

LEISTUNGSELEKTRONIK UND SENSORIK FÜR EINEN HTSL-MAGNETLAGERPRÜFSTAND

F. Hinrichsen, P. Hoffmann

1 EINLEITUNG

Die Wechselwirkung zwischen Hochtemperatur-Supraleitern (HTSL) und Permanentmagneten, die sich in einer abstoßenden Kraft äußert, kann zum Aufbau von berührungslosen Lagerungen genutzt werden. Durch Formgebung der Supraleiter und Magnete sowie durch die Anordnung und Abfolge der Magnetpole können viele der von den Kugellagern her bekannten rotatorischen und linearen Konfigurationen realisiert werden.

2 ZIELSETZUNG

Am Institut wurde ein solches Lager für die rotierende Welle einer Turbomaschine entwickelt. Um dessen Eigenschaften im Experiment überprüfen zu können, wird ein Prüfstand, bestehend aus einer horizontal mit zwei HTSL-Lagern gelagerten Welle konstruiert (**Abb. 1**).

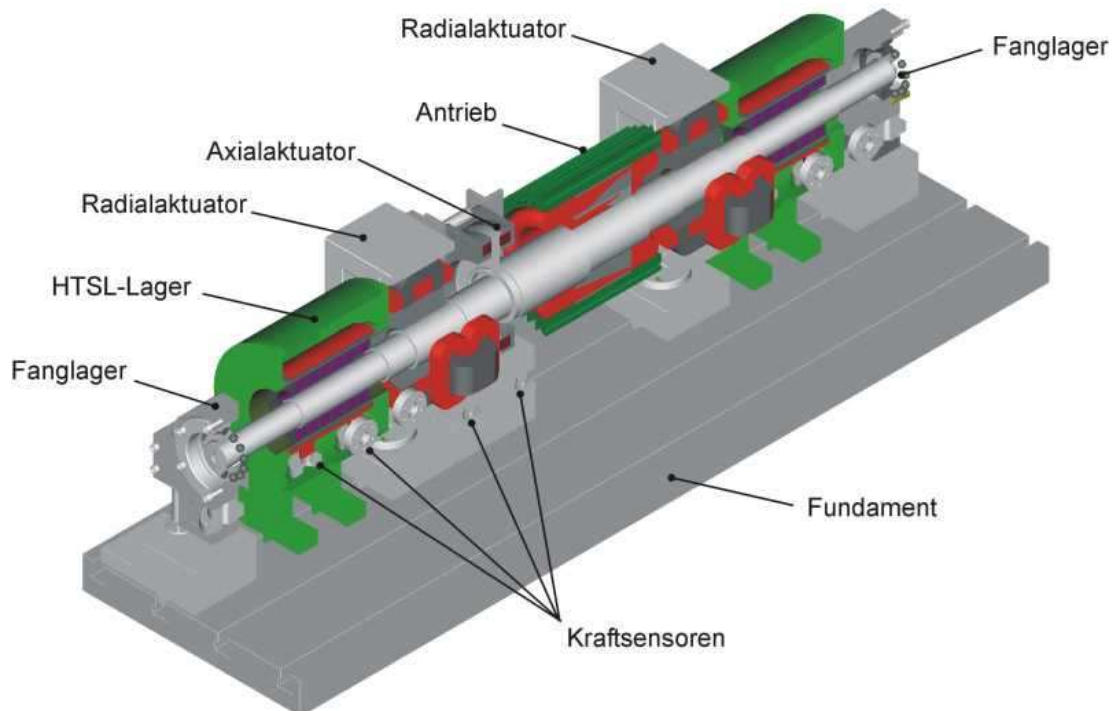


Abb. 1: Aufbau des Prüfstands

Um verschiedene Betriebsbedingungen simulieren zu können, wurde die Welle zusätzlich mit zwei radialen und einem axialen Aktuator sowie einem drehzahl-geregelten Antrieb ausgerüstet. Dadurch soll die Möglichkeit geschaffen werden, anregende Kräfte von außen definiert einzubringen und ihren Einfluß auf die Lagerung bei verschiedenen Drehzahlen zu ermitteln. Die Lagerreaktionskräfte werden von Piezo-Kraftsensoren für alle drei Raumrichtungen getrennt aufgenommen und mit Hilfe eines PC, der gleichzeitig die dazugehörige Position der Welle sowie die Lagertemperatur registriert, aufgezeichnet. **Abb. 1** zeigt den Prüfstand in einer Schnittdarstellung.

