(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) EP 1 182 462 A2

(12) EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
27.02.2002 Patentblatt 2002/09

(51) Int Cl.[7]: **G01R 33/38**

(21) Anmeldenummer: **01115747.6**

(22) Anmeldetag: **09.07.2001**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU MC NL PT SE TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL LT LV MK RO SI

(30) Priorität: **24.08.2000 DE 10041672**

(71) Anmelder: **Bruker AG**
8117 Fällanden (CH)

(72) Erfinder:
- **Schauwecker, Robert**
  8032 Zürich (CH)
- **Bovier, Pierre-Alain**
  8051 Zürich (CH)
- **Amann, Andreas**
  8008 Zürich (CH)
- **Tschopp, Werner**
  8127 Forch (CH)

(74) Vertreter: **KOHLER SCHMID + PARTNER**
Patentanwälte GbR, Ruppmannstrasse 27
70565 Stuttgart (DE)

(54) Dimensionierung einer Magnetanordnung mit einem zusätzlichen stromführenden Spulensystem

(57) Bei einer Magnetanordnung (M, *D, P1*, ..., *Pn)* mit einem Magnetspulensystem (*M*) mit mindestens einer stromführenden supraleitenden Magnetspule, einem weiteren stromführenden Spulensystem (*D*), welches durch eine externe Stromquelle gespeist werden kann und im Arbeitsvolumen ein von null wesentlich verschiedenes Magnetfeld aufbaut, und ggf. mit zusätzlichen supraleitend geschlossenen Strompfaden (*P1*, ..., *Pn),* wobei die durch die zusätzlichen Strompfade (*P1* ..., *Pn)* im Betriebszustand aufgrund von induzierten Strömen erzeugten Magnetfelder in z-Richtung und das Feld des stromführenden Spulensystems die Größenordnung von 0.1 Tesla im Arbeitsvolumen nicht überschreiten, ist das weitere Spulensystem (D) so ausgelegt ist, dass

$$\left|g_D^{eff}\right| > 1.2 \cdot \left|g_D^{eff,cl}\right|,$$

wobei

$$g_D^{eff} = g_D - g^{\mathrm{T}} \cdot \left(L^{cl} - \alpha L^{cor}\right)^{-1} \cdot \left(L_{\leftarrow D}^{cl} - \alpha L_{\leftarrow D}^{cor}\right)$$

$$g_D^{eff,cl} = g_D - g^T \cdot (L^{cl})^{-1} \cdot L_{\leftarrow D}^{cl}.$$

Dadurch kann ein weiteres Spulensystem (D) gegenüber einem herkömmlich dimensionierten Spulensystem (M) mit einfachen und unaufwändigen Mitteln so modifiziert werden, dass die effektive Feldeffizienz g_D^{eff} des weiteren Spulensystems (D) unter Berücksichtigung des Diamagnetismus des Supraleiters im Magnetspulensystem (M) möglichst groß ist.

EP 1 182 462 A2

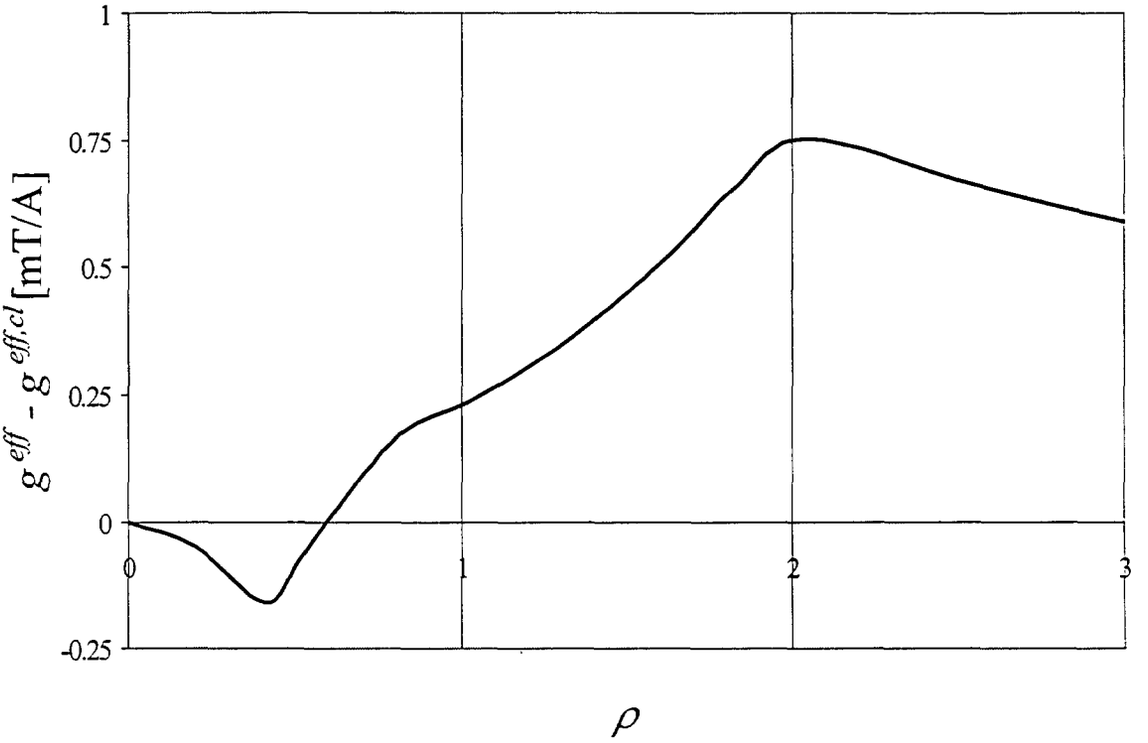

Fig. 4

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Magnetanordnung zur Erzeugung eines Magnetfeldes in Richtung einer *z*-Achse in einem um $z = 0$ angeordneten Arbeitsvolumen mit einem Magnetspulensystem mit mindestens einer stromführenden supraleitenden Magnetspule, einem weiteren stromführenden Spulensystem, welches durch eine externe Stromquelle gespeist werden kann und im Arbeitsvolumen ein von null wesentlich verschiedenes Magnetfeld aufbaut, insbesondere ein Magnetfeld mit einem Betrag größer als 0.2 Millitesla pro Ampère Strom, und gegebenenfalls mit einem oder mehreren zusätzlichen supraleitend geschlossenen Strompfaden, wobei die durch die zusätzlichen Strompfade im Betriebszustand aufgrund von induzierten Strömen erzeugten Magnetfelder in *z*-Richtung und das Feld des stromführenden Spulensystems die Größenordnung von 0.1 Tesla im Arbeitsvolumen betragsmäßig nicht überschreiten.

[0002] Eine derartige Magnetanordnung mit einem supraleitenden Magnetspulensystem und einem weiteren, durch eine externe Stromquelle gespeisten Spulensystem, jedoch ohne zusätzliche supraleitend geschlossenen Strompfade ist beispielsweise in dem von der Firma Bruker Analytik GmbH, Silberstreifen, D-76287 Rheinstetten seit 1996 vertriebenen EPR (Electron Paramagnetic Resonance) System ELEXSYS E 600/680 gemäß Firmenprospekt.

[0003] Das Einsatzgebiet von supraleitenden Magneten umfasst verschiedene Anwendungsfelder, insbesondere verschiedene Magnetresonanzverfahren. In einigen dieser Verfahren wird von der Magnetanordnung verlangt, dass die Feldstärke im Arbeitsvolumen während einem Experiment moduliert werden kann. Insbesondere beim Einsatz eines supraleitenden Magneten ist es mit erheblichen Nachteilen verbunden, wenn diese Feldmodulation durch eine Variation des Stromes im Hauptspulensystem erzeugt wird. Typischerweise hat das Hauptspulensystem eine hohe Selbstinduktivität und erlaubt daher nur träge Strom- und Feldänderungen.

[0004] Ferner ist es für die Kühlung der supraleitenden Magnetspulensystems nachteilig, wenn während dem Betrieb Stromzuleitungen vom Raumtemperaturbereich aus an den gekühlten supraleitenden Magneten angeschlossen werden. Wenn der Bereich, über den die Magnetfeldstärke moduliert werden soll, nicht zu groß ist (insbesondere kleiner als 0.1 Tesla), kann die Feldmodulation durch Variation des Stromes in einem das Hauptspulensystem ergänzenden Spulensystem erzeugt werden.

[0005] Ein weiteres Einsatzgebiet von felderzeugenden Zusatzspulen in einem supraleitenden Magnetsystem sind sogenannte supraleitende Z^0-Shimvorrichtungen. Durch eine Stromänderung in einer solchen Vorrichtung ist es möglich, eine allfällige Drift des Hauptspulensystems nach einer gewissen Zeit wieder zu kompensieren, ohne dass der Strom im Hauptspulensystem neu gesetzt werden muss.

[0006] Der Schwerpunkt der Erfindung liegt auf dem Gebiet der Dimensionierung von Magnetanordnungen mit einem zusätzlichen stromführenden Spulensystem, welches durch eine externe Stromquelle gespeist werden kann und im Arbeitsvolumen ein von null wesentlich verschiedenes Magnetfeld aufbaut, insbesondere auf dem Gebiet der Dimensionierung solcher Magnetanordnungen mit einem supraleitenden Magneten mit aktiver Streufeldkompensation und weiteren supraleitenden Strompfaden.

[0007] Eine Anforderung an ein zusätzliches felderzeugendes Spulensystem in einer Magnetanordnung ist, möglichst viel Feld zu erzeugen und dabei möglichst wenig Raum innerhalb der Magnetanordnung einzunehmen. Um die zu erzielenden Feldstärken zu erbringen, muss ein zusätzliches felderzeugendes Spulensystem häufig nahe am Arbeitsvolumen der Magnetanordnung angebracht werden, was mit einer unerwünschten "Aufblähung" und Verteuerung des supraleitenden Hauptspulensystems verbunden ist.

[0008] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es demgegenüber, eine Magnetanordnung der eingangs genannten Art mit möglichst einfachen Mitteln so zu modifizieren, dass ein zusätzliches felderzeugendes Spulensystem so in die Magnetanordnung integriert werden kann, dass es bei gleicher Wirkung das Hauptspulensystem weniger stark "aufbläht".

[0009] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe dadurch gelöst, dass $|g_D^{eff}| > 1.2 \cdot |g_D^{eff,cl}|$, wobei

$$g_D^{eff} = g_D - g^T \cdot \left(L^{cl} - \alpha L^{cor}\right)^{-1} \cdot \left(L_{\leftarrow D}^{cl} - \alpha L_{\leftarrow D}^{cor}\right)$$

$$g_D^{eff,cl} = g_D - g^T \cdot (L^{cl})^{-1} \cdot L_{\leftarrow D}^{cl}.$$

[0010] Die Effizienz des zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems wird dadurch verbessert, dass Wechselwirkungen zwischen dem zusätzlichen felderzeugenden Spulensystem und der restlichen Magnetanordnung zur Felderzeugung genutzt werden. Abgesehen von den induktiven Kopplungen mit dem supraleitenden Magnetspulensystem und mit weiteren supraleitend geschlossenen Strompfaden wird in einer erfindungsgemäßen Anordnung auch ein diamagnetisches Verhalten des Supraleitermaterials im supraleitenden Magnetspulensystem genutzt, welches sich dadurch auszeichnet, dass Feldänderungen kleiner als 0.1 Tesla, wie sie beispielsweise beim Laden eines zusätzlichen

felderzeugenden Spulensystems auftreten, aus dem supraleitenden Volumenanteil des Magnetspulensystems verdrängt werden.

