

⑲ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Patentschrift
⑪ DE 3041746 C2

⑤① Int. Cl. 4.
H01F 7/22
H 01 B 12/00
H 02 J 15/00

⑳ Aktenzeichen: P 30 41 746.0-33
㉑ Anmeldetag: 5. 11. 80
㉒ Offenlegungstag: 9. 6. 82
㉓ Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 16. 1. 86

DE 3041746 C2

Innerhalb vcr. 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

㉔ Patentinhaber:
Siemens AG, 1000 Berlin und 8000 München, DE

㉕ Erfinder:
Elsel, Werner, Dipl.-Phys., 8520 Erlangen, DE

⑤⑥ Im Prüfungsverfahren entgegengehaltene
Druckschriften nach § 44 PatG:
»Electrical World« (1. März 1975) S. 30-33;
»Siemens Forschungs- und Entwicklungs-
Berichte« 8 (1979) Seiten 1-7 u. 16-22;

⑤④ Supraleitende Energiespeichereinrichtung

DE 3041746 C2

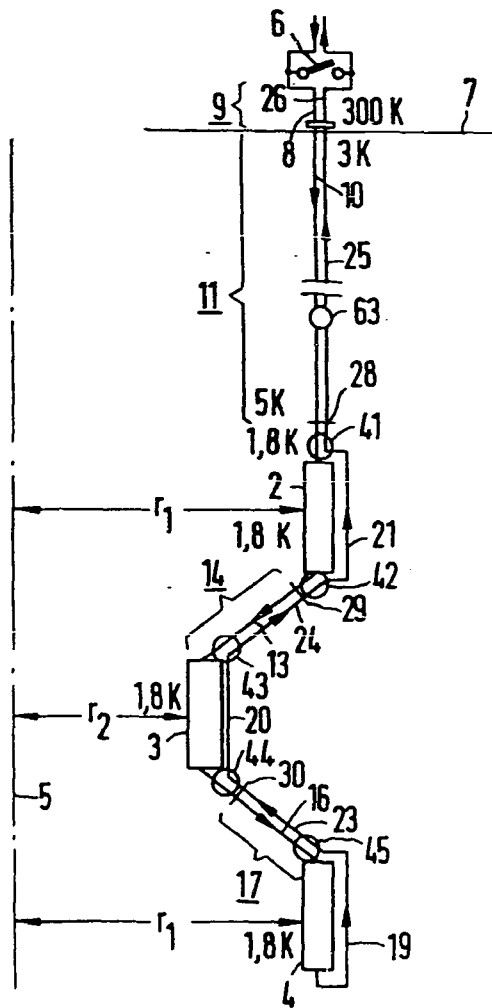


FIG 1

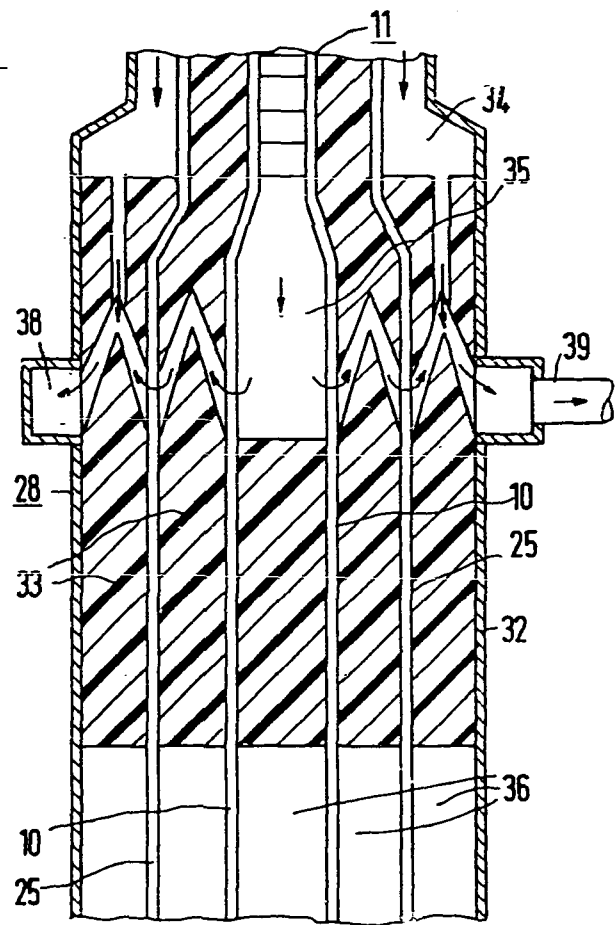


FIG 2

Patentansprüche:

1. Supraleitende Energiespeichereinrichtung mit einem supraleitenden Solenoidsystem, das aus mindestens zwei hintereinander geschalteten, unterirdisch um eine gemeinsame vertikale Achse, jedoch vertikal gegeneinander versetzt angeordneten supraleitenden Teilsolenoiden besteht, die sich jeweils in einem Kühlmittelbad befinden, und mit einer Stromzuführung, die jedes der beiden freien Enden des Solenoidsystems mit einem auf Raumtemperatur oberirdisch liegenden Anschluß elektrisch verbindet, gekennzeichnet durch folgende Merkmale:

- a) Ein die freien Enden des Solenoidsystems kurzschließender Dauerstromschalter (6) enthält normaleitende Kontakte und ist oberirdisch auf Raumtemperatur angeordnet,
- b) die Stromzuführung enthält einen von dem Anschluß ausgehenden Anschlußteil (9) mit normaleitendem Hin- und Rückleiter (8 bzw. 26) und einen unterirdischen, vertikal, direkt zu dem obersten Teilsolenoid (2) verlaufenden Fortsetzungsteil (11) mit supraleitendem Hin- und Rückleiter (10 bzw. 25),
- c) Hin- und Rückleiter (10, 25) des Fortsetzungsteils (11) sind unabhängig von dem Kühlmittelbad des obersten Teilsolenoids (2) gekühlt und zwischen benachbarten Teilsolenoiden (2, 3 bzw. 3, 4) ist jeweils ein einziges Verbindungskabel (14 bzw. 17) mit supraleitendem Hin- und Rückleiter (13, 24 bzw. 16, 23) angeordnet, die von dem Bad des jeweils oberliegenden Teilsolenoids (3 bzw. 4) mitgekühlt sind.

2. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Hin- und Rückleiter (10, 25) des Fortsetzungsteils (11) und die Hin- und Rückleiter (13, 24; 16, 23) der Verbindungskabel (14; 17) jeweils koaxial zueinander angeordnet sind.

3. Einrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß an dem dem obersten Teilsolenoid (2) zugewandten Ende des Fortsetzungsteils (11) eine thermische Trennstelle (28) zwischen den Kühlmittelräumen (34, 35) des Fortsetzungsteils (11) und dem Kühlmittelraum (36) des obersten Teilsolenoids (2) vorgesehen ist.

4. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß für die Hin- und Rückleiter (10, 25) des Fortsetzungsteils (11) eine Zwangskühlung mit strömendem Helium vorgesehen ist.

5. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Hin- und Rückleiter (10, 25) des Fortsetzungsteils (11) in einem Bad mit Helium II angeordnet sind.

6. Einrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß sich der Querschnitt für das Kühlmittel in dem Fortsetzungsteil (11) nach dessen oberem Ende hin vergrößert.

7. Einrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß an dem dem höher gelegenen Teilsolenoid (2 bzw. 3) zugewandten Ende des Verbindungskabels (14 bzw. 17) eine thermische Trennstelle (29 bzw. 30) zwischen den Kühlmittelräumen des Kabels und dem Kühlmittelraum dieses Teilsolenoids vorgesehen ist.

Die Erfindung bezieht sich auf eine supraleitende Energiespeichereinrichtung mit einem supraleitenden Solenoidsystem, das aus mindestens zwei hintereinandergeschalteten, unterirdisch um eine gemeinsame vertikale Achse, jedoch vertikal gegeneinander versetzt angeordneten supraleitenden Teilsolenoiden besteht, die sich jeweils in einem Kühlmittelbad befinden, und mit einer Stromzuführung, die jedes der beiden freien Enden des Solenoidsystems mit einem auf Raumtemperatur oberirdisch liegenden Anschluß elektrisch verbindet. Eine derartige Energiespeichereinrichtung ist aus der Veröffentlichung »Electrical World«, 1. März 1975, Seiten 30 bis 33 bekannt.

