

HOCHTEMPERATUR-SUPRALEITER MAGNETLAGER FÜR HOCHTOURIGE MASCHINEN

S.O. Siems

1 EINLEITUNG

Magnetische Lagerungen werden überall dort eingesetzt, wo eine berührungsfreie und damit reibungs- und schmiermittelfreie sowie verschleiß- und verlustarme Lagerung gefordert ist.

Supraleitende magnetische Lager (SMB) sind passive Lager bestehend aus Hochtemperatur-Supraleitern (HTSL) und Permanentmagneten (PM) und können wie aktive magnetische Lager (AMB) sowohl für rotierende Wellen als auch zum Tragen und Führen von Maschinenteilen oder Fahrzeugen genutzt werden. Im Gegensatz zu AMB sind SMB eigenstabil, es wird also für den Schwebezustand keine Regelung benötigt. Dieses Verhalten trägt auch zu den Fail-Safe-Eigenschaften eines SMB bei. Da bei einem Energieausfall und damit dem Wegfall der Kühlung bedingt durch die Wärmekapazitäten des Lagers keine sprunghafte Erwärmung der HTSL und damit der plötzliche Verlust der Tragfähigkeit eintritt, verbleibt bis zum Überschreiten der kritischen Temperatur T_c eine ausreichend lange Zeitspanne, um den Rotor kontrolliert abzubremesen. Gerade bei Schwungmassenspeichern mit sehr großen Energieinhalten wird damit eine Erhöhung der Sicherheit erreicht. Unmittelbar nach dem Ende des Energieausfalls kann die Maschine wieder angefahren werden, eine zusätzliche Wartung wird nicht erforderlich. Anders als bei aktiven Magnetlagern, bei denen der Rotor mit voller Drehzahl in die Fanglager fällt, die durch die plötzliche Beschleunigung einem extrem hohen Verschleiß unterliegen und daher eine sehr begrenzte Lebensdauer haben.

Ein weiterer Vorteil von Magnetlagern ist, dass der Betrieb ohne Schmierstoffe erfolgt und verschleißfrei ist, was gerade unter Reinraum- und Vakuumbedingungen wichtig ist. Die Verschleißfreiheit und die damit für das Lager nicht anfallenden Reibungsverluste sowie die Wartungsarmut müssen allerdings unter dem Gesichtspunkt der für den Betrieb notwendigen Zusatzaggregate für Kühlung und Vakuumisolation betrachtet werden. Hier müssen je nach Anwendungsfall die Vor- und Nachteile gegeneinander abgewogen werden.

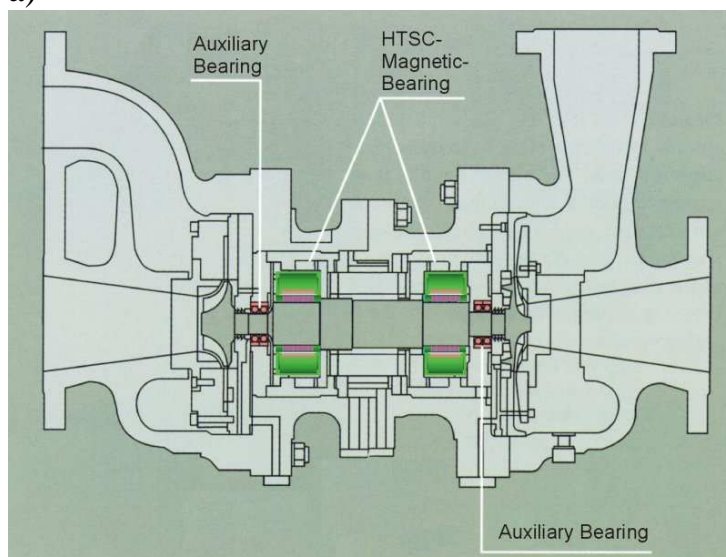
Werden die Lagerungen dagegen in einer ohnehin kryogenen Umgebung betrieben, wie z.B. in Pumpen oder Tanks für tiefkalte Flüssigkeiten, erhält man die Kühlung der HTSL ohne den Einsatz von Zusatzaggregaten.

Gegenüber aktiven Magnetlagern sind SMB resistent gegenüber elektromagnetischen Feldern, die in der EMV-sensitiven Regelelektronik aktiver Lager schnell zu Störungen und damit zu unkontrollierten Bewegungen, schlimmstenfalls zum Absturz des Lagers führen können.

1 ANWENDUNG

Im folgenden soll exemplarisch eine Turbomaschine mit SMB betrachtet werden. Sie besteht aus einem Läufer mit zwei Laufrädern (Axialschubausgleich) und einem Antriebsmotor, der in zwei zylindrischen HTSL-PM-Lagern läuft (**Abb. 1a**).

a)



b)

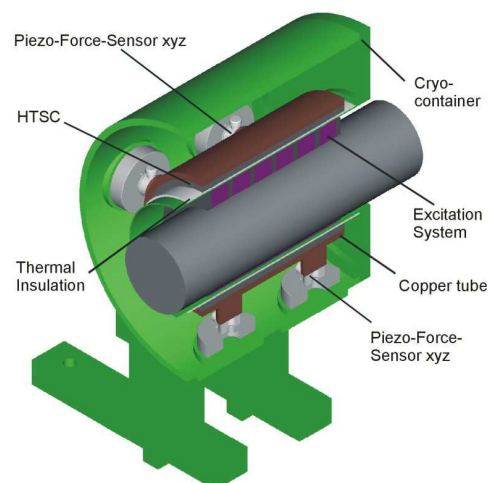


Abb. 1: a) Turbomaschine mit SMB, b) Lagerprototyp mit Sensorik

2 BELASTUNGEN

Im Betrieb treten folgende Belastungen auf:

- Masse des Rotors
- Radiale Anregung durch Unwucht des Rotors und einseitiger magnetischer Zug des Motors (EMZ)
- Axialkraft durch Schub der Laufräder (hier als weitgehend kompensiert angenommen)

Um diese Belastungen zu simulieren, wurde am IMAB ein Prüfstand für statische und dynamische Kraftmessungen entworfen. In diesen sind zwei

Exemplare des in **Abb. 1b** dargestellten Lagerprototypen integriert. Die Lager tragen eine Welle, auf der sich die Läufer von zwei radialen und eines axialen elektromagnetischen Aktuators sowie der eines Motors befinden. Die Aktuatoren sind konzipiert für statische, periodische und stochastische Erregungen, so dass beliebige Lastspiele einer Anwendung simuliert werden können. Die Kraftmessung erfolgt mittels Piezo-Sensoren, die sowohl an den Lagern als auch an den Aktuatoren angebracht sind.

In der **Abb. 2** ist der Prüfaufbau dargestellt. Er besteht aus einem Fundament, auf dem alle Komponenten befestigt sind. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass trotz des modularen Aufbaus eine exakte Ausrichtung gewährleistet ist.

3 AUFBAU DES LAGERS

Das Erregersystem des Lagers ist in Sammlerbauweise ausgeführt und besteht aus sechs axial magnetisierten Ringmagneten und dazwischen liegenden Eisenringen als Sammelpole (**Abb. 1b**). Im magnetischen Luftspalt befindet sich die Gehäusewandung aus GFK und eine thermische Isolation aus mehreren Schichten Isolationsfolie. Der Rest verbleibt für den mechanischen Luftspalt. Um die Isolation herum liegt der HTSL, der von einem Kupferrohr umschlossen ist, das für eine gleichmäßige Temperaturverteilung und zusätzlich für eine mechanische Stabilisierung des HTSL-Rohrs sorgt. Unmittelbar an diesem Rohr sind vier Kraftsensoren befestigt, jeweils zwei in der Horizontalen und zwei in der Vertikalen. Durch diese direkte Ankopplung erreicht man eine sehr steife Verbindung und damit eine Kraftmessung, die nicht von der Konstruktion der Lagergehäuse abhängig ist. Aber nicht nur die Sensoren sind im kryogenen Teil des Lagers untergebracht, sondern auch die Ladungsverstärker, so dass beim Herausführen der Signale aus dem Vakuum eine Verminderung der Signalqualität vermieden wird.

Die Kühlung der HTSL erfolgt mit einer einstufigen Stirling-Kältemaschine, die über eine flexible Kupferlitze mit dem die HTSL umgebenden Kupferrohr verbunden ist. Die Kühlung mit einer Kältemaschine ist im Vergleich zu einer Kühlung mit flüssigem Stickstoff wesentlich unkomplizierter und anwendungsfreundlicher in der Handhabung. Die für den Prüfstand eingesetzten Kältemaschinen erzielen bei einer Temperatur von $T=75\text{K}$ eine Kälteleistung von $P_c=15\text{W}$ bei einer Antriebsleistung von $P_{el}=500\text{W}$.

Durch eine am Kaltkopf der Stirling-Maschine befestigte Kryo-Vakuumpumpe aus Aktivkohle wird für den Betrieb keine dauerhaft eingeschaltete Vakuumpumpe benötigt, die für den Erhalt des isolierenden Vakuums sorgt. Damit

vermeidet man störende Vibrationen durch die Vakuumpumpe während der Messung.

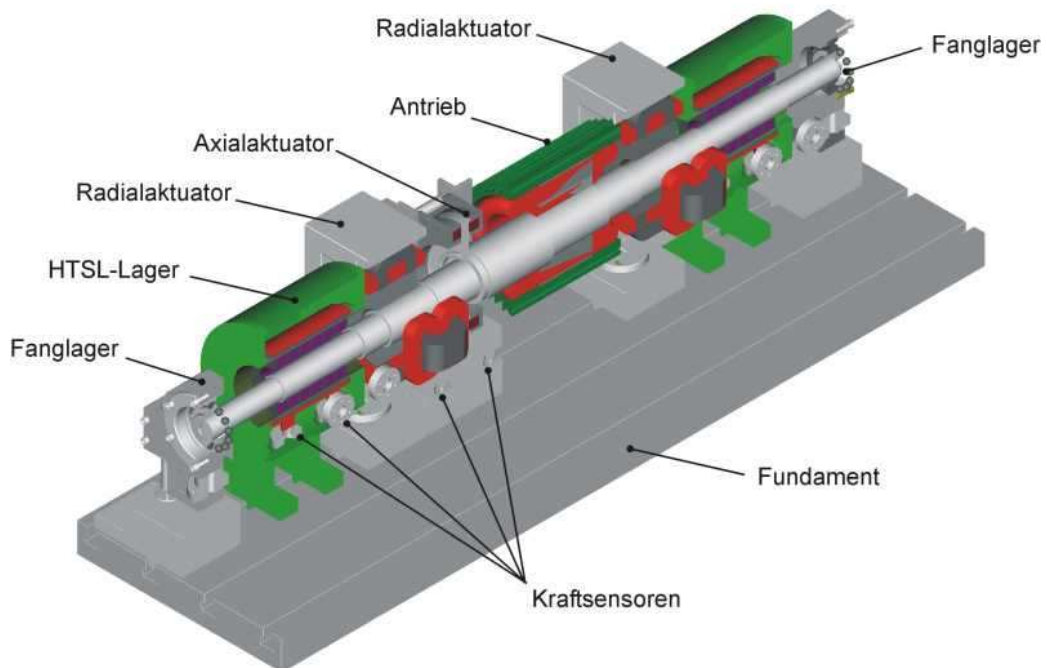


Abb. 2: Aufbau des Prüfstands

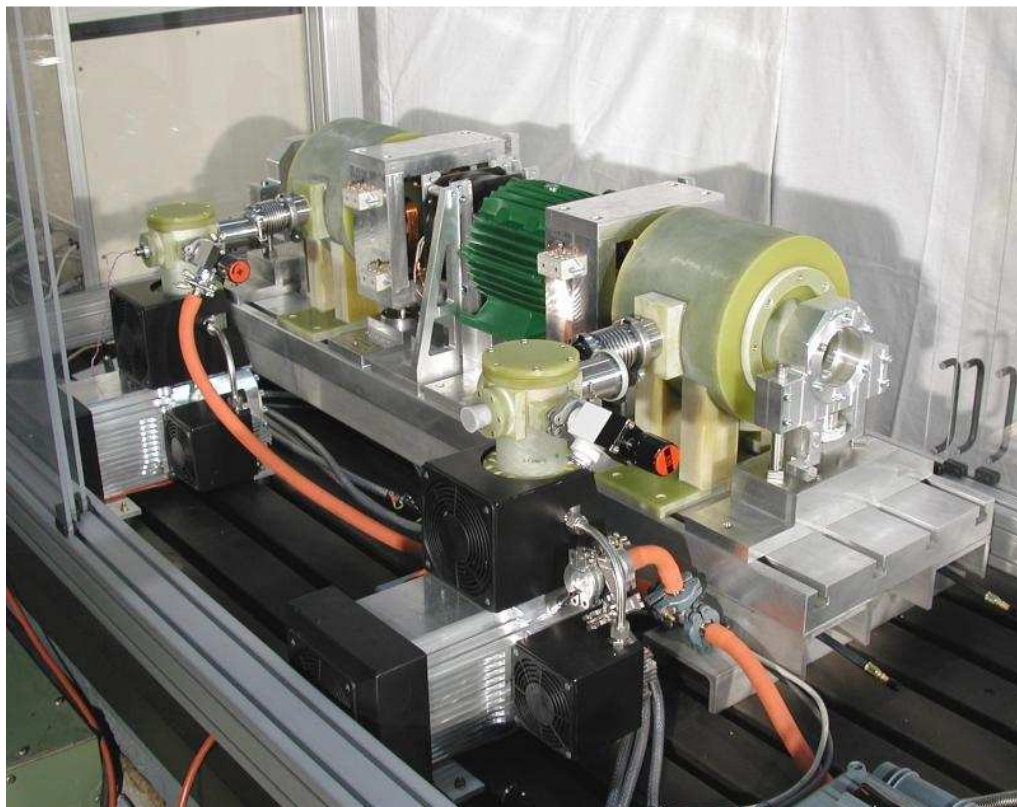


Abb. 2: Aufbau des Prüfstands

4 LAGERDATEN

Für die Auslegung müssen folgende Lagerdaten im Betriebspunkt bekannt sein:

- Statische Kraft – radial und axial
- Steifigkeitsmatrix
- Dämpfungsmatrix
- Frequenzabhängigkeit der Größen

Für die in **Abb. 1b** dargestellte Lagergeometrie ergibt sich im Arbeitspunkt eine berechnete statische Tragkraft von $F_y=483\text{N}$ und eine Steifigkeit von $k_y=309\text{N/mm}$. Da SMB keine nennenswerten Dämpfungseigenschaften aufweisen, wird in der Anwendung eine zusätzliche Dämpfung z.B. in Form eines Quetschöldämpfers oder metallischer Schäume erforderlich.

Benötigt man bei gleicher Lagergeometrie höhere Werte für Tragkraft und Steifigkeit, als mit dem Vorspannweg der durch das Eigengewicht des Rotors erzeugten Auslenkung erzielt werden kann, muss man für die Aktivierung neue Wege beschreiten. Am IMAB wurde ein Methode entwickelt, die es erlaubt, verschiedene Vorspannwege bei Beibehaltung der Rotorlage einzustellen (**Abb. 3**).

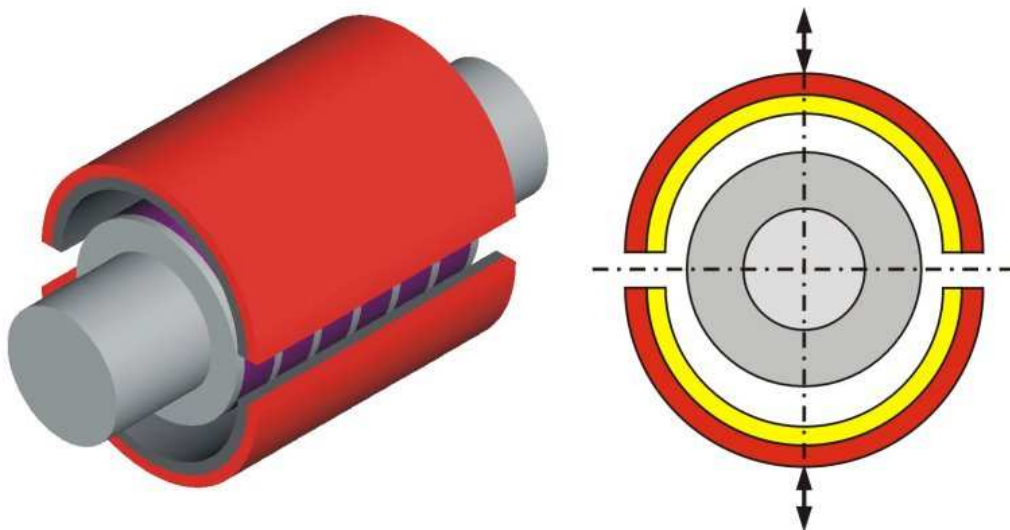


Abb. 3: Aktivierung mit geteilten Lagerschalen

Dies ist vor allem für Anwendungen notwendig, die keine Veränderung der Rotorlage erlauben, wie es meist bei Turbomaschinen mit kleinen Spaltmaßen der Fall ist. Die Aktivierung der Lager erfolgt also nicht durch eine Verlagerung der Rotorachse, sondern durch eine Bewegung der Lagerschalen relativ zum Rotor. Die Lagerbauweise mit geteiltem HTSL-Rohr ermöglicht es zugleich, für den oberen und unteren Lagerteil getrennt den optimalen Vorspannweg und Arbeitsluftspalt einzustellen. Damit können für die Zugkraft (oben) und die

Levitationskraft (unten) maximale Werte bei gleichem Erregersystem erzielt werden, obwohl die Optima bei verschiedenen Luftspalten liegen.

Der im Aufbau befindliche Prüfstand am IMAB hat die notwendige Ausstattung, um diese Vorgänge zu simulieren. Die Messergebnisse werden Aussagen darüber liefern, wie groß die Einflussnahme mittels der Temperatur maximal ist, bezogen auf die hier untersuchte zylindrische Lagertopologie.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die bisher vorgenommenen Untersuchungen zum Einsatz von SMB zur Lagerung von Rotoren haben gezeigt, dass es sich dabei um eine zwar aufwendige aber gerade für bestimmte Anwendungsfälle um eine sehr vielversprechende Technik handelt. Der Schlüssel zum Erfolg liegt in der Aktivierung der Lager. Ein erster Ansatz für eine anwendungsbezogene Aktivierung wurde beschrieben.

Vor allem auf dem Gebiet der HTSL schreitet die Entwicklung stetig voran, so dass mit ständig steigenden Werten hinsichtlich Tragkraft und Steifigkeit der Lager gerechnet werden kann.