

# REALISIERUNG VON MAGNETLAGERN MIT HOCHTEMPERATUR SUPRALEITERN

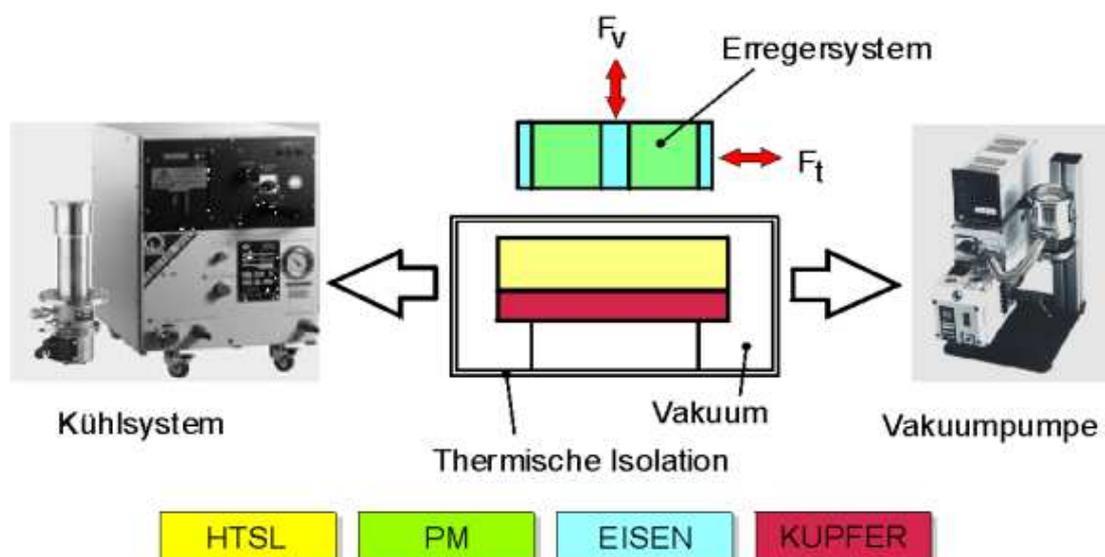
S. O. Siems

## 1 EINLEITUNG

Magnetische Lagerungen mit Hochtemperatur Supraleitern (SMB) bieten gegenüber herkömmlichen aktiven Magnetlagern (AMB) den großen Vorteil der Eigenstabilität – eine Regelung des Lagers ist also nicht erforderlich. Damit bieten sie einen Zugewinn an Sicherheit, da ein plötzliches Versagen ausgeschlossen ist [1]. Allerdings stehen diesem wichtigen Vorteil auch einige Nachteile gegenüber, die bei der Konzeption einer solchen Lagerung nicht übersehen werden dürfen. So ist die derzeit verfügbare relativ geringe Steifigkeit nicht für alle Arten von Anwendungen geeignet. Zu beachten ist weiterhin die Bereitstellung der benötigten Kühlleistung für die Supraleiter. Um diese und damit die Kosten möglichst gering zu halten, ist eine ausgefeilte Isolations-technik erforderlich.

## 1 PRINZIPIELLER AUFBAU EINES SMB

Der Aufbau eines SMB folgt unabhängig von der gewählten Lagertopologie einem prinzipiellen Schema: Grundsätzlich vorhanden sein müssen der Supraleiter, die Erregung, ein Kühl- und ein Vakuumsystem sowie eine vakuumdichte thermische Isolation des Supraleiters. Das Schema kann wie folgt dargestellt werden (**Bild 2.1**).



**Bild 2.1:** Schematischer Aufbau eines SMB

## 1.1 Kühlung

Bei der Kühlung unterscheidet man grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Man kann zum einen ein Kühlmedium einsetzen, wie z.B. flüssigen Stickstoff, Wasserstoff oder Helium, je nachdem welche Temperaturen erreicht werden sollen. Vorteilhaft ist diese Variante vor allem dann, wenn das Lager dort eingesetzt wird, wo diese Medien ohnehin vorhanden sind, also in Tanks oder bei Pumpen, die diese verflüssigten Gase fördern.

Die zweite Möglichkeit der Kühlung besteht darin, dass man ein Kühlaggregat bestehend aus Kompressor und Kaltkopf nutzt (wie in **Bild 2.1** links). Der Vorteil besteht darin, dass man ein geschlossenes System hat, das keinen Betriebsstoff benötigt. Bei einer Lagerungsaufgabe, wo nicht systembedingt Kälte vorhanden ist, vermindert sich der Aufwand für den laufenden Betrieb erheblich.

Für die am IMAB realisierten Versuchsaufbauten bietet sich ebenfalls die Nutzung von Kältemaschinen an, da so die Lagereigenschaften über einen großen Temperaturbereich hinweg untersucht werden können. Mit den verschiedenen tiefkalten Gasen ließen sich zwar auch Temperaturen erreichen, die sich vom jeweiligen Siedepunkt unterscheiden, jedoch ist eine Regelbarkeit der Temperatur quasi nicht möglich.

Für die zum Einsatz kommenden Supraleiter werden im Labor Temperaturen im Bereich von 90 K abwärts bis etwa 20 K benötigt. Für reale Anwendungen kann von einem Bereich zwischen 77 K (flüssiger Stickstoff) bis etwa 60 K ausgegangen werden. Bei tieferen Temperaturen wird der Aufwand für die Kühlung unverhältnismäßig hoch.

## 1.2 Thermische Isolation

Bei der thermischen Isolation muss der Wärmeeintrag auf zwei Pfaden unterbunden werden: Wärmeleitung über Festkörper und Gase (s. Kap. 2.3) sowie Wärmestrahlung.

Die Festkörperwärmeleitung wird durch die Wahl der Werkstoffe, vor allem aber durch eine isolationsgerechte Gestaltung beeinflusst. Isolationsgerecht bedeutet dabei, dass die unmittelbar mit der Umgebung in Verbindung stehenden Querschnitte möglichst klein gewählt werden und die Weglängen zwischen warm und kalt möglichst groß sind.

Bei der Wahl der Werkstoffe ist darauf zu achten, dass die Wärmeleitfähigkeit so klein wie möglich ist. Leider sind die besten Isolationswerkstoffe (z.B. Schäume und ähnliche Dämmmaterialien) in Bezug auf ihre mechanischen Eigenschaften meist ungeeignet. Zudem sind sie nicht vakuumdicht. Deshalb wird meist Edelstahl eingesetzt, der neben der hohen Festigkeit von Stahl, wodurch sich kleine Querschnitte realisieren lassen, noch eine vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit von ca. 20 W/(mK) mitbringt.

Eine Alternative dazu stellen Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) dar. Sie haben gegenüber Edelstahl eine um etwa den Faktor 20 geringere thermische Leitfähigkeit bei immer noch hohen mechanischen Festigkeiten. Mit GFK ist man zudem sehr frei in der Gestaltung, da sich die Einzelteile durch Kleben leicht verbinden lassen.

Die Wärmestrahlung, die mit der vierten Potenz von der Temperaturdifferenz abhängt, trägt bei den tiefen Temperaturen erheblich zum Wärmeeintrag ins System bei. Deshalb wird sie durch mehrere Schichten einer wenige  $\mu\text{m}$  dicken und mit Aluminium bedampften Kunststoffolie abgeschirmt. Die Folie ist auf einer Seite noch mit einem Glasfaservlies beschichtet, das die Kontaktflächen zwischen den einzelnen Schichten auf punktförmige Kontakte beschränkt, sodass keine zusätzlichen Wärmebrücken entstehen.



**Bild 2.2:** Vakuumgehäuse aus GFK

### 1.3 Vakuum

Für Systeme in den oben genannten Temperaturbereichen wird an die Qualität des Vakuums ein hoher Anspruch gestellt. Um einen Wärmeeintrag durch Konvektion des Restgases im Dewar zu unterbinden, muss der Druck zu Beginn des Einkühlvorgangs möglichst kleiner als  $1 \cdot 10^{-4}$  mbar sein. Im eingekühlten Zustand wirken die kalten Oberflächen wie eine Kältefalle aus der Hochvakuumtechnik, sodass der Druck bis auf  $1 \cdot 10^{-6}$  mbar fallen kann.

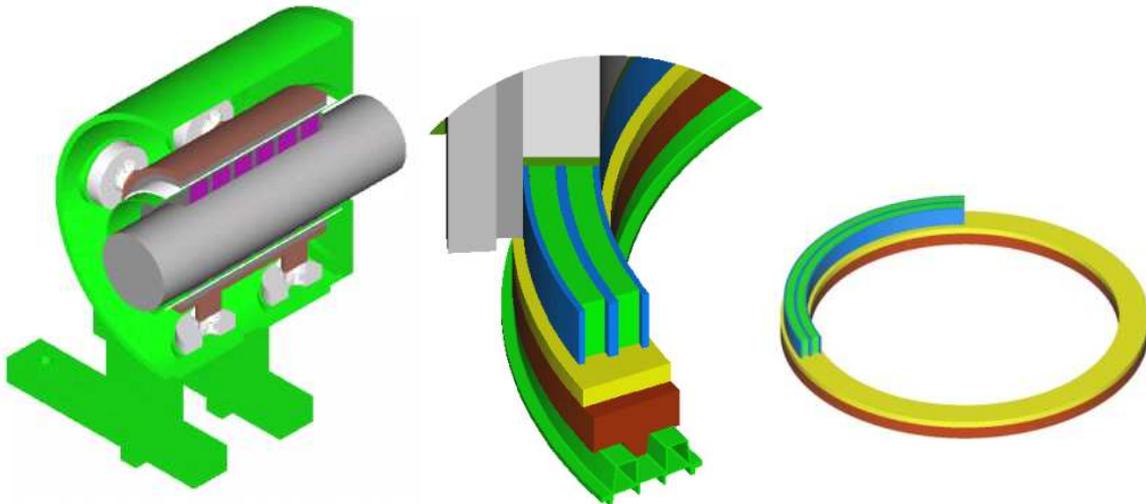
Für das Primärvakuum von kleiner  $1 \cdot 10^{-4}$  mbar wird eine Turbomolekularpumpe eingesetzt, die bei großen zu evakuierenden Volumina zu Beginn durch eine Drehschieberpumpe ergänzt werden kann (**Bild 2.1** rechts).

Um ein Vakuum auf diesem Niveau zu erreichen und zu halten, werden an das Vakuumgefäß bzw. an den gesamten evakuierten Aufbau hohe Anforderungen bezüglich der Gasdichtigkeit gestellt. Aber auch die Beschaffenheit und die Reinheit der Oberflächen sind von großer Bedeutung.

Für Vakuumbehälter, Leitungen und Armaturen wird zumeist Edelstahl eingesetzt. Für den Laborbetrieb, wo sehr lange Standzeiten des Vakuums nicht unbedingt erforderlich sind, lassen sich die Behälter aber auch aus GFK realisieren. GFK lässt sich leicht verarbeiten und durch Kleben gasdicht verbinden und hat, wie oben bereits erwähnt, gute Isolationseigenschaften.

## 2 LAGERTOPOLOGIEN

Wie in [2] beschrieben sind diverse Topologien supraleitender Magnetlager denkbar. Am IMAB werden derzeit zwei dieser Möglichkeiten experimentell untersucht. **Bild 3.1** zeigt die beiden Lagerkonfigurationen: Links ein Radiallager, rechts ein Umfangslager.

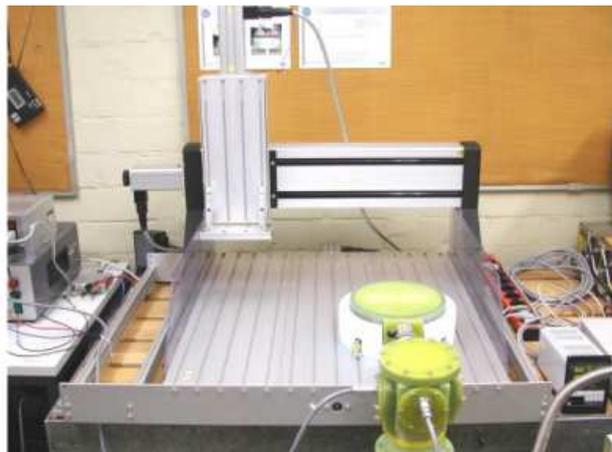


**Bild 3.1:** Radial- und Umfangslager (Erregers. nur teilw. dargest.) mit HTSL

Zu experimentellen Untersuchungen wurden Versuchseinrichtungen gebaut ([1] und **Bilder 2.2** und **3.2**) und bereits erste Messungen am Linearmodell des Umfangslagers durchgeführt.

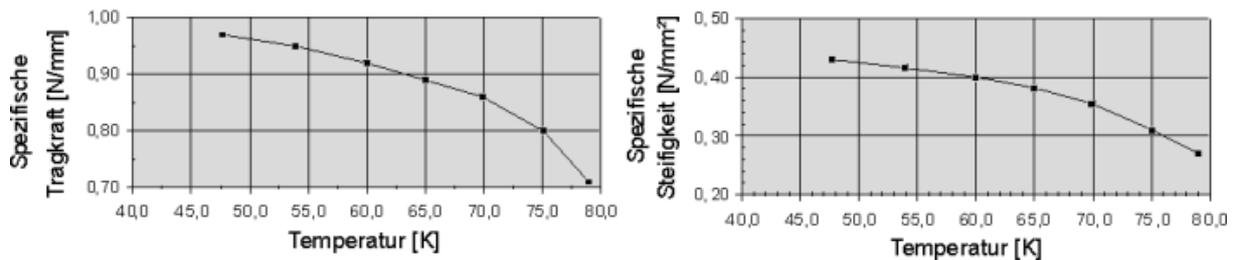
## 2.1 Messungen am Lagermodell

Für die Messungen wurde ein Ausschnitt des Umfangslagers “linearisiert” und auf 3-achsige Kraftsensoren gestellt. Das Erregersystem wird relativ zum HTSL bewegt. Damit lassen sich sowohl verschiedene Aktivierungsmodi als auch die erreichbaren Kräfte in Richtung der Bewegungsfreiheitsgrade des Lagers ermitteln.

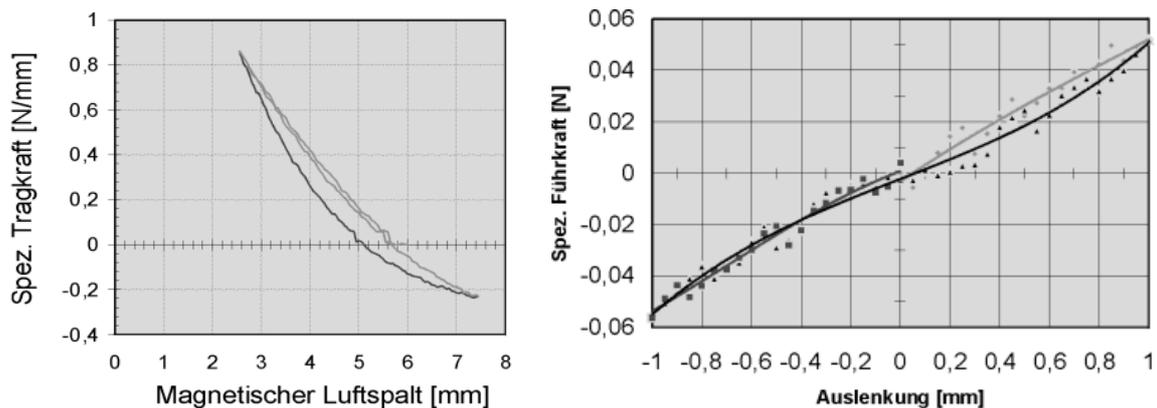


**Bild 3.2:** 3-Achsen Tisch mit Linearmodell des HTSL-Lagers

Im Folgenden sind exemplarisch einige Ergebnisse dargestellt für den Aktivierungsmodus OFCo [1]. Die Daten sind in spezifische Werte umgerechnet, um sie auf andere Geometrien übertragbar zu machen. Da die Geometrie des Lagers hier nicht aufgeführt wird, sind die Kurven rein qualitativ zu sehen.



**Bild 3.3:** Kraft und Steifigkeit über der Temperatur



**Bild 3.4:** Tragkraft über magn. Luftspalt und Führkraft über Querauslenkung

Die Kurven aus **Bild 3.3** zeigen, wie die erreichbare Tragkraft und die Steifigkeit von der Temperatur abhängen bzw. mit fallender Temperatur ansteigen. Oberhalb von 80 K ist kein Betrieb des Lagers mehr möglich.

Ebenso deutlich ist die Abhängigkeit der Tragkraft vom magnetischen Luftspalt zu erkennen (**Bild 3.4**). Aufgrund der Notwendigkeit, den HTSL mit einem Dewar zu umschließen, war ein kleinerer als der dargestellte magnetische Luftspalt aus mechanischen Gründen nicht anfahrbar. Gut zu erkennen ist im **Bild 3.4** links die für HTSL-Lager charakteristische Hysterese. Auf der oberen Kurve wird das Erregersystem dem HTSL angenähert, auf der unteren entfernt. HTSL-Lager weisen also in vertikaler Richtung eine anisotrope Steifigkeit auf.

Im **Bild 3.4** rechts ist der Verlauf der Führkraft bis zu einem Millimeter Auslenkung dargestellt. Im Vergleich mit der Tragkraft aus dem linken Diagramm erkennt man, dass die erreichbaren Führkräfte etwa eine Größenordnung kleiner sind als die Tragkräfte.

## **4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK**

Der vorliegende Bericht zeigt, dass am IMAB die technischen Voraussetzungen für eine systematische experimentelle Untersuchung von SMB geschaffen und bereits erste erfolgreiche Messungen durchgeführt wurden.

In den folgenden Messreihen werden neben Kräften aus kombinierten Auslenkungen und der Vermessung des Luftspaltfeldes bei aktiviertem HTSL auch die Qualitäten verschiedener Supraleitermaterialien untersucht.

## **5 LITERATUR**

- [1] Siems, S. O.: "Hochtemperatur-Supraleiter Magnetlager für Hochtourige Maschinen", IMAB-Jahresbericht 2000, Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen, TU Braunschweig, 2000
  
- [2] Siems, S. O., May, H., Portabella, E., Canders, W.-R.: "Application of HTSC-Bearings for High Speed Machines", 7. International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB-7), Zürich, 2000