3 AUSFÜHRUNG

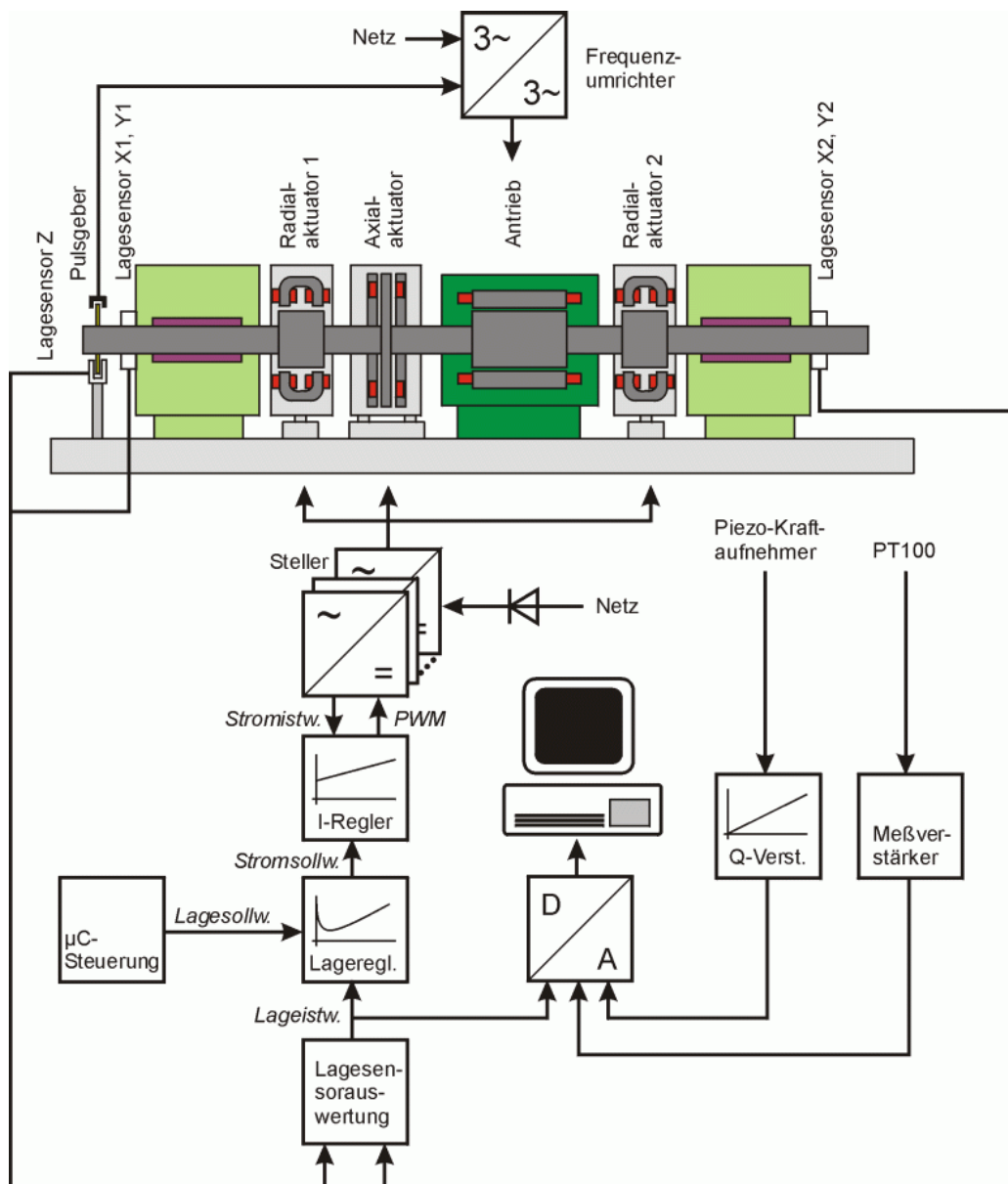


Abb. 2: Meß- und Regelungskonzept

Das Blockschaltbild in **Abb. 2** zeigt, wie die elektronischen Komponenten zusammenwirken. Eine denkbare Möglichkeit, die Aktuatoren zu regeln, wäre eine Kraftregelung. Dieser Ansatz wurde aus zwei Gründen nicht weiter verfolgt: Zum einen neigen die Ladungsverstärker der Kraftsensoren zum Driften, so daß bei längeren Messungen die Gefahr von Fehlern bestünde, zum anderen müßte aus Sicherheitsgründen trotzdem die Lage der Welle in die Regelung einfließen, um ein Anschlagen am Antriebsstator oder an den Lagergehäusen zu verhindern.

Deshalb wurde ein anderer Weg gewählt: Die Aktuatoren werden wie ein geregeltes elektromagnetisches Lager betrieben. Dafür ist eine Kaskadenregelung aus Stromregler und Lageregler vorgesehen. Die innere Regelschleife besteht aus den Aktuatorspulen, den Stellern und den Stromreglern, die als analoge PI-Regler ausgeführt sind. Die äußere Regelschleife umfaßt das gesamte elektromechanische System aus Welle und Aktuatoren. Der digitale PID-Lageregler erhält seine Sollwerte aus einem Mikrocontrollerprogramm. Die Lageistwerte werden an drei Stellen mit Wirbelstrom-Abstandssensoren aufgenommen. Für die Radialaktuatoren werden jeweils der waagerechte und der senkrechte Versatz der Welle gemessen. Der Sensor für die axiale Position befindet sich aus Platzgründen am Ende der Welle. Er nutzt die Fächerscheibe des Drehgebers als Reaktionsfläche.

