

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN RADIALEN HTSL MAGNETLAGERN

S.O. Siems

1 EINLEITUNG

Der wichtigste Vorteil von Magnetlagern mit Hochtemperatur-Supraleitern (SMB) ist die inhärente Stabilität, die eine Regelung erübrigt und damit der Zugewinn an Sicherheit durch das Fehlen von störanfälligen Komponenten (EMV). Erweitert wird der Sicherheitsaspekt durch die gerade bei hochtourigen Maschinen wichtige Zeit für ein kontrolliertes Herunterfahren der Maschine, die sich aus der systemimmanenten thermischen Zeitkonstante ergibt, welche zwischen Betriebs- und Sprungtemperatur der Supraleiter liegt.

Ziel der im Folgenden beschriebenen Versuche ist die Ermittlung der Eigenschaften für ein ausgeführtes Lager. Mit den gewonnenen Daten lassen sich Aussagen über die Einsatz- und Verwendungsmöglichkeiten für Lagerungen dieser Art treffen.

2 VERSUCHSAUFBAUTEN

Für die experimentellen Untersuchungen wurden zwei Versuchslager – ein radiales und ein lineares Lager – auf einem 3-Achsen-Tisch montiert. In **Bild 1** sind jeweils die Dewar mit den darin befindlichen Supraleitern sowie entsprechenden Erregersystemen dargestellt. Mit Hilfe des 3-Achsen-Tisches können die Erregersysteme relativ zu den HTSL bewegt werden. Die Kraftmessung erfolgt mittels 3-achsiger piezoelektrischer Kraftsensoren, die an den Erregersystemen angebracht sind.

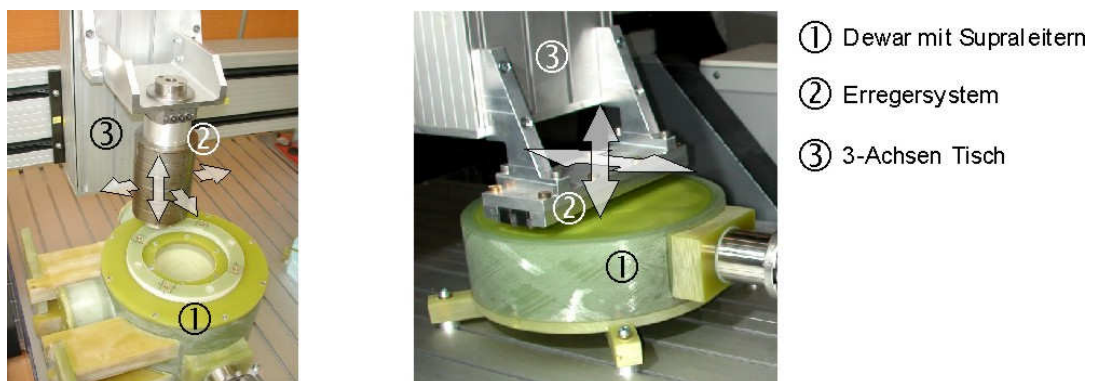


Bild 1: Versuchsaufbauten für radiales Lager (links) und lineares Lager (rechts)

3 MESSUNGEN

Zunächst wurden Messungen mit dem linearen System durchgeführt. Zum Einsatz kamen monokristalline Supraleiter aus YBaCuO, die sich hinsichtlich des maximal einfrierbaren Magnetfeldes (Trapped Field) unterschieden. Es wurden jeweils vier Proben mit den Abmessungen $35 \times 35 \times 10 \text{ mm}^3$ (LxBxH) nebeneinander auf dem Kaltkopf befestigt (**Bild 2**).



Bild 2: Vier YBaCuO-Proben mit Kupferrahmen zur Befestigung auf dem Kaltkopf

Die Kühlung erfolgte wie bei allen Messungen durch Kältemaschinen, die mit dem Gifford-McMahon-Prinzip arbeiten. Damit lassen sich in diesen Versuchsaufbauten Temperaturen von der Sprungtemperatur T_c bis hinunter zu 40K realisieren, womit eine Untersuchung des Temperatureinflusses auf die Lagereigenschaften möglich wird.

3.1 Einfluss der Qualität der Supraleiter auf die Lagereigenschaften

Die für diese Messreihen verwendeten Supraleiter wiesen Trapped Fields von 800mT, 1000mT und 1100mT auf. Wie man in **Bild 3** links erkennen kann, ist der Einfluss auf die erreichbaren Tragkräfte relativ gering. Die Steifigkeit der Lageranordnung wird jedoch sehr stark von der Qualität der Supraleiter beeinflusst (**Bild 3** mitte). Tragkraft und Steifigkeit sind in den Graphen als spezifische Werte angegeben, da sie auf die Länge der HTSL-Anordnung im Versuchsaufbau bezogen sind.

Mit den 800mT-Proben werden im Nulldurchgang $0,42 \text{ N/mm}^2$ spezifische Steifigkeit erreicht, mit den 1100mT-Proben $0,56 \text{ N/mm}^2$, was einer Steigerung von 25% entspricht. Die Höhe des einfrierbaren Feldes ist demnach einer der entscheidenden Parameter für die Steifigkeit eines Lagers.

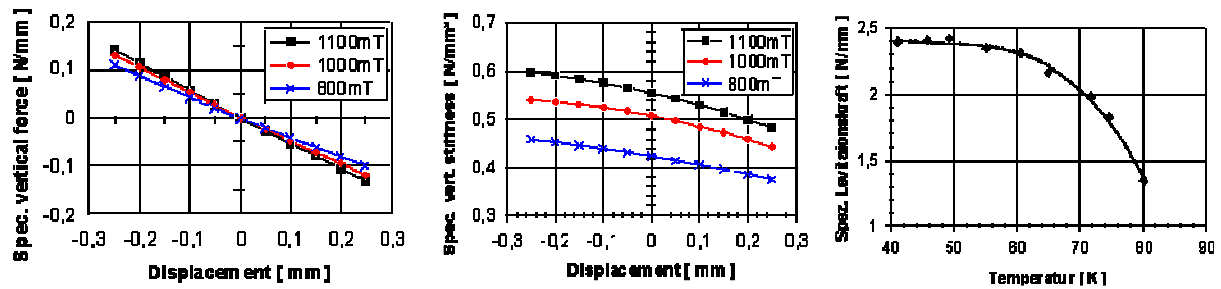


Bild 3: Spez. vertikale Kraft (links), Steifigkeit (mitte) und Temperaturabhängigkeit

Den Einfluss der Temperatur auf die erreichbaren Tragkräfte zeigt anschaulich das **Bild 3** rechts. Es wird auch deutlich, dass eine Absenkung der Betriebstemperatur auf unter 60K keine nennenswerte Steigerung der Kraft einbringt. Der Aufwand für die Kühlung hingegen nimmt stark zu. Aus diesem Grund wurde für die im Folgenden untersuchte anwendungsnahe Lagerung eine Betriebstemperatur von 65K gewählt, die als guter Kompromiss zwischen erreichbarer Lagerkraft und erforderlichem Kühlaufwand angesehen werden kann.

3.2 Messungen am radialen Lager

Das Versuchslager besteht aus einem mit HTSL-Ringen (**Bild 4** links) bestückten Lagerstator (**Bild 4** mitte) und einem Erregersystem mit axial magnetisierten Permanentmagneten in Sammlerbauweise (**Bild 4** rechts). Der Lagerstator hat einen Innendurchmesser von 90mm, eine Wandstärke von 5mm und eine Länge von 132mm. Das Erregersystem hat einen Außendurchmesser von 82mm, sodass sich ein magnetischer Luftspalt von $\delta_{mag} = 4\text{mm}$ ergibt. Dieser wird durch die konstruktiven Maßnahmen zur thermischen Isolation auf einen mechanischen Luftspalt von $\delta_{mech} = 1,5\text{mm}$ reduziert.



Bild 4: HTSL-Ring (links), Lagerstator (mitte), Erregersystem (rechts)

Mit dem in **Bild 5** dargestellten Aufbau wurden die folgenden acht Messreihen durchgeführt:

- OFC: F_x , F_y , F_z und Kreisbewegung mit Auslenkung 1mm um den Mittelpunkt
 - OFCo ($y = 1\text{mm}$): F_x , F_y , F_z , Kreisbewegung mit Auslenkung 1mm um den Mittelpunkt
- Ergänzend wurde noch der Einfluss des Wellenzapfenmaterials auf die Lagereigenschaften untersucht. Zwar wird das Erregersystem durch eine Aluminiumhülle getragen, die für einen

gewissen Abstand zum eigentlichen Wellenzapfen sorgt, doch ein Einfluss auf die Stärke des Erregerfeldes ist trotzdem festzustellen, wie die weiter unten dargestellten Messdaten zeigen. Mit OFC und OFCo wird die jeweilige Art der Aktivierung der Lagerung bezeichnet. Dabei bedeutet OFC (**O**perational **F**ield **C**ooling), dass der Abstand von Erregersystem und HTSL während des Einfriervorgangs genau dem Arbeitsabstand entspricht. Dagegen wird bei OFCo (**O**perational **F**ield **C**ooling with **o**ffset) in einer etwas ausgelenkten Position eingefroren und danach erst die Arbeitsposition eingenommen.

Den Messaufbau des radialen Lagers zeigt **Bild 5**. Im Vordergrund sieht man das Dewar der Kältemaschine mit dem Verbindungsrohr zum Lagerdewar aus grünem GFK. Am linken Bildrand befinden sich die zwei Ladungsverstärker für den 3-Komponenten Kraftsensor, sodass bei der Kreisbewegung die Signale für die x- und y-Komponente parallel aufgezeichnet werden können.

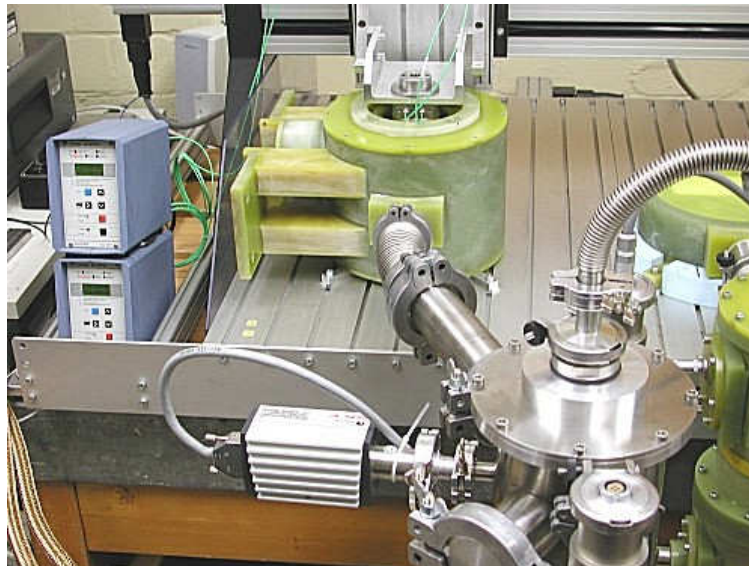


Bild 5: Versuchsaufbau mit radialem Lager, Erregersystem in Messposition

Nachfolgend sind die Messergebnisse dargestellt. Für die x-Komponente (**Bild 6**) sind die Einflüsse durch die Art der Aktivierung und die Wahl des Wellenzapfenmaterials relativ gering. Für die maximale Auslenkung von 1mm wird jeweils eine Führungskraft von $F_x > 100\text{N}$ erreicht, was bei der vorhandenen Linearität einer Lagersteifigkeit von $c_x = 100\text{N/mm}$ entspricht.

Bei der Betrachtung der y-Komponente (**Bild 7**), also der Tragkraft, sind die Unterschiede in Bezug auf die Wahl des Wellenmaterials wesentlich deutlicher, wenn man die OFCo-Aktivierung betrachtet. Bei der maximalen Auslenkung von 2mm wird das Erregerfeld durch die Supraleiter stark zurückgedrängt, sodass sich mehr Feldlinien über den ferromagnetischen Wellenzapfen schließen. Die erreichbare Tragkraft wird dadurch erheblich vermindert gegenüber der Anordnung mit dem Wellenzapfen aus Aluminium. Dies spiegelt sich auch deutlich in der x-y-Darstellung der Lagerkräfte wieder (**Bild 8**). Gut ist in dieser Darstellung die relativ hohe Homogenität der Lagerkräfte bezogen auf den Umfang zu erkennen. Die geringe Unsymmetrie in Bezug auf den geometrischen Lagermittelpunkt beruht auf

mechanischen Abweichungen im Aufbau. Wie für die x-Komponente wird auch für die y-Komponente eine Lagersteifigkeit von etwa $c_y = 100\text{N/mm}$ erreicht.

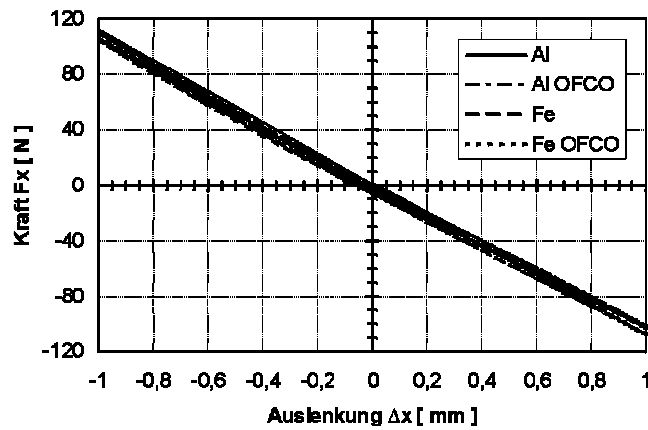


Bild 6: Kraftverläufe der x-Komponente (Führkraft)

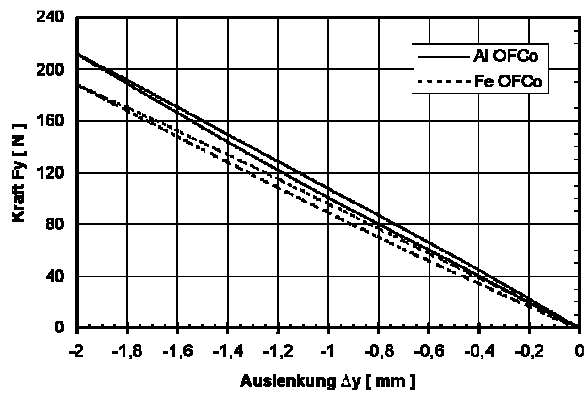
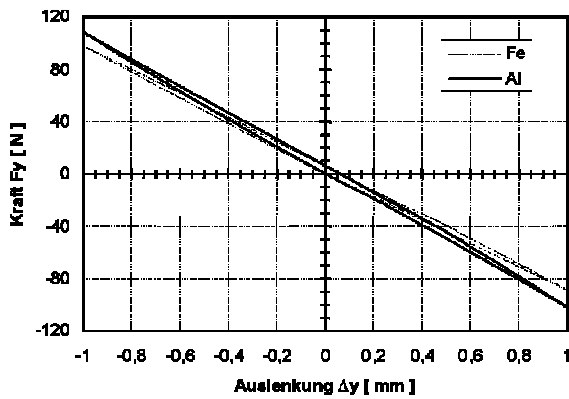


Bild 7: Kraftverläufe der y-Komponente (Tragkraft)

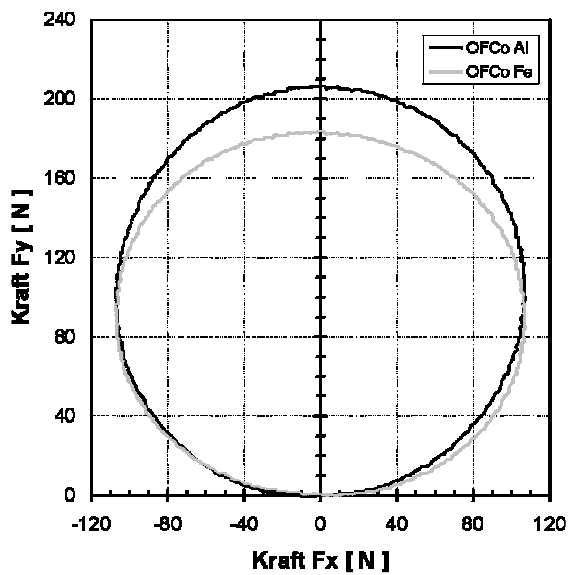
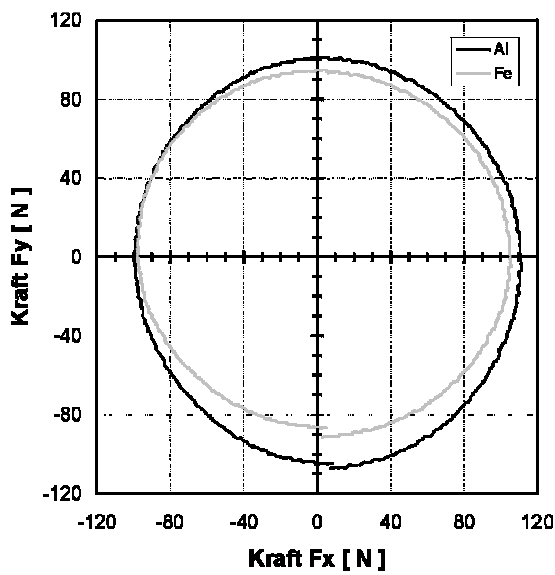


Bild 8: Kraftverläufe y- über x-Komponente aufgetragen

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit dem gezeigten Versuchsaufbau für eine radiale Magnetlagerung mit Hochtemperatur-Supraleitern wurde erfolgreich demonstriert, wie ein solches Lager prinzipiell aufgebaut sein muss, um eine echte Lagerfunktion zu realisieren. Es wurde jedoch auch deutlich, dass die erreichbaren Steifigkeiten derzeit noch sehr gering sind. Die Betrachtung des Einflusses der Qualität der Supraleiter auf die Lagereigenschaften zeigt jedoch auch, dass durch eine weitere Verbesserung an dieser Stelle noch Potenziale zu erschließen sind und für eine erfolgreiche Verbreitung im industriellen Einsatz auch erschlossen werden müssen.

Gegenstand weiterer geplanter Versuchsreihen werden die Untersuchung optimierter Aktivierungsmethoden, die Ermittlung der mechanischen Haltbarkeit unter Dauerbelastung sowie ein weiter optimierter Materialeinsatz auf Seiten der HTSL-Formkörper sein.