

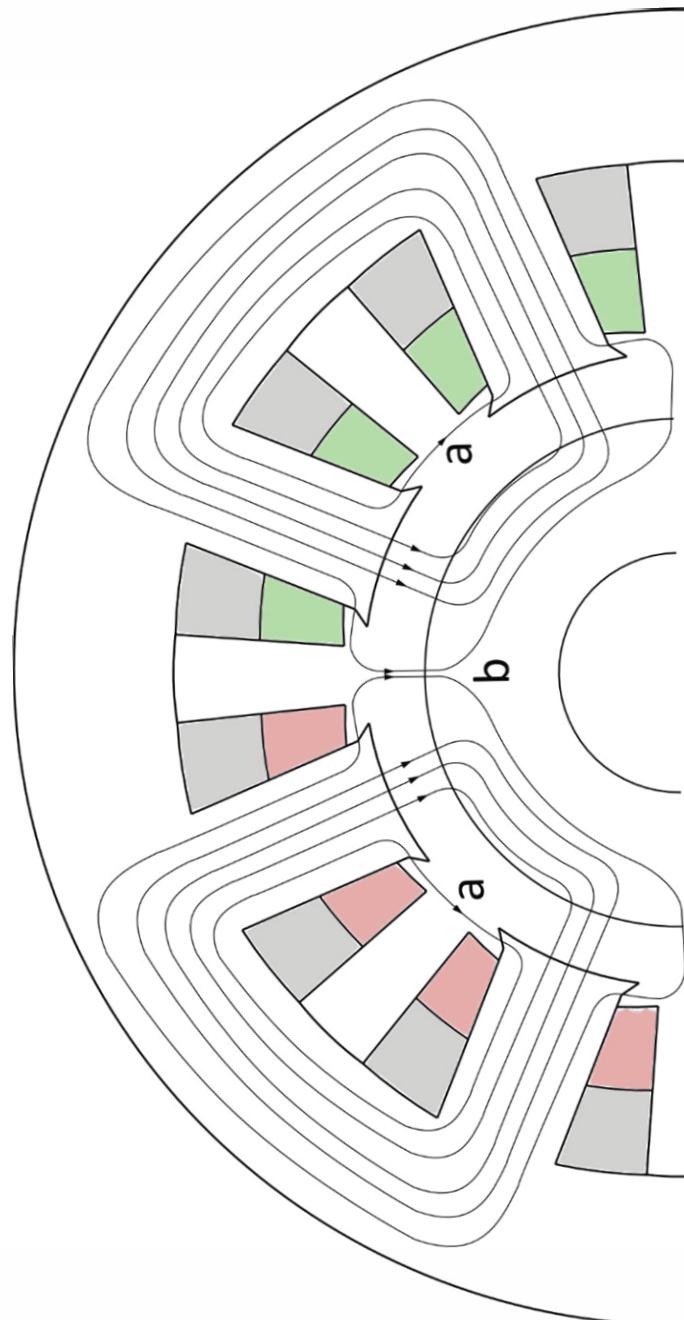


TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ

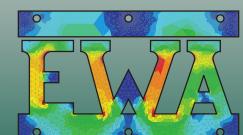
11. Workshop Magnetlagertechnik Zittau-Chemnitz

Chemnitz

5. - 6. September 2017



Professur für
Elektrische Energie-
wandlungssysteme und Antriebe



Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Ralf Werner

Technische Universität Chemnitz
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe
09107 Chemnitz

Redaktion

Dipl.-Ing. (FH) Johannes Rudolph
johannes.rudolph@etit.tu-chemnitz.de

Dipl.-Ing. Fabian Lorenz
fabian.lorenz@etit.tu-chemnitz.de

©2017 Technische Universität Chemnitz

Alle Rechte vorbehalten

Printed in Germany

Vorwort

Im Jahr 2015 fand der Magnetlagerworkshop Zittau-Chemnitz zum zehnten Mal statt. Für die sehr erfolgreiche Durchführung, die spannenden Diskussionen und das Rahmenprogramm sei an dieser Stelle noch einmal herzlichst gedankt. Es ist eine große Freude mit der Durchführung des Workshops in diesem Jahr in Chemnitz eine neue Dekade zu beginnen. In Anknüpfung an die erfolgreichen Veranstaltungen der letzten Jahre soll der Workshop auch im Jahr 2017 wieder eine Basis für den Austausch von Erfahrungen und die Vorstellung neuer Entwicklungen auf dem Gebiet der Magnetlagertechnik für Forscher und Anwender sein.

Die Organisatoren danken den Autoren für die zahlreichen, interessanten Beiträge und hoffen auf anregende Diskussionen.

Prof. Dr.-Ing. Ralf Werner

Inhalt

<i>Das leistungsfähige und modulare Werkzeug Maglap++ zur Zustandsdiagnose und Überwachung magnetgelagerter Maschinen</i> Mikail Shmachkov, Ivo Noack, Frank Worlitz	5
<i>Zuverlässigkeitssbewertung aktiver Magnetlagerungen unter der Berücksichtigung erweiterter Umgebungsbedingungen</i> Stephan Düsterhaupt, Frank Worlitz	17
<i>Experimentelle Bestimmung der Rotorverluste eines dreipoligen kombinierten Radial-/Axiallagers aus Pulververbundwerkstoffen</i> Robert Seifert, Erik Fleischer, Wilfried Hofmann	27
<i>Herstellung elektromagnetisch aktiver Strukturen mittels 3D Multimaterialdruck</i> Fabian Lorenz, Johannes Rudolph, Ralf Werner	35
<i>Auswirkungen hoher Temperaturen auf die Auslegung und Gestaltung aktiver Magnetlager</i> Torsten Rottenbach, Christian Vanek, Frank Worlitz	39
<i>Eignung von Gleitlagern als Fanglager für schwere magnetgelagerte Rotoren</i> Christian Vanek, Frank Worlitz	47
<i>Entwicklung und Bau eines neuartigen magnetischen Momentenlagers</i> Holger Neumann, Klaus Pantke, Jürgen Frantzheld, Frank Worlitz	53
<i>Berührungsloses 6-Achs-Messsystem für lagerlose reluktante Rotations- Linearmotoren</i> André Schleicher, Ralf Werner	67
<i>Differentiation und Linearisierung von Messsignalen eines streuflussbasierten Messsystems für magnetisch gelagerte Rotoren</i> Johannes Rudolph, Arthur Sieber, Ralf Werner	75

Das leistungsfähige und modulare Werkzeug *Maglap++* zur Zustandsdiagnose und Überwachung magnetgelagerter Maschinen

Mikhail SHMACHKOV, Ivo NOACK, Frank WORLITZ

Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik (IPM)

Hochschule Zittau/Görlitz

Theodor-Körner-Allee 16

02763 Zittau, Germany

Tel.: +49 3583 612 4383, Fax: +49 3583 612 3449

Email: Mikhail.Shmachkov@hszg.de, I.Noack@hszg.de, F.Worlitz@hszg.de

Kurzfassung

Moderne aktive Magnetlager sind hoch präzise mechatronische Systeme, deren Überwachung, Zustandsdiagnose und Analyse spezielle Anforderungen mit sich bringen. Diese müssen auch von der zu verwendenden Software zur Messwerterfassung, Datenspeicherung und -verarbeitung erfüllt werden. Ein solches Messwerterfassungssystem ist eine komplexe Software, die vor allem schnell und genau arbeiten muss. Die bisherigen Umsetzungen unterlagen einigen Einschränkungen, die sich nachteilig auf Effizienz, Erweiterbarkeit und Programmdesign auswirkten. Ebenfalls problematisch sind die verwendeten Lizenzmodelle und die fehlende Quellcodetransparenz in der Software. Für das Forschungspersonal ist nicht ersichtlich, wie interne Funktionen (auch Module usw.) arbeiten und wie sie in bestimmten Situationen reagieren. Um diesen Problemen und Begrenzungen entgegenzuwirken, wurde am Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik (IPM) mit der Entwicklung der Software „Magnetlagerprogramm“ (*Maglap++*, Logo: Abb. 1) begonnen.



Abb. 1: Logo von Maglap++

Maglap++ ist ein Cross-Plattform-Projekt in der Programmiersprache C++ und kann derzeit auf Windows und Linux gleichermaßen eingesetzt werden. Das System ist sehr modular aufgebaut, wodurch sich nahezu beliebige Verarbeitungsketten erzeugen lassen. So kann das Programm, allein durch die Anordnung der zu verwendenden Module und hier speziell der Datenquelle und der Datensenke, zu einem Server oder einer Client-Applikation konfiguriert werden. So ist zum Beispiel ein perfor-

mantes Aufzeichnen und Überwachen der Anlage möglich, während zeitgleich auch Techniker von anderen Geräten aus zu Diagnosezwecken auf die Daten schauen können. Denkbar wäre hierfür auch eine Android-App, die auf einem Tablet als Analysewerkzeug fungiert.

Da Herkunft und Ziel der Daten durch eigenständige Module bestimmt werden und alle verarbeitenden Module weitestgehend frei kombiniert werden können, beschränkt sich der Einsatz von *Maglap++* nicht nur auf die Magnetlagertechnik. Vielmehr bietet es einen Raum zur kreativen Gestaltung von Verarbeitungsketten, bis hin zur modellgestützten Simulation von Anlagenteilen. Die Stärken von *Maglap++* liegen in einer effizienten, plattformunabhängigen Programmierung und dem äußerst modularen Aufbau.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Magnetlagertechnik findet große Verwendung in Industrie und Wissenschaft, vor allem im Bereich der Energie- und Weltraumtechnik. Im Rahmen verschiedener Projekte finden am IPM die theoretischen und experimentellen Untersuchungen an den Versuchsanlagen statt. Für die Arbeit an derartigen Versuchsständen wird Software benötigt, die den speziellen Anforderungen gewachsen ist. Im Rahmen von Industrie 4.0 spielt die Vernetzung der Systemkomponenten sowie deren Zustandsdiagnose und Überwachung eine entscheidende Rolle. Die Magnetlagerregelkreise besitzen aufgrund ihres Funktionsprinzips inhärent das Potenzial, derartig ausgerüstete Applikationen in ein Netzwerk im Sinne von Industrie 4.0 zu integrieren.

Die Durchführung der theoretischen und experimentellen Forschung beeinflusst mehrere Bereiche der Industrie. Die wissenschaftlichen Untersuchungen an den Versuchsanlagen bedürfen der sensorischen Aufnahme von Daten durch die Technik mithilfe von Messgeräten. Anschließend müssen die erfassten, analogen Werte, zur weiteren Verarbeitung, in eine digitale Form überführt werden. Die erstellten Messwerte müssen mithilfe von mathematischen und physikalischen Algorithmen verarbeitet und analysiert werden. Diese Methoden stellen sich als komplizierte und langwierige Kalkulationen dar. Dazu ist eine spezielle analytische Software notwendig. Abbildung 2 stellt diesen Themenkomplex schematisch dar und dient als Orientierungspunkt bei der Entwicklung von *Maglap++*.

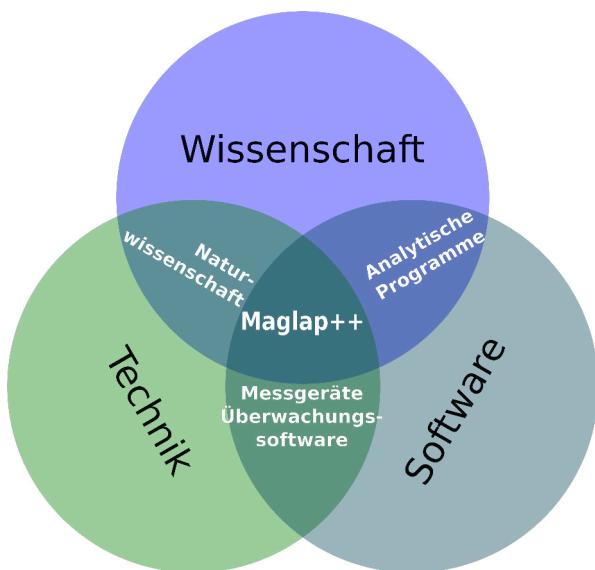


Abb. 2: thematische Einordnung von Maglap++

1.2 Maglap++

Das Projekt *Maglap++* wurde als studentisches Programm zur simplen Messwerterfassung gegründet. Während der Entwicklung (2014-2016) wurde dieses Programm von Studenten aus verschiedenen Ländern und Studienrichtungen erweitert. Dank des Enthusiasmus der Entwickler und durch die Hilfe der hochqualifizierten Mitarbeiter des IPMs wurde das Ziel gesetzt, *Maglap++* als qualitativ hochwertige und anwendungsfreundliche Software aufzubauen. Überdies wurde die Entscheidung getroffen, ein modulares Konzept in dem Programm umzusetzen, welches den Entwicklungsprozess, vor allem mit Blick auf die nachfolgende Erweiterung, verbessert. Die dem Programm zugewiesenen Aufgaben

können jetzt als unabhängige Module realisiert werden. Außerdem ist es damit möglich, die Arbeit zwischen dem Entwicklungspersonal aufzuteilen und sauber zu trennen. Die Erweiterung des Projektes erfolgt mithilfe des integrierten Plugin-Systems. Die dazu entwickelte Programm- und Elementorganisation erlaubt es, die neuen Module leicht und unabhängig zu entwickeln und in das Hauptprogramm zu integrieren.

1.3 Zielstellung

Formulierung

Für theoretische und experimentelle Untersuchungen an Magnetgenlagerversuchsständen ist es notwendig, eine leistungsfähige und funktionale Software zur

- Messwerterfassung,
- Datenverarbeitung,
- Client-Server-Verbindung,
- Darstellung,
- Analyse,
- Datenspeicherung und
- Zustandsdiagnose

zur Verfügung zu haben. Dafür wird am IPM (Fachgebiet „Mechatronische Systeme“) das Projekt *Maglap++* bearbeitet. Das Messwerterfas-

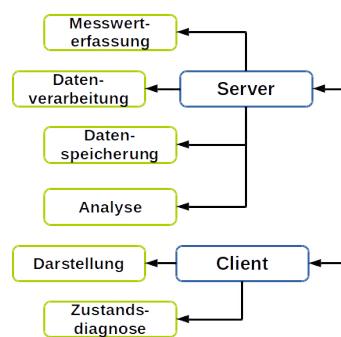


Abb. 3: Maglap++ System

sungssystem *Maglap++* ist eine Software zur Prozessverarbeitung, Prozessanalyse, Prozessauswertung und Visualisierung von Prozessen und Prozesszuständen. Dieses System besteht aus zwei Teilen: Client und Server (Abb. 3). Das Konzept einer Client-Server-Struktur sah vor, die Daten per Netzwerkverbindung an einen angeschlossenen Client zu übertragen, um die „Mensch-Maschine-Schnittstelle“ örtlich von der Messwerterfassung zu trennen.

Programmanforderungen

Maglap++ soll eine universelle, modulare und flexible Cross-Plattform-Software werden. Es soll aus mehreren Modulen bestehen, die jeweils bestimmte Aufgaben erfüllen. Dazu müssen zunächst Module existieren, die in der Lage sind, Messwertdaten zu erfassen. Als Quellen können dabei verschiedene Geräte (z.B. Messwerterfassungskarte), Netzverbindungen und Dateien dienen. Die erfassten Daten sind anschließend zu verarbeiten (z.B. Skalierung, Reduzierung usw.). Die Ergebnisse müssen dargestellt, gespeichert und protokolliert werden. Je nach Wunsch des Benutzers müssen verschiedene Module eingesetzt und konfiguriert werden. Für die Verwendung, Erweiterung und Integration der Module muss ein Extension-/Plugin-System existieren. *Maglap++* soll sich nicht nur auf Magnetlagertechnik fokussieren, sondern ein gutes Forschungstools für alle naturwissenschaftlichen Richtungen sein.

Um eine hohe Qualität des Programms sicherzustellen, müssen die Regeln der Softwaretechnik beachtet werden. Das System muss die Möglichkeit bieten, die verschiedenen Aufgaben (und ihre Kombinationen) realisieren zu können. Alle Einzelteile des Programms sollen eine ereignisgesteuerte Nutzeroberfläche (eng. Graphical User Interface) und eine Konfigurationsdatei besitzen. Bei der Entwicklung der Komponenten ist zu beachten, dass die zu verarbeitenden Prozesse unterschiedlich sind (z.B. Anzahl der Kanäle, verschiedene Datenmengen, Abtastfrequenz usw.). Dazu ist eine Systematisierung der Eingangsdaten zu erstellen. Für die Entwicklung solcher Schnittstellen sind entsprechende Regeln zu definieren. Die Programmierschriften basieren auf der allgemeinen Programmierrichtlinie des IPM. Für Test und Verifikation ist eine Testanleitung für die Software zu verfassen. Notwendig ist die Erstellung eines Test-Frameworks mit allgemeinen Testverfahren und Testszenarien. Für das gesamte Projekt sollen eine Dokumentation und eine Bedienungsanleitung erstellt werden.

2 Projektvorstellung

2.1 Notwendige Definitionen

Durch die modulare Struktur von *Maglap++*, ist es notwendig, die Hauptschnittstellen exakt zu be-

schreiben. Das heißt, um die Dokumentation klar, deutlich und verständlich zu präsentieren, müssen die verschiedenen Programmteile definiert werden.

Das Programm muss eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche und eine dynamische Integration der Module mithilfe eines Plugin-Systems bieten. Dafür ist „*General Core*“ verantwortlich. Dieses Element stellt sich als Basis von *Maglap++* dar. Außerdem wird das Erweiterungssystem des Programms und der Module unterstützt. Später kann auch „*General Core*“ wegen des modularen Aufbaus erweitert oder verändert werden.

Die Module, welche spezielle Aufgaben realisierende, werden als „*Units*“ festgelegt. Das heißt, die Module, welche die Programmfunctionen von *Maglap++*, wie Messwerterfassung, Datenverarbeitung usw., darstellen, bilden einen speziellen Modulbereich. Die *Maglap++-Units* unterteilen sich in drei bestimmten Gruppen:

Receiver — Die Units, welche für die Erfassung der Daten (Messwerte usw.) von verschiedenen Quellen und Übergabe dieser an interne Module (Units/Core) verantwortlich sind;

Processing — Die Units, welche die Daten verarbeiten und die notwendigen Kalkulationen realisieren;

Sender — Die Units, welche die verarbeiteten (berechneten) Daten oder Messwerte an externe Objekte (Dateien, Clients usw.) übergeben;

Und die letzte Definition ist „*Core*“. Sie stellt sich als komplexe Unit dar. Dort kann die Kombination der zu verwendenden Units erstellt werden. Anderes genannt, *Core* ist ein Unterprogramm, welches komplizierte Aufgaben verwirklicht. Zusätzlich gehören die Module dazu, welche sich nicht in eine der drei Grundgruppen der Units einordnen lassen. Mit anderen Worten, es handelt sich dabei um besondere Units.

2.2 Arbeitspunkte

Die Aufgabenbearbeitung erfolgt nach den Regeln der objektorientierten Programmierung (OOP) und des Software Engineering (SE). Für die Erfüllung der Zielstellung müssen die folgende Arbeitspunkte (AP) bearbeitet werden:

- **Programm-AP:**

- AP-1. Betriebssystemunabhängiges Basisprogramm
- AP-2. Dynamisches Modulsystem
- AP-3. Test und Verifikation
- AP-4. Dokumentation der Ergebnisse

- **Unit/Core-AP:**

- AP-5. Messwerterfassung
- AP-6. Datenbearbeitung
- AP-7. Client-Server-Verbindung
- AP-8. visuelle Darstellung
- AP-9. Messwertanalyse/-auswertung
- AP-10. Messwertarchivierung
- AP-11. Zustandsdiagnose

Dies sind die aktuellen Aufgaben des Projekts. Die Funktionalität wird in Zukunft erweitert. Außerdem ermöglicht es das aktuelle Konzept, Module zu erstellen und in das Programm zu integrieren, die nicht auf Magnetlagertechnik beschränkt sind. Damit kann *Maglap++* verschiedene Modifikationen unterstützen. Abschließend kann man das Hauptziel des Projekts als universales, betriebssystemunabhängiges modulares Forschung-Werkzeug mit örtlicher Trennung der Mensch-Maschine-Schnittstelle definieren.

2.3 Programm-Arbeitspunkte

AP-1. Betriebssystemunabhängiges Basisprogramm
Das Programm soll weitestgehend betriebssystemunabhängig sein, d.h. *Maglap++* wird für die Betriebssysteme Windows und Linux als Cross-Plattform-Applikation umgesetzt. Dazu soll ein universaler Quellcode verwendet werden. Für die Entwicklung des Programms wird die Programmiersprache „C++“ genutzt. Um die Unabhängigkeit vom Betriebssystem zu erreichen und eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) zu erstellen, wird die Programmabibliothek „wxWidgets“ verwendet. Für die Erstellung des Quellcodes und des Kompilats wird „Code::Blocks“ als integrierte Entwicklungsumgebung (IDE) in Kombination mit dem „C++“-Compiler der GNU Compiler Collection („GCC“) genutzt.

AP-2. Dynamisches Modulsystem

Ein allgemeines, unabhängiges und modulares Umsetzungskonzept ist zu entwickeln. Dieses Konzept soll die Möglichkeit bieten, neue Elemente und Komponenten leicht und schnell zu integrieren. Es ist als API zu realisieren. *Maglap++* ist nicht nur

auf Magnetlagertechnik fokussiert, sondern soll als universelle, modulare und flexible Cross-Plattform-Software mit Extension-/Plugin-System zur Prozessverarbeitung, Prozessanalyse, Prozessauswertung und Visualisierung von Prozessen und Prozesszuständen realisiert werden.

AP-3. Test und Verifikation der Software

Um die Funktionsfähigkeit der erstellten Software nachzuweisen und die Ergebnisse zu verifizieren, sind verschiedene Tests und Vergleiche mit Referenzprogrammen durchzuführen. Für die Tests der Software sind Testanleitungen und Testszenarien zu erstellen. Ein Test und eine Verifikation müssen laut SE-Regeln durchgeführt werden. Die erhaltenen Ergebnisse sind zu dokumentieren und zu protokollieren.

AP-4. Dokumentation der Ergebnisse

Alle Ergebnisse sind zu dokumentieren. Die Dokumentationssprache ist deutsch und in Teilen englisch. Insbesondere werden die Quellcodedokumentation und ausgewählte Diagramme englisch dokumentiert. Damit ist sichergestellt, dass fremdsprachiges Personal barrierefrei damit arbeiten kann. Darüber hinaus ist Mehrsprachigkeit sinnvoll, da Literaturquellen und Syntax im Bereich der Softwareentwicklung grundsätzlich in englisch ausgeführt sind. So fügt sich die Dokumentation nahtlos in die Entwicklungsumgebung ein. Als Dokumentation zu realisieren:

- Lastenheft
- Pflichtenheft
- Balkenplan
- Arbeitspaketbeschreibung
- Projektdokumentation
- Quellcodedokumentation

2.4 Unit/Core-Arbeitspunkte

AP-5. Messwerterfassung

Das Hauptziel der Messwerterfassung ist die Erfassung der Daten von der Technik. Ausgehend vom Ziel gehört sie zum zweiten Bereich: die Messtechnik und die Software. Die Messwerterfassung unterteilt sich in drei Schritte und bildet eine Messkette (Abb. 4):

- Erfassung der Messgröße
- Umwandlung des Messsignals in ein normiertes Ausgangssignal
- Erfassung der Messwerte (Digitalisierung)

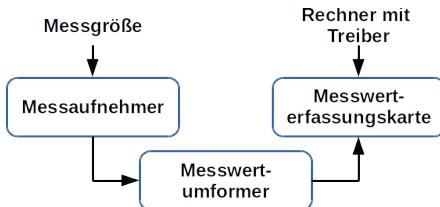


Abb. 4: Messkette

Die Charakteristiken des Versuchsstandes (z.B. Rotorpositionen) werden sensorisch erfasst. Der Messaufnehmer wandelt die physikalische Messgröße in ein elektrisches Strom- oder Spannungssignal um.

Die Signale der Sensoren werden durch Kabel (Sensorleitung) an ein Umformungsgerät übertragen. Der Messumformer speist einerseits das Sensorelement mit elektrischer Hilfsenergie und normiert andererseits das Messsignal in ein analoges Ausgangssignal. Das heißt, Eingangssignale werden mithilfe des analogen Messwertumformers in definierte, analoge Ausgangssignale umgewandelt.

Dieses Ausgangssignal wird mithilfe der Messwerterfassungskarte erfasst und in eine digitale Form umgewandelt. Diese Daten werden im Puffer der Karte zwischengespeichert, von wo aus sie mithilfe des Treibers in das Programm übernommen werden können. Diese Aufgabe übernimmt das Messwerterfassungsmodul. Hierbei handelt es sich um eine Receiver-Unit von *Maglap++*. Diese Unit muss ständig die Messdaten erfassen und an die nachfolgenden Units (oder Cores) übertragen. Die Messwerterfassung soll vollständig konfigurierbar sein, um den Messwerterfassungsprozess wie gewünscht steuern zu können.

AP-6. Datenbearbeitung

Die Zustandsdiagnose und insbesondere die Visualisierung an der Mensch-Maschine-Schnittstelle erfolgt auf der Basis physikalischer Messgrößen. Die dazu erforderlichen Umwandlungen und Umrechnungen einschließlich einer ggf. notwendigen Filterung erfolgen in der Datenverarbeitung. Dazu werden Units aus der Gruppe der Processing-Units verwendet. Diese Units müssen ihre Daten von einer vorangestellten Unit bekommen, dann verarbeiten (umrechnen, usw.) und die erstellten Ergebnisse weiter an nachfolgende Units übergeben. Dieser Prozess muss vom Benutzer kontrolliert werden können und ereignisgesteuert ablaufen.

AP-7. Client-Server-Verbindung

Der Server, im Sinne der Messwerterfassung und Verarbeitung, und der Client, im Sinne des Beobachters, können räumlich voneinander getrennt eingesetzt werden. Die Kommunikation zwischen Server und Client soll dazu unter Anwendung industrieller Netzwerktechnologien erfolgen. Dazu zählen insbesondere die Kombination aus Transmission Control Protocol und Internet Protocol (TCP/IP). Auf der Server-Seite muss dazu das Server-Modul eingesetzt werden, welches die Netzwerkverbindung erstellt und an den relevanten Ports lauscht (Bind und Listening). Das Beobachter-Programm muss sich mithilfe des Client-Moduls mit dem Server verbinden und kommunizieren. Nach der Erstellung der Client-Server-Verbindung müssen die Server-Daten auf die Clients übertragen werden.

AP-8. Visuelle Darstellung

Die von einem Server mit Messwerterfassungskarte oder einem Mirror-Server empfangenen Daten sollen auf der Client-Seite geeignet dargestellt werden. Die Informationen sind so aufzubereiten, dass eine Anzeige tabellarisch, im kartesischen Koordinatensystem und/oder als Orbit auswählbar ist. Diagramme mit einem kartesischen Koordinatensystem stellen auf der Abzisse die Zeit und auf der Ordinate den Funktionswert (physikalische Messgröße) dar. Die Orbitdarstellung eignet sich zur Visualisierung von Wellenlagen und Spulenströmen.

AP-9. Messwertanalyse/-auswertung

Ein Auswertungsmodul ist zu erstellen, das die Daten auswerten und die Resultat protokollieren kann. Zu den Aufgaben der Auswertung gehören die Berechnung, Bewertung, Analyse und Einschätzung der Ergebnisse. Außerdem ist eine allgemeine TEX-Vorlage zu entwickeln, die für die Erstellung des Protokolls in der Form einer PDF-Datei (PDF) genutzt werden kann.

AP-10. Messwertarchivierung

Ein Archivierungsmodul ist zu implementieren, das in einer geeigneten Form verschiedene Messdaten speichern kann. Die Messwertarchivierung soll verschiedene Varianten der Speicherung und Komprimierung anbieten. Innerhalb der Entwicklung der Messwertarchivierung wird das Ziel verfolgt, den TDC, der die gruppierten Daten (Messwerte) und eine Beschreibung dazu enthält, und das Verfahren TT, das den Kompressionskoeffizienten mithilfe der spezifischen Kodierung verbessert, zu erstellen.

AP-11. Zustandsdiagnose

Mit „Maglap++“ soll auch der Zustand einer magnetgelagerten Maschine diagnostizierbar sein. Hierzu sind Informationen durch geeignete Algorithmen so zu verdichten, dass ausgehend von abstrakten Messwerten Bewertungsaussagen möglich werden. Die Algorithmen sollen um Codeteile zur Visualisierung erweitert werden. Insbesondere soll auf mobilen Endgeräten (Android-Client) dem Anwender/Bediener ein Werkzeug in die Hand geben werden, mit dem auf eine intuitive Art und Weise der Gesamtzustand sowie die Zustände in den Teilanlagen angezeigt werden. Im einfachsten Fall sind hier Ampelfarben zu wählen.

3 Konzeption

3.1 Programmkonzept

Von Mitte 2015 bis zur ersten Hälfte des Jahres 2016 wurde das Projekt *Maglap++* als eine Programmfamilie aus Server- und Client-Programmen entwickelt. Aber dieses Konzept wird den steigenden Anforderungen nicht gerecht. Die Programm-familie *Maglap++* konnte nicht mit vertretbarem Aufwand erweitert werden. Weiterhin sieht das ursprüngliche Umsetzungskonzept keine dynamische Einbindung von Programmbibliotheken vor. Deswegen wurde als Ziel gesetzt, das Umsetzungskonzept zu modernisieren. Die softwaretechnische Lösung und die Idee des Modulkonzepts ergaben sich aus der Analyse der Gesamtfunktion der Server- und Client-Programme.

Der Server bildet die Basis des Messwerterfassungssystems. Laut den formulierten Anforderungen zu *Maglap++*:

Der Server

- erfasst die Daten aus einer Datenquelle (z. B. Messwerterfassungskarte),
- verarbeitet diese (Datenvorverarbeitung, Datenverarbeitung),
- speichert,
- archiviert,
- analysiert,
- diagnostiziert und
- stellt sie einem Client zur Verfügung.

Die Abbildung 5 zeigt die Funktionsverkettung des Servers. Die Verarbeitungskette besteht aus drei Abschnitten:

- **Erfassung** — Programm muss die Daten aus dem Puffer des Messwerterfassungskarte abholen.

Als Alternative können die Daten auch aus Dateien übernommen werden.

- **Verarbeitung** — Die erfassten Daten (Messwerte) müssen umgewandelt oder kalkuliert werden. Außerdem muss die Verarbeitung der Daten, sowie deren Analyse und Transformation durchgeführt werden.

- **Übergabe** — Programm bietet die folgenden Möglichkeiten für die verarbeiteten Daten: Archivierung (Speicherung in Dateien), Auswertung (ereignisgesteuerte Speicherung mit Protokoll) und Übertragung an die Clients (Netzwerk) – nämlich die Übergabe der Daten an externe Objekte (Dateien, Netzwerk).

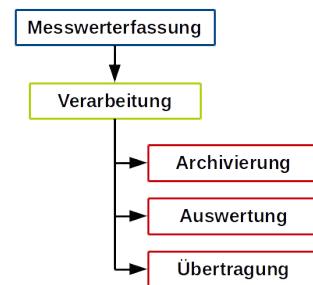


Abb. 5: Server-Aufgaben

Die Verwendung eines Clients setzt die Einrichtung eines Servers voraus. Der Client mit seinen notwendigen Funktionen stellt die Mensch-Maschine-Schnittstelle dar. Somit ist er aus Sicht des Werkzeuganwenders eine wesentliche Komponente im Programm Paket *Maglap++*. Zu seinen wesentlichen Funktionen zählen die

- Initialisierung der Netzwerkverbindung zum Server,
- Datenabholung,
- Datenverarbeitung und
- Darstellung/Visualisierung von Informationen.

Abbildung 6 zeigt die Funktionsverkettung des Clients. Der Client vollzieht die folgende Aufgaben:

- **Datenempfang** — Erfassung der Daten vom Server über eine Netzwerkverbindung.
- **Datenvorbereitung** — Die erfassten Daten müssen zur Weiterarbeit vorbereitet werden, zB. Umwandlung in Messgrößen, Erstellung Zeitverlauf für die graphische Darstellung, usw.
- **Darstellung** — Darstellung der vorbereiteten Daten als Diagramm oder Tabelle
- **Zustandsdiagnose** — Note: Android-App, die Ergebnisse der Zustandsdiagnose werden von der

App in geeigneter Form angezeigt.

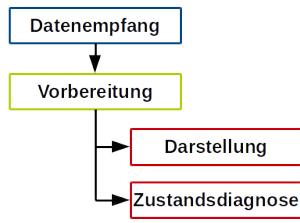


Abb. 6: Client-Aufgabe

Der Vergleich der Funktionsketten von Server und Client zeigt, dass sie in wesentlichen Teilen übereinstimmen. Während sich der Anwendungsnutzen grundsätzlich unterscheidet ist die Funktionsstruktur – Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe – identisch. In diesem Zusammenhang sei auf die Abbildung 7 verwiesen. Die Programme sollen

- von einer frei wählbaren Informationsquelle (Messwerterfassungskarte, Dateien, Netz) die Daten abrufen (erfassen),
- den Datensatz verarbeiten (Skalierung, Reduktion, Aufbereitung zur Darstellung) und
- die verdichteten Informationen übertragen (senden, speichern, anzeigen).

Es ist das Umsetzungskonzept so weiterzuentwickeln, dass die Funktionskette nach Abbildung 7 in Server und Client Anwendung findet.

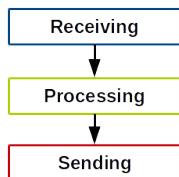


Abb. 7: Programm-Aufgabe

Das Konzept macht Funktionsmodule mit definierter Ein- und Ausgabeschnittstellen erforderlich. Diese werden durch den Anwender in logischen Ketten (Datenfluss- und Verarbeitungskette) angeordnet, mit denen er jeweils eine Server- oder Clientfunktionsstruktur abbildet. Das heißt, aufgrund des neuen Konzepts kann das Programm durch den Benutzer mit den erstellten Modulen dynamisch konfiguriert und aufgebaut werden (Abb. 8).

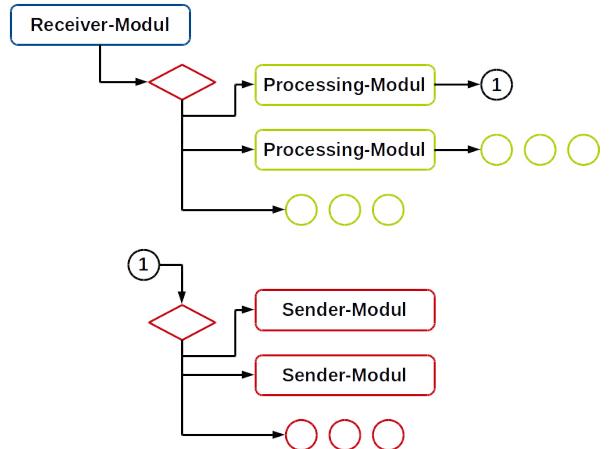


Abb. 8: Logische Kette

3.2 Modulsystem

Maglap++ basiert auf dem Prinzip „Receiver-Processing-Sender“. Außerdem bietet dieses Modulsystem die Möglichkeit, die Module durch Extensions zu erweitern oder neue Module in das Programm einzufügen. Dafür ist der *General Core* verantwortlich. Die in den *Logischen Ketten* verwendeten Module sind *Units* und *Cores* (siehe Kap. 2.1).

Die modulare Programmierung — eine Organisation des Programms (Software) als Gesamtheit der unabhängigen Blöcke (Module), deren Struktur und Funktionalität definierte Regeln folgt. Das verbessert die Mobilität des Programms. Außerdem vereinfacht die modulare Programmierung den Entwicklungsprozess und die Verifikation (auch Test usw.) der Software. Man versteht das Modul als fertiges Einzelteil (Komponente) des Programms, welches eine definierte Aufgabe erfüllt.

Bei der Erstellung und Weiterentwicklung der Programme entsteht die Notwendigkeit, die Funktionalität zu ändern oder zu ergänzen. Dies führt häufig dazu, dass man den Quellcode teilweise oder stark verändern muss. Programmentwickler müssen das Programm dann vollständig neu kompilieren. Die häufigste Lösung ist das Plugin-System. Ein Plugin (häufig auch Plug-in) ist ein unabhängig kompiliertes optionales Software-Modul, das dem Hauptprogramm dynamisch angeschlossen wird und die bestehende Software erweitert bzw. verändert. Das Plugin-System liefert neben den Erweiterungen ein Datenaustauschprotokoll und die Möglichkeit das Plugin im Programm zu registrieren. Softwarehersteller definieren Programmierschnittstellen (Ap-

plication Programming Interface (API)) zu ihren Produkten, mit denen Erweiterungen für diese Software entwickelt werden können.

Das Modulsystem in *Maglap++* wird mithilfe der Vererbung (Objektorientierte Programmierung) erstellt. Die Notwendige API wird in der Basisklasse definiert. Die Erstellung oder Weiterentwicklung der Module realisiert man mithilfe abgeleiteter Klassen. Eine dynamische Erweiterung des Programms (Plugin-System) während Arbeit der Applikation (Explizites Verknüpfen) wird durch die Verwendung dynamischer Bibliotheken erreicht. Die dynamische Bibliotheksdatei wird bei Unix-Betriebssystemen als Shared Object (SO) bezeichnet. Sie verfügen meist über die Dateiendung „.so“. Im Betriebssystem Windows wird eine solche Datei als Dynamic Link Library (DLL) bezeichnet und trägt die Dateiendung „.dll“.

3.3 Archivierung

Datenspeicherung

In letzter Zeit vergrößert sich die Anzahl der Informationen weltweit und die Frage der optimalen Datenspeicherung wird relevant. Es gibt viele Formate (Möglichkeiten), die Daten zu speichern, z.B. Audio-, Video-, Text-Formate usw. Im vorliegenden Fall ist die Lagerung der technischen Angaben interessant. Als Kriterien spielen die folgenden Charakteristiken eine große Rolle:

- Geschwindigkeit des Lesens/Schreibens,
- Art der Kodierung/Dekodierung,
- Optimierung auf Platzbedarf,
- Möglichkeiten der Benutzung/des Zugriffs (Zugänglichkeit)

Zurzeit existieren zwei Basisdateiformatsrichtungen:

- **Textformat** — Speicherung der Information als symbolische Zeile. Diese Variante ist verfügbar, sicher und stabil. Aber das größte Problem ist die ineffiziente Speicherung der Daten (insbesondere von Zahlen).

- **Binär Format** — verschlüsselte oder komprimierte Speicherung der Daten als binärer Code. Wegen des Fehlens der Verbildlichung sind binäre Dateien schnell und platzsparend.

Maglap++ bietet beide Möglichkeiten. Dazu existieren die TDC-Units (Receiver - zum Lesen, Sender - zum Speichern). Diese Units verwirklichen

„Technical Data Container“, welcher mit verschiedenen Dateiformaten arbeiten kann.

Datenspeicherungstrategie

Während der Forschungsarbeiten erhält man eine große Menge an Daten. Daraus entsteht das Problem der platzsparenden Datenspeicherung. Die erste und einfachste Lösung ist Datenreduktion. Diese Methode reduziert die Anzahl der Werte durch z.B. Mittelwertbildung. Die Reduzierung ist eine Lösung um die Dateigröße zu verringern, aber dies ist nicht für alle Gelegenheiten geeignet. Zum Beispiel soll man Daten, die nicht im Normalbetrieb liegen, ohne Verlust speichern. Deswegen spielt die ereignisgesteuerte Speicherung eine große Rolle. Das heißt, die Unit muss die Daten analysieren und eine Entscheidung treffen, wie die Daten zu speichern sind. Dazu müssen die entsprechenden Bedienungen durch den Benutzer eingesetzt werden. Für *Maglap++* werden *TDC-Units* entwickelt, die Daten einfach speichern/lesen können. Die ereignisgesteuerte Speicherung wird in *Processing-Units* realisiert. Zurzeit existiert eine solche *Unit*, welche die Daten im Fehlerfall vollständig (ereignisgesteuert) an die nachfolgende Unit übergibt und die Mittelwerte immer erstellt.

Diese Datenspeicherungstrategie ist schon sehr effektiv, aber der Speicherbedarf kann noch weiter reduziert werden. Die Archivierung der Daten (komprimierte Speicherung) hilft die Datengröße zu verringern und zu organisieren. Deswegen spielt die Erweiterung der Komprimierungskoeffizienten eine wichtige Rolle. Dazu wird die *TT-Unit* für *Maglap++* entwickelt, welche auf einer speziellen Datencodierung basiert (siehe Kap. Table-Transposition (TT)).