[0011] Dies manifestiert sich in einer Umverteilung des magnetischen Flusses der Feldänderungen in der Magnetanordnung, was sich wiederum darauf auswirkt, wie das supraleitende Magnetspulensystem und weitere supraleitend geschlossene Strompfade auf eine Stromänderung im zusätzlichen felderzeugenden Spulensystem reagieren, weil diese Reaktion durch das Prinzip der Erhaltung des magnetischen Flusses durch eine geschlossene supraleitende Schlaufe bestimmt wird. In der vorliegenden Erfindung werden die Wechselwirkungen zwischen dem zusätzlichen felderzeugenden Spulensystem und der restlichen Magnetanordnung derart zur Felderzeugung genutzt, dass die Größe

$$g_D^{eff} = g_D - g^{\mathrm{T}} \cdot \left(L^{cl} - \alpha L^{cor}\right)^{-1} \cdot \left(L_{\leftarrow D}^{cl} - \alpha L_{\leftarrow D}^{cor}\right)$$

berechnet wird und die Magnetanordnung dahingehend optimiert wird, dass $|g_D^{eff}| > 1.2\,|g_D^{eff,cl}|$, wobei

$$g_D^{eff,cl} = g_D - g^{\mathrm{T}} \cdot (L^{cl})^{-1} \cdot L_{\leftarrow D}^{cl}.$$

[0012] Die genannten Größen haben folgende Bedeutung:

g_D^{eff} : Feldbeitrag pro Ampère Strom des zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems im Arbeitsvolumen unter Berücksichtigung der Feldbeiträge des zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems selbst wie auch der Feldänderung aufgrund von Strömen, welche im supraleitenden Magnetspulensystem und in weiteren supraleitend geschlossenen Strompfaden beim Laden des zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems induziert werden, unter Berücksichtigung einer diamagnetischen Verdrängung von kleinen Feldänderungen aus dem Volumen des Magnetspulensystems,

$g_D^{eff,cl}$: Feldbeitrag pro Ampere Strom des zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems im Arbeitsvolumen unter Berücksichtigung der Feldbeiträge des zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems selbst wie auch der Feldänderung aufgrund von Strömen, welche im supraleitenden Magnetspulensystem und in weiteren supraleitend geschlossenen Strompfaden beim Laden des zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems induziert werden, unter Vernachlässigung der diamagnetischen Verdrängung von kleinen Feldänderungen aus dem Volumen des Magnetspulensystems,

-α: mittlere magnetische Suszeptibilität im Volumen des Magnetspulensystems gegenüber Feldänderungen, welche die Größenordnung von 0.1 T betragsmäßig nicht überschreiten; wobei $0 < \alpha \leq 1$,

$$g^{\mathrm{T}} = (g_M, g_{P1}, \ldots, g_{Pj}, \ldots g_{Pn}),$$

g_{Pj}: Feld pro Ampère des Strompfades *Pj* im Arbeitsvolumen ohne die Feldbeiträge der induktiv auf Flussänderungen reagierenden Strompfade *Pi* für $i \neq j$ und des Magnetspulensystems,

g_M : Feld pro Ampère des Magnetspulensystems im Arbeitsvolumen ohne die Feldbeiträge zusätzlicher induktiv auf Flussänderungen reagierender Strompfade,

g_D : Feld pro Ampère des zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems im Arbeitsvolumen ohne die Feldbeiträge zusätzlicher induktiv auf Flussänderungen reagierender Strompfade und des Magnetspulensystems,

L^{cl}: Matrix der induktiven Kopplungen zwischen dem Magnetspulensystem und zusätzlichen induktiv auf Flussänderungen reagierenden Strompfaden sowie zwischen den zusätzlichen induktiv auf Flussänderungen reagierenden Strompfaden untereinander,

L^{cor} : Korrektur zur Induktivitätsmatrix L^{cl}, welche sich bei kompletter diamagnetischer Verdrängung von Störfeldern aus dem Volumen des Magnetspulensystems ergäbe,

$L_{\leftarrow D}^{cl}$: Vektor der induktiven Kopplungen des zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems mit dem Magnetspu-

lensystem und den zusätzlichen induktiv auf Flussänderungen reagierenden Strompfaden,

$L^{cor}_{\leftarrow D}$: Korrektur zum Kopplungsvektor $L^{cl}_{\leftarrow D}$, welche sich bei kompletter diamagnetischer Verdrängung von Störfeldern aus dem Volumen des Magnetspulensystems ergäbe.

[0013] In einer bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Magnetanordnung ist diese Teil einer Apparatur zur Magnetresonanz-Spektroskopie, beispielsweise auf dem Gebiet der EPR und NMR. In solchen Apparaturen muss das Magnetfeld im Arbeitsvolumen häufig moduliert werden können, um mit einem sogenannten Feldsweep die Resonanzlinie abzufahren. Typischerweise wird dies mit einem, das Magnetspulensystem ergänzenden, zusätzlichen Spulensystem erreicht, welches in einer erfindungsgemäßen Anordnung besonders effizient dimensioniert werden kann.

[0014] Besonders bevorzugt ist eine Ausführungsform der erfindungsgemäßen Magnetanordnung, bei der das supraleitende Magnetspulensystem ein radial inneres und ein radial äußeres, elektrisch in Serie zusammengeschaltetes, koaxiales Spulensystem umfasst, wobei diese beiden Spulensysteme im Arbeitsvolumen je ein Magnetfeld mit entgegengesetzter Richtung entlang der z-Achse erzeugen. In einer solchen Anordnung wirkt sich das magnetische Abschirmverhalten des Supraleiters im Magnetspulensystem typischerweise besonders stark auf die effektive Feldstärke im Arbeitsvolumen g^{eff}_D gewisser zusätzlicher felderzeugender Spulensysteme aus.

[0015] Bei einer Weiterbildung dieser Ausführungsform weisen das radial innere Spulensystem und das radial äußere Spulensystem näherungsweise entgegengesetzt gleich große Dipolmomente auf. Dies ist die Bedingung für optimale Unterdrückung des Streufeldes des Magnetspulensystems. Aufgrund der großen technischen Bedeutung von aktiv abgeschirmten Magneten ist es ein großer Vorteil, dass auch in solchen Magneten die effektive Feldstärke im Arbeitsvolumen g^{eff}_D zusätzlicher felderzeugender Spulensysteme durch das diamagnetische Abschirmverhalten des Supraleiters im Magnetspulensystem erfindungsgemäß verstärkt werden kann.

[0016] Eine andere vorteilhafte Weiterbildung einer der obigen Ausführungsformen sieht vor, dass das Magnetspulensystem einen ersten im Betriebszustand supraleitend kurzgeschlossenen Strompfad bildet, und dass eine mit dem Magnetspulensystem galvanisch nicht verbundene Störkompensationsspule koaxial zum Magnetspulensystem angeordnet ist und einen weiteren im Betriebszustand supraleitend kurzgeschlossenen Strompfad bildet. Das Vorhandensein einer Störkompensationsspule verbessert die zeitliche Stabilität des Magnetfeldes im Arbeitsvolumen unter dem Einfluss von externen Feldfluktuationen. In einer solchen Weiterbildung einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung wird der Einfluss einer Störkompensationsspule auf die effektive Feldstärke im Arbeitsvolumen g^{eff}_D eines zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems berücksichtigt.

[0017] Vorteilhaft ist auch eine Weiterbildung, die sich dadurch auszeichnet, dass ein mit einem supraleitenden Schalter überbrückter Teil des Magnetspulensystems einen weiteren im Betriebszustand supraleitend kurzgeschlossenen Strompfad bildet. Mit einer solchen Anordnung wird die zeitliche Stabilität des Magnetfeldes im Arbeitsvolumen unter dem Einfluss von externen Feldfluktuationen verbessert. In einer solchen Weiterbildung einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung wird der Einfluss der Überbrückung eines Teils des Magnetspulensystems mit einem supraleitenden Schalter auf die effektive Feldstärke im Arbeitsvolumen g^{eff}_D eines zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems berücksichtigt.

[0018] Bei einer vorteilhaften Weiterbildung der erfindungsgemäßen Magnetanordnung bildet ein System zur Kompensation der Drift des Magnetspulensystems einen weiteren im Betriebszustand supraleitend kurzgeschlossenen Strompfad. Mit einer solchen Anordnung wird die zeitliche Stabilität des Magnetfeldes im Arbeitsvolumen verbessert. In einer solchen Weiterbildung einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung wird der Einfluss der Driftkompensation auf die effektive Feldstärke im Arbeitsvolumen g^{eff}_D eines zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems berücksichtigt.

[0019] Vorteilhaft ist auch eine Weiterbildung, die sich dadurch auszeichnet, dass eine Shimvorrichtung einen weiteren im Betriebszustand supraleitend kurzgeschlossenen Strompfad bildet. Mit einer solchen Anordnung können Feldinhomogenitäten kompensiert werden. In einer solchen Weiterbildung einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung wird der Einfluss der supraleitenden Shimvorrichtung auf die effektive Feldstärke im Arbeitsvolumen g^{eff}_D eines zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems berücksichtigt.

[0020] Eine besonders bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Magnetanordnung zeichnet sich dadurch aus, dass eine Vorrichtung mit einer radial inneren und radial äußeren Teilspule einen weiteren im Betriebszustand supraleitend kurzgeschlossenen Strompfad bildet, wobei die Teilspulen in Serie geschaltet sind, die radial äußere Teilspule pro Ampère Strom ein im Betrag wesentlich größeres Dipolmoment aufweist als die radial innere, und wobei die radial innere Teilspule pro Ampère Strom im Arbeitsvolumen ein im Betrag wesentlich größeres Magnetfeld aufbaut als die radial äußere. Mit einer solchen Vorrichtung kann die effektive Feldstärke im Arbeitsvolumen g^{eff}_D eines zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems verstärkt werden, wenn sich das zusätzliche felderzeugende Spulensystem außerhalb der radial äußeren Teilspule der genannten Vorrichtung befindet.

[0021] Bei einer besonders vorteilhaften Weiterbildung einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung ist das zusätzliche felderzeugende Spulensystem normalleitend. Der Vorteil dieser Anordnung besteht darin, dass das zusätzliche

felderzeugende Spulensystem im Raumtemperaturbereich angebracht werden kann und daher die Kühlung des supraleitenden Teils der Magnetanordnung nicht beeinträchtigt wird.

[0022] Eine andere vorteilhafte Weiterbildung einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung zeichnet sich dadurch aus, dass das zusätzliche felderzeugende Spulensystem supraleitend ist. Der Vorteil dieser Anordnung besteht darin, dass das zusätzliche felderzeugende Spulensystem mehr Strom tragen kann, als wenn die Spulen aus einem resistiven Material bestünden.

[0023] Bei einer vorteilhaften Weiterbildung einer erfindungsgemäßen Anordnung ist das zusätzliche felderzeugende Spulensystem Teil einer Vorrichtung zur Modulation der Magnetfeldstärke im Arbeitsvolumen. In einer erfindungsgemäßen Anordnung kann ein solches Spulensystem besonders effizient dimensioniert werden.

[0024] Vorteilhaft ist auch eine Weiterbildung, die sich dadurch auszeichnet, dass das zusätzliche felderzeugende Spulensystem Teil eines sogenannten Z^0-Shims ist, welcher im Arbeitsvolumen ein im Wesentlichen homogenes Magnetfeld erzeugt. Durch eine Stromänderung in einer solchen Vorrichtung ist es möglich, eine allfällige Drift des Hauptspulensystems nach einer gewissen Zeit wieder zu kompensieren, ohne dass der Strom im Hauptspulensystem neu gesetzt werden muss. In einer erfindungsgemäßen Anordnung kann eine solche Vorrichtung besonders effizient dimensioniert werden.

[0025] In den Rahmen der vorliegenden Erfindung fällt auch ein Verfahren zur Dimensionierung einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung, dadurch gekennzeichnet, dass die Größe g_D^{eff}, welche der Feldänderung im Arbeitsvolumen bei $z = 0$ pro Ampère Strom im zusätzlichen felderzeugenden Spulensystem entspricht, unter Berücksichtigung der aufgrund von in der restlichen Magnetanordnung induzierten Strömen erzeugten Magnetfelder, berechnet wird gemäß:

$$g_D^{eff} = g_D - g^{\mathrm{T}} \cdot \left(L^{cl} - \alpha L^{cor}\right)^{-1} \cdot \left(L_{\leftarrow D}^{cl} - \alpha L_{\leftarrow D}^{cor}\right)$$

wobei die verwendeten Größen die oben genannten Bedeutungen haben. Der Vorteil dieser Methode zur Dimensionierung einer Magnetanordnung mit einem zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems besteht darin, dass das magnetische Abschirmverhalten des Supraleiters im Magnetspulensystem berücksichtigt wird. Die Methode basiert darauf, dass für die induktiven Kopplungen und für alle Selbstinduktivitäten Korrekturterme berechnet werden, welche sich mit einem Gewichtungsfaktor α auf die entsprechenden Größen niederschlagen. Mit dieser Methode wird eine bessere Übereinstimmung zwischen berechneter und messbarer effektiver Feldstärke im Arbeitsvolumen g_D^{eff} des zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems erreicht als mit einer Methode nach dem Stand der Technik. Insbesondere kann die Magnetanordnung dahingehend optimiert werden, dass g_D^{eff} unter dem Einfluss des magnetischen Abschirmverhaltens des Supraleiters im Magnetspulensystem möglichst groß ist.

