



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
10.04.2019 Patentblatt 2019/15

(51) Int Cl.:
H01F 6/06 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **18198875.9**

(22) Anmeldetag: **05.10.2018**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME
Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN

(30) Priorität: **09.10.2017 DE 102017217930**

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

(72) Erfinder:
• **Wikus, Patrick**
8309 Nürensdorf (CH)
• **Hinderer, Jörg**
79761 Waldshut-Tiengen (DE)
• **Strobel, Marco**
76137 Karlsruhe (DE)

(74) Vertreter: **Kohler Schmid Möbus Patentanwälte Partnerschaftsgesellschaft mbB**
Gropiusplatz 10
70563 Stuttgart (DE)

(54) **MAGNETANORDNUNG MIT KRYOSTAT UND MAGNETSPULENSYSTEM, MIT KÄLTESPEICHERN AN DEN STROMZUFÜHRUNGEN**

(57) Eine Magnetanordnung (1), umfassend einen Kryostaten (2), ein supraleitendes Magnetpulensystem (3), eine aktive Kühleinrichtung (4) für das Magnetpulensystem (3) und Stromzuführungen (5a, 5b) zum Laden des Magnetpulensystems (3) im Kryostaten (2), wobei die Stromzuführungen (5a, 5b) zumindest einen normalleitenden Bereich (15a, 15b) umfassen, insbesondere wobei die Stromzuführungen (5a, 5b) auch einen HTS-Bereich (16a, 16b) umfassen, wobei entlang des normalleitenden Bereichs (15a, 15b) der Stromzuführungen (5a, 5b) mehrere Kältespeicher (20) an die Stromzuführungen (5a, 5b) thermisch gekoppelt sind, um beim Laden des Magnetpulensystems (3) im normalleitenden Bereich (15a, 15b) entstehende Wärme aufzunehmen,

ist dadurch gekennzeichnet, dass die Stromzuführungen (5a, 5b) im normalleitenden Bereich (15a, 15b) entlang ihrer Erstreckungsrichtung eine veränderliche Querschnittsfläche B aufweisen, wobei sich zumindest über einen überwiegenden Anteil der gesamten Länge der Stromzuführungen (5a, 5b) im normalleitenden Bereich (15a, 15b) die Querschnittsfläche B von einem kalten Ende (18a, 18b) zu einem warmen Ende (19a, 19b) hin verringert. Die Erfindung stellt eine Magnetanordnung bereit, bei der während des Ladens des supraleitenden Magnetpulensystems eine verringerte Kühlleistung benötigt wird, und im Normalbetrieb ein Wärmeeintrag in das supraleitende Magnetpulensystem verringert ist.

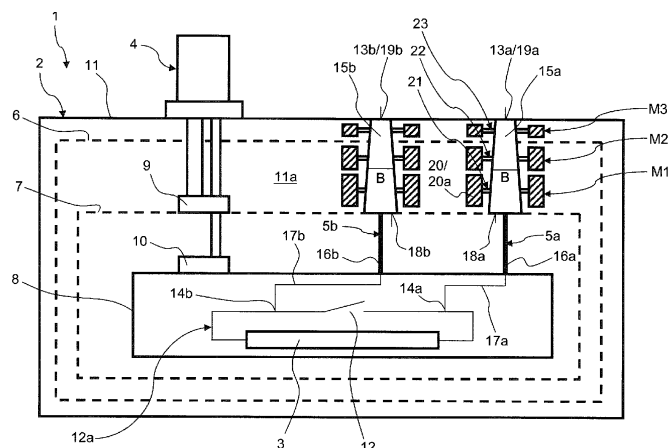


Fig. 1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Magnetanordnung, umfassend einen Kryostaten, ein supraleitendes Magnetspulensystem, eine aktive Kühleinrichtung für das Magnetspulensystem und Stromzuführungen zum Laden des Magnetspulensystems im Kryostaten, wobei die Stromzuführungen zumindest einen normalleitenden Bereich umfassen, insbesondere wobei die Stromzuführungen auch einen HTS-Bereich umfassen, wobei entlang des normalleitenden Bereichs der Stromzuführungen mehrere Kältespeicher an die Stromzuführungen thermisch gekoppelt sind, um beim Laden des Magnetspulensystems im normalleitenden Bereich entstehende Wärme aufzunehmen.

[0002] Eine solche Magnetanordnung ist aus der JP H04 23305 A bekannt geworden.

[0003] Für Kernspinresonanz(=NMR, nuclear magnetic resonance)-Messungen werden starke Magnetfelder benötigt, die mittels supraleitenden Magnetspulensystemen erzeugt werden können. Die supraleitenden Magnetspulensysteme können verlustfrei große elektrische Ströme tragen, mit denen die starken Magnetfeldstärken erzeugt werden. Allerdings ist für den supraleitenden Zustand eine Kühlung auf kryogene Temperaturen unterhalb der Sprungtemperatur des supraleitenden Materials im Magnetspulensystem nötig. Die supraleitenden Magnetspulensysteme werden daher in einem Kryostaten angeordnet. Um den Heliumverbrauch des Kryostaten zu minimieren, werden teilweise aktive Kühleinrichtungen verwendet, z.B. Pulsrohrkühler, mit denen eine kryogene Temperatur dauerhaft und kostengünstig unterhalten werden kann.

[0004] Um ein supraleitendes Magnetspulensystem innerhalb eines Kryostaten mit elektrischem Strom zu laden, verlaufen im Kryostaten von der raumtemperaturwarmen Außenwand des Kryostaten zum Magnetspulensystem Stromzuführungen. Zumindest ein Abschnitt dieser Stromzuführungen ist dabei normalleitend ("normalleitender Bereich"); ein unterer (magnetspulensystemnaher) Abschnitt der Stromzuführungen ist oft auch aus einem Hochtemperatursupraleiter(=HTS)-Material. Während des Ladens fließt durch die Stromzuführungen elektrischer Strom, welcher im normalleitenden Bereich eine ohmsche Wärme erzeugt. Während des Normalbetriebs (auch "steady state" Betrieb genannt) fließt durch die Stromzuführungen typischerweise kein elektrischer Strom ("persistent mode"), jedoch stellen die Stromzuführungen thermische Brücken dar, die Wärme in das Magnetspulensystem einbringen.

[0005] Typischerweise ist die Wärmelast beim Laden aufgrund mehrerer Effekte (z.B. Betrieb des "Persistent Mode Switches" oder ohmsche Dissipation in den Stromzuführungen) deutlich größer als im Normalbetrieb. Um zu verhindern, dass während des Ladens eine zu hohe, zu einem Quench (Verlust der Supraleitung) führende Temperatur am Magnetspulensystem oder auch im HTS-Bereich der Stromzuführungen entsteht, kann die aktive

Kühleinrichtung so groß dimensioniert werden, dass auch die Wärmelast des Ladens mit der Kühleinrichtung kompensiert werden kann. Dies führt aber zu hohen Herstellungskosten und hohen Unterhaltskosten, zu einer großen Baugröße und zu Anforderungen an Kühlung und Stromversorgung, die sich an der beim Laden benötigten Spitzenleistung orientieren müssen. Da das Laden typischerweise nur einige Stunden, der Normalbetrieb aber meist viele Wochen oder Monate dauert, wird die aktive Kühleinrichtung die meiste Zeit nicht ausgelastet.

[0006] Im Falle von mit einem flüssigen Kryogen (etwa flüssigem Helium) gefüllten Kryobehälter des Kryostaten kann beim Laden einfach ein hoher Kühlmittelverbrauch hingenommen werden, was aber hohe Kosten verursacht.

[0007] Aus der EP 2 624 262 A2 ist es bekannt, bei einem kryogenfreien Kryokühlersystem eine Stromzuführung an die obere Kühlstufe eines zweistufigen Kühlers zu koppeln, und im Bereich dieser oberen Kühlstufe weiterhin ein thermisches Trägheitsselement (thermal inertia member) anzukoppeln. Das thermische Trägheitsselement kann einen Temperaturanstieg beim Laden oder Entladen einer gekühlten supraleitenden Spule reduzieren.

[0008] Aus der JP H04 23305 A sind Stromzuführungen für ein supraleitendes Magnetsystem bekannt geworden, an denen Wärmespeichermaterial angeordnet ist. In einer Ausführungsform sind die Stromzuführungen rohrförmig ausgebildet, und das Wärmespeichermaterial ist in dem Rohr angeordnet, wobei das Wärmespeichermaterial im Inneren des Rohrs durch Schichten eines thermisch isolierenden Materials unterteilt ist. Die Stromzuführungen werden mit einem Heliumgasstrom gekühlt.

[0009] Aus der GB 2 506 009 A, der US 5 317 296, der CN 102 360 694 A und der CN 102 592 773 A sind trennbare Stromzuführungen für einen supraleitenden Magneten bekannt geworden. Durch Trennung der Stromzuführungen nach dem Laden kann im Normalbetrieb ein Wärmeeintrag verhindert werden. Dieser Ansatz ist jedoch technisch schwierig und mit hohen Herstellungskosten verbunden.

[0010] In der US 5 302 928 ist eine Stromzuführung für einen supraleitenden Magneten bekannt geworden, die zwischen dem Interface bei Raumtemperatur und der Magnetspule geteilt ist, und an der Stelle der Teilung an eine Wärmesenke angekoppelt ist. Nachteilig ist der Leitungsfortsatz (lead extension), der in den Strompfad eingebracht wird und durch zusätzliche Kontaktwiderstände zu erhöhtem ohmschen Widerstand führt.

[0011] In der JP H06 231950, der GB 2 476 716 A und der DE 10 2007 013 350 A1 sind Stromzuführungen bekanntgeworden, die mit flüssigen Kryogenen gekühlt werden.

[0012] In der DE 69 324 436 T2 ist ein supraleitendes Magnetsystem bekannt geworden, dessen Stromzuführungen an dem der Spule naheliegenden Ende aus Hochtemperatursupraleitermaterial besteht, und dessen warmes Ende nicht mechanisch befestigt ist.