Table-Transposition (TT)

Das Archivierungsprinzip basiert auf einer Codierung mithilfe eines Wörterbuches, welches auf Grundlage einer Analyse der zu komprimierenden Daten erstellt wird. Dazu werden, statt der eigentlichen Datenketten, die entsprechenden, kurzen Schlüsselworte des Wörterbuches gespeichert. Bei technischen Daten treten in der Regel keine hohen Frequenzen mit gleichzeitig hohen Amplituden auf. Das heißt, der Signalverlauf unterliegt keinen enormen Schwankungen, sodass benachbarte Werte meist dicht beieinander liegen. Da es sich bei Messwerten in der Regel um technische Daten handelt, bei denen die Differenzen zwischen den aufeinanderfolgenden Einzelwerten eher gering ausfallen,

kann hier durch eine geschickte Reorganisation ein Datenstrom erzeugt werden, der relativ viele gleiche Datenketten enthält und damit gut komprimierbar ist.

Das Grundprinzip der Datenreorganisation, welche in *Maglap++* realisiert wurde, ist einfach die Erzeugung einer Datentabelle und seiner Transposition. TT-Algorithmen unterteilen sich in zwei Gruppen:

- **Binär** — die Werte haben eine binäre Darstellung
- **Symbolisch** — die Werte werden in symbolischer Form geschrieben (als Ziffern)

Nachfolgend soll an einem Beispiel (TT-binär) die detaillierte Funktionsweise des TT-Algorithmus demonstriert werden. Der Unterschied zwischen den beiden Gruppen besteht nur in der Darstellung der Zahlen. Das Grundprinzip ist davon unabhängig.

Bemerkung: Für TT-binär werden Integer-Werte verwendet, weil bei Double-Werten das Exponent-Fraction-Zahl-Format verwendet wird, was die Erweiterung der Methode erfordert. Die Realzahlen werden dazu in ganze Zahlen umgewandelt (zB. durch Multiplikation mit 10000000).

Zu Beginn befinden sich alle Werte normalerweise in einem Puffer als Zeile (in Informatik: Array). Mit verschiedenen Farben werden das nullte, erste, zweite usw. Bit (bis 31 für *int*) markiert (Abb. 9). Zuerst baut man die spezielle Matrix (wie in Abb. 9) auf. Dazu werden alle nullten Bits in der ersten Spalte eingesetzt (erste in zweite usw.).

Dann transponiert man diese erstellte Matrix. Als Ergebnis entsteht eine Matrix (Abb. 10), wo die nullten Bits unserer Zahlen die erste Zeile darstellen und jede weitere Bit-Gruppe entsprechend eine nächste Zeile. Anschließend müssen diese Zeilen in einem Puffer nacheinander gespeichert werden. Anderes gesagt, wird eine gruppierte Bits-Folge erstellt. Weil die Unterschiede zwischen den Werten gering sind, werden sich in diesem Puffer viele gleiche Zahlenfolgen befinden. Diese Daten-Umwandlung verbessert den Kompressionskoeffizienten.

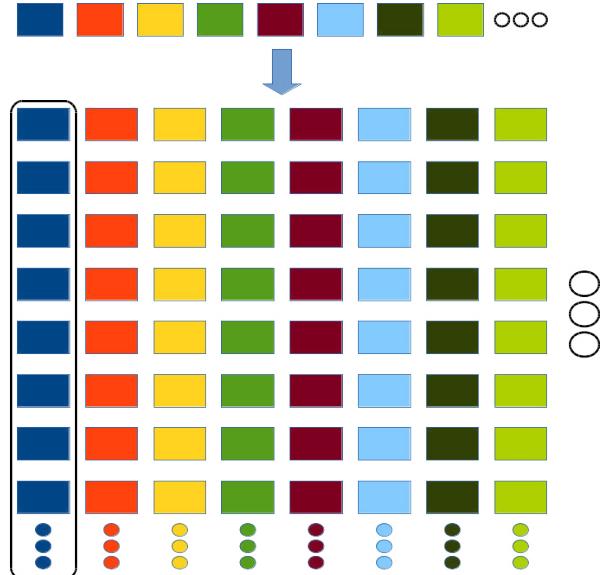


Abb. 9: TT. Erstellung der Matrix

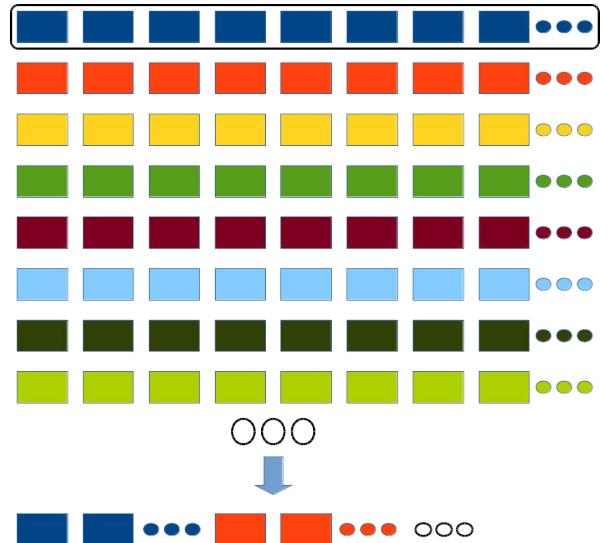


Abb. 10: TT. Erstellung der Ausgangsdaten

4 Test und Verifikation

4.1 Softwaretest

Um die Software auf die Erfüllung der Anforderungen hin zu bewerten, müssen Software-Tests nach den Regeln der Softwaretechnik durchgeführt werden. Das Hauptziel der Tests stellt sich als eine Prüfung des Programms auf korrekte Verarbeitung dar. Aber das ist nicht ganz korrekt. Ein Test muss nicht zeigen, dass ein Programm fehlerfrei funktioniert, sondern er muss die Anzahl der Fehler minimieren. Deswegen kann man das Ziel besser mit der Suche nach Situationen beschreiben, in denen das Produkt fehlerhaft arbeitet. Das Testen selbst ist ein destruktiver Prozess und beginnt mit der

Vermutung, dass Fehler vorhanden sind. Ein Testprozess ist gegensätzlich zum Entwicklungsprozess. Dies ist vor allem zeitaufwendig und kompliziert. In der Zeitplanung kann für das Testen normalerweise ca. 50% der gesamten Entwicklungszeit angesetzt werden. Aus organisatorischen Gründen aber vor allem aufgrund psychologischer Aspekte darf ein Programm nicht vollständig vom Entwickler selbst getestet werden.

Die notwendigen Tests und Testszenarien wurden durchgeführt. Mit dem Funktionsnachweis wurde die Qualität der Arbeiten sichergestellt. Außerdem wurden die Forschungs-Tests (Experimente) auf Versuchsanlagen mithilfe von *Maglap++* erstellt.

4.2 Muffelofen-Test

Beschreibung

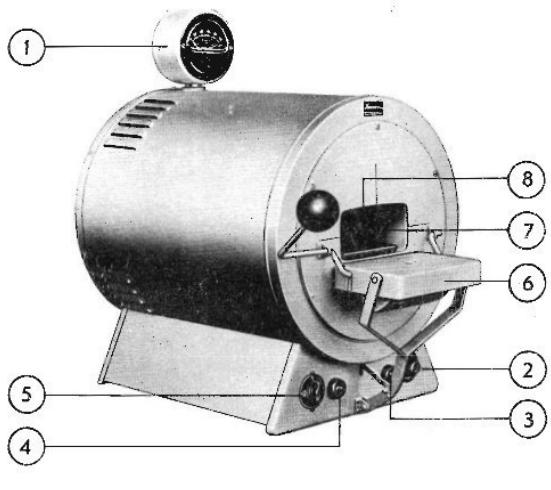
Für die Verifikation des Programms *Maglap++* wurde ein Test an der Versuchsanlage „Muffelofen MR 170“ (Abb. 11) durchgeführt. Ein „Muffelofen MR 170“ (Temperaturbereich: zwischen ca. 600 und 1000°C) ist ein Standard-Heizgerät. Das Ziel des Tests ist die Temperaturmessung im „Muffelofen“. Während des Versuchs wurde die Herdschale des „Muffelofens“ von ca. 120 auf ca. 500°C erwärmt. Der Versuch lief ca. zwei Stunden.

Aufbau

Die Abbildung 12 zeigt die Struktur des Testszenarios und die notwendigen Einrichtungen. Die Temperatursensoren wurden in dem „Muffelofen“ installiert (in der Herdschale) und mithilfe der Leitungen mit einem SAE-Systemgehäuse „Bedobox“ verbunden. Die analogen Spannungen wurden von der „Bedobox“ in normierte, analoge Signale umgewandelt. Diese wurden dann an die Messwerterfassungskarte des Rechners mit den NI-Treibern (von National Instruments) weitergeleitet, wo sie digitalisiert und über einen Pufferspeicher dem System verfügbar gemacht wurden. Auf diesem Rechner wurde das Programm *Maglap++* als ein Messwerterfassungssystem mit Archivierung und Auswertung gestartet.

Auswertung

Nach ca. 2 Stunden wurde der Versuch beendet, die erfassten Daten gespeichert (Darstellung der Daten, Abb. 13) und ein Auswertungsprotokoll erstellt. Es bestand bei diesem Test technisch keine Möglichkeit parallel ein Referenzprogramm laufen zu lassen. Es ist nicht möglich, dass zwei Programm



- 1 Temperatur-Anzeigegerät
- 2 Temperatur-Einstellknopf
- 3 Regel-Kontrolllampe (gelb)
- 4 Haupt-Kontrolllampe (rot)
- 5 Netzschalter
- 6 Wendetür
- 7 Herdschale
- 8 Heizmuffel

Abb. 11: Test Muffelofen, Quelle: o.V. "messerforum.net"



Abb. 12: Test Muffelofen. Struktur

gleichzeitig mit der Messwerterfassungskarte arbeiten können. Auch war es mit der vorhandenen Ausrüstung nicht möglich die Signale zu verdoppeln um sie auch noch auf einem anderen Rechner aufzuzeichnen. Für eine Überprüfung der Messwerte wurde deshalb das analoge Thermometer am Muffelofen (siehe Abb. 11) genutzt. Die erfassten Daten wurden im Auswertungsmodul als Mittelwerte dargestellt. Die Messwerte wurden in Temperaturwerte umgerechnet und mit den abgelesenen Werten des Thermometers verglichen. Daraus konnte geschlussfolgert werden, dass die Daten korrekt erfasst wurden. Ein Eingang der „Bedobox“ war beschädigt, was mit späteren Tests und Überprüfungen nachgewiesen wurde.

4.3 Archivierung

Beschreibung

Um den TDC und die TT-Verfahren zu prüfen, wurden zwei Tests mit „realen“ (Quelle: Magnet- und Fanglagerprüfstand (MFLP)) und generierten Daten durchgeführt.

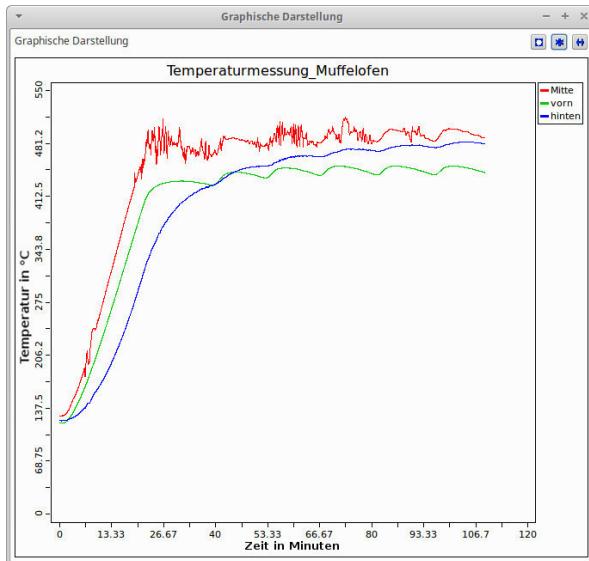


Abb. 13: Test Muffelofen. Datendarstellung

Aufbau

Die Abbildung 14 zeigt die allgemeine Struktur zum Test. Im ersten Fall wurden die Daten mithilfe der Unit übernommen, welche die Werte aus Dateien lesen kann. Diese Daten stellten die Messwerte vom Versuchsstand MFLP dar. Für die zweite Variante wurde die Unit verwendet, welche die Daten generiert. Die Daten hatten die nachfolgende Charakteristik. Dabei steht die erste Zahl für „real“ und Zweite für „generierte“ Daten.

- 10 Dateien (je 120/180 Mb groß)
- 40/60 Sekunden
- 12 Kanäle
- 2500 Werte pro Sekunde

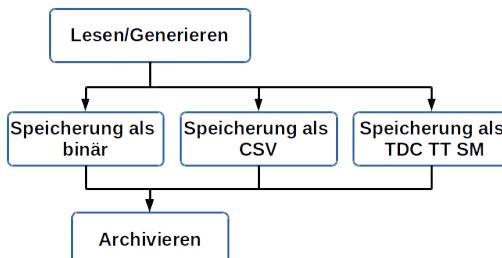


Abb. 14: Archivierung - Teststruktur

Zuerst werden die Daten von einer Quelle erfasst (Dateien/Generator). Dann müssen diese in drei Gruppen als Dateien gespeichert werden, wobei jede Gruppe in einem eigenen Ordner abgelegt wird. Dann werden die Dateien separat mithilfe eines Archivierungsprogramms archiviert. Für diese

Aufgabe wurde das Programm „7-Zip“ ausgewählt. Schließlich muss eine Vergleich zwischen den Archiven und den nicht komprimierten Dateien erstellt werden.

Auswertung

Für den Vergleich und die Analyse wurden die Tabelle 1 und 2 erstellt.

	Binär	CSV	TT-SM
real	80%	100%	50%
generiert	80%	100%	50%

Tab. 1: Dateigröße. Versionsvergleich.

Die Tabelle 1 zeigt, wie viel Platz nach der Speicherung im jeweils speziellen Datenformat im Vergleich zur „Originalgröße“ notwendig ist. In dieser Tabelle wurden die Werte in den Zellen mithilfe der Formel 1 erstellt. Für die notwendige Berechnung wurde der Wert „Größe der originalen Dateien“ verwendet:

- Anfangsdateien (Test eins) = 1,2 Gb (10 Dateien, 40 Sekunden pro Datei, 2500 Wert pro Sekunde)
- Generierte Dateien (Test zwei) = 1,8 Gb (10 Dateien, 60 Sekunden pro Datei, 2500 Wert pro Sekunde)

$$\begin{aligned}
 \text{Codierungskoeffizient} &= \\
 &= \frac{\text{Größe nach der Codierung}}{\text{Größe der originalen Dateien}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Obwohl es sich jedes mal um die selben Daten handelt, unterscheiden sich die resultierenden Dateien der verschiedenen Formate in ihrer Größe. Dies ist auf die Besonderheiten des jeweils verwendeten Formats zurückzuführen. In der „binären“ Form wurden die Werte zum Beispiel als „Double-Werte“ (8 Bytes) gespeichert. Zum Vergleich, in CSV wurden die Werte als „Text“ gespeichert. Für jeden Wert werden dabei mindestens „10 Bytes“ verwendet. Ein Byte für das Vorzeichen, eins für das Dezimalzeichen, mindestens ein Byte für den ganzzahligen Teil und 6 Bytes für den Bruchteil.

Die Tabelle 2 stellt die Resultate nach der Archivierung dar. Das heißt, jede Zelle zeigt, wie viel

	Binär	CSV	TT-SM
real	12,9%	18,9%	19,3%
generiert	66,6%	31,6%	24,6%

Tab. 2: Archivierung. Versionsvergleich.

Platz nach der Codierung und der Archivierung im Vergleich zur „Originalgröße“ der Anfangsdaten notwendig ist. Mithilfe der Formel 2 wurden diese Werte berechnet.

$$\begin{aligned} \text{Kompressionskoeffizient} &= \\ &= \frac{\text{Größe nach der Archivierung}}{\text{Größe der originalen Dateien}} \quad (2) \end{aligned}$$

Der Container TDC-TT-SM hat fast den gleichen Koeffizienten für „Real“, wie der Container mit CSV. Aber ersterer speichert die Werte zusammen mit einer Beschreibung, was etwas mehr Platz benötigt. Deswegen sind diese zwei Container als gleich anzusehen. In diesem Test sind die Resultate des Containers TDC-Binär am besten. Im zweiten Test hingegen hat er die schlechtesten Resultate (es wird mehr als der doppelte Speicherplatz benötigt). Der Container TDC-TT-SM lieferte im zweiten Test die beste Resultate.

Für die Analyse der Datenspeicherung sind diese zwei Test zu wenig. Für ein repräsentatives Ergebnis sind mindestens 1000000 Tests mit unterschiedlichen Daten notwendig. Die Archivierung ist eine komplizierte Aufgabe und bislang existiert noch keine allgemeine Lösung mit guten Ergebnissen dazu. Die entwickelten Container sind zwar gut für die Archivierung, aber nur für die Messwertarchivierung.

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Maglap++ ist ein gutes Werkzeug zur Zustandsdiagnose und Überwachung magnetgelagerter Maschinen. Außerdem beschränkt sich dieses Programm nicht nur auf Magnetlagertechnik und die genannten Aufgaben. *Maglap++* verwendet einen benutzerdefinierten dynamischen Aufbau, was es ermöglicht, frei kombinierte komplexe

Verarbeitungs- und Datenstromketten zu verwirklichen.

Die Verwendung der „Open Source“-Ressourcen entbindet weitestgehend von lizenzerrechtlichen Problemen. Der modulare Aufbau ermöglicht es, die Module, das Design und das Programm selbst leicht erweitern und anpassen zu können. Die notwendigen Units zur Messwerterfassung, Datenverarbeitung, Client-Server-Verbindung, Darstellung, Analyse, Datenspeicherung und Zustandsdiagnose wurden erstellt. Die dazu notwendigen Methoden wurden im Quellcode implementiert.

5.2 Ausblick

Maglap++ ist ein gutes Messwerterfassungssystem. Diese Software stellt sich als ein Programm zur Verarbeitung und Analyse von Daten dar. Natürlich liegt das zukünftige Ziel auf der Weiterentwicklung des Konzepts und des Programms und die Implementierung neuer Möglichkeiten in *Maglap++*. Zusätzlich ist eine Erweiterung des Modulkonzepts notwendig. Dazu sind die Weiterentwicklung des Plugin-Systems wichtig. Das Programm muss auch in Zukunft weiter optimiert und an die Fortschritte in der Technik und der Softwaretechnik angepasst werden (Funktionalität, Threads, GUI usw.).

Zuverlässigkeitssbewertung aktiver Magnetlagerungen unter der Berücksichtigung erweiterter Umgebungsbedingungen

Stephan DÜSTERHAUPT*, Frank WORLITZ*

* *Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik*

Hochschule Zittau/Görlitz – University of Applied Sciences

Theodor-Körner-Allee 16

02763 Zittau, Germany

Tel.:+49 3583 612 4383, Fax: +49 3583 612 3449

E-Mail: S.Duesterhaupt@hszg.de, F.Worlitz@hszg.de

Kurzfassung

Aktive Magnetlagerungen können in modernen Industrieapplikationen wie Turbomaschinen eine Schlüsseltechnologie darstellen.

Gegenwärtig berücksichtigt der Designprozess Nennwerte in der statischen Auslegung und dynamischen Simulation des magnetgelagerten Systems. Im praktischen Einsatz jedoch beeinflussen der Prozess und die Umgebung die Funktionsweise der Sensoren, Leistungsverstärker und magnetischen Aktoren. Insbesondere der thermische Einfluss verursacht mehr oder minder starke Driften in den Komponenten- und Bauteilparametern. Die Ursachen dafür können hohe Umgebungstemperaturen sein oder mechanische Stützanregungen bzw. Druckänderungen. Die mechanischen Einflüsse führen zu einer zunehmenden Relativbewegung zwischen Rotor und Stator. Infolge der Auslenkungen reagiert das aktive Magnetlager mit Regel eingriffen. Die Steuerstromänderungen führen zu einer veränderten Eigenerwärmung der Leistungs steller und Lagerspulen.

Die arbeitspunkt- und lastabhängige Beeinflussung der Lagerkomponenten führt letztendlich zu einer veränderten Dynamik der Lage- und ggf. der unterlagerten Stromregelkreise. Ein unter Nominalbedingungen funktionsfähiges aktives Magnetlager versagt ggf. aufgrund mechanischer, elektrischer und magnetischer Parameterdriften.

Für den Einsatz muss daher die Zuverlässigkeit des mechatronischen Systems objektiv nachgewiesen

werden. Dies muss unter der Berücksichtigung von Prozess und Umgebung erfolgen.

1 Einleitung und Zielstellung

Die qualitative und quantitative Beurteilung der Zuverlässigkeit ist Voraussetzung für die Zulassung und Verwendung aktiver Magnetlager in Industrieapplikationen. Bereits innerhalb des Design-Prozesses muss überprüft werden, inwieweit das AML-System seinen Systemzweck unter Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Unsicherheiten seiner Komponenten und der Prozessumgebung erfüllt.

Der Einsatz von Magnetlagerungen in Turbomaschinen, wie sie bspw. Turbinen, Pumpen und Verdichter darstellen, ist durch extreme Prozess- und Umgebungsbedingungen charakterisiert. Fertigungstoleranzen in den Lagerkomponenten und die Beeinflussung durch spezifische Betriebs- und Störszenarien führen zu Parameterdriften, die um die Erwartungswerte einer Nennwertauslegung streuen. Die Folge ist eine arbeitspunkt- und lastabhängige Zuverlässigkeit der Lagerkomponenten.

Aus der Einschätzung der Funktions- und Leistungsfähigkeit der Lagerkomponenten als Funktion des Arbeitspunktes, der Belastung und des Alters lassen sich Maßnahmen zum ausfallsicheren Betrieb ableiten. So können

Teile oder der gesamte Regelkreis redundant ausgeführt werden.

Innerhalb der Zuverlässigkeitssbewertung aktiver Magnetlagerungen müssen nach gegenwärtigem Stand zwei Driftmechanismen grundlegend berücksichtigt werden: last- und altersabhängige Parameterdriften in den Bauteilen und Komponenten.

Die lastabhängigen Parameterdriften können mit Hilfe physikalischer Modelle hinreichend genau simuliert werden. So sind Belastungssintensitäten in den Lagerkomponenten zeitabhängig darstellbar.

Die Frage ist aber, wie wird das Funktions- und Leistungsvermögen der Lagerkomponenten durch ihr kalendarisches Alter beeinflusst? Wie verändert sich bspw. die Ausfallrate, wenn das Bauteil eine kurzzeitige thermische Überlastung erfahren hat? Oder wie groß ist die Überlebenswahrscheinlichkeit einer „alten“ Lagerkomponente?

Die Gewinnung von Zuverlässigkeitssdaten für ein Bauteil, oder sogar für eine Lagerkomponente, ist derzeit unzureichend geklärt. Die Simulation der Widerstandsfähigkeit als Funktion des kalendarischen Alters und damit die Definition von Leistungsgrenzen ist gegenwärtig ungelöst. Das Teilmodell zur Bestimmung der kalendarischen Widerstandsfähigkeit ist jedoch essentiell für die Zuverlässigkeitssanalyse.

Zielstellung

Nachfolgend werden Methoden und Verfahren für die Modellierung und Simulation der Zuverlässigkeit magnetgelagerter Maschinen beschrieben. Mit Hilfe qualitativer und quantitativer Untersuchungen soll das Ergebnis einer Magnetlagerauslegung (mit Nominalwerten parametrierter Regelkreis) in Bezug auf seine Funktionsfähigkeit bei Parameterschwankungen analysiert werden.

Während auf wesentliche Aspekte zur Bestimmung der *Belastungssintensität* in [1] bereits eingegangen wurde, stellt die Bestimmung/Bewertung der *Widerstandsfähigkeit* mechatronischer Komponenten eine wesentliche Herausforderung dar. Die Einschätzung der Widerstandsfähigkeit ist besonders für

gealterte Magnetlagerungen für den prognostizierten Ausfall entscheidend.

2 Belastungssintensität und Widerstandsfähigkeit

Die Belastungssintensität und die Widerstandsfähigkeit einer Komponente sind eng miteinander verknüpft. Während die Widerstandsfähigkeit eine Eigenschaft darstellt, die jedem System- und Systemelement inhärent gegeben ist, resultiert die Belastungssintensität aus dem applikationsspezifischen Betrieb einschließlich der Störungen.

Die Widerstandsfähigkeit markiert im Sinne einer Grenze die Funktions- und Leistungsfähigkeit eines Bauteils oder einer Komponente im Zustandsraum. Diese Grenze driftet mit der zunehmenden Alterung. Überschreitet die Belastungssintensität die Widerstandsfähigkeit und damit das Funktions- und Leistungsvermögen eines Bauteils oder einer Komponente so versagt diese und fällt aus.

Für die Zuverlässigkeitssanalyse aktiver Magnetlagerungen kann nach [2] in Normal- und Ermüdungs- oder Alterungsausfälle unterschieden werden.

Normalausfälle

Zu den Normalausfällen werden die Überbeanspruchungsausfälle gezählt. Sie treten während der gesamten Lebensdauer der Lagerkomponenten auf. Ganz allgemein kann gesagt werden, dass ein Überbeanspruchungsausfall dann auftritt, wenn spezifische Belastungsgrenzen der Magnetlagerkomponenten (und da wiederum ihrer Bauteile) verletzt werden.

Technische Belastungsgrenzen

Die Berücksichtigung von Belastungsgrenzen innerhalb der Zuverlässigkeitssanalysen führen zur Einführung von Restriktionsgrenzen für die physikalischen/technischen Lagerparameter. Sie sind ein Maß für die *Widerstandsfähigkeit*. Die Restriktionsgrenzen lassen sich für den Neuzustand aus den Herstellerangaben der Lagerkomponenten und Bauteile entnehmen. Zudem werden sie mit dem zulässigen Betriebsbereich der Magnetlagerregelkreise festgelegt. Dazu zählen bspw. max. zulässige Temperaturen, Tragkraft, max. Magnetkraft,

max. Lagerströme usw. Diese Überlastungen führen zu Spontanausfällen.

Regelkreisdynamik (Phasenrand und Amplitudenreserve) als Restriktionsgrenze

Für aktive Magnetlagerungen muss darüber hinaus die Regelkreisdynamik als Restriktionsgrenze eingeführt werden. Die Lagerkomponenten für sich genommen können funktions- und ausreichend leistungsfähig sein, der Regelkreis kann dennoch instabil werden. Die Ursache liegt in einer unzureichenden Regelkreisdynamik.

Die iterative Nennwertauslegung der Regelkreise ist dann abgeschlossen, wenn für den gewählten Arbeitspunkt oder Betriebsbereich ein gutmütiges Regelverhalten erwartet wird. Die ausgewählten Gütekriterien werden erfüllt. An- und Ausregelzeiten sind hinreichend kurz. Die Überschwingweite und die Regelflächen sind hinreichend klein.

Während des Maschinenbetriebes driften die Werte der Lagerparameter arbeitspunkt- und lastabhängig. Vor allem bei Störungen ändern sich Lagerparameter schnell und mit großen Amplituden. Dies führt zu einem veränderten Frequenzgang (Amplituden- und Phasengang) des offenen Regelkreises gegenüber der Auslegungsreferenz. Damit driften auch die Werte der Stabilitätskriterien *Phasenrand* und *Amplitudenreserve*.

Die Untersuchung der arbeitspunkt- und lastabhängigen Driften in den Lagerparametern erfolgt innerhalb der probabilistischen Simulation eines physikalischen Komplexmodells (Abschnitt 3). Damit kann die *Belastungintensität* im Magnetlagerregelkreis ermittelt werden.

Ermüdungs- oder Alterungsausfälle

Die Ermüdungs- oder Alterungsausfälle treten in den komponentenspezifischen Ermüdungsphasen auf. Sie zählen auch zum Normausfall. Bisher werden die technischen Belastungsgrenzen und damit die *Widerstandsfähigkeit* als konstant betrachtet. Diese Annahme gilt allerdings nur für den Zeitraum unmittelbar nach der Inbetriebnahme eines neuen Systems.

Einerseits lassen physikalische und chemische Veränderungen die Komponenten grundsätzlich

lich altern. Dieser Prozess startet bereits unmittelbar nach der Herstellung. Die Lagerkomponenten altern kalenderisch. Darüber hinaus beschleunigen thermische, elektromagnetische und mechanische Belastungen an den Bauteilen im Lagerbetrieb die physikalischen und chemischen Veränderungsprozesse (*Memory-Effekt*). Beides drückt sich darin aus, dass sich die *Widerstandsfähigkeit* komponentenspezifisch verändert bzw. driftet. Der Regelkreis altert.

Irgendwann sind Veränderungen der Belastungsgrenzen so weit vorangeschritten, dass bereits der Normalbetrieb zum Versagen führt.

Ein Maß für die Widerstandsfähigkeit kann die Ausfallrate als zuverlässigkeitssensitive Kenngröße darstellen. Diese wird für ausgewählte Bauteile innerhalb umfangreicher Stichproben experimentell ermittelt. Die Ausfallraten sind spezifisch und nicht auf andere Bauteile übertragbar.

Weiterhin sind häufig die Wirkstrukturen innerhalb der Lagerkomponenten unbekannt. Hohe Integrationsgrade gerade in der Leistungs- und Reglerelektronik lassen die Methoden der klassischen Aufklärung von Wirkstrukturen im Sinne der Zuverlässigkeitssanalyse unmöglich werden.

Fazit

Daher muss nach alternativen Lösungsansätzen gesucht werden. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwieweit zur Einschätzung der Alterung ein Blick auf die Systemelemente (Bauteilebene) überhaupt notwendig ist.

Interessant und diskussionswürdig erscheint in diesem Kontext die Analogiebetrachtung zwischen dem technischen System „Aktives Magnetlager“ und dem biologischen System „Mensch“.

3 Simulation der arbeitspunkt- und lastabhängigen Driften

Driftet der Wert eines Parameters, so verändert sich seine Lage bezüglich einer Referenzlage im Zustandsraum, die sich aus der Nennwertauslegung des applikationsspezifischen Magnetlagerregelkreises ergibt. Die Drift steht für den Grad der Parameterabweichung bezüglich

einer Nennlage im Zustandsraum bei Normal- oder Nennbetrieb.

Physikalisches Komplexmodell

Für die Simulation der arbeitspunkt- und last-abhängigen Driften in aktiven Magnetlagern eignen sich physikalische Modelle. Mit ihnen können Einzeleffekte und Nichtlinearitäten hinreichend genau beschrieben werden.

Abb. 1 zeigt das Blockschaltbild eines unterlagerten Magnetlagerregelkreises.

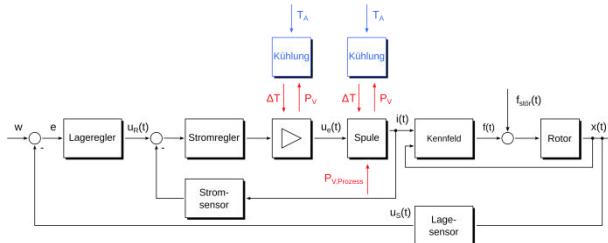


Abb. 1: Blockschaltbild der Regelkreiskomponenten

Die mechanischen, elektromagnetischen und thermischen Einzeleffekte in der Strecke, Aktorik und Sensorik werden in dem physikalischen Komplexmodell mit geeigneten Teilmodellen simuliert. So kann die Prozessumgebung (mechanische und thermische Einflüsse) ebenso berücksichtigt werden wie bspw. die Eigenerwärmung von Lagerkomponenten.

Probabilistische Simulation

Innerhalb der probabilistischen Simulation werden die unscharfen Systemantworten ermittelt. Mit Hilfe der *Monte-Carlo-Simulation* oder weiteren mathematischen Modellen werden dazu Stichproben des entsprechenden Parameters oder einer Parameterkombination generiert. Es wird der Zustandsraum des dynamischen AML-Systems abgetastet. Dabei definiert sich der Systemzustand als zeitabhängige Kombination aller Variablen der Systemstruktur.

Es wird untersucht, wie stark die Parameter in den Systemantworten driften.

Abb. 2 stellt die für die probabilistische Simulation notwendige Prozedur grafisch dar.

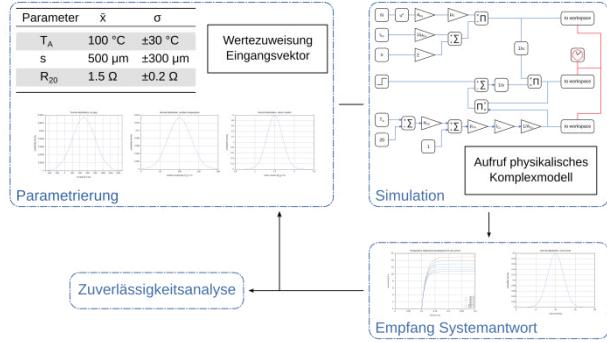


Abb. 2: Prozedur zur Ermittlung zuverlässigkeitssrelevanter Daten

Die allgemeine Vorgehensweise kann dabei wie folgt unterstellt werden:

- *Modellbildung und Nennwertsimulation* – Verknüpfung elektrischer, magnetischer und mechanischer Teilmodelle; Bilanzierung der im Betrieb auftretenden Leistungs- und Energieflüsse unter Berücksichtigung des Einflusses von Umgebung und Prozess
- *Probabilistische Simulation* – Dynamische Simulation des komplexen Magnetlagermodells; Parametrierung der Modellparameter mit unscharfen Werten; die Streuung in den Eingangsvektoren führt zu einer Streuung in den Systemantworten
- *Zuverlässigkeitssanalyse* – statistische Auswertung der Ergebniswerte der probabilistischen Simulation; Zählung Grenzverletzungereignisse in den Systemantworten und Analyse des Frequenzganges des geschlossenen Regelkreises (Änderung der Regelkreisdy namik); Ermittlung von Teilversagens- oder Teilüberlebenswahrscheinlichkeiten
- *Fehlerbaumanalyse* – Erstellung eines umfassenden Fehlerbaumes auf der Grundlage der Kenntnisse über komponentenspezifische Versagensmechanismen; Zusammenfassung der Ergebnisse der Zuverlässigkeitssanalyse in Fehlerbäumen zu einer Versagens- oder Überlebenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems

Lastabhängige Drift

Für einen elektromagnetischen Aktor soll beispielhaft die zeitliche Drift der unscharfen Magnetkraft zwischen zwei Arbeitspunkten veranschaulicht werden.

Tab. 1 fasst die Erwartungswerte, die den nominalen Arbeitspunkt der Lagerspule im mehrdimensionalen Zustandsraum festlegen, zusammen.

Tab. 1: Erwartungswerte der Magnetkreisparameter

Parameter	
Induktivität der Spule	100 mH
Wicklungswiderstand	1,5 Ω
Tragkraft am Arbeitspunkt	6.361,5 N
Klemmspannung der Spule	9 V
Spulenstrom	6 A
Luftspalt am Arbeitspunkt	500 μm

Die Abszisse stellt den Stichprobenumfang dar, die Ordinate die Magnetkraft. Die obere und untere Begrenzung sind jeweils durch rote Geraden markiert.

40 Millisekunden (Abb. 3) nach dem Beaufschlagen der Lagerspule mit einem Spannungssprung fließt ein zunehmend größerer Spulenstrom. Dabei bewegt sich der Schwerpunkt der Punktwolke in Richtung der Tragkraft am Arbeitspunkt. Die Driftgeschwindigkeit resultiert aus der Spulenzeitkonstante. Die Grenzen werden statistisch gegenüber dem Zustand im stationären Arbeitspunkt sehr oft verletzt.

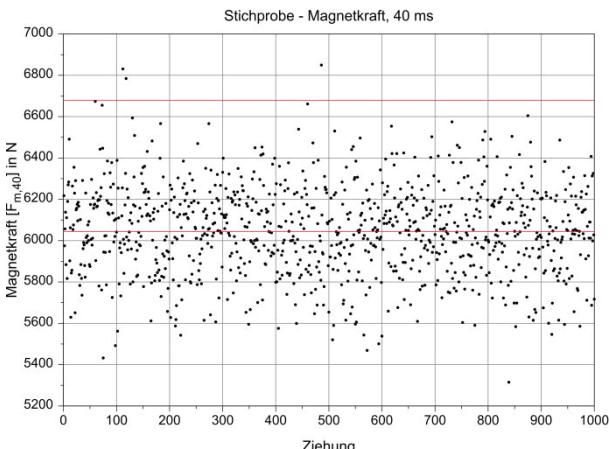


Abb. 3: Streuung der Magnetkraftwerte nach 40 ms

300 Millisekunden (Abb. 4) nach dem Anlegen des Spannungssprungs befindet sich der Aktor in seinem quasistationären Arbeitspunkt.

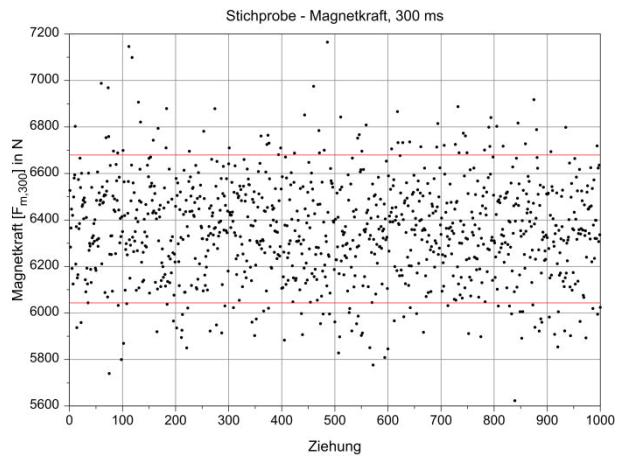


Abb. 4: Streuung der Magnetkraftwerte nach 300 ms

Die Grenzverletzungssereignisse sind hier sehr viel kleiner als 40 Millisekunden nach der sprungförmigen Änderung der Klemmspannung.

Ermittlung der Stabilitätsreserve

Ein mit Nennwerten parametrierter Magnetlagerregelkreis wird in Betrieb genommen. Das Magnetlager befindet sich im Nennbetrieb, wenn die realen Umgebungs- und Prozessbedingungen denen entsprechen, die in der vorangestellten statischen und dynamischen Auslegung berücksichtigt wurden.

Die Veränderung der Prozess- und Umgebungsbedingungen (z. B. Temperaturänderung) führen nun zu arbeitspunkt- und lastabhängigen Parameterdriften in der erweiterten Regelstrecke und ggf. in den Messketten. Damit ist die Reglerparametrierung für die reale Systemdynamik nicht mehr optimal. Auch dann nicht, wenn die Regler mit Hilfe geeigneter Adaptionsalgorithmen an die veränderte Dynamik angepasst werden. Hier sind es Übergangsvorgänge, die den Regelkreis möglicherweise instabil werden lassen.

Mit der Untersuchung der Regelkreisdynamik stehen zwei Aspekte zur Untersuchung. Einerseits gibt es Stabilitätsgrenzen, die sich aus der offenen Regelstrecke bzw. mit der Analyse des Zustandsraummodells bestimmen lassen. Sie werden im Sinne der Zuverlässigkeitsanalyse

als Belastungsgrenzen eingeführt. Werden diese verletzt, wird der Magnetlagerkreis instabil und das Magnetlager versagt. Weiterhin müssen bezüglich der Stabilitätsgrenzen die Stabilitätsreserven (Amplitudenreserve, Phasenrand) ermittelt werden.

Ganz praktisch lässt sich auch die Störübertragungsfunktion anwenden. Mit ihr kann bestimmt werden, welche Störkraft gerade noch zulässig ist, so dass der Regelkreis stabil bleibt. Je kleiner diese „Störkraftreserve“ wird, desto stärker neigt das Magnetlager zum Schwingen. In der Praxis wird eine Belastungsgrenze definiert. Sie sagt aus, welche Störkraftreserve auf jeden Fall zur Verfügung stehen muss. Ist sie kleiner als der Vorgabewert, klingen unzulässig hohe Schwingungen auf und das aktive Magnetlager versagt.