[0026] Bei einer einfachen Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens entspricht der Parameter α dem Volumenanteil des Supraleitermaterials am Volumen des Magnetspulensystems. Dieser Methode zur Bestimmung des Parameters α liegt die Annahme zugrunde, dass im Supraleiter die Suszeptibilität gegenüber kleinen Feldänderungen (-1) betrage (idealer Diamagnetismus).

[0027] Die so bestimmten Werte für α können aber für die meisten Magnettypen experimentell nicht bestätigt werden. Daher zeichnet sich eine besonders bevorzugte alternative Verfahrensvariante dadurch aus, dass der Parameter α für das Magnetspulensystem experimentell bestimmt wird aus der Messung der Größe β^{exp} des Magnetspulensystems [ohne zusätzliche induktiv auf Flussänderungen reagierende Strompfade] bezüglich einer Störspule, welche im Volumen des Magnetspulensystems im Wesentlichen ein homogenes Störfeld erzeugt, und durch Einsetzen der Größe β^{exp} in die Gleichung

$$\alpha = \frac{g_H \left(L_M^{cl}\right)^2 \left(\beta^{\exp} - \beta^{cl}\right)}{g_H \left(\beta^{\exp} - \beta^{cl}\right) L_M^{cl} L_M^{cor} - g_M \left(L_{M\leftarrow H}^{cl} L_M^{cor} - L_{M\leftarrow H}^{cor} L_M^{cl}\right)} \quad ,$$

wobei

$$\beta^{\exp} = \frac{g_H^{\exp}}{g_H},$$

$g_H^{\exp}$: gemessene Feldänderung im Arbeitsvolumen der Magnetanordnung pro Ampère Strom in der Störspule,

$$\beta^{cl} = 1 - g_M \cdot \left(\frac{L^{cl}_{M \leftarrow H}}{L^{cl}_M \cdot g_H} \right),$$

g_M : Feld pro Ampère des Magnetspulensystems im Arbeitsvolumen,

g_H : Feld pro Ampère der Störspule im Arbeitsvolumen ohne die Feldbeiträge des Magnetspulensystems,

L^{cl}_M : Induktivität des Magnetspulensystems,

$L^{cl}_{M \leftarrow H}$: induktive Kopplung der Störspule mit dem Magnetspulensystem,

L^{cor}_M : Korrektur zur Magnetinduktivität L^{cl}_M, welche sich bei kompletter diamagnetischer Verdrängung von Störfeldern aus dem Volumen des Magnetspulensystems ergäbe,

$L^{cor}_{M \leftarrow H}$: Korrektur zur induktiven Kopplung $L^{cl}_{M \leftarrow H}$ der Störspule mit dem Magnetspulensystem, welche sich bei kompletter diamagnetischer Verdrängung von Störfeldern aus dem Volumen des Magnetspulensystems ergäbe.

[0028] Bei einer weiteren besonders bevorzugten Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens schließlich werden die Korrekturen L^{cor}, $L^{cor}_{\leftarrow D}$, L^{cor}_M und $L^{cor}_{M \leftarrow D}$ folgendermaßen berechnet:

$$L^{cor} = \begin{pmatrix} L^{cor}_M & L^{cor}_{M \leftarrow P1} & \cdots & L^{cor}_{M \leftarrow Pn} \\ L^{cor}_{P1 \leftarrow M} & L^{cor}_{P1} & \cdots & L^{cor}_{P1 \leftarrow Pn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L^{cor}_{Pn \leftarrow M} & L^{cor}_{Pn \leftarrow P1} & \cdots & L^{cor}_{Pn} \end{pmatrix},$$

$$L^{cor}_{\leftarrow D} = \begin{pmatrix} L^{cor}_{M \leftarrow D} \\ L^{cor}_{P1 \leftarrow D} \\ \vdots \\ L^{cor}_{Pn \leftarrow D} \end{pmatrix},$$

$$L^{cor}_{Pj \leftarrow Pk} = f_{Pj}(L^{cl}_{(Pj,red,Ra_1) \leftarrow Pk} - L^{cl}_{(Pj,red,Ri_1) \leftarrow Pk}),$$

$$L^{cor}_{Pj \leftarrow D} = f_{Pj}(L^{cl}_{(Pj,\mathrm{red},Ra_1) \leftarrow D} - L^{cl}_{(Pj,\mathrm{red},Ri_1) \leftarrow D}),$$

$$L^{cor}_{Pj \leftarrow M} = f_{Pj}(L^{cl}_{(Pj,\mathrm{red},Ra_1) \leftarrow M} - L^{cl}_{(Pj,\mathrm{red},Ri_1) \leftarrow M}),$$

$$L^{cor}_{M \leftarrow Pj} = L^{cl}_{1 \leftarrow Pj} - L^{cl}_{(1,\mathrm{red},Ri_1) \leftarrow Pj} + \frac{Ra_1}{R_2}(L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ra_1) \leftarrow Pj} - L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ri_1) \leftarrow Pj}),$$

$$L^{cor}_{M \leftarrow D} = L^{cl}_{1 \leftarrow D} - L^{cl}_{(1,\mathrm{red},Ri1) \leftarrow D} + \frac{Ra_1}{R_2}(L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ra_1) \leftarrow D} - L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ri_1) \leftarrow D}),$$

$$L_M^{cor} = L_{1\leftarrow 1}^{cl} - L_{(1,\mathrm{red},Ri1)\leftarrow 1}^{cl} + L_{1\leftarrow 2}^{cl} - L_{(1,\mathrm{red},Ri1)\leftarrow 2}^{cl}$$

$$+ \frac{Ra_1}{R_2}\left(L_{(2,\mathrm{red},Ra_1)\leftarrow 2}^{cl} - L_{(2,\mathrm{red},Ri_1)\leftarrow 2}^{cl} + L_{(2,\mathrm{red},Ra_1)\leftarrow 1}^{cl} - L_{(2,\mathrm{red},Ri_1)\leftarrow 1}^{cl}\right)$$

wobei

Ra_1: Außenradius des Magnetspulensystems (im Falle eines aktiv abgeschirmten Magnetspulensystems Außenradius der Hauptspule),

Ri_1: Innenradius des Magnetspulensystems,

R_2: im Falle eines aktiv abgeschirmten Magnetspulensystems mittlerer Radius der Abschirmung, sonst unendlich,

R_{Pj}: mittlerer Radius der Zusatzspule *Pj,*

$$f_{Pj} = \begin{cases} \dfrac{Ra_1}{R_{Pj}}, R_{Pj} > Ra_1 \\ 1, R_{Pj} < Ra_1 \end{cases}$$

und wobei der Index 1 im Falle eines aktiv abgeschirmten Magnetspulensystems die Hauptspule, sonst das Magnetspulensystem bezeichnet, der Index 2 im Falle eines aktiv abgeschirmten Magnetspulensystems die Abschirmung bezeichnet, während ansonsten die Terme mit Index 2 wegfallen, und der Index (*X*, *red, R*) eine hypothetische Spule bezeichnet, welche entstünde, wenn alle Windungen der Spule *X* auf dem Radius *R* gewickelt wären.

[0029] Der besondere Vorteil dieser Methode zur Berechnung der Korrekturen L^{cor}, $L_{\leftarrow D}^{cor}$, L_M^{cor} und $L_{M\leftarrow D}^{cor}$ besteht darin, dass die Korrekturen unter Berücksichtigung der geometrischen Anordnung der beteiligten Spulen auf induktive Kopplungen und Eigeninduktivitäten von Spulen zurückgeführt werden.

[0030] Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der Zeichnung. Ebenso können die vorstehend genannten und die noch weiter ausgeführten Merkmale erfindungsgemäß jeweils einzeln 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.

[0031] Die Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 einen schematischen Vertikalschnitt durch eine radiale Hälfte der erfindungsgemäßen Magnetanordnung zur Erzeugung eines Magnetfeldes in Richtung einer *z*-Achse in einem um *z = 0* angeordneten Arbeitsvolumen *AV* mit einem supraleitenden Magnetspulensystem *M*, einem zusätzlichen felderzeugenden Spulensystem *D* und mit einem weiteren supraleitend geschlossenen Strompfad *P1*;

Fig. 2 die effektive Feldstärke $g^{eff,cl}$ pro Ampère Strom, berechnet mit einer Methode nach dem Stand der Technik, für eine einzelne Teilspule eines felderzeugenden Spulensystems in einem aktiv abgeschirmten supraleitenden Magnetspulensystem ohne weitere supraleitend geschlossene Strompfade als Funktion des reduzierten Radius ρ (Radius normiert auf den Außenradius der Hauptspule des Magnetspulensystems) der betrachteten Teilspule;

Fig. 3 die effektive Feldstärke g^{eff} pro Ampère Strom, berechnet mit der erfindungsgemäßen Methode, für eine Teilspule eines felderzeugenden Spulensystems in einem aktiv abgeschirmten supraleitenden Magnetspulensystem ohne weitere supraleitend geschlossene Strompfade als Funktion des reduzierten Radius ρ (Radius normiert auf den Außenradius der Hauptspule des Magnetspulensystems) der betrachteten Teilspule;

Fig. 4 die Differenz der in Figur 2 und 3 dargestellten Größen g^{eff} und $g^{eff,cl}$ als Funktion des reduzierten Radius ρ (Radius normiert auf den Außenradius der Hauptspule) der betrachteten Teilspule.

[0032] Anhand der Figur 1 wird ersichtlich, dass in einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung sowohl das supraleitende Magnetspulensystem *M* als auch das zusätzliche felderzeugende Spulensystem *D* und der weitere supraleitend geschlossene Strompfad *P1* aus mehreren Teilspulen aufgebaut sein können, welche auf verschiedene Radien verteilt sein können. Die Teilspulen können unterschiedliche Polaritäten aufweisen. Alle Teilspulen sind koaxial angeordnet um ein Arbeitsvolumen *AV* auf einer Achse *z* bei *z = 0*. Durch den kleinen Spulenquerschnitt des zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems *D* und des weiteren supraleitend geschlossenen Strompfades *P1* in der Figur 1 wird dargestellt, dass das zusätzliche felderzeugende Spulensystem *D* und der weitere supraleitend geschlossene Strompfad *P1* nur schwache Magnetfelder erzeugen, das Hauptfeld aber vom Magnetspulensystem *M* herrührt.

[0033] Anhand der Figuren 2 bis 4 werden die Funktionen $g^{eff,cl}$ und g^{eff} für eine einzelne Teilspule eines felderzeugenden Spulensystems gezeigt in Abhängigkeit vom Radius der Teilspule. Die Teilspule hat eine axiale Länge von 200 mm und besteht aus zwei Lagen mit je 400 Drahtwindungen. Ihre Mittelebene liegt auf der Höhe des Arbeitsvolumens bei *z = 0*. Die Größen $g^{eff,cl}$ beziehungsweise g^{eff} entsprechen dem Feldbeitrag pro Ampère der betrachteten Teilspule im Arbeitsvolumen bei *z = 0* unter Berücksichtigung der Feldbeiträge der Teilspule selbst wie auch der Feldänderung aufgrund von Strömen, welche im supraleitenden Magnetspulensystem *M* beim Laden der Teilspule induziert werden, wobei $g^{eff,cl}$ mit einer Methode nach dem Stand der Technik und g^{eff} mit der erfindungsgemäßen Methode simuliert wurde. Diese Berechnungen wurden für eine Magnetanordnung mit einem aktiv abgeschirmten supraleitenden Magnetspulensystem M ohne weitere supraleitend geschlossene Strompfade durchgeführt, wobei der Radius der aktiven Abschirmung dem doppelten Außenradius der Hauptspule des Magnetspulensystems *M* entspricht. Die Dipolmomente von Hauptspule und Abschirmspule sind entgegengesetzt gleich groß. Es zeigt sich, dass sich aufgrund der mit $\alpha = 0.33$ gewichteten Korrekturterme entsprechend der erfindungsgemäßen Methode gegenüber einer Methode nach dem Stand der Technik für große Radien der Teilspule des felderzeugenden Spulensystems eine Abweichung von etwa 40 Prozent ergibt für die effektive Feldstärke pro Ampère. Die Größe $\alpha = 0.33$ entspricht grob dem Supraleitergehalt des Spulenvolumens des Magnetspulensystems.