Mit diesem System kann der Welle eine Position außerhalb der Ruhelage in den HTSL-Magnetlagern aufgeprägt werden. Aus der einfachen Messung von Reaktionskraft und Lageänderung kann dann die Steifigkeit des HTSL-Magnetlagers ermittelt werden. Die meisten der dafür benötigten elektronischen Komponenten wurden am Institut entwickelt und gefertigt.

3.1 Leistungselektronik

Auf **Abb. 3** ist der Baugruppenträger für die Leistungselektronik zu sehen. Im hinteren Bereich des Schrankes ist der Frequenzumrichter für die Asynchronmaschine untergebracht. Von ihm ist nur die schwarze Fernsteuerung auf dem Bild zu sehen. Die zweite und dritte Einschubebene sind mit dem Gleichspannungszwischenkreis und mit insgesamt 10 Stück Vier-Quadranten-Stellern (4Q-Stellern) bestückt. Die dazugehörigen Netzteile und Stromregler befinden sich im oberen 19"-Gehäuse.



Abb. 3: Schrank mit Stellern und Frequenzumrichter

Die beiden Halbbrücken eines Stellers werden mit jeweils 10 kHz pulsweitenmoduliert versetzt getaktet. Das hat zum einen den Vorteil, daß durch Ausnutzung des Freilaufs der Stromrippel erheblich reduziert wird, zum anderen ergibt sich dadurch in der Last eine Taktfrequenz von 20 kHz, die außerhalb des Hörbereichs liegt. **Abb. 4** zeigt ein 4Q-Stellermodule. Die vier ultraschnellen IGBTs sind unterhalb der Leiterplatte mit dem Kühlkörper verschraubt. Die Treiberstufen verfügen über eine Unterspannungs- und eine Kurzschlußüberwachung. Das Schaltnetzteil für die Treiberstufen ist mit auf dem Modul integriert. Durch die induktivitätsarme Ausführung der Zwischenkreisverbindungen in Form von Leiterflächen werden die Schaltüberspannungen auf ein Minimum reduziert.