Für die Untersuchung der Regelkreisdynamik im Sinne eines „stabilen Magnetlagers“ eignen sich folgende weitere Methoden:

Bode-Diagramm des offenen Regelkreises

Zur Ermittlung der Stabilitätsreserve eignet sich der Amplituden- und Phasenrand. Mit Hilfe des Bode-Diagramms wird der Amplituden- und Phasengang dargestellt.

Abb. 5 zeigt beispielhaft eine Kurvenschar im Frequenzgang eines geregelten Systems.

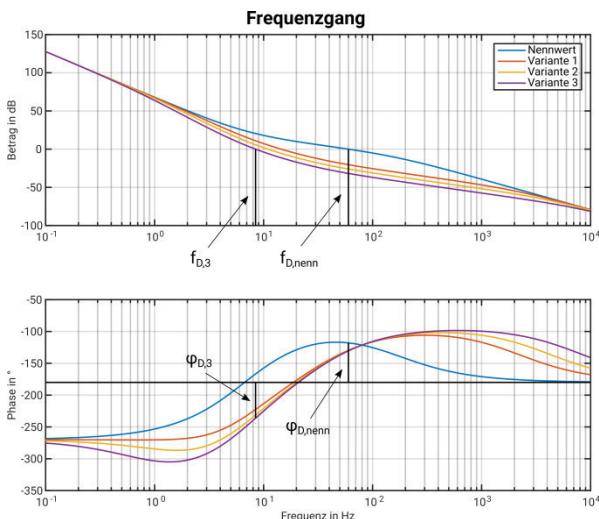


Abb. 5: Kurvenschar im Frequenzgang eines geregelten Systems

Ausgehend von einer Nennwertsimulation wurde die Systemdynamik im Zustandsraum durch die Variation eines Parameters verändert. Mit der Lage der Durchtrittsfrequenzen

$f_{D,nenn}$ und $f_{D,3}$ kann der entsprechend dazugehörige Phasenrand $\varphi_{D,nenn}$ bzw. $\varphi_{D,3}$ bestimmt werden.

Die Belastungs- bzw. Restriktionsgrenzen stellen die 0-dB-Linie im Amplitudengang und die Linie bei -180° im Phasengang dar.

Während bei der Nennwertauslegung ein Phasenrand > 0 erwartet wird, ist dieser für die Variante 3 negativ. Die Nennwertauslegung zeigt demnach ein stabiles Systemverhalten während Variante 3 instabil wird.

Zustandsraummodell

Mit der Zustandsraummodellierung wird das dynamische Systemverhalten des Magnetlagerregelkreises mit Hilfe von Zustandsgrößen beschrieben. Für die Modellentwicklung im Zustandsraum werden die Differentialgleichungen n -ter Ordnung in n Differentialgleichungen erster Ordnung zerlegt.

Dabei beschreiben die Zustandsvariablen die im System vorhandenen Energiespeicher.

Die Gl. (1) und Gl. (2) bilden allgemein die Grundlage für die Zustandsraummodellierung.

Zustandsdifferenzialgleichung

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A} \cdot \underline{x}(t) + \underline{B} \cdot \underline{u}(t) \quad (1)$$

Ausgangsgleichung

$$\underline{y}(t) = \underline{C} \cdot \underline{x}(t) + \underline{D} \cdot \underline{u}(t) \quad (2)$$

mit

- \underline{A} ... Systemmatrix
- \underline{B} ... Eingangsmatrix
- \underline{C} ... Ausgangsmatrix
- \underline{D} ... Durchgangsmatrix
- $\underline{x}(t)$... Zustandsvektor
- $\dot{\underline{x}}(t)$... Ableitung des Zustandsvektors
- $\underline{u}(t)$... Eingangsvektor
- $\underline{y}(t)$... Ausgangsvektor

Die Systemmatrix \underline{A} wird mit den Koeffizienten der Zustandsvariablen parametriert.

Mit der Aufstellung des charakteristischen Polynoms \underline{x}_A kann nun eine Eigenwertanalyse

der Systemmatrix nach Gl. (3) durchgeführt werden.

$$x_A(\lambda) = 0 = \det(\underline{A} - \lambda \underline{E}) \quad (3)$$

Im Ergebnis liegen die Eigenwerte (Polstellen in der Wurzelortskurve) λ vor. Stellen sich im Magnetlagerbetrieb die Eigenwerte ein, so treten Resonanzen und damit verbundene Amplitudenüberhöhungen auf. Die Eigenwerte wiederum stellen komplexe Größen dar, die durch Betrag und Winkel in der Wurzelortskurve gekennzeichnet sind. Praktisch lassen sich mit den Eigenwerten die Steifigkeit und Dämpfung des dynamischen Systems abbilden.

Damit bilden die Eigenwerte der Systemmatrix eine Belastungsgrenze im Magnetlagerregelkreis. So lässt sich auch hier analog zur Störkraftreserve eine Dämpfungsreserve festlegen, die im Anlagenbetrieb auf jeden Fall nicht unterschritten werden darf. Ist die tatsächliche Dämpfung kleiner als diese Reserve, klingen unzulässige Schwingungen auf und das Lager versagt.

4 Berücksichtigung der Alterung von Lagerkomponenten

Bisher wurde bei der Entwicklung der Modellansätze postuliert, dass die *Widerstandsfähigkeit* der Lagerkomponenten im Sinne ihrer physikalischen Parameter über das kalendarische Alter konstant bleibt. So werden die technischen Belastungsgrenzen (Grundlage sind die Herstellerangaben) gegenwärtig in den Zuverlässigkeitssanalysen zeitinvariant berücksichtigt.

Die Erfahrungen zeigen jedoch, dass die Belastungsgrenzen mechanischer und elektronischer Systeme mit zunehmendem kalendarischem Alter ganz unterschiedlich driften. Ursachen dafür sind chemische und physikalische Veränderungen bspw. in Halbleiterkristallen, Kondensatoren (Folie, Elektrolyt) und Konstruktionselementen (Korrosion).

Ausfallprognose, Trend

Für die Prognose einer Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des aktiven Magnetlagers ist daher die Einschätzung und Beschreibung der *Widerstandsfähigkeit* als Funktion der Zeit notwendig. Dies gewinnt zunehmend an Be-

deutung, wenn sich die Komponenten in einem fortgeschrittenen kalendarischen Alter ab dem Herstellungszeitpunkt befinden.

Analogiebetrachtungen

Ein Lösungsansatz könnte über die Analogiebetrachtung zwischen dem mechatronischen System „Aktives Magnetlager“ und dem biologischen System „Menschlicher Organismus“ hergestellt werden.

Ein Mensch wird geboren. In Abhängigkeit seines/ seiner

- Lebensortes (Umwelteinfluss),
- Geschlechts,
- kalendarischen Alters,
- Unsicherheiten in der Funktions- und Leistungsfähigkeit seines Organismus/ seiner Organe (*Widerstandsfähigkeit*),
- allgemeinen Lebensrisikos (Wechselwirkungen mit der Umwelt),
- Lebensgewohnheiten (z. B. Qualität der Ernährung, Rauchen, Trinken),
- körperlichen Belastungen (*Belastungsintensität*)

kann zeitabhängig eine statistische Lebensorwartung postuliert werden. Diese kann sogar für die Organe angegeben werden.

Weiterhin ist allgemein bekannt, dass mit dem zunehmenden kalendarischen Alter die Widerstandsfähigkeit des Organismus tendenziell abnimmt. Der Mensch neigt zu alterstypischen Erkrankungen. Die Ursachen dafür finden sich in der Veränderung biologischer (z. B. Zellteilungsrate) und chemischer Prozesse innerhalb der Organe/Zellstruktur.

Ein aktives Magnetlager wird gefertigt und in Betrieb genommen. In Abhängigkeit der/des

- Aufstellungsortes (Umgebungseinfluss),
- Topologie,
- kalendarischen Alters,

- Unsicherheiten in der Funktions- und Leistungsfähigkeit seiner Komponenten (*Widerstandsfähigkeit*),
- technisches Risiko der Anlage (Wechselwirkungen mit der Umgebung),
- Fahrweise der Anlage (Arbeitspunkt),
- thermischen und mechanischen Belastungen (*Belastungsintensität*)

könnte analog zum biologischen System eine statistische Lebenserwartung postuliert werden. Dabei wird von den Lebenserwartungen der Lagerkomponenten ausgegangen.

Auch für mechatronische Systeme ist allgemein bekannt, dass mit dem zunehmenden kalendarischen Alter die Widerstandsfähigkeit des Gesamtsystems tendenziell abnimmt. Der Magnetlagerregelkreis neigt zu alterstypischem Versagen. Die Ursachen dafür finden sich in der Veränderung physikalischer und chemischer Prozesse innerhalb der Komponenten/Bauelementestruktur.

Weiterhin kann festgehalten werden, dass die medizinische Forschung versucht, Wirkstrukturen, Vorgänge und Effekte auf zellulärer Ebene zu verstehen. Die Komplexität dämpft den Erkenntnisgewinn. Analog dazu führen die komplexen Wirkstrukturen auf der Bauelementeebene zu komplexen Teilsystemen (Komponenten) der Magnetlagertechnik.

So könnte vom System „Mensch“ durch Analogiebetrachtungen ein Verhaltensmodell zur Bestimmung der Widerstandsfähigkeit als Funktion der Zeit abgeleitet werden. In beiden Fällen ist ggf. ein Wissen über Vorgänge auf zellulärer Ebene bzw. Bauelementeebene nicht zwingend erforderlich. Es nimmt lediglich die Unsicherheit in der prognostizierten Lebensdauer zu. Der qualitative Verlauf jedoch wäre damit gegeben und die Widerstandsfähigkeit im Sinne zeitvarianter Belastungsgrenzen simulierbar.

Dieser Denkansatz ist zu diskutieren und weiterzuentwickeln.

5 Fehlerbaumanalyse

Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitssanalyse, Teilversagens- oder Teilüberlebenswahrscheinlichkeiten, werden in Fehlerbäumen zu

einer Versagens- oder Überlebenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems zusammengefasst.

Praxiserfahrungen zeigen, dass grundsätzlich von einem Versagen der AML gesprochen werden kann, wenn mindestens ein Magnetlagerregelkreis an der Maschine versagt.

Der komplexe Fehlerbaum für ein aktives Magnetlager berücksichtigt dabei sowohl

- Normalausfälle aufgrund von Überlastung durch arbeitspunkt- oder lastabhängige Driften in den Parametern,
- Normalausfälle aufgrund von Überlastung des Regelkreises durch eine zu geringe Stabilitäts- oder Störkraftreserve,
- Ermüdungs- oder Alterungsausfälle aufgrund einer zu geringen Widerstandsfähigkeit der Lagerkomponenten.

Die serielle Anordnung der Teilkomponenten eines Regelkreises ergibt ausschließlich disjunktive Verknüpfungen der Teilkomponenten innerhalb des Fehlerbaumes (Abb. 6), wenn keine Redundanzen/Diversitäten vorgesehen werden.

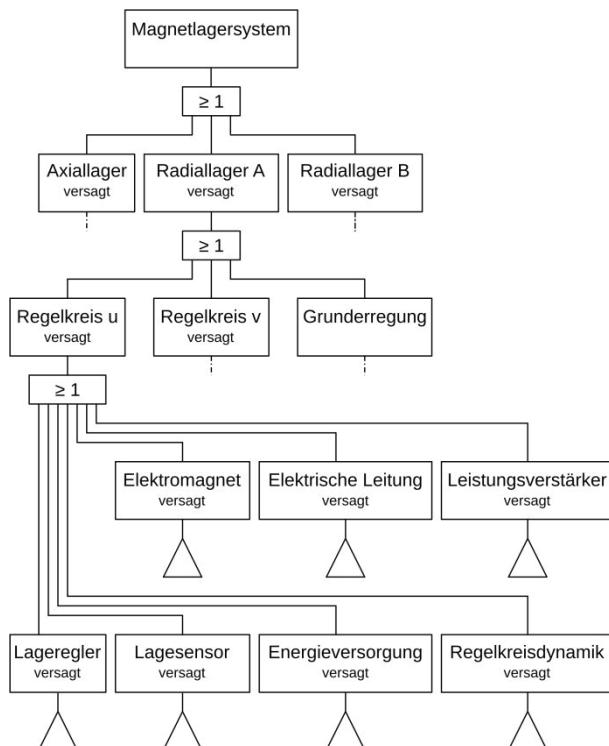


Abb. 6: Fehlerbaum eines aktiven Magnetlagers (Übersicht)

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag gibt einen Überblick zur grund-sätzlichen Herangehensweise bei der Zuverlässigkeitsbewertung aktiver Magnetlagerungen.

Es wurde herausgearbeitet, dass die *Belastungsintensität* im Magnetlagersystem mit der *Widerstandsfähigkeit* der Lagerkomponenten eng verknüpft ist. Dabei markiert die Widerstandsfähigkeit die Belastungsgrenze innerhalb des Zustandsraumes. Aufgrund von Parameterdriften während des Betriebes verändert sich die Belastungsintensität. Ursächlich dafür sind Arbeitsverlagerungen und thermische, mechanische, elektromagnetische Belastungen. Sie ergeben sich aus der Betriebsweise bzw. aus dem Prozess und der Umgebung. Aber auch die Widerstandsfähigkeit der Lagerkomponenten verändert sich insbesondere mit zunehmendem Alter. So kann gesagt werden, dass die Funktions- und Leistungsreserven mit der Zeit tendenziell abnehmen. Im Ergebnis kann bereits der Normalbetrieb dazu führen, dass die Widerstandsfähigkeit überschritten wird. Die Folge ist ein (teilweises) Versagen des Magnetlagerregelkreises. Aufgrund der seriellen Anordnung der Lagerkomponenten führt dies in der Regel zum Lagerausfall, wenn keine Redundanzen vorgesehen sind.

Weiterhin wurde gezeigt, welche Wirkmechanismen zum *Normalausfall* führen können. Die Überlegungen wurden für den *Ermüdungs- oder Alterungsausfall* erweitert.

Für die Bestimmung der Versagenwahrscheinlichkeiten durch Normalausfälle eignen sich physikalische Modelle zur Simulation der Einzeleffekte und Nichtlinearitäten. Die Effekte und ihr Einfluss auf die Zuverlässigkeit können hinreichend genau berücksichtigt werden. Damit kann das Driften der technischen Parameter in den Komponenten ebenso untersucht werden wie der Einfluss der Parameteränderungen auf die Regelkreisdynamik. So kann die Stabilitätsreserve des Regelkreises ebenfalls als beeinflussender Faktor in der Zuverlässigkeitsanalyse bewertet werden. Die physikalischen Modelle werden gegenüber der Nennwertauslegung unscharf parametriert. Dazu wird die *Monte-Carlo-Simulation* angewendet. Die in der probabilistischen Simulati-

on gewonnenen Ergebnisse werden innerhalb der Zuverlässigkeitsanalyse statistisch ausgewertet. Im Ergebnis liegen Teilversagenswahrscheinlichkeiten vor, die innerhalb topologiespezifischer *Fehlerbäume* in eine Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des magnetgelagerten Systems zusammengefasst werden.

Die Frage, inwieweit die *Alterung von Lagerkomponenten* in der Zuverlässigkeitsanalyse berücksichtigt werden kann, ist noch unbeantwortet. Es zeichnet sich bereits ab, dass die Herangehensweise über physikalische Modelle ungeeignet erscheint. Ursache hierfür ist, dass aufgrund der hohen Integrationsdichte moderner elektronischer Komponenten die Aufklärung von Struktur und Wirkung unmöglich wird. Daher wird das Ziel verfolgt, mit Hilfe verhaltensbasierter Modellansätze das Informationsdefizit zu bewältigen. Vorbild könnte hier das biologische System „Mensch“ sein. Die Überlegungen dazu sollen zur Diskussion anregen.

Die vorgestellte Herangehensweise ermöglicht zukünftig die Bewertung der Zuverlässigkeit für eine gewählte Magnetlagertopologie auch unter Berücksichtigung des Auslegungsprozesses. Es werden die Unsicherheiten in technischen Parametern, die auf ein grundsätzliches Informationsdefizit zurückzuführen sind, während der Auslegung berücksichtigt. Mit Hilfe der Ergebnisse findet eine Ableitung von Aussagen zu notwendigen Redundanzen statt.

Die Schnittstellen der physikalischen Modelle können mit Messwerten gespeist werden. Die Algorithmen, in ein Magnetlagerdiagnosesystem implementiert, ermöglichen eine Bewertung der Systemzuverlässigkeit im Rahmen der Online-Zustandsdiagnose.

Quellen

- [1] Wörlitz, F.; Düsterhaupt, S.: *Komplexe und integrierte Methoden zur Zuverlässigkeitsermittlung berührungsfreier Lager*. 9. Workshop Magnetlagertechnik Zittau-Chemnitz, Proceedings, Chemnitz, 2013
- [2] Preuß, H.: *Zuverlässigkeit elektronischer Einrichtungen*. 2. bearbeitete Auflage, VEB Verlag Technik Berlin, Berlin, 1978

Experimentelle Bestimmung der Rotorverluste eines dreipoligen kombinierten Radial-/Axialmagnetlagers aus Pulververbundwerkstoffen

Robert Seifert*, Erik Fleischer und Wilfried Hofmann

Technische Universität Dresden, Elektrotechnisches Institut
Helmholtzstraße 9, 01062 Dresden, Germany, *Robert.Seifert@tu-dresden.de

Kurzfassung—In Vakuumanwendungen, wie Molekularpumpen oder Schwungradenergiespeichern, treffen oftmals hohe Drehzahlen auf schwierige Kühlbedingungen. Es besteht daher der Bedarf nach aktiven Magnetlagern mit einem besonders geringem Leistungsbedarf sowie geringen Ummagnetisierungsverlusten im Rotor. Die zur Verlustminimierung prädestinierten Pulververbundwerkstoffe (SMC - Soft Magnetic Composites) finden aufgrund ihrer geringen mechanischen Festigkeit bisher keine Anwendung in industriellen Hochgeschwindigkeitsanwendungen. In diesem Artikel wird das DFG-Projekt „Verlustarme magnetische Radial-/Axiallagerung unter Verwendung von Pulververbundwerkstoffen“ zusammengefasst sowie abschließend der experimentelle Nachweis erbracht, dass die neu entwickelte dreipolare Lagerstruktur mit kombiniertem Radial- und Axiallager den Einsatz von SMC auch bei Drehzahlen von bis zu $30\,000\text{ min}^{-1}$ erlaubt. Eine Projizierung der Messergebnisse auf verlustoptimierte industrielle SMC-Sorten verspricht zudem ein Reduzierungspotential der Ummagnetisierungsverluste von mindestens 23–44 %, wobei insbesondere kompakte und hochausgenutzte Geometrien im Vorteil sind.

Stichwörter—Rotorverluste, Ummagnetisierungsverluste, Pulververbundwerkstoffe, Aktive Magnetlager, Homopolarlager, Kombinierte Radial-/Axialmagnetlager

I. EINLEITUNG

Durch neue Anwendungsgebiete, wie Schwungradenergiespeicher oder Vakuumpumpen, besteht ein Bedarf an aktiven Magnetlagern mit besonders geringer Verlustleistung. Dies betrifft einerseits die Leistungsaufnahme im Stator durch die Steuerströme und andererseits die rotorseitigen Verluste. Letztere sind insbesondere in Vakuumanwendungen problematisch, da hier schwierige Kühlungsbedingungen vorherrschen. Rotorverluste entstehen infolge von Ummagnetisierungsverlusten in magnetisch gelagerten Rotoren, die sich in einem feststehenden Magnetfeld bewegen. In der Literatur waren Messdaten [1] und Berechnungsverfahren [2] für heteropolare Lager vorgestellt worden. Für die hinsichtlich der Rotorverluste günstigeren Homopolarlager sind den Autoren jedoch bisher keine analytischen Ansätze für deren Berechnung bekannt.

Ziel dieses Projekts ist es daher, neue Erkenntnisse sowohl hinsichtlich der Berechnung als auch der Minimierung der Rotorverluste in aktiven Magnetlagern zu gewinnen und die Möglichkeiten auszuloten, Pulververbundwerkstoffe (kurz SMC für Soft Magnetic Composite [3]) in aktiven Magnetlagern einzusetzen,

da diese weiteres Potential für die Verringerung der Rotorverluste versprechen.

Zunächst wurde ein Berechnungsmodell für Rotorverluste in homopolaren Magnetlagern auf Basis der 3D-FEM erstellt [4] und anhand von Messdaten aus der Literatur verifiziert. Die damit abgeschätzte Reduktion der Rotorverluste durch den Einsatz von Pulververbundwerkstoffen beträgt bis zu 74 % bei hohen Luftspaltflussdichten. Um dies experimentell überprüfen zu können, wurde eine neuartige dreipolare Magnetlagerstruktur (5-achsig) konzipiert, die es erlaubt sowohl im Stator als auch im Rotor Pulververbundwerkstoffe einzusetzen [5], [6]. Für die neue Lagerstruktur wurden passende Regelungsstrategien – sowohl eine lineare als auch ein nichtlineare – entworfen und experimentell verifiziert [7]. Die nichtlineare Regelung erlaubt einen Betrieb ohne Vormagnetisierung der Lager und ist somit hinsichtlich der Verluste sowohl im Rotor als auch im Stator am günstigsten.

Nach einer Zusammenfassung der eigenen Vorarbeiten sollen in diesem Artikel abschließend die experimentellen Ergebnisse aus den Auslaufversuchen mit der neuen dreipoligen Lagerstruktur vorgestellt werden. Die ermittelten Rotorverluste werden mit den Messergebnissen an einem Referenzlager [8] verglichen. Zudem erfolgt eine Projizierung der Ergebnisse auf weitere industrielle SMC-Sorten.

II. BERECHNUNG DER ROTORVERLUSTE

Zu Beginn des Projektes wurden zunächst mit Hilfe einer 3D-FEM-Analyse die Rotorverluste magnetischer Lager mit SMC-Rotor quantifiziert. Um das Modell zumindest für den Fall eines gebleichten Rotors mit Messwerten verifizieren zu können, wurde das homopolare Magnetlager aus [1] als Beispielgeometrie verwendet. Aus den in Abb. 2 dargestellten Stromdichteverteilungen, welche mit Hilfe einer FEM-Analyse ermittelt wurden, können direkt die Wirbelstromverluste bestimmt werden. Auf Basis des Modells nach [9] war es zudem möglich, die Hystereseverluste zu berechnen.

Für die Auslegung des Lagers mit SMC-Rotor wurde die gesamte aktive Länge des Rotors als massives Teil modelliert. Die innere Struktur aus isolierten Eisenkörnern wurde dabei makroskopisch durch die gegenüber Elektroblech verringerte elektrische Leitfähigkeit abgebildet. Die Rotorverluste wurden für mehrere Vor-

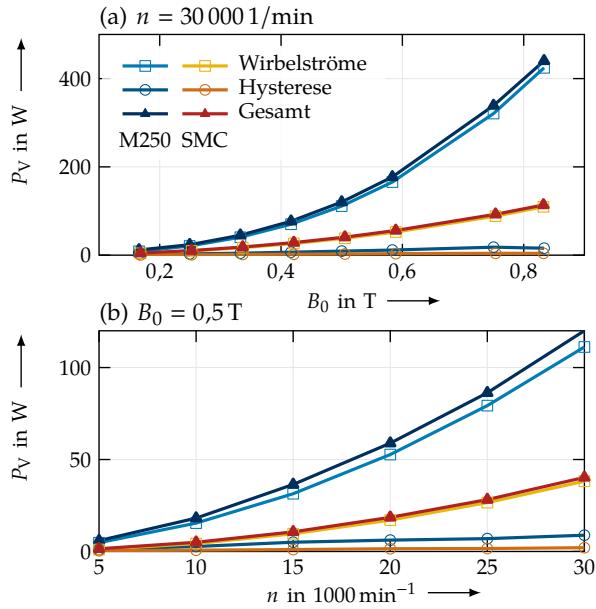


Abbildung 1. Berechnete Verlustleistung im Rotor mit 0,35 mm Blechdicke (M250-35A) bzw. massiven SMC-Rotor (Somaloy® 500 LB1) als Funktion (a) der Flussdichte B_0 und (b) der Drehzahl n

spannungen und Drehzahlen bis $30\,000\,\text{min}^{-1}$ für die gesamte Magnetlagerung sowohl für einen gebleichten Rotor als auch für einen Rotor aus SMC berechnet. In Abb. 1 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Dabei stellt Abb. 1a die Rotorverluste bei einer Drehzahl $n = 30\,000\,\text{min}^{-1}$ und einer Variation der Vorspannungsflussdichte B_0 dar. In Abb. 1b wird dagegen eine konstante Vormagnetisierung von $0,5\,\text{T}$ angenommen und die Drehzahl variiert.

Die Rechenergebnisse zeigen, dass mit einem SMC-Rotor insgesamt eine Verringerung der Ummagnetisierungsverluste auf 26 % bis 35 % gegenüber einem vergleichbaren gebleichten Rotor möglich ist. Im SMC-Rotor treten wie erwartet geringere Wirbelstromverluste auf. Nicht zu erwarten waren dagegen die geringeren Hystereseverluste. Wie die Messergebnisse in Abschnitt V später zeigen werden, kann zwar die Verringerung der Wirbelstromverluste experimentell bestätigt werden, die Hystereseverluste werden in der Rechnung jedoch tatsächlich zu niedrig bewertet. Der Berechnungsansatz in [5] ist daher kritisch zu hinterfragen.

III. ENTWURF UND OPTIMIERUNG DES LAGERUNGSKONZEPTES

Aufbauend auf diesen Ergebnissen und dem Konzept aus [4] wurde ein kombiniertes Radial-/Axialmagnetlager entworfen, welches die Möglichkeit der dreidimensionalen Flussführung durch die Verwendung von SMC ausnutzt (SMC-Kombilager). Die Abmaße und Bemessungsdaten sollten zum Zwecke der Vergleichbarkeit möglichst dem Referenzlager aus [8] entsprechen. In Abb. 3a sind in der Frontansicht die drei radialen Pole des Lagers dargestellt. Zusammen mit dem zusätzlichen axialen Rückschluss entsteht so eine homopolare Struktur. Diese bietet zwei wesentliche Vorteile. Klar erkennbar ist die Möglichkeit, eine axiale

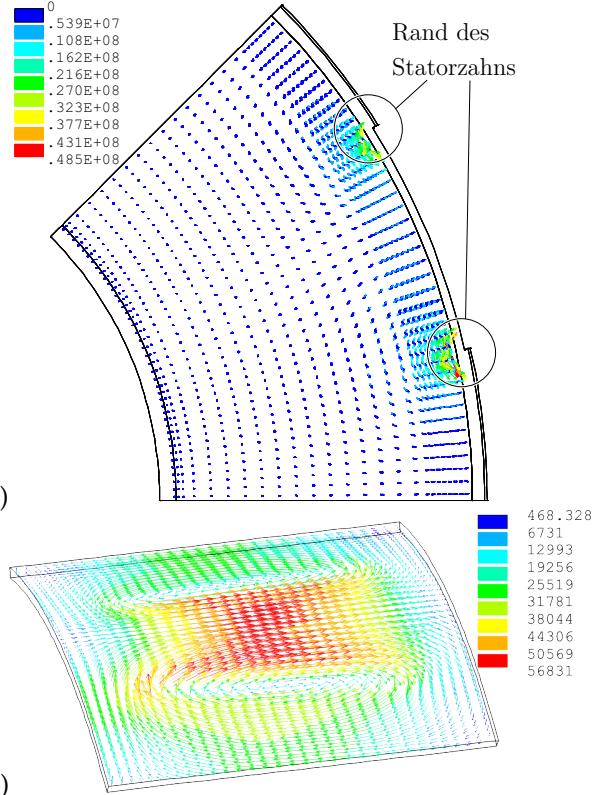


Abbildung 2. Stromdichteverteilungen: (a) im Rotorblech (M250-35A), (b) an der Oberfläche des SMC-Rotors (Somaloy® 500 LB1) bei $n = 30\,000\,\text{min}^{-1}$, $B_0 = 0,5\,\text{T}$

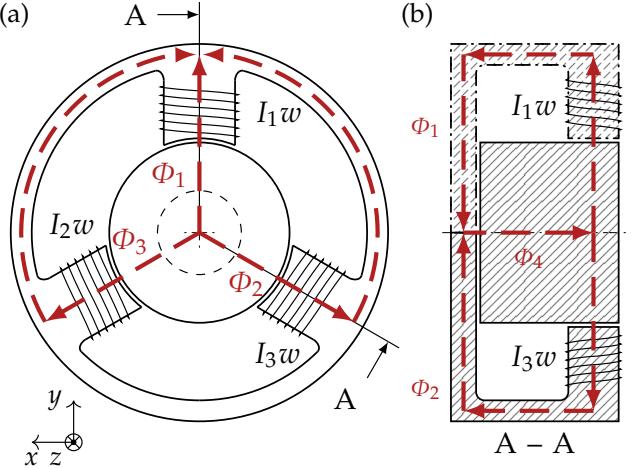


Abbildung 3. Frontansicht (a) und Querschnitt (b) des neuartigen dreipoligen kombinierten Axial/Radiallagers; Festlegung der Flussrichtungen für den Regelungsentwurf, beispielhaft für die Bestromung der oberen Spule mit I_1

Kraft in einer Richtung zu erzeugen. Ebenso wichtig ist, dass sich die drei radialen Flüsse im Rotor nicht mehr zu null addieren müssen und so frei eingestellt werden können. Die Rotorverluste können so theoretisch um bis zu 50 % gesenkt werden.

Die Möglichkeit der dreidimensionalen Flussführung wurde insbesondere für die Integration von Radial- und Axiallager genutzt, da der gemeinsame SMC-Kern sowohl die axialen als auch radiale Flüsse führen

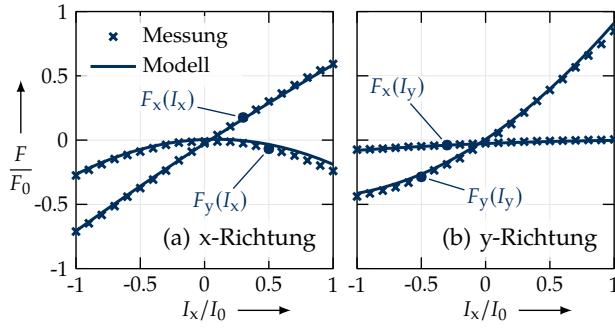


Abbildung 4. Vergleich analytisch berechneter Lagerkräfte mit Messungen für verschiedene Steuerströme

kann. Zudem konnten die Statorzähne mit gerundeten Kanten ausgeführt werden, was die Bewicklung und die Isolation vereinfacht und die mittlere Windungslänge verringert. Des Weiteren sind die wirksamen Eisenquerschnitte im Rücken groß, sodass sich der Fluss ungehindert verteilen kann. Damit wird die im Vergleich zu Elektroblech geringere Permeabilität teilweise ausgeglichen. Mit der gewählten minimalen Polzahl von drei kommt man der Zielstellung, minimale Rotorverluste zu erreichen, am nächsten.

Es wurde auf Basis eines linearen analytischen Modells eine Magnetlagergeometrie für eine maximale Lagerkraft im gegebenen Bauraum ermittelt und mit einer FEM-Simulation verifiziert. Die größte Herausforderung war an dieser Stelle, eine geeignete analytische Näherung für die Bestimmung des magnetischen Widerstands des Rotors und des Stators zu finden, da hier komplexe dreidimensionale Felder vorliegen. Mit der Annahme einer jeweiligen mittleren Eisenweglänge und einer dazugehörigen Querschnittsfläche konnten gute Ergebnisse erzielt werden [6].

Mittels des Simplex-Algorithmus werden anschließend Korrekturfaktoren so bestimmt, dass der Fehler zwischen analytischem und FEM-Modell minimal wird. So kann eine sehr gute Übereinstimmung erzielt werden, wie der Vergleich mit Messdaten in Abb. 4 zeigt. Die Ergebnisse der Auslegung sind in Tab. I zusammengefasst. Die analytisch nicht erfassten Streuflüsse erklären die um ca. 10 % erhöhte Tragkraft gegenüber dem Ergebnis der FEM-Analyse. Da der Rotor im Messaufbau nicht perfekt zentriert werden konnte, ist der Luftspalt des betrachteten Pols etwas kleiner, wodurch die gemessene Tragkraft um 23 % von der FEM-Analyse abweicht.

IV. REGELUNG DES DREIPOLIGEN KOMBILAGERS

Die vorangegangenen Überlegungen haben zu einer neuen Lagertopologie geführt. Im Folgenden werden zwei Regelungsstrategien, eine lineare und eine nichtlineare für den Betrieb ohne magnetische Vorspannung, kurz diskutiert. Eine Vertiefung der Sachverhalte ist in [7] zu finden.

Tabelle I
KENNWERTE DES LAGERS

Bohrungsdurchmesser	45 mm
Außendurchmesser	90 mm
Axiale Länge	40 mm
Maximale Luftspaltflussdichte	0,8 T
Ruheluftspalt	500 µm
Bemessungsstrom	5 A
Windungszahl	113
Erzeugbare Kräfte ¹	
radial (analytisch)	49,9...70,2 N
radial (FEM)	46,0...64,1 N
radial (Messung)	54,3...78,6 N
axial (analytisch)	67,6 N
axial (FEM)	64,7 N
axial (Messung) ²	25,8 N

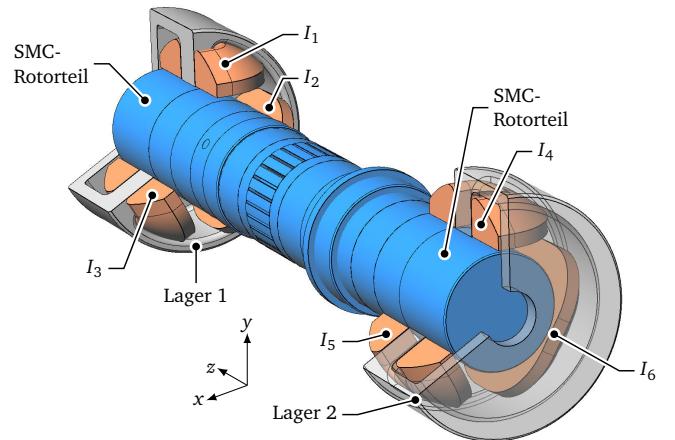


Abbildung 5. Prinzip-Zeichnung SMC-Kombilager: Vollständige 5-achsige Magnetlagerung

A. Lineare Regelung mit magnetischer Vorspannung

Um das Konzept der dezentralen Lageregelung einer einzelnen Lagerachse auf ein dreipoliges Kombilager zu übertragen, ist eine lineare Transformation zwischen Reglern und Strecke erforderlich. Mit der inversen Clarke-Transformation

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & & & 1 & 1 \\ \frac{1}{2} \sqrt{3} & -\frac{1}{2} & 0 & 1 & 1 & I_{y1} \\ -\frac{1}{2} \sqrt{3} & -\frac{1}{2} & 1 & 1 & I_{x2} \\ & 0 & 1 & -1 & 1 & I_{y2} \\ 0 & -\frac{1}{2} \sqrt{3} & -\frac{1}{2} & -1 & 1 & I_z \\ & \frac{1}{2} \sqrt{3} & -\frac{1}{2} & -1 & 1 & I_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{x1} \\ I_{y1} \\ I_{x2} \\ I_{y2} \\ I_z \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$i_c = T_i i_{xyz0} \quad (2)$$

erhält man den Vektor i_c , welcher die Wicklungsströme zweier gespiegelt angeordneter Kombilager einer fünfachsigen Lagerung beschreibt (Abb. 5). Die Ströme I_1 bis I_3 gehören dabei zu Lager 1, I_4 bis I_6 zu Lager 2.

¹Der angegebene Bereich für die radikalen Kräfte reicht von der Minimalkraft, die in alle radikalen Richtungen erzeugt werden kann, bis zur Tragkraft, welche die maximale Kraft in der Vorzugsrichtung darstellt. Alle Angaben gelten für den Dauerbetrieb.

²Aufgrund von Problemen mit dem Kraftmessprüfstand weicht dieser Wert stark ab und ist nur der Vollständigkeit halber aufgeführt.

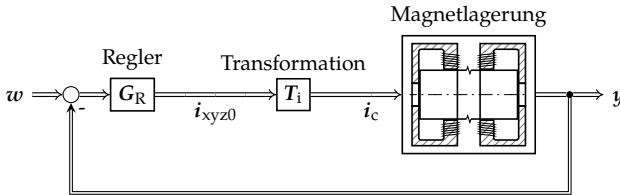


Abbildung 6. Struktur der linearen Lageregelung, bestehend aus den Lagereglern G_R und der Transformationsmatrix T_i ; mit den Zustandsvektoren: w - Lage-Sollwerte, y - Lage-Istwerte

Der Vektor der Steuerströme i_{xyz0} enthält eine Größe für jede der fünf Lagerachsen einer vollständigen Magnetlagerung und den Vormagnetisierungsstrom I_0 .

Die Nullkomponente der inversen Clarke-Transformation wird sowohl für die Steuerung der Kraft in z-Richtung als auch für die Vorspannung genutzt. Dabei wird der Vorspannungsstrom I_0 als 6. Größe im Steuervektor i_{xyz0} mitgeführt. Somit wird die Transformationsmatrix T_i quadratisch und invertierbar [10].

Die resultierende Regelungsstruktur ist in Abb. 6 dargestellt. Zwischen den fünf unabhängigen Lagereglern in G_R und der Strecke wird die Transformationsmatrix T_i eingefügt. Die einzelnen Werte im Vektor i_c liefern die Sollwerte für sechs unterlagerte Stromregelkreise. Diese Struktur unterscheidet sich nur durch die zusätzliche Transformation von einer dezentralen Lageregelung mit unterlagerter Stromregelung.

B. Nichtlineare Regelung ohne magnetische Vorspannung

Mit der Absenkung der Vorspannung geht eine zunehmende Nichtlinearität der Kraft-Strom-Kennlinie des Magnetlagers einher. Regelungstechnisch muss in diesem Fall die Magnetlagerstelle als System mit einer statischen Nichtlinearität betrachtet werden.

Diese wird hier mit der Methode der exakten Linearisierung behandelt. In den Regelkreis wird ein zusätzlicher Block zwischen Strecke und Regler eingefügt, welcher die Nichtlinearität im gesamten Arbeitsbereich kompensiert und eine neue Eingangsgröße für das linearisierte System bereitstellt. Eine anschauliche Variante ist es, die neuen Eingänge als Kräfte aufzufassen, welche auf die einzelnen Lagerachsen wirken. Somit erhält man die in Abb. 7 dargestellte Struktur.

Ähnlich zum linearen Ansatz besteht diese aus fünf unabhängigen Reglern in G_R und einer Strecke mit unterlagerten Stromregelkreisen. Im Unterschied zum linearen Ansatz wird jedoch ein nichtlinearer Block eingefügt, in dem die Wicklungsströme aus den Sollkräften in f_{xyz} und der aktuellen Rotorlage berechnet werden. Die exakte Ein-/Ausgangs-Linearisierung bildet somit eine zusätzliche nichtlineare Rückkoppelschleife.

