

DISS. ETH Nr. 29873

# LUFTGELAGERTE SPINDEL MIT AKTIVEM MAGNETISCHEM AKTUATOR

Abhandlung zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN  
(Dr. sc. ETH Zürich)

vorgelegt von

FABIAN DOMINIK STOOP  
MSc ETH Masch.-Ing., ETH Zürich  
geboren am 09.07.1993

angenommen auf Antrag von

Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Konrad Wegener, Leiter der Doktorarbeit  
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. habil. Friedrich Bleicher, Koexaminator

2024

# Abstract

Microsystem technology places high demands on the manufacturing industry, especially concerning the realization of small structures with high precision and at high production rate. Ensuring these requirements necessitates precise components, with particular emphasis on aerostatic bearings and mechatronic elements playing a prominent role in the development of highly precise machine tool spindles.

This work focuses on the investigation of air-bearing spindles with active magnetic actuators. The presented methods enable the integration of these technologies into manufacturing engineering and provide insights into the optimization of air bearings, rotor systems, and motors with actuators. Within the scope of this research, various aspects of fluid dynamics, rotor dynamics, control engineering, and measurement technology are explored, all of which have relevance across diverse application domains. A significant emphasis is placed on the development of analytical modeling approaches to solve complex problems.

Another significant focal point of this work is the importance of air bearings and their substantial influence on the stability and performance of rotor systems. In this context, a detailed examination of the behavior of different types of air bearings with specialized nozzles and porous inlet conditions is conducted. These investigations are subsequently analyzed within an analytical rotor dynamics model, with aspects such as vortex trajectories, stiffness, damping, load-bearing capacity, and the consideration of uncertainties and disturbances being thoroughly scrutinized. The insights gained serve as the basis for the development of a novel spindle equipped with both air bearings and an active magnetic actuator.

The spindle test stand plays a pivotal role in evaluating the air-bearing spindles with active magnetic actuators. The objective is to design a modular spindle test stand capable of precisely measuring spindle movements as well as the forces and accelerations acting upon it. A key feature of this test stand is its modularity, enabling the flexible integration of various spindle types and measurement devices. The knowledge derived from the test stand measurements forms the foundation for the development and optimization of this

technology.

The primary objective of this work is to investigate a novel spindle equipped with an integrated kilowatt-range motor and actuator for active compensation, in conjunction with air bearings. Such an actuator functions similarly to a support winding in the stator and can act as an active magnetic bearing in the radial direction for a motor with an air gap winding. The actuator and the motor are integrated and operate across the entire active magnetic length of the rotor and stator, allowing for an increase in the critical bending speed. The realization of air-bearing spindles with active magnetic actuators raises fundamental questions, particularly regarding their application in boundary conditions while ensuring high precision. These spindles, tailored for functional precision, could serve as the basis for sustainable manufacturing value chains and offer versatile applications in precision machining.

# Zusammenfassung

Die Mikrosystemtechnik stellt hohe Anforderungen an die Fertigungsindustrie, insbesondere hinsichtlich der Realisierung kleiner Strukturen mit hoher Präzision und hoher Produktionsrate. Die Gewährleistung dieser Anforderungen erfordert präzise Komponenten, wobei insbesondere aerostatische Lager und mechatronische Elemente eine herausragende Rolle bei der Entwicklung hochpräziser Werkzeugmaschinen-spindeln spielen.

Diese Arbeit widmet sich der Untersuchung von luftgelagerten Spindeln mit aktiven magnetischen Aktuatoren. Die präsentierten Methoden ermöglichen die Integration dieser Technologien in die Fertigungstechnik und bieten Einblicke in die Optimierung von Luftlagern, Rotorsystemen und Motoren mit Aktuatoren. Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Aspekte der Strömungsmechanik, Rotordynamik, Regelungstechnik und Messtechnik beleuchtet, die in vielfältigen Anwendungsbereichen von aktueller Relevanz sind. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung analytischer Modellierungsansätze zur Lösung komplexer Probleme.

Ein weiterer bedeutender Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Bedeutung von Luftlagern und ihrem massgeblichen Einfluss auf die Stabilität und Leistung von Rotorsystemen. In diesem Kontext erfolgt die detaillierte Untersuchung des Verhaltens verschiedener Luftlagertypen mit speziellen Düsen und porösen Einlassbedingungen. Diese Untersuchungen werden anschliessend in einem analytischen Rotordynamikmodell analysiert, wobei Aspekte wie Wirbelbahnen, Steifigkeit, Dämpfung, Tragfähigkeiten sowie die Berücksichtigung von Unsicherheiten und Störgrössen eingehend betrachtet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Entwicklung einer neuartigen Spindel, die sowohl mit Luftlagern als auch mit einem aktiven magnetischen Aktuator ausgestattet ist.

Der Spindelteststand spielt eine entscheidende Rolle bei der Evaluierung der luftgelagerten Spindeln mit aktiven magnetischen Aktuatoren. Das Ziel besteht darin, einen modularen Spindelteststand zu konzipieren, der die Bewegungen der Spindel sowie die auf sie wirkenden Kräfte und Beschleunigungen präzise messen kann. Ein wesentliches Merkmal dieses Teststands ist seine Modularität, die es ermöglicht, verschiedene Spindeltypen und verschiedene Messgeräte flexibel zu integrieren. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den

Teststandmessungen bilden die Grundlage für die Entwicklung und Optimierung dieser Technologie.

Das Hauptziel dieser Arbeit besteht darin, eine neuartige Spindel zu untersuchen, die mit einem integrierten Motor und Aktuator im Kilowatt-Bereich für aktive Kompensation ausgestattet ist, in Verbindung mit Luftlagern. Ein derartiger Aktuator ähnelt in seiner Funktionsweise einer Tragwicklung im Stator und vermag es, als aktives Magnetlager in radialer Richtung für einen Motor mit Luftspaltwicklung zu fungieren. Der Aktuator und der Motor sind integriert und wirken über die gesamte aktive magnetische Länge von Rotor und Stator, was es ermöglicht, die biegekritische Drehzahl zu erhöhen. Die Realisierung luftgelagerter Spindeln mit aktiven magnetischen Aktuatoren wirft fundamentale Fragen auf, insbesondere im Hinblick auf ihren Einsatz in Grenzbereichen bei gleichzeitiger Gewährleistung hoher Präzision. Diese Spindeln, die gezielt auf funktionale Präzision optimiert sind, könnten die Grundlage für nachhaltige Fertigungswertschöpfungsketten bilden und vielseitige Anwendungen in der Präzisionsbearbeitung ermöglichen.