

①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Patentschrift**
⑪ **DE 3529391 C 2**

⑤ Int. Cl. 4:-
F 25 D 3/10
F 25 B 23/00

⑳ Aktenzeichen: P 35 29 391.8-13
㉑ Anmeldetag: 16. 8. 85
㉒ Offenlegungstag: 5. 3. 87
㉓ Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 4. 6. 87

DE 3529391 C 2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

㉔ Patentinhaber:
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, 7500
Karlsruhe, DE

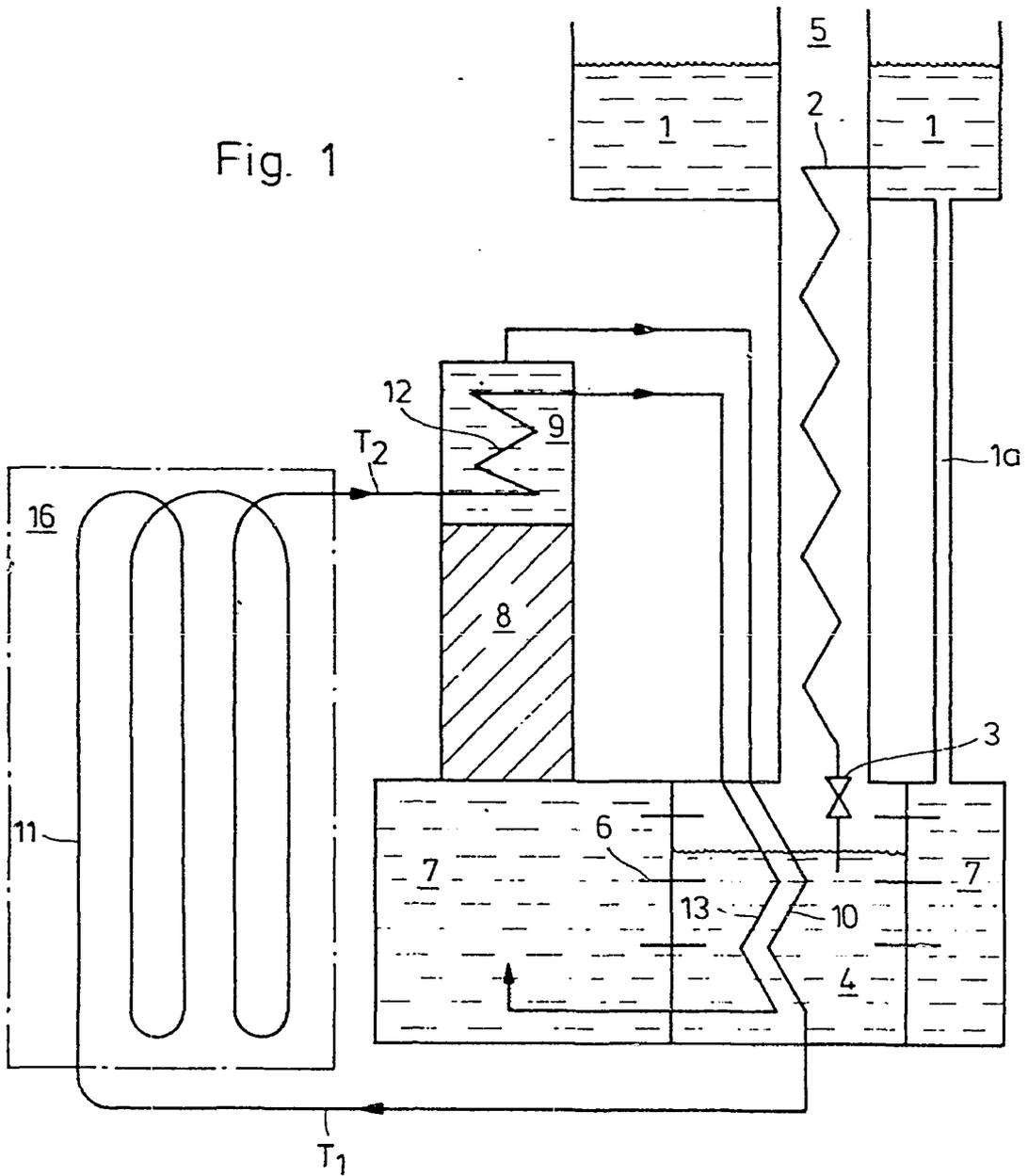
㉕ Erfinder:
Hofmann, Albert, Dr., 7500 Karlsruhe, DE

㉖ Im Prüfungsverfahren entgegengehaltene
Druckschriften nach § 44 PatG:
NL 79 02 438

㉗ Verfahren zum Kühlen eines Objektes mit Hilfe von suprafluidem Helium (He II) und Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens

DE 3529391 C 2

Fig. 1



Patentansprüche

1. Verfahren zum Kühlen eines Objektes mit Hilfe von suprafluidem Helium (He II), bei welchem eine Fountainpumpe zur Erzeugung einer Zwangsströmung des He II verwendet wird, dadurch gekennzeichnet, daß die Zwangsströmung dadurch ange- 5 regt wird, daß die dem zu kühlenden Objekt (16) zu entziehende Wärme in die Fountainpumpe eingekoppelt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß

a) dem im zu kühlenden Objekt (16) von der Eintrittstemperatur T_1 auf die Austrittstemperatur T_2 aufgewärmten Helium in dem Aufwärmbad (9) der Fountainpumpe Wärme entzogen wird, worauf es in einem Rückkühlbad (4) weiter rückgekühlt und dem Versorgungsbad (7) der Fountainpumpe zugeführt wird, und daß 20

b) das derart im Aufwärmbad (9) der Fountainpumpe erwärmte und unter Druck stehende Helium entnommen und, nachdem es im Rückkühlbad (4) auf die Eintrittstemperatur T_1 zurückgekühlt wurde, dem zu kühlenden Objekt (16) zugeführt wird. 25

3. Verfahren nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß das dem Aufwärmbad (9) der Fountainpumpe entnommene He II in mehrere, dem Objekt (16) an verschiedenen Stellen zuzuführende He II-Teilströme (17, 17a) aufgeteilt wird. 30

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß 35

a) bei zwei oder mehreren He II-Teilströmen (17, 17a) mit unterschiedlicher Wärmelast jeder Teilstrom (17, 17a) einer eigenen, der jeweiligen Wärmelast angepaßten Fountainpumpe entnommen und dem zu kühlenden Objekt (16) zugeführt wird, und daß 40

b) die He-Teilströme (17, 17a) nach der Wärmeaufnahme im zu kühlenden Objekt (16) zu einem He-Gesamtstrom (17, 17a) zusammengefaßt werden, der die Aufwärmäder (9) der Fountainpumpen nacheinander, entsprechend der Wärmelast der zugehörigen Teilströme zur Anregung der Zwangsströmung versorgt, wobei die Fountainpumpe des Teilstromes mit der jeweils größeren Wärmelast Vorrang hat. 45

5. Verfahren nach Anspruch 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß dem Aufwärmbad (9) der Fountainpumpe neben dem dem zu kühlenden Objekt (16) entzogene Wärme zur Verstärkung der Zwangsströmung Wärme aus dem He I-Vorratsbehälter (1) eingekoppelt wird. 50

6. Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß folgende Komponenten in Reihe zu einem geschlossenen Heliumkreislauf angeordnet sind: Ein erster Wärmeaustauscher (10) in einem Rückkühlbad (4), der mit einem Kühlkanal (11) des zu kühlenden Objektes (16) verbunden ist; ein zweiter Wärmeaustauscher (12) für das Aufwärmbad (9) einer Fountainpumpe, der mit dem Ausgang des Kühlkanals (11) verbunden ist; ein dritter Wärmeaus- 55

tauscher (13) im Rückkühlbad (4) dessen Eingang mit dem zweiten Wärmeaustauscher (12) verbunden ist, mündet im Versorgungsbad (7), das das Superfilter (8) der Fountainpumpe mit He II versorgt.

7. Einrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen den zweiten Wärmeaustauscher (12) und den dritten Wärmeaustauscher (13) ein vierter Wärmeaustauscher (14) eingebracht ist, der im Wärmeaustausch mit der Abgasleitung (5) des Rückkühlbades (4) steht.

8. Einrichtung nach Anspruch 6 und 7, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen das Aufwärmbad (9) und den ersten Wärmeaustauscher (10) ein fünfter Wärmeaustauscher (15) eingebracht ist, der im Wärmeaustausch mit der Abgasleitung (5) steht.

9. Einrichtung nach Anspruch 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Vorratsbehälter (1) mit dem Aufwärmbad (9) der Fountainpumpe über einen sechsten Wärmeaustauscher (2a) thermisch gekoppelt ist, dessen Ein- und Ausgang mit je einem im Wärmeaustausch mit der Abgasleitung (5) stehenden Rohr (2b und 2c) verbunden ist, dessen Ende mit einem Entspannungsventil (3) im Rückkühlbad (4) mündet.

10. Einrichtung nach Anspruch 6 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß eine Druckausgleichsverbindung (1a), die normalerweise zwischen dem Vorratsbehälter (1) und dem Versorgungsbad (7) besteht, direkt im Aufwärmbad (9) mündet.

11. Einrichtung nach Anspruch 6 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß anstelle der Druckausgleichsverbindung (1a) über einen siebten Wärmetauscher (20) im Vorratsbehälter (1), eine Druckleitung (21) im Aufwärmbad (9) mündet. 60

Beschreibung

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Kühlen eines Objektes mit Hilfe von suprafluidem Helium (He II) und eine Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach dem Oberbegriff des Patentanspruches 1.

Die abnorm gute Wärmeleitfähigkeit des He II im Temperaturbereich zwischen 1,7 K und 2,1 K und die Suprafluidität sind hervorragende Eigenschaften zur Kühlung supraleitender Magnetwicklungen. Bisher konnten solche 1,8 K-gekühlten Spulen nur nach dem Prinzip badgekühlter Wicklungen realisiert werden. Diese konventionelle Technik hat bekanntlich folgende Nachteile: die Notwendigkeit eines dichten Spulengehäuses, schlechtere mechanische Fixierung des Leiters und schlechte Hochspannungsfestigkeit. Diese Nachteile können durch Übergang von einer derartigen Badkühlung mit Außenkühlung des Leiters zu einer Leiterinnenkühlung mit erzwungener Heliumströmung überwunden werden. Mangels geeigneter Pumpen konnte dieses Konzept bisher nicht bei Kühlung mit suprafluidem Helium (He II) realisiert werden.

Bekannt sind Fountainpumpen zur Anregung einer Konvektion von He II in ^3He - ^4He -Kühlmaschinen, wie in der niederländischen Offenlegungsschrift 79 02 438 beschrieben.

Bei allen bekannt gewordenen Anwendungen wird die Pumpwirkung durch zusätzliche elektrische Heizung am warmen Ende des Superfilters erzielt. Da der thermomechanische Wirkungsgrad solcher Pumpen von Natur aus sehr gering ist (weniger als 10% der zugeführten Wärme kann in Arbeit umgesetzt werden), führt

dieses Verfahren vor allem bei großer umzuwäzenden Heliumrate zu unwirtschaftlich hoher Belastung der Kälteanlage.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Kühlung von Objekten, wie z.B. supraleitende Großmagnete, mit flüssigem Helium, effektiver und wirtschaftlicher zu gestalten.

Die Lösung der obigen Aufgabe erfolgt gemäß dem Oberbegriff des Anspruches 1 erfindungsgemäß durch dessen kennzeichnenden Merkmale. Die übrigen Patentansprüche geben vorteilhafte Weiterführungen und Ausbildungsformen sowohl des erfindungsgemäßen Verfahrens als auch der erfindungsgemäßen Einrichtung zu dessen Durchführung sowie ein besonderes Anwendungsgebiet der Erfindung wieder.

Der besondere Vorteil der Erfindung besteht darin, daß die Verlustwärme des zu kühlenden Objektes zur Erzeugung der Zwangsströmung in dem eigenen Kühlkreislauf genutzt wird, wobei die Verlustwärme derart in eine Fountainpumpe eingekoppelt wird, daß keine zusätzliche Antriebsleistung benötigt wird und der jeweiligen Belastung entsprechender Durchsatz sich selbstständig einstellt. Diese Pumpen haben in besonders vorteilhafterweise keine mechanisch bewegten Teile.

Durch die Erfindung wird die Möglichkeit geschaffen, innengekühlte Leiterkonzepte bei extrem tiefen Temperaturen unterhalb der λ -Linie des flüssigen Heliums, d.h. mit suprafluidem Helium (He II) zu verwirklichen, wobei die unbestrittenen Vorteile einer Kühlung durch Zwangsströmung mit den Vorteilen der extrem guten Kühleigenschaft von He II bei dem Bau großer Supraleiterwicklungen verbunden sind.

Der gegenüber der z.Z. meist üblichen Kühlung bei Temperaturen um 4 K zwangsläufig vergrößerte Aufwand zur Bereitstellung der Kühlleistung wird häufig durch die Verwendung billigerer Materialien (NbTi statt Nb₃Sn) bzw. durch die höheren Magnetfelder und Stromdichten, die bei 1,8 K erreicht werden können, wettgemacht.

Nachfolgend wird die Erfindung anhand der Fig. 1 bis 6 an einigen Beispielen beschrieben.

Fig. 1 stellt das Schema des erfindungsgemäßen Kühlkreislaufes dar;

Fig. 1a zeigt eine erweiterte Version des Kühlkreislaufes nach Fig. 1;

Fig. 2 zeigt die Austrittstemperatur T_2 in Abhängigkeit von der normierten Belastung bei unterschiedlichen Systemdrücken p_0 . Die Eintrittstemperatur ist $T_1 = 1,8$ K;

Fig. 2a zeigt den Heliumdurchsatz in Kühlkanälen mit dem Durchmesser $D = 4$ mm bei unterschiedlichen Längen in Abhängigkeit von der thermischen Belastung Q ;

Fig. 2b zeigt den Fountaindruck Δp in Abhängigkeit von der Austrittstemperatur T_2 ;

Fig. 3 zeigt ein Ausführungsbeispiel einer typischen Fountainpumpe;

Fig. 4 stellt ein Kühlschema mit parallel geschalteten Kühlkanälen dar;

Fig. 5 stellt ein Kühlschema für den Fall dar, daß parallele Kühlkanäle 11, 11a ungleich belastet sind;

Fig. 6 zeigt eine weitere Konzeption eines Kühlsystems, wobei außer der Verlustwärme des zu kühlenden Objektes noch andere Wärmequellen zur Verstärkung der Zwangsströmung genutzt werden.

Fig. 1 stellt das Schema des erfindungsgemäßen Kühlkreislaufes dar. Die Figur enthält zum besseren Verständnis auch ein Kühlsystem nach dem Stand der

Technik, mit dem die 1,8 K-Betriebstemperatur erzielt wird. Hierbei wird flüssiges Helium, das in einem Vorratsbehälter 1 unter einem Druck von beispielsweise 1 bar siedet, durch ein als Wärmeaustauscher ausgebildete Rohr 2 zum Entspannungsventil 3 geführt. Durch Entspannung auf einen Druck von etwa 15 mbar, wird in einem Rückkühlbad 4 eine Betriebstemperatur von etwa 1,8 K erreicht. Der Dampf wird über die Leitung 5 abgesaugt und zum Verflüssiger zurückgeführt. Das Rückkühlbad 4 befindet sich über die als Wärmeaustauscher ausgebildete Wand 6 in gutem thermischem Kontakt mit einem Versorgungsbad 7, welches über eine Druckausgleichsleitung 1a den gleichen Druck annimmt wie im Vorratsbehälter 1. Somit erhält man im Versorgungsbad 7 unterkühltes He II mit einer Temperatur von 1,8 K und dem Druck von beispielsweise 1 bar, wie im Vorratsbehälter 1. Die Druckausgleichsleitung 1a ist als sogenannte thermische Barriere auszulegen, um so den Wärmestrom vom Vorratsbehälter 1 zum Versorgungsbad 7 auf ein zulässiges Maß herabzusetzen.

Das suprafluide Helium (He II) aus dem Versorgungsbad 7 wird mittels einer thermomechanischen Pumpe (Fountainpumpe), die aus einem fein porösen Filter 8 (Superfilter) mit nachgeschaltetem Aufwärmbad 9 besteht, nach Rückkühlung in einem ersten Wärmeaustauscher 10 auf die Temperatur des Rückkühlbades 4, in einen Kühlkanal 11 des zu kühlenden Objektes 16, beispielsweise einer supraleitenden Wicklung, geleitet. In dieser Kühlstrecke 11 nimmt das He II die von dort abzuführende Wärme auf. Das austretende, erwärmte He durchströmt dann einen zweiten Wärmeaustauscher 12, wobei es einen Teil der aufgenommenen Wärme an das Aufwärmbad 9 abgibt.

Aufgrund des thermomechanischen Effektes, eines spezifischen Effektes, der im He II auftritt, strömt suprafluides He weitgehend dissipationsfrei aus dem Versorgungsbad 7 in das Aufwärmbad 9, wenn in dem Aufwärmbad 9 eine höhere Temperatur als in dem Versorgungsbad 7 vorliegt. Dies wird gerade durch Einkopplung der in der Kühlstrecke 11 aufgenommenen Wärme in das Aufwärmbad 9 der Fountainpumpe bewirkt.

Das Superfilter 8 wirkt als Entropiefilter. Bildlich gesprochen wird dem He II bei Durchströmen dieses Filters die Wärme abgestreift. Dies hat zur Folge, daß bei Strömung im Versorgungsbad 7 Wärme entsteht, die durch den Wärmeaustauscher 6 an das Rückkühlbad 4 abgegeben wird. Am Austritt des Superfilters 8 tritt dagegen eine Kühlwirkung auf. Hiermit wird ein Teil der über den Wärmeaustauscher 12 dem Aufwärmbad 9 zugeführte Wärme abgeführt. Das aus dem zweiten Wärmeaustauscher 12 austretende Helium wird dann in einem nachgeschalteten dritten Wärmeaustauscher 13 auf die Ausgangstemperatur rückgekühlt und wieder dem Versorgungsbad 7 zugeführt.

Fig. 1a zeigt eine erweiterte Version der Einrichtung nach Fig. 1, wobei den Wärmeaustauschern 10 und 13 ein vierter Wärmeaustauscher 14 und ein fünfter Wärmeaustauscher 15 vorgeschaltet sind, die zum Vorkühlen innerhalb der Abgasleitung 5 geführt sind, um die Wärmebelastung des Rückkühlbades 4 zu reduzieren.

In Fig. 2 ist die errechnete Kühlcharakteristik des erfindungsgemäßen Kühlsystems dargestellt. Hierbei ist die Fluidtemperatur T_2 bei Austritt aus dem mit der Leistung Q beheizten Kühlkanal 11 mit der Länge L , dem Strömungsquerschnitt F und dem hydraulischen Durchmesser D über der "normierten" Heizleistung aufgetragen. Die Rechnung ist für zwei verschiedene Sy-

stemdrücke ($p_0 = 1,0$ und $7,5$ bar) durchgeführt worden.

In Fig. 2a ist der Heliumdurchsatz, der sich in Kanälen mit dem Durchmesser von $D = 4$ mm einstellt, wenn daraus der Wärmestrom Q abgeführt wird. Dies veranschaulicht, daß mit dem erfindungsgemäßen Kühlsystem auch aus langen Kanälen beträchtliche Wärmelasten abgeführt werden können. Die Kühlung setzt auch nicht aus, wenn die Austrittstemperatur T_2 den He II-Bereich verläßt.

Wie in Fig. 2b dargestellt, nimmt der Förderdruck (Fountaindruck Δp_f) sogar bis zu einer Austrittstemperatur von $T_2 \text{ max} \approx 3,5$ K zu. Somit ist zu erwarten, daß in einem solchen Kühlsystem ein kontinuierlicher Übergang von He II zur erzwungenen He I-Kühlung stattfindet. Dies kann auch als Vorteil gegenüber einer He II-Badkühlung angesehen werden.

Fig. 3 zeigt ein Ausführungsbeispiel einer typischen Fountainpumpe für eine maximale Förderrate von etwa 10 g/sec bei kleinem Druckabfall und für etwa $0,3$ bar maximalen Förderdruck bei kleinem Durchsatz. Mit einer solchen Einheit, kann beispielsweise aus einem Kühlkanal von 5 mm Durchmesser und 100 mm Länge, kann eine Leistung von etwa 3 Watt abgeführt werden, wenn die Eintrittstemperatur T_1 $1,8$ K und die Austrittstemperatur T_2 $2,16$ K beträgt. Das Superfilter 8 besteht hierbei beispielsweise aus Al_2O_3 -Pulver mit einer mittleren Teilchengröße von $1,5$ μm , das mit einem Füllfaktor von etwa 50% in ein Rohr von etwa 100 mm Länge und 35 mm Durchmesser gepreßt ist. Natürlich können auch andere Materialien mit ähnlicher Porosität verwendet werden. Querschnitt und Länge der Filtereinheiten sind den speziellen Anforderungen bezüglich Massendurchsatz und Förderdruck anzupassen.

Um solche Einrichtungen den jeweiligen Gegebenheiten bezüglich abzuführender Wärme sowie Querschnitt und Länge der Kühlkanäle anzupassen, können mehrere Kühlkanäle 11 oder mehrere Pumpeinheiten in geeigneter Weise miteinander kombiniert werden.

Bei derartigen Kombinationen muß der Tatsache Rechnung getragen werden, daß der mit solchen Fountainpumpen erreichbare Förderdruck aufgrund physikalischer Effekte zwar auf relativ niedrige Werte von weniger als etwa $0,5$ bar begrenzt ist. Der erzielbare Durchsatz hängt jedoch bei gegebenem Filtermaterial nur von der zugeführten Wärme und vom Filterquerschnitt ab. Demzufolge können zwar nicht beliebig lange Kühlkanäle betrieben werden, einer Unterteilung in mehrere Parallelkanäle ist dagegen keine physikalische Grenze gesetzt.

Fig. 4 stellt ein Kühlschema mit parallel geschalteten Kühlkanälen 11 dar, wie es bei großer Wärmelast bzw. engen Kühlkanalquerschnitten möglich ist. Dieses Kühlsystem unterscheidet sich von dem in Fig. 1 dargestellten lediglich dadurch, daß in dem zu kühlenden Objekt (beispielsweise einer supraleitenden Wicklung) der He II-Strom in mehrere Teilströme aufgespalten ist. Der Querschnitt der Kühlkanäle 11 des Superfilters 8 sowie die Wärmeaustauscher 10, 12, 13, 14 und 15 müssen dabei dem erhöhten Durchsatz angepaßt sein. Ein solches System erscheint dann zweckmäßig, wenn alle Parallelzweige gleiche Strömungswiderstände und gleiche thermische Belastungen haben.

Fig. 5 zeigt eine Kühleinrichtung für den Fall, daß parallele Kühlkanäle 11 und 11a ungleich belastet sind und ungleiche Strömungswiderstände aufweisen. Jeder der Kühlkanäle 11 und 11a hat eine eigene Pumpe, wodurch gewährleistet ist, daß sich in jedem Kühlkanal 11 und 11a ein der jeweiligen Belastung entsprechender

Durchsatz einstellt.

Das aus der Mitte der Wicklung 16 (oder auch von einer beliebigen Zwischenstelle abgeführte, erwärmte He wird zunächst durch den zweiten Wärmeaustauscher 12 geführt und regt somit einen ersten Massenstrom 17 an, der nach Rückkühlung in den Wärmeaustauschern 15 und 10 den Kühlkanal 11 der Wicklung 16 durchströmt. Nach Austritt aus dem Wärmeaustauscher 12 wird das He in einen sechsten Wärmeaustauscher 12a einer zweiten Fountainpumpe geführt. Wegen der bereits teilweise abgesenkten Temperatur des Kältemittels bei Eintritt in diese zweite Pumpe, kann dort nur ein vergleichsweise geringerer zweiter Massenstrom 17a angeregt werden als in der ersten Pumpe. Dieser Heliumstrom wird nach Rückkühlung in den Wärmeaustauschern 15a und 10a durch den zweiten Kühlkanal 11a der Wicklung 16 geführt.

Somit erhält man ein selbst angeregtes Kühlsystem, mit dem in den beiden Wicklungsteilen unterschiedliche Kühlmittelströme 17 und 17a erzeugt werden. Nach dem gleichen Prinzip können auch mehr als zwei parallele Kühlkreise aufgebaut werden.

Derartige Kühlkreise mit abgestuften Kälteleistungen können insbesondere für Wicklungen mit inhomogener thermischer Belastung interessant sein. Ein solcher Fall liegt z.B. bei einer Toroidalfeldspule eines TOKAMAK-Fusionsreaktors vor. Hierbei tritt in den Wicklungslagen, die dem Plasma am nächsten sind, aufgrund der Absorption von Neutronen, eine beträchtlich höhere Belastung auf als weiter außen. Bezogen auf das in Fig. 5 dargestellte Kühlsystem würde man in diesem Fall den größeren Massenstrom 17 durch die inneren Windungen führen.

Fig. 6 zeigt eine weitere Konzeption eines Kühlsystems, wobei die Zirkulation des He II nicht nur durch die vom Kühlobjekt zur Fountainpumpe zurückgekoppelte Wärme angeregt wird, sondern auch zusätzlich durch andere Wärmeströme, die an anderen Stellen des Gesamtkühlsystems zwischen dem Temperaturniveau des He I-Vorratsbehälters 1 und des He II-Aufwärmrades 9 fließen. Bei den hier diskutierten Beispielen sind das zwei Anteile:

- a) ein erster Wärmestrom 18, durch die als thermische Barriere auszubildende Druckausgleichsverbinding 1a zwischen dem He I und dem He II-System, und
- b) ein zweiter Wärmestrom 19, der mit dem vom He I-Vorratsbehälter 1 über einen achten Wärmeaustauscher 2a zum Rückkühlbad 4 einströmenden He verknüpft ist.

Beide Wärmeströme 18 und 19 belasten das Aufwärmrad 9 und liefern somit einen Beitrag zur verstärkten Konvektion. Durch diese Maßnahme wird die thermische Belastung des Rückkühlbades 4 verringert. Wenn eine Druckleitung 21, die über einen Wärmeaustauscher 20 mit dem Versorgungsbad 1 thermisch gekoppelt ist, anstelle der Druckausgleichsleitung 1a hydraulisch von dem Vorratsbad 1 entkoppelt ist, kann dem He II-System 4 über diese Druckleitung 21 ein beliebig hoher Druck aufgeprägt werden.

Bezugszeichenliste

- 1 Vorratsbehälter
- 2 Rohr
- 2a achter Wärmeaustauscher

3	Entspannungsventil	
4	Rückkühlbad	
5	Abgasleitung	
6	Wand	
7	Versorgungsbad	5
8	Superfilter	
9	Aufwärmbad	
10	erster Wärmeaustauscher	
11	Kühlkanal/Kühlstrecke	
12	zweiter Wärmeaustauscher	10
12a	sechster Wärmeaustauscher	
13	dritter Wärmeaustauscher	
14	vierter Wärmeaustauscher	
15	fünfter Wärmeaustauscher	
16	zu kühlende Objekt	15
17	erster Massenstrom	
17a	zweiter Massenstrom	
18	erster Wärmestrom	
19	zweiter Wärmestrom	
20	siebter Wärmeaustauscher	20
21	Druckleitung	

Hierzu 8 Blatt Zeichnungen

25

30

35

40

45

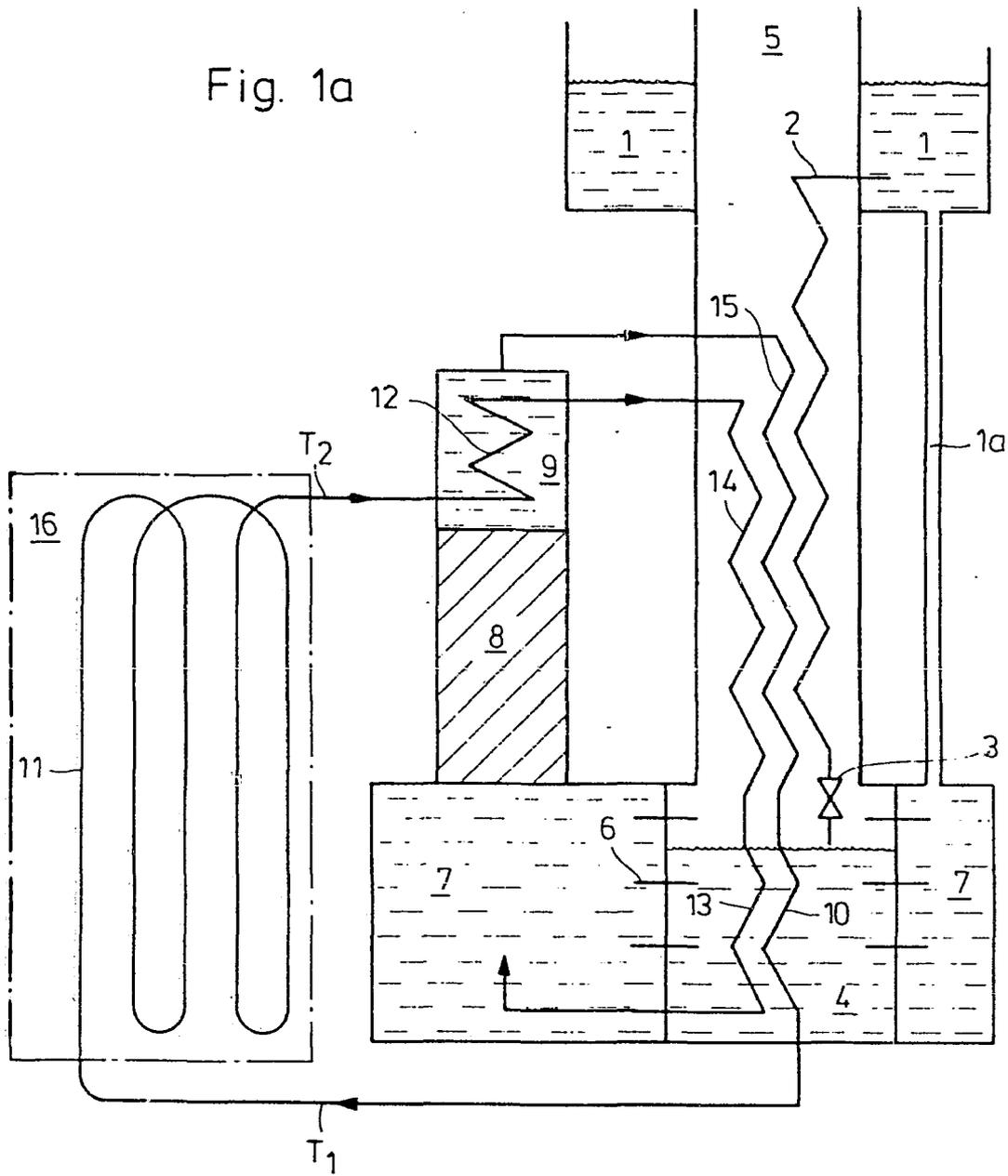
50

55

60

65

Fig. 1a



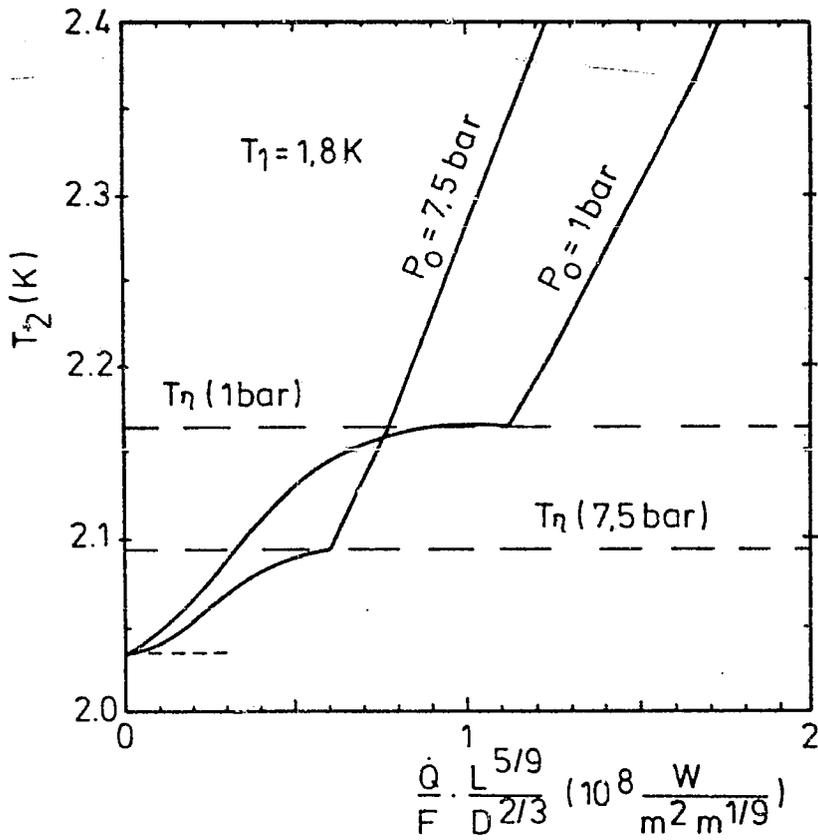


Fig. 2

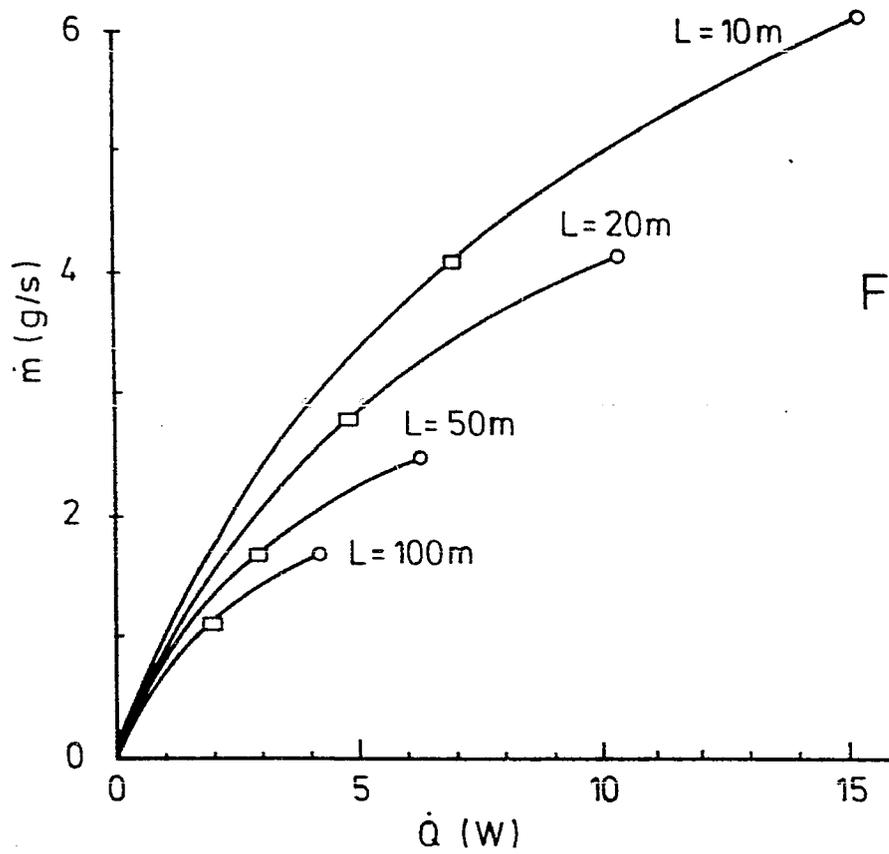
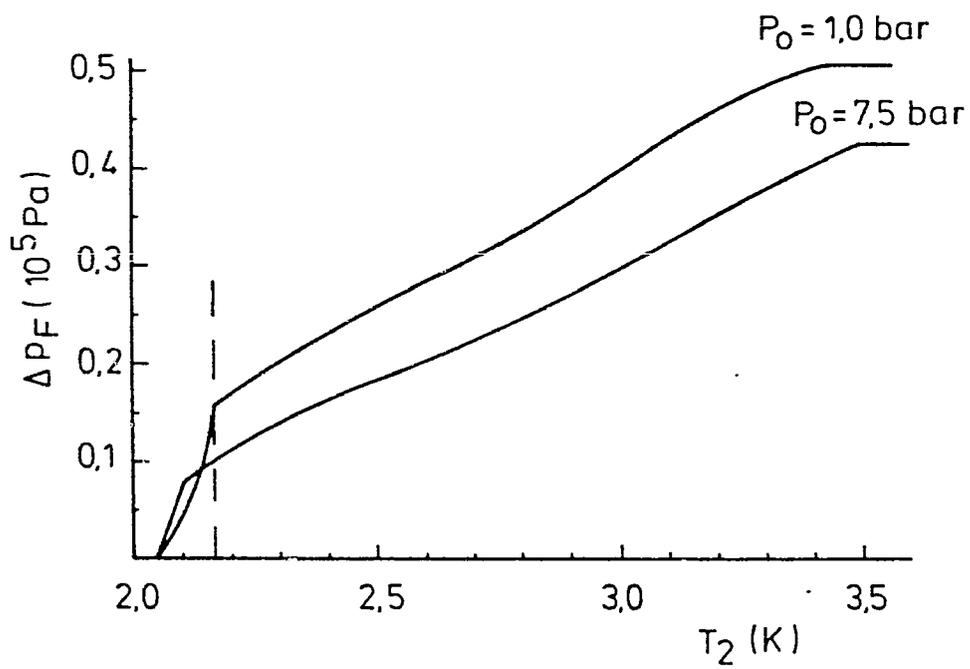


Fig. 2a

Fig. 2b



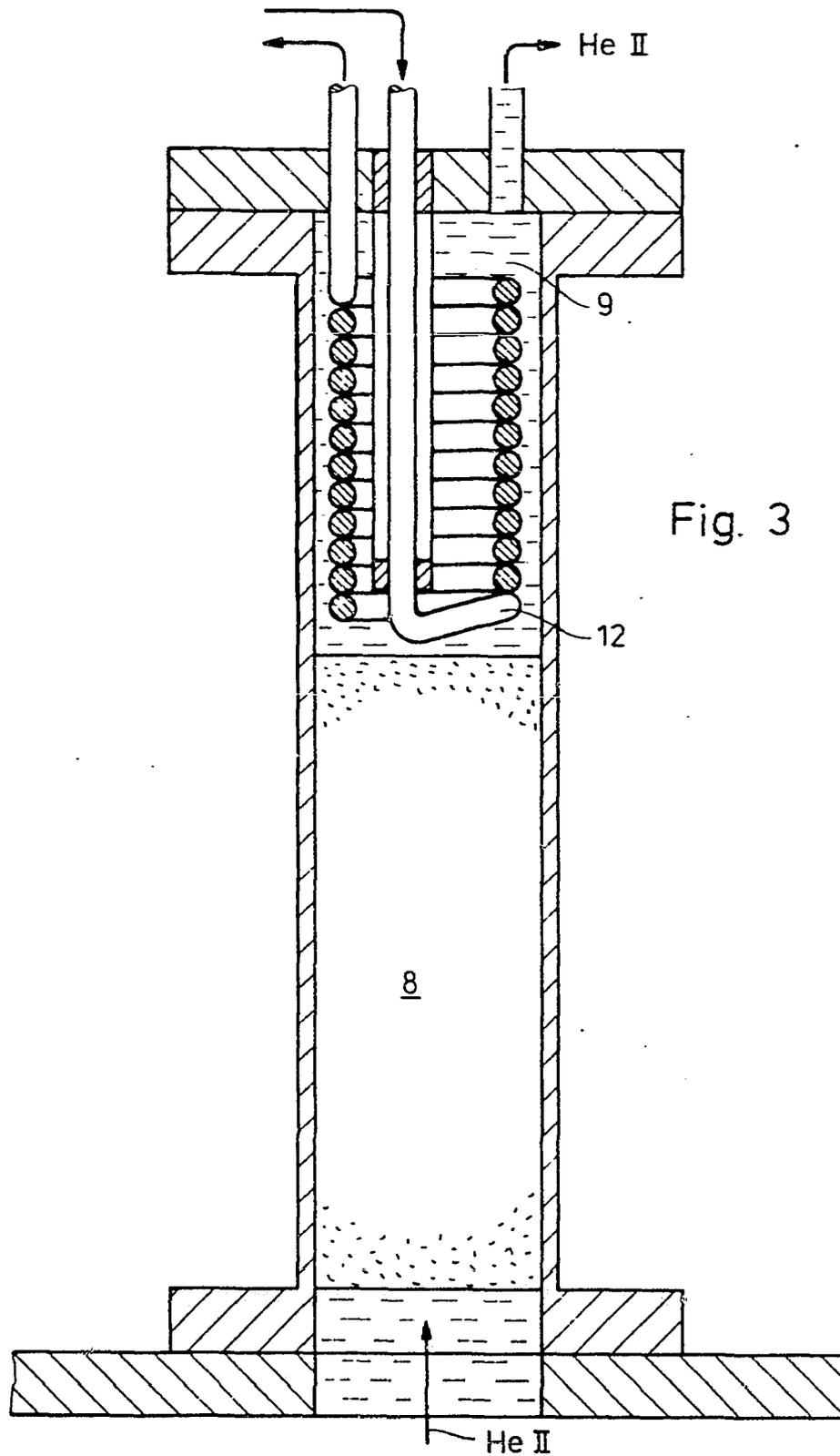


Fig. 3

Fig. 4

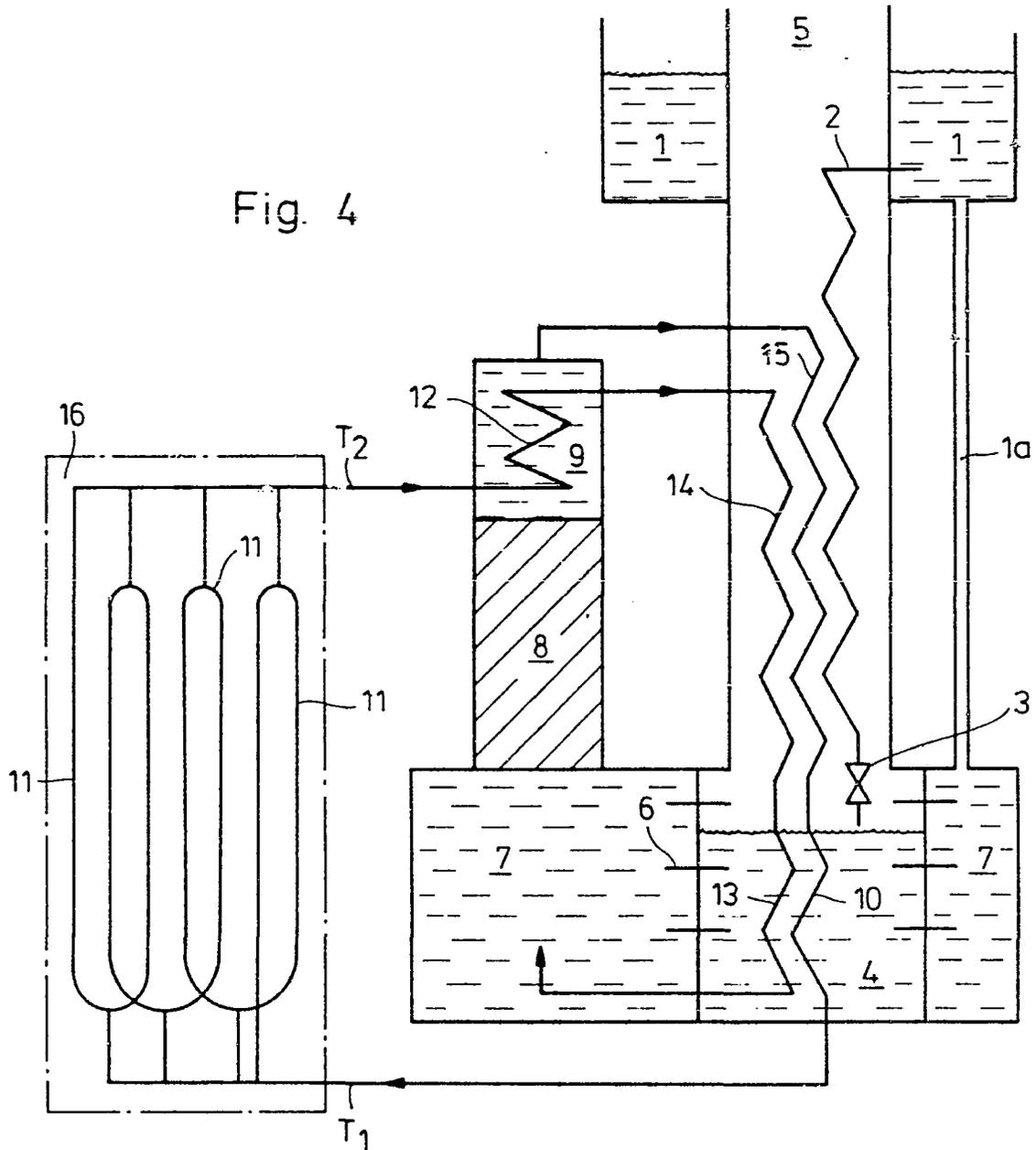


Fig. 5

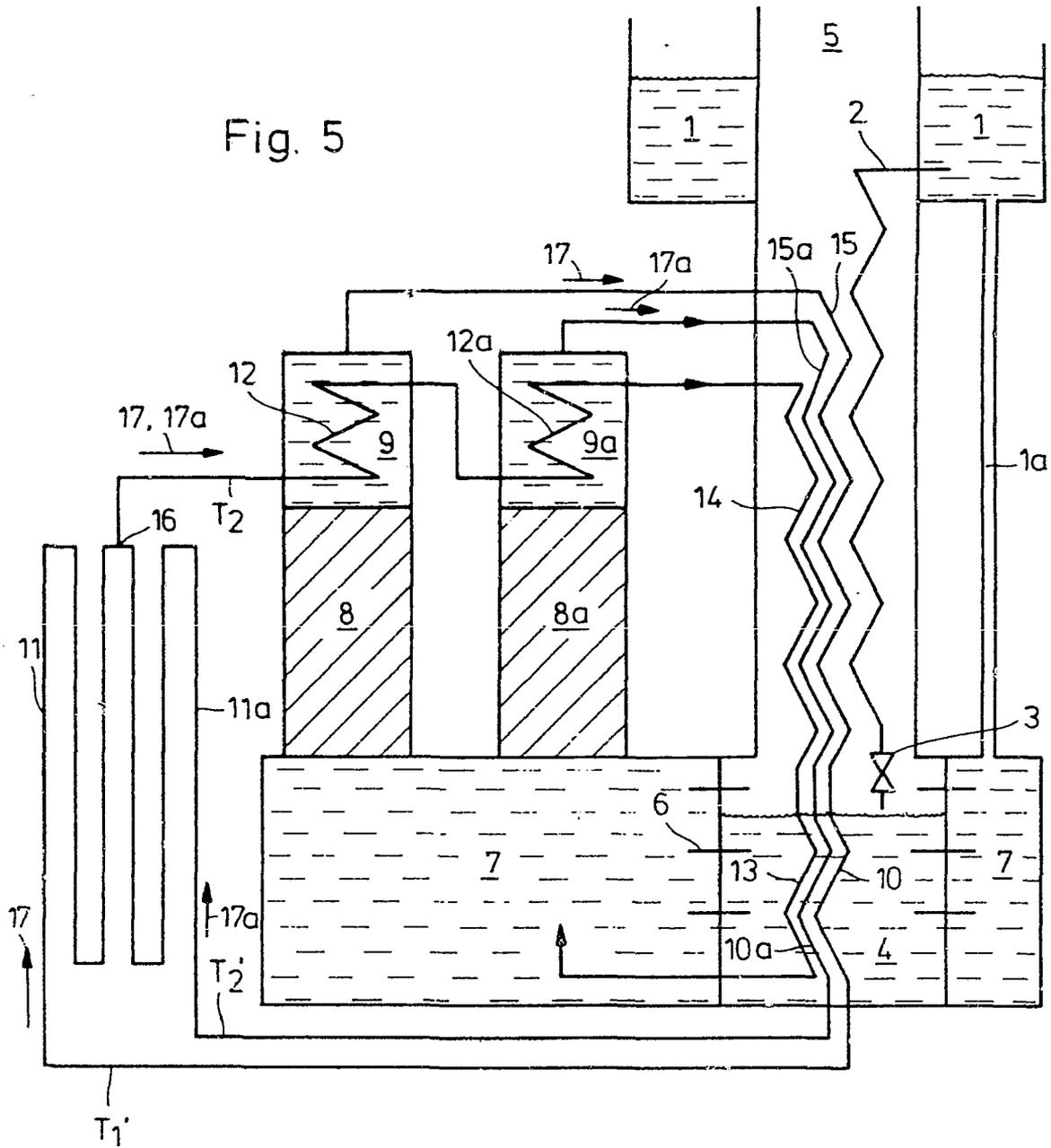


Fig. 6