[0013] In der US 5 586 437 wird ein MRI-Kryostat mit einem inneren Wärmeschild und einem äußeren Wärmeschild beschrieben, wobei zur Kühlung des äußeren Wärmeschildes eine eigene Kühleinrichtung vorgesehen ist.

Aufgabe der Erfindung

[0014] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Magnetanordnung bereit zu stellen, bei der während des Laden des supraleitenden Magnetspulensystems eine verringerte Kühlleistung benötigt wird, und im Normalbetrieb ein Wärmeeintrag in das supraleitende Magnetspulensystem verringert ist.

Kurze Beschreibung der Erfindung

[0015] Diese Aufgabe wird auf überraschend einfache und wirkungsvolle Weise gelöst durch eine Magnetanordnung der eingangs genannten Art, die dadurch gekennzeichnet ist, dass die Stromzuführungen im normalleitenden Bereich entlang ihrer Erstreckungsrichtung eine veränderliche Querschnittsfläche B aufweisen, wobei sich zumindest über einen überwiegenden Anteil der gesamten Länge der Stromzuführungen im normalleitenden Bereich die Querschnittsfläche B von einem kalten Ende zu einem warmen Ende hin verringert.

[0016] Im Rahmen der vorliegenden Erfindung wird vorgeschlagen, die Stromzuführungen in ihrem normalleitenden Bereich mit einer besonderen Geometrie zu versehen, um die Stromzuführungen für die Anforderungen beim Laden einerseits und im Normalbetrieb andererseits zu optimieren, wobei entlang des normalleitenden Bereichs der Stromzuführungen mehrere Kältespeicher an die Stromzuführungen thermisch gekoppelt sind.

[0017] Beim Laden der supraleitenden Magnetspule ist es wichtig, die ohmsche Wärmeentwicklung vor allem am kalten Ende der Stromzuführungen zu reduzieren. Daher sieht die Erfindung vor, zum kalten Ende hin die Querschnittsfläche (Senkrecht zur Längserstreckung bzw. Stromflussrichtung) zu vergrößern, so dass der ohmsche Widerstand zum kalten Ende hin, soweit er durch die Querschnittsfläche bedingt ist, gesenkt wird. Dadurch wird auch die Wärmeentwicklung nahe dem kalten Ende reduziert.

[0018] Im Normalbetrieb, aber auch beim Laden, ist es wichtig, den Wärmeeintrag in das supraleitende Magnetspulensystem über die Stromzuführungen als Wärmebrücke zur raumtemperaturwarmen Außenwand des Kryostaten zu reduzieren. Der Wärmeeintrag erfolgt vor allem von der raumtemperaturwarmen Außenwand des Kryostaten her. Daher wird erfindungsgemäß die Querschnittsfläche der Stromzuführungen zum raumtemperaturwarmen Ende hin verkleinert, was den Wärmeleitungswiderstand, soweit er durch die Querschnittsfläche bedingt ist, erhöht.

[0019] Durch die gleichzeitige Verteilung von mehreren Kältespeichern entlang der Stromzuführungen im

normalleitenden Bereich wird gewährleistet, dass die durch die Geometrie der Stromzuführungen erreichten lokalen Begrenzungen in der Wärmeentwicklung und dem Wärmeeintrag über längere Zeit genutzt werden können, und insbesondere nicht durch Wärmeleitung entlang der Stromzuführungen schnell ausgeglichen werden können. Die Kältespeicher verlangsamen die Ausgleichsprozesse; durch geeignete Dimensionierung der Kältespeicher (und geeignete Geometrie der Stromzuführungen) kann ohne weiteres die Dauer eines vollständigen Ladevorgangs abgepuffert werden.

[0020] Dadurch ist es möglich, das Laden mit einer vergleichsweise kleinen Kühlleistung während der Dauer des Ladevorgangs zu bewältigen, ohne dass das Magnetspulensystem oder ggf. ein supraleitender Abschnitt der Stromzuführungen zu warm wird und quenchet. Entsprechend kann eine kostengünstige aktive Kühleinrichtung mit vergleichsweise geringer Kühlleistung eingesetzt werden, die wenig Bauraum benötigt. Im Falle eines kryogenhaltigen Kryostaten kann der Kryogenverbrauch (Kühlmittelverbrauch) beim Laden minimiert werden. Gleichzeitig kann auch der Wärmeeintrag über die Stromzuführungen im Normalbetrieb gering gehalten werden, so dass auch hierfür nur eine geringe Kühlleistung benötigt wird und im Normalbetrieb nur geringe Betriebskosten anfallen.

[0021] Die Stromzuführungen im normalleitenden Bereich laufen typischerweise von einem Anschluss bei Raumtemperatur (warmes Ende) bis zum Magnetspulensystem oder bis zu einem HTS-Bereich (oder HTS-Abschnitt) der Stromzuführungen (kaltes Ende); die Stromzuführung im HTS-Bereich führt dann weiter zum Magnetspulensystem.

[0022] Das Magnetspulensystem hat typischerweise einen supraleitenden Kurzschlusschalter zur Einrichtung eines Dauerstrombetriebs (persistent mode). Bevorzugt kann der Kurzschlusschalter mit einem geringen Heizstrom bzw. einer geringen Heizleistung betrieben werden, etwa mit 50 mW oder weniger. Das Magnetspulensystem ist bevorzugt mit Tieftemperatursupraleiter (=LTS)-Materialien (insbesondere NbTi oder bevorzugt Nb₃Sn für höhere Betriebstemperaturen) ausgebildet. Vorteilhafter Weise ist der Betriebsstrom des Magnetspulensystems im Normalbetrieb niedrig, etwa 100 A oder weniger, bevorzugt 70 A oder niedriger. Bevorzugt kann das Magnetspulensystem mit hohen Ladespannungen geladen werden, beispielsweise mit 5 V oder mehr.

[0023] Die aktive Kühleinrichtung kann insbesondere ein Pulsrohrkühler oder ein Gifford-McMahon-Kühler sein. Eine bevorzugte Leistungsaufnahme der aktiven Kühleinrichtung liegt bei 2 kW oder weniger, insbesondere 1,5 kW oder weniger. Bevorzugt wird die aktive Kühleinrichtung ohne Kühlwasser bzw. luftgekühlt betrieben.

[0024] Die Querschnittsfläche B der Stromzuführungen im normalleitenden Bereich verringert sich typischerweise über die gesamte Länge des normalleitenden Bereichs vom kalten Ende hin zum warmen Ende, zumindest aber über einen überwiegenden Anteil der gesam-

ten Länge der Stromzuführungen im normalleitenden Bereich. Die Querschnittsverringerung kann kontinuierlich oder in Stufen oder in einer gemischten Form erfolgen. Manchmal sind Ausnahmen im Querschnittsflächenverlauf, insbesondere an Verbindungsstellen von Stromzuführungsteilen, nötig und/oder gewünscht. Solche Verbindungsstellen weisen meist eine geringere Querschnittsfläche B ("Lötpunkt"), seltener eine größere Querschnittsfläche ("Lötwulst") auf als die umgebenden Stromzuführungsteile. Diese Ausnahmen machen typischerweise weniger als 5%, meist weniger als 2%, der Gesamtlänge der Stromzuführungen im normalleitenden Bereich aus, und haben entsprechend nur geringen Einfluss auf die gesamte Wärmeentwicklung in den Stromleitungen beim Laden des Magnetspulensystems oder auf den gesamten Wärmeeintrag vom warmen Ende der Stromzuführungen her. Bevorzugt verringert sich die Querschnittsfläche B vom kalten Ende zum warmen Ende hin über einen Anteil von wenigstens 95%, bevorzugt wenigstens 98%, der gesamten Länge der Stromzuführungen im normalleitenden Bereich innerhalb des Kryostaten.

[0025] Bevorzugt ist die aktive Kühleinrichtung innerhalb eines Rohres angeordnet, das im Betrieb (insbesondere beim Laden und im Normalbetrieb) mit Gas gefüllt ist; dann ist ein Ausbau oder Tausch der aktiven Kühleinrichtung möglich, ohne das Isolationsvakuum des Kryostaten zu brechen. Beispielsweise kann dieses Rohr für eine der Stromzuführungen vorgesehen sein; diese ist ohnehin vorhanden und somit erhöht sich die Wärmelast im Normalbetrieb nicht weiter. Ebenso kann dieses Rohr das Halsrohr des Kryostaten sein, insbesondere wobei auch eine der Stromzuführungen im Halsrohr verläuft. Eine etwaige überschüssige Kühlleistung, die an einem Regenerator der aktiven Kühleinrichtung zur Verfügung steht, kann durch einen thermischen Kontakt über das Gas im Rohr für die Kühlung der Stromzuführung verwendet werden.

Bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung

[0026] Eine bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Magnetanordnung sieht vor, dass die Stromzuführungen im normalleitenden Bereich jeweils N aufeinanderfolgende Teilabschnitte aufweisen, mit $N \geq 2$, insbesondere $3 \leq N \leq 7$, wobei die Teilabschnitte jeweils eine innerhalb eines Teilabschnitts konstante Querschnittsfläche B_i aufweisen, und dass sich die Querschnittsflächen B_i vom kalten Ende zum warmen Ende hin verringern. Diese Ausführungsform ist baulich einfach zu realisieren; zudem kann das thermische Verhalten während eines Ladevorgangs relativ einfach simuliert und entsprechend die Geometrie der Stromzuführungen gut optimiert werden. Durch eine große Anzahl von Teilabschnitten können Wärmefluss und Wärmeentwicklung bzw. die Temperaturverteilung in den Stromzuleitungen genauer eingestellt werden. Man beachte, dass auch über die Verhältnisse B_i/H_i die-

se Einstellung weiter optimiert werden kann, mit H_i : Länge des Teilabschnitts i (entlang der Längsrichtung/Stromflussrichtung). Meist gilt auch $N \geq 3$ oder $N \geq 4$. Typischerweise ist je Teilabschnitt wenigstens ein angekoppelter Kältespeicher vorgesehen. Alternativ ist es auch möglich, die Querschnittsfläche einer Stromzuführung entlang der Erstreckungsrichtung kontinuierlich zu ändern.

