



SCHWEIZERISCHE Eidgenossenschaft
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 707 701 A2

(51) Int. Cl.: G01R 33/385 (2006.01)
G01R 33/422 (2006.01)
A61B 5/055 (2006.01)

Patentanmeldung für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

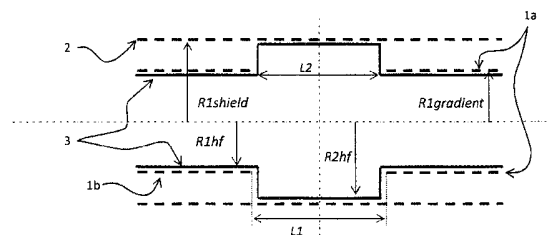
(12) PATENTANMELDUNG

(21) Anmeldenummer: 00384/14	(71) Anmelder: Bruker BioSpin AG, Industriestrasse 26 8117 Fällanden (CH)
(22) Anmeldedatum: 14.03.2014	(72) Erfinder: Nicolas Freytag, 8122 Binz (CH)
(43) Anmeldung veröffentlicht: 30.09.2014	
(30) Priorität: 20.03.2013 DE 10 2013 204 952.8	(74) Vertreter: Riederer Hasler & Partner Patentanwälte AG, Kappelstrasse 15 9492 Eschen (LI)

(54) Aktiv abgeschirmtes zylinderförmiges Gradientenspulensystem mit passiver HF-Abschirmung für NMR-Apparate.

(57) Ein aktiv abgeschirmtes zylinderförmiges NMR-Gradientenspulensystem, das ein z-Gradientenfeld erzeugt und eine aktive Abschirmspule (2) aufweist, wobei die Hauptgradientenspule (1a, 1b) aus mindestens zwei in z-Richtung um eine Länge L1 symmetrisch zum Zentrum des Messvolumens axial beabstandeten Teilspulensystemen kollinear mit der z-Achse aufgebaut ist, und die aus mit einem maximalen Aussenradius $R1_{gradient_{out}^{max}}$ um die z-Achse gewickelten elektrischen Leiterabschnitten aufgebaut ist, wobei eine aktive Abschirmspule aus elektrischen Leitern auf einem minimalen Innenradius $R1_{shield_{in}^{min}}$ um die z-Achse aufgebaut ist, und wobei $R1_{shield_{in}^{min}} > R1_{gradient_{out}^{max}}$, ist dadurch gekennzeichnet, dass in einem hohlzylindrischen Abschnitt auf der axialen Länge L1 symmetrisch zum Zentrum in einem Radienbereich zwischen einem minimalen Innenradius $R1_{gradient_{in}^{min}}$ der Hauptgradientenspule und $R1_{shield_{in}^{min}}$ keine elektrischen Leiterelemente des Gradientenspulensystems vorhanden sind, und dass eine passive HF-Abschirmung (3) vorgesehen ist, die aus mindestens drei elektrisch miteinander verbundenen Teilabschnitten (3a, 3b, 3c) aufgebaut ist, von denen zwei Teilabschnitte mit einem maximalen Aussenradius $R1_{hf_{out}^{max}}$ um die z-Achse angeordnet sind, während dazwischen ein dritter Teilabschnitt mit einer axialen Länge L2 und einem minimalen Innenradius $R2_{hf_{in}^{min}}$ sowie einem maximalen Aussenradius $R2_{hf_{out}^{max}}$ um die z-Ach-

se angeordnet ist, wobei gilt: $R1_{hf_{out}^{max}} < R1_{gradient_{in}^{min}}$ und $R1_{gradient_{out}^{max}} < R2_{hf_{in}^{min}} < R2_{hf_{out}^{max}}$ und $L2 < L1$.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein aktiv abgeschirmtes zylinderförmiges Gradientenspulensystem zur Verwendung in einem MR (=Magnetresonanz)-Spektrometer mit einem Hauptfeldmagneten, der ein in Richtung einer z-Achse ausgerichtetes Hauptmagnetfeld erzeugt, wobei das Gradientenspulensystem bei Stromdurchfluss in einem von der z-Achse durchqueren Messvolumen ein z-Gradientenfeld erzeugt, dessen Nulldurchgang im Zentrum des Messvolumens liegt, und wobei das Gradientenspulensystem mindestens eine Hauptgradientenspule und mindestens eine aktive Abschirmspule aufweist, wobei die Hauptgradientenspule aus mindestens zwei in z-Richtung um eine Länge L_1 symmetrisch zum Zentrum des Messvolumens axial voneinander beabstandeten zylinderförmigen Teilpulensystemen aufgebaut ist, deren Achsen kollinear mit der z-Achse verlaufen, wobei die zylinderförmigen Teilpulensysteme zumindest zum Teil aus mit einem maximalen Aussenradius $R1_{\text{gradient}_{\text{out}}^{\text{max}}}$ um die z-Achse gewickelten elektrischen Leiterabschnitten aufgebaut sind, wobei mindestens eine der aktiven Abschirmspulen aus elektrischen Leitern auf einem minimalen Innenradius $R1_{\text{shield}_{\text{in}}^{\text{min}}}$ um die z-Achse aufgebaut ist, und wobei $R1_{\text{shield}_{\text{in}}^{\text{min}}} > R1_{\text{gradient}_{\text{out}}^{\text{max}}}$.

[0002] Ein solches Gradientenspulensystem für eine bildgebende NMR-Apparatur ist beispielsweise aus US-A 5 296 810 bekannt geworden.

Hintergrund der Erfindung

[0003] Ein modernes Kernspinresonanz-(NMR)Spektrometer besteht aus einem supraleitenden Elektromagneten zur Erzeugung eines starken, statischen Magnetfeldes, einem Shimsystem zur Homogenisierung des statischen Magnetfeldes und einem NMR-Messkopf, enthaltend mindestens ein Sende/Empfangsspulensystem zum Aussenden von HF-Pulsen und Empfangen der Signale, eine Messprobe und ein Gradientenspulensystem zur Erzeugung gepulster Feldgradienten. Darüber hinaus umfasst das NMR-Spektrometer die notwendigen Apparate zur Erzeugung und Detektion der elektrischen Signale, die in den vorgenannten Komponenten erzeugt beziehungsweise detektiert werden.

[0004] Die meisten modernen NMR Messköpfe enthalten aktiv abgeschirmte Gradientenspulensysteme zur Erzeugung eines Z-Gradientenfeldes, in seltenen Fällen auch zur Erzeugung von X-, Y-, und Z-Gradientenfeldern. Die aktive Abschirmung ist notwendig, da viele NMR-Pulssequenzen ein schnelles Schalten der Gradientenfelder erfordern, was bei ungeschirmten Gradientenspulensystemen zur Induktion von Wirbelströmen in den umgebenden metallischen Strukturen führt (insbesondere der Aussenhülle der Messköpfe, dem Träger für das Shimsystem und der diversen z.T. kryogen gekühlten metallischen Elemente der supraleitenden Magnetsysteme und Kryo-Shimsysteme. Ziel der aktiven Abschirmung ist es die Wirbelströme auf ein Minimum zu reduzieren und die Messartefakte, die durch die verbliebenen Wirbelströme im Messvolumen entstehen, zu minimieren. Diese Messartefakte werden unter dem Begriff «Recovery-Eigenschaften» des Gradientenspulensystems zusammengefasst und umfassen sowohl Phasenfehler als auch spektrale Aufweitungen der zu empfangenden NMR Linien.

[0005] Im Stand der Technik werden aktiv abgeschirmte Gradientenspulensysteme in der Regel so gefertigt, dass die Windungen der Gradientenspulen und der zugehörigen Abschirmspulen auf zwei verschiedenen Radien pro Gradienten zu liegen kommen. Die Windungen auf dem inneren Radius werden dabei für die Erzeugung des Gradientenfeldes eingesetzt, der äussere Radius für die Abschirmung der Gradientenfelder nach aussen hin verantwortlich. Zum Teil können auch bestimmte Linearisierungsaufgaben durch die Windungen auf dem äusseren Durchmesser übernommen werden und ein Teil der Abschirmung in den äussersten axialen Bereichen des inneren Zylinders zu liegen kommen.

[0006] Dieses Konstruktionsprinzip hat grosse Vorzüge bei der Fertigung und Berechnung der Gradientenspulen. Insbesondere vereinfacht sich die Fertigung, da beim Aufbau von Gradientenspulen aus geschnittenen elektrisch leitenden Rohren, Folien, Blechen, PCB-Material oder dem Beschichten und Strukturieren auf zylinderförmigen Substraten lediglich jeweils zwei rohrförmige Objekte zueinander ausgerichtet werden müssen. Bei mehrlagigen Gradientenspulen müssen zusätzliche radiale und axiale Positionierungen durchgeführt werden, die in der Regel die Ausbeute bei der Fertigung reduzieren.

[0007] Insbesondere bei Z-Gradientenspulensystemen besteht die Möglichkeit, ein Design für den Gradienten zu wählen, bei dem die Verteilung der elektrischen Leiter der Hauptgradientenspule einen axialen Abstand symmetrisch zum Zentrum des Messvolumens aufweist. Je nach Konzeption kann dies auch für die aktiven Gradientenabschirmungen gültig sein. Beispiele für die Belegung solcher Gradienten finden sich z.B. in US-A 4 733 189.

[0008] Die Windungen der Gradienten werden in der Regel in Serie verschaltet, um einen konstanten Strom durch alle Leiter gewährleisten zu können. Parallele Verschaltung würde in Fluktuationen des Gradientenfeldes durch Variation der Ströme verschiedener Teilspulen resultieren, insbesondere wenn die Temperaturen der einzelnen Leiter im Betrieb durch inhomogene Kühlung, verschiedene Leiterlängen und dadurch gegebene Widerstände etc. variieren. Es finden sich jedoch auch parallele Verschaltungen in der Praxis, die jedoch eines grösseren Aufwandes bei der Erzeugung und Regelung der Gradientenströme erfordern.

[0009] Um die galvanische Verbindung zwischen den beiden symmetrischen Hälften der Hauptgradientenspule und der aktiven Abschirmspule herzustellen ist es üblich, diese durch den zentralen Bereich, in dem sie beabstandet sind, zu verlegen, wobei der Leiter zur Verbindung entweder coaxial mit der Zylinderachse oder in einer beliebigen Kurve verlaufen kann. Beispiele für gekurvte Verläufe finden sich in US 7 109 712 B2 oder in US 6 456 076 B1.

[0010] Beispiele für gerade Verläufe finden sich z.B. in der eingangs zitierten US-A 5 296 810 oder in den als Stand der Technik in US 6 456 076 B1 oder in US 7 109 712 B2 zitierten Dokumenten.

[0011] Im Stand der Technik existieren neben den rohrförmigen Gradientenspulensystemen auch andere Geometrien, bei denen die Windungen der Haupt und/oder Abschirmgradientenspulen auf komplexeren Oberflächen zu liegen kommen:

[0012] Aus US-A 5 512 828 sind Gradienten bekannt, bestehend aus einer Hauptgradientenspule und einer aktiven Abschirmspule, wobei der Abstand zwischen den beiden Spulen in vom Zentrum entfernten Bereichen grösser ist als in den Bereichen in der Nähe des Zentrums.

[0013] US-A 5 939 882 stellt ein Gradientenspulensystem vor, bei dem nicht der volle Raum von den Gradientenspulen belegt wird. Jedoch handelt es sich hierbei um eine Modifikation eines biplanaren Gradientenspulensystems auf gekrümmten Flächen und nicht um ein zylinderförmiges Gradientenspulensystem. Im Bereich der HF-Spulen ist zumindest für einen Teil der xy-Ebene eine Befüllung des Raumes mit Gradientenspulen gegeben.

[0014] US 6 933 723 B2 zeigt ein Gradientenspulensystem, bei dem die Hauptgradientenspule im Bereich der HF-Spule zurückversetzt ist. Hierbei repräsentieren 218/221 die Symmetrieachsen x und z, 211 den Magneten zur Erzeugung eines statischen Magnetfeldes, 212 die aktive Abschirmspule des Gradientenspulensystems, 213/213' die Hauptgradientenspule des Gradientenspulensystems und 219 die HF-Spule. Weder in der Beschreibung noch in den Abbildungen ist eine HF-Abschirmung zur Begrenzung des der HF zugänglichen Volumens beschrieben, so dass davon ausgegangen werden muss, dass sich in dieser Anordnung keine HF-Abschirmung befindet.

[0015] Idem findet sich in US 7 852 083 B2, hier jedoch wird explizit eine HF-Abschirmung beschrieben, die durch den zurückversetzten Teil der Hauptgradientenspule dem HF-Spulensystem ein grösseres Volumen gewährt und somit die Performanz des HF-Spulensystems erhöht (beziehungsweise dem Gradienten im Bereich ausserhalb des zentralen Bereiches einen grösseren Abstand zwischen Gradientenspule und Abschirmspule erlaubt und somit die Effizienz der Gradientenspulen in Bezug auf ein konventionelles Gradientenspulensystem erhöht). Die HF-Abschirmung folgt der Form der Hauptgradientenspule, die im Bereich der HF-Spulen einen grösseren Radius $r_2 > r_1$ hat als ausserhalb des aktiven HF-Bereiches.