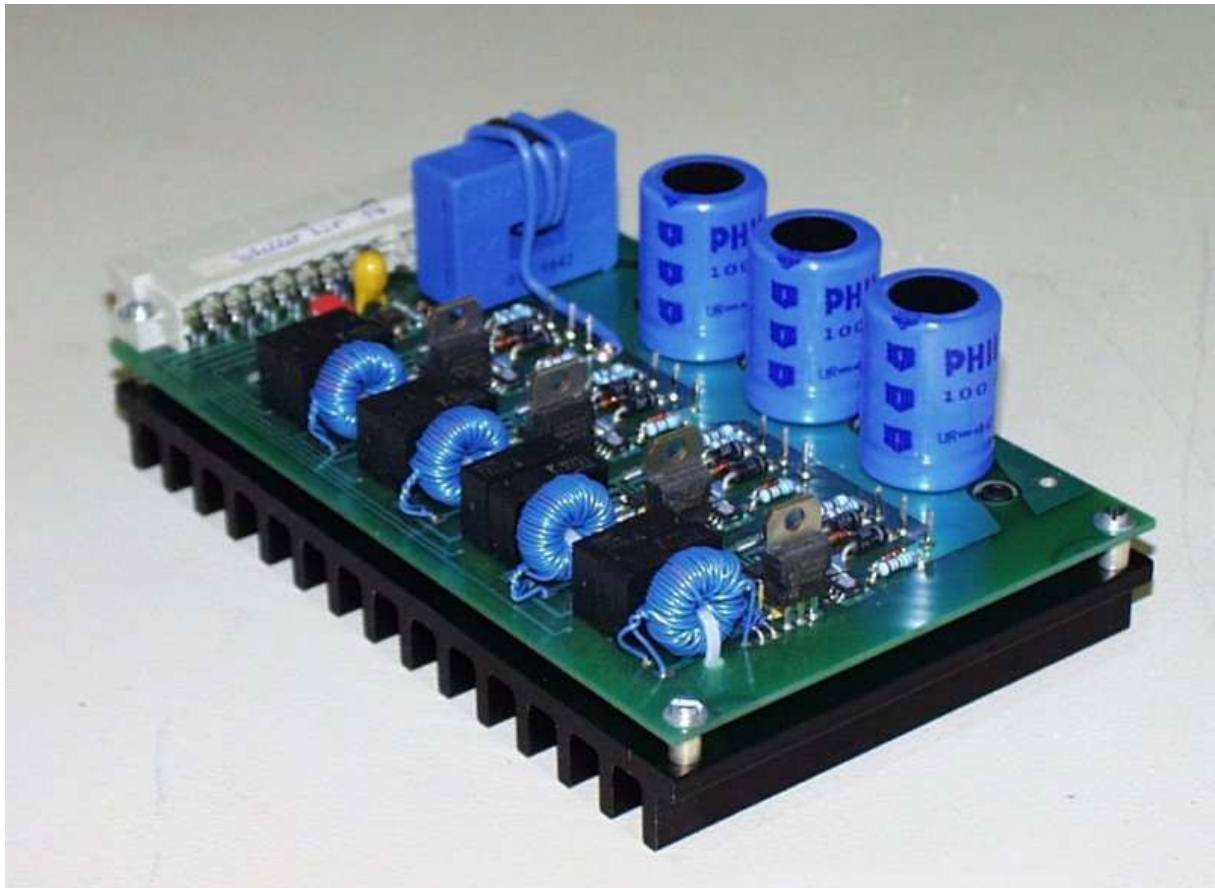


Abb. 4: 4Q-Stellermodul: Zwischenkreisspannung 300 V, Dauerstrom 10 A, Spitzenstrom 27 A