C. Vergleich der Regelungsstrategien

Unabhängig von der Regelungsstrategie sind alle Lagereglern mit dem symmetrischen Optimum nach [6] in Anlehnung an [11] ausgelegt. Ein stabiler Betrieb konnte sowohl mit der linearen als auch mit der nichtlinearen Regelung erreicht werden, wie Abb. 8 zeigt. Dargestellt sind die Sprungantworten beider Lagerachsen

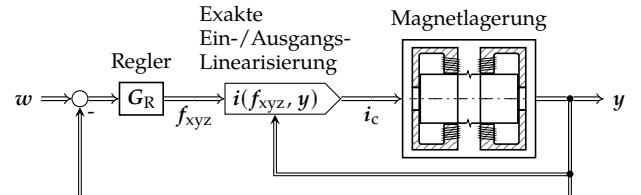


Abbildung 7. Struktur der nichtlinearen Lageregelung, bestehend aus den Lagereglern G_R und der Ausgangsrückführung zur exakten Linearisierung; mit den Zustandsvektoren: w - Lage-Sollwerte, y - Lage-Istwerte

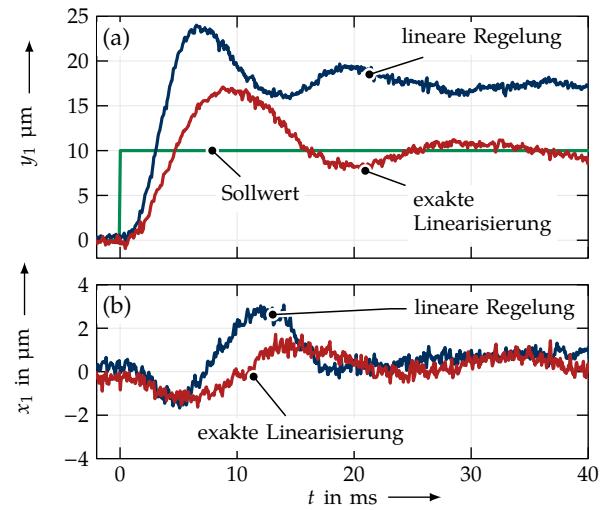


Abbildung 8. Gemessene Sprungantworten (a) der Führungsgröße y_1 und (b) der verkoppelten Lage x_1 für einen Sollwertsprung $\Delta y_1 = 10 \mu\text{m}$

x_1 und y_1 (für Lager 1) auf einen Sollwertsprung von $10 \mu\text{m}$ der y_1 -Position. Bei Verwendung der linearen Regelung kann trotz magnetischer Vorspannung die Nichtlinearität der Kraft-Strom-Kennlinien (vgl. Abb. 4) insbesondere auf der y -Achse nicht vollständig kompensiert werden. So weist die Antwort der y_1 -Achse bei einem Sollwertsprung der Führungsgröße y_1 mit $7 \mu\text{m}$ eine große Regelabweichung nach Abklingen der Schwingungen auf (Abb. 8a). Die in [7] dargestellte Abweichung der x_1 -Achse bei einem Sprung von x_1 ist mit $4 \mu\text{m}$ geringer. Der Integralanteil muss somit eine größere Abweichung ausgleichen und das Erreichen des Sollwertes dauert länger.

Nach dem Einschwingvorgang tritt bei Verwendung der nichtlinearen Regelung keine bleibende Regelabweichung auf und die mittlere zum Schweben notwendige Stellgröße bleibt unverändert. Dies deutet darauf hin, dass die Kompensation von Mitkopplung und Nichtlinearität zumindest statisch mit dem verwendeten Verfahren gelingt. Durch die exakte Linearisierung erhält man ein System, das wesentlich schneller einen neuen Sollwert erreicht, ohne dass ein entsprechend größerer Integralanteil dafür notwendig ist, der wiederum die Stabilitätsreserve verringert.

Die Wahl des Regelungsverfahrens beeinflusst auch die Querkopplung zwischen x- und y-Achse einer Lagerstelle. Die Sprungantworten in Abb. 8b zeigen dies.

Hier erlaubt es die nichtlineare Regelung, Störungen schneller auszuregeln und führt somit zu einer besseren Entkopplung der Lagerachsen.

V. VERIFIKATION DER THEORETISCHEN ANNAHMEN BEZÜGLICH DER ROTORVERLUSTE

A. Auslaufversuche

Messtechnisch lassen sich die Rotorverluste mit Hilfe von Auslaufversuchen bestimmen. Der Rotor wird auf Nenndrehzahl beschleunigt und die Auslaufzeit bis zum Stillstand für verschiedene Luftdrücke gemessen. Aus dem Drehzahlabfall lassen sich das Bremsmoment und die Gesamtrotorverluste $P_{V\text{ges}}$ bestimmen:

$$\begin{aligned} P_{V\text{ges}} &= 2\pi \cdot M_R \cdot n = (2\pi)^2 \cdot J \cdot \frac{dn}{dt} \cdot n \\ &= P_L + P_{\text{PMSM}} + P_{\text{ML}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Über den Vergleich der Drehzahlverläufe bei Raumdruck und im Vakuum ist es möglich, die Luftreibungsverluste P_L zu isolieren und über das in [12] bzw. [8] vorgestellte Modell die Schleppverluste P_{PMSM} (nur für Referenzlager) und die Ummagnetisierungsverluste P_{ML} der Magnetlager zu ermitteln. Auf Grund des geringeren Trägheitsmoments des neuen Versuchsaufbaus ($J_{\text{SMC}} = 638 \text{ kgmm}^2$) gegenüber dem Referenzlager ($J_{\text{Ref}} = 2284 \text{ kgmm}^2$) sind zwar die Auslaufzeiten kürzer (Abb. 9), die ebenfalls geringere Luftreibung (vgl. Abb. 10) führt jedoch zu deutlich reduzierten Gesamtverlusten (55 %).

Verliefen die Untersuchungen am Referenzlager zu Beginn des Projekts noch problemlos [8], kam es bei den Auslaufversuchen für das neue dreipolige SMC-Kombilager (Abschnitt III) mit der dafür entwickelten nichtlinearen Regelung (Abschnitt IV) zu einigen Einschränkungen:

- Anders als das Referenzlager, besitzt das SMC-Kombilager eine Hülse aus insgesamt 10 Teilelementen, die einzeln abzudichten sind. Drücke von $< 0,3 \text{ mbar}$ lassen sich auf Grund erhöhter Leckage somit nicht erreichen. Das ist jedoch unkritisch, da bereits ab 1 mbar der Einfluss der Luftreibung vernachlässigbar klein wird [8].
- Der Freqenzumrichter aus der Frühphase des Projekts stand für die abschließenden Untersuchungen nicht mehr zur Verfügung. Die Zwischenkreisspannung des Ersatzmodells ($U_{\text{DC}} = 144 \text{ V}$) reichte nur im Vakuum aus, den Rotor auf über 20000 min^{-1} zu beschleunigen.
- Trotz einer erreichten Wuchtgüte G 0,4 (DIN ISO 1940) führte die verbleibende Unwucht des Rotors bei einer Drehzahl von 10000 min^{-1} zu sehr großen Orbiten ($> 15 \mu\text{m}$). Im Falle der linearen Regelung musste auf eine weitere Erhöhung der Drehzahl aus Sicherheitsgründen verzichtet werden. Mit der nichtlinearen Regelung war es möglich die kritische Drehzahl vorsichtig zu durchfahren, bevor sich die Orbiten wieder leicht verkleinerten.

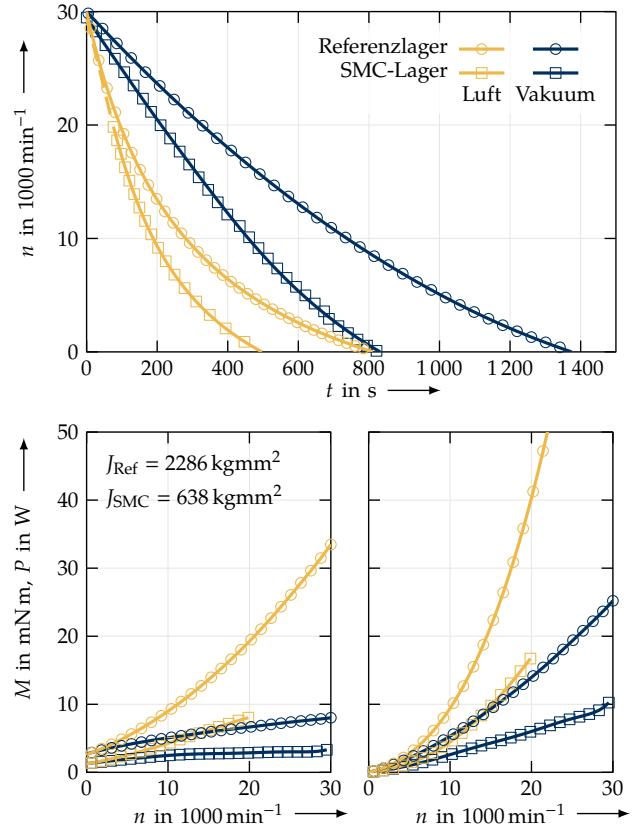


Abbildung 9. Auslaufversuche für Referenz-Magnetlager und SMC-Kombilager mit nichtlinearer Regelung: Interpolierte Messwerte aus jeweils mehreren Messreihen für den Drehzahlabfall von 30000 min^{-1} , Bremsmomente und Gesamtrotorverluste für verschiedene Drücke, Luftdruck: $\approx 1,01 \text{ mbar}$, Vakuum: $0,015 \text{ mbar}$ (Referenzlager) bzw. $0,3 \text{ mbar}$ (SMC-Kombilager)

Die höhere Genauigkeit (Abb. 8) der neu entwickelten nichtlinearen Lageregelung macht sich somit im Belastungstest bei hohen Drehzahlen deutlich bemerkbar.

B. Verlustbestimmung

Das SMC-Kombilager wird von einer Schlitzläufer-Asynchronmaschine angetrieben [13], womit anders als beim Referenzlager keine Schleppverluste auftreten und sich aus den Messergebnissen unmittelbar die Ummagnetisierungsverluste des Magnetlagers P_{ML} ermitteln lassen. Der SMC-Hersteller HÖGANÄS gibt für alle im Jahr 2017 verfügbaren Somaloy® SMC-Sorten die Verlustfaktoren für Hysterese k_h und Wirbelströme k_w sowie ein Verlustmodell an [14]:

$$P_{\text{ML}}(f) = V\rho \left(\underbrace{k_h f B^{1,75}}_{\text{Hysterese}} + \underbrace{\left(k_w + \frac{d^2}{1800\rho\sigma} \right) f^2 B^2}_{\text{Wirbelströme}} \right). \quad (4)$$

Unter der Annahme, dass dieses Modell auch für das nicht mehr erhältliche SMC Somaloy® 500 LB1 gilt, werden die Verlustfaktoren k_h und k_w aus dem mitgelieferten Datenblatt [15] ermittelt. Dabei wird Gl. 4 mittels einer nichtlinearen 2D-Least-Squares-Regression an das angegebene B - f -Kennlinienfeld angeglichen. Auf diese Weise kann das Verlustmodell in Gl. 4 auch für den

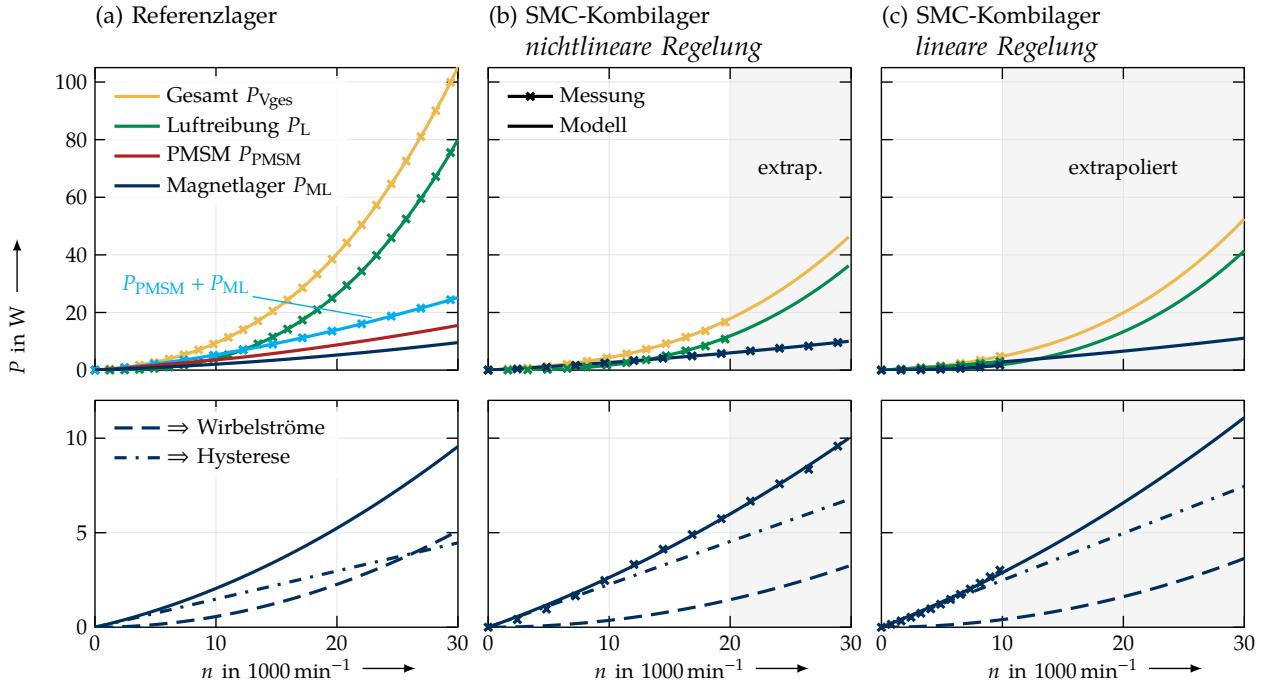


Abbildung 10. Komponenten der Rotorverluste, Anteil Hysterese- und Wirbelstromverluste an den Magnetlagerverlusten: (a) geblechtes Referenzlager mit PM-Synchronmaschine (b) SMC-Magnetlager mit Schlitzläufer-Asynchronmaschine bei nichtlinearer Lageregelung ohne magnetische Vorspannung sowie (c) bei linearer Lageregelung

vorliegenden Rotor aus Somaloy® 500 LB1 verwendet werden, wobei es in diesem Fall auf die Messwerte aus den Auslaufversuchen in Abb. 9 angewandt wird.

Da der genaue dreidimensionale Flussverlauf in den Stirn-Segmenten des SMC-Rotors nicht ermittelbar ist, werden die minimale Querschnittslänge³ d , das aktive Volumen V sowie die tatsächliche Flussdichte B im SMC-Kern in realistischen Grenzen als freie Variablen festgelegt und aus der Regression bestimmt. Neben den Verlustfaktoren k_h und k_w sind auch die Dichte ρ und der spezifische elektrische Widerstand σ materialspezifische Größen, die nach Gl. 4 abschließend einen Vergleich der Ergebnisse mit anderen SMC-Sorten erlauben (Abschnitt VI).

Da es nicht möglich war, das SMC-Kombilager bei Raumdruck auf die gewünschte Drehzahl von $30\,000\text{ min}^{-1}$ zu beschleunigen, war es nötig, die Luftreibungsverluste zu extrapolieren. Zu diesem Zweck wurde Gl. 4 mit dem Summanden $k_L \cdot f^3$ [16] um die kubisch von der Drehzahl abhängigen Luftreibungsverluste erweitert.

Wie die Messergebnisse in Abb. 10 zeigen, konnte die in Abschnitt II bzw. in [5] vorhergesagte Reduzierung der Ummagnetisierungsverluste durch die neue Lagertopologie nicht experimentell bestätigt werden. Bei Einsatz der nichtlinearen Regelung konnte eine Erhöhung der Verluste um 4 % gegenüber dem Referenzlager festgestellt werden, bei der linearen Regelung sind es

³Die minimale Querschnittslänge entspricht der kleinsten Ausdehnung eines Kernelements (z. B. Blechdicke). Im Falle des SMC-Kombilagers ist die obere Grenze der als freie Variable festgelegten Größe d der Außenradius des aktiven SMC-Kerns im Rotor ($d_{\max} = 44\text{ mm}$).

16 % (vgl. auch Tab. II). Auffällig ist, dass der dominierende Anteil der Ummagnetisierungsverluste auf die Hysterese zurückzuführen und somit das Gegenteil der analytischen Vorbetrachtung eingetreten ist, welche die Wirbelströme als dominierenden Einflussfaktor sieht. Es liegt damit die Vermutung nahe, dass der analytische Ansatz aus [4] den Einfluss der Hysterese und damit auch die Gesamtverluste zu niedrig bewertet.

Es konnte bestätigt werden, dass mit der nichtlinearen Regelung durch die Kompensation der magnetischen Vorspannung eine Reduzierung der Verluste um 10 % erreicht werden kann. Der Abbruch der Messung bei $n = 10\,000\text{ min}^{-1}$ erlaubt jedoch keine belastbaren Aussagen, da nur dieser sehr kleine Drehzahlbereich für die nichtlineare Regression der Messwerte zur Verfügung stand.

VI. VERGLEICH DER ROTORVERLUSTE FÜR INDUSTRIELLE SMC-SORTEN

Mit Hilfe des Verlustmodells nach Gl. 4 konnten, anhand der ermittelten Verlustfaktoren k_h und k_w für das verbaute Somaloy® 500 LB1, die Geometriefaktoren d und V sowie die Kern-Flussdichte B bestimmt werden. Diese können im Umkehrschluss genutzt werden, um auf Basis der Verlustfaktoren anderer SMC-Sorten in [14] die Rotorverluste für deren möglichen Einsatz im SMC-Kombilager abzuschätzen (Abb. 12). Dabei wurden nur Materialien in Betracht gezogen, die mindestens eine Zugfestigkeit von 50 MPa aufweisen.

Das verlustoptimierte Somaloy® 700 HR 5P erlaubt eine Reduzierung der Ummagnetisierungsverluste um 44 % gegenüber dem Referenzlager (Tab. II), besitzt

Tabelle II

VERGLEICH DER EXPERIMENTELLEN ERGEBNISSE (ABB. 10) MIT DER THEORETISCHEN VORBETRACHTUNG (ABB. 1) FÜR VERSCHIEDENE SOMALOY® SMC-SORTEN

Lager/Regelung	Kernmaterial	B in T	Hystereseverluste		Wirbelstromverluste		Ummagnetisierungsverluste $P_{Vges,SMC}$ in W	$1 - \frac{P_{Vges,SMC}}{P_{Vges,Ref}}$
			P_h in W	P_w in W	P_w in W			
Theoretisch								
Beispielgeometrie [1]	M250-35A	0,33	4,5	40,1		45,1		
<i>Homopolarlager, geblecht</i>	M250-35A	0,83	15,8	424,4		440,2		
Beispielgeometrie [1]	500 LB1	0,33	1,5	16,9		18,5	59 %	
<i>Homopolarlager, massiv</i>	500 LB1	0,83	4,2	109,6		113,7	74 %	
Experimentell								
Referenzlager [8]	NO20	- ¹	4,5	5,1		9,6		
SMC-Kombilager	500 LB1	\approx ² 0,33	6,8	3,2		10,0		
<i>nichtlineare Regelung</i>	700 HR 3P	\approx 0,33	4,5	2,9		7,4	23 %	
	700 HR 5P	\approx 0,33	2,8	2,6		5,4	44 %	
SMC-Kombilager	500 LB1	\approx 0,33	7,5	3,6		11,1		-16 %
<i>lineare Regelung</i>	700 HR 3P	\approx 0,33	4,9	3,3		8,2	14 %	
	700 HR 5P	\approx 0,33	3,1	2,9		6,0	37 %	

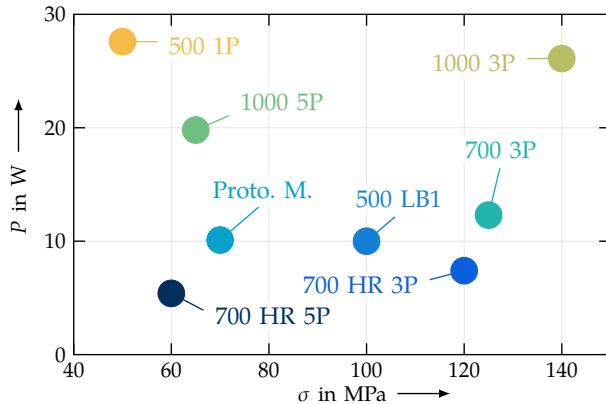
¹ nicht bekannt ² Wert aus nichtlinearer Regression (Gl. 4)

Abbildung 11. Gesamotorverluste im Vergleich zur Zugfestigkeit für verschiedene Somaloy® SMC-Sorten

mit 60 MPa jedoch eine geringere Zugfestigkeit als das Somaloy® 500 LB1 (Abb. 11). Das im Gegenzug hochfeste Somaloy® 1000 3P mit $\sigma = 140$ MPa weist wiederum vergleichsweise hohe Verluste auf (+173 %). Den besten Kompromiss stellt das Somaloy® 700 HR 3P ($\sigma = 120$ MPa) dar, welches eine Verlustreduzierung um 23 % ermöglicht. Die Eisenverluste der Blechsorten M250-35A (Beispielgeometrie für Berechnung aus Literatur [1]) und NO20 (im Zuge des Projekts vermessenes Homopolarlager der Fa. LEVITEC [8]) unterscheiden sich ebenfalls (17,1 W/kg bzw. 12,3 W/kg) und erschweren den Vergleich zur Rechnung.

Die Abweichungen in der möglichen Verlustreduzierung zwischen der theoretischen Vorbetrachtung und den experimentellen Ergebnissen lässt sich somit durch abweichende Geometrien, unterschiedliche Blechsorten, die Notwendigkeit der Extrapolation und der bei 0,3 mbar nicht vollständigen Vermeidung der Luftreibung erklären. Auch die von Seiten des Herstellers nicht bestätigten Verlustfaktoren für das verbaute Somaloy® 500 LB1 stellen eine mögliche Fehlerquelle dar. Dennoch

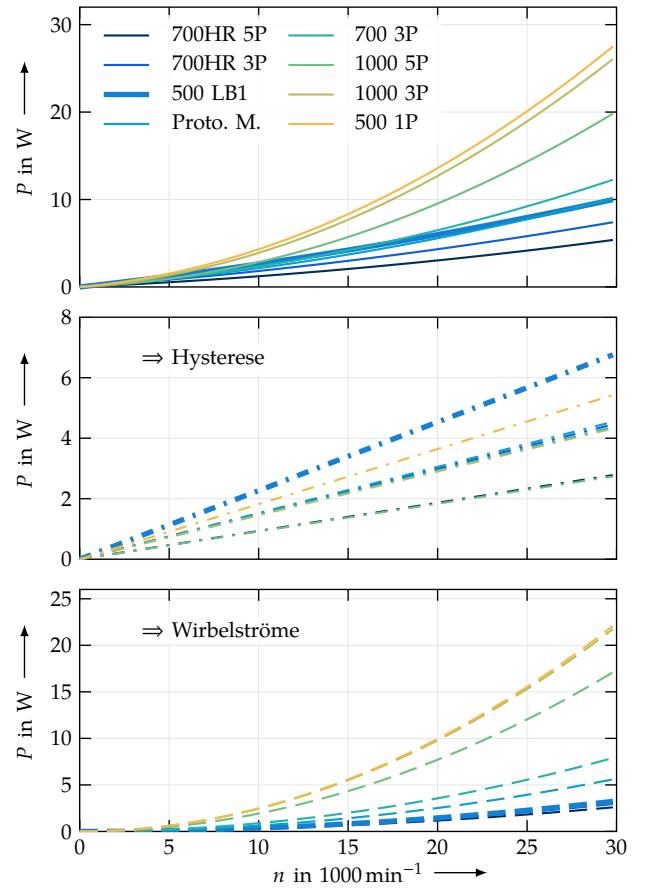


Abbildung 12. Gesamotorverluste bei nichtlinearer Regelung im Vergleich für verschiedene Somaloy® SMC-Sorten mit einer maximalen mechanischen Zugspannung von mindestens 50 MPa sowie deren Anteile der Hysterese- und Wirbelstromverluste

wird in Tab. II deutlich, dass die neue Lagertopologie in Verbindung mit der nichtlinearen Regelung eine signifikante Verlustreduzierung ermöglicht, vorausgesetzt verlustoptimierte SMC-Sorten kommen zum Einsatz.

VII. FAZIT

Bei den abschließenden Auslaufversuchen mit der neuen Lagertopologie konnte gegenüber dem gebleibten Referenzlager keine Verlustreduzierung nachgewiesen werden. Die somit großen Unterschiede zu den theoretischen Ergebnissen lassen sich insbesondere durch die unterschiedlichen Blechsorten und die auf Grund der neuen Lagertopologie abweichende Geometrie erklären. Seit dem Aufbau des Versuchsstands mit dem inzwischen nicht mehr erhältlichen Somaloy® 500 LB1 als Kernmaterial im Rotor, haben sich die Festigkeit und die magnetischen Materialeigenschaften von Pulververbundwerkstoffen signifikant verbessert. Die Projizierung der experimentellen Ergebnisse auf im Jahr 2017 verfügbare, verlustoptimierte industrielle SMC-Sorten verspricht eine Reduzierung der Ummagnetisierungsverluste von mindestens 23–44 %, wobei insbesondere kompakte und hochausgenutzte Geometrien im Vorteil sind.

Im Vergleich der beiden Regelungsstrategien wurde deutlich, dass die Eliminierung der magnetischen Vorspannung durch Anwendung einer exakten Ein-/Ausgangslinearisierung die Steuerströme um durchschnittlich 23 % senken konnte. Somit war eine weitere Reduzierung der Ummagnetisierungsverluste um 10 % und der Kupferverluste um 41 % erreichbar. Teilweise waren sogar bessere Ergebnisse hinsichtlich Regelungsgüte und Stabilitätsreserve erzielbar, was sich insbesondere durch eine geringere Anfälligkeit für Unwuchten bei hohen Drehzahlen zeigte.

Die Verwendung von Pulververbundwerkstoffen in der neuen dreipoligen Lagerstruktur erlaubt unter Ausnutzung der möglichen dreidimensionalen Flussführung kompaktere Geometrien. Die verminderte elektrische Leitfähigkeit von SMC gegenüber Elektroblechen ermöglicht eine effektive Reduzierung der Rotorverluste. Es wurde somit eine interessante Alternative zu häufig verwendeten permanentmagnetisch vorgespannten Homopolarlagern vorgestellt, die insbesondere im Bereich der Vakuumtechnik vorteilhaft ist.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung des Forschungsvorhabens im Zuge des Projekts *DFG HO 1483/55-3, AOBJ: 615510*.

REFERENZEN

- [1] M. Kasarda, P. Allaire, P. Norris u. a., „Experimentally determined rotor power losses in homopolar and heteropolar magnetic bearings“, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Jg. 121, Nr. 4, S. 697–702, Okt. 1999.
- [2] D. C. Meeker, A. V. Filatov und E. H. Maslen, „Effect of magnetic hysteresis on rotational losses in heteropolar magnetic bearings“, *IEEE Transactions on Magnetics*, Jg. 40, Nr. 5, S. 3302–3307, Sep. 2004.
- [3] H. Shokrollahi und K. Janghorban, „Soft magnetic composite materials (SMCs)“, *Journal of Materials Processing Technology*, Jg. 189, Nr. 1, S. 1–12, 2007.
- [4] E. Fleischer und W. Hofmann, „Einsatz von Pulververbundwerkstoffen in aktiven Magnetlagern zur Reduzierung der Rotorverluste“, *ETG-Kongress*, Düsseldorf, 2009, S. 35–40.
- [5] E. Fleischer und W. Hofmann, „Application of soft magnetic composites in active magnetic bearings“, *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Nov. 2011, S. 1770–1775.
- [6] E. Fleischer, „Entwurf, Modellierung und nicht-lineare Regelung eines integrierten Radial-Axial-Magnetlagers“, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2017, unveröffentlicht, eingereicht 2016.
- [7] E. Fleischer und W. Hofmann, „Linear and nonlinear control of a three pole combined radial and axial active magnetic bearing - a comparison“, *Mechanical Engineering Journal*, Jg. 3, Nr. 1, S. 1–13, 2016.
- [8] E. Fleischer und W. Hofmann, „Experimentelle Bestimmung der Rotorverluste in einem homopolaren Magnetlager“, *VDI / VDE-Tagung Antriebssysteme*, Nr. 2138, S. 65–73, 2011.
- [9] J. Tellinen, „A simple scalar model for magnetic hysteresis“, *IEEE Transactions on Magnetics*, Jg. 34, Nr. 4, S. 2200–2206, Juli 1998.
- [10] M. Linke, „Implementierung eines LQG-Reglers an einem 5-achsigen magnetisch gelagerten Antrieb“, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2013.
- [11] C. Kessler, „Das Symmetrische Optimum, Teil I“, *Regelungstechnik*, Nr. 11, S. 395–400, 1958.
- [12] C. Hufenbach, „Untersuchung der Rotorverluste in einer Hochgeschwindigkeitsmagnetlagerung“, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2011.
- [13] E. Fleischer und W. Hofmann, „Auslegung eines Asynchronversuchsmotors mit Massivläufer für ein Hochgeschwindigkeitsmagnetlager“, 8. *Workshop Magnetlagertechnik Zittau-Chemnitz*, Zittau, 2011.
- [14] Höganäs. (5. Mai 2017). Somaloy Material Data, Adresse: https://www.hoganäs.com/globalassets/media/sharepoint-documents/BrochuresanddatasheetsAllDocuments/SomaloyMaterialData_November_2016_1806HOG.pdf.
- [15] Höganäs, *Somaloy 500 LB1 Datenblatt*, 2007.
- [16] E. Alwers und W. Böning, *Taschenbücher der Technik: Elektrische Energietechnik*. Springer-Verlag Berlin, 1978, Bd. 1.

Herstellung elektromagnetisch aktiver Strukturen mittels 3D Multimaterialdruck

Fabian LORENZ, Johannes RUDOLPH, Ralf WERNER

Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe (EWA)

Technische Universität Chemnitz

Email: fabian.lorenz@etit.tu-chemnitz.de

Kurzfassung

Additive Fertigungsverfahren werden zunehmend für die Herstellung von Konsum- und Industrieprodukten eingesetzt. Neben den weit verbreiteten, kunststoffbasierten 3D-Druckverfahren sind Laser-Pulverbett-basierte Technologien etabliert, mit denen komplexe, hochbelastbare Funktionsbauteile hergestellt werden können. Die aktuell verfügbaren Anlagen sind jedoch weitestgehend auf die Verarbeitung nur eines Werkstoffes bzw. einer Werkstoffgruppe (Kunststoff) begrenzt. Die Herstellung komplexer Funktionsbaugruppen erfordert darüber hinaus die gleichzeitige Verarbeitung mehrerer Werkstoffe mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften. Der vorliegende Beitrag stellt ein neuartiges Fertigungsverfahren vor, das die Realisierung komplexer Multimaterialbauteile aus Metallen sowie Keramiken ermöglicht und somit die Herstellung physikalisch anspruchsvoller Baugruppen zulässt. Die Herstellung elektromagnetisch aktiver Strukturen steht dabei im Fokus.

Keywords – additive Fertigung; elektrische Maschinen; 3D Multimaterialdruck; Hochtemperaturanwendung

1 Einleitung

Additive Fertigungsverfahren stellen eine interessante Möglichkeit dar, komplexe Bauteilgeometrien zu realisieren, die mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht umsetzbar sind. Der auf 3D-Druck basierende Umsatz betrug im Jahr 2016 allein in Deutschland ca. eine Milliarde Euro. Das entspricht einem Anteil von zehn Prozent am weltweiten Umsatz, der auf zehn Milliarden Euro beziffert wird [1]. Besonders kunststoffbasierte Verfahren wie FFF (Fused Filament Fabrication), FDM (Fused Deposition Modeling), STL (Stereolithografie), DLP (Digital Light Processing), MJM (Multi Jet Modeling) und FTI (Film Transfer Imaging) sind mittlerweile weit verbreitet. Grundlegend können mit Hilfe der genannten Verfahren geometrisch äußerst komplexe Bauteile hergestellt

werden, deren technischen Eigenschaften jedoch stark begrenzt sind. Strukturen mit nennenswerten elektrischen, magnetischen oder mechanischen Eigenschaften lassen sich mit kunststoffbasierten Verfahren nicht herstellen. Parallel zu den kunststoffbasierten Verfahren haben sich im Bereich industrieller Fertigung in den letzten Jahren additive Verfahren entwickelt, bei denen Metalle oder Keramiken für den Aufbau von dreidimensionalen Strukturen eingesetzt werden. Die am weitesten verbreiteten Technologien SLS (Selective Laser Sintering) bzw. SLM (Selective Laser Melting) sind Pulverbettverfahren, bei denen metallische bzw. keramische Pulver mittels eines Lasers lokal gesintert bzw. verschmolzen werden. Neben komplexen Geometrien lassen sich gute mechanische Eigenschaften der Werkstoffe erreichen, was die Herstellung hochbelastbarer Funktionsbauteile ermöglicht.

Für die Fertigung komplexer Komponenten, die mehr als eine hohe Strukturfeinheit oder eine gute mechanische Festigkeit aufweisen, ist die Integration von mehreren Materialien unterschiedlicher physikalischer Eigenschaften notwendig. Um beispielsweise ganze Funktionsbaugruppen, wie die Wicklung von elektrischen Maschinen herstellen zu können, ist es zwingend erforderlich, neben einem elektrisch leitfähigen Material, ein zweites elektrisch isolierendes Material zu verarbeiten. Nach dem derzeitigen Stand der Technik ist keines der etablierten Verfahren in der Lage, umfassende Kombinationen von Materialien unterschiedlicher elektrischer, mechanischer oder magnetischer Eigenschaften zu verarbeiten.

Der 3D Multimaterialdruck – ein speziell für die Herstellung elektromagnetischer Strukturen an der Professur für elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe der TU Chemnitz entwickeltes Verfahren bietet hingegen die Möglichkeit, komplizierte Bauteile aus mehreren Materialien wie z.B. Kupfer, Eisen und Keramik herzustellen. Die anwendbaren Werkstoffe sowie die umsetzbaren Geometrien haben das Potenzial, die Gestaltungsfreiheiten

und darüber hinaus den Einsatzbereich elektrischer Maschinen deutlich zu erweitern.

2 Verfahren

Beim 3D Multimaterialdruck handelt es sich um ein extrusionsbasiertes Verfahren. Ausgangsstoff sind Pulver des zu verwendenden Materials, die mittels spezieller Bindemittel zu hochviskosen Pasten verarbeitet werden. Die Pasten werden durch Düsen eines speziellen Druckkopfes extrudiert, der durch eine CNC-Maschine bewegt wird (siehe Abb.2). Es werden schichtweise komplexe Geometrien aufgebaut, die – je nach Anforderung – aus unterschiedlichen Materialien bestehen können. Das Ergebnis des Druckprozesses ist der sogenannte Grünkörper, der die Endgeometrie abbildet, jedoch noch nicht die gewünschten physikalischen Eigenschaften besitzt. In einer anschließenden Wärmebehandlung werden die Bindemittel aus dem Bauteil entfernt und die Werkstoffe gesintert.

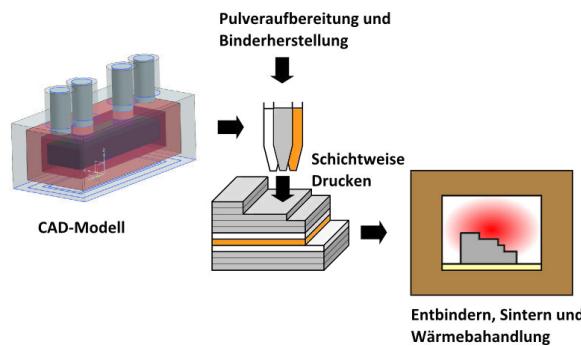


Abbildung 1: Arbeitsschritte 3D Multimaterialdruck

Der Sinterprozess hat eine Schrumpfung der Bauteile sowie einen deutlichen Anstieg deren Dichte zur Folge und ist bei exakter Kontrolle der Temperaturprofile mit hoher Genauigkeit wiederholbar, wobei Restporositäten der Materialien von unter 10% erreichbar sind.

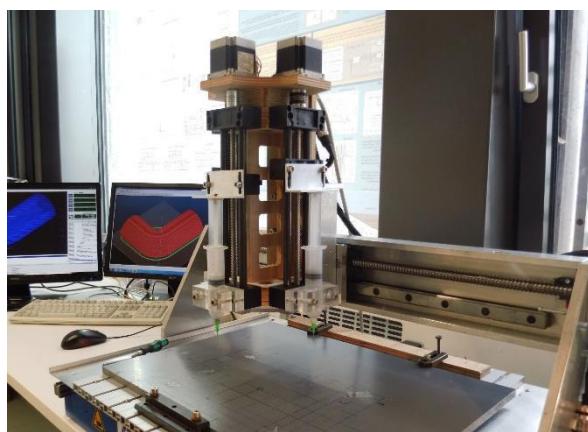


Abbildung 2: Prototyp Multimaterialdrucker

Die Erstellung der Druckdaten setzt die CAD-Modellierung der Zielgeometrie unter Beachtung des verfahrensspezifischen Abbildungsvermögens voraus. Die Geometrie wird in Schichten zerlegt, in denen die einzelnen Druckwege definiert werden (Slicing). Wichtige Steuerungsparameter dabei sind die Layerhöhe sowie der Durchmesser der Extrusionsdüse. Abbildung 2 zeigt die einzelnen Schritte vom CAD-Modell zum fertigen Bauteil anhand einer Rohrgeometrie, hergestellt aus reinem Eisen.

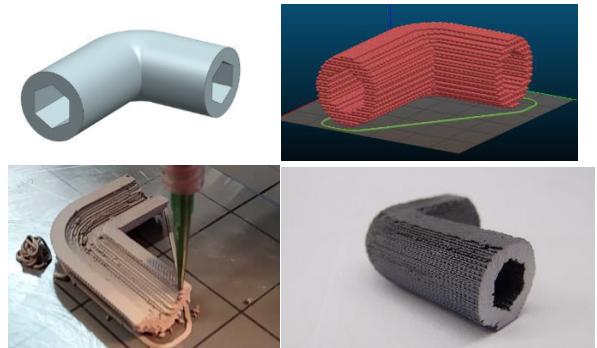


Abbildung 3: CAD-Modell, Slicing-Ergebnis, Druck, fertiges Teil nach Wärmebehandlung

Die erreichbare Genauigkeit hängt neben dem verwendeten Düsendurchmesser von der Höhe der einzelnen Drucklayer ab und kann in weiten Grenzen variiert werden. Kleine Werte für Düsendurchmesser und Layerhöhe ermöglichen hohe Strukturauflösungen, führen jedoch zu langen Druckzeiten. Entsprechend kann durch die Wahl größerer Werte die Baurate bei reduzierter Genauigkeit deutlich erhöht werden. Dies zeigt, dass feine Strukturen ebenso möglich sind wie der schnelle Aufbau großer Geometrien. Tabelle 1 stellt die Verfahrensparameter der aktuellen Forschungsanlage dar.

Tabelle 1: Aktuell realisierbare Druckparameter

Düsendurchmesser	0,41 – 1,6 mm
Layerhöhe	0,1 – 1,6 mm
Genauigkeit Positionierung	10 μ m
Baurate	bis 140 cm^3/h
Arbeitsraum	300x400x300mm
Anzahl Materialien	3 gleichzeitig

Neben den dargestellten Rohrgeometrien lassen sich massive Körper, Gitterstrukturen und geschlossenen, leere Hohlräume ohne Stützstrukturen herstellen.



Abbildung 4: Gitterstruktur Eisen (links), Kombination Eisen-Keramik (rechts)

3 Einsatzmöglichkeiten

Die Anwendung des 3D Multimaterialdruckes zur Herstellung elektrischer Maschinen bietet ein umfangreiches Optimierungspotenzial, das sich in folgende Bereiche untergliedern lässt.

3.1 Gestaltungsfreiheit

Der 3D-Multimaterialdruck ermöglicht, ähnlich wie andere generative Fertigungstechnologien, eine nahezu vollständige Gestaltungsfreiheit in allen drei Raumdimensionen. Mit Hilfe von gedruckten magnetisch aktiven Materialien, die ein ähnliches Verhalten wie SMC (Soft Magnetic Compound) aufweisen, lassen sich Magnetkreise mit dreidimensionaler Flussführung realisieren. Eine Erhöhung der Leistungsdichte ist zum einen durch die Umsetzung alternativer Maschinenkonzepte wie z.B. Transversalflussmaschinen möglich, zum anderen können Wickelräume konventioneller Maschinentypen besser ausgenutzt werden, da der Fokus bei der Wicklungsauslegung nicht mehr auf deren Herstellbarkeit gelegt werden muss. Es können somit Wicklungen realisiert werden, die mit herkömmlichen Verfahren nicht umsetzbar sind. Darüber hinaus kann die Querschnittsform von Leiterzügen z.B. in Wickelköpfen variiert werden, um deren Ausladung zu verringern (siehe Abb.5).

