

ENTWURF EINES SUPRALEITENDEN MAGNETLAGERS FÜR HOCHTOURIGE ANWENDUNGEN

unter Berücksichtigung fertigungstechnischer Gegebenheiten

J. Hoffmann, H. May, R. Palka

1 EINLEITUNG

Das supraleitende Magnetlager ist eine sehr viel versprechende Anwendung für Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL). Es basiert auf der wechselwirkenden Kraft zwischen einem Erregersystem und HTSL-Elementen. Kontaktfreier Lauf, prinzipbedingt stabile Lagerung vom Stillstand bis zu höchsten Relativgeschwindigkeiten sind die besonderen Vorzüge dieser Lagerung. Daraus resultieren Vorteile wie Verschleißfreiheit, Verzicht auf Regelungs- und Sensoreinheiten, hohe Zuverlässigkeit und keine EMV-Problematik.

Von besonderem Interesse ist der Einsatz in Hochgeschwindigkeitsanwendungen wie z. B. Turbomaschinen, rotierenden Energiespeichern sowie planaren Transportsystemen. Eine besonders gute Eignung für Anwendungen im Reinraum- und Vakuumbereich ergibt sich aus dem Funktionsprinzip.

Aufgrund ihrer Robustheit und Zuverlässigkeit stellen diese Lager eine fortschrittliche Alternative zu aktiven magnetischen Lagerungen dar.

2 FUNKTIONSWEISE

Die Krafterzeugung zwischen einem HTSL und dem Erregersystem wird in **Bild 1** dargestellt. Nach dem Einkühlen des Supraleiters in einer Startposition (**Bild 2**) wird, wie durch den Pfeil angezeigt, der Permanentmagnet seitwärts bewegt und durch äußere Kräfte angehoben. In der ausgelenkten Position erfährt der Permanentmagnet dann rückstellende Kräfte (**Bild 3**).

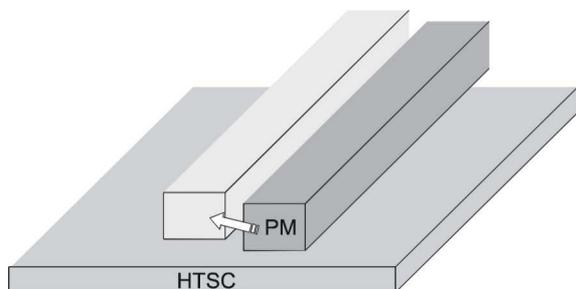


Bild 1: Unendlich langer HTSL mit ausgelenktem PM

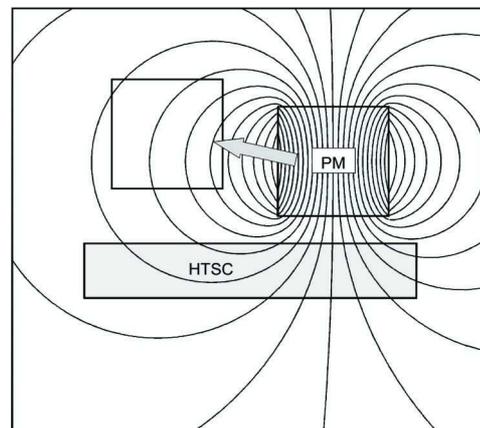


Bild 2: Anordnung mit endlicher Breite und unendlich langem HTSL: Startposition

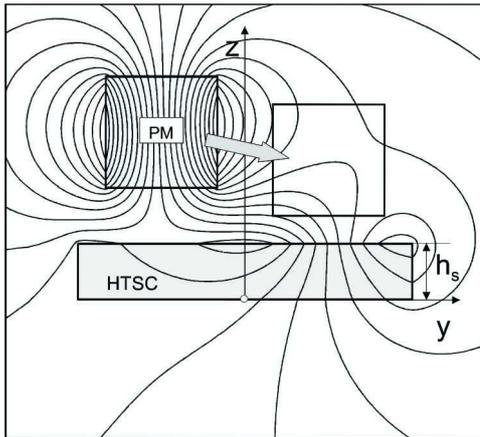


Bild 3: Anordnung mit endlicher Breite und unendlich langem HTSL: PM verschoben, rückstellende Kraft

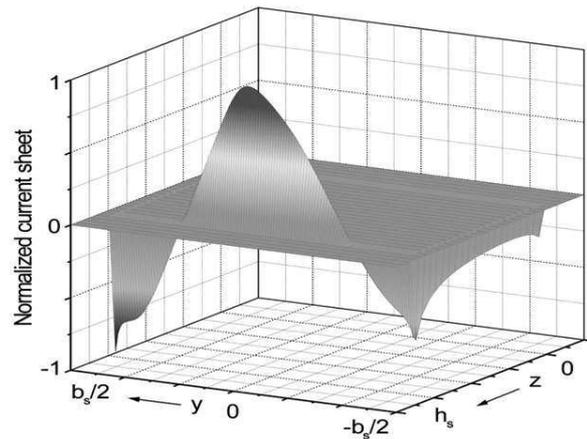


Bild 4: Strombelagsverteilung im Schnitt von **Bild 3**

Die Krafterzeugung fußt auf einem mit dem supraleitenden Effekt verknüpften physikalischen Phänomen. Das Auftreten von Wirbelströmen in herkömmlichen Leitern bei variierendem Fluss erfolgt auch in aktivierten (Temperatur unterhalb des kritischen Wertes) Supraleitern. Die Strombelagsverteilung (**Bild 4**) zeigt, dass unter der Voraussetzung, dass für den Supraleiter vereinfachend eine unendlich große Stromdichte angenommen wird (Meißner Zustand, $j_c = \infty$) diese Wirbelströme einen Strombelag auf der dem Permanentmagneten zugewandten Oberfläche des Supraleiters bilden (sog. „Skin Effekt“). Die Wirbelströme verhindern vollständig eine Feldänderung im Inneren des Supraleiters. Als Resultat erzeugen diese Ströme zusammen mit dem Feld eine inhärent stabile rückstellende Kraft (Lorentzkraft). Neben dem analytischen Modell zur Berechnung der Kräfte an einem unendlich ausgedehnten HTSL nach **Bild 1** wurden auch weiterführende Berechnungsmodelle für in allen drei Ortskoordinaten endlich ausgedehnte Systeme erarbeitet.

Fast alle Erregersysteme für Hochgeschwindigkeits-HTSL-Lager bestehen aus Permanentmagneten, deren Fluss durch Eisenpole konzentriert und homogenisiert wird (**Bild 5**).

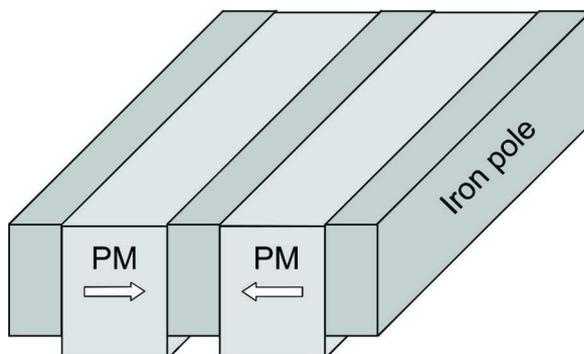


Bild 5: Lineares Erregersystem bestehend aus horizontal magnetisierten Permanentmagneten und dazwischen liegenden Eisenpolen

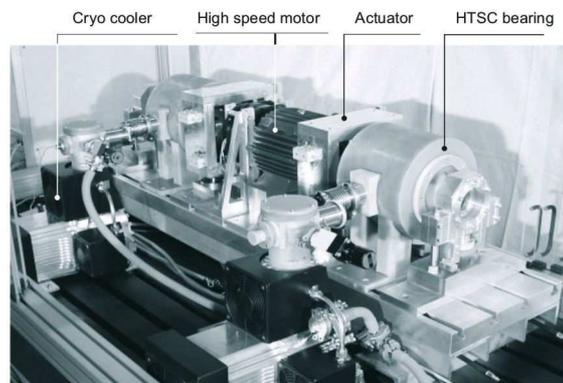


Bild 6: Aufbau des Prüfstandes

Im Zuge eines Forschungsprojekts wurden im ersten Entwicklungszeitraum supraleitende Magnetlager für hochohmige Maschinen entworfen und in einem Prüfstand hinsichtlich der Trag- und Führeigenschaften untersucht (**Bild 6**).

3 MODELL ZUR BERECHNUNG DER 3D FELD-SUPRALEITER WECHSELWIRKUNG

Da bezüglich der berechneten Kräfte zwischen idealen 2D-Systemen und realen Messungen größere Unterschiede festzustellen waren, mussten die 2D-Modelle zu 3D-Berechnungsmodellen erweitert werden. Wie aus **Bild 7** zu entnehmen ist, sind die Permanentmagnete und die Supraleiter eines realen technischen Lagersystems aus einzelnen Elementen zusammengesetzt und damit nicht als kontinuierlicher Aufbau vorhanden. Das erweiterte Berechnungsmodell ist jedoch in der Lage, diese Faktoren zu berücksichtigen.

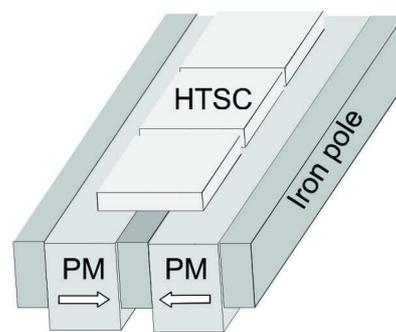


Bild 7: Supraleitendes Lager mit einzelnen HTSL

4 AUFBAU DES LAGERS

Beim Bau eines HTSL-Lagers muss aus Fertigungsgründen auf Anordnungen von einzelnen Supraleiterelementen zurückgegriffen werden. Es wurden einige Anordnungen ähnlich **Bild 8** gebaut, berechnet und vermessen und die Ergebnisse validiert. Wird ein Lager wie in **Bild 9** aufgebaut, mit einem Statorteil bestehend aus einzelnen Supraleiterblöcken in einer Kupferschale angeordnet, so muss man die Abweichung zum Rechenmodell durch die Streuung der Kraftwerte der einzelnen HTSL mit in die Anordnung der Blöcke einbeziehen. Dieses wird berücksichtigt und zusätzlich werden die Supraleiter entsprechend einer homogenen Verteilung der Kräfte angeordnet (**Bild 10**). Zur Berechnung der Anordnung der Supraleiter werden die Einzelmessungen jedes Supraleiterelements verwendet und über den Umfang des Lagers die resultierende Steifigkeit bestimmt.

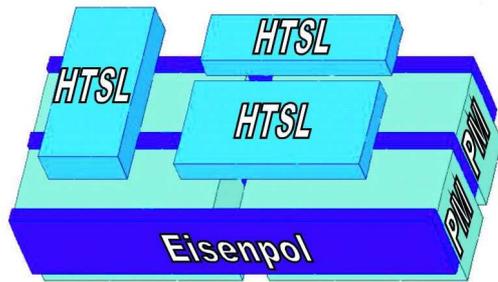


Bild 8: HTSL-Traganordnung, bestehend aus einer permanentmagnetischen Erregung (Sammleraufbau) und mehreren Supraleiter-Formkörpern



Bild 9: Lagerschalen eines supraleitenden Lagers, bestehend aus einzelnen HTSL-Formkörpern und einer Kupfereinfassung, welche innerhalb des Dewar als Kaltkopf dient

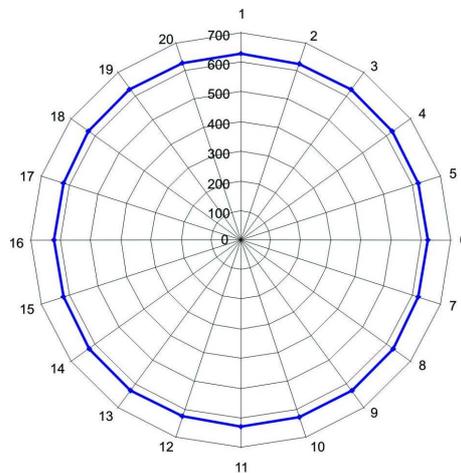


Bild 10: In allen Auslenkungsrichtungen homogene Steifigkeitsverteilung des zylindersymmetrischen HTSL-Lagers von **Bild 9**