[0027] Bei einer bevorzugten Weiterbildung dieser Ausführungsform sind unterschiedliche Teilabschnitte an unterschiedliche Kältespeicher thermisch gekoppelt. Bei dieser Bauform haben die Kältespeicher nur jeweils eine (direkte) Kopplung zu einem der Teilabschnitte; eine Verbindung zu anderen Teilabschnitten erfolgt nur indirekt über ersteren Teilabschnitt. Dadurch wird die Ausbildung eines starken Temperaturgradienten in den Stromzuleitungen erleichtert. Die Kältespeicher können die Teilbereiche beispielsweise jeweils näherungsweise in der Mitte (bezüglich der Erstreckungsrichtung) kontaktieren.

[0028] Bei einer anderen Weiterbildung ist jeweils an einem Übergang von zwei Teilabschnitten wenigstens ein Kältespeicher thermisch angekoppelt, insbesondere wobei auch am kalten Ende der Stromzuführung im normalleitenden Bereich wenigstens ein Kältespeicher thermisch angekoppelt ist. Dies ist meist baulich besonders einfach. Ein oder mehrere Kältespeicher am kalten Ende sorgen für einen besonders guten Schutz des supraleitenden Magnetspulensystems (oder eines HTS-Bereichs der Stromzuleitungen).

[0029] Bevorzugt ist auch eine Ausführungsform, bei der entlang der Stromzuführungen im normalleitenden Bereich jeweils K Stufen der thermischen Kopplung eingerichtet sind, wobei an jeder Stufe wenigstens ein Kältespeicher an die Stromzuführungen thermisch gekoppelt ist, mit $K \geq 2$, insbesondere $3 \leq K \leq 7$. Vorteilhaft ist auch $K \geq 3$ oder $K \geq 4$. Durch eine größere Zahl von Stufen der thermischen Kopplung kann der Wärmefluss bzw. die Temperaturverteilung in den Stromzuführungen genauer eingestellt werden. Zudem werden die Kältespeicher thermodynamisch effizienter eingesetzt. Bevorzugt ist im Falle von N Teilabschnitten jeweils konstanten Querschnitts B_i weiterhin $K=N$ oder $K=N+1$. Eine Stufe der thermischen Kopplung entspricht einer Kontaktierung einer Stromzuführung durch einen oder mehrere Kältespeicher bei einer bestimmten Längenposition entlang der Stromzuführung; unterschiedliche Stufen der thermischen Kopplung kontaktieren eine Stromzuführung im normalleitenden Bereich also an unterschiedlichen Längenpositionen.

[0030] Vorteilhaft ist eine Weiterbildung dieser Ausführungsform, bei der eine schwere Masse M_i von kältespeicherndem Material in dem wenigstens einen Kältespeicher einer jeweiligen Stufe der thermischen Kopplung über die Stufen vom kalten Ende zum warmen Ende hin abnimmt. Die spezifische Wärmekapazität der meisten kältespeichernden Materialien (etwa Metallen) nimmt mit

höherer Temperatur (im kryogenen Bereich) stark zu, so dass zum warmen Ende hin keine so großen (absoluten) schweren Massen benötigt werden. Der Begriff der "schweren" (also Gewichtskraft erzeugenden) Masse eines Kältespeichers wird hier verwendet, um eine Verwechslung mit der "thermischen Masse" (also der absoluten Wärmekapazität) zu vermeiden. Bevorzugt ist eine Ausführungsform, bei der der Kryostat als kryogenfreier Kryostat ausgebildet ist. In diesem Fall kann eine erhöhte Wärmelast während des Ladens nicht durch Inkaufnahme eines erhöhten Kryogenverbrauchs beim Laden ausgeglichen werden. Die Erfindung ermöglicht in diesem Fall die Nutzung einer aktiven Kühlvorrichtung mit kleiner Kühlleistung, die kostengünstig und kompakt ist. Ein Kryostat wird hier als kryogenfrei angesehen, wenn in keinem zu erwartenden Betriebszustand (also auch nicht beim Laden oder bei einem Quench) Kryogene aus dem System entweichen können. Typischerweise ist das Magnetspulensystem hierbei direkt im Vakuum des Vakuumbehälter angeordnet (und insbesondere nicht in einem Kryogentank mit flüssigem Kryogen, in welches das Magnetspulensystem eintaucht).

[0031] Bevorzugt ist auch eine Ausführungsform, bei der zumindest ein Teil der Kältespeicher als gasdichte Behälter ausgebildet ist, wobei ein Teil des Volumens der gasdichten Behälter mit einer verdampfbaren Substanz gefüllt ist. Bei dieser Bauform kann Wärmeenergie durch Verdampfen der (bei den im Betrieb vorherrschenden Temperaturen) verdampfbaren Substanz gebunden werden. Die verdampfbare Substanz kann zum Beispiel Stickstoff, Krypton oder Argon, und in einem kälteren Bereich auch Neon oder Helium sein. Man beachte, dass bei dieser Bauform die verdampfbare (meist flüssige) Substanz im Wesentlichen die "schwere Masse" des jeweiligen Kältespeichers bereitstellt. Man beachte weiterhin, dass der Behälter typischerweise aus schlecht wärmeleitfähigem Material besteht, etwa aus Edelstahl oder der Titanlegierung 15-3-3-3. Typischerweise sind entlang der Stromzuführungen mehrere Behälter in Serie geschaltet.

[0032] Eine vorteilhafte Weiterbildung dieser Ausführungsform sieht vor, dass die Stromzuführungen im normalleitenden Bereich zumindest teilweise innerhalb der Behälter verlaufen. Dadurch kann ein besonders guter Wärmefluss erfolgen. In den Behältern können Leitbleche und Strahlungsschilde (Baffles) angeordnet werden, um den Wärmefluss zwischen dem warmen und kalten Ende des Behälters durch Konvektion und/oder Wärmestrahlung zu minimieren.

[0033] Bevorzugt ist weiterhin eine Ausführungsform, bei der zumindest ein Teil der Behälter mit einem unteren Ende über ein Wärmeleitelement an eine Wärmesenke der aktiven Kühleinrichtung thermisch gekoppelt ist, und der Siedepunkt der im Behälter enthaltenen Substanz über der Temperatur der Wärmesenke liegt. Über das Wärmeleitelement kann dem Behälter (nach dem Laden) langsam Wärme entzogen werden, um die verdampfte Substanz wieder zu rekondensieren, typischerweise

langsam über mehrere Stunden oder auch mehrere Tage. Insbesondere können zwei Behälter in Serie eingesetzt werden, die an zwei unterschiedliche Kühlstufen der aktiven Kühleinrichtung (etwa eines Pulsrohrkühlers) gekoppelt werden.

[0034] Bevorzugt ist auch eine Ausführungsform, bei der zumindest ein Teil der Kältespeicher als metallische Körper ausgebildet sind. Diese Bauform ist besonders einfach und robust. Ein guter thermischer Kontakt zwischen den (metallischen) Stromzuführungen im normalleitenden Bereich und den metallischen Körpern ist leicht direkt einzurichten.

[0035] Vorteilhaft ist dabei eine Ausführungsform, bei der mehrere als metallische Körper ausgebildete Kältespeicher voneinander beabstandet in einem Vakuumbereich des Kryostaten angeordnet sind. Dies vermeidet auf einfache Weise thermische Kurzschlüsse der Kältespeicher, insbesondere zwischen Kältespeichern verschiedener Stufen der thermischen Kopplung.

[0036] Besonders bevorzugt ist eine Ausführungsform, bei der weiterhin eine aktive Hilfskühleinrichtung vorhanden ist, die an einen Teil (Teilstück) der Stromzuführungen im normalleitenden Bereich thermisch gekoppelt ist, insbesondere wobei eine tiefste Arbeitstemperatur AT_{hilf} der Hilfskühleinrichtung höher ist als eine tiefste Arbeitstemperatur AT_{mss} der aktiven Kühleinrichtung für das Magnetspulensystem. Mit der Hilfskühleinrichtung kann den Stromzuführungen zusätzlich Wärmeenergie entzogen werden, insbesondere beim Laden; dadurch kann die aktive Kühleinrichtung (die vor allem das Magnetspulensystem kühlen soll) entlastet werden. Die Hilfskühleinrichtung hat typischerweise ein AT_{hilf} in einem Bereich von -70°C bis -30°C , meist von -60°C bis -50°C , was relativ einfach (insbesondere mit geringer Leistungsaufnahme) zu erreichen ist; hingegen liegt AT_{mss} meist bei 4 K bis 10 K (-269°C bis -263°C). Eine Hilfskühleinrichtung bzw. eine entsprechende Kühlwendel (zugehöriger Wärmetauscher) ist typischerweise im Vakuumbehälter (im Vakuum) angeordnet.

[0037] Eine Weiterbildung dieser Ausführungsform sieht vor, dass die Hilfskühleinrichtung weiterhin an einen Strahlungsschild des Kryostaten und/oder einen Vakuumbehälter des Kryostaten und/oder eine Temperiereinrichtung für eine zu untersuchende Probe thermisch gekoppelt ist. Dadurch wird die aktive Kühleinrichtung zusätzlich entlastet, insbesondere im Normalbetrieb. Wird die Hilfskühleinrichtung genutzt, um den Vakuumbehälter des Kryostaten unter die Umgebungstemperatur abzukühlen, ist es vorteilhaft, den Vakuumbehälter thermisch zu isolieren. Besonders geeignet sind dafür z.B. Kunststoffschäume. Damit kann z.B. Kondenswasserbildung vorgebeugt werden.

[0038] Bevorzugt ist zudem eine Ausführungsform, bei der sich die Querschnittsfläche B vom kalten Ende zum warmen Ende hin um wenigstens einen Faktor 3 verändert. Durch einen Faktor von 3 oder mehr (bezogen auf den überwiegenden Anteil der Stromzuführungen im normalleitenden Bereich) kann bereits eine sehr deutliche

Entlastung der aktiven Kühleinrichtung bezüglich der Wärmelast beim Laden erreicht werden.