3.2 Sensorik

Zur Überwachung der Lagertemperatur sind je ein PT100-Element am Kaltkopf der beiden Sterling-Kältemaschinen und je eines direkt an den Supraleitern montiert. Zur Auswertung wurden Meßverstärker entwickelt, deren Kennlinie speziell auf den Bereich von 25 bis 150 K angepaßt ist. Ihr Ausgangssignal wird, wie alle Sollwerte, Istwerte und Meßwerte, als ± 10 V-Differenzsignal übertragen, um ein hohes Maß an Störsicherheit gegenüber den leistungselektronischen Komponenten zu erreichen.

3.2.1 Ladungsverstärker

Piezo-Kraftsensoren liefern als Ausgangsgröße eine der auf sie wirkenden Kraft proportionale Ladungsmenge von einigen Pikocoulomb pro Newton. Um daraus ein Nutzsignal zu erzeugen, muß die Ladung auf einem Kondensator gesammelt werden, dessen Spannung dann ein Maß für die Kraft ist. Um auch statische Messungen über einige Stunden durchführen zu können, sind Kondensatoren mit einem sehr hohen Innenwiderstand erforderlich. Mit einem hochohmigen Operationsverstärker zusammen als Integrator geschaltet kann daraus ein

einfacher Ladungsverstärker aufgebaut werden, der sich sogar in das Kryolager integrieren läßt. So kann bei gleichzeitig verbesserter Signalqualität auf die sonst erforderliche große Zahl von speziellen Koaxial-Vakuumdurchführungen verzichtet werden.

3.2.2 Lagesensoren

Bei den Wirbelstrom-Abstandssensoren ergibt sich das Problem, daß eigentlich alle kommerziellen Produkte einen kreis- oder punktförmigen Abtastbereich besitzen. Da aber der Wellendurchmesser gegenüber dem möglichen horizontalen und vertikalen Spiel nicht besonders groß ist, würde zum Beispiel ein seitliches Ausbrechen der Welle aufgrund ihres naturgemäß runden Querschnitts auch vom Vertikalsensor fälschlicherweise als Hub interpretiert werden.

