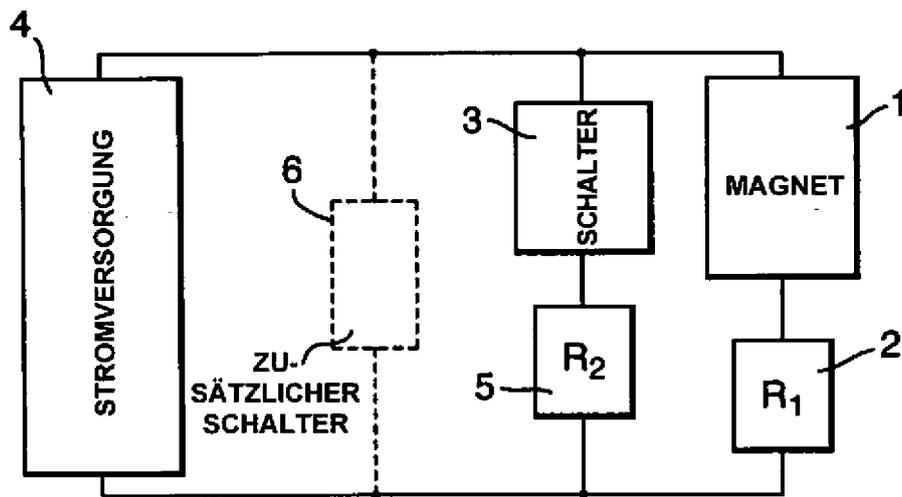


Fig.2.