[0016] Gemeinsam ist den Dokumenten US 7 852 083 B2 und US 6 933 723 B2, dass die Gradientenspulen jeweils über die volle Länge der z-Achse verlaufen oder sogar einen Überlappungsbereich aufweisen, in welchem auf zwei Radien Windungen der Gradientenspulen existieren. Es gibt keinen axialen Bereich in dem die Hauptgradientenspulen keine Windungen aufweisen.

[0017] Aus US 7 057 391 B1 ist ein Magnetsystem mit integriertem Gradienten (3) und HF-Spule (4) bekannt, bei dem Gradient und Spule in einer Ausbuchtung des Magneten eingelassen sind. Ziel ist es hier «ungenutzten» Platz für die effiziente Erzeugung des statischen Magnetfeldes zu nutzen. Gradient, HF-Spule und eventuell HF-Abschirmung scheinen zylinderförmig hergestellt zu sein.

[0018] Aus US-A 6 154 110 ist ein Gradientenspulensystem für offene MRI-Magnete bekannt, bei dem die Gradientenspulen und die Abschirmspulen in einem zentralen Bereich unterbrochen sind. In demselben Bereich kann jedoch auch keine HF-Abschirmung montiert werden, da ansonsten das offene System durch die HF-Abschirmung geschlossen würde. Es handelt sich dabei im Prinzip um eine Modifikation biplanarer Gradientenspulensysteme.

[0019] In US-A 5 600 245 werden lokale Gradientenspulensysteme vorgestellt, die die HF-Spule umschliessen und dabei eine Öffnung im Bereich der HF-Spule frei lassen. Bei diesen Gradientenspulen handelt es sich jedoch nicht um aktiv abgeschirmte Spulen und sie können lediglich in Kombination mit einer Haupt-Gradientenspule arbeiten und dienen lediglich der lokalen Verstärkung des Gradientenfeldes.

[0020] Aus US-A 5 406 204 ist ein Gradientenspulensystem bekannt, das eine HF-Abschirmung enthält, die bei bestimmten Ausführungsformen auf verschiedenen Radien angeordnet ist. Die Windungen der Z-Gradientenspule werden bei einer Ausführungsform in Nuten eines Trägers verlegt. HF-Abschirmung wird entweder auf der Oberfläche des Trägers und in die Nuten hinein, ausserhalb der Z-Gradientenspule oder sowohl in den Nuten als auch ausserhalb der Z-Gradientenspule verlegt.

[0021] Die Tiefe der Nuten entspricht weitestgehend der Dicke der Z-Gradientenwindungen. Es wird darauf hingewiesen, dass die Aussenfläche der HF-Abschirmung mit der Aussenfläche der Z-Gradientenwindungen eine weitestgehend ebene Fläche zur Aufnahme der X- und Y-Gradientenwindungen bilden soll.

[0022] Die Dicke der Gradientenwindungen ist im Vergleich zu den grossen Durchmessern des Gradientenspulensystems (60–90 mm) als vernachlässigbar einzustufen. Dies kann insbesondere auch aus den Fig. 1 bis 3 der US-A 5 406 204 entnommen werden: Die dargestellte Abstufung der HF-Abschirmung in den Nuten der Z-Gradientenwindungen bewegt sich lediglich im Bereich von ca. 0.5–1% ihres Radius. Aufgrund dieser geringfügigen Variation des Radius wird auch explizit ausgeführt, dass die Nuten für die Funktionalität der Erfindung keine Bedeutung haben und der Z-Gradient ohne wesentliche Einbussen in der Performanz auch auf einer durchgehenden HF-Abschirmung mit konstantem Radius auflaminiert werden könne. Es erscheint, dass das Ausfüllen der Nuten tendenziell eher aus fertigungstechnischen Gründen denn aus Performanzgründen erfolgt.

[0023] Aus der Druckschrift wird nicht direkt klar wie die galvanischen Verbindungen zwischen den einzelnen Windungen der Z-Gradientenspule ausgeführt werden. Jedoch wird darauf hingewiesen, dass die Auslegung der X, Y und Z-Gradientenspulen bevorzugt gemäss der Patentanmeldung Nr. 07/942 521 erfolge. Aus dieser Anmeldung ist die eingangs zitierte Offenlegungsschrift US-A 5 296 810 hervorgegangen, in der für einen Z-Gradienten eine serielle Verschattung der Windungen auch durch den zentralen Bereich dargestellt ist. Es ist daher davon auszugehen, dass in US-A 5 406 204 über die volle Länge des Gradientenspulensystems elektrische Leiter auf den Rändern der Haupt und Abschirmspulen der X, Y und Z-Gradientenspulen existieren. Da die X- und Y-Gradientenspulen auf die Z-Gradientenspule aufgeklebt werden ist davon auszugehen, dass bei einer Ausführungsform mit Nuten auch eine koaxiale Nut existieren muss, die die elektrische Verbindung zwischen den beiden Hälften der Hauptgradientenspule herstellt.

[0024] Moderne NMR Messköpfe werden in der Regel mit aktiv abgeschirmten Gradientenspulensystemen zur Erzeugung gepulster Feldgradienten hergestellt. Im Gegensatz zu Sensoren für bildgebende Kernresonanzverfahren (=MRI) sind die meisten dieser Gradientenspulensysteme lediglich uniaxiale Gradientenspulensysteme, insbesondere Z-Gradienten, bei denen ein möglichst uniformer Gradient des magnetischen Feldes entlang der z-Richtung angelegt wird, wobei die z-Richtung durch die Richtung des statischen Magnetfeldes definiert ist. Der Effekt dieses Gradientenfeldes auf einen Spin I ist eine Rotation um die z-Achse um einen Winkel γGz , wobei G die Gradientenamplitude und γ das gyromagnetische Verhältnis des Spins I ist. Durch das Anlegen eines Feldgradienten kann ein entlang der Gradientenachse kodierter Phasenfaktor der Magnetisierung induziert werden, in seltenen Fällen finden jedoch auch Gradientenspulensysteme zur Erzeugung von mehreren Gradientenfeldern, insbesondere von X,Y,Z-Gradientenfeldern Verwendung, so wie sie für die MRI üblich sind.

[0025] Für die Kernspinresonanzspektroskopie ist es üblich, Messköpfe mit integrierten gepulsten Feldgradientenspulen herzustellen. Dabei sind in der Regel sowohl die Messköpfe als auch die Gradientenspulensysteme Zylinder- bzw. Hohlzylinderförmig, wobei insbesondere Kreiszyylinderförmige Varianten Verwendung finden. Diese Gradientenspulensysteme werden üblicherweise auf (kreis-)zylinderförmigen Trägern aufgebracht und deren Leiter belegen im Wesentlichen die volle Zylindermantelfläche. In selteneren Fällen und insbesondere für sehr starke Gradientensysteme, die eine Flüssigkeitskühlung benötigen werden die Gradientensysteme von den Messköpfen getrennt.

[0026] Es gibt verschiedene Herstellungsverfahren für Gradientenspulensysteme: Entweder sie werden aus Draht gewickelt, wobei die Drähte in der Regel in Nuten in den Trägern fixiert werden, oder sie werden aus in der Regel metallischen Rohren, Folien oder elektrisch beschichteten Trägern geschnitten beziehungsweise auf flexiblen Leiterplatten oder Blechen oder Folien gefertigt und anschliessend auf Trägern aufgebracht.

[0027] Die Gradientenwindungen können auf zwei verschiedene Methoden erstellt werden: das sogenannte «lane change winding» oder das «spiral winding». Der Einfachheit halber wird die nachfolgende Diskussion auf Z-Gradientenspulensysteme beschränkt, gilt jedoch weitestgehend auch für alle anderen Gradientenspulensysteme.

[0028] Für ein Z-Gradientenspulensystem liegen die Windungen beim «lane changing» bis auf einen kleinen Abschnitt jeweils auf einer z-Position. Im kleinen Abschnitt wird ein Übergang von einer z-Position auf die nächste ausgeführt. Beim «spiral winding» ist die z-Position kontinuierlich belegt. Insbesondere Drahtgradienten werden in der Regel als «lane change windings» ausgeführt, da die Nuten mit hoher Präzision nicht oder nur mit grossem Aufwand spiralförmig herstellbar sind. Aufgrund der einfacheren Berechnung des Gradientendesigns werden jedoch meist auch anders hergestellte Gradiententypen als «lane change windings» hergestellt.

[0029] Um ein Z-Gradientenfeld herzustellen wird eine Hauptgradientenspule benötigt, die üblicherweise eine Symmetrie gegenüber der xy-Ebene aufweist. Um das Gradientenfeld erzeugen zu können muss jedoch der Drehsinn des Stromes in den beiden Halbräumen entgegengesetzt ausfallen. Üblicherweise werden die beiden Gradientenhälften mittels einer galvanischen Verbindung durch das Zentrum in Serie verschaltet, wobei diese Verbindung auf demselben Radius wie die eigentlichen Gradientenwindungen verlegt wird.

[0030] Für die meisten NMR-Anwendungen werden aktiv abgeschirmte Z-Gradientenspulensysteme eingesetzt, wobei aufgrund der notwendigen kurzen Gradienten-recovery-Zeiten besonderes Augenmerk auf die Abschirmung der Gradienten nach aussen und deren Wechselwirkung mit dem Magnet- und Shimsystem, sowie dem HF-Spulensystemen im Inneren gelegt werden muss. Aktiv abgeschirmte Gradientenspulensysteme bestehen üblicherweise aus mindestens je einer Hauptgradientenspule und einer Abschirmspule, wobei die Abschirmspule die Hauptgradientenspule vollumfänglich umhüllt. Insbesondere sind die Abschirmspulen in der Regel länger ausgeführt als die Hauptgradientenspulen. Da die Belegung der Gradientenspulen aus technischen Gründen meist nur auf Zylindermantelflächen und nicht auf den Stirnflächen der Zylinder erfolgt kann durch Verlängerung der Abschirmspulen zumindest zum Teil die fehlenden Stirnflächen kompensiert werden. Des Weiteren werden üblicherweise Teile der axialen Abschirmung auf dem Zylindermantel der Hauptgradientenspule konzipiert.

[0031] Wie auch für die MRI werden in der NMR-Spektroskopie möglichst starke und möglichst effiziente Feldgradienten gefordert. Insbesondere der zweite Punkt bedingt, dass der radiale Abstand zwischen Hauptgradientenspule und Abschirmspule möglichst gross ausgeführt werden muss. Da jedoch die äusseren Dimensionen durch die Bohrung des Magnetsystems festgelegt sind, kann dies nur erreicht werden, indem der Radius der Hauptgradientenspule in Bezug auf den festgelegten Aussenradius der Abschirmspule reduziert wird.

[0032] Ein NMR Messkopf wird nicht in erster Linie durch das in ihm enthaltene Gradientenspulensystem charakterisiert, da er insbesondere zum Senden und Empfangen von HF-Signalen ausgelegt ist. Dies wird mit HF-Spulen- oder Resonatorsystemen durchgeführt, die auf die Resonanzfrequenzen der zu messenden Kernspins in einem gegebenen statischen Magnetfeld abgestimmt werden. Die Reduktion des Radius der Hauptgradientenspulen hat daher eine untere Grenze, die durch das für einen effizienten Betrieb des HF-Spulensystems notwendige Volumen im Inneren gegeben ist.

[0033] Grundsätzlich bestehen zwei Möglichkeiten, HF-Spulen- und Gradientenspulensysteme in einem Messkopf zu kombinieren: Entweder beide Systeme teilen sich denselben Raum, d.h. sie werden elektromagnetisch nicht voneinander separiert oder der verfügbare Raum wird in einen Bereich für das Gradientenspulensystem (Gradientenbereich) und einen Raum für das HF-System (HF-Bereich) aufgeteilt. Im letzteren Fall wird eine HF-Abschirmung zwischen Spulen und Gradientenspulensystem eingebracht.

[0034] Die Vor- und Nachteile der beiden Konzepte sind wie folgt: Nicht-abgeschirmte Gradientenspulensysteme schränken das der HF zur Verfügung stehende Volumen im Vergleich zu einem Messkopf ohne Gradientenspulensystem nicht oder kaum ein. Eine eingefügte HF-Abschirmung reduziert die Performanz des HF-Systems z.T. wesentlich, da auf der HF-Abschirmung Abschirmströme fließen müssen, die zum einen dissipativ wirken und damit die Güte des HF-Systems reduzieren, und zum anderen dem HF-Magnetfeld entgegen gerichtetes Feld erzeugen und somit die erzeugte Magnetfeldamplitude pro Einheitsstrom im Messvolumen reduzieren. Somit sinkt die Empfindlichkeit eines Messkopfes mit HF-Abschirmung in Bezug auf einen Messkopf ohne HF-Abschirmung.