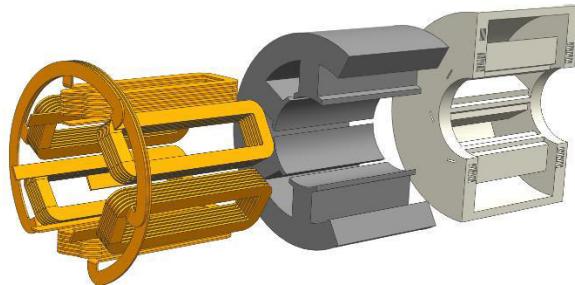


Abbildung 5: Geometriestudie einer einfachen, druckbaren Drehfeldwicklung mit wechselndem Leiterquerschnitt im Wickelkopf

3.2 Wärmemanagement

Der 3D Multimaterialdruck ermöglicht die vollständig keramische Isolation von Kupfer-Lei-

terstrukturen, wodurch das Wärmemangement elektromagnetischer Anordnungen deutlich verbessert werden kann. Aufgrund der Wärmeleitfähigkeit der anwendbaren Keramiken, die $5 - 20 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ beträgt und damit deutlich über der Wärmeleitfähigkeit von Isolationsharzen ($< 0,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) liegt, lassen sich höhere Verlustwärmemengen ableiten und damit die Leistungsdichte weiter erhöhen. Abbildung 6 zeigt den Vergleich der Wärmeverteilung in einer gedruckten, keramisch isolierten Wicklung (links) und einer konventionellen, lackisierten Wicklung (rechts) im Nutsegment einer Drehfeldmaschine bei gleichem Phasenstrom. Gut erkennbar sind die gleichmäßige Wärmeverteilung und die geringere Wicklungstemperatur.

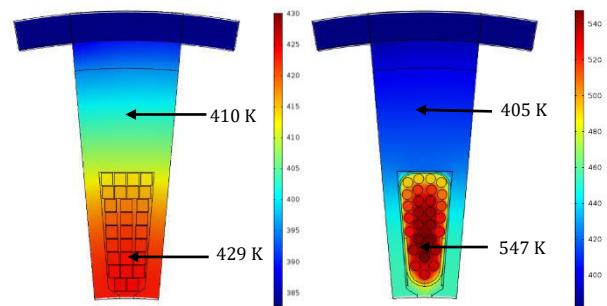


Abbildung 6: Wärmeverteilung im Nutsegment einer Drehfeldmaschine. links: gedruckte, keramisch isolierte Wicklung, rechts: konventionelle, lackisierte Wicklung[2]

Hinzu kommt die gute thermische Anbindung der Leiter an das umgebende Material und die Möglichkeit, Kühlkanäle sehr nahe an die Wärmequellen zu bringen.

4 Ergebnisse

Die Umsetzbarkeit keramisch isolierter Spulengeometrien mittels 3D Multimaterialdruck konnte am Beispiel einer Zahnpule gezeigt werden. Abbildung 7 zeigt eine Spule, deren aktive Wicklung durch bandförmige Leiter realisiert ist, die in der Wickelebene verlaufen und nach jeder Windung eine diagonale Verbindung zur nächsten Windung aufweisen. Die keramische Isolation übernimmt gleichzeitig die Aufgabe einer mechanischen Stabilisierung, wodurch ein Spulenkörper entfällt. Abbildung 7 zeigt Aufbau, Druckprozess und Sinterergebnis der betrachteten Spule. Durch intensive Untersuchung insbesondere des Wärmebehandlungsprozesses konnte gezeigt werden, dass derartige Kombinationsbauteile erfolgreich gesintert werden können.

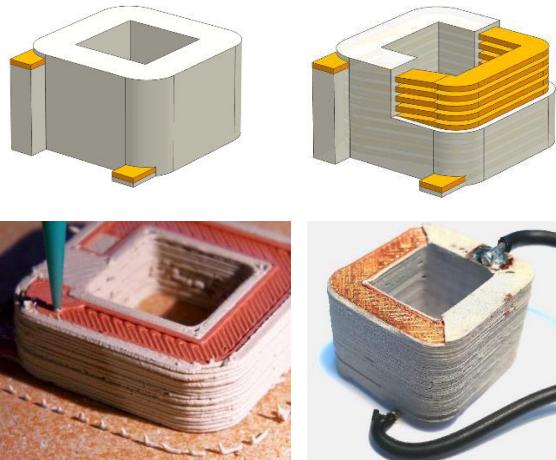


Abbildung 7: CAD-Modell, Druckprozess und funktionsfähige Spule (geöffnete erste Kupferwindung)

Die Kennwerte der Spule sowie die erreichten Eigenschaften der Werkstoffe sind in Tabelle 2 ersichtlich. Die erkennbar geringeren Werte der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit (71%) bzw. der Dichte (87%) des gedruckten Kupfers gegenüber konventionellem Elektrolytkupfer sind in der verbleibenden Restporosität im Material begründet.

Tabelle 2: Kennwerte Zahnpule

Windungszahl	$N = 10$
Leiterquerschnitt	5 mm^2
Abmessungen	$34 \times 34 \times 22 \text{ mm}$
Spezifische elektrische Leitfähigkeit Kupfer	$4,19 \cdot 10^7 \text{ S/m}$
Dichte Kupfer	$7,78 \text{ g/cm}^3$
Spannungsfestigkeit Keramik	$2,9 \text{ kV/mm}$
Dichte Keramik	$1,93 \text{ g/cm}^3$

Die Kombination von Kupfer und Keramik auf makroskopischer Skala stellt dabei aufgrund des hohen spezifischen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Kupfer ($16,5 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$) eine besondere Herausforderung dar. Durch gezielte Anpassung der Keramikmischung konnte deren Wärmeausdehnungsvermögen ausreichend gesteigert werden, um die Wärmebehandlung und anschließende Temperaturwechselzyklen schadenfrei zu durchlaufen. Im Belastungstest konnten Stromdichten von 16 A/mm^2 erreicht werden, wobei die Spule im Dauerbetrieb bis auf 300°C erhitzt wurde (siehe Tabelle 3 und Abbildung 8). Die erreichten Einsatztemperaturen zeigen, dass durch die Anwendung des 3D Multimaterialdrucks Betriebsbereiche erschlossen werden können,

die mit konventionellen Herstellungsverfahren nicht erreichbar sind. Das Verfahren eignet sich somit besonders für Strukturen in Hochtemperaturanwendungen sowie die Steigerung der Überlastfähigkeit von elektrischen Maschinen, Übertragern und magnetischen Lagerungen.

Tabelle 3: Testparameter Zahnpule

Strom	80 A
Spannung	$0,38 \text{ V}$
Widerstand	$0,00475 \Omega$
Stromdichte	16 A/mm^2
Betriebstemperatur	300°C
Kühlung	freie Konvektion



Abbildung 8: gedruckte Spule auf ebenfalls gedrucktem Magnetkreis (links), Wärmebild der Anordnung im Test bei Dauerstrom $i = 80 \text{ ADC}$

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der 3D-Multimaterialdruck stellt ein völlig neues Fertigungsverfahren für elektromagnetische Strukturen dar, mit dessen Hilfe sich die wesentlichen Bestandteile von elektrischen Maschinen in einem Arbeitsgang herstellen lassen. Durch die Substitution von kunststoffbasierten Isolationswerkstoffen durch Keramik können deren thermischen Eigenschaften signifikant verbessert werden. Darüber hinaus ermöglicht die umfangreiche Gestaltungsfreiheit die Umsetzung alternativer Maschinenkonzepte und komplexer Wicklungsstrukturen. Im Fokus der Weiterentwicklung des Verfahrens steht die Reduzierung der Restporosität der Werkstoffe sowie die Integration von ferromagnetischen Materialien in den Druck- und Sinterprozess, um neben Wicklungsgeometrien komplett elektrische Maschinen herstellen zu können.

Literatur

- [1] Heidenreich A. M., Dr. Kuckartz M.: 3D-Druck-Potenziale und Herausforderungen für die Hamburger Wirtschaft: Hamburg, Deutschland: Handelskammer Hamburg, Januar 2017
- [2] Diplomarbeit Fabian Lorenz „Thermische Modellierung moderner Wicklungsstrukturen und deren Kühlung“ (2012)

Auswirkungen hoher Temperaturen auf die Auslegung und Gestaltung aktiver Magnetlager

Torsten Rottenbach, Christian Vanek, Frank Worlitz

Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik

Hochschule Zittau/Görlitz

Theodor-Körner-Allee 16

02763 Zittau, Germany

Tel.: +4935836124388, Fax: +4935836123449

Email: t.rottenbach@hszg.de, c.vanek@hszg.de, f.worlitz@hszg.de

Kurzfassung

Der Einsatz aktiver Magnetlager an Turbomaschinen in Kraftwerken führt aufgrund der wesentlich geringeren Lagerreibung und dem Wegfall der Ölschmierung zu einer Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades des Aggregates. Dieser wird jedoch erheblich reduziert, da die über die Welle in die Magnetlager eingeleitete Prozesswärme durch geeignete Kühlmaßnahmen abgeführt werden muss. Alternativ dazu sind Konzepte, die auf eine Erhöhung der Grenztemperaturen der Isolation der Lagerspulen und der Rotor- bzw. Statorbleche durch temperaturbeständiger Isolierstoffe abzielen. Der Beitrag gibt, ausgehend von den Auswirkungen hoher Temperaturen auf die elektrischen, magnetischen und mechanischen Eigenschaften der Magnetkreismaterialien, einen Überblick über verfügbare Werkstoffe und deren Hersteller/Anbieter sowie auf den Auslegungs- bzw. Designprozess von Magnetlagern.

1 Einleitung und Zielstellung

Der Einsatz aktiver Magnetlager an Turbomaschinen in Kraftwerken bietet gegenüber den üblicherweise mit hydrodynamischen Lagern ausgestatteten Aggregaten eine Reihe von Vorteilen:

- erheblich geringere Lagerreibung
- Reduzierung des Wartungs- und Instandhaltungsaufwandes, Möglichkeit der Online-Überwachung/-diagnose
- Erhöhung der Betriebssicherheit durch die Verringerung der Brandlast in der Anlage infolge des Wegfalls des Schmieröls

Daneben reduziert sich der anlagentechnische Aufwand, da das Ölsystem entfällt. Damit verbunden ist jedoch, dass die aus dem Prozessraum über die Welle an die Lagerstellen geleitete sowie die in den Lagern entstehende Wärme nicht mehr über das Öl zum Ölkühler abgeführt wird. Der Magnetlagerluftspalt wirkt zudem als thermische Isolierung. Das führt zu

hohen thermischen Belastungen der Magnetlager und der in unmittelbarer Nähe angebrachten Lagesensoren und erfordert den Einsatz aufwändiger Kühlkonzepte. Während der Stator relativ einfach durch einen Wasserkreislauf gekühlt werden kann, gestaltet sich die Kühlung des Rotorblechpaketes weitaus komplizierter. Konstruktionsbedingt können hier lediglich gasförmige Kühlmedien genutzt werden. Die Bereitstellung und Führung der Kühlmedien führt zu einem zusätzlichen technischen Aufwand und reduziert die erzielbaren Wirkungsgradverbesserungen beim Einsatz von aktiven Magnetlagern gegenüber Gleitlagern. Ziel muss es daher sein, Magnetlager zu entwickeln, die ohne diese Kühlung auskommen und die o. g. Vorteile volumnäßig aus schöpfen.

Eine Alternative zu den Kühlkonzepten ist der Einsatz von temperaturbeständigeren Isolationswerkstoffen bzw. Beschichtungen für die Lagerspulen und der Rotor- bzw. Statorbleche. Die im Elektromaschinenbau üblicherweise genutzten Standardwerkstoffe sind dafür nicht geeignet, da diese erheblichen Einschränkungen bezüglich der oberen Dauereinsatztemperaturen unterliegen. Im Rahmen einer Literatur- und Internetrecherche wurde daher geprüft, ob Werkstoffe am Markt verfügbar sind, die diesen Ansprüchen genügen.

2 Thermische Belastungen an einer magnetgelagerten Turbomaschine

Die Magnetlager einer Turbomaschine werden durch Wärmeleitung in der Welle und durch Verluste im Lager selbst thermisch belastet. Die über die Welle eingetragene Wärmemenge ist abhängig vom Temperaturunterschied zwischen Lager und Prozessraum, den Materialei-

genschaften sowie der konstruktiven Gestaltung der Maschine. Diese Problematik wurde auch an der seit März 2015 im Kraftwerk Jänschwalde eingesetzten magnetgelagerten SPAT deutlich: „Außerdem ist es äußerst wichtig, die hohen Prozesstemperaturen von 535° Celsius von den elektrischen Wicklungen der Lagerung fern zu halten“ [1]. Zu diesem Zweck wurde an der SPAT eine fertigungstechnisch sehr aufwändige Kühlung installiert, bei der Kühlung axial durch die Hülse unterhalb der Rotorblechpakete geblasen wird. Die Kühlung wird durch zwei Gebläse bereitgestellt.

Die Eigenerwärmung des Lagers ist abhängig von den Verlusten im Lager. Diese unterteilen sich in ohmsche Wicklungs- und Eisenverluste, letztere werden durch Wirbelstrom- und Ummagnetisierungsverluste verursacht und sind drehzahlabhängig. Abb. 1 zeigt in einer Übersicht die thermischen Lasten an der Magnetlagerung einer Turbomaschine.

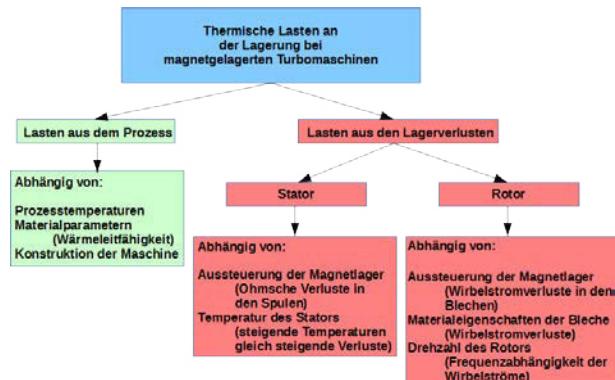


Abb. 1: Thermische Lasten an der Magnetlagerung einer Turbomaschine

3 Auswirkungen hoher Temperaturen auf die Auslegung und Gestaltung aktiver Magnetlager

3.1 Vorbetrachtung

Die spezifischen Eigenschaften der für aktive Magnetlager eingesetzten Werkstoffe sind temperaturabhängig. Das betrifft sowohl die für die Funktion der Magnetlager maßgeblichen elektrischen und magnetischen als auch mechanische und chemische Eigenschaften.

Elektrische Eigenschaften

Die im Elektromaschinenbau für Wicklungen eingesetzten Werkstoffe Kupfer und Aluminium sind Kaltleiter und haben einen positiven

Temperaturkoeffizienten für den elektrischen Widerstand, d. h. mit steigender Temperatur nimmt auch der elektrische Widerstand dieser Materialien nach Glg. 1 zu [2].

$$R_9 = R_{20} \cdot [1 + \alpha_{20}(\vartheta-20^\circ\text{C})] \quad (\text{Glg. 1})$$

Die Temperaturkoeffizienten α_{20} für Kupfer ($0,00392 \text{ K}^{-1}$) und Aluminium ($0,004 \text{ K}^{-1}$) sind über den Temperaturbereich von -200°C bis 600°C nahezu konstant, der Widerstand R steigt demnach linear mit der Temperatur. Beträgt bspw. der Widerstand R eines Kupferdrahtes 10 Ohm bei 20°C , so steigt der Widerstand bei 200°C auf $17,06 \text{ Ohm}$.

$$P_V = i^2 \cdot R \quad (\text{Glg. 2})$$

Die Wicklungsverluste P_V steigen entsprechend Glg. 2 und führen wiederum zu einer Erhöhung der Temperatur und der Verluste bis zur Einstellung eines thermischen Gleichgewichts.

Die für den magnetischen Kreis verwendeten ferromagnetischen Werkstoffe für Elektrobleche bestehen aus Eisenlegierungen mit Zusätzen von Silizium oder Aluminium zu Erhöhung des spezifischen Widerstandes. Dadurch werden die Wirbelstromverluste bei magnetischen Wechselfeldern z. B. gegenüber der Verwendung von Reineisen deutlich reduziert. Der positive Temperaturkoeffizient dieser Werkstoffe bewirkt bei steigender Temperatur ebenfalls einen Anstieg des ohmschen Widerstandes, wodurch die Wirbelstromverluste reduziert werden.

Elektrische Isolation

Bei der elektrischen Isolation in elektrischen Maschinen wird unterschieden in die Isolation der elektrischen Leiter und die Blechisolation. Aufgabe der Leiterisolation ist die galvanische Trennung der betriebsmäßig unter Spannung stehenden elektrischen Leiter gegeneinander und gegen geerdete Bauteile. Zur Reduzierung von Wirbelstromverlusten werden bei magnetischen Wechselfeldern die magnetischen Kreise der Maschinen aus gegeneinander elektrisch isolierten Blechen gefertigt. Die Wärmebeständigkeit der Isolierstoffe ist abhängig vom eingesetzten Material. Dementsprechend sind unterschiedliche Höchstwerte zulässig. Eine Überschreitung der höchstzulässigen Dauertemperaturen beeinflusst die Funk-

tion und Lebensdauer der Maschine negativ und beschleunigt den chemischen Alterungsprozess der Isolation.

Magnetische Eigenschaften

Die magnetischen Sättigungspolarisationen verschiedener Ferromagnetika sind in gleicher Weise von der Temperatur nichtlinear abhängig – vgl. Abb. 2. Die Sättigungspolarisation sinkt mit steigender Temperatur zunächst langsam, dann immer stärker bis zur Curietemperatur T_C auf den Wert Null ab. Oberhalb der Curietemperatur gehen die ferromagnetischen Eigenschaften verloren und das Material verhält sich paramagnetisch. Bezieht man die Sättigungspolarisation I_S auf den Wert bei Zimmertemperatur I_{S0} und die Temperatur T auf die materialabhängige Curietemperatur T_C , so kann die temperaturabhängige Sättigungspolarisation I_S nach Abb. 2 ermittelt werden [3].

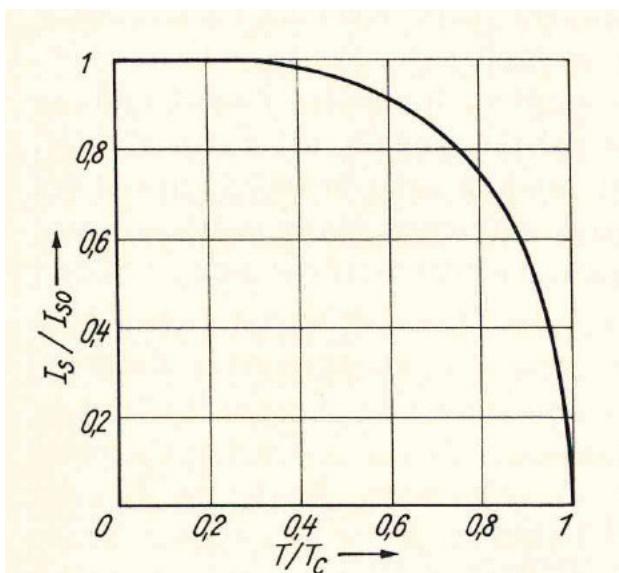


Abb. 2: Temperaturabhängigkeit der Sättigungspolarisation von Ferromagnetika [3]

Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften von in aktiven Magnetlagern eingesetzten Werkstoffen werden wesentlich durch temperaturabhängige, spezifische Werkstoffkennwerte wie Elastizitätsmodul E oder Dehngrenze $R_{p0,2}$ bestimmt und kennzeichnen das Verhalten der Werkstoffe gegenüber äußeren Belastungen. Die Werkstoffkennwerte nehmen mit zunehmender Temperatur ab. Die Schmelztemperatur der eingesetzten Blechmaterialien spielt insofern eine Rolle, als es bei einem Verhältnis

von Einsatztemperatur zu Schmelztemperatur größer 0,4 zum Kriechen des Werkstoffes kommt. Sollte dieses Verhältnis überschritten sein, muss die Zeitstandfestigkeit der Bauteile überprüft und die maximale Einsatzzeit bei den entsprechenden Temperaturen definiert werden.

Thermische Ausdehnung

Die thermische Ausdehnung von Werkstoffen kann bei hohen Temperaturen nicht vernachlässigt werden. Der sichere Betrieb von Magnetlagern hängt wesentlich von der Berücksichtigung des Verhaltens der Werkstoffe bei hohen Temperaturen ab. Unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten von Materialien können zu erhöhten Belastungen (z. B. innere Spannungen) oder zu erhöhten Spielen zwischen den Materialien führen, welche in der konstruktiven Gestaltung für die gesamte Temperaturspanne der Einsatzbedingungen berücksichtigt werden müssen.

Chemische Reaktionen

Die Atmosphäre der Betriebsumgebung beeinflusst das Verhalten der eingesetzten Werkstoffe. So korrodieren Werkstoffe infolge Oxidation schon bei Raumtemperatur. Dieser Vorgang kann bei hohen Temperaturen wesentlich beschleunigt werden. Die Auswahl entsprechender Materialien oder der Einsatz in einer oxidationsmittelfreien Atmosphäre verlangsamen dieses Phänomen [4].

Daneben kommt es beim Kontakt zweier Werkstoffe zu chemischen Reaktionen zwischen diesen. Viele Werkstoffe sind bei Raumtemperatur inert, jedoch nicht mehr bei hohen Temperaturen. So kommt es bspw. zwischen Nickel und Kupfer bei hohen Temperaturen zur Diffusion, welche die Leitfähigkeit des Kupferleiters beeinträchtigt [4].

3.2 Analyse verfügbarer Hochtemperaturwerkstoffe für Magnetlager

Ferromagnetische Werkstoffe

Ferromagnetische Werkstoffe für aktive Magnetlager bei Hochtemperaturanwendungen stellen besondere Anforderungen an die Werkstoffeigenschaften. So müssen sie sehr gute magnetische, mechanische und elektrische Eigenschaften über einen großen Temperaturbereich und über der Zeit aufweisen [4]. Eben-

so spielt die Curietemperatur eine wesentliche Rolle, oberhalb derer die ferromagnetischen Eigenschaften des Materials in paramagnetische übergehen - vgl. auch Abb. 2. Magnetlagerwerkstoffe für Hochtemperaturanwendungen sollten eine möglichst hohe Sättigungsflussdichte aufweisen, damit bei der angestrebten Einsatztemperatur am Arbeitspunkt noch eine ausreichende Induktion für die Krafterzeugung bereitgestellt werden kann. Dafür sind weichmagnetische Eisen-Kobalt-Legierungen prädestiniert. Eine Auswahl dieser Legierungen und deren Hersteller zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1: hochpermeable Fe-Co-Legierungen

Legierung	Hersteller
AFK 502	Aperam Alloys Inchy
Hiperco 50	Carpenter Technologies Corp.
Vacoflux 50	Vacuumschmelze GmbH Hanau
Vacdour 50	Vacuumschmelze GmbH Hanau

Diese Legierungen zeichnen sich durch hohe Sättigungsinduktionen von $> 2,2$ T, hohe relative Permeabilitäten von > 12000 , Curietemperaturen von ≥ 900 °C und großen spezifischen elektrischen Widerständen von ≥ 40 $\mu\Omega\text{cm}$ aus. Die Werkstoffe sind auf Grund des hohen Kobaltanteiles spröde und schwer bearbeitbar. Bleche sind in unterschiedlichen Dicken i. d. R von 0,025 bis 2,0 mm, jedoch nur in Breiten von max. 300 mm lieferbar.

Abb. 3 zeigt die Magnetisierungskurven von Vacoflux 50/17 im Vergleich zu Silizium- und Reineisen.

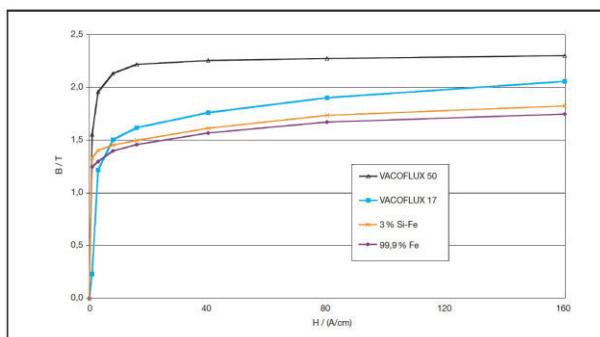


Abb. 3: Magnetisierungskurve Vacoflux im Vergleich zu Silizium- und Reineisen

Blechisolationswerkstoffe

Die vorrangige Aufgabe der Blechisolation ist die galvanische Trennung der Bleche im Blechpaket gegeneinander mit dem Ziel der Reduzierung der Wirbelstromverluste in mag-

netischen Wechselfeldern. Daneben übernehmen die Beschichtungen den Korrosionsschutz. Die Isolationen bestehen aus Oxidschichten oder aufgetragene Beschichtungen. Die Beschichtungen beinhalten organische und/oder anorganische Bestandteile. Eine Einteilung der Isolationen auf Elektroblech und -band gibt die DIN EN 10342. Grundlage dafür sind die allgemeinen chemischen Zusammensetzungen der Isolationen, deren relative Isolierfähigkeit sowie typische Einsatzgebiete. Hersteller bzw. Lieferanten von Elektroblech und -band bieten i. d. R. Isolationssysteme für die Bleche an. Diese weisen bis zu einem gewissen Grad Dauertemperaturbeständigkeit auf. Diese ist abhängig von der Art der Beschichtung (organisch/anorganisch, Zuschlagsstoffe) und liegt im Allgemeinen bei Temperaturen zwischen 150 °C und 200 °C. Für Anwendungen im Hochtemperaturbereich sind weitaus höhere Temperaturen erforderlich. In Tabelle 2 sind beispielhaft Isolierungen für Elektrobleche einschließlich der zulässigen Dauertemperatur aufgelistet.

Tabelle 2: Blechisolationen für erhöhte Temperaturen

Dauertemperatur	Name
> 450 °C	isovac BLUE, Magnesiumoxid
300 °C	Remisol EB 5620 (C-4)
270 °C	Remisol EB 5308 (C-5)
270 °C	SURALAC 7000
270 °C	CDW AN8
250 °C	ArcelorMittal G11

Hochtemperaturwickeldrähte/-leiterisolationswerkstoffe

Zur elektrischen Isolation der Windungen einer Spule gegeneinander und gegen geerdete Bauteile werden die Leiter mit Isolierstoffen umgeben. Die Art der Isolierstoffe beeinflusst neben der Spannungsfestigkeit die Wärmableitung aus der Wicklung und die konstruktiven Gegebenheiten wie Wicklungsvolumen oder auch die Schutzklasse. Die zulässige Erwärmung ist durch die Wärmebeständigkeit der Isolation begrenzt. Eine Überschreitung der höchstzulässigen Dauertemperatur beeinflusst wesentlich die Lebensdauer.

An die Drahtisolation für Hochtemperaturanwendungen werden im Allgemeinen folgende Anforderungen gestellt [4]:

- hochtemperaturbeständig
- gute elektrische Isoliereigenschaften

- gute Wärmeleitfähigkeit
- kompakt
- flexibel

Für diese Anwendungsfälle sind die Anforderungen an die Isolierstoffe z. T. gegensätzlich und schwer erfüllbar.

Nachfolgend werden von verschiedenen Produzenten hergestellte Hochtemperaturwickeldrähte und ihre wesentlichen Eigenschaften kurz vorgestellt:

- vonRoll
SK 650 SamicaFirewall
Mica-umwickelte Kupfer- oder vernickelte Kupferwickeldrähte für Betriebstemperaturen bis 500 °C (abhängig von der Dicke der Nickelschicht, ohne Vernickelung bis 230 °C), Ø 0,7 mm - 3,5 mm, Durchmesserzuwachs durch die Isolation 0,21 mm
- Karl Schupp AG
KD500 Wickeldrähte mit Keramikisolation, Dauertemperaturbereich -90 °C bis 500 °C, Ø 0,07 mm - 1,0 mm, Isolationsdicke 5 µm - 20 µm
- Ceramawire
HT Wire mit Glas-Emaille-Isolation, vernickelte Kupferdrähte (Ø 0,101 mm - 1,02 mm) oder Nickeldrähte (Ø 0,071 mm - 0,51 mm), Dauertemperaturbereich -232 °C – 538 °C, Isolationsdicke 3,8 µm – 7,6 µm
- CGP
CERAFILE 500 – Kupfer-Nickel-Draht mit Keramikisolation, Temperaturbereich von -90 °C - 500 °C, Ø 0,07 mm - 1,0 mm, Isolationsdicke 5 µm – 20 µm

Als Alternative dazu werden keramische Textilien wie Nextel 440, beschichtete Glasseide-, Glimmer- oder Fiberglasumhüllungen eingesetzt, deren Temperaturbeständigkeit im Einzelfall zu prüfen ist. Dadurch wird jedoch der Kupferfüllfaktor der Spulen erheblich herabgesetzt. Daneben kommen Keramiken als Schlicker für die Isolation und mechanische Fixierung der Spulen zum Einsatz. Abb. 4 zeigt ein Axialmagnetlager mit keramischen Schlicker. Nachteilig bei der Verwendung solcher Keramiken ist, dass der Isolierstoff spröde und hygroskopisch ist und eine schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzt.

Neben den o. g. Wickeldrähten können auch Drähte mit elektrisch isolierenden Oxidschichten eingesetzt werden, die eine hohe Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit aufweisen, wie z. B. ISOTAN.



Abb. 4: Axialmagnetlager mit keramischer Isolation

Spulenkörper

Bei körperlosen Lackdrahtspulen wird deren Stabilität und Formtreue durch Verbacken mit Backlack gesichert, alternativ erfolgt die Fixierung durch Umwickeln mit Tape. Keramikisierte Wickeldrähte sind zur Erreichung der Isoliereigenschaften nach der Verarbeitung thermisch auszuhärten oder ggf. zu trocknen. Außerdem ist die Isolierung sehr spröde und vor mechanischen Einflüssen zu schützen. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, die Spulen auf separate, wärmebeständige Spulenkörper zu wickeln. Diese Vorgehensweise hat mehrere Vorteile, die Spulen

- können einer separaten Wärmebehandlung unterzogen werden,
- sind problemlos einzeln austauschbar,
- werden bei der Aufbringung auf die Pole nicht mechanisch beansprucht und
- sind über die Spulenkörper gegenüber dem Blechpaket sehr gut elektrisch isoliert.

Nachteilig dagegen ist, dass die Spulenkörper mehr Platz beanspruchen und die Wärmeableitung zum Blechpaket stark reduziert ist.

Als Material für die Spulenkörper können Glimmerplatten oder Elektrokeramik eingesetzt werden. Glimmerplatten sind dauerthermperaturbeständig bis 500 °C und werden aus Muscovite- oder Phlogopiteglimmer hergestellt. Durch Stanzen können einfach Formteile für die Spulenkörper hergestellt werden. Elek-

trokeramische Spulenkörper können durch Gießen oder Formpressen hergestellt werden, möglich ist auch eine drehtechnische Bearbeitung des Grünteils. Problematisch sind dünne Wandstärken aufgrund der Sprödigkeit des Materials [5]. Auch eine Kombination beider Werkstoffe für die Fertigung der Spulenkörper ist möglich [4].

4 Auswirkungen hoher Temperaturen auf den ML-Designprozesse

Für die Auslegung und Konstruktion von Hochtemperaturmagnetlagern ist, ausgehend von den geforderten Parametern der Lagerung wie bspw. der Tragkraft, die Temperaturabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften zu berücksichtigen. Dabei ist die Funktion des Lagers für Arbeitspunkte bei verschiedenen Temperaturen nachzuweisen, so bspw. bei Raum- und Maximaltemperatur.

Die Tragkraft eines Magnetlagers ist von der Flussdichte und der Eisenfläche abhängig. Gemäß Abb. 2 reduziert sich die Sättigungspolarisation über der Temperatur. Dementsprechend verringert sich auch die zur Auslegung des Magnetlagers zugrunde gelegte Flussdichte. Abb. 5 zeigt den Einfluss der Temperatur auf die Magnetisierung von Elektroblech M250 gemäß der Funktion nach Abb. 2.

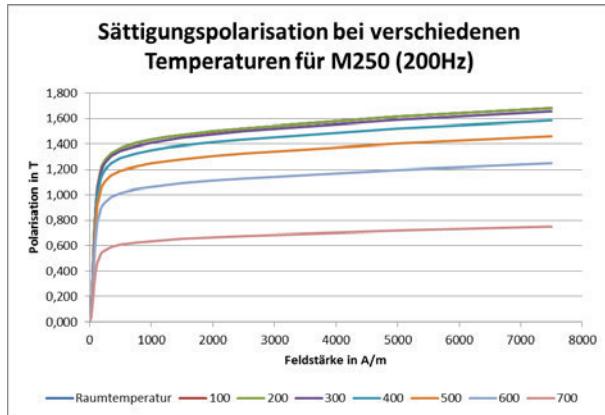


Abb. 5: Einfluss der Temperatur auf die Magnetisierung von Elektroblech M250

Die temperaturbedingte Verringerung der Flussdichte führt unter Beibehaltung der Tragkraft zwangsläufig zu einer Erhöhung der Eisenfläche und somit des Lagervolumens. Alternativ dazu ist die Verwendung von hochpermeablen Kobalt-Eisen-Legierungen.

Die Verwendung von o. a. Hochtemperaturdrähten oder Isolierungen führt ebenfalls zur

Erhöhung des Lagervolumens, da für erstere Spulenkörper verwendet werden und letztere den Kupferfüllfaktor deutlich herabsetzen. Das ist in der Konstruktion der Magnetkreise zu berücksichtigen und der erforderliche Platz dafür vorzusehen. Ebenso sind bei keramikisierten Wickeldrähten die geforderten minimalen Biegeradien vom 5- bis 7-fachen des Leiteraußendurchmessers einzuhalten. Abb. 6 zeigt ein Radialmagnetlager mit Keramikisolation und verdeutlicht deren Nachteile:

- Der Isolierstoff ist sehr spröde und wird bei mechanischen Beanspruchungen leicht beschädigt bzw. zerstört.
- Das Volumen der Isolation ist im Vergleich zu Isolationen im kleineren Temperaturbereich wesentlich größer.
- Die Isolation besitzt eine hohe Wärmeisolation.
- Die keramischen Werkstoffe sind meist hygrokopisch und damit ohne zusätzliche Maßnahmen nur in trockener Umgebung einsetzbar.



Abb. 6: Hochtemperatur-Radialmagnetlager mit Keramikisolation

Neben der Tragkraft als magnetischer Zug wirken in den Magnetlagern weitere Kräfte, die bei der Auslegung berücksichtigt werden müssen. So wirken Fügekräfte zwischen Bauteilen, Fliehkräfte infolge der Rotation der Welle und durch thermische Dehnung hervorgerufene Spannungen zwischen Bauteilen unterschiedlicher Temperaturen. Dementsprechend werden die temperaturabhängigen Werkstoffparameter, wie Temperaturausdehnungskoeffizienten, Elastizitätsmodul, Streckgrenzen oder Spannungs-Dehnungsverläufe für den Standsicherheitsnachweis für die ein-

gesetzten Materialien über den anvisierten Temperaturbereich benötigt. Abb. 7 zeigt beispielhaft den temperaturabhängigen Verlauf der Streckgrenzen verschiedener Stähle.

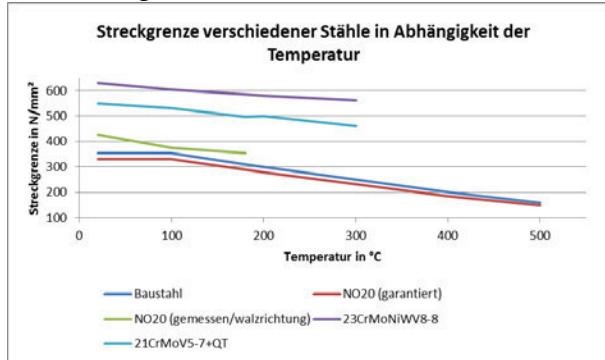


Abb. 7: Temperaturabhängige Streckgrenzen verschiedener Stähle

Für die Berücksichtigung der Auswirkungen der Temperaturabhängigkeit der Werkstoffparameter ist die zu erwartende radiale und axiale Temperaturverteilung innerhalb der Lagerkomponenten zu bestimmen. Diese ist neben der eingetragenen Prozesswärme von den Verlusten innerhalb der Lager, aber auch von konstruktiven Gegebenheiten der Maschine abhängig. So verringern freie Wellenabschnitte zwischen Prozessraum und Lager den Wärmeeintrag in die Lager erheblich.

Für die Anordnung der Sensor- und Lagerebenen innerhalb der Maschine als auch für die Lageregelung ist die Rotordynamik für den kalten und für den heißen Zustand zu ermitteln. Daneben ist die wärmebedingte Längenausdehnung des Rotors zu berücksichtigen.

In diesem Zusammenhang ist auch die Luftspaltänderung infolge der temperaturbedingten Wärmeausdehnung der Materialien zu beachten. So kann durch den Wärmeintrag in das Lager der Rotor eine gegenüber dem Stator verschiedene Wärmeausdehnung erfahren, so dass sich der Lagerluftspalt verkleinert. Das bedeutet, dass sich temperaturbedingt die Arbeitspunkte im Lager verändern. Dies muss bei der Reglerauslegung berücksichtigt werden.

Die sich in unmittelbarer Nähe zur Magnetlagerkonstruktion befindliche Sensorik zur Lagemesung des Rotors ist den gleichen Umgebungsbedingungen wie die Magnetlager ausgesetzt, daher sind o. g. Ausführungen auch für die Sensoren relevant.

Für den Einsatz von Magnetlagern unter aggressiven Medien, wie bspw. Flüssigkeiten, Gase oder Dämpfe, die herkömmliche Werk-

stoffe bei dauerhaftem Kontakt schädigen (z. B. Säuren oder auch Salzwasser), sind besondere Maßnahmen bezüglich der Trennung der elektrisch aktiven Teile zu treffen. Hierfür bietet sich die Verwendung eines Spaltrohres bspw. aus Hastelloy, einer hochkorrosionsbeständigen, paramagnetischen Nickel-Molybdän-Legierung mit einer relativen Permeabilität von max. 1,001 und einem spezifischen elektrischen Widerstand von ca. 125 $\mu\Omega\text{cm}$ an.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von aktiven Magnetlagern an Turbomaschinen in Kraftwerken führt zu erheblichen Wirkungsgradverbesserungen des Aggregates infolge des Wegfalls der Lagerreibung und der Ölschmierung und dem damit verbundenen anlagentechnischen Aufwand. Allerdings entfällt damit auch die Kühlung der Lagerstellen, so dass der anfallende Wärmestrom nicht mehr abgeführt wird. Dieser resultiert einerseits aus dem Lager selbst und andererseits aus dem Prozessraum und wird über die Welle zu den Lagerstellen geleitet. Der funktionsbedingte Luftspalt der Magnetlager wirkt zudem wie eine thermische Isolation. Die in den Lagern anfallende Wärme muss durch geeignete Kühlmaßnahmen abgeführt werden. Die Bereitstellung und Führung der Kühlmedien erfordert einen zusätzlichen technischen und energetischen Aufwand, der die erzielbaren Wirkungsgradverbesserungen beim Einsatz von Magnetlagern erheblich reduziert. Eine Alternative zur Lagerkühlung bietet der Einsatz von temperaturbeständigeren Werkstoffen für die Magnetlager.

Der Beitrag beschreibt die Auswirkungen hoher Einsatztemperaturen auf den Auslegungs- und Designprozess von Magnetlagern. Dabei werden die Auswirkungen hoher Temperaturen allgemein auf die elektrischen, magnetischen und mechanischen Eigenschaften, auf die elektrische Isolation, die thermische Ausdehnung und die chemischen Reaktionen betrachtet. Im Rahmen einer Internet- und Literaturrecherche wurde geprüft, ob die Magnetlagerkühlung für künftige Anwendungen durch den Einsatz anderer, temperaturbeständigerer Werkstoffe für die aktiven Magnetlager entfallen kann. Dazu wurden entsprechende Werkstoffe und Hersteller/Anbieter ermittelt. Dabei

zeigte sich, dass auf diese Weise nur sehr schwer Daten von Werkstoffen für hohe Temperaturen beschaffbar sind, so dass für die Auslegung von Hochtemperaturmagnetlagern Annahmen getroffen werden müssen. Ein weiterer Ausbau der Datenbasis ist somit unabdingbar.

Mit der Verwendung hochtemperaturstabiler Werkstoffe in Magnetlagern geht i. d. R. eine Vergrößerung des Lagervolumens bei gleichbleibender Tragkraft einher. Das liegt einerseits an der temperaturbedingten Verringerung der erreichbaren Flussdichten, andererseits am geringeren Kupferfüllfaktor infolge der mechanisch empfindlichen Hochtemperaturisolation und der daraus resultierenden Verwendung von Spulenkörpern. Mit dem Einsatz hochpermeabler Eisen-Kobalt-Legierungen kann einer Volumenvergrößerung entgegengewirkt werden.

