

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

IMAB

Institut für Elektrische Maschinen,
Antriebe und Bahnen
Prof. Dr.-Ing. W.-R. Canders



TB 04-08-01



Verbundprojekt
„Grundlegende Untersuchungen an HTSL Lagern für Turbomaschinen“

bmb+f

Abschlussbericht

Fkz: 13N8067

Laufzeit: 1.4.2001-31.12.2003

**Verbundpartner: IMAB TU Braunschweig
ACE GmbH, Köln**

Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. W.-R. Canders

Dipl. Ing. J. Hoffmann

Dipl. Ing. H. May

August 2004

Änderungsstand: ABSCHLUSS-N1.DOC, 10.09.2004

Gliederung

1 Darstellung des Vorhabens	3
1.1 Aufgabenstellung	3
1.2 Voraussetzungen	3
1.3 Planung und Ablauf	4
1.4 Stand von Wissenschaft und Technik zu Beginn des Vorhabens	5
1.4.1 Literatur	6
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
2 Darstellung der erzielten Ergebnisse	8
2.1 Theoretische Untersuchungen zur Lagerauslegung	8
2.1.1 Grundlagen	8
2.1.2 Optimierung von Erregersystem und HTSL-Anordnung	16
2.1.2.1 Optimierungsziele und -strategie	16
2.1.2.2 Bau und Validierung des Magnetlagers	20
2.2 Lagerauslegung	24
2.2.1 Ermittlung der Lagersteifigkeit	24
2.2.2 Lagerabmessungen	26
2.2.3 Aktivierung des geteilten Lagers	31
2.2.3.1 Kräfte und Wege bei der Aktivierung	34
2.3 Aufbau des Versuchslagers	36
2.3.1 Konstruktion und Fertigung	36
2.3.1.1 Supraleiteranordnung	40
2.3.1.2 Versuchsumfeld, Kryotechnik, Vakuum, Sensorik, Erregersystem	41
2.3.1.3 Aktivierung	42
2.3.2 Messungen	42
2.3.2.1 An Halbschale	42
2.3.2.2 Lager komplett	46
2.4 Theoretische Untersuchungen zur Rotordynamik	47
2.4.1 Rotordynamische Berechnungen	47
2.4.1.1 Lagerung	49
2.4.1.1.1 Primärlager	49
2.4.1.1.2 Sekundärlager	50
2.4.1.2 Destabilisierende Einflüsse	51
2.4.1.3 Mindestanforderungen	52
2.4.1.4 Simulation und Ergebnisse	53
3 Verwertbarkeit der Ergebnisse	62
4 Fortschritt bei anderen Stellen	64
5 Erfolgte Veröffentlichungen	65
6 Zusammenfassung	67

1 Darstellung des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Der Wunsch nach berührungsfreien Lagerungen in Turbomaschinen ist zum einen durch die enormen Verluste in hydrodynamischen Gleitlagern und zum anderen durch die zunehmende Forderung nach hoher Reinheit der hergestellten Produkte begründet. Mittelfristige Anwendungen sind insbesondere in der Verfahrenstechnik bei der Produktion hochreiner technischer Gase wie LN_2 z.B. für die Elektronik Industrie, aber auch bei der Erzeugung von flüssigem Wasserstoff, der als zukünftiger Energieträger eine weiter zunehmende Bedeutung erfährt, zu sehen. Gerade die Wasserstoffverflüssigung erfordert extrem schnelllaufende Expansionsturbinen, bei denen sich die Lagerverlustprobleme potenzieren. Damit wird den Zielen des Förderprogrammes insofern entsprochen, als dass hier eine auf den praktischen Einsatz gerichtete Forschung zur Anwendung von neuartigen berührungsfreien Lagern durchgeführt wurde, bei der die Ziele der Energieeinsparung, die Verbesserung der Marktposition der heimischen Industrie und die Potentiale eines Marktes für zukünftige Wasserstoffinfrastrukturen kombiniert wurden.

1.2 Voraussetzungen

Das Projekt „Grundlegende Untersuchungen an HTSL Lagern für Turbomaschinen“, das mit dem Industriepartner Atlas Copco Energas, Köln, durchgeführt wurde, hatte das Ziel, die speziellen Anforderungen an solche Lager, die sich aus dem Betrieb einer Turbomaschine ergeben, zu ermitteln und gleichzeitig zu prüfen, inwieweit Turbomaschine und Lager aneinander angepasst werden können. Die bisherigen Aktivitäten und Erfahrungen des IMAB auf dem Gebiet der Hochtemperatursupraleitung wie

- Brite Euram – „Melt texture processing of bulk YBCO material for magnetic levitation and energy conversion“
- Massivmaterial Verbund (BMBF)
- Joint German Chinese Project (HTSL Maglev model vehicle)
- Power SCENET
- Cryobehälter (BMBF)

- Leitprojekt „Energiespeicher für den dezentralen und mobilen Einsatz“
(BMWA - seit 1.1.00)

legten die Ausweitung der Forschungsarbeiten auf das Gebiet der Lagerung hochtouriger Rotoren nahe. Mit dem Projektpartner Atlas Copco Energas stand ein weltweit agierender Industriepartner mit hohem Renommee auf dem Gebiet verfahrenstechnischer Turbomaschinen, insbesondere der industriell vorwiegend eingesetzten Radialmaschinen zur Verfügung.

Ferner bestand eine etablierte Zusammenarbeit mit mehreren Herstellern von Hochtemperatursupraleitern wie dem Institut für physikalische Hochtechnologie (IPHT) in Jena, dem Zentrum für Funktionswerkstoffe (ZFW) in Göttingen, der Fa. Nexans Superconductor und dem Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK) in Dresden.

Für die theoretischen Untersuchungen konnte auf den bereits existierenden numerischen Rechenprogrammen des Institutes aufgesetzt werden.

1.3 Planung und Ablauf

Das Vorhaben wurde zwischen den Projektpartnern so aufgeteilt, dass die Ermittlung der Lastkollektive an existierenden Turbomaschinen, deren exakte Ermittlung wegen der hohen Tragfähigkeiten der konventionellen hydrodynamischen Lager bisher nicht erforderlich war, vom Industriepartner Atlas Copco Energas (ACE) durchgeführt wurde während die theoretischen / experimentellen Untersuchungen an den HTSL-Lagern vom IMAB durchgeführt wurden. Das Vorhaben war ursprünglich für zwei Jahre mit einem Meilensteinbericht nach einem Jahr geplant.

Die theoretischen Untersuchungen innerhalb des Projektes befassten sich mit der Optimierung des Zusammenwirkens von Supraleiter und Erregersystem, der Entwicklung einer Auslegungsprozedur für HTSL Lager mit verschiebbaren Lagerschalen sowie mit der Untersuchung der Rotordynamik HTSL gelagerter Turbomaschinen.

Während des Ablaufes des Vorhabens kam es zu erheblichen Verzögerungen beim Aufbau der experimentellen Einrichtungen, da sowohl die Kryokühler (AWT) die zugesagten Leistungen nicht erbrachten als auch die Dewars (ILK) unzureichende Isolierwerte aufwiesen. Die erforderlichen Umrüstungen und Nachbesserungen führten zu einer Verzögerung von insgesamt mehr als einem Jahr, was durch die kostenneutrale Verlängerung des Vorhabens um 9 Monate anzugleichen versucht wurde.

Weitere Probleme ergaben sich durch ein fehlerhaftes Erregersystem, das innerhalb des Projektes nicht ersetzt werden konnte, so dass der Umfang des Messprogramms innerhalb der Projektlaufzeit eingeschränkt werden musste.

1.4 Stand von Wissenschaft und Technik zu Beginn des Vorhabens

Versuche zur berührungs- und schmiermittelfreien Lagerung von Turbomaschinen mit aktiven Magnetlagern sind bereits vor einigen Jahren erfolgt und bis zur industriellen Anwendungsreife vorangetrieben worden. Als nachteilig erwiesen sich jedoch hierbei die hohe Komplexität des Sensor-Mikrorechner-Aktor-Systemes und die damit verbundene hohe Störanfälligkeit, insbesondere bezüglich elektromagnetischer Störungen. Kurzzeitige Überlastung dieser Lager führt zur Sättigung der Leistungsverstärker und damit zur Instabilität, was den „Absturz“ in die Fanglager verbunden mit einer erheblichen Störung der Anlage zur Folge hat. Supraleitende Lager stellen dagegen ein passives, inhärent stabiles Maschinenelement dar, dessen Funktion nur von der Existenz der Kühlung abhängt und das ein wesentlich robusteres Betriebsverhalten erwarten lässt. Hervorzuheben sind hier:

- Die hohe thermische Zeitkonstante, die auch bei Ausfall der Kühlung noch ein geordnetes Stillsetzen der Anlage oder das Anfahren einer Reservemaschine gestattet
- Die Möglichkeit, bei kurzzeitigen Überlastungen ohne „Rotorabsturz“ gegen ein Hilfslager anzulaufen, das im einfachsten Fall aus einem Hartkohlering bestehen kann
- Die Möglichkeit, das bei Gasverflüssigungsanlagen – die ein bevorzugtes Einsatzgebiet von HTSL Lagern sein dürften - anfallende kalte Produkt zur Kühlung der Lagerung mit zu nutzen.

Nachteilig ist beim HTSL-Lager die geringe statische Steifigkeit, die sowohl in der Lagerauslegung als auch in der Gestaltung der Turbomaschine berücksichtigt werden muss.

Sowohl die Anforderungen an die Lager als auch die technische Gestaltung von HTSL Lagern für hochtourige Radialturbinen waren bis dato noch nicht untersucht worden, so dass hier technisches Neuland betreten wurde. Neben den bereits vorliegenden Patentanmeldungen von Prof. Canders [2, 6, 7] waren nur wenige – vorwiegend japanische - Anmeldungen bekannt, die aber die spezifischen hier interessierenden Fragen nicht beantworten konnten. Es wurde daher eine laufende Patentüberwachung eingerichtet, so dass während des Projektes stets Informationen über den aktuellen Stand der Patentliteratur verfügbar waren.

Ein wichtiger Gesichtspunkt bei allen HTSL Lagern ist die Lageraktivierung, die bei den bisherigen HTSL Lagertechnologien durch Verschieben des Rotors (axial oder radial) aus

einer Einfrierposition in den Arbeitspunkt erfolgte. Die hierfür erforderliche Kraft war i. a. das Eigengewicht des Rotors. In Turbomaschinen steht dieser Verschiebeweg wegen der engen Dichtspalte nicht zur Verfügung, so dass hier die Aktivierung bei mittiger Position des Rotors in der Lagerbohrung oder mit sehr kleinen Verschiebungen von wenigen zehntel mm dargestellt werden muss. Dieses Problem kann mit Hilfe beweglicher Lagerschalen gelöst werden [2]. Die gleichzeitige Verspannung der Lagerschalen führt dabei infolge der nichtlinearen Kennlinie der Lagerung zu einer erhöhten Steifigkeit im Arbeitspunkt. Erst mit diesem Ansatz ist die Anwendung von HTSL Lagern in Turbomaschinen überhaupt möglich.

Ein wesentlicher Arbeitspunkt des Vorhabens war daher die experimentelle Verifizierung dieses Ansatzes.

1.4.1 Literatur

Die verwendete Literatur ist in der Tabelle 1.1 zusammengestellt.

Tabelle 1.1

1	S.O.Siems, Konstruktion von Magnetlagern mit Hochtemperatursupraleitern, Diss. TU-Braunschweig, 2003
2	W.-R.Canders, H.May Patent PCT WO 02/06688 Magnetic bearing assembly (24.01.02, Pri.: 18.7.2000), DE 100 34 922 C2, Magnetische Lagerung (16.1.03), US 6,541,885 B2 (1.4.03), Magnetic bearing assembly
3	E. Portabella, Static and dynamic properties of high temperature superconducting bearings, Diss. TU Braunschweig, Mai 2000
4	W.-R.Canders, High speed machines on magnetic bearings - Design concepts and power limits, Proc. ICEM `98, Int. Conference on Electrical Machines, Sept. 2-4, 1998, Istanbul, Turkey
5	W.-R. Canders, H. May : Patent DE 197 27 550, (8.5.02, Pri.: 28.6.1997) „Magnetische Lagerung eines Rotors in einem Stator“
6	W.-R. Canders, H.May, Patent EP 0936 367 B1, (22.5.02, Pri.:14.2.98), „Vorrichtung zur Fixierung eines supraleitend gelagerten Körpers während seiner Einfrierphase“
7	Beitz, W./ Grote, K.-H. (Hrsg.): <i>Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau</i> ; 19. Auflage; Springer-Verlag; Berlin u.a.; 1997; G62
8	Gasch, N./ Nordmann, R./ Pfützner, H.: <i>Rotordynamik</i> ; 2. vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage; Springer-Verlag; Berlin u.a.; 2002
9	SR3, Programm zur Berechnung der selbst- und unwuchterregten Querschwingungen gleit- und wälzgelagerter Rotoren mit Zusatzeinflüssen, Version 3, 2001, (FVA) Forschungsvereinigung Antriebstechnik , Frankfurt

10	Atlas Copco, Abschlussbericht zum Verbundprojekt „Turbomaschinen mit HTSL Lagern“, 12.12.2003
----	-----------------------------------------------------------------------------------------------

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine formelle Zusammenarbeit mit anderen Stellen bezüglich dieses Projektes erfolgte nicht. Unabhängig davon wurden die etablierten Kontakte zu den vorgenannten Materialforschungseinrichtungen und zu Nexans Superconductor weitergepflegt.

2 Darstellung der erzielten Ergebnisse

2.1 Theoretische Untersuchungen zur Lagerauslegung

2.1.1 Grundlagen

Die Regel von Earnshaw (1842) besagt, dass es mittels Permanentmagneten nicht möglich ist, eine stabile Lagerung herzustellen. Dieses Phänomen tritt dagegen bei dem hier eingesetzten Wirkungsprinzip nicht auf, da die Anordnung von permanentem magnetischen Erregersystem gegenüber einem Supraleiter in sich stabil ist, so dass sie einer Auslenkung entgegenwirkende Kräfte entwickelt und immer dem energetisch niedrigsten Niveau zustrebt, d. h. es existiert ein definierter Arbeitspunkt.

Ausgehend von dieser Eigenschaft lässt sich ein Lager konstruieren, welches völlig berührungslos, ohne Reibung und ohne klassische Schmier- und Tragmedien auskommt. Die Lagerung benötigt zudem nicht, wie bei anderen Verfahren, bestimmte Mindestgeschwindigkeiten und Drücke, um eine Berührung des Notlagers zu vermeiden. Sie ist andererseits bis zu sehr hohen Geschwindigkeiten einsetzbar.

Aus diesen Gründen ist von einer Eignung für hochdrehende Turbomaschinen grundsätzlich auszugehen.

Zur Sicherstellung der Funktion eines HTSL-Lagers müssen folgende Gesichtspunkte berücksichtigt werden: Es ist zum Kühlen des HTSLs eine effektive Kühlung auf niedrigem Temperaturniveau erforderlich, zudem dürfen sich kalte Bereiche nicht erwärmen (Isolierung, Vakuum), d. h. Verluste und externer Wärmeeintrag müssen minimiert werden. Das vorliegende Lagerkonzept sieht daher vor, Rotor und Stator thermisch zu entkoppeln.

Die theoretischen Untersuchungen beziehen sich darauf, die Welle einer Turbomaschine mit Hilfe von supraleitenden Magnetlagern (SMB) selbststabil zu lagern. Hierbei können prinzipiell die in Bild 2.1 dargestellten Freiräume für klassische, geregelte Magnetlager verwendet werden.

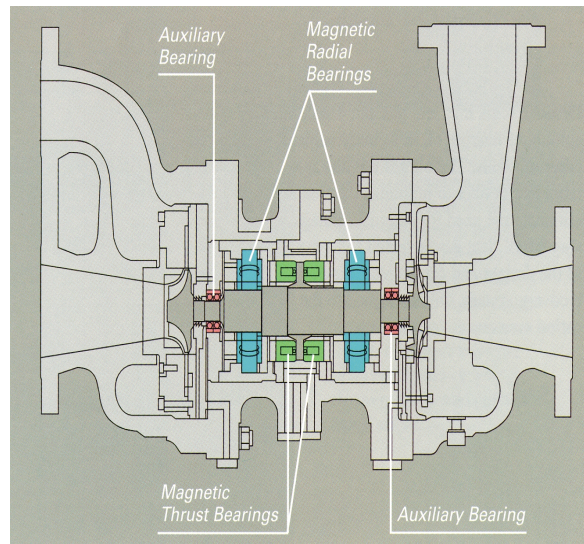


Bild 2.1 Querschnittszeichnung einer mit Hilfe von geregelten Elektromagneten unterstützten Welle einer Turbomaschine

Die prinzipielle Wirkungsweise von supraleitenden Magnetlagern kann anhand von Bild 2.2 erklärt werden. Zunächst wird ein Erregersystem – hier Permanentmagnet PM – in der Nähe eines Supraleiters (SC) positioniert und dieser unter seine kritische Temperatur ($T_c < 77\text{ K}$) abgekühlt (Bild 2.2b). Wird nun der Magnet aus dieser Einfrierposition verschoben, so wird der SC Feldänderungen ausgesetzt, welchen er durch interne Wirbelströme (Faradaysches Gesetz, Lenzsche Regel) entgegenwirkt. Werden vereinfachend unbegrenzte Stromtragfähigkeiten für den SC angenommen, so bilden sich in ihm nur Oberflächenstrombeläge aus (Bild 2.2d). Dieser Idealfall hält die ursprüngliche Feldverteilung im SC vollkommen unverändert (Bild 2.2c) und die Oberflächenströme bewirken mit dem externen Feld die in Bild 2.2c mit einem Pfeil dargestellten selbstständig wirkenden rückstellenden Kräfte.

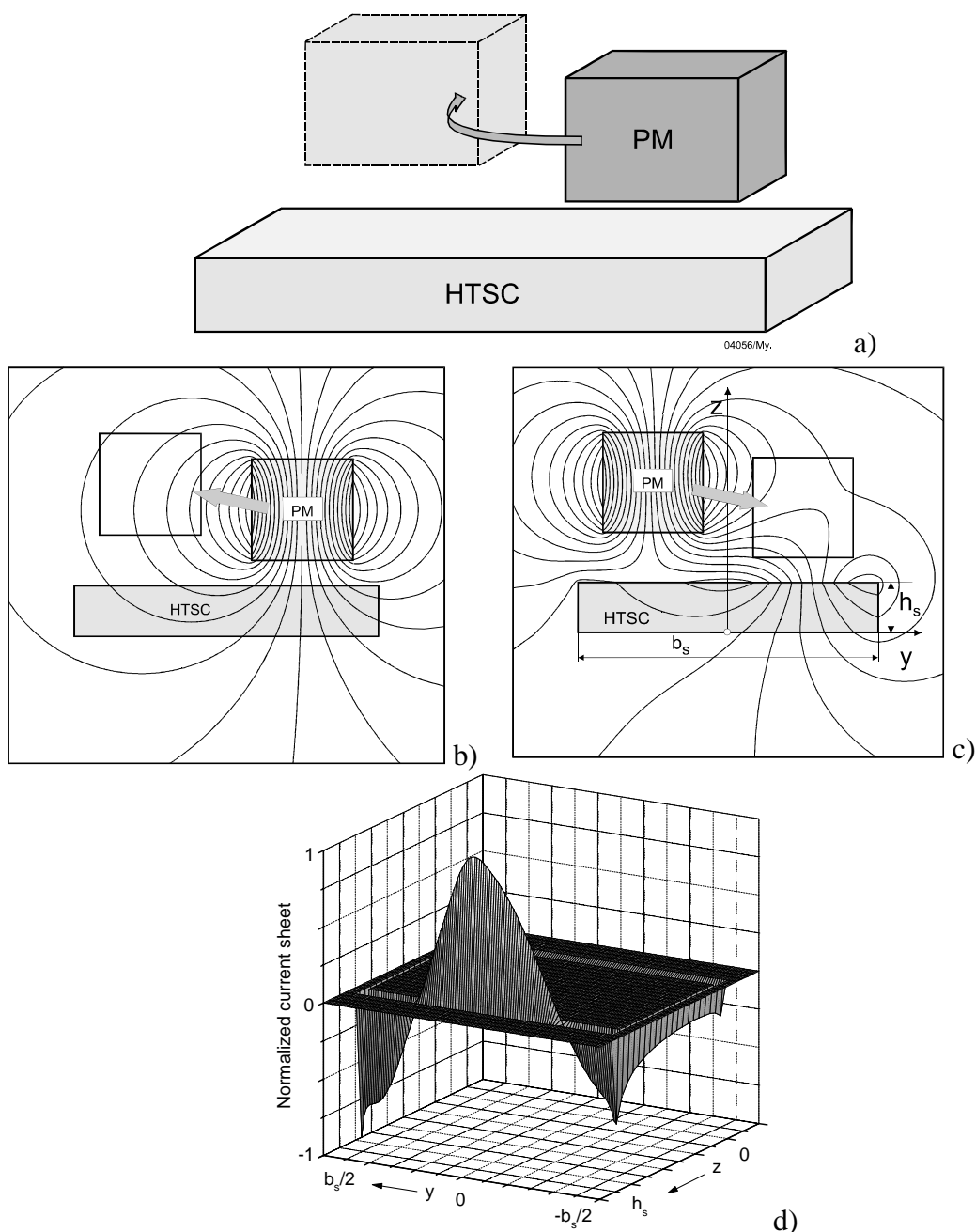


Bild 2.2 Bilder zur Erklärung der selbststabilen Rückstellkraftbildung bei einem supraleitenden Magnetlager.
 a) Darstellung mit einem Permanentmagneten, welcher nach Abkühlung des Supraleiters (HTSC) seitlich verschoben und gleichzeitig angehoben wird
 b) Feldverteilung in der Aktivierungsposition. Der Permanentmagnet wird durch äußere Kräfte in dieser Position zum Supraleiter gehalten. (Der Pfeil gibt den äußeren Kraftvektor an, mit dem der Magnet in die schemenhaft dargestellten Auslenkungsposition verschoben wird)
 c) Feldverteilung bei Verschiebung aus der Aktivierungsposition. (Der Pfeil gibt den Kraftvektor an, mit dem der Magnet inhärent in die schemenhaft dargestellte Aktivierungsposition aufgrund der Magnetkraftwirkung zurückverschoben wird)

Wie in Bild 2.3 dargestellt können diese Kräfte zur selbststabilen magnetischen Lagerung von Wellen herangezogen werden. Die Welle mit den beiden Supraleitern war zunächst in ein flüssiges Stickstoffbad getaucht. Dieses wurde nach dem Abkühlen entfernt.

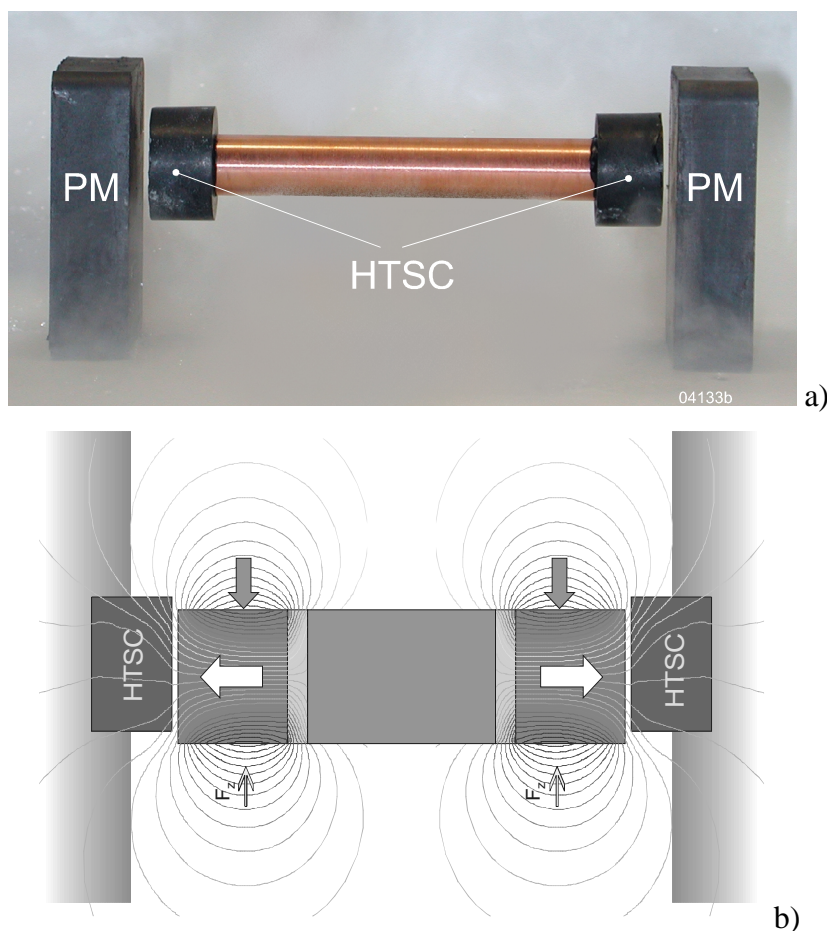


Bild 2.3 a) Demonstrationsaufbau eines selbststabilen supraleitenden Magnetlagers für schnell rotierende Wellen. Die Supraleiter befinden sich beidseitig der Kupferwelle.
 b) Feldverteilung eines supraleitenden Magnetlagers für schnell rotierende Wellen. (Bemerkung: Wie für tatsächliche Magnetlager vorgesehen, befinden sich hier die Magnete auf der rotierenden Welle und die Supraleiter sind ortsfest mit einer Kühlvorrichtung verbunden.)

Zur systematischen Untersuchung verschiedener SMB-Aktivierungen und der mit ihnen verbundenen Lagereigenschaften bieten sich die in Bild 2.4 dargestellten Basisanordnungen an. Mit SMB-Aktivierung wird hier die Distanz zwischen der Kühlposition g_{act} und der Arbeitsposition g_{op} des Lagers bezeichnet.

Bei der in Bild 2.4a dargestellten Aktivierungsart wird der Supraleiter in der Nähe der späteren Arbeitsposition eingefroren (OFCo: Operational Field Cooling with offset). Im Bild 2.4b wird die Aktivierungsart grafisch dargestellt, bei der der Supraleiter so nah wie möglich zum Magneten abgekühlt wird (MFC: Maximal Field Cooling), während in Bild 2.4c der Supraleiter in einem feldfreien Raum weit weg von Magneten eingefroren wird (ZFC: Zero Field Cooling).

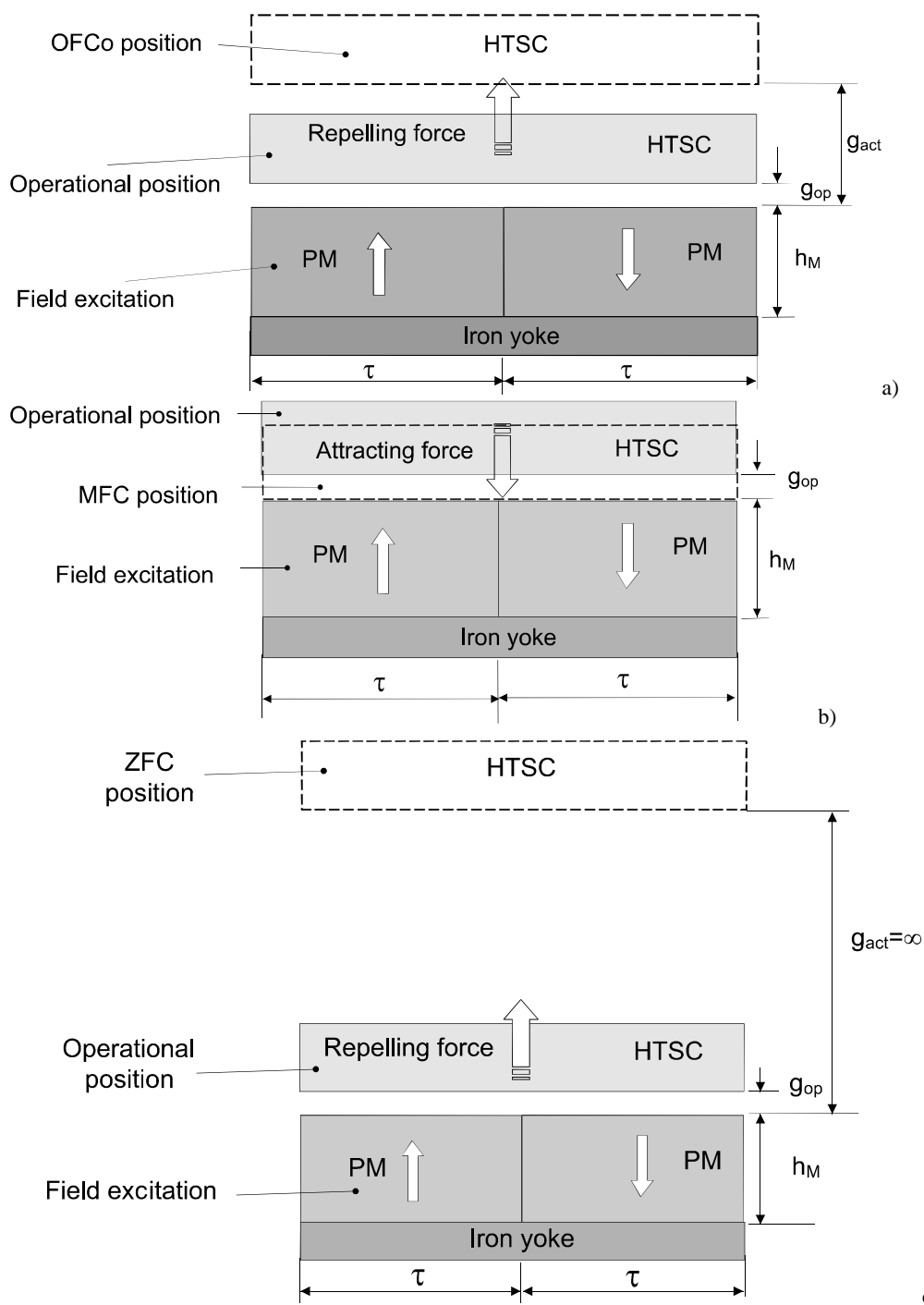


Bild 2.4 Prinzipischnen zur Erklärung der drei unterschiedlichen Aktivierungsmoden von supraleitenden Magnetlagern.
 a) Während des Abkühlens befindet sich der Supraleiter in der Nähe des später vorgesehenen Arbeitspunktes (OFCo: Operational Field Cooling with Offset. Bemerkung: Bei dieser Aktivierung $g_{act} \approx g_{op}$)
 b) Während des Abkühlens befindet sich der Supraleiter in der unmittelbaren Nähe zum Erregersystem (MFC: Maximal Field Cooling, $g_{act} \approx 0$)
 c) Während des Abkühlens befindet sich der Supraleiter in einem sehr großen Abstand zum Erregersystem (ZFC: Zero Field Cooling, $g_{act} \approx \infty$)

Da der Supraleiter aufgrund der aktivierungsabhängigen unterschiedlichen Verschiebungen auch unterschiedlichen Feldänderungen ausgesetzt wird, ist aufgrund des Faradayschen Gesetzes auch mit aktivierungsabhängigen Kraftverläufen zu rechnen.

Wie man dem Feldverlauf von Bild 2.5a leicht entnehmen kann, führt eine ZFC-Aktivierung zu abstoßenden Kräften, welche mit zunehmender Annäherung progressiv ansteigen (Bild 2.5c ZFC). Wesentlich komplizierter ist der Kraft-Luftspaltverlauf nach einer MFC-Aktivierung gemäß Bild 2.5b. Wie in Bild 2.5c (MFC) dargestellt ist, nimmt die Kraft zunächst proportional zum Luftspalt zu, um dann einen Maximalwert zu durchlaufen und anschließend abzunehmen. Diese Kraftcharakteristika haben natürlich einen großen Einfluss auf die verschiedenen Anwendungen und werden im Einzelnen später genauer spezifiziert. Für die OFCo Aktivierung kann man natürlich keinen Kraftverlauf sondern nur Steifigkeiten im Arbeitspunkt angeben.

Zur Erfassung des mit einer beliebigen Verschiebung verbundenen mehrdimensionalen Kraftvektors – z. B. in Bild 2.2 – sind die Feldverteilung und die Kraftwirkung bei einer lateralen Verschiebung aus Aktivierung im Arbeitspunkt in Bild 2.6 dargestellt. Der punktsymmetrische Verlauf um die Aktivierungsposition (Bild 2.6b) zeigt die Stabilität auch in seitlicher Richtung auf.

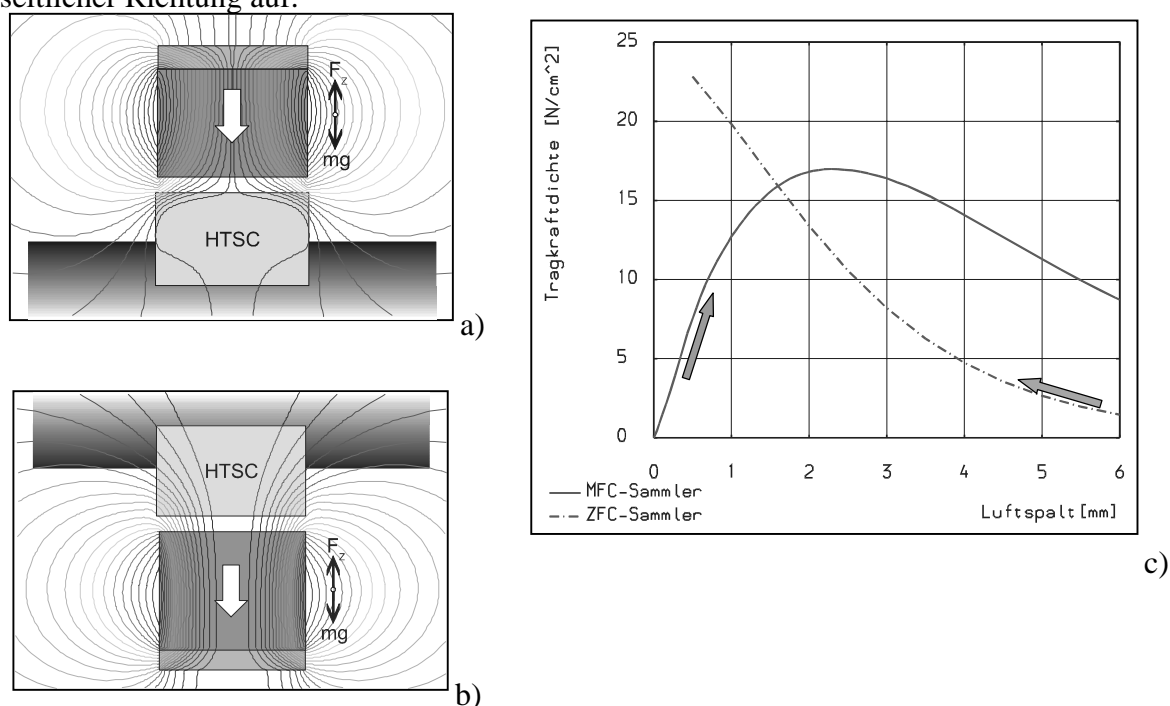


Bild 2.5 Feldverläufe für a) der Supraleiter wird nach dem Einfrieren an das Erregersystem herangeführt (ZFC), b) der Supraleiter wird nach dem Einfrieren vom dem Erregersystem entfernt (MFC). c) Kraftverläufe für die beiden Aktivierungen und anschließenden Verschiebungen. Die MFC-Aktivierung führt zu anziehenden Kräften und ist zum besseren Vergleich mit der ZFC-Aktivierung mit umgekehrten Vorzeichen dargestellt.

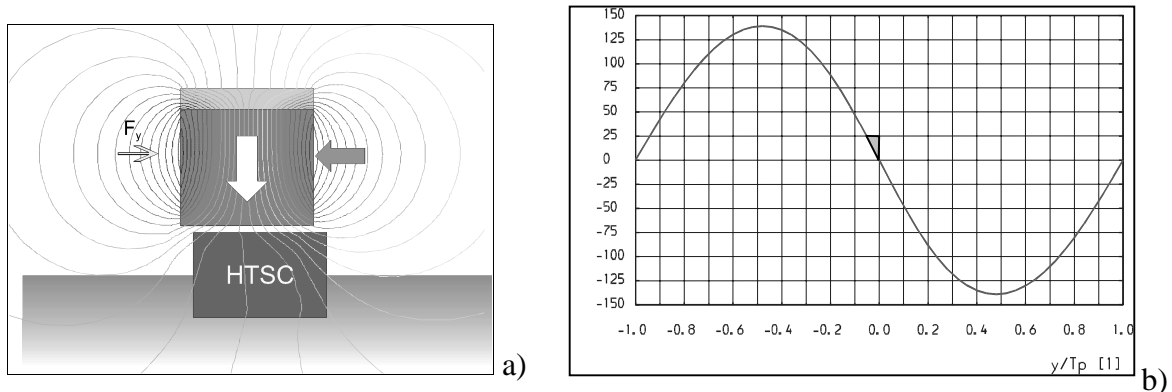


Bild 2.6 a) Feldverteilung bei einer seitlichen Verschiebung eines Permanentmagneten gegenüber einem Supraleiter,
 b) Führkraft bei einer seitlichen Verschiebung eines Permanentmagneten gegenüber einem Supraleiter (periodische Anordnung)

Aufgrund der Besonderheit von supraleitenden Magnetlagern, dass eine beliebige Auslenkung aus der Aktivierungsposition zu entsprechend gerichteten Rückstellkräften führt, lässt die verschiedensten Magnetlagertopologien für schnell rotierende Wellen zu. Neben rotationssymmetrischen Zylinderlagern (Bild 2.7a) sind auch Lager mit einer planaren Ausbildung der Reaktionskörper möglich (Bild 2.7b). Obgleich man annehmen könnte, dass die Zylinderlager größere Radialkräfte und –steifigkeiten aufweisen und die planaren Anordnungen größere Normalkräfte, d.h. Axialkräfte aufweist, so liefern jedoch alle Rechnungen und Messungen Ergebnisse, dass SMBs in jedem Fall größere (zumeist zweimal) Axial- Als Radialkräfte erzeugen. Die Topologie der SMBs kann sich also ganz nach den geometrischen Gegebenheiten und eventuell nach Forderungen der Fliehkraftbeherrschung richten. Zur Validierung dieser Zusammenhänge wurde ein Prüfstand konstruiert, welcher ein zylindrisches und ein planares Magnetlager aufwies. Mit Hilfe entsprechender Aktuatoren können die Lager mit radialen und axialen Störkräften verschiedener Frequenzen sowie Unwuchtkräften beaufschlagt werden. Durch einen Mittelfrequenzmotor kann die Welle bis ca. 10000 U/min in Rotation versetzt und damit weitgehend ihr dynamisches Verhalten untersucht werden.

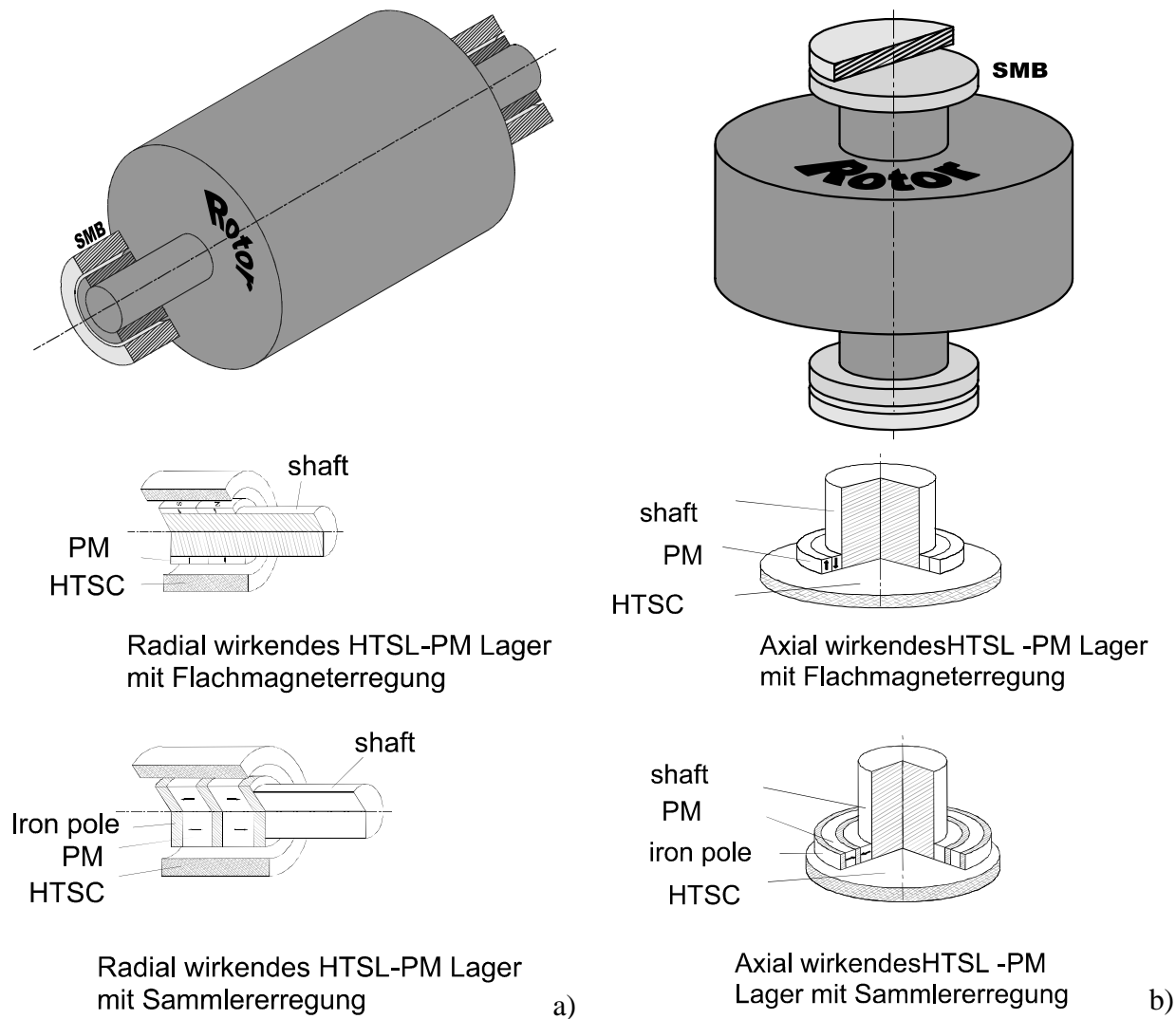


Bild 2.7 Verschiedene Magnetlagertopologien für schnell rotierende Wellen
 a) Traganordnung mit horizontaler Welle,
 b) Traganordnung mit vertikaler Welle

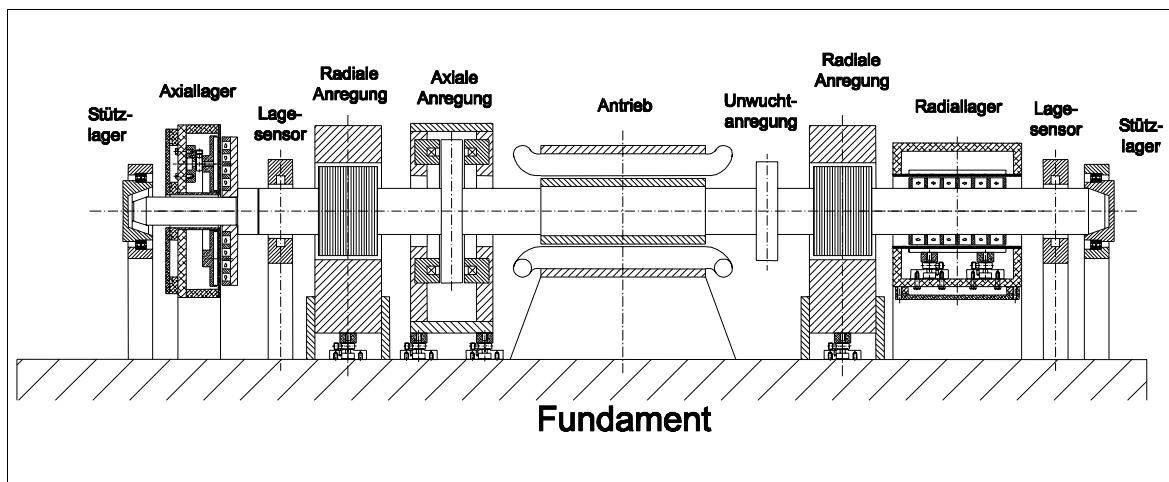


Bild 2.8 Dynamischer Teststand mit rotierender Welle und einem Zylinder- und einem Planlager. Über entsprechende Aktuatoren können die Lager mit radialen und axialen Störkräften sowie Unwucht Kräften beaufschlagt werden

2.1.2 Optimierung von Erregersystem und HTSL-Anordnung

2.1.2.1 Optimierungsziele und -strategie

Durch entsprechende Änderungen klassischer numerischer Feldberechnungsprogramme können die Kräfte von supraleitenden Magnetlagern aufgrund der Wechselwirkung (Lorentz Kräfte) zwischen den Magnetfeldern und den Supraleiterströmen als Voraussetzung einer Optimierungsrechnung sehr genau bestimmt werden ([1.4]).

Aufgabe und Ziel einer Optimierung ist die Kraftdichte und/oder Steifigkeitsdichte einer Supraleiter-Erregersystem Wechselwirkung zu erhöhen. Je nach Aufgabe können die geometrischen Parameter von Bild 2.9 zur Optimierung herangezogen werden. Es muss hier noch darauf hingewiesen werden, dass als Erregersystem nicht nur – entsprechend Bild 2.4 – so genannte Flachmagnetanordnungen zum Einsatz kommen. Die bereits in Bild 2.7 angedeuteten und in Bild 2.9b spezifizierten Anordnungen mit Flusskonzentration zeichnen sich dadurch aus, dass der Magnetfluss von ferromagnetischen Polen (Platten oder Ringe) zum Arbeitsluftspalt geführt wird. Hierdurch wird die Luftspaltflussdichte in Bewegungsrichtung stark homogenisiert, so dass es beim Hochgeschwindigkeitsbetrieb nicht zu parasitären Zusatzverlusten kommt. Flachmagnetanordnungen (Bild 2.9a) weisen dagegen aufgrund von Materialinhomogenitäten der Permanentmagnete oder Klebeluftspalten immer gewisse Feldschwankungen in Bewegungsrichtung auf, so dass für Hochgeschwindigkeitsanordnungen praktisch nur Fluss-Konzentratoranordnungen verwendet werden können. Obgleich das Optimierungsziel eigentlich leicht zu definieren ist (Kraftdichte und/oder Steifigkeitsdichte), so muss weiterhin beachtet werden, dass bei einer Lagerung der Welle einer Turbomaschine – gemäß Anforderungsspezifikationen des Forschungspartners ACE – neben der von Radialkräften aufzufangenden Gewichtskompensation auch noch prozessbedingte Radial- und Axialkräfte bei unterschiedlichen Drehzahlen beherrscht werden müssen. Neben diesen Optimierungszielen sind auch noch gewisse Randwerte zu beachten, die darin bestehen, dass neben der Masse auch die Länge des Erregersystems möglichst klein gehalten werden sollte. Die Masse muss zusätzlich getragen werden und eine Verlängerung der Welle kann die Schwingungsproblematik (Kapitel 2.4) beeinflussen.

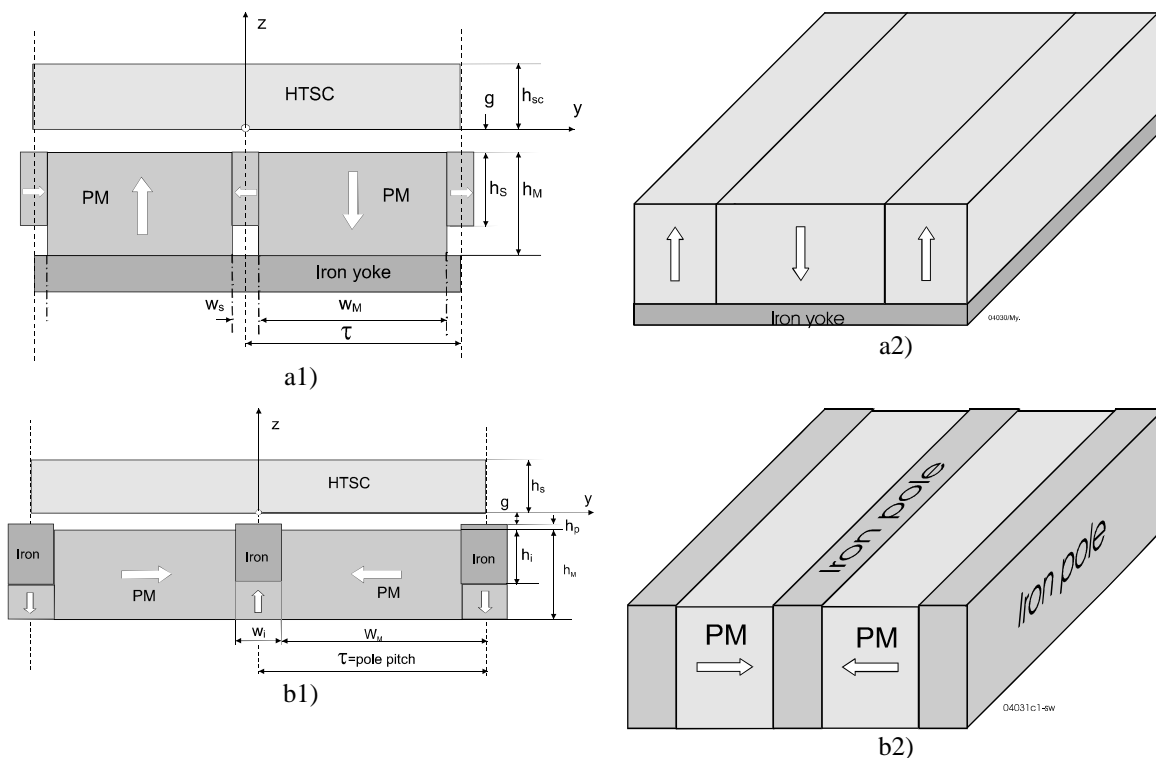


Bild 2.9 Prinzipischnen und Bauformen unterschiedlicher Erregeranordnungen (hier kartesisch dargestellt)

- a) Flachmagnetanordnung mit zum Luftspalt gerichteten Permanentmagneten
 - a1) Bezeichnungen einer Flachmagnetanordnung mit Streufeldkompensationsmagneten
 - a2) 3D-Darstellung der einfachsten Bauform einer Flachmagnetanordnung
- b) Flusskonzentrationsanordnung mit ferromagnetischen Polen zwischen den Permanentmagneten
 - b1) Bezeichnungen einer Flusskonzentrationsanordnung mit eingezogenen Polen und Streufeldkompensationsmagneten
 - b2) 3D-Darstellung der einfachsten Bauform einer Flusskonzentrationsanordnung

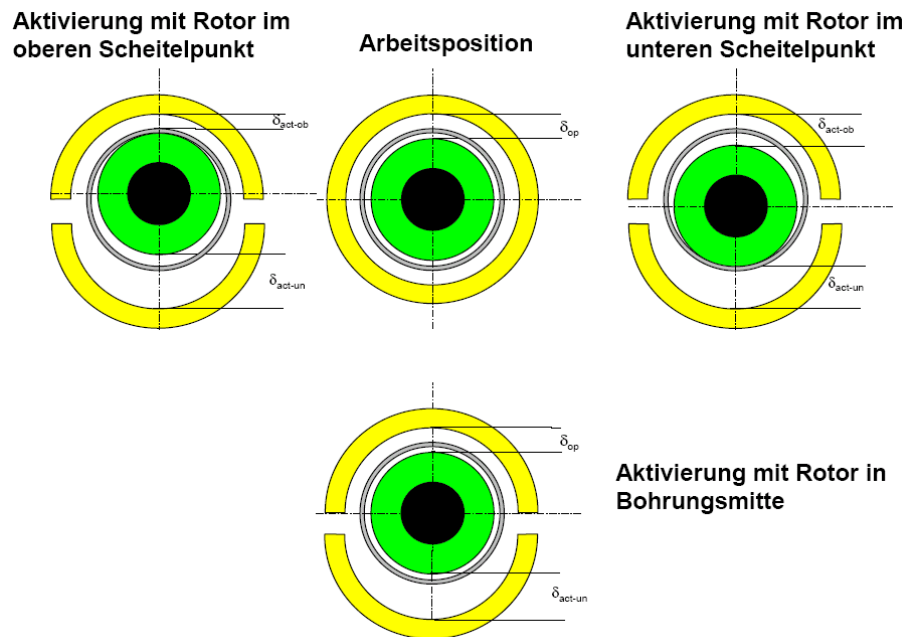


Bild 2.10 Aktivierungsmoden für Magnetlager mit einer beweglichen Supraleiter-Halbschale (unten).

Da dieser Optimierungsraum nicht mathematisch spezifiziert werden kann und die Vorgehensweise bei der Art der Kraftaktivierung (Bild 2.10) noch nicht exakt bekannt ist, wurde die Optimierung in vielen Teilschritten durchgeführt.

Legt man die geometrischen Verhältnisse von Bild 2.9b1 zu Grunde und nimmt einen unteren Aktivierungsluftspalt $g_{act,un}$ (Bild 2.10) von 3,5 mm und Arbeitluftspalt von 2,5 mm an, so kann beispielhaft die Steifigkeitsdichte mit der Polteilung τ verändert werden. (Bemerkung: Die Kraftdichte erhält man durch Multiplikation der Steifigkeitsdichte mit der angenommenen Auslenkung, in diesem Fall 1 mm). Mit der hierdurch optimierten Polteilung kann man anschließend die Sammelpoldicke w_i optimieren.

- Da man keinen mehrdimensionalen Optimierungsvektorraum aufgespannt hat, nimmt man hier natürlich stillschweigend an, dass die optimale Polteilung nicht von der Sammelpoldicke w_i abhängt. Die Zulässigkeit dieser schrittweisen Optimierungsstrategie ist aber schon mehrfach nachgewiesen worden.

Anschließend kann man die Sammelpolhöhen im Luftspalt h_p und im Magnetbereich h_i optimieren.

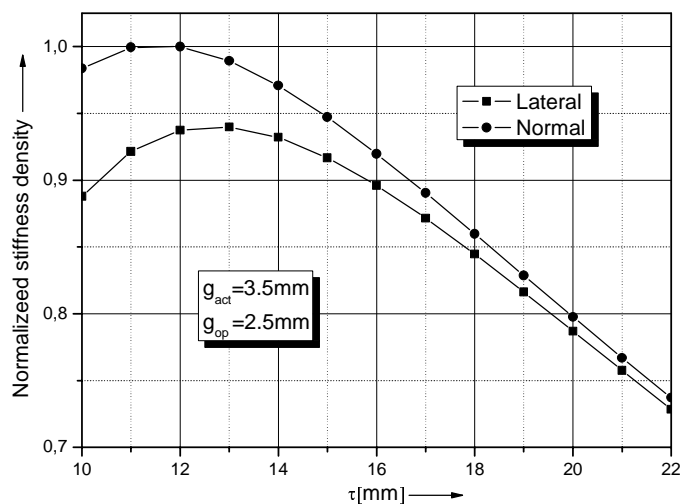


Bild 2.11 Normierte Steifigkeitsdichten (lateral und normal) eines kartesischen Supraleiterlagers mit einer Flusskonzentrations- Erregeranordnung

Als Kompromiss aus den unterschiedlichen Randbedingungen und Zusatzforderungen wurde das in Bild 2.33 gezeigte Erregersystem mit den in Bild 2.12 spezifizierten Abmessungen gebaut.

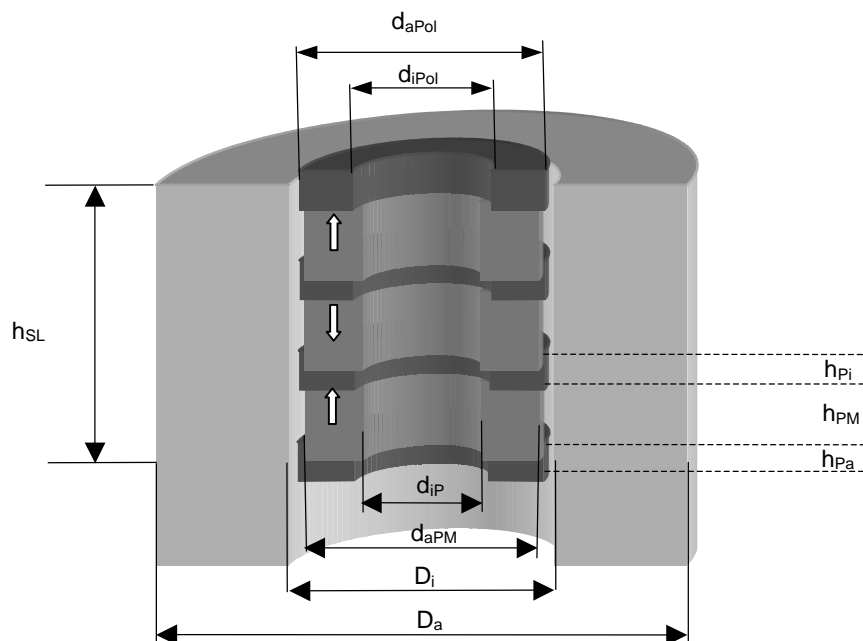


Bild 2.12 Abmessungen des Erregersystems des verwendeten Magnetlagers. (Schematische Zeichnung. Das Erregersystem (Bild 2.33) hat tatsächlich 6 Magnetringe und 7 Eisenpole)

Magnetringe (6): d_{iPM} : 56 mm, d_{aPM} : 82 mm, h_{PM} : 16 mm

Magnetpole (7): d_{iPol} : 56 mm, d_{aPol} : 82 mm, h_{Pi} : 4 mm, h_{Pa} : 4 mm

2.1.2.2 Bau und Validierung des Magnetlagers

Zur Validierung der Berechnungen wurden zwei Magnetlager gebaut (Bild 2.13), welche jeweils aus den auf einer Welle montierten Erregersystemen (Bild 2.33) und zwei Dewars bestanden. Innerhalb des Dewars (Bild 2.13, Bild 2.16) waren die durch eine Multiseed-technik als Ringe gefertigten Supraleiter (Bild 2.14) in die Bohrung eines Kupferkaltkopfes (Bild 2.15) geklebt.

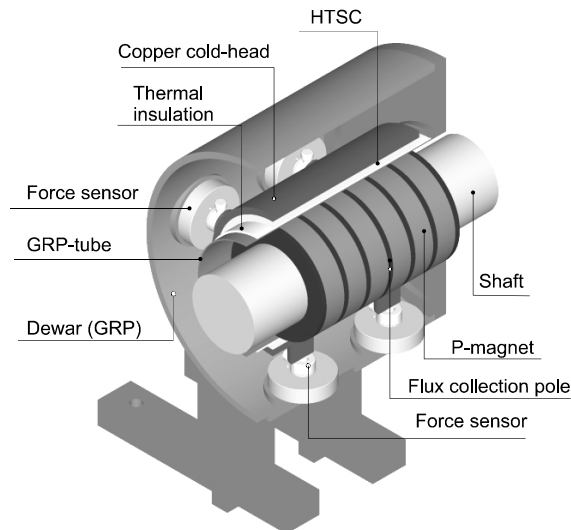


Bild 2.13 Gesamtaufbau eines supraleitenden Magnetlagers mit einer Flusskonzentrations-Erregeranordnung. Das Erregersystem befindet sich in der Warmbohrung des Dewars. Die Supraleiter sind innerhalb des Dewars in eine Kupferhülse geklebt, die ihrerseits über Kraftmessdosen mit der Außenwand verbunden ist

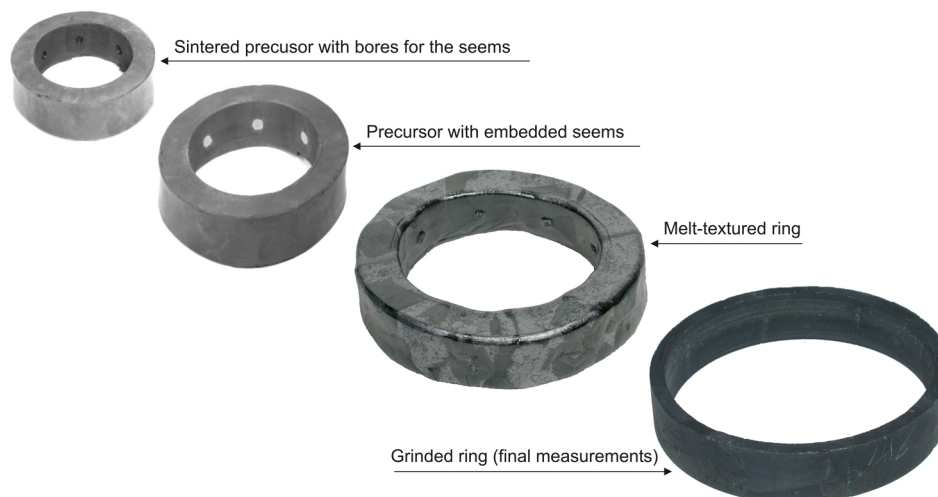


Bild 2.14 Einzelschritte zur Herstellung von supraleitenden Ringen, wie sie für Radiallager benötigt werden.



Bild 2.15 Kupferhülse mit integrierten Supraleiterringen



Bild 2.16 Partiiell geöffnetes Dewar mit Kupferhülse und Superisolation zur thermischen Entkopplung von der Umwelt. Rechts hinten ist der Wellschlauch zu sehen, in dem der vakuumisolierte Kupferstab vom Kaltkopf der Supraleiterummantelung zum Cryocooler verläuft.

Zur Ermittlung der statischen radialen und axialen Kräfte und der entsprechenden Steifigkeiten wurde das Dewar auf einen Messtisch montiert und das Erregersystem konnte mit Hilfe des 3D-Messkopfes innerhalb der Warmbohrung des Dewar verschoben werden

(Bild 2.17). Zur Kraftmessung war das Erregersystem über einem 3D-Piezosensor mit dem Messkopf verbunden.

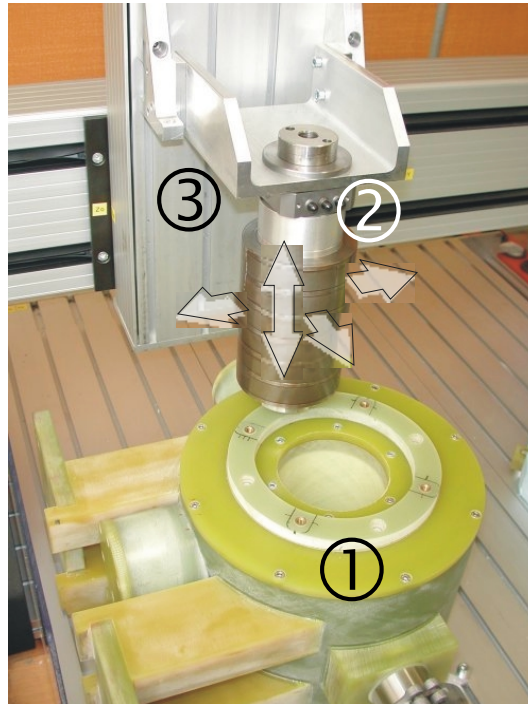


Bild 2.17 Aufbau zur Kraftmessung des supraleitenden Magnetlagers auf dem 3-D Messtisch (3).

- 1) Dewar mit integrierten Supraleitern.
- 2) 3D piezoelektrischer Kraftaufnehmer.

Nach diesen Messungen der statischen Lagereigenschaften konnte der dynamische Teststand gemäß (Bild 2.8) gefertigt werden. Abweichend von dieser Prinzipskizze wurde jedoch ein Aufbau (Bild 2.18) gewählt, bei dem auf beiden Enden der Welle Radiallager zur Unterstützung vorgesehen waren. Es wurde auf die Untersuchung des auf der linken Wellenseite von Bild 2.8 dargestellten Axiallagers verzichtet, da im Gehäuse der Turbomaschine hierfür nicht genug Bauraum (Querschnittsfläche) zur Verfügung steht.

Mit den umfangreichen Messungen an diesem Prüfstand mit dynamischen Störkraftaufschaltungen konnten zwar die berechneten Eigenschaften nachgewiesen werden, der konzeptionelle Nachteil von supraleitenden Magnetlagern mit starrer Geometrie der Lagerschalen zwang jedoch zu einem vollkommen Redesign des Lageraufbaus. Wie bereits oben erwähnt, weisen SMBs – wie auch viele konventionelle Wälzlager – bessere Trageigenschaften in axialer Richtung auf als in radialer Richtung.

Obgleich SMBs gegenüber Wälzlagern noch den prinzipbedingten Vorteil aufweisen, dass sowohl die obere Halbschale in Form von Zugkräften als auch die untere Halbschale in Form von Druckkräften die Welle in der Schwebe zu halten versuchen, ist die Steifigkeit jedoch zu gering, um mit einer radialen Verschiebung innerhalb der Warmbohrung größere Gewichtslasten zu kompensieren. Da eine für die Magnetlagerung vorteilhafte vertikale Ausrichtung der Welle für die vorgesehenen Turbomaschinen eine zu große Einschränkung bedeutet hätte, wurde die in Kapitel 2.3 beschriebene Magnetlagerausführung mit beweglichen Halbschalen entwickelt und untersucht.

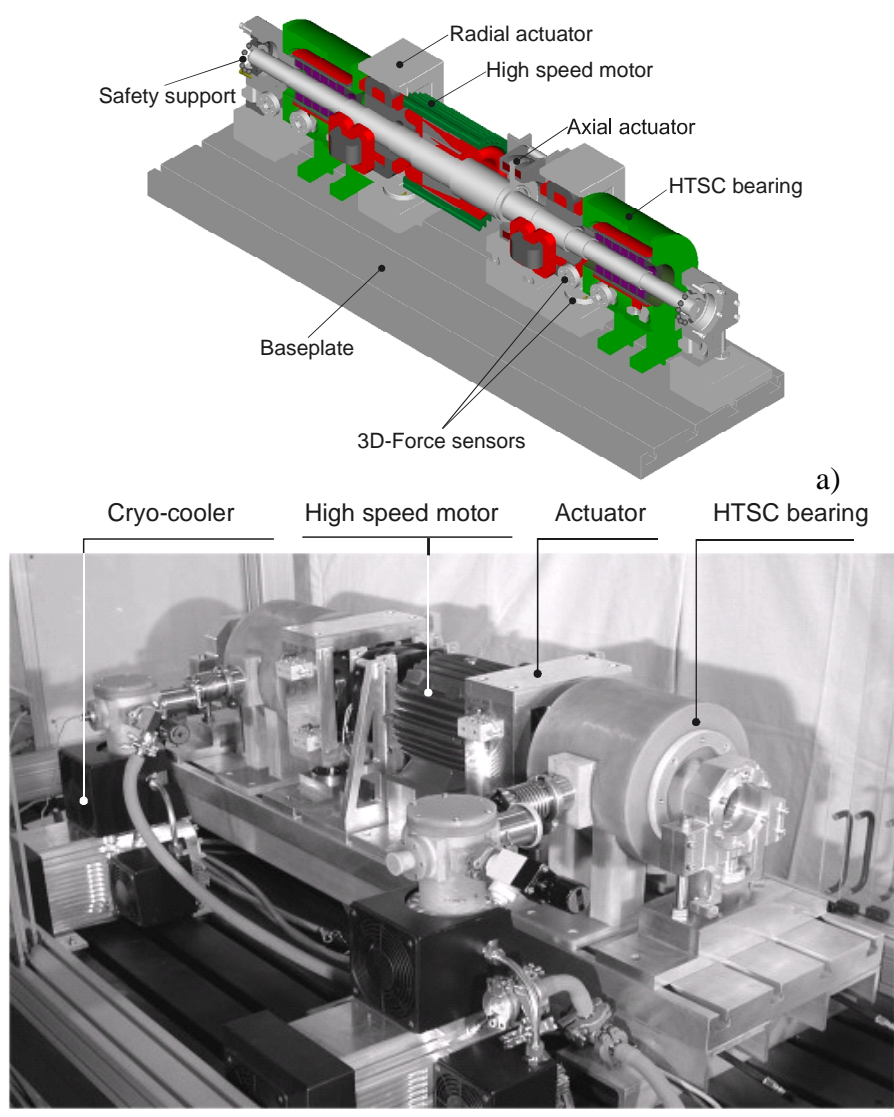


Bild 2.18 a+b) Aufbau zur Messung des dynamischen Verhaltens der supraleitenden Magnetlager. Die Welle kann über den High Speed Motor bis zu einer Drehzahl von 10000 Umin^{-1} angetrieben werden. Weiterhin können die Lager bei jeder Drehzahl durch magnetische Aktuatoren in einem weiten Frequenzbereich axial und radial belastet werden.

2.2 Lagerauslegung

Es wird ein Rechenalgorithmus aufgebaut, der die Dimensionierung eines supraleitenden Lagers mit geteilten Lagerschalen gestattet. Mit Hilfe analytischer Gleichungen, die sich auf Messwerten abstützen, werden einfach zu handhabende Beziehungen zur überschlägigen Dimensionierung angegeben.

2.2.1 Ermittlung der Lagersteifigkeit

Im Gleichgewichtszustand kompensieren sich alle am Lager angreifenden Kräfte, die Welle befindet sich in der Bohrungsmitte. Bei Störkräften wird die Welle ausgelenkt und es treten Rückstellkräfte aufgrund der Wirkung der Supraleiter auf, die zu einem neuen Gleichgewichtszustand führen. Für die Analyse des Betriebs und die Lagerauslegung ist die Ermittlung der Lagersteifigkeit im Arbeitspunkt somit die wichtigste Aufgabe. Die allgemeine (dynamische) Steifigkeit eines Lagers wird mit Hilfe der komplexen Rechnung (Fourier Transformation) aus der Bewegungsgleichung für Massenkrafterregung ermittelt und ist eine frequenzabhängige, komplexe Größe. Sie deckt naturgemäß auch den Arbeitspunkt mit Frequenz $f = 0$ ab, ist also allgemeingültig. Für die Lagerdimensionierung ist es jedoch einfacher, statische und dynamische Steifigkeit zu trennen.

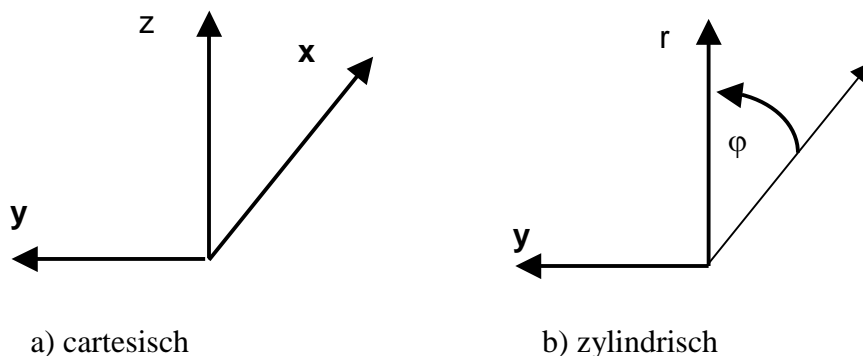


Bild 2.19 Koordinatensysteme am Lager, x bzw. φ in Bewegungsrichtung

In die dynamische Steifigkeit gehen die Unwuchterregung und weitere frequenzabhängige Kräfte ein, während für die statische Steifigkeit nur die Kräfte maßgeblich sind, die bereits bei $n = 0$ auftreten, z. B. das Rotorgewicht und die aus dem einseitigen magnetischen Zug elektrischer Maschinen resultierenden Exzentrizitätskräfte.

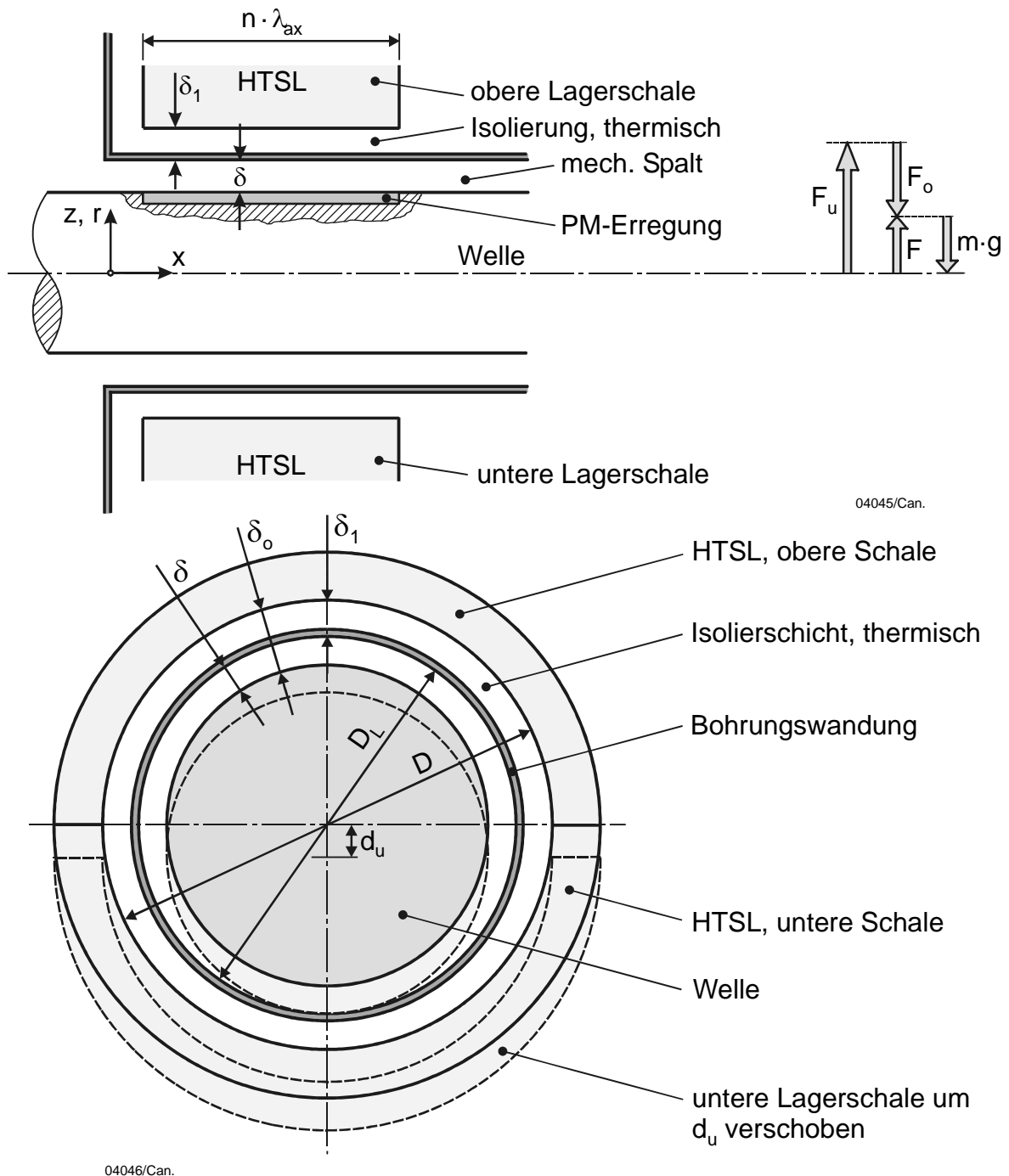


Bild 2.20 Abmessungen und Kräfte am Lager, Gleichgewichtszustand

Weitere Störgrößen können sich aus Stillstandserschütterungen und seismischen Lasten ergeben, auch diese sind i. w. für die dynamische Steifigkeit relevant, allerdings nun als Fußpunkterregung.

Die erforderliche statische Steifigkeit folgt aus der gewünschten statischen Einfederung s_{\max} des Lagers unter Gewichtslast und sonstigen statischen Lasten, $F_{s,\text{rad}}$ sowie der negativen Steifigkeit c_{ex} aus den magnetischen Exzentrizitätskräften elektrischer Maschinen:

$$(c_r + c_{ex})s_{\max} = F_{s,rad} \quad (2.1)$$

$$c_r = \frac{F_{s,rad}}{s_{\max}} - c_{ex} \quad (2.2)$$

2.2.2 Lagerabmessungen

Die Festlegung der Abmessungen ist ein iterativer Prozess, da in die Dimensionierung des Lagers in hohem Maße das Aktivierungsverfahren mit eingeht. In der Praxis relevante Aktivierungsverfahren sind OFC/OFCo und MFC (Operational Field Cooling/ OFC with Off-set, Maximum Field Cooling). Das letztere geht praktisch in eine OFCo Aktivierung über, wenn zwischen Rotor und Supraleiter bei der Aktivierung noch ein nennenswerter Spalt infolge Isolierung und Wandstärke der Warmbohrung liegt.

OFC: Hierfür wurden im Projekt eine Reihe von Standardmessungen an Elementaranordnungen durchgeführt. Die Werte gelten für das beschriebene Aktivierungsverfahren, die angegebene Temperatur und eine Remanenz der Erregermagnete von $B_r = 1.3 \text{ T}$. Für kleine Auslenkungen um den Arbeitspunkt ergibt sich die spezifische Steifigkeit eines Elementarlagers für einen Nennspalt von 2.5 mm gemäß **Tabelle 2.6**.

Analog zu [1] werden die Lagerabmessungen für diskrete Formkörperabmessungen der HTSL Elemente bestimmt. Dabei wird – praxiskonform- stets eine große Zahl von Polteilungen des Erregersystems vorausgesetzt, so dass der Einfluss der Polteilungen auf die Tragfähigkeit vernachlässigbar ist (periodische Anordnung).

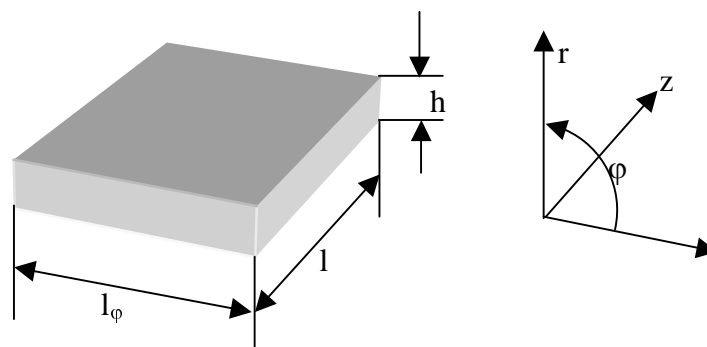


Bild 2.21 Abmessungen des HTSL Formkörpers

Tabelle 2.6: Spezifische Lagersteifigkeiten – gemessen und gerechnet

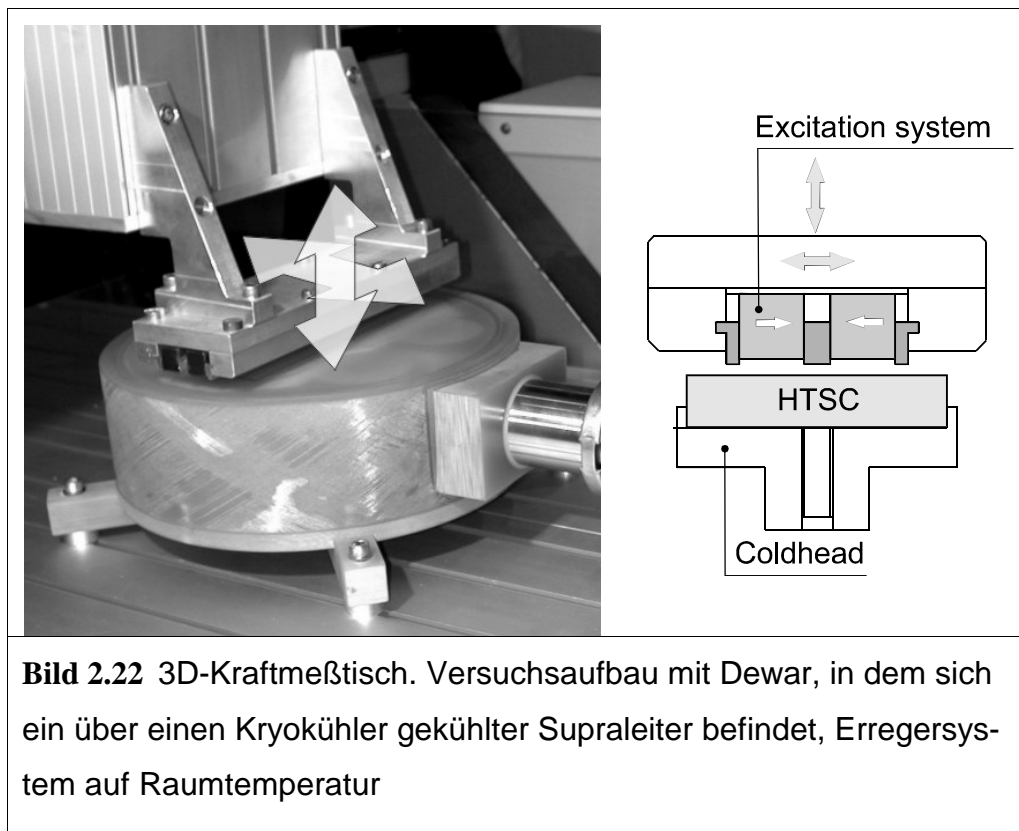
Messung / Maßnahme	Spezifische Steifigk. für 35×35 mm ² Formkörper [N/mm ²]	Cartesische Anordng. Spezifische Steifigkeit bezogen auf die Wirkfläche c_z^z [N/mm ³]		Zylindrische Lager Spezifische Steifigkeit bezogen auf die Wirkfläche c_r^z c_a^z [N/mm ³]	
		radial	axial	radial	axial
ACE Lager Halbschale, gemessen, $B_r=1,27$ T, $\delta = 2,5$ mm, 77 K, $\Delta\delta = 0,25$ mm				$1,6 \cdot 10^{-3}$	
Messungen Siems [1] am Elementarlager , cartesisch, Standardmagnetsystem, $B_r = 1,28$ T, 77K, $\delta = 3$ mm, $\Delta\delta = 0,25$ mm	1,23	$3,5 \cdot 10^{-2}$		$1,76 \cdot 10^{-2}$	
Rechnungen:					
ACE Lager – untere Schale, Polteilung und Poldicke optimiert, $B_r= 1,26$ T, $\delta = 3$ mm – eingefroren bei 6 mm, $\tau_p = 16$ mm, Kraftdichte $f = 9,2 \cdot 10^{-2}$ N/mm ²		$5,2 \cdot 10^{-2} / 2$ für reale Anordnung $2,6 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$ $1,25 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$
ACE Lager , obere Schale, Polteilung und Poldicke optimiert, $B_r= 1,26$ T, $\delta = 3$ mm – eingefroren bei 3 mm, $\tau_p = 16$ mm		$4,4 \cdot 10^{-2} / 2$ für reale Anordnung $2,2 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-2} / 2$ für reale Anordnung $2,4 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$

Hierbei ist zu beachten, dass die Steifigkeiten in radialer und axialer Richtung (meist gegenläufig) vom Einfriermodus abhängen, was bei den Lagern mit verschiebbaren Lager-schalen zur Gewichtskompensation genutzt wird.

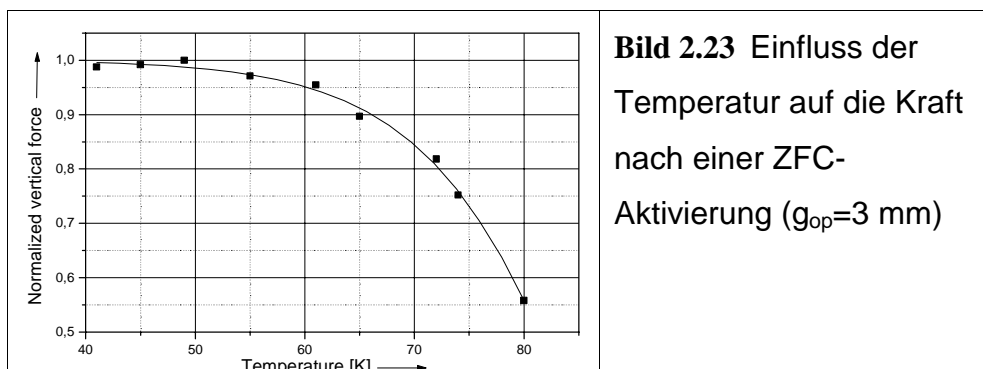
Die gerechneten und gemessenen Daten passen gut zueinander, wenn ein Faktor 2 für den Übergang von der idealen, eindomänigen Probe zum realen dreidimensionalen Supraleiter berücksichtigt wird. Hier ist in etwa auch das durch Materialverbesserung erreichbare Potential beschrieben.

Weiteres Potential ist durch tiefere Temperaturen zu erschließen. Wird die Temperatur des Supraleiters weiter abgesenkt, verschwinden sog. „Weak Links“ in der Kristallstruktur und

das „Fluß-Pinning“ Verhalten wird deutlich besser. Kräfte und Steifigkeiten steigen an. Für YBCO Supraleiter wurden diese Abhängigkeiten durch Modellmessungen bestimmt (Bild 2.22)



Das Erregersystem kann mit Schrittmotoren über der Supraleiteranordnung im Dewar bewegt werden. Der Kaltkopf im Dewar ist über eine Kupfer-Wärmeleitung mit dem Kryokühler verbunden. Für die Kraftmessungen werden die Supraleiter auf die gewünschte Temperatur abgekühlt und über die Piezo - Kraftsensoren am warmen Erregersystem die Kräfte für inkrementelle Verschiebungen gemessen. Die Zunahme der Kraft mit fallender Temperatur ist aus **Bild 2.23** ersichtlich. Gegenüber 77 K ist eine Verbesserung um den Faktor 1,53 bei 40 K möglich.



Eine weitere Steigerung von Tragkraft und Steifigkeit ist möglich, wenn höherremanente Erregersysteme eingesetzt werden. Während hier mit den üblichen Remanenzen moderner NdFeB Magnete von 1,26..1,27 T gerechnet wurde, sind heute Magnete mit Remanenzinduktionen von 1,47 T verfügbar. Die Remanenz des Magneten geht in guter Näherung quadratisch in die spezifischen Daten des Lagers ein, so dass sich hier ein weiteres Potential von 36% erschließt.

Weitere Steigerungsmöglichkeiten wären bei flusskonzentrierenden Erregersystemen, wie sie hier vorliegen, noch durch Abkühlung der Magnete auf Stickstofftemperaturniveau zu erreichen, was bei Luftzerlegungsanlagen evtl. durch einen Bypass des kalten Produktes durch die „Warmbohrung“ erreicht werden könnte, womit gleichzeitig auch die thermische Isolation des Dewars entlastet würde.

Die **spezifischen radialen Steifigkeiten** c_r^z (auf die Wirkfläche des Lagers = HTSL Oberfläche bezogen, für 77 K) sind bei zylindrischen Anordnungen infolge der Integration über den Umfang gerade $\frac{1}{2}$ mal so groß wie bei kartesischen Anordnungen. Die axialen Steifigkeiten der kartesischen und zylindrischen Anordnung sind dagegen gleich.

Weiter kann angenommen werden, dass die radiale Lagercharakteristik im Arbeitspunkt für kleine Auslenkungen ε linear oder leicht progressiv ist:

$$c_r(\varepsilon) = c_{r,0} + a\varepsilon \quad 2.3)$$

Aus der Lageroptimierung folgt die Polteilung des Erregersystems in axialer Richtung, sie sollte in einem ganzzahligen Verhältnis zu den Formkörperabmessungen stehen.

$$l_{axe} = n\tau_p \quad 2.4)$$

Im Allgemeinen besteht das Lager aus zwei Halbschalen mit jeweils gleicher Zahl von Formkörpern in Umfangsrichtung $z_\varphi/2$ und in axialer Richtung z_{ax} , wobei die Halbschalen gegeneinander verfahren werden können, so dass zur Kompensation des Rotorgewichtes die untere Schale in größerem Abstand vom Rotor eingefroren und nach dem Einfrieren nach oben verschoben wird.

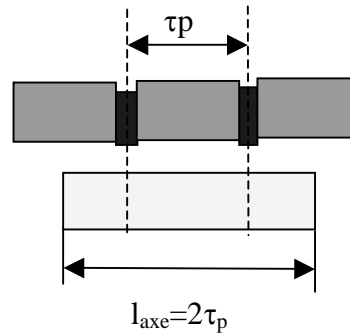


Bild 2.24 : Anpassung der axialen Formkörperlänge an die Erregerpolteilung, hier 2 Polteilungen

Dadurch ergeben sich für die Halbschalen unterschiedliche Steifigkeiten sowohl in radialer als auch in axialer Richtung.

Bei von 77 K abweichenden Temperaturen ist die Steifigkeit um den Temperaturfaktor k_t zu korrigieren (z.B. bei 65 K – $k_t=1,5$).

Als Zwischengröße erhält man die Steifigkeiten k der Halbschalen mit der Länge

$$l_{ax} = n \tau_p z_{ax} = l_{axe} z_{ax} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} k_{r,u}(\varepsilon) &= \pi \cdot R \cdot l_{ax} (c_{r,u}^z + a_u \varepsilon) k_t \\ k_{a,u} &= \pi \cdot R \cdot l_{ax} c_{a,u}^z k_t \\ k_{r,o}(\varepsilon) &= \pi \cdot R \cdot l_{ax} (c_{r,o}^z + a_o \varepsilon) k_t \\ k_{a,o} &= \pi \cdot R \cdot l_{ax} c_{a,o}^z k_t \end{aligned} \quad (2.6)$$

In der Summe müssen Sie die gewünschte Gesamtsteifigkeit c_r , c_a ergeben. Diese errechnet sich aus externen Vorgaben, wie z. B. einer Mindest Eigenfrequenz des Lagers oder den maximal zulässigen Verschiebungen unter statischer Last oder den zulässigen Auslenkungen bei Resonanzdurchfahrt.

$$\begin{aligned} c_r &= \pi \cdot R \cdot l_{ax} (c_{r,u}^z + c_{r,o}^z) \\ c_a &= \pi \cdot R \cdot l_{ax} (c_{a,u}^z + c_{a,o}^z) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Nimmt man eine gegebene axiale Länge an, die meist aus kinematischen Gründen festgelegt wird, ergibt sich der Lagerradius und damit die Zahl der Formkörper am Lagerumfang zu:

$$R_r = \frac{c_r}{\pi \cdot l_{ax} (c_{r,u}^z + c_{r,o}^z)} \quad (2.8)$$

$$R_a = \frac{c_a}{\pi \cdot l_{ax} (c_{a,u}^z + c_{a,o}^z)}$$

Je nach dem, welche Steifigkeit dominant ist, ergibt sich der Lagerradius R zu R_r oder R_a . Anschließend ist der Lagerradius so aufzurunden, dass sich eine gerade Anzahl von Formkörpern am Umfang ergibt:

$$z_\varphi = \text{ceil} \left(\frac{2\pi R_r}{l_\varphi} \right) \quad \text{oder} \quad (2.9)$$

$$z_\varphi = \text{ceil} \left(\frac{2\pi R_a}{l_\varphi} \right)$$

Damit liegen die Lagerabmessungen fest.

2.2.3 Aktivierung des geteilten Lagers

Die Aktivierung des Lagers besteht aus der Fixierung des zu lagernden Körpers in einer gewünschten Position, bis der Supraleiter beim Herunterkühlen die Arbeitstemperatur erreicht hat. Aktivierung und HTSL Lagerung können somit nie getrennt voneinander betrachtet werden. Zu unterscheiden sind die Aktivierungsmodi

OFC: Operational Field Cooling – Der Rotor mit dem Erregersystem befindet sich beim Einkühlen in der Arbeitsposition. Nach der Freigabe verschiebt sich der Rotor um die statische Einfederung aus der Idealposition heraus.

OFCo: Operational Field Cooling mit Offset. Der Rotor ist beim Einkühlen gegenüber der Arbeitsposition um einen Offset verschoben. Dieser Offset wird in vielen Fällen gleich der statischen Einfederung gewählt, so dass der Rotor im Betrieb ungefähr die ideale Lage hat.

MFC: Maximum Field Cooling. Das Erregersystem befindet sich beim Einkühlen in Kontakt mit dem Supraleiter, so dass dieser das maximal mögliche Erregerfeld erfährt.

ZFC: Der Supraleiter wird feldfrei eingekühlt. Erst dann wird der zu lagernde Körper mit dem Erregersystem an den Supraleiter angenähert.

Innerhalb dieser Modi können anwendungsbezogene Aktivierungsverfahren zum Einsatz kommen. Einen Überblick über die möglichen Aktivierungsverfahren gibt **Tabelle 2.2**.

Tabelle 2.2 Übersicht über mögliche Aktivierungsverfahren

Aktivierungsverfahren Aktivierungsmodus	ZFC	OFC/OFCo + MFC
Einbringen des zu lagernden Körpers aus $B_f=0$ extrem große Wege, $x \rightarrow \infty$	Labor, Qualitätskontrolle Stabil nur in einer Richtung	
Verschieben des Rotors im Lager + Eigengewicht (kleine Wege)		MM-Aktuator elektromagnetisch mit Anschlag geregelter Magnet Hydrostatisch Mechanisch (Getriebe, Hebel) mit Servoantrieb Mechanisch (Getriebe, Hebel) mit Servoantrieb
Verschieben geteilter Lagerschalen innerhalb des Dewars Mittlere Wege		
Axial-Verschiebung des Dewars mit konischen Lagerschalen Mittlere Wege,		MM-Aktuator Hydrostatisch Mechanisch (Getriebe, Hebel) mit Servoantrieb

Genauigkeit:

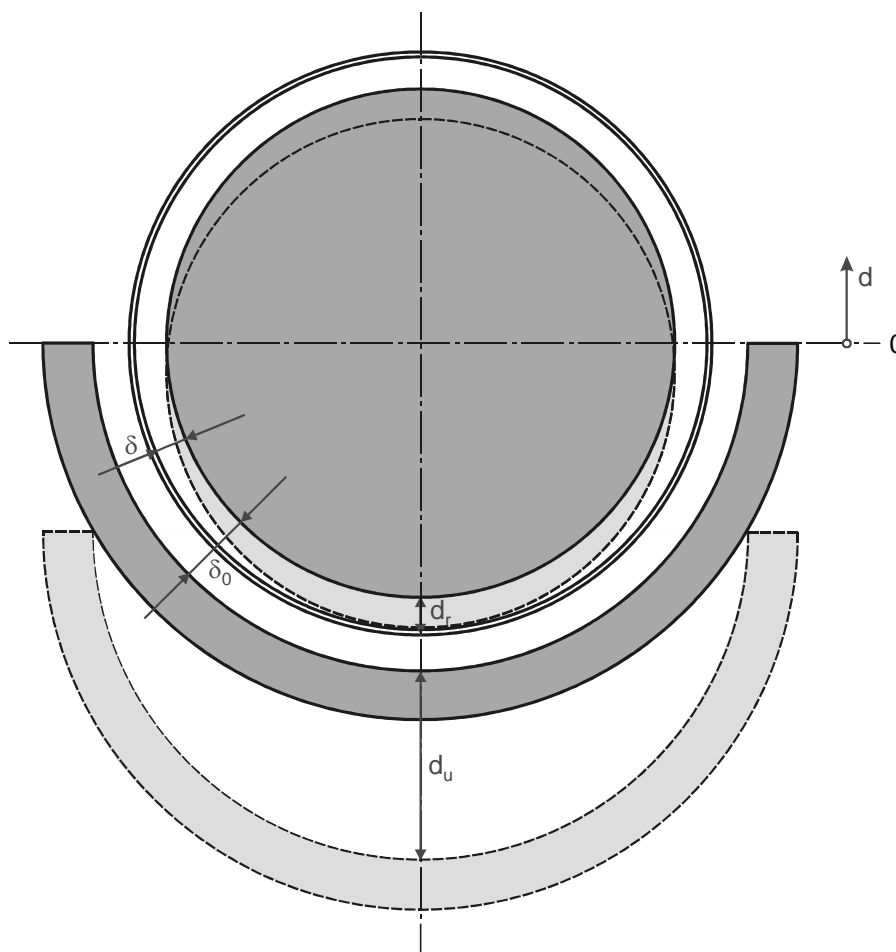
grob

mittel

fein

Der für die meisten praktischen Anwendungen relevante Aktivierungsmodus ist OFC/OFCo. Auch MFC kann gelegentlich angewendet werden, wenn der Mindestabstand zwischen Supraleiter und Erregersystem nicht durch die Wandung einer Warmbohrung und die Isolierung festgelegt ist. Den ZFC Modus findet man bei Labortests, z. B. zur Qualitätskontrolle. Bei praktischen Anwendungen in Lagerungen lassen die hierfür erforderlichen Bewegungsspielräume keine Anwendung zu.

Hier erfolgt die Lageraktivierung gemäß [2] im OFCo Modus, was den Vorteil hat, dass ein wesentlich kleinerer mechanischer Spalt zulässig ist und eine Überdimensionierung des Lagers weitgehend verhindert werden kann. Weiter ist eine genaue Positionierung des Rotors in der Bohrungsmitte möglich, was wiederum bei vielen Maschinen Voraussetzung für einen störungsfreien Betrieb ist.



Bewegung des Rotors : $d_r = \delta$
 Bewegung der Lagerschale : d_u
 Relativbewegung Rotor-Lagerschale : $d_u - d_r$

04122/Can.

Bild 2.25 Verschiebung der unteren Lagerschale zur Aktivierung

Die einfachste Methode zur Aktivierung nach dem in [2] genannten Verfahren ist, mit einer ortsfesten oberen Lagerschale zu arbeiten und den Rotor im tiefsten Punkt der Lagerbohrung abzulegen. Durch Heranfahren der unteren Lagerschale um den Weg d_u wird der Rotor angehoben und das Lager gleichzeitig vorgespannt (Bild 2.25).

2.2.3.1 Kräfte und Wege bei der Aktivierung

Das Verhalten des Lagers bei der Aktivierung durch Verfahren einer Halbschale wurde experimentell bestimmt (Kap. 2.3.2).

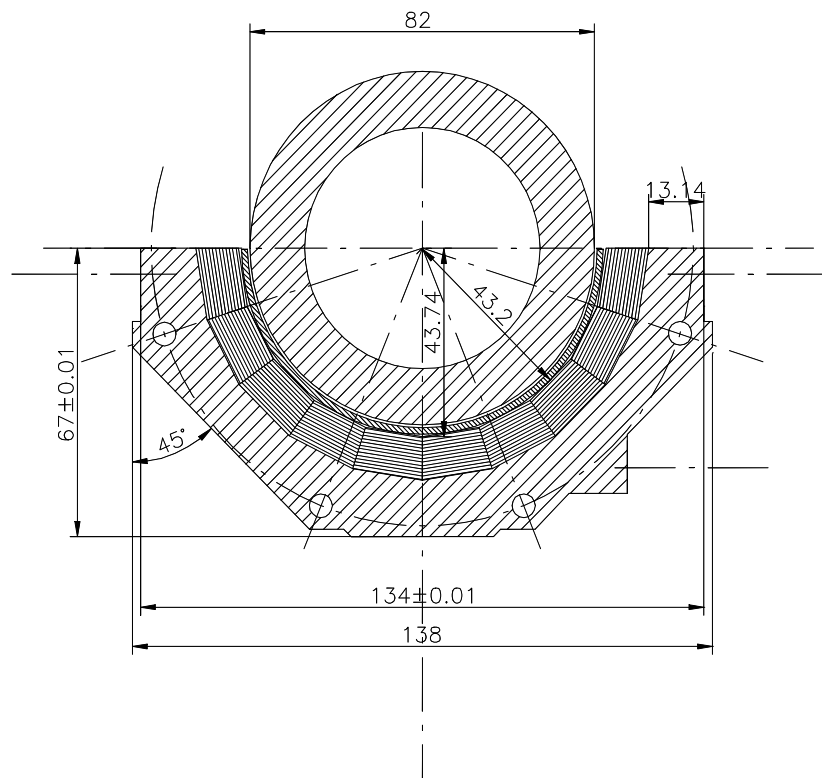


Bild 2.26 Querschnitt durch die Versuchsanordnung zur Kraftmessungen an einer Halbschale

Die Ergebnisse der Messungen dienen zur Sicherung der Datenbasis für die Berechnung des Aktivierungsvorganges.

Bewegung relativ zur unteren Schale: Der Weg der unteren Schale relativ zum Rotor beträgt

$$\varepsilon_u = d_{u0} - d_r \quad (2.10)$$

Aus den in Bild 2.42 dargestellten Messwerten lässt sich die auf die Lagerfläche bezogene spezifische Tragkraft als Funktion des Einfrierabstandes mit Hilfe der Regressionsrechnung darstellen.

$$f_u = \left(a_0 \ln \left(\frac{\varepsilon_u}{mm} \right) + a_1 \right) \frac{N}{mm^2} \quad (2.11)$$

Mit den Parametern

$$a_0 = 0,015 \quad \text{und}$$

$$a_1 = 6,325 \cdot 10^{-3}$$

Die Gesamtkraft ergibt sich dann durch Multiplikation mit der Lagerfläche zu:

$$F_u = \frac{D}{2} \pi \cdot l_{ax} \cdot f_u \quad (2.12)$$

Bewegung relativ zur oberen Schale:

Liegt der Rotor bei der Aktivierung im oberen Scheitelpunkt des Lagers, bewegt er sich um den Luftspalt nach unten, der Weg relativ zur oberen Schale ist

$$\varepsilon_o = \delta \quad (2.13)$$

Die auf die Lagerfläche bezogene Kraft als Funktion des Einfrierabstandes findet man mit

$$f_o = \left(b_0 \left(\frac{\varepsilon_o}{mm} \right)^{b_1} + b_2 \right) \frac{n}{mm^2} \quad (2.14)$$

Mit den Parametern

$$b_0 = -7,78 \cdot 10^{-3}$$

$$b_1 = 0,6$$

$$b_2 = 1,79 \cdot 10^{-4}$$

Die Gesamtkraft der oberen Schale ist dann

$$F_o = \frac{D}{2} \pi \cdot l_{ax} f_o \quad .15)$$

Die Gesamtkraft auf den Rotor infolge des Einfriervorganges ist

$$F = F_u - F_o \quad (2.16)$$

und sollte gleich dem Eigengewicht des Rotors zuzüglich einer evtl. statischen Zusatzlast sein

2.3 Aufbau des Versuchslagers

Mit dem Versuchslager sollte die Funktion einer Lagereinheit mit beweglichen Halbschalen für eine rotierende Anordnung nachgewiesen werden.

2.3.1 Konstruktion und Fertigung

Die Konstruktion (Bild 2.27) zeigt den Aufbau des Versuchslagers. Im Innern befindet sich der Rotor mit aufgesetztem Erregersystem. Daran schließt sich ein schmaler Luftspalt an, der radial nach außen an einem Tubus endet. Dieser Tubus ist die Durchführung des Rotors durch den Vakuumbehälter, welcher die HTSL-Segmente, die Wärmeleiter und die Isolation umfasst.

Die Bauweise des HTSL-Lagers ist in einen Kalt- und einen Warmbereich gegliedert. Während sich im Warmbereich der Rotor befindet, sind im Kaltbereich die Supraleiter über einer Folienisolation (auf einem dünnwandigen Tubus) um den Rotor herum in einem Vakuumbehälter angeordnet und über thermische Isolationsträger mit der Gehäusewand verbunden.

Zum Aktivieren des Lagers ist eine verschiebbare untere Halbschale vorgesehen. Den Aufbau des Stators zeigt Bild 2.28. Die supraleitenden Elemente sind segmentiert und ringförmig in Kupferhalbschalen angeordnet, welche axial verspannt werden. Das Kupfer dient der Kühlung und der mechanischen Stabilisierung und Verbindung der Supraleiter.

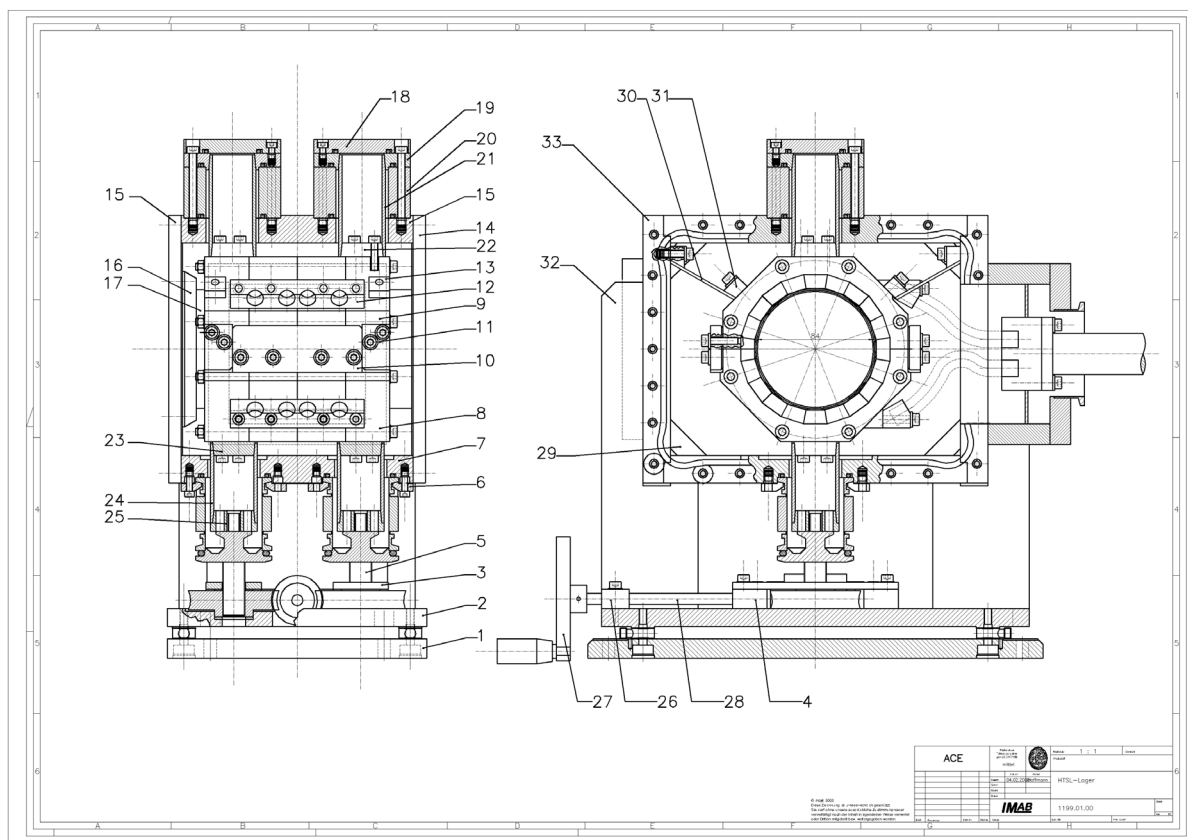


Bild 2.27 Konstruktionsansicht des HTSL-Lagers mit beweglichen Lagerschalen

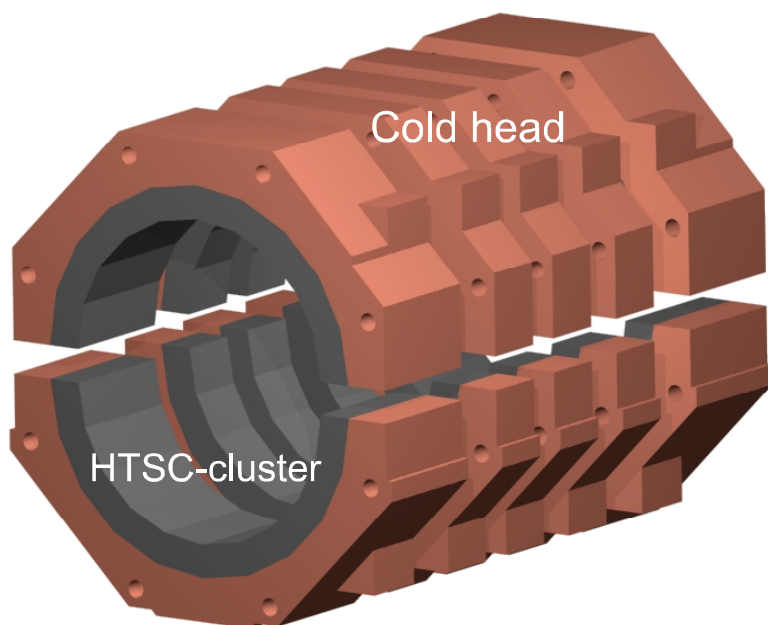


Bild 2.28 Ansicht der HTSL-Elemente mit zugehörigen Kupfer-Halbschalen

Zur Überprüfung der Fertigungstechnik und der Fügetechnik der Supraleiter-Segmente in Bezug auf die Kupferhalbschalen wurden zunächst Aluminium-Vormodelle gebaut (Bild 2.29).

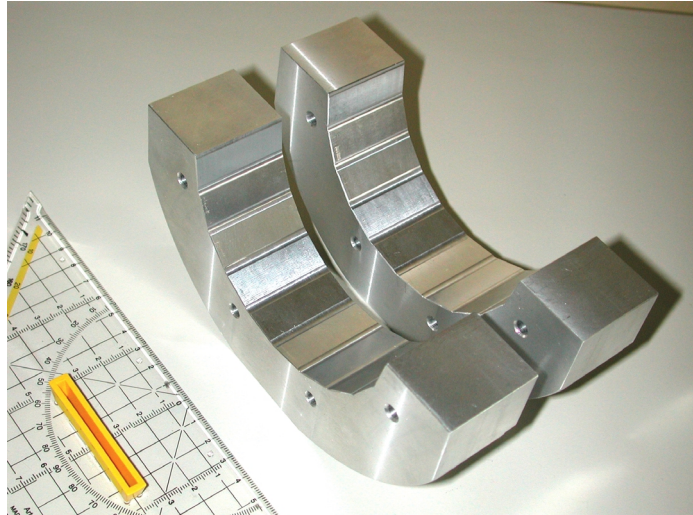


Bild 2.29 Aluminium-Vormodelle der Cu-Halbschalen

Nach Abschluss dieser Voruntersuchung wurde der Kupferträger für die geschliffenen HTSL-Segmente gefertigt (Bild 2.30). Den fertigen Aufbau einer Halbschale zeigt Bild 2.31.

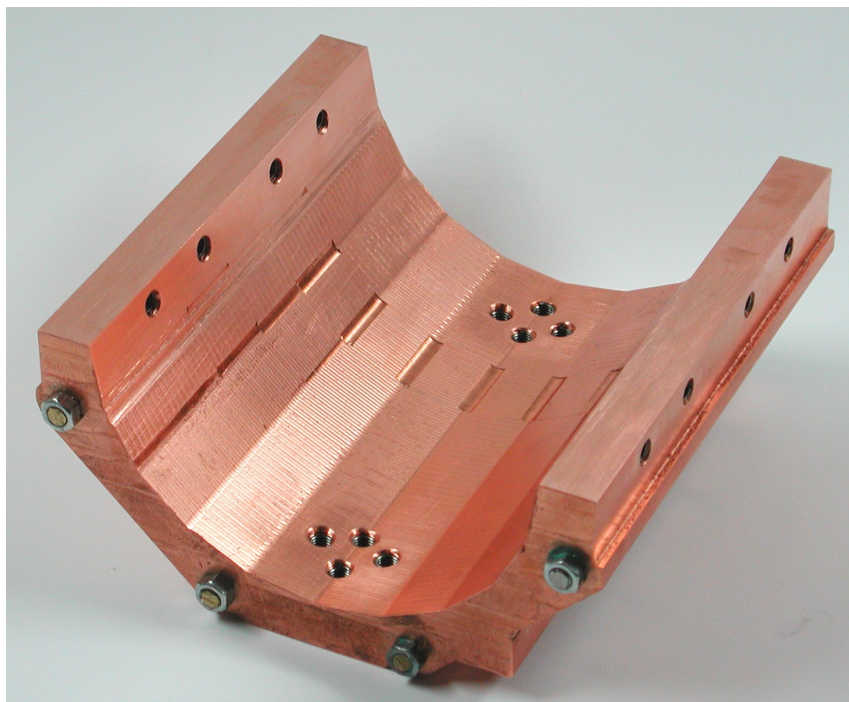


Bild 2.30 Diese Kupferhalbschale dient als Träger der Supraleitersegmente

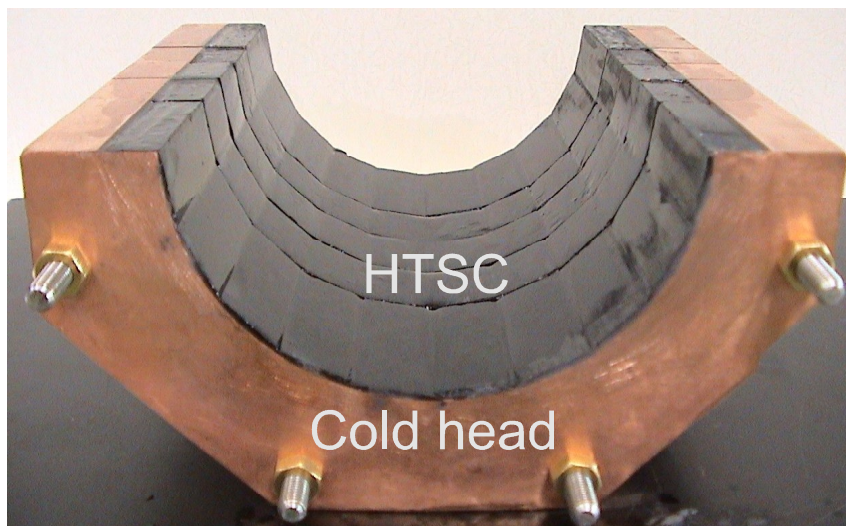
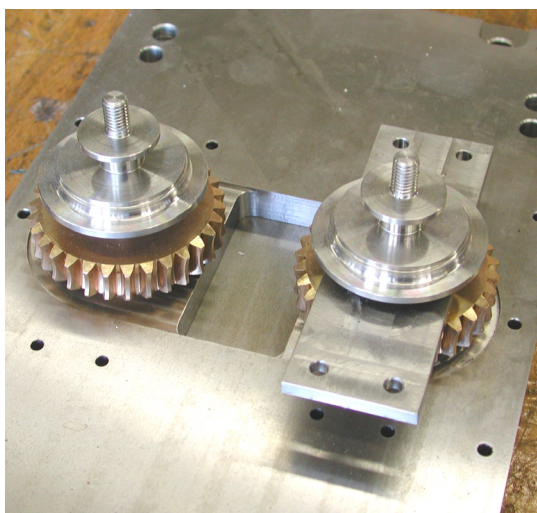
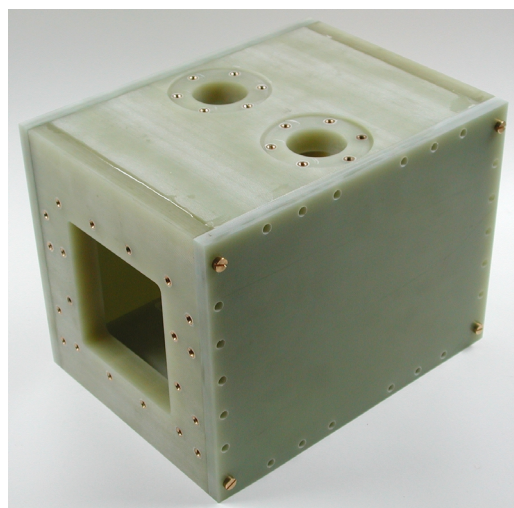


Bild 2.31 Kupferhalbschale mit eingefügten HTSL-Segmenten



a)



b)

Bild 2.32 Mechanische Elemente des Magnetlagers mit verstellbarer Supraleiter-Halbschale;
 a) Verstellmechanismus (Schneckenantrieb);
 b) Gehäuse des Dewar (GFK, noch ohne Tubusbohrung)

Des Weiteren wurden Komponenten des Gehäuses und der Verstellung gefertigt, die das Lager komplettieren (Bild 2.32)

Das Erregersystem mit ringförmigen Magneten und Eisenpolen ist in Bild 2.33 dargestellt.

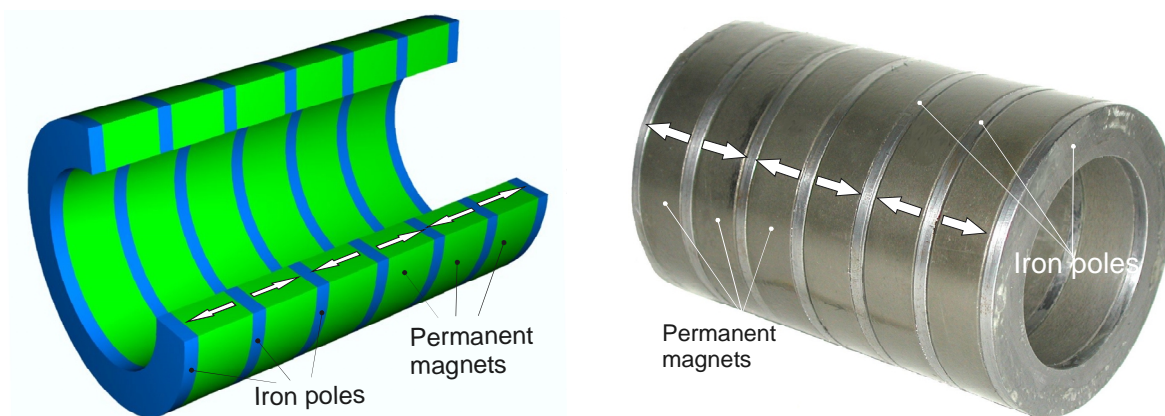


Bild 2.33 7-poliges Erregersystem als Flusskonzentrationsanordnung. Die Pfeile geben die Magnetisierungsrichtungen der Magnetringe zwischen den ferromagnetischen Fluss-Sammelpolen an

2.3.1.1 Supraleiteranordnung

Da die Supraleiterfertigung eine Streubreite der Kräfte der einzelnen Elemente zulässt, ist es für eine gleichmäßige und richtungsunabhängige Steifigkeit des Lagers von großer Bedeutung, dass die Supraleiter kraftgerecht auf dem Umfang der Halbschalen angeordnet werden. Daher wurde eine Sortierung der HTSL-Elemente (Bild 2.34, Bild 2.35) vorgenommen,

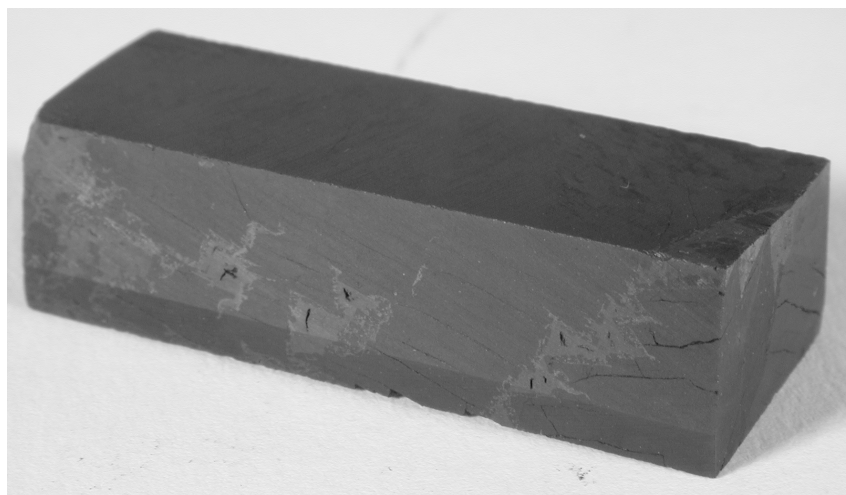


Bild 2.34 Zum Einbau vorbereitetes HTSL-Segment

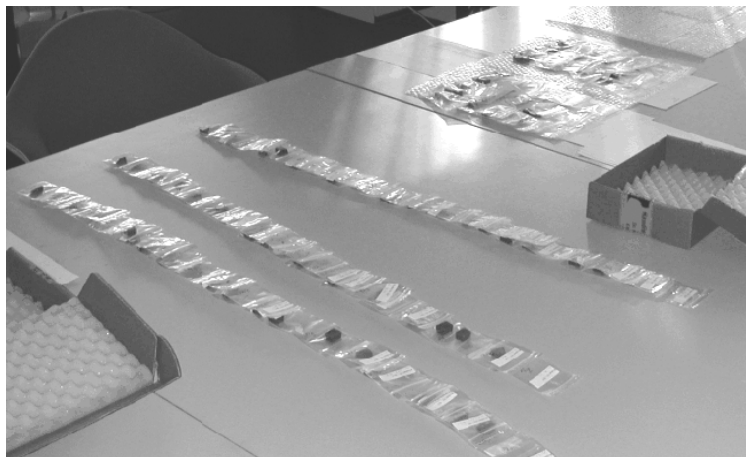


Bild 2.35 Klassifizierung und Sortierung der HTSL-Segmente

die in Verbindung mit einer Berechnung der resultierenden Steifigkeit zu einer angepassten Verteilung der Supraleiter führte. Als Resultat ergab sich eine gleichmäßige Verteilung der Steifigkeiten bezogen auf die Auslenkungsrichtung (Bild 2.36)

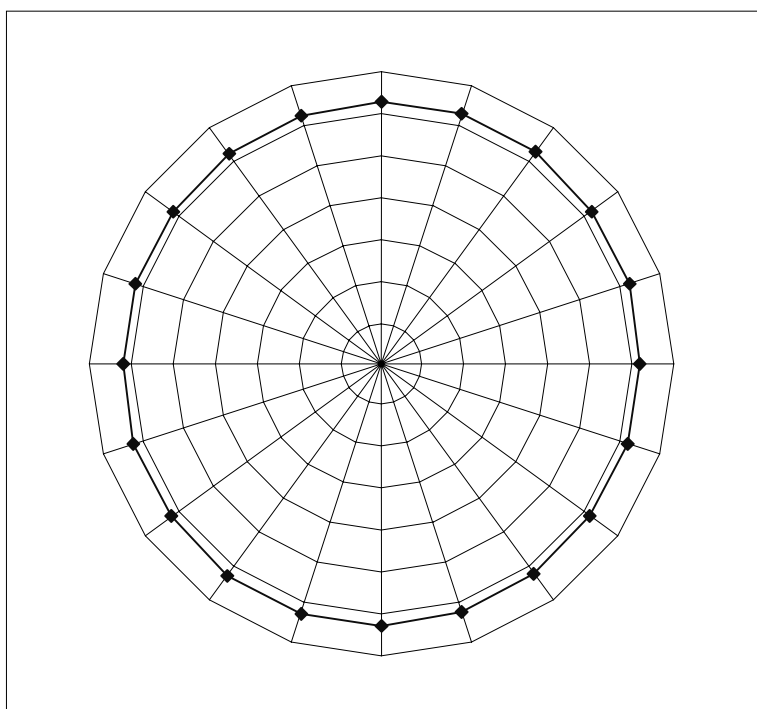


Bild 2.36 Kräfte über dem Umfang (Umfang: Position der SL, Radius: Kraft; basierend auf ZFC-Messung)

2.3.1.2 Versuchsumfeld, Kryotechnik, Vakuum, Sensorik, Erregersystem

Das Versuchsumfeld beinhaltet Kryotechnik (Leybold COOLPAK 4000 mit RGS 120), Tieftemperatur-Temperaturmessung, Vakuumtechnik (Leybold Turbo-Molekularpumpe TURBOVAC TW 300 und Kreiskolbenpumpe TRIVAC), Vakuummessung (Leybold COMBIVAC).

2.3.1.3 Aktivierung

Für die hier vorliegende Aufgabe, einen Rotor innerhalb enger Toleranzen in einer Warmbohrung mit kleinem Luftspalt zu positionieren, kommt nur ein OFC/OFCo Modus mit dem Verfahren der bewegten Lagerschalen in Frage [2]. Damit sind – über die in gewissen Grenzen frei wählbaren Verschiebewege der Lagerschalen – eine Gewichtskompensation des Rotors und eine hinreichend genaue Positionierung in der Lagerbohrung möglich.

Die praktische Ausführung für die Versuchsanordnung ist im Folgenden veranschaulicht (vgl. a. Konstruktionsbeschreibung):

Wie die Untersuchungen zeigten, genügt es, zur Kompensation des Eigengewichts die untere Halbschale des Versuchslagers beim Aktivieren des Lagers vertikal mit Hilfe des Verstellmechanismus zu verfahren.

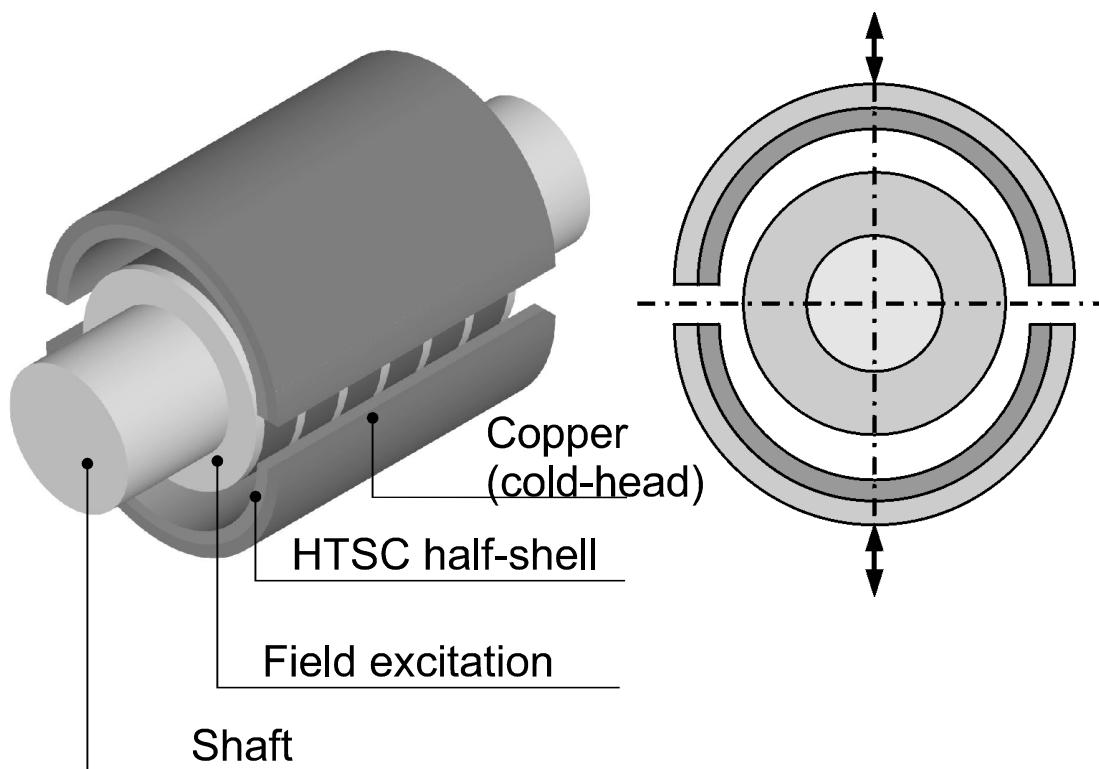


Bild 2.37 Geteilte und vertikal verschiebbare Anordnung der HTSL Schalen

2.3.2 Messungen

2.3.2.1 An Halbschale

Der Messaufbau setzt sich aus einem 3D-Tisch mit Steuerung und dem HTSL-Prüfling mit an der Z-Achse des 3D-Tisches angebrachtem Erregersystem zusammen.

Vermessen wird die obere Lagerschale des supraleitenden Lagers. Diese ist in einem Novotex-Behälter, der mit flüssigem Stickstoff (LN_2) befüllt wird, befestigt (Bild 2.38).

Zum thermischen Schutz des Erregersystems vor dem flüssigen Stickstoff ist eine GFK-Wanne auf die HTSL-Halbschale gesetzt.

Das System wird durch Verfahren des Erregersystems mit kraftüberwachtem Antasten eingerichtet.

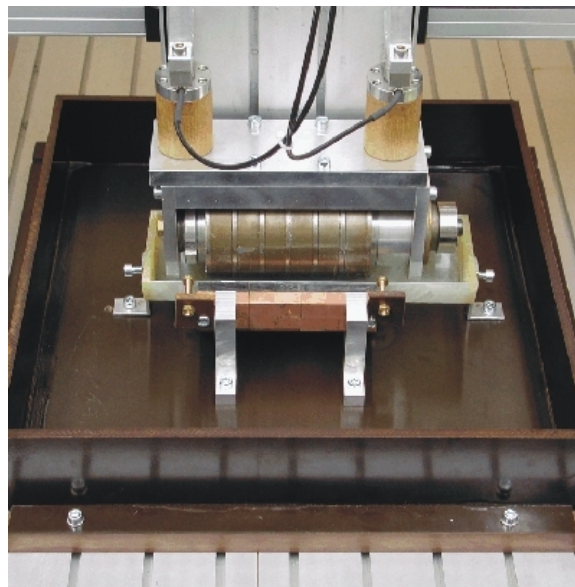


Bild 2.38 Versuchsaufbau zur Bestimmung der radialen axialen Kräfte und Steifigkeiten einer Supraleiterhalbschale. Die einzelnen Komponenten dieses Aufbaus sind in Bild 2.40 beschrieben

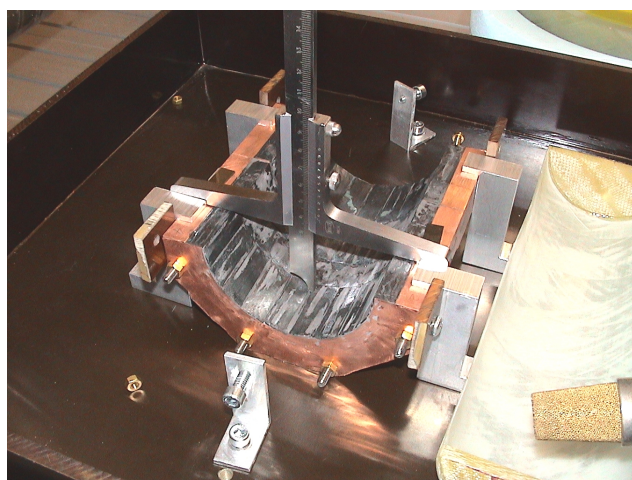


Bild 2.39 Arbeiten an der Supraleiterhalbschale zur exakten achsenparallelen Ausrichtung zum Erregersystem

Das Erregersystem der Versuchsanlage ist zur Untersuchung der Steifigkeit einer HTSL-Halbschale an der Z-Achse des 3D-Messtischs angebracht (Bild 2.40). Piezo-Kraftaufnehmer befinden sich zwischen Erregersystem und Z-Achse.

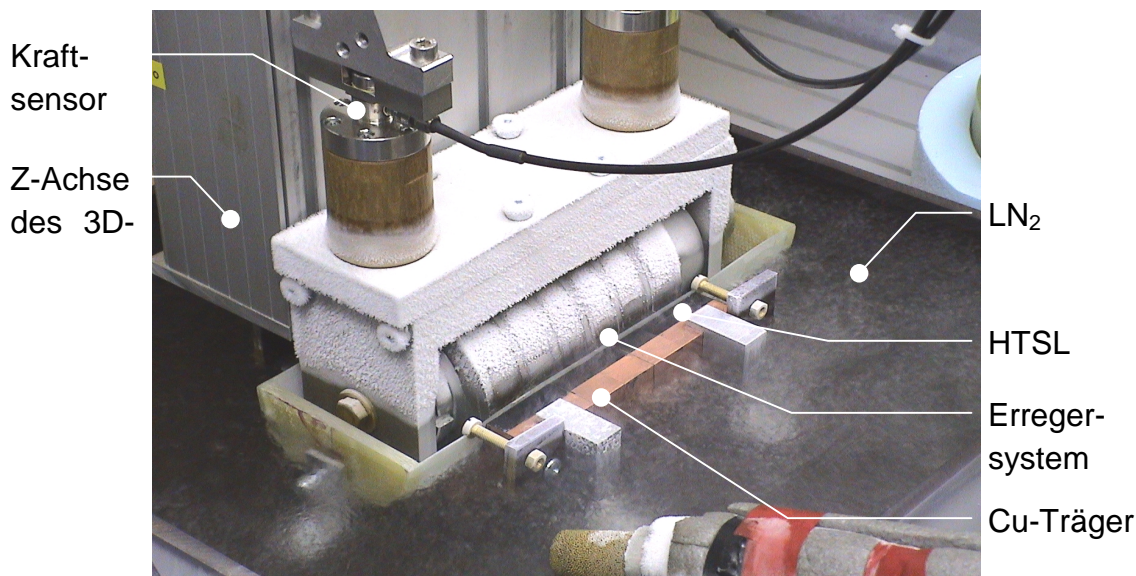


Bild 2.40 Kraftmessungen an einer Supraleiterhalbschale. Diese befindet sich in einem LN₂-Bad, von dem das Erregersystem durch eine Wanne thermisch isoliert ist.

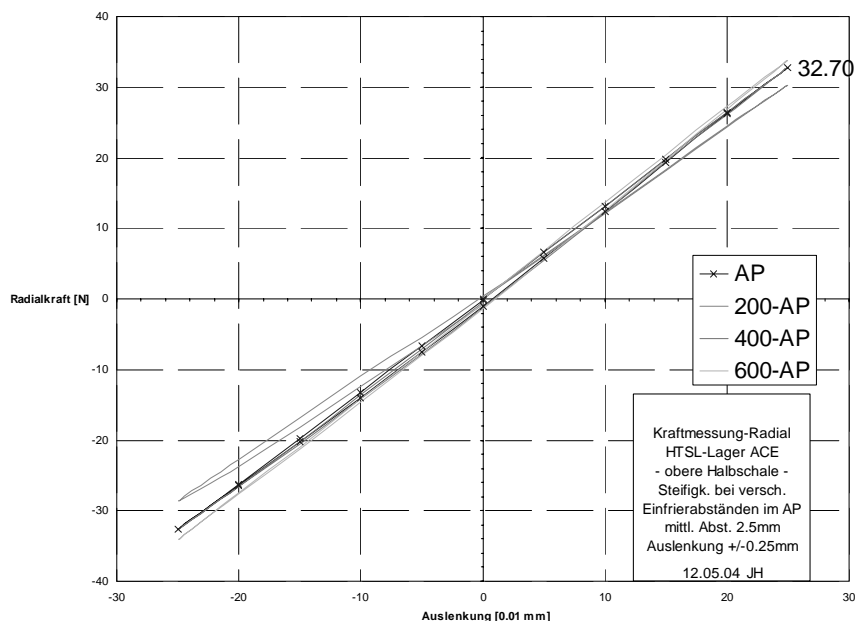


Bild 2.41 Mit dem Messaufbau gemäß Bild 2.40 ermittelte Kraft-Weg-Diagramme für unterschiedliche Einfrierabstände. Der Arbeitsluftspalt ist für jede Messung $g_{op} = 2.5 \text{ mm}$, in den das Erregersystem aus verschiedenen Aktivierungsluftspalten g_{act} verschoben wird. Es sind die Kraftänderungen bei Auslenkung aus der Arbeitsposition dargestellt.

Zur Überprüfung der Steifigkeit in Abhängigkeit des Einfrierabstands wurden verschiedene Messungen durchgeführt Bild 2.41. Für den Arbeitspunkt ergibt sich, hochgerechnet auf das gesamte Lager, eine Steifigkeit von 262 N/mm.

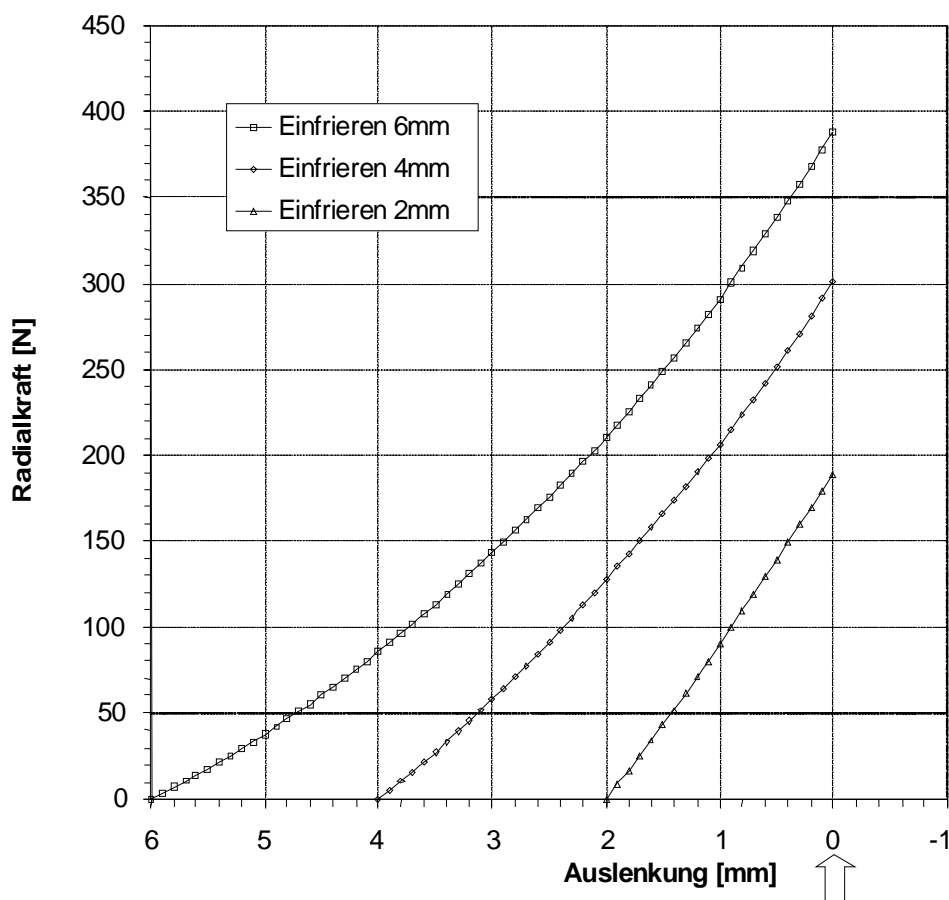


Bild 2.42 Resultierende Vertikalkräfte beim radialen Heranfahren des Erregersystems an den Arbeitspunkt ($g_{op} = 2.5$ mm oberhalb der Supraleiterhalb-schale) aus verschiedenen Einfrierabständen. Zur besseren Kennzeichnung der Verfahrswege ist der mit einem Pfeil versehene Arbeitspunkt als Referenzpunkt mit 0 gekennzeichnet.

Neben den Steifigkeiten im Arbeitspunkt, welche für die Rotordynamik verantwortlich sind, muss noch der untere Aktivierungsabstand g_{act} bestimmt werden. Dieser ist so zu wählen, dass die gesamte zu unterstützende Masse nach Verschieben in den Arbeitspunkt so kompensiert wird, dass anschließend die Welle exakt in der vorgegebenen Rotationsachse verbleibt. Hierzu wurde die Kraftmessung durchgeführt, bei dem das Erregersystem in einem Abstand von 6 mm von dem Arbeitsluftspalt (hier $g_{op} = 2,5$ mm), d.h. insgesamt im Abstand von 8,5 mm vom Supraleiter eingefroren und anschließend in diesen Arbeitsluftspalt verfahren wurde. Die gleichen Messungen wurden für Abstände von 4 und zwei mm vom Arbeitsluftspalt durchgeführt. Aus den in Bild 2.42 dargestellten Kraftverläufen kann

durch Interpolation der genaue Verfahrweg bestimmt werden, um genau im Arbeitspunkt eine vorgegebene Masse zu lagern.

2.3.2.2 Lager komplett

Basierend auf den die Berechnungen bestätigenden Kraftmessungen an der supraleitenden Halbschale (Bild 2.40) wurden die Supraleiter-Halbschale (Bild 2.31) und weitere Teilkomponenten in den Dewaraufbau (Bild 2.32) integriert und an einen Cryocooler über massive Cu-Leiter angeschlossen. Zur achsenparallelen Radialverschiebung der unteren Supraleiter-Halbschale wurde diese auf Stützen montiert (Bild 2.27), welche ihrerseits über das in Bild 2.32 gezeigte Schneckengetriebe vertikal verschoben werden können.

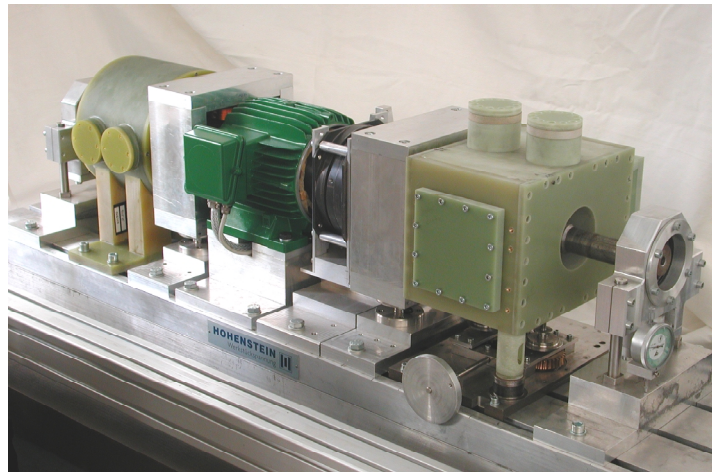


Bild 2.43 Gegenüber Bild 2.18 geänderter Messaufbau mit einem konventionellen supraleitenden Magnetlager (links) und rechts das SMB mit einer verschiebbaren unteren Halbschale gemäß Konstruktionszeichnung Bild 2.27. Im neuen Dewar sind die beiden Halbschalen von Bild 2.28 bzw. Bild 2.31 integriert und an einen Cryocooler angeschlossen.

Zur besseren Kontrolle der Antriebskraft wird die Verstellung über ein handbetriebenes Antriebsrad gemäß Bild 2.44 vorgenommen.

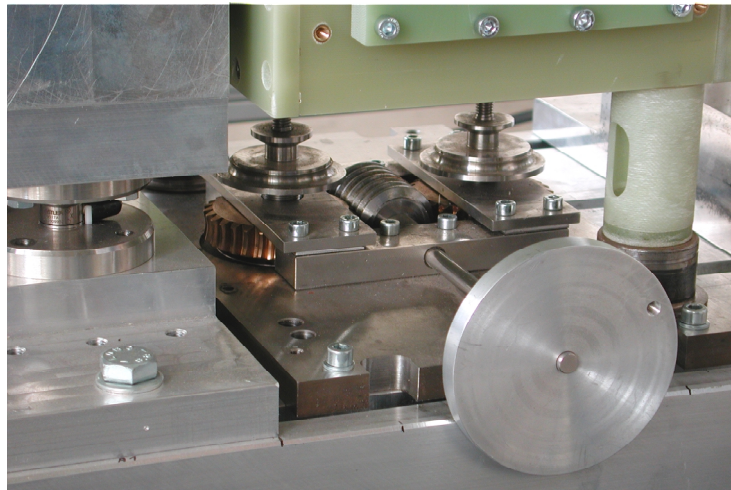


Bild 2.44 Integration des Getriebes (Bild 2.32) zur achsenparallelen radialen Verschiebung der unteren Supraleiter-Halbschale in das Magnetlager.

Die Funktionserprobung des Lagers verlief erfolgreich und erbrachte die erwarteten Tragkräfte. Damit ist nachgewiesen, das HTSL Lager mit horizontalem und in Bohrungsmittelpositioniertem Rotor gebaut werden können.

2.4 Theoretische Untersuchungen zur Rotordynamik

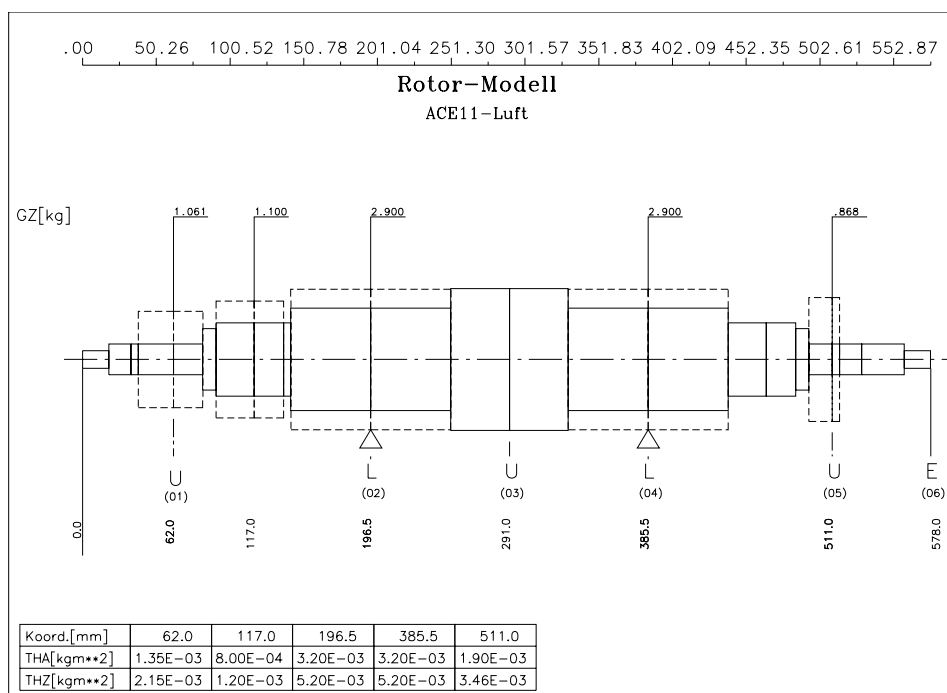
2.4.1 Rotordynamische Berechnungen

Zur Veranschaulichung der Möglichkeiten und der Probleme der supraleitenden Lagerung wurde beispielhaft eine Luftzerlegungseinheit zur Produktion von LN₂ untersucht. Für einen Rotor dieser Maschine wurde ein entsprechendes Konzept mit einer supraleitenden Lagerung entwickelt und mittels des Rotordynamikprogramms SR3 [9] untersucht worden.

Der Rotor (Bild 2.45) setzt sich aus dem Turbinenläufer mit aufgesetztem Turbinen- und Verdichterlaufrad, den beiden Erregersystemen und einem Dichtelement zusammen. Gegeben sind die folgenden Bedingungen:

Tabelle 2.3. Daten des untersuchten Rotors

Rotorlänge	582 mm
Rotorvolumen:	$3,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
Gewicht:	27 kg (V: 0,87 kg; T: 1,1 kg)
Betriebsdrehzahl	33200 min^{-1}
Umfangsgeschwindigkeit am Erregersystem	$166,9 \text{ ms}^{-1}$
Polares Trägheitsmoment der Welle ohne Laufräder	0.029 kg m^2
Axiales Trägheitsmoment der Welle ohne Laufräder	0.28 kg m^2
Polares Trägheitsmoment des Turbinenlaufrads	0.0022 kg m^2
Axiales Trägheitsmoment des Turbinenlaufrads	0.0013 kg m^2
Polares Trägheitsmoment des Verdichterlaufrads	0.0035 kg m^2
Axiales Trägheitsmoment des Verdichterlaufrads	0.0019 kg m^2
Zulässiger Unwuchtradius bei $G = 2,5$	$0,72 \text{ } \mu\text{m}$ ($\omega = 3476,7 \text{ s}^{-1}$)
Zulässige radiale Auslenkung	+/- 0,05 mm

**Bild 2.45** Rotormodell in SR3-Darstellung; der Verdichter befindet sich rechts

2.4.1.1 Lagerung

Die Lagerung des schnell drehenden Rotors erfolgt magnetisch passiv mittels HTSL-PM-Kombination (Primärlager). Um eine gewisse Lagerdämpfung zu erlangen, wird angenommen, dass die HTSL-Lagerschale in einem Quetschöldämpfer gelagert ist. Die Abdichtung des Dämpferelements erfolgt mittels O-Ringen. Auch dieses Element stellt eine Lagereinheit mit Dämpfungs- und Steifigkeitskoeffizienten dar (Sekundärlager). Die Lager werden mit linearer Kennlinie berechnet.

2.4.1.1.1 Primärlager

Die Daten des Lagers sind in Tabelle 2.4 zusammengestellt. Für die HTSL-PM-Lager ergeben sich folgende radiale Steifigkeiten:

Spezifische Steifigkeit der oberen Schale	$1,15 \cdot 10^7 \text{ N/(m}^2\text{)}$
Spezifische Steifigkeit der unteren Schale	$1,29 \cdot 10^7 \text{ N/(m}^2\text{)}$

Tabelle 2.4: Eigenschaften des HTSL-PM Lagers

Außendurchmesser des Erregersystems	96 mm
Länge eines Erregersystems	109 mm (6 Polteilungen + 4 mm)
Polteilung	17,5 mm (Magnetbreite 13,5 mm; Eisen 4 mm)
Magnetischer Abstand	2,3 mm (Isolierung 1,5; Rohr 0,3; Abstand Rotor/Rohr 0,5)
Überstand des Eisenpols	1 mm
Länge eines Stators	109 mm
Innendurchmesser Stator	100,6 mm
Außendurchmesser Stator	160 mm
HTSL-Höhe	ca. 10 mm
Gewicht des Stators	$10,91 \text{ kg}$ ($m_{\text{HTSL}} = 2,32 \text{ kg}$, $\rho_{\text{HTSL}} = 6150 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{\text{Cu}} = 8960 \text{ kg/m}^3$)

Pro Lager steht eine Mantelfläche von:

$$A_{\text{Mantel}} = \pi \cdot 0,096 \text{ m} \cdot 0,109 \text{ m} = 0,033 \text{ m}^2 \quad (2.17)$$

zur Verfügung.

Durch Parallelschaltung der oberen und unteren Schale ergibt sich eine ideale rechnerische Steifigkeit von:

$$c_{\text{HTSL-PM}} = 2,44 \cdot 10^7 \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{m}^2) \cdot 0,033 \text{ m}^2 = 802,1 \text{ Nmm}^{-1} \quad (2.18)$$

Unter Berücksichtigung der realen Verhältnisse des Lagers (z. B. Stromdichte des Supraleiters und begrenzte Domänengröße) ist von der Hälfte des obigen Steifigkeitswertes auszugehen. Für die Simulation wird zunächst $c_{\text{HTSL-PM}} = \underline{401 \text{ Nmm}^{-1}}$ verwendet („Worst-Case“). Eine weitere Betrachtung, die „Best-Case-Simulation“ geht von optimierten geometrischen Verhältnissen am Erreger, d.h. optimale Polteilung und Polhöhe aus. Auch wird von einer Weiterentwicklung der Materialien und Anordnungen der Supraleiter ausgegangen. Besonders das Zusammenwachsen von Kristallebenen durch neue Fügeverfahren birgt ein großes Potential. Daher wird für diese Simulation von 100% des Werts in Gl. (2.18) ausgegangen. Die Dämpfung wird über den Dämpfungskoeffizienten in die Simulation eingegeben. Mit Hilfe des Abklingkoeffizienten δ lässt sich der Dämpfungskoeffizient b für ein bestimmtes Lehrsches Dämpfungsmaß D ermitteln (Weitere Größen ω : Eigenfrequenz der ungedämpften Schwingung; c : Federkonstante; m : gefederte Masse):

$$b = 2\delta m = 2D\omega m = 2D\sqrt{\frac{c}{m}}m = 2D\sqrt{c \cdot m} \quad (2.19)$$

Es folgt für b :

$$\begin{aligned} b_{\text{p_worst_case}} &= 0,006\sqrt{401050\text{Nm}^{-1} \cdot 13,5 \text{ kg}} = 13,96 \text{ kg/s} = 0,014 \text{ Ns/mm} \\ b_{\text{p_best_case}} &= 0,006\sqrt{802100\text{Nm}^{-1} \cdot 13,5 \text{ kg}} = 19,74 \text{ kg/s} = 0,020 \text{ Ns/mm} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Die Eigenkreisfrequenz dieses Teilsystems liegt bei $\omega_{\text{p_w_c}} = 172,3 \text{ Hz}$ und $\omega_{\text{p_b_c}} = 243,8 \text{ Hz}$.

2.4.1.1.2 Sekundärlager

Die Steifigkeit des Sekundärlagers wird näherungsweise durch Parallelschaltung von Gummielementen mit einer Auflagefläche von $A_Q = 4,9 \text{ mm}^2$ ($d = 2,5 \text{ mm}$) bestimmt [7]. Ein einzelnes Element mit Shorehärte 50 und einem E-Modul von $2,2 \text{ N/mm}^2$ besitzt folgende Steifigkeit:

$$c_{s_i} \approx \frac{E\pi d^2}{4h} = \frac{2,2\text{N/mm}^2 \cdot 4,9\text{mm}^2}{2,5\text{mm}} = 4,3\text{N/mm} \quad 2.21)$$

Ein Durchmesser von 160mm kann auf dem Umfang 201 derartiger Elemente aufnehmen. Zur Steifigkeitsbestimmung wird von 1/3 der Elemente ausgegangen. Es folgt für einen Ring:

$$c_s = 288 \text{ N/mm} \quad 2.22)$$

Bei Verwendung von 4 Ringen pro Lager ergibt sich die Sekundärsteifigkeit eines Lagers zu:

$$c_s = 1153 \text{ N/mm}^2 \quad 2.23)$$

Als Dämpfungskoeffizient erhält man mit einem gewählten $D_s = 0,02$:

$$b_s = 0,04\sqrt{1153000\text{Nm}^{-1} \cdot 10,91 \text{ kg}} = 142 \text{ kg/s} = 0,142 \text{ Ns/mm} \quad 2.24)$$

Die Eigenkreisfrequenz dieses Teilsystems beträgt $\omega = 325,1 \text{ Hz}$.

2.4.1.2 Destabilisierende Einflüsse

Durch Unwucht oder andere Einflüsse kann sich der Rotor aus seiner Mittellage lösen. Die auftretende Exzentrizität bewirkt, dass die Spaltgröße an den Laufrädern zwischen den Schaufeln und dem Gehäuse ungleichmäßig wird. An der umlaufenden Engstelle tritt folglich einseitig eine größere Kraft an den Schaufeln auf als an der gegenüberliegenden Seite. Die resultierende Kraft auf den Rotor ist um 90° zur Auslenkung verschoben und eilt dieser voraus. Dieser Effekt wird als Spalterregung¹ bezeichnet. Einen ähnlich destabilisierenden Einfluss üben Kräfte aus der Druckverteilung in Spaltdichtungen und Kräfte von ungleichförmigen Leckageströmungen aus [10].

Die Spalterregung wird mittels Steifigkeitskoeffizienten in der Simulation berücksichtigt. Grundlage der Berechnung sind die folgenden gegebenen Werte (Tab. 2.5 [10]), von deren Beträgen 80% als realistisch angenommen werden.

¹ weitere Stichworte sind hier: Thomas-Kräfte, Alford-Forces

Tabelle 2.5: Kreuzgekoppelte Steifigkeiten

Koppelsteifigkeit Turbine Laufrad	1000 N/mm
Koppelsteifigkeit Turbine Deckscheibendichtung	1500 N/mm
Koppelsteifigkeit Turbine Laufrad	500 N/mm
Koppelsteifigkeit Turbine Deckscheibendichtung	1300 N/mm

Die maximal umlaufende Kraft durch Unwucht pro Lagerstelle beträgt:

$$F_u = m r \omega^2 = U_{zul} \omega^2 = 13,5 \text{ kg} \cdot 0,72 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot (3476,7 \text{ s}^{-1})^2 = 117,5 \text{ N} \quad (2.25)$$

Die Kraftmessungen von ACE zeigen im Standardbetrieb eine drehzahlsynchrone maximale Kraft von 1400N. Für die hier vorliegende Anwendung mit einer geringeren Drehzahl wird von einer maximalen Kraft von 1200N ausgegangen. Die drehzahlsynchrone Kraft wird durch einen angepassten Unwuchtradius modelliert. Die Radien ergeben sich zu:

$$r_T = \frac{1200 \text{ N}}{1,1 \text{ kg} \cdot (3476,7 \text{ s}^{-1})^2} = 90,25 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (2.26)$$

$$r_V = \frac{1200 \text{ N}}{0,87 \text{ kg} \cdot (3476,7 \text{ s}^{-1})^2} = 114,12 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (2.27)$$

Ein weiterer kritischer Fall tritt im Fall von Pumpstößen auf. Der Faktor des Verhältnisses der Frequenz der Pumpstöße zur Drehfrequenz beträgt 0,8. Die Kraft wird am Turbinenlager mit 500N und am Verdichterlager mit 1200N festgelegt.

2.4.1.3 Mindestanforderungen

In dem hier vorliegenden Fall ergeben sich hohe Anforderungen an die Lagersteifigkeit durch die negativen Koppelsteifigkeiten und Radialkräfte bei gleichzeitig sehr gering tolerierter radialer Auslenkung.

Die hohen geometrischen Anforderungen resultieren aus der Abdichtung der Laufräder an der Deckscheibe in radialer Richtung. Um bei einer Radialkraft von 500N (negativster Fall: Druckstöße, Drehzahlfremd) einen Maximalweg von 0,05 mm zu erhalten, müsste eine Steifigkeit von 24 kN/mm vorhanden sein. Mit einem Sicherheitsbereich von 30% erhält man für die bereitzustellende Steifigkeit 31,2 kN/mm. Dieses ist mit den obigen Steifigkeiten nicht zu erreichen.

Würden die Forderungen auf der Kraft- und Abmessungsseite gelockert, so könnte man mit deutlich niedrigeren Steifigkeiten auskommen, die dann evtl. aber immer noch über 401 N/mm liegen (Bsp.: Mit einem Weg von 0,15 mm (Verdreifachung) und einer Belastung von 600N (Halbierung) ergibt sich $c_{\min} = 4000$ N/mm).

Hier müssen die Möglichkeiten der Belastungsreduktion noch ausgelotet werden. Außerdem ist der Einfluss einer Wirbelstromdämpfung auf der Primärseite des Lagers zu untersuchen. Dafür müssten mehrere SR3-Durchläufe und eine Geometrieänderung des Modells erfolgen.

2.4.1.4 Simulation und Ergebnisse

Die Simulation ermittelt zunächst die kritischen Drehzahlen bezogen auf die Worst-Case-Lagersteifigkeit des Primärlagers. Die Lage der verwendeten Steifigkeit ist eingezeichnet und in Bild 2.46² zu sehen. Zum Erreichen der Betriebsdrehzahl müssen zwei kritische Bereiche durchfahren werden.

Im weiteren Verlauf der Simulation zeigte sich, dass die Verdoppelung der Steifigkeit keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Eine genauere Bestimmung der kritischen Drehzahlen geht aus Bild 2.47 hervor. Im linken Teilbild ist die Lage der Eigenfrequenzen über der bezogenen Drehzahl aufgetragen; im rechten sind die entsprechenden Dämpfungen erkennbar. Beim Durchlaufen des Anfahrstrahls werden die Eigenfrequenzen bei ca. 2400, 4350 und 4650 min^{-1} abwechselnd im Gegen- und Gleichlauf durchfahren. Die Dämpfungen für die zweite und vierte Eigenfrequenz (beide Gleichlauf) sind negativ, d. h. dass Schwingungen in diesen Frequenzbereichen verstärkt werden (Vorzeichenumkehr des Abklingkoeffizienten). Dieser Effekt ist nur durch eine drastische Erhöhung der Lagerdämpfung oder eine Reduzierung der Koppelsteifigkeiten zu beeinflussen. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Bild 2.49 und Bild 2.50 zeigen die Schwingungsformen für den 1. Unwuchtfall, d. h. die Unwuchten sind phasengleich. Das erste Bild stellt den reinen Unwuchtfall ohne zusätzliche Belastung dar, das zweite die drehzahlsynchrone erhöhte Belastung. Die resultierenden Schwingungs- (Bild 2.51, Bild 2.52) und Kraftamplituden (Bild 2.54, Bild 2.55) zeigen sehr moderate Werte für den Betriebsdrehzahlbereich und Erhöhungen für die Bereiche um

² Im Word-Format sind die Bildangaben verlinkt.

4000 min^{-1} und 80000 min^{-1} an. Die Schwingungsamplitude im Betriebsbereich beträgt weniger als $1\mu\text{m}$, was deutlich unterhalb der zulässigen Grenze³ von 0,05 mm liegt. Auch im erhöhten Unwuchtfall liegt die Wegamplitude unterhalb des Grenzwerts.

Bild 2.53 stellt die Schwingungsamplituden für den Belastungsfall des Pumpens mit einer um den Faktor 0,8 (gegenüber der Drehzahl) reduzierten Anregungsfrequenz. Besonders interessant ist hier der Drehzahlbereich um die Betriebsdrehzahl herum. Bei niedrigen Drehzahlen steigt der Weg auf über 1,06 mm an, jedoch werden in der Praxis bei diesem Fahrzustand nicht derartig hohe Kräfte aufgebaut. Im Betriebspunkt ist mit einer ca. 0,02 mm großen Amplitude am Rotorende (Turbine) zu rechnen.

Der zweite Unwuchtfall berücksichtigt um 180° versetzte Unwuchten an den Laufrädern. Die Ergebnisse für die Amplituden sind ab Bild 2.58 einsehbar. Die Unwuchtsimulation zeigt, dass im Betriebspunkt der Grenzwert der Schwingungsamplitude eingehalten wird. Die erhöhte Unwucht führt zu einer Schwingungsamplitude von knapp 0,04 mm.

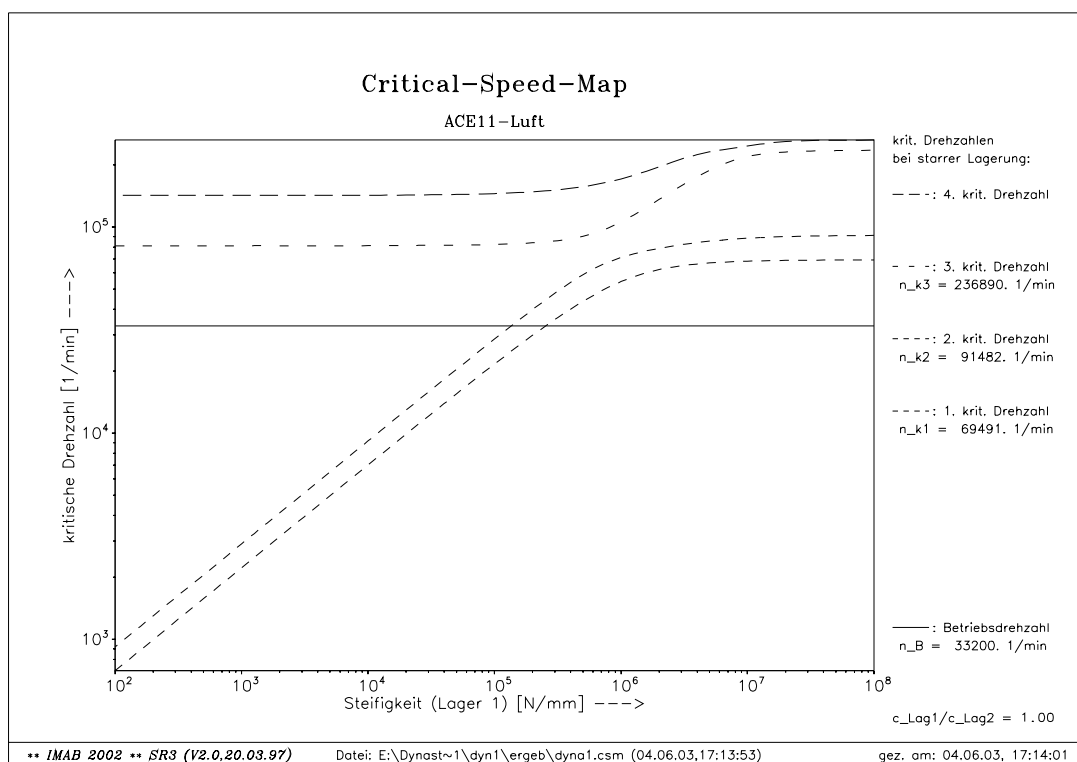


Bild 2.46 Kritische Drehzahlen über der Lagersteifigkeit

Das HTSL-Lager ist im Vergleich zu anderen Lagern, wie z.B. dem Kugellager (Federsteifigkeitswerte um $1 \cdot 10^6$ N/mm) als weich zu bezeichnen. Daher liegen die ersten Eigenfre-

³ Diese Grenze ergibt sich durch die Abdichtung.

quenzen sehr niedrig, d.h. der Rotor durchläuft beim Anfahren kritische Drehzahlen. Fehlen für diese Schwingungsmodi Erregungen, so wirken sich diese Drehzahlbereiche nicht negativ auf das Verhalten des Rotors aus.

Ein sehr positiver Gesichtspunkt der weichen Lagerung ist, dass sich der Rotor bei erhöhter Drehzahl in seinem realen Schwerpunkt zentriert, d. h. er besitzt eine große Laufruhe.

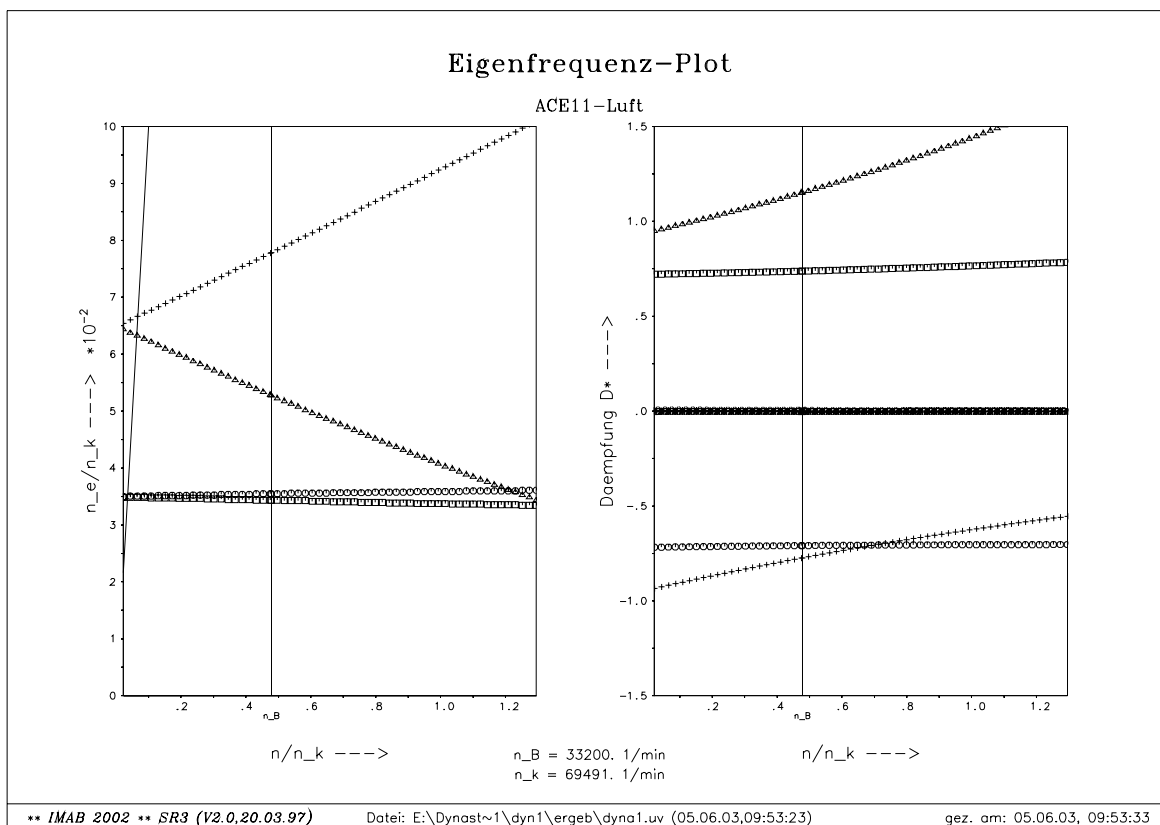


Bild 2.47 Lage der Eigenfrequenzen und der Dämpfung. Drehzahl bezogen auf 1. Kritische

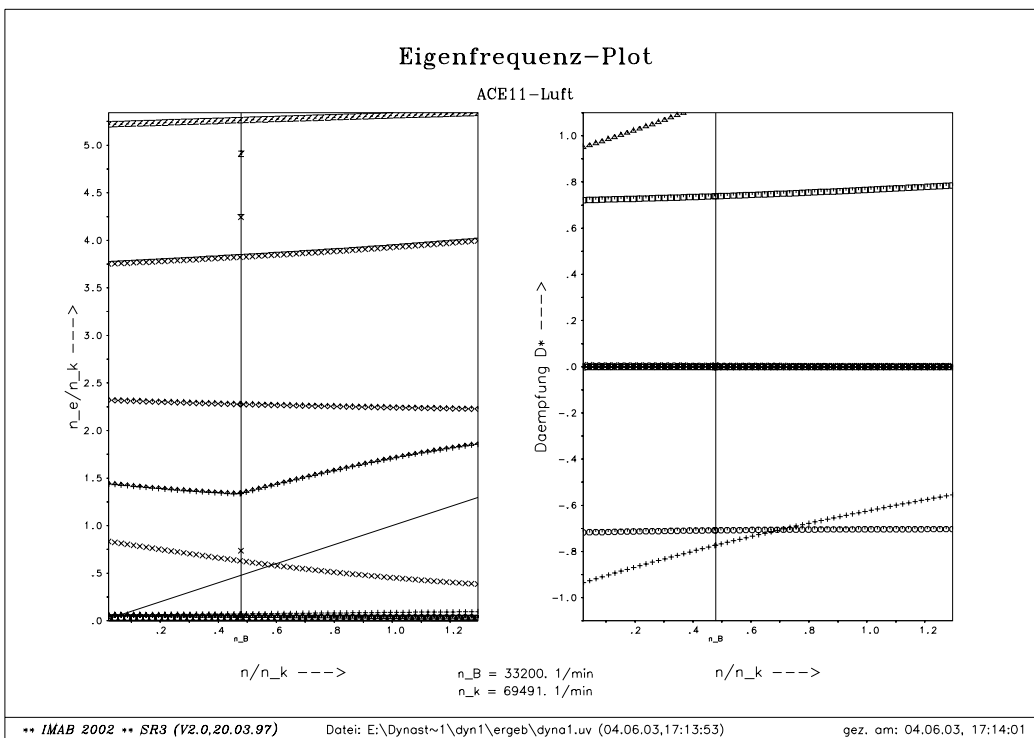


Bild 2.48 Lage der Eigenfrequenzen und der Dämpfung. Drehzahl bezogen auf 1. Kritische

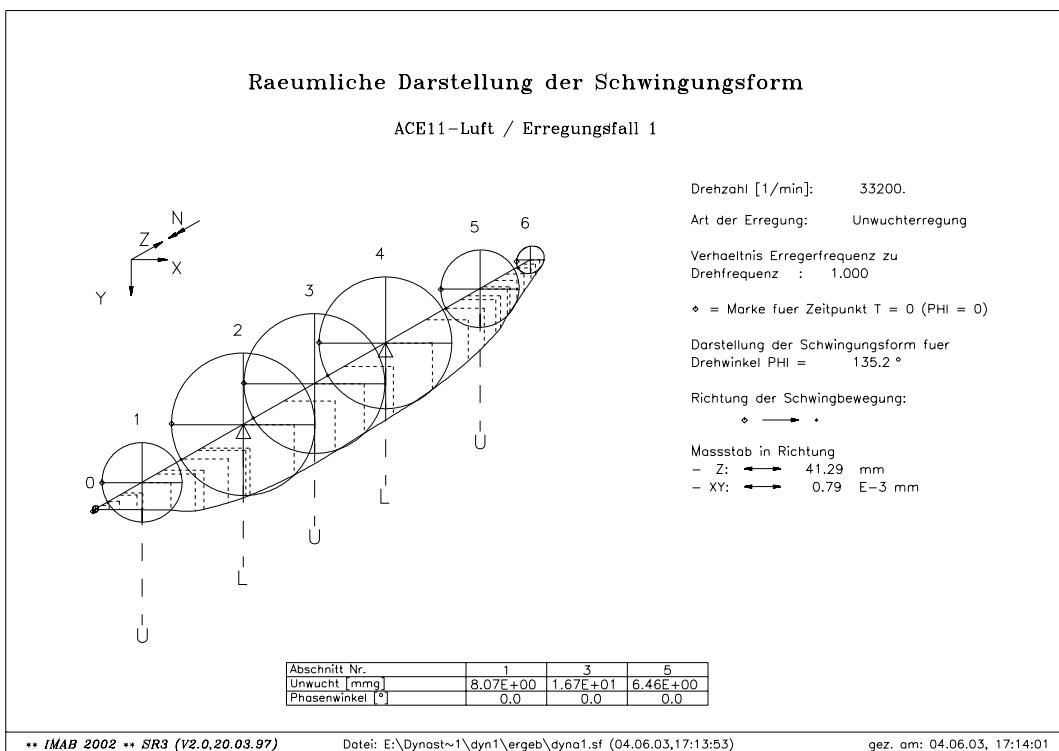


Bild 2.49 Schwingungsform bei Unwuchtanordnung in Reihe

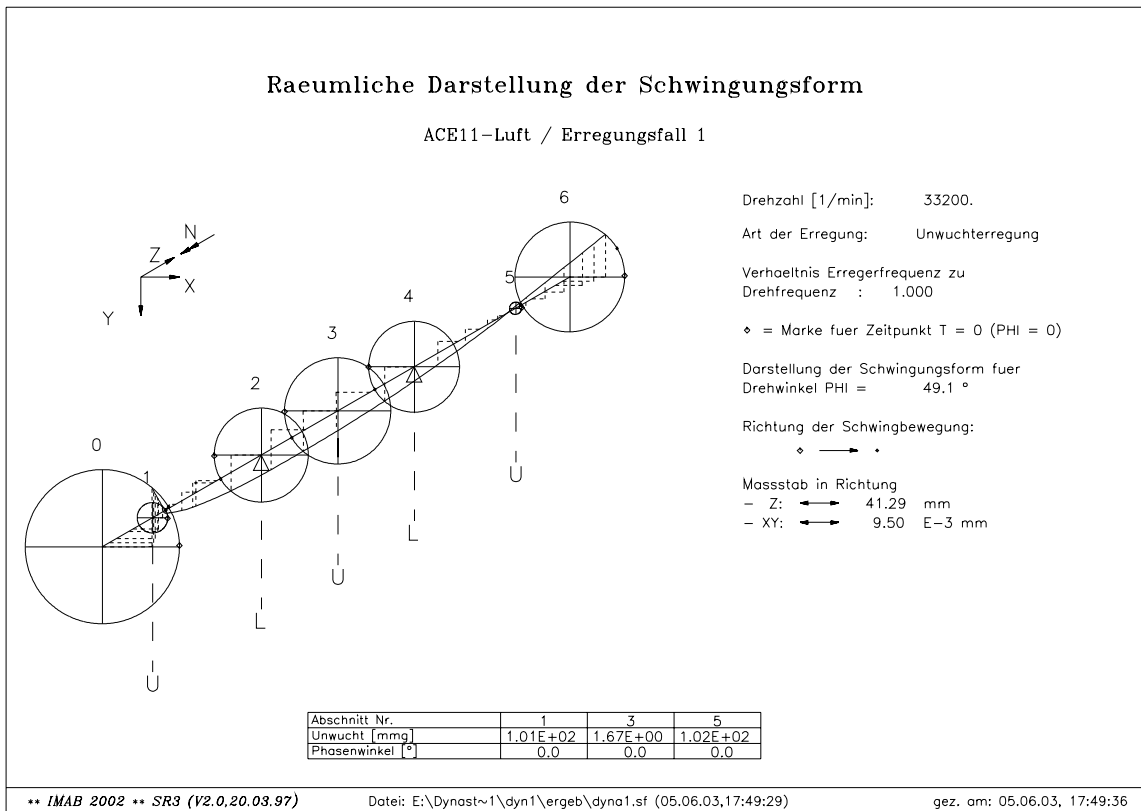


Bild 2.50 Schwingungsform bei Unwuchtanordnung in Reihe, erhöhte Unwucht

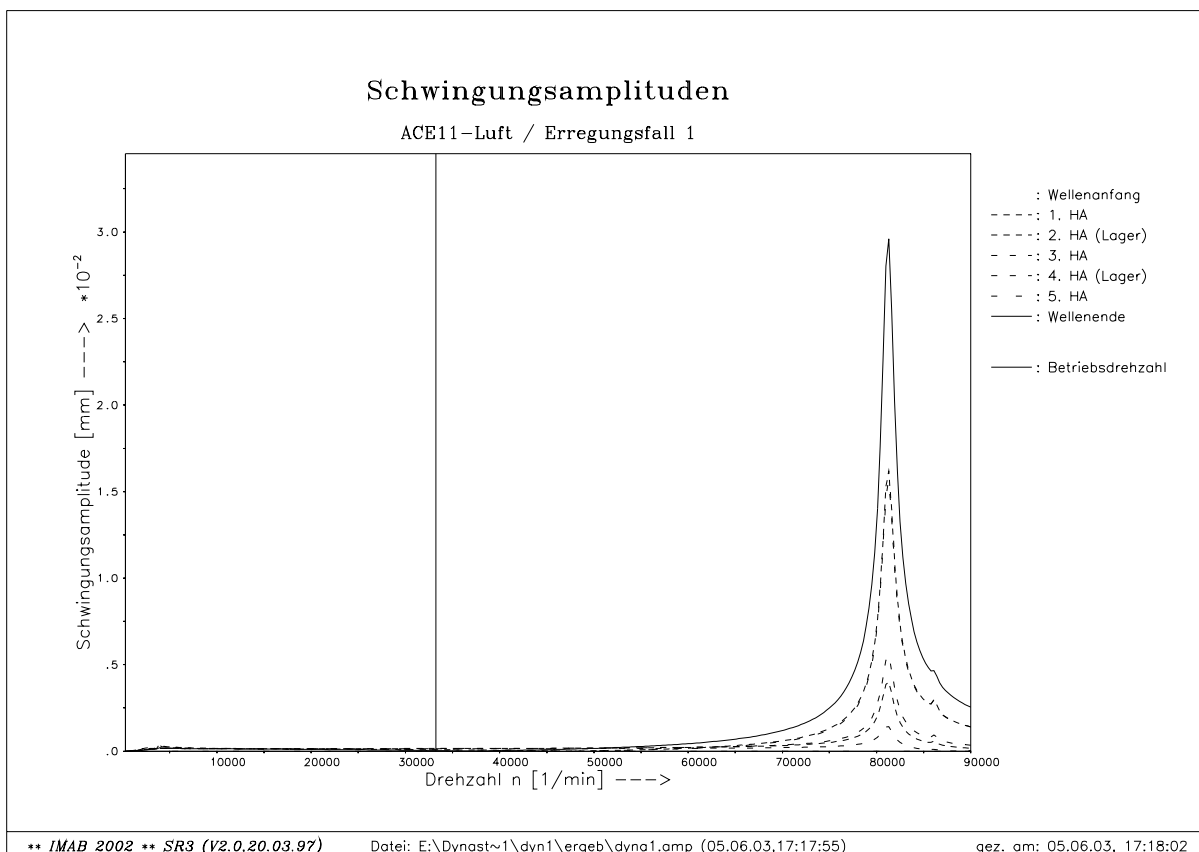


Bild 2.51 Schwingungsamplitude für 1. Unwuchtfall

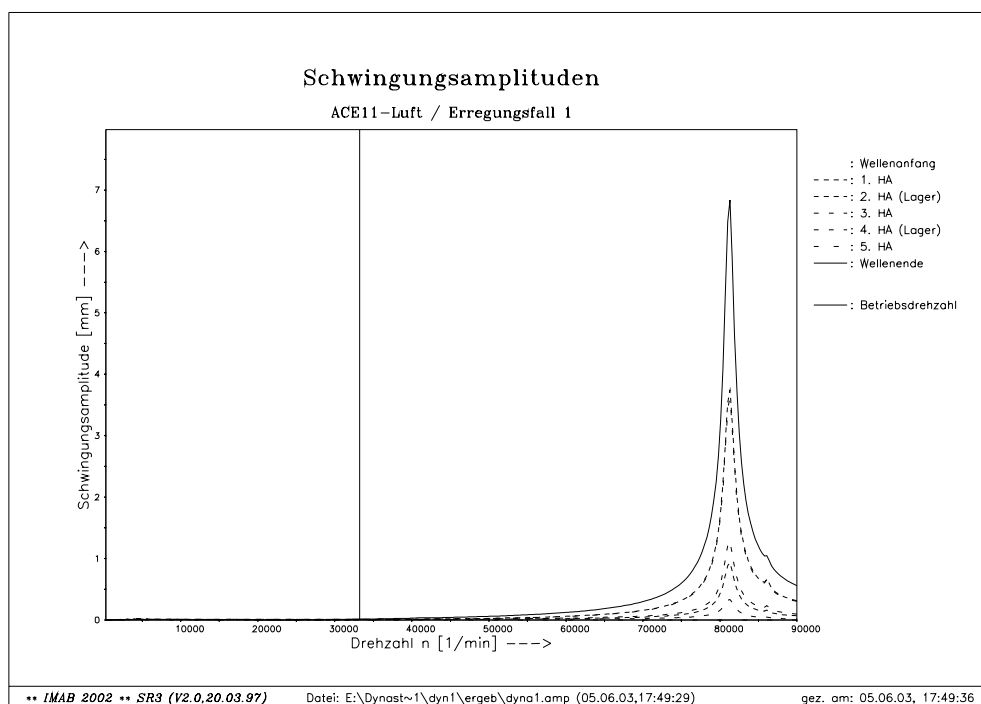


Bild 2.52 Schwingungsamplituden für 1. Unwuchtfall, erhöhte Unwucht

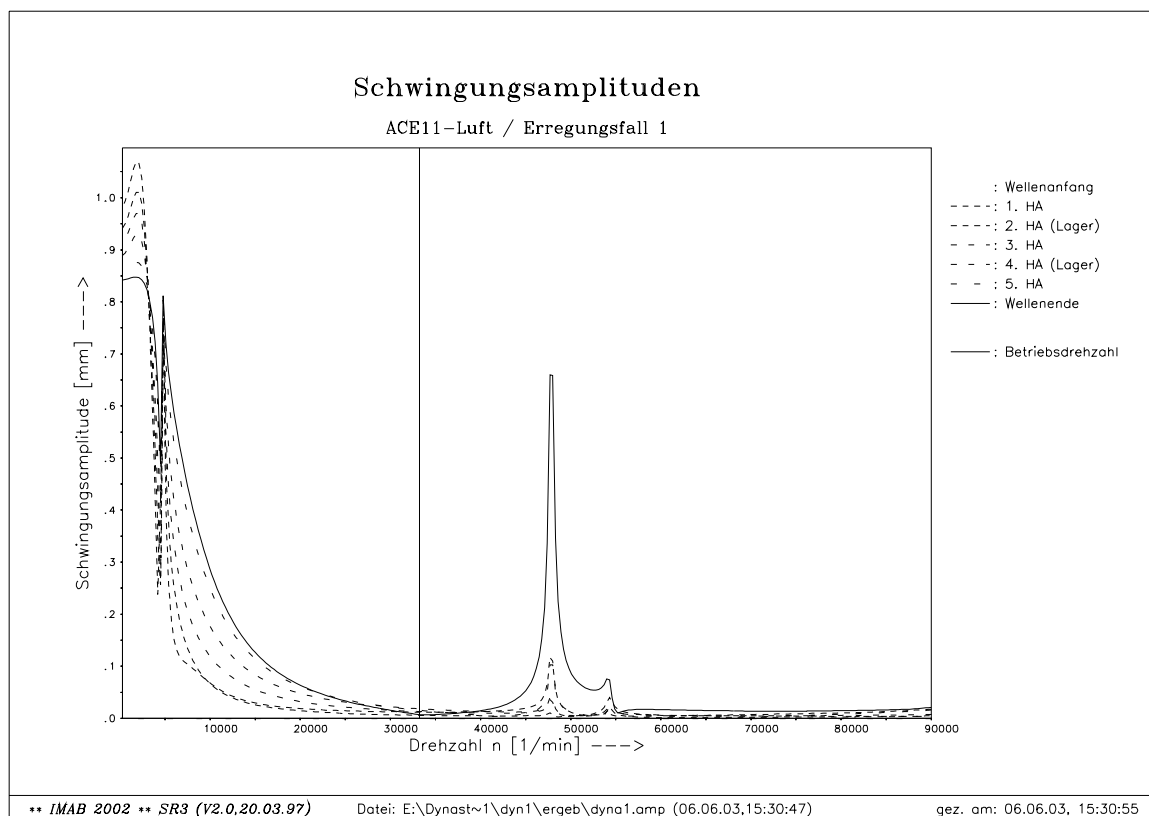


Bild 2.53 Schwingungsamplituden für phasengleiche Erregung (500N, 1200N;

V=0.8)

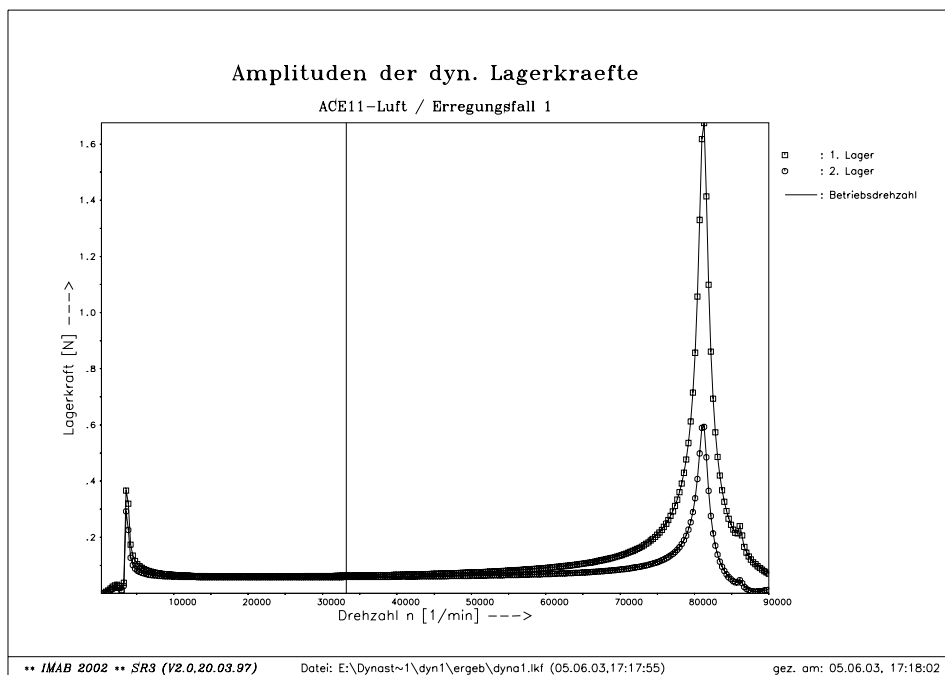


Bild 2.54 Lagerkraftamplituden für 1. Unwuchtfall

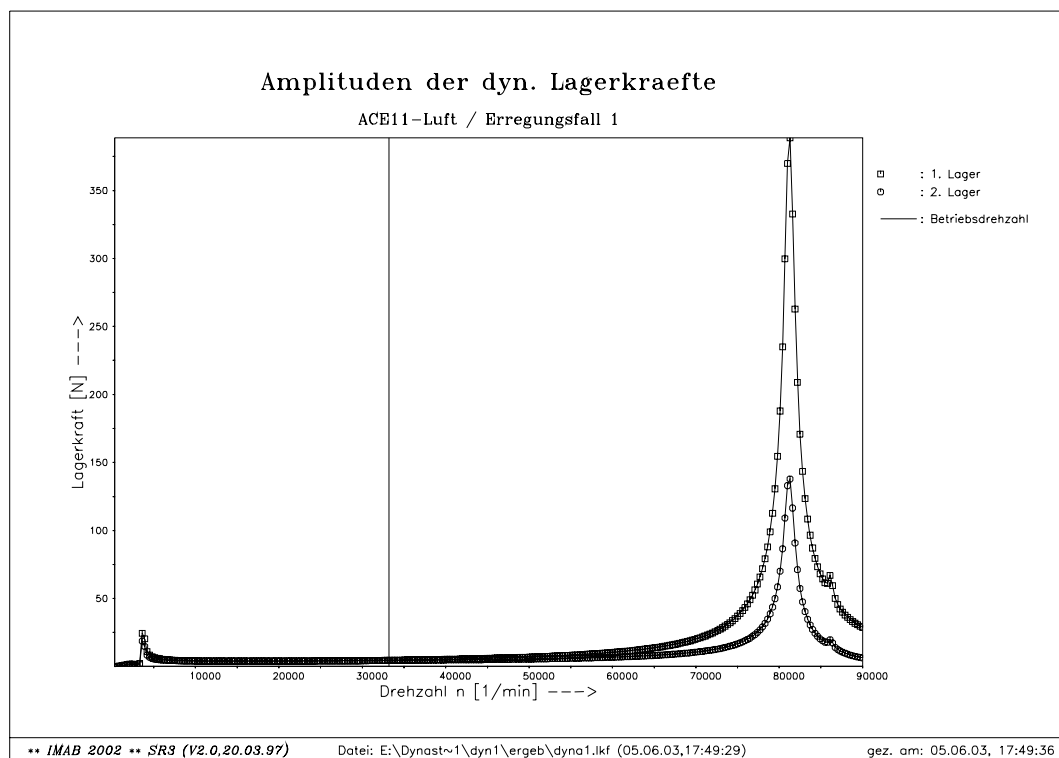


Bild 2.55 Lagerkraftamplituden für 1. Unwuchtfall, erhöhte Unwucht

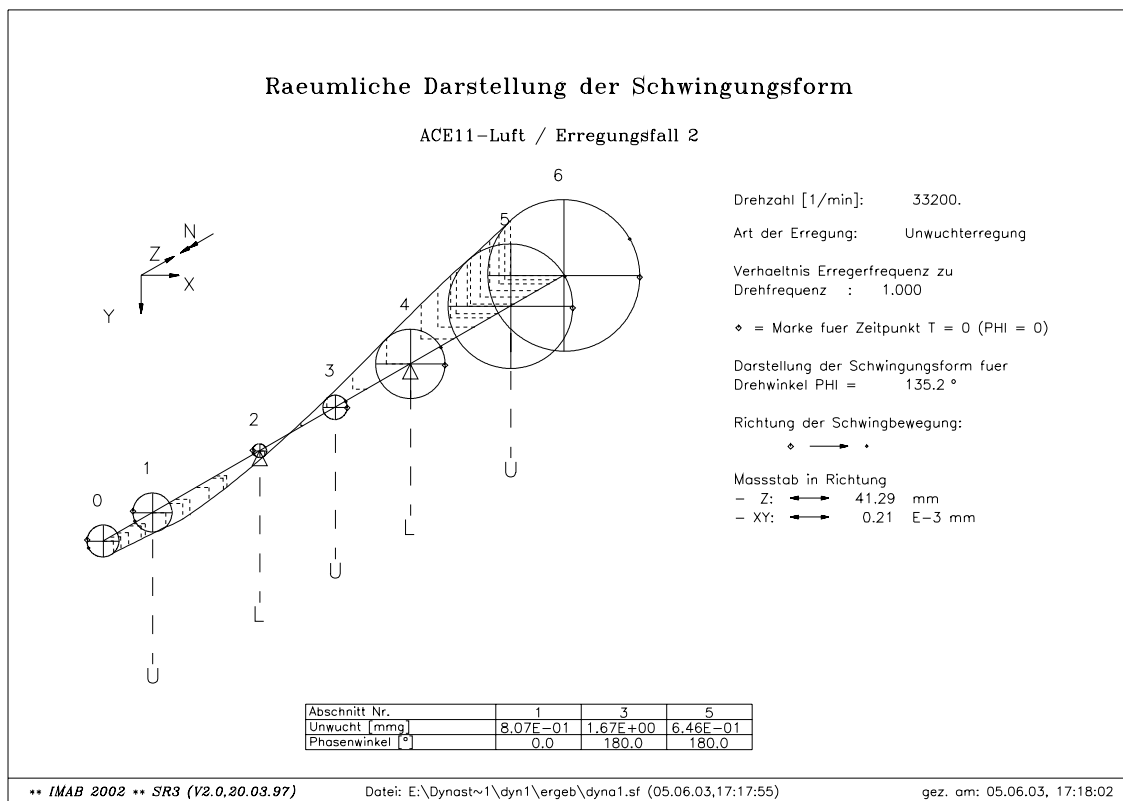


Bild 2.56 Schwingungsform bei einer versetzten Unwucht

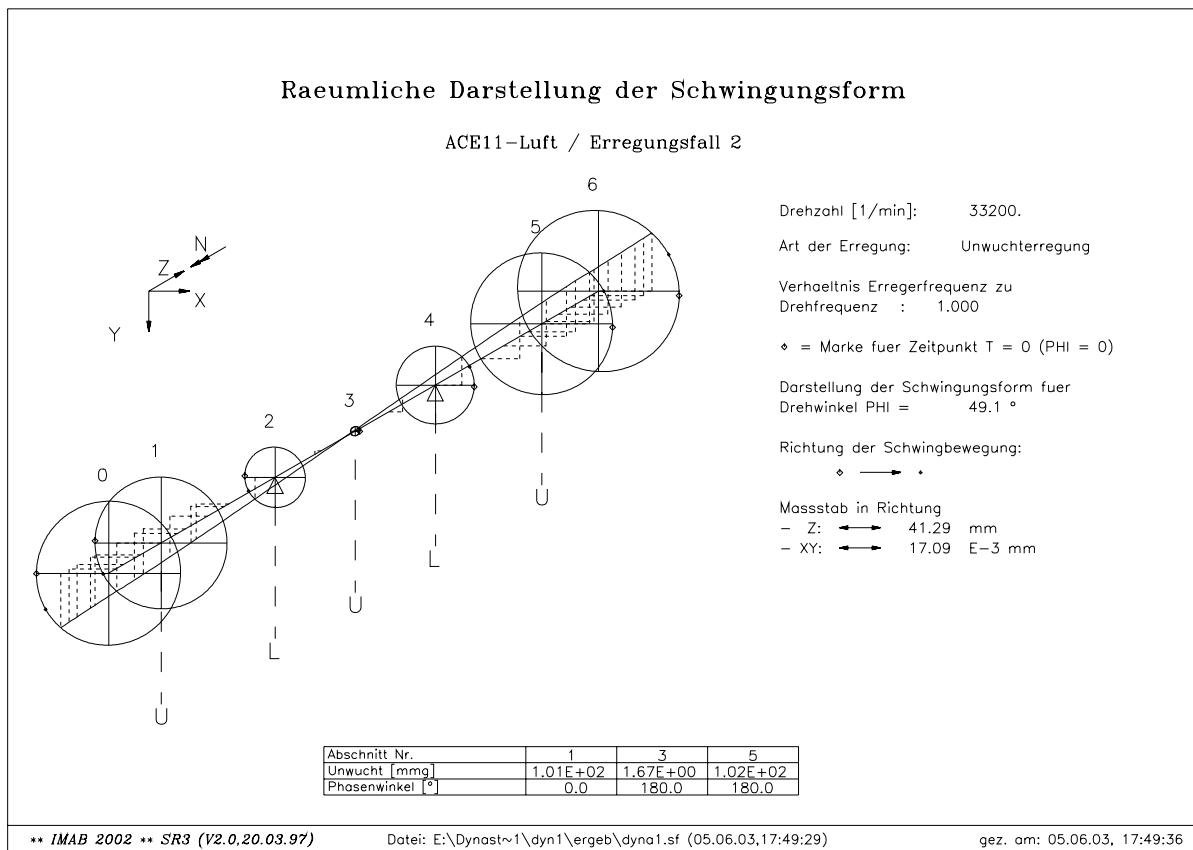
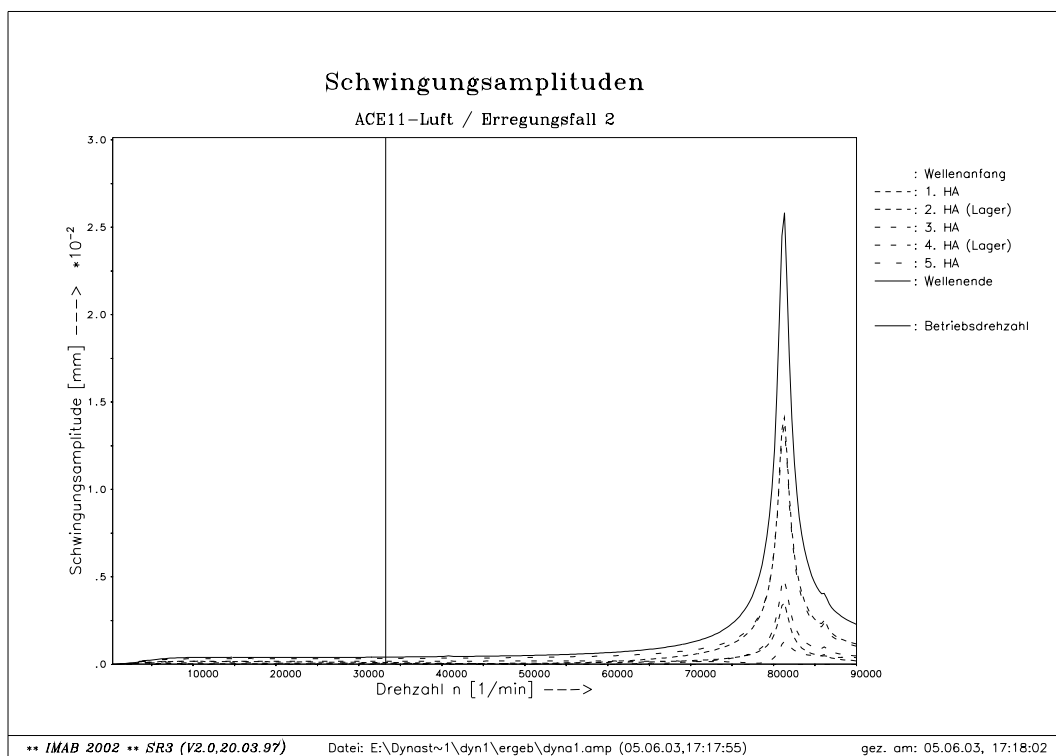


Bild 2.57 Schwingungsform bei einer versetzten Unwucht, erhöhte Unwucht**Bild 2.58** Schwingungsamplituden für 2. Unwuchtfall

3 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Erfindungen, Schutzrechte: Für das Verfahren der Lageraktivierung mit beweglichen Lagerschalen als Schlüsselement für den Bau steifer HTSL Lager wurde zwischenzeitlich ein Patent erteilt. Die Erfindung wurde auf den Projektpartner ACE übertragen und kann von ihm wirtschaftlich verwertet werden (DE 100 34 922 C2, PCT/DE 01/02602, US 6,541,885 B2).

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten: Eine unmittelbare Umsetzung der gewonnenen Ergebnisse in eine industrielle Entwicklung im wettbewerblichen Bereich erfordert die Lösung einer Reihe während des Vorhabens erkannter Aufgaben, die im nächsten Punkt dargestellt sind. Gelingt es, diese Aufgaben zufrieden stellend zu lösen, stünde eine berührungsfreie, extrem verlustarme und ölfreie Lagerung speziell für kryogenische Turbomaschinen zu Verfügung. Geht man weiter von einer eingespielten Fertigung und der Nutzung des kalten Produktes zur Kühlung des Lagers aus, dürften die Investitionskosten für solche Lager kaum höher als die Kosten für eine Kippsegment-Gleitlagerung mit Ölversorgung und Verrohrung liegen. Berücksichtigt man zu den oben genannten Vorteilen noch die erheblichen Platz- und Gewichtseinsparung durch den Fortfall der Ölanlage, sollte mittelfristig für viele Anwendungen eine wirtschaftlich günstige Lösung darstellbar sein. Der noch zu leistende Entwicklungsaufwand ist jedoch erheblich, so dass erst mittelfristig mit greifbaren Ergebnissen gerechnet werden kann.

Wissenschaftlich /technische Erfolgsaussichten: Die gesteckten wissenschaftlichen Ziele wurden erreicht. Es liegen experimentell gestützte Aussagen darüber vor, welche Lasten in einem Lager für Turbomaschinen auftreten können und was mit den heute verfügbaren HTSL-PM Lagern erreicht werden kann. Die hieraus abzuleitenden Forschungsaufgaben (Abschn. 2) sind eindeutig identifizierbar und als lösbar anzusehen, erfordern aber weitere umfangreiche Forschungsarbeiten, für die Zeit und Kapital benötigt wird.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit: Die Anwendung von HTSL für die Lagerung schnelllaufender Rotoren ist nicht ausschließlich auf Turbomaschinen beschränkt. Die gewonnenen Ergebnisse lassen sich in einer Vielzahl von denkbaren Anwendungen weiter entwickeln, bei denen es auf Verschleißfreiheit, Ölfreiheit, hohe Laufruhe und geringe Körperschallübertragung ankommt. Weiterhin münden die hier begonnenen

Arbeiten unmittelbar in die Untersuchung rotierender HTSL Magnetlager ein, die zur Zeit in zwei Projekten für Schwungmassenspeicher in der Energieversorgung als auch für elektrische Generatoren weitergeführt werden. Weitere Anwendungen der HTSL Lagertechnik wären bei cryogenischen Pumpen zum Transport tiefkalter Gase denkbar.

4 Fortschritt bei anderen Stellen

Vergleichbare Arbeiten anderer Stellen wurden im Berichtszeitraum nicht bekannt. Hierfür relevante Foren sind zum einen die „European Conference on Applied Superconductivity“ (EUCAS) als auch das „International Symposium on magnetic bearings“, ISMB. An beiden Konferenzen wurde während des Vorhabens mit Präsentation eigener Veröffentlichungen teilgenommen. Forschungsarbeiten, die in diese Richtung deuten wurden nicht bekannt.

Die Patentüberwachung zeigte, dass in Japan (Turbomolekularpumpen), aber auch bei der Fa. Siemens (Axialturbinen) über die Lagerung von Turbomaschinen nachgedacht wird. Hier wurden auch Vorschläge für Rotoren mit „kalten Magneten“ – mit Isolierung der Magnete zur Welle hin - zum Patent angemeldet. Vorteilhaft ist die durch den kleineren Spalt zwischen Supraleiter und Erregermagneten erhöhte Tragkraft und Steifigkeit. Voraussetzung hierfür ist eine Vakuumabdichtung an den Wellendurchtritten, die besonders bei hohen Rotorumfangsgeschwindigkeiten, wie sie bei Turbomaschinen üblich sind, nach unserer Kenntnis schwierig sein dürfte. Die Güte des Vakuums entscheidet aber auch über die thermische Isolierung des Lagers und den externen Wärmeeintrag. Die Arbeiten sind während des Berichtszeitraumes nach unserer Erkenntnis jedoch nicht über den Stand erster Ideenskizzen mit entsprechenden Patentanmeldungen hinaus gediehen.

Weitere Aktivitäten im Hause Siemens auf dem Gebiet elektrischer Maschinen mit supra-leitender Erregerwicklung führten zu Überlegungen, die Rotorkühlung zur berührungsfreien Lagerung des Rotors mit zu nutzen. Hier konnte eine Zusammenarbeit zwischen Siemens, Nexans Superconductors und dem IMAB etabliert werden.

5 Erfolgte Veröffentlichungen

Die Liste der erfolgten einschlägigen Veröffentlichungen während des Berichtszeitraumes (begutachtete Tagungsveröffentlichungen und Statusseminare) kann der folgenden Aufstellung entnommen werden:

- [1.1] Canders, W.-R.
Magnetlager und rotierende Speicher
 Internationaler ETG Kongress 2001, - „Energietechnik für die Zukunft“- ,23.- 24. Okt. 2001, Nürnberg, Germany
- [1.2] S.O.Siems, H.May, W.-R.Canders
Levitation Forces and Stiffness of model arrangements of magnetic HTSC bearings
 ISMB-8, 8th international Symposium on magnetic bearings, 26.-28. Aug. 2002., Mito, Jp
- [1.3] S.O.Siems, H.May, W.-R.Canders:
Experimental investigation of linear and rotary magnetic bearings with HTSC,
 ISEM 11th, Int. Symp.on Appl. Electromagnetics and Mechanics, May 12-14, 2003, Versailles, France
- [1.4] H. May, R. Palka, E. Portabella, W.-R. Canders
Evaluation of the magnetic field – hightemperature superconductor interactions
 COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, COMPEL, Vol.23, No.1, 2004, Emerald group publishing limited, ISSN 0332-1649
- [1.5] H.May, W.-R. Canders, R. Palka
Grundlagenuntersuchungen für die Auslegung supraleitender Magnetlager, Anwendungsbeispiele
 Deutsche Kälte&Klima Tagung 2003, 20.-21.11.03,Bonn, De.
- [1.6] R. Palka,H. May, W.-R. Canders
Three-dimensional identification of the subdomains positions within the HTSC bulks
 ISTET 03, July6-9, Warsaw, Pl.
- [1.7] R. Palka, H. May, W.R. Canders
Quality examination of high temperature superconducting bulk material used in electrical machines and magnetic bearings
 VII-th international workshop on optimisation and inverse problems in electromagnetism, Lodz, Pl, 2002
- [1.8] W.-R.Canders, R.,Palka, H. May,S.O.Siems:
Magnetische Lagerung ruhender und rotierender Körper mit Hochtemperatursupraleitern, Tagungsband 7. Statusseminar für Supraleitung und Tieftemperaturtechnik, 14.-15. Dez. 2002, Garmisch Partenkirchen
- [1.9] S.O.Siems, H.May,W.-R.Canders,M.Leonhard, **Rotierende HTSL Magnetlager für Turbomaschinen,** Tagungsband 8. Statusseminar für Supraleitung und Tieftemperaturtechnik, 13.,14. Feb. 2003, Garmisch Partenkirchen

6 Zusammenfassung

Am IMAB wurde ein Modelllager mit der zugehörigen Prüfumgebung aufgebaut, mit dem sowohl statische als auch dynamische Messungen durchgeführt wurden. Hierbei konnten Supraleiter mit inzwischen deutlich verbesserten Materialeigenschaften verwendet werden. Diese positive Entwicklung ist wesentlich durch das Leitprojekt „Dynastore“ des BMWA, Fkz 0327305 I begünstigt worden, in dem das IMAB ebenfalls maßgeblich engagiert ist.

Parallel zu der Vorbereitung der Messungen wurde das Berechnungsinstrumentarium zur Auslegung rotierender supraleitender Lager erweitert. So ist es heute möglich, die Wechselwirkung zwischen Supraleiter und Permanentmagnet – Erregersystem unter Annahme einer über die Oberfläche des Supraleiters gemittelten kritischen Stromdichte (Engineering Wert $J_{c,eng.}$) treffsicher zu berechnen. Hierzu werden eigens entwickelte numerische Berechnungsverfahren mit finiten Elementen verwendet. Weitere Programme auf analytischer Basis dienen zum Entwurf des Lagers, zur Ermittlung elementarer Schwingungseigenschaften, zur Simulation von Stoßvorgängen oder des Hochlaufes auf Nenndrehzahl.

Die am Modellager durchgeführten Messungen bestätigen die theoretischen Berechnungen weitgehend, die gemessenen Abweichungen sind plausibel erklärbar. Das Aktivierungsverfahren mit beweglichen Lagerschalen konnte verifiziert werden. Es ist somit möglich, auch bei Rotoren mit engen Lagerspalten eine Aktivierung mit ausreichender Vorspannung zur Gewichtskompensation zu erreichen. Ebenso konnten technologische Effekte wie der Einfluss einer zunehmenden „Granulierung“ der Supraleiter bei Lagerflächen mit starker Krümmung und der Einfluss des Ausschleifens der Supraleiteroberfläche auf die Tragfähigkeit untersucht werden.

Die Auswertung der beim Projektpartner ACE durchgeführten Messungen der Lagerbelastungen einer herkömmlich gelagerten Turbine lieferte praxisnahe Lastkollektive, die für rotordynamische Rechnungen verwendet wurden. Unter Einbeziehung in der Praxis üblicher Sicherheitsfaktoren muss für heutige gleitgelagerte Radialmaschinen davon ausgegangen werden, dass für die statischen Lagerkräfte das 16 fache und für die dynamischen Lagerkräfte das 32 fache der Gewichtskraft angesetzt werden sollte. Weiter ist zu berücksichtigen, dass die Gaskräfte auch entdämpfende Kraftkomponenten erzeugen, die bei der Lagerauslegung als sog. kreuzgekoppelte Steifigkeiten zu berücksichtigen sind.

Wie nicht anders zu erwarten, kann eine auf Gleitlagertechnologie zugeschnittene Radial-Turbomaschine nicht unmittelbar auf eine supraleitende Lagerung umgerüstet werden. Für zwei wahrscheinliche Anwendungsfälle, die Expansionsturbine einer Luftzerlegungsanlage (kompressorbelastet) und die Expansionsturbine einer Wasserstoffverflüssigungsanlage

wurden HTSL Lager ausgelegt und die Rotordynamik mit dem Programm SR3 durchgerechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass die statischen Steifigkeiten und insbesondere die Dämpfung der supraleitenden Lagerung nicht ausreichen, um einen sicheren Betrieb einer konventionellen Radialturbine bei allen Betriebsbedingungen zu gewährleisten.

Damit lassen sich eine Reihe von Entwicklungsaufgaben i. w. auf der maschinenbaulichen Seite ableiten, die zu lösen sind, bevor solche Maschinen in der Verfahrenstechnik eingesetzt werden können:

- Es ist ein dämpfendes Element zu entwickeln, das die Kompensation der entdämpfenden Gaskräfte ermöglicht. Alternativ könnten die kreuzgekoppelten Steifigkeiten auch durch die Gestaltung der Spalte an den Laufrädern und Dichtungen erheblich beeinflusst werden.
- Die größeren Radialbewegungen des Rotors im Bereich geringer dynamischer Radialsteifigkeit (unterer Drehzahlbereich) erfordern Laufradspalte und Dichtungen, die unempfindlich gegen Radialverlagerungen sind.
- Die einseitig auftretenden, aus Druckdifferenzen in Umfangsrichtung resultierenden mittleren (quasistatischen) Lasten an den Laufrädern sollten durch konstruktive Maßnahmen reduziert werden
- Die Supraleiter Formkörper sollten zu größeren kritischen Stromdichten $J_{c,eng}$ weiterentwickelt werden, um zusammen mit heute bereits verfügbaren Magneten höherer Remanenz höhere spezifische Lagersteifigkeiten zu erreichen. Auf diesem Gebiet zeigten sich in letzter Zeit viel versprechende Ansätze sowohl in der Materialforschung als auch in der Fügetechnologie von Supraleitern.

