

Verhalten von massiven HTSL in äußeren Magnetfeldern Rechenmodelle, Messungen, Anwendungen

W.-R. Canders, E. Portabella; H. May, R. Palka,

1 Einleitung

Die möglichen Einsatzbereiche von Hochtemperatursupraleitern (HTSL) umfassen nahezu alle Aspekte der Elektrotechnik und Elektronik und reichen von der Energieerzeugung (Generatoren) und der dynamischen Energiespeicherung (DYNASTORE) über die Medizin (SQUID) bis hin zur Verkehrstechnik (HTSL-Tragsysteme). In den vergangenen Jahren sind wesentliche Erfolge beim prinzipiellen Verständnis der Supraleitung erzielt worden. Die makroskopische Modellierung und damit Berechenbarkeit der Magnetfeld-HTSL Wechselwirkung stellt jedoch selbst unter der Annahme idealer monolithischer HTSL-Strukturen immer noch ein großes Problem dar.

Am IMAB sind verschiedene HTSL-Magnetlagertopologien entwickelt und untersucht worden. In linearer Ausführung sind sie ideal für die berührungsfreie Transporttechnik für Güter und Personen geeignet während sie in zylindrischer Form für schnell rotierende Motoren und Pumpen mit den Eigenschaften: -geringer Wartungsaufwand, kontaminationsfrei und geräuscharm-einsatzbar sind. Im Gegensatz zu den konventionellen geregelten Magnetlagern sind die HTSL-Kraftwirkungen selbststabil /1/. Sie beruhen auf dem Effekt, daß das den HTSL durchdringende Magnetfeld -beim Übergang in den supraleitenden Zustand- "eingefroren" wird und selbst bei einer Verschiebung z.B. des Erregermagneten ortsfest mittels supraleitender Ströme fixiert bleibt. Größe und Richtung dieser Supraleiterströme bestimmen zusammen mit dem Erregerfeld die Kraftvektoren.

Reale massive Supraleiter weisen jedoch eine Anzahl von störenden Eigenschaften auf, die die Interaktion von HTSL's mit äußeren Magnetfeldern in Hinblick auf die Kraftberechnung erschweren. Zu erwähnen wären:

- Anisotroper Aufbau des massiven Supraleiters aus vielen, willkürlich geformten und ausgerichteten Domänen verschiedener Größe.
- Hystereseffekte in der Krafterzeugung bei der Wechselwirkung mit variierenden Magnetfeldern
- Temperaturabhängigkeit der kritischen Stromdichte und damit auch der Kraft.

2 Berechnungsmodelle der Supraleitung

Der spezielle Einsatz von inherent selbststabilen HTSL-Magnetlagern leitet sich von den anwendungsspezifischen Kraft- und Steifigkeitsanforderungen ab, die ihrerseits durch die Art des Flußeinfrierens beeinflusst werden können. Insgesamt können 3 Einfriermoden unterschieden werden:

1. Beim sogenannten *Zero-Field-Frozen* (ZFF) befindet sich der Supraleiter beim Übergang in den supraleitenden Zustand weit entfernt vom Permanentmagneten im feldfreien Raum. In

diesem Einfriermodus werden bei Annäherung maximale abstoßende Kräfte erzeugt.

2. Friert man den Supraleiter jedoch im Arbeitspunkt des Lagers, d.h. zumeist in der Nähe des Erregermagneten ein, so spricht man vom *Operational-Field Frozen* (OFF) Modus, und es wirken selbststabile Rückstellkräfte bei beliebiger Auslenkungsrichtung. Eine Sonderform vom OFF-Modus ist dadurch gekennzeichnet, daß man z.B. bei einem horizontal arbeitenden Rotor das Lager in der Symmetrieposition betreiben möchte. Um diesen Sonderfall zu erreichen, muß der Rotor zur Gewichtskompensation etwas oberhalb der Arbeitsposition eingefroren werden (*Operational-Field Frozen with offset OFFo*).
3. Ein Sonderfall des OFF-Modus ist weiterhin dadurch gekennzeichnet, daß der Supraleiter bei größter Annäherung zum Permanentmagneten eingefroren wird (*Maximum Field Frozen MFF*). Unter diesen Umständen entstehen bei Abstandsvergrößerung stabile anziehende Kräfte.

Während alle OFF-Moden (reines OFF, OFFo und MFF) in jedem Fall zu einer mehrdimensional selbststabilen Lagerung führen, bewirken ZFF-Moden zwar eine maximale stabile Abstoßkraft in Richtung der Verbindungslinie zwischen HTSL und Erregereinheit, wie abstoßende Permanentmagnetanordnungen können sie jedoch nur stütztechnisch mit einer zusätzlichen Führeinrichtung angewendet werden.

Zur Berechnung der Kraftwechselwirkung zwischen dem HTSL und der Felderregeranordnung wird im folgenden der supraleitende Körper als perfekter Monolith angenommen.

2.1 Perfect Field Cooling

Unter *Perfect Field Cooling* wird ein Verhalten des Supraleiters dergestalt verstanden, daß bei einer Verschiebung des Erregersystems das Feld im Innern des HTSL absolut konstant bleibt. Aus mathematischen Gründen folgt, daß dies nur mit Stromdichten auf der Oberflächen der HTSL erreichbar ist. Frühere Veröffentlichungen bezüglich der Kraftwechselwirkung basieren zumeist auf dieser Annahme. Die Kraft kann jedoch nach geringen Modifikationen ($\int \vec{H} d\vec{s} = 0$, um den HTSL) mit konventionellen Feldberechnungsprogrammen erfaßt werden.

Ein Sonderfall des *Perfect Field Cooling* ist beim ZFF-Modus dadurch gegeben, daß bei Verschiebung überhaupt kein Feld in den Supraleiter eindringt und er somit als perfektes diamagnetisches Material angesehen werden kann (mit Feldprogrammen berechenbar). Dieses Verhalten wird als *Meißner Effekt* bezeichnet, der aber von den bekannten HTSL nur für -in der Energietechnik nicht anwendbare- kleine Feldstärken in Erscheinung tritt. Auf dem *Meißner Effekt* beruht weiterhin folgendes etwas überraschendes Verhalten von Supraleitern: auch ein kleines den HTSL durchdringendes Magnetfeld wird beim Übergang in den supraleitenden Zustand aus dem HTSL vollkommen verdrängt und somit das System angehoben.

Für anwendungsnahe Flußdichten arbeiten Supraleiter jedoch in der *Shubnikov-Phase*, welche das Eindringen des Flusses in Form von sogenannten Flußschläuchen erlaubt. Ändert sich nun der äußere Fluß aufgrund einer Bewegung des Erreger/HTSL-Systems, so reagiert der HTSL nur mit einer endlichen Stromdichte, so daß sich das Feld innerhalb des HTSL Körpers weiter ausbreiten bzw. zurückziehen kann. Die sich einstellende Stromdichte- und damit Feldverteilung hängt stoffspezifisch von der Temperatur und der Flußdichte im HTSL ab. Die Schwierigkeiten bei der Berechnung der Stromdichteverteilung und damit der Kräfte von hochdynamischen Lagern basieren darauf, daß weiterhin diese Verteilungen in äußerst komplizierter Weise von der Vorgeschichte des Bewegungsablaufes abhängen.

2.2 Berücksichtigung der endlichen Stromdichte eines Supraleiters

2.2.1 J_c -kritische Zustandsmodelle

Die bei weitem am häufigsten angewandte Theorie zur Berücksichtigung des Eindringens bzw. der Änderungen von Magnetfeldern innerhalb von realen Supraleitern und der damit verbundenen Stromdichteverteilung stammt von Bean/3/. Hierbei wird davon ausgegangen, daß der HTSL sich in einem sog. "kritischen Zustand" befindet, bei dem die Stromdichten -abhängig von der Vorgeschichte und der örtlichen Feldverteilung- nur drei verschiedene kritische Werte annehmen können: $-J_c$, 0 oder J_c .

Erweiterungen des Beanschen Modells wurden von Kim, Fietz usw. vorgeschlagen /4-9/. Hierbei wird die Abhängigkeit der kritischen Ströme J_c von der Feldstärke zusätzlich noch durch unterschiedliche funktionale Zusammenhänge berücksichtigt.

Die in Bild 1 angegebene Tragkraft-Luftspaltabhängigkeit wurde z.B. mit dem Bean-Modell berechnet, wobei eine kritische Stromdichte von $J_c = 14 \text{ kA/cm}^2$ zugrunde gelegt worden war.

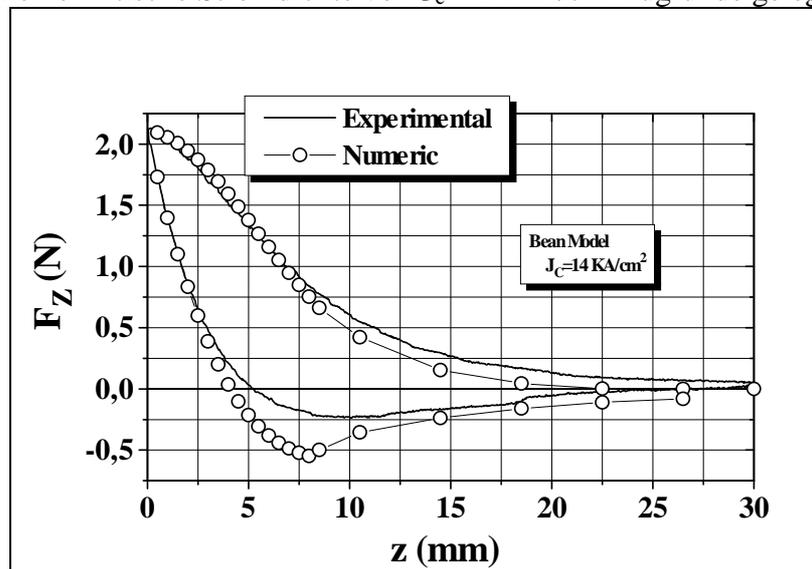


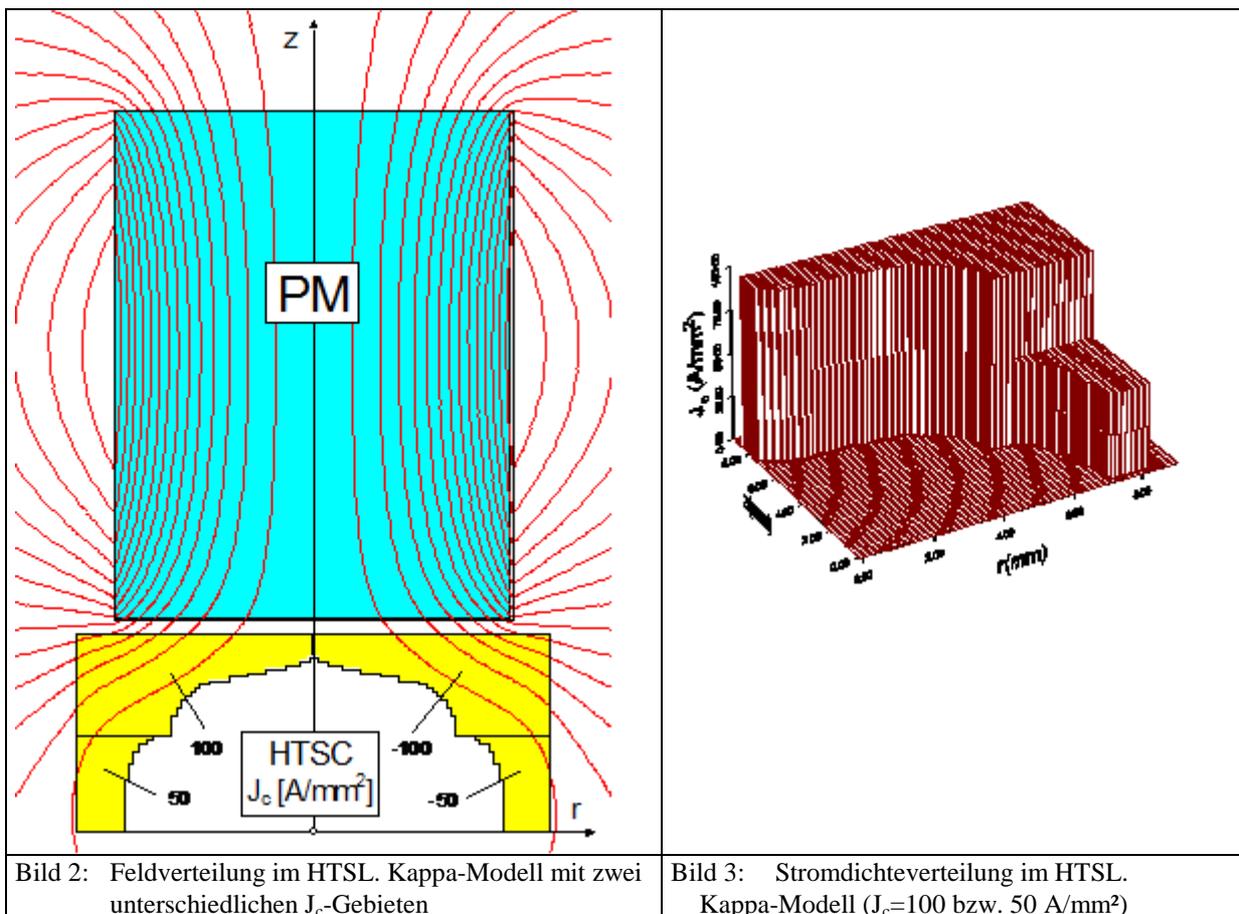
Bild 1: Mit dem Bean-Modell berechneter Weg-Kraft-Verlauf.
 Vergleich mit Meßkurve aus Barcelona /2/

2.2.1 Kappa-Modell

Bei dem von May und Palka /10/vorgeschlagenen Rechenmodell wird das HTSL-Gebiet als normaler elektrischer Leiter betrachtet, auf den zunächst die Maxwellschen Gleichungen angewendet werden können. Die Bewegung des HTSL als Massivleiter im Magnetfeld führt – vom Einfriermodus abhängig- aufgrund des klassischen Induktionsgesetzes zu induzierten Strömen, deren Größe und Richtung nach dem vorgeschlagenen Kappa-Modell nicht von der Induktion selbst, sondern von der Flußdichteänderung abhängen, die sich während der Verschiebung von der Einfrierposition zur Arbeitsposition ergibt. Darüber hinaus berücksichtigt ein am IMAB entwickeltes Feldberechnungsprogramm die Tatsache, daß der HTSL nur mit einem Stromdichtewert auf äußere Feldänderungen reagiert, durch eine angepaßte Änderung der Leitfähigkeitsverteilung innerhalb des HTSL-Gebietes. Hieraus leitet sich der Begriff "Kappa-Modell" ab. Die Abhängigkeit der Stromdichte von der Temperatur wird als äußerer Parameter eingegeben und die Feldstärkeabhängigkeit wird in einem iterativen Rechenprozess ermittelt.

Die hier erwähnten Rechenmodelle führen zu einem Kraftverlauf zwischen dem Supraleiter und dem Magneten, der -bei Änderungen der Bewegungsrichtung- eine stromdichteabhängige Hysterese aufweist.

Für den Fall eines HTSL-Permanentmagnet-Tragsystems, bei dem sich der Permanentmagnet aus einer großen Entfernung auf der z-Achse in Richtung des HTSL bewegt hat, ist in Bild 2 die mit dem Kappa-Modell berechnete Feldverteilung und in Bild 3 die zugehörige Stromdichteverteilung unter der Annahme dargestellt, daß in den unterschiedlichen HTSL-Gebieten eine kritische Stromdichte von $J_c=100$ bzw. 50 A/mm^2 angenommen wurde. Die Berücksichtigung anderer stoffspezifischer J_c -Werte führt natürlich zu geänderten Stromdichteverteilungen und damit zu anderen Tragkraftwerten (Bild 4). Der Grenzwert wird natürlich unter der Annahme einer ∞ großen Stromdichte erreicht, welche das Magnetfeld perfekt am Eindringen in den Supraleiter hindern würde (*Meißner-Phase*).



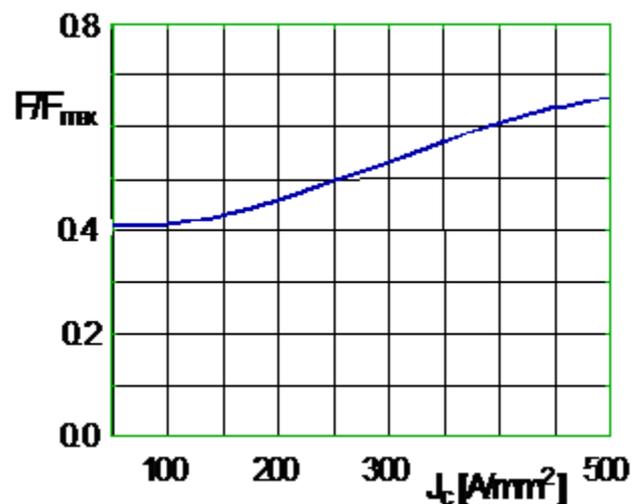
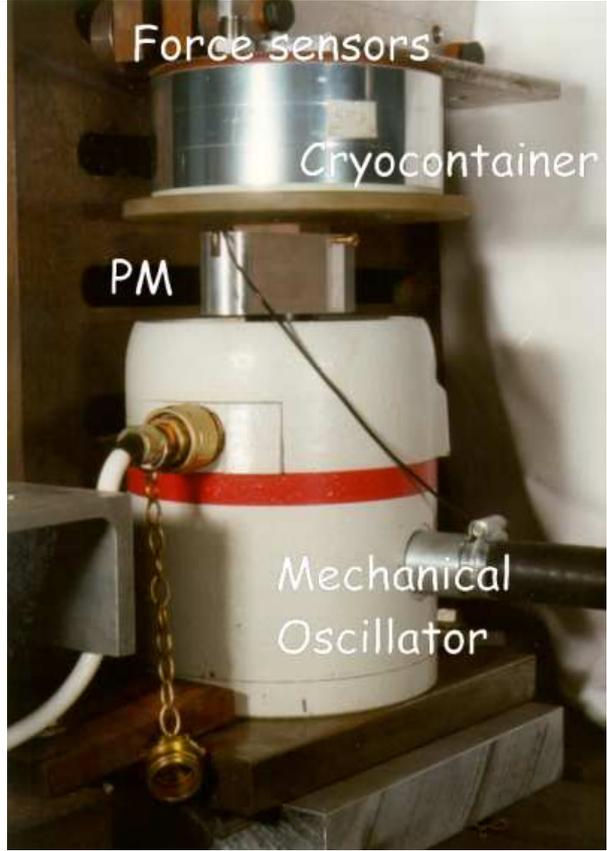


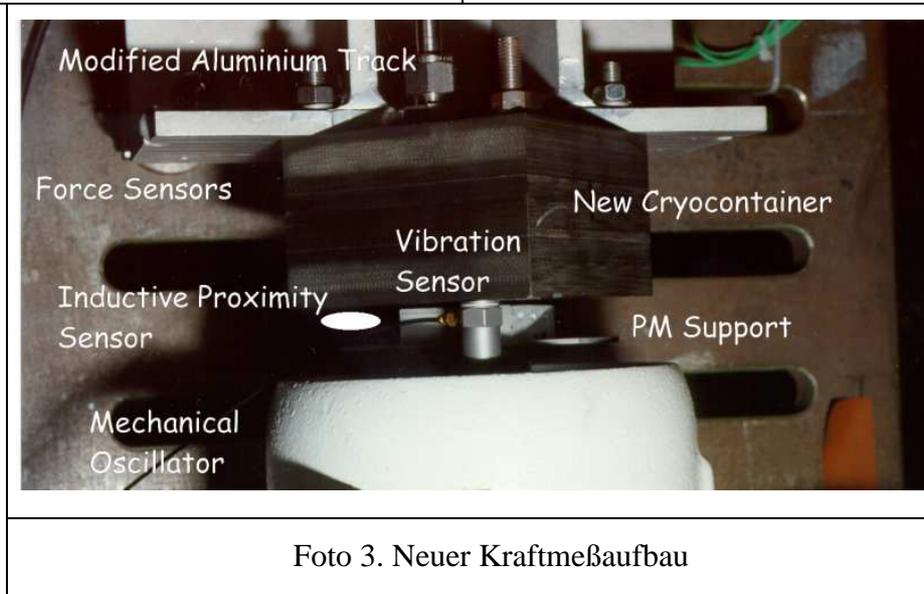
Bild 4: Tragkraft als Funktion der kritischen Stromdichte J_c
 (Bezugswert: F_{max} mit $J_c = \infty$ A/mm²)

3 Statische und dynamische Kraftmessungen

Die Messungen der Kraft zwischen einem HTSL und einem äußeren Felderregersystem wurden mit Hilfe der im Foto 1 dargestellten Meßeinrichtung durchgeführt. Dieser Aufbau besteht aus dem in einem Kryocontainer befindlichen Massivsupraleiter (Foto 2) und einem Permanentmagneten. Dieses Felderregersystem ist auf einem elektromagnetischen Schwinger befestigt und kann hiermit in einem weiten Frequenz- und Hubbereich in Richtung des HTSL bewegt werden. Mittels piezokeramischer Sensoren (Kistler AG) wurden die auf den Supraleiter wirkenden Kräfte gemessen, während die jeweilige Position mit einem berührungsfreien Wegsensorsystem erfaßt wurde. Aus der Phasenverschiebung zwischen dem Kraft- und Positionsverlauf können weiterhin wichtige Lager- bzw. HTSL-Parameter -wie Steifigkeit und Dämpfung- ermittelt werden. Mit Hilfe dieser Einrichtung wurden die dynamische Eigenschaften von verschiedenen berührungsfreien HTSL-Permanentmagnetlagern im Frequenzbereich von $f=20$ bis 125 Hz ermittelt. Die Komponenten des Lagers unterschieden sich in der Qualität und den Abmessungen der HTSL und im Aufbau der Erregeranordnung.

Die minimale Größe des Abstandes zwischen den aktiven Lagerkomponenten wird durch die mechanische Festigkeit und thermische Isolierfähigkeit des Kryokontainers bestimmt und beträgt für die hier gezeigte Konfiguration 3.5 mm. Damit auch Aussagen bei einer größeren Annäherung getroffen werden konnten, wurde ein neuer Kryocontainer (Foto 3) mit einer sehr dünnen Trennfläche zwischen den Magneten und den Supraleitern gebaut (Foto 2), der eine Annäherung zwischen den Tragkomponenten bis auf 2 mm erlaubte.

	
<p>Foto 1: Aufbau zur Messung des statischen und dynamischen Verhaltens von HTSL-Magnetlagern</p>	<p>Foto 2: Geöffneter Kryocontainer mit dünner Trennfläche und eingelegtem HTSL.</p>



In Bild 5 ist ein typisches Ergebnis einer dynamischen Kraft-Weg Messung dargestellt, bei dem die Erregeranordnung mit 20 Hz bei einem mittleren Abstand von 5,5 mm um einen Betrag von $\pm 0,6$ mm auf und ab bewegt wurde.

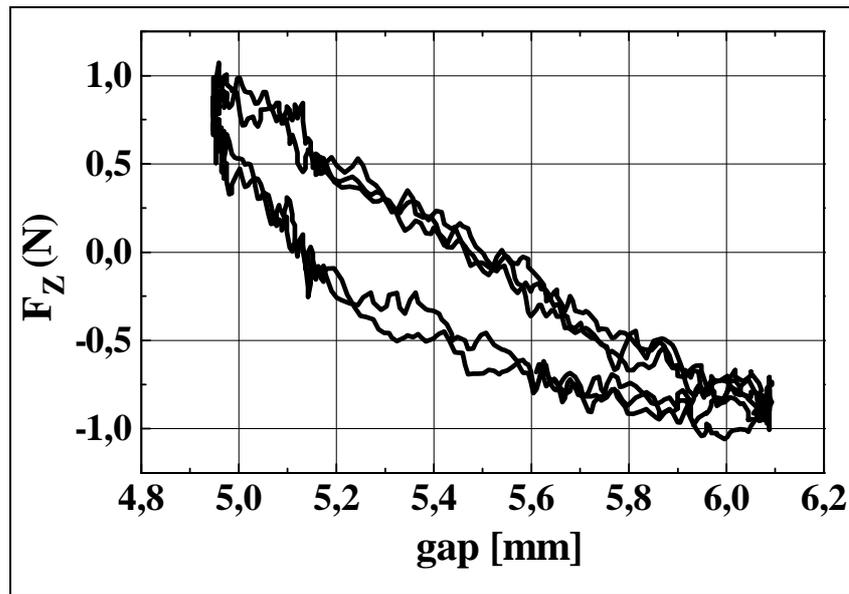


Bild 5: Gemessene dynamische Levitationskraft ($f=20\text{Hz}$)

Auf den selben Messungen basierend sind in Bild 6 die Tragkraft und die Auslenkung über der Zeit dargestellt.

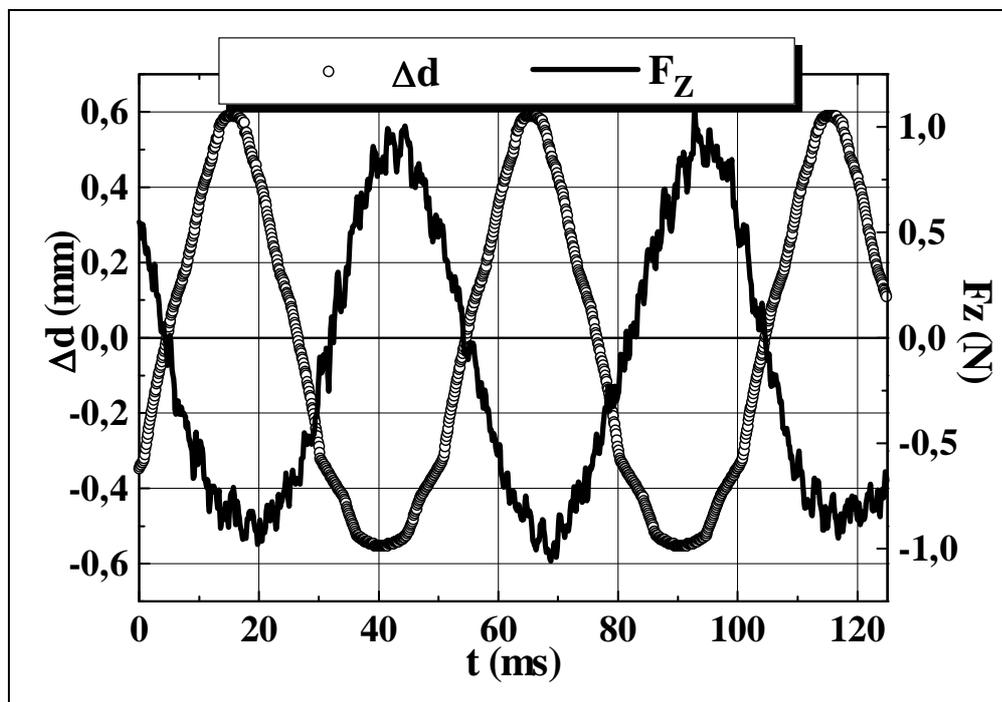


Bild 6. Gemessene dynamische Levitationskraft ($f=20\text{Hz}$)

Bemerkung: Es wird z.Zt. eine neue Meßanordnung mit einer größeren mechanischen Entkopplung von Umwelteinflüssen und einem wesentlich stärkeren Schwingungsanreger aufgebaut. Die Bewegungsabläufe werden somit weitgehend erzwungenen Oszillationen ohne Oberschwingungen entsprechen.

4 Anwendungen

Aus heutiger Sicht sind schon Anwendungen von Hochtemperatursupraleitern in verschiedenen Levitationssystemen und Lagerkonfigurationen möglich. Die berührungsfreie HTSL-Lagerung weist viele Vorteile auf: inherente Stabilität in mehr als einer Lastrichtung, progressive Federcharakteristik und -da keine elektronische Regelung zum Einsatz kommt- eine absolute Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen. Die Lagerung eines rotierenden Körpers verlangt die Kenntnis der Lagerparameter, wie Steifigkeit und Dämpfung. Diese Parameter sind zur Zeit für HTSL-Lager noch nicht exakt bekannt. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, daß bei hochwertigen, durch entsprechend niedrige Temperaturen langzeitstabil eingestellten Supraleitern die beiden o.g. Größen kleiner als die von klassischen Lagern sind. Dies ist rotordynamisch nicht unbedingt nachteilig, da die durch Rotorunwuchten erregten Reaktionskräfte solch eines Lagers entsprechend klein ausfallen, so daß sich die Maschinen durch eine hohe Laufruhe auszeichnen. Bedingung für den Einsatz von HTSL-Lagern für schnell rotierende Maschinen ist jedoch, daß beim Durchfahren der kritischen Drehzahlen die Auslenkungsamplituden des Rotors so klein gehalten werden können, daß es nicht zu Berührungen zwischen den Lagerkomponenten kommt. Die am IMAB durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, daß die HTSL-Lagerungen eine günstige Charakteristik bezüglich der Lage der Resonanzstellen aufweisen und daß somit die "weiche Lagerung mit geringer Dämpfung" eine Reihe von Vorteilen im Vergleich zu klassischen Lösungen besitzt.

5 Literatur

- /1/ Braunbeck, W.: Z.Phys. **112** (1938), 753-763
- /2/ R. Yu, Obradors, X, et al.; IEEE Transactions on Applied Superconductivity (1996)
- /3/ C. P. Bean, Phys. Rev. Lett. **8**, 250 (1962)
- /4/ Y. B. Kim, C. F. Hempstead and A. R. Strnad, Phys. Rev. Lett. **9**, 306 (1962)
- /5/ J. H. P. Watson. J. Appl. Phys. **39**, 3406 (1968)
- /6/ F. Irie and Yamafuji. J. Appl. Phys. Soc. Jpn. **23**, 255 (1967)
- /7/ I. M. Green and P. Hlawczkia, Proc. IEEE **114**, 1329 (1967)
- /8/ W. A. Fietz, M. R. Beasley, J. Silcox and W. W. Webb, Phys. Rev. **136**, A335 (1964)
- /9/ V. R. Karasik, N. G. Vasilev, and V. G. Ershov. Soc. Phys. JETP **32**, 433 (197)
- /10/ Canders, W.-R.; May, H.; Palka, R.: Identification of the Current Density Distribution of Monolithic Superconductors. ISTET '97, Palermo (Italy), 9-11 June 1997