Die Recherche ergab, dass sowohl Leiter- als auch Isolationswerkstoffe für den anvisierten Temperaturbereich von bis zu 500 °C verfügbar sind. Allerdings gibt es nur punktuell Aussagen zur Langzeitstabilität der elektrischen und magnetischen Eigenschaften sowie zur Korrosionsbeständigkeit und Alterungsvorgängen beim Hochtemperatur Einsatz.

Die vorgestellten Ergebnisse sind dahingehend auch als Diskussionsgrundlage zu verstehen und sollen den Erfahrungsaustausch forcieren.

[5] METOXIT AG: Konstruieren mit Keramik; Quelle:
<http://www.metoxit.com/deutsch/download/s/hinweise.pdf>

Quellen

- [1] Enders, K. in „Ein schwebender Rotor im 3.000 Megawatt-Kraftwerk“; Zitat aus <https://www.leag.de/de/blog/artikel/ein-schwebender-rotor-im-3000-megawatt-kraftwerk/>
- [2] Führer, A.; Heidemann, K.; Nerreter, W.: Grundgebiete der Elektrotechnik Band 1: Stationäre Vorgänge, Carl Hanser Verlag München Wien, 1990
- [3] Mierdel, G.: Elektrophysik, Verlag Technik Berlin, 1970
- [4] Burdet, L.: Active Magnetic Bearing Design and Characterization for High Temperature Applications, PhD-Thesis N° 3616 (2006), 06.09.2006

Eignung von Gleitlagern als Fanglager für schwere magnetgelagerte Rotoren bei erhöhten Temperaturen

Christian VANEK, Frank WORLITZ

Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik (IPM)

Hochschule Zittau/Görlitz

Email: C.Vanek@hszg.de, F.Worlitz@hszg.de

Kurzfassung

Der zunehmende Einsatz von Magnetlagern im industriellen Umfeld stellt immer höhere Anforderungen an die eingesetzten Komponenten bezüglich der Robustheit gegenüber extremen Umgebungsbedingungen. Extreme Umgebungsbedingungen sind hohe Temperaturen ($> 200^{\circ}\text{C}$) und/oder die Anwesenheit von aggressiven Medien. Neben der Ertüchtigung der Magnetlager muss auch die Fanglagerung unter diesen Umgebungsbedingungen zuverlässig funktionieren. Der Beitrag soll zeigen, welche Herausforderungen bestehen, eine solche Fanglagerung auszulegen. Weiterhin soll das geplante Gleitfanglagermodell und die Validierungsstrategie für dieses Modell vorgestellt werden.

Schmierung vermieden werden, da diese die Systemkomplexität erhöht und ein Sicherheitsrisiko auf Grund der Brandmasse darstellt. Es soll daher eine wartungsfreie Trockenschmierung zum Einsatz kommen. Für eine Fanglagerung für den Einsatz bei erhöhten Temperaturen werden folgende Anforderungen gestellt:

1. einfacher Aufbau
2. kostengünstig in Fertigung und Montage
3. möglichst wartungsfrei
4. geringe Alterung
5. verwendbar für mehr als einen Rotorabsturz

1.2 Stand von Wissenschaft und Technik

Für kleine und leichte Rotoren sind Gleitfanglager aus der Literatur bekannt, welche auch in kommerziell vertriebenen Maschinen eingesetzt werden. In [1] wird ein Schwungmassenspeicher vorgestellt, der mit Kohlenstoffgleitlagern ausgestattet ist. Fumagalli beschreibt in [2] einen Versuchsstand, an welchem verschiedene Gleitfanglager aus Kohlenstoff, Berylliumbronze, Bronze und Nylon getestet wurden. In [3] werden weitere Versuche mit Gleitfanglagern aus Sinterbronze, PTFE und Polyamid vorgestellt. Für schwere Rotoren (Masse $> 1\text{ t}$) werden fast ausnahmslos Wälzlager verwendet [4]. Gleitfanglager werden bisher nur von der Waukesha Bearings Corporation realisiert (Abb. 1). Das hier dargestellte Fanglager wird für Rotoren mit einer Masse von ca. $1,5\text{ t}$ bei Drehzahlen oberhalb der biegekritischen Drehzahl verwendet [5]. Die Umgebungstemperaturen bei dieser Anwendung sind $< 100^{\circ}\text{C}$. In [7] wird ein Gleitfanglager als Fanglager für ein magnetgelagertes Flugzeugtriebwerk vorgestellt. Das Lager

1 Einleitung

1.1 Anforderungen an das Gleitfanglager

Der Einsatz von Magnetlagern unter extremen Umgebungsbedingungen stellt besondere Anforderungen an die einzusetzenden Magnetlager. Extreme Umgebungsbedingungen sind hohe Temperaturen ($> 200^{\circ}\text{C}$) und/oder die Anwesenheit von aggressiven Medien. Neben der Ertüchtigung der Magnetlager muss auch die Fanglagerung unter diesen Umgebungsbedingungen zuverlässig funktionieren. Je einfacher die Fanglagerung aufgebaut ist, desto eher kann dieses Ziel erreicht werden. Gleitlager sind gegenüber Wälzlagern unempfindlicher gegen Schmutz und können mit einer Trockenschmierung versehen werden. Darüber hinaus können Gleitlager teilbar gestaltet werden, um die Montage zu vereinfachen. Bei Gleitlagern wird zur Schmierung Öl eingesetzt. Bei Fanglagern soll eine solche



Abb. 1: Radialgleitfanglager der Waukesha Bearings Corporation [6]

kann bei einer Temperatur bis ca. 540 °C eingesetzt werden. Das Fanglager besteht aus einer Graphitlegierung mit guten Schmiereigenschaften. Um einen aerostatischen Effekt in diesem Fanglager zu erzeugen, wird das Lager mit Druckluft beaufschlagt.

1.3 Einfluss der Temperatur auf das Fanglager

Steifigkeit

Fast alle mechanischen Eigenschaften der Fanglagerwerkstoffe sind temperaturabhängig. Bei Stahl nehmen Elastizitätsmodul, Schubmodul und Streckgrenze mit steigender Temperatur ab. Die Querkontraktionszahl bleibt bis ca. 600 °C konstant und der Wärmeausdehnungskoeffizient nimmt zu [8]. Diese mechanischen Eigenschaften haben Einfluss auf die Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften des Fanglagers. Die Reaktionskraft des Fanglagers auf den Rotor berechnet sich nach Gl. 1 [9]. Grundlage für die Berechnung ist die Kontakttheorie nach Hertz.

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot E^* \cdot L \cdot d \quad (1)$$

Dabei beschreibt L die Kontaktlänge und d die Eindrucktiefe. Der Kontaktelastizitätsmodul E^*

berechnet sich nach Gl. 2.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2} \quad (2)$$

mit der Poissonzahl v . Der Kontaktelastizitätsmodul ist ebenso temperaturabhängig (Abb. 2). Bei höheren Temperaturen kommt es daher zu

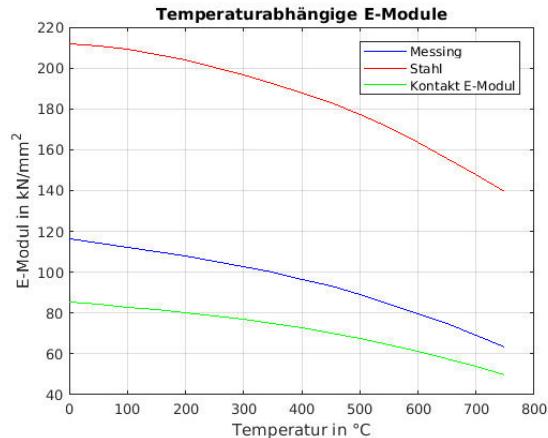


Abb. 2: Temperaturabhängige E-Module für Messing (blau), Stahl (rot) und der nach GL. 2 berechnete Kontakt E-Modul [9][8]

einem Absinken der Steifigkeit.

Dämpfung

Neben der Steifigkeit ist die Dämpfung des Lagers entscheidend für das Verhalten des Rotors im Absturzfall. Als Dämpfung wird der Energieverlust zwischen Be- und Entlastung des Lagers bezeichnet und allgemein als Dämpfungsarbeit angegeben. Die Dämpfung hängt von den eingesetzten Werkstoffen sowie der Art und der Höhe der Belastung ab. Je nach Art der Belastung muss ein Dämpfungsmodell gewählt werden, das mit verschiedenen Hilfsgrößen parametrisiert wird. Die Ermittlung der Hilfsgrößen gestaltet sich besonders bei komplexen Bauteilen, wie einem Fanglager, schwierig, da diese von der Verarbeitung der einzelnen Werkstoffe abhängig sind. Darauf hinaus ist auf Grund der Temperaturabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften auch die Dämpfung temperaturabhängig.

Reibwert

Der Reibwert zwischen Fanglager und Rotor hat entscheidenden Einfluss auf das Verhalten des Rotors im Absturzfall. Bei höheren Reibwerten

ist es eher möglich, dass der Rotor in den zerstörerischen Backward whirl gezwungen wird. Im Fall eines Backward whirl können Kräfte mit dem 300-fachen der Rotorgewichtskraft auftreten [10]. Eine Auslegung des Fanglagers und des Maschinengehäuses für derartige Belastungen ist sehr kostenintensiv.

Bei Temperaturerhöhung ist ebenso eine Erhöhung des Reibwertes zu erwarten [9], wie in Abb. 3 dargestellt. Für den Gleitreibungskoeffizienten ist

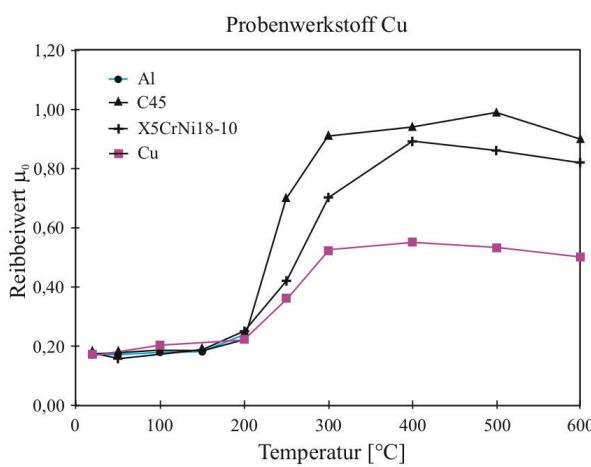


Abb. 3: Temperaturabhängigkeit des Reibwertes [9]

fizienten ist ein ähnlicher Verlauf zu erwarten. Darüber hinaus sind die Reibkoeffizienten von der Relativgeschwindigkeit, der Kontaktzeit und Verunreinigungen auf der Oberfläche abhängig. Um die dabei auftretenden Einzeleffekte und Wechselwirkungen zu untersuchen sowie Parameter für Simulationsrechnungen zu ermitteln, sind Experimente notwendig.

Verschleiß

Der Verschleiß bei trocken geschmierten Gleitlagern ist von der Belastung, der Temperatur, der Geschwindigkeit und den Reibpartnern abhängig. In der Regel wird der Wert für den Verschleiß in Abtrag je Laufweg angegeben. Für das Fanglager muss der Verschleiß so begrenzt werden, dass es bei einem kompletten Auslauf des Rotors in den Fanglagern zu keiner Beschädigung der Maschine kommt.

2 Fanglagermodell

2.1 Aufbau

Für Wälzfanglager sind aus der Literatur Modelle zur Simulation des Rotor-Fanglagerkontakte bekannt. Eine Übersicht dazu ist in [11] veröffentlicht.

Für Gleitfanglager sind diese Modelle nur bedingt einsetzbar. Abb. 4 zeigt einen Ansatz für eine Modellstruktur mit modularem Aufbau. Die einzelnen Module können ersetzt werden, um beispielsweise andere Reibmodelle zu verwenden. Bei allen Modulen muss die Änderung der

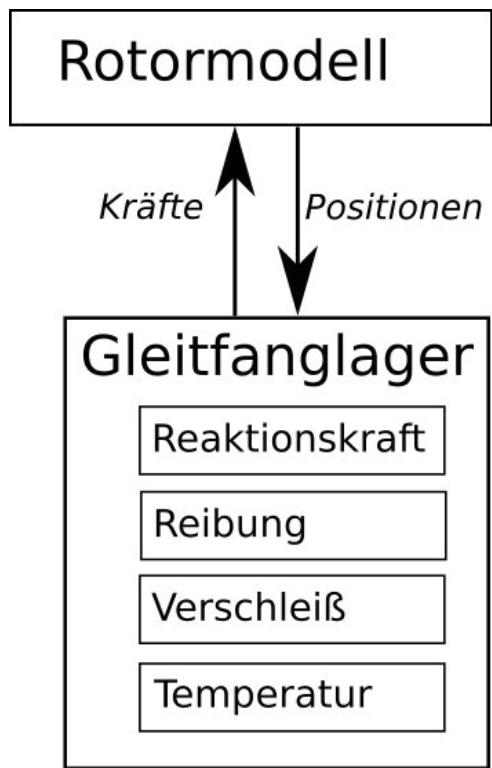


Abb. 4: Schema des geplanten Modells

Eigenschaften auf Grund der Temperatur berücksichtigt werden. Neben den im Abschnitt 1.3 genannten Eigenschaften müssen auch Änderung der Geometrie, wie Luftspalte oder Längen, berücksichtigt werden. Für den Rotor soll daher ein numerisches Modell verwendet werden, was sich derzeit in der Entwicklung befindet. Mit Hilfe des Modells soll es möglich sein, die Auslegung von Gleitfanglagern für magnetgelagerte Maschinen zu unterstützen. Die Modellvalidierung erfolgt am Magnet- und Fanglagerversuchstand (MFLP).

2.2 Parametrierung

Die Parametrierung der einzelnen Bestandteile des Fanglagermodells sollte nach Möglichkeit durch Berechnung der Parameter aus den Eigenschaften der Bauteile erfolgen. Sofern diese Parameter und Werte in der Literatur verfügbar sind, können diese direkt übernommen werden. Für die Temperaturabhängigkeit von Dämpfung, Verschleiß und Reibwert müssen eigene Experimente durchgeführt werden. Reibwert und Verschleiß können an einem Reibversuchsstand ermittelt werden. Dazu werden zwei Proben (Wellenmaterial und Fanglagermaterial) mit der zu erwartenden Flächenpressung aneinander gedrückt und gegeneinander bewegt. Ziel ist es, die Reib- und Verschleißwerte für einen Versuch, der in den wesentlichen Parametern dem Rotorabsturz entspricht, zu ermitteln. Für Untersuchungen der Temperaturabhängigkeit der Dämpfung ist ein Kugelversuchsstand geplant. Dieser Versuchsstand besteht aus einer beheizbaren Prallplatte, auf welche aus einer definierten Höhe eine Kugel fallen gelassen wird. Über eine Highspeedkamera wird der Rückprallweg der Kugel ermittelt. Somit kann die Steifigkeit und die Dämpfung berechnet werden. Durch Experimente bei verschiedenen Temperaturen werden so prinzipielle Erkenntnisse zur Temperaturabhängigkeit von Steifigkeit und Dämpfung gewonnen.

3 Modellvalidierung

3.1 Versuchsstand MFLP

Der MFLP wurde in einem zurückliegenden EFRE-Projekt im Zittauer Kraftwerkslabor aufgebaut (Abb. 5) [12]. Der Versuchsstand ermöglicht die Validierung des Gleitfanglagermodells bei verschiedenen Temperaturen sowie der Anwesenheit verschiedener Medien, wie zum Beispiel Dampf.

3.2 Radialgleitfanglager

Aufbau

Um das Fanglagermodell zu validieren, wird ein neues, modular aufgebautes Radialgleitfanglager gefertigt (Abb. 6). Die Hauptkomponenten sind das Gehäuse und die Gleitfanglagerhülse. Das



Abb. 5: Versuchsstand MFLP

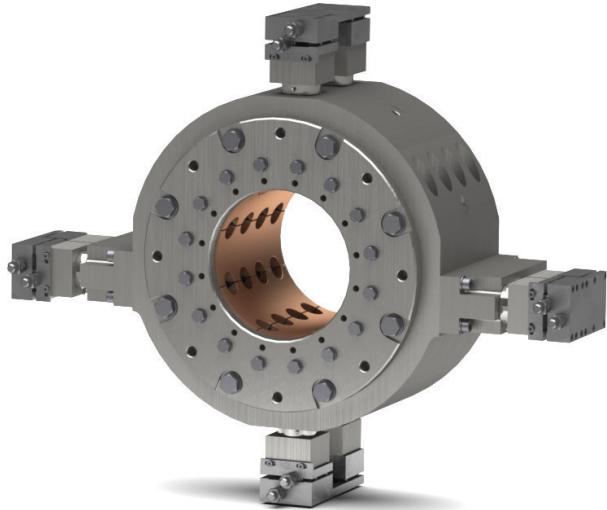


Abb. 6: geplantes Radialgleitfanglager

Gehäuse des Lagers ist fest mit dem Druckbehälter des Versuchsstandes verbunden. Die Ausrichtung erfolgt über einstellbare Keilschieber. Zwischen den Keilschiebern und dem Gehäuse werden Kraftsensoren installiert, um die Belastungen während des Abwurfs messen zu können. Je Achse sind vier Sensoren der Firma Kistler vom Typ 9061A vorgesehen. In das Gehäuse wird die Gleitfanglagerhülse eingeschoben, in welche Gleitpads montiert werden. Zum Test verschiedener Konfigurationen von Reibpartnern können die Gleitpads aus unterschiedlichen Materialien bestehen. Für die Inbetriebnahme sind Gleitpads aus Lagerbronze vorgesehen, welche mit einem Gleitlack überzogen sind. Der Gleitlack dient als Trockenschmierstoff. Für den Einsatz bei höheren Temperaturen eignet sich diese beschichtete Bronze nicht, da der vorgesehene Gleitlack nur bis ca. 140 °C stabil ist. Die Verwendung von anderen Gleitlackwerkstoffen

muss daher geprüft werden. Neben Bronze kommen Kohlenstoff oder Keramikgleitpads infrage. Beide Werkstoffe sind bis über 500 °C einsetzbar. Kohlenstoff und Keramik sind spröde Werkstoffe. Es besteht daher beim Einschlag des Rotors ins Fanglager die Gefahr der Beschädigung der Gleitpads. Besonders Gleitlager aus Keramik neigen beim Trockenlauf dazu, die Welle zu beschädigen. Dieses geschieht durch die Aufrauung der Keramikoberfläche, welche dann wie ein Schleifmittel wirkt. Sinnvoll könnte auch eine Kombination von unterschiedlichen Gleitpadmaterialien sein. Sinterbronze vereint die Eigenschaften von Bronze und Kohlenstoff in einem Werkstoff. Fanglager aus diesem Material haben schon in Versuchen mit einem Kleinversuchstand gute Ergebnisse erzielt [3].

Instrumentierung

Für die Experimente werden folgende Messwerte aufgezeichnet:

1. Temperatur
2. Position
3. Drehzahl
4. Kraft
5. Beschleunigung

Die Temperatur wird nahe der Oberfläche der Gleitpads mit Hilfe von Thermoelementen bestimmt. Die Gleitpads im unteren Teil des Lagers werden mit mehr Temperaturmessstellen ausgestattet, da hier die größten Belastungen und damit der größten Wärmeeinträge zu erwarten sind. Für die Messung der Rotorposition werden die dem Magnetlager inhärenten Abstandssensoren verwendet. Damit können die Positionsdaten zur Modellvalidierung und zur Zustandsdiagnose der Lager [11] genutzt werden.

Um zusätzliche Informationen zur Modellvalidierung zu gewinnen, ist eine Positionsmessung direkt am Fanglager geplant. Die Drehzahl des Rotors wird über eine Zahnscheibe gemessen und auch für die Drehzahlreglung des Motors verwendet. Im Abschnitt Aufbau wurden bereits die geplanten Sensoren vom Typ Kistler 9061A erwähnt. Abb. 6 zeigt die Einbauposition der Sensoren zwischen Gehäuse und Keilschieber. Es handelt sich um piezoelektrische Kraftaufnehmer mit einer maximalen Belastung von 200 kN.

Um Zug- und Druckkräfte messen zu können sind die Sensoren vorgespannt. Die Rotorbeschleunigung kann über zweimalige Differenzierung der Positionssignale berechnet werden. Die Auswertung der stark verrauschten Signale ist dabei eine besondere Herausforderung. Die Beschleunigung des Fanglagergehäuses wird über Beschleunigungssensoren in den drei Hauptachsen gemessen.

Validierungstrategie

Auf Grund der Komplexität des Fanglagermodells ist eine mehrstufige Validierung sinnvoll [13]. Die einzelnen Bestandteile des Modells sollten nach Möglichkeit separat getestet werden. Für das Rotormodell kann dies durch Vergleichsrechnungen mit anderen Rotordynamik- oder FEM-Programmen erfolgen. Die Reaktionskraft kann experimentell durch Abschalten der Magnetlager aus der Mittellage erfolgen. Das Rotorverhalten ist dann nur von der Steifigkeit und Dämpfung des Lagers abhängig. Das Reibmodell kann durch ein Abrollen des Rotors im Fanglager getestet werden. Dazu wird der Rotor an die linke oder rechte Randlage in den Magnetlagern positioniert und die Magnetlager abgeschaltet. Die Gesamtwirkungsweise des Modells kann nur durch Experimente mit komplexen Rotorabstürzen validiert werden.

4 Zusammenfassung

Um die Vorteile von Gleitlagern als Fanglager nutzen zu können, muss deren Zuverlässigkeit für schwere Rotoren und beim Einsatz bei hohen Temperaturen nachgewiesen werden. Dies erfolgt durch theoretische und experimentelle Untersuchungen. Für die theoretischen Untersuchungen wird dazu ein modular aufgebautes Modell erstellt. Die experimentellen Untersuchungen erfolgen zur Ermittlung von Einzeleffekten an Kleinversuchsständen und für die Validierung des Modells am MFLP.

Quellenverzeichnis

- [1] P.-K., Budig: Betrachtungen zur Theorie und Anwendung magnetischer Lager. In:

8. Workshop Magnetlagertechnik Zittau-Chemnitz. 5. Sep. 2011
- [2] Fumagalli, M.: *Modelling and Measurement Analysis of the Contact Interaction between a High Speed Rotor and its Stator*. Diss. SWISS INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH, 1997
- [3] Vanek, C. ; Hecht, N. ; Worlitz, F. ; Janse van Rensburg, J. ; van Schoor, G.: Validierung eines Gleitfanglagermodells durch Abwurfversuche. In: 9. Workshop Magnetlagertechnik Zittau-Chemnitz. 2013
- [4] Schaeffler Technologies GmbH & Co KG: *FAG Active Magnetic Bearing*. 20. Dez. 2016. URL: http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/brochure/downloads_1/pmb_de_de.pdf
- [5] Collins, T. ; Masala, A. ; Schultz, R. ; Guo, Z.: Numerical and Experimental Results of Auxiliary Bearings Testing on a High Speed Test Rig. In: *Proceedings of 14th International Symposium on magnetic bearing*. 2014
- [6] Waukesha Bearings Corporation: *Auxiliary Bearings*. Hrsg. von Corporation, Waukesha Bearings. 27. Juli 2017. URL: <http://www.waukbearing.com/images/gallery/thumbs/en-after49-1.jpg?ts=1355199125>
- [7] Jansen, M. ; Montague, G. ; Provenza, A. ; Palazzolo, A.: *High Speed, High Temperature, Fault Tolerant Operation of a Combination Magnetic-Hydrostatic Bearing Rotor Support System for Turbomachinery*. Techn. Ber. ARL-TR-3156. NASA, März 2004
- [8] Biermann, Markus ; Blanke, Walter ; Dammermann, Wilhelm ; German, Sigmar ; Gorski, Walter: *Thermophysikalische Stoffgrößen*. Springer, 29. Nov. 1988. 400 S. ISBN: 3540184953. URL: http://www.ebook.de/de/product/17970737/markus_biermann_walter_blanke_wilhelm_dammermann_sigmar_german_walter_gorski_thermophysikalische_stoffgroessen.html
- [9] Popov, V.: *Kontaktmechanik und Reibung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ISBN: 978-3-540-88836-9. DOI: [10.1007/978-3-540-88837-6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88837-6)
- [10] Helfert, M.: *Rotorabstürze in Wälzlagern*. Fachbereich Maschinenbau der Technischen Universität Darmstadt, 2009
- [11] Janse van Rensburg, J. J.: *Delevitation modelling of an active magnetic bearing supported rotor*. Diss. Potchefstroom campus of the North-West University, 4. Dez. 2013
- [12] Duesterhaupt, S. ; Neumann, H. ; Panescu, C. ; Rottenbach, T. ; Worlitz, F.: Test Field for Magnetic Bearing Applications under Extreme Conditions. In: *14th International Symposium on Magnetic Bearings*. 2014
- [13] Renwanz, W. ; Liebich, R. ; Fehres, F.: Validierung und Parameteranpassung von Fanglager-Simulationsmodellen. In: *Proceedings of SIRM 2013*. 25. Feb. 2013

Entwicklung und Bau eines neuartigen magnetischen Momentenlagers

Holger NEUMANN*, Klaus PANTKE**, Jürgen FRANTZHELD***,
Frank WORLITZ*

* *Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik
Hochschule Zittau/Görlitz
Email: H.Neumann@hszg.de, F.Worlitz@hszg.de*

** *thyssenkrupp Rothe Erde GmbH
Email: Klaus.Pantke@thyssenkrupp.com*

*** *thyssenkrupp Transrapid GmbH
Email: Juergen.Frantzheld@thyssenkrupp.com*

Kurzfassung

In der Regel wird die vollständig aktive Magnetlagerung eines Rotors durch zwei Radial- und ein Axialmagnetlager realisiert. Für Anwendungen, bei denen die axiale Ausdehnung des Rotors zur Unterbringung eines zweiten Radiallagers nicht ausreicht, sind alternative Lösungsansätze notwendig. Nachfolgend wird die Auslegung, Simulation und experimentelle Validierung am Beispiel eines Demonstrators in Außenläuferbauweise vorgestellt. Außerdem werden der Bau und die Inbetriebnahme eines Prototyps zur Lagerung eines Computertomographen vorgestellt.

1 Einleitung

Das Ziel eines gemeinsamen Vorhabens zwischen dem IPM und der thyssenkrupp Rothe Erde GmbH war es, ein neuartiges magnetisches Momentenlager als Alternative für Großwälzlager (Durchmesser ca. 1 m) zu entwickeln. Eine typische Anwendung eines solchen magnetischen Momentenlagers ist z. B. in medizinischen Computertomographen (CT). Durch so ein berührungsloses Magnetlager ist ein verschleißfreier und geräuschloser Betrieb eines CT-Systems möglich, dies kann einen erheblichen Wettbewerbsvorteil für die Hersteller von CT-Systemen darstellen. Neben der Geräuschreduzierung ist ein weiteres Ziel, eine Steigerung der Drehzahlen von $n = 150 \text{ min}^{-1}$ auf $n = 300 \text{ min}^{-1}$ zu ermöglichen. Die Entwicklung und der Bau eines solchen Lagers ist jedoch mit einem erheblichen Kostenaufwand verbunden. Es ist daher sinnvoll, möglichst viele Fragestellungen im Vorfeld durch Simulationsmodelle abzudecken. Die Validierung dieser Modelle kann anschließend an Modellprüfständen erfolgen, bevor ein Lager in originaler Größe gebaut wird. Im Rahmen dieses Projektes wurde das Regelungssystem für ein großes Momentenlager am IPM entwickelt und auf Basis eines Kleinversuchsstandes (ZML320) validiert. Anschließend erfolgte bei der thyssenkrupp Rothe Erde GmbH der Bau eines großen Magnetlagers, welches mit dem zuvor am IPM entwickelten Regelungsmodell in Betrieb genommen wurde. In diesem Beitrag werden die Arbeiten am IPM zur Regelungsentwicklung sowie der Aufbau des großen Versuchslagers bei der thyssenkrupp Rothen Erde GmbH vorgestellt.

2 Kleinversuchsstand ZML320

2.1 Aufbau

In Abb. 1 ist der Aufbau des vollständig aktiv magnetgelagerten Außenläufers dargestellt. Der Rotor besteht aus einem radialen und zwei axialen Rückschlüssen. Die radiale Lagerung

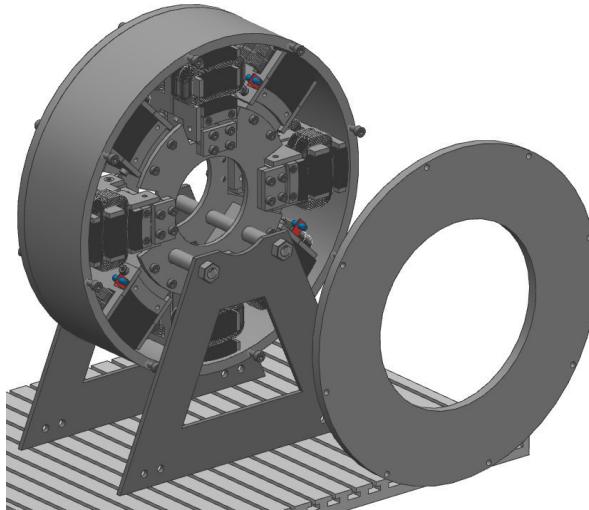


Abb. 1: Vollständig aktiv magnetlagerter Außenläufer

erfolgt durch vier Radialmagnete, wobei die zwei gegenüberliegenden Magnete differentiell verschaltet sind und damit zwei Lagerachsen gebildet werden. Diese sind jeweils um 45° gegenüber der Wirkrichtung der Gewichtskraft gedreht angeordnet. Zur axialen Stabilisierung dienen acht Axialmagnete, die zu vier Lagerachsen differentiell verschaltet sind. Sowohl die axialen als auch die radiaalen Lagerachsen werden mit separater Grunderregung von 3 A und Steuerströmen von ± 3 A betrieben.

Die Herausforderung bei dieser Lageranordnung besteht darin, dass sowohl axiale als auch radiale Auslenkungen nicht in Richtung der Lagerachsen gemessen werden können, da die Abstandssensoren aus Platzgründen im Freiraum zwischen den Magneten untergebracht sind (Abb. 2).

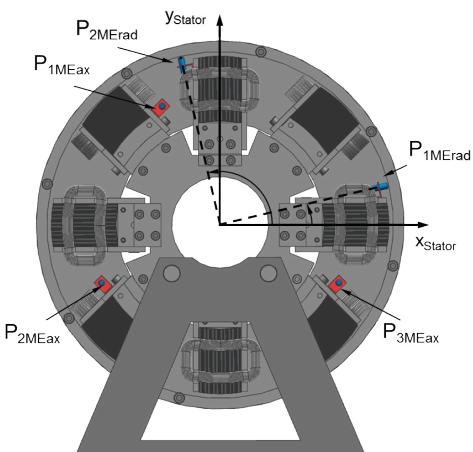


Abb. 2: Einbauposition der Lagesensoren

Tab. 1: Ausgewählte Versuchsstandsparameter

Parameter

Rotormasse	16,6 kg
Rotordurchmesser	320 mm
Nenndrehzahl	350 min^{-1}
Tragkraft, axial	4x470 N
Nennluftspalt, axial	300 μm
Tragkraft, radial	2x590 N
Nennluftspalt, radial	300 μm

Es werden drei Sensoren zur Bestimmung der axialen Position und der Kippung des Rotors verwendet. Die radiale Position wird mit zwei Sensoren erfasst. Die fünf Sensorsignale bilden die Eingangsgrößen für einen Transformationsalgorithmus, mit dem die Lage des Rotors und die sich ergebenden Luftspalte an den einzelnen Magneten berechnet werden. Diese stellen die Eingangsgröße für die Lageregelung dar. In Tab. 1 sind ausgewählte Parameter des Kleinversuchsstands zusammengestellt.

2.2 Messsystemauswertung und Reglerstruktur

Abb. 3 zeigt das Regelkonzept am Kleinversuchsstand ZML320. Die Achsen u und v bezeich-

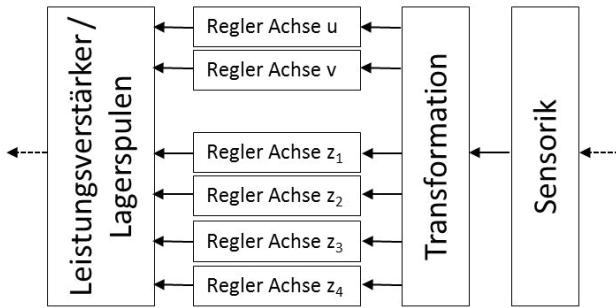


Abb. 3: Regelkonzept

nen die beiden radialen Lagerachsen und z_1 bis z_4 die axialen Lagerachsen.

Wie aus Abb. 2 und 3 zu entnehmen ist, müssen die Messwerte der Lagesensoren durch eine geeignete Transformation in Auslenkungen an den Lagerachsen transformiert werden. Aufgrund von konstruktiven Gegebenheiten (Fanglagerbegrenzung) sind die maximalen Verkipplungen des Rotors auf ca. $0,1^\circ$ begrenzt. Aus diesem Grund kann die Auswertung der Messsignale axial und radial entkoppelt betrachtet werden. In Abb. 4 ist die Vorgehensweise bei der Auswertung der radialen Lage dargestellt. Die Achsen u und v stellen die

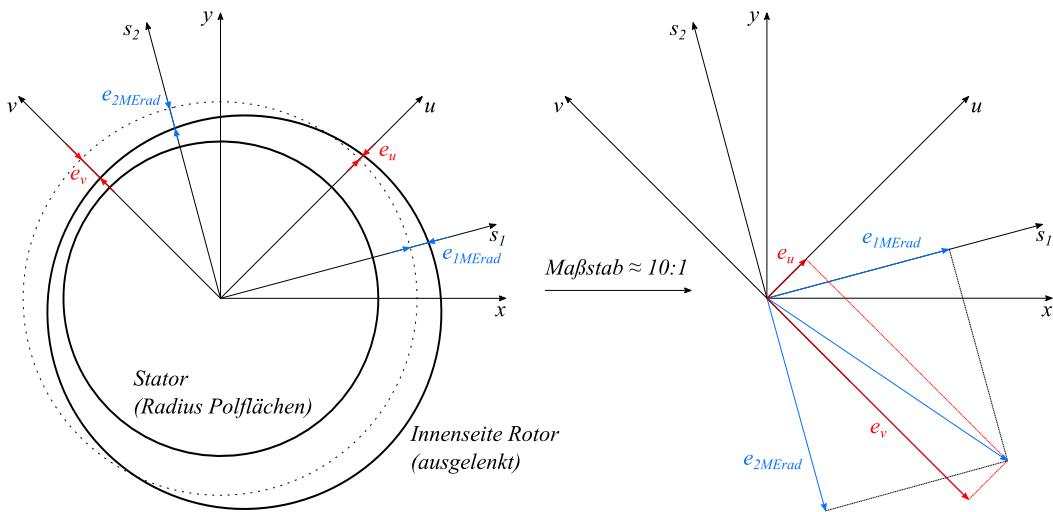


Abb. 4: Transformation radial

radialen Lagerachsen dar, während die Achsen s_1 und s_2 die Messrichtungen der Sensoren kennzeichnen.

Für die Transformation wird von einem idealen Rundlauf der Messspur ausgegangen. Im ersten Schritt werden die Regelabweichungen in Sensorrichtung (e_{1MErad} bzw e_{2MErad}) gebildet und anschließend mit Hilfe einer Drehmatrix in die Auslenkungen (e_u, e_v) in den radialen Lagerachsen transformiert:

$$\begin{pmatrix} e_u \\ e_v \end{pmatrix} = D \times \begin{pmatrix} e_{1MErad} \\ e_{2MErad} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Ausgangspunkt für die Transformation der axialen Auslenkungen ist die Annahme, dass die Innenseiten der axialen Rückschlüsse ideal ebene Messflächen bilden. Bei bekannter Einbauposition der Axialsensoren bezüglich des Statorkoordinatensystems (x_{Stator}, y_{Stator}) kann aus den gemessenen Abständen an den drei Axialsensoren (P_{1MEax} bis P_{3MEax} in Abb. 2) auf die Ebenenlage der Messfläche geschlossen werden. Abb. 5 zeigt das Prinzip der Lageberechnung. Dabei sind \vec{r}_1 und \vec{r}_2 die Richtungsvektoren, welche die Ebenenlage

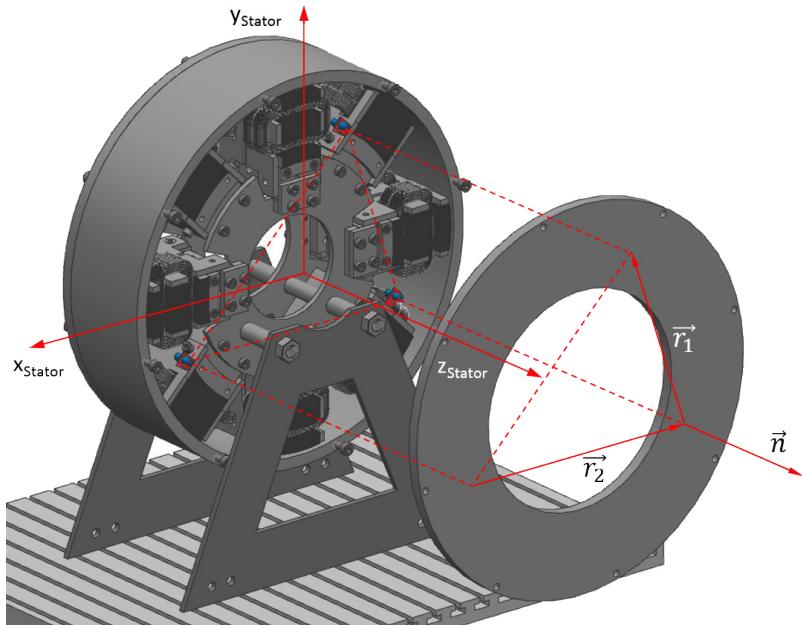


Abb. 5: Transformation axial

ge bezüglich des Statorkoordinatensystems beschreiben. Diese werden wie folgt berechnet:

$$\vec{r}_1 = \vec{P}_{2MEax} - \vec{P}_{1MEax} \quad (2)$$

$$\vec{r}_2 = \vec{P}_{3MEax} - \vec{P}_{2MEax} \quad (3)$$

Die Vektoren \vec{P}_{1MEax} bis \vec{P}_{3MEax} setzen sich dabei aus der x - y -Einbauposition der Sensoren und den gemessenen Abständen zusammen. Anschließend folgt die Berechnung des Normalenvektors \vec{n} und des Ebenenparameters λ :

$$\vec{n} = \vec{r}_1 \times \vec{r}_2 \quad (4)$$

$$\lambda = \vec{P}_{1MEax} \circ \vec{n} \quad (5)$$

Aus \vec{n} und λ können nun bei bekannter Einbauposition der Axialmagnete die entsprechenden Auslenkungen an diesen berechnet werden:

$$z_{k,SEax} = \frac{\lambda - n_x \cdot x_{k,SEax} + n_y \cdot y_{k,SEax}}{n_z} \quad (6)$$

mit $k = 1 \dots 4$

Die Auslenkungen e_u , e_v und $z_{k,SEax}$ bilden die Eingangsgrößen für sechs PID-Regler.

