

**Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft,  
Forschung und Technologie**

**Abschlußbericht**

**Förderkennzeichen: 13 N 6853 / 2**

*Hochtemperatursupraleitung*

**Thema:** *Supraleitende Magnetlager für elektrische Motoren*

von

*Dr. G. Fuchs*

*Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden*

**Projektleiter:** *Dr. G. Fuchs*

Juni 2000

# **Gliederung**

- 1. Einführung**
- 2. Grundlagen und Einsatzgebiete supraleitender Magnetlager**
- 3. Bauformen supraleitender Magnetlager**
  - 3.1 Axiale und radiale Magnetlager
  - 3.2 Magnetlager für supraleitende Motoren
- 4. Experimentelle Grundlagen und Untersuchungsmethoden**
  - 4.1 YBCO-Proben und ihre Charakterisierung
  - 4.2 Charakterisierung von YBCO-Bauteilen für Magnetlager
    - 4.2.1 YBCO-Ringe
    - 4.2.2 YBCO-Hohlzylinder
  - 4.4 Bestimmung statischer Lagerparameter von Magnetlagern
- 5. Untersuchung der Lagerparameter für einen supraleitenden „Disk“- Motor**
- 6. Radiale Magnetlager für supraleitende Motoren**
  - 6.1 Untersuchte Konfigurationen und erreichte Lagerparameter
  - 6.2 Supraleitendes Lager für einen Reluktanzmotor
  - 6.3 Möglichkeiten zur Verbesserung der Steifigkeit
- 7. Ausblick auf supraleitende Magnetlager mit extremen Parametern**
  - 7.1 Verbesserte Magnetlager durch Verwendung supraleitender Permanentmagnete
  - 7.2 Ergebnisse zum Aufmagnetisieren von YBCO-Proben im Impulsfeld
- 8. Literaturzitate und eigene Arbeiten**
- 9. Erfolgskontrollbericht**
- 10. Zusammenfassung**

## 1. Einführung

Ziel des Vorhabens „Supraleitende Magnetlager für elektrische Maschinen“ war es, Magnetlager auf der Basis von massiven schmelztexturierten YBCO-Proben und von Permanentmagneten für den Einsatz in supraleitenden elektrischen Maschinen bei 77 K zu entwickeln. Dabei wurden Konfigurationen mit möglichst hohen Levitationskräften und Steifigkeiten angestrebt, um die unter den spezifischen Einsatzbedingungen in supraleitenden Motoren auftretenden Kräfte zu beherrschen. Das Vorhaben war Bestandteil des Verbundprojektes "Elektrische Maschinen mit HTSL-Massivmaterial für Ausgangsleistungen in kW-Bereich", das von mehreren deutschen und russischen Forschungseinrichtungen bearbeitet wurde.

Das Vorhaben schloß sich an Arbeiten zu supraleitenden magnetischen Lagern im Rahmen des 1995 abgeschlossenen Vorhabens "Einsatz von HTSL in Spulen und Lagern" (13N6102) an. Dabei wurde in Zusammenarbeit mit dem IPHT Jena ein supraleitend gelagerter konventioneller Motor aufgebaut und getestet.

Die Aufgaben wurden in enger Kooperation mit den Verbundpartnern durchgeführt. Darüber hinaus wurde in die Arbeiten auch die Gruppe von Prof. Krabbes aus dem IFW Dresden einbezogen, durch die die für die supraleitenden Lager benötigten schmelztexturierten YBCO-Proben zur Verfügung gestellt wurden. Die Technologie zur Probenherstellung wurde im Rahmen des 1998 abgeschlossenen Verbundprojekts "Texturierte HTSL-Massivmaterialien - Synthese und Charakterisierung" (13N6662) entwickelt.

An den im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Untersuchungen waren Dr. Günter Fuchs, Herr Stefan Gruß (als Doktorand), Dr. Peter Verges und Dr. Christian Frenzel von der Themengruppe "Supraleitung" in der Abteilung "Supraleitung und Magnetismus" des IFW Dresden beteiligt.

## 2. Grundlagen und Einsatzgebiete supraleitender Magnetlager

Supraleitende Magnetlager sind aus Supraleitern und Permanentmagneten aufgebaut. Der Effekt des über einem Supraleiter schwebenden Permanentmagneten beruht entweder auf dem Meißnerzustand, d.h. der Feldverdrängung im supraleitenden Zustand bei äußeren Magnetfeldern unterhalb des unteren kritischen Feldes  $H_{c1}$  oder auf der Verankerung des Magnetfeldes im Supraleiter an Pinningzentren, wenn bei äußeren Feldern  $H > H_{c1}$  Flußschläuche in den Supraleiter eingedrungen sind. Für praktische Anwendungen kommt nur die zweite Variante in Betracht, da hierbei der Permanentmagnet nicht nur eine Levitationskraft sondern außerdem auch Rückstellkräfte erfährt, so daß sich eine im Raum stabile Position einstellt.

Je nach der Symmetrie der von den Permanentmagneten ausgehenden Feldverteilung lassen sich dabei auch Freiheitsgrade für (fast) reibungsfreie Bewegungen erzeugen. Bei konstantem Feld längs einer Schiene aus Permanentmagneten und einer Feldverteilung quer zur Schiene kann auf diese Weise eine geführte Bewegung längs des Schienenwegs realisiert werden. Für eine durch Permanentmagnete erzeugte rotationssymmetrische Feldverteilung ist der Freiheitsgrad die Rotation um die eigene Achse und die Anwendung hierfür sind Magnetlager für elektrische Maschinen - im vorliegenden Falle Motoren.

Bezüglich der für rotierende Magnetlager wichtigen radialen Steifigkeit haben supraleitende Magnetlager auf der Basis von YBCO gegenüber konventionellen Magnetlagern derzeit noch Nachteile. Andererseits besteht der große Vorteil supraleitender Magnetlager gegenüber konventionellen Magnetlagern darin, daß sich die Lage des über dem Supraleiter schwebenden Permanentmagneten infolge der Verankerung des Magnetflusses des Permanentmagneten an den Pinningzentren des Supraleiters selbst stabilisiert. Es handelt sich somit um passive Lager, während konventionelle Magnetlager bekanntlich nur mit Hilfe einer aufwendigen Regelung stabilisiert werden können.

Entsprechend des Earnshaw-Theorems [1] ist eine passive Lagerung zwischen Permanentmagneten prinzipiell nicht möglich. Das ist eine unmittelbare Folge der Kraft-Abstands-Relation  $F \sim 1/r^2$  zwischen zwei Permanentmagneten, die auf ein sattelförmiges Potential führt. Somit gibt es für konventionelle Magnetlager kein eigenstabiles Gleichgewicht und die Lage des schwebenden Permanentmagneten muß durch eine aktive Regelung stabilisiert werden.

Wegen der für supraleitende Magnetlager notwendigen Kühlung ist ihr Einsatz vorwiegend im Bereich kryogener Temperaturen zu erwarten. Die bei einer Einsatztemperatur von 77 K mit schmelztexturierten YBCO-Proben gegenwärtig realisierbaren Lagerparameter lassen attraktive Anwendungen supraleitender Magnetlager in Schwungrädern für die Energiespeicherung und in Motoren zu. Für beide Anwendungsfälle wurden bereits Demonstratoren realisiert [2-9]. Bisher realisierte Schwungräder mit supraleitenden Magnetlagern haben gespeicherte Energien in der Größenordnung von 1 kWh [2]. Als nächster Schritt werden gespeicherte Energien von 10 kWh anvisiert.

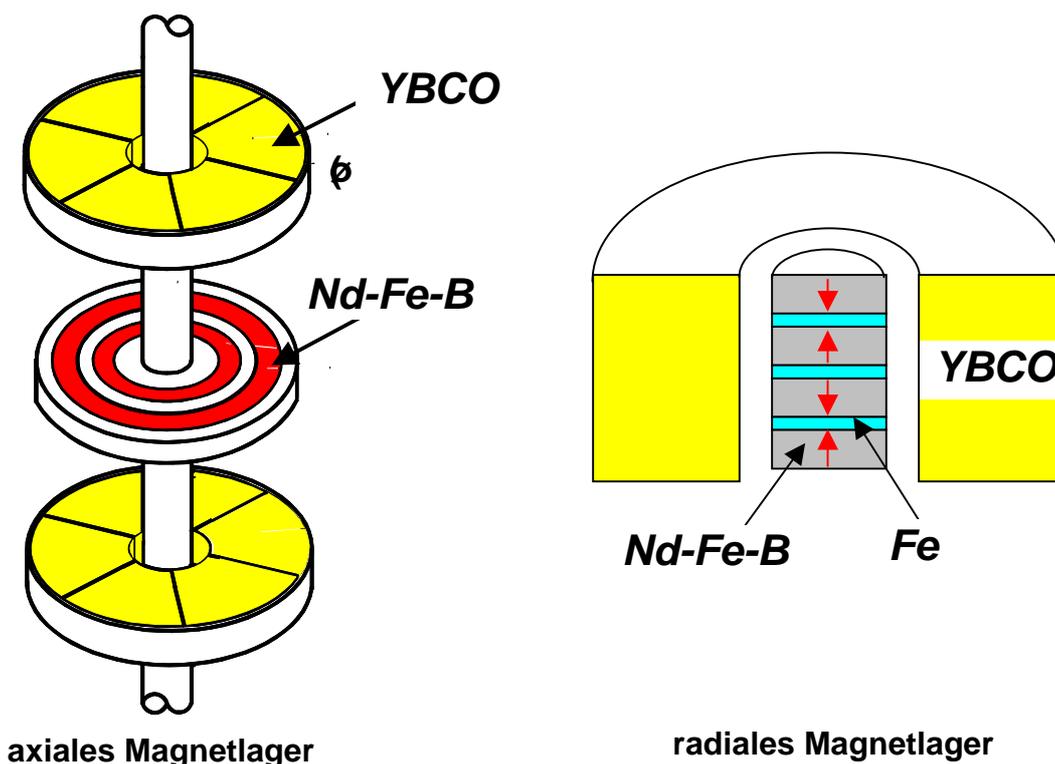
Als Beispiel für supraleitende Magnetlager für Motoren sei ein in Japan aufgebauter Demonstrator genannt, in dem eine Drehzahl von 30 000 U/min erreicht wurde [3]. In diese Richtung gingen auch die im Rahmen des Vorhabens "Einsatz von HTSL in Spulen und Lagern" durchgeführten Arbeiten. Dabei wurden zwei Demonstratoren für supraleitend gelagerte Motoren aufgebaut [4-9]. Supraleitend gelagerte Motoren könnten vor allem in Pumpen für tiefsiedende Flüssigkeiten zum Einsatz kommen, wobei insbesondere durch den zu erwartenden Einsatz von Wasserstoff als Energieträger ein Bedarf an Pumpen für flüssigen Wasserstoff entsteht.

### **3. Bauformen supraleitender Magnetlager**

#### *3.1. Axiale und radiale Magnetlager*

In Abb. 1 sind zwei Beispiele supraleitender Magnetlager gezeigt. Das im linken Bild dargestellte Lager wurde in Zusammenarbeit mit dem IPHT Jena aufgebaut, in dem die YBCO-Ringe hergestellt wurden. Unter Verwendung solcher Lager wurde im IFW Dresden ein supraleitend gelagerter Motor aufgebaut, der erfolgreich im Bereich von Drehzahlen bis zu 42 000 U/min getestet wurde [9]. Es handelt sich bei diesem Lager der Bauform nach um ein axiales Lager, während im rechten Bild ein radiales supraleitendes Magnetlager dargestellt ist.

Die Terminologie „axial“ und „radial“ bringt zum Ausdruck, daß in einem Fall eine axiale Bewegung für die Variation des Abstands zwischen Supraleiter und Permanentmagnet erforderlich ist, im anderen Fall dagegen eine radiale Bewegung. Allerdings ist diese



**Abb. 1** Vergleich der beiden Lagertypen. *Links:* axiales Magnetlager aus einem segmentierten YBCO-Ring ( $\varnothing$  7cm) und zwei konzentrischen NdFeB-Ringmagneten, *Rechts:* radiales Magnetlager, bestehend aus YBCO-Hohlzylindern und einer Stapelfolge von NdFeB-Magneten und Fe-Scheiben in der Bohrung des Hohlzylinders

Bezeichnung insofern etwas irreführend, als sie nicht, wie man auf den ersten Blick erwarten könnte, gleichzeitig auch das Verhältnis zwischen axialer und radialer Steifigkeit kennzeichnet. Diese Erwartung bestätigt sich nämlich nur im Fall des axialen Lagers, das eine höhere Steifigkeit in axialer als in radialer Richtung aufweist. Das gleiche gilt aber auch für die im rechten Bild von Abb. 1 gezeigten radialen Lager, zumindest für die von uns bisher untersuchten Ausführungsformen, auf die in Kapitel 6 näher eingegangen wird.

Der große Vorteil, den radiale Lager im Vergleich mit axialen haben, besteht darin, daß praktisch der gesamte magnetische Fluß der Permanentmagnete im Supraleiter aufgefangen werden kann, was bei der planaren Anordnung des axialen Lagers nicht gelingt. Die erforderliche inhomogene Feldverteilung im Supraleiter wird bei dem in Abb. 1 dargestellten Axiallager durch die umgekehrte Polarität benachbarter Permanentmagnete in der Bohrung des supraleitenden Hohlzylinders erzeugt. Die Eisenscheiben zwischen den Permanentmagneten konzentrieren den magnetischen Fluß auf den Spalt zwischen den Permanentmagneten. Auf diese Weise können sehr hohe Feldgradienten im Supraleiter erzeugt werden, die zu deutlich höheren Steifigkeiten führen, als sie in axialen Lagern zu realisieren sind.

### 3.2. Magnetlager für supraleitende Motoren

Für supraleitende Motoren müssen Konfigurationen mit möglichst hohen Levitationskräften und Steifigkeiten angestrebt werden, um die erheblichen Kräfte zu beherrschen, die auf Grund der relativ geringen Polteilung bei den gegenwärtigen supraleitenden Motoren unvermeidlich sind. Ein zusätzliches Argument für die Verwendung radialer Magnetlager in supraleitenden Motoren ist der sehr kompakte Aufbau, der bei diesem Lagertyp möglich ist. Dagegen führt der Versuch, die Lagerparameter eines axialen Lagers zu verbessern, unvermeidlich zu großen planaren Flächen und damit zu großflächigen Anordnungen, die in supraleitende Motoren wegen des erforderlichen Platzbedarfs nicht leicht zu integrieren wären und zudem die zu kühlende Masse deutlich vergrößern würde.

## **4. Experimentelle Grundlagen und Untersuchungsmethoden**

### *4.1 YBCO-Proben und ihre Charakterisierung*

Ausgangspunkt zur Herstellung supraleitender Magnetlager waren massive YBCO-Proben, die im IFW Dresden durch Schmelztexturierung in Form von Zylindern mit typischen Durchmessern von 25 mm, 35 mm und 50 mm hergestellt werden können [10]. Die Zylinderhöhe ist dabei jeweils etwa 12-15 mm. Die mit einem Durchmesser von 50 mm größten Proben erreichen allerdings sowohl in ihren Eigenschaften als auch bezüglich ihrer Homogenität noch nicht die Qualität der kleineren Proben, so daß sie bisher noch nicht in supraleitenden Magnetlagern eingesetzt wurden. Damit standen für die vorliegenden Untersuchungen Proben mit Durchmessern bis zu 35 mm zur Verfügung.

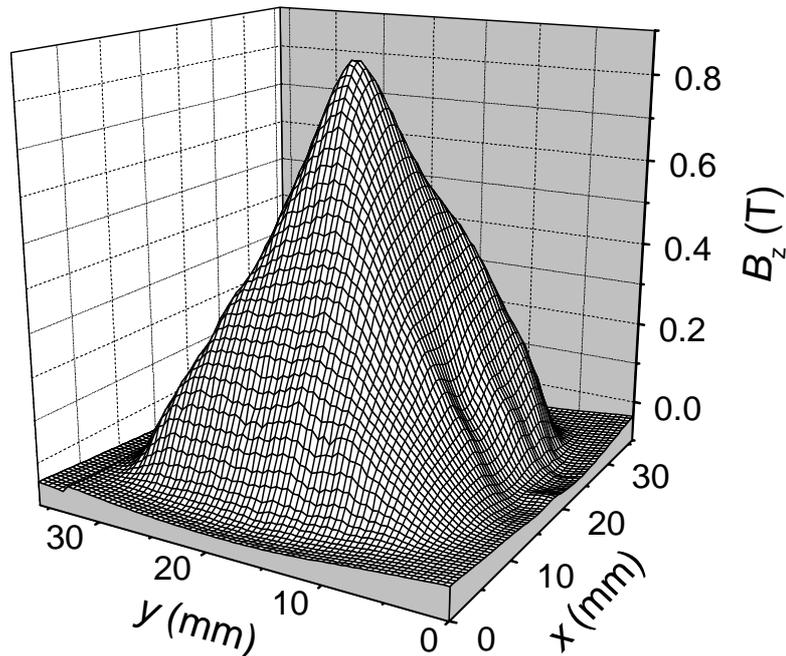
Hohe Tragekräfte und Steifigkeiten von in supraleitenden Magnetlagern eingesetzten schmelztexturierten YBCO-Proben erfordern hohe kritische Stromdichten und möglichst große Körner innerhalb der Proben. Zur Charakterisierung der YBCO-Proben wurde deshalb neben der Tragekraft auch die Kornstruktur und das eingefrorene Feld bestimmt, das ein Maß für das Produkt aus kritischer Stromdichte und Korngröße ist. Auf diese Weise konnten die relativ großen in Magnetlagern zum Einsatz kommenden Proben zerstörungsfrei untersucht werden.

Die Charakterisierung der YBCO-Proben erfolgte in einer PC-gesteuerten dreidimensionalen Bewegungseinrichtung, die Schrittweiten von 2,5  $\mu\text{m}$  in x- und y-Richtung und von 1  $\mu\text{m}$  in z-Richtung über eine Weglänge von 105 mm (x- und y-Richtung) bzw. von 50 mm (z-Richtung) ermöglicht.

Zur Untersuchung eingefrorener Felder wurden die Proben bei 77 K in einem supraleitenden Magneten mit einer großen Raumtemperaturbohrung aufmagnetisiert. Anschließend wurde der Behälter mit der aufmagnetisierten Probe aus dem Magneten herausgezogen und das Magnetfeld in einem Abstand von 1 mm über der Probe in der erwähnten Bewegungseinrichtung mit Hilfe einer Hallsonde abgerastert. Abb. 2 zeigt ein typisches Feldprofil einer Probe von 35 mm Durchmesser.

Durch Feldprofilmessungen bei 77 K wurde nachgewiesen, daß die YBCO-Proben bis zu Durchmessern von 35 mm keine die supraleitenden Dauerströme behindernden Korngrenzen enthalten. Die maximalen eingefrorenen Felder  $B_0$  im Probenzentrum liegen bei 77 K für Proben mit 25 mm Durchmesser bei 1,0 T, während  $B_0$  für die Proben mit 35 mm Durchmesser bis auf 1.1 T erhöht werden konnte [11].

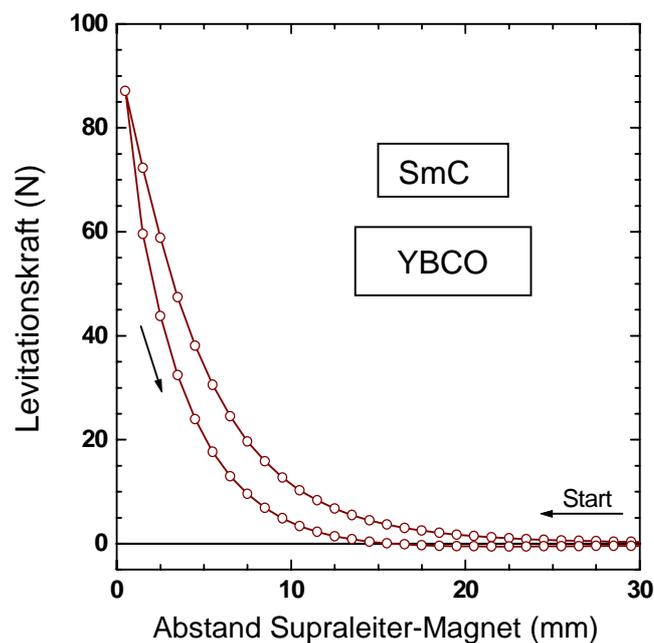
Die Bestimmung der Levitationskraft erfolgt in der gleichen Bewegungseinrichtung mit Hilfe eines Sm-Co-Standardmagneten ( $\varnothing$  25 mm) und einem Kraftsensor anstelle des Hallsonde. Die



**Abb. 2** Feldprofil einer YBCO-Probe ( $\varnothing$  35 mm) bei 77 K

YBCO-Probe wurde bei großem Abstand des Magneten von der Probe mit Hilfe von flüssigem Stickstoff abgekühlt. Die Achse des Magneten wurde mit der der YBCO-Probe zur Deckung gebracht und anschließend die Kraft als Funktion des Abstands zwischen Supraleiter und Magneten bestimmt.

In Abb. 3 ist die Tragekraft einer YBCO-Probe in Abhängigkeit vom abnehmenden und zunehmenden Abstand gezeigt. Dabei wird eine Hysteresekurve durchlaufen, die dadurch



**Abb. 3** Tragekraft einer YBCO-Probe ( $\varnothing$  35 mm) als Funktion des Abstands von einem SmCo - Magneten ( $\varnothing$  25 mm) bei 77 K

zustandekommt, daß die zunächst feldfreie Supraleiterprobe bei kleinerem Abstand eine abstoßende Kraft auf den Magneten ausübt. Bei sehr kleinem Abstand wird diese Kraft maximal, wobei nun auch Magnetfelder in den Supraleiter eindringen. Deshalb liegt die Kurve für zunehmendem Abstand deutlich unterhalb unter der für abnehmenden Abstand. Die Levitationskraft von YBCO-Proben ( $\varnothing$  35 mm) konnte im Berichtszeitraum bei kleinem Abstand zwischen Supraleiter und Magneten bis auf 100 N verbessert werden [11], was einem Lagerdruck von  $20 \text{ N/cm}^2$  entspricht.

Der maximale Grenzwert für den Lagerdruck bei vorgegebenen Permanentmagneten würde sich für einen unendlich ausgedehnten Supraleiter mit unendlich großer kritischer Stromdichte ergeben. Dieser ideale Diamagnet würde Felder perfekt abschirmen. Die dabei ausgeübte Kraft entspricht der Kraft  $F_{\max}$  zwischen dem Magneten und einem an der Supraleiterebene gespiegelten identischen Magneten. Dabei ergibt sich für den maximal möglichen Lagerdruck

$$F_{\max}/A = 2 B_s^2/\mu_0 = 25 \text{ N/cm}^2 \quad (1),$$

wobei  $A$  der Stirnfläche des Magneten und  $B_s = 0,4 \text{ T}$  dem Magnetfeld an der Stirnfläche entspricht. Der experimentelle Wert von  $20 \text{ N/cm}^2$  entspricht somit 75 % des überhaupt möglichen Werte. Das obere Limit ist insofern überschätzt, als der Supraleiter als unendlich ausgedehnt angenommen wurde. Würde man die Geometrie des Supraleiters beibehalten und nur die Annahme einer unendlich hohen kritischen Stromdichte aufrechterhalten, dann würde der Grenzwert niedriger ausfallen und der experimentell ermittelte Wert demzufolge noch näher am oberen Limit liegen.

Diese Abschätzung verdeutlicht daß die Möglichkeiten einer Erhöhung der Levitationskraft seitens des Supraleiters bereits weitgehend ausgeschöpft sind. Verbesserungen der Parameter supraleitender Magnetlager können demzufolge nur durch eine geeignete Formgebung der YBCO-Proben erreicht werden, die in Verbindung mit geeignet angeordneten Permanentmagneten im Supraleiter die für hohe Levitationskräfte und Steifigkeiten optimale Magnetfeldverteilung erzeugt.

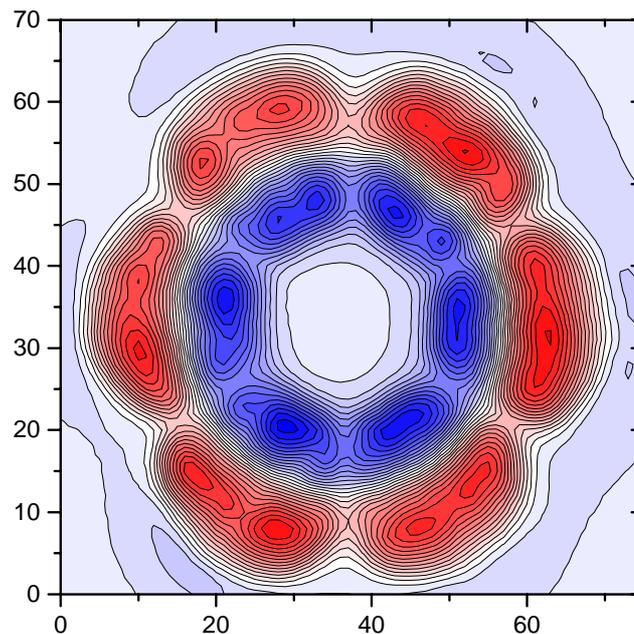
## 4.2. Charakterisierung von YBCO-Bauteilen für Magnetlager

### 4.2.1. YBCO-Ringe

Die einfachste Möglichkeit, bei vorgegebenen Materialparametern von Supraleiter und Permanentmagnet hohe Levitationskräfte zu erzielen, besteht nach Gl. (1) in einer Vergrößerung der Fläche  $A$  von Magnet und Supraleiter. Eine in rotierenden Systemen wie Motoren bevorzugte Geometrie stellen ringförmige Bauteile dar. YBCO-Ringe mit Durchmessern größer als 50 mm können gegenwärtig nur aus einzelnen Segmenten zusammengesetzt werden. Für den Einsatz in supraleitenden Magnetlagern ist das ein akzeptabler Kompromiß, da sich die Kraftwirkungen zwischen den relativ großen YBCO-Segmenten und den Permanentmagneten addieren.

Auf die segmentierten YBCO-Ringe von 7 cm Durchmesser der supraleitenden Magnetlager, die in einem konventionellen Motor eine stabile Rotation bis zu hohen Drehzahlen ermöglichten [9], wurde bereits ausführlich eingegangen.

Abb. 4 zeigt ein bei 77 K aufgenommenes Feldprofil eines YBCO-Ringes von 7 cm Durchmesser, der aus 6 YBCO-Proben ( $\varnothing$  25 mm) aus dem IFW Dresden zusammengesetzt wurde. Zum Aufmagnetisieren wurden zwei konzentrische NeFeB-Permanentmagnete verwendet, wie sie auch im axialen Magnetlager in Abb. 1 eingesetzt wurden. Die entgegengesetzte Polarisierung dieser beiden Permanentmagnete führt im Feldprofil zu zwei ringförmigen supraleitenden Domänen in jeder der sechs YBCO-Proben.



**Abb. 4** Feldprofil eines aus sechs YBCO-Proben zusammengefügt YBCO-Ringes ( $\varnothing$  7cm)

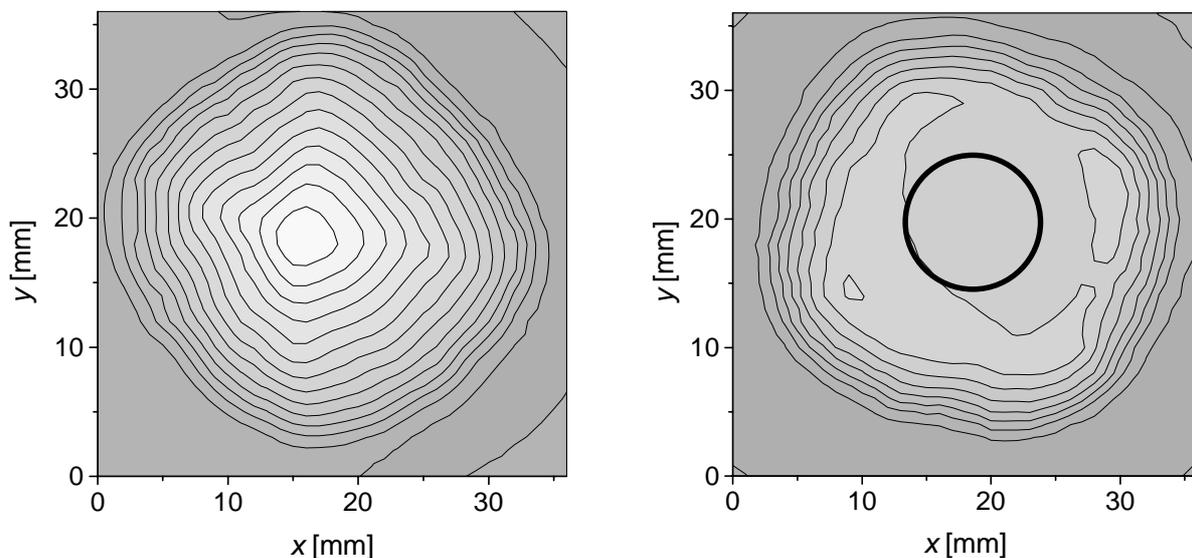
Entsprechend der unterschiedlichen Polarität der beiden Magnete haben die eingefrorenen Felder im äußeren und inneren Bereich des YBCO-Rings das entgegengesetzte Vorzeichen. Auf diese Weise wird ein relativ großer Feldgradient erzeugt, der wichtig insbesondere für die radiale Steifigkeit ist. Die Lagerparameter dieses Ringes wurden nach Abkühlung im Nullfeld mit den gleichen Ringmagneten bestimmt, die für die Feldprofilmessung verwendet wurden. Bei kleinem Abstand ergab sich dabei für die Levitationskraft ein Wert von 80 N, während für die radiale Steifigkeit 20 N/mm ermittelt wurde. Im Vergleich mit den früher hergestellten YBCO-Proben, die im axialen Lager (siehe Abb. 1 links) für einen Motor eingesetzt wurden [4 - 9], entspricht das etwa einer Verdopplung der Levitationskraft und der radialen Steifigkeit. Diese Verbesserung der Lagerparameter spiegelt die Fortschritte der Materialentwicklung wider, die zu einer Erhöhung der Levitationskraft der Einzelproben ( $\varnothing$  25 mm) von 20 N auf 50 N führte.

#### 4.2.2. YBCO-Hohlzylinder

Für radiale supraleitende Magnetlager können vorteilhaft YBCO-Hohlzylinder eingesetzt werden, die aus massiven YBCO-Zylindern ausgestochen wurden Erste Versuche zum

Ausstechen von Bohrkernen aus YBCO-Proben mittels einer Ultraschallbohrmaschine zeigten, daß ursprünglich eindomänige Proben danach in zwei supraleitende Domänen zerfallen. Zwei Ursachen kommen dafür in Betracht: (1) zum einen wurde beobachtet, daß durch das Ausstechen des Bohrkerns Risse im Material erzeugt werden können, durch die die Ausbildung von Ringströmen beeinträchtigt wird, (2) zum anderen zeigte sich, daß das Ausbohren eines Bohrkerns lokale Einschnürungen der supraleitenden Domäne zur Folge haben kann, die durch Asymmetrien der Feldverteilung der Ausgangsprobe hervorgerufen werden.

Im Verlauf der Arbeiten wurden auch eindomänige Hohlzylinder hergestellt. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 5 gezeigt.



**Abb. 5** Feldprofil vor (linkes Bild) und nach dem Ausbohren (rechtes Bild) einer YBCO-Probe. Der schwarze Kreis stellt die Bohrung dar. Der Hohlzylinder ist praktisch eindomänig, was durch die gute Homogenität der Ausgangsprobe erreicht wurde.

Bei Testexperimenten zum Einsatz derartiger Hohlzylinder in supraleitenden Magnetlager stellte sich heraus, daß deren Eigenschaften nicht entscheidend davon abhängen, ob die Hohlzylinder eindomänig sind. Die Erklärung hierfür ist, daß sich die Eindomänigkeit im wesentlichen auf die Abschirmwirkung von magnetischen Feldern auswirkt. Dagegen wird in supraleitenden Magnetlagern durch Abkühlung im Magnetfeld eine Feldverteilung im Supraleiter erzeugt, die den magnetischen Fluß der Permanentmagnete an die Defektstruktur des Supraleiters ankoppelt. Insofern werden im Supraleiter bei der Wechselwirkung mit den Permanentmagneten auch keine Ringströme um den ganzen Hohlzylinder angeworfen, sondern eher kleinere Ringströme in der Umgebung des gepinnten magnetischen Flusses.

Nicht einfach läßt sich die Frage beantworten, wie die bevorzugte Orientierung der a,b-Ebenen in den YBCO-Proben parallel zur Zylinderachse die Lagerparameter beeinflusst. Da nennenswerte supraleitende Ströme nur in den a,b-Ebenen fließen können, erscheint diese Geometrie auf den ersten Blick ungünstig, wenn radial gerichtete Magnetfelder in die Probe eindringen, wie für radiale Lager der Fall ist (siehe Abb. 1, rechtes Bild). Eine Verankerung der entsprechenden Flußschläuche würde daher eher eine radiale Orientierung der c-Achse

erfordern. Andererseits läßt sich die Feldverteilung im Supraleiter aber durch eine geeignete Anordnung der Permanentmagnete so gestalten, daß auch große Feldkomponenten parallel zur Zylinderachse auftreten. Nur so ist das empirisch gefundene Ergebnis zu erklären, daß die Außendurchmesser von 112 mm und einen Innendurchmesser von 52 mm. Jede der Antriebsspulen wirkt jeweils auf die darunter- und darüberliegende YBCO-Scheibe. Nicht angetrieben wird die Oberseite der oberen YBCO-Scheibe und die Unterseite der unteren

Scheibenoberfläche wirkende Feldspulen angetrieben werden. Aus Abb. 6 ist ersichtlich, daß der Motor im vorliegenden Fall aus fünf parallelen Ebenen aufgebaut ist. Jede Ebene besteht aus zwei YBCO-Scheiben, zwischen denen sich eine Fe-Scheibe befindet. Eine derartige YBCO-Scheibe ist aus neun YBCO-Proben  $\varnothing$  30 mm zusammengesetzt, hat einen Außendurchmesser von 112 mm und einen Innendurchmesser von 52 mm. Jede der Antriebsspulen wirkt jeweils auf die darunter- und darüberliegende YBCO-Scheibe. Nicht angetrieben wird die Oberseite der oberen YBCO-Scheibe und die Unterseite der unteren Scheibe. Diese beiden Flächen bieten sich demnach zur Einbindung in supraleitende Magnetlager an, die seitens der Permanentmagnete aus drei konzentrischen NdFeB-Ringmagneten unterschiedlicher Polarität bestehen sollen. Die dadurch entstehende Anordnung ist im rechten Teilbild von Abb. 6 dargestellt, wobei die drei Mittelebenen der Einfachheit halber weggelassen wurden.

Der einfache Aufbau des Magnetlagers von Abb. 6 darf nicht darüber hinwegtäuschen, daß der Einsatz der relativ großen NdFeB-Ringmagnete nicht unproblematisch ist. So wird der äußere Ring kommerziell nicht angeboten und müßte demzufolge segmentiert aufgebaut werden, was aufwendig und kostspielig ist. Deshalb wurden die Lagerparameter für das konzipierte Magnetlager mit Hilfe einer einfachen Anordnung bestimmt, bei der die drei konzentrischen NdFeB-Ringmagnete durch zwei Paare von drei kleinen Magneten ersetzt wurden. Die Levitationskraft und axiale Steifigkeit wurden aus den erhaltenen Ergebnissen durch Aufskalieren der Magnetfläche auf das vollständige Magnetlager ermittelt.

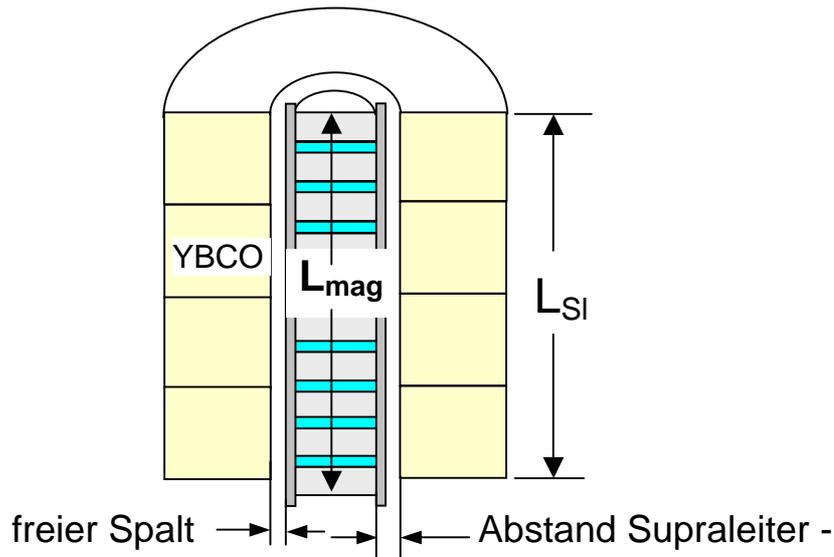
Für das konzipierte supraleitende Magnetlager konnte auf diese Weise eine Levitationskraft von 68 N und eine axiale Steifigkeit von 250 N/mm ermittelt werden. Die radiale Steifigkeit beträgt für jedes der beiden Lager 82 N/mm. Diese Ergebnisse zeigen, daß das konzipierte Magnetlager für ausreichende Kräfte und Steifigkeiten gesorgt hätte. Allerdings konnte die Beschaffung der erforderlichen NdFeB-Ringmagnete aus Kostengründen nicht realisiert werden, so daß dieses Magnetlager nicht aufgebaut werden konnte.

## **6. Radiale Magnetlager für supraleitende Motoren**

### *6.1 Untersuchte Konfigurationen und erreichte Lagerparameter*

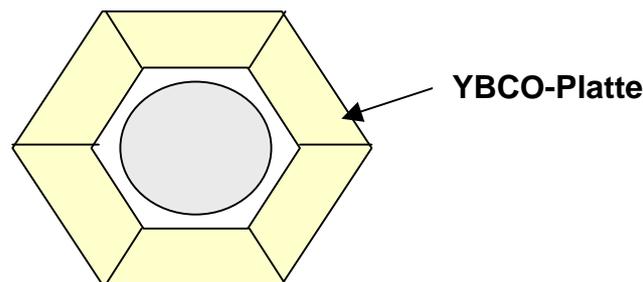
Radiale supraleitende Magnetlager wurden aus supraleitenden Hohlzylindern und Permanentmagneten entsprechend der schematischen Darstellung im rechten Teilbild von Abb. 1 aufgebaut [12]. Es wurden unterschiedlich lange Anordnungen realisiert, um den Einfluß der wirksamen Länge der Wechselwirkung zwischen Supraleiter und Permanentmagnet auf die Lagerparameter zu untersuchen.

Die Geometrie ist in Abb. 7 gezeigt, Ergebnisse für zwei typische Beispiele sind in Tabelle 1 in den ersten beiden Spalten zusammengestellt (Anordnung 1 und 2). Da der Homogenitätsbereich der YBCO-Proben sowohl in radialer als auch in axialer Richtung durch den zur Probenherstellung verwendeten Keimkristall begrenzt ist, bestehen die unterschiedlich langen Hohlzylinder aus einzelnen, 13 mm langen Hohlzylindern, die durch Ausstechen eines Kerns aus Zylinderproben mittels einer Ultraschallbohrmaschine hergestellt wurden. An die Hohlzylinderlänge  $L_{sl}$  angepaßt ist die Höhe des NdFeB-Fe-Stapels  $L_{mag}$ , wobei es sich als günstig erwies,  $L_{mag} > L_{sl}$  zu wählen, da das Magnetfeld jeweils eines Permanentmagneten außerhalb des supraleitenden Hohlzylinders die Steifigkeit der Anordnung erhöht.



**Abb. 7** Geometrie der Magnetlager aus YBCO-Hohlzylindern

Zusätzlich wurden anstelle von YBCO-Hohlzylindern auch sechseckige YBCO-Hohlkörper aus 6 YBCO-Platten aufgebaut, deren c-Achsen in radiale Richtung zeigten (siehe Abb. 8),



**Abb. 8** Draufsicht auf ein radiales Magnetlager mit einem sechseckigen YBCO-Hohlkörper, der aus 6 YBCO - Platten zusammengesetzt wurde.

während für die YBCO-Hohlzylinder die c-Achsen immer parallel zur Achse des Hohlzylinders ausgerichtet sind. Hintergrund für diese in Tabelle 1 als Anordnung 3 bezeichnete Konfiguration war die Frage, ob die Lagerparameter durch die Orientierung der c-Achse relativ zur Lagerachse beeinflusst werden.

Der Vergleich der Steifigkeiten für die verschiedenen Anordnungen läßt zwei Schlußfolgerungen zu:

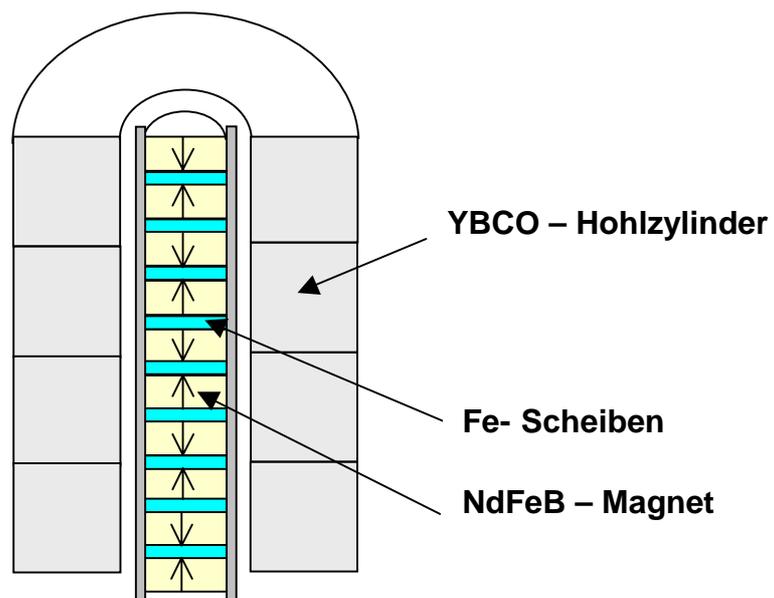
- 1) Das aus YBCO-Platten aufgebaute Lager hat etwas geringere Steifigkeiten als das kürzere der beiden Hohlzylinder-Lager. Insofern ist ein Vorteil der radialen Ausrichtung der c-Achsen des segmentierten Lagers nicht zu erkennen. Da der Aufwand für die Herstellung von YBCO-Hohlzylindern viel geringer ist als für die Herstellung der 6 YBCO-Platten, spricht das für die Hohlzylinder-Variante.
- 2) Für die beiden aus Hohlzylindern aufgebauten Lagern ist erwartungsgemäß eine Skalierung bezüglich der Länge erkennbar. Für das längere Lager, das in Abb. 5 schematisch dargestellt ist, wurden Steifigkeiten von 80 N/mm (radial) bzw. 150 N/mm (axial) erreicht - ein für supraleitende Magnetlager hervorragendes Ergebnis.

**Tabelle 1** Parameter für supraleitende radiale Lager.  
 (Außendurchmesser des YBCO-Hohlzylinders jeweils 35 mm, Innendurchmesser für Anordnung 1 und 2 jeweils 17 mm. NdFeB-Magnete jeweils  $\varnothing$  15 mm und Höhe 5 mm)

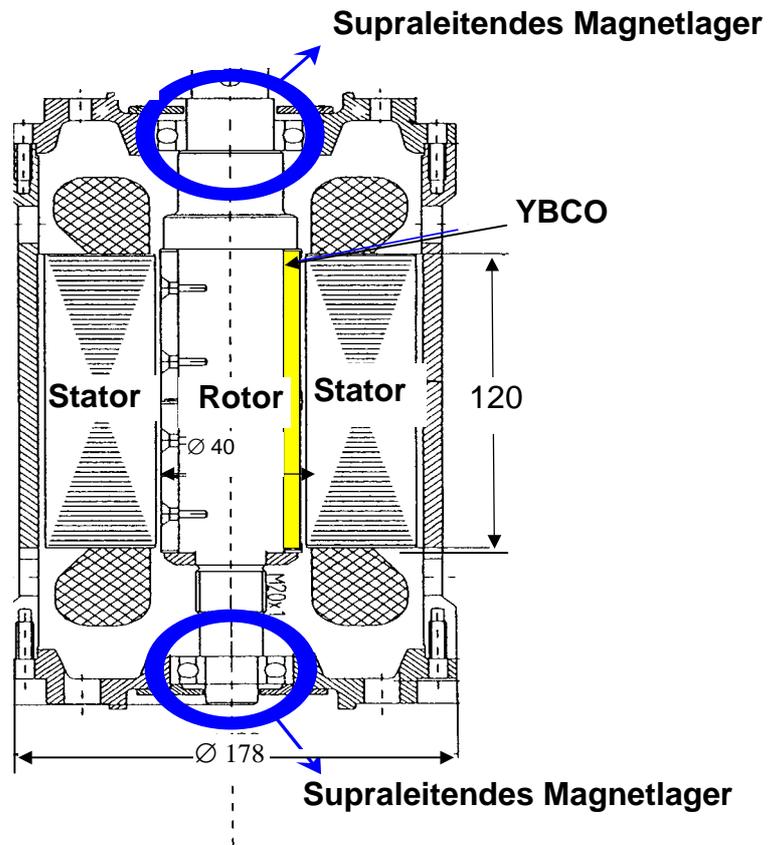
<b>Anordnung</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
$L_{sl}$	(mm)	26	44	19
$L_{mag}$	(mm)	35	64	35
Anzahl der YBCO-Hohlzylinder bzw. - Segmente		2	4	6
Anzahl der NdFeB-Magnete		5	10	5
Abstand Supraleiter – Magnete (mm)		1	1,5	1
freier Spalt (mm)		0,65	0,7	0,5
<b>Radiale Steifigkeit</b>	(N/mm)	<b>38</b>	<b>80</b>	<b>28</b>
<b>Axiale Steifigkeit</b>	(N/mm)	<b>80</b>	<b>150</b>	<b>70</b>

## 6.2. Supraleitendes Lager für einen Reluktanzmotor

Zum Test der im Rahmen des Vorhabens entwickelten radialen Magnetlager in einem supraleitenden Reluktanzmotor wurden zwei YBCO-Hohlzylinder aufgebaut, wie sie in Abb. 9 gezeigt sind, und der Fa. Oswald übergeben. Dort werden die Permanentmagnete und Fe-Scheiben für zwei Magnetlager in den Rotor eines Reluktanzmotors integriert, der in Abb. 10 dargestellt ist. In diesem supraleitenden Reluktanzmotor erfolgt der Test der beiden supraleitenden Magnetlager.



**Abb. 9** Schema des radialen Magnetlagers für einen Reluktanzmotor. Der YBCO-Hohlzylinder besteht aus 4 einzelnen Hohlzylindern und ist 44 mm lang .



**Abb. 10** Schnittbild eines supraleitenden Reluktanzmotors der Fa. Oswald.

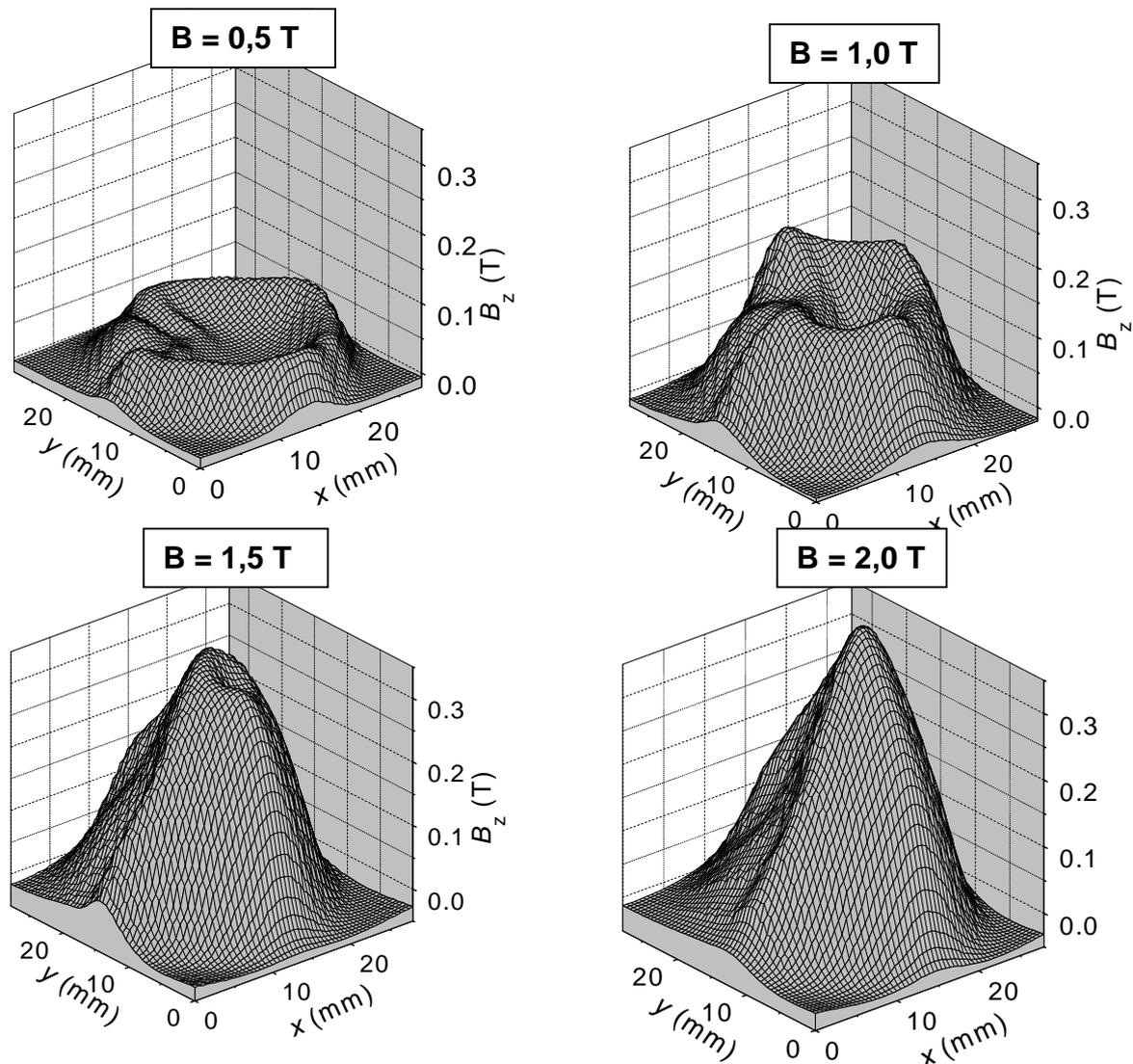
### 6.1 Möglichkeiten zur Verbesserung der Steifigkeit

Messungen der durch die Permanentmagnete und Fe-Scheiben im Supraleiter erzeugten Felder zeigten einen sägezahnförmigen Verlauf. Der dabei an der Innenbohrung des Supraleiters auftretende Feldgradient von 1,7 T/cm entspricht der Größenordnung der kritischen Stromdichte des Supraleiters, so daß in diesem Bereich eine optimale Anpassung der Feldverteilung an die Supraleiterparameter gewährleistet ist. Andererseits weist die Feldverteilung einen rapiden radialen Abfall auf, so daß auch die Feldgradienten nach außen zu sehr schnell abnehmen. Insofern kann man davon ausgehen, daß nur ein relativ kleiner Anteil des Supraleiters im Bereich der Innenbohrung zur Steifigkeit des Magnetlagers beiträgt. Daraus ergibt sich die Schlußfolgerung, daß durch Optimierung der Geometrie und insbesondere durch eine radiale Aufskalierung des Magnetlagers eine weitere Verbesserung der Lagerparameter möglich ist.

## 7. Ausblick auf supraleitende Magnetlager mit extremen Parametern

### 7.1. Verbesserte Magnetlager durch Verwendung supraleitender Permanentmagnete

Im allgemeinen werden die YBCO-Proben eines supraleitenden Magnetlagers durch die Permanentmagnete im Magnetlager aufmagnetisiert. Da die Felder an der Oberfläche von



**Abb. 11** Feldprofile bei 77 K für eine mittels Impulsfelder aufmagnetisierte YBCO-Probe bei schrittweiser Erhöhung der Amplitudes des Feldimpulses

Permanentmagneten bei 0,4 T liegen, während in den gegenwärtig verfügbaren YBCO-Proben bei 77 K maximale Felder von 1 T eingefroren werden können, wird das Potential der YBCO-Proben bei dieser Methode bereits bei 77 K nicht ausgeschöpft. Das trifft in weit stärkerem Maße auf den Temperaturbereich unterhalb 77 K zu, in dem das Remanenzfeld der YBCO-Proben bis auf Werte oberhalb 14 T anwächst, wie wir kürzlich nachweisen konnten [13].

Als bisher bestes Ergebnis für das eingefrorene Feld an der Oberfläche einer einzelnen YBCO-Probe haben wir einen Wert von 11,4 T erzielen können [13,14]. Derartige Felder können für supraleitende Magnetlager nutzbar gemacht werden, wenn der konventionelle Permanentmagnet durch diese supraleitenden Permanentmagneten ersetzt wird. Eine Abschätzung der auf diese Weise erreichbaren Levitationskraft liefert einen Wert von  $2500 \text{ N/cm}^2$ , wenn ein 11 T-Dauermagnet zugrunde gelegt wird. Dieser Wert liegt um zwei Größenordnungen über dem in Kapitel 1 abgeschätzten Grenzwert des Levitationsdrucks, der

mit üblichen Permanentmagneten erreichbar ist. Entsprechend würde sich auch die Steifigkeit eines derartigen supraleitenden Magnetlagers um mindestens eine Größenordnung erhöhen.

## 7.2 *Ergebnisse zum Aufmagnetisieren von YBCO-Proben im Impulsfeld*

Die Realisierung von Magnetlagern mit supraleitenden Permanentmagneten wird einmal durch die aufwendigere Kühlprozedur erschwert, sind die genannten Rekordwerte der Remanenzfelder in YBCO doch erst im Bereich relativ tiefer Temperaturen von etwa 20 K erreicht worden. Das Hauptproblem stellt jedoch das Aufmagnetisieren der YBCO Proben dar.

Eine Möglichkeit, die YBCO-Proben maximal aufzumagnetisieren, besteht im Einsatz von Impulsfeldern. Deshalb wurden Tests zum Aufmagnetisieren mit einem Impulsmagnetisierer der Fa. Magnet-Physik, Dr.Steingroever GmbH durchgeführt. Dabei kann in der 60 mm - Bohrung einer Kupferspule ein maximales Feld von 3 T mit einer Anstiegszeit von 16 ms erzeugt werden. Abb. 11 zeigt in Feldprofilaufnahmen das Eindringen der Flußfront bei 77 K in eine YBCO-Probe von 25 mm Durchmesser bei schrittweiser Erhöhung der Amplitude des Feldimpulses. Deutlich erkennbar ist ein kleines Nebenkorn am linken Probenrand, dessen Einfluß auch nach vollständig erfolgter Aufmagnetisierung noch sichtbar ist.

Es konnte gezeigt werden, daß Anstiegszeiten des Feldimpulses von 16 ms ausreichend lang sind, um die mit dem Feldeindringen verbundenen Verluste genügend gering zu halten [15 -17]. Dagegen führen kürzere Anstiegszeiten im Bereich von 1 ms bei 77 K schon zu Aufheizeffekten. Diese Untersuchungen müssen nun noch auf tiefere Temperaturen ausgedehnt werden, um zu klären, ob dann zur Vermeidung von Verlusten unter Umständen Anstiegszeiten  $> 16$  ms erforderlich sind.

## 8. Literaturzitate und eigene Arbeiten

- [1] S. Earnshaw, Trans. Cambridge Philos. Soc. **7** (1842) 97.
- [2] M. Minami, S. Nagaya, H. Kawashima, T. Sato, T. Kurimura, Adv. in Superconductivity X, Ed. K. Osamura, I. Hirabayashi, vol. 2 (Springer – Verlag Tokyo, 1998) 1305.
- [3] H. Takaichi, M. Murakami, A. Kondoh, N. Koshizuka, S. Tanaka, H. Fukuyama, K. Seki, T. Takizawa, and S. Aihara, Proc. Third Int. Symp. on Magnetic Bearings, July 29-31, 1992, p. 307.
- [4] Gladun, P. Stoye, P. Verges, W. Gawalek, T. Habisreuther, P. Görnert, Applied Superconductivity 1993, Ed. H. C. Freyhardt, vol. 2 (DGM Informationsgesellschaft, Oberursel, Germany, 1993) p. 973.
- [5] Stoye, G. Fuchs, W. Gawalek, P. Görnert, A. Gladun, IEEE Trans. on Magnetics **31** (1995) 4220.
- [6] Stoye, G. Fuchs, W. Gawalek, P. Görnert, A. Gladun, Applied Superconductivity 1995, Institute of Physics Conference Series No 148, vol. 1, Ed. D. Dew-Hughes, (Institute of Physics Publishing, Bristol, 1995) p. 683.
- [7] P. Stoye, G. Fuchs, G. Krabbes, P. Schätzle, T. Staiger, K.-H. Müller, L. Schultz, W. Gawalek, P. Görnert, A. Gladun, J. Low Temp. Physics **105** (1996) 1457.
- [8] G. Fuchs, P. Stoye, T. Staiger, G. Krabbes, P. Schätzle, W. Gawalek, P. Görnert, A. Gladun, IEEE Trans. on Appl. Superconductivity **7** (1997) 1949.
- [9] P. Stoye, W. Gawalek, P. Görnert, A. Gladun, G. Fuchs, Applied Superconductivity 1997, Institute of Physics Conference Series No 158, vol. 2, Ed. H. Rogalla, D.H.A. Blank, (Institute of Physics Publishing, Bristol, 1997) p. 1535.
- [10] G. Krabbes, P. Schätzle, W. Bieger, U. Wiesner, G. Stöver, M. Wu, T. Strasser, A. Köhler, D. Litzkendorf, K. Fischer, P. Görnert, Physica C **244**, 145 (1995).
- [11] G. Krabbes, G. Fuchs, P. Schätzle, S. Gruß, J.W. Park, F. Hardinghaus, G. Stöver, R. Hayn, S.-L. Drechsler, T. Fahr, Physica C **330** (2000) 181.
- [12] G. Fuchs, P. Verges, C. Frenzel, G. Krabbes, P. Stoye, W. Gawalek, P. Görnert, A. Gladun, B. Oswald, Proc. 6. Statusseminar Supraleitung und Tieftemperaturtechnik 1998, (VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien Düsseldorf, 1998) 279.
- [13] G. Fuchs, P. Schätzle, G. Krabbes, S. Gruß, P. Verges, K.-H. Müller, J. Fink and L. Schultz, Appl. Phys. Lett. **76** (2000) 2107.
- [14] G. Fuchs, G. Krabbes, P. Schätzle, S. Gruß, P. Verges, K.-H. Müller, J. Fink, L. Schultz IEEE Trans. Appl. Supercond. **10** (2000) 890.
- [15] S. Gruß, G. Fuchs, G. Krabbes, P. Schätzle, J. Fink, K.-H. Müller, and L. Schultz IEEE Trans. on Magnetics **34** (1998) 2099.

- [16] S. Gruss, G. Fuchs, G. Krabbes, P. Schätzle, J. Fink, K.-H. Müller, L. Schultz, IEEE Trans. Appl. Supercond. **9** (1999) 2070.
- [17] S. Gruss, G. Fuchs, P. Verges, P. Schätzle, G. Krabbes, K.-H. Müller, J. Fink, L. Schultz, presented at 4<sup>th</sup> European Conf. Appl. Supercond. (EUCAS '99), Sitges (Spain) 14 –17 Sept. 1999, to be published in *Applied Superconductivity 1999*.

## Abstract für Berichtsblatt

Unter Verwendung von aus schmelztexturiertem YBCO-Massivmaterial hergestellten Hohlzylindern wurden radiale Magnetlager mit für supraleitende Lager hohen Steifigkeiten in der Größenordnung von 100 N/mm entwickelt. Entsprechende Bauteile wurden an den Verbundpartner in diesem Projekt, die Fa. Oswald Elektromotoren GmbH, zum Test in einem supraleitenden Reluktanzmotor übergeben. Es konnte gezeigt werden, daß die Steifigkeit der entwickelten supraleitenden Magnetlagern durch die Größe der verfügbaren YBCO-Proben begrenzt wird, die in der erforderlichen Qualität gegenwärtig bis zu Durchmessern von 35 mm hergestellt werden können. Generell werden die Lagerparameter durch das zu geringe Feld der verfügbaren Permanentmagnete begrenzt, die nur Felder von etwa bei 0,4 T liefern, während in den YBCO-Proben bei 77 K maximale Felder von 1 T und bei tieferen Temperaturen mehr als 11 T eingefroren werden können. Derartige Felder können für supraleitende Magnetlager nutzbar gemacht werden, wenn der konventionelle Permanentmagnet durch diese supraleitenden Permanentmagneten ersetzt wird. Auf diese Weise könnte die Levitationskraft bis auf  $2500 \text{ N/cm}^2$  gesteigert werden, während mit üblichen Permanentmagneten nur  $25 \text{ N/cm}^2$  erreichbar ist. Entsprechend würde sich auch die Steifigkeit eines derartigen supraleitenden Magnetlagers um mindestens eine Größenordnung erhöhen. Untersuchungen zum Aufmagnetisieren von YBCO-Proben mit Hilfe von Impulsfeldern zeigten, daß Anstiegszeiten des Feldimpulses von mindestens 16 ms erforderlich sind, um die bei 77K auftretenden Verluste zu beherrschen.

Using hollow cylinders made from melt-textured, bulk YBCO material, superconducting magnetic bearings with high values of the stiffness of about 100 N/mm were developed. These superconducting bearings will be tested in a reluctance motor by the cooperation partner of this project, the Oswald Elektromotoren GmbH. It was shown that the stiffness of the developed superconducting bearings is limited by the size of the available YBCO samples which can be produced in the required quality up to a diameter of 35 mm. In general, the parameters of superconducting bearings are limited by the too small magnetic field of about 0.4 T of the available permanent magnets, whereas the maximum trappable field in YBCO samples is 1 T at 77 K and more than 11 T at lower temperatures. Such high magnetic fields can be utilized for superconducting bearings by replacing the conventional permanent magnet by a superconducting permanent magnet. In this way, the levitation force could be enhanced up to  $2500 \text{ N/cm}^2$ , whereas only  $25 \text{ N/cm}^2$  can be achieved with conventional permanent magnets. Also the stiffness of such a superconducting bearing could be enhanced at least by one order of magnitude. Pulsed fields were used in order to magnetize the YBCO samples. These investigations showed that rise times of the pulsed field of at least 16 ms are necessary in order to avoid losses at 77 K.

## Veröffentlichungen

- G. Fuchs, P. Stoye, T. Staiger, G. Krabbes, P. Schätzle, W. Gawalek, P. Görnert, A. Gladun  
Melt textured YBCO Samples for Trapped Field Magnets and Levitating Bearings  
IEEE Trans. Appl. Supercond. **7** (1997) 1949
- P. Stoye, W. Gawalek, P. Görnert, A. Gladun and G. Fuchs  
Superconducting Magnetic Bearings in a High Speed Motor  
in *Applied Superconductivity 1997*, vol. 2, H. Rogalla, D.H.A. Blank, Eds., Bristol and Philadelphia: IOP Publishing, pp. 1535-1538, 1997.
- S. Gruß, G. Fuchs, G. Krabbes, P. Schätzle, J. Fink, K.-H. Müller, and L. Schultze  
Superconducting Permanent Magnets From Bulk  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  Samples  
IEEE Trans. on Magnetics **34** (1998) 2099.
- S. Gruß, G. Fuchs, G. Krabbes, P. Schätzle, J. Fink, K.-H. Müller, and L. Schultze  
Superconducting Permanent Magnets From Bulk  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  Samples  
IEEE Trans. on Magnetics **34** (1998) 2099.
- P. Schätzle, G. Krabbes, G. Stoeber, G. Fuchs, D. Schläefer,  
Multi-seeded melt crystallization of YBCO bulk material for cryogenic applications,  
Superconductor Science and Technology **12** (1999) Nr. 2, S. 69-76.