

(19)



(11)

EP 3 467 852 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
15.04.2020 Patentblatt 2020/16

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

(21) Anmeldenummer: **18198875.9**

(22) Anmeldetag: **05.10.2018**

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

MAGNET ASSEMBLY WITH CRYOSTAT AND MAGNET COIL SYSTEM, WITH COLD STORAGE AT THE POWER CONNECTIONS

DISPOSITIF MAGNÉTIQUE POURVU DE CRYOSTAT ET DE SYSTÈME DE BOBINES MAGNÉTIQUES, D'ACCUMULATEURS DE FROID SUR LES ALIMENTATIONS EN COURANT

(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

- **Hinderer, Jörg**
79761 Waldshut-Tiengen (DE)
- **Strobel, Marco**
76137 Karlsruhe (DE)

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

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

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
10.04.2019 Patentblatt 2019/15

(73) Patentinhaber: **Bruker Switzerland AG**
8117 Fällanden (CH)

(56) Entgegenhaltungen:
DE-T2- 69 324 436 GB-A- 2 476 716
GB-A- 2 506 009 JP-A- H0 423 305

(72) Erfinder:
• **Wikus, Patrick**
8309 Nürens Dorf (CH)

EP 3 467 852 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

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 Trägheitselement (thermal inertia member) anzukoppeln. Das thermische Trägheitselement 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 Wärmeleitwiderstand, 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 quent. 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 Tieftemperatur-supraleiter (=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 normaleitenden 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 ("Lötunkt"), seltener eine größere Querschnittsfläche ("Lötulst") auf als die umgebenden Stromzuführungsteile. Diese Ausnahmen machen typischerweise weniger als 5%, meist weniger als 2%, der Gesamtlänge der Stromzuführungen im normaleitenden 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 normaleitenden 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 normaleitenden 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 Teilbereich 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 normaleitenden 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 normaleitenden 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 normaleitenden 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.

[0031] 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).

[0032] 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.

[0033] 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.

[0034] 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.

[0035] 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.

[0036] 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.

[0037] 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.

[0038] Eine Weiterbildung dieser Ausführungsform sieht vor, dass die Hilfskühleinrichtung weiterhin an einen Strahlungsschild des Kryostaten und/oder einen Vakuumbehälter des Kryostaten und/oder eine Temperier Vorrichtung 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.

[0039] 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 nor-

malleitenden Bereich) kann bereits eine sehr deutliche Entlastung der aktiven Kühleinrichtung bezüglich der Wärmelast beim Laden erreicht werden.

[0040] 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 normaleitenden 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.

[0041] 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

[0042] 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 normaleitenden Bereich für die Erfindung, mit Teilabschnitten konstanter Querschnittsfläche, mit mittig kontaktierenden Käl-

tespeichern;

Fig. 4 eine schematische Darstellung einer Stromzuführung im normaleitenden 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 Strahlungsschildes;

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

[0043] 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.

[0044] 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.

[0045] Im Inneren des inneren Strahlungsschildes 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").

[0046] 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 Strahlungsschildes 8 ein Kryobehälter vorgesehen, welcher typischerweise flüssiges Kryo-

gen (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.

[0047] 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).

[0048] Die Stromzuführungen 5a, 5b im normalleitenden Bereich 15a, 15b weisen hier jeweils eine sich vom kalten (magnetspulensystemnahen) Ende 18a, 18b zum warmen (Raumtemperaturanschlussnahen) 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 Querschnittsverringeringung ist hier über die gesamte (vertikale) Länge der Stromzuführungen 5a, 5b im normalleitenden Bereich 15a, 15b eingerichtet.

[0049] 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.

[0050] 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 ä-

ußere 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.

[0051] 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 (Wärmefluss "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.

[0052] 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.

[0053] 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.

[0054] 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.

[0055] 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.

[0056] 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 gekoppelt.

[0057] 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.

[0058] Beim Laden (oder Entladen) des Magnetspulensystems 3 über die Stromzuleitungen 5a, 5b entsteht Wärme in den Behältern 27, 30, die durch Verdampfen von verdampfbare 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.

[0059] 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.

[0060] 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.

[0061] 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.

[0062] In der Fig. 4 ist eine weitere Stromzuführung 5a im normalleitenden Bereich 15a gezeigt, die weitge-

hend der Bauform von Fig. 3 entspricht, so dass nur die wesentlichen Unterschiede erläutert werden.

[0063] 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.

[0064] Die Stromzuführung 5a ist hier integral aus einem einzigen Teil gefertigt, z.B. als eine in entsprechender Form zurechtgeschnittene Metallplatte.

[0065] 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.

[0066] 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.

[0067] 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.

[0068] 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.

[0069] 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 Temperier Vorrichtung 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 Raumtemperaturbohrung des Kryostaten 2 durch die Temperier Vorrichtung 54 auf konstanter Temperatur gehalten, wobei das im Normalbetrieb vom Magnetspulensystem 3 der Magnetanordnung 1 erzeugte Magnetfeld genutzt wird.

Bezugszeichenliste

[0070]

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
11a	Vakuumbereich
12	supraleitender Schalter
12a	supraleitender Lade- und Kurzschlussstromkreis
13a, 13b	Anschluss (am Vakuumbehälter)
14a, 14b	Anschluss (am Lade- und Kurzschlussstromkreis)
15a, 15b	normalleitender Bereich
16a, 16b	HTS-Bereich
17a, 17b	LTS-Bereich
18a, 18b	kaltes Ende
19a, 19b	warmes Ende
20	Kältespeicher
20a	metallischer Körper
21	kälteste Stufe der thermischen Kopplung
22	mittlere Stufe der thermischen Kopplung
23	wärmste Stufe der thermischen Kopplung
25,26	Teilabschnitt
27	Behälter
28	verdampfbare Substanz
29	Wärmeleitelement
30	Behälter
41-44	Teilabschnitt
45	Brückenelement
50	aktive Hilfskühleinrichtung
51-53	Wärmetauscher
54	Temperiervorrichtung
55	Probe
B	Querschnittsfläche
B1-B4	Querschnittsfläche (Teilabschnitt)
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 Magnet-

spulensystems (3) im normalleitenden Bereich (15a, 15b) entstehende Wärme aufzunehmen, **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.

2. Magnetanordnung (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** 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, dass** unterschiedliche Teilabschnitte (25, 26; 41-44) an unterschiedliche Kältespeicher (20) thermisch gekoppelt sind.
4. Magnetanordnung (1) nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** 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, dass** 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, dass** 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, dass** 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 verdampfbaren Substanz (28) gefüllt ist.
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. Magnetanordnung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche 8 und 9, **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.
11. Magnetanordnung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zumindest ein Teil der Kältespeicher (20) als metallische Körper (20a) ausgebildet sind.
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.
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).
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 Temperiervorrichtung (54) für eine zu untersuchende Probe (55) thermisch gekoppelt ist.
15. Magnetanordnung (1) nach einem der vorhergehenden

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.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

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:

$$WL_{\text{laden}} \leq 5 \cdot WL_{\text{gg}}, \text{ insbesondere } WL_{\text{laden}} \leq 2 \cdot WL_{\text{gg}}.$$

Claims

1. A magnet assembly (1), comprising a cryostat (2), a superconducting magnet coil system (3), an active cooling device (4) for the magnet coil system (3), and current leads (5a, 5b) for charging the magnet coil system (3) in the cryostat (2), wherein the current leads (5a, 5b) comprise at least one normal-conducting region (15a, 15b), in particular wherein the current leads (5a, 5b) also comprise an HTS region (16a, 16b), wherein multiple cold reservoirs (20) are thermally coupled to the current leads (5a, 5b) along the normal-conducting region (15a, 15b) of the current leads (5a, 5b), in order to absorb the heat arising in the normal-conducting region (15a, 15b) during the charging of the magnet coil system (3), **characterized in that** the current leads (5a, 5b) have a variable cross-sectional area B in the normal-conducting region (15a, 15b) along the extension direction thereof, wherein at least over a predominant fraction of the overall length of the current leads (5a, 5b) in the normal-conducting region (15a, 15b), the cross-sectional area B decreases from a cold end (18a, 18b) toward a warm end (19a, 19b).
2. The magnet assembly (1) as claimed in claim 1, **characterized in that** the current leads (5a, 5b) in the normal-conducting region (15a, 15b) each have N successive subsections (25, 26; 41-44), with $N \geq 2$, in particular $3 \leq N \leq 7$, wherein the subsections (25, 26; 41-44) each have a constant cross-sectional area B_i within a subsection (25, 26; 41-44), and the cross-sectional areas B_i decrease from the cold end (18a, 18b) toward the warm end (19a, 19b).

3. The magnet assembly (1) as claimed in claim 2, **characterized in that** different subsections (25, 26; 41-44) are thermally coupled to different cold reservoirs (20).
4. The magnet assembly (1) as claimed in claim 2, **characterized in that** at least one cold reservoir (20) is thermally coupled on at each transition of two subsections (25, 26; 41-44), in particular wherein at least one cold reservoir (20) is also thermally coupled on at the cold end (18a, 18b) of the current lead (5a, 5b) in the normal-conducting region (15a, 15b).
5. The magnet assembly (1) as claimed in any one of the preceding claims, **characterized in that** K stages of the thermal coupling (21-23) are configured along each of the current leads (5a, 5b) in the normal-conducting region (15a, 15b), wherein at least one cold reservoir (20) is thermally coupled to the current leads (5a, 5b) at each stage (21-23), with $K \geq 2$, in particular $3 \leq K \leq 7$.
6. The magnet assembly (1) as claimed in claim 5, **characterized in that** a heavy mass M_i of cold-storing material in the at least one cold reservoir (20) of a respective stage of the thermal coupling (21-23) decreases over the stages (21-23) from the cold end (18a, 18b) toward the warm end (19a, 19b).
7. The magnet assembly (1) as claimed in any one of the preceding claims, **characterized in that** the cryostat (2) is designed as a cryogen-free cryostat (2).
8. The magnet assembly (1) as claimed in any one of the preceding claims, **characterized in that** at least a part of the cold reservoirs (20) is formed as gas-tight containers (27, 30), wherein a part of the volume of the gas-tight containers (27, 30) is filled with an evaporable substance (28).
9. The magnet assembly (1) as claimed in claim 8, **characterized in that** the current leads (5a, 5b) extend at least partially inside the containers (27, 30) in the normal-conducting region (15a, 15b).
10. The magnet assembly (1) as claimed in one of the preceding claims 8 and 9, **characterized in that** at least a part of the containers (27, 30) is thermally coupled with a lower end via a heat conduction element (29) to a heat sink (9, 10) of the active cooling device (4), and the boiling point of the substance (28) contained in the container (27, 30) is greater than the temperature of the heat sink (9, 10).
11. The magnet assembly (1) as claimed in any one of the preceding claims, **characterized in that** at least a part of the cold reservoirs (20) are formed as metallic bodies (20a).
12. The magnet assembly (1) as claimed in claim 11, **characterized in that** multiple cold reservoirs (20) formed as metallic bodies (20a) are arranged spaced apart from one another in a vacuum region (11a) of the cryostat (2).
13. The magnet assembly (1) as claimed in any one of the preceding claims, **characterized in that** furthermore an active auxiliary cooling device (50) is provided, which is thermally coupled to a part of the current leads (5a, 5b) in the normal-conducting region (15a, 15b), in particular wherein a lowest working temperature AT_{hilf} of the auxiliary cooling device (50) is higher than a lowest working temperature AT_{mss} of the active cooling device (4) for the magnet coil system (3).
14. The magnet assembly (1) as claimed in claim 13, **characterized in that** the auxiliary cooling device (50) is furthermore thermally coupled to a radiation shield (6, 7, 8) of the cryostat (2) and/or a vacuum container (11) of the cryostat (2) and/or a temperature control device (54) for a sample (55) to be studied.
15. The magnet assembly (1) as claimed in any one of the preceding claims, **characterized in that** the cross-sectional area B changes from the cold end (18a, 18b) toward the warm end (19a, 19b) by at least a factor of 3.
16. The use of a magnet assembly (1) as claimed in any one of the preceding claims, wherein the magnet coil system (3) is charged via the current leads (5a, 5b), and a charging current is selected and the variable cross-sectional area B and/or the cold reservoirs (20) are configured such that for a thermal load WL_{laden} , which acts maximally on a coldest stage (21) of the current leads (5a, 5b) in the normal-conducting region (15a, 15b) during the charging, and for a thermal load WL_{gg} on this coldest stage (21) in an equilibrium state with charged magnet coil system (3), the following applies:
 $WL_{\text{laden}} \leq 5 * WL_{\text{gg}}$, in particular $WL_{\text{laden}} \leq 2 * WL_{\text{gg}}$.

50 Revendications

1. Agencement magnétique (1), comprenant un cryostat (2), un système de bobines magnétiques supraconductrices (3), un dispositif de refroidissement actif (4) pour le système de bobines magnétiques (3) et des amenées de courant (5a, 5b) pour charger le système de bobines magnétiques (3) dans le cryostat (2),

- dans lequel les amenées de courant (5a, 5b) comprennent au moins une zone normalement conductrice (15a, 15b), en particulier dans lequel les amenées de courant (5a, 5b) comprennent également une zone HTS (16a, 16b), dans lequel plusieurs accumulateurs de froid (20) sont couplés thermiquement aux amenées de courant (5a, 5b) le long de la zone normalement conductrice (15a, 15b) des amenées de courant (5a, 5b) pour absorber la chaleur générée dans la zone normalement conductrice (15a, 15b) lors de la charge du système de bobines magnétiques (3),
- caractérisé en ce que** les amenées de courant (5a, 5b) dans la zone normalement conductrice (15a, 20, 15b) présentent une surface de section transversale B variable suivant leur direction d'extension, la surface de section transversale B diminuant d'une extrémité froide (18a, 18b) à une extrémité chaude (19a, 19b) au moins sur une partie prépondérante de la longueur totale des amenées de courant (5a, 5b) dans la zone normalement conductrice (15a, 15b).
2. Agencement magnétique (1) selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les amenées de courant (5a, 5b) présentent chacune dans la zone normalement conductrice (15a, 15b) N tronçons successifs (25, 26 ; 41-44), avec $N \geq 2$, en particulier $3 \leq N \leq 7$, les tronçons (25, 26 ; 41-44) présentant chacun une surface de section transversale B_i constante au sein d'un tronçon (25, 26 ; 41-44), et que les surfaces de section transversale B_i diminuent de l'extrémité froide (18a, 18b) vers l'extrémité chaude (19a, 19b).
 3. Agencement magnétique (1) selon la revendication 2, **caractérisée en ce que** différents tronçons (25, 26 ; 41-44) sont couplés thermiquement à différents accumulateurs de froid (20).
 4. Agencement magnétique (1) selon la revendication 2, **caractérisé en ce qu'**au moins un accumulateur de froid (20) est couplé thermiquement à chaque jonction de deux tronçons (25, 26 ; 41-44), en particulier au moins un accumulateur de froid (20) étant également couplé thermiquement à l'extrémité froide (18a, 18b) de l'amenée de courant (5a, 5b) dans la zone normalement conductrice (15a, 15b).
 5. Agencement magnétique (1) selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** K étages de couplage thermique (21-23) sont prévus le long de chacune des amenées de courant (5a, 5b) dans la zone normalement conductrice (15a, 15b), au moins un accumulateur de froid (20) étant couplé thermiquement aux amenées de courant (5a, 5b) à chaque étage (21-23), avec $K \geq 2$, en particulier $3 \leq K \leq 7$.
 6. Agencement magnétique (1) selon la revendication 5, **caractérisé en ce qu'**une lourde masse M_i de matériau accumulateur de froid dans ledit au moins un accumulateur de froid (20) d'un étage respectif de couplage thermique (21-23) diminue de l'extrémité froide (18a, 18b) vers l'extrémité chaude (19a, 19b) sur les étages (21-23).
 7. Agencement magnétique (1) selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le cryostat (2) est réalisé sous la forme d'un cryostat (2) sans cryogène.
 8. Agencement magnétique (1) selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'**au moins une partie des accumulateurs de froid (20) est réalisée sous la forme de récipients étanches aux gaz (27, 30), une partie du volume des récipients étanches aux gaz (27, 30) étant remplie d'une substance vaporisable (28).
 9. Agencement magnétique (1) selon la revendication 8, **caractérisé en ce que** les amenées de courant (5a, 5b) dans la zone normalement conductrice (15a, 15b) s'étendent au moins partiellement à l'intérieur des récipients (27, 30).
 10. Agencement magnétique (1) selon l'une des revendications 8 et 9 précédentes, **caractérisé en ce qu'**au moins une partie des récipients (27, 30) est couplée thermiquement à une extrémité inférieure, par l'intermédiaire d'un élément thermoconducteur (29), à un dissipateur de chaleur (9, 10) du dispositif de refroidissement actif (4), et le point d'ébullition de la substance (28) contenue dans le récipient (27, 30) est supérieur à la température du dissipateur de chaleur (9, 10).
 11. Agencement magnétique (1) selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'**au moins une partie des accumulateurs de froid (20) est réalisée sous la forme de corps métalliques (20a).
 12. Agencement magnétique (1) selon la revendication 11, **caractérisé en ce que** plusieurs accumulateurs de froid (20) réalisés sous la forme de corps métalliques (20a) sont disposés à distance les uns des autres dans une zone de vide (11a) du cryostat (2).
 13. Agencement magnétique (1) selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'**un dispositif de refroidissement auxiliaire actif (50) est également présent, qui est couplé thermiquement à une partie des amenées de courant (5a, 5b) dans la zone normalement conductrice (15a, 15b), en particulier une température de fonctionnement la plus basse

AT_{nif} du dispositif de refroidissement auxiliaire (50) étant supérieure à une température de fonctionnement la plus basse AT_{mss} du dispositif de refroidissement actif (4) pour le système de bobines magnétiques (3).

5

14. Agencement magnétique (1) selon la revendication 13, **caractérisé en ce que** le dispositif de refroidissement auxiliaire (50) est en outre couplé thermiquement à un écran anti-rayonnement (6, 7, 8) du cryostat (2) et/ou à un récipient sous vide (11) du cryostat (2) et/ou à un dispositif de régulation de température (54) pour un échantillon (55) à examiner.
15. Agencement magnétique (1) selon l'une des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** la surface de section transversale B varie d'au moins un facteur 3 de l'extrémité froide (18a, 18b) à l'extrémité chaude (19a, 19b).
16. Utilisation d'un agencement magnétique (1) selon l'une des revendications précédentes, selon laquelle le système de bobines magnétiques (3) est chargé par l'intermédiaire des amenées de courant (5a, 5b) et un courant de charge est choisi de telle sorte et la surface de section transversale variable B et/ou les accumulateurs de froid (20) sont conçus de telle sorte que pour une charge thermique WL_{laden} qui agit au maximum sur un étage le plus froid (21) des amenées de courant (5a, 5b) dans la zone normalement conductrice (15a, 15b) pendant la charge, et pour une charge thermique WL_{gg} sur cet étage le plus froid (21) dans un état d'équilibre avec un système de bobines magnétiques chargées (3), la relation suivante s'applique :
- $$WL_{laden} \leq 5 * WL_{gg}, \text{ en particulier } WL_{laden} \leq 2 * WL_{gg}.$$

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

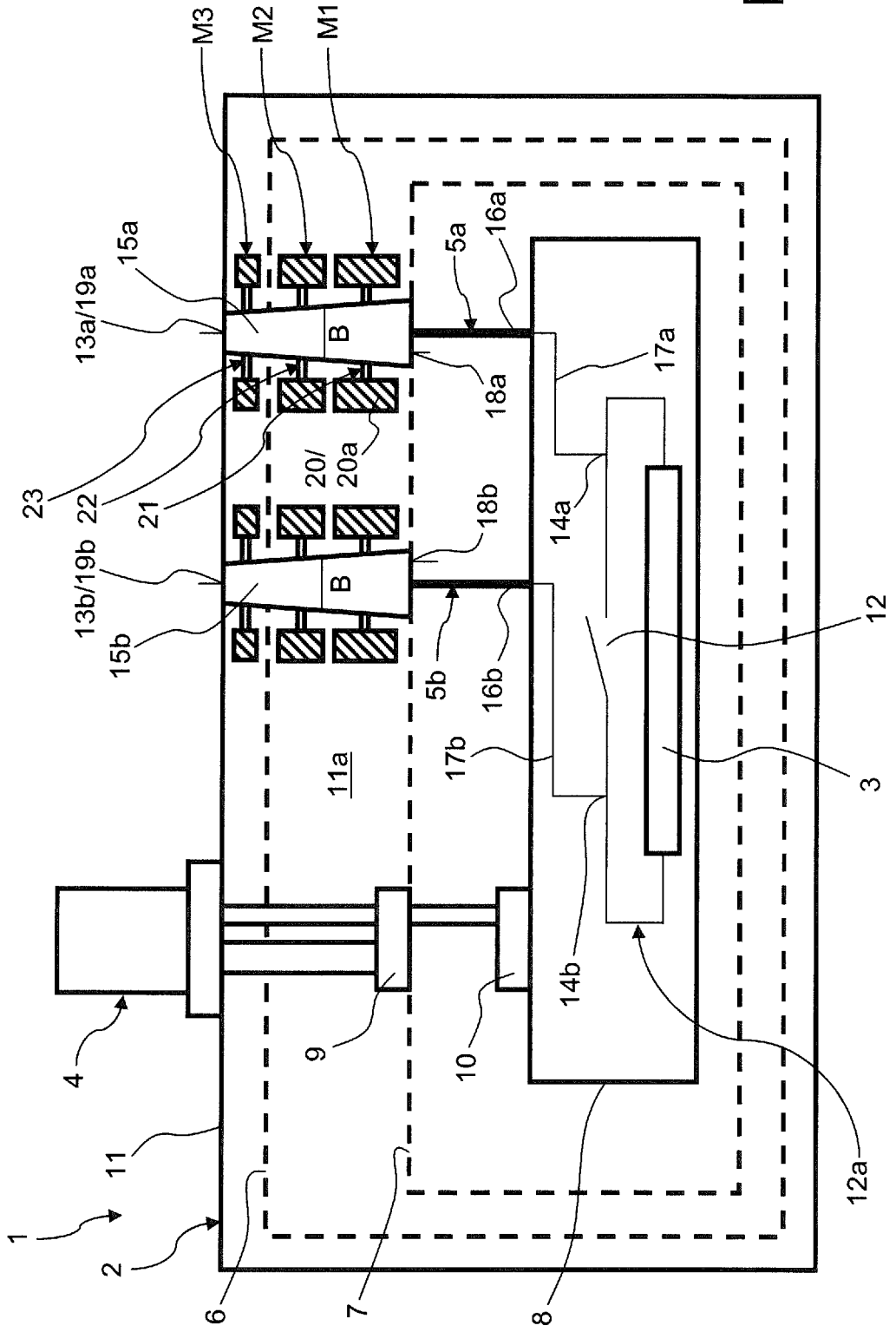


Fig. 1

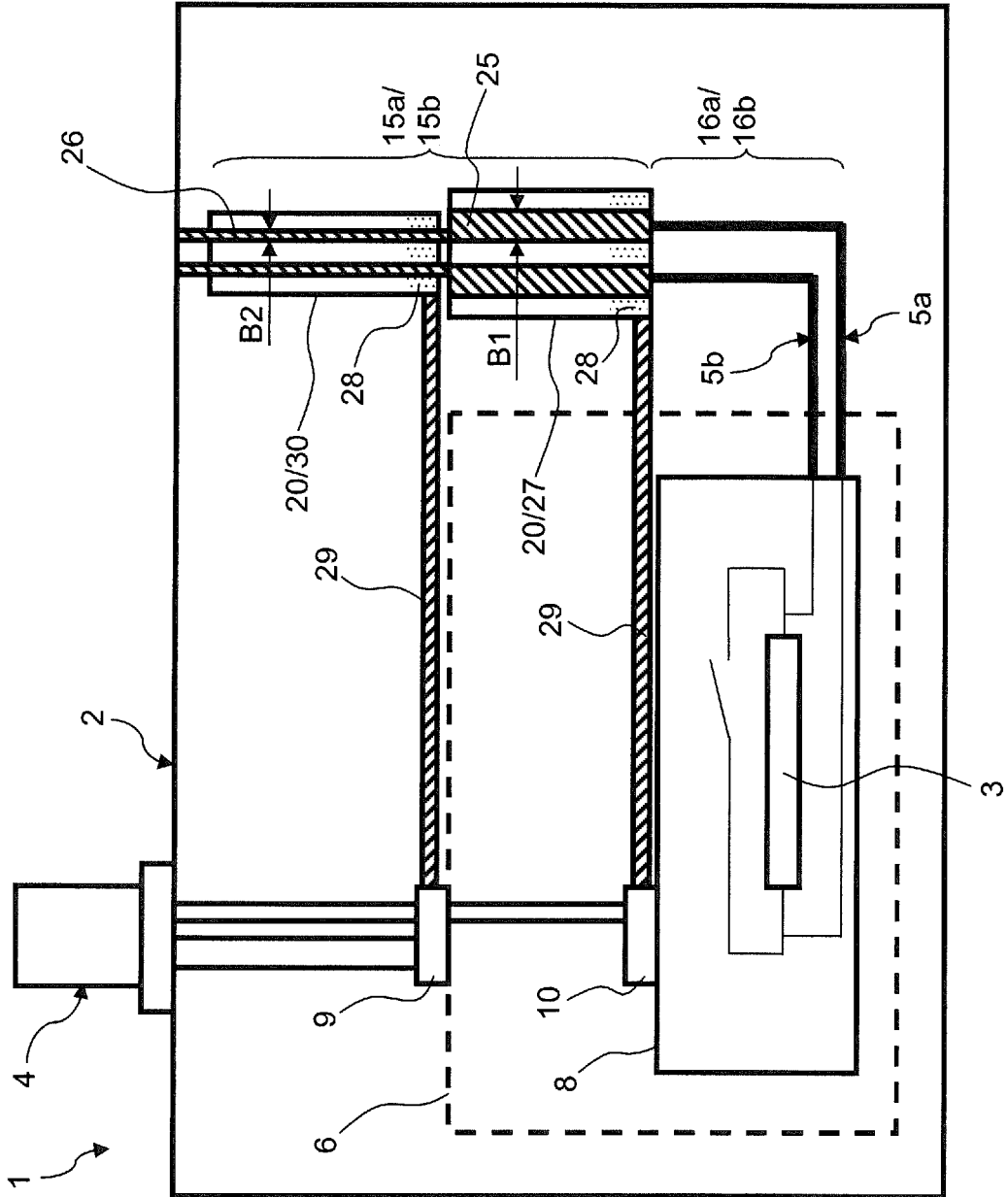


Fig. 2

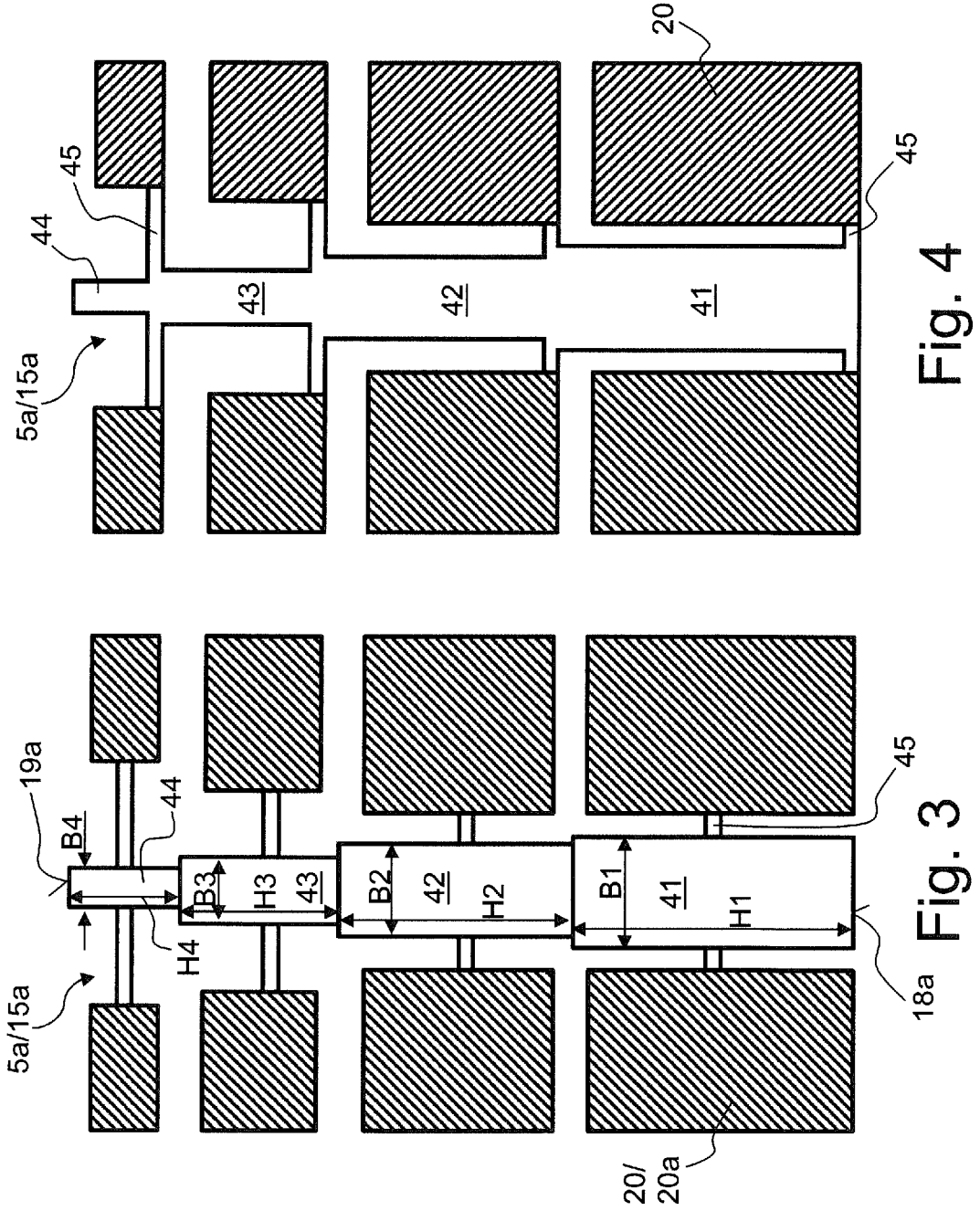


Fig. 4

Fig. 3

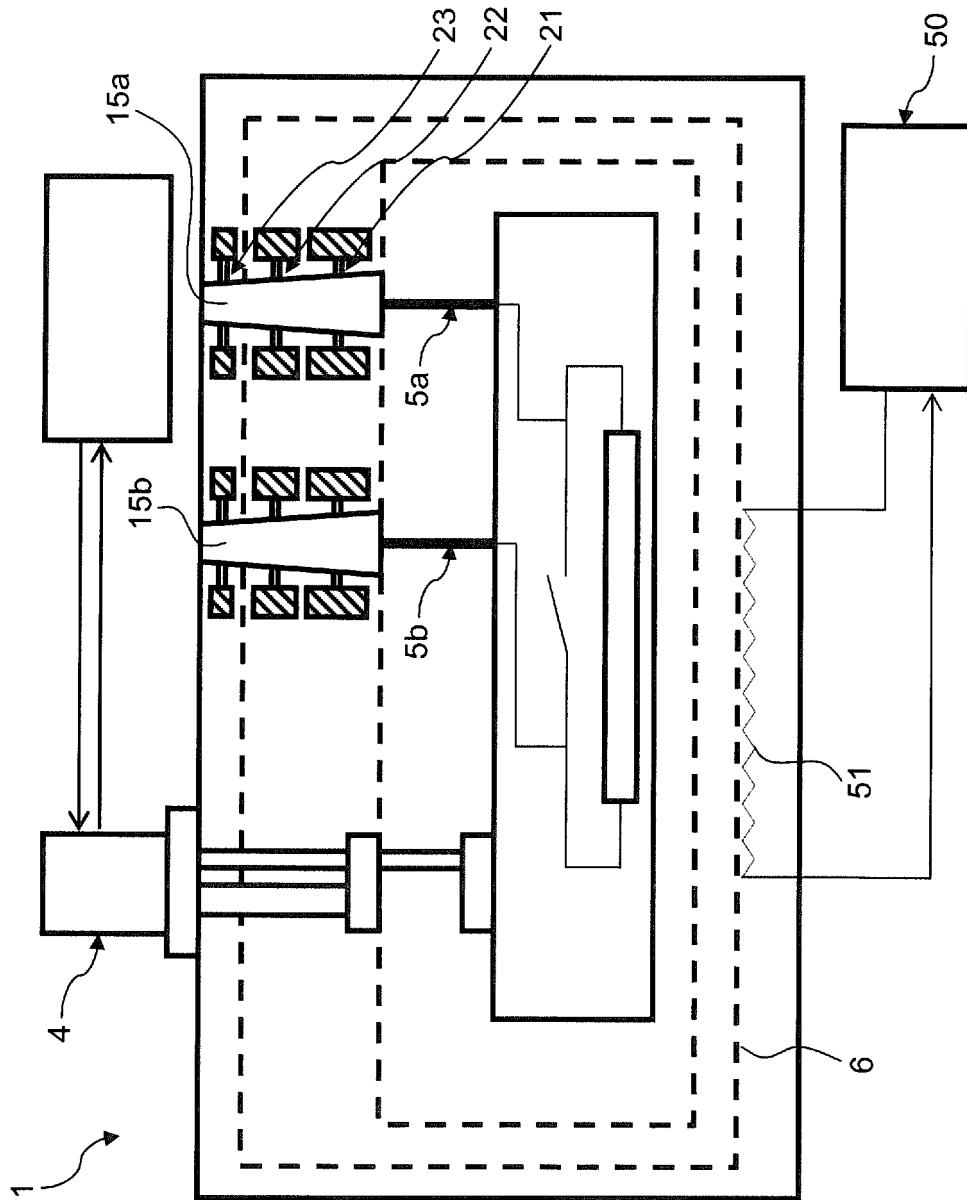


Fig. 5

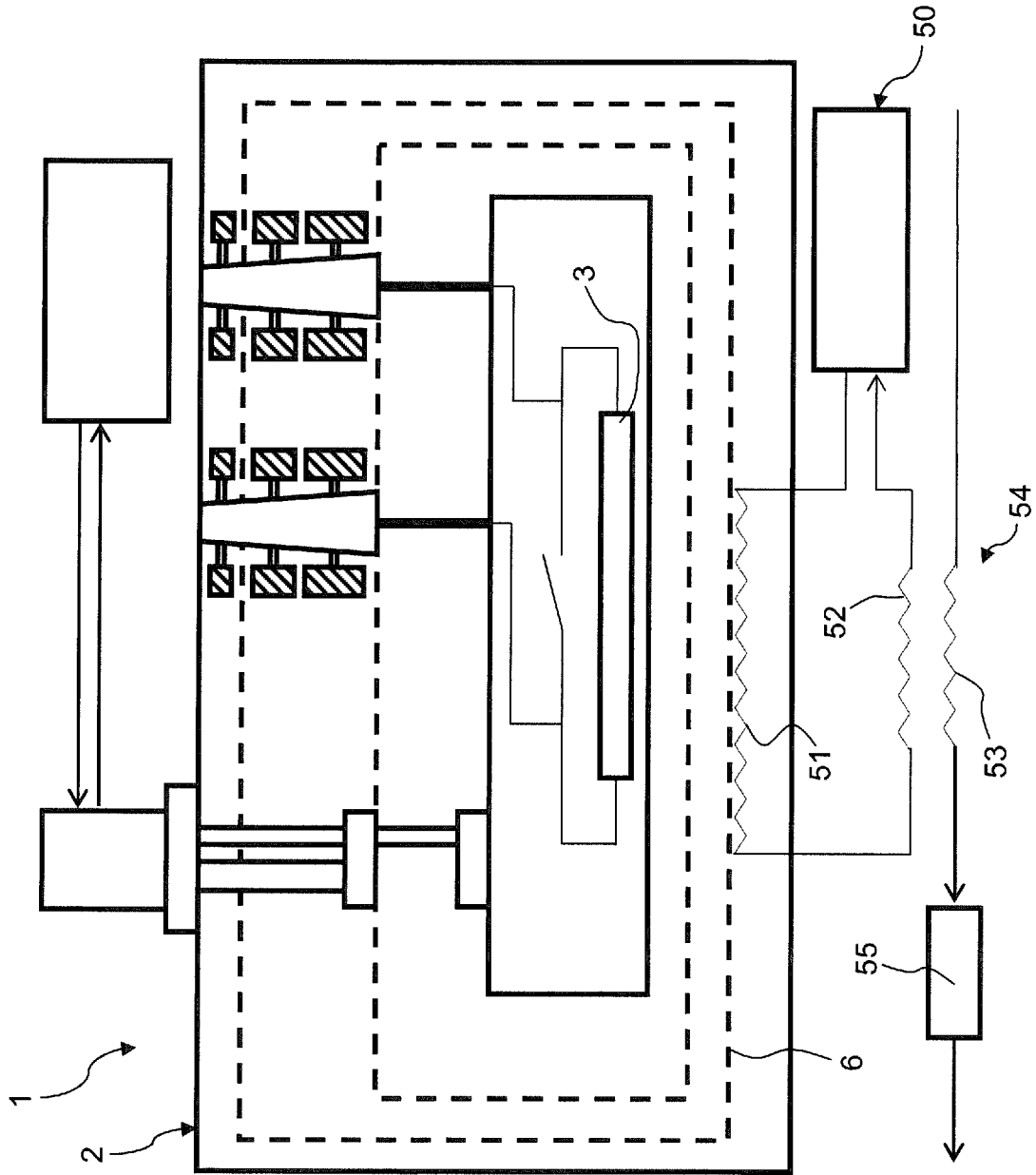


Fig. 6

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 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]