[0034] Um die nachfolgende Beschreibung zu vereinfachen, werden hier einige Begriffe eingeführt:

- Ein aktiv abgeschirmtes supraleitendes Magnetspulensystem *M* umfasst ein radial inneres Spulensystem *C1*, im Weiteren als *Hauptspule* bezeichnet, und ein radial äußeres Spulensystem *C2*, im Folgenden *Abschirmspule* genannt. Diese Spulen sind axialsymmetrisch um eine *z*-Achse angeordnet und erzeugen in einem auf der Achse um *z* = 0 angeordneten Volumen - im Folgenden als das *Arbeitsvolumen* des Magneten bezeichnet - Magnetfelder entgegengesetzter Richtung. Ein nicht abgeschirmtes supraleitendes Magnetspulensystem *M* wird als Spezialfall mit einem vernachlässigbaren äußeren Spulensystem *C2* betrachtet.

- Unter einem *Störfeld* verstehen wir entweder eine elektromagnetische Störung, die außerhalb der Magnetanordnung entsteht oder ein Feld, das von zusätzlichen, nicht zum Magnetspulensystem *M* gehörenden, Spulen erzeugt wird (beispielsweise von Spulen eines zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems) und dessen Feldbetrag 0.1 T nicht überschreitet.

- Um möglichst kompakte und übersichtliche Formeln zu bekommen, werden in der Ausführung folgende Indizes benutzt:

1	Hauptspule
2	Abschirmspule
M	Magnetspulensystem *C1*, *C2*
D	zusätzliches felderzeugendes Spulensystem
H	Störspule
P	zusätzlicher supraleitender Strompfad
cl	nach dem zitierten Stand der Technik berechnete Größe
cor	Korrekturterme gemäß der vorliegenden Erfindung

[0035] Für zusätzliche supraleitende Strompfade werden die Indizes *P1, P2,* ... verwendet.

[0036] Bei der Berechnung der effektiven Feldstärke g^{eff} pro Ampère Strom eines zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems *D* müssen sowohl die Feldbeiträge des Spulensystems selbst wie auch die Feldänderungen aufgrund von Strömen, welche im supraleitenden Magnetspulensystem *M* und in weiteren supraleitend geschlossenen Strompfaden beim Laden des Spulensystems *D* induziert werden, berücksichtigt werden. Um die induktive Reaktion des Magnetspulensystems *M* mit einem Modell nach dem Stand der Technik (im Weiteren als das *klassische Modell* bezeichnet) zu berechnen, wird der Supraleiter des Magnetspulensystems als ein Material ohne elektrischen Widerstand modelliert. Im Modell, welches der vorliegenden Erfindung zugrunde liegt, werden dagegen zusätzliche magnetische Eigenschaften des Supraleiters berücksichtigt. Diese Eigenschaften haben zwar alle supraleitenden Magnetspulen-

systeme, sie wirken sich aber vor allem in aktiv abgeschirmten Magnetspulensystemen auf die effektive Feldstärke von zusätzlichen Spulensystemen *D* aus. In solchen Magnetanordnungen stellt man häufig fest, dass die gemessene effektive Feldstärke des zusätzlichen Spulensystems *D* nicht der mit dem klassischen Modell berechneten entspricht. Insbesondere kann die diamagnetische Verdrängung von kleinen Feldänderungen genutzt werden, um besonders große effektive Feldstärken von zusätzlichen Spulensystemen zu erreichen. Solche Spulensysteme können beispielsweise Z^0-Shims oder Feldmodulationsspulen sein.

[0037] Weil das Feld des supraleitenden Magnetspulensystems im Arbeitsvolumen um Größenordnungen stärker ist als das Feld von zusätzlichen Spulensystemen (beispielsweise eines Z^0-Shims oder einer Feldmodulationsspule), wirkt sich nur die zum Feld des Magnetspulensystems parallele Komponente (hier als *z*-Komponente bezeichnet) des Feldes der zusätzlichen Spulensysteme im Gesamtfeldbetrag aus. Deshalb betrachten wir im Weiteren nur B_z-Felder.

[0038] Sobald am Ort eines supraleitenden Magnetspulensystems *M* durch ein felderzeugendes Spulensystem *D* ein Störfeld aufgebaut wird (beispielsweise beim Laden eines Z^0-Shims oder einer Feldmodulationsspule), wird nach der Lenz'schen Regel ein Strom im supraleitend kurzgeschlossenen Magnetspulensystem induziert, welcher ein dem Störfeld entgegengesetztes Kompensationsfeld aufbaut. Die im Arbeitsvolumen resultierende Feldänderung $\Delta B_{z,total}$ ist eine Überlagerung des Störfeldes $\Delta B_{z,D}$ und des Kompensationsfeldes $\Delta B_{z,M}$, das heißt $\Delta B_{z,total} = \Delta B_{z,D} + \Delta B_{z,M}$. Bei einem Strom ΔI_D im felderzeugenden Spulensystem *D* wird im Magnetspulensystem der Strom

$$\Delta I_M^{cl} = -\Delta I_D \cdot \frac{L_{M\leftarrow D}^{cl}}{L_M^{cl}}$$

induziert, wobei L_M^{cl} die (klassische) Eigeninduktivität des Magnetspulensystems und $L_{M\leftarrow D}^{cl}$ die (klassische) induktive Kopplung zwischen Magnetspulensystem und felderzeugendem Spulensystem bedeuten. Die effektive Feldstärke pro Ampère Strom im felderzeugenden Spulensystem *D* im Arbeitsvolumen $g_D^{eff,cl}$ ist die Überlagerung des Feldbeitrags pro Ampère

$$g_D = \frac{\Delta B_{z,D}}{\Delta I_D}$$

des Spulensystems selbst mit der Feldänderung aufgrund des im supraleitenden Magnetspulensystem *M* induzierten Stromes pro Ampère Strom im felderzeugenden Spulensystem *D*, also:

$$g_D^{eff,cl} = g_D + g_M \frac{\Delta I_M^{cl}}{\Delta I_D} = g_D - g_M \frac{L_{M\leftarrow \mathrm{D}}^{cl}}{L_M^{cl}}, \tag{1}$$

wobei g_M das Feld pro Ampère des Magnetspulensystems *M* im Arbeitsvolumen ist.

Im Fall, wo in der Magnetanordnung nebst dem Magnetspulensystem *M* und einem felderzeugenden Spulensystem *D* (beispielsweise einem Z^0-Shim oder einer Feldmodulationsspule) noch weitere supraleitend kurzgeschlossene Strompfade *P1,...,Pn* vorhanden sind, verallgemeinert sich die obige Formel zu:

$$g_D^{eff,cl} = g_D - g^{\mathrm{T}} \cdot (L^{cl})^{-1} \cdot L_{\leftarrow D}^{cl}, \tag{2}$$

wobei:

$$g^{\mathrm{T}} = (g_M, g_{P_1}, ..., g_{Pj}, ..., g_{Pn}),$$

wobei:

g_M : Feld pro Ampère des Magnetspulensystems *M* im Arbeitsvolumen ohne die Feldbeiträge der in den zusätzlichen Strompfaden *P1,...,Pn* induzierten Ströme,

g_{Pj} : Feld pro Ampère des Strompfades *Pj* im Arbeitsvolumen ohne die Feldbeiträge der in den anderen zusätzlichen Strompfaden *P1,...,Pn* und im Magnetspulensystem *M* induzierten Ströme,

$$L^{cl} = \begin{pmatrix} L^{cl}_{M} & L^{cl}_{M\leftarrow P1} & \cdots & L^{cl}_{M\leftarrow Pn} \\ L^{cl}_{P1\leftarrow M} & L^{cl}_{P1} & \cdots & L^{cl}_{P1\leftarrow Pn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L^{cl}_{Pn\leftarrow M} & L^{cl}_{Pn\leftarrow P1} & \cdots & L^{cl}_{Pn} \end{pmatrix}$$

Matrix der (klassischen) induktiven Kopplungen zwischen dem Magnetspulensystem *M* und den Strompfaden *P1,...,Pn* sowie zwischen den Strompfaden *P1,...,Pn* untereinander,

$(L^{cl})^{-1}$ Inverse der Matrix L^{cl},

$$L^{cl}_{\leftarrow D} = \begin{pmatrix} L^{cl}_{M\leftarrow D} \\ L^{cl}_{P1\leftarrow D} \\ \vdots \\ L^{cl}_{Pn\leftarrow D} \end{pmatrix},$$

wobei:
$L^{cl}_{Pj\leftarrow D}$ (klassische) induktive Kopplung des Strompfades *Pj* mit dem Spulensystem *D*,
$L^{cl}_{M\leftarrow D}$ (klassische) induktive Kopplung des Magnetspulensystems *M* mit dem Spulensystem *D*.

[0039] Unter Berücksichtigung der erwähnten speziellen magnetischen Eigenschaften des Supraleiters werden die klassischen induktiven Kopplungen und die Eigeninduktivitäten um einen zusätzlichen Beitrag erweitert. Deshalb werden die im Magnetspulensystem *M* und in den zusätzlichen Strompfaden *P1,...,Pn* induzierten Ströme im Allgemeinen andere Werte als die klassisch berechneten annehmen. Im Folgenden werden diese Korrekturen aufgrund eines Modelles des magnetischen Verhaltens des Supraleiters im Magnetspulensystem berechnet.

[0040] Es ist bekannt, dass Typ-I Supraleiter magnetischen Fluss komplett aus ihrem Inneren verdrängen (Meissner Effekt). Bei Typ-II Supraleitern ist dies oberhalb des unteren kritischen Feldes H_{c1} nicht mehr der Fall. Nach dem Bean-Modell (C.P. Bean, Phys. Rev. Lett. **8,** 250 (1962), C.P. Bean, Rev. Mod. Phys. **36,** 31 (1964)) haften die magnetischen Flusslinien aber an den sogenannten "pinning centers". Kleine Flussänderungen werden von den "pinning centers" an der Oberfläche des Supraleiters eingefangen und gelangen nicht bis ins Innere des Supraleiters. Es resultiert eine teilweise Verdrängung von Störfeldern aus dem Supraleitervolumen. Ein Typ-II Supraleiter reagiert also auf kleine Feldänderungen diamagnetisch, während größere Feldänderungen weitgehend ins Supraleitermaterial eindringen.

[0041] Um die Wirkungen dieses Effekts der Verdrängung von kleinen Störfeldern aus dem Supraleitervolumen berechnen zu können, machen wir verschiedene Annahmen. Erstens gehen wir davon aus, dass der überwiegende Anteil des gesamten Supraleitervolumens in einer Magnetanordnung in der Hauptspule konzentriert ist, und dass das Supraleitervolumen in der Abschirmspule und in weiteren supraleitenden Spulensystemen vernachlässigt werden kann.

[0042] Ferner stellen wir uns vor, dass alle kleine Feldänderungen im Volumen der Hauptspule um einen konstanten Faktor $(1 - \alpha)$ mit $0 < \alpha < 1$ reduziert sind gegenüber dem Wert, den sie ohne die diamagnetische Abschirmwirkung des Supraleiters hätten. In der freien Innenbohrung der Hauptspule (Radius Ri_1) nehmen wir dagegen an, dass keine Reduktion der Störfelder aufgrund des Supraleiter-Diamagnetismus auftritt. Die aus der Hauptspule verdrängten Feldlinien akkumulieren sich außerhalb des Außenradius Ra_1 der Hauptspule, so dass in diesem Bereich eine Überhöhung des Störfeldes eintritt. Für diese Störfeldüberhöhung außerhalb von Ra_1 nehmen wir an, dass sie von einem Maximalwert bei Ra_1 gegen größere Abstände *r* von der Magnetachse mit $(1/r^3)$ abnehme (Dipolverhalten). Der Maximalwert bei Ra_1 wird so normiert, dass die Verstärkung des Störflusses außerhalb Ra_1 die Reduktion des Störflusses innerhalb des Supraleitervolumens der Hauptspule genau kompensiert (Flusserhaltung).