[0035] Da ein nicht-abgeschirmtes Gradientenspulensystem jedoch im Radiofrequenzbereich ein breites Spektrum an Eigenresonanzen aufweist und diese, insbesondere für den Fall von Tripleaxis-Gradienten, zum Teil massiv mit dem HF-Spulensystem koppeln können, ist die Verwendung Gradientenspulensystemen ohne HF-Abschirmung in der Regel sehr aufwändig oder sogar unmöglich. Kopplungen zwischen Eigenmoden der Gradienten- und den HF-Spulensysteme können z.T. deutlich höhere Verluste in Güte und Magnetfeldamplitude pro Einheitsstrom erzeugen als eine entsprechende HF-Abschirmung erzeugen würde.

[0036] Um dieses Dilemma zu umgehen, werden in der Regel die Radien der Gradientenspulensysteme so gross wie möglich gewählt, um möglichst geringe Verluste durch eine HF-Abschirmung hinnehmen zu müssen. Dadurch resultiert jedoch eine geringere Effizienz des Gradientenspulensystems, die mit höheren Strömen und/oder höherer Induktivität und höherer Dissipation im Betrieb erkauft werden muss.

Die erfindungsgemässe Vorrichtung

[0037] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es demgegenüber, ein aktiv abgeschirmtes Gradientenspulensystem der eingangs beschriebenen Art mit möglichst einfachen technischen Mitteln dahingehend zu verbessern, dass durch eine HF-Abschirmung der verfügbare Raum im Messkopf in einen HF-Bereich und einen Gradientenbereich aufgeteilt werden wobei das Volumen des HF-Bereiches bei gleichbleibender Performanz des Gradientenspulensystems maximiert wird.

[0038] Erfindungsgemäss wird diese Aufgabe auf überraschend einfach zu realisierende, aber sehr wirkungsvolle Weise vollständig dadurch gelöst, dass in einem hohlzylindrischen Abschnitt auf der axialen Länge L_1 symmetrisch zum Zentrum des Messvolumens in einem Radienbereich zwischen einem minimalen Innenradius $R_{1\text{gradient}_in}^{\text{min}}$ der Hauptgradientenspule und $R_{1\text{shield}_in}^{\text{min}}$ keine elektrischen Leiterelemente des Gradientenspulensystems vorhanden sind, und dass eine passive HF-Abschirmung vorgesehen ist, die aus mindestens drei elektrisch miteinander verbundenen Teilabschnitten aufgebaut ist, von denen zwei Teilabschnitte mit einem maximalen Aussenradius $R_{1\text{hf}_out}^{\text{max}}$ um die z-Achse angeordnet sind, während zwischen diesen zwei Teilabschnitten ein dritter Teilabschnitt mit einer axialen Länge L_2 und einem minimalen Innenradius $R_{2\text{hf}_in}^{\text{min}}$ sowie einem maximalen Aussenradius $R_{2\text{hf}_out}^{\text{max}}$ um die z-Achse angeordnet ist, wobei gilt: $R_{1\text{hf}_out}^{\text{max}} < R_{1\text{gradient}_in}^{\text{min}}$ und $R_{1\text{gradient}_out}^{\text{max}} < R_{2\text{hf}_in}^{\text{min}} < R_{2\text{hf}_out}^{\text{max}}$ und $L_2 < L_1$.

Ausführliche Beschreibung der Erfindung mit Ausführungsbeispielen

[0039] Insbesondere bei Verwendung von aktiv abgeschirmten Z-Gradientenspulensystemen ist es nicht zwingend notwendig die volle Zylindermantelfläche beziehungsweise Zylindermantelflächen auf diversen Radien über den vollen z-Bereich zu belegen, wie dies bei den Gradientenspulensystemen im Stand der Technik üblich ist. Die höchsten Stromdichten müssen im Bereich der Umkehrpunkte des Gradientenfeldes erzeugt werden, die in der Regel ausserhalb des Bereiches der HF-Spulensysteme liegen müssen, um eine ausreichende Länge des Gradientenfeldes über den aktiven Bereich des NMR Systems gewährleisten zu können. Im axialen Bereich in dem die HF-Spulensysteme zu liegen kommen können zusätzliche Windungen notwendig sein, um eine bessere Linearität des Z-Gradientenfeldes entlang der z-Achse zu erreichen, wobei die Möglichkeit besteht, einen Teil der Linearisierung durch Windungen der Gradientenabschirmspule zu Lasten der Abschirmwirkung durchzuführen. Zudem können die zur Linearisierung notwendigen zusätzlichen Windungen auf einem anderen Radius als die der Hauptgradientenspule verlegt werden.

[0040] Ausserdem ist es für die üblichen Dimensionen der Kernspinresonanzspektroskopie ausreichend ein einziges Paar von Gradientenspulen zum Paar der Hauptgradientenspule hinzuzufügen um eine ausreichende Linearität für den Z-Gradienten über das Messvolumen zu erzielen.

[0041] Zusätzlich zu den üblichen Optimierungszielen eines Gradientenspulensystems auf minimale Induktivität, maximale Effizienz, Linearität über ein bestimmtes Volumen, Abschirmung nach aussen und Recovery-Eigenschaften bei gegebenen Innen- sowie Aussendurchmesser werden somit Vorgaben für Volumina gemacht, die frei von Leitern sein müssen. Um den zentralen Bereich frei von elektrischen Leitern zu halten, kann die Hauptgradientenspule als zwei oder mehr separaten Teilspulensystemen aufgebaut werden. Die elektrischen Zuleitungen für jedes der Teilspulensysteme werden axial im Zwischenraum zwischen Hauptgradientenspulen und Abschirmspule zum jeweils näheren Ende des Gradienten geführt ohne den zentralen Bereich zu durchkreuzen. Nun können alle Teilspulensysteme des Gradienten inklusive der Abschirmspule(n) in Serie verschaltet werden.

[0042] Ein erfindungsgemässes Gradientenspulensystem weist demnach einen zylindrischen Abschnitt in einem zentralen Bereich auf, der keine Leiterelemente des Gradientenspulensystems enthält und einen maximalen Aussenradius hat, der grösser ist als der minimale Innenradius der Leiterelemente der Hauptgradientenspule. Dies beinhaltet neben den eigentlichen Gradientenwindungen auch die Zuleitungs- bzw. Verbindungsdrähte zwischen den einzelnen Windungen der Gradientenspulen. Insbesondere ist der Aussenradius dieses zylindrischen Abschnittes nur unwesentlich kleiner oder gleich gross wie der minimale Innenradius der Abschirmspule in diesem axialen Bereich.

[0043] Dieser freie Raum im Zentrum des Gradientenspulensystems kann nun genutzt werden um eine passive HF-Abschirmung einzufügen, deren Radius R_2 in einem zentralen Bereich über einer Länge L_2 grösser wird als deren Radius R_1 in den äusseren Bereichen (insbesondere dem Bereich der höchsten Stromdichte der Hauptgradienten-Teilspulensysteme). Um dies zu erreichen wird die HF-Abschirmung aus mindestens drei Teilabschnitten aufgebaut, die elektrisch miteinander verbunden werden. Unter elektrischer Verbindung soll in diesem Kontext entweder eine galvanische Verbindung oder eine elektromagnetische Verbindung verstanden werden. Elektromagnetisch verbunden sind zwei Leiterelemente, wenn sie eine wesentliche elektromagnetische Kopplung aufweisen, die insbesondere durch kapazitive oder induktive Verkopplung zustande kommt. Sie kann durch diskrete oder verteilte kapazitiv und/oder induktiv wirkende Elemente erreicht werden. Verteilte kapazitive Elemente können z.B. als, zur Isolation durch dielektrische Schichten getrennte, überlappende elektrischer Leiter ausgeführt werden.

[0044] Da im zentralen Bereich eines NMR Messkopfes mindestens ein Sende-und/oder Empfangsspulensystem montiert ist, wird das diesem zur Verfügung stehende Volumen durch die erfindungsgemässe HF-Abschirmung weniger stark begrenzt als im Stand der Technik. Dies führt bei vergleichbarer Performanz des Gradientenspulensystems zu einer höheren Performanz des Sende- und/oder Empfangsspulensystems als in einem NMR-Messkopf gemäss dem Stand der Technik.

[0045] Insbesondere können die erforderlichen Pulswinkel beim Senden mit niedrigeren Pulsleistungen erreicht werden, was thermische Effekte reduziert. Weiterhin wird die Empfindlichkeit und damit das Signal zu Rauschverhältnis des Messkopfes beim Empfang verbessert.

[0046] Im Folgenden werden bevorzugte Ausführungsformen und Weiterbildungen der Erfindung mit ihren Wirkungsweisen und besonderen Vorteilen beschrieben:

[0047] Eine besonders bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemässen Gradientenspulensystems ist dadurch gekennzeichnet, dass gilt: $R_{2hf_{out}}^{max} < R_{1shield_{in}}^{min}$.

[0048] Damit wird erreicht, dass die Abschirmspule des Gradientenspulensystems aus einem Stück, z.B. auf einem einzigen Träger gefertigt werden kann. Dies vereinfacht die Montage und das Ausrichten der Teilspulensysteme der Hauptgradientenspule zur Abschirmspule bei der Herstellung.

[0049] Besondere Vorteile bietet auch eine Ausführungsform des erfindungsgemässen Gradientenspulensystems, bei der gilt:

$$R_{2hf_{in}}^{min} \geq 1,1 \cdot R_{1gradient_{out}}^{max} \text{ und } R_{2hf_{out}}^{max} \geq 0,8 \cdot R_{1shield_{in}}^{min}.$$

Bei diesen Dimensionen kann eine signifikante Steigerung der Performanz des Sende- und/oder Empfangs-Spulensystems erreicht werden.

[0050] Bei einer weiteren bevorzugten Ausführungsform gilt: $R_{2hf_{in}}^{min} \geq R_{1gradient_{out}}^{max} + 3 \text{ mm}$ und $R_{2hf_{out}}^{max} \geq R_{1shield_{in}}^{min} - 3 \text{ mm}$. Bei den üblichen Dimensionen des Gradientenspulensystems eines NMR Messkopfes mit R_2 ungefähr im Bereich $33 \text{ mm} < R_2 < 40 \text{ mm}$ und R_1 ungefähr im Bereich $18 \text{ mm} < R_1 < 25 \text{ mm}$ resultiert aus diesen Abmessungen eine deutliche Steigerung der Performanz des Sende- und/oder Empfangs-Spulensystems in Bezug auf einen NMR Messkopf gemäss dem Stand der Technik.

[0051] Eine Klasse von Ausführungsformen des erfindungsgemässen Gradientenspulensystems zeichnet sich dadurch aus, dass die um die z-Achse gewickelten elektrischen Leiterabschnitte aus Drähten mit vorzugsweise rundem Querschnitt aufgebaut sind. Dies ist besonders einfach zu fertigen, z.B. indem in einem Träger Nuten eingebracht werden, in die Drähte gewickelt werden. Drähte mit rundem Querschnitt lassen sich noch einfacher montieren als Drähte mit beliebigem, insbesondere mit quadratischem Querschnitt. Drähte mit rechteckförmigen Querschnitt optimieren die Stromdichte pro Volumeneinheit beim Design in Bezug auf runde Drähte.

[0052] Bei einer alternativen Klasse von Ausführungsformen sind die um die z-Achse gewickelten elektrischen Leiterabschnitte aus Bandleitern aufgebaut. Als Bandleiter sollen Drähte verstanden werden, deren Querschnitt ein Breiten zu Höhen Verhältnis aufweist, das deutlich von 1 abweicht, insbesondere für die ein Höhen zu Breiten bzw. Breiten zu Höhen

Verhältnis grösser als 1.5 aufweisen. Besonders bevorzugt sind Leiter mit einem Breiten zu Höhenverhältnis grösser 2. Bandleiter können bei gegebener radialer Dimension den elektrischen Widerstand des Gradientensystems minimieren oder einen geringeren Leiterabstand in axialer Richtung bei gegebenem elektrischem Widerstand erlauben.

[0053] Eine weitere, ebenfalls alternative Klasse von Ausführungsformen ist dadurch gekennzeichnet, dass die um die z-Achse gewickelten elektrischen Leiterabschnitte aus mit einer elektrisch leitenden Schicht beschichteten dielektrischen Trägern aufgebaut sind. Eine präzise und zugleich kostengünstige Fertigung von Gradientenspulensystemen ist mittels Strukturierung (z.B. Laserstrukturierung, aber auch nasschemischen Methoden) von mit elektrisch leitenden Schichten beschichteten Trägern möglich. Der manuelle Aufwand kann hierbei minimiert und die Reproduzierbarkeit maximiert werden. Als Träger eignen sich keramische Werkstoffe, Kunststoffe, Gläser und geschliffene Einkristalle. Wird ein Trägermaterial mit hoher Wärmeleitfähigkeit (z.B. Aluminiumnitrid, Aluminiumoxid, Silizium oder Siliziumcarbid als Keramik oder Einkristall) verwendet, kann der Träger zusätzlich zur Funktion der mechanischen Positionierung und Stabilisierung der elektrischen Leiter auch die Wärmeübertragung zu deren Kühlung übernehmen. Dies ist insbesondere bei kryogen gekühlten Gradientenspulensystemen von Vorteil.

