

GEOMETRIE VON MASSIVKÖRPERSUPRALEITERN IN ZYLINDRISCHEN MAGNETLAGERN

S.O. Siems

1 EINLEITUNG

Im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben wurden am IMAB Prototypen supraleitender Magnetlager konzipiert und gebaut. Davor wurden umfangreiche Studien und Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, für die eine flexible Prüfstandtechnik zur Verfügung steht (**Bild 1**).

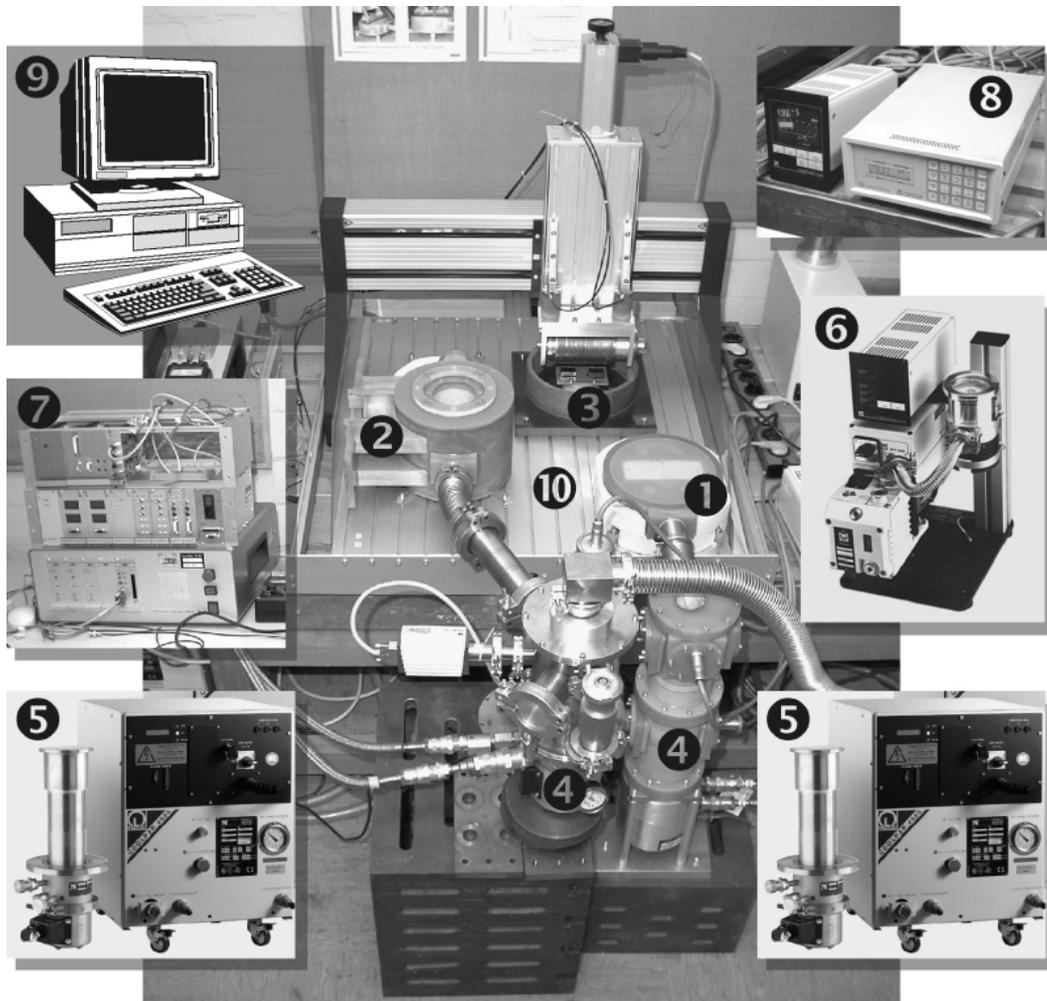


Bild 1: 3-Koordinatenmesstisch mit Schrittmotorantrieb (10), Versuchslager (1, 2, 3), Kaltfinder (4) und Kompressoren (5) der Kältemaschinen, Vakuumpumpe (6), Messverstärker (7), Temperaturmesstechnik (8), Auswerte- und Steuerrechner (9)

Viele grundlegende Eigenschaften supraleitender Magnetlager wurden an einem linearen Versuchslager (Pos. 1 in **Bild 1**) bzw. an einzelnen mit flüssigem Stickstoff gekühlten Proben und einem neu definierten Standarderregersystem ermittelt. Dieses System wird von drei

deutschen Herstellern von Hochtemperatursupraleitern (HTSL) als Werkzeug zur Charakterisierung von Standardformkörpern ($40 \times 40 \times 10 \text{ mm}^3$) eingesetzt.

Ergänzend wurde auf Basis dieses Erregersystems und der Auswertung von Simulationsergebnissen ein parametrisches Lagermodell entwickelt, das nach Vorgabe des magnetischen Luftspalts zur Vorauslegung von Magnetlagern mit HTSL herangezogen werden kann [1].

Bei zylindrischen Lagergeometrien ergibt sich eine zusätzliche Problemstellung durch die gekrümmte Oberfläche der Supraleiteranordnung (**Bild 2**). Zylindrische Supraleiteranordnungen können auf unterschiedliche Weise erzeugt werden, was im Folgenden beschrieben werden soll.



Bild 2: Stator eines zylindrischen HTSL-Magnetlagers
(Kupferkaltkopf mit eingeklebten HTSL-Ringen)

2 SUPRALEITERHERSTELLUNG

HTSL für zylindrische Lager lassen sich grundsätzlich auf drei verschiedene Arten herstellen. Der erste Ansatz besteht darin, polykristalline Formteile herzustellen, die geometrisch der gewünschten Endform schon sehr nahe kommen. Für dieses Verfahren eignet sich in erster Linie Material auf Wismutbasis (BSCCO). Versuche mit Seltenen Erden (Re-BCO) führten nicht zu HTSL-Formteilen mit für Lager geeigneten Eigenschaften, da bei polykristallinen HTSL die Ausrichtung der a - b -Ebenen nicht entscheidend beeinflusst werden kann. Für Lageranwendungen sollten diese Ebenen jedoch möglichst Tangenten an den Lagerumfang bilden.

Für die Lagerung eines Flüssigwasserstofftanks wurden HTSL-Ringe entwickelt, die aus mehreren einkristallinen Kristallen bestehen. Diese werden durch mehrfaches Keimsetzen in einem Texturierungsprozess aus einem bereits ringförmigen Sinterkörper hergestellt [2]. Nach einer mechanischen Bearbeitung erhält man Ringe wie in **Bild 3** exemplarisch abgebildet.

Diese Ringe wurden in einem Messaufbau (**Bild 4**) mit einem Permanentmagneten (PM) nach dem Einkühlen mit LN_2 abgetastet und deren Kraft aufgezeichnet. Das in **Bild 4** dargestellte Ergebnis einer Messung zeigt deutlich, dass die Domänen trotz parallelen Wachstums und mechanischer Verbindung keine supraleitenden Verbindungen haben: Die abstoßende Kraft bricht an den Übergängen zwischen den Domänen stark ein. Dass die Kraft nicht auf null zurückgeht, ist bedingt durch die endliche Breite des Magneten.



Bild 3: Mehrdomäniger HTSL-Ring aus YBCO

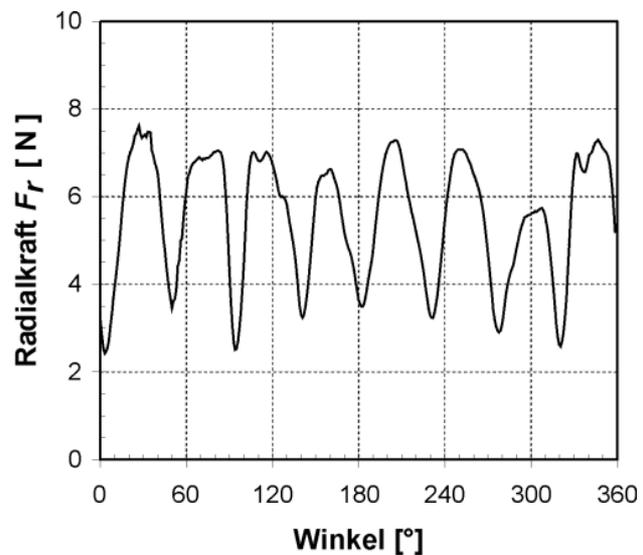
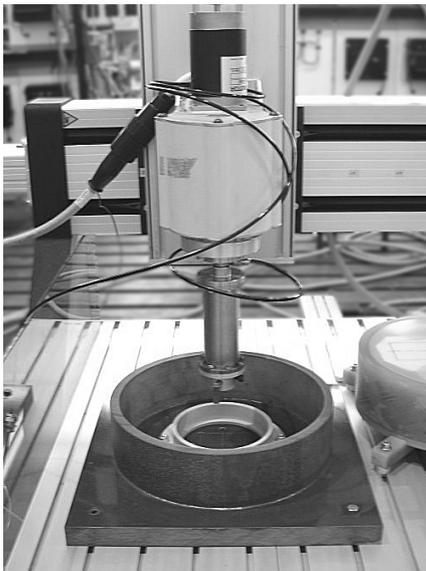


Bild 4: Prüfstand zur Vermessung mehrdomäniger HTSL-Ringe und exemplarisches Messergebnis

Die dritte Option zur Herstellung zylindrischer Anordnungen besteht darin, die Endform aus einzelnen Formkörpern, die bereits texturiert sind, zusammensetzen und ggf. nachzubearbeiten. Das hat den Vorteil, dass die mittlerweile in Stückzahlen – Batchgrößen von 16 bis 64 Stück – herstellbaren Standardformkörper mit hoher Qualität Verwendung finden können. Allerdings muss, wie auch bei der Bearbeitung der mehrdomänigen Ringe, beachtet werden, dass bei der konkaven Ausarbeitung der dem Luftspalt zugewandten Oberfläche die a - b -Ebenen durchtrennt werden.

3 EINFLUSS DER GEOMETRIE

Die Geometrie der Formkörper bzw. eine von der Standardform abweichende Geometrie – insbesondere der Oberfläche senkrecht zur c -Achse – spielt bei zylindrischen Lagern mit kleinen Radien eine wichtige Rolle. Um den Luftspalt möglichst klein halten zu können, ist eine Anpassung der Supraleiteranordnung an die zylindrische Form des Erregersystems notwendig. Dazu müssen die Formkörper konkav ausgearbeitet werden, wobei der

Materialabtrag um so größer ist, je großflächiger die Formkörper sind. Da bei diesem Bearbeitungsschritt die den Strom tragenden a - b -Ebenen vielfach durchtrennt werden, kommt es zu einer stark veränderten Stromverteilung unter dem Einfluss des Erregerfeldes.

Weil eine einfache Abschätzung des Einflusses dieser Formgebung nicht möglich ist, wurden Versuche mit einem einfachen Messaufbau (**Bild 5**) durchgeführt, die eine grundlegende Aussage zu dieser Fragestellung liefern konnten.

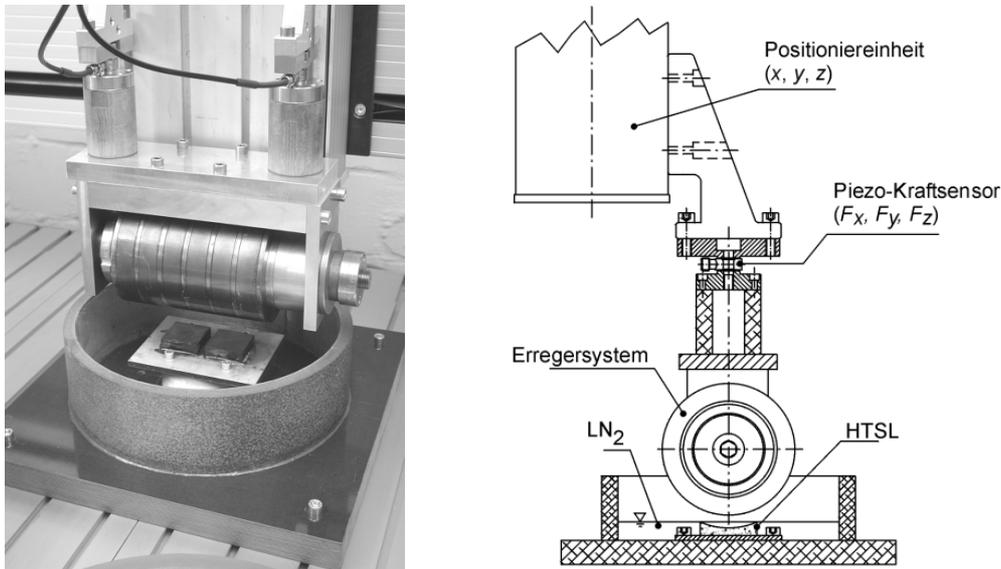


Bild 5: Aufbau zur Untersuchung des Formeinflusses

Gegenstand der Untersuchung waren das zylindrische Erregersystem, das für einen LH₂-Tank entworfen wurde [2], sowie jeweils zwei YBCO-Proben mit quadratischer (**Bild 6a** und **b**) und zwei Proben mit rechteckiger Fläche (**Bild 6c** und **d**), wobei für diese Geometrie zum einen schmale Proben texturiert wurden und zum anderen eine quadratische Probe halbiert wurde (**Bild 6e**).

Die Messungen wurden bei $T = 77$ K im Stickstoffbad nach einer Aktivierung bei einem Luftspalt von $\delta_c = 2$ mm durchgeführt. Gemessen wurde die Kraft für eine Auslenkung $\Delta_z = 0,25$ mm in 0,05 mm-Schritten. Dieser Vorgang wurde für die Proben jeweils in unbearbeiteter und bearbeiteter Form durchgeführt.

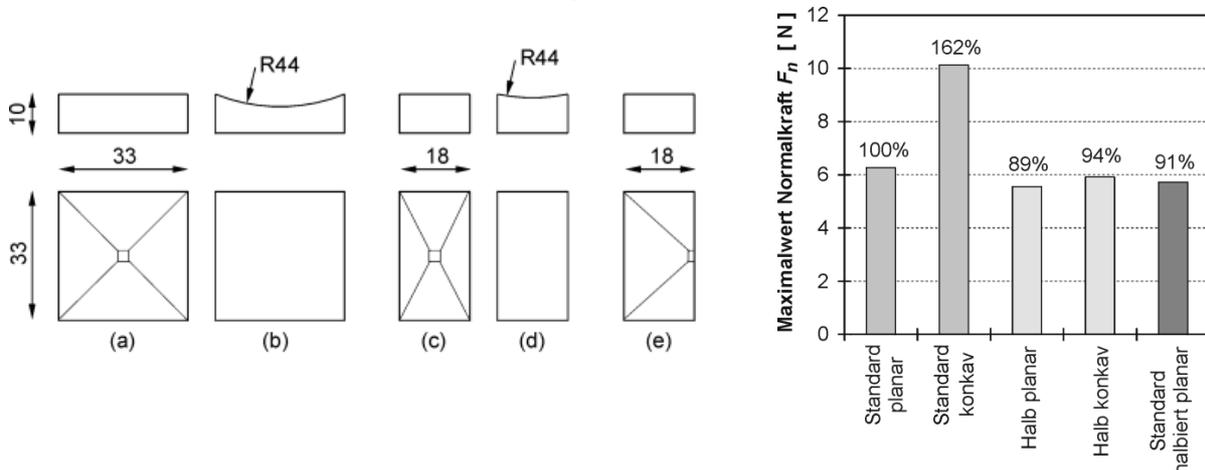


Bild 6: Geometrie der untersuchten Formkörper und Messergebnisse

Wie die in **Bild 6** dargestellten Messdaten zeigen, kommt der Formgebung der Supraleiter eine entscheidende Bedeutung zu. Setzt man die mit den unbearbeiteten Standardproben erreichte Kraft zu 100 %, wird durch die Anpassung an das Erregersystem eine Steigerung von über 60 % erreicht. Es wird aber auch deutlich, dass eine auf die Geometrie abgestimmte Breite der Formkörper zu einer Steigerung der Tragkraft führt, da bei halber Breite und bearbeiteter Oberfläche bereits 54 % der Tragkraft der bearbeiteten Standardprobe erreicht werden. Ein Vergleich der einzeln texturierten Probe und der halbierten Standardprobe zeigt, dass sich der doppelte Aufwand beim Texturieren halber Proben nicht auszahlt und sogar leicht höhere Werte für die halbierte Probe erreicht werden. Dies ist auf etwas ungünstigere Gefügestrukturen direkt unterhalb der Keimstelle zurückzuführen, die bei zerteilten Proben dann am Rand liegt und beim Sägen zum Teil entfernt wird.

Der geringe Unterschied beim Vergleich der Tragkräfte der unbearbeiteten und der bearbeiteten schmalen Elemente lässt darauf schließen, dass ab einem bestimmten Durchmesser, der hier schon fast erreicht ist, auf eine Formanpassung ganz verzichtet werden kann. Für Lager größeren Durchmessers und breitere Formkörper gilt dies entsprechend.

Die Formgebung senkrecht zur a - b -Ebene, also die Bearbeitung der Seitenflächen, z. B. für die kreisförmige Anordnung in einem planaren Lager für rotierende Anwendungen, hat einen wesentlich geringeren Einfluss auf die Eigenschaften des Lagers.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Mit den beschriebenen Versuchen konnten Einflüsse der Geometrie der HTSL-Formkörper in zylindrischen Lagern auf die erreichbaren Tragkräfte gezeigt werden. Es muss nun mit Hilfe von erweiterten Versuchen die tatsächliche Größe des Einflusses näher untersucht werden. Es ist auch geplant, das Feld im Luftspalt nach der Aktivierung mittels einer Hall-Sonde abzutasten, um so die reale Feldverteilung im Luftspalt sichtbar machen und damit einen Einblick in die Größe und Lage der Stromschleifen gewinnen zu können.

LITERATUR

- [1] S.O. Siems, *Konstruktion supraleitender Magnetlager*, Dissertation Technische Universität Braunschweig, 2003
- [2] H.Walter, S. Arzac, J. Bock, S.O. Siems, W.-R. Canders, A. Leenders, H.C. Freyhardt, H. Fieseler, M. Kesten, *Liquid hydrogen tank with cylindrical superconducting bearing for automotive application*, Applied Superconductivity 2002, Publ. IEEE Trans. On Appl. Superconductivity, 3. Vol. June 2003