[0043] Die Umverteilung von magnetischem Fluss durch die Anwesenheit eines sich gegenüber kleinen Feldänderungen diamagnetisch verhaltenden Supraleitervolumens bewirkt, dass die induktiven Kopplungen und Eigeninduktivitäten von Spulen im Bereich des Supraleitervolumens verändert werden. Um das klassische Modell zur Berechnung der effektiven Feldstärke eines felderzeugenden Spulensystems *D* (beispielsweise eines Z^0-Shims oder einer Feldmodulationsspule) zu erweitern und den Einfluss des Supraleiter-Diamagnetismus zu berücksichtigen, genügt es, für jeden in der Formel $g^{eff,cl}_{D} = g_D - g^T \cdot (L^{cl})^{-1} \cdot L^{cl}_{\leftarrow D}$ vorkommenden Kopplungs- oder Eigeninduktivitäts-Term den richtigen Korrekturterm zu bestimmen. An der Struktur der Gleichung ändert sich nichts. Die Korrekturterme werden im Folgenden für alle Kopplungen und Eigeninduktivitäten hergeleitet.

[0044] Das Prinzip der Berechnung der Korrekturterme ist in allen Fällen dasselbe, nämlich zu bestimmen, um wie viel der magnetische Fluss durch eine Spule aufgrund einer kleinen Stromänderung in einer anderen (oder in ihr selbst) durch die Anwesenheit des diamagnetisch reagierenden Supraleitermaterials in der Hauptspule des Magnetspulensystems reduziert wird. Entsprechend ist auch die Kopplung der ersten mit der zweiten Spule (bzw. die Eigeninduktivität) reduziert. Die Größe des Korrekturterms hängt einerseits davon ab, wie groß der Anteil des mit Supraleitermaterial der Hauptspule gefüllten Volumens innerhalb der induktiv reagierenden Spule am gesamten von der Spule umschlossenen Volumen ist. Andererseits hat auch die relative Lage der Spulen zueinander einen Einfluss auf den Korrekturterm für ihre gegenseitige induktive Kopplung.

[0045] Als nützliches Hilfsmittel zur Berechnung der Korrekturterme hat sich die Einführung von "reduzierten Spulen" erwiesen. Unter der auf den Radius *R* reduzierten Spule *X* verstehen wir jene hypothetische Spule, welche entstünde, wenn alle Windungen der Spule *X* auf dem Radius *R* gewickelt wären. Für diese Spule wird in der Notation der Index *"X,red,R*" verwendet. Dank der reduzierten Spulen können bei einer Flussänderung durch eine Spule die Beiträge der Flussänderung durch Teilflächen dieser Spule an der gesamten Flussänderung berechnet werden.

[0046] Als erstes wird nun der Korrekturterm für die Kopplung eines felderzeugenden Spulensystems *D* mit der Hauptspule *C1* des Magnetspulensystems (abgeschirmt oder unabgeschirmt) berechnet.

[0047] Im Volumen der Hauptspule *C1* wird das Störfeld $\Delta B_{z,D}$ im Mittel um den Beitrag $\alpha \cdot \Delta B_{z,D}$ reduziert, wobei $0 < \alpha < 1$ ein a priori noch unbekannter Parameter ist. Als Konsequenz wird der Störfluss durch die Hauptspule *C1* und damit die induktive Kopplung $L_{1\leftarrow D}$ von Hauptspule und zusätzlichem felderzeugendem Spulensystem um einen Faktor $(1 - \alpha)$ gegenüber dem klassischen Wert $L^{cl}_{1\leftarrow D}$ geschwächt, sofern man das Störfeld in der Innenbohrung der Hauptspule auch als um den Faktor $(1 - \alpha)$ reduziert behandelt. Wir nehmen aber an, dass der Fluss des zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems nicht aus der Innenbohrung des Magneten verdrängt wird. Daher muss die Kopplung zwischen dem zusätzlichen felderzeugenden Spulensystem und der Hauptspule nun wieder um den fälschlicherweise abgezogenen Anteil aus der Innenbohrung ergänzt werden. Gemäß der Definition der "reduzierten Spulen" ist dieser Beitrag $\alpha \cdot L^{cl}_{(1,\mathrm{red},Ri1)\leftarrow D}$, wobei $L^{cl}_{(1,\mathrm{red},Ri1)\leftarrow D}$ die Kopplung des zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems mit der auf ihren Innenradius Ri_1 reduzierten Hauptspule *C1* ist. Unter Berücksichtigung der Störfeldverdrängung aus dem Supraleitervolumen der Hauptspule beträgt die induktive Kopplung $L_{1\leftarrow D}$ von Hauptspule und zusätzlichem felderzeugendem Spulensystem daher:

$$L_{1\leftarrow D} = (1-\alpha) \cdot L^{cl}_{1\leftarrow D} + \alpha L^{cl}_{(1,\mathrm{red},Ri1)\leftarrow D} \tag{3}$$

[0048] Der verdrängte Fluss taucht radial außerhalb des Außenradius Ra_1 der Hauptspule wieder auf. Nimmt man für das verdrängte Feld ein Dipolverhalten an (Abnahme mit $(1/r^3)$), bekommt man außerhalb der Hauptspule zusätzlich zum klassischen Störfeld noch den Beitrag

$$\alpha \frac{Ra_1}{r^3} \int_{Ri_1}^{Ra_1} \Delta B_{z,D} R dR \,. \tag{4}$$

[0049] Diese Funktion ist so normiert, dass der gesamte Fluss der Störfeldes durch eine große Schlaufe vom Radius *R* für $R \to \infty$ gegen null strebt. Es wurde ein Störfeld $\Delta B_{z,D}$ mit Zylindersymmetrie angenommen.

[0050] Im Falle eines aktiv abgeschirmten Magnetspulensystems reduziert sich wegen der Verdrängung des Störflusses durch die Hauptspule *C1* auch der Störfluss durch die Abschirmspule C2. Genauer gesagt ist der Störfluss durch eine Windung vom Radius R_2 auf axialer Höhe z_0 gegenüber dem klassischen Fall um folgenden Beitrag reduziert (Integral von (4) über das Gebiet $r > R_2$):

$$2\pi\alpha \int_{R_2}^{\infty} \frac{Ra_1}{r^2} dr \int_{Ri_1}^{Ra_1} \Delta B_z^D R dR = 2\pi\alpha \frac{Ra_1}{R_2} \int_{Ri_1}^{Ra_1} \Delta B_z^D R dR = \alpha \frac{Ra_1}{R_2} (\Phi^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ra_1)\leftarrow D} - \Phi^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ri_1)\leftarrow D})$$

[0051] $\Phi^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ra_1)\leftarrow D}$ bezeichnet hier den klassischen Störfluss durch eine Schlaufe vom Radius Ra_1, die sich auf gleicher axialer Höhe z_0 befindet wie die betrachtete Schlaufe mit Radius R_2 (analog für Ri_1). Summiert man nun über alle Windungen der Abschirmspule (diese befinden sich näherungsweise alle auf dem gleichen Radius R_2) bekommt man neu folgende gegenseitige Kopplung des zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems mit der Abschirmspule:

$$L_{2\leftarrow D} = L^{cl}_{2\leftarrow D} - \alpha\frac{Ra_1}{R_2}(L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ra_1)\leftarrow D} - L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ri_1)\leftarrow D})$$

[0052] $L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ra_1)\leftarrow D}$ bezeichnet dabei die klassische Kopplung des zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems mit der auf den Radius Ra_1 "reduzierten" Abschirmung (analog für Ri_1). Dieses "Reduzieren" zusammen mit dem Vorfaktor Ra_1/R_2 bewirkt, dass die Kopplung $L_{2\leftarrow D}$ gegenüber dem klassischen Wert $L^{cl}_{2\leftarrow D}$ verhältnismäßig viel weniger abgeschwächt wird als $L_{1\leftarrow D}$ gegenüber $L^{cl}_{1\leftarrow D}$. Da die Haupt- und die Abschirmspule elektrisch in Serie geschaltet sind, überwiegt deshalb in der Gesamtreaktion des Magnetspulensystems auf die kleine Feldänderung die induktive Reaktion der Abschirmspule gegenüber derjenigen der Hauptspule.

[0053] Insgesamt ist die neue Kopplung des zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems *D* mit dem Magnetspulensystem *M* gegeben durch

$$L_{M\leftarrow D} = L^{cl}_{M\leftarrow D} - \alpha L^{cor}_{M\leftarrow D} \tag{5}$$

$$L^{cor}_{M\leftarrow D} = L^{cl}_{1\leftarrow D} - L^{cl}_{(1,\mathrm{red},Ri1)\leftarrow D} + \frac{Ra_1}{R_2}(L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ra_1)\leftarrow D} - L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ri_1)\leftarrow D})$$

[0054] Analog wie bei der Hauptspule wird der Störfluss auch aus dem Supraleitervolumen der Abschirmung verdrängt. Weil aber dieses Volumen im Vergleich zum Supraleitervolumen der Hauptspule typischerweise klein ist, kann dieser Effekt vernachlässigt werden.

[0055] Ob das Störfeld durch ein Spulensystem innerhalb oder außerhalb der Magnetanordnung oder durch eine kleine Stromänderung im Magnetspulensystem selber erzeugt wird, ist für den Mechanismus der Flussverdrängung irrelevant. Aus diesem Grunde verändert sich auch die Eigeninduktivität des Magnetspulensystems im Vergleich zum klassischen Fall. Insbesondere gelten:

$$L_{1\leftarrow 1} = (1-\alpha)L^{cl}_{1\leftarrow 1} + \alpha L^{cl}_{(1,\mathrm{red},Ri_1)\leftarrow 1}$$

$$L_{1\leftarrow 2} = (1-\alpha)L^{cl}_{1\leftarrow 2} + \alpha L^{cl}_{(1,\mathrm{red},Ri_1)\leftarrow 2}$$

[0056] Die anderen Induktivitäten ändern sich wie folgt:

$$L_{2\leftarrow 2} = L^{cl}_{2\leftarrow 2} - \alpha\,\frac{Ra_1}{R_2}\,(L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ra_1)\leftarrow 2} - L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ri_1)\leftarrow 2})$$

$$L_{2\leftarrow 1} = L^{cl}_{2\leftarrow 1} - \alpha\frac{Ra_1}{R_2}(L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ra_1)\leftarrow 1} - L^{\mathrm{cl}}_{(2,\mathrm{red},Ri_1)\leftarrow 1})$$

[0057] Insgesamt bekommt man für die neue Induktivität des Magnetspulensystems

$$L_M = L^{cl}_M - \alpha L^{cor}_M \tag{6}$$

mit

$$L^{cor}_M = L^{cl}_{1\leftarrow 1} - L^{cl}_{(1,\mathrm{red},Ri1)\leftarrow 1} + L^{cl}_{1\leftarrow 2} - L^{cl}_{(1,\mathrm{red},Ri1)\leftarrow 2}$$
$$+ \frac{Ra_1}{R_2}\,(L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ra_1)\leftarrow 2} - L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ri_1)\leftarrow 2} + L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ra_1)\leftarrow 1} - L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ri_1)\leftarrow 1})$$

[0058] Setzt man in der Gleichung (1) für die effektive Feldeffizienz des zusätzlichen felderzeugenden Spulensy-

stems *D* die korrigierte Kopplung $L_{M\leftarrow D}$ von Magnet und Spulensystem *D* gemäß Gleichung (5) anstelle der klassischen induktiven Kopplung $L^{cl}_{M\leftarrow D}$ und die korrigierte Eigeninduktivität L_M gemäß Gleichung (6) anstelle der klassischen Eigeninduktivität L^{cl}_M ein, so erhält man:

$$g_D^{eff} = g_D - g_M \cdot \frac{L^{cl}_{M\leftarrow D} - \alpha L^{cor}_{M\leftarrow D}}{L^{cl}_M - \alpha L^{cor}_M} \tag{7}$$

[0059] Im Folgenden werden die obigen Formeln auf den Fall verallgemeinert, in dem noch zusätzliche Strompfade *P1,...,Pn* vorhanden sind.

[0060] Für die Richtung $M \leftarrow Pj$ (eine Stromänderung in *Pj* induziert einen Strom in *M*) sind die Kopplungen zwischen dem Magnetspulensystem und den zusätzlichen Strompfaden *Pj* ($j = 1, ..., n$) in gleichem Maße reduziert wie die entsprechenden Kopplungen zwischen dem Magnetspulensystem und einem zusätzlichen felderzeugenden Spulensystem:

$$L_{M\leftarrow Pj} = L^{cl}_{M\leftarrow Pj} - \alpha L^{cor}_{M\leftarrow Pj} \tag{8}$$

wobei

$$L^{cor}_{M\leftarrow Pj} = L^{cl}_{1\leftarrow Pj} - L^{cl}_{(1,\mathrm{red},Ri_1)\leftarrow Pj} + \frac{Ra_1}{R_2}\left(L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ra_1)\leftarrow Pj} - L^{cl}_{(2,\mathrm{red},Ri_1)\leftarrow Pj}\right)$$

[0061] Die neue Kopplung $L_{Pj\square M}$ $L_{Pj\square M}$ (eine Stromänderung in *M* induziert einen Strom in *Pj*) berechnet sich hingegen wie folgt:

$$L_{Pj\leftarrow M} = L^{cl}_{Pj\leftarrow M} - \alpha L^{cor}_{Pj\leftarrow M} \tag{9}$$

mit

$$L^{cor}_{Pj\leftarrow M} = f_{Pj}\left(L^{cl}_{(Pj,\mathrm{red},Ra_1)\leftarrow M} - L^{cl}_{(Pj,\mathrm{red},Ri_1)\leftarrow M}\right)$$

[0062] Für $R_{Pj} > Ra_1$ ist die auf Ra_1 "reduzierte" Spule *Pj* wieder so definiert, dass alle Windungen auf den kleineren Radius Ra_1 komprimiert werden (analog für Ri_1). Ist hingegen $Ri_1 < R_{Pj} < Ra_1$, wird die auf Ra_1 "reduzierte" Spule mit der Spule *Pj* identifiziert (die Windungen werden nicht expandiert auf Ra_1). Für $R_{Pj} < Ri_1$ wird auch die auf Ri_1 "reduzierte" Spule mit der Spule *Pj* identifiziert, also ist in diesem Fall der Korrekturterm zur klassischen Theorie gleich null.

[0063] Für $R_{Pj} > Ra_1$ berechnet sich die Konstante f_{Pj} aus der Integration von (4) über das Gebiet $r > R_{Pj}$. Für $R_{Pj} \leq Ra_1$ ist $f_{Pj} = 1$:

$$f_{Pj} = \begin{cases} \dfrac{Ra_1}{R_{Pj}}, R_{Pj} > Ra_1 \\ 1, R_{Pj} \leq Ra_1 \end{cases}$$

[0064] Die Korrekturen aufgrund der Eigenschaften des Supraleiters führen somit auf asymmetrische Induktivitätsmatrizen ($L_{M\square Pj} \neq L_{Pj\square M}$!).

[0065] Die Kopplung $L_{Pj\square D}$ zwischen einem zusätzlichen supraleitenden Strompfad *Pj* und dem felderzeugenden Spulensystem *D* wird ebenfalls mehr oder weniger stark von der Verdrängung des Flusses des Störfeldes des Spulensystems *D* aus dem Supraleitermaterial der Hauptspule beeinflusst:

$$L_{Pj\leftarrow D} = L^{cl}_{Pj\leftarrow D} - \alpha L^{cor}_{Pj\leftarrow D} \tag{10}$$

mit

$$L^{cor}_{Pj\leftarrow D} = f_{Pj}\,(L^{cl}_{(Pj,\mathrm{red},Ra_1)\leftarrow D} - L^{cl}_{(Pj,\mathrm{red},Ri_1)\leftarrow D})$$

[0066] Nach dem gleichen Prinzip werden auch die Kopplungen zwischen den zusätzlichen supraleitenden Strompfaden untereinander mehr oder weniger reduziert (man beachte dabei die Reihenfolge der Indizes):

$$L_{Pj_{\leftarrow} Pk} = L^{cl}_{Pj\leftarrow Pk} - \alpha L^{cor}_{Pj\leftarrow Pk} \tag{11}$$

mit

$$L^{cor}_{Pj\leftarrow Pk} = f_{Pj}(L^{cl}_{(Pj,\mathrm{red},Ra_1)\leftarrow Pk} - L^{cl}_{(Pj,\mathrm{red},Ri_1)\leftarrow Pk})$$

($j = 1, ..., n$; $k = 1, ..., n$).

[0067] Im Speziellen werden auch die Eigeninduktivitäten ($j = k$) der zusätzlichen supraleitenden Strompfade beeinflusst.

[0068] Der tatsächliche Feldbeitrag g_D^{eff} pro Ampère Strom eines felderzeugenden Spulensystems *D* im Arbeitsvolumen wird berechnet mit der Gleichung (2) für die klassische Feldeffizienz $g_D^{eff,cl}$ des Spulensystems *D*, wobei die korrigierten Werte für die Kopplungen $L_{M\square D}$, $L_{M\square Pj}$, $L_{Pj\square M}$, $L_{Pj\square D}$ und $L_{Pj\square Pk}$ gemäß (5), (8), (9), (10) bzw. (11) eingesetzt werden:

$$g_D^{eff} = g_D - g^{\mathrm{T}} \cdot \left(L^{cl} - \alpha L^{cor}\right)^{-1} \cdot \left(L^{cl}_{\leftarrow D} - \alpha L^{cor}_{\leftarrow D}\right)$$

wobei:

g_D^{eff} : Feldbeitrag pro Ampère Strom des Spulensystems *D* im Arbeitsvolumen bei $z = 0$ unter Berücksichtigung der Feldbeiträge des Spulensystems selbst wie auch der Feldänderung aufgrund von Strömen, welche im supraleitenden Magnetspulensystem *M* und in den weiteren supraleitend geschlossenen Strompfaden *P1,..., Pn* beim Laden des Spulensystems *D* induziert werden, und unter Berücksichtigung einer diamagnetischen Verdrängung von kleinen Feldänderungen aus dem Volumen des Magnetspulensystems *M*,

$-\alpha$: mittlere magnetische Suszeptibilität im Volumen des Magnetspulensystems *M* gegenüber Feldänderungen, welche die Größenordnung von 0.1 T betragsmäßig nicht überschreiten; wobei $0 < \alpha \leq 1$,

$$g^{\mathrm{T}} = (g_M, g_{P1}, ..., g_{Pj}, ... g_{Pn}),$$

g_{Pj}: Feld pro Ampère des Strompfades *Pj* im Arbeitsvolumen ohne die Feldbeiträge der Strompfade *Pi* für $i \neq j$ und des Magnetspulensystems *M* und ohne die Feldbeiträge des Spulensystems *D*,

g_M : Feld pro Ampère des Magnetspulensystems *M* im Arbeitsvolumen ohne die Feldbeiträge der Strompfade *P1,...,Pn* und ohne die Feldbeiträge des Spulensystems *D*,

g_D : Feld pro Ampère des Spulensystems *D* im Arbeitsvolumen ohne die Feldbeiträge der Strompfade *P1,...,Pn* und des Magnetspulensystems *M,*

L^{cl} : Matrix der induktiven Kopplungen zwischen dem Magnetspulensystem M und den Strompfaden *P1,...,Pn* sowie zwischen den Strompfaden *P1,...,Pn* untereinander,

L^{cor} : Korrektur zur Induktivitätsmatrix L^{cl}, welche sich bei kompletter diamagnetischer Verdrängung von Störfeldern aus dem Volumen des Magnetspulensystems *M* ergäbe,

$L^{cl}_{\leftarrow D}$: Vektor der induktiven Kopplungen des Spulensystems *D* mit dem Magnetspulensystem *M* und den Strompfaden *P1,...,Pn,*

$L^{cor}_{\leftarrow D}$: Korrektur zum Kopplungsvektor $L^{cl}_{\leftarrow D}$, welche sich bei kompletter diamagnetischer Verdrängung von Störfeldern aus dem Volumen des Magnetspulensystems *M* ergäbe.

[0069] Falls ein Strompfad *Pj* Teilspulen auf unterschiedlichen Radien umfasst, müssen die Matrixelemente in den Korrekturtermen L^{cor} und $L^{cor}_{\leftarrow D}$, welche zu *Pj* gehören, so berechnet werden, dass zuerst jede Teilspule als einzelner Strompfad behandelt wird und dann die Korrekturterme aller Teilspulen aufaddiert werden. Diese Summe ist das Matrixelement des Strompfades *Pj*.

[0070] Die Spulensysteme *D*, die uns interessieren, sind vor allem Z^0-Shims oder Feldmodulationsspulen. Die Feldeffizienz g^{eff}_D eines solchen Spulensystems soll typischerweise möglichst groß sein. Mit dem oben beschriebenen Formalismus können das zusätzliche felderzeugende Spulensystem und die übrige Magnetanordnung derart optimiert werden, dass diese Feldeffizienz maximal wird.

[0071] In vielen supraleitenden Magnetanordnungen *M, D, P1, ..., Pn* mit einem Magnetspulensystem *M,* einem zusätzlichen felderzeugenden Spulensystem *D* und mit zusätzlichen supraleitend geschlossenen Strompfaden *P1, ..., Pn* gibt es keinen grossen Unterschied zwischen der klassisch berechneten Feldeffizienz $g^{eff,cl}_D$ und der nach der erfindungsgemäßen Methode berechneten Feldeffizienz g^{eff}_D. Eine Magnetanordnung, in welcher sich das magnetische Abschirmverhalten des Supraleitermaterials im Magnetspulensystem gegenüber kleinen Feldänderungen deutlich auf die Feldeffizienz g^{eff}_D des zusätzlichen felderzeugenden Spulensystems auswirkt, umfasst ein aktiv abgeschirmtes Magnetspulensystem mit einer Hauptspule *C1* und einer Abschirmspule *C2*.

[0072] Aus den Figuren 2 bis 4 wird ersichtlich, dass sich Teilspulen eines felderzeugenden Spulensystems klassisch verhalten, solange sie sich im Bereich der Hauptspule *C1* des aktiv abgeschirmten Magnetspulensystems befinden, dagegen wird ihre effektive Feldeffizienz durch das magnetische Abschirmverhalten des Supraleitermaterials im Magnetspulensystem verstärkt, wenn sie radial weiter außen liegen. Dieser Effekt kann dazu genutzt werden, ein effizientes zusätzliches felderzeugendes Spulensystem auf großem Radius anzubringen, wodurch Platz für das Magnetspulensystem auf kleinem Radius gewonnen wird.

[0073] Der Parameter α ist in einer ersten Näherung der Supraleiteranteil am Volumen der Hauptspule *C1*. Die genaueste Art, den Parameter α zu bestimmen, basiert auf einem Störexperiment des Magnetspulensystems *M* ohne zusätzliche supraleitende Strompfade *P1, ..., Pn*. Störspulen mit großen Radien sind dafür besonders geeignet. Deshalb empfiehlt sich folgendes Vorgehen:

1. Experimentelle Bestimmung der Größe

$$\beta^{\exp} = \frac{g_H^{\exp}}{g_H},$$

des Magnetspulensystems bezüglich einer im Bereich des Magnetspulensystems im Wesentlichen homogenen Störung (z.B. mit einer Störspule *H* auf großem Radius), wobei

$g^{\exp}_H$: gemessene Feldänderung im Arbeitsvolumen der Magnetanordnung pro Ampère Strom in der Störspule *H*,

g_H : Feld pro Ampère der Störspule *H* im Arbeitsvolumen ohne die Feldbeiträge des Magnetspulensystems *M*,

2. Bestimmung der Größe

$$\beta^{cl} = 1 - g_M \cdot \left(\frac{L^{cl}_{M \leftarrow H}}{L^{cl}_M \cdot g_H} \right)$$

bezüglich derselben Störspule, wobei

g_M : Feld pro Ampère des Magnetspulensystems *M* im Arbeitsvolumen,

L^{cl}_M : Induktivität des Magnetspulensystems *M*,

$L^{cl}_{M\leftarrow H}$: induktive Kopplung der Störspule *H* mit dem Magnetspulensystem *M,*

3. Bestimmung des Parameters α aus der Gleichung

$$\alpha = \frac{g_H \left(L_M^{cl}\right)^2 \left(\beta^{\exp} - \beta^{cl}\right)}{g_H \left(\beta^{\exp} - \beta^{cl}\right) L_M^{cl} L_M^{cor} - g_M \left(L^{cl}_{M\leftarrow H} L_M^{cor} - L^{cor}_{M\leftarrow H} L_M^{cl}\right)}$$

wobei

L_M^{cor} : Korrektur zur Magnetinduktivität L_M^{cl}, welche sich bei kompletter diamagnetischer Verdrängung von Störfeldern aus dem Volumen des Magnetspulensystems *M* ergäbe,

$L^{cor}_{M\leftarrow H}$: Korrektur zur induktiven Kopplung $L^{cl}_{M\leftarrow H}$ der Störspule *H* mit dem Magnetspulensystem *M*, welche sich bei kompletter diamagnetischer Verdrängung von Störfeldern aus dem Volumen des Magnetspulensystems *M* ergäbe.