[0054] Bevorzugt sind auch Ausführungsformen des erfindungsgemässen Gradientenspulensystems, bei denen mindestens zwei der Paare von axial voneinander beabstandeten zylinderförmigen Teilspulensystemen der Hauptgradientenspule unterschiedliche minimale Innenradien $R1_{\text{gradient}_n^{\text{min}}}$, $R2_{\text{gradient}_n^{\text{min}}}$, $R3_{\text{gradient}_n^{\text{min}}}$ aufweisen. Bei diesen Ausführungsformen können z.B. Spulen zur Linearisierung des Gradienten eingefügt werden, die den für den HF-Bereich zur Verfügung stehenden Raum nur minimal reduzieren, wenn die HF-Abschirmung dem Profil der Leiter des Gradientenspulensystems folgt.

[0055] Bei weiteren vorteilhaften Ausführungsformen ist vorgesehen, dass mindestens zwei Teilabschnitte der passiven HF-Abschirmung unterschiedliche minimale Innenradien $R1_{\text{hf}_n^{\text{min}}}$, $R2_{\text{hf}_n^{\text{min}}}$, $R3_{\text{hf}_n^{\text{min}}}$, $R4_{\text{hf}_n^{\text{min}}}$ aufweisen. Dies erlaubt es, den HF-Bereich zu maximieren, wenn ein Gradient mit mindestens zwei Paaren axial voneinander beabstandeter zylinderförmiger Teilspulensysteme mit unterschiedlichen minimalen Innenradien verwendet wird. Darüberhinaus kann so auch eine «Einbuchtung» der HF-Abschirmung lediglich im Bereich von Leitern eines Teilspulensystems der Hauptgradientenspule vorgenommen werden. Dies maximiert den HF-Bereich und somit die Performanz der NMR-Sende/Empfangsspulensysteme.

[0056] Des Weiteren sind auch Ausführungsformen bevorzugt, bei denen mindestens eines der zylinderförmigen Teilspulensysteme aus mehreren in radialer Richtung übereinander gewickelten elektrischen Leiterabschnitten aufgebaut ist. Als übereinander gewickelte Leiter sollen Leiter verstanden werden, die auf mehreren Radien bei ungefähr derselben z-Position montiert werden. Dies gibt die Möglichkeit höhere Stromdichten in einer z-Position bei konstanter Leiterbreite zu designen. Damit kann der Widerstand der Gradientenspulen reduziert in Bezug auf Designs mit lokal reduzierten Leiterbreiten reduziert und das Design vereinfacht werden. Im Vergleich zu einer «verschmierten» Belegung durch Leiter wird auch der von den Leitern der Hauptgradientenspule belegte Raum minimiert, der nicht mehr für den HF-Bereich zur Verfügung steht.

[0057] Ebenfalls vorteilhaft ist eine Klasse von Ausführungsformen, die sich dadurch auszeichnen, dass die zylinderförmigen Teilspulensysteme der Hauptgradientenspule sowie die mindestens eine aktive Abschirmspule bis auf eine Zuleitungsöffnung vollständig von der passiven HF-Abschirmung eingefasst sind. Dadurch können einerseits die elektromagnetischen Kopplungen zwischen den Gradientenspulen und den Sende/Empfangsspulensystemen minimiert beziehungsweise auf null reduziert werden, andererseits kann eventuell detektierbares NMR-Signal von Materialien der Gradienten (z.B. ^1H bzw. ^{13}C Signal von Isolationen der elektrischen Leiter, Klebstoffe, Trägermaterialien etc.) minimiert beziehungsweise auf null reduziert werden.

[0058] Diese Ausführungsform des erfindungsgemässen Gradientenspulensystems können dadurch weitergebildet werden, dass die radial inneren Flächen und die axialen Stirnflächen der zylinderförmigen Teilspulensysteme (der Hauptgradientenspule sowie die radial äusseren Flächen und die axialen Stirnflächen der mindestens einen aktiven Abschirmspule von der passiven HF-Abschirmung eingefasst sind. Dadurch wird das Gradientenspulensystem vollständig, durch die HF-Abschirmung umschlossen, so dass Kopplungen und Grundsignal aus minimiert bzw. ausgeschlossen werden können.

[0059] Eine alternative Klasse von Ausführungsformen zeichnet sich dadurch aus, dass die passive HF-Abschirmung räumlich so geformt ist, dass sie einen HF-dichten Raumbereich umschliesst, aus welchem HF-Strahlung nicht aussen dringen kann. Bei dieser Ausführungsform wird der HF-Bereich scharf abgegrenzt so dass Kopplungen mit dem Aussenraum effizient minimiert werden können und kein NMR-Grundsignal aus dem Aussenraum empfangen werden kann.

[0060] Die beiden oben beschriebenen Klassen von Ausführungsformen können vorteilhaft dadurch weitergebildet werden, dass eine HF-Dichtigkeit der passiven HF-Abschirmung durch kapazitives Überlappen von Elementen der passiven HF-Abschirmung und/oder durch Verlöten und/oder durch Verpressen und/oder durch Verkleben mit elektrisch leitfähigem Klebstoff bewirkt wird. Dies erlaubt, eine HF-dichte Abstufung der passiven HF-Abschirmung kostengünstig aus mehreren Teilen herzustellen.

[0061] Gradientenspulensystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die passive HF-Abschirmung (3) auf einem Träger aufgebracht ist, insbesondere durch Aufdampfen und/oder Sputtern und/oder CVD und/oder galvanischen Auftrag, und/oder Aufdrucken und/oder Aufmalen und/oder Aufkleben. Dies erlaubt, eine HF-Abschirmung in einem Fertigungsschritt auf der Innenseite und/oder Aussenseite eines Trägermaterials effizient aufzubringen.

gen. Weiterhin kann die so aufgebrachte elektrisch leitfähige Schicht einfach und präzise in einem weiteren Schritt in einem Muster strukturiert werden, das möglichst geringe Abschirmströme beim Schalten von Gradientenfeldern zulässt.

[0062] Eine weitere bevorzugte Ausführungsform ist dadurch gekennzeichnet, dass mindestens zwei der elektrisch miteinander verbundenen Teilabschnitte zylindersymmetrisch um die z-Achse mit einem maximalen Aussenradius $R1_{hf_{out}^{max}}$ angeordnet sind, wobei zwischen diesen zwei Teilabschnitten ein dritter Teilabschnitt mit einer axialen Länge $L2$ und einem minimalen Innenradius $R2_{hf_{in}^{min}}$ sowie einem maximalen Aussenradius $R2_{hf_{out}^{max}}$ um die z-Achse angeordnet ist, und dass zwischen dem dritten Teilabschnitt und den zwei anderen Teilabschnitten jeweils ein Übergangabschnitt, insbesondere in Form eines konusförmigen Elements, angeordnet ist, der auf einer axialen Länge $L8$ die auf unterschiedlichen Radien angeordneten Teilabschnitte miteinander verbindet. Diese Ausführungsform ist besonders geeignet, wenn die passive HF-Abschirmung mittels Beschichtungsverfahren auf einem Träger aufgebracht wird, da keine Flächen senkrecht zur Zylinderachse oder scharfen Kanten beschichtet beziehungsweise strukturiert werden müssen.

[0063] In den Rahmen der vorliegenden Erfindung schliesslich fällt auch ein MR-Spektrometer mit einem Gradientenspulensystem mit den oben beschriebenen, erfindungsgemässen Modifikationen, welches sich dadurch auszeichnet, dass ein HF-Sende- und/oder Empfangs-Spulensystem vorgesehen ist, das innerhalb des Radius $R2_{hf_{in}^{min}}$ auf einer axialen Länge $L3 < L2$ symmetrisch zum Zentrum des Messvolumens angeordnet ist. Wenn die Aussparung mit vergrössertem Radius der passiven HF-Abschirmung eine grössere Länge aufweist als die HF-Sende- und/oder Empfangs-Spulensysteme, kann die Performanz der letzteren weiter verbessert werden.

[0064] Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der Zeichnung. Die Zeichnungen stellen die verschiedenen Merkmale nicht notwendigerweise massstabsgetreu dar. Ebenso können die vorstehend genannten und die weiter aufgeführten Merkmale je für sich oder zu mehreren in beliebigen Kombinationen Verwendung finden. Die gezeigten und beschriebenen Ausführungsformen sind nicht als abschliessende Aufzählung zu verstehen, sondern haben vielmehr beispielhaften Charakter für die Schilderung der Erfindung.

[0065] Es zeigen:

- Fig. 1 einen schematischen Querschnitt durch eine erste, besonders einfach aufgebaute Ausführungsform des erfindungsgemässen aktiv abgeschirmten zylinderförmigen Gradientenspulensystems;
- Fig. 2 eine Ausführungsform des erfindungsgemässen Gradientenspulensystems enthaltend ein Sende- und/oder Empfangs-Spulensystem;
- Fig. 3 eine Ausführungsform mit einer Hauptgradientenspule bestehend aus drei Paaren von Teilpulensystemen auf verschiedenen Radien und einer passiven HF-Abschirmung mit drei Teilabschnitten auf verschiedenen Radien;
- Fig. 4 ein weiteres erfindungsgemässes Gradientenspulensystem, bei dem die Teilpulensysteme der Hauptgradientenspule jeweils aus mehreren Lagen von Leitern gefertigt sind und die HF-Abschirmung Einbuchtungen im Bereich der Leiter definiert;
- Fig.5 eine Ausführungsform des erfindungsgemässen Gradientenspulensystems, das vollständig von der passiven HF-Abschirmung umschlossen ist;
- Fig.6 ein erfindungsgemässes Gradientenspulensystem, das vollständig von der passiven HF-Abschirmung umschlossen ist, wobei die Abschirmspule aus zwei in einem zentralen Bereich in einem zentralen Bereich abstandeten Teilpulensystemen besteht;
- Fig.7 eine Ausführungsform mit HF-dicht abgeschlossenem HF-Bereich;
- Fig.8a eine HF-Abschirmung für ein erfindungsgemässes Gradientenspulensystem, die auf der Auenseite eines Trägers aufgebracht ist; und
- Fig.8b eine HF-Abschirmung, die auf der Aussenseite eines Trägers aufgebracht ist, wobei der Übergang zwischen den beiden Radien der HF-Abschirmung konisch ausgeführt ist.

[0066] In der nachfolgenden, detaillierten Beschreibung werden zu Zwecken der Erklärung und nicht der Einschränkung dienende Ausführungsbeispiele, die spezifische Details offenbaren, ausgeführt, um ein tiefgreifendes Verständnis der vorliegenden Lehren zu geben. Für einen Fachmann auf dem Gebiet, der die vorliegende Offenbarung gelesen hat, ist es jedoch offensichtlich, dass andere Ausführungsbeispiele gemäss den vorliegenden Lehren, die von den spezifischen, hierin offenbarten Details abweichen, innerhalb des Schutzbereichs der angehängten Ansprüche verbleiben. Ferner können Beschreibungen von aus dem Stand der Technik bekannten Vorrichtungen und Verfahren der Übersichtlichkeit halber weggelassen sein. Solche Verfahren und Vorrichtungen sind offensichtlich innerhalb des Schutzbereichs der vorliegenden Lehren.

[0067] Die hierin verwendete Terminologie ist ausschliesslich zu Zwecken der Beschreibung bestimmter Ausführungsbeispiele und soll nicht einschränkend sein. Die definierten Ausdrücke sind zusätzlich zu technischen und wissenschaftlichen Bedeutungen der definierten Ausdrücke, wie sie üblicherweise verstanden werden und auf dem technischen Gebiet der vorliegenden Lehren akzeptiert sind.

[0068] Die Ausdrücke «ein, eine, eines» und «der, die, das» umfassen sowohl Singularis auch Pluralformen, ausser der Kontext gibt eindeutig anderes vor. Somit umfasst zum Beispiel «eine Vorrichtung» eine Vorrichtung und/oder mehrere Vorrichtungen.

[0069] Die in der Beschreibung und den angehängten Ansprüchen verwendeten Ausdrücke «wesentlich» oder «im Wesentlichen» bedeuten «innerhalb akzeptabler Grenzen oder Grade».

[0070] Der Ausdruck «ungefähr» bedeutet «innerhalb einer akzeptablen Grenze oder einem Betrag für einen Durchschnittsfachmann auf dem Gebiet. Zum Beispiel bedeutet «ungefähr dasselbe», dass ein Durchschnittsfachmann auf dem Gebiet die Elemente, die verglichen werden, als die gleichen betrachtet.