2.3 Inbetriebnahme des Kleinversuchsstandes und Modellvalidierung

Im Rahmen der Inbetriebnahme des Kleinversuchsstandes wurde die Ebenheit der Axialrückschlüsse und der Rundlauf des Radialrückschlusses mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine vermessen. Parallel dazu wurden Ebenheit und Rundlauf auch mit einem Wirbelstromsensor gemessen. Während es bei der Ebenheitsmessung keine Unterschiede zwischen Wirbelstromsensor und 3D-Koordinaten-Messmaschine gab, traten bei der Vermessung des Rundlaufes erhebliche Abweichungen auf. In Abb. 6 sind die Ergebnisse der Rundlaufvermessung dargestellt. Mit der 3D-Koordinaten-Messmaschine wurden sechs in axialer Richtung gleich-

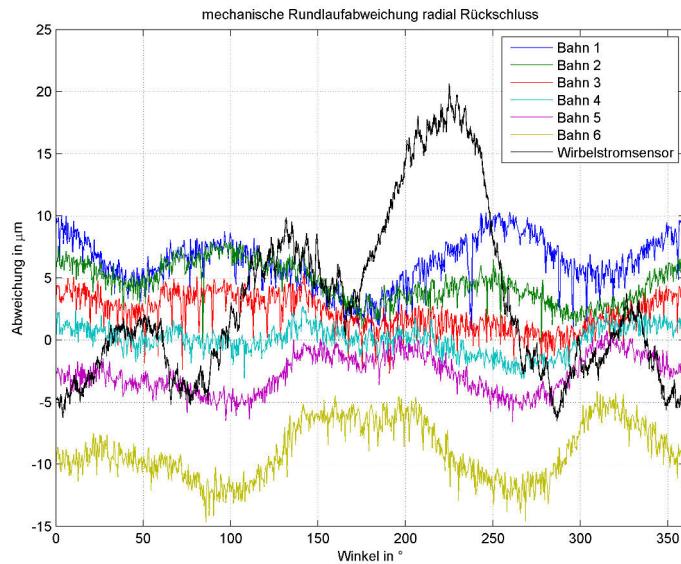


Abb. 6: Gemessene Rundlaufabweichung am radialen Rückschluss

verteilte Bahnen am inneren Umfang des radialen Rückschlusses gemessen. Die mit dem Wirbelstromsensor vermessene Bahn entspricht der Messspur während des Betriebes und befand sich dabei zwischen Bahn 3 und 4. Es ist zu erkennen, dass mit dem Wirbelstromsensor deutlich größere Abweichungen gemessen werden, als mechanisch tatsächlich vorhanden sind. Die Ursache für die größeren gemessenen Abweichungen sind punktuell unterschiedliche elektrische Eigenschaften der Messfläche. Diese können zum Beispiel von der Art der Bearbeitung der Oberfläche abhängen [1, 2].

Die gemessenen Abweichungen wurden in die Simulation integriert. Abb. 7 zeigt die an den Sensoren messbare Rundlaufabweichung und die durch sie verursachten Messfehler in den radialen Lagerachsen (u , v). Für die Berechnung der vom Luftspalt abhängigen Kräfte an den Magneten wurden im Simulationsmodell die mechanisch gemessenen Abweichungen zu

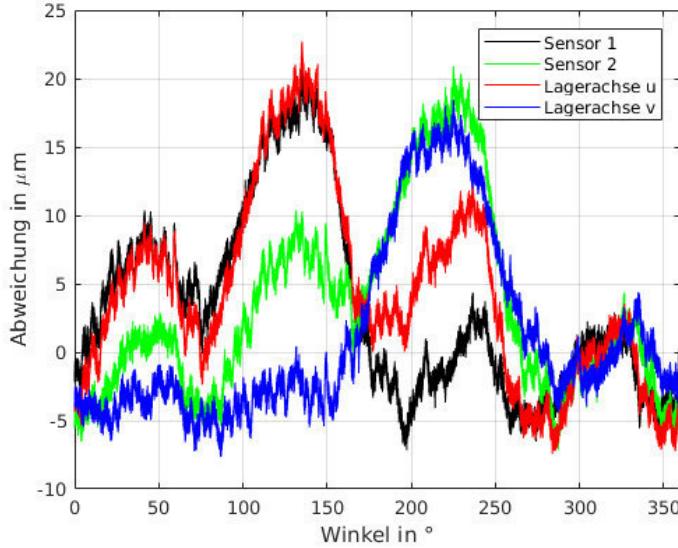


Abb. 7: Rundlaufabweichung transformiert in die radialen Lagerachsen

Grunde gelegt. Den Sensorsignalen werden in der Simulation die mit dem Wirbelstromsensor gemessenen Abweichung überlagert.

Abb. 8 zeigt die simulierten und die am Versuchsstand gemessenen Auslenkungen an den radialen Sensoren bei einer Drehzahl von 300 min^{-1} . In beiden Signalverläufen ist der Einfluss

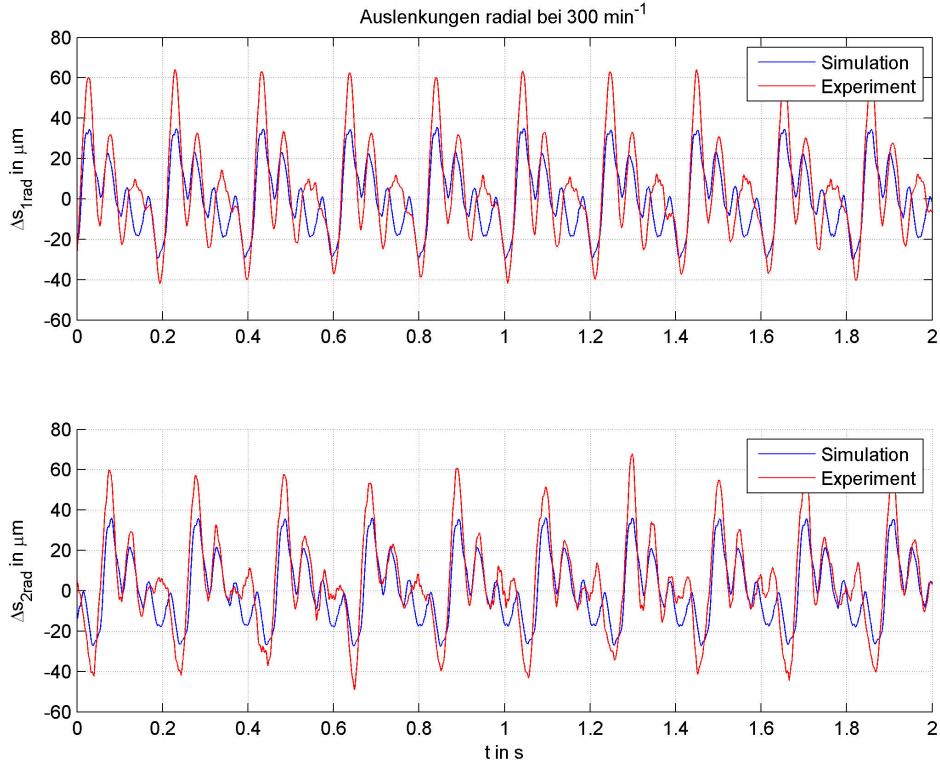


Abb. 8: Auslenkungen radial an den Sensoren bei einer Drehzahl von 300 min^{-1}

der Rundlaufabweichung zu erkennen (vgl. Abb. 6). Die so verfälschten Signale gehen durch die Transformation (Gleichung 1/Abb. 7) als Regelabweichung in die Bildung der Reglerstellgrößen (Sollströme) ein. Diese sind in Abb. 9 dargestellt.

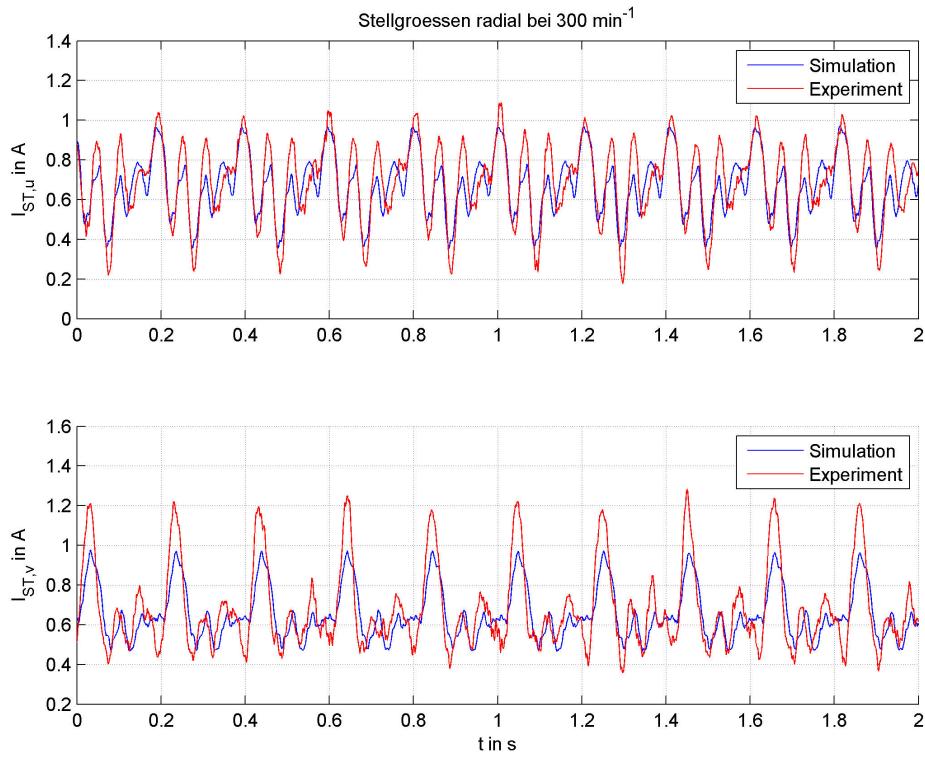


Abb. 9: Stellgrößen radial bei einer Drehzahl von 300 min^{-1}

In Abb. 10 sind die Signalverläufe an den axialen Sensoren dargestellt. Die Auslenkungen

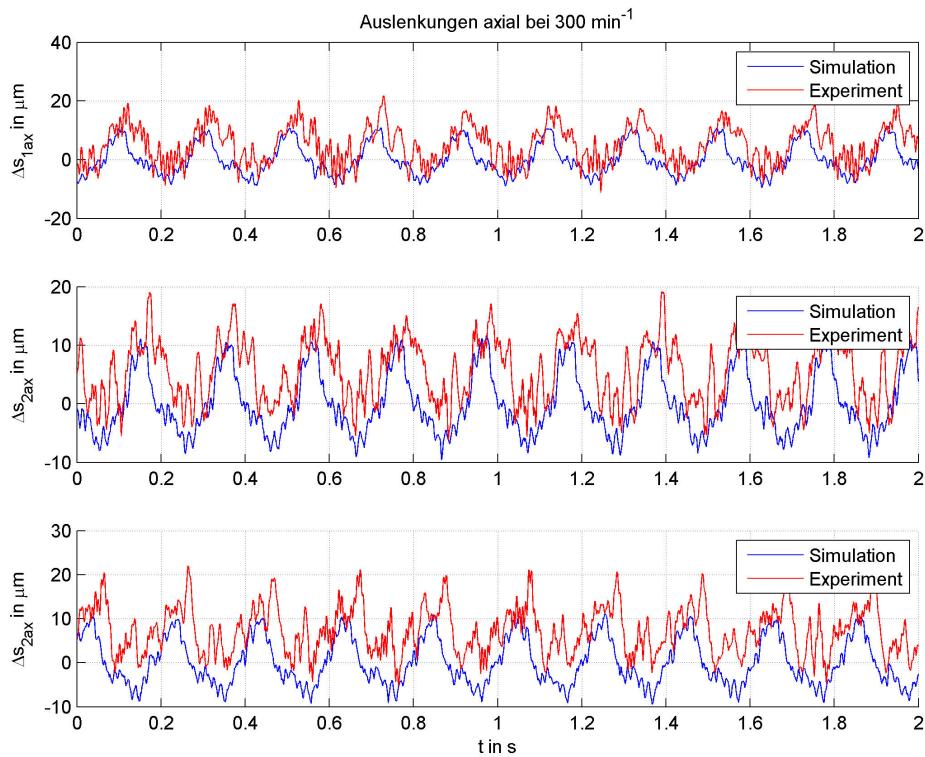


Abb. 10: Auslenkungen axial an den Sensoren bei einer Drehzahl von 300 min^{-1}

sind auf die Ebenheitsabweichung der Messfläche des axialen Rückschlusses zurückzuführen. Abb. 11 zeigt die zugehörigen Stellgrößen in den vier Lagerachsen.

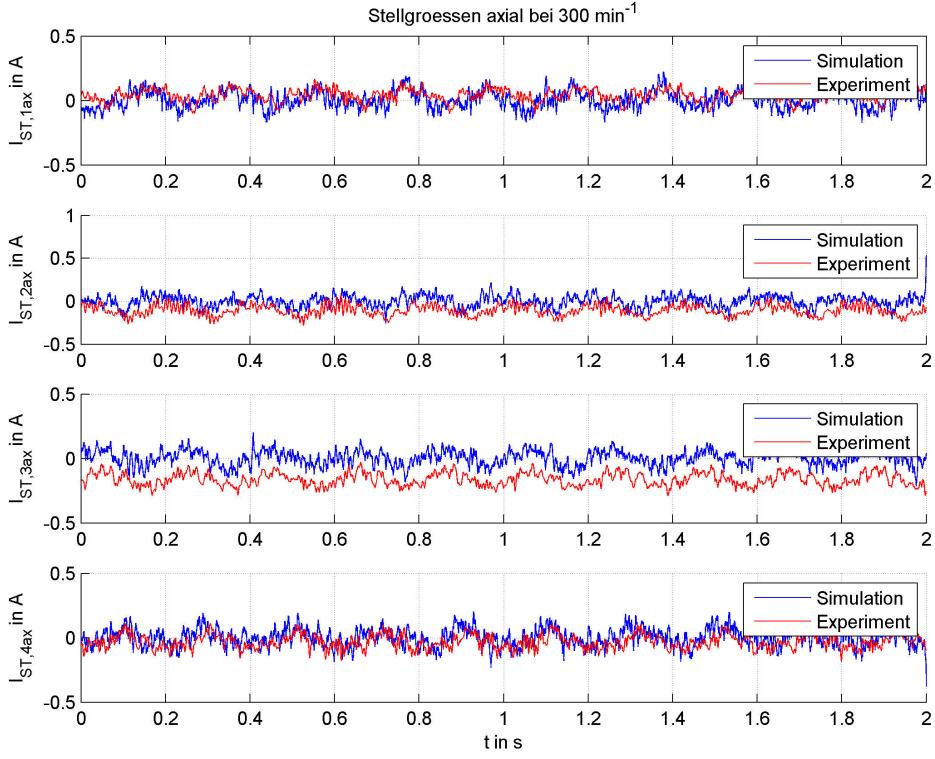


Abb. 11: Stellgrößen axial bei einer Drehzahl von 300 min^{-1}

Auffällig ist hier der Offset der Stellgröße ($I_{ST,3ax}$) in der Lagerachse drei. Dieser liegt darin begründet, dass die Magnete in dieser Lagerachse bedingt durch die Montage einen minimalen axialen Versatz zu den drei anderen Magneten aufweisen. Hierdurch ergeben sich in der Solllage an dieser Lagerachse an beiden Magneten unterschiedliche Luftspalte, welche durch den Betrieb mit Grunderregung zu einer permanenten Störkraft führen würden. Durch die Regelung des Steuerstromes wird dieser Effekt ausgeglichen, woraus sich der genannte Offset in dieser Lagerachse ergibt.

3 Bau und Inbetriebnahme des Prototyps

3.1 Aufbau

Der Prototyp hat einen Durchmesser von ca. 1,0 m und besteht aus einem Rotor und einem Stator. Das Lager wurde aus einzelnen Ringen gefertigt. Abb. 12 gibt einen Überblick über die einzelnen Komponenten des Prototyps. Der Innendurchmesser des Prototyps beträgt 998 mm. Die geplante Nutzlast des Rotors beträgt 750 kg. Der Antrieb erfolgt über einen Riemenantrieb, welcher bei CT-Systemen üblich ist.

Der Rotor des Prototyps besteht aus mehreren Einzelringkomponenten (siehe Abb. 13). Dies ist dadurch begründet, dass im Rotor gleichzeitig ein Fanglager in Form von Bronzegleitringen integriert wurde. Diese Bronzegleitringe können bei Stromausfall kurzfristig den Rotor mit der Nutzlast abfangen und ein sicheres Abbremsen gewährleisten. Gleichzeitig wird durch diese Bronzeelemente eine Flusstrennung des magnetischen Flusses zwischen Axialspulen und Radialspulen erzielt (siehe Beschreibung des Stators, weiter unten). Alle Einzelkomponenten werden untereinander verschraubt. Bei der Konzipierung



Abb. 12: Aufbau des Prototypenlagers bei thyssenkrupp Rothe Erde GmbH

der Gewindebohrungen wurde der magnetische Fluss berücksichtigt, so dass ein magnetischer Kurzschluss über die Schrauben ausgeschlossen ist. Der Rotor verfügt axial und radial über eine Rillung zur Reduzierung möglicher Wirbelströme. Eine Blechung erfolgte aus konstruktiven Gründen nicht. Die Eigenmasse des Rotors beträgt ca. 250 kg. Am Rotor sind Bohrungen zum Anbringen der Nutzlast eingebracht worden.

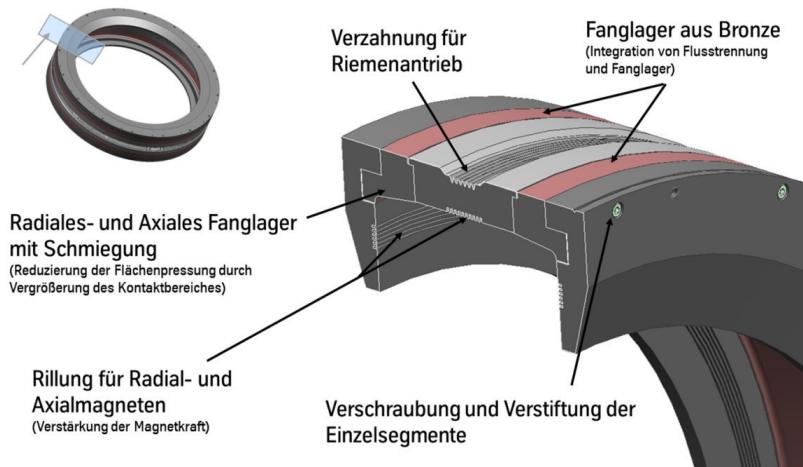


Abb. 13: Aufbau des Rotors des Prototyps

In Abb. 14 ist der Stator dargestellt. Der Stator besteht aus einem zentralen Ring (Statorring), an welchem die einzelnen Magnetspulen montiert werden. Es werden 16 sich gegenüberliegende Spulenpaare als Axiallager eingesetzt. Das Radiallager besteht aus 16 Radialspulen in der Mitte des Statorringes. Sowohl die Axialspulen als auch die Radialspulen werden mit einem Polkern verschraubt. Dieser Polkern ist ringförmig ausgebildet. Der Polschuhring für die Radialspulen ist in vier 90° Segmente geteilt, um ein Montieren dieses Polkernringes sicherzustellen. Der Statorring ist so gefertigt, dass er über spezielle Laufflächen für das Gleitlager verfügt. Auf diesen Flächen kann der Rotor mit den zuvor beschriebenen Bronzefanglagerringen im Falle eines Stromausfalles abgleiten. Im Statorring sind ebenfalls Bohrungen für Positionssensoren integriert worden. Die Bohrungen für die radialen Sensoren befinden sich zwischen den Radialspulen. Für die axialen Sensoren wurden die Bohrungen unterhalb der Axialspulen eingebracht. Da es sich hier um ein erstes Versuchslager handelt, wurden wesentlich mehr Bohrungen vorgesehen, als Sensoren eingesetzt werden. Im aktuellen Prototyp werden 10 Wirbelstromsensoren genutzt, um die Position des Rotors in den

fünf Freiheitsgraden für die Regelung zu ermitteln.

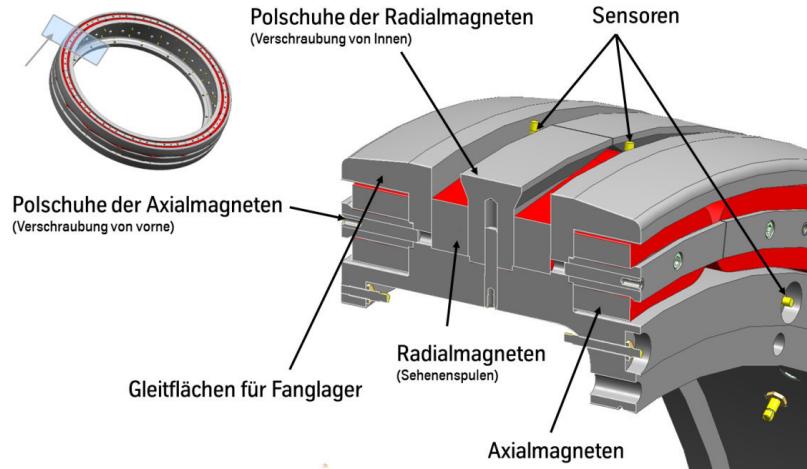


Abb. 14: Aufbau des Stators des Prototyps

Die Lage- und Stromregelung des Prototyps wurde auf einem Industrie-PC der Fa. Beckhoff implementiert. Dieser ermöglicht eine vollständige Überwachung und Steuerung des Prototyps entsprechend der Industrie 4.0. Um mögliche elektromagnetische Wechselwirkungen zwischen Sensorik und Regelung zu reduzieren, wurden die Leistungselektronik und die Messelektronik in separaten Schaltschränken untergebracht (siehe Abb. 15). Die Messsignale werden digitalisiert an den Industrie-PC übertragen.

Am Prototyp kommt ein angepasster Regelalgorithmus des Kleinversuchsstandes ZML320 zum Einsatz. Während die Auswertung der Messsignale in gleicher Weise wie am ZML320 erfolgt, ist die Berechnung von 48 Stellgrößen (32 axial, 16 radial) für die Ansteuerung der Magnete notwendig. Aufgrund von im Simulationsmodell noch nicht berücksichtigten Einzeleffekten (Wirbelströme, unbekannte Leistungsstellerdynamik) wurden die Reglerparameter empirisch ermittelt.



Abb. 15: Regelung des Prototyps

3.2 Inbetriebnahme des Prototyps und Versuchsergebnisse

Mit dem vorgestellten Prototyp wurden zunächst Drehzahlversuche durchgeführt. Hierfür wurde das Lager mit einer horizontalen Drehachse an einer Wand angebracht und mit einem Riemenantrieb angetrieben (siehe Abb. 16). Anschließend wurde der Antrieb deaktiviert und die Dauer bis zum Stillstand des Lagers gemessen. Mit den bislang implementierten empirisch ermittelten Reglerparametern sind Drehzahlen bis zu 135 min^{-1} möglich.

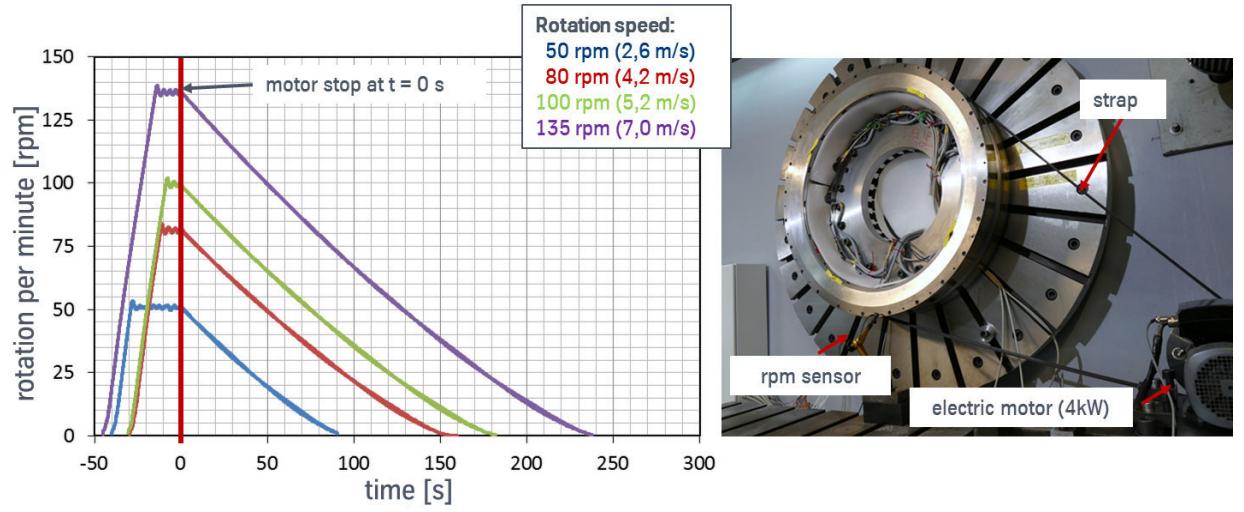


Abb. 16: Drehzahlversuche mit dem Versuchslager

Wesentliches Kriterium für die Leistungsfähigkeit dieses Lagertyps sind die während des Betriebes entstehenden Wirbelstromverluste, da sie die Drehbewegung des Lagers bremsen. Um diese am Prototyp zu erfassen, wurden Drehversuche mit Messung des anschließenden Auslaufverhaltens durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde der Rotor mit einem Riemenantrieb auf eine Zieldrehzahl beschleunigt. Nach dem Erreichen einer vorgegebenen Zieldrehzahl wurde der Antrieb abgeschaltet und die Auslaufdauer gemessen. Die Drehzahl des Rotors wurde über die integrierte Sensorik erfasst. Wirbelstromverluste eines Magnetlagers steigen extrem mit der Drehzahl und bremsen die Rotationsbewegung des Rotors. Es wäre somit zu erwarten, dass bei hohen Wirbelstromverlusten das Magnetlager bei höheren Drehgeschwindigkeiten einen starken Anstieg der Bremsbeschleunigung zeigt. In Abb. 17 sind die ermittelten Ergebnisse dargestellt. Es zeigt sich sehr deutlich, dass bei Drehgeschwindigkeiten bis 7 m/s (135 min^{-1}) kein signifikanter Anstieg der Bremsbeschleunigung zu messen ist. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die aus der Relativbewegung resultierenden Wirbelstromverluste relativ gering sind.

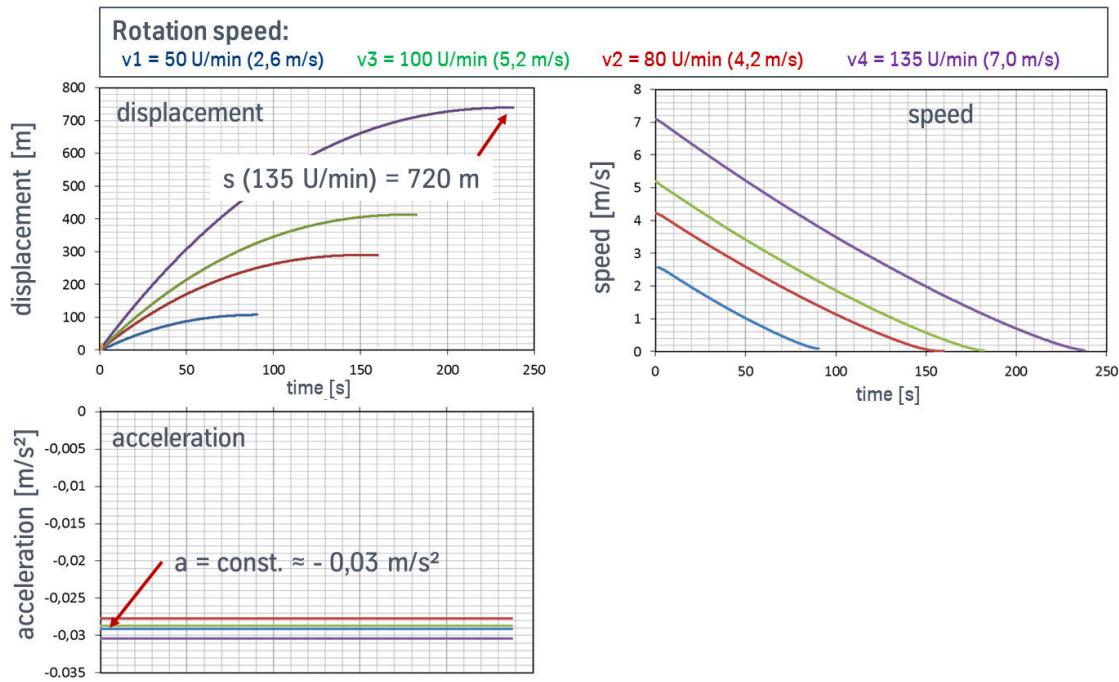


Abb. 17: Rotationsversuche mit dem Versuchslager

4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die Entwicklung eines neuartigen magnetischen Momentenlagers vorgestellt. Ziel war es, die Vorteile einer Magnetlagerung (geräuscharmer und verschleißfreier Betrieb) auf Anwendungen zu übertragen, bei denen üblicherweise Großwälzlager eingesetzt werden. Zielanwendung ist die Lagerung eines Computertomographen. Der geräuscharme Betrieb ist hier von besonderer Bedeutung. Darüberhinaus ergeben sich für solche magnetischen Momentenlager Anwendungsgebiete überall dort, wo die axiale und die radiale Lagerung in einer Ebene realisiert werden soll. Neben dem Computertomographen ist die Anwendung auch bspw. in Radarantennen denkbar.

Mit dem Kleinversuchsstand konnte der Funktionsnachweis für das magnetische Momentenlager erbracht und die Validierung von Modell und Regelstrategie durchgeführt werden.

Das Versuchslager im Maßstab 1:1 wurde durch die thyssenkrupp Rothe Erde GmbH speziell für die Anwendung in CT-Systemen konstruiert. Dieser besitzt gegenüber dem Kleinversuchsstand eine modifizierte Anzahl und Anordnung der Lagermagnete. Nach Anpassung der Regelalgorithmen an das Versuchslager konnte eine erfolgreiche Inbetriebnahme durchgeführt werden. Durch Versuche mit unterschiedlichen Drehzahlen konnte der Funktionsnachweis am Prototyp erbracht werden. Die Versuche zeigten weiterhin, dass Wirbelstromeinflüsse, resultierend aus der Relativbewegung von Stator und Rotor, gering sind.

Für eine Optimierung der Reglerparameter und damit der Leistungsfähigkeit des Versuchslagers muss eine Anpassung des Modells, unter Berücksichtigung von Einzeleffekten (Wirbelstromeinflüsse aus Stellereingriffen, Leistungsstellerdynamik), erfolgen.

Quellenverzeichnis

- [1] Hahn, L. ; Munke, I.: *Werkstoffe für die Elektrotechnik und Elektronik*. VEB Verlag Technik Berlin, 1973
- [2] Werner, R.: *Vorlesungsunterlagen Traktions- und Magnetlagertechnik*. TU Chemnitz, 2009

Berührungsloses 6-Achs-Messsystem für lagerlose reluktante Rotations-Linearmotoren

André Schleicher¹, Ralf Werner¹

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein berührungsloses Messsystem für die Messung von Verdrehungen und Verschiebungen in 6 Freiheitsgraden vorgestellt. Das Messsystem ist speziell für einen neuartigen Antrieb, den lagerlosen reluktanten Rotations-Linearmotor, entwickelt worden, kann jedoch leicht auch für andere Zwecke modifiziert werden. Für den Einsatz in diesem Spezialantrieb werden hohe Anforderungen gestellt, welche nicht alle von einzelnen konventionellen Messsystemen erfüllt werden können. Daher wurde ein Gesamtsystem aus aufeinander sowie auf die Messaufgabe abgestimmten Einzelmesssystemen entwickelt. Dieses besteht aus einem kapazitiven Mehrachs-Messsystem mit neuartiger differenzieller Sensorik und Auswertung sowie aus einem inkrementellem Laser-Messsystem in Differenzialanordnung.

Schlagwörter

differenzieller kapazitiver Abstandssensor, mehrfach differenzielle Auswertung, Amplitudenmodulation, inkrementelles Laser-Messsystem, lagerloser Rotations-Linearmotor, Signal-Stör-Abstand, Signal-Rausch-Abstand

Einleitung

Der lagerlose Rotations-Linearmotor ist ein neuartiger Antrieb, welcher Rotationsmotor, Linearmotor und Magnetlager zu einer sehr kompakten und einfachen Bauform vereinigt. Dadurch kann mit geringem Fertigungsaufwand ein Antrieb hergestellt werden, welcher unabhängig voneinander Verschiebungen und vollständige Drehungen eines schwebenden Rotors um eine Achse ermöglicht. Darüber hinaus kann auch das magnetische Schweben geregelt werden, so dass geringfügig exzentrische oder taumelnde Bewegungen möglich sind. Ein lagerloser Rotations-Linearmotor, welcher auf dem Reluktanzprinzip basiert, ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die Bewegungsvielfalt, negative Steifigkeiten aufgrund der magnetischen Lagerung, sowie die komplexe Regelung des Motors stellen zusammen hohe Ansprüche an das Messsystem für die Rotorlage. Dabei kann unterschieden werden zwischen der Messung der Verdrehung und Verschiebung in der Rotorachse und der Messung in den anderen 4 Freiheitsgraden (radiale Lage):

- Allgemeine Anforderungen:
 - 6 unabhängige Messachsen
 - geringe Kopplung der Achsen
 - hohe elektromagnetische Störsicherheit
- Radiale Lage:
 - schnelle Reaktionszeit
 - sehr wenig Rauschen
- Verdrehung und Verschiebung in Rotorachse:
 - Synchronizität zur Nutung

Konventionelle Messsysteme erfüllen nicht alle Anforderungen, weshalb ein System aus abgestimmten Messsystemen unterschiedlicher physikalischer Prinzipien entwickelt wurde, welches nachfolgend erläutert wird.

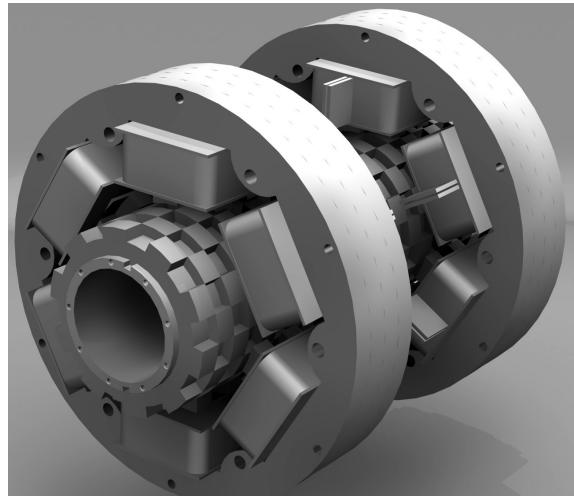


Abbildung 1. Lagerloser reluktanter Rotations-Linearmotor mit Doppelstator

Überblick über die Einzelmesssysteme und deren physikalische Wirkprinzipien

Für die Bestimmung der vollständigen Radiallage des Rotors müssen 4 Abstände zum Stator gemessen werden. Dies geschieht durch mehrere jeweils mehrfach differenzielle kapazitive Abstandsmesssysteme. Ein Einzelmesssystem besteht

¹Technische Universität Chemnitz

Kontakt:

André Schleicher, Technische Universität Chemnitz
Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe
Reichenhainer Straße 70
09126 Chemnitz
Email: andre.schleicher@etit.tu-chemnitz.de

aus einem differenziellen Sensor, einer differenziellen Auswerteelektronik mit A/D-Wandlung und einem zentralen Signalverteil器. Mit Hilfe von Sensor und Auswerteelektronik wird die Koppelkapazität zwischen beiden Sensorflächen, welche vom Abstand des Rotors zum Sensor abhängig ist, ermittelt und digitalisiert. Der Signalverteil器 stellt einen gemeinsamen Hochfrequenzträger für alle Einzelmesssysteme zur Verfügung. Das bedeutet, die kapazitiven Einzelmesssysteme arbeiten nach dem Prinzip der Amplitudenmodulation und sind miteinander synchronisiert.

Die Messung der Verschiebung und Verdrehung erfolgt jeweils über ein inkrementelles optisches Messsystem. Auf dem Rotor ist ein diffus reflektierendes Muster angebracht, welches eine sich sinusförmig ändernde Reflektivität in Längs- bzw. in Querrichtung aufweist. Das Sinusmuster ist jeweils synchronisiert mit der Nutzung des Rotors. Die Reflektivität des Musters wird mit mehreren Lasersensoren abgetastet. Diese leiten einen kollimierten Laserstrahl mit sinusförmig modulierter Leistung auf die Oberfläche und ermitteln die Leistung der gestreuten Strahlung. Über eine synchrone Abtastung wird das Signal eines Lasersensors demoduliert und digitalisiert. Durch den Versatz bzw. Winkelversatz der einzelnen Sensoren zueinander kann die Verdrehung bzw. Verschiebung des Musters eindeutig aus den einzelnen Signalstärken rekonstruiert werden.

Mehrfach differenzielles kapazitives Abstandsmesssystem

Stand der Technik

Stand der Technik sind kapazitive Messsysteme, welche durch eine aktive Schirmung die Wirkung der parasitären Kapazität zwischen Sensorelektrode und Bezugspotential vermindern und den Feldverlauf der Sensorelektrode homogenisieren^{1,2}. Die Zuleitung zu den Sensoren erfolgt durch 3-Leiter-Koaxialleitungen, bei denen zwischen dem Signalinnenleiter und dem Masseaußenleiter noch ein Aktivschirmleiter existiert³. Der Einfluss der Kapazität zwischen Messobjekt und Bezugspotential wird bei manchen Systemen vermindert, indem mehrere Sensoren verwendet und die Verschiebungsströme der Messelektroden gegenphasig synchronisiert werden³.

Die Hauptprobleme der genannten Messsysteme sind zum einen die meist geringe Trägerfrequenz, wodurch das Arbeitsband mit dem Störspektrum des Magnetlagers überlappt und die erreichbare Messgrenzfrequenz gering ist. Zum anderen ist die Kompensation der Rotor-Bezugspotential-Kapazität nicht vorhanden oder nur mäßig effektiv⁴.

Umsetzung: mehrfach differenzielle Auswertung bei hoher Trägerfrequenz

Das entwickelte Messsystem besitzt einen zweifach-differenziellen Sensor, siehe Abbildung 2. Um den Rotor herum sind 4 differenzielle Sensoren mit Aktivschirm angebracht. Zu jedem differenziellen Sensor gehört ein Einzelmesssystem, welches die beiden Teilsensoren mit gespiegelten Signalen betreibt und deren Koppelkapazität zueinander misst.

Die Schaltung eines Einzelmesssystems und des Gesamtsystems ist in Abbildung 3 dargestellt. Ein Sinusträger wird

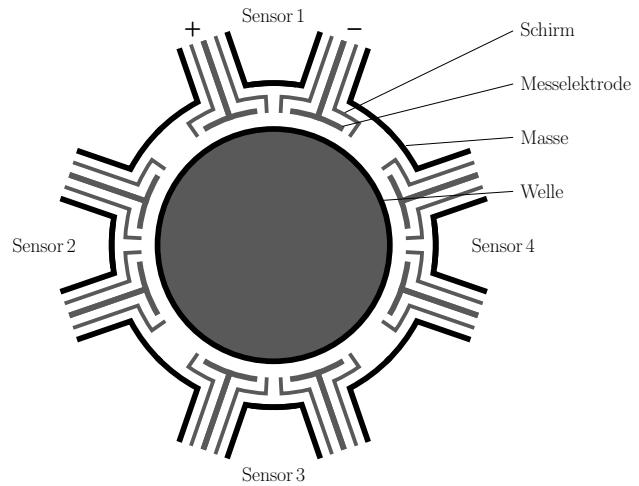


Abbildung 2. Differenzielle Sensoranordnung

an alle Einzelmesssysteme verteilt, wo in zwei gespiegelte Signale aufgeteilt wird und jeweils einer Messbrücke zugeführt wird. Beide Brückenspannungen werden über zwei differenzielle Demodulatoren (siehe Abbildung 4) demoduliert, über zwei Differenzverstärker verstärkt und einem differenziellem AD-Wandler mit vorgeschaltetem Tiefpass zugeführt. Die digitalen Signale je zweier Einzelmesssysteme, die zu sich gegenüberliegenden differenziellen Sensoren gehören, werden anschließend subtrahiert. Durch die hohe Trägerfrequenz von $f = 10 \text{ MHz}$ wird das störempfindliche Arbeitsband gegenüber konventionellen Messsystemen in Frequenzbereiche verschoben, die weit genug entfernt sind vom Spektrum der von Motor und Leistungselektronik verursachten elektromagnetischen Störungen. Zudem wird dadurch die Nutzsignal-Leistung erhöht:

$$P = UI = UC\dot{U} \sim f \quad (1)$$

Auch eine hohe Messgrenzfrequenz und eine kurze Reaktionszeit verlangen bei der Amplitudenmodulation prinzipbedingt eine hohe Trägerfrequenz. Ermöglicht wird die hohe Frequenz durch die passive RC-Brückenschaltung, die im Gegensatz zu Stromregelungen o.ä. auch bei hohen Frequenzen keine Stabilitätsprobleme bereitet sowie durch den einfach aufgebauten differenziellen Demodulator. Die Schottkydioden D_1 und D_2 eines Demodulators sind thermisch gut gekoppelt, um die Temperaturdrift zu verringern. Durch die mehrfach differenzielle Sensoranordnung und Auswertung werden die Einflüsse von

- Gleichtaktstörungen aller Art
- Änderungen der Rotor-Bezugspotential-Kapazität
- Wärmeausdehnungen

stark vermindert, worauf später im Detail eingegangen wird. Durch die Synchronisation werden gegenseitige Beeinflussungen der Einzelmesssysteme wie Schwebungen verhindert. Die digitalen Ausgänge ermöglichen eine einfache Erweiterbarkeit des Gesamtsystems um weitere Messachsen oder noch mehr Einzelmesssysteme pro Achse.

