



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 100 19 841 B4 2006.07.20**

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **100 19 841.4**
 (22) Anmeldetag: **20.04.2000**
 (43) Offenlegungstag: **30.11.2000**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **20.07.2006**

(51) Int Cl.⁸: **G01R 33/3815** (2006.01)
H01F 6/00 (2006.01)
G01R 33/421 (2006.01)

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

(30) Unionspriorität:
60/130,885 23.04.1999 US
09/385,407 31.08.1999 US

(73) Patentinhaber:
General Electric Co., Schenectady, N.Y., US

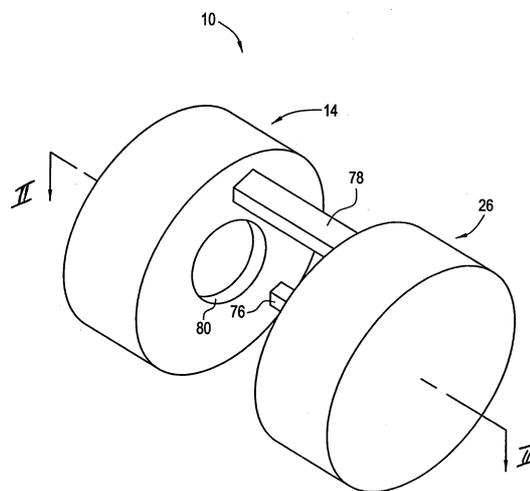
(74) Vertreter:
TBK-Patent, 80336 München

(72) Erfinder:
Laskaris, Evangelos Trifon, Niskayuna, N.Y., US;
Palmo jun., Michael Anthony, Ballston Spa, N.Y., US

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:
WO 90/04 258 A1

(54) Bezeichnung: **Supraleitender, insbesondere offener Magnet und Verfahren zur Schaffung eines kompakten supraleitenden Magneten mit homogenen Magnetresonanzbilderzeugungsraum**

(57) Hauptanspruch: Supraleitender Magnet (10), mit:
 einer sich in Längsrichtung erstreckenden Achse (12) und
 einer ersten Baugruppe (14), mit:
 einer supraleitenden Hauptspule (16), die um die Achse (12) angeordnet ist und einen ersten elektrischen Hauptstrom in einer ersten Richtung führt;
 einem magnetisierbaren Polschuh (18), der koaxial mit der Achse (12) ausgerichtet ist, von der Hauptspule (16) der ersten Baugruppe (14) beabstandet ist und einen Oberflächenabschnitt (22) hat, wobei ein Großteil des Polschuhs (18) der ersten Baugruppe (14) radial einwärts der Hauptspule (16) in Richtung der Achse (12) der ersten Baugruppe (14) angeordnet ist;
 einem Dewargefäß (20) für kryogenes Fluid (64) das die Hauptspule (16) der ersten Baugruppe (14) umschließt und eine Innenfläche (24) hat, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt (22) des Polschuhs (18) der ersten Baugruppe (14) definiert ist;
 und einem kryogenen Fluid (64) dem Dewargefäß (20) und in thermischem Kontakt mit der Hauptspule (16) und in...



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf einen supraleitenden, insbesondere offenen Magneten, der zur Erzeugung eines gleichmäßigen Magnetfelds verwendet wird, und auf ein Verfahren zur Schaffung eines solchen Magneten.

Stand der Technik

[0002] Magnete umfassen widerstandsbehaftete und supraleitende Magnete, welche ein Teil eines Magnetresonanzbilderzeugungssystems (MRI) sind, das in verschiedenen Anwendungen, wie medizinischer Diagnose und medizinischen Verfahren verwendet wird. Bekannte supraleitende Magnete umfassen flüssigheliumgekühlte und kryokühlergekühlte supraleitende Magnete. Typischerweise umfasst die supraleitende Spulenbaugruppe eine supraleitende Hauptspule, die von einer ersten thermischen Abschirmung umgeben ist, die von einem Vakuumbehälter umschlossen ist. Ein kryokühlergekühlter Magnet umfasst zudem typischerweise einen Kühlkopf des Kryokühlers, der außen an dem Vakuumbehälter angebracht ist und seine erste Kühlstufe in thermischem Kontakt mit der thermischen Abschirmung hat und seine zweite Kühlstufe in thermischem Kontakt mit der supraleitenden Hauptspule hat. Ein flüssigheliumgekühlter Magnet umfasst typischerweise zudem ein Flüssigheliumdewargefäß, das die supraleitende Hauptspule umgibt, und eine zweite thermische Abschirmung, welche die erste thermische Abschirmung umgibt, die das Flüssigheliumdewargefäß umgibt. Bekannte Ausführungen widerstandsbehafteter und supraleitender Magnete umfassen geschlossene Magnete und offene Magnete. Geschlossene Magnete haben typischerweise eine einzelne, rohrförmige, widerstandsbehaftete oder supraleitende Spulenbaugruppe mit einer Bohrung. Die Spulenbaugruppe umfasst mehrere radialausgerichtete und in Längsrichtung beabstandete widerstandsbehaftete oder supraleitende Hauptspulen, die jeweils einen großen identischen elektrischen Strom in der gleichen Richtung führen. Die Hauptspulen sind somit ausgelegt, ein Magnetfeld mit hoher Gleichmäßigkeit innerhalb eines üblicher Weise sphärischen Abbildungs- oder Bilderzeugungsraums zu erzeugen, der zentral innerhalb der Bohrung des Magneten angeordnet ist, wo das abzubildende Objekt platziert ist. Eine einzelne rohrförmige Abschirmbaugruppe kann zudem verwendet werden, um das durch die Hauptspulen erzeugte und diese umgebende Magnetfeld daran zu hindern, mit elektronischer Ausrüstung in der Nähe des Magnets nachteilig in Wechselwirkung zu treten. Eine solche Abschirmbaugruppe umfasst mehrere radial ausgerichtete und in Längsrichtung beabstandete, radial außerhalb der Hauptspulen angeordnete widerstandsbehaftete oder supraleitende Abschirmspulen, die elektrische Ströme führen, die allgemein die gleiche Stärke haben, jedoch in einer entgegen-

gesetzten Richtung zu den in den Hauptspulen geführten elektrischen Strömen sind.

[0003] Offene Magnete, einschließlich C-förmiger Magnete verwenden üblicherweise zwei voneinander beabstandete Spulenbaugruppen, wobei der Raum zwischen den Baugruppen den Abbildungs- oder Bilderzeugungsraum oder Abbildungsbereich enthält und einen Zugang durch medizinisches Personal für Operationen oder andere medizinische Verfahren während der Magnetresonanzbilderzeugung gestattet. Der Patient kann in diesem Raum oder auch in der Bohrung oder Zentralöffnung der ringförmigen Spulenbaugruppen positioniert werden. Der offene Raum unterstützt den Patienten darin, Platzangstgefühle zu überwinden, die in einer geschlossenen Magnetkonstruktion auftreten können. Bekannte Konstruktionen offener Magnete mit einer Abschirmung umfassen jene, in denen jede Spulenbaugruppe eine offene Bohrung und eine widerstandsbehaftete oder supraleitende Abschirmspule hat, die in Längsrichtung und radial außerhalb der widerstandsbehafteten oder supraleitenden Hauptspule(n) positioniert ist. Im Fall eines supraleitenden Magneten ist eine große Menge eines teuren Supraleiters in der Hauptspule erforderlich, um die Magnetfeldsubtraktionseffekte der Abschirmspule zu überwinden. Berechnung zeigen, dass für einen 0,75 Tesla-Magneten etwa 1.043 kg (2.300 Pfund) an Supraleiter erforderlich sind, was zu einem teuren Magneten führt, der etwa 5.440 kg (12.000 Pfund) wiegt. Dieses bescheidene Gewicht macht diese Konstruktion ausführbar.

[0004] Es ist bei Konstruktionen offener Magnete zudem bekannt, einen eisernen Polschuh in der Bohrung einer widerstandsbehafteten oder supraleitenden Spulenbaugruppe anzuordnen, die keine Abschirmspule hat. Der eiserne Polschuh erhöht die Stärke des Magnetfelds und, indem die Oberfläche des Polschuhs geformt ist, glättet es den Magneten magnetisch, wodurch die Homogenität des Magnetfelds verbessert ist. Ein eiserner Rückkehrpfad wird verwendet, um die zwei eisernen Polschuhe zu verbinden. Es ist anzumerken, dass der eiserne Polschuh zudem eine Abschirmung des Magneten bewirkt. Jedoch ist eine große Eisenmenge in dem eisernen Polschuh erforderlich, um eine Abschirmung bei starken Magneten zu erreichen. Im Fall eines supraleitenden Magneten zeigen Berechnungen, dass für einen 0,75 Tesla-Magneten lediglich etwa 90 kg (200 Pfund) an Supraleiter erforderlich sind, was jedoch zu einem Magneten führt, der über 31.750 kg (70.000 Pfund) wiegt, was zu schwer ist, um ihn in medizinischen Einrichtungen, wie Hospitälern verwenden zu können. Dieses Gewicht macht diese Magnetkonstruktion nicht ausführbar.

[0005] Ferner ist aus der GB 2 311 375 A ein supraleitender Magnet bekannt, dessen Hauptspulen und Korrekturringe in ein kryogenes Fluid eintauchen und

diese im Betrieb kühlen.

Aufgabenstellung

[0006] Demgegenüber ist es Aufgabe der Erfindung, einen supraleitenden Magneten vorzuschlagen, der kompakt ist und eine große Magnetfeldhomogenität innerhalb des Abbildungsraums des Magneten hat. Ferner soll ein Verfahren zur Schaffung einer solchen Magneten angegeben werden.

[0007] Diese Aufgabe wird mit den Merkmalen der Ansprüche 1, 12, 22 bzw. 28 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen aufgezeigt.

[0008] Gemäß der Erfindung umfasst ein supraleitender Magnet eine sich in Längsrichtung erstreckende Achse und hat eine erste Baugruppe mit einer supraleitenden Hauptspule, einem magnetisierbaren Polschuh und einem Dewargefäß für kryogenes Fluid. Die Hauptspule ist coaxial mit der Achse ausgerichtet und führt einen ersten elektrischen Hauptstrom in einer ersten Richtung. Der Polschuh ist coaxial mit der Achse ausgerichtet, ist von der Hauptspule der ersten Baugruppe beabstandet und hat einen Oberflächenabschnitt. Der Hauptteil des Polschuhs der ersten Baugruppe ist radial einwärts der Hauptspule der ersten Baugruppe angeordnet. Das Dewargefäß umschließt die Hauptspule der ersten Baugruppe und hat eine Innenfläche, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt des Polschuhs der ersten Baugruppe definiert oder begrenzt ist.

[0009] In einer Ausführungsform der Erfindung umfasst ein offener Magnet eine sich in Längsrichtung erstreckende Achse und in Längsrichtung voneinander beabstandete erste und zweite Baugruppen, die jeweils eine supraleitende Hauptspule, eine supraleitende Abschirmspule, einen magnetisierbaren und allgemein zylinderförmigen Polschuh sowie ein Dewargefäß für ein kryogenes Fluid haben. Jede Hauptspule ist coaxial mit der Achse ausgerichtet und führt einen ersten elektrischen Hauptstrom in der gleichen ersten Richtung. Jeder Polschuh ist coaxial mit der Achse ausgerichtet und schneidet diese, ist von seiner zugehörigen Hauptspule beabstandet und hat einen Oberflächenabschnitt. Der Hauptteil jedes Polschuhs ist radial einwärts seiner zugehörigen Hauptspule angeordnet. Jedes Dewargefäß umschließt seine Haupt- und Abschirmspulen und hat eine Innenfläche, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt seines zugehörigen Polschuhs definiert oder begrenzt ist.

[0010] In einem Aufbau umfasst der offene Magnet zudem voneinander beabstandete und nicht magnetisierbare erste und zweite Stützpfosten, die jeweils ein erstes Ende haben, das an dem Polschuh der ersten Baugruppe befestigt ist, die jeweils ein zweites

Ende haben, das an dem Polschuh der zweiten Baugruppe befestigt ist, und die jeweils einen Oberflächenabschnitt haben. In diesem Aufbau umfasst der offene Magnet ferner erste und zweite Dewarleitungen, die jeweils in Fluidverbindung mit dem Dewargefäß der ersten Baugruppe und dem Dewargefäß der zweiten Baugruppe sind. Die erste Dewarleitung hat eine Innenfläche, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt des ersten Stützpfostens definiert oder begrenzt ist, und die zweite Dewarleitung hat eine Innenfläche, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt des zweiten Stützpfostens definiert oder begrenzt ist.

[0011] Ein erfindungsgemäßes Verfahren umfasst Schritt a) bis d) und schafft sowohl Kompaktheit als auch einen homogenen Bilderzeugungsraum für einen supraleitenden Magneten mit einem magnetisierbaren Polschuh und einer supraleitenden Hauptspule. Schritt a) umfasst die Bereitstellung einer nicht magnetisierbaren Spulenhalterung. Schritt b) umfasst das Anbringen der Spulenhalterung an dem Polschuh. Schritt c) umfasst das Abstützen der Hauptspule mit der Spulenhalterung. Schritt d) umfasst die Auslegung und Positionierung eines Dewargefäßes für kryogenes Fluid die Hauptspule umgebend und mit einer Innenfläche, die teilweise durch einen Oberflächenabschnitt des Polschuhs definiert oder begrenzt ist.

[0012] Das erfindungsgemäße Verfahren umfasst ferner die Schritte a) bis j) und schafft Kompaktheit sowie einen homogenen Bilderzeugungsraum für einen supraleitenden offenen Magneten mit einer sich in Längsrichtung erstreckenden Achse und in Längsrichtung voneinander beabstandeten und coaxial ausgerichteten ersten und zweiten Baugruppen, die jeweils einen magnetisierbaren und im zylindrischen, die Achse schneidenden Polschuh, eine supraleitende Hauptspule sowie eine supraleitende Abschirmspule haben. Schritt a) umfasst die Bereitstellung von nicht magnetisierbaren ersten Spulenhalterungen. Schritt b) umfasst das Anbringen der ersten Spulenhalterungen an dem Polschuh der ersten Baugruppe. Schritt c) umfasst das Abstützen der Haupt- und Abschirmspulen der ersten Spulenhalterungen mit den ersten Spulenhalterungen. Schritt d) umfasst die Auslegung und Positionierung eines Dewargefäßes für kryogenes Fluid die Haupt- und Abschirmspulen der ersten Baugruppe umgebend, das eine Innenfläche hat, die teilweise durch einen Oberflächenabschnitt des Polschuhs der ersten Baugruppe definiert oder begrenzt ist. Schritt e) umfasst die Bereitstellung von nicht magnetisierbaren zweiten Spulenhalterungen. Schritt f) umfasst die Anbringung der zweiten Spulenhalterungen an dem Polschuh der zweiten Baugruppe. Schritt d) umfasst das Abstützen der Haupt- und Abschirmspulen der zweiten Baugruppe mit den zweiten Spulenhalterungen. Schritt h) umfasst die Auslegung und Positionierung eines Dewar-

gefäßes für kryogenes Fluid die Haupt- und Abschirmspulen der zweiten Baugruppe umgebend, wobei es eine Innenfläche hat, die teilweise durch einen Oberflächenabschnitt des Polschuhs der zweiten Baugruppe begrenzt ist. Schritt i) umfasst die Befestigung eines ersten Endes eines nicht magnetisierbaren Stützpfostens an dem Polschuh der ersten Baugruppe und die Befestigung eines zweiten Endes des Stützpfostens an dem Polschuh der zweiten Baugruppe. Schritt j) umfasst die Auslegung und Positionierung einer Dewarleitung in Fluidverbindung mit dem Dewargefäß der ersten Baugruppe und dem Dewargefäß der zweiten Baugruppe, wobei die Dewarleitung eine Innenfläche hat, die teilweise durch einen Oberflächenabschnitt des Stützpfostens definiert oder begrenzt ist.

[0013] Die Erfindung bietet verschiedene Vorzüge und Vorteile. Indem der Polschuh als ein tieftemperaturkalter Polschuh ausgebildet ist, bietet der Polschuh eine größere Magnetfeldhomogenität innerhalb des Bilderzeugungsraums des Magneten, indem Inhomogenitäten des Magnetfelds eliminiert werden, die durch Temperaturänderungen herkömmlicher Raumtemperatur-Polschuhe hervorgerufen sind, die durch Veränderungen in der Raumtemperatur bedingt sind. Indem der Polschuh als ein Teil des Dewargefäßes verwendet wird, ist für Kompaktheit gesorgt, indem der andernfalls erforderliche zusätzliche Raum eingespart wird, der für einen tiefkalten Polschuh gemäß der Erfindung erforderlich wäre, der von einem Dewargefäß für kryogenes Fluid vollständig umschlossen ist.

Ausführungsbeispiel

[0014] Die Erfindung wird anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher erläutert. Darin zeigen:

[0015] [Fig. 1](#) eine schematische Perspektivansicht eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Magneten; und

[0016] [Fig. 2](#) eine schematische Schnittansicht des Magneten aus [Fig. 1](#) entlang der Linie II-II in [Fig. 1](#).

[0017] In der Zeichnung, in der gleiche Bezugszeichen durchgehend gleiche Elemente bezeichnen, zeigen [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) ein Ausführungsbeispiel des Magneten **10** gemäß der vorliegenden Erfindung. In einer Anwendung schafft der Magnet **10** das statische Magnetfeld für ein Magnetresonanzbilderzeugungssystem (MRI) (nicht gezeigt), das in medizinischer Diagnose verwendet wird. Es ist anzumerken, dass bei der Beschreibung der Erfindung, wenn ein Magnet als eine Komponente, wie eine Spule, einen Polschuh oder ein Dewargefäß etc. enthaltend beschrieben wird, klar sein soll, dass der Magnet mindestens eine Spule, mindestens einen Polschuh oder

mindestens ein Dewargefäß oder dergleichen umfasst.

[0018] In einer ersten Ausgestaltung der Erfindung umfasst ein supraleitender Magnet **10** eine sich in Längsrichtung erstreckende Achse **12** und eine erste Baugruppe **14**. Die erste Baugruppe **14** umfasst eine supraleitende Hauptspule **16** und einen magnetisierbaren Polschuh **18**. Die Hauptspule **16** ist im Wesentlichen koaxial mit der Achse **12** ausgerichtet, führt einen ersten elektrischen Hauptstrom in einer ersten Richtung und ist mit einem ersten Radialabstand von der Achse **12** angeordnet. Die erste Richtung ist entweder als im Uhrzeigersinn oder im Gegenuhrzeigersinn in Umfangsrichtung um die Achse **12** bestimmt, wobei jedwede geringe Längskomponente der Stromrichtung unbeachtet bleibt. Der Polschuh **18** ist im Wesentlichen koaxial mit der Achse **12** ausgerichtet und ist von der Hauptspule **16** der ersten Baugruppe **14** beabstandet. Der Hauptteil des Polschuhs **18** der ersten Baugruppe **14** ist radial einwärts der Hauptspule **16** der ersten Baugruppe **14** angeordnet. Der Polschuh **18** der ersten Baugruppe **14** erstreckt sich von der Achse **12** radial auswärts um einen Abstand, der mindestens gleich 75 % des ersten Radialabstands ist. Während des Betriebs des Magneten **10** hat der Polschuh **18** der ersten Baugruppe **14** eine Temperatur, die im Wesentlichen gleich der der Hauptspule **16** der ersten Baugruppe **14** ist. Es ist anzumerken, dass die erste Baugruppe **14** alleine als ein Tischmagnet (nicht gezeigt) verwendet werden kann, oder eine von zwei Baugruppen eines offenen Magneten sein kann, wie in den Figuren gezeigt ist. Während des Betriebs des Magneten **10** sind die Hauptspule **16** und der Polschuh **18** der ersten Baugruppe **14** durch einen Kühkopf (nicht gezeigt) eines Kryokühlers und/oder durch ein kryogenes Fluid oder dergleichen gekühlt.

[0019] In einer zweiten Ausgestaltung der Erfindung hat ein supraleitender Magnet **10** eine sich in Längsrichtung erstreckende Achse **12** und eine erste Baugruppe **14**. Die erste Baugruppe **14** umfasst eine supraleitende Hauptspule **16**, einen magnetisierbaren Polschuh **18** und ein Dewargefäß **20** für ein kryogenes Fluid. Die supraleitende Hauptspule **16** ist im Wesentlichen koaxial mit der Achse **12** ausgerichtet und führt einen ersten elektrischen Hauptstrom in einer ersten Richtung. Der Polschuh **18** ist im Wesentlichen koaxial mit der Achse **12** ausgerichtet, ist von der Hauptspule **16** beabstandet und hat einen Oberflächenabschnitt **22**. Der Hauptteil des Polschuhs **18** ist radial einwärts der Hauptspule **16** angeordnet. Das Dewargefäß **20** umschließt die Hauptspule **16** und hat eine Innenfläche **24**, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt **22** des Polschuhs **18** begrenzt oder definiert bzw. gebildet ist.

[0020] In besonderen Magnetkonstruktionen können zusätzliche supraleitende Hauptspulen (nicht ge-

zeigt) in der ersten Baugruppe **14** erforderlich sein, um eine hohe Magnetfeldstärke innerhalb des Bildzeugungstraums des Magneten zu erreichen, ohne die kritische Stromdichte des Supraleiters zu überschreiten, der in den supraleitenden Spulen verwendet wird, wie dem Fachmann bekannt ist. Ein Beispiel eines Supraleiters für die supraleitende Hauptspule **16** ist Niob-Titan. Ein Beispiel eines Materials für den Polschuh **18** ist Eisen.

[0021] In einem Beispiel umfasst der Magnet **10** ferner eine zweite Baugruppe **26**, die in Längsrichtung von der ersten Baugruppe **14** beabstandet ist. Die zweite Baugruppe **26** umfasst eine supraleitende Hauptspule **28**, einen magnetisierbaren Polschuh **30** und ein Dewargefäß **32** für ein kryogenes Fluid. Die supraleitende Hauptspule **28** ist im Wesentlichen koaxial mit der Achse **12** ausgerichtet und führt einen ersten elektrischen Hauptstrom in der vorgenannten ersten Richtung. Der Polschuh **30** ist im Wesentlichen koaxial mit der Achse **12** ausgerichtet, ist von der Hauptspule **28** beabstandet und hat einen Oberflächenabschnitt **34**. Der Hauptteil des Polschuhs **30** ist radial einwärts der Hauptspule **28** angeordnet. Das Dewargefäß **32** umschließt die Hauptspule **28** und hat eine Innenfläche **36**, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt **34** des Polschuhs **30** definiert ist. In dem in [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) gezeigten Beispiel hat der Polschuh **18** einen weiteren Oberflächenabschnitt **23**, welcher nicht zur Begrenzung oder Bildung der Innenfläche **24** des Dewargefäßes **20** beiträgt, und der Polschuh **30** umfasst einen weiteren Oberflächenabschnitt **35**, welcher nicht zur Begrenzung oder Bildung der Innenfläche **36** des Dewargefäßes **32** beiträgt.

[0022] In einem Aufbau umfasst der Magnet **10** zudem eine im Wesentlichen nicht magnetisierbare Spulenhalterung **38**, die an dem Polschuh **18** angebracht ist und die Hauptspule **16** der ersten Baugruppe abstützt, und er umfasst ferner eine im Wesentlichen nicht magnetisierbare Spulenhalterung **40**, die an dem Polschuh **30** angebracht ist und die Hauptspule **28** der zweiten Baugruppe **26** abstützt. Der Ausdruck "nicht magnetisierbar" bedeutet, dass das Material nicht besser magnetisierbar ist als nichtmagnetischer Edelstahl. Ein Beispiel für ein Material für die Spulenhalterungen **38** und **40** ist nichtmagnetischer Edelstahl oder Fiberglas. In einer Ausgestaltung des Magneten umfasst der Magnet **10** zudem im Wesentlichen einen nicht magnetisierbaren ersten Stützpfosten **42**, der ein erstes Ende hat, das an dem Polschuh **18** der ersten Baugruppe **14** befestigt (z.B. geschweißt) ist, der ein zweites Ende hat, das an dem Polschuh **30** der zweiten Baugruppe **26** befestigt (z.B. geschweißt) ist, und der einen Oberflächenabschnitt **44** hat. Ein Beispiel eines Materials für den (ersten) Stützpfosten **42** ist nichtmagnetischer Edelstahl. In dieser Ausgestaltung umfasst der Magnet **10** ferner eine (erste) Dewarleitung **46** in Fluidverbin-

dung mit dem Dewargefäß **20** der ersten Baugruppe **14** und dem Dewargefäß **32** der zweiten Baugruppe **26**. Die (erste) Dewarleitung **46** hat eine Innenfläche **48**, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt **44** des (ersten) Stützpfostens **42** definiert oder begrenzt ist. Eine Plattenbaugruppe **50** hat eine Innenfläche einschließlich eines ersten Abschnitts **52**, der teilweise die Innenfläche des Dewargefäßes **20** der ersten Baugruppe **14** definiert oder begrenzt, einen zweiten Abschnitt **54**, der teilweise die Innenfläche des Dewargefäßes **32** der zweiten Baugruppe **26** definiert oder begrenzt, und einen dritten Abschnitt **56**, der teilweise die Innenfläche der (ersten) Dewarleitung **46** begrenzt oder definiert. In diesem Beispiel umfasst der Magnet **10** zusätzlich eine thermische Abschirmung **58** und ein Vakuumgefäß **60**. Die thermische Abschirmung **58** umschließt im Wesentlichen die Polschuhe **18** und **30** und die Dewargefäße **20** und **32** der ersten und zweiten Baugruppe **14** und **26**, den (ersten) Stützpfosten **42** und die (erste) Dewarleitung **46** und sie ist davon beabstandet. Der Vakuumbehälter **60** umschließt hermetisch die thermische Abschirmung **58** und ist davon beabstandet. Ein Beispiel eines Materials für die Plattenbaugruppe **50**, die thermische Abschirmung **58** und den Vakuumbehälter **60** ist nichtmagnetischer Edelstahl. Es ist anzumerken, dass in diesem Beispiel die zuvor beschriebene Beabstandung durch Verwendung herkömmlicher Abstandshalter oder Unterlegscheiben **62** erreicht wird.

[0023] Im Betrieb wird der Magnet **10** ein kryogenes Fluid **64** aufweisen, das in den Dewargefäßen **20** und **32** der ersten und zweiten Baugruppe **14** und **26** sowie in der (ersten) Dewarleitung **46** aufgenommen ist. Ein Beispiel eines kryogenen Fluids ist flüssiges Helium. Ein Kühlkopf eines Kryokühlers (nicht gezeigt) kann verwendet werden, um verdampftes flüssiges Helium wieder zu kondensieren, indem die erste Stufe des Kühlkopfs in Kontakt mit der thermischen Abschirmung **58** ist und die zweite Stufe des Kühlkopfs in das Leervolumen des Dewargefäßes in der Nähe des höchsten Punktes eines Dewargefäßes **20** bzw. **32** eindringt. In einer anderen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Magneten haben die erste und die zweite Baugruppe **14** und **26** jeweils ein selbständiges Dewargefäß, eine thermische Abschirmung und einen Vakuumbehälter, wobei Stützpfosten die Vakuumbehälter miteinander verbinden oder wobei die beiden Baugruppen **14** und **26** durch einen C-förmigen Arm in voneinander beabstandeter Beziehung gehalten sind oder wobei sie mit einem Fußboden und/oder Wänden verschraubt sind oder durch andere Mittel gehalten sind. In dem nicht gezeigten Ausführungsbeispiel ist das kryogene Fluid **64** lediglich in den Dewargefäßen **20** und **32** der ersten und zweiten Baugruppe **14** und **26** aufgenommen, weil keine (erste) Dewarleitung **46** vorhanden ist. In dem in [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) gezeigten Ausführungsbeispiel umfasst der Magnet **10** ferner einen Magnetresonanzbilder-

zeugungsraum **66**, der eine Mitte hat, die im Wesentlichen auf der Achse **12** in Längsrichtung gleichbeabstandet zwischen der ersten und zweiten Baugruppe **14** und **26** angeordnet ist. Eine Form des Bilderzeugungsraums **66** ist eine Kugel. Es ist anzumerken, dass typischerweise die zweite Baugruppe **26** allgemein spiegelbildlich zur ersten Baugruppe **14** bezüglich einer Ebene (nicht gezeigt) ist, die auf die Achse **12** senkrecht steht und welche im Wesentlichen gleichbeabstandet zwischen der ersten und der zweiten Baugruppe **14** und **26** angeordnet ist.

[0024] In einer dritten Ausgestaltung der Erfindung umfasst ein supraleitender offener Magnet **10** eine sich in Längsrichtung erstreckende Achse **12**, eine erste Baugruppe **14** sowie eine in Längsrichtung von der ersten Baugruppe **14** beabstandete zweite Baugruppe **26**. Die erste Baugruppe **14** umfasst eine supraleitende Hauptspule **16**, eine supraleitende Abschirmspule **68**, einen magnetisierbaren und im Wesentlichen zylinderförmigen Polschuh **18** sowie ein Dewargefäß **20** für ein kryogenes Fluid. Die supraleitende Hauptspule **16** ist im Wesentlichen koaxial mit der Achse **12** ausgerichtet und führt einen ersten elektrischen Hauptstrom in einer ersten Richtung. Die supraleitende Abschirmspule **68** ist im Wesentlichen koaxial mit der Achse **12** ausgerichtet, ist in Längsrichtung außerhalb der Hauptspule **16** angeordnet und führt einen ersten elektrischen Abschirmstrom in einer zu der vorgenannten ersten Richtung entgegengesetzten Richtung. Der Polschuh **18** ist im Wesentlichen koaxial mit der Achse ausgerichtet und schneidet diese, ist von der Haupt- und der Abschirmspule **16** und **68** beabstandet und hat einen Oberflächenabschnitt **22**. Der Hauptteil des Polschuhs **18** ist in Längsrichtung zwischen und radial einwärts der Haupt- und Abschirmspule **16** und **68** angeordnet. Das Dewargefäß **20** umschließt die Haupt- und Abschirmspulen **16** und **18** und hat eine Innenfläche **24**, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt **22** des Polschuhs **18** begrenzt oder definiert ist. Die zweite Baugruppe **26** umfasst eine supraleitende Hauptspule **28**, eine supraleitende Abschirmspule **70**, einen magnetisierbaren und im Wesentlichen zylinderförmigen Polschuh **30** und ein Dewargefäß **32** für ein kryogenes Fluid. Die supraleitende Hauptspule **28** ist im Wesentlichen koaxial mit der Achse **12** ausgerichtet und führt einen zweiten elektrischen Hauptstrom in der vorgenannten ersten Richtung. Die supraleitende Abschirmspule **70** ist im Wesentlichen koaxial mit der Achse **12** ausgerichtet, ist in Längsrichtung außerhalb der Hauptspule **28** angeordnet und führt einen zweiten elektrischen Abschirmstrom in der vorgenannten entgegengesetzten Richtung. Der Polschuh **30** ist im Wesentlichen mit der Achse **12** ausgerichtet und schneidet diese, ist von den Haupt- und Abschirmspulen **28** und **70** beabstandet und hat einen Oberflächenabschnitt **34**. Der Hauptteil des Polschuhs **30** ist in Längsrichtung zwischen und radial einwärts der Haupt- und Abschirm-

spulen **28** und **70** angeordnet. Das Dewargefäß **32** umschließt die Haupt- und Abschirmspulen **28** und **70** und hat eine Innenfläche **36**, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt **34** des Polschuhs **30** begrenzt oder definiert ist.

[0025] In einem Aufbau umfasst der offene Magnet **10** zudem im Wesentlichen nicht magnetisierbare Spulenhalterungen **38** und **72**, die an dem Polschuh **18** befestigt sind und die Haupt- und Abschirmspulen **16** und **68** der ersten Baugruppe **14** halten, und er umfasst ferner im Wesentlichen nicht magnetisierbare Spulenhalterungen **40** und **74**, die an dem Polschuh **30** angebracht sind und die Haupt- und Abschirmspulen **28** und **70** der zweiten Baugruppe **26** halten. In einer Ausführung umfasst der offene Magnet **10** zudem im Wesentlichen nicht magnetisierbare erste **42** und zweite Stützpfeiler (nicht gezeigt, jedoch identisch mit dem ersten Stützpfeiler **42**), die jeweils ein erstes Ende haben, das an den Polschuh **18** der ersten Baugruppe **14** befestigt ist, die jeweils ein zweites Ende haben, das an dem Polschuh **30** der zweiten Baugruppe befestigt ist, und die jeweils einen Oberflächenabschnitt **44** haben. In dieser Ausführung umfasst der offene Magnet **10** ferner erste **46** und zweite Dewarleitungen (nicht gezeigt, jedoch mit der ersten Dewarleitung **46** identisch), die jeweils in Fluidverbindung mit dem Dewargefäß **20** der ersten Baugruppe **14** und dem Dewargefäß **32** der zweiten Baugruppe **26** sind. Die erste Dewarleitung **46** hat eine Innenfläche **48**, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt **44** des ersten Stützpfeilers **42** definiert oder begrenzt ist, und die zweite Dewarleitung hat eine Innenfläche, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt des zweiten Stützpfeilers definiert oder begrenzt ist. In diesem Beispiel umfasst der offene Magnet **10** zusätzlich eine thermische Abschirmung **58** und ein Vakuumgefäß **60**. Die thermische Abschirmung **58** ist von dem Polschuh **18** und **30** sowie dem Dewargefäß **20** und **32** der ersten und zweiten Baugruppe **14** und **26**, dem ersten **42** und zweiten Stützpfeiler und der ersten **46** und zweiten Dewarleitung beabstandet und umschließt im Wesentlichen diese Elemente. Der Vakuumbehälter **60** ist von der thermischen Abschirmung **58** beabstandet und umschließt diese hermetisch. Es ist anzumerken, dass der erste Stützpfeiler **42** und die erste Dewarleitung **46** innerhalb eines ersten Abschnitts **76** des Vakuumgefäßes **60** angeordnet sind, dass der zweite Stützpfeiler und die zweite Dewarleitung innerhalb eines zweiten Abschnitts **78** des Vakuumbehälters angeordnet sind, und dass diese ersten und zweiten Abschnitte **76** und **78** des Vakuumbehälters **60** in [Fig. 1](#) gezeigt sind. Im Betrieb weist der Magnet **10** das vorgenannte kryogene Fluid **64** und einen Magnetresonanzbilderzeugungsraum **66** (auch lediglich als "Bilderzeugungsraum" bekannt) auf. In einem Aufbau sind der erste **42** und der zweite Stützpfeiler (von den einschließenden ersten und zweiten Abschnitten **76** und **78** des Vakuumbehälters **60** aus gesehen, wie

in [Fig. 1](#) gezeigt ist) in Winkelrichtung zwischen im Wesentlichen 110° und 150° um die Achse **12** beabstandet und radial außerhalb des Bilderzeugungsraums **66** angeordnet. In einem Beispiel ist eine Winkelteilung von im Wesentlichen 130° vorgesehen, um den Patienten (nicht gezeigt) bequem in dem Bilderzeugungsraum **66** positionieren zu können.

[0026] In einer Anwendung hat der offene Magnet **10** ein Magnetfeld in seinem Bilderzeugungsraum **66** von im Wesentlichen 1,4 bis 1,5 Tesla. In einer Ausrichtung des offenen Magneten **10** sind die ersten und zweiten Abschnitte **76** und **78** des Vakuumbehälters **60** horizontal ausgerichtet (wie in [Fig. 1](#) gezeigt ist) und der Patient würde üblicherweise in einer stehenden Position innerhalb des Bilderzeugungsraums **66** sein. In einer anderen Ausrichtung (nicht gezeigt) des offenen Magneten **10** sind der erste und zweite Abschnitt **76** und **78** des Vakuumbehälters **60** vertikal ausgerichtet und der Patient würde üblicher Weise auf einer Bahre innerhalb des Bilderzeugungsraums **66** liegen. Es ist anzumerken, dass die Polschuhe **18** und **30** die Hauptstütze des Magneten **10** einschließlich der Spulen **16**, **28**, **68** und **70** sowie der Dewargefäße **20** und **32** bilden, und dass die Polschuhe **18** und **30** geformt sind (beispielsweise Ringstufen haben), um ein gleichmäßigeres Magnetfeld innerhalb des Bilderzeugungsraums **66** zu schaffen. Jede weitere Korrektur der Magnetfeldinhomogenitäten kann durch aktives Glätten oder Trimmen (shimming) verwirklicht werden, wie dem Fachmann bekannt ist. Es ist ferner anzumerken, dass in dem in den Figuren gezeigten Beispiel der Magnet **10** für jede Baugruppe **14** und **26** ausgelegt ist, eine dem Bilderzeugungsraum **66** zugewandte Aussparung **80** für ein geteiltes Paar flacher abgeschirmter Gradienten/RF-Spulen in dem Vakuumraum **60** zu haben, wobei die Polflächen der Polschuhe **18** und **30** nicht laminiert sind, wie für den Fachmann zu erkennen ist.

[0027] Das Verfahren der Erfindung ist ein Verfahren zur Schaffung eines homogenen Magnetresonanzbilderzeugungsraums **66** für einen supraleitenden Magneten **10** mit einem magnetisierbaren Polschuh **18** und einer supraleitenden Hauptspule **16**, wobei im Betrieb die Hauptspule **16** eine kritische Temperatur hat (d.h. eine Temperatur bei der oder unterhalb der Supraleitung auftritt). Das Verfahren umfasst das Kühlen der Hauptspule **16** auf eine Temperatur gleich oder niedriger als die kritische Temperatur und das Kühlen des Polschuhs **18** auf eine Temperatur gleich oder im Wesentlichen gleich der Temperatur der Hauptspule **16**. Während des Betriebs des Magneten **10** sind die Hauptspule **16** und der Polschuh **18** der ersten Baugruppe **14** durch einen Kühlkopf (nicht gezeigt) eines Kryokühlers und/oder durch eine kryogenes Fluid oder dergleichen gekühlt.

[0028] Das Verfahren gemäß der Erfindung umfasst ferner die Schritte a) bis d). Schritt a) umfasst die Be-

reitstellung einer im Wesentlichen nicht magnetisierbaren Spulenhalterung **38**. Schritt b) umfasst die Befestigung der Spulenhalterung **38** an dem Polschuh **18**. Schritt c) umfasst die Abstützung der Hauptspule **16** mit der Spulenhalterung **38**. Schritt d) umfasst die Auslegung und Anordnung eines Dewargefäßes **20** für ein kryogenes Fluid, das die Hauptspule **16** umgibt und eine Innenfläche **24** hat, die teilweise durch einen Oberflächenabschnitt **22** des Polschuhs **18** definiert oder begrenzt ist.

[0029] In einer Umsetzung des Verfahrens wird ein Schritt hinzugefügt, um eine thermische Abschirmung **58** anzuordnen, die den Polschuh **18** und das Dewargefäß **20** im Wesentlichen umschließt und davon beabstandet ist. In dieser Umsetzung wird ein weiterer Schritt hinzugefügt, um einen Unterdruckbehälter **60** anzuordnen, der die thermische Abschirmung **58** hermetisch umschließt und davon beabstandet ist. Ein weiterer Schritt wird hinzugefügt, um ein kryogenes Fluid **64** in das Dewargefäß **20** einzubringen.

[0030] In einer Anwendung des Verfahrens in Schritt d) ist das Dewargefäß **20** so ausgebildet, dass der Oberflächenabschnitt **22** des Polschuhs **18** zwischen im Wesentlichen 40 % und im Wesentlichen 60 % der Gesamtoberfläche des Polschuhs **18** beträgt. In der gleichen oder einer anderen Anwendung wird in Schritt d) das Dewargefäß **20** so ausgebildet, dass es ein Leervolumen hat, wobei mindestens im Wesentlichen 60 % des Leervolumens in Längsrichtung außerhalb des Polschuhs **18** angeordnet sind.

[0031] Ein weiteres Verfahren gemäß der Erfindung umfasst die Schritte a) bis j) und ist ein Verfahren zur Schaffung von Kompaktheit und einem homogenen Magnetresonanzbilderzeugungsraum **66** für einen supraleitenden offenen Magneten **10** mit einer sich in Längsrichtung erstreckenden Achse **12** und in Längsrichtung voneinander beabstandeten und im Wesentlichen coaxial ausgerichteten ersten und zweiten Baugruppen **14** und **26**, die jeweils einen magnetisierbaren und im Wesentlichen zylinderförmigen Polschuh **18** und **30**, der die Achse **12** schneidet, eine supraleitende Hauptspule **16** und **28** sowie eine supraleitende Abschirmspule **68** und **70** haben. Schritt a) umfasst die Bereitstellung von im Wesentlichen nicht magnetisierbaren ersten Spulenhalterungen **38** und **72**. Schritt b) umfasst die Anbringung der ersten Spulenhalterungen **38** und **72** an dem Polschuh **18** der ersten Baugruppe **14**. Schritt c) umfasst die Abstützung der Haupt- und Abschirmspulen **16** und **68** mit den ersten Spulenhalterungen **38** und **72** der ersten Baugruppe **14**. Schritt d) umfasst die Auslegung und Anordnung eines Dewargefäßes **20** für ein kryogenes Fluid die Haupt- und Abschirmspulen **16** und **68** der ersten Baugruppe **14** umgebend, das eine Innenfläche **24** hat, die teilweise durch einen Oberflächenabschnitt **22** des Polschuhs **18** begrenzt

oder definiert ist. Schritt e) umfasst die Bereitstellung von im Wesentlichen nicht magnetisierbaren zweiten Spulenhalterungen **40** und **74**. Schritt f) umfasst die Anbringung der zweiten Spulenhalterungen **40** und **74** an dem Polschuh **30** der zweiten Baugruppe **26**. Schritt g) umfasst die Abstützung der Haupt- und Abschirmspulen **28** und **70** mit den zweiten Spulenhalterungen **40** und **74** der zweiten Baugruppe **26**. Schritt h) umfasst die Auslegung und Anordnung eines Dewargefäßes **32** für ein kryogenes Fluid die Haupt- und Abschirmspulen **28** und **70** der zweiten Baugruppe **26** umgebend, das eine Innenfläche **36** hat, die teilweise durch einen Oberflächenabschnitt **34** des Polschuhs **30** begrenzt oder definiert ist. Schritt i) umfasst die Befestigung eines ersten Endes eines im Wesentlichen nicht magnetisierbaren (ersten) Stützpfostens **42** an dem Polschuh **18** der ersten Baugruppe **14** und die Befestigung eines zweiten Endes des (ersten) Stützpfostens **42** an dem Polschuh **30** der zweiten Baugruppe **26**. Schritt j) umfasst die Auslegung und Anordnung einer (ersten) Dewarleitung **46** in Fluidverbindung mit dem Dewargefäß **20** der ersten Baugruppe **14** und dem Dewargefäß **32** der zweiten Baugruppe **26**, wobei die (erste) Dewarleitung **46** eine Innenfläche **48** hat, die teilweise durch einen Oberflächenabschnitt **44** des (ersten) Stützpfostens **42** definiert oder begrenzt ist.

[0032] In einer Umsetzung des Verfahrens wird ein Schritt hinzugefügt, um eine thermische Abschirmung **58** anzuordnen, die im Wesentlichen die Polschuhe **18** und **30** sowie Dewargefäße **20** und **32** der ersten und zweiten Baugruppe **14** und **26** sowie den (ersten) Stützpfosten **42** und die (erste) Dewarleitung **46** umschließt und davon beabstandet ist. In dieser Umsetzung wird ein weiterer Schritt hinzugefügt, um einen Vakuumbehälter **60** anzuordnen, der die thermische Abschirmung **58** hermetisch umschließt und davon beabstandet ist. Es wird ein weiterer Schritt hinzugefügt, um ein kryogenes Fluid **64** in die Dewargefäße **20** und **32** der ersten und zweiten Baugruppe **26** und in die (erste) Dewarleitung **46** einzubringen.

[0033] In einer Anwendung des Verfahrens wird in Schritt d) das Dewargefäß **20** der ersten Baugruppe **14** so ausgebildet, dass der Oberflächenabschnitt **22** des Polschuhs **18** zwischen im Wesentlichen 40 % und im Wesentlichen 60 % der Gesamtoberfläche des Polschuhs **18** beträgt, und in Schritt h) wird das Dewargefäß **32** der zweiten Baugruppe **26** so ausgelegt, dass der Oberflächenabschnitt **34** des Polschuhs **30** zwischen im Wesentlichen 40 % und im Wesentlichen 60 % der Gesamtoberfläche des Polschuhs **30** beträgt. In der gleichen oder einer anderen Anwendung wird in Schritt d) das Dewargefäß der ersten Baugruppe **14** so ausgebildet, dass es ein Leervolumen hat, wobei mindestens im Wesentlichen 60 % des Leervolumens des Dewargefäßes **20** in Längsrichtung außerhalb des Polschuhs **18** angeordnet sind, und in Schritt h) wird das Dewargefäß **32** der

zweiten Baugruppe **26** so ausgebildet, dass es ein Leervolumen hat, wobei mindestens im Wesentlichen 60 % des Leervolumens des Dewargefäßes **32** in Längsrichtung außerhalb des Polschuhs **30** angeordnet sind. In einem Beispiel wird in Schritt j) die (erste) Dewarleitung **46** so ausgebildet, dass sie ein Leervolumen hat, das vollständig radial außerhalb des (ersten) Stützpfostens **42** angeordnet ist.

[0034] Verschiedene Vorzüge und Vorteile werden mit der Erfindung erhalten. Indem der Polschuh zu einem tieftemperaturgekühlten Polschuh gemacht wird, schafft dies eine größere Magnetfeldhomogenität innerhalb des Bilderzeugungsraums des Magneten, indem Magnetfeldinhomogenitäten eliminiert werden, die durch Temperaturveränderungen eines herkömmlichen Raumtemperaturpolschuhs hervorgerufen sind, die durch Änderungen der Raumtemperatur bedingt sind. Indem der Polschuh ein Teil des Dewargefäßes gemacht wird, wird Kompaktheit erreicht, indem auf den zusätzlichen Raum verzichtet wird, der andernfalls für einen tieftemperaturgekühlten Polschuh gemäß der Erfindung erforderlich wäre, der vollständig durch ein Dewargefäß für kryogenes Fluid umgeben ist.

[0035] Es ist anzumerken, dass der Fachmann unter Verwendung von Computersimulationen auf der Basis herkömmlicher Magnetfeldanalysetechniken und unter Verwendung der Lehre der vorliegenden Erfindung einen abgeschirmten supraleitenden offenen Magneten **10** mit einer gewünschten Magnetfeldstärke, einer gewünschten Magnetfeldinhomogenität und einem gewünschten Abschirmpegel (d.h. eine gewünschte Position des 5-Gauss-Streifens von der Mitte des Bilderzeugungsraums **66** des supraleitenden offenen Magneten) auslegen kann. Der Polschuh verstärkt die Stärke des Magnetfelds, so dass weniger Supraleiter in der Hauptspule erforderlich ist. Der radial äußerste Abschnitt des Polschuhs schafft einen Rückfluss eines Teils des magnetischen Flusses für die Hauptspule, was die in dem Polschuh erforderliche Eisenmenge verringert und die in der Hauptspule erforderliche Menge an Supraleiter vermindert. Der radial äußerste Abschnitt des Polschuhs entkoppelt zudem magnetisch die Abschirmspule von der Hauptspule, so dass die magnetischen Flusslinien von der Abschirmspule durch den radial äußersten Abschnitt des Polschuhs eingefangen werden und die magnetischen Flusslinien von der Hauptspule nicht erreichen. Somit muss die Eisenmasse des Polschuhs nicht vergrößert werden, und die Menge an Supraleiter in der Hauptspule muss nicht vergrößert werden, um die Feldsubtraktionseffekte der magnetischen Flusslinien von der Abschirmspule auszugleichen, weil diese durch die Anwesenheit des radial äußersten Abschnitts des Polschuhs blockiert sind.

[0036] Computersimulationen zeigen, dass ein 1,4

Tesla MRI (Magnetresonanzbilderzeugungs-) Magnet, wie er in den Figuren gezeigt ist und einen kugelförmigen Bilderzeugungsbereich mit 35 cm Durchmesser hat, etwa 16.300 kg (30.000 Pfund) wiegen würde und ein 5-Gauss-Streifeld haben würde, das sich 4,5 m vertikal und 5,5 m horizontal von der Mitte des Bilderzeugungsraums **66** erstreckt. Das 5-Gauss-Streifeld kann durch die Verwendung eines 6.520 kg (12.000 Pfund) Raumschildes auf 2,5 m vertikal und 3,5 m horizontal beschränkt werden. Der Magnet würde in einen 180 cm Würfel passen (d.h. ein Würfel mit Länge = Breite = Höhe = 180 cm). Die vorhergehende Beschreibung verschiedener Ausgestaltungen eines Ausführungsbeispiels des Magneten gemäß der Erfindung und verschiedene Methoden, die sich darauf beziehen, wurden erläuternd präsentiert. Dies soll nicht erschöpfend sein oder die Erfindung auf die genauer beschriebene Form beschränken und es sind verschiedene Modifikationen und Variationen im Lichte der oberen Lehre möglich. Der Bereich der Erfindung soll durch die nachfolgenden Ansprüche definiert sein.

[0037] Ein Magnet, wie ein offener Magnetresonanzbilderzeugungsmagnet (MRI) hat eine ersten Baugruppe, die eine supraleitende Hauptspule und einen magnetisierbaren Polschuh hat, der während des Betriebs des Magneten eine Temperatur hat, die im Wesentlichen gleich der Temperatur der Hauptspule ist. In einem Beispiel umschließt ein Dewargefäß für ein kryogenes Fluid (z.B. flüssiges Helium) die Hauptspule und das Dewargefäß hat eine Innenfläche, die teilweise durch einen Oberflächenabschnitt des Polschuhs definiert ist. Ein Verfahren zur Schaffung eines homogenen Bilderzeugungsraums für einen Magneten umfasst Schritte zum Aufbau des zuvor beschriebenen Magneten.

Patentansprüche

1. Supraleitender Magnet (**10**), mit:
einer sich in Längsrichtung erstreckenden Achse (**12**) und einer ersten Baugruppe (**14**), mit:
einer supraleitenden Hauptspule (**16**), die um die Achse (**12**) angeordnet ist und einen ersten elektrischen Hauptstrom in einer ersten Richtung führt;
einem magnetisierbaren Polschuh (**18**), der koaxial mit der Achse (**12**) ausgerichtet ist, von der Hauptspule (**16**) der ersten Baugruppe (**14**) beabstandet ist und einen Oberflächenabschnitt (**22**) hat, wobei ein Großteil des Polschuhs (**18**) der ersten Baugruppe (**14**) radial einwärts der Hauptspule (**16**) in Richtung der Achse (**12**) der ersten Baugruppe (**14**) angeordnet ist;
einem Dewargefäß (**20**) für kryogenes Fluid (**64**) das die Hauptspule (**16**) der ersten Baugruppe (**14**) umschließt und eine Innenfläche (**24**) hat, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt (**22**) des Polschuhs (**18**) der ersten Baugruppe (**14**) definiert ist;
und einem kryogenen Fluid (**64**) dem Dewargefäß

(**20**) und in thermischem Kontakt mit der Hauptspule (**16**) und in direktem Kontakt mit dem magnetisierbaren Polschuh (**18**) zur Kühlung durch das kryogene Fluid (**64**).

2. Magnet nach Anspruch 1, ferner mit:
einer zweiten Baugruppe (**26**), die von der ersten Baugruppe (**14**) in Längsrichtung beabstandet ist und umfasst:
eine supraleitende Hauptspule (**28**), die koaxial mit der Achse (**12**) ausgerichtet ist und einen zweiten elektrischen Hauptstrom in der ersten Richtung führt;
einen magnetisierbaren Polschuh (**30**), der koaxial mit der Achse (**12**) ausgerichtet ist, von der Hauptspule (**28**) der zweiten Baugruppe (**26**) beabstandet ist und einen Oberflächenabschnitt (**34**) hat, wobei ein Großteil des Polschuhs (**30**) der zweiten Baugruppe (**26**) radial einwärts der Hauptspule (**28**) der zweiten Baugruppe (**26**) angeordnet ist; und
einem Dewargefäß (**32**) für ein kryogenes Fluid (**64**), das die Hauptspule (**28**) der zweiten Baugruppe (**26**) umschließt und eine Innenfläche (**32**) hat, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt (**34**) des Polschuhs (**30**) der zweiten Baugruppe (**26**) definiert ist.

3. Magnet nach Anspruch 2, ferner mit einer nicht magnetisierbaren Spulenhalterung (**38**), die an dem Polschuh (**18**) der ersten Baugruppe (**14**) angebracht ist und die Hauptspule (**16**) der ersten Baugruppe (**14**) hält, und ferner mit einer nicht magnetisierbaren Spulenhalterung (**40**), die an dem Polschuh (**30**) der zweiten Baugruppe (**26**) angebracht ist und die Hauptspule (**28**) der zweiten Baugruppe (**26**) hält.

4. Magnet nach Anspruch 2, ferner mit einem nicht magnetisierbaren Stützpfeiler (**42**), der ein erstes Ende hat, das an dem Polschuh (**18**) der ersten Baugruppe (**14**) befestigt ist, und ein zweites Ende hat, das an dem Polschuh (**30**) der zweiten Baugruppe (**26**) befestigt ist, und der einen Oberflächenabschnitt (**44**) hat.

5. Magnet nach Anspruch 4, ferner mit einer Dewarleitung (**46**) in Fluidverbindung mit dem Dewargefäß (**20**) der ersten Baugruppe (**14**) und mit dem Dewargefäß (**32**) der zweiten Baugruppe (**26**), wobei die Dewarleitung (**46**) eine Innenfläche (**48**) hat, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt (**44**) des Stützpfeilers (**42**) definiert ist.

6. Magnet nach Anspruch 5, ferner mit einer thermischen Abschirmung (**58**), die den Polschuh (**18**), **30**) sowie das Dewargefäß (**20**, **32**) der ersten (**14**) und zweiten (**26**) Baugruppe, den Stützpfeiler (**42**) und die Dewarleitung (**46**) umschließt und davon beabstandet ist.

7. Magnet nach Anspruch 6, ferner mit einem Vakuumbehälter (**60**), der von der thermischen Abschirmung (**58**) beabstandet ist und diese hermetisch um-

schließt.

8. Magnet nach Anspruch 7, ferner mit einer nicht magnetisierbaren Spulenhalterung (38), die an dem magnetisierbaren Polschuh (18) der ersten Baugruppe (14) angebracht ist und die Hauptspule (16) der ersten Baugruppe (14) trägt, und ferner mit einer nicht magnetisierbaren Spulenhalterung (40), die an dem magnetisierbaren Polschuh (30) der zweiten Baugruppe (26) angebracht ist und die Hauptspule (28) der zweiten Baugruppe (26) trägt.

9. Magnet nach Anspruch 8, ferner mit einem kryogenen Fluid (64), das in dem Dewargefäß (20, 32) der ersten und zweiten Baugruppe (14, 26) und in der Dewarleitung (46) angeordnet ist.

10. Magnet nach Anspruch 2, ferner mit einem kryogenen Fluid (64), das in dem Dewargefäß (20, 32) der ersten und zweiten Baugruppe (14, 26) angeordnet ist.

11. Magnet nach Anspruch 2, ferner mit einem Magnetresonanzbilderzeugungsraum (66), welcher eine Mitte hat, die im auf der Achse (12) und in Längsrichtung gleichbeabstandet zwischen der ersten (14) und der zweiten (26) Baugruppe positioniert ist.

12. Supraleitender offener Magnet, mit:
einer sich in Längsrichtung erstreckenden Achse (12);
einer ersten Baugruppe (14), mit:
einer supraleitenden Hauptspule (16), die koaxial mit der Achse (12) ausgerichtet ist und einen ersten elektrischen Hauptstrom (16) in einer ersten Richtung führt;
einer supraleitenden Abschirmspule (68), die koaxial mit der Achse (12) ausgerichtet ist, in Längsrichtung auswärts der Hauptspule (16) der ersten Baugruppe (14) angeordnet ist und einen ersten elektrischen Abschirmstrom in einer zu der ersten Richtung entgegengesetzten Richtung führt;
einem magnetisierbaren und zylinderförmigen Polschuh (18), der koaxial mit der Achse (12) ausgerichtet ist und diese schneidet, von der Hauptspule (16) und der Abschirmspule (68) der ersten Baugruppe (14) beabstandet ist, und einen Oberflächenabschnitt (22) hat, wobei der Großteil des Polschuhs (18) der ersten Baugruppe (14) in Längsrichtung zwischen und radial einwärts der Hauptspule (16) und der Abschirmspule (68) der ersten Baugruppe (14) angeordnet ist; und
einem Dewargefäß (20) für ein kryogenes Fluid (64), das die Hauptspule (16) und die Abschirmspule (68) der ersten Baugruppe (14) umschließt und eine Innenfläche (24) hat, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt (22) des Polschuhs (18) der ersten Baugruppe (14) definiert ist; und
einer zweiten Baugruppe (26), die in Längsrichtung

von der ersten Baugruppe (14) beabstandet ist und umfasst:

eine supraleitende Hauptspule (28), die koaxial mit der Achse (12) ausgerichtet ist und einen zweiten elektrischen Hauptstrom in der ersten Richtung führt;
einer supraleitenden Abschirmspule (70), die koaxial mit der Achse (12) ausgerichtet ist, in Längsrichtung außerhalb der Hauptspule (28) der zweiten Baugruppe (26) ausgebildet ist und einen zweiten elektrischen Abschirmstrom in der entgegengesetzten Richtung führt;
einem magnetisierbaren und zylinderförmigen Polschuh (30), der koaxial mit der Achse (12) ausgerichtet ist und diese schneidet, von der Hauptspule (28) und der Abschirmspule (70) der zweiten Baugruppe (26) beabstandet ist und einen Oberflächenabschnitt (34) hat, wobei der Hauptteil des Polschuhs (30) der zweiten Baugruppe (26) in Längsrichtung zwischen und radial einwärts der Hauptspule (28) und der Abschirmspule (70) der zweiten Baugruppe (26) angeordnet ist; und
einem Dewargefäß (32) für kryogenes Fluid (64), das die Hauptspule (28) und die Abschirmspule (70) der zweiten Baugruppe (26) umschließt und eine Innenfläche (36) hat, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt (34) des Polschuhs (30) der zweiten Baugruppe (26) definiert ist.

13. Offener Magnet nach Anspruch 12, ferner mit nicht magnetisierbaren Spulenhalterungen (38, 72), die an dem Polschuh (18) der ersten Baugruppe (14) angebracht sind und die Hauptspule (16) und die Abschirmspule (68) der ersten Baugruppe (14) halten, und ferner mit nicht magnetisierbaren Spulenhalterungen (40, 74), die an dem Polschuh (30) der zweiten Baugruppe (26) angebracht sind und die Hauptspule (28) und die Abschirmspule (70) der zweiten Baugruppe (26) halten.

14. Offener Magnet nach Anspruch 12, ferner mit beabstandeten und nicht magnetisierbaren ersten (42) und zweiten Stützpfosten, die jeweils ein erstes Ende haben, das an dem Polschuh (18) der ersten Baugruppe (14) befestigt ist, die jeweils ein zweites Ende haben, das an dem Polschuh (30) der zweiten Baugruppe (26) befestigt ist, und die jeweils einen Oberflächenabschnitt (44) haben.

15. Offener Magnet nach Anspruch 14, ferner mit ersten (46) und zweiten Dewarleitungen, die jeweils in Fluidverbindung mit dem Dewargefäß (20) der ersten Baugruppe (14) und dem Dewargefäß (32) der zweiten Baugruppe (26) sind, wobei die erste Dewarleitung (46) eine Innenfläche (48) hat, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt (44) des ersten Stützpfostens (42) definiert ist, und wobei die zweite Dewarleitung eine Innenfläche hat, die teilweise durch den Oberflächenabschnitt des zweiten Stützpfostens definiert ist.

16. Offener Magnet nach Anspruch 15, ferner mit einer thermischen Abschirmung (58), die die Polschuhe (18, 30) und die Dewargefäße (20, 32) der ersten (14) und zweiten (26) Baugruppe, die ersten (42) und zweiten Stützpfosten und die ersten (46) und zweiten Dewarleitungen umschließt und davon beabstandet ist.

17. Offener Magnet nach Anspruch 16, ferner mit einem Vakuumbehälter (60), der von der thermischen Abschirmung (58) beabstandet ist diese hermetisch umschließt.

18. Offener Magnet nach Anspruch 17, ferner mit nicht magnetisierbaren Spulenhalterungen (38, 72), die an dem Polschuh (18) der ersten Baugruppe (14) angebracht sind und die Hauptspule (16) und die Abschirmspule (68) der ersten Baugruppe (14) halten, und ferner mit nicht magnetisierbaren Spulenhalterungen (40, 74), die an dem Polschuh (30) der zweiten Baugruppe (26) angebracht sind und die Hauptspule (28) und die Abschirmspule (70) der zweiten Baugruppe (26) halten.

19. Offener Magnet nach Anspruch 18, ferner mit einem kryogenen Fluid (64), das in den Dewargefäßen (20, 32) der ersten (14) und der zweiten (26) Baugruppe sowie in der ersten (46) und zweiten Dewarleitung angeordnet ist.

20. Offener Magnet nach Anspruch 12, ferner mit einem kryogenen Fluid (64); das in den Dewargefäßen (20, 32) der ersten (14) und zweiten (26) Baugruppe angeordnet ist.

21. Offener Magnet nach Anspruch 12, mit einem Magnetresonanzbilderzeugungsraum (66), der eine Mitte hat, die auf der Achse (12) in Längsrichtung gleichbeabstandet zwischen der ersten (14) und zweiten (26) Baugruppe liegt, wobei die ersten (42) und zweiten Stützpfosten in Winkelrichtung voneinander zwischen 110° und 150° um die Achse (12) beabstandet sind und radial außerhalb des Bilderzeugungsraums (66) angeordnet sind.

22. Verfahren zur Schaffung von Kompaktheit und eines homogenen Magnetresonanzbilderzeugungsraums (66) für einen supraleitenden Magneten (10) mit einem magnetisierbaren Polschuh (18, 30) und einer supraleitenden Hauptspule (16, 28), wobei das Verfahren die Schritte umfasst:

- a) Bereitstellung einer allgemein nicht magnetisierbaren Spulenhalterung (38, 40);
- b) Anbringen der Spulenhalterung (38, 40) an dem Polschuh (18, 30);
- c) Abstützen der Hauptspule (16, 28) mit der Spulenhalterung (38, 40); und
- d) Auslegen und Anordnen eines Dewargefäßes (20, 32) für ein kryogenes Fluid (64) die Hauptspule (16, 28) umgebend, das eine Innenfläche (24, 36) hat, die

teilweise durch einen Oberflächenabschnitt (22, 34) des Polschuhs (18, 30) definiert ist.

23. Verfahren nach Anspruch 22, ferner mit der Anordnung einer thermischen Abschirmung (58), die den Polschuh (18, 30) und das Dewargefäß (20, 32) umschließt und davon beabstandet ist.

24. Verfahren nach Anspruch 23, ferner mit der Anordnung eines Vakuumgefäßes (60), das die thermische Abschirmung (58) hermetisch umschließt und davon beabstandet ist.

25. Verfahren nach Anspruch 24, ferner mit dem Schritt der Anordnung eines kryogenen Fluids (64) in dem Dewargefäß (20, 32).

26. Verfahren nach Anspruch 25, wobei Schritt d) das Dewargefäß (20, 32) so ausbildet, dass der Oberflächenabschnitt (22, 34) des Polschuhs (18, 30) zwischen 40 und 80 % der Gesamtoberfläche des Polschuhs (18, 30) beträgt.

27. Verfahren nach Anspruch 26, wobei der Schritt d) das Dewargefäß (20, 32) mit einem Leervolumen versieht, wobei mindestens 60 % des Leervolumens in Längsrichtung außerhalb des Polschuhs (18, 30) angeordnet sind.

28. Verfahren für die Schaffung von Kompaktheit und einem homogenen Magnetresonanzbilderzeugungsraum (66) für einen supraleitenden offenen Magneten (10) mit einer sich in Längsrichtung erstreckenden Achse (12) und in Längsrichtung voneinander beabstandeten und koaxial ausgerichteten ersten (14) und zweiten (26) Baugruppen, die jeweils einen magnetisierbaren und zylinderförmigen Polschuh (18, 30), der die Achse (12) schneidet, eine supraleitende Hauptspule (16, 28) und eine supraleitende Abschirmspule (68, 70) haben, wobei das Verfahren die Schritte umfasst:

- a) Bereitstellen von nicht magnetisierbaren ersten Spulenhalterungen (38, 72);
- b) Anbringen der ersten Spulenhalterungen (38, 72) an dem Polschuh (18) der ersten Baugruppe (14);
- c) Abstützen der Hauptspule (16) und der Abschirmspule (68) der ersten Baugruppe (14) mit den ersten Spulenhalterungen (38, 72);
- d) Auslegen und Anordnen eines Dewargefäßes (20) für kryogenes Fluid (64), das die Hauptspule (16) und die Abschirmspule (68) der ersten Baugruppe (14) umgibt und eine Innenfläche (24) hat, die teilweise durch einen Oberflächenabschnitt (22) des Polschuhs (18) der ersten Baugruppe definiert ist;
- e) Bereitstellung von nicht magnetisierbaren zweiten Spulenhalterungen (40, 74);
- f) Anbringen der zweiten Spulenhalterungen (40, 74) an dem Polschuh (30) der zweiten Baugruppe (26);
- g) Abstützen der Hauptspule (28) und der Abschirmspule (70) der zweiten Baugruppe (26) mit den zwei-

ten Spulenhalterungen (40, 74);

h) Auslegen und Anordnen eines Dewargefäßes (32) für ein kryogenes Fluid (64), das die Hauptspule (28) und die Abschirmspule (70) der zweiten Baugruppe (26) umgibt und eine Innenfläche (36) hat, die teilweise durch einen Oberflächenabschnitt (34) des Polschuhs (30) der zweiten Baugruppe definiert ist;

i) Anbringen eines ersten Endes eines nicht magnetisierbaren Stützpfeilers (42) an dem Polschuh (18) der ersten Baugruppe (14) und Anbringen eines zweiten Endes des Stützpfeilers (42) an dem Polschuh (30) der zweiten Baugruppe (26); und

j) Auslegen und Anordnen einer Dewarleitung (46) in Fluidverbindung mit dem Dewargefäß (20) der ersten Baugruppe (14) und dem Dewargefäß (32) der zweiten Baugruppe (26), wobei die Dewarleitung (46) eine Innenfläche (48) hat, die teilweise durch einen Oberflächenabschnitt (44) des Stützpfeilers (42) definiert ist.

29. Verfahren nach Anspruch 28, ferner mit der Anordnung einer thermischen Abschirmung (58), die die Polschuhe (18, 30) und die Dewargefäße (20, 32) der ersten und zweiten Baugruppe, den Stützpfeiler (42) und die Dewarleitung (46) umschließt und davon beabstandet ist.

30. Verfahren nach Anspruch 29, ferner mit der Anordnung eines Vakuumgefäßes (60), das die thermische Abschirmung (58) hermetisch umschließt und davon beabstandet ist.

31. Verfahren nach Anspruch 30, ferner mit dem Schritt der Anordnung eines kryogenen Fluids (64) in den Dewargefäßen (20, 32) der ersten und zweiten Baugruppe (14, 26) und in der Dewarleitung (46).

32. Verfahren nach Anspruch 31, wobei Schritt d) das Dewargefäß (20) der ersten Baugruppe (14) ausbildet, so dass der Oberflächenabschnitt (22) des Polschuhs (18) der ersten Baugruppe zwischen 40 % und 80 % der Gesamtoberfläche des Polschuhs (18) der ersten Baugruppe (14) beträgt, und wobei Schritt h) das Dewargefäß (32) der zweiten Baugruppe (26) ausbildet, so dass der Oberflächenabschnitt (34) des Polschuhs (30) der zweiten Baugruppe (26) zwischen 40 % und 80 % der Gesamtoberfläche des Polschuhs (30) der zweiten Baugruppe (26) beträgt.

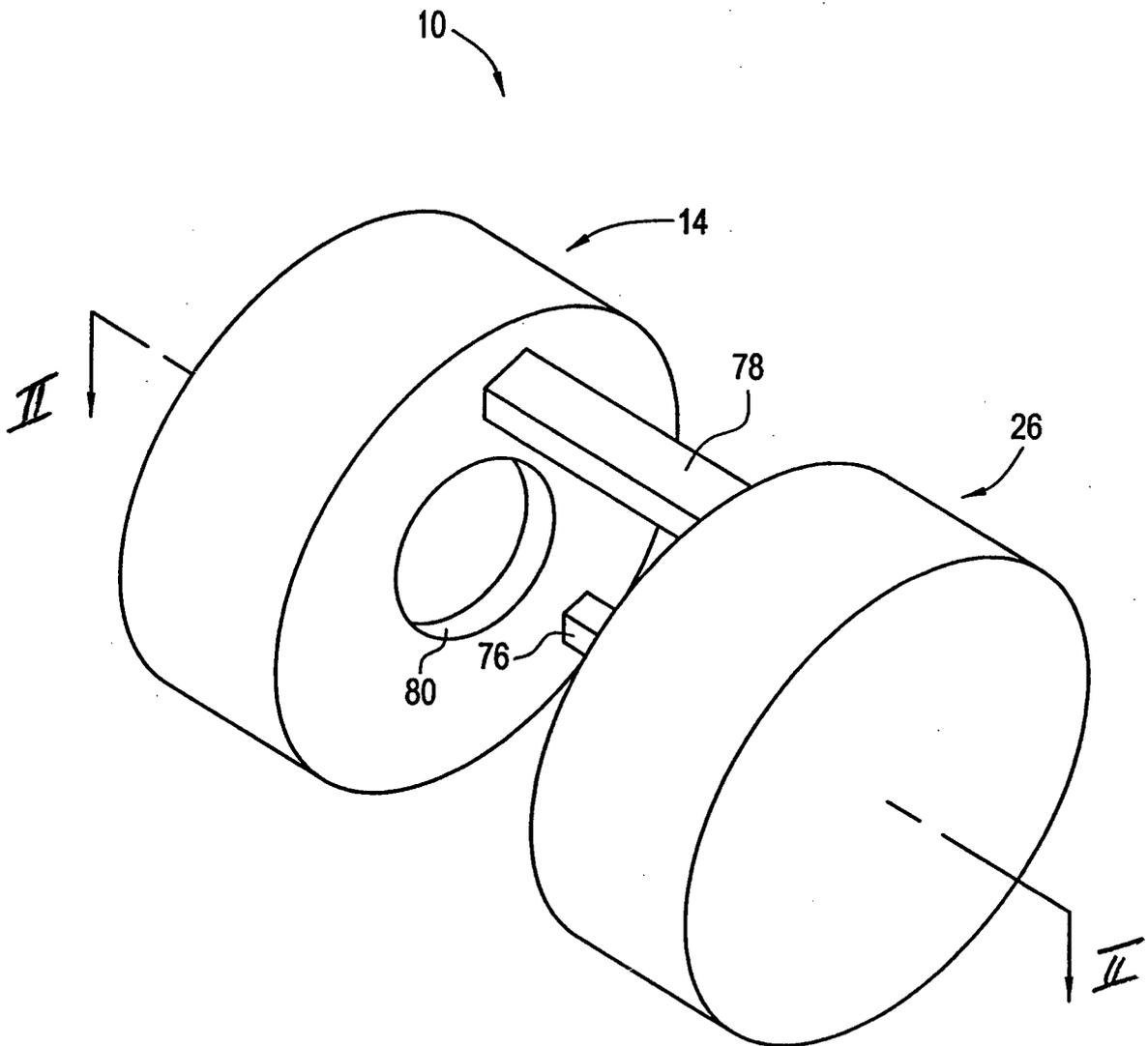
33. Verfahren nach Anspruch 32, wobei Schritt d) das Dewargefäß (20) der ersten Baugruppe (14) mit einem Leervolumen ausbildet, wobei in mindestens 60 % des Leervolumens des Dewargefäßes (20) der ersten Baugruppe (14) in Längsrichtung außerhalb des Polschuhs (18) der ersten Baugruppe (14) angeordnet sind, und wobei Schritt h) das Dewargefäß (32) der zweiten Baugruppe (26) mit einem Leervolumen ausbildet, wobei mindestens 60 % des Leervolumens des Dewargefäßes (32) der zweiten Baugruppe (26) in Längsrichtung außerhalb des Pol-

schuhs (30) der zweiten Baugruppe angeordnet sind.

34. Verfahren nach Anspruch 33, wobei Schritt j) die Dewarleitung (46) mit einem Leervolumen ausbildet, das vollständig radial auswärts des Stützpfeilers (42) angeordnet ist.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

FIG. 1



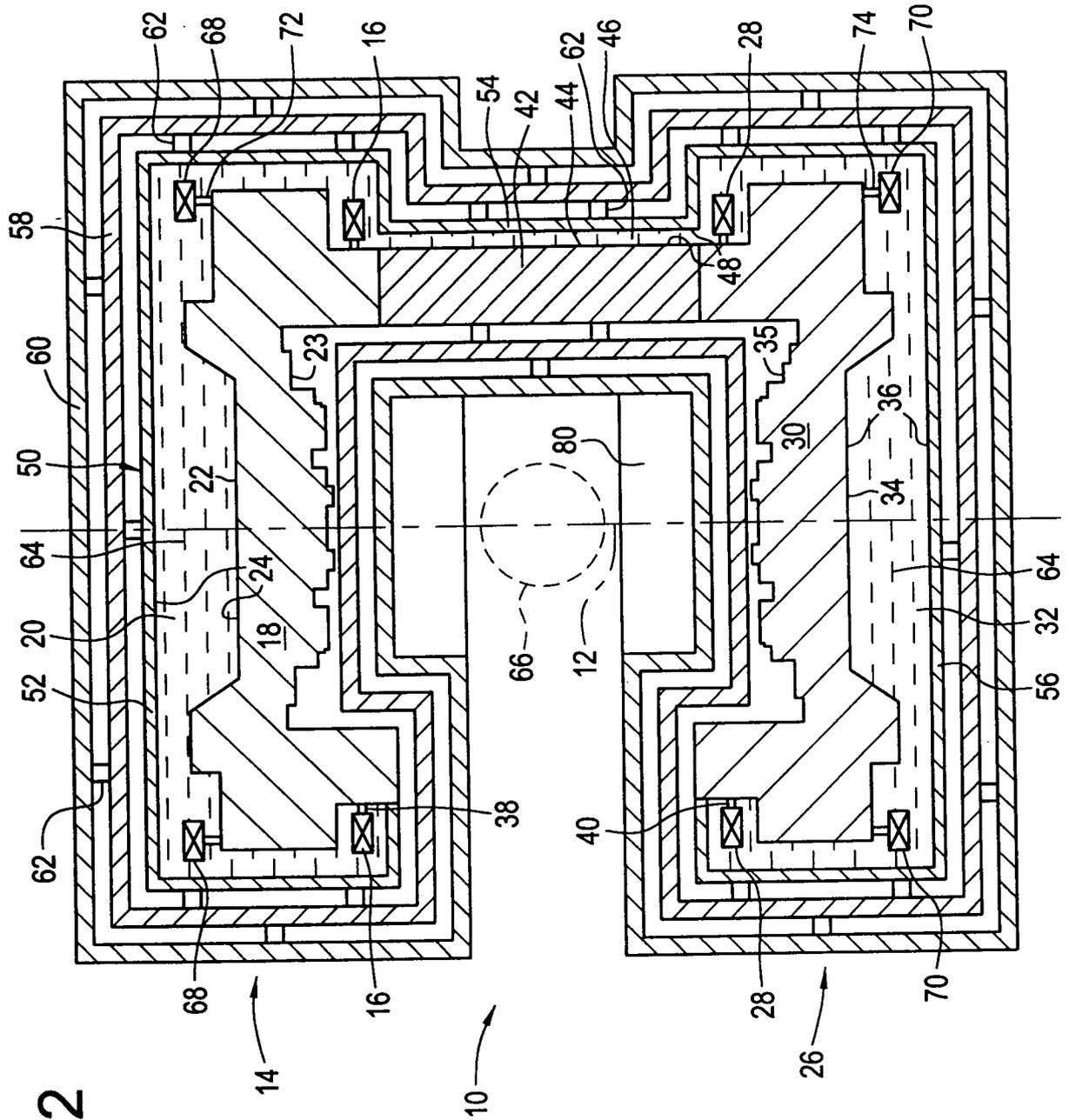


FIG. 2