[0071] Die Verwendung des Ausdrucks «insbesondere» hebt lediglich eine Teilmenge aus einer Menge hervor ohne die Grundgesamtheit der Menge explizit einzuschränken. So umfasst z.B. die Menge «Zylinder, insbesondere Kreiszyylinder», die Menge aller Zylinder beliebiger Querschnittsfläche und hebt lediglich diejenigen mit kreisförmiger Querschnittsfläche als besonders geeignet hervor.

[0072] Ein erfindungsgemässes aktiv abgeschirmtes Gradientenspulensystem zur Verwendung in einem MR-Spektrometer mit einem Hauptfeldmagneten, der ein in Richtung einer z-Achse ausgerichtetes Hauptmagnetfeld erzeugt, ist zylinderförmig um die z-Achse herum angeordnet und besteht aus einer Hauptgradientenspule, die aus mindestens zwei zylinderförmigen Teilspulensystemen aufgebaut ist, mindestens einer zylinderförmigen Abschirmspule und mindestens einer passiven HF-Abschirmung, wobei die mindestens zwei Teilspulensysteme der Hauptgradientenspule aus elektrischen Leitern auf einem Radius $R1_{\text{gradient}}$ aufgebaut sind, und in der z-Richtung über eine axiale Länge $L1$ voneinander beabstandet sind, und die mindestens eine Abschirmspule aus elektrischen Leitern auf einem Radius $R1_{\text{shield}}$ aufgebaut ist.

[0073] Bei vielen Ausführungsformen, insbesondere mit elektrischen Leiterelementen aus Draht ist die radiale Ausdehnung der Hauptgradientenspule sowie der Abschirmspule so gross, dass der Unterschied zwischen dem minimalen Innendurchmesser und dem maximalen Aussendurchmesser nicht mehr als ungefähr gleich anzusehen sind. Aus diesem Grunde wird insbesondere für die Ausführungsformen mit nicht vernachlässigbaren radialen Abmessungen jeweils ein minimaler Innenradius $R1_{\text{gradient}}^{\text{min}}$ beziehungsweise $R1_{\text{shield}}^{\text{min}}$ sowie ein maximaler Aussenradius $R1_{\text{gradient}}^{\text{max}}$ beziehungsweise $R1_{\text{shield}}^{\text{max}}$ zugeordnet. Für kreiszylinderförmige Gradientenspulensysteme gilt insbesondere dass der minimale Innenradius gleich dem Innenradius und der maximale Aussenradius gleich dem Aussenradius ist. Für Ausführungsformen, insbesondere kreiszylinderförmige, mit ungefähr gleichen Innen- und Aussenradien der Teilspulen, soll $R1_{\text{gradient}}^{\text{min}} = R1_{\text{gradient}}^{\text{max}} = R1_{\text{gradient}}$ betrachtet werden.

[0074] Hierbei gelten folgende Bedingungen:

[0075] $R1_{\text{gradient}}^{\text{max}} < R1_{\text{shield}}^{\text{min}}$, d.h. die Hauptgradientenspule kann innerhalb der Abschirmspule ausgeführt werden. Dies ermöglicht einerseits eine einfache Montage bei der Herstellung, andererseits aber auch eine Herstellung auf einem einzigen Träger für die Abschirmspule und die Gradientenspule, indem die Leiterelemente auf der Innen- sowie der Aussenseite aufgebracht werden. Technisch ist diese Bedingung für die Separierung der Funktionalität in Felderzeugung in einem Innenraum, insbesondere im Messvolumen und aktive Abschirmung des Gradientenfeldes in einem Aussenraum, insbesondere ausserhalb des NMR Messkopfes notwendig.

[0076] Darüber hinaus wird $R1_{\text{shield}}^{\text{max}}$ durch die maximal möglichen Dimensionen des Gradientenspulensystems bestimmt, die noch im NMR Messkopf beziehungsweise im Shimsystem des MR Spektrometers eingebaut werden können. $R1_{\text{gradient}}^{\text{min}}$ wird durch die Anforderungen an die Performanz des Gradientenspulensystems sowie der Dimensionen und der Performanz des Sende- und/oder Empfangs-Spulensystems bestimmt.

[0077] Das Gradientenspulensystem besteht darüber hinaus aus mindestens einer abschnittsweise zylinderförmigen passiven HF-Abschirmung, deren elektrisch leitenden Elemente sich innerhalb mindestens zweier minimaler Innenradien $R1_{\text{hf}}^{\text{min}}$ und zweier maximaler Aussenradien $R1_{\text{hf}}^{\text{max}}$ und befinden, wobei i eine natürliche Zahl grösser als gleich zwei ist. Analog zu den Radien der Gradientenspulen sollen für den Fall ungefähr gleicher Innen- und Aussenradien diese als $R1_{\text{hf}}^{\text{min}} = R1_{\text{hf}}^{\text{max}} = R1_{\text{hf}}$ betrachtet werden, was insbesondere für dünne, kreiszylinderförmige HF-Abschirmungen erfüllt ist.

[0078] Die HF-Abschirmung ist aus mindestens drei Teilabschnitten aufgebaut, wobei zwei dieser Teilabschnitte den Radius $R1_{\text{hf}}$ aufweisen und zwischen diesen ein dritter Teilabschnitt mit einer axialen Länge $L2$ symmetrisch zum Zentrum des Messvolumens auf dem Radius $R2_{\text{hf}}$ eingefügt ist.

[0079] Für die Radien der passiven HF-Abschirmung gelten folgende Bedingungen:

[0080] $R1_{\text{hf}}^{\text{max}} < R2_{\text{hf}}^{\text{min}}$, $R1_{\text{hf}}^{\text{max}} < R1_{\text{gradient}}^{\text{min}}$ und $R1_{\text{gradient}}^{\text{max}} < R2_{\text{hf}}^{\text{min}}$. Darüber hinaus gilt für die axialen Dimensionen $L2 < L1$. Daraus resultiert ein aktiv abgeschirmtes Gradientenspulensystem mit einer passiven HF-Abschirmung, die in einem zentralen Bereich eine Ausbuchtung nach aussen aufweist. Da sich in diesem zentralen Bereich des NMR-Messkopfes mindestens ein Sende- und/oder Empfängerspulensystem befindet wird dessen Performanz durch

die Vergrößerung des zur Verfügung stehenden Volumens gegenüber den NMR Messköpfen des Standes der Technik mit zylinderförmiger HF-Abschirmung auf dem Radius R_{1hf} verbessert.

[0081] Besonders bevorzugt ist eine Ausführungsform bestehend aus einer Hauptgradientenspule umfassend genau zwei Teilspulensysteme und einer einzigen Abschirmspule, wobei die passive HF-Abschirmung in einem zentralen Bereich einen möglichst geringen radialen Abstand zur Abschirmspule aufweist und in den Randbereichen einen möglichst geringen radialen Abstand zu den Gradientenspulen aufweist.

[0082] Für diese Ausführungsform gilt zusätzlich zu den oben genannten Bedingungen $R_{2hf_{out}}^{max} < R_{1shield_{in}}^{min}$. Diese Ausführungsform ist technisch möglichst einfach zu realisieren und erlaubt ein grosses Volumen für die HF-Spulensysteme zur Verfügung zu stellen und stellt zugleich keine Einschränkung für die Positionierung der Leiterelemente der Abschirmspule dar. Dadurch kann eine effiziente Abschirmung der Gradientenfelder nach aussen hin gewährleistet werden. Wenn die Abschirmspule auf einem Träger montiert ist und dieser eine geringe Wandstärke aufweist, stellt diese Ausführungsform nur eine geringe Einbusse der Performanz des Sendee- und/oder Empfangsspulensystems dar. Sie ist schematisch als Schnitt in Fig. 1 dargestellt.

[0083] Die Herstellung eines solchen Gradientenspulensystems kann besonders bevorzugt aus folgenden Teilstücken erfolgen:

1. Aus vier Komponenten, bestehend aus einer HF-Abschirmung auf einem Träger, zwei Teilspulensystemen der Hauptgradientenspule auf jeweils einem rohrförmigen Träger und einer Abschirmspule auf einem anderen rohrförmigen Träger. Diese Herstellungsmethode kann auf alle gängigen Verfahren zur Herstellung von Gradientensystemen angewendet werden. Insbesondere eignet sie sich für aus Draht gewickelten Gradienten, jedoch auch für elektrisch leitend beschichtete Träger. Bei einer Herstellung der Gradientenspulen aus geschnittenen Metallrohren entfallen die oben erwähnten Träger zumindest für einen Teil der Elemente.
2. Aus drei Komponenten bestehend aus jeweils einem oder mehreren Teilspulensystemen der Hauptgradientenspule auf der Innenseite und der Hälfte der Abschirmspule (geschnitten durch die xy-Ebene) auf der Aussenseite sowie einer HF-Abschirmung auf einem Träger. Hierbei ist anzumerken, dass die Fertigung einer Abschirmspule aus zwei Hälften als im Wesentlichen gleich zur Fertigung auf einem einzigen zylinderförmigen Träger anzusehen ist, wenn sich die beiden Hälften im zentralen Abschnitt weitestgehend berühren. Diese Herstellungsmethode reduziert die Anzahl der Freiheitsgrade bei der Positionierung der Bauteile und kann so den Ausschuss minimieren, wenn fertigungstechnisch die korrekte Positionierung der Leiterelemente auf den beiden Trägern sichergestellt werden kann.
3. Das Gradientenspulensystem kann auf den Innen- und Aussenseiten eines einzigen Trägers gefertigt werden in das die HF-Abschirmung eingefügt wird. Hierbei wird die HF-Abschirmung in der Regel aus Einzelteilen zusammengesetzt oder auf einer Isolationsschicht im Inneren der Gradientenspule aufgebracht. Diese Fertigungsmethode eignet sich insbesondere für elektrisch leitend beschichtete Träger und erlaubt mittels maschineller Fertigung eine hohe Ausbeute der Gradienten ohne zeitaufwändige Positionierung der Hauptgradientenspule zur Abschirmspule.
4. Eine weitere Möglichkeit besteht darin das Gradientenspulensystem auf der Innen- und Aussenseite eines entlang der Längsachse zerschnittenen «Halbschalenförmigen» Trägers zu fertigen. Hierbei kann insbesondere das Design des Gradientensystems so ausgelegt werden, dass keine oder nur wenige galvanischen Verbindungen zwischen den «Halbschalen» vonnöten sind. Dies kann z.B. erreicht werden, indem ein mehrfacher Wechsel des Stromes zwischen der Hauptgradientenspule und der Abschirmspule über die Schnittkante hinweg erfolgt. Die HF-Abschirmung kann auf einem dritten Träger gefertigt werden, der in die beiden Halbschalen eingefügt wird oder auf einer Isolationsschicht im Inneren der Halbschalen aufgebracht werden.

[0084] Andere Herstellungsmethoden bestehend aus mehr Elementen, insbesondere für die HF-Abschirmung können unter bestimmten Umständen ebenfalls Vorzüge aufweisen, insbesondere wenn die HF-Abschirmung nicht aus einer durchgehenden, dünnen, elektrisch leitenden Schicht gefertigt wird, sondern aus Teilstücken mit kapazitiver Kopplung zwischen benachbarten Elementen.

[0085] Bei einer anderen bevorzugten Ausführungsform kann der Aussenradius der HF-Abschirmung in einem zentralen Abschnitt der Länge L_2 auch grösser als der Innenradius der aktiven Abschirmspule ausfallen, d.h. $R_{2hf_{out}}^{max} \geq R_{1shield_{in}}^{min}$. Dies wird möglich, wenn im Design des Gradienten ein zentraler Bereich der Länge L_6 vorgesehen ist, in dem weder die Hauptgradientenspule noch die Abschirmspule Leiterelemente aufweisen. In diesem Fall wird das Volumen für die Sendee- und/oder Empfangs-Spulensysteme maximiert, jedoch wird in der Regel die Effizienz der aktiven Gradientenabschirmung etwas reduziert, so dass beim schnellen Schalten der/des Gradientenfeldes mehr Wirbelströme in den elektrisch leitenden Strukturen mit Radien grösser als $R_{1shield_{out}}^{max}$ induziert werden. Dem muss durch Verwendung entsprechender Materialien mit hohem elektrischen Widerstand beziehungsweise nicht-leitenden Materialien im Umfeld des Gradientenspulensystems oder durch angepasstes Design des Gradienten das Wirbelströme mit geringer Wirkung auf das Messvolumen erzeugt entgegengewirkt werden. In der Regel gilt weiterhin $R_{2hf_{out}}^{max} = R_{1shield_{out}}^{max}$.

[0086] Weiterhin besonders bevorzugt ist eine Ausführungsform, bei der die Länge L_2 grösser ist als die Länge L_3 mindestens eines Sendee- und/oder Empfangs-Spulensystems. Dies ermöglicht die geringsten Performanzverluste durch eine HF-Abschirmung bei zugleich grosser Effizienz des Gradientenspulensystems. In Fig. 2 ist ein solches Gradientenspulensystem in seiner einfachsten Form schematisch dargestellt. Ein NMR-Messkopf enthält in der Regel mehr als ein Sendee- und/oder Empfangs-Spulensystem. Die Länge L_3 bezieht sich hierbei auf die magnetische Länge eines dieser Spulensysteme. Es existieren diverse Definitionen für die magnetische Länge von Sendee- und/oder Empfangs-Spulensystemen,

die jedoch im Rahmen dieser Erfindung als ungefähr dieselben Werte angesehen werden können. Eine dieser Definition für magnetische Länge ist die Halbwertslänge des HF-Magnetfeldes auf der z-Achse.

