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

(11) EP 0 958 585 B1

(12) # EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
21.05.2003 Patentblatt 2003/21

(21) Anmeldenummer: **98907881.1**

(22) Anmeldetag: **02.02.1998**

(51) Int Cl.[7]: **H01F 6/06**, F25B 9/14

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/DE98/00285

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 98/035365 (13.08.1998 Gazette 1998/32)

(54) **STROMZUFÜHRUNGSVORRICHTUNG FÜR EINE GEKÜHLTE ELEKTRISCHE EINRICHTUNG**

CURRENT SUPPLY DEVICE FOR A COOLED ELECTRICAL DEVICE

INSTALLATION D'ALIMENTATION EN COURANT POUR UN DISPOSITIF ELECTRIQUE REFROIDI

(84) Benannte Vertragsstaaten:
CH DE FR GB IT LI SE

(30) Priorität: **07.02.1997 DE 19704485**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
24.11.1999 Patentblatt 1999/47

(73) Patentinhaber: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT**
80333 München (DE)

(72) Erfinder:
- **STEINMEYER, Florian**
  D-91074 Herzogenaurach (DE)
- **KRÄMER, Hans-Peter**
  D-91074 Herzogenaurach (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
- **PFOTENHAUER J M ET AL: "MULTIPLE COLD FINGER CRYOCOOLER WITH VOLTAGE ISOLATION" ADVANCES IN CRYOGENIC ENGINEERING, PROCEEDINGS OF THE 1995 CRYOGENIC ENGINEERING CONFERENCE, COLUMBUS JULY 17 - 21, 1995, Bd. PART B, Nr. VOL. 41, 17.Juli 1995, KITTEL P (ED), Seiten 1443-1447, XP000637591**
- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 006, no. 103 (E-112), 12.Juni 1982 & JP 57 035384 A (JAPAN ATOM ENERGY RES INST;OTHERS: 01), 25.Februar 1982,**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

EP 0 958 585 B1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf eine Stromzuführungsvorrichtung mit wenigstens einer zwischen einem höheren Temperaturniveau und einem tieferen Temperaturniveau verlaufenden elektrischen Leitung, die an ihrem tieftemperaturseitigen Ende mit einer gekühlten elektrischen Einrichtung verbunden und thermisch an einen Kaltkopf eines Pulsröhrenkühlers angekoppelt ist, der einen Regenerator und eine Pulsröhre aufweist. Eine derartige Stromzuführungsvorrichtung geht z.B. aus "Advances in Cryogenic Engineering", Vol. 41, 1996, Seiten 1443 bis 1447 hervor.

[0002] Eines der Hauptprobleme bei der Konstruktion kryogener Systeme ist eine effiziente Einleitung verhältnismäßig großer Ströme in supraleitende oder halbleitende Einrichtungen, wie sie z.B. zu einer Magnetfelderzeugung oder zu einer Kurzschlußstrombegrenzung oder zu einer Spannungstransformation oder zu einer Stromübertragung vorgesehen werden. Häufig wird das größte Wärmeleck in einem isolierten Kryobehälter von dem mindestens einen elektrischen Leiter der Stromzuführungsvorrichtung verursacht, der zwischen einem höheren Temperaturniveau, insbesondere bei Raumtemperatur von etwa 300 K, und einem tieferen Temperaturniveau von z.B. 77 K, der Temperatur des flüssigen Stickstoffs LN_2, verläuft, auf dem sich die elektrische Einrichtung befinden kann. Sofern die zwischen diesen Temperaturniveaus verlaufende elektrische Leitung der Stromzuführungsvorrichtung nicht verlustarm konstruiert werden kann und die entstehende Verlustwärme nicht effektiv abgeführt wird, kann allein der Kühlaufwand den technischen oder wirtschaftlichen Sinn des gesamten Systems in Frage stellen.

[0003] Bei der Auslegung von bekannten Stromzuführungsvorrichtungen unterscheidet man insbesondere zwischen leitungsgekühlten und abgasgekühlten Bauformen. Leitungsgekühlte Stromzuführungsvorrichtungen werden im allgemeinen nur durch Wärmeleitung von einem kalten Ende her gekühlt. Optimiert man die Dimensionen so, daß die Summe aus Joule'schen Verlusten des Metalls der Leitung mit einem spezifischen Widerstand $\rho(T)$ und durch den durch die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit $\lambda(T)$ bestimmten Wärmetransport minimal ist, dann beträgt der spezifische Verlust, d.h. die Wärmeeinleitung pro Einheitsstrom, für Kupfer etwa 43 W/kA bei Betrachtung einer einzigen elektrischen Leitung (vgl. die Zeitschrift *"IEEE Transactions on Magnetics", Vol. MAG-13, No. 1, 1977, Seiten 690 bis 693).*

[0004] Bei abgasgekühlten Stromzuführungsvorrichtungen wird die Enthalpie eines verdampften Kühlmittels, z.B. von LN_2 bei 77 K oder von flüssigem Helium LHe von 4,2 K, dazu genutzt, die eingeleitete Verlustwärme im Gegenstrom abzuführen. Dadurch kann man den spezifischen Verlust zwischen 300 K und 77 K auf etwa 25 W/kA reduzieren, wobei pro Stunde, Kiloampere und Stromzuführungsleitung etwa 0,56 Liter LN_2 verdampfen.

[0005] Die in einen Kryostaten eingeleitete Wärmemenge diktiert bei einem gegebenen Kühlmittelvorrat die Standzeit des kryogenen Systems, nach der ein Auffüllen nötig ist, oder die Größe eines Kühlaggregats, wenn keine Kühlflüssigkeiten benutzt werden. Für einen Anwender ist zudem von Bedeutung, wie hoch die nötige Leistung bei Raumtemperatur ist, die zur Kühlung bereitgestellt werden muß. Diese Leistung wird z.B. in einem Kompressor eines Kühlaggregats oder bei der Herstellung des flüssigen Kühlmittels verbraucht.

