



Doctoral Thesis

## Gas bearing with active magnetic damping for ultra-high-speed electrical drive systems

**Author(s):**

Looser, Andreas E.

**Publication Date:**

2013

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010174834> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 21378

**GAS BEARING WITH ACTIVE  
MAGNETIC DAMPING FOR  
ULTRA-HIGH-SPEED ELECTRICAL  
DRIVE SYSTEMS**

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
ANDREAS E. LOOSER  
Dipl. El.-Ing. ETH Zürich  
born 29. March 1981  
citizen of Ebnet-Kappel SG, Switzerland

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Johann W. Kolar, examiner  
Prof. ir. Robert H. Munnig Schmidt, co-examiner

2013

# Abstract

Ultra-high-speed electrical drive systems are expected in industrial applications such as turbo-compressors for heat pumps, fuel cells, generators for portable gas or air turbines and cryogenic systems, with rotational speeds ranging from 200'000 revolutions per minute (rpm) to 1 Million rpm at power ratings of a few tens of watts to a few kilowatts. At high rotational speeds, these applications can be realized with high power density, compact size and low weight. While efficient electric machine designs have been developed for highest rotational speeds, their use in industrial applications is currently limited by lacking high speed bearing technologies permitting high reliability and long lifetime.

Promising bearing technologies for high rotational speeds are contact-less bearing concepts such as active magnetic bearings or gas bearings. While magnetic bearings usually are major electromechanical systems with substantial complexity, gas bearings allow compact realizations with high load capacity and stiffness; however, stringent manufacturing tolerances and poor dynamic stability has been limiting their use at high rotational speeds.

A hybrid bearing approach is therefore followed in the present work employing a self-acting gas bearing as the main load carrying element and a small-sized active magnetic damper for stabilization at high rotational speeds; the hybrid gas-magnetic concept aims to combine the advantages of the two individual bearing technologies while eliminating their drawbacks.

Focusing on high speed operation, the basic properties of gas bearings are reviewed and their limitations and critical design aspects involved with ultra-high-speed operation are identified. For stabilization of the gas bearing at high rotational speeds, existing and novel magnetic damper concepts are evaluated. A new eddy current based

---

self-sensing active magnetic damper concept is proposed, allowing for a highly compact integration into a permanent-magnet machine with minimal additional design constraints. Novel circuit topologies are developed to facilitate the eddy current based displacement measurement by means of a high frequency signal injection self-sensing technique.

A prototype machine employing the hybrid gas-magnetic bearing concept is realized and stabilization of an entirely unstable gas bearing design is demonstrated at 210 krpm. The experimental results verify the feasibility of the hybrid bearing approach and demonstrate the capability of the developed self-sensing active magnetic damper concept to facilitate operation of gas bearings at elevated rotational speeds.

# Kurzfassung

Ultrahochdrehende elektrische Antriebssysteme werden in zukünftigen industriellen Anwendungen wie Turbo-Kompressoren für Wärmepumpen, Brennstoffzellen, portablen Generatoren (angetrieben von Luft- oder Gasturbinen) und kryotechnischen Systemen erwartet, mit Drehzahlen von 200'000 Umdrehungen pro Minute (U/min) bis 1 Million U/min bei Leistungen von einigen zehn Watt bis zu einigen Kilowatt. Dank der hohen Drehzahlen können diese Anwendungen mit hoher Leistungsdichte, kompakter Baugröße und geringem Gewicht realisiert werden. Obwohl bereits Elektromotoren mit hoher Effizienz bei höchsten Drehzahlen vorgestellt und gebaut worden sind, ist ihr Einsatz in industriellen Anwendungen stark limitiert, vorwiegend bedingt durch die beschränkte Lebensdauer von existierenden Lagertechnologien bei diesen Drehzahlen.

Potentiell geeignete Lagertechnologien für hohe Drehzahlen sind berührungslose Lagerkonzepte wie Magnetlager oder Luftlager. Die Installation von Magnetlagern resultiert meist in einem System mit erhöhtem Bauvolumen und erweiterter Komplexität, wohingegen Luftlager sehr kompakt mit hoher Tragkraft und Steifigkeit realisiert werden können. Der Einsatz von Luftlagern bei hohen Drehzahlen ist jedoch stark eingeschränkt, hauptsächlich wegen der schlechten dynamischen Stabilität und der deshalb geforderten engen Fertigungstoleranzen. In der vorliegenden Arbeit wird deshalb ein hybrides Lagerkonzept verfolgt. Dabei wird ein dynamisches Luftlager als primäres Lagerelement eingesetzt, welches bei hohen Drehzahlen mittels eines aktiven magnetischen Dämpfers mit entsprechend kleiner Baugröße stabilisiert wird. Das Ziel des hybriden Ansatzes ist die Kombination der Vorteile von beiden Lagertechnologien bei gleichzeitiger Minimierung bzw. Elimination ihrer Nachteile.

---

Fokussierend auf einen Betrieb bei ultrahohen Drehzahlen, werden die grundlegenden Eigenschaften, Möglichkeiten und Einschränkungen von Luftlagern erläutert und kritische Aspekte bezüglich Auslegung und Fertigung aufgezeigt. Zur Stabilisierung des Luftlagers bei hohen Drehzahlen werden sowohl bekannte wie auch neuartige magnetische Dämpferkonzepte evaluiert. Ein neues, sensorloses Dämpferkonzept gestützt auf eine wirbelstrombasierte Distanzmessung wird dargelegt, welches eine hohe Integration in eine hochdrehende Permanentmagnet-Synchronmaschine erlaubt und dabei die zugrundeliegende Maschinenauslegung und Konstruktion nur minimal beeinträchtigt. Zu diesem Zweck werden neuartige dedizierte Verschaltungstopologien der Dämpfer-Aktuatorwicklung mit den Leistungsverstärkern untersucht, welche das sensorlose wirbelstrombasierte Messprinzip mittels Superposition eines hochfrequenten Testsignals ermöglichen.

Ein Prototypen-Aufbau einer Permanentmagnet-Synchronmaschine unter Anwendung der hybriden Lagerung wird präsentiert, welcher mittels der implementierten aktiv magnetischen Dämpfung den stabilen Betrieb eines stark instabilen Luftlagers bis 210 krpm ermöglicht. Die experimentellen Resultate belegen die Tauglichkeit und Machbarkeit des hybriden Lagerungskonzepts und demonstrieren die Möglichkeit des entwickelten Dämpferkonzepts einen stabilen Betrieb von Luftlagern bei hohen Drehzahlen zu gewährleisten.