[0087] Eine andere Ausführungsform sieht vor, dass die Teilspulensysteme der Hauptgradientenspule auf mehr als einem und die HF-Abschirmung auf mehr als zwei Radian gefertigt werden. Dies hat den Vorzug, mehr Flexibilität für die Konzeption des Gradienten zu haben, die Linearität und Abschirmung des Gradienten verbessern sowie zugleich das für den HF-Bereich zur Verfügung stehende Volumen bei gegebenen Spezifikationen für das Gradientenspulensystem noch weiter zu vergrössern.

[0088] In Fig. 3 ist schematisch ein Gradientenspulensystem dargestellt, bei dem die HF-Abschirmung über der Länge L_2 einen Innenradius $R_{2hf, in}^{min}$ aufweist. Auf zwei symmetrisch zum Zentrum des Messvolumens liegenden Abschnitten mit $L_2/2 \leq |z| \leq L_4/2$ weist sie einen Radius R_{3hf} auf, wobei $R_{3hf, out}^{max} < R_{2hf, in}^{min}$. Über der restlichen Länge weist die HF-Abschirmung einen Radius R_{1hf} auf, wobei in diesem Beispiel gilt $R_{1hf, out}^{max} < R_{3hf, in}^{min}$. Grundsätzlich sind weitere Abstufungen der HF-Abschirmung möglich. Auch müssen diese nicht symmetrisch zum magnetischen Zentrum des Messkopfes ausgeführt sein.

[0089] Eine weitere bevorzugte Ausführungsform sieht eine geringe Flächenbelegung durch die Teilspulensysteme der Hauptgradientenspule vor. Dies maximiert das Volumen für den HF-Bereich weiter. Diese geringere Flächenbelegung kann insbesondere dann erreicht werden, wenn mehrere Lagen Leiter radial übereinandergestapelt werden. Dies ist insbesondere für aus Draht gewundene Gradienten eine vorteilhafte Ausführungsform, da sie technisch einfach zu lösen ist, indem in einem Träger Nuten zur Aufnahme der Gradientendrähte gefertigt werden und der Gradient dicht gepackt in diese Nuten gewunden wird. Alternativ kann mit Multilayer-PCB's gearbeitet werden beziehungsweise mehrere Lagen von Rohren ineinander verschachtelt werden. In diesem Falle soll jeder mit Leiter belegte Radius als eigenständige Gradientenspule auf Radius $R_{igradient}$, wobei i eine natürliche Zahl (positive ganze Zahl) ist, betrachtet werden. Die z-Positionen verschiedener Teilspulensysteme können sich daher auch überlappen.

[0090] In Fig. 4 ist ein solches Gradientenspulensystem schematisch im Schnitt dargestellt, wobei bei dieser konkreten Ausführungsform die HF-Abschirmung in einem Intervall $-L_2/2 \leq z \leq L_2/2$ den Radius R_{2hf} aufweist, in zwei weiteren Intervallen $L_2/2 < |z| < L_4/2$ den Radius R_{3hf} , in den Intervallen $L_4/2 \leq |z| \leq L_5/2$ den Radius R_{4hf} sowie über der verbleibenden Länge den Radius R_{1hf} . In Fig. 4 ist $R_{2hf} = R_{4hf}$. Dies muss jedoch nicht gelten und dient lediglich zur Veranschaulichung einer besonders bevorzugten Ausführungsvariante. Im Allgemeinen können alle Radien verschieden ausgeführt werden. Ausserdem ist in Fig. 4 die axiale Ausdehnung der verschiedenen Gradientenspulen bei ungefähr gleicher z-Position gleich gross gezeichnet. Dies muss im allgemeinen Fall nicht gewährleistet sein, ist jedoch z.B. bei Drahtgradienten besonders einfach zu realisieren, wenn Drähte in Nuten gewunden werden. Eine andere einfach zu realisierende Möglichkeit für einen Drahtgradienten ist es die Drähte in «dichtester Kugelpackung» zu winden, so dass jede zweite Lage einen Draht weniger enthält und einen halben Drahtdurchmesser Versatz aufweist.

[0091] Für bestimmte Anwendungen der NMR ist nicht nur die Reduktion der Kopplung zwischen Sendee- und/oder Empfangs-Spulensystem und dem Gradientenspulensystem relevant sondern auch die Unterdrückung des NMR-Hintergrundsignals das z.B. von Draht oder Leiter-Isolationen, Klebstoffen oder Substratmaterial im Gradienten herrührt. Dieses Grundsignal entsteht durch die Anregung und den Empfang von NMR-Signalen. Im besten Falle führt es zu einer reproduzierbar veränderten Basislinie der NMR-Spektren, die numerisch korrigiert werden kann. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn das Grundsignal schwach und die NMR-Linien sehr breit sind. Im schlimmsten Fall jedoch enthält das Grundsignal relativ starke schmale NMR-Linien, die nicht korrigiert werden können. Um dieses Hintergrundsignal möglichst vollständig vermeiden zu können ist es angebracht das Gradientenspulensystem vollständig vom HF-Bereich abzutrennen. Dazu kann es notwendig sein den Gradienten innen, aussen und stirnflächig mittels einer HF-Abschirmung einzufassen. Im Bereich der Gradientenzuleitung kann ebenfalls eine HF-Abschirmung vorgesehen werden um Kopplungen beziehungsweise Empfang von Grundsignal in diesem Bereich zu verhindern. Es ist hierbei anzumerken, dass in der Regel lediglich Komponenten mit nahezu identischem statischem Magnetfeld zum NMR-Grundsignal beitragen können, weil ansonsten die Larmorfrequenz der Kerne des Hintergrundes in Bezug auf das zu messende Spektrum so stark verschoben ist, dass sie ausserhalb der Messfrequenzen zu liegen kommen, da das statische Feld der Hauptmagnete ein weitestgehend zum Messbereich symmetrisches Plateau aufweist, das ausserhalb steil abfällt.

[0092] Fig. 5 stellt schematisch eine Variante dieser Ausführungsform dar, bei der des Gradientenspulensystem vollständig in einer HF-Abschirmung eingefasst ist. Hierbei besteht die HF-Abschirmung aus Elementen 3a auf der Innenseite des Gradientenspulensystems, Elementen 3b auf den Stirnseiten und Elementen 3c auf der Aussenseite des Gradientenspulensystems, sowie einer Einfassung 6 der Gradientenzuleitungen. Die HF-Abschirmung bildet einen abgeschlossenen Gradienten-Bereich 7, in den im Wesentlichen keine HF-Strahlung eindringen kann, solange die HF-Abschirmung eine ausreichend hohe Dämpfung der HF-Strahlung erzielt. Dies kann besonders gut durch eine galvanisch geschlossene HF-Abschirmung erreicht werden, wenn die Leiterdicke mehrere Eindringtiefen der bei den relevanten Frequenzen und Temperaturen aufweist. Alternativ kann auch eine strukturierte HF-Abschirmung so gestaltet werden, dass diese ausreichende HF-Dichtheit bei den relevanten Frequenzen aufweist. Eine strukturierte Abschirmung ist jedoch in der Regel nicht bei allen Frequenzen ausreichend HF-dicht um Artefakte durch Grundsignal vollständig verhindern zu können.

[0093] Stirnflächige und zylindermantelförmige Elemente können z.B. durch kapazitives Überlappen, Verlöten, Verpressen, Verkleben mit leitfähigem Klebstoff etc. verbunden werden um die HF-Dichtigkeit der Abschirmung auf einem geforderten Niveau zu gewährleisten.

[0094] In Fig. 6 ist eine Ausführungsform dargestellt bei der die HF-Abschirmung so ausgeführt ist, dass für den zentralen Bereich der HF-Abschirmung (3d) $R_{2hf_{out}^{max}} > R_{1shield_{out}^{max}}$ gilt. Dadurch kann das für die Performanz der Sendee- und/oder Empfangsspulensysteme relevante Volumen des HF-Bereichs noch weiter erhöht werden. Um dies erreichen zu können, muss die Abschirmspule in der Mitte einen symmetrischen Bereich mit einer Länge L_6 aufweisen, der keine Leiter enthält. In diesem Falle ist der Radius $R_{2hf_{out}^{max}}$ derselbe Radius, den die HF-Abschirmung für einen NMR Messkopf ohne integriertes Gradientenspulensystem beziehungsweise mit einem nicht mittels HF-Abschirmung abgeschirmten Gradientenspulensystem aufweisen würde.

[0095] Um eine HF-dichte HF-Abschirmung in den Gradienten zu integrieren, die verhindert, dass z.B. NMR-Grundsignal von Materialien ausserhalb des eigentlichen HF-Bereichs empfangen werden können, kann alternativ zu den oben vorgestellten Varianten, bei denen das, das Grundsignal erzeugende Material mittels der HF-Abschirmung «eingepackt» wird auch der HF-Bereich auch nach aussen hin verschlossen werden. Dabei wird der HF-Bereich so abgekapselt, dass kein Signal ausserhalb dieses Bereiches empfangen werden kann. Zu diesem Zweck müssen die Stirnflächen des HF-Bereiches möglichst HF-dicht verschlossen werden. Da in der Regel eine Messprobe in den Messkopf eingeführt werden muss kann dies jedoch nur auf einer Seite vollständig erfolgen. Das Verschliessen der Einführungsöffnung kann z.B. durch einen Wellenleiter ausgeführt werden, der unterhalb seiner Cutoff-Frequenz betrieben wird und dadurch exponentielle Dämpfung für die HF-Wellen aufweist. Dies wird schematisch in der Fig. 7 dargestellt. Des Weiteren auch müssen die HF-Zuleitungen durch die HF-Abschirmung so eingeführt werden, dass sie keine Abstrahlung im Aussenraum erzeugen können.

[0096] Bei einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist die HF-Abschirmung auf einem Träger aufgebracht (z.B. durch Aufdampfen, Sputtern, CVD, Galvanik, Aufkleben, Aufklemmen, Aufdrucken oder Aufmalen). Dies hat den Vorzug, dass keine Innenbeschichtungen durchgeführt werden müssen und die HF-Abschirmung lediglich an Aussenseiten aufgebracht werden muss. Dies ist technisch deutlich einfacher zu realisieren. Ebenso ist ein Strukturieren der HF-Abschirmung auf einem Aussenmantel technisch einfacher. Durch Strukturieren kann das «Recovery-Verhalten» des Gradientenspulensystems verbessert werden, da die in der HF-Abschirmung induzierten Wirbelströme durch galvanische Unterbrechungen der HF-Abschirmung nur noch in kleinerem Ausmass entstehen können. Hierzu sind aus der Literatur eine Vielzahl von verschiedenen Varianten bekannt, die an erfindungsgemässe Geometrie angepasst werden können. Die erfindungsgemässe Ausführung der HF-Abschirmung umfasst explizit alle aus dem Stand der Technik bekannten Konzepte zur Ausführung einer passiven HF-Abschirmung.

[0097] Für die Anwendung in der NMR ist aufgrund der typischen Dimensionen die Durchführung von elektrischen Verbindungen zwischen den einzelnen Abschnitten der HF-Abschirmung, insbesondere jedoch deren galvanische Verbindung z.B. durch Löten bei einer Montage auf der Aussenseite eines Trägers deutlich einfacher durchzuführen als auf der Innenseite eines Trägers. Ebenso kann eine auf einer flexiblen Leiterplatte (PCB – printed circuit board) strukturierte HF-Abschirmung einfach von aussen auf einem Substrat aufgebracht werden, z.B. durch Aufkleben, oder Klemmen.

[0098] Des Weiteren kann das Trägermaterial aus einem Material mit hoher thermischer Leitfähigkeit (Aluminiumoxid, Aluminiumnitrid, Siliziumnitrid oder Siliziumcarbid als Keramik, polykristallin oder als Einkristall, z.B. Saphir) hergestellt werden, so dass die Möglichkeit besteht die HF-Abschirmung effizient zu kühlen. Dies ist insbesondere für Messköpfe mit kryogen gekühlten HF-Spulensystemen unabdingbar um den Rauschbeitrag der HF-Abschirmung möglichst gering zu halten. Weiterhin ist es auch für Gradienten, die mit hohen Strömen arbeiten müssen von Vorteil, da eine Kühlung im Betrieb z.B. durch in das Trägermaterial eingelassene oder auf dem Trägermaterial aufgebrachte Kühlflüssigkeitsleitungen erfolgen kann. Dadurch kann der Duty-Cycle und zulässige Maximalstrom eines erfindungsgemässen Gradienten erhöht werden.

[0099] Besonders einfach zu fertigen ist eine HF-Abschirmung auf einem Trägermaterial, wenn die Übergänge zwischen den verschiedenen Radien der HF-Abschirmung abgeschrägt sind, da dann eine Beschichtung technisch bedeutend einfacher realisiert werden kann. Die Abschrägung kann konisch erfolgen, sie kann jedoch auch kompliziertere Geometrien enthalten.

[0100] Die im Rahmen dieser Erfindung vorgestellte Formgebung der passiven HF-Abschirmung lässt sich mit den diversen Realisierungsmöglichkeiten zur Reduktion von Wirbelströmen auf HF-Abschirmungen gemäss dem Stand der Technik kombinieren. Besonders bevorzugt sind jedoch dünne metallische Schichten, die keine oder nur wenige Schlitz aufweisen. Als «dünn» soll eine metallische Schicht verstanden werden, wenn die Schichtdicke d in derselben Grössenordnung wie die elektrische Eindringtiefe δ im relevanten Frequenzbereich ist, d.h. $0 < d < 10 \delta$, insbesondere aber $0 < d \leq 3 \delta$.

[0101] Bei geschlitzten Abschirmungen werden kapazitive Verbindungen zwischen den einzelnen leitfähigen Elementen bevorzugt als kapazitive Überlappungen über den Schlitz hergestellt. Dies minimiert die radialen Dimensionen. Weiterhin sind kapazitive Überlappungen mit geringen dielektrischen Schichtdicken vorzuziehen, da der Verbleibende magnetische Fluss durch die verbleibenden Spalte geringer ausfällt als bei Kapazitiven Verbindungen mit gleichen Kapazitätswerten jedoch grösserem Abstand zwischen den leitfähigen Elementen. Bei grösseren HF-Abschirmungen können die kapazitiven

Verbindungen auch mittels Kondensatoren ausgeführt werden, was eine grössere Flexibilität in der Auswahl der Elemente erlaubt.

Bezugszeichenliste

[0102]

1a–1f	elektrische Leiterabschnitte der Teilspulensysteme einer Hauptgradientenspule
2; 2a–2c	aktive Abschirmspulen
3	passive HF-Abschirmung
3a–3e	Teilabschnitte der passiven HF-Abschirmung
4	HF-Sende- und/oder Empfangs-Spulensystem
z	z-Achse

Variablenliste

[0103]

$L1$	Länge der axiale Beabstandung zwischen den Teilspulensystemen der Hauptgradientenspule in denen zwischen $R1gradient_{in}^{min}$ und $R1shield_{in}^{min}$ keine Leiterelemente vorhanden sind
$L2$	axiale Länge des dritten Teilabschnittes der HF-Abschirmung
$L3$	axiale Länge des HF Sende- und/oder Empfangs-Spulensystems
$L4,5$	axiale Länge verschiedener Bereiche der HF-Abschirmung
$L6$	axiale Beabstandung der zwei Teilspulensysteme der Abschirmspule
$R1gradient_{in}^{min}$	minimaler Innenradius der Hauptgradientenspule
$R1gradient_{out}^{max}$	maximaler Außenradius der Hauptgradientenspule
$R1shield_{in}^{min}$	minimaler Innenradius der Abschirmspule
$R1hf_{out}^{max}$	maximaler Außenradius der mindestens zwei Teilabschnitte der HF-Abschirmung
$R2hf_{in}^{min}$	minimaler Innenradius des dritten (zentralen) Teilabschnittes der HF-Abschirmung
$R2hf_{out}^{max}$	maximaler Außenradius des dritten (zentralen) Teilabschnittes der HF-Abschirmung
$R2gradient_{in}^{min}$	minimaler Innenradius eines zweiten Teilspulensystems der Hauptgradientenspule
$R3gradient_{in}^{min}$	minimaler Innenradius eines dritten Teilspulensystems der Hauptgradientenspule
$Rihf_{in}^{min} (i \in \mathbb{N})$	minimale Innenradien der verschiedenen Teilabschnitte der HF-Abschirmung

Referenzliste

- [0104] [1] US-A 5 296 810
 [2] US-A 4 733 189
 [3] US 7 109 712 B2
 [4] US 6 456 076 B1
 [5] US-A 5 512 828
 [6] US-A 5 939 882
 [7] US 6 933 723 B2
 [8] US 7 852 083 B2
 [9] US 7 057 391 B1
 [10] US-A 6 154 110
 [11] US-A 5 600 245
 [12] US-A 5 406 204

Patentansprüche

1. Aktiv abgeschirmtes zylinderförmiges Gradientenspulensystem zur Verwendung in einem MR (=Magnetresonanz)-Spektrometer mit einem Hauptfeldmagneten, der ein in Richtung einer z-Achse ausgerichtetes Hauptmagnetfeld erzeugt, wobei das Gradientenspulensystem bei Stromdurchfluss in einem von der z-Achse durchquerten Messvolumen ein z-Gradientenfeld erzeugt, dessen Nulldurchgang im Zentrum des Messvolumens liegt, und wobei das Gradientenspulensystem mindestens eine Hauptgradientenspule (1a, 1b; 1a, 1b, 1c, 1d, 1e, 1f) und mindestens eine aktive Abschirmspule (2; 2a, 2b, 2c) aufweist, wobei die Hauptgradientenspule (1a, 1b; 1a, 1b, 1c, 1d, 1e, 1f) aus mindestens zwei in z-Richtung um eine Länge L1 symmetrisch zum Zentrum des Messvolumens axial voneinander beabstandeten zylinderförmigen Teilpulensystemen (1a und 1b; 1a, 1b, 1c und 1d, 1e, 1f; 1, 1b und 1c, 1d) aufgebaut ist, deren Achsen kollinear mit der z-Achse verlaufen, wobei die zylinderförmigen Teilpulensysteme (1a und 1b; 1a, 1b, 1c und 1d, 1e, 1f; 1a, 1b und 1c, 1d) zumindest zum Teil aus mit einem maximalen Aussenradius $R1_{\text{gradient}_{\text{out}}^{\text{max}}}$ um die z-Achse gewickelten elektrischen Leiterabschnitten (1a, 1b; 1a, 1c, 1d, 1f; 1a, 1d) aufgebaut sind, wobei mindestens eine der aktiven Abschirmspulen (2; 2a) aus elektrischen Leitern auf einem minimalen Innenradius $R1_{\text{shield}_{\text{in}}^{\text{min}}}$ um die z-Achse aufgebaut ist, und wobei $R1_{\text{shield}_{\text{in}}^{\text{min}}} > R1_{\text{gradient}_{\text{out}}^{\text{max}}}$, dadurch gekennzeichnet, dass in einem hohlzylindrischen Abschnitt auf der axialen Länge L1 symmetrisch zum Zentrum des Messvolumens in einem Radienbereich zwischen einem minimalen Innenradius $R1_{\text{gradient}_{\text{in}}^{\text{min}}}$ der Hauptgradientenspule (1a, 1b; 1a, 1b, 1c, 1d, 1e, 1f) und $R1_{\text{shield}_{\text{in}}^{\text{min}}}$ keine elektrischen Leiterelemente des Gradientenspulensystems vorhanden sind, und dass eine passive HF-Abschirmung (3) vorgesehen ist, die aus mindestens drei elektrisch miteinander verbundenen Teilabschnitten (3a, 3b, 3c) aufgebaut ist, von denen zwei Teilabschnitte (3a, 3c) mit einem maximalen Aussenradius $R1_{\text{hf}_{\text{out}}^{\text{max}}}$ um die z-Achse angeordnet sind, während zwischen diesen zwei Teilabschnitten (3a, 3c) ein dritter Teilabschnitt (3b) mit einer axialen Länge L2 und einem minimalen Innenradius $R2_{\text{hf}_{\text{in}}^{\text{min}}}$ sowie einem maximalen Aussenradius $R2_{\text{hf}_{\text{out}}^{\text{max}}}$ um die z-Achse angeordnet ist, wobei gilt: $R1_{\text{hf}_{\text{out}}^{\text{max}}} < R1_{\text{gradient}_{\text{in}}^{\text{min}}}$ und $R1_{\text{gradient}_{\text{out}}^{\text{max}}} < R2_{\text{hf}_{\text{in}}^{\text{min}}} < R2_{\text{hf}_{\text{out}}^{\text{max}}}$ und $L2 < L1$.
2. Gradientenspulensystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass gilt: $R2_{\text{hf}_{\text{out}}^{\text{max}}} < R1_{\text{shield}_{\text{in}}^{\text{min}}}$.
3. Gradientenspulensystem nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass gilt: $R2_{\text{hf}_{\text{in}}^{\text{min}}} \geq 1 \cdot R1_{\text{gradient}_{\text{out}}^{\text{max}}}$ und $R2_{\text{hf}_{\text{out}}^{\text{max}}} \geq 0,8 \cdot R1_{\text{shield}_{\text{in}}^{\text{min}}}$.
4. Gradientenspulensystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass gilt: $R2_{\text{hf}_{\text{in}}^{\text{min}}} \geq R1_{\text{gradient}_{\text{out}}^{\text{max}}} + 3 \text{ mm}$ und $R2_{\text{hf}_{\text{out}}^{\text{max}}} \geq R1_{\text{shield}_{\text{in}}^{\text{min}}} - 3 \text{ mm}$.
5. Gradientenspulensystem nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die um die z-Achse gewickelten elektrischen Leiterabschnitte (1a, 1b; 1a, 1c, 1d, 1f; 1a, 1d) aus Drähten mit vorzugsweise rundem Querschnitt aufgebaut sind.
6. Gradientenspulensystem nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die um die z-Achse gewickelten elektrischen Leiterabschnitte (1a, 1b; 1a, 1c, 1d, 1f; 1a, 1d) aus Bandleitern aufgebaut sind.
7. Gradientenspulensystem nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die um die z-Achse gewickelten elektrischen Leiterabschnitte (1a, 1b; 1a, 1c, 1d, 1f; 1a, 1d) aus mit einer elektrisch leitenden Schicht beschichteten dielektrischen Trägern aufgebaut sind.
8. Gradientenspulensystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens zwei der Paare von axial voneinander beabstandeten zylinderförmigen Teilpulensystemen (1a und 1f, 1b und 1e, 1c und 1d) der Hauptgradientenspule unterschiedliche minimale Innenradien ($R1_{\text{gradient}_{\text{in}}^{\text{min}}}$, $R2_{\text{gradient}_{\text{in}}^{\text{min}}}$, $R3_{\text{gradient}_{\text{in}}^{\text{min}}}$) aufweisen.
9. Gradientenspulensystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens zwei Teilabschnitte (3a, 3b, 3c, 3d) der passiven HF-Abschirmung (3) unterschiedliche minimale Innenradien ($R1_{\text{hf}_{\text{in}}^{\text{min}}}$, $R2_{\text{hf}_{\text{in}}^{\text{min}}}$, $R3_{\text{hf}_{\text{in}}^{\text{min}}}$, $R4_{\text{hf}_{\text{in}}^{\text{min}}}$) aufweisen.

10. Gradientenspulensystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eines der zylinderförmigen Teilspulensysteme (1a und 1b; 1a, 1b, 1c und 1d, 1e, 1f; 1a, 1b und 1c, 1d) aus mehreren in radialer Richtung übereinander gewickelten elektrischen Leiterabschnitten (1a, 1b; 1a, 1c, 1d, 1f; 1a, 1d) aufgebaut ist.
11. Gradientenspulensystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die zylinderförmigen Teilspulensysteme (1a und 1f, 1b und 1e, 1c und 1d) der Hauptgradientenspule sowie die mindestens eine aktive Abschirmspule (2; 2a, 2b, 2c) bis auf eine Zuleitungsöffnung vollständig von der passiven HF-Abschirmung (3) eingefasst sind.
12. Gradientenspulensystem nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die radial inneren Flächen und die axialen Stirnflächen der zylinderförmigen Teilspulensysteme (1a und 1f, 1b und 1e, 1c und 1d) der Hauptgradientenspule sowie die radial äusseren Flächen und die axialen Stirnflächen der mindestens einen aktiven Abschirmspule (2; 2a, 2b, 2c) von der passiven HF-Abschirmung (3) eingefasst sind.
13. Gradientenspulensystem nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die passive HF-Abschirmung (3) räumlich so geformt, dass sie einen HF-dichten Raumbereich umschliesst, aus welchem HF-Strahlung nicht nach aussen dringen kann.
14. Gradientenspulensystem nach einem der Ansprüche 11 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass eine HF-Dichtigkeit der passiven HF-Abschirmung (3) durch kapazitives Überlappen von Elementen der passiven HF-Abschirmung (3) und/oder durch Verlöten und/oder durch Verpressen und/oder durch Verkleben mit elektrisch leitfähigem Klebstoff bewirkt wird.
15. Gradientenspulensystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die passive HF-Abschirmung (3) auf einem Träger aufgebracht ist, insbesondere durch Aufdampfen und/oder Sputtern und/oder CVD und/oder galvanischen Auftrag und/oder Aufdrucken und/oder Aufmalen und/oder Aufkleben.
16. Gradientenspulensystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens zwei der elektrisch miteinander verbundenen Teilabschnitte (3a, 3c) zylindersymmetrisch um die z-Achse mit einem maximalen Aussenradius $R1_{hf_{out}^{max}}$ angeordnet sind, wobei zwischen diesen zwei Teilabschnitten (3a, 3c) ein dritter Teilabschnitt (3b) mit einer axialen Länge $L2$ und einem minimalen Innenradius $R2_{hf_{in}^{min}}$ sowie einem maximalen Aussenradius $R2_{hf_{out}^{max}}$ um die z-Achse angeordnet ist, und dass zwischen dem dritten Teilabschnitt (3b) und den zwei anderen Teilabschnitten (3a, 3c) jeweils ein Übergangsabschnitt (3d, 3e), insbesondere in Form eines konusförmigen Elements, angeordnet ist, der auf einer axialen Länge $L8$ die auf unterschiedlichen Radien angeordneten Teilabschnitte (3a,3b bzw. 3c, 3b) miteinander verbindet.
17. MR-Spektrometer mit einem Gradientenspulensystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein HF-Sende- und/oder Empfangs-Spulensystem (4) vorgesehen ist, das innerhalb des Radius $R2_{hf_{in}^{min}}$ auf einer axialen Länge $L3 < L2$ symmetrisch zum Zentrum des Messvolumens angeordnet ist.

