

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