In Tabelle 1 sind die wichtigsten getroffenen Maßnahmen und Ihre Auswirkungen auf fundamentale Eigenschaften des Messsystems zusammengefasst. Dabei bedeutet das Symbol + eine Verbesserung der jeweiligen Eigenschaft,

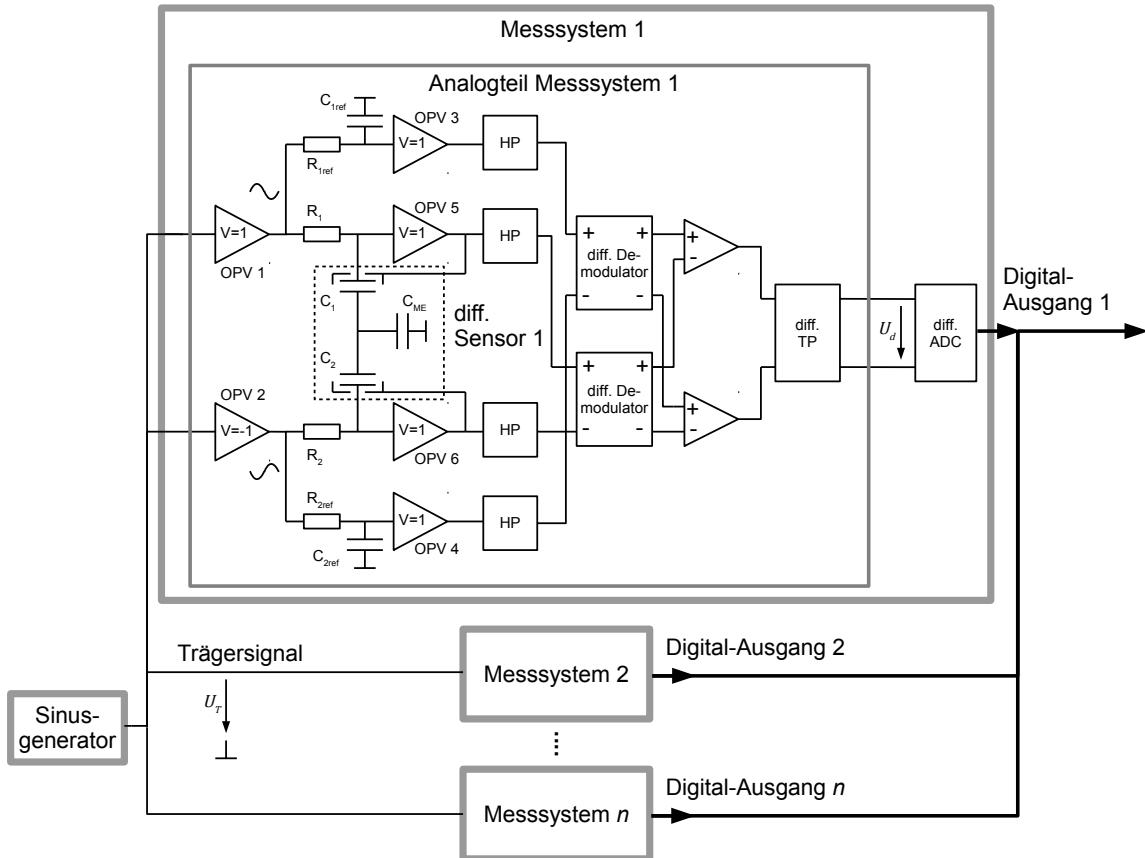


Abbildung 3. Prinzipschaltung kapazitives Messsystem

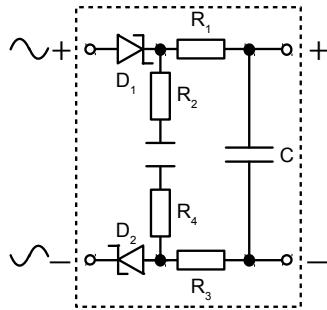


Abbildung 4. Differenzieller Demodulator

jedoch nicht notwendigerweise eine Erhöhung der jeweiligen physikalischen Größe.

Messergebnisse

Das kapazitive Messsystem wurde erfolgreich an einem Versuchsaufbau eines lagerlosen reluktanten Rotations-Lineararmotors in Betrieb genommen und ermöglichte eine stabile magnetische Lagerung des Rotors mit sehr geringem Rauschen.

Tabelle 1. Einflüsse verschiedener konstruktiver Maßnahmen auf Eigenschaften des Messsystems

Maßnahme	Stör-abstand	Reak-tions-zeit	Rausch-abstand	Linea-rität	Temp.-drift
diff. Sensor	++		+		
diff. Demodulator	++		-	-	-
hohe Träger-frequenz	++	++	-	-	-
Doppel-Messsystem mit Digital-ausgang	+		+	++	+

Sprungantwort und Grenzfrequenz

Die Sprungantwort wurde ermittelt durch eine schnelle Änderung der Trägeramplitude. Der Effekt der Spannungsänderung bei Bewegung des Rotors durch Ladungserhalt auf Sensor- und Rotoroberfläche wird dadurch nicht nachgebildet. Jedoch werden durch das Vorgehen alle relevanten Verzögerungen des Systems erfasst. Die Trägerspannung U_T und die Ausgangsspannung U_d eines Einzelmesssystems sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Reaktionszeit des Systems beträgt etwa

$$t_R \approx 10 \mu\text{s} \quad (2)$$

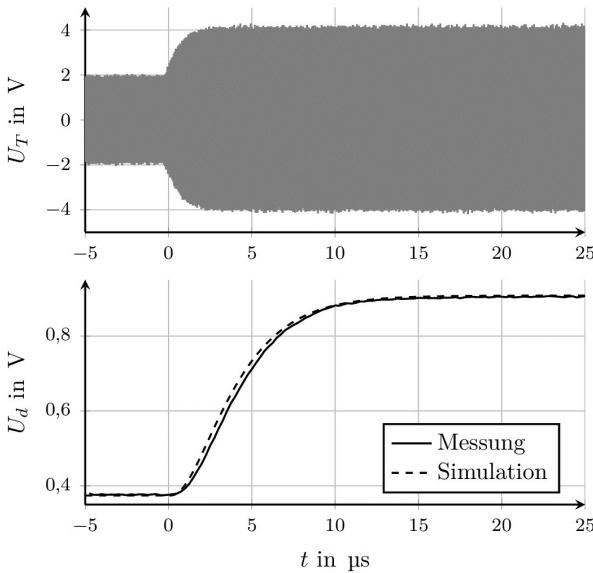


Abbildung 5. Sprungantwort eines Einzelmesssystems

Über eine lineare Simulation des Schaltung mit Parameteranpassung an die gemessene Kurve (vgl. gestrichelte Kurve in Sprungantwort) konnten Zeitkonstanten des Systems rekonstruiert werden und eine -3 dB-Messgrenzfrequenz von

$$f_G = 47 \text{ kHz} \quad (3)$$

ermittelt werden. Die Dynamik des Systems ist somit ausreichend schnell für die Anwendung in aktiven Magnetlagern und übertrifft die der meisten konventionellen Messsysteme deutlich.

Rausch- und Störabstände

Der Signal-Rausch-Abstand eines Einzelmesssystems wurde über ein Histogramm der Werte des A/D-Wandlers ermittelt und beträgt

$$SNR = 92 \text{ dB} \quad (4)$$

Bei Verwendung von n Einzelmesssystemen pro Achse erhöht sich der Wert entsprechend auf etwa

$$SNR(n) \approx 92 \text{ dB} + 20 \log_{10}(\sqrt{n}) \text{ dB} \quad (5)$$

da das Rauschen der Sensoren überwiegend in den Ausverstärkerlektroniken entsteht und somit weitgehend unkorreliert ist.

Darüber hinaus wurde die Störempfindlichkeit des Einzelmesssystems gegenüber sich ändernden Messobjekt-Bezugspotential-Kapazitäten und -Spannungen ermittelt. Dazu wurde zum einen eine Änderung der Kapazität von $C = 20 \text{ pF}$ auf $C \rightarrow \infty$ mittels Isolation bzw. Kurzschluss zwischen Messobjekt und Bezugspotential erzeugt. Der resultierende Signal-Stör-Abstand SDR_C , definiert als Verhältnis von Aussteuerbereich zu Differenz zwischen der mittleren Ausgangsspannung vor und nach dem Kapazitätssprung, beträgt für ein Einzelmesssystem

$$SDR_C = 74 \text{ dB} \quad (6)$$

Dieser Wert ist angesichts der sehr starken Kapazitätsänderung relativ hoch und wird nur durch die differenzielle Sensorik und Auswertung erreicht. Durch die

Unempfindlichkeit gegenüber der Rotor-Bezugspotential-Kapazität können auch sehr kleine Rotoren und/oder große Luftspaltlängen realisiert werden.

Zum anderen wurde eine sinusförmige Störspannung U_n mit unterschiedlichen Effektivwerten und Frequenzen zwischen Rotor und Bezugspotential angelegt. Ermittelt wurden der Signal-Stör-Abstand SDR_{AC} der Wechselanteile der Ausgangsspannung sowie der gesamte Signal-Stör-Abstand SDR , welcher neben dem Wechselanteil auch die Verschiebung des Mittelwertes durch die Störung beinhaltet:

$$SDR_{AC} := 10 \log_{10} \left(\frac{U_{AB}^2}{\sigma^2} \right) \quad (7)$$

$$SDR := 10 \log_{10} \left(\frac{U_{AB}^2}{\sigma^2 + e^2} \right) \quad (8)$$

mit:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_k^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_k \right)^2}$$

$$e = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_k - U_m$$

Darin sind U_k die Abstastwerte der gestörten Ausgangsspannung und U_m der Mittelwert der ungestörten Ausgangsspannung, d.h. der Mittelwert für $U_n = 0$. N ist die Zahl der Abstastwerte und U_{AB} der Aussteuerbereich des Messsystems.

In Abbildung 6 sind beide Verläufe für die Differenzausgangsspannung eines Einzelmesssystems dargestellt. Der Signal-Stör-Abstand ist wegen der hohen Trägerfrequenz sehr hoch und wird erst ab einigen hundert kHz nennenswert kleiner als der Signal-Rausch-Abstand. Zusätzlich wurde der Stör-Abstand für eine einzelne Ausgangsspannung U_s , welche ein gleichwertiges Single-ended-Messsystem repräsentiert, aufgetragen. Das differenzielle Messsystem erreicht bis in den einstelligen MHz-Bereich erheblich mehr Störsicherheit als die Single-ended-Variante. Dies gilt vor allem für den Wechselanteil, der auch für die Stabilität und Genauigkeit der Regelung der magnetischen Lagerung von Antrieben von großer Bedeutung ist.

In den Kurven des gesamten Signal-Stör-Abstands zeigt sich bei hohen Frequenzen bei der differenziellen Messung eine stärkere Abnahme als bei den Kurven des Wechselanteils. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass der differenzielle Demodulator (vgl. Abbildung 4) prinzipbedingt nichtlineares Verhalten bei größeren Störamplituden aufweist.

Insgesamt sind die erreichten Signal-Rausch- und -Stör-Abstände relativ hoch und erlauben in Verbindung mit der sehr schnellen Reaktionzeit des Systems eine stabile, rausch- und störarme magnetische Lagerung.

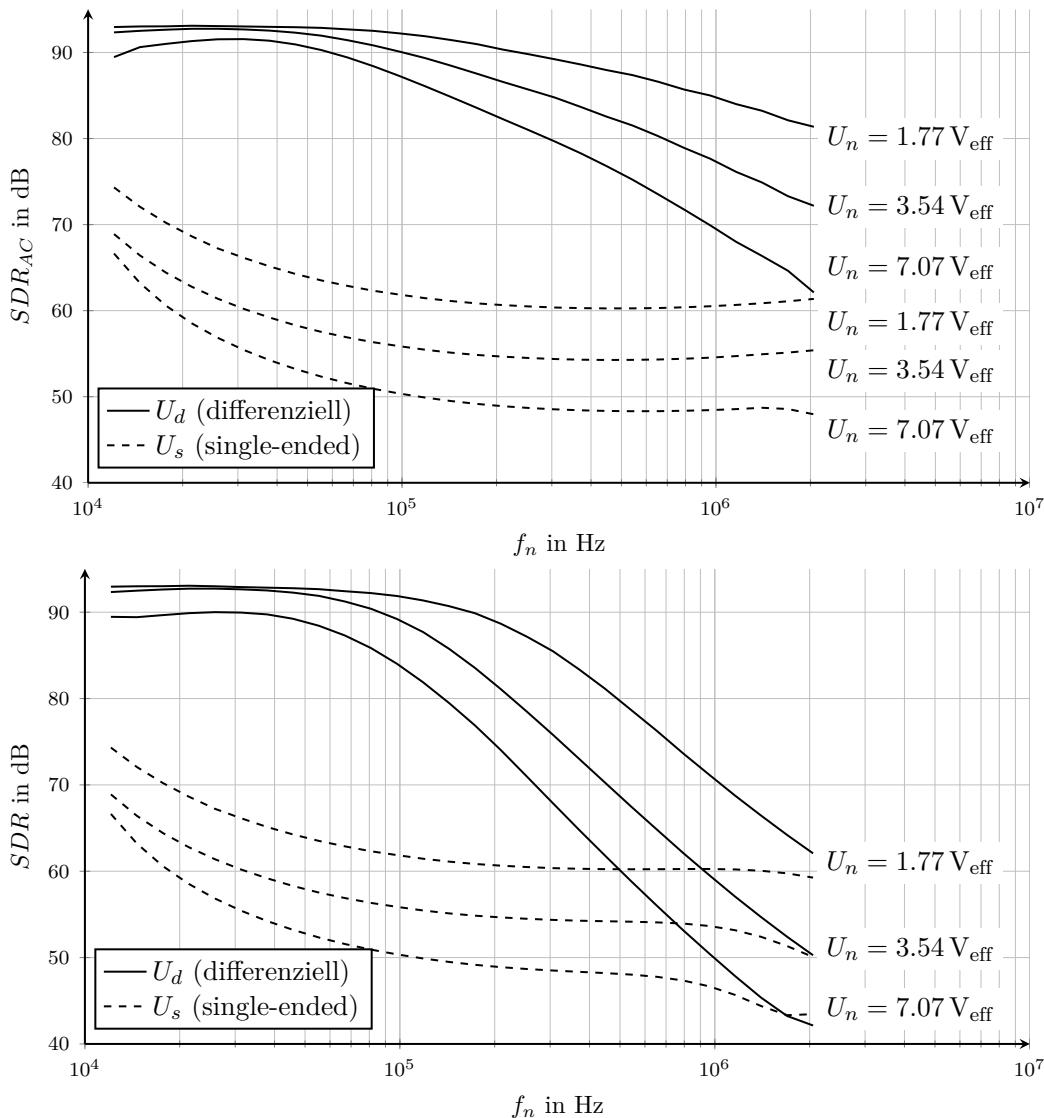


Abbildung 6. Signal-Stör-Abstände eines Einzelmesssystems

Inkrementelles Lasermesssystem mit Differenzialanordnung

Stand der Technik

Stand der Technik sind optische Messsysteme nach dem Transmissionsprinzip, bei denen der Strahl einer Lichtquelle (LED, Laser) durch eine geschlitzte Scheibe hindurch auf eine Photodiode bzw. einen Phototransistor trifft. Analog gibt es Systeme, die nach dem Reflexionsprinzip arbeiten und eine reflektierende Fläche abtasten¹. Darüber hinaus gibt es kamerabasierte Systeme, welche über Bildkorrelation einer beleuchteten diffus reflektierenden Fläche Bewegungen erfassen, z.B. bei einer Computer-Maus.

Letztere Systeme sind zwar unempfindlich gegenüber Abnutzung/Verschmutzung der Oberfläche und prinzipiell in der Lage, auch bei variierenden Abständen zweidimensionale Verschiebungen zu messen. Jedoch eignen sich diese Systeme eher zur Messung von Veränderungen und besitzen ggf. nur geringe Wiederholgenauigkeit. Darüber hinaus sind diese relativ langsam und/oder kostenintensiv.

Transmissionssysteme sind für lagerlose Rotations-Linearmotoren bautechnisch bedingt nur in Ausnahmefällen

einsetzbar, da die Distanz zwischen Fotoelement und Transmissionsmuster nicht konstant ist und/oder sehr groß werden kann. Dies führt zu nicht konstanter bzw. starker Beugung des Lichtstrahls und somit zur Verfälschung des Messsignals. Konventionelle Reflexionssysteme sind ebenfalls für konstante Abstände zur Reflexionsfläche ausgelegt und somit i.A. ungeeignet.

Umsetzung: Reflexionsmesssystem mit Differenzialanordnung

Das zur Lösung der o.g. Probleme entwickelte Lasermesssystem besteht für die Messung der Verdrehung und der Verschiebung jeweils aus 4 Einzelsensoren in Differenzialanordnung. Dabei sind 2 Sensoren gegenüberliegend angeordnet und besitzen bezüglich des Reflexionsmusters dieselbe Phasenlage, siehe Abbildung 7. Die Signale beider Sensoren eines solchen Paares werden zu einem Gesamtsignal addiert, sodass bei radialer Verschiebung des Rotors die entstehenden Abweichungen der Signalstärken der Einzelsensoren teilweise kompensiert werden, vgl. Tabelle 2 und Abbildung 7. Beide Sensorpaare sind um 90° phasenverschoben angeordnet, um möglichst gute Rekonstruierbarkeit des Winkels

bzw. der Verschiebung des Musters aus den beiden Summensignalen zu erreichen. Anzumerken ist, dass eine Verschiebung

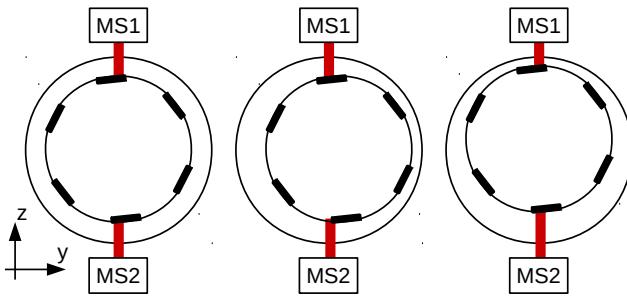


Abbildung 7. Differenzialanordnung für die Messung des axialen Rotorwinkels

Tabelle 2. Kompensationswirkung der Differenzialanordnung

Rotorlage	(0, 0)	(+ Δy , 0)	(0, + Δz)
Amplitude		+ ΔU_1	+ ΔU_1
Messsystem 1			
Amplitude		- ΔU_2	- ΔU_2
Messsystem 2			
Amplitude gesamt	U	$\approx U$	$\approx U$

bung des Rotors um $(\Delta y, 0)$ nur für den in Abbildung 7 dargestellten speziellen Rotorwinkel am besten kompensiert wird - jedoch geht der entstehende Fehler auch nur in diesem Fall am stärksten in den rekonstruierten Winkel ein. Ein Grundwellenmodell für den rekonstruierten Winkel $\hat{\varphi}$ in Abhängigkeit der einer beliebigen seitlichen Verschiebung, die zu einem Fehler (a, b) beliebiger Richtung in den beiden Summensignalen führt, lautet:

$$\hat{\varphi}(\varphi, a, b) = \text{atan2}(A(\varphi, a), B(\varphi, b)) \quad (9)$$

mit:

$$A(\varphi, a) := \frac{1}{2} (\cos(\varphi + a) + \cos(\varphi - a)) \quad (10)$$

$$B(\varphi, b) := \frac{1}{2} (\sin(\varphi + b) + \sin(\varphi - b)) \quad (11)$$

Darin sind A und B die vom Offset befreiten Summensignalstärken der beiden Sensorpaare und φ der reale Rotorwinkel. Die Empfindlichkeit ε berechnet sich nun wie folgt:

$$\varepsilon(\varphi) = \left. \begin{pmatrix} \frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial a} \\ \frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial b} \end{pmatrix} \right|_{a=b=0} = \left. \begin{pmatrix} -B \frac{\partial A}{\partial a} + A \frac{\partial B}{\partial a} \\ A \frac{\partial B}{\partial b} - B \frac{\partial A}{\partial b} \end{pmatrix} \right|_{a=b=0} \equiv 0 \quad (12)$$

Wegen der Orthogonalität der beiden Summensignale funktioniert die Kompensation in erster Näherung vollständig für beliebige Rotorwinkel φ und ermöglicht somit eine Entkopplung von den Messachsen des kapazitiven Messsystems.

Ein Prinzipschaltbild eines Einzelsensors im Gesamtsystem ist in Abbildung 8 dargestellt.

Im Mikroprozessor der Auswerteeinheit wird ein Taktsignal erzeugt, welches in eine Sinusspannung gewandelt wird,

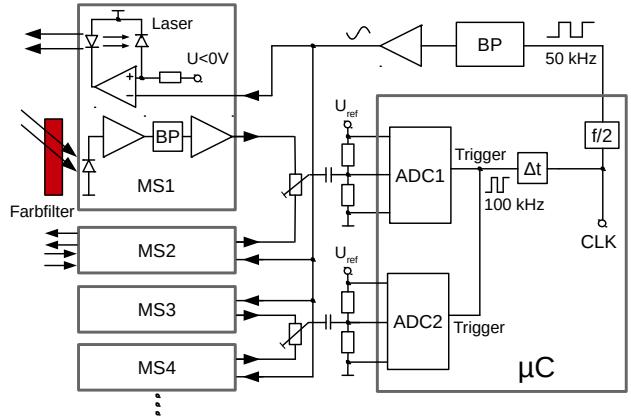


Abbildung 8. Prinzipschaltung Laser-Messsystem

die alle Einzelmesssysteme als Träger versorgt. Im Einzelmesssystem erzeugt eine über die Monitordiode leistungsgegeregelte Laserdiode einen Lichtstrahl mit trägefrequent modulierter Leistung, welcher kollimiert auf die Reflexionsfläche trifft. Das gestreute Licht wird von einer Photodiode mit vorgeschaltetem Farbfilter aufgenommen. Deren Signal wird über einen Transimpedanzverstärker verstärkt und über einen nachgeschalteten, auf den Träger abgestimmten Bandpass von Störanteilen befreit wird. Die Ausgänge zweier Einzelmesssysteme eines Paares werden über ein Potentiometer zusammengeführt, um mit wenig Aufwand eine Mittelung der Signale mit justierbarer Wichtung zu erreichen. Das so gemischte Summensignal wird über einen Hochpass dem A/D-Wandler des Prozessors zugeführt. Dieser demoduliert und digitalisiert schließlich, indem im Maximum und im Minimum des Signals jeweils eine Abtastung erfolgt und deren Differenz gebildet wird. Die Phasenverschiebung zwischen Trigger und Ausgangssignal eines Messsystems ist konstant und wird einmalig digital im Mikroprozessor justiert (vgl. Δt in Abbildung 8). Die Rekonstruktion des Rotorwinkels erfolgt über die Anwendung der atan2-Funktion auf die Werte von ADC1 und ADC2. Bei Bedarf kann das Winkel signal nach Ausführung der atan2-Funktion digital entzerrt werden über eine hinterlegte statische Übertragungsfunktion. Somit lässt sich die Linearität des Messsystems erhöhen unter Beibehaltung der Amplitudeninvarianz der Summensignale A und B .

Durch die Wahl einer relativ hohen Trägerfrequenz von 50 kHz und des Farbfilters wird der Fremdlichteinfluss stark verringert. Die Synchronabtastung ermöglicht eine einfache Demodulation mit hoher Reaktionsgeschwindigkeit. Der demodulierte Wert steht bereits nach einer Periodendauer des Trägers zur Verfügung und es werden gegenüber gewöhnlichen Demodulatoren keine weiteren Tiefpässe oder Integratoren benötigt. Durch die Leistungsregelung des Lasers wird eine weitgehend störungsfreie konstante Amplitude der optischen Leistung erreicht. Zudem arbeitet die Empfänger-Fotodiode über den Transimpedanzverstärker im Quasi-Kurzschluss und somit sehr linear.

Das Lasermesssystem wurde erfolgreich an einem Versuchsaufbau eines lagerlosen reluktanten Rotationslinearmotors in Betrieb genommen und ermöglichte eine

stabile Regelung des Motorvorschubs. Messungen zur Genauigkeit und Dynamik des Lasermesssystems an sich stehen aufgrund des hohen Aufwands noch aus.

Fazit und Ausblick

Es wurde eine kapazitive Mehrachs-Abstandsmesssystem mit neuartiger mehrfach differenzieller Sensorik und Auswertung entwickelt, vermessen und an einem Versuchstand zum lagerlosen reluktanten Rotations-Linearmotor in Betrieb genommen. Dieses zeichnet sich durch hohe Rausch- und Stör-Abstände aus. Es wurde nachgewiesen, dass die differenzielle Wirkungsweise bis in den einstelligen MHz-Bereich gegenüber einem Single-ended-Verfahren deutliche Vorteile besitzt. Die sehr hohe Trägerfrequenz unterstützt die Störfestigkeit bis hin zu hohen Frequenzen. Für die Hauptbewegungssachsen eines lagerlosen Rotations-Linearmotors wurde ein inkrementelles Laser-Messsystem entwickelt. Es konnte theoretisch gezeigt werden, dass durch die entwickelte Differenzialanordnung mehrerer Einzelsensoren in erster Näherung eine Kompensation von radialen Verschiebungen des Rotors erfolgen kann. Somit sind die Messachsen von kapazitivem und optischem Messsystem gut voneinander entkoppelt. Weitere Messungen hinsichtlich Dynamik und Genauigkeit des optischen Messsystems sind geplant.

Danksagung

Das Projekt „Lagerloser reluktanter Rotations-Linearmotor“ wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen einer Sachbeihilfe (GZ: WE 4347/4-1) gefördert, wofür gedankt wird.

Literatur

1. E. Hering, G. Schönenfelder, „Sensoren in Wissenschaft und Technik“, ISBN 978-3-8348-0169-2, Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
2. R. Haberland, „Kapazitiver Abstandssensor“, Kaiserslautern, deutsches Patent DE 000003734715 A1, 1987.
3. Fa. Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG, 94496 Ortenburg, „Kapazitive Sensoren für Weg, Abstand & Position“, Firmenschrift, 2015.
4. A. Schleicher, R. Werner, „Differenzielles kapazitives Mehrachs-Abstandsmesssystem für Umgebungen mit elektromagnetischen Störungen“, tm - Technisches Messen, 84(4), S. 241-250, doi:10.1515/teme-2016-0049.

Differentiation und Linearisierung von Messsignalen eines streuflussbasierten Messsystems für magnetisch gelagerte Rotoren

Johannes RUDOLPH, Arthur SIEBER, Ralf WERNER

Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe (EWA)

Technische Universität Chemnitz

Email: johannes.rudolph@etit.tu-chmneit.de

Kurzfassung

In dem vorliegenden Beitrag wird auf Besonderheiten und Probleme eingegangen, die bei der Signalverarbeitung von stark verrauschten Signalen eines streuflussbasierten Messsystems zur Bestimmung der Rotorposition in einem heteropolaren Magnetlager auftreten. Besonders die zeitliche Ableitung der Steuerströme zur Kompensation von Feldverzögerungseffekten verursacht Probleme, für die in dieser Arbeit Lösungsansätze vorgestellt werden. Im Anschluss wird die Umsetzung auf einem Echtzeitbetriebssystem mithilfe von MATLAB-Simulink beschrieben.

1. Einleitung

Magnetisch gelagerte Rotoren kommen überall dort zum Einsatz, wo hohe Ansprüche an Verschleißarmut gelten. Sie zeichnen sich zudem durch einen geringen Wartungsaufwand und niedrige Reibverluste aus.

1.1. Messsysteme für Magnetlager

Aufgrund ihrer vielen Vorteile stellen Magnetlager in einigen Anwendungsfällen eine interessante Alternative zu konventionellen Wälzlagern dar. Magnetlager weisen viele Vorteile auf, sind aber von Natur aus instabile Systeme. Für einen sicheren Betrieb ist eine genaue Lokalisation der rotierenden Welle im Magnetlager notwendig. Dies wird in der Praxis mit konventionellen Messsystemen realisiert, bei denen meist kapazitive oder wirbelstrombasierte Abstandssensoren zum Einsatz kommen. Seit einiger Zeit stehen zusätzlich sogenannte sensorlose Verfahren zur Verfügung [1], [2], [3]. Bei dieser Methode zur Positionsbestimmung wird die Lage des Rotors im Magnetlager mit Hilfe der Informationen gewonnen, die in den

Spulenströmen und den dazugehörigen Spannungen enthalten sind. Neben den klassischen und sensorlosen Messmethoden besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Rotorposition mittels der magnetischen Flüsse im Lager zu bestimmen. In [4] wird beispielsweise ein sehr dünner Magnetfeldsensor beschrieben. Dieser wird in Form einer Folie direkt in den Luftspalt eingebracht. Bei diesem Verfahren kommen experimentelle Sensoren zum Einsatz, die z.Z. noch nicht auf dem Markt zur Verfügung stehen. Um auf Standardbauelemente zurückgreifen zu können ist in [5] eine Methode vorgeschlagen worden, bei der die Wellenposition mittels der Messung der magnetischen Streuflüsse realisiert wird, die zwischen den Steuerspulen eines Magnetlagers auftreten.

1.2. Streuflussbasiertes Messsystem

Um magnetische Streuflüsse zur Bestimmung der Wellenposition im Magnetlager nutzen zu können, müssen die magnetischen Verhältnisse im Lager genau bekannt sein. Dies kann mithilfe von FEM-Modellen oder durch Messungen realisiert werden. Grundsätzlich sind in Magnetlagern zwei verschiedene Arten von magnetischen Streuflüssen zu beobachten, aus denen die Rotorposition abgeleitet werden kann. Zwischen gleichgerichtet magnetisierten Polen treten intrapolare Streuflüsse auf. Diese sind hauptsächlich tangential orientiert. Im Bereich zwischen entgegengesetzten magnetisierten Polen finden sich interpolare Flüsse, deren Feldlinien zum größten Teil radial ausgerichtet sind.



Abbildung 1 Netzwerk aus magnetischen Widerständen zur Veranschaulichung von Magnetflüssen in Magnetlagern am Beispiel eines Heteropolarlagers. Intrapolare Streuflüsse sind gelb, interpolare Streuflüsse rot und der Luftspaltfluss blau dargestellt.

Die verschiedenen Arten magnetischer Flüsse sind mittels magnetischer Widerstände in Abbildung 1 dargestellt. Zur Messung der Streuflüsse eignen sich handelsübliche HALL-Sensoren. Diese weisen eine hohe Messgenauigkeit und Dynamik auf. Zudem sind sie im Vergleich zu konventionellen Sensoren deutlich kostengünstiger. Bauartbedingt eignen sie sich jedoch nur zur Messung der interpolaren Streuflüsse.

Grundlegend sind die Streuflüsse im Magnetlager direkt von der Länge des Luftspaltes bzw. der Rotorlage abhängig und dem Strom, der in den Lagerspulen fließt. Dies macht dessen Messung notwendig, um die mittels Streuflussmessung erhaltene Rotorposition vom Einfluss der Steuerströme bereinigen zu können.

2. Realisierung eines streuflussbasierten Messsystems

2.1. Linearisierung

Der Zusammenhang zwischen Luftspaltlänge und Streufluss ist nichtlinear. Daher ist es sinnvoll, eine erste Linearisierung durch eine differentielle Anordnung der HALL-Sensoren in genau gegenüberliegenden Bereichen des Magnetlagerstators durchzuführen. Die in Abbildung 2 blau dargestellten Kennlinien wurden mittels HALL-Sensoren aufgenommen, die sich im Bereich der

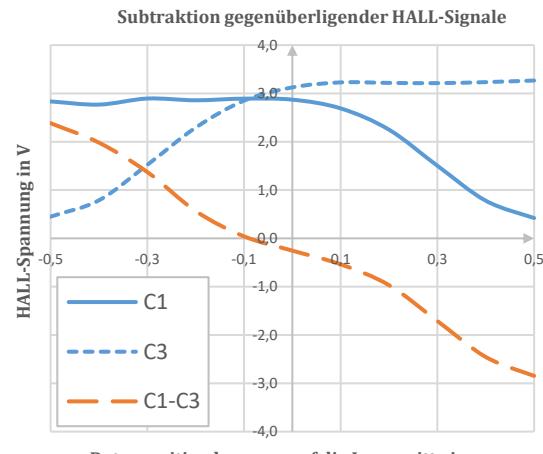


Abbildung 2 Erste Linearisierung des Zusammenhangs zwischen Luftspaltlänge und Streufluss durch Subtraktion der Messsignale gegenüberliegend angeordneter HALL-Sensoren.

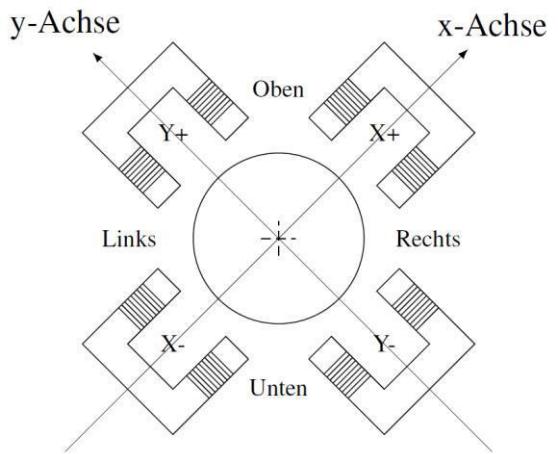


Abbildung 3 Schematische Darstellung der Lagerachsen sowie der Achsen des streuflussbasierten Messsystems am Beispiel eines Heteropolarlagers..

interpolaren Streuflüsse an der Position OBEN und UNTEN zwischen den Lagerachsen befinden (siehe Abbildung 3). Nach Bildung der Differenz beider Kennlinien erhält man die in Abbildung 2 rot dargestellte Kennlinie. In erster Näherung kann diese im Bereich der Lagermitte als linear betrachtet werden. Zur Linearisierung der Kennlinie über den gesamten Bereich möglicher Positionen dient im nächsten Schritt der Signalbearbeitung eine LookUp-Tabelle. Diese bietet gleichzeitig die Möglichkeit, den Einfluss der Steuerströme zu berücksichtigen. Zur Ermittlung des in der LookUp-Tabelle hinterlegten Kennfeldes wurde der Rotor entlang der beiden Messsystemachsen an unterschiedlichen Positionen mechanisch fixiert. An jedem

Punkt wurden die Steuerströme innerhalb der Aussteuerungsgrenzen variiert und die zugehörige Differenz der HALL-Spannungen gegenüberliegender Sensoren gemessen. Eine Änderung der Steuerströme entspricht dabei einer Verschiebung und Verformung der entsprechenden Kennlinie, wie in Abbildung 4 dargestellt. Aufgrund der Lage der HALL-Sensoren zwischen den Spulen der beiden Lagerachsen haben jeweils immer beide Steuerströme eine Auswirkung auf die Kennlinie. Sind die Steuerströme in x- und y-Achse so gerichtet, dass sich das Streufeld verstärkt, ist entsprechend auch die Verschiebung größer. Bei entgegengesetzten Stromrichtungen fällt die Beeinflussung der Kennlinie durch die Steuerströme geringer aus. Sind entgegengesetzte Ströme gleich groß, wird deren Einfluss vollständig kompensiert [6]. Abbildung 5 zeigt das Kennfeld einer Messsystemachse. Die abgeplatteten Bereiche stellen den Kontakt des Rotors mit dem Fanglager dar. Da eine Positionsänderung über diesen Punkt hinaus mechanisch nicht möglich ist, darf auch das streuflussbasierte Messsystem keine größeren Werte annehmen. Eine Extrapolation über diesen Bereich hinaus würde Werte erzeugen, die in der Praxis nicht auftreten können. Zur Verfeinerung des Kennfeldes wurde eine lineare Interpolation durchgeführt.

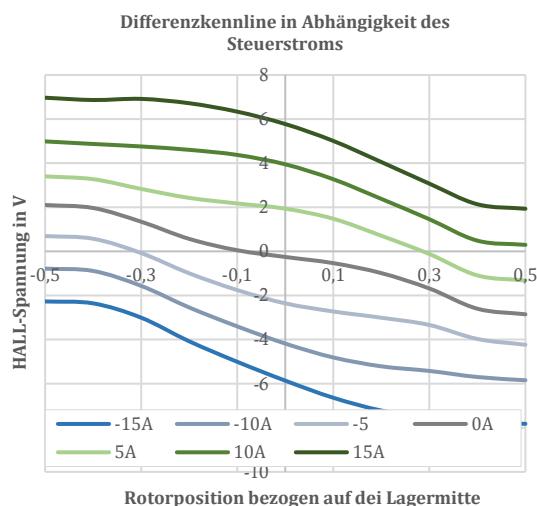


Abbildung 4 Verschiebung der Differenzkennlinie gegenüberliegender HALL-Sensoren bei Änderung des Steuerstroms von -15 A bis 15 A.

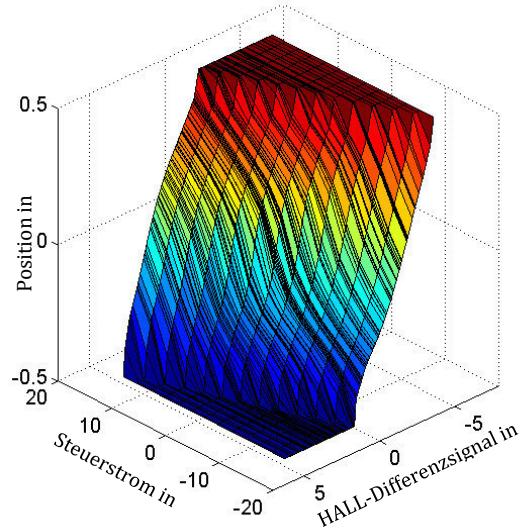


Abbildung 5 In LookUpTabelle hinterlegtes Kennfeld. Die abgeplatteten Bereiche am oberen und unteren Ende repräsentieren die mechanische Grenze der Bewegungsfreiheit des Rotors im Magnetlagerstator.

3. Einfluss dynamischer Änderungen des Steuerstroms

Im Gegensatz zu langsamem Stromänderungen lassen sich die Auswirkungen schnell ansteigender Steuerströme nicht mit statischen Kennfeldern kompensieren. Wie in [7] beschrieben, kommt es in Abhängigkeit der Induktivität der Steuerspulen zu einem, gegenüber dem Stromanstieg, verzögerten Aufbau des Magnetflusses. Dies führt in Abhängigkeit der Steilheit des Stromanstiegs zu einer Überkompensation des Einflusses der Steuerströme. In [7] wurden dazu Untersuchungen durchgeführt und ein Verfahren beschrieben, mit dem die Auswirkungen der Feldverzögerung auf die Qualität des streuflussbasierten Messsystems reduziert werden können. Bei dieser Methode führt die diskrete Differentiation der gemessenen Steuerströme zu einer extremen Verstärkung des Signalrauschen, was eine nachträgliche Filterung notwendig macht. Dies führt allerdings dazu, dass die Kompensation der Feldverzögerung gerade dann weniger effektiv funktioniert, wenn der Stromanstieg am größten ist und damit auch das Positionssignal am meisten beeinflusst wird. Durch die Einführung eines vom Stromanstieg abhängigen Skalierungs-

faktors c der durch Gleichung 1 gegeben ist, lässt sich dieser Effekt reduzieren.

$$c = \frac{c_{\text{konstant}}}{\frac{dI}{dt} \cdot c_1 + 1} \quad (1)$$

3.1. Ermittlung der Stromanstiege durch Faltung des Eingangssignals mit einer Modulationsfunktion

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, ist die zeitliche Ableitung von gemessenen Größen aufwendig. Vor allem dann, