



**Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein**  
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑫ PATENTSCHRIFT A5

② Gesuchsnummer: 4374/80

(73) Inhaber:  
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH,  
Karlsruhe 1 (DE)

② Anmeldungsdatum: 06.06.1980

72 Erfinder:  
Hofmann, Albert, Karlsruhe (DE)  
Schnapper, Christoph, Erlangen (DE)

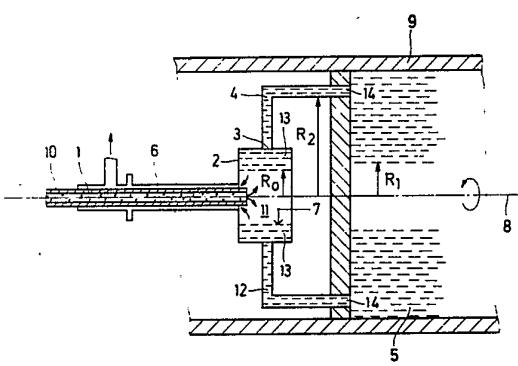
②4 Patent erteilt: 31.05.1985

⑦4 Vertreter:  
Walter F. Sax, Oberengstringen

#### **54 Verfahren und Einrichtung zum Nachfüllen von Helium in den Rotor eines supraleitenden Generators.**

57 Das Helium wird aus einem unter Umgebungsdruck stehenden Vorratsbehälter über eine Zuleitung (1) in das bei Unterdruck siedende Heliumbad (5) des Rotors (9) eingeleitet, wobei ein Teil des Heliums bei der Überführung in Dampfphase übergeht. Durch einen im Rotor integrierten Phasenseparator (2) werden die flüssige und die gasförmige Phase voneinander getrennt. Die flüssige Phase wird über Rohrleitungen (4, 12) im Abstand zur Rotationsachse (8) in das Heliumbad eingespeist, während die gasförmige Phase durch ein die Zuleitung umgebendes Außenrohr (6) nach aussen abgeführt wird.

Die Stelle der Einspeisung ist in weiten Grenzen frei wählbar und die Einrichtung daher an verschiedene Rohrkonzepte anpassbar. Die Einrichtung arbeitet mit einer klaren Trennung von Flüssigkeit und Dampf und unabhängig vom Dampfgehalt im Helium. Damit wird eine hohe Betriebssicherheit erreicht.



### PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zum Nachfüllen von flüssigem Helium aus einem unter Umgebungsdruck stehenden Helium-Vorratsbehälter in ein bei Unterdruck siedendes Heliumbad des Rotors eines supraleitenden Generators, wobei ein Teil des Heliums bei der Überführung in Dampfphase übergeht und die flüssige Phase im Abstand zur Rotationsachse in das Heliumbad eingespeist wird, dadurch gekennzeichnet, dass die flüssige und die gasförmige Phase des Heliums in einem im Rotor (9) integrierten Phasenseparator (2) getrennt werden, und dass die gasförmige Phase aus dem Phasenseparator (2) herausgeführt wird.

2. Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass eine Durchführung (1, 6) für die Einspeisung der beiden Phasen in den Phasenseparator (2) vorgesehen ist, und dass die Durchführung (1, 6) als Koaxialleitung ausgebildet ist, durch deren Außenrohr (6) die gasförmige Phase aus dem Phasenseparator (2) abgeführt wird.

3. Einrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine Leitung (4 und/oder 12) vom Phasenseparator (2) zum Heliumbad (5) im Abstand zur Rotationsachse (8) vorgesehen ist.

---

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Einrichtung zum Nachfüllen von flüssigem Helium aus einem unter Umgebungsdruck stehenden Helium-Vorratsbehälter in ein bei Unterdruck siedendes Heliumbad des Rotors eines supraleitenden Generators, wobei ein Teil des Heliums bei der Überführung in Dampfphase übergeht und die flüssige Phase im Abstand zur Rotationsachse in das Heliumbad eingespeist wird.

Zur Erzielung hoher Zuverlässigkeit beim Betrieb elektrischer Maschinen mit rotierender supraleitender Erregerwicklung erscheint es erforderlich, die Einspeisung des flüssigen Heliums so vorzunehmen, dass ein ungestörter Betrieb auch bei einer Störung an der Kälteanlage gewährleistet ist. Diese Entkopplung der elektrischen Maschine von der Kälteanlage wird in einfacher Weise durch einen zwischengeschalteten Vorratsbehälter für flüssiges Helium gewährleistet. Der Druck in diesem Vorratsbehälter liegt zweckmässigerweise bei Atmosphärendruck oder – zur Vermeidung von Verunreinigung des flüssigen Heliums aus der ungebundenen Atmosphäre – bei geringem Überdruck.

Die supraleitende Rotorwicklung wird – zur Erzielung einer hohen Stromdichte – zweckmässigerweise mit Helium gekühlt, das unter vermindertem Druck von einigen Zehntel bar siedet und somit eine Siedetemperatur von  $T < 4,2 \text{ K}$  hat. Dieser Unterdruck im Rotor kann in einfacher Weise durch zweckmässige Führung des Abgasstromes aufrechterhalten werden (das Abgas verlässt nach Aufnahme der Verlustwärme den Rotor bei Umgebungsdruck. Zusätzliche Pumpen sind zur Erzielung eines Unterdrucks im kalten Teil des Rotors nicht erforderlich).

Es ist bereits vorgeschlagen worden (A. Bejan, «Improved Thermal Design of the Cryogenic Cooling System for a Superconducting Synchronous Generator», Thesis, MIT (1974); US-PS 4 056 745), das ankommende Helium durch ein Drosselventil auf den im Rotor vorliegenden Unterdruck zu entspannen (Joule-Thomson-Entspannung). Das Ventil muss entsprechend dem im Rotor benötigten Heliumstrom aktiv geregelt werden.

Bei anderen Vorschlägen (US-PS 4 085 529 und 4 082 967) wird davon ausgegangen, dass das in den Rotor einströmende Helium infolge der thermischen Verluste in der Transferlei-

tung einen relativ grossen Gasanteil hat. Die rotierende Einspeiseleitung wird so ausgebildet, dass sich – zumindest in dem radial verlaufenden Teil der Einspeiseleitung – Flüssigkeit und Gas räumlich trennen. Der Druckverlauf in dieser Leitung ist durch die rotationsbedingte Kompression des Dampfes gegeben. Diese Leitung mündet an der Stelle in die bei Unterdruck siedende Flüssigkeit, wo deren hydraulischer Druck gleich dem in der Dampfsäule ist. Dieses Nachfüllsystem ist selbstregelnd, solange der Dampfanteil nicht zu gering wird. Um auch bei grossem Heliumstrom sicheren Betrieb zu gewährleisten, wird erwogen, durch eine Heizung in der Transferleitung, bei Bedarf den erforderlichen Dampfanteil zu erzeugen.

Ein anderes Verfahren ist in «Cryogenics» 17, 429 (1977) beschrieben. Hierbei wird eine Flüssigkeit durch eine radiale Einspeiseleitung eingeführt und an der Stelle in das bei Unterdruck siedende Helium eingespeist, wo gleiche hydraulische Drücke vorliegen. Der Radius, bei dem die Einspeisung erfolgt, ist grösser als bei Einspeisung eines Dampf-Flüssigkeitsgemisches. Bei einem 50-Hz-Rotor muss er z.B. grösser als 0,33 m sein. Ein weiterer Nachteil ist, dass durch die radiale Einspeiseleitung nur reine Flüssigkeit gefördert wird.

Die der Erfindung zugrundeliegende Aufgabe besteht darin, ein Nachfüllverfahren und eine Einrichtung hierzu zu bieten, die eine Nachfüllung eines unter vermindertem Druck siedenden rotierenden Heliums und auch unabhängig von der Grösse des zu versorgenden Rotors ermöglichen.

Die Lösung dieser Aufgabe ist in den Merkmalen der Ansprüche 1 und 2 beschrieben. Die Merkmale des Anspruchs 3 geben eine vorteilhafte Weiterbildung der erfindungsgemässen Einrichtung wieder.

Die Erfindung wird im folgenden anhand eines Ausführungsbeispieles mittels der Fig. 1 und 2 näher beschrieben, wobei die Fig. 1 den schematischen Aufbau eines Generators darstellt.

Das flüssige Helium strömt durch die feststehende mit einem Vakuummantel 10 isolierte Leitung 1 (Fig. 1) aus einem nicht näher dargestellten Helium-Vorratstank, der unter dem Druck  $p_0$  ( $p_0 \approx 1 \text{ bar}$ ) steht, und mündet in einen mit dem Rotor 9 verbundenen Phasenseparator 2. Der Phasenseparator 2 besteht im wesentlichen aus einem Verzweigungsstück 11 für verschiedene Rohrleitungen 4 und 12 mit mindestens einem Ausgang 3 an der Peripherie. Infolge der Rotation um die Rotationsachse 8, zu der der Phasenseparator 2 konzentrisch steht, wird der in der Versorgungsleitung 1 anfallende Dampfanteil von der Flüssigkeit getrennt, so dass die Flüssigkeit 13 sich an der Peripherie ansammelt. Bei hinreichend hoher Drehzahl findet die Separation auch bei horizontal liegender Rotorachse 8 statt. Z.B. ist die Zentrifugalbeschleunigung bei der Betriebsdrehzahl eines Synchrongenerators von 50 Hz bereits in einem Abstand von 1 cm 100mal grösser als die Erdbeschleunigung.

Die Flüssigkeit wird durch die Leitung 4 und/oder 12 in das zu versorgende Heliumbad 5 – mit einer Oberfläche im Abstand  $R_1$  zur Achse 8 – geführt, welches in der Nähe der Drehachse 8 bei dem Druck  $p_1$ , der kleiner als  $p_0$  ist, siedet. Der im Phasenseparator anfallende Dampf wird durch die Koaxial-Aussenleitung 6 aus dem Rotor 9 bzw. Phasenseparator 2 herausgeführt. Der Radius  $R_0$  des Dampfraumes 11 in dem Phasenseparator 2 wird durch einen Niveauregler 7 bei einem vorzugebenden Wert gehalten. Das Flüssigkeitsniveau in dem Phasenseparator 2 muss aktiv geregelt werden. Derartige Niveauregler 7 sind hinreichend bekannt. Als Niveauregler 7 dienen z.B. temperaturabhängige Messfühler (Kohlewidderstandsthermometer oder supraleitende Detektoren). Der Niveauegleich kann entweder durch Druckänderung im Heliumspeicher oder durch Druckänderung am Gasaustritt erfolgen. Es handelt sich hierbei um die gleiche Technik wie

bei nichtrotierenden Systemen.

In dem nachzufüllenden Bad 5 stellt sich die Phasengrenze  $R_1$  so ein, dass an der Einspeisestelle 14 der Leitungen 4 und 12 der gleiche hydraulische Druck vorliegt wie in dem Heliumbad 5.

In Fig. 2 ist angegeben, wie sich die Drücke in den radialen Leitungen 4 und 12 (es ist auch eine zylindrische Zuführungsleitung möglich) und in dem Heliumbad 5 in Abhängigkeit vom Abstand  $R$  zur Rotationsachse 8 und in Abhängigkeit von den Radien der Phasengrenzen  $R_0$  und  $R_1$  verändern. Das Beispiel beschreibt typische Verhältnisse in einem grossen supraleitenden Turboläufer 9 mit 50 Hz Drehzahl und 1 m Durchmesser. Im Zentrum des Rotors 9 wird ein Druck von 0,41 bar, wie er sich z.B. infolge des Selbstpumpeffektes im Abgaskreis einstellen kann, angenommen.

Die strichliinierte Kurve (a) beschreibt den Druckverlauf in rotierendem gesättigtem Dampf mit einem Zentrumsdruck von  $p_0 = 1$  bar und die ausgezogene Kurve (b) den entsprechenden Verlauf für den Druck  $p_1 = 0,41$  bar. Die anderen Kurven beschreiben die Drücke in den Flüssigphasen, die sich ausserhalb der Radien  $R_0$  und  $R_1$  an diese Dampfräume anschliessen. Diese Kurvenscharen geben an, in welchen Grenzen die Radien  $R_0$ ,  $R_1$  und  $R_2$  variiert werden können.

Um zu zeigen, in welchem Bereich die Dampf- und Einspeiseradien variiert werden können, sind in Fig. 2 drei Beispiele angegeben. Es wird jeweils gefordert, dass sich im Heliumbad ein Dampfradius von  $R_1 = 0,1$  m einstellt. Wenn die Einspeisung an den Stellen  $R_{2A} = 0,2$  m,  $R_{2B} = 0,35$  m oder  $R_{2C} = 0,45$  m erfolgt, muss das Niveau im Phasenseparator auf die Radien  $R_{0A}$ ,  $R_{0B}$  oder  $R_{0C}$  eingeregelt werden.

Bei der Rechnung, die zu dem in Fig. 2 dargestellten Ergebnis führt, muss berücksichtigt werden, dass sich der thermodynamische Zustand des Heliums bei der Kompression infolge der Zentrifugalbeschleunigung stark ändert. Dem

Helium wird in der Einspeiseleitung 4 und/oder 12 keine Wärme zugeführt oder entzogen. D.h. diese Leitungen müssen vorzugsweise aus Material mit schlechter Wärmeleitfähigkeit (z.B. Edelstahl) hergestellt werden. Die Druckerhöhung 5 in der einphasigen Flüssigkeit wird berechnet aus der Zustandsänderung

$$h(R) - h(0) = \frac{1}{2} \omega^2 R^2 \quad (1)$$

10 und

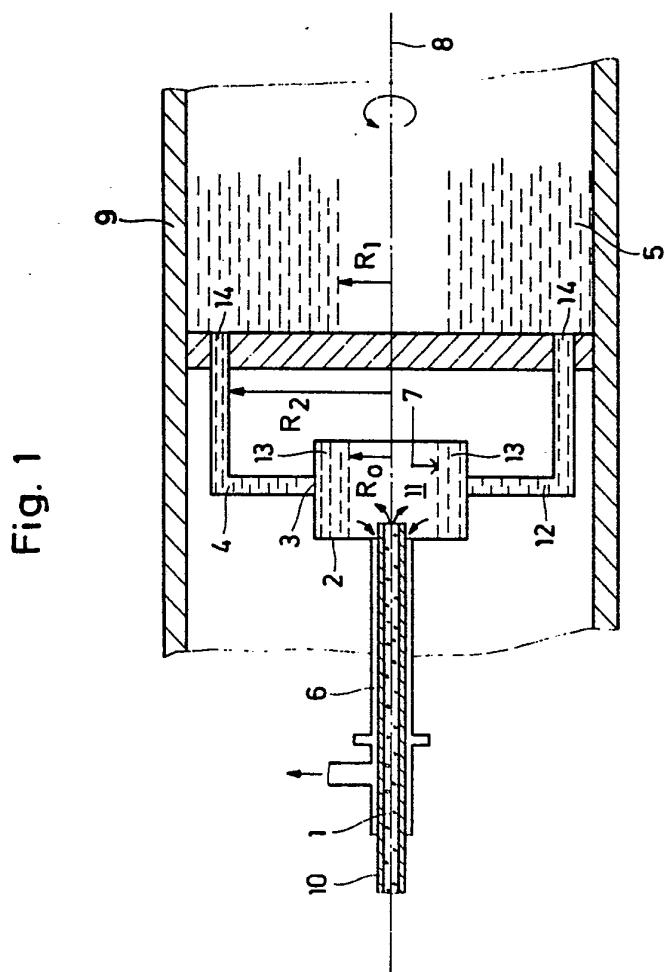
$$s = \text{const}, \quad (2)$$

wobei  $h$  die spezifische Enthalpie und  $s$  die spezifische Entropie ist. Der Dampf wird längs der Phasengrenze im Zustandsdiagramm komprimiert, so dass gilt

$$\int_{p(r_0)}^{p(r_1)} \frac{1}{\rho_s} dp = \frac{1}{2} \cdot \omega^2 (r_1^2 - r_0^2), \quad (3)$$

wobei  $\rho_s$  die Dichte des Sattdampfes ist. Die Beziehungen (1), (2) und (3) sind auch experimentell verifizierbar.

Die wesentlichen Vorteile der Erfindung bestehen darin, dass die Flüssigkeit und das Gas des einströmenden Heliums in einem im Rotor 9 integrierten Phasenseparator 2 getrennt werden. Die Flüssigkeit wird an geeigneter Stelle 14 in den Rotor 9 eingespeist und das Gas durch eine separate Leitung 6 zurückgeführt. Die Stelle der Einspeisung kann in weiten Grenzen frei gewählt werden. Das System funktioniert unabhängig von der Grösse des Dampfgehaltes im Helium. Hieraus ergeben sich die weiteren Vorteile der hohen Betriebssicherheit, der Anpassbarkeit an verschiedeneartige Rotorkonzepte und der klaren Trennung von Flüssigkeit und Dampf.



一  
江

