



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2010 041 194.9**

(22) Anmeldetag: **22.09.2010**

(43) Offenlegungstag: **22.03.2012**

(51) Int Cl.: **H02K 55/02 (2006.01)**

(71) Anmelder:
Siemens Aktiengesellschaft, 80333, München, DE

(72) Erfinder:
**Frank, Michael, 91080, Uttenreuth, DE; Haßelt,
Peter van, 91058, Erlangen, DE**

**JIKIHARA, K. u.a.: A Cryocooler Cooled
10.7T Superconducting Magnet with a Room
Temperature Bore of 52mm. Proceedings of the
Sixteenth International Cryogenic Engineering
conference, 20.-24.05.1996. - : Verlag Elsevier
Science, 1997. 1109-1129. - ISBN -**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

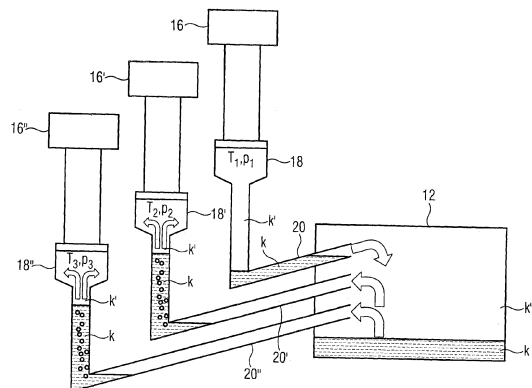
DE	103 21 463	A1
US	6 477 847	B1
US	5 848 532	A
WO	00/ 13 296	A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung und Verfahren zur Kühlung einer supraleitenden Maschine**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Kühlung einer supraleitenden Maschine (2), bei welcher wenigstens zwei Kondensorräume (18, 18', 18'') jeweils mit einem Kaltkopf (16, 16', 16'') in thermischen Kontakt stehen und bei welchen die wenigstens zwei Kondensorräume (18, 18', 18'') jeweils eine Verbindungsleitung (20, 20', 20'') aufweisen, über welche die wenigstens zwei Kondensorräume (18, 18', 18'') fluidisch mit einem Verdampferraum (12) in Verbindung stehen. Über einen Temperatur- und damit verbundenen Druckunterschied in den wenigstens zwei Kondensorräumen (18, 18', 18'') ist ein flüssiges Kühlfluid k von wenigstens einem Kondensorraum (18, 18', 18'') in den Verdampferraum (12) beweg- bzw. pumpbar.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Kühlung einer supraleitenden Maschine, bei welchen wenigstens zwei Kondensorräume jeweils mit einem Kaltkopf in thermischen Kontakt stehen und bei welchen die wenigstens zwei Kondensorräume jeweils eine Verbindungsleitung aufweisen, über welche die wenigstens zwei Kondensorräume fluidisch mit einem Verdampferraum in Verbindung stehen.

[0002] Supraleitende Maschinen umfassen in der Regel supraleitende Spulen, welche zumindest während des Betriebs der Maschine zuverlässig gekühlt werden müssen. Seit 1987 kennt man metalloxidische Supraleitermaterialien mit Sprungtemperaturen T_c von über 77 K. Diese Materialien werden auch als Hoch(High)- T_c -Supraleitermaterialien oder HTS-Materialien bezeichnet und ermöglichen prinzipiell eine Kühltechnik mit flüssigem Stickstoff (LN_2). Maschinen, welche Spulen mit HTS-Material umfassen, können somit z. B. mit flüssigem Stickstoff (LN_2) oder mit flüssigem Neon (LNe) gekühlt bzw. betrieben werden.

[0003] Zur Kühlung von Wicklungen mit HTS-Material kommen bevorzugt Kälteanlagen in Form von sogenannten Kryokühlern mit geschlossenem He-Druckgaskreislauf zum Einsatz. Solche Kryokühler sind insbesondere vom Typ Gifford-McMahon oder Stirling oder sind als sogenannte Pulsröhrenkühler ausgebildet. Sie haben den Vorteil, dass ihre Kälteleistung quasi auf Knopfdruck zur Verfügung steht und die Handhabung von tiefkalten Flüssigkeiten vermieden wird. Bei Verwendung solcher Kälteanlagen wird die supraleitende Wicklung z. B. durch Wärmeleitung zu einem Kaltkopf eines Refrigerators indirekt gekühlt (vgl. z. B. "Proc. 16th Int. Cryog. Engng. Conf. (ICEC 16)", Kitakyushu, JP, 20.-24.05.1996, Verlag Elsevier Science, 1997, Seiten 1109 bis 1129).

[0004] Eine Kühltechnik, wie z. B. in der DE 103 21 463 A1 beschrieben, ist für die Kühlung von Rotoren elektrischer Maschinen einsetzbar. Der Rotor enthält eine rotierende Wicklung aus HTS-Leitern, die sich in einem wärmeleitend ausgebildeten Wicklungsträger befinden. Dieser Wicklungsträger ist mit einem zentralen, sich in Achsrichtung erstreckenden, zylindrischen Hohlraum ausgestattet, an den sich seitlich aus dem Wicklungsträger herausführende rohrförmige Leitungsteile anschließen. Diese Leitungsteile führen in einen geodätisch höher liegenden Kondensorraum einer Kälteeinheit und bilden zusammen mit diesem Kondensorraum und dem zentralen Rotorhohlraum ein geschlossenes Ein-Rohr-Leitungssystem. In diesem Leitungssystem befindet sich ein Kältemittel bzw. Kühlfluid, das unter Ausnutzung eines sogenannten Thermosiphon-Effektes zirkuliert. Hierbei wird in dem Kondensorraum kondensiertes

Kühlfluid über die rohrförmigen Leitungsteile in den zentralen Hohlraum geleitet, wo es wegen der thermischen Ankopplung an den Wicklungsträger und damit an die HTS-Wicklung Wärme aufnimmt und verdampft. Das verdampfte Kühlfluid gelangt dann zurück über dieselben Leitungsteile in den Kondensorraum, wo es zurückkondensiert wird. Die hierfür erforderliche Kälteleistung wird von einer Kältemaschine erbracht, deren Kaltkopf an den Kondensorraum thermisch angekoppelt ist.

[0005] Der Rückstrom des Kältemittels wird dabei getrieben durch einen leichten Überdruck in den als Verdampfer teil wirkenden zentralen Hohlraum hin zu dem als Kondensator wirkenden Teilen der Kältemaschine. Dieser, durch das Entstehen von Gas im Verdampfer teil und das Verflüssigen im Kondensorraum erzeugte Differenzdruck, führt also zu dem gewünschten Kältemittelrückstrom. Entsprechende Kältemittelströmungen sind von sogenannten "Heat-Pipes" prinzipiell her bekannt.

[0006] Bei der bekannten Maschine mit Thermosiphon-Kühlung mittels einer entsprechenden Kälteeinheit erfolgt also der Transport des flüssigen Kältemittels allein unter Ausnutzung der Schwerkraft, so dass keine weiteren Pumpsysteme erforderlich sind. Dies erfordert eine Kälteeinheit bzw. einen Kondensorraum, welcher zwingend geodätisch höher angeordnet sein muss als die Maschine bzw. der Wicklungsträger. Damit verbundene Nachteile treten insbesondere bei räumlichen Beschränkungen des Maschinen- und Kälteeinheitsaufbaus auf. So kann z. B. bei einer Maschine mit senkrecht angeordneter Maschinenachse ein mit der Maschine angetriebenes Objekt, z. B. ein Motor, oberhalb der Maschine angeordnet sein. Die Maschine ist derart in ihrer Umgebung eingebaut, dass in der Ebene der Maschine kein freier Raum vorhanden ist. Die geodätisch höhere Position ist durch das angetriebene Objekt besetzt, und eine Anordnung der Kälteeinheit geodätisch höher ist in dieser Situation nicht möglich. Auch in komplexen Anwendungen, wie z. B. bei Triebwagen von Eisenbahnen, kann z. B. aus Vorschriften auf Grund von Oberleitungs- und/oder Tunnelhöhen die Bauhöhe des Triebwagens beschränkt sein. Bei gegebenen Maschinengrößen, welche in der Größenordnung der Höhenvorschrift liegen, kann selbst bei waagerechter Anordnung der Maschinenachse eine Anordnung der Kälteeinheit geodätisch höher als die Maschine nicht möglich sein.

[0007] Ein weiterer Fall, bei welchem Probleme bei einem rein schwerkraftgetriebenen Kühlmittelfluss auftreten, ist auf Schiffen oder Off-shore-Einrichtungen gegeben. Will man eine zuvor beschriebene Maschineneinrichtung auf Schiffen oder Off-shore-Einrichtungen einsetzen, so muss vielfach mit statischen Schieflagen, einem sogenannten "Trim", von z. B. bis zu $\pm 5^\circ$ und/oder mit dynamischen Schieflagen von

z. B. bis zu $\pm 7,5^\circ$ in Längsrichtung gerechnet werden. Um eine Zulassung einer Klassifizierungsgesellschaft für einen Schiffseinsatz zu erhalten, muss folglich das Kühlsystem einer solchen Maschineneinrichtung an Bord eines Seefahrzeugs auch unter diesen Bedingungen eine sichere Kühlung gewährleisten. Will man die genannten Schieflagen der Maschine zulassen, so besteht dann die Gefahr, dass ein Bereich der rohrförmigen Leitungsteile zwischen dem zentralen Rotorhohlraum und der Kälteeinheit geodätisch tiefer zu liegen kommt als der zentrale Rotorhohlraum. Die Folge davon ist, dass das Kältemittel unter Einfluss der Schwerkraft den zu kühlenden Rotorhohlraum nicht erreichen kann. Eine Kühlung der Maschine und somit deren Betrieb wäre damit nicht mehr sichergestellt.

[0008] Um eine zuverlässige Kühlung auch bei Schieflagen der Maschine zu gewährleisten, ist es möglich die Maschine gegenüber der Horizontalen so geneigt anzuordnen, dass auch bei größter anzunehmender Trimlage oder Oszillationsamplitude in dem Thermosiphon-Leitungssystem immer noch ein Gefälle in Richtung auf den Rotorhohlraum vorhanden ist. Eine entsprechend geneigte Anordnung ist gerade im Schiffsbau insbesondere bei größerer Maschinenlänge aus Gründen eines dann erforderlichen großen Platzbedarfs unerwünscht. Alternativ kann statt eines Ein-Rohr-Leitungssystems für eine Kältemittelzirkulation zwischen einem Kondensorraum und dem Verdampferraum, bei dem das flüssige und das gasförmige Kältemittel durch gleiche Rohrteile vom und zum Kondensorraum strömen, ein Zwei-Rohr-Leitungssysteme verwendet werden. Dabei wird der Thermosiphon-Effekt genutzt, wie er z. B. in der WO 00/13296 A beschrieben ist. Es muss jedoch im Bereich der Hohlwelle des Rotors ein zusätzliches Rohr für das gasförmige Kältemittel vorgesehen werden. Der Kondensorraum muss geodätisch gegenüber dem Verdampferraum hoch genug angeordnet sein, um über die Schwerkraft eine zuverlässige Strömung des Kühlfluids aus dem Kondensorraum in den Verdampferraum sicherzustellen. Dies erfordert Bauraum, welcher z. B. in Schiffen nur beschränkt zur Verfügung steht.

[0009] Eine weitere Alternative stellt die Verwendung einer mechanischen Pumpe und/oder von mechanischen Ventilen dar. Das Kältemittel kann durch eine Pumpanlage zwangsumgewälzt werden. Hierfür ist jedoch ein erheblicher apparativer Aufwand erforderlich, insbesondere wenn das Kältemittel z. B. eine Temperatur von 25 bis 30 K aufweist. Derartige Umwälzanlagen bedingen erhebliche Verluste und können die Lebensdauernanforderungen des Schiffbaus mit seinen langen Wartungsintervallen kaum erfüllen.

[0010] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es deshalb, eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Kühlung einer supraleitenden Maschine anzugeben, wel-

che eine zuverlässige Kühlung auch bei Schieflagen von Maschinen ermöglichen. Dabei soll auf mechanisch bewegliche Teile, wie z. B. mechanische Pumpen und Ventile verzichtet werden, da diese bei kryogenen Temperaturen aufwendig, kostenintensiv und störanfällig sind. Weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine Vorrichtung und ein Verfahren anzugeben, bei welchen ein Kühlfluid auch entgegen der Richtung bzw. Wirkung der Schwerkraft ohne mechanisch bewegte Teile wie z. B. mechanische Pumpen und Ventile bewegt werden kann.

[0011] Die angegebene Aufgabe wird bezüglich der Vorrichtung zur Kühlung einer supraleitenden Maschine mit den Merkmalen des Anspruchs 1 und bezüglich des Verfahrens zur Kühlung einer supraleitenden Maschine mit den Merkmalen des Anspruchs 7 sowie mit den Merkmalen des Anspruchs 8 gelöst.

[0012] Vorteilhafte Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Vorrichtung und des Verfahrens zur Kühlung einer supraleitenden Maschine gehen aus den jeweils zugeordneten abhängigen Unteransprüchen hervor. Dabei können die Merkmale der Nebengeordneten Ansprüche untereinander und mit Merkmalen der Unteransprüche sowie Merkmale der Unteransprüche untereinander kombiniert werden.

[0013] Die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Kühlung einer supraleitenden Maschine weist wenigstens zwei Kondensorräume auf, welche jeweils mit einem Kaltkopf in thermischen Kontakt stehen. Dabei weisen die wenigstens zwei Kondensorräume jeweils eine Verbindungsleitung auf, über welche die wenigstens zwei Kondensorräume fluidisch mit einem Verdampferraum in Verbindung stehen. Die wenigstens zwei Kondensorräume sind derart ausgebildet, dass ein Kühlfluid in flüssiger Form auch gegen die Schwerkraft bewegbar ist, von wenigstens einem Kondensorraum in den Verdampferraum durch einen Druckunterschied zwischen einem ersten Druck im ersten Kondensorraum und einem zweiten Druck im zweiten Kondensorraum. Die Drücke sind jeweils durch die Temperatur in den Kondensorräumen bestimmt (Siedelinie des Kühlmittels).

[0014] Durch die Verwendung von zwei Kondensorräumen, mit jeweils einer Verbindungsleitung zum Verdampferraum, können die Temperaturen in den Kondensorräumen über die jeweils mit den Kondensorräumen thermisch gekoppelten Kaltköpfe unterschiedlich eingestellt werden. Dies ermöglicht den Aufbau eines Druckunterschieds zwischen den Kondensorräumen bzw. ihren Innenraumvolumen, welche mit flüssigem und/oder gasförmigem Kühlfluid gefüllt sind. In einem Kondensorraum, in welchem die Temperatur erhöht wird, verdampft Flüssigkeit und/oder dehnt sich das gasförmige Kühlfluid aus und der Druck erhöht sich. In einem Kondensorraum, in welchem die Temperatur erniedrigt bzw. verringert wird,

verringert sich der Druck, da gasförmiges Kühlmittel kondensiert wird. Durch unterschiedliche Änderung der Temperatur in den Kondensorräumen bzw. über die Kaltköpfe, wird ein Druckunterschied zwischen den Kondensorräumen aufgebaut.

[0015] Der Druckunterschied bewirkt eine Bewegung von flüssigem Kühlfliuid aus wenigstens einer Verbindungsleitung in den Verdampferraum. Dabei wird durch einen größeren Druck in einem Kondensorraum im Vergleich zum Verdampferraum, welcher durch einen größeren Druck in einem Kondensorraum im Vergleich zu einem anderen Kondensorraum entstehen kann, Kühlfliuid in dem Verbindungsrohr des einen Kondensorraums in den Verdampferraum auch gegen die Schwerkraft bewegt, wenn der Druckunterschied groß genug ist. Dabei sind keinerlei beweglichen Teile wie Ventile oder mechanische Pumpen notwendig.

[0016] Es können auch wenigstens drei Kondensorräume mit jeweils einem Kaltkopf verwendet werden, wobei insbesondere in den wenigstens drei Kondensorräumen über den jeweils zugeordneten Kaltkopf unabhängig voneinander Temperatur geregelt oder gesteuert einstellbar ist. Vorteilhaft wird dann in zwei Kondensorräumen gleichzeitig die Temperatur erniedrigt und in einem Kondensorraum die Temperatur erhöht. Dabei kann zeitlich folgend zwischen den Kondensorräumen, in welchen die Temperatur erhöht und erniedrigt wird, getauscht werden, wobei aber immer in einem die Temperatur erhöht und in den anderen erniedrigt wird. So wird bewirkt, dass immer aus einem Verbindungsrohr flüssiges Kühlfliuid strömt und eine zuverlässige Kühlung sicher gestellt ist. In den zwei Kondensorräumen, in welchen die Temperatur erniedrigt wird, kann während aus der Verbindungsleitung des dritten Kondensorraums flüssiges Kühlfliuid in den Verdampferraum strömt, gasförmiges Kühlfliuid verflüssigt werden, welches aus dem Verdampferraum in die zwei ersteren Kondensorräume strömt.

[0017] Über die Kondensorräume, die Verbindungen und den Verdampferraum kann ein geschlossener, insbesondere ein abgeschlossener Kühlkreislauf gebildet sein. Es geht kein Kühlfliuid verloren und eine Wartung des Kühlmittelkreislaufs bzw. ein Auffüllen von Kühlfliuid ist nicht notwendig, insbesondere wenn ein geeignet dimensionierter Ausgleichsbehälter vorgesehen ist.

[0018] Die Vorrichtung kann mit einem Kühlfliuid befüllt sein, welches eine homogene Flüssigkeit, insbesondere flüssigen Stickstoff oder flüssiges Neon umfasst bzw. daraus besteht, oder welches eine Mischung aus Kühlfliuiden mit unterschiedlichen Kondensationstemperaturen umfasst. Die Verdampfungstemperatur des Kühlfliuids bestimmt die Temperatur, auf welche die supraleitende Wicklung bzw.

Maschine gekühlt werden kann, d. h. welche supraleitenden Materialien eingesetzt werden können. Die Kondensationstemperatur des Kühlfliuids bestimmt die Temperatur, auf welche die Kühlköpfe den Kondensorraum abkühlen müssen, um das verdampfte, gasförmige Kühlfliuid wieder zu verflüssigen. Über Mischungen oder Zusätze zu den Kühlfliuiden können auch Temperaturen eingestellt werden, bei welchen das Kühlfliuid verdampft bzw. sich verflüssigt, welche zwischen Temperaturen liegen, bei welchen reine Stoffe wie z. B. reiner Stickstoff oder reines Helium verdampfen bzw. sich verflüssigen.

[0019] Die supraleitende Maschine kann ein Motor oder ein Generator sein, insbesondere mit einem Rotor mit wenigstens einer supraleitenden Wicklung, wobei der Rotor um eine Achse rotierbar angeordnet ist. Die supraleitende Wicklung kann aus HTS-Material bestehen oder dieses umfassen. Dies erlaubt die Verwendung von Stickstoff als Kühlfliuid. Die Maschine kann z. B. in Schiffen eingesetzt werden.

[0020] Die Kondensorräume und die jeweils zugeordneten Kaltköpfe können feststehend außerhalb des Rotors angeordnet sein und der Verdampferraum kann innerhalb des Rotors, insbesondere als zylindrischer Hohlraum entlang der Rotationsachse des Rotors rotierbar angeordnet sein. Die Verbindungsrohre können nach dem Thermosiphonprinzip in den Verdampferraum ragen und ebenfalls feststehend sein. Dadurch werden günstige Eigenschaften der Maschine erreicht.

[0021] Ein erfindungsgemäßes Verfahren zur Kühlung einer supraleitenden Maschine, insbesondere unter Verwendung des Thermosiphoneffekts, umfasst die Schritte:

A) dass in einem ersten Kondensorraum, welcher mit einem ersten Kaltkopf thermisch in Verbindung steht, eine Temperatur erhöht wird, wobei der Druck im Kondensorraum erhöht wird, und flüssiges Kühlfliuid in einem ersten Verbindungsrohr zwischen dem ersten Kondensorraum und einem Verdampferraum durch die Temperaturerhöhung und/oder Gasausdehnung in den Verdampferraum bewegt wird,

und
B) dass gleichzeitig in wenigstens einem zweiten Kondensorraum, welcher mit einem zweiten Kaltkopf thermisch in Verbindung steht, eine Temperatur konstant gehalten wird oder erniedrigt wird, insbesondere eine niedrigere Temperatur als im ersten Kondensorraum, wodurch gasförmiges Kühlfliuid insbesondere über ein zweites Verbindungsrohr zwischen dem Verdampferraum und dem zweiten Kondensorraum durch die Temperaturerhöhung im ersten Kondensorraum und/oder durch die Temperaturerniedrigung im zweiten Kondensorraum aus dem Verdampferraum in den zweiten Kondensorraum bewegt wird.

[0022] Dabei wird der Druckunterschied durch die Temperaturerhöhung im ersten Kondensorraum aufgebaut bzw. verstärkt, wodurch durch den dadurch im ersten Kondensorraum bestehenden Überdruck, auch im Vergleich zum Druck im Verdampfererraum, flüssiges Kühlfluid in den Verdampfererraum gedrückt wird. Eine Temperaturerhöhung ist einfach und schnell zu realisieren, wodurch hohe Druckunterschiede erzeugt werden können und das flüssige Kühlfluid über große Höhenunterschiede im Bereich von Zentimetern bis hin zu Metern gegen die Schwerkraft in der Verbindungsleitung bewegt werden kann.

[0023] Ein alternatives Verfahren zur Kühlung einer supraleitenden Maschine, insbesondere unter Verwendung des Thermosiphoneffekts, umfasst die Schritte,

C) dass in einem ersten Kondensorraum, welcher mit einem ersten Kaltkopf thermisch in Verbindung steht und welcher über ein erstes Verbindungsrohr mit einem Verdampfererraum fluidisch in Verbindung steht, eine Temperatur konstant gehalten wird, und

D) dass gleichzeitig in wenigstens einem zweiten Kondensorraum, welcher mit einem zweiten Kaltkopf thermisch in Verbindung steht, eine Temperatur erniedrigt wird, wodurch gasförmiges Kühlfluid über ein zweites Verbindungsrohr zwischen dem Verdampfererraum und dem zweiten Kondensorraum durch die Temperaturerniedrigung im zweiten Kondensorraum aus dem Verdampfererraum in den zweiten Kondensorraum bewegt wird, und

E) wodurch flüssiges Kühlfluid in dem ersten Verbindungsrohr zwischen dem ersten Kondensorraum und dem Verdampfererraum in den Verdampfererraum bewegt wird, durch die Temperaturerniedrigung im wenigstens zweiten Kondensorraum.

[0024] Dabei wird der Druckunterschied durch die Temperaturerniedrigung im wenigstens zweiten Kondensorraum aufgebaut bzw. verstärkt, wodurch durch den dadurch im ersten Kondensorraum bestehenden Überdruck, auch im Vergleich zum Druck im Verdampfererraum, flüssiges Kühlfluid in den Verdampfererraum gedrückt wird. Bei der Temperaturerniedrigung kann gleichzeitig gasförmiges Kühlfluid im wenigstens zweiten Kondensorraum verflüssigt werden, welches zu einem späteren Zeitpunkt in den Verdampfererraum bewegt werden kann.

[0025] Gleichzeitig kann wenigstens in einem dritten Kondensorraum, welcher mit einem dritten Kaltkopf thermisch in Verbindung steht, eine Temperatur konstant gehalten werden oder erniedrigt werden. So kann z. B. bei den Schritten C) bis E) ein höherer Unterdruck im ersten Kondensorraum erzeugt werden und in kurzer Zeit mehr flüssiges Kühlfluid in den Verdampfererraum bewegt werden. Bei den Schritten A)

und B) kann der Effekt des Aufbaus eines Druckunterschieds zwischen ersten und zweiten Kondensorraum durch einen dritten Kondensorraum unterstützt werden und ebenfalls in kurzer Zeit mehr flüssiges Kühlfluid in den Verdampfererraum bewegt werden.

[0026] Zeitlich direkt oder indirekt folgend auf die Schritte A) und B) oder C) bis E) in dem wenigstens einem Kondensorraum, in welchem die Temperatur zur Zeit der Schritte A) und B) oder C) bis E) erhöht wurde oder konstant gehalten wurde, kann die Temperatur verringert oder konstant gehalten werden. In dem wenigstens einen zweiten, insbesondere dem zweiten und dritten Kondensorraum, in welchen die Temperatur zur Zeit der Schritte A) und B) oder C) bis E) konstant gehalten wurde oder verringert wurde, kann die Temperatur erhöht werden oder konstant gehalten werden.

[0027] Ein weiteres alternatives Verfahren zur Kühlung einer supraleitenden Maschine, insbesondere unter Verwendung des Thermosiphoneffekts, umfasst die Schritte, dass in einem ersten Kondensorraum, welcher mit einem ersten Kaltkopf thermisch in Verbindung steht, und dass gleichzeitig in wenigstens einem zweiten Kondensorraum, welcher mit einem zweiten Kaltkopf thermisch in Verbindung steht, eine Temperatur erhöht wird, wobei die Temperatur und/oder Temperaturerhöhung im ersten Kondensorraum größer ist als im zweiten Kondensorraum, wodurch im ersten Kondensorraum mehr Kühlfluid verdampft wird als im zweiten Kondensorraum und/oder sich Gas mehr ausdehnt und/oder ein Druckunterschied zwischen dem Druck im ersten und zweiten Kondensorraum entsteht oder erhöht wird, wodurch flüssiges Kühlfluid k in einem ersten Verbindungsrohr zwischen dem ersten Kondensorraum und einem Verdampfererraum bewegt wird, und gasförmiges Kühlfluid k' insbesondere über ein zweites Verbindungsrohr von dem Verdampfererraum in den zweiten Kondensorraum bewegt wird.

[0028] Alternativ können in einem Verfahren zur Kühlung einer supraleitenden Maschine, insbesondere unter Verwendung des Thermosiphoneffekts, die Schritte umfasst sein, dass in einem ersten Kondensorraum, welcher mit einem ersten Kaltkopf thermisch in Verbindung steht, und dass gleichzeitig in wenigstens einem zweiten Kondensorraum, welcher mit einem zweiten Kaltkopf thermisch in Verbindung steht, eine Temperatur verringert wird, wobei die Temperatur im ersten Kondensorraum kleiner ist als im zweiten Kondensorraum und/oder die Temperaturerniedrigung im ersten Kondensorraum größer ist als im zweiten Kondensorraum, wodurch im ersten Kondensorraum mehr Kühlfluid kondensiert wird als im zweiten Kondensorraum und/oder Gas mehr komprimiert wird und/oder ein Druckunterschied zwischen dem Druck im ersten und zweiten Kondensorraum entsteht oder erhöht wird, wodurch flüssiges

Kühlfluid k in einem zweiten Verbindungsrohr zwischen dem zweiten Kondensorraum und einem Verdampferraum bewegt wird, und gasförmiges Kühlfluid k' insbesondere über ein erstes Verbindungsrohr von dem Verdampferraum in den ersten Kondensorraum bewegt wird.

[0029] Bei den beiden zuletzt genannten Verfahren kann gleichzeitig wenigstens in einem dritten Kondensorraum, welcher mit einem dritten Kaltkopf thermisch in Verbindung steht, eine Temperatur erhöht, gleichgehalten oder verringert werden.

[0030] Es kann zeitlich direkt oder indirekt folgend in Kondensorräumen, in welchen die Temperatur erhöht wurde, die Temperatur verringert werden, und/oder zeitlich direkt oder indirekt folgend in Kondensorräumen, in welchen die Temperatur verringert wurde, die Temperatur erhöht werden. Die zuvor beschriebenen Vorteile für Verfahren mit wenigstens drei Kondensorräumen, bei welchen deren Rollen zeitlich durchgetauscht werden, gelten hierbei ebenfalls.

[0031] Das Verfahren kann so als ein kontinuierlicher oder gepulster Prozess des Pumpens von flüssigem Kühlfluid in den Verdampferraum durchgeführt werden.

[0032] Eine Temperaturerniedrigung kann durch Kühlen mit Hilfe wenigstens eines Kaltkopfes erfolgen. Eine Temperaturerhöhung kann mit Hilfe wenigstens eines Kaltkopfes und/oder durch Heizen mit Hilfe einer Heizeinrichtung erfolgen.

[0033] Eine Bewegung von Kühlfluid kann ausschließlich geregelt oder gesteuert über Druck- und/oder Temperaturunterschiede in den Kondensorräumen und dem Verdampferraum erfolgen, insbesondere bei Druckausgleich durch Kühlfluidbewegung und/oder insbesondere gegen die Schwerkraft. Ventile oder mechanische Pumpen müssen nicht mehr eingesetzt werden, um flüssiges Kühlfluid in einer Verbindungsleitung auch gegen die Schwerkraft in den Verdampferraum zu bewegen. Probleme an mechanischen Teilen bei Kryotemperaturen werden so vermieden und Wartungsaufwand- und Kosten reduziert.

[0034] In dem Verdampferraum kann das Kühlfluid von einem flüssigen in einen gasförmigen Zustand übergehen und eine rotierende Supraleitungseinrichtung, insbesondere eine supraleitende Wicklung eines Rotors eines Motors oder eines Generators kühlen, wobei die supraleitende Wicklung insbesondere HTS-Material umfasst. Der Verdampferraum kann innerhalb des Rotors, insbesondere als zylindrischer Hohlraum entlang der Rotationsachse des Rotors rotierbar angeordnet werden.

[0035] Die wenigstens zwei Kaltköpfe und die wenigstens zwei Kondensorräume und insbesondere die wenigstens zwei Verbindungsrohre, welche insbesondere von einem die Verbindungsrohre umhüllenden Gesamtrohr umfasst werden, können feststehend angeordnet werden. Das Umhüllen der Verbindungsrohre durch ein Gesamtrohr ermöglicht die Verringerung der Zahl an Dichtungen und Lager beim Übergang der feststehenden auf die rotierenden Teile.

[0036] Die mit der Vorrichtung zur Kühlung einer supraleitenden Maschine und mit dem Verfahren zur Kühlung einer supraleitenden Maschine verbundenen Vorteile, sind analog aufeinander anwendbar.

[0037] Bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung mit vorteilhaften Weiterbildungen gemäß den Merkmalen der abhängigen Ansprüche werden nachfolgend anhand der Figuren näher erläutert, ohne jedoch darauf beschränkt zu sein.

[0038] Es wird in den Figuren dargestellt:

[0039] [Fig. 1](#) eine schematische Schnittdarstellung einer supraleitenden Maschine **2** mit einer Vorrichtung zur Kühlung nach dem Stand der Technik, und

[0040] [Fig. 2](#) eine vereinfachte schematische Darstellung einer Vorrichtung zur Kühlung entsprechend der Erfindung.

[0041] In den Figuren sind sich entsprechende Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen.

[0042] Maschinen entsprechend den Figuren umfassen jeweils einen Stator und Rotor sowie eine zugeordnete Kälteeinheit. Bei der nachfolgend angedeuteten Ausführungsform der Maschine kann es sich insbesondere um einen Synchron-Motor oder einen Generator handeln. Die Maschine umfasst eine rotierende, supraleitende Wicklung, die prinzipiell metallisches LTS-Material (Niedrig- T_c -Supraleitermaterial) oder oxidisches HTS-Material (Hoch- T_c -Supraleitermaterial) verwendet. Letzteres Material sei für die nachfolgenden Ausführungsbeispiele zu Grunde gelegt. Die Wicklung kann aus einer Spule oder aus einem System von Spulen in einer zwei-, vier- oder sonstigen mehrpoligen Anordnung bestehen. Der prinzipielle Aufbau eines entsprechenden Synchron-Motors geht aus [Fig. 1](#) hervor, wie er aus dem Stand der Technik bekannt ist.

[0043] Die mit **2** bezeichnete Maschine umfasst ein feststehendes, auf Raumtemperatur befindliches Außengehäuse **3** mit einer Ständerwicklung **4**. Innerhalb des Außengehäuses und von der Ständerwicklung **4** umschlossen ist ein Rotor **5** drehbar um eine Rotationsachse **A** in Lagern **6** gelagert. Bei diesen Lagern kann es sich um konventionelle mechanische Lager

oder auch um Magnetlager handeln. Der Rotor weist ferner ein Vakuumgefäß **7** auf, in dem an z. B. hohlzylindrischen, drehmomentübertragenden Aufhängeelementen **8** ein Wicklungsträger **9** mit einer HTS-Wicklung **10** gehalten ist. In diesem Wicklungsträger ist konzentrisch zur Rotationsachse A ein sich in Achsrichtung erstreckender zentraler Hohlraum **12** vorhanden, der beispielsweise eine Zylinderform hat. Der Wicklungsträger ist dabei vakuumdicht gegenüber diesem Hohlraum ausgeführt. Er schließt diesen auf einer Seite des Rotors ab, der auf dieser Seite mittels eines massiven axialen Rotorwellenteils **5a** gelagert ist. Auf der gegenüberliegenden Seite ist der zentrale Hohlraum **12** an einen seitlichen Hohlraum **13** mit vergleichsweise kleinerem Durchmesser angeschlossen. Dieser seitliche Hohlraum führt von dem Bereich des Wicklungsträgers nach außen aus dem Bereich des Außengehäuses **3** hinaus. Ein diesen seitlichen Hohlraum **13** umschließender, in einem der Lager gelagerter, rohrförmiger Rotorwellenteil ist mit **5b** bezeichnet.

[0044] Zu einer indirekten Kühlung der HTS-Wicklung **10** über wärmeleitende Teile ist eine Kälteeinheit vorgesehen, von der lediglich ein Kaltkopf **16** angedeutet ist. Bei dieser Kälteeinheit kann es sich um einen Kryokühler vom Typ Gifford-McMahon oder insbesondere um einen regenerativen Kryokühler wie z. B. einen Pulsröhrenkühler oder einer Split-Stirling-Kühler handeln. Dabei befinden sich der Kaltkopf **16** und damit alle wesentlichen, weiteren Teile der Kälteeinheit außerhalb des Rotors **5** bzw. dessen Außengehäuses **3**.

[0045] Das Kaltteil des beispielsweise etliche Meter seitlich von dem Rotor **5** angeordneten Kaltkopfes **16** steht in einem Vakuumgefäß **23** über einen Wärmeübertragungskörper **17** in gutem thermischen Kontakt mit einer Kältemittelkondensationseinheit, die einen Kondensorraum **18** aufweist. An diesem Kondensorraum ist ein vakuumisoliertes, ortsfestes Wärmerohr **20** angeschlossen, das seitlich in einem axialen Bereich in den seitlichen, mitrotierenden Hohlraum **13** oder den zentralen Hohlraum **12** hineinragt. Zur Abdichtung des Wärmerohres **20** gegenüber dem seitlichen Hohlraum **13** dient eine in der Figur nicht näher ausgeführte Dichtungseinrichtung **21** mit mindestens einem Dichtungselement, das als eine Ferrofluidichtung und/oder eine Labyrinthdichtung und/oder eine Spaltdichtung ausgebildet sein kann. Über das Wärmerohr **20** und den seitlichen Hohlraum **13** ist der zentrale Hohlraum **12** mit dem Wärmetauschbereich des Kondensorraums **18** nach außen gasdicht abgedichtet verbunden. Die zwischen dem zentralen Hohlraum **12** und dem Kondensorraum **18** verlaufenden, rohrförmigen Teile, die zur Aufnahme eines Kältemittels dienen, sind allgemein als Leitungsteile **22** bezeichnet. Diese Leitungsteile werden zusammen mit dem Kondensorraum **18** und dem zentralen Hohlraum **12** als ein Leitungssystem betrachtet.

[0046] Diese Räume dieses Leitungssystems sind mit einem Kältemittel gefüllt, das je nach gewünschter Betriebstemperatur der HTS-Wicklung **10** ausgewählt wird. So kommen beispielsweise Helium (Kondensationstemperatur 4,2 K bei Normaldruck), Wasserstoff (Kondensationstemperatur 20,4 K bei Normaldruck), Neon (Kondensationstemperatur 27,1 K bei Normaldruck), Stickstoff (Kondensationstemperatur 77,4 K bei Normaldruck) oder Argon (Kondensationstemperatur 87,3 K bei Normaldruck) in Frage. Auch können Gemische aus diesen Gasen vorgesehen werden. Die Zirkulation des Kältemittels erfolgt dabei unter Ausnutzung eines sogenannten Thermosiphon-Effektes. Hierzu wird an einer Kaltfläche des Kaltkopfes **16** im Bereich des Kondensorraums **18** das Kältemittel kondensiert. Anschließend fließt das so verflüssigte, mit *k* bezeichnete Kältemittel durch die Leitungsteile **22** in den zentralen Hohlraum **12**. Der Transport des Kondensats geschieht dabei unter Einfluss der Schwerkraft. Hierzu kann vorteilhaft das Wärmerohr **20** geringfügig (um einige wenige Grad) gegenüber der Rotationsachse A in Richtung Erdmittelpunkt geneigt sein, um so ein Herausfließen des flüssigen Kältemittels *k* aus dem offenen Ende **20a** des Rohres **20** zu unterstützen. Im Inneren des Rotors wird dann das flüssige Kältemittel verdampft. Das dampfförmige Kältemittel ist mit *k'* bezeichnet. Dieses unter Aufnahme von Wärme verdampfte Kältemittel strömt dann durch das Innere der Leitungsteile **22** zurück in den Kondensorraum **18**. Hierbei wird der Rückstrom durch einen leichten Überdruck im als Verdampfer wirkenden Hohlraum **12** in Richtung auf den Kondensorraum **18** hin angefacht, der durch das Entstehen von Gas im Verdampfer und das Verflüssigen in dem Kondensorraum verursacht wird. Da die Zirkulation des verflüssigten Kältemittels von dem Kondensorraum **18** in den zentralen Hohlraum **12** und die Rückströmung des verdampften Kältemittels *k'* aus diesem Hohlraum zurück zu dem Kondensorraum in dem aus dem Kondensorraum **18**, den Leitungsteilen **22** und dem Hohlraum **12** gebildeten rohrförmigen Leitungssystem erfolgt, kann von einem Ein-Rohr-System mit einer Zirkulation des Kältemittels *k, k'* unter Ausnutzung eines Thermosiphon-Effektes gesprochen werden.

[0047] Wie in [Fig. 1](#) ferner dargestellt ist, kann bei einem Einsatz der Maschine **2** auf Schiffen oder Offshore-Einrichtungen eine Schiefelage auftreten, bei der die Rotationsachse A gegenüber der Horizontalen H um einen Winkel δ von einigen Grad geneigt ist. Dann erfolgt zwar nach wie vor eine Kondensation des Kältemittels in dem Kondensorraum **18**; aber das Kältemittel kann nicht mehr den zentralen Hohlraum **12** erreichen, so dass dann die Leitungsteile **20** allmählich mit flüssigem Kältemittel *k* volllaufen. Bei einer verhältnismäßig geringen Füllmenge des Leitungssystems mit Kältemittel kann dann der Läuferinnenraum bzw. der Hohlraum **12** trocken laufen und wird somit nicht mehr gekühlt. Auch bei einer

größeren Füllmenge des Leitungssystems wird der Strom des flüssigen Kältemittels k in den Leitungsteilen **20** hin zum Verdampferraum **12** nach einer gewissen Zeit blockiert. Eine sichere Kühlung des Rotors bzw. seiner supraleitenden Wicklung ist in diesem Fall ebenfalls nicht mehr gewährleistet.

[0048] Gemäß dem Stand der Technik kann deshalb vorgesehen sein, dass in diesem Zustand der Gasdruck auf der Kondensorseite für eine kurze Zeit soweit zu erhöhen ist, dass hierdurch die Kältemittelflüssigkeit aus den Leitungsteilen **20** entgegen der Schwerkraft (bei Vorhandensein des Neigungswinkels δ) in den zentralen Hohlraum **12** gedrückt wird. Eine solche Druckerhöhung erfolgt gemäß dem Stand der Technik mit Hilfe eines warmen Puffervolumens PV_w und einer mechanischen Pumpe **28**. Mit Hilfe dieser Mittel kann der Gasdruck in dem Kondensorraum **18** vorübergehend erhöht werden, so dass das dort und in den Leitungsteilen **20** befindliche flüssige Kältemittel k in den zentralen Hohlraum **12** gedrückt wird. In einer Verbindungsleitung **24** zwischen dem unter Überdruck stehenden Puffervolumen PV_w und dem Kondensorraum **18** ist deshalb ein Steuerventil **29** angeordnet, das die Verbindung zu der Pumpe **28** öffnet, die dann das Gas k' aus dem Puffervolumen in den Kondensorraum fördert. Ein Ventil **30** erlaubt eine Rückführung von überschüssigem Gas aus dem Kondensorraum **18**.

[0049] Eine so hervorzurufende Druckoszillation kann permanent erfolgen, d. h. in kurzen, sich wiederholenden Zeitintervallen (jeweils für eine kurze Zeitdauer), oder kann durch einen Lagesensor **26** bekannter Bauweise von einer Steuereinheit **27** gesteuert werden. Dieser Lagesensor detektiert die Schiefelage mit dem Neigungswinkel δ der Maschine **2** und löst so über die Steuereinheit **27** die erläuterte Einleitung eines Druckvolumens (Gaspulses) aus.

[0050] In [Fig. 1](#) wurde von einer Darstellung weiterer Teile zur Bereitstellung und Ableitung des Gases wie z. B. von einem Füllventil, von dem aus das System über die Verbindungsleitung **24** mit gasförmigem Kältemittel zu befüllen ist, abgesehen, da diese Teile allgemein bekannt sind. Lediglich ein bei einem unzulässigen Überdruck in dem System ansprechendes Überdruckventil **31** ist angedeutet.

[0051] Selbstverständlich müssen die das Kältemittel k bzw. k' umschließenden Teile oder Behältnisse gegen Wärmeeinleitung geschützt sein. Zu ihrer thermischen Isolation wird deshalb zweckmäßig eine Vakuumumgebung vorgesehen, wobei gegebenenfalls in den entsprechenden Vakuumräumen zusätzlich noch Isolationmittel wie z. B. Superisolation oder Isolationsschaum vorgesehen werden können. In [Fig. 1](#) ist das von dem Vakuumgefäß **7** eingeschlossene Vakuum mit V bezeichnet. Es umgibt außerdem das den seitlichen Hohlraum **13** umschlie-

ßende, sich bis zu der Dichtung **21** erstreckende Rohr. Das das Wärmerohr **20** sowie den Kondensorraum **18** und den Wärmeübertragungskörper **17** umschließende Vakuum ist mit V' bezeichnet. Gegebenenfalls kann auch in dem den Rotor **5** umgebenden, von dem Außengehäuse **3** umschlossenen Innenraum **32** ein Unterdruck erzeugt werden.

[0052] Nachteilig an einem System der mechanischen Pumpe **28** und Ventile **29, 30, 31** ist, dass bei einer der Einfachheit halber nicht dargestellten Anordnung der Teile in einem kryogenen Bereich, bei kryogenen Temperaturen diese Teile sehr stör anfällig sind und die Auslegung bewegter Teile auf diese Temperaturen aufwendig und kostenintensiv ist. Gerade in Hinblick auf den Einsatz auf Schiffen, aber auch bei anderen maschinentypischen Einsätzen, ist ein wartungsfreier Betrieb über lange Zeiten notwendig. Mechanisch bewegte Teile sind deshalb auf ein Minimum zu reduzieren, da diese in der Regel stör anfällig sind.

[0053] Erfindungsgemäß wird, wie in [Fig. 2](#) dargestellt, in einer zuvor beschriebenen Maschine **2** ein neuartiges Kühlprinzip eingesetzt. Dabei kann auf Teile wie Pumpe **28** und Ventile **29, 30, 31** verzichtet werden, wobei alle weiteren Teile der Maschine analog denen der zuvor in [Fig. 1](#) beschriebenen Maschine sind, soweit im Weiteren nicht anders erwähnt.

[0054] Im Gegensatz zu der in [Fig. 1](#) dargestellten Vorrichtung mit einem Kaltkopf **16** und einem Kondensorraum **18** weist das in [Fig. 2](#) dargestellte Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Kühlung einer supraleitenden Maschine **2** einen ersten, zweiten und dritten Kondensorraum **18, 18', 18''** jeweils mit einem zugeordneten Kaltkopf **16, 16', 16''** auf. Alternativ können auch zwei oder mehr als drei Kondensorräume **18** mit zugeordneten Kaltköpfen **16** vorhanden sein, was der Einfachheit halber in den [Fig.](#) nicht dargestellt ist. Jeder Kondensorraum **18, 18', 18''** ist über ein Wärmerohr **20, 20', 20''**, was im Weiteren allgemein als Verbindungsleitung **20, 20', 20''** bezeichnet wird, fluidisch mit dem Verdampferraum **12**, welcher in [Fig. 1](#) durch den zentralen Hohlraum **12** gegeben ist, verbunden. Die Verbindungsleitungen **20, 20', 20''** sind geneigt verzerrt V- oder U-förmig ausgebildet und angeordnet, d. h. sie sind leicht schräg im Bezug auf den Horizont H wie in [Fig. 1](#) dargestellt, mit einem tiefsten Punkt, an welchem unter Einfluss der Schwerkraft sich ein Fluid ansammeln kann. Die Verbindungsleitungen **20, 20', 20''** können aber auch andere Formen aufweisen, wobei wichtig ist, dass analog einem U-Rohr-Manometer sich Flüssigkeit in ihrem Inneren ansammeln kann.

[0055] Die Kondensorräume **18, 18', 18''** mit den zugehörigen Verbindungsleitungen **20, 20', 20''** und dem Verdampferraum **12** bilden ein geschlossenes

System, d. h. einen nach außen hin fluiddichten Innenraum. Der Innenraum ist mit einem Kältemittel k , k' , welches im Weiteren als Kühlfluid bezeichnet wird, befüllt. Das Kühlfluid kann im flüssigen k und/oder gasförmigen k' Aggregatzustand, d. h. als flüssiges Kühlfluid k und/oder als gasförmiges Kühlfluid k' vorliegen.

[0056] Im Betrieb der Maschine, bei welchem die supraleitende Wicklung **10** des Rotors **5** wie schon zuvor in [Fig. 1](#) beschrieben, auf bzw. unter eine kryogene Temperatur T_k gekühlt wird, ist der Verdampfererraum **12** teilweise mit flüssigem Kühlfluid k befüllt. Das Kühlfluid k verdampft und führt dadurch Wärmemenge aus dem Rotor **5** ab bzw. kühlt die supraleitende Wicklung **10** des Rotors **5**. In [Fig. 2](#) ist die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Kühlung einer supraleitenden Maschine **2** zu einem ersten Zeitpunkt gezeigt. Zu diesem Zeitpunkt wird das gasförmige, verdampfte Kühlfluid k' aus dem Verdampfererraum **12** über die Verbindungsleitungen **20'** und **20''** in die Kondensorräume **18'** und **18''** geleitet. In den Kondensorräumen **18'** und **18''** liegt eine Temperatur T_2 und T_3 unterhalb der Kondensationstemperatur des Kühlfluids k vor, jeweils mit Hilfe der zugeordneten Kühlköpfe **16'** und **16''**, wodurch dem gasförmigen Kühlfluid k' Wärmemenge entzogen wird und es zu flüssigem Kühlfluid k kondensiert. Das flüssige Kühlfluid k sammelt sich in den Verbindungsleitungen **20'** und **20''**.

[0057] Im ersten Kondensorraum **18** wird, ausgehend von einer Temperatur unterhalb der Kondensationstemperatur des Kühlfluids k die Temperatur T_1 mit Hilfe des zugeordneten Kaltkopfes **16** und/oder einer der Einfachheit halber nicht dargestellten Heizeinrichtung erhöht, auf eine Temperatur T_1^* oberhalb der Kondensationstemperatur des Kühlfluids k . Dabei verdampft flüssiges Kühlfluid und/oder dehnt sich das gasförmige Kühlfluid k' im ersten Kondensorraum **18** aus, d. h. der Druck p_1 im ersten Kondensorraum **18** wird auf einen Wert erhöht, welcher höher als die Drücke p_v im Verdampfererraum **12** und in den zwei weiteren Kondensorräumen **18'**, **18''** p_2 und p_3 ist. Dadurch wird flüssiges Kühlfluid k , welches sich in der Verbindungsleitung **20** befindet, in den Verdampfererraum **12** gedrückt, gegen die Wirkung der Schwerkraft bei einer Druckkraft, die größer als die Gewichtskraft des Kühlfluids k ist. Kühlfluid k aus dem Kondensorraum **18** und der Verbindungsleitung **20** wird in den Verdampfererraum **12** gedrückt.

[0058] Dieser Effekt wird zusätzlich verstärkt durch einen Unterdruck p_1 und p_2 in den Kondensorräumen **18'** und **18''**, welcher durch die Verringerung des Volumens des gasförmigen Kühlfluids k' bei Abkühlung und Kondensation in den Kondensorräumen **18'** und **18''** entsteht. Dieser Unterdruck saugt gasförmiges Kühlfluid k' aus dem Verdampfererraum **12** in die Verbindungsleitungen **20'** und **20''** an und verringert so

den Druck p_v im Verdampfererraum **12**. Der Druckunterschied $\Delta p(p_1 - p_v)$ zwischen dem ersten Kondensorraum **18** und dem Verdampfererraum **12** wird dadurch verstärkt und zusätzlich zum Druckausgleich flüssiges Kühlfluid k aus der Verbindungsleitung **20** in den Verdampfererraum **12** bewegt.

[0059] Der zuvor beschriebene Prozess endet unter anderem, wenn das flüssige Kühlfluid k aus der Verbindungsleitung **20** vollständig oder zumindest nahezu vollständig in den Verdampfererraum **12** bewegt wurde. Um eine kontinuierliche Kühlung bzw. einen kontinuierlichen, quasikontinuierlichen oder einen gepulsten Kühlfluidstrom von flüssigem Kühlfluid k in den Verdampfererraum **12** zu gewährleisten, kann rechtzeitig ein Tausch der Temperaturen T_1 , T_2 , T_3 in den Kondensorräumen **18**, **18'**, **18''** über die Kühlköpfe **16**, **16'**, **16''** erfolgen. Dabei kann der Kondensorraum **18** auf eine Temperatur unterhalb der Kondensationstemperatur des Kühlfluids über den Kühlkopf **16** gekühlt werden, wobei z. B. die Kondensorräume **18** und **18''** die gleiche Temperatur aufweisen. Der Kondensorraum **18'** kann über den Kühlkopf **16'** oder eine der Einfachheit halber nicht dargestellten Heizeinrichtung auf eine Temperatur geheizt werden, welche oberhalb der Kondensationstemperatur des Kühlfluids liegt. Dies bewirkt, dass zu einem zweiten, in diesem Absatz beschriebenen Zeitpunkt, der Kondensorraum **18'** wie der Kondensorraum **18** zum ersten Zeitpunkt wirkt, und zum zweiten Zeitpunkt die Kondensorräume **18** und **18''** wie die Kondensorräume **18'** und **18''** zum ersten Zeitpunkt wirken. Im Kondensorraum **18'** wird durch die Erhöhung der Temperatur ein Überdruck aufgebaut und flüssiges Kühlfluid k aus der Verbindungsleitung **20'** in den Verdampfererraum **12** bewegt. Da die Situation analog der in [Fig. 2](#) dargestellten Situation ist, nur mit vertauschten Rollen (Temperaturen, Drücken und Fluidströmen) zwischen den Kondensorräumen **18**, **18'** und **18''**, ist die Situation bzw. der Prozess zum zweiten Zeitpunkt der Einfachheit halber in den Fig. nicht dargestellt.

[0060] Zu einem dritten Zeitpunkt kann die Wirkung der Kondensorräume **18**, **18'**, **18''** ebenfalls vertauscht werden, wobei der Kondensorraum **18''** auf eine Temperatur oberhalb der Verdampfungstemperatur des Kühlfluids k mit Hilfe des Kühlkopfes **16''** gebracht werden kann. Die Kondensorräume **18** und **18'** können dabei z. B. die gleiche Temperatur aufweisen, eine Temperatur unterhalb der Kondensationstemperatur des Kühlfluids k' . Der Kondensorraum **18''** kann über den Kühlkopf **16''** oder eine der Einfachheit halber nicht dargestellten Heizeinrichtung auf eine Temperatur geheizt werden, welche oberhalb der Kondensationstemperatur des Kühlfluids liegt. Dies bewirkt, dass zum dritten Zeitpunkt der Kondensorraum **18''** wie der Kondensorraum **18** zum ersten Zeitpunkt wirkt, und zum dritten Zeitpunkt die Kondensorräume **18** und **18'** wie die Kondensorräume **18'** und **18''** zum ersten Zeitpunkt wirken. Im Kondensorraum **18''** wird

durch die Erhöhung der Temperatur ein Überdruck aufgebaut und flüssiges Kühlfluid **k** aus der Verbindungsleitung **20''** in den Verdampferraum **12** bewegt. Da die Situation analog der in [Fig. 2](#) dargestellten Situation ist, nur mit vertauschten Rollen (Temperaturen, Drücken und Fluidströmen) zwischen den Kondensorräumen **18**, **18'** und **18''**, ist die Situation bzw. der Prozess zum dritten Zeitpunkt der Einfachheit halber in den Fig. ebenfalls nicht dargestellt.

[0061] Zu einem vierten Zeitpunkt kann der Zustand des ersten Zeitpunktes wieder hergestellt werden. Durch ein regelmäßiges Tauschen der Wirkungen der Kondensorräume **18**, **18'**, **18''** nach einer festen Zeitperiode oder nach unterschiedlichen Zeiten, kann so ein kontinuierlicher, quasikontinuierlicher oder ein gepulster Betrieb der Vorrichtung zur Kühlung einer supraleitenden Maschine **2** sichergestellt werden.

[0062] Es sind auch beliebig andere Reihenfolgen bei der Vertauschung der Wirkung der Kondensorräume **18**, **18'**, **18''** möglich, wobei sich das Grundprinzip nicht ändert. Ein sicherer Kühlbetrieb kann so gewährleistet werden, selbst bei einer Neigung der Maschine **2** z. B. bei einem Einsatz in einem Schiff.

ZITATE ENHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- DE 10321463 A1 [0004]
- WO 00/13296 A [0008]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- "Proc. 16th Int. Cryog. Engng. Conf. (ICEC 16)", Kitakyushu, JP, 20.-24.05.1996, Verlag Elsevier Science, 1997, Seiten 1109 bis 1129 [0003]

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Kühlung einer supraleitenden Maschine (2), wobei die Vorrichtung wenigstens zwei Kondensorräume (18, 18', 18'') aufweist, welche jeweils mit einem Kaltkopf (16, 16', 16'') in thermischen Kontakt stehen, und wobei die wenigstens zwei Kondensorräume (18, 18', 18'') jeweils eine Verbindungsleitung (20, 20', 20'') aufweisen, über welche die wenigstens zwei Kondensorräume (18, 18', 18'') fluidisch mit einem Verdampferraum (12) in Verbindung stehen, **dadurch gekennzeichnet**, dass die wenigstens zwei Kondensorräume (18, 18', 18'') derart ausgebildet sind, dass ein Kühlfluid k in flüssiger Form gegen die Schwerkraft bewegbar ist von wenigstens einem Kondensorraum (18, 18', 18'') in den Verdampferraum (12) durch einen Druckunterschied zwischen einem ersten Druck p_1 im ersten Kondensorraum (18, 18', 18'') und einem zweiten Druck p_2 im zweiten Kondensorraum (18, 18', 18''), welche jeweils durch die Temperatur in den Kondensorräumen (18, 18', 18'') bestimmt sind.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens drei Kondensorräume (18, 18', 18'') mit jeweils einem Kaltkopf (16, 16', 16'') umfasst sind, wobei insbesondere in den wenigstens drei Kondensorräumen (18, 18', 18'') über den jeweils zugeordneten Kaltkopf (16, 16', 16'') unabhängig voneinander eine Temperatur (T_1, T_2, T_3) geregelt oder gesteuert einstellbar ist.

3. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass über die Kondensorräume (18, 18', 18''), die Verbindungen und den Verdampferraum (12) ein geschlossener, insbesondere ein abgeschlossener Kühlkreislauf gebildet ist, und/oder ein Kühlkreislauf, welcher insbesondere Füllarmaturen und insbesondere wenigstens einen Vorratsbehälter aufweist.

4. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung mit einem Kühlfluid k, k' befüllt ist, welches eine homogene Flüssigkeit, insbesondere flüssigen Stickstoff, flüssiges Neon oder flüssiges Helium umfasst, oder welches eine Mischung aus Kühlflüssigkeiten mit unterschiedlichen Kondensationstemperaturen umfasst.

5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die supraleitende Maschine (2) ein Motor oder ein Generator ist, insbesondere mit einem Rotor (5) mit wenigstens einer supraleitenden Wicklung (10), insbesondere einer supraleitenden Wicklung (10) welche HTS-Material umfasst, wobei der Rotor (5) um eine Achse (A) rotierbar angeordnet ist.

6. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Kondensorräume (18, 18', 18'') und die jeweils zugeordneten Kaltköpfe (16, 16', 16'') feststehend außerhalb des Rotors (5) angeordnet sind und der Verdampferraum (12) innerhalb des Rotors (5), insbesondere als Hohlraum (12, 13) entlang der Rotationsachse (A) des Rotors (5) rotierbar angeordnet ist, wobei der Hohlraum insbesondere zylindrisch ausgebildet ist.

7. Verfahren zur Kühlung einer supraleitenden Maschine (2) insbesondere unter Verwendung des Thermosiphoneffekts, umfassend die Schritte,

A) dass in einem ersten Kondensorraum (18, 18', oder 18''), welcher mit einem ersten Kaltkopf (16, 16', oder 16'') thermisch in Verbindung steht, eine Temperatur (T_1, T_2 , oder T_3) erhöht wird, wobei Kühlfluid verdampft wird und/oder sich Gas in dem Kondensorraum (18, 18', oder 18'') ausdehnt und/oder der Druck (p_1, p_2 , oder p_3) im Kondensorraum (18, 18', oder 18'') erhöht wird, und flüssiges Kühlfluid k in einem ersten Verbindungsrohr (20, 20', oder 20'') zwischen dem ersten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') und einem Verdampferraum (12) durch die Temperaturerhöhung, Verdampfung und/oder Gasausdehnung in den Verdampferraum (12) bewegt wird, und

B) dass gleichzeitig in wenigstens einem zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18''), welcher mit einem zweiten Kaltkopf (16, 16', oder 16'') thermisch in Verbindung steht, eine Temperatur (T_1, T_2 , oder T_3) konstant gehalten wird oder erniedrigt wird, insbesondere eine niedrigere Temperatur (T_1, T_2 , oder T_3) als im ersten Kondensorraum (18, 18', oder 18''), wodurch gasförmiges Kühlfluid k' insbesondere über ein zweites Verbindungsrohr (20, 20', oder 20'') von dem Verdampferraum (12) in den zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') durch die Temperaturerhöhung im ersten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') und/oder durch die Temperaturniedrigung im zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') bewegt wird.

8. Verfahren, insbesondere nach Anspruch 7, zur Kühlung einer supraleitenden Maschine (2) insbesondere unter Verwendung des Thermosiphoneffekts, umfassend die Schritte,

C) dass in einem ersten Kondensorraum (18, 18', oder 18''), welcher mit einem ersten Kaltkopf (16, 16', oder 16'') thermisch in Verbindung steht und welcher über ein erstes Verbindungsrohr (20, 20', oder 20'') mit einem Verdampferraum (12) fluidisch in Verbindung steht, eine Temperatur (T_1, T_2 , oder T_3) konstant gehalten wird, und

D) dass gleichzeitig in wenigstens einem zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18''), welcher mit einem zweiten Kaltkopf (16, 16', oder 16'') thermisch in Verbindung steht, eine Temperatur (T_1, T_2 , oder T_3) erniedrigt wird, wodurch gasförmiges Kühlfluid k' über ein zweites Verbindungsrohr (20, 20', oder 20'') zwi-

schen dem Verdampferraum (12) und dem zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') durch die Temperaturerniedrigung, eine Kondensation von Kühlfluid und/oder eine Kompression von Gas im zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') aus dem Verdampferraum (12) in den zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') bewegt wird,

und

E) wodurch flüssiges Kühlfluid k in dem ersten Verbindungsrohr (20, 20', oder 20'') zwischen dem ersten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') und dem Verdampferraum (12) in den Verdampferraum (12) bewegt wird, durch die Temperaturerniedrigung, eine Kondensation von Kühlfluid und/oder eine Kompression von Gas im wenigstens zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18'').

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, dass gleichzeitig wenigstens in einem dritten Kondensorraum (18, 18', oder 18''), welcher mit einem dritten Kaltkopf (16, 16', oder 16'') thermisch in Verbindung steht, eine Temperatur (T_1 , T_2 , oder T_3) konstant gehalten wird oder erniedrigt wird.

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass zeitlich direkt oder indirekt folgend auf die Schritte A) und B) oder C) bis E) in dem wenigstens einem Kondensorraum (18, 18', oder 18''), in welchem die Temperatur (T_1 , T_2 , oder T_3) zur Zeit der Schritte A) und B) oder C) bis E) erhöht wurde oder konstant gehalten wurde, die Temperatur (T_1 , T_2 , oder T_3) verringert oder konstant gehalten wird, und dass in dem wenigstens einen zweiten, insbesondere dem zweiten und dritten Kondensorraum (18, 18', oder 18''), in welchen die Temperatur (T_1 , T_2 , oder T_3) zur Zeit der Schritte A) und B) oder C) bis E) konstant gehalten wurde oder verringert wurde, die Temperatur (T_1 , T_2 , oder T_3) erhöht wird oder konstant gehalten wird.

11. Verfahren, insbesondere nach einem der Ansprüche 7 bis 10, zur Kühlung einer supraleitenden Maschine (2) insbesondere unter Verwendung des Thermosiphoneffekts, umfassend die Schritte, dass in einem ersten Kondensorraum (18, 18', oder 18''), welcher mit einem ersten Kaltkopf (16, 16', oder 16'') thermisch in Verbindung steht, und dass gleichzeitig in wenigstens einem zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18''), welcher mit einem zweiten Kaltkopf (16, 16', oder 16'') thermisch in Verbindung steht, eine Temperatur (T_1 , T_2 , oder T_3) erhöht wird, wobei die Temperatur und/oder Temperaturerhöhung im ersten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') größer ist als im zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18''), wodurch im ersten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') mehr Kühlfluid verdampft wird als im zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') und/oder sich Gas mehr ausdehnt und/oder ein Druckunterschied zwischen dem Druck (p_1 , p_2 , oder p_3) im ersten und zweiten Kon-

densorraum (18, 18', oder 18'') entsteht oder erhöht wird, wodurch flüssiges Kühlfluid k in einem ersten Verbindungsrohr (20, 20', oder 20'') zwischen dem ersten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') und einem Verdampferraum (12) bewegt wird, und gasförmiges Kühlfluid k' insbesondere über ein zweites Verbindungsrohr (20, 20', oder 20'') von dem Verdampferraum (12) in den zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') bewegt wird.

12. Verfahren, insbesondere nach einem der Ansprüche 7 bis 11, zur Kühlung einer supraleitenden Maschine (2) insbesondere unter Verwendung des Thermosiphoneffekts, umfassend die Schritte, dass in einem ersten Kondensorraum (18, 18', oder 18''), welcher mit einem ersten Kaltkopf (16, 16', oder 16'') thermisch in Verbindung steht, und dass gleichzeitig in wenigstens einem zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18''), welcher mit einem zweiten Kaltkopf (16, 16', oder 16'') thermisch in Verbindung steht, eine Temperatur (T_1 , T_2 , oder T_3) verringert wird, wobei die Temperatur im ersten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') kleiner ist als im zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') und/oder die Temperaturverringern im ersten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') größer ist als im zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18''), wodurch im ersten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') mehr Kühlfluid kondensiert wird als im zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') und/oder Gas mehr komprimiert wird und/oder ein Druckunterschied zwischen dem Druck (p_1 , p_2 , oder p_3) im ersten und zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') entsteht oder erhöht wird, wodurch flüssiges Kühlfluid k in einem zweiten Verbindungsrohr (20, 20', oder 20'') zwischen dem zweiten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') und einem Verdampferraum (12) bewegt wird, und gasförmiges Kühlfluid k' insbesondere über ein erstes Verbindungsrohr (20, 20', oder 20'') von dem Verdampferraum (12) in den ersten Kondensorraum (18, 18', oder 18'') bewegt wird.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass gleichzeitig wenigstens in einem dritten Kondensorraum (18, 18', oder 18''), welcher mit einem dritten Kaltkopf (16, 16', oder 16'') thermisch in Verbindung steht, eine Temperatur (T_1 , T_2 , oder T_3) erhöht, gleichgehalten oder verringert wird.

14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass zeitlich direkt oder indirekt folgend in Kondensorräumen (18, 18', oder 18''), in welchen die Temperatur (T_1 , T_2 , oder T_3) erhöht wurde, die Temperatur (T_1 , T_2 , oder T_3) verringert wird, und/oder dass zeitlich direkt oder indirekt folgend in Kondensorräumen (18, 18', oder 18''), in welchen die Temperatur (T_1 , T_2 , oder T_3) verringert wurde, die Temperatur (T_1 , T_2 , oder T_3) erhöht wird.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren als ein kontinuierlicher oder gepulster Prozess des Pumpens von flüssigem Kühlfluid k in den Verdampferraum (12) durchgeführt wird.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass eine Temperaturerniedrigung durch Kühlen mit Hilfe wenigstens eines Kaltkopfes (16, 16', 16'') erfolgt und/oder eine Temperaturerhöhung mit Hilfe wenigstens eines Kaltkopfes (16, 16', 16'') und/oder durch Heizen mit Hilfe einer Heizeinrichtung erfolgt.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass eine Bewegung von Kühlfluid k , k' ausschließlich geregelt oder gesteuert über Druck- und/oder Temperaturunterschiede in den Kondensorräumen (18, 18', 18'') und dem Verdampfererraum (12) erfolgt, insbesondere bei Druckausgleich durch Kühlfluidbewegung und/oder insbesondere gegen die Schwerkraft.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass in dem Verdampfererraum (12) das Kühlfluid von einem flüssigen k in einen gasförmigen k' Zustand übergeht und eine rotierende Supraleitungseinrichtung, insbesondere eine supraleitende Wicklung (10) eines Rotors (5) eines Motors oder eines Generators kühlt, wobei die supraleitende Wicklung (10) insbesondere HTS-Material umfasst und/oder wobei der Verdampfererraum (12) innerhalb des Rotors (5), insbesondere als zylindrischer Hohlraum (12, 13) entlang der Rotationsachse (A) des Rotors (5) rotierbar angeordnet wird.

19. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass die wenigstens zwei Kaltköpfe (16, 16', 16'') und die wenigstens zwei Kondensorräume (18, 18', 18'') und insbesondere die wenigstens zwei Verbindungsrohre (20, 20', 20''), welche insbesondere von einem die Verbindungsrohre (20, 20', 20'') umhüllenden Gesamtrohr umfasst werden, feststehend angeordnet werden.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