Ein Vorteil großer supraleitender Energiespeichereinrichtungen ist darin zu sehen, daß mit ihnen Energien der Größenordnung von 10^{12} Joule oder höher in einem verhältnismäßig kleinen Volumen zu speichern sind, wobei Energiedichten von etwa 10 Joule/cm³ bei magnetischen Flußdichten von etwa 5 Tesla erreicht werden. Derartig hohe Flußdichten sind mit Hilfe von sogenannten technischen Typ II-Supraleitern wie z. B. Niob-Titan (NbTi), Niob-Zinn (Nb₃Sn) oder Vanadium-Gallium (V₃Ga) zu erzeugen. Die Speichereinrichtungen enthalten im allgemeinen ein Solenoidsystem aus diesen Leitern, in welche während Niederlastzeiten die elektrische Energie über Gleichrichter aus einem angeschlossenen Wechselstromnetz eingespeist wird. Durch ein Kurzschließen des Solenoidsystems mittels eines oder mehrerer Dauerstromschalter läßt sich die eingespeiste Energie ohne größere Verluste über längere Zeiten speichern. In Spitzenlastzeiten kann dann die benötigte Energie innerhalb weniger Minuten oder auch über Stunden in das angeschlossene Netz über Wechselrichter wieder abgegeben werden.

Aus der eingangs genannten Literaturstelle »Electrical World« ist eine supraleitende Energiespeichereinrichtung bekannt, die mehrere Gigawattstunden speichern soll. Für diese Einrichtung ist ein supraleitendes Solenoidsystem mit drei supraleitenden Teilsolenoiden um eine gemeinsame vertikale Achse vorgesehen, die einen Durchmesser zwischen 100 und 150 m haben, 4 bis 5 m breit und 8 bis 10 m hoch sind. Zur Kühlung dieser Teilsolenoiden sind diese jeweils in einem eigenen Kühlmittelbad angeordnet. Jedes Teilsolenoid soll an Ort und Stelle in einem unterirdischen, in Felsgestein getriebenen Tunnelstollen erstellt werden. Die Tunnelstollen befinden sich dabei in vertikal gegeneinander versetzten, parallelen Ebenen.

Bei dieser bekannten Energiespeichereinrichtung ist ein zentral, längs der gemeinsamen Spulenachse vertikal verlaufender Hauptschacht vorgesehen, von dem aus horizontale, radial verlaufende Seitenschächte zu den einzelnen Tunnelstollen mit den Teilsolenoiden abzweigen. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, daß die Stromzuleitung zwischen einem oberirdisch, zentral angeordneten Wechselrichter und den Teilsolenoiden sowie die elektrische Verbindung der Teilsolenoiden untereinander und mit der Stromzuleitung über diese Schächte erfolgt. Die sich in dem äußeren, von den Teilsolenoiden erzeugten Magnetfeld befindenden Stromleitungen sind dann jedoch verhältnismäßig lang, so daß es schwierig ist, die thermischen Verluste dieser Stromleitungen möglichst klein, d. h. auf einem wirtschaftlich vertretbaren Wert zu halten. Dabei ist außerdem noch die Forderung zu beachten, daß die Teilsolenoiden aufgrund ihrer Verbindungen mit diesen Stromleitungen nicht zusätzlichen thermischen Verlusten ausgesetzt werden.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es deshalb, die supraleitende Energiespeichereinrichtung der eingangs genannten Art so auszugestalten, daß ihre über ein Kühlmittel abzuführenden thermischen Verluste verhältnismäßig gering sind.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die im Kennzeichen des Hauptanspruchs aufgeführten Merkmale gelöst.

Die mit dieser Ausgestaltung der Energiespeichereinrichtung verbundenen Vorteile bestehen insbesondere darin, daß nur verhältnismäßig kurze supraleitende Hin- und Rückleiter benötigt werden, die zudem noch soweit wie möglich in Kabeln zusammengefaßt sind. Hierdurch sind die Kühlmittelverluste der Kabel entsprechend begrenzt. Außerdem ist nur ein einziger, konstruktiv verhältnismäßig aufwendiger Anschlußteil mit einem Übergang seiner Leiter von Raumtemperatur auf Tieftemperatur erforderlich, der ebenso wie der normaleitende Dauerstromschalter leicht zugänglich ist. Da der Fortsetzungsteil unabhängig von dem obersten Teilsolenoid zu kühlen ist, kann durch eine entsprechende Kühlung dieses Fortsetzungsteils eine Einleitung größerer Wärmemengen in das angeschlossene Teilsolenoid weitgehend unterbunden werden. Aufgrund der Kühlung der Hin- und Rückleiter des Verbindungskabels mit dem Kühlmittel des tieferliegenden Teilsolenoids ergeben sich vorteilhaft nur verhältnismäßig wenige Trennstellen zwischen den Kühlmittelräumen der Teilsolenoiden.

Vorteilhafte Ausgestaltungen der Energiespeichereinrichtung nach der Erfindung gehen aus den Unteransprüchen hervor.

Zur weiteren Erläuterung der Erfindung und deren in den Unteransprüchen gekennzeichneten Weiterbildungen wird nachfolgend auf die Zeichnung Bezug genommen, in deren Fig. 1 die elektrischen Verbindungen einer Energiespeichereinrichtung schematisch angedeutet sind. Die Fig. 2 und 3 zeigen eine thermische Trennstelle bzw. ein Verbindungselement im Kabelsystem dieser Energiespeichereinrichtung, während in Fig. 4 eine Halterung im Fortsetzungsteil des Anschlußteils dieses Kabelsystems veranschaulicht ist.

Bei dem in Fig. 1 angedeuteten Teil eines Längsschnittes durch eine supraleitende Energiespeichereinrichtung enthält ein als Solenoidsystem geschalteter Speichermagnet drei supraleitende Teilsolenoiden 2, 3 und 4. Diese Teilsolenoiden sind unterirdisch und konzentrisch zu einer gemeinsamen Spulenachse 5 in Stollen angeordnet, die in vertikal gegeneinander versetzten Ebenen liegen und beispielsweise in Felsgestein getrieben sind. Während sich das oberste und unterste Teilsolenoid 2 bzw. 4 auf gleichem Radius r_1 bezüglich der Spulenachse 5 von beispielsweise 75 m befinden, ist der Radius r_2 des zwischen ihnen liegenden Teilsolenoids 3 geringer und beträgt zum Beispiel 60 m. Für die Teilsolenoiden 2 bis 4 ist eine Badkühlung vorgesehen, wobei vorteilhaft Helium-II zur Aufrechterhaltung der supraleitenden Betriebstemperatur von etwa 1,8 K der Supraleiter verwendet wird.

Die drei Teilsolenoiden sind elektrisch hintereinandergeschaltet und können während des Speicherbetriebs mittels eines Dauerstromschalters 6 kurzgeschlossen werden. Dieser Schalter ist unter anderem aus Gründen einer guten Zugänglichkeit oberhalb der Erdoberfläche 7 auf Raumtemperatur angeordnet, d. h. er besitzt ungekühlte Kontakte aus normaleitendem Material. In diesem Fall ergeben sich nämlich nur zwei Übergangsstellen der vorzusehenden Stromleitungen zwischen normaleitenden und supraleitenden Leitungsteilen. Der

Dauerstromschalter 6, der oberirdisch über eine in der Figur nicht dargestellte Stromrichteranlage mit einem Wechselstromnetz verbunden ist, ist direkt oberhalb des obersten Teilsolenoids 2 angeordnet, so daß die vorzusehenden elektrischen Leitungen besonders kurz sind.

Die Stromführungsrichtung durch die mit einem oberirdisch liegenden Anschluß über eine Stromzuführung elektrisch verbundene Energiespeichereinrichtung ist in Fig. 1 durch Pfeile an den entsprechenden Stromleitungen angedeutet. Danach wird der Strom über einen Hinleiter 8 eines von dem Anschluß ausgehenden, als Kabelendverschluß gestalteten Anschlußteiles 9 und einen Hinleiter 10 eines daran angeschlossenen, unterirdisch verlaufenden kabelartigen Fortsetzungsteiles 11 in das oberste Teilsolenoid 2 eingespeist. Nach dessen Durchlaufen gelangt der Strom über einen Hinleiter 13 eines Verbindungskabels 14 in das mittlere Teilsolenoid 3 und von dort aus über einen Hinleiter 16 eines entsprechenden Verbindungskabels 17 in das untere Teilsolenoid 4. Die Stromrückführung erfolgt im Bereich der Teilsolenoiden 2 bis 4 jeweils durch das Kühlmittelbad dieser Teilsolenoiden. Die entsprechenden Leiter sind in Fig. 1 mit 19 bis 21 bezeichnet. Zwischen den Teilsolenoiden bzw. zwischen dem oberen Teilsolenoid 2 und dem Dauerstromschalter 6 wird der Strom ebenfalls über die Verbindungskabel 17 und 14 bzw. den Fortsetzungsteil 11 und den Anschlußteil 9 zurückgeführt. Hierzu sind Rückleiter 23 und 24 zwischen den einzelnen Teilsolenoiden und ein Rückleiter 25 zwischen dem oberen Teilsolenoid 2 und dem Anschlußteil 9 sowie ein sich daran anschließender, bis zu dem Dauerstromschalter 6 verlaufender Rückleiter 26 coaxial zu den entsprechenden Hinleitern 16, 13, 10 und 8 angeordnet. Durch eine coaxiale Ausführung der kabelartigen Teile 11, 14 und 17 wird nämlich vorteilhaft erreicht, daß in ihren Hin- und Rückleitern durch das von den Teilsolenoiden 2 bis 4 erzeugte äußere Magnetfeld etwa gleichgroße, entgegengesetzt gerichtete Lorentz-Kräfte auftreten. Dabei müssen diese Kräfte nur im kalten Bereich aufgenommen werden, während auf Umgebungstemperatur keine Kräfte zu übertragen sind.

Als oberirdischer Anschlußteil 9 kann beispielsweise die aus der Veröffentlichung »Siemens Forschungs- und Entwicklungs-Berichte«, Band 8 (1979), Nr. 1, Seiten 16 bis 22 bekannte Hochspannungs- und Kühlmittelzuführung mit normaleitenden Hin- und Rückleitern 8 bzw. 26 dienen. Bei dem an diesen Anschlußteil 9 angeschlossenen, unterirdischen kabelartigen Fortsetzungsteil 11 handelt es sich um ein supraleitendes Kabel mit einem beispielsweise halbflexiblen Aufbau, wie er aus der Veröffentlichung »Siemens Forschungs- und Entwicklungs-Berichte«, Band 8 (1979), Nr. 1, Seiten 1 bis 7 bekannt ist. Die Verbindungskabel 14 und 17 können zweckmäßig einen dem kabelartigen Fortsetzungsteil 11 entsprechenden Aufbau haben.

Obwohl die Teilsolenoiden 2 bis 4 selbst durch ein 1,8 K-Helium-II-Bad gekühlt werden, wird zur Kühlung des vertikal verlaufenden Fortsetzungsteils 11 zwischen dem Anschlußteil 9 und dem obersten Teilsolenoid 2 vorteilhaft zwangsweise strömendes Helium mit etwa 3 bis 5 Kelvin vorgesehen. Dadurch treten im Anschlußteil zwischen dessen normalsiedendem Helium-Bad, welches Abgas zur Kühlung der Leiter 8 und 26 liefert, und dem forcierten Helium keine oder nur geringe Temperaturunterschiede und entsprechende kleine thermische Verluste auf. Aus dieser Kühlart folgt jedoch, daß an dem unteren, dem Teilsolenoid 2 zugewandten Ende des Fortsetzungsteils 11 eine thermische Trennstelle 28

erforderlich ist. Außerdem werden die Hin- und Rückleiter 13, 24 bzw. 16, 23 der Verbindungskabel 14 und 17 von dem Helium II-Bad des jeweils unteren Teilsolenoids 3 bzw. 4 mitgekühlt. An dem dem oberen Teilsolenoid 2 zugewandten oberen Ende des Verbindungskabels 14 und entsprechend an dem dem Teilsolenoid 3 zugewandten oberen Ende des Verbindungskabels 17 werden dann ebenfalls thermische Trennstellen 29 bzw. 30 benötigt. Ein Ausführungsbeispiel einer solchen Trennstelle, beispielsweise der Trennstelle 28, ist schematisch in Fig. 2 als Längsschnitt angedeutet. Diese Trennstelle enthält ein äußeres Heliumrohr 32, in dem eine thermische und elektrische Isolation 33 die oberen Räume 34 und 35 für das forcierte Helium von etwa 5 K zur Kühlung des kabelförmigen Fortsetzungsteils 11 von einem unteren Raum 36 trennt, der mit Helium II von etwa 1,8 K des Teilsolenoids gefüllt ist. Durch die Isolation 33 sind die Kabelleiter 10 und 25 in ihrer konzentrischen Anordnung hindurchgeführt. Wie Fig. 2 noch ferner zu entnehmen ist, kann das forcierte Helium in einen Ringkanal 38 am Außenrand des Heliumrohres 32 durch den oberen Teil der thermischen und elektrischen Isolation 33 hindurch eingeleitet und von dort aus über einen Austritt 39 beispielsweise einem Strahlungsschild zu dessen Kühlung zugeführt werden.

Gemäß dem in Fig. 1 angedeuteten Ausführungsbeispiel einer Speichereinrichtung sind an der Einspeisung in die Teilsolenoid 2 bis 4 jeweils die flexiblen Hinleiter 10, 13 und 16 der kabelförmigen Teile 11, 14 und 17 mit den entsprechenden Spulenleitern zu verbinden. Diese Spulenleiter müssen hingegen kompakt, d. h. nichtflexibel ausgeführt sein. Die Rückleiter 19 bis 21 werden entweder als flexible oder auch als kompakte Leiter an den Teilsolenoiden vorbeigeführt. Bei der Leitungsführung gemäß Fig. 1 sind dann fünf entsprechende Verbindungselemente erforderlich. Dabei sind die an den Enden des Teilsolenoids 2 vorzusehenden Verbindungselemente in der Figur mit 41 und 42, die entsprechenden Verbindungselemente des Teilsolenoids 3 mit 43 und 44 und das einzige Verbindungselement zwischen dem Verbindungskabel 17 und dem Teilsolenoid 4 mit 45 bezeichnet. Ein Ausführungsbeispiel eines solchen Verbindungselementes, beispielsweise des Elementes 41, das zwischen der thermischen Trennstelle 28 und dem Teilsolenoid 2 liegt, geht aus dem schematischen Längsschnitt der Fig. 3 hervor. In dem oberen Teil dieses Elementes ist jeweils das untere Ende des von dem kabelförmigen Fortsetzungsteil 11 bzw. der thermischen Trennstelle 28 kommenden flexiblen Kabelhinleiter 10 und des ihn koaxial umschließenden, flexiblen Kabelrückleiters 25 ersichtlich. Der innen angeordnete Hinleiter 10 befindet sich auf einem rohrförmigen Trägerkörper 46 aus einem isolierenden Material, um den der äußere Rückleiter 25, durch eine hohlzylindrische Isolation 47 von diesem getrennt, angeordnet ist. Die unteren, dem Teilsolenoid 2 zugewandten Endstücke 50 und 51 des Hinleiters und des Rückleiters sind über Zwischenstücke 52 und 53 aus elektrisch gut leitendem Material wie z. B. aus Kupfer mit den Enden des kompakten Spulenleiters 55 bzw. der Stromrückführungsleitung 21 verbunden. Da auch zur Kühlung des unteren Endes des inneren Hinleiters 10 das den Spulenleiter 55 kühlenden Helium II von etwa 1,8 K verwendet werden soll, sind in dem Kupferzwischenstück 52 Bohrungen 58 vorgesehen, um einen Kühlmittelaustausch zwischen dem von dem Hinleiter 10 bzw. seinem Trägerkörper 46 umschlossenen Innenraum 60 und dem Raum 61 des Kühlmittelbades des Teilsolenoids 2 zu gewährleisten.

Wie in Fig. 1 ferner angedeutet ist, kann wegen begrenzter Leiterlängen für den vertikal verlaufenden, flexiblen kabelförmigen Fortsetzungsteil 11, der beispielsweise eine Länge von mehreren hundert Metern hat, mindestens eine weitere Verbindung 63 erforderlich sein. Für eine derartige Verbindung läßt sich zum Beispiel eine Ausführungsform wählen, die der in der Veröffentlichung »Siemens Forschungs- und Entwicklungsberichte«, Band 8 (1979), Nr. 1, Seite 21 dargestellten Ausführungsform entspricht.

Da sich der kabelförmige Fortsetzungsteil 11 oberhalb des obersten Teilsolenoids 2 in vertikaler Richtung erstreckt, sind besondere Halterungen für diesen Teil erforderlich. Ein entsprechendes Ausführungsbeispiel einer solchen Halterung ist in Fig. 4 als Längsschnitt schematisch angedeutet. Die innere, flexible Leiteranordnung mit den koaxialen Hin- und Rückleitern des Fortsetzungsteils, die in der Figur allgemein mit 64 bezeichnet ist, wird dabei von einer Kunststoff-Manschette 65 umfaßt. Am Umfang dieser Manschette sind beispielsweise drei Haltestäbe 66 befestigt, die mit ihrem anderen Ende an einem äußeren Heliumrohr 67 fixiert sind. Durch eine ausreichend lange Bemessung dieser Haltestäbe ist ein Abbau des elektrischen Potentials zwischen der flexiblen Leiteranordnung 64 auf Hochspannungspotential und dem Heliumrohr 67 auf Erdpotential zu gewährleisten. Der zwischen dem Heliumrohr und der flexiblen Leiteranordnung ausgebildete Zwischenraum 68 ist mit flüssigem Helium einer Temperatur zwischen etwa 3 und 5 K ausgefüllt.

Im Ausführungsbeispiel nach Fig. 1 ist angenommen, daß die Leiter 10 und 25 des kabelförmigen Fortsetzungsteils 11 forciert mit flüssigem Helium zwischen 3 und 5 K gekühlt sind. Ebensogut können jedoch diese Leiter auch durch ein stehendes Bad mit Helium II auf Supraleitungstemperatur gehalten werden. Da in diesem Falle jedoch der Wärmestrom in das Helium II-Bad von unten nach oben zunimmt, wird vorteilhaft ein nach dem oberen Ende des Fortsetzungsteils hin sich erweiternder Querschnitt für das Kühlmittel vorgesehen. Auf diese Weise läßt sich der Wärmestrom unterhalb des für eine Aufrechterhaltung der Superfluidität des Heliums kritischen Wertes des Wärmestromes halten.

Hierzu 2 Blatt Zeichnungen

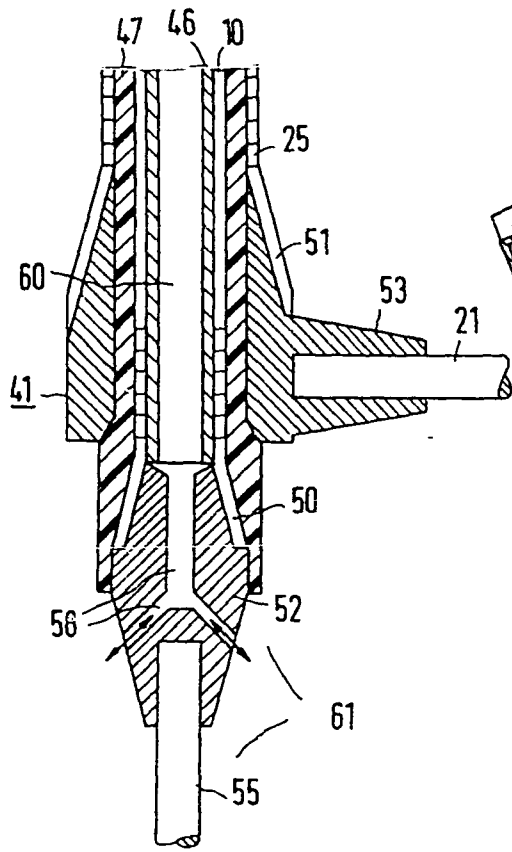


FIG 3

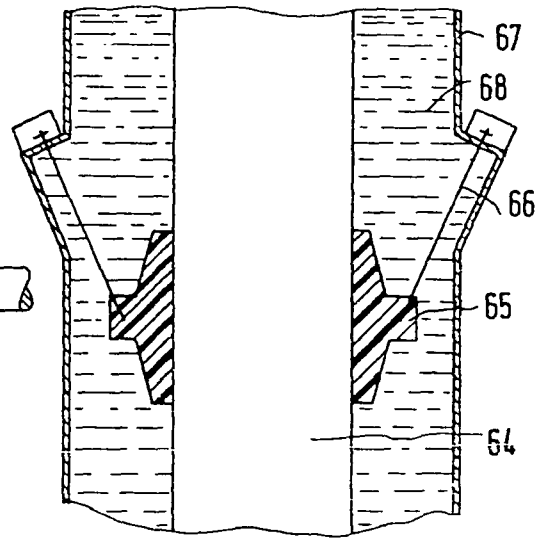


FIG 4