[0006] Je nach konkreter Anwendung sind eine Vielzahl von Ausführungsformen für Stromzuführungsvorrichtungen bekannt (vgl. die Literaturstelle *"Cryogenics", Vol. 25, 1985, Seiten 94 bis 110*). In der Regel kommt für die zwischen den verschiedenen Temperaturniveaus verlaufende elektrische Leitung als Material Kupfer oder Messing zum Einsatz. Bei leitungsgekühlten Stromzuführungsvorrichtungen wird zudem das kalte Ende häufig gut wärmeleitend, aber elektrisch isolierend mit der kalten Seite eines insbesondere nach dem Gifford-McMahon-Prinzip arbeitenden Refrigerators verbunden. Bei abgasgekühlten Stromzuführungsvorrichtungen wird zumindest ein großer Teil des verdampften Kühlmittels an der elektrischen Leitung entlanggeführt, die eine möglichst große Oberfläche haben sollte, damit ein effektiver Wärmeaustausch stattfindet.

[0007] Aus der erwähnten Veröffentlichung "Advances in Cryogenic Engineering" ist eine Stromzuführungsvorrichtung mit den eingangs genannten Merkmalen zu entnehmen. Zu einer effizienten Kühlung ihrer elektrischen Leitungen ist ein Kaltkopf eines Pulsröhrenkühlers im oberen, wärmeren Bereich eines Kryostaten zwischen den elektrischen Leitungen angeordnet. Der Pulsröhrenkühler ist mit den Stromleitungen über eine Kupferbrücke gut wärmeleitend verbunden, wobei die erforderliche Isolierung zwischen den Leitungen durch den Kaltkopf selbst hergestellt wird. Ein solcher Aufbau ist entsprechend aufwendig.

[0008] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ausgehend von diesem Stand der Technik eine verbesserte Stromzuführungseinrichtung mit reduzierten Wärmeverlusten, reduziertem Platzbedarf und einfacherem Aufbau anzugeben.

[0009] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit den in Anspruch 1 angegebenen Maßnahmen gelöst. Demgemäß soll bei einer Stromzuführungsvorrichtung mit den eingangs genannten Merkmalen zumindest ein Teilstück der elektrischen Leitung von wenigstens einem Teil des Kaltkopfes gebildet sein.

[0010] Bei der erfindungsgemäßen Stromzuführungsvorrichtung ist also ein Pulsröhrenkühler integraler Bestandteil der Vorrichtung. Dabei wird ausgenutzt, daß der Kaltkopf eines solchen Pulsröhrenkühlers verglichen mit Kaltköpfen herkömmlicher Kryokühler, die z.B. nach dem Gifford-McMahon-Prinzip arbeiten, ein einfaches Bauteil ohne mechanisch bewegte Teile ist, das in vorteilhafter Weise preiswert zu fertigen ist und das durch Fehlen weiterer elektrischer Antriebe gegen hohe Spannungen isolierbar ist. Die erfindungsgemäße Stromzuführungsvorrichtung stellt somit wär-

metechnisch eine Zwischenform zwischen einer leitungs- und abgasgekühlten Stromzuführung dar, die ohne ein strömendes flüssiges Kühlmittel auskommt und dabei eine gegenüber einer leitungsgekühlten Stromzuführung eine vergleichsweise geringere Wärmeeinleitung verursacht. Sie vereint somit die Vorteile der beiden herkömmlichen Bauformen von Stromzuführungen.

[0011] Vorteilhafte Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Stromzuführungsvorrichtung gehen aus den abhängigen Ansprüchen hervor.

[0012] Zur weiteren Erläuterung der Erfindung und deren Weiterbildungen wird nachfolgend auf die Zeichnung Bezug genommen. Dabei zeigen jeweils schematisch als Längsschnitt

deren Figur 1 eine erste Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Stromzuführungsvorrichtung,
deren Figur 2 eine weitere Ausführungsform einer solchen Stromzuführungsvorrichtung

und

deren Figuren 3 bis 7 verschiedene Ausführungsformen bekannter Pulsröhrenkühler.

[0013] In den Figuren sind sich entsprechende Teile mit denselben Bezugszeichen versehen.

[0014] Bei der in Figur 1 gezeigten, allgemein mit 2 bezeichneten Ausführungsform einer Stromzuführungsvorrichtung nach der Erfindung erfolgt über Teile eines Kaltkopfes 3 eines Pulsröhrenkühlers die elektrische Stromleitung zwischen einer wärmeren, insbesondere auf Raumtemperatur RT befindlichen Seite und einer kälteren, z.B. auf Tieftemperatur TT von 77 K des LN_2 befindlichen Seite. Der Kaltkopf 3 ragt dabei zumindest mit seinem kälteren Teil in den Vakuumraum V eines Vakuumgefäßes 4 bzw. eines Kryostaten hinein. Statt des Vakuumraums eines Vakuumgefäßes kann auch der Innenraum eines (Bad-)Kryostaten mit dem Kaltkopf bzw. Kaltkopfteil versehen werden. Der Kaltkopf weist einen Regenerator 6 und eine Pulsröhre 7 auf, die an ihren tieftemperaturseitigen Enden über eine Überströmleitung 15 miteinander verbunden sind. Die Stromleitung bildet dabei das Hüllrohr 6a des Regenerators 6 und/oder das Hüllrohr 7a der Pulsröhre 7 in einer koaxialen oder parallelen Bauweise. Dabei können entweder Regenerator und Pulsröhre gegeneinander elektrisch isoliert sein und zwei auf unterschiedlichem Potential befindliche elektrische Leitungen bilden, wie gemäß dem dargestellten Ausführungsbeispiel angenommen ist. Oder diese Teile können auch parallelgeschaltet sein. In der Figur sind ferner bezeichnet mit 8a und 8b die Stromanschlüsse auf dem wärmeren Temperaturniveau RT, mit 9a und 9b die entsprechenden Stromanschlüsse auf dem tieferen Temperaturniveau TT, mit 10 eine Einbauöffnung für den Kaltkopf 3 in dem Vakuum- oder Kryostatengefäß 4, mit 11 ein den Kaltkopf 3 an seiner wärmeren Seite haltenden, isolierenden Montageflansch, der für eine vakuum- oder gasdichte Abdichtung der Einbauöffnung 10 sorgt, mit 13 ein Gaseinlaß und/oder -auslaß an dem Regenerator, mit 14 ein Gaseinlaß und/oder -auslaß an der Pulsröhre, mit 15 die beispielsweise elektrisch isolierende Überströmleitung zwischen dem Regenerator und dem Pulsrohr sowie mit 16 ein Anschluß für eine thermische Sammelschiene. An den Stromanschlüssen 8a und 8b ist beispielsweise eine externe, auf Raumtemperatur RT befindliche Stromversorgungseinheit anzuschließen, während mit den Stromanschlüssen 9a und 9b eine gekühlte, im allgemeinen auf der Tieftemperatur TT zu haltende elektrische Einrichtung verbunden ist. Bei der elektrischen Einrichtung kann es sich insbesondere um ein Kabel, einen Strombegrenzer, eine Magnetfeldwicklung oder Teile einer Elektronik jeweils mit supraleitendem Material handeln. Dabei können für klassische Supraleitermaterialien wie z.B. Nb_3Sn oder NbTi im allgemeinen eine LHe-Kühltechnik und für metalloxidische Supraleitermaterialien mit hoher Sprungtemperatur wie z.B. vom Y-Ba-Cu-Ooder vom (Bi,Pb)-Sr-Ca-Cu-O-Typ im allgemeinen eine LN_2-Kühltechnik vorgesehen sein. Die elektrische Einrichtung kann jedoch auch zu kühlende normalleitende oder halbleitende Teile aufweisen und braucht nicht unbedingt auf exakt dem Temperaturniveau TT zu liegen.

[0015] Die in Figur 2 gezeigte Ausführungsform einer mit 22 bezeichneten Stromzuführungsvorrichtung unterscheidet sich von der Ausführungsform nach Figur 1 dadurch, daß ihr Kaltkopf 23 eines Pulsröhrenkühlers nur mittels seines Regenerators 26 zur Stromführung genutzt wird. Der Regenerator enthält dabei als stromführenden Teil einen metallischen Körper in Form von z.B. einem in sein Hüllrohr 26a gepacktes, eng gerolltes Metallnetz 26b. Statt des Metallnetzes kann auch ein poröser Körper aus gesinterten Metallkörnchen oder ein Bündel dünner Drähte oder mindestens ein dünner, gerollter oder gefalteter Blechstreifen oder eine Anzahl von Profilblechen dienen. Diese metallischen Körper sind am warmen und am kalten Ende z.B. durch Einlöten, -schweißen oder -pressen elektrisch kontaktiert. Ein Bündel dünner Drähte eignet sich besonders gut für eine Einleitung von Wechselstrom, da die Drahtdicke der Skintiefe angepaßt werden kann. Bei der Ausführungsform nach Figur 2 wird jedoch gegenüber einem Stapel feiner Drahtnetze die Wärmeleitung im Regenerator stark erhöht, so daß diese Ausführungsform vorzugsweise nur für vergleichsweise große Ströme in Betracht gezogen wird.

[0016] Bei den Stromzuführungsvorrichtungen gemäß der Erfindung, wie sie aus den Figuren 1 und 2 hervorgehen, wird eine elektrische Isolation vorteilhaft durch Dielektrika, z.B. Kunststoffe und/oder Keramik, gewährleistet. Am tieftemperaturseitigen Ende kommen bevorzugt auch Saphir, BeO oder Aluminiumnitrid zum Einsatz, die vorteilhaft eine

hohe Wärmeleitfähigkeit besitzen. Dadurch können auch weitere zu kühlende Bauteile, z.B. Strahlungsschilde oder elektrische oder magnetische Apparate thermisch angekoppelt werden. Eine Potentialtrennung zwischen einem Kompressor mit möglicherweise elektrischem Ventiltrieb und der Stromzuführungsvorrichtung kann z.B. durch ein isolierendes Verbindungsrohr, das beispielsweise aus Kunststoff, faserverstärktem Kunststoff oder Keramik bestehen kann, erreicht werden.