Patentansprüche

1. Magnetanordnung (*M, D, P1, ..., Pn*) zur Erzeugung eines Magnetfeldes in Richtung einer *z*-Achse in einem um *z* = 0 angeordneten Arbeitsvolumen mit einem Magnetspulensystem (*M*) mit mindestens einer stromführenden supraleitenden Magnetspule, einem weiteren stromführenden Spulensystem (*D*), welches durch eine externe Stromquelle gespeist werden kann und im Arbeitsvolumen ein von null wesentlich verschiedenes Magnetfeld aufbaut, insbesondere ein Magnetfeld mit einem Betrag grösser als 0.2 Millitesla pro Ampère Strom, und gegebenenfalls mit einem oder mehreren zusätzlichen supraleitend geschlossenen Strompfaden (*P1*, *..., Pn*), wobei die durch die zusätzlichen Strompfade (*P1, ..., Pn*) im Betriebszustand aufgrund von induzierten Strömen erzeugten Magnetfelder in *z*-Richtung und das Feld des stromführenden Spulensystems (*D*) die Größenordnung von 0.1 Tesla im Arbeitsvolumen betragsmäßig nicht überschreiten,
dadurch gekennzeichnet,
dass $|g_D^{eff}| > 1.2 \cdot |g_D^{eff,cl}|$, wobei

$$g_D^{eff} = g_D - g^{\mathrm{T}} \cdot \left(L^{cl} - \alpha L^{cor}\right)^{-1} \cdot \left(L^{cl}_{\leftarrow D} - \alpha L^{cor}_{\leftarrow D}\right)$$

$$g_D^{eff,cl} = g_D - g^{\mathrm{T}} \cdot (L^{cl})^{-1} \cdot L^{cl}_{\leftarrow D}$$

mit:

g_D^{eff} : Feldbeitrag pro Ampère Strom des Spulensystems (*D*) im Arbeitsvolumen unter Berücksichtigung der Feldbeiträge des Spulensystems (*D*) selbst wie auch der Feldänderung aufgrund von Strömen, welche im supraleitenden Magnetspulensystem (*M*) und in den weiteren supraleitend geschlossenen Strompfaden (*P1,...,Pn*) beim Laden des Spulensystems (*D*) induziert werden, unter Berücksichtigung einer diamagnetischen Verdrängung von Störfeldern aus dem Volumen des Magnetspulensystems (*M*),

$g_D^{eff,cl}$: Feldbeitrag pro Ampère Strom des Spulensystems (*D*) im Arbeitsvolumen unter Berücksichtigung der Feldbeiträge des Spulensystems (*D*) selbst wie auch der Feldänderung aufgrund von Strömen, welche im supraleitenden Magnetspulensystem (*M*) und in den weiteren supraleitend geschlossenen Strompfaden (*P1,...,Pn*) beim Laden des Spulensystems (*D*) induziert werden, unter Vernachlässigung der diamagnetischen Verdrängung von Störfeldern aus dem Volumen des Magnetspulensystems (*M*),

$-\alpha$: mittlere magnetische Suszeptibilität im Volumen des Magnetspulensystems (*M*) gegenüber Feldfluktuationen, welche die Größenordnung von 0.1 T betragsmäßig nicht überschreiten; wobei $0 < \alpha \leq 1$,

$$g^T=(g_M,g_{P1},...,g_{Pj},...g_{Pn}),$$

g_{Pj}: Feld pro Ampère des Strompfades *Pj* im Arbeitsvolumen ohne die Feldbeiträge der Strompfade *Pi* für $i \neq j$ und des Magnetspulensystems (*M*),

g_M : Feld pro Ampère des Magnetspulensystems (*M*) im Arbeitsvolumen ohne die Feldbeiträge der Strompfade (*P1,...,Pn*),

g_D : Feld pro Ampère des Spulensystems (*D*) im Arbeitsvolumen ohne die Feldbeiträge der Strompfade (*P1,...,Pn*) und des Magnetspulensystems (*M*),

L^{cl}: Matrix der induktiven Kopplungen zwischen dem Magnetspulensystem (*M*) und den Strompfaden (*P1,..., Pn*) sowie zwischen den Strompfaden (*P1,...,Pn*) untereinander,

L^{cor}: Korrektur zur Induktivitätsmatrix L^{cl}, welche sich bei kompletter diamagnetischer Verdrängung von Störfeldern aus dem Volumen des Magnetspulensystems (*M*) ergäbe,

$L^{cl}_{\leftarrow D}$: Vektor der induktiven Kopplungen des Spulensystems (*D*) mit dem Magnetspulensystem (*M*) und den Strompfaden (*P1,...,Pn*),

$L^{cor}_{\leftarrow D}$: Korrektur zum Kopplungsvektor $L^{cl}_{\leftarrow D}$, welche sich bei kompletter diamagnetischer Verdrängung von Störfeldern aus dem Volumen des Magnetspulensystems (*M*) ergäbe.

2. Magnetanordnung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** das supraleitende Magnetspulensystem (*M*) ein radial inneres und ein radial äußeres, elektrisch in Serie zusammengeschaltetes, koaxiales Spulensystem (*C1, C2*) umfasst, wobei diese beiden Spulensysteme im Arbeitsvolumen je ein Magnetfeld mit entgegengesetzter Richtung entlang der *z*-Achse erzeugen.

3. Magnetanordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Magnetspulensystem (*M*) einen ersten im Betriebszustand supraleitend kurzgeschlossenen Strompfad bildet, und dass eine mit dem Magnetspulensystem (*M*) galvanisch nicht verbundene Störkompensationsspule koaxial zu dem Magnetspulensystem (*M*) angeordnet ist und einen weiteren im Betriebszustand supraleitend kurzgeschlossenen Strompfad (*P1*) bildet.

4. Magnetanordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** mindestens einer der zusätzlichen Strompfade (*P1, ..., Pn*) Teil einer supraleitenden Shimvorrichtung ist.

5. Magnetanordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** mindestens einer der zusätzlichen Strompfade (*P1, ..., Pn*) eine radial innere und eine radial äussere Teilspule umfasst, welche in Serie geschaltet sind, wobei die radial äussere Teilspule pro Ampere Strom ein im Betrag wesentlich grösseres Dipolmoment aufweist als die radial innere, und wobei die radial innere Teilspule pro Ampère Strom im Arbeitsvolumen ein im Betrag wesentlich grösseres Magnetfeld aufbaut als die radial äussere.

6. Magnetanordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das zusätzliche Spulensystem (*D*) Teil einer Vorrichtung zur Modulation der Magnetfeldstärke im Arbeitsvolumen ist.

7. Magnetanordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** das zusätzliche Spulensystem (*D*) Teil eines sogenannten Z^0-Shims ist, welcher im Arbeitsvolumen ein im Wesentlichen homogenes Magnetfeld erzeugt.

8. Verfahren zur Dimensionierung einer Magnetanordnung (*M, D, P1, ..., Pn*) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Größe g_D^{eff}, welche der Feldänderung im Arbeitsvolumen bei $z = 0$ pro Ampère Strom im zusätzlichen Spulensystem (*D*) entspricht, unter Berücksichtigung der aufgrund von in der restlichen Magnetanordnung (*M, P1, ..., Pn*) induzierten Strömen erzeugten Magnetfelder, berechnet wird gemäß:

$$g_D^{eff} = g_D - g^T \cdot \left(L^{cl} - \alpha L^{cor}\right)^{-1} \cdot \left(L_{\leftarrow D}^{cl} - \alpha L_{\leftarrow D}^{cor}\right)$$

mit:

-α : mittlere magnetische Suszeptibilität im Volumen des Magnetspulensystems (*M*) gegenüber Feldfluktuationen, welche die Größenordnung von 0.1 T betragsmäßig nicht überschreiten; wobei $0 < \alpha \leq 1$,

$$g^T = (g_M, g_{P1}, ..., g_{Pj}, ... g_{Pn}),$$

g_{Pj}: Feld pro Ampère des Strompfades *Pj* im Arbeitsvolumen ohne die Feldbeiträge der Strompfade *Pi* für $i \neq j$ und des Magnetspulensystems (*M*),

g_M : Feld pro Ampère des Magnetspulensystems (*M*) im Arbeitsvolumen ohne die Feldbeiträge der Strompfade (*P1,...,Pn*),

g_D : Feld pro Ampère des Spulensystems (*D*) im Arbeitsvolumen ohne die Feldbeiträge der Strompfade (*P1,...,Pn*) und des Magnetspulensystems (*M*),

L^{cl}: Matrix der induktiven Kopplungen zwischen dem Magnetspulensystem (*M*) und den Strompfaden (*P1,..., Pn*) sowie zwischen den Strompfaden (*P1,...,Pn*) untereinander,

L^{cor}: Korrektur zur Induktivitätsmatrix L^{cl}, welche sich bei kompletter diamagnetischer Verdrängung von Störfeldern aus dem Volumen des Magnetspulensystems (*M*) ergäbe,

$L_{\leftarrow D}^{cl}$: Vektor der induktiven Kopplungen des Spulensystems (*D*) mit dem Magnetspulensystem (*M*) und den Strompfaden (*P1,...,Pn*),

$L_{\leftarrow D}^{cor}$: Korrektur zum Kopplungsvektor $L_{\leftarrow D}^{cl}$, welche sich bei kompletter diamagnetischer Verdrängung von Störfeldern aus dem Volumen des Magnetspulensystems (*M*) ergäbe.

9. Verfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Parameter α dem Volumenanteil des Supraleitermaterials am Gesamtvolumen des Magnetspulensystems (M) entspricht.

10. Verfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Parameter α experimentell bestimmt wird aus der Messung der Größe β^{exp} des Magnetspulensystems (*M*) [ohne Strompfade (*P1,...,Pn*) und ohne zusätzliches Spulensystem (*D*)] bezüglich einer Störspule (*H*), welche im Volumen des Magnetspulensystems (*M*) im Wesentlichen ein homogenes Störfeld erzeugt, und durch Einsetzen der Größe β^{exp} in die Gleichung

$$\alpha = \frac{g_H \left(L_M^{cl}\right)^2 \left(\beta^{\exp} - \beta^{cl}\right)}{g_H \left(\beta^{\exp} - \beta^{cl}\right) L_M^{cl} L_M^{cor} - g_M \left(L_{M \leftarrow H}^{cl} L_M^{cor} - L_{M \leftarrow H}^{cor} L_M^{cl}\right)} \quad ,$$

wobei

$$\beta^{\exp} = \frac{g_H^{\exp}}{g_H},$$

g_H^{exp} : gemessene Feldänderung im Arbeitsvolumen der Magnetanordnung pro Ampère Strom in der Störspule (*H*),

$$\beta^{cl} = 1 - g_M \cdot \left(\frac{L^{cl}_{M \leftarrow H}}{L^{cl}_M \cdot g_H} \right),$$

g_M : Feld pro Ampère des Magnetspulensystems (*M*) im Arbeitsvolumen,

g_H : Feld pro Ampère der Störspule (*H*) im Arbeitsvolumen ohne die Feldbeiträge des Magnetspulensystems (*M*),

L^{cl}_M : Induktivität des Magnetspulensystems (*M*),

$L^{cl}_{M \leftarrow H}$: induktive Kopplung der Störspule (*H*) mit dem Magnetspulensystem (*M*),

L^{cor}_M : Korrektur zur Magnetinduktivität L^{cl}_M, welche sich bei kompletter diamagnetischer Verdrängung von Störfeldern aus dem Volumen des Magnetspulensystems (*M*) ergäbe,

$L^{cor}_{M \leftarrow H}$: Korrektur zur induktiven Kopplung $L^{cl}_{M \leftarrow H}$ der Störspule (*H*) mit dem Magnetspulensystem (*M*), welche sich bei kompletter diamagnetischer Verdrängung von Störfeldern aus dem Volumen des Magnetspulensystems (*M*) ergäbe.