[0039] In den Rahmen der vorliegenden Erfindung fällt auch eine Verwendung einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung, wobei das Magnetspulensystem über die Stromzuführungen geladen wird und ein Ladestrom so gewählt wird und die veränderliche Querschnittsfläche B und/oder die Kältespeicher so eingerichtet sind, dass für eine Wärmelast WL_{laden} , die auf eine kälteste Stufe der Stromzuführungen im normalleitenden Bereich während des Ladens maximal einwirkt, und für eine Wärmelast WL_{gg} auf diese kälteste Stufe in einem Gleichgewichtszustand mit geladenem Magnetspulensystem gilt:

$WL_{\text{laden}} \leq 5 \cdot WL_{\text{gg}}$, insbesondere $WL_{\text{laden}} \leq 2 \cdot WL_{\text{gg}}$. Die kälteste Stufe (oder Stufe der thermischen Kopplung) entspricht dem Bereich der Stromzuführung, an dem der dem kalten Ende nächste Kältespeicher (oder Kältespeichersatz bei gleicher Längenposition auf den Stromzuführungen) thermisch angekoppelt ist. Die angegebenen Verhältnisse sind im Rahmen der Erfindung gut zu erreichen, und ermöglichen die Nutzung von aktiven Kühleinrichtungen (Kryokühlern) mit geringer Kühlleistung, was kostengünstig ist, einen kompakten Bau der Magnetanordnung ermöglicht und dazu beiträgt, die Integration des Systems in ein Kundenlabor so einfach wie möglich zu gestalten.

[0040] Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der Zeichnung. Ebenso können die vorstehend genannten und die noch weiter ausgeführten Merkmale erfindungsgemäß jeweils einzeln für sich oder zu mehreren in beliebigen Kombinationen Verwendung finden. Die gezeigten und beschriebenen Ausführungsformen sind nicht als abschließende Aufzählung zu verstehen, sondern haben vielmehr beispielhaften Charakter für die Schilderung der Erfindung.

Detaillierte Beschreibung der Erfindung und Zeichnung

[0041] Die Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung, mit metallischen Körpern als Kältespeicher;

Fig. 2 eine schematische Darstellung einer zweiten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung, mit Behältern gefüllt mit verdampfbarer Substanz als Kältespeicher;

Fig. 3 eine schematische Darstellung einer Stromzuführung im normalleitenden Bereich für die Erfindung, mit Teilabschnitten konstanter Querschnittsfläche, mit mittig kontaktierenden Kältespeichern;

Fig. 4 eine schematische Darstellung einer Stromzuführung im normalleitenden Bereich für die Erfindung, mit Teilabschnitten konstanter Querschnittsfläche, mit Kältespeichern am Übergang von Teilabschnitten;

Fig. 5 eine schematische Darstellung einer dritten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung, mit Hilfskühleinrichtung zur Kühlung des äußeren Strahlungsschilds;

Fig. 6 eine schematische Darstellung einer vierten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung, mit Hilfskühleinrichtung zur Kühlung des äußeren Strahlungsschilds und einer Temperiervorrichtung einer zu untersuchenden Probe.

[0042] Die Fig. 1 zeigt schematisch eine erste Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung 1. Diese umfasst einen Kryostaten 2, ein Magnetspulensystem 3, eine aktive Kühleinrichtung 4 und hier zwei Stromzuführungen 5a, 5b zum Laden des Magnetspulensystems 3.

[0043] Der Kryostat 3 ist hier mit einem Vakuumbehälter 11, einem äußeren Strahlungsschild 6, einem mittleren Strahlungsschild 7 und einem inneren Strahlungsschild 8 ausgebildet. Der Vakuumbehälter 11, der gleichzeitig die Außenwand des Kryostaten 2 bildet, befindet sich auf Raumtemperatur (ca. 20°C). Der äußere Strahlungsschild 6 ist bei ca. 213 K (ca. -60°C). Der mittlere Strahlungsschild 7 koppelt an eine obere Kühlstufe 9 der aktiven Kühlvorrichtung 4 bei ca. 50 K, und der innere Strahlungsschild 8 koppelt an eine untere Kühlstufe 10 der aktiven Kühlvorrichtung bei ca. 3,5 K; letzteres stellt auch die tiefste Arbeitstemperatur AT_{mss} der aktiven Kühleinrichtung 4 dar.

[0044] Im Inneren des inneren Strahlungsschilds 8 ist im Vakuum das Magnetspulensystem 3 angeordnet, welches über einen Schalter 12 eines Lade- und Kurzschlussstromkreises 12a supraleitend kurzschließbar ist. Das vom Magnetspulensystem 3 erzeugte Magnetfeld kann im Normalbetrieb beispielsweise für eine NMR-Messung verwendet werden. Der innere Strahlungsschild 8 kann auch gasdicht ausgebildet sein, sodass zur Verbesserung der thermischen Leitfähigkeit beispielsweise etwas gasförmiges Helium vorgesehen werden bzw. enthalten sein kann, das im Rahmen des Betriebs (einschließlich Laden und Normalbetrieb) allerdings nicht eingefüllt werden muss und auch nicht entweichen kann ("kryogenfreier Kryostat"). Alternativ zum kryogenfreien Kryostat kann der Kryostat 2 auch als kryogenhaltiger Kryostat ausgebildet sein (in Fig. 1 nicht näher dargestellt). In diesem Fall ist anstelle des inneren Strahlungsschilds 8 ein Kryobehälter vorgesehen, welcher typischerweise flüssiges Kryogen (etwa Helium) enthält, in welches das Magnetspulensystem 3 ganz oder teilweise eingetaucht ist. Das Kryogen im Kryobehälter kann

beim kryogenhaltigen Kryostaten bei Bedarf im Betrieb nachgefüllt werden, gegebenenfalls auch während des Ladens.

[0045] Die Stromzuführungen 5a, 5b führen von Anschlüssen 13a, 13b am Vakuumbehälter 11 durch den Kryostaten 3 bis zu Anschlüssen 14a, 14b am Lade- und Kurzschlussstromkreis 12a. Die Stromzuführungen 5a, 5b umfassen dabei in der gezeigten Ausführungsform jeweils einen normalleitenden Bereich 15a, 15b (zwischen Vakuumbehälter 11 und mittlerem Strahlungsschild 7), einen HTS-Bereich 16a, 16b (zwischen mittlerem Strahlungsschild 7 und innerem Strahlungsschild 8) und einen LTS-Bereich (innerhalb des inneren Strahlungsschildes 8).

[0046] Die Stromzuführungen 5a, 5b im normalleitenden Bereich 15a, 15b weisen hier jeweils eine sich vom kalten (magnetspulensystemnahen) Ende 18a, 18b zum warmen (Raumtemperatur-anschlussnahen) Ende 19a, 19b hin kontinuierlich verkleinernde Querschnittsfläche B auf, erkennbar an einem sich nach oben hin verkleinernden Durchmesser; beispielhaft ist hier die Querschnittsfläche B etwa in der Mitte (entlang der Längsrichtung) der Stromzuführungen 5a, 5b im normalleitenden Bereich 15a, 15b eingezeichnet. Die Querschnittsfläche B verringert sich im gezeigten Ausführungsbeispiel um einen Faktor von ca. 3 (man beachte, dass der Durchmesser quadratisch in die Querschnittsfläche B eingeht, wobei das Durchmesser Verhältnis kalt zu warm hier bei ca. 1,75 liegt). Die Querschnittsverringerung ist hier über die gesamte (vertikale) Länge der Stromzuführungen 5a, 5b im normalleitenden Bereich 15a, 15b eingerichtet. Entlang der Stromzuführungen 5a, 5b im normalleitenden Bereich 15a, 15b sind Kältespeicher 20 an diese angekoppelt. Die Kältespeicher 20 sind hier als metallische Massen 20a ausgebildet. Im gezeigten Beispiel sind dabei jeweils drei Stufen 21, 22, 23 der thermischen Kopplung eingerichtet, wobei an jeder der Stufen 21, 22, 23 jeweils zwei Kältespeicher 20 (links und rechts) bei der gleichen Längenposition (die Längenrichtung verläuft in Fig. 1 vertikal) angekoppelt sind. Die Kältespeicher 20 der kältesten Stufe 21 haben insgesamt eine schwere Masse M1 die größer ist als die gesamte schwere Masse M2 der Kältespeicher 20 der mittleren Stufe 22, und die gesamte schwere Masse M2 der Kältespeicher 20 der mittleren Stufe 22 ist wiederum größer als die gesamte schwere Masse M3 der Kältespeicher 20 der wärmsten Stufe 23. Die Kältespeicher 20 der unterschiedlichen Stufen 21-23, und hier auch innerhalb der Stufen 21-23, sind im Vakuumbereich 11a des Vakuumbehälters 11 voneinander beabstandet angeordnet, um einen thermischen Kurzschluss zu vermeiden.

[0047] Am unteren, kalten Ende 18a, 18b sind die Stromzuführungen 5a, 5b an den mittleren Strahlungsschild 7 gekoppelt, so dass eine gewisse Kühlleistung der oberen Kaltstufe 9 der aktiven Kühleinrichtung 4 genutzt werden kann. Zudem kontaktiert hier auch der äußere Strahlungsschild 6 die Stromzuführungen 5a, 5b in normalleitenden Bereich 15a, 15b, hier zwischen den

Stufen 22 und 23; alternativ kann auch eine nicht-koppelnde Durchführung am äußeren Strahlungsschild 6 vorgesehen sein.