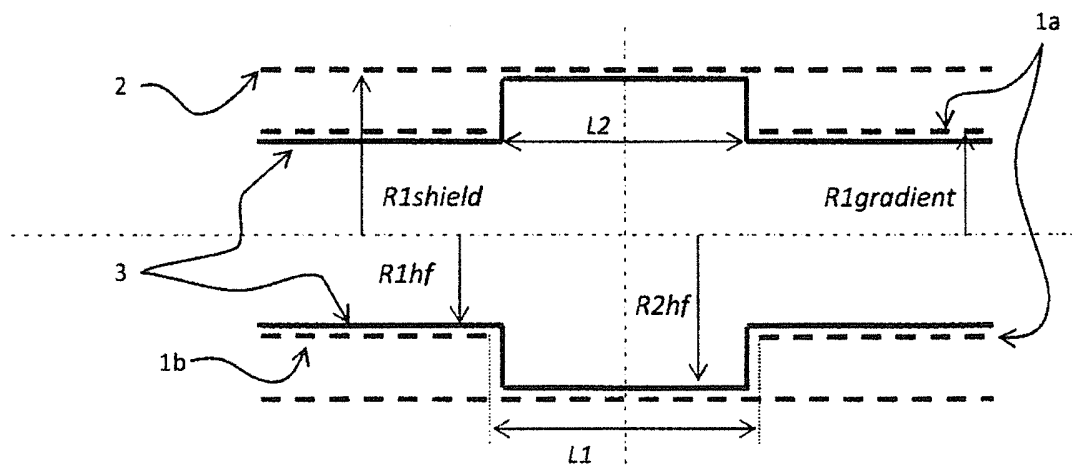


Fig. 1

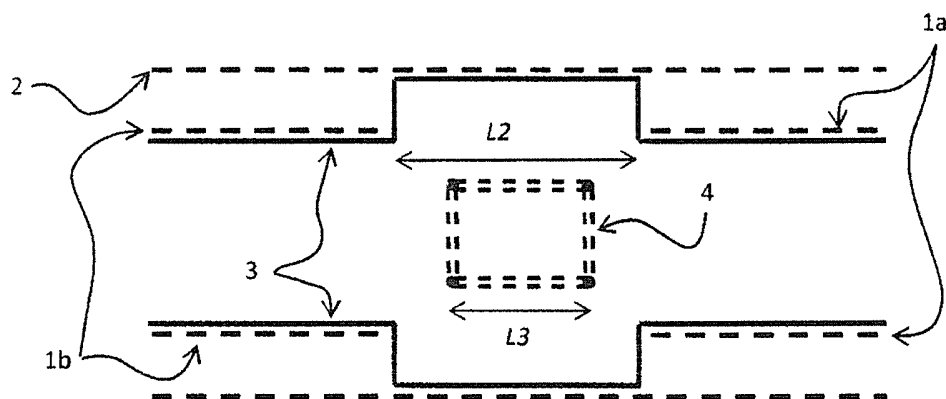


Fig. 2

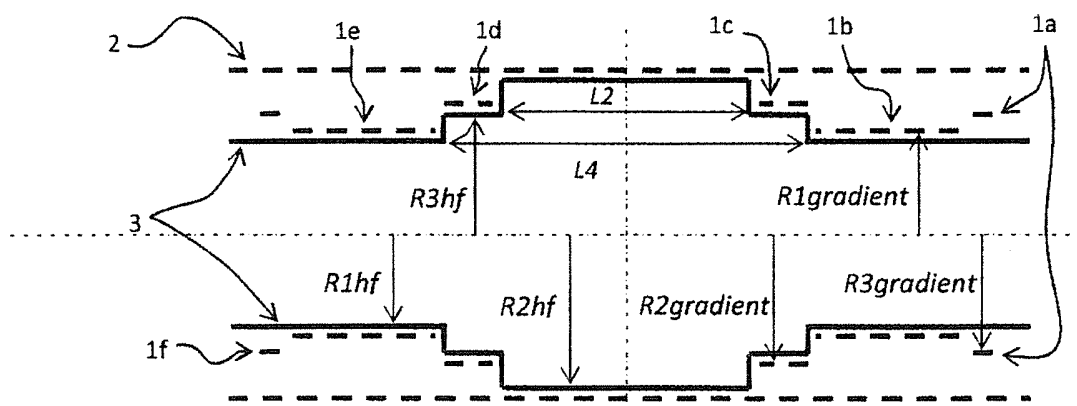


Fig. 3

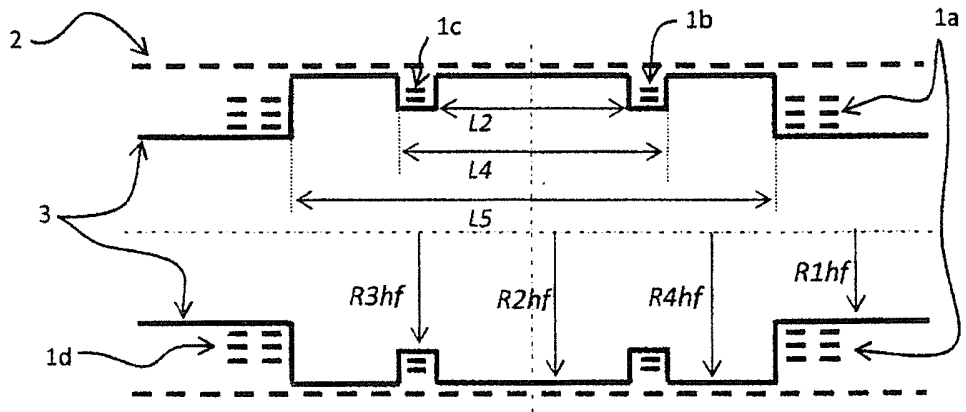


Fig. 4

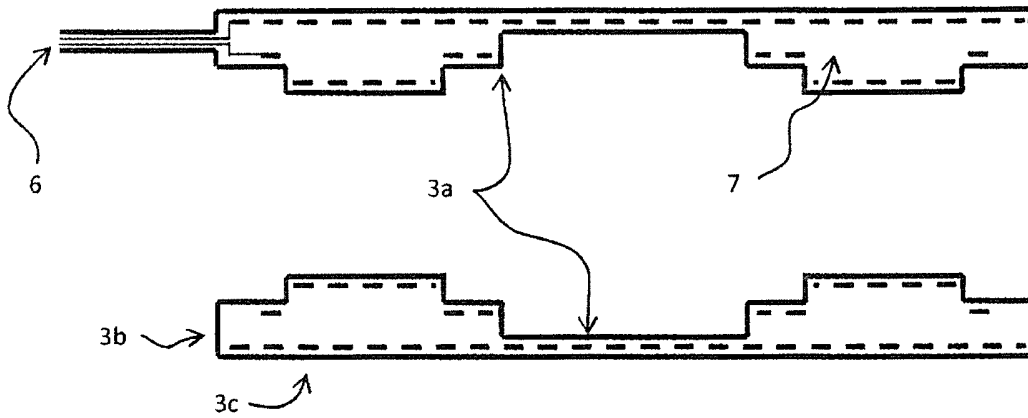


Fig. 5

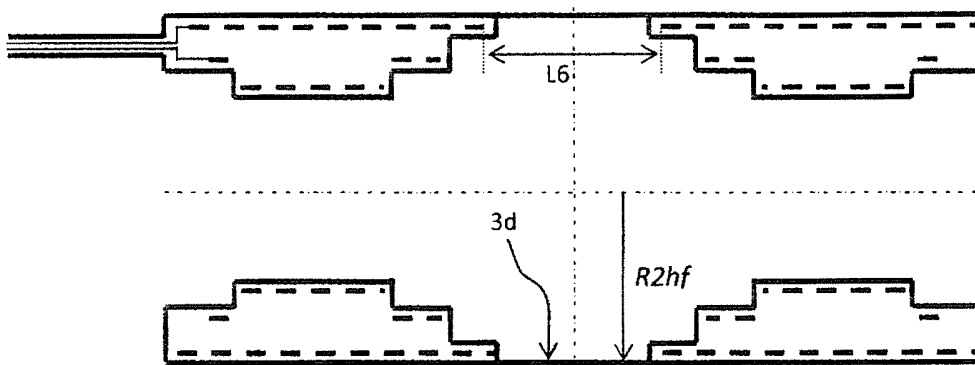


Fig. 6

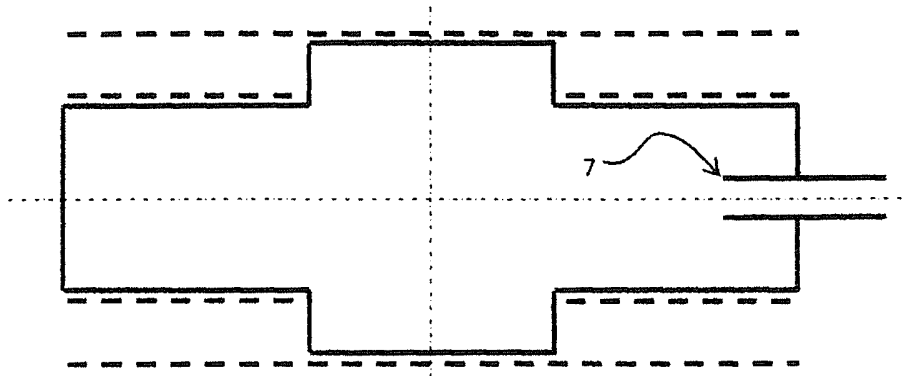


Fig. 7

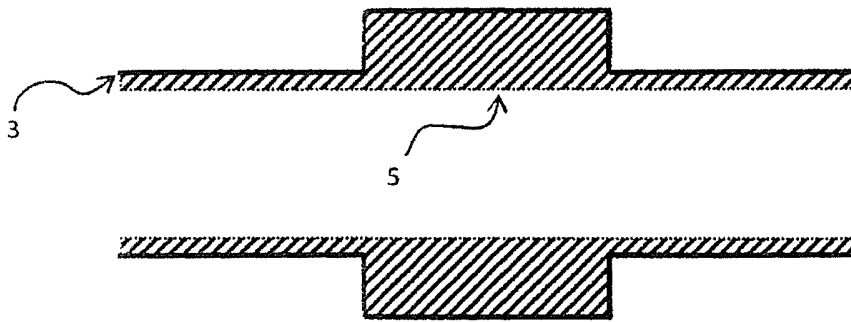


Fig. 8a

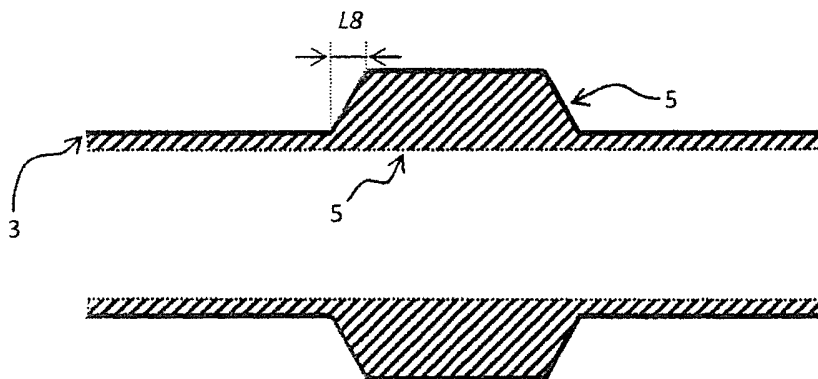


Fig. 8b