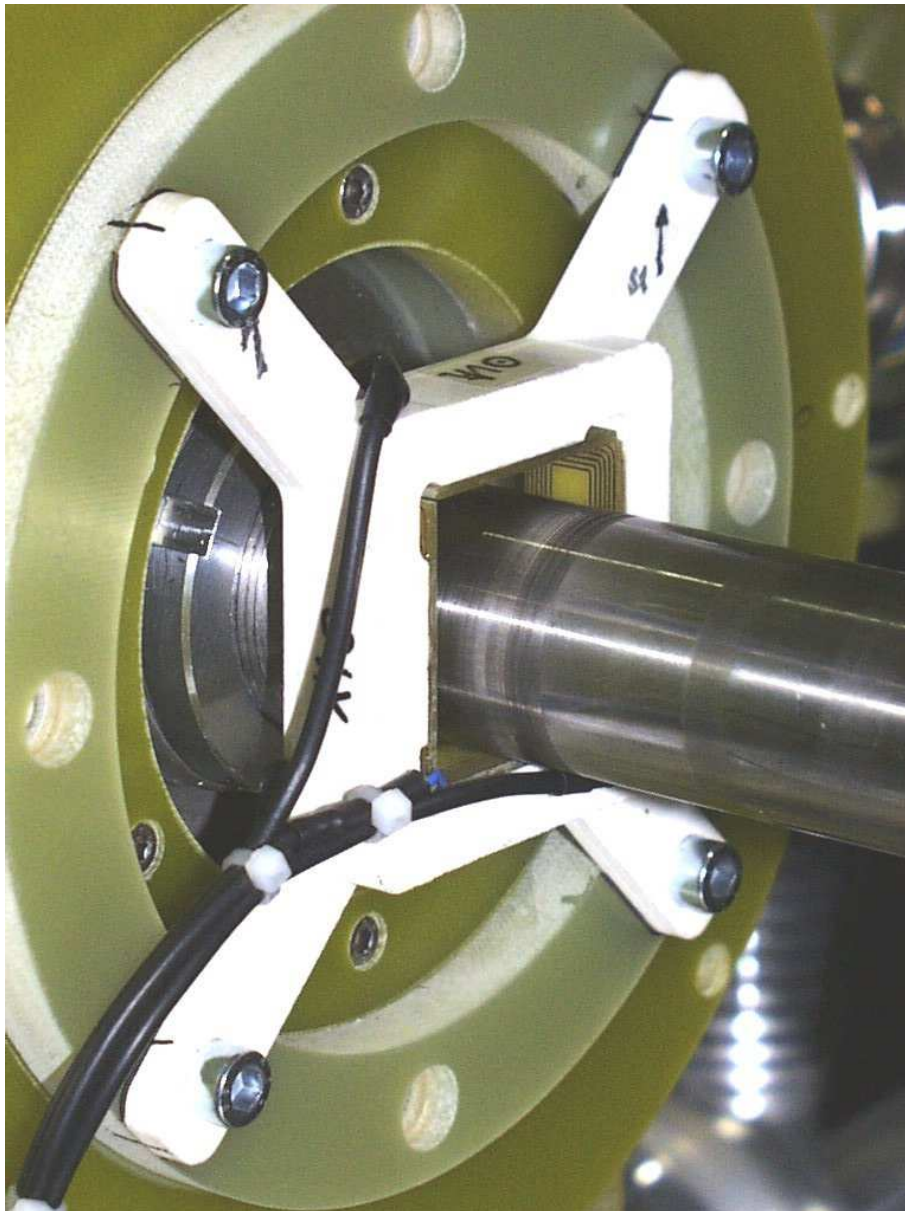


Abb. 5: Lagesensorspule am Lagerbehälter montiert

Abhilfe schafft eine längliche Form der Spulen. Wenn diese zum Beispiel als Printspulen auf doppelseitigem Platinenmaterial hergestellt werden, besteht die Möglichkeit, ihnen sehr einfach eine ovale Form zu geben. Außerdem bietet dieser Herstellungsprozeß gute Wiederholgenauigkeiten bei gleichzeitig niedrigen Kosten. **Abb. 5** zeigt einen kompletten Radiallagesensor aus vier Printspulen in einem Kunststoffrahmen.

Die Meßwerte gegenüberliegender Spulen werden im Differenzverfahren ausgewertet, um Offsetprobleme und Nichtlinearitäten zu mindern. Die Resonanzfrequenz wird schon wegen der geringen Induktivität der Spulen mit 2 MHz relativ hoch gewählt, so daß problemlos auch sehr schnelle Vorgänge gemessen werden könnten. Eine Einschränkung ergibt sich jedoch durch die Anordnung der x- und y-Spulen dicht nebeneinander. Bedingt durch die hohe Frequenz ist die Kopplung der beiden Systeme groß, so daß nur ein System gleichzeitig bestromt werden kann. Daher werden beide Raumrichtungen abwechselnd mit 40 kHz gesampelt.

4 ERGEBNISSE

Stromregler und Steller arbeiten zuverlässig zusammen und ergeben eine kompakte, benutzerfreundliche Einheit. Da der Aufbau des Prüfstands noch nicht ganz abgeschlossen ist, konnten erst wenige Erfahrungen mit dem Gesamtsystem gesammelt werden. Die Ladungsverstärker und Temperaturaufnehmer haben aber bereits in einem anderen Testaufbau zur Klassifizierung von Memory-Metall-Federn ihre Einsatzfähigkeit unter Beweis gestellt.