GRUNDLAGENUNTERSUCHUNGEN FÜR DIE AUSLEGUNG SUPRALEITENDER MAGNETLAGER

H. May, R. Palka

1 EINLEITUNG

Während die Erzeugung einer Magnetkraft zum Anheben eines Gegenstandes relativ einfach ist, gelingt die stabile Aufhängung ohne mechanischen Kontakt i. a. nur unter Verwendung von elektronischen Stell-, Mess- und Regelgliedern. Die Gründe für die allgemeine Instabilität von elektromagnetischen Trag- und Führsystemen können aus der Potentialtheorie abgeleitet werden und wurden zuerst von S. Earnshaw [1] im Jahre 1839 formuliert.

Etwa 100 Jahre später jedoch schränkte Braunbeck [2] die Allgemeingültigkeit dieses Theorems ein. Er bewies mit Hilfe des Variationsprinzips, dass die Wirkung eines diamagnetischen ($\mu_r < 1$) Körpers die Stabilisierung von elektromagnetischen Tragsystemen ohne elektronische Stellglieder ermöglicht.

Von M.K. Bevir [3] wurde am Rutherford Laboratorium dieses Phänomen ausgenutzt und das inhärent stabile berührungsfreie Schweben von Körpern unter Verwendung von metallischen Tieftemperatursupraleitern demonstriert. Aber erst nach der Entdeckung von keramischen Hochtemperatursupraleitern (HT_cSL) [4], deren kritische Temperatur oberhalb des Siedepunktes von LN_2 (77 K) liegt, konnten anwendungsnahe, berührungsfreie Lager für lineare Transportaufgaben [5] und schnell rotierende Maschinen ohne zu großen Isolations- und Kühlungsaufwand entwickelt werden. In [6] und auf mehreren Magnetlager-Fachtagungen wurden die Kräfte und Steifigkeiten [7], sowie ihr dynamisches Verhalten beschrieben [8] [9].

2 GRUNDLAGEN DER MAGNETFELD-HT_cSL KRAFTWECHSELWIRKUNG

Mit der Entwicklung des Melt-Texture-Growth (MTG) Herstellungsverfahrens [10] standen Supraleiter mit normalleitenden Mikro-Fehlstellen zur Verfügung, mit denen externe Magnetflüsse festgehalten (getrapped) werden können. Nur in diesem Zustand bzw. der pinned type II (Shubnikov) Phase [11] können Supraleiter Stromdichten von einigen 100 A/mm² führen, welche wesentlich größer als die von konventionellen z. B. Cu-Leitern sind.

Die Wechselwirkung von HT_c -Supraleitern mit externen Magnetfeldern kann weitgehend mit den aus der Maxwellschen Magnetfeldtheorie bekannten Beziehungen beschrieben werden, wenn man nur die elektrische Leitfähigkeit des Materials als ∞ groß annimmt. Bei der Berechnung der Kraftwechselwirkung von HT_c -Supraleitern mit externen Magnetfeldern muss man jedoch weiter als Besonderheit berücksichtigen, dass die kritischen Stromdichten (J_c) bestimmte materialspezifische Maximalwerte nicht überschreiten dürfen, und dass diese J_c -Werte noch von der Temperatur und der örtlichen magnetischen Feldstärke abhängen. Das Faradaysche Gesetz besagt nun, dass ein sehr guter elektrischer Leiter Änderungen des ihn durchdringenden Magnetfeldes mit internen Strömen derart entgegnet, dass diese Ströme die ursprüngliche Feldverteilung möglichst unverändert erhalten. Dies hat z. B. gemäß **Bild 1** zur Folge, dass bei Annäherung eines Permanentmagneten an einen Supraleiter interne Ströme so fließen, dass abstoßende Kräfte entstehen. Wenn sich im Gegensatz dazu ein Permanentmagnet vor dem Abkühlen in der Nähe des HT_cSL befindet und anschließend z. B. von der Gravitation nach unten gezogen wird, so bewirken interne Ströme wieder das möglichst gute Verharren des Magneten in der ursprünglichen Position (**Bild 2**).



Bild 1: Aufgrund der internen Supraleiterströme bei Abstandsverkleinerung abstoßend auf den Permanentmagneten wirkende Tragkraft



Bild 2: Aufgrund der internen Supraleiterströme bei Abstandsvergrößerung anziehend auf den Permanentmagneten wirkende Tragkraft

Je nach Auslenkung aus der Ursprungsposition kann also ein HT_cSL mit einem Felderregersystem anziehend oder abstoßend wirkende Kräfte erzeugen. Charakteristisch hierbei ist, dass bei Annäherung aus einer großen Entfernung die abstoßende Kraft immer größer wird (Zero-Field-Cooling ZFC), während die anziehende Kraft bei Luftspaltvergrößerung ebenfalls zunächst ansteigt, dann aber nach Erreichen eines Maximalwertes wieder abfällt (Maximum-Field-Cooling MFC).

Die rückstellende Führkraft eines seitlich ausgelenkten Magneten gemäß **Bild 3** ist auf den gleichen Stromerzeugungsmechanismus zurückzuführen. Charakteristisch ist wieder der symmetrische, selbststabile Kraftanstieg nach beiden Seiten, der aber nach Durchlaufen eines Maximums wieder abfällt.



Bild 3: Aufgrund der internen Supraleiterströme rückstellend auf den Permanentmagneten wirkende Führkraft

Zur Felderregung kommen aber nicht nur Permanentmagnete in Frage, es können auch elektrisch erregte Spulensysteme verwendet werden (**Bild 4**). Sie haben den Vorteil, dass bei wechselnden Tragkraftanforderungen, z. B. durch Belastungsänderungen, der Erregerstrom so eingestellt werden kann, dass die Schwebehöhe konstant bleibt. Wie **Bild 5** zeigt, erhöht sich z. B. bei Stromvergrößerung die Feldliniendichte unterhalb des Kryogefäßes und erhöht somit die Tragkraft. Bei vertikaler bzw. lateraler Auslenkung des Supraleiters aus der Sollposition gibt es keine prinzipiellen Unterschiede zwischen einer permanentmagnetischen oder elektrischen Erregung.



Bild 4: Feldverteilung eines elektrisch erregten Feldsystems, bei dem der HT_cSL im Nennluftspalt aktiviert wird. HT_cSL-bulk in einem LN₂-Kryobehälter über einer Spule mit U-Eisenkern



Bild 5: Feldverteilung eines elektrisch erregten Feldsystems, bei dem der HT_cSL im Nennluftspalt aktiviert und die Erregung zur Kraftsteigerung erhöht wird

Aufgrund der mikroskopischen Fehlstellen von MTG-prozessierten HT_cSL-Formkörpern können diese nicht nur –wie in **Bild 1** gezeigt wurde– äußere Felder mehr oder weniger perfekt abschirmen, sondern sie können die Felder, von denen sie vor dem Abkühlen durchdrungen werden, nach dem Abkühlen und anschließendem Abschalten des äußeren Feldes aufrechterhalten (**Bild 6**). Durch diese als field-trapping bekannte Eigenschaft von Massivsupraleitern können diese auch als supraleitende Permanentmagnete (SPM) verwendet werden. Am IFW-Dresden wurden von solchen SPM bei tiefen Temperaturen schon Flussdichten von mehr als 10 T eingefroren.



Bild 6: Aufbau zur Magnetisierung eines HT_cSL-Formkörpers bestehend aus einer Spannungsquelle, einem Schalter und einer Spule mit eingebettetem Dewar

Bild 7: Durch einen Edelstahlzylinder verstärkte Magnetisierungsspule mit eingebettetem Dewar. Außendurchmesser ϕ =140 mm, Bohrung ϕ =50 mm

In **Bild 8** ist die Magnetfeldverteilung dicht oberhalb eines $35 \times 35 \times 10$ mm³ großen Supraleiters normiert dargestellt, nachdem er in der Magnetisierungsspule (**Bild 7**) aufmagnetisiert wurde.





Bild 8: Feldverteilung eines magnetisierten HT_cSL-Formkörpers. Normalkomponente der Flussdichte dicht oberhalb des Supraleiters

Bild 9: Demonstration der Kraftwirkung eines aufmagnetisierten SPM auf ferromagnetische Körper

Die bekannte magnetische Kraftwirkung ist in **Bild 9** dargestellt. Hier hält ein magnetisierter SPM die unter ihm befindlichen ferromagnetischen Körper fest.

Wie mit **Bild 10** vom IFW-Dresden nachgewiesen werden konnte, kann die Kraft einer magnetischen Traganordnung durch die Verwendung eines tiefgekühlten SPM wesentlich gesteigert werden. Bei diesen Messungen wurde ein HT_cSL-Formkörper verwendet, der bei einer Temperatur von 50 K auf eine Flussdichte von 4 T aufmagnetisiert worden ist.



Bild 10: Abstoßende Tragkraft zwischen einem HT_cSL und einem auf 50 K abgekühlten SPM im Vergleich zu einer konventionellen Anordnung mit einem permanenten Erregermagneten. Aufbau und Messungen vom IFW-Dresden

3 GRUNDLEGENDE BAUFORMEN VON MAGNETLAGERN FÜR UNTERSCHIEDLICHE AUFGABEN

Allgemein kann man Lagerungen nach ihren spezifischen Aufgaben klassifizieren. So können mit einer Lagerung z. B. alle 6 Bewegungsfreiheitsgrade eingeschränkt werden. Dies erfolgt zumeist zur Gewichtskompensation von ruhenden Körpern z. B. für einen Behälter für kryogene Flüssigkeiten, wie es in Kapitel 5 beschrieben ist. Bei der Auslegung kommt es darauf an, in alle möglichen Bewegungsrichtungen ein möglichst großes und gleichzeitig möglichst inhomogenes Magnetfeld zu erzeugen. Diesen Zustand großer Feldgradienten erfährt der HT_C-Supraleiter und reagiert besonders intensiv mit internen Stromdichten schon bei kleinsten Verschiebungen aus der Einfrierposition. Die Erregeranordnungen in **Bild 11** können folgendermaßen beschrieben werden: Links und Mitte: Cluster aus alternierend vertikal-magnetisierten Magneten, die sich auf einem ferromagnetischen Rückschlussjoch befinden. Rechts: Cluster aus alternierend lateral-magnetisierten Magneten mit zwischenliegenden ferromagnetischen Flussleitstücken. Die Größe der einzelnen Magnete richtet sich nach der geforderten Trag- und Führsteifigkeit und dem Nennluftspalt.



Bild 11: Verschiedene permanentmagnetische Erregersysteme für statische Tragaufgaben

Soll bei der magnetischen Lagerung eine Bewegungsrichtung (linear oder Rotation) frei sein, so müssen die Erregeranordnungen in Richtung der magnetischen Stabilisierung die gleichen inhomogenen Feldverteilungen aufweisen wie die Anordnungen, die alle Freiheitsgrade einschränken. In Richtung der freien Bewegung muss das Magnetfeld jedoch möglichst homogen sein, damit bei Bewegung keine Wirbelströme in den Supraleiter induziert werden. Die beiden grundsätzlichen permanentmagnetischen Anordnungen sind in **Bild 12** dargestellt. Hierbei sind bei der linken Anordnung die Magnete in Richtung des Luftspalts magnetisiert und so angeordnet, dass sie in Bewegungsrichtung –hier orthogonal zur Papierebene–möglichst keine Feldschwankungen aufweisen. Da aber lange lineare Flachmagnetanordnungen material- und fertigungsbedingt immer mehr oder weniger große Inhomogenitäten aufweisen, sind sie nur für langsame Geschwindigkeiten geeignet, bei denen kleine Kraftschwankungen in Bewegungsrichtung kein Ausschlusskriterium ist. Bei der mittleren Sammleranordnung von **Bild 12** sind die Magnete horizontal magnetisiert und zwischen ferromagnetischen Flussleitstücken angeordnet. Diese Eisenpole bewirken mit ihrer sehr

großen magnetischen Leitfähigkeit, dass die oben erwähnten Feldinhomogenitäten so vergleichmäßigt werden, dass diese Erregeranordnungen für höchste Lagergüten mit vernachlässigbaren Reibungskoeffizienten und vernachlässigbaren Supraleiterverlusten verwendet werden müssen. Eine elektrische Erregeranordnung gemäß **Bild 12** rechts weist natürlich die höchsten Feldhomogenitäten auf. Man muss jedoch die hohen Erregerverluste berücksichtigen, welche allerdings bei einer längeren Anordnung durch Unterteilung in einzelne Streckenabschnitte und partielle Bestromung reduziert werden können.



Bild 12: Verschiedene permanentmagnetische und elektrische Erregersysteme für Trag-, Führaufgaben mit einem Freiheitsgrad

Bis auf den Aufbau gibt es keine prinzipiell unterschiedlichen Anforderungen zwischen rotationssymmetrischen und linearen Lagern. Da aufgrund der Reduzierung von Lagerverlusten wieder nur solche Erregeranordnungen in Frage kommen, welche in Bewegungsrichtung eine sehr hohe Feldhomogenität aufweisen, sind die bereits in **Bild 12** (Mitte) gezeigten Sammleranordnungen entsprechend auch zur Lagerung schnell rotierender Wellen anzuwenden (**Bild 13**).



Bild 13: Verschiedene Magnetlager für schnell rotierende Wellen

Es kann hierbei prinzipiell zwischen mehr radial und mehr axial wirkenden Bauformen unterschieden werden. Nur zur Veranschaulichung sind in **Bild 13** auch Anordnungen mit luftspaltorientierten Magnetisierungen dargestellt. Prinzipiell kann man auf Wellen auch Magnete anordnen, welche in Umfangs- und axialer Richtung eine wechselnde Magnetisierung sinngemäß zu **Bild 11** aufweisen. Hierdurch wird jede Bewegungsfreiheit, wie sie z. B. für die Lagerung von Flüssigkeitstanks gewünscht wird, eingeschränkt.

4 ERHÖHUNG DER LAGERKRÄFTE DURCH OPTIMIERUNG DER ERREGERANORDNUNG

Mit dem Übergang von reinen Demonstrationsmodellen, die allein dem Funktionsnachweis dienten, zu anwendungsnäheren Versuchsaufbauten stellt sich natürlich die Frage nach einer Lageroptimierung. Hierunter ist eine Erhöhung der Kraftdichten mit geringstem Materialaufwand zu verstehen. Hierzu wurden am IMAB Rechenverfahren entwickelt, welche nicht nur Anordnungen ohne magnetische Flussleitstücke berücksichtigen können [6], sondern auch solche Bauformen berechnen können, welche, für hohe Relativgeschwindigkeit unbedingt erforderlich, als Sammleranordnungen ausgeführt sind [7]. Für solch eine Anordnung ist in **Bild 14** links eine typische Feldverteilung dargestellt, welche die Kraftwechselwirkung zwischen dem Erregerfeld und dem HT_cSL bestimmt, während rechts die wichtigen Rechenvariablen zur Optimierung dieser Kräfte dargestellt sind.



Bild 14: Links: Feldverteilung eines HT_cSL-Magnetlagers in Sammlerbauform Rechts: Modellbezeichnungen zur Optimierung von HT_cSL-Magnetlagern

Für eine vorgegebene Magnethöhe von $h_M = 20$ mm und einem Nennluftspalt von $\delta = 3,5$ mm wurde in einem ersten Optimierungsschritt die Polteilung τ variiert. Es ergeben sich ausgeprägte Maxima sowohl für die Trag- als auch die Führsteifigkeit bei Polteilungen, die etwa das 3- bis 4-fache vom Nennluftspalt betragen. Leider treten die Maximalwerte der beiden Bewegungsrichtungen nicht beim gleichen Wert der Polteilung auf. Je nach Anforderungsprofil muss man also einen Kompromiss wählen. Anschließend wird für die ausgewählte Polteilung von $\tau = 12$ mm die Breite des Sammelpols b_e variiert. Die maximalen Steifigkeiten treten für beide Bewegungsrichtungen bei derselben sehr kleinen Eisenbreite von 1,2 mm auf. Hierbei muss jedoch darauf geachtet werden, dass es bei der Wahl von großen Magnethöhen h_M zu Sättigungserscheinungen kommen kann und daher von diesem kleinen Eisenbreiten-Optimum abgewichen und zur Vermeidung von Sättigung eine größere Breite, z. B. $b_e = 2,4$ mm, gewählt werden muss. Für diese Eisenbreite und der oben gewählten Polteilung wird im nächsten Optimierungsschritt die Eisenhöhe h_e reduziert. Hierdurch wird versucht, den für Sammleranordnungen typischen Streufluss unterhalb des Erregersystems (**Bild 14** links) zu minimieren, ohne gleichzeitig den Nutzfluss zu stark zu reduzieren. Es zeigt sich, dass bei Annahme der bereits optimierten Größen von τ und b_e eine Eisenhöhe optimal ist, die etwa 80 % von der Magnethöhe h_M beträgt.

Die Verstärkung des Nutzflusses und damit der Kräfte kann nicht nur durch eine Verkürzung des Sammelpols (**Bild 14**) erzielt werden. Gemäß **Bild 15** gelingt eine weitere Reduzierung des unteren Streuflusses durch Einbringung eines Fluss-Kompensationsmagneten unterhalb des eingezogenen Sammelpols, durch einen Multipolarmagnet mit rotierter Magnetisierung und die vollständige Streuflussunterdrückung mit einem HT_cSL-Schirm. Durch die zuletzt genannte besonders aufwändige Maßnahme kann eine bemerkenswerte Kraftsteigerung von ca. 100 % erzielt werden.



Bild 15: Feldverteilung für Erregeranordnungen mit reduzierter Streuung

- Einbringung eines Kompensationsmagneten im Polbereich
- Multipolarmagnet mit rotierter Magnetisierung im unteren Streubereich
- Streuflussunterdrückung mit einem HTcSL-Schirm

5 KRYOTECHNISCHE AUFGABEN UND AKTIVIERUNGS-MÖGLICHKEITEN BEIM BAU VON ANWENDUNGS-NAHEN MAGNETLAGERN

Innerhalb von öffentlich geförderten F&E-Vorhaben und einem vom Bundeswirtschaftsministerium initiierten Leitprojekt wurden die magnetischen Lagerungen eines LH₂-Kryobehälters, einer schnell rotierenden Welle von Turbomaschinen und die Umfangslagerung eines CFK-Rings zur mechanischen Energiespeicherung entwickelt. Beim LH₂-Kryotank bestand die Aufgabe darin, den Wärmeeintrag von der Umwelt in den Innenbehälter zu halbieren, so dass der flüssige Wasserstoff ohne Ansprechen des Überdruckventils mehrere Tage gelagert werden kann. Bisher wurde eine doppelschalige Konstruktion gemäß Bild 16 verwendet, bei der der Zwischenraum zur Reduzierung der Wärmeleitung evakuiert war und der Innenbehälter vor Strahlungswärmeeintrag mit einer viellagigen Superisolation



Bild 16: Doppelschaliger LH₂-Kryotank für den automobilen Einsatz

umgeben war. Zur mechanischen Fixierung war der Innenbehälter mit sehr dünnwandigen GFK-Rohren auf beiden Seiten mit dem Außenbehälter verbunden. Die Idee des Forschungsvorhabens bestand nun darin, diesen durch die Aufhängungsart gegebenen Wärmeeintrittspfad durch eine berührungsfreie magnetische Lagerung zu durchtrennen.



Bild 17: Berührungsfreie magnetische Aufhängung des Innenbehälters eines LH₂-Kryocontainers in planarer Bauweise (links) und als konzentrisches Zylinderlager

Um den Innenbehälter des LH₂-Kryocontainers sicher berührungsfrei zu lagern, bietet sich einmal die planare Ausführung gemäß **Bild 11** an. Diese Lagerbauform ist in **Bild 17** links gezeigt. Obgleich die notwendigen Tragkräfte und Schockbelastungen auch unter automobilen Bedingungen nachgewiesen werden konnten, erwies sich diese Bauform als zu ausladend und daher zu viel Platz verbrauchend. Daher bot sich ein zentrales Lager gemäß **Bild 17** rechts an, bei dem die Permanentmagnete des Erregersystems um ein dünnes GFK-Zentralrohr angebracht waren, welches den gesamten Innenbehälter durchdringt. Die eigentlichen Supraleiterschalen waren direkt mit dem Innenbehälter verbunden und damit während des Betriebs auf den Siedepunkt von LH₂ von ca. 20 K abgekühlt. Diese systemkonforme Ausnutzung der tief siedenden Flüssigkeit als Kühlmittel ist ein starker Anreiz zur Verwendung eines solchen Lagers. Eine besondere Aufgabe bei der Inbetriebnahme von HT_cSL-Lagern besteht darin, die Kraft so zu aktivieren, dass der zu unterstützende Körper in der richtigen Position schwebt. Im Falle des Kryocontainers wurde ein patentierter, systemkonformer Aktuator entwickelt, welcher unter Ausnutzung des Memory-Effektes den

Innenbehälter in der warmen Phase anhebt (im rechten Teil von **Bild 17** durch "warm" gekennzeichnet). Nach dem Abkühlen zieht sich der Aktuator selbständig zurück (im rechten Teil von **Bild 17** durch "kalt" gekennzeichnet) und lässt somit den Innenbehälter frei schweben. Die Kraftwirkungen am Umfang des Zylinderlagers können durch die in **Bild 1** und **Bild 2** gezeigten Effekte erklärt werden. Durch die Art der Verschiebung ziehen die unterhalb der Erregeranordnung befindlichen Supraleiter an den Erregermagneten, während sich die oberen Supraleiter am Erregersystem abstützen. Zur Überprüfung der Lagerkräfte wurde ein Messstand aufgebaut, bei dem ein permanentmagnetisches Erregersystem mit Hilfe eines 3D-Tisches über in einem Dewar angeordnete HT_cSL-Formkörper bewegt werden konnte (**Bild 18**).

Bild 18: 3D-Messtisch zum Bewegen eines permanentmagnetischen Erregersystems über einen Dewar mit einem Array aus HT_cSL-Formkörpern

Im gleichen Bild ist der geöffnete Dewar mit dem Supraleiter-Array, dem Kaltkopf und der Superisolation dargestellt. Der Dewar konnte zur Reduzierung der Supraleitererwärmung evakuiert werden. Der mit dem HT_cSL-Array verlötete Cu-Kaltkopf war über dicke Cu-Leiter wärmeleitungstechnisch mit dem Kaltkopf einer Kältemaschine verbunden. Der Dewar war zusammen mit der Superisolation und einer kompakten Stirlingmaschine vom ILK-Dresden im Rahmen eines Forschungs-Unterauftrags entworfen und gebaut worden. Nach einigen Verbesserungen konnten Temperaturen bis ca. 72 K erreicht werden, was zunächst zum Aktivieren der verwendeten Supraleiter völlig ausreichte. Für die weitere Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der Trag- und Führkräfte musste jedoch ein leistungsstarker GM-Kühler verwendet werden. Hiermit konnten Temperaturen am Supraleiter im 50 K Bereich erzielt werden. Es zeigte sich, dass der Temperaturarbeitspunkt für die verwendeten Supraleiter als Kompromiss zwischen Kühlaufwand und erzielbaren Kräften bei ca. 65 K liegen sollte.

In einem weiteren noch laufenden Forschungsvorhaben soll die schnell rotierende Welle eines Turboverdichters magnetisch gelagert werden. Neben einem praktisch wartungsfreien Betrieb der berührungsfreien Lagerung verspricht man sich auch große prozesstechnische Vorteile dadurch, dass das Lager völlig hermetisch dicht arbeiten kann. Hierdurch kann es zu keiner Kontamination des zu verdichtenden Gutes kommen.

Bild 19: Versuchs- und Messaufbau für die magnetische Lagerung einer schnell rotierenden Welle für eine Turbomaschine

Vom Forschungspartner wurden zunächst Spezifikationen erstellt, welche statischen und dynamischen Lasten von der magnetischen Lagerung zu kompensieren sind. Anschließend wurde vom IMAB ein Versuchs- und Messaufbau erstellt (**Bild 19**), mit dem diese anwendungsnahen Gegebenheiten simuliert und das Verhalten der supraleitenden Lager messtechnisch erfasst werden konnten. Hierbei ist vorgesehen, dass die Welle bis zu einer Drehzahl von ca. 10000 U/min in Rotation versetzt und durch entsprechende Aktuatoren radial und axial ausgelenkt wird.

Bild 20: Schnitt durch den Dewar-Aufbau eines HT_cSL-Magnetlagers mit einer Warmbohrung für die rotierende Welle(links). Geöffneter Dewar zur Sichtbarmachung der Wärme- und Kraftankopplung sowie des Aufbaus der Superisolation (rechts)

Das Lager besteht aus einer zentralen Welle, auf der alternierend magnetisierte Permanentmagnetringe zwischen ferromagnetischen Flussleitstücken befestigt sind (**Bild 20, Bild 21**). Diese Welle befindet sich in der Warmbohrung eines Dewars und ist im Abstand von ca. 2,5 mm von einem 1 mm dünnen GFK Innenrohr umgeben, welches den Dewar nach innen begrenzt. Radial gesehen folgt nach diesem Innenrohr die mehrschichtige Superisolation, dann die hohlzylinderförmigen Supraleiter, welche im Innern eines massiven Cu-Zylinders aufgelötet sind. Dieses Kupferteil dient als innerer Kaltkopf und ist auf der einen Seite über massive Kupferleiter thermisch gut leitend mit dem Kaltkopf der Kältemaschine verbunden. Weiterhin sind in zwei orthogonalen Ebenen piezoelektrische Kraftsensoren (Kistler) auf der einen Seite mit dem Cu-Zylinder und auf der anderen Seite mit dem Außengehäuse des Dewars verbunden. Durch diesen kompakten Aufbau können auch dynamische Lagerkräfte sicher erfasst werden. Wie der Darstellung des geöffneten Dewars (**Bild 20**) weiter zu entnehmen ist, ist auch auf der Innenseite des äußeren Dewar-Mantels eine mehrschichtige Superisolation angebracht.

Zur Überprüfung der Lagerauslegungsdaten wurde der Dewar auf einem 3D-Messtisch montiert und mit der Vakuumanlage und der Kryotechnik verbunden (**Bild 21** links). Das Erregersystem seinerseits ist über einen 3D-Kraftsensor mit der über Schrittmotoren zu bewegenden Einheit verbunden. Mit dieser Anlage konnten die radialen und axialen Lagerkräfte und Steifigkeiten für verschiedene Temperaturen des Supraleiters ermittelt werden.

Bild 21: Aufbau zur Messung der radialen und axialen Steifigkeiten des Lagers für eine Turbomaschine (links). Aktivierungsvorrichtung mit beweglichen HT_cSL-Halb schalen zur genauen Positionierung einer rotierenden Welle (rechts)

Ein Problem bei der Verwendung von selbststabilen Magnetlagern für Turbomaschinen rührt daher, dass betriebsbedingt die Verdichterwelle absolut zentral in der Bohrung der Maschine laufen muss. Um dieses zu gewährleisten, wurde vom IMAB ein patentiertes Aktivierungssystem entwickelt, welches auf individuell beweglichen Supraleiter-Halbschalen ober- und unterhalb der Erregeranordnung beruht (**Bild 21** rechts).

Zur Aktivierung des Magnetlagers in der exakten Lage wird vor dem Einfrieren die Welle mit einer Vorrichtung zunächst in ihre Sollposition gebracht und die untere Supraleiter-Halbschale in einem genau berechneten Abstand zum Erregersystem positioniert. Die obere Supraleiter-Halbschale ist hierbei bereits in ihre Sollposition gebracht. Nach dem Abkühlen wird die untere Supraleiter-Halbschale ihrerseits nach oben versetzt und baut somit im Betriebszustand die Kraft auf, die bei dem horizontalen Maschinenaufbau das Gewicht der Welleneinheit genau kompensiert. Da aufgrund dieser Kraftaktivierung die untere und obere Lagereinheit unterschiedliche Tragkraftsteifigkeiten aufweisen, kann man die genaue Lage der Welle durch Änderung der Kaltkopftemperatur feinjustieren.

Im Rahmen eines Leitprojektes des Bundeswirtschaftsministeriums sollte ein "Energiesparender Schwungradspeicher mit HT_cSL-Magnetlager" entwickelt werden. Im Wesentlichen besteht der Schwungradspeicher aus einem großen CFK-Ring, der als kinetischer Energiespeicher bis zu Umfangsgeschwindigkeiten von ca. 800 m/s in einem Vakuum-Sicherheitsbehälter betrieben wird (**Bild 22**). Zur Einbringung und Auskopplung der Energie ist im Innenbereich des CFK-Schwungrings eine elektrische Motor/Generatoreinheit integriert.

Zur berührungsfreien Aufhängung des schnell rotierenden CFK-Ringes wurde ein supraleitendes Umfangslager entwickelt, bei dem die Erregereinheiten als Sammleranordnungen oben und unten in den Schwungring integriert sind (**Bild 22** und **Bild 23**). Die Supraleiter sind mit einem Kupferkaltkopf über eine mechanisch feste aber thermisch entkoppelnde GFK-Koppelstruktur gemäß **Bild 22** mit dem Vakuumbehälter fest verbunden. Diese Supraleitereinheit ist ihrerseits durch eine möglichst dünne Superisolation gegen externe Wärmeeinträge abgeschirmt.

Bild 22: Prinzipieller Aufbau des Schwungradspeichers mit integrierter HT_cSL-Umfangs lagerung. Wärmeleitungsdaten der einzelnen Baugruppen

Es besteht nun die Aufgabe, die aufgrund verschiedener Mechanismen in die Supraleiter eindringende oder in ihm selbst erzeugte Wärmemenge von 20 W erstens nach außen abzuführen und die Temperatur am Umfang des Kaltkopfes möglichst gleichmäßig tief zu halten. Zur redundanten Wärmeabfuhr werden insgesamt zwei getrennte Kühlkreisläufe verwendet, welche an jeweils zwei Stellen mit dem unteren und oberen Kupferkaltkopf verbunden sind (**Bild 24**).

Bild 23: Prinzipieller Aufbau des unteren Umfangsmagnetlagers und der thermisch isolierende Aufbau des Supraleiterauflagers mit innerem Kryokopf

Dadurch, dass vom unteren und oberen Kaltkopf am Umfang gleichmäßig verteilt an jeweils vier Stellen die Wärme abgeführt wird, ist bei dem verwendeten Kupferquerschnitt mit Temperaturunterschieden am Umfang von insgesamt weniger als 0,5 K zu rechnen. Somit sind auch eine gleichmäßige Tragkraft am Umfang und damit eine gute Laufruhe gewährleistet. In **Bild 24** sind noch vom ILK-Dresden entwickelte Stirling-Kühler eingezeichnet, welche sich durch einen hohen Wirkungsgrad und eine kompakte Bauweise auszeichnen. Aus Gründen der größeren Arbeits-Temperaturbandbreite im vorläufigen Testbetrieb werden jedoch zunächst GM-Kühler verwendet, die bei dem zu erwartenden Wärmeeintrag von ca. 20 W Temperaturen von unter 65 K gewährleisten können.

Bild 24: Aufbau des redundanten Kühlsystems mit zwei getrennten Kühlkreisläufen und über Kreuz arbeitenden Kryomaschinen

Nach Herstellerangaben ist ein ununterbrochener mehrjähriger, wartungsfreier Betrieb von Stirling- und GM-Kühlern nicht möglich. Für den industriellen Einsatz des rotierenden Energiespeichers entweder als USV-Anlage oder zum *local tuning* der elektrischen Versorgungsqualität müssen jedoch wartungsarme, d.h. möglichst berührungsfrei arbeitende Kühler zum Einsatz kommen. Hierzu wurden von der Firma Thales (Vertretung: ERT Refrigeration Technology GmbH) Studien angestellt, bei denen ausgehend von einem berührungsfrei schwingenden Stirling-Kompressor mehrere Kaltköpfe versorgt werden (splitted Stirling process). Mit dem von Thales vorgeschlagenen Aufbau scheint es möglich zu sein, den von den Anwendern verlangten mehrjährigen wartungsfreien Betrieb zu gewährleisten.

Literaturverzeichnis

- [1] S. Earnshaw: On the Nature of the Molecular Forces which regulate the Constitution of the Luminiferous Ether, Trans. Cambridge Phil. Soc. Vol. 7 (1842), p. 97-112
- W. Braunbeck: Freely Suspended Bodies in Electric and Magnetic Fields, Z. Phys., 1938, Vol. 112, p.753-763
- [3] M.K. Bevir, T.C. Randle and M.N. Wilson: *Superconductors to Lift Trains*, IEEE Spectrum, No. 144, 1976/77
- [4] J. G. Bednorz and K. A. Müller: Z. Phys. B 64 (1986) 189.
- [5] H. Weh, H. May: *Field conditioning by Superconducting screens*, Vortrag im Rahmen der VDI-Tagung: Superconductivity in Energy Technologies 1990 in Karlsruhe. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1990; ISBN 3-18-400983-1
- [6] A. A. Kordyuk: Magnetic levitation for hard superconductors, J. Appl. Phys. 83 (1), 1 January 1998
- S.O. Siems, H. May, W.-R. Canders: Levitation Forces and Stiffness of Model Arrangements of Magnetic Bearings; The Eighth International Symposium on Magnetic Bearings ISMB-8, August 26-28, 2002 Mito, Japan
- [8] E. Portabella, R. Palka, H. May, W.-R. Canders: *Static and Dynamic Model of a HTSC Axial Bearing*; The Seventh International Symposium on Magnetic Bearings ISMB-7, 2000, Zurich, Switzerland
- [9] E. Portabella: *Static and Dynamic Properties of High Temperature Superconducting Bearings*, PhD-Thesis TU Braunschweig, May 2000.
- [10] S. Jin, T.H. Tiefel, R.C. Sherwood, M.E. Davis, R.B. van Dover, G.W. Kammlott, R.A. Fastnacht and H.D Keith: Appl. Phys. Lett. 52 (1988) 2074
- [11] M. Murakami: *Melt Processed High-Temperature Superconductors*; World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 1992