[0017] Bei den für eine erfindungsgemäße Stromzuführungsvorrichtung eingesetzten Pulsröhrenkühlern wird von an sich bekannten Ausführungsformen ausgegangen (vgl. z.B. *"Cryocoolers 8"*, *Plenum Press, New York, 1994, Seiten 345 bis 410;* oder *"Advances in Cryogenic Engineering", Vol. 35, Plenum Press, New York, 1990, Seiten 1191 bis 1205;* oder *"INFO PHYS TECH" des VDI-Technologiezentrums, Nr. 6/Febr. 1996, mit dem Titel: "Pulsröhrenkühler: Neue Kältemaschinen für die Supraleitungstechnik und Kryoelektronik", 4 Seiten; oder die US 5,335,505 A*). Ein solcher Pulsröhrenkühler weist gemäß Figur 3 einen Kaltkopf 33 auf, der zumindest mit seinem kälteren Teil im allgemeinen von einem Isoliervakuum umgeben ist. Dieser Kaltkopf besitzt zwei untereinander verbundene Röhren. Eine Röhre ist als ein sogenannter Regenerator 36 gestaltet und enthält in ihrem Inneren einen die Gaswärme periodisch zwischenspeichernden Körper z.B. in Form von gestapelten Metallnetzen 36a kleiner Maschenweite. Dieser Körper wird bei der Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Stromzuführungsvorrichtung 22 nach Figur 2 zur Stromleitung herangezogen. Demgegenüber stellt die andere Röhre eine sogenannte Pulsröhre 37 dar, welche lediglich an ihrem warmen und kalten Ende jeweils z.B. durch feine Kupfernetze gebildete Wärmetauscher 38 bzw. 39 aufweist und ansonsten hohl ist. Die beiden nicht unbedingt rohrförmig gestalteten Teile 36 und 37 sind an ihren auf Tieftemperatur TT liegenden Enden mittels eines Überströmkanals 40 für ein Kühlmittel verbunden. Eine erste Versorgungsleitung 41 dient dazu, dem Regenerator 36 ein im allgemeinen ungekühltes, insbesondere auf Raumtemperatur RT befindliches Arbeitsgas, beispielsweise He-Gas, unter Hochdruck über den Ventiltrieb 42a pulsierend mit einer Frequenz beispielsweise zwischen 2 Hz und 50 Hz zuzuführen. Während einer Niederdruckphase des Pulsröhrenkühlers wird mittels eines Ventiltriebs 42b über die Versorgungsleitung 41 auch Arbeitsgas wieder abgeführt. Die Pulsröhre 37 kann an ihrem raumtemperaturseitigen Ende über einen in der Figur nicht dargestellten Verbindungskanal an eine zweite Versorgungsleitung angeschlossen sein, die je nach Bauart des Pulsröhrenkühlers zu einem weiteren, in der Figur nicht dargestellten Ventiltrieb oder zu einem Puffervolumen des Arbeitsgases von beispielsweise einigen Litern Größe führt (vgl. Figuren 5 bis 7). Die Figur 3 zeigt ferner einen Kompressor 43, der an die erste Verbindungsleitung 41 mittels einer Hinleitung 41a mit darin angeordnetem (Hochdruck-)Ventil 42a für das Arbeitsgas unter hohem Druck und einer Rückleitung 41b mit darin angeordnetem (Niederdruck-)Ventil 42b für das Arbeitsgas unter niedrigem Druck angeschlossen ist.

[0018] Während bei der in Figur 3 gezeigten Ausführungsform des Kaltkopfes 33 eines bekannten Pulsröhrenkühlers Regenerator 36 und Pulsröhre 37 räumlich parallel oder gegebenenfalls auch räumlich hintereinander angeordnet sind, ist bei der in Figur 4 gezeigten Ausführungsform des Kaltkopfes 45 eines weiteren bekannten Pulsröhrenkühlers eine konzentrische (koaxiale) Anordnung von Pulsröhre 47 und diese umschließendem Regenerator 46 vorgesehen. Bei dieser Ausführungsform wird das Arbeitsgas mittels einer Pumpvorrichtung 48 mit Arbeitskolben 48a gefördert.

[0019] Bei allen diesen Ausführungsformen von bekannten Pulsröhrenkühlern wird periodisch eine durch den Arbeitskolben 48a oder durch den Kompressor 43 mit Ventiltrieb erzeugte Druckwelle eingelassen, die im Regenerator 36 bzw. 46 vorgekühlt wird und in der Pulsröhre 37 bzw. 47 so entspannt wird, daß eine nutzbare Kälteleistung entsteht. Das entspannte, kalte Gas kühlt dann beim Ausströmen aus der Pulsröhre den Regenerator.

[0020] Ausführungsformen von entsprechenden Phasenschiebern am warmen Ende der Pulsröhre zeigen die Figuren 5 bis 7, wobei ein Kaltkopf 33 gemäß Figur 3 zugrundegelegt ist. Nach Figur 5 ist hierzu ein Puffervolumen 51 mit Drossel 52 vorgesehen. Zusätzlich kann gemäß Figur 6 ein zweiter Einlaß von der wärmeren Regeneratorseite her über eine Leitung 53 mit Düse 54 erfolgen. Nach Figur 7 kann ein entsprechender Phasenschieber auch mit vier Ventilen 42a, 42b, 55a und 55b gebildet werden.

[0021] Darüber hinaus lassen sich erfindungsgemäßen Stromzuführungsvorrichtungen auch zwei- und mehrstufige Varianten von Pulsröhrenkühlern zugrundelegen (vgl. z.B. Zeitschrift *"Cryogenics", Vol. 34, 1994, Seiten 259 bis 262*).

[0022] Selbstverständlich sind auch andere Ausführungsformen von erfindungsgemäßen Stromzuführungsvorrichtungen als die in den Figuren 1 und 2 gezeigten denkbar: So können z.B. Gestaltungsmerkmale der Stromzuführungsvorrichtung 2 nach Figur 1 und der Stromzuführungsvorrichtung 22 nach Figur 2 kombiniert werden, so daß dann der elektrische Strom sowohl innerhalb des Regenerators als auch über dessen Hüllrohr fließt. Alle Varianten können auch koaxial wie auch parallel ausgeführt sein, wobei ein, zwei oder mehrere Stromleitungen mit unterschiedlichen Potentialen in einem Kaltkopf denkbar sind. Es können auch mehrere Stromzuführungsvorrichtungen an einem Kompressor betrieben werden. Sofern eine Kühlstufe für eine bestimmte Anwendung nicht ausreicht, können auch zwei- oder mehrstufige Versionen aufgebaut werden, indem am kalten Ende der wärmeren Stufe das wärmere Ende einer weiteren, kälteren Stufe angeschlossen wird. Eine entsprechende Anordnung kann als thermische Hintereinanderschaltung von mehreren Kaltköpfen angesehen werden.

[0023] Mit der erfindungsgemäßen Integration von mindestens einem Kaltkopf eines Pulsröhrenkühlers in eine Stromzuführungsvorrichtung werden gegenüber bekannten Ausführungsformen eine Reihe bedeutender Vorteile erzielt:

1. Die Wärmeverluste sind im Vergleich zu einer leitungsgekühlten Stromzuführungsvorrichtung deutlich reduziert. Die Stromzuführungsvorrichtung 2 nach Figur 1 nutzt nämlich die elektrische Leitfähigkeit der Hüllrohre 6a und 7a von Regenerator 6 und Pulsröhre 7, die ohnehin vergleichsweise massiv sind, um einem Arbeitsdruck von typischerweise 20 bar Heliumgas standzuhalten. Beispielsweise kann ein Edelstahlrohr von 1 mm Wandstärke, 20 mm Durchmesser und 200 mm Länge einen Strom von 32 A optimal übertragen, wobei die Verluste gegenüber einer mit einem Pulsröhrenkühler nur indirekt gekühlten Stromzuführungsvorrichtung bei Belastung mit dem Nennstrom auf ein Drittel reduziert sind. Im stromlosen Zustand ergibt sich überhaupt kein zusätzliches Wärmeleck. Bei großen Strömen werden vorteilhaft größere Wandstärken bzw. Materialien höherer spezifischer Leitfähigkeit wie z.B. Messing oder Bronze oder Kupfer eingesetzt. Eine weitere Verlustreduktion ergibt sich durch den Gegenstromkühleffekt in Regenerator 6 und Pulsröhre 7, der durch das kalte Arbeitsgas erreicht wird. Um diesen Effekt noch zu erhöhen, können gegebenenfalls weitere Verbesserungen angebracht werden, die z.B. in Rohren mit variablem Querschnitt oder zusätzlichen Wärmetauschern auf verschiedenen Höhen in der Pulsröhre bestehen. Auch können Maßnahmen zur Vergrößerung der Oberfläche, beispielsweise durch besondere Rippen oder durch eine Aufrauhung oder eine Besinterung der Innenflächen mit einem porösen Metall vorgesehen werden. Bei der Stromzuführungsvorrichtung 22 nach Figur 2 ist die Ersparnis besonders groß, da ein optimierter Regenerator 26 ohnehin eine große Oberfläche aufweist, so daß die Kühlung durch das kalte Arbeitsgas thermodynamisch besonders effektiv ist.

2. Da bei der Stromzuführungsvorrichtung der Kaltkopf kein separates Bauteil darstellt, ergeben sich entsprechende Kosteneinsparungen. Die integriert gekühlte Stromzuführungsvorrichtung arbeitet zudem kryotechnisch gutmütig, da sie kein warmes Endstück in ein Kryostatsystem einzubringen braucht, das erst mit beträchtlichem konstruktiven Aufwand an ein Kältereservoir angekoppelt werden muß.

3. Durch gemeinsame Auslegung der Stromzuführungsvorrichtung und des Pulsröhrenkühlers kann die Kühlleistung des Pulsröhrenkühlers optimal an die Verluste der Stromzuführungsvorrichtung angepaßt werden. Dadurch lassen sich Verluste einsparen, die häufig durch die erforderliche Überdimensionierung des Kühlers auftreten.

4. Sofern die Kühlleistung am kalten Ende auf z.B. 77 K groß genug gewählt wird, können weitere Kryostatverluste z.B. aufgrund einer Wärmeeinstrahlung ohne weitere Kühleinheit oder Nachschub von Kryoflüssigkeiten ausgeglichen werden.

5. Durch den einfachen Aufbau ist eine ökonomische Anpassung an den Strombedarf eines gegebenen Kryosystems auch durch eine modulare Bauweise möglich, bei der mehrere Stromzuführungsvorrichtungen an einen gemeinsamen Kompressor mit Ventiltrieb angeschlossen werden.

6. Herkömmliche Stromzuführungsvorrichtungen, die für einen bestimmten Nennstrom optimiert sind, können am warmen Ende betauen oder sogar vereisen, wenn bei einem Unterstrom die abzuführende Joule'sche Wärme reduziert ist. Dabei besteht für Hochspannungs-Stromzuführungen die Gefahr, daß sich die Überschlagsfestigkeit verringert. Bei der integriert gekühlten Stromzuführungsvorrichtung nach der Erfindung kann diesem Effekt durch eine entsprechende Reduktion der Kühlleistung auf einfache Weise entgegengewirkt werden. Dazu wird z.B. die Betriebsfrequenz des Ventiltriebs oder des Kolbens, der eine periodische Heliumdruckwelle erzeugt, gesenkt.

Patentansprüche

1. Stromzuführungsvorrichtung (2, 22) mit wenigstens einer zwischen einem höheren Temperaturniveau (RT) und einem tieferen Temperaturniveau (TT) verlaufenden elektrischen Leitung, die an ihrem tieftemperaturseitigen Ende mit einer gekühlten elektrischen Einrichtung verbunden und thermisch an einen Kaltkopf (3, 23) eines Pulsröhrenkühlers angekoppelt ist, der einen Regenerator (6, 26) und eine Pulsröhre (7, 27) aufweist, **dadurch gekennzeichnet, daß** zumindest ein Teilstück der elektrischen Leitung von wenigstens einem Teil (6a, 7a, 26b) des Kaltkopfes (3, 23) gebildet ist.

2. Stromzuführungsvorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, daß** ein Hüllrohr (6a) des Regenerators (6) und/oder ein Hüllrohr (7a) der Pulsröhre (7) als Leitungsteilstück vorgesehen ist.

3. Stromzuführungsvorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, daß** ein metallischer Körper (26b) im Inneren eines Hüllrohres (26a) des Regenerators (26) als Leitungsteilstück vorgesehen ist.

4. Stromzuführungsvorrichtung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, daß** der metallische Körper (26b) ein Metallnetz oder ein Sinterkörper oder ein Drahtbündel oder mindestens ein Blechstreifen ist.

5. Stromzuführungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, daß** mit dem Regenerator (6) und der Pulsröhre (7) zwei verschiedene, gegenseitig isolierte Leitungsteilstücke gebildet sind.

6. Stromzuführungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, daß** mit dem Regenerator (6) und der Pulsröhre (7) zwei elektrisch parallelgeschaltete Leitungsteilstücke gebildet sind.

7. Stromzuführungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **gekennzeichnet durch** eine räumlich parallele Anordnung von Regenerator (6) und Pulsröhre (7).

8. Stromzuführungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **gekennzeichnet durch** eine räumlich konzentrische Anordnung von Regenerator und Pulsröhre.

9. Stromzuführungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Kaltkopf mehrstufig ausgebildet ist.

10. Stromzuführungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Kaltkopf (3, 23) zumindest mit seinem kälteren Teil in den Vakuumraum (V) eines Vakuumgefäßes (4) oder in den Innenraum eines Kryostaten hineinragt.

11. Stromzuführungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **gekennzeichnet durch** einen elektrischen Anschluß an eine supraleitende Einrichtung.

Claims

1. Power supply apparatus (2,22) having at least one electrical line which runs between a higher temperature level (RT) and a lower temperature level (TT) and is connected at its end on the low-temperature side to a cooled electrical device and thermally coupled to a cold head (3,23) of a pulse tube cooler, which cold head has a regenerator (6,26) and a pulse tube (7,27), **characterized in that** at least one portion of the electrical line is formed by at least one part (6a, 7a, 26b) of the cold head (3, 23).

2. Power supply apparatus according to Claim 1, **characterized in that** an encasing tube (6a) of the regenerator (6) and/or an encasing tube (7a) of the pulse tube (7) is provided as a line portion.

3. Power supply apparatus according to Claim 1 or 2, **characterized in that** a metallic body (26b) is provided in the interior of an encasing tube (26a) of the regenerator (26), as a line portion.

4. Power supply apparatus according to Claim 3, **characterized in that** the metallic body (26b) is a metal mesh, a sintered body, a wire bundle or at least one sheet-metal strip.

5. Power supply apparatus according to one of Claims 1 to 4, **characterized in that** two different, mutually insulated, line portions are formed by the regenerator (6) and the pulse tube (7).

6. Power supply apparatus according to one of Claims 1 to 4, **characterized in that** two electrically parallel-connected line portions are formed by the regenerator (6) and the pulse tube (7).

7. Power supply apparatus according to one of Claims 1 to 6, **characterized by** the regenerator (6) and the pulse tube (7) being arranged physically parallel.

8. Power supply apparatus according to one of Claims 1 to 6, **characterized by** the regenerator and the pulse tube being arranged physically concentrically.

9. Power supply apparatus according to one of Claims 1 to 8, **characterized in that** the cold head is designed with a plurality of stages.

10. Power supply apparatus according to one of Claims 1 to 9, **characterized in that** at least the colder part of the cold head (3, 23) projects into the vacuum area (V) of a vacuum vessel (4), or into the interior of a cryostat.

11. Power supply apparatus according to one of Claims 1 to 10, **characterized by** an electrical connection to a superconducting device.

Revendications

1. Dispositif d'alimentation en courant (2, 22) comportant au moins un conducteur électrique qui s'étend entre un niveau à température supérieure (RT) et un niveau à température inférieure (TT), qui est relié à son extrémité côté basse température à un dispositif électrique refroidi et qui est couplé thermiquement à une tête froide (3, 23) d'un radiateur tubulaire pulsé comportant un régénérateur (6, 26) et un tube pulsé (7, 27), **caractérisé par le fait qu'**au moins un tronçon du conducteur électrique est formé par au moins une partie (6a, 7a, 26b) de la tête froide (3, 23).

2. Dispositif d'alimentation en courant selon la revendication 1, **caractérisé par le fait qu'**une gaine (6a) du régénérateur (6) et/ou une gaine (7a) du tube pulsé (7) est prévue comme tronçon de conducteur.

3. Dispositif d'alimentation en courant selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé par le fait qu'**un corps métallique (26b) à l'intérieur d'une gaine (26a) du régénérateur (26) est prévu comme tronçon de conducteur.

4. Dispositif d'alimentation en courant selon la revendication 3, **caractérisé par le fait que** le corps métallique (26b) est un réseau métallique ou un corps fritté ou un faisceau de fils ou au moins une bande de tôle.

5. Dispositif d'alimentation en courant selon l'une des revendications 1 à 4, **caractérisé par le fait que** deux tronçons de conducteur différents, isolés l'un de l'autre, sont formés avec le régénérateur (6) et avec le tube pulsé (7).

6. Dispositif d'alimentation en courant selon l'une des revendications 1 à 4, **caractérisé par le fait que** deux tronçons de conducteur branchés électriquement en parallèle sont formés avec le régénérateur (6) et avec le tube pulsé (7).

7. Dispositif d'alimentation en courant selon l'une des revendications 1 à 6, **caractérisé par** une disposition parallèle, dans l'espace, du régénérateur (6) et du tube pulsé (7).

8. Dispositif d'alimentation en courant selon l'une des revendications 1 à 6, **caractérisé par** une disposition concentrique, dans l'espace, du régénérateur et du tube pulsé.

9. Dispositif d'alimentation en courant selon l'une des revendications 1 à 8, **caractérisé par le fait que** la tête froide est conçue à plusieurs étages.

10. Dispositif d'alimentation en courant selon l'une des revendications 1 à 9, **caractérisé par le fait que** la tête froide (3, 23) pénètre au moins avec sa partie plus froide dans la chambre à vide (V) d'un flacon à vide (4) ou à l'intérieur d'un cryostat.

11. Dispositif d'alimentation en courant selon l'une des revendications 1 à 10, **caractérisé par** un raccordement électrique à un dispositif supraconducteur.

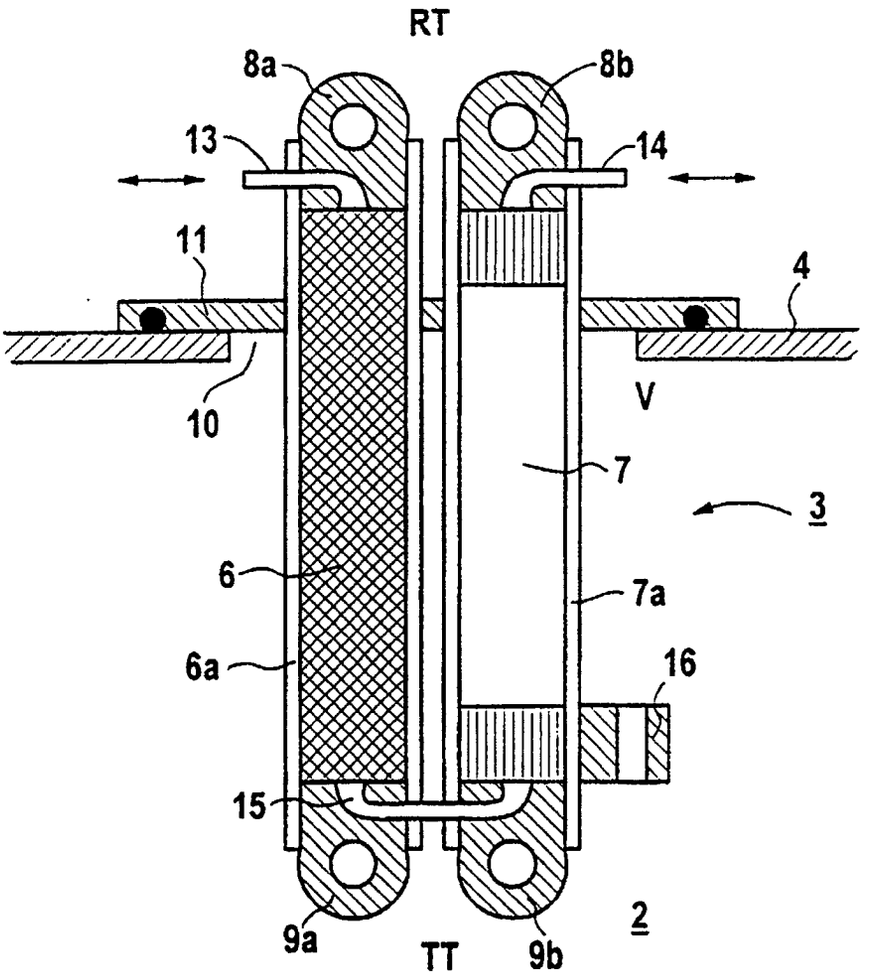


FIG 1

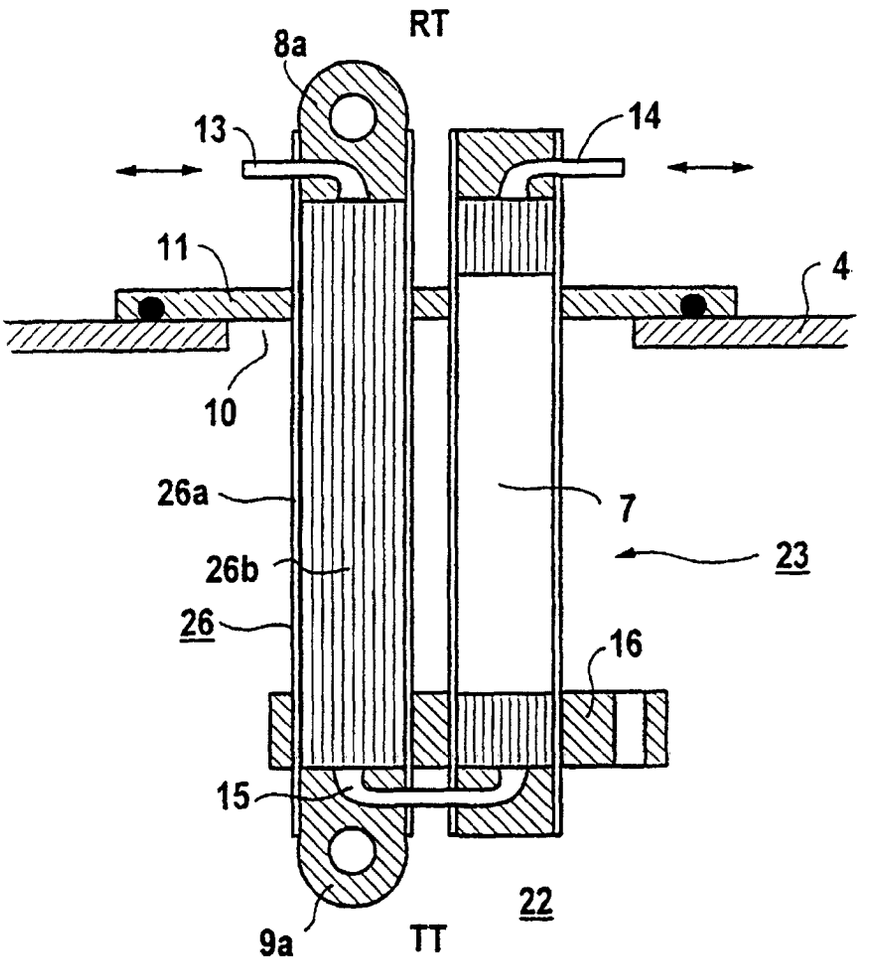


FIG 2

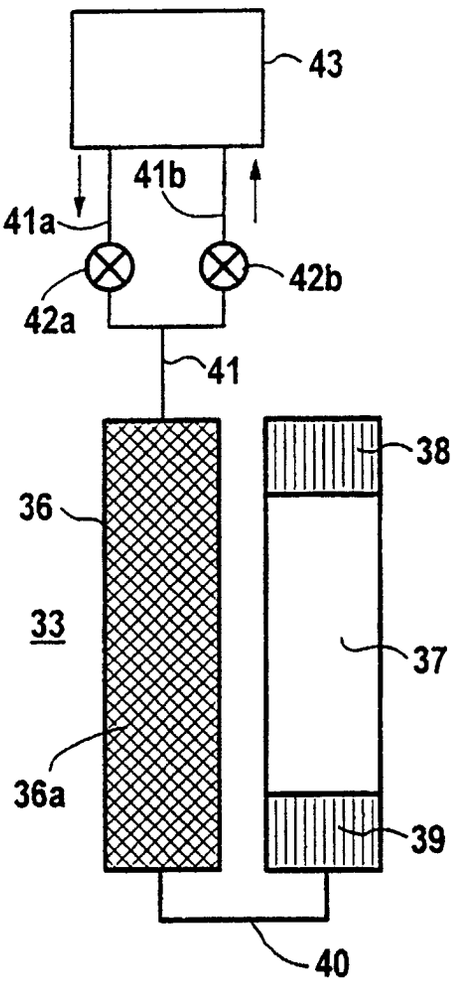

43
41b
41a
42b
42a
41
38
36
33
37
36a
39
40

FIG 3

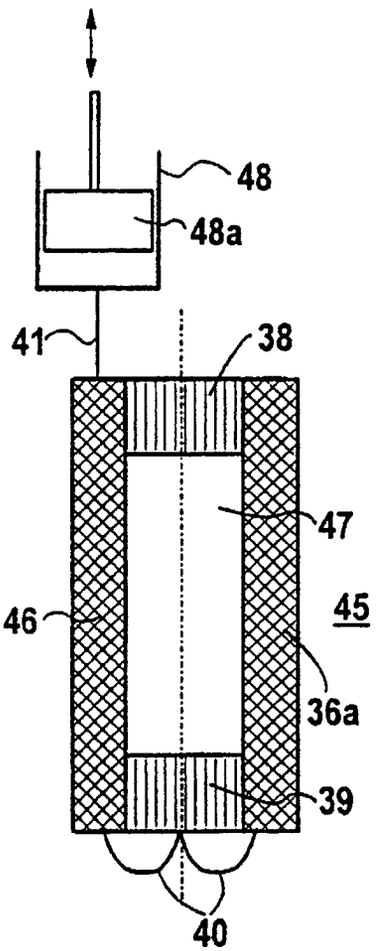

48
48a
41
38
47
46
45
36a
39
40

FIG 4

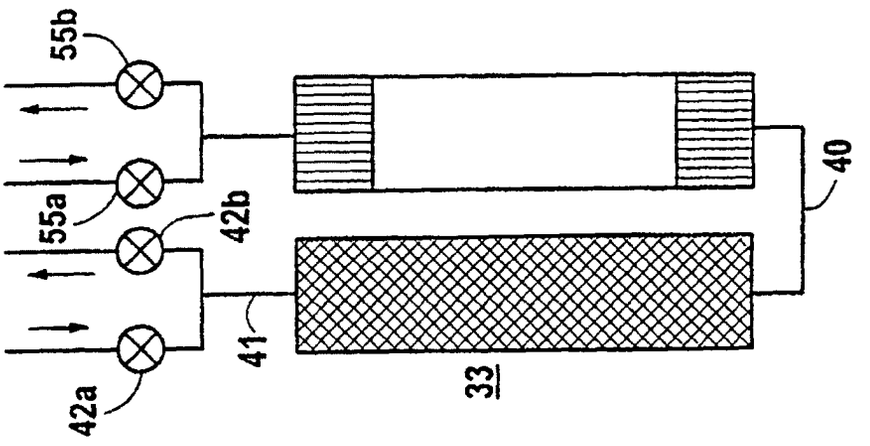


FIG 7

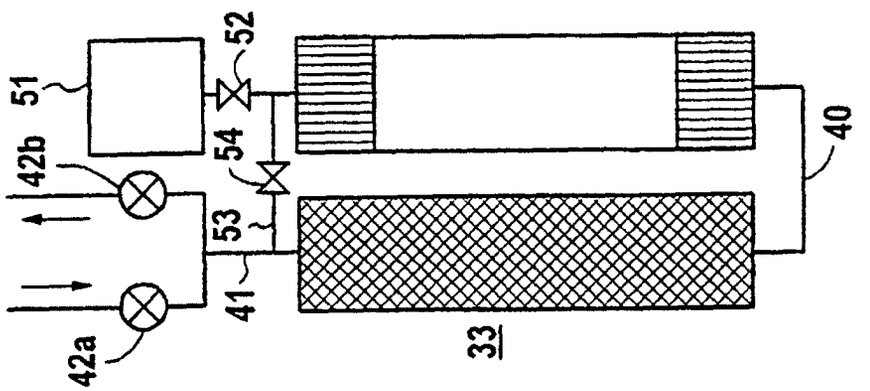


FIG 6

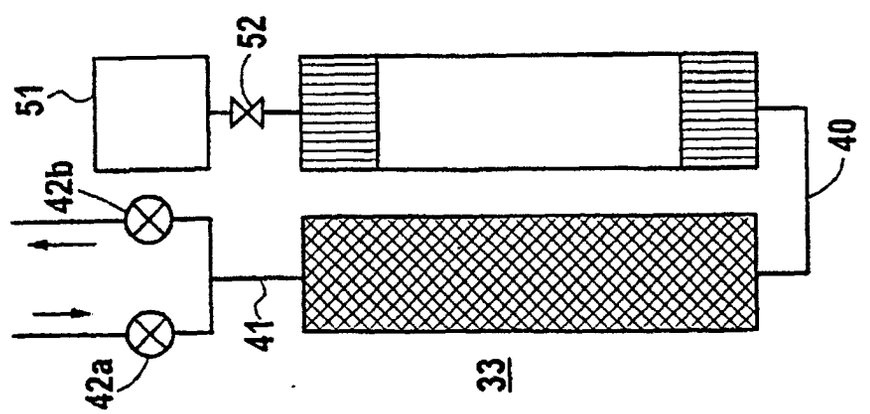


FIG 5