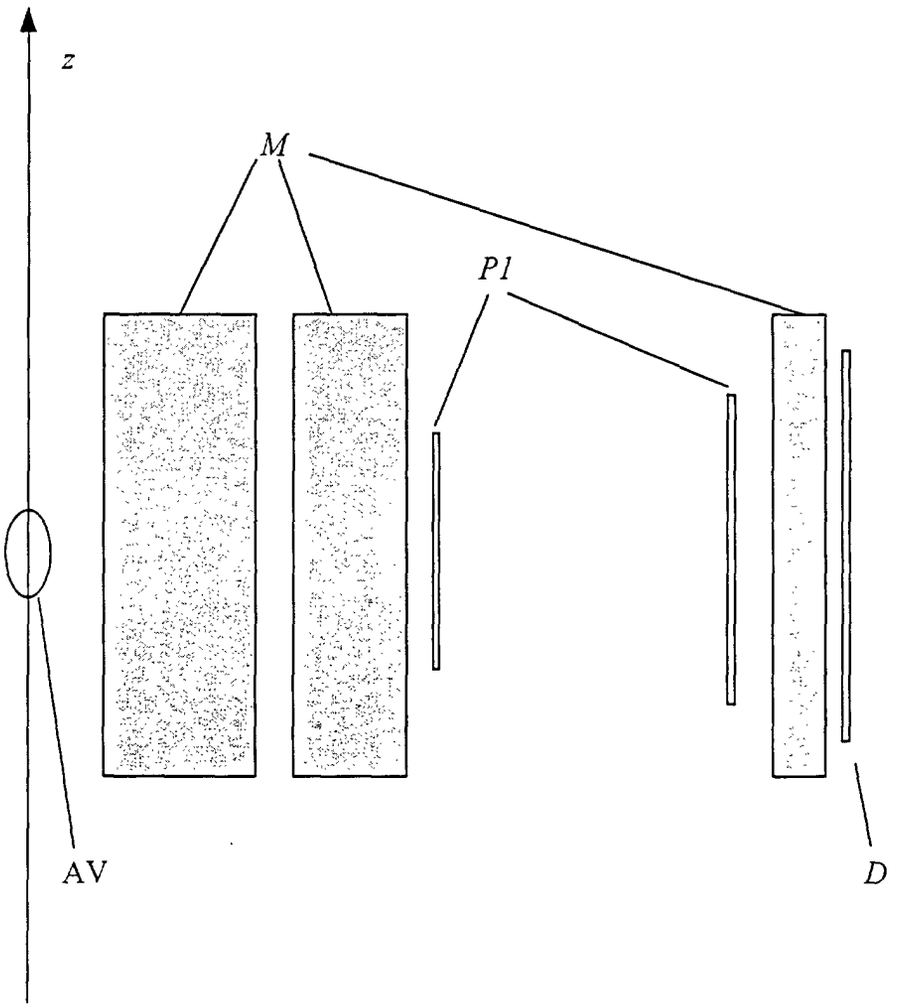

Fig. 1

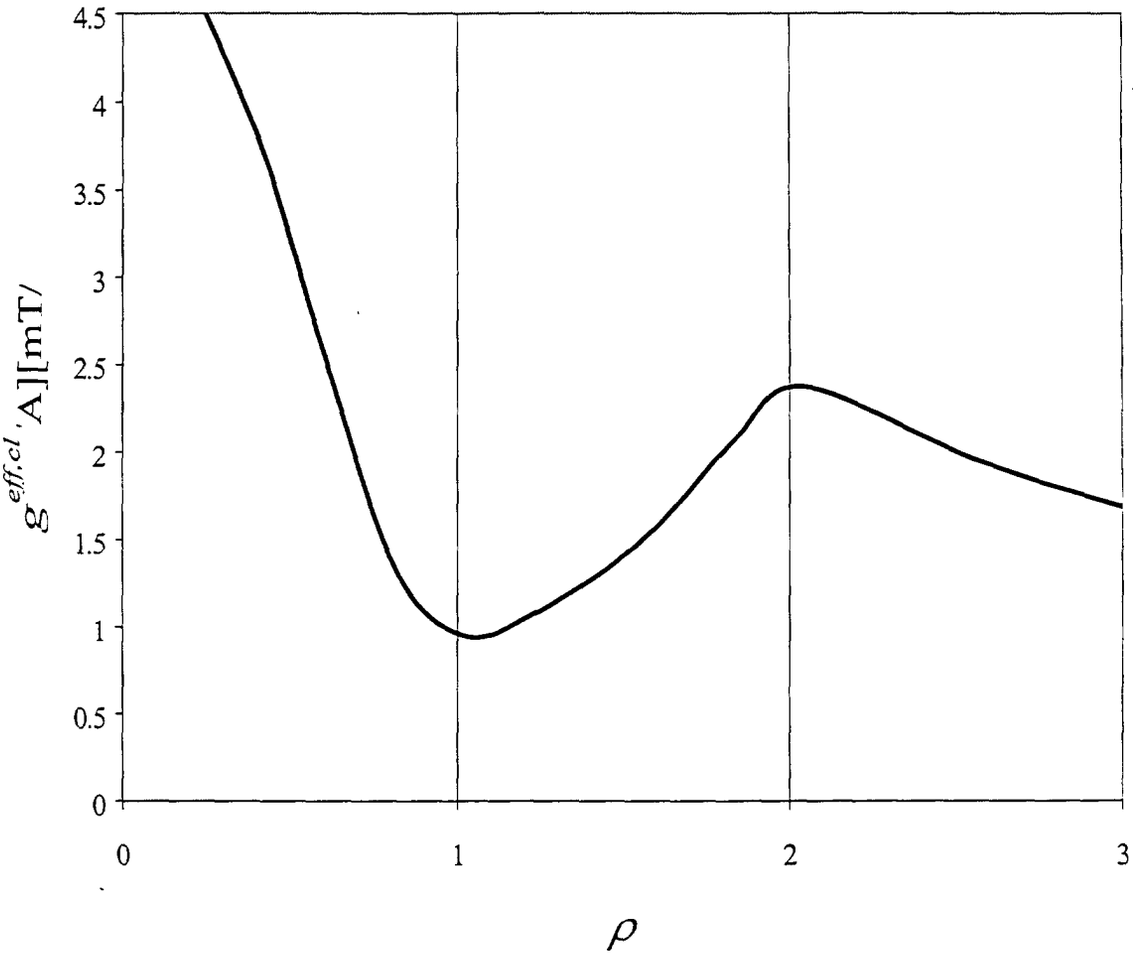

Fig. 2

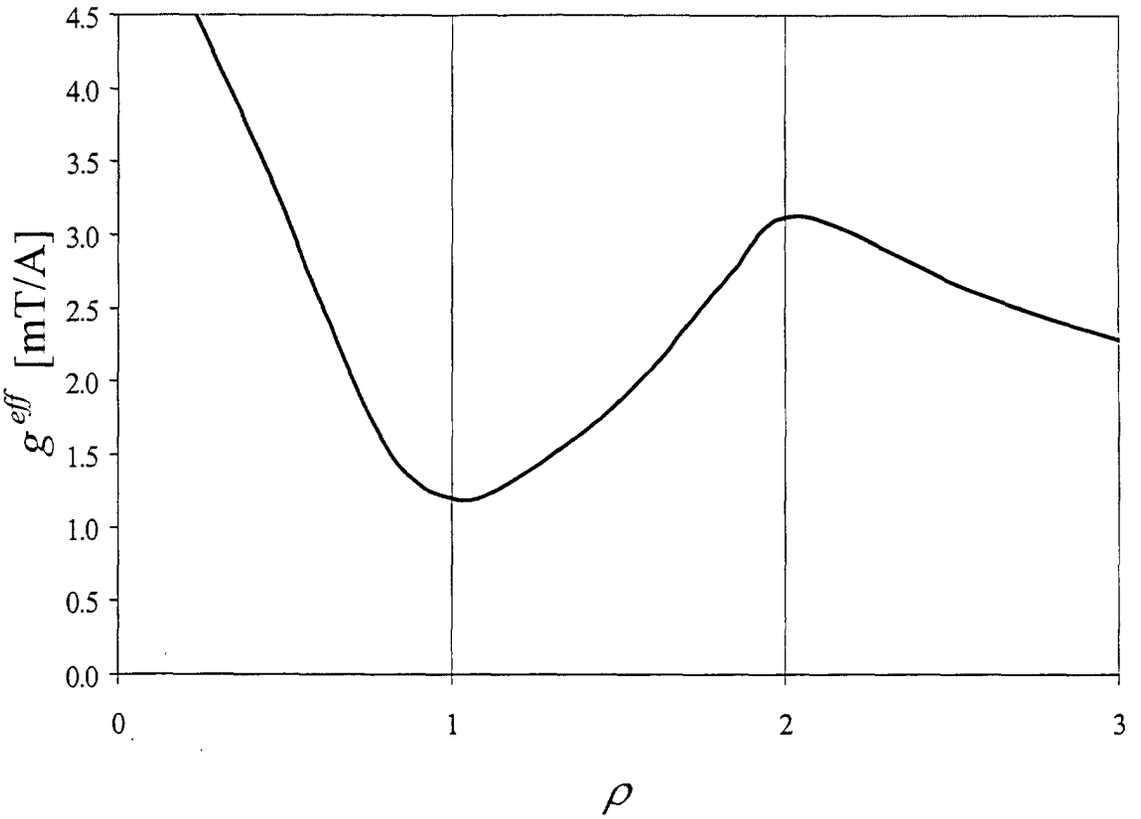

Fig. 3

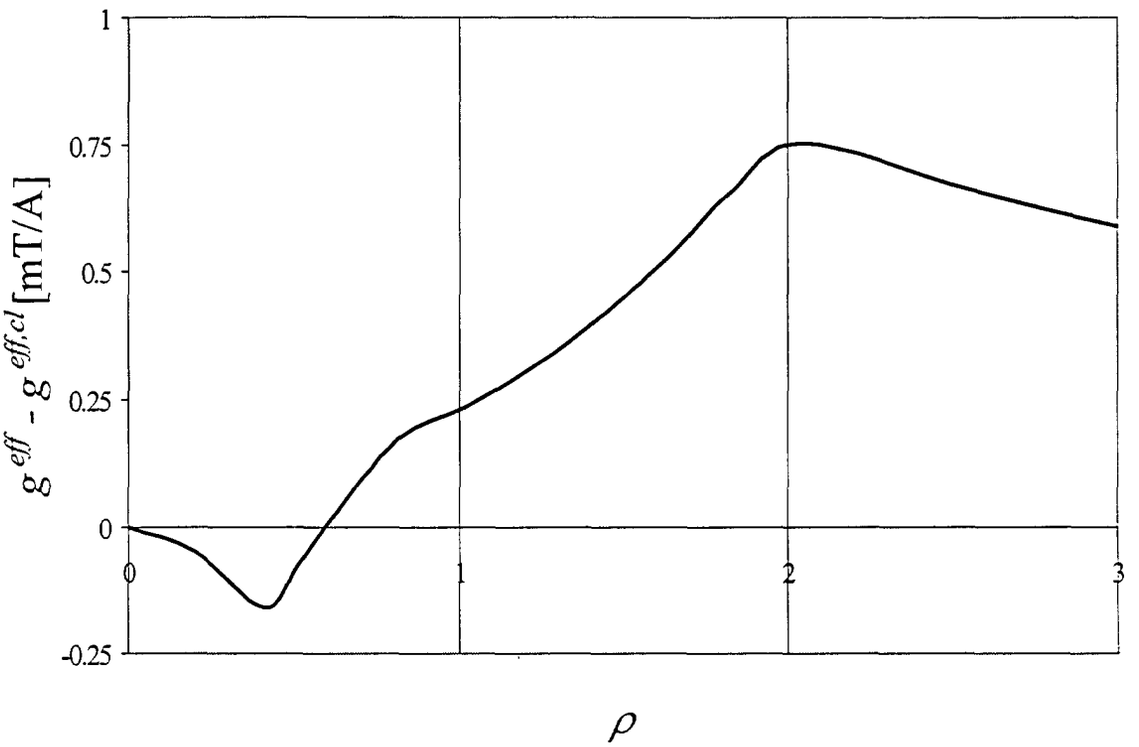

Fig. 4