[0048] Beim Laden (oder Entladen) des Magnetspulensystems 3 über die Stromzuleitungen 5a, 5b entsteht Wärme in den Stromzuführungen 5a, 5b im normalleitenden Bereich 15a, 15b, die die Kältespeicher 20 durch Erwärmen der metallischen Massen 20a zumindest teilweise kompensieren, wodurch ein Wärmeeintrag in den HTS-Bereich 16a, 16b der Stromleitungen 5a, 5b oder gar in das Magnetspulensystem 3 verringert wird. Die sich zum kalten Ende 18a, 18b hin erweiternde Geometrie der Stromzuführungen 5a, 5b im normalleitenden Bereich 15a, 15b verringert dabei die ohmsche Wärmeentwicklung nahe dem kalten Ende 18a, 18b, und verringert einen Wärmeeintrag vom raumtemperaturwarmen warmen Ende 19a, 19b her. Die Wärmelast (Wärmeffluss "nach unten") im Bereich der untersten Stufe 21 beim Laden WL_{laden} kann dabei im Vergleich zur Wärmelast im Gleichgewichtszustand im Normalbetrieb WL_{gg} begrenzt werden, so dass gilt $WL_{\text{laden}} \leq 2 \cdot WL_{\text{gg}}$. Die verbleibende Wärmelast WL_{laden} kann durch die aktive Kühleinrichtung 4 kompensiert werden, so dass sich das supraleitende Magnetspulensystem 3 und auch nicht der HTS-Bereich 16a, 16b der Stromzuführungen 5a, 5b unzulässig (über die jeweilige Sprungtemperatur) erwärmt.

[0049] Die Fig. 2 zeigt eine zweite Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung 1, die weitgehend der Bauform von Fig. 1 entspricht; es werden nachfolgend nur die wesentlichen Unterschiede erläutert.

[0050] Der Kryostat 2 verfügt hier über lediglich einen äußeren Strahlungsschild 6, der an der oberen Kühlstufe 9 der aktiven Kühleinrichtung 4 angekoppelt ist, sowie einen inneren Strahlungsschild 8, der an die untere Kühlstufe 10 angekoppelt ist, nicht jedoch über einen mittleren Strahlungsschild.

[0051] Die Stromzuführungen 5a, 5b im normalleitenden Bereich 15a, 15b verlaufen hier jeweils mit zwei zylinderförmigen Teilabschnitten 25, 26, wobei der kältere Teilabschnitt 25 eine deutlich größere Querschnittsfläche B_1 im Vergleich zur Querschnittsfläche B_2 des wärmeren Teilabschnitt 26 hat.

[0052] Der untere Teilabschnitt 25 verläuft im Wesentlichen in einem Kältespeicher 20, der mit einem gasdichten Behälter 27 und einer darin enthaltenen, verdampfbaren Substanz 28 ausgebildet ist. Die verdampfbare Substanz 28 liegt flüssig vor; etwas verdampfbare Substanz 28 ist bereits im Behälter 27 verdampft. Das untere Ende des Behälters 27 ist über ein Wärmeleitelement 29 mit der unteren Kühlstufe 10 der aktiven Kühleinrichtung 4 gekoppelt.

[0053] Der obere Teilabschnitt 26 verläuft im Wesentlichen in einem Kältespeicher 20, der mit einem gasdichten Behälter 30 und einer darin enthaltenen, verdampfbaren Substanz 28 ausgebildet ist. Das untere Ende des Behälters 30 ist über ein Wärmeleitelement 29 mit der oberen Kühlstufe 9 der aktiven Kühleinrichtung 4 gekop-

pelt.

[0054] Der untere Behälter 27 ist deutlich größer als der obere Behälter 30, und der untere Behälter 27 enthält deutlich mehr (bezogen auf die schwere Masse) verdampfbare Substanz 28 als der obere Behälter 30.

[0055] Beim Laden (oder Entladen) des Magnetspulensystems 3 über die Stromzuleitungen 5a, 5b entsteht Wärme in den Behältern 27, 30, die durch Verdampfen von verdampfbarer Substanz 28 (was den Gasdruck in den Behältern 27, 30 erhöht) zumindest teilweise kompensiert, wodurch ein Wärmeeintrag in den HTS-Bereich 16a, 16b der Stromzuführungen 5a, 5b oder gar in das Magnetspulensystem 3 im inneren Strahlungsschild 8 verringert wird. Im Normalbetrieb kann gespeicherte Wärmeenergie über die Wärmeleitelemente 29 an die Kühlstufen 9, 10, die als Wärmesenken wirken, allmählich wieder abgegeben werden, so dass die verdampfte Substanz wieder rekondensieren kann. Bei der Auslegung der Behälter 27, 30 ist zu beachten, dass das Verdampfen und Rekondensieren isochore Prozesse sind, da aus den Behältern 27, 30 im Betrieb keine Substanz entweichen darf. Die Veränderung der latenten Wärme bei steigendem Druck und steigender Temperatur im jeweiligen Behälter 27, 30 muss entsprechend berücksichtigt werden.

[0056] Die Fig. 3 zeigt eine Stromzuführung 5a im normalleitenden Bereich 15a für die Erfindung. Diese umfasst hier N=4 aufeinanderfolgende Teilabschnitte 41, 42, 43, 44, wobei jeder Teilabschnitt 41-44 eine eigene, einheitliche Querschnittsfläche B1-B4 aufweist. Die Querschnittsflächen B1-B4 nehmen vom kalten Ende 18a zum warmen Ende 19a hin ab.

[0057] Die unterschiedlichen Teilabschnitte 41-44 sind an unterschiedliche Kältespeicher 20, hier in Gestalt von metallischen Körpern 20a, gekoppelt. Die jeweils zwei gekoppelten Kältespeicher 20 eines Teilabschnitts 41-44 kontaktieren ihren Teilabschnitt 41-44 hier jeweils näherungsweise mittig bezogen auf die vertikale Längsrichtung der Stromzuführung 5a mittels eines kurzen Brückenelements 45. Die Anzahl K der Stufen thermischer Kopplung, hier jeweils ausgebildet durch die Kontaktierung von zwei Kältespeichern 20 an einer gemeinsamen Längenposition, beträgt hier ebenfalls 4, so dass hier K=N=4 ist. Die gesamten schweren Massen M_i der Kältespeicher 20 der vier Stufen der thermischen Kopplung nimmt vom kalten Ende 18a zum warmen Ende 19a hin ab.

[0058] Man beachte, dass für eine Einstellung eines bestimmten Wärmeflusses oder Temperaturprofils auch das Verhältnis B_i/H_i bei den verschiedenen Teilabschnitten 41-44 variiert werden kann, mit H_i: Länge des Teilabschnitts i, mit i=1 bis 4 für die Teilabschnitte 41-44. Typischerweise nimmt das Verhältnis B_i/H_i vom kalten Ende 18a zum warmen Ende 19a hin ab.

[0059] In der Fig. 4 ist eine weitere Stromzuführung 5a im normalleitenden Bereich 15a gezeigt, die weitgehend der Bauform von Fig. 3 entspricht, so dass nur die wesentlichen Unterschiede erläutert werden.

[0060] Die Kältespeicher 20 sind hier jeweils an den Übergängen zwischen den Teilabschnitten 41-44 mit kurzen Brückenelementen 45 angekoppelt, und zusätzlich ist ein Paar Kältespeicher 20 am unteren, kalten Ende 18a der Stromzuführung 5a im normalleitenden Bereich 15a über Brückenelemente 45 angekoppelt.

[0061] Die Stromzuführung 5a ist hier integral aus einem einzigen Teil gefertigt, z.B. als eine in entsprechender Form zurechtgeschnittene Metallplatte.

[0062] Die Fig. 5 zeigt eine dritte Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung 1, die weitgehend der Bauform von Fig. 1 entspricht; es werden nachfolgend nur die wesentlichen Unterschiede erläutert.

[0063] Neben der aktiven Kühleinrichtung 4 ist hier auch eine aktive Hilfskühleinrichtung 50 vorhanden, die über einen Wärmetauscher 51 an den äußeren Strahlungsschild 6 gekoppelt ist. Der äußere Strahlungsschild 6 kontaktiert wiederum einen Teil (ein Teilstück) der Stromzuführungen 5a, 5b in normalleitenden Bereich 15a, 15b, hier zwischen den Stufen 22, 23 der thermischen Kopplung. Die Hilfskühleinrichtung 50 kann hier eine tiefste Arbeitstemperatur AT_{hilf} von ca. -60°C erreichen.

[0064] Über die Hilfskühleinrichtung 50 kann ein Teil der beim Laden auftretenden Wärmelast aus den Stromzuführungen 5a, 5b im normalleitenden Bereich 15a, 15b abgeleitet werden, so dass die aktive Kühleinrichtung 4 entlastet wird. Es ist auch möglich, die Kühlung im Normalbetrieb mit der Hilfskühleinrichtung 50 zu unterstützen.

[0065] Die Fig. 6 zeigt eine vierte Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung 1, die weitgehend der Bauform von Fig. 5 entspricht, so dass nachfolgend nur die wesentlichen Unterschiede erläutert werden.

[0066] Die aktive Hilfskühleinrichtung 50 kühlt hier nicht nur den Wärmetauscher 51 zum äußeren Strahlungsschild 6, sondern auch einen Wärmetauscher 52, der seinerseits einen Wärmetauscher 53 einer Temperiertorrichtung 54 für eine zu untersuchende Probe 55 kühlt. Die zu untersuchende Probe 55 wird während ihrer Vermessung durch NMR-Spektroskopie in einer nicht näher dargestellten auf konstanter Temperatur gehalten, wobei das im Normalbetrieb vom Magnetspulensystem 3 der Magnetanordnung 1 erzeugte Magnetfeld genutzt wird.

Bezugszeichenliste

[0067]

1	Magnetanordnung
2	Kryostat
3	supraleitendes Magnetspulensystem
4	aktive Kühleinrichtung
5a, 5b	Stromzuführungen
6	äußerer Strahlungsschild

7	mittlerer Strahlungsschild	
8	innerer Strahlungsschild	
9	obere Kühlstufe (Wärmesenke)	
10	untere Kühlstufe (Wärmesenke)	
11	Vakuumbehälter	5
11a	Vakuumbereich	
12	supraleitender Schalter	
12a	supraleitender Lade- und Kurzschlussstromkreis	
13a, 13b	Anschluss (am Vakuumbehälter)	10
14a, 14b	Anschluss (am Lade- und Kurzschlussstromkreis)	
15a, 15b	normalleitender Bereich	
16a, 16b	HTS-Bereich	
17a, 17b	LTS-Bereich	15
18a, 18b	kaltetes Ende	
19a, 19b	warmes Ende	
20	Kältespeicher	
20a	metallischer Körper	
21	kälteste Stufe der thermischen Kopplung	20
22	mittlere Stufe der thermischen Kopplung	
23	wärmste Stufe der thermischen Kopplung	
25, 26	Teilabschnitt	
27	Behälter	
28	verdampfbare Substanz	25
29	Wärmeleitelement	
30	Behälter	
41-44	Teilabschnitt	
45	Brückenelement	
50	aktive Hilfskühleinrichtung	30
51-53	Wärmetauscher	
54	Temperiervorrichtung	
55	Probe	
B	Querschnittsfläche	
B1-B4	Querschnittsfläche (Teilabschnitt)	35
H1-H4	Länge (Teilabschnitt)	
M1-M3	schwere Massen	

Patentansprüche

1. Magnetanordnung (1), umfassend einen Kryostaten (2), ein supraleitendes Magnetspulensystem (3), eine aktive Kühleinrichtung (4) für das Magnetspulensystem (3) und Stromzuführungen (5a, 5b) zum Laden des Magnetspulensystems (3) im Kryostaten (2),
wobei die Stromzuführungen (5a, 5b) zumindest einen normalleitenden Bereich (15a, 15b) umfassen, insbesondere wobei die Stromzuführungen (5a, 5b) auch einen HTS-Bereich (16a, 16b) umfassen, wobei entlang des normalleitenden Bereichs (15a, 15b) der Stromzuführungen (5a, 5b) mehrere Kältespeicher (20) an die Stromzuführungen (5a, 5b) thermisch gekoppelt sind, um beim Laden des Magnetspulensystems (3) im normalleitenden Bereich (15a, 15b) entstehende Wärme aufzunehmen, **dadurch gekennzeichnet**,

dadurch die Stromzuführungen (5a, 5b) im normalleitenden Bereich (15a, 15b) entlang ihrer Erstreckungsrichtung eine veränderliche Querschnittsfläche B aufweisen,
wobei sich zumindest über einen überwiegenden Anteil der gesamten Länge der Stromzuführungen (5a, 5b) im normalleitenden Bereich (15a, 15b) die Querschnittsfläche B von einem kalten Ende (18a, 18b) zu einem warmen Ende (19a, 19b) hin verringert.

2. Magnetanordnung (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, **dadurch** die Stromzuführungen (5a, 5b) im normalleitenden Bereich (15a, 15b) jeweils N aufeinanderfolgende Teilabschnitte (25, 26; 41-44) aufweisen, mit $N \geq 2$, insbesondere $3 \leq N \leq 7$, wobei die Teilabschnitte (25, 26; 41-44) jeweils eine innerhalb eines Teilabschnitts (25, 26; 41-44) konstante Querschnittsfläche B_i aufweisen, und dass sich die Querschnittsflächen B_i vom kalten Ende (18a, 18b) zum warmen Ende (19a, 19b) hin verringern.
3. Magnetanordnung (1) nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, **dadurch** unterschiedliche Teilabschnitte (25, 26; 41-44) an unterschiedliche Kältespeicher (20) thermisch gekoppelt sind.
4. Magnetanordnung (1) nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, **dadurch** jeweils an einem Übergang von zwei Teilabschnitten (25, 26; 41-44) wenigstens ein Kältespeicher (20) thermisch angekoppelt ist, insbesondere wobei auch am kalten Ende (18a, 18b) der Stromzuführung (5a, 5b) im normalleitenden Bereich (15a, 15b) wenigstens ein Kältespeicher (20) thermisch angekoppelt ist.
5. Magnetanordnung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, **dadurch** entlang der Stromzuführungen (5a, 5b) im normalleitenden Bereich (15a, 15b) jeweils K Stufen der thermischen Kopplung (21-23) eingerichtet sind, wobei an jeder Stufe (21-23) wenigstens ein Kältespeicher (20) an die Stromzuführungen (5a, 5b) thermisch gekoppelt ist, mit $K \geq 2$, insbesondere $3 \leq K \leq 7$.
6. Magnetanordnung (1) nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, **dadurch** eine schwere Masse M_i von kältespeicherndem Material in dem wenigstens einen Kältespeicher (20) einer jeweiligen Stufe der thermischen Kopplung (21-23) über die Stufen (21-23) vom kalten Ende (18a, 18b) zum warmen Ende (19a, 19b) hin abnimmt.
7. Magnetanordnung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, **dadurch** der Kryostat (2) als

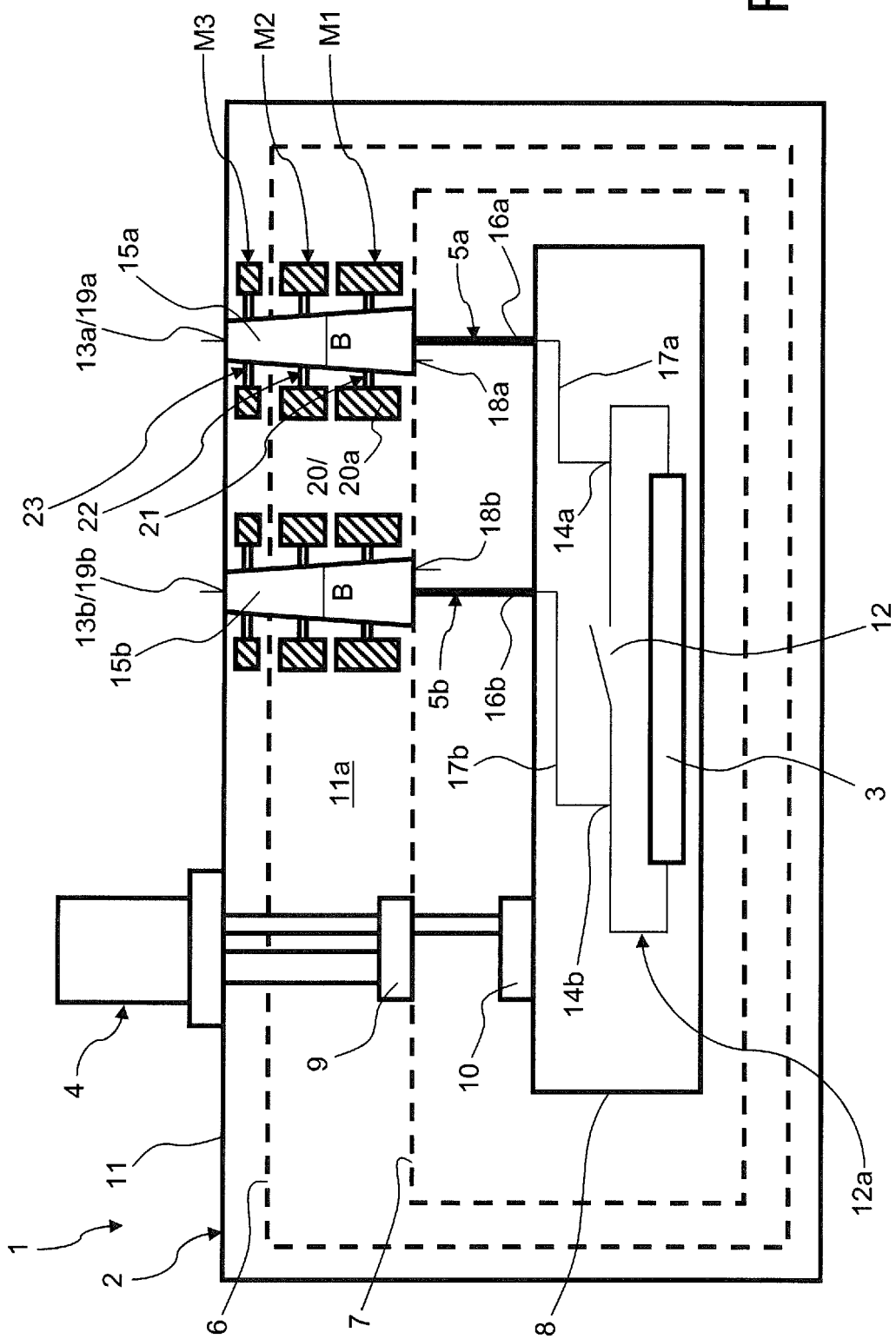
kryogenfreier Kryostat (2) ausgebildet ist.

8. Magnetanordnung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein Teil der Kältespeicher (20) als gasdichte Behälter (27, 30) ausgebildet ist, wobei ein Teil des Volumens der gasdichten Behälter (27, 30) mit einer verdampfba-
 ren Substanz (28) gefüllt ist. 5
9. Magnetanordnung (1) nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Stromzuführungen (5a, 5b) im normalleitenden Bereich (15a, 15b) zumindest teilweise innerhalb der Behälter (27, 30) verlaufen. 10
10. Magnetanordnung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein Teil der Behälter (27, 30) mit einem unteren Ende über ein Wärmeleitelement (29) an eine Wärmesenke (9, 10) der aktiven Kühleinrichtung (4) thermisch gekoppelt ist, und der Siedepunkt der im Behälter (27, 30) enthaltenen Substanz (28) über der Temperatur der Wärmesenke (9, 10) liegt. 15 20 25
11. Magnetanordnung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein Teil der Kältespeicher (20) als metallische Körper (20a) ausgebildet sind. 30
12. Magnetanordnung (1) nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** mehrere als metallische Körper (20a) ausgebildete Kältespeicher (20) voneinander beabstandet in einem Vakuumbereich (11a) des Kryostaten (2) angeordnet sind. 35
13. Magnetanordnung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass weiterhin eine aktive Hilfskühleinrichtung (50) vorhanden ist, die an einen Teil der Stromzuführungen (5a, 5b) im normalleitenden Bereich (15a, 15b) thermisch gekoppelt ist, insbesondere wobei eine tiefste Arbeitstemperatur AT_{hilf} der Hilfskühleinrichtung (50) höher ist als eine tiefste Arbeitstemperatur AT_{mss} der aktiven Kühleinrichtung (4) für das Magnetspulensystem (3). 40 45
14. Magnetanordnung (1) nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Hilfskühleinrichtung (50) weiterhin an einen Strahlungsschild (6, 7, 8) des Kryostaten (2) und/oder einen Vakuumbehälter (11) des Kryostaten (2) und/oder eine Temperiertvorrichtung (54) für eine zu untersuchende Probe (55) thermisch gekoppelt ist. 50 55
15. Magnetanordnung (1) nach einem der vorhergehenden

den Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, dass sich die Querschnittsfläche B vom kalten Ende (18a, 18b) zum warmen Ende (19a, 19b) hin um wenigstens einen Faktor 3 verändert.

16. Verwendung einer Magnetanordnung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
 wobei das Magnetspulensystem (3) über die Stromzuführungen (5a, 5b) geladen wird und ein Ladestrom so gewählt wird und die veränderliche Querschnittsfläche B und/oder die Kältespeicher (20) so eingerichtet sind, dass für eine Wärmelast WL_{laden} , die auf eine kälteste Stufe (21) der Stromzuführungen (5a, 5b) im normalleitenden Bereich (15a, 15b) während des Ladens maximal einwirkt, und für eine Wärmelast WL_{gg} auf diese kälteste Stufe (21) in einem Gleichgewichtszustand mit geladenem Magnetspulensystem (3) gilt:
 $WL_{\text{laden}} \leq 5 \cdot WL_{\text{gg}}$, insbesondere $WL_{\text{laden}} \leq 2 \cdot WL_{\text{gg}}$.



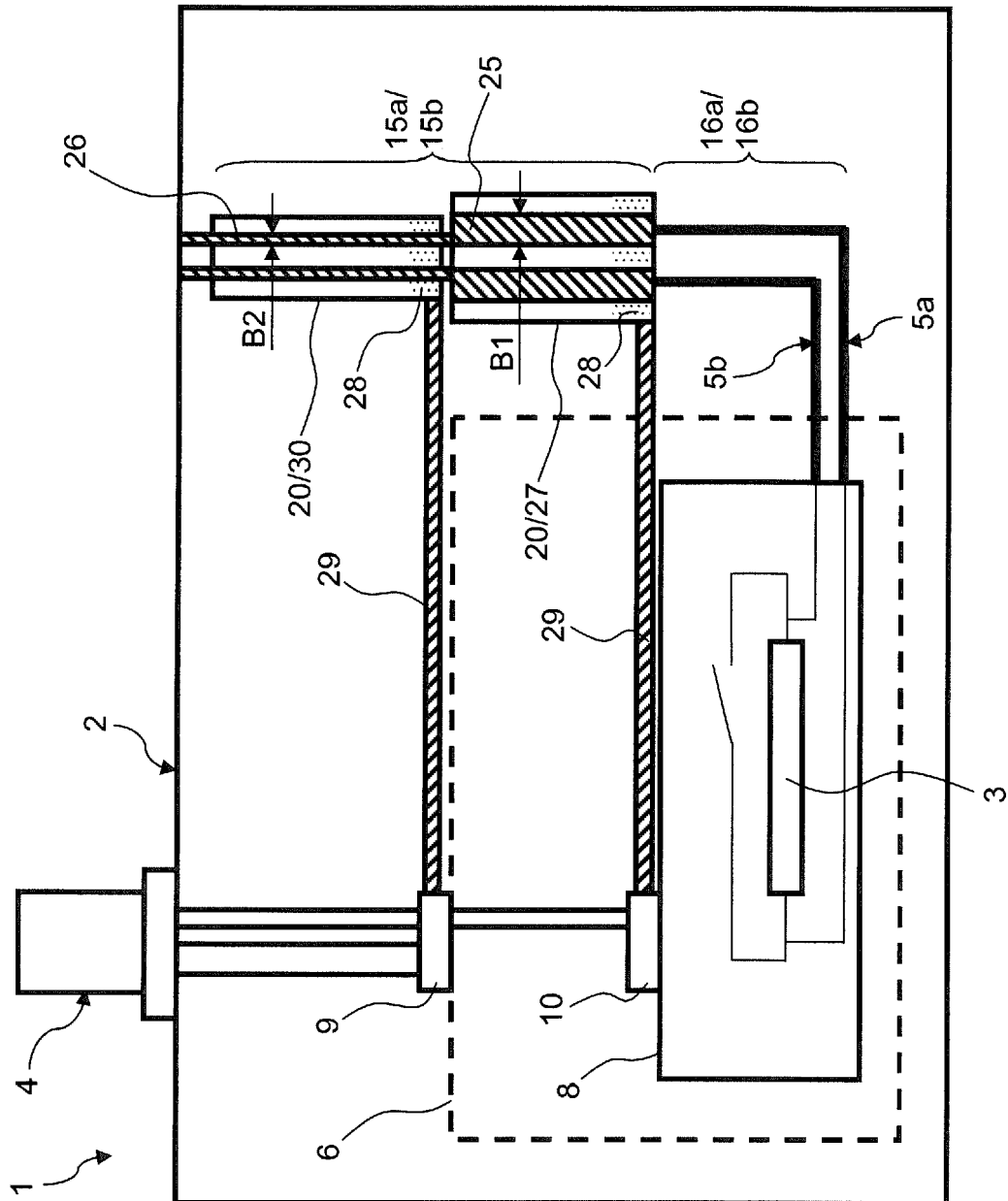
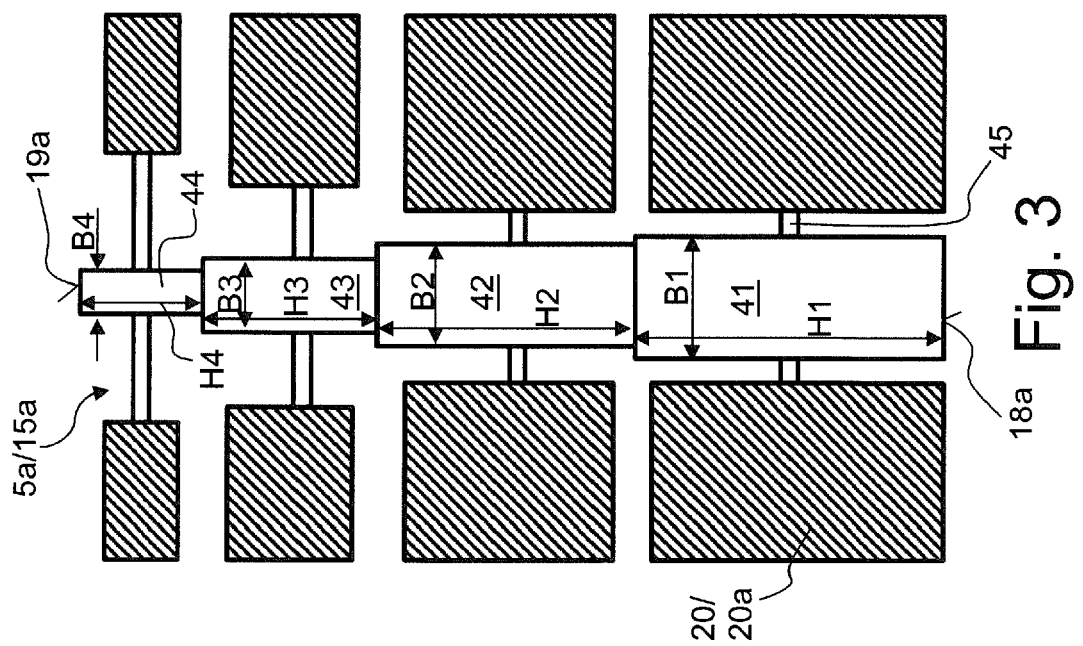
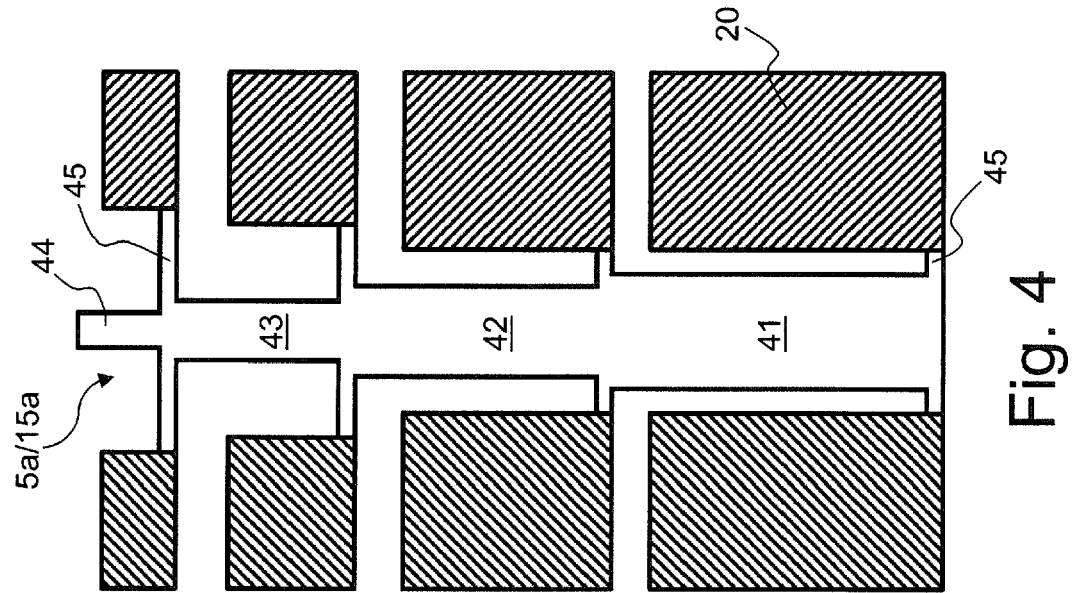


Fig. 2



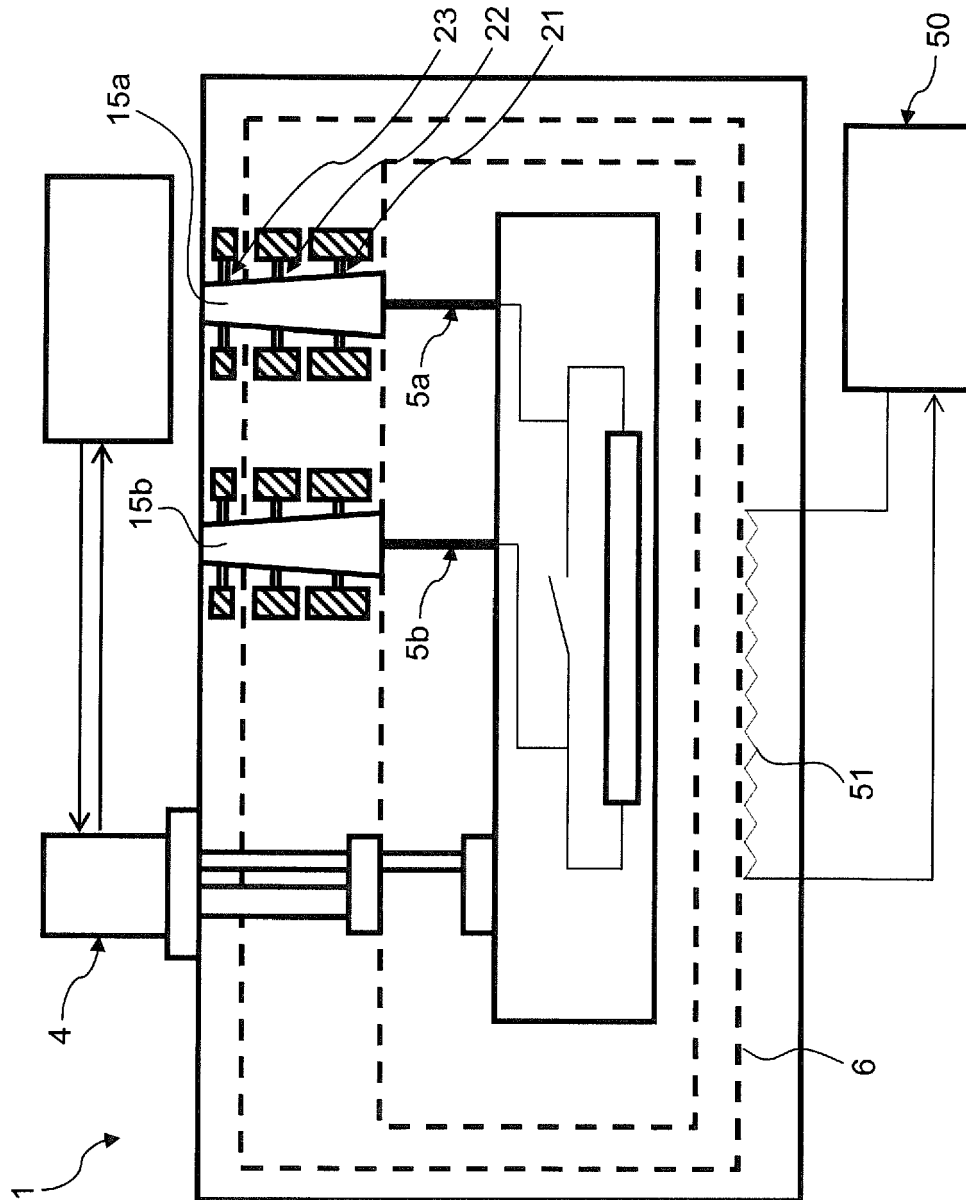


Fig. 5

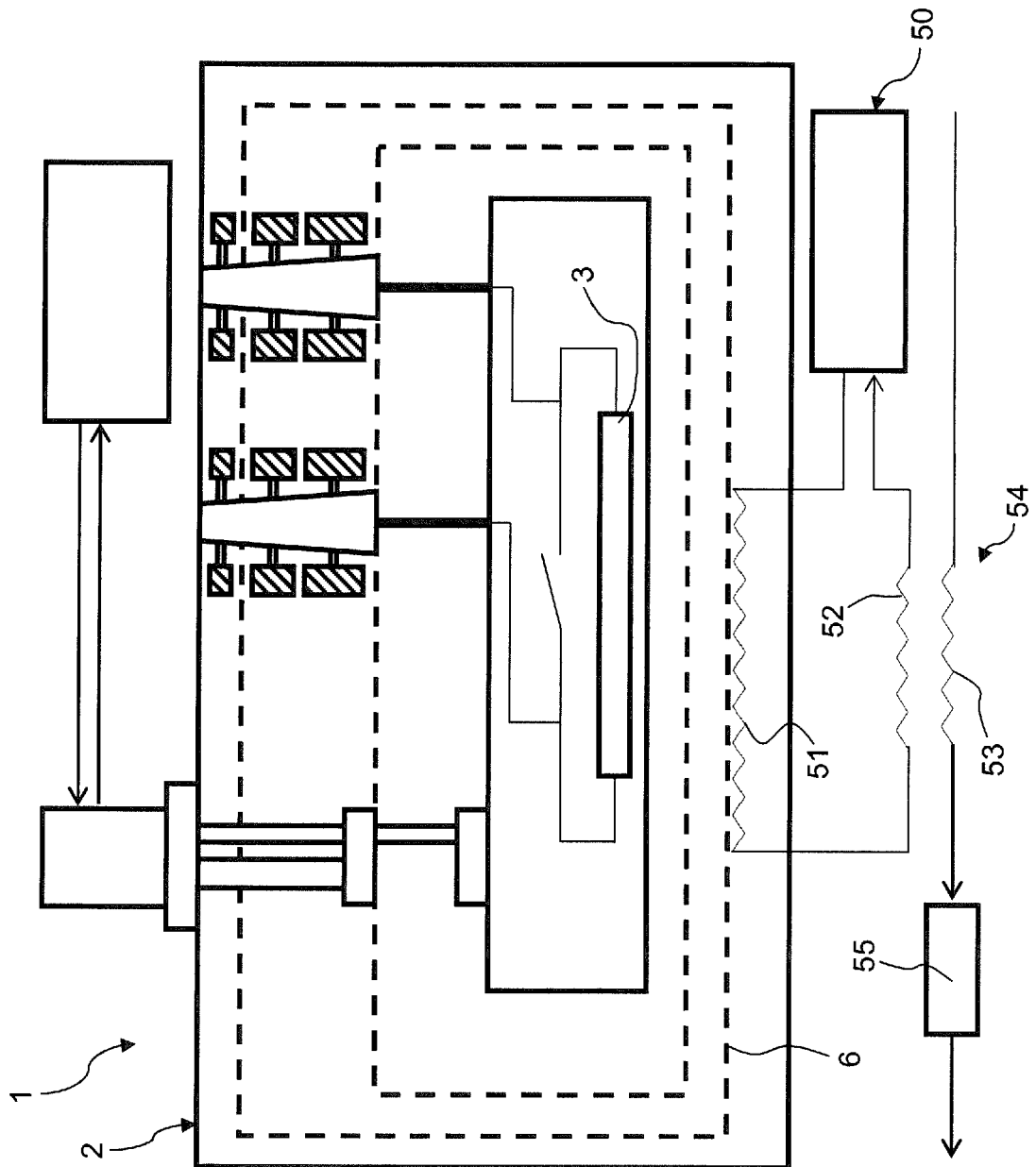


Fig. 6



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung
EP 18 19 8875

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
A,D	DE 693 24 436 T2 (SUMITOMO HEAVY INDUSTRIES [JP]) 26. August 1999 (1999-08-26) * Seite 4, Zeile 4 - Seite 5, Zeile 10; Abbildungen 1-7 *	1-16	INV. H01F6/06
A,D	JP H04 23305 A (HITACHI LTD) 27. Januar 1992 (1992-01-27) * Zusammenfassung * * Abbildungen 2,3 *	1-16	
A,D	GB 2 506 009 A (GEN ELECTRIC [US]) 19. März 2014 (2014-03-19) * Zusammenfassung * * Seite 4, Zeile 1 - Seite 5, Zeile 1; Abbildung 1 *	1-16	
A,D	GB 2 476 716 A (GENERAL ELECTRIC CO) 6. Juli 2011 (2011-07-06) * Zusammenfassung * * Seite 4, Absatz 2; Abbildungen 2,3 *	1-16	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			H01F
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 7. Februar 2019	Prüfer Winkelman, André
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 18 19 8875

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

07-02-2019

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 69324436 T2	26-08-1999	DE 69324436 D1	20-05-1999
		DE 69324436 T2	26-08-1999
		DE 69333128 D1	04-09-2003
		DE 69333128 T2	22-04-2004
		EP 0596249 A2	11-05-1994
		EP 0837478 A1	22-04-1998
		US 5623240 A	22-04-1997

JP H0423305 A	27-01-1992	JP 2821549 B2	05-11-1998
		JP H0423305 A	27-01-1992

GB 2506009 A	19-03-2014	CN 103578682 A	12-02-2014
		GB 2506009 A	19-03-2014
		JP 2014027273 A	06-02-2014
		US 2014028316 A1	30-01-2014

GB 2476716 A	06-07-2011	CN 102117691 A	06-07-2011
		GB 2476716 A	06-07-2011
		JP 2011222959 A	04-11-2011

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- JP H0423305 A [0002] [0008]
- EP 2624262 A2 [0007]
- GB 2506009 A [0009]
- US 5317296 A [0009]
- CN 102360694 A [0009]
- CN 102592773 [0009]
- CN A [0009]
- US 5302928 A [0010]
- JP H06231950 B [0011]
- GB 2476716 A [0011]
- DE 102007013350 A1 [0011]
- DE 69324436 T2 [0012]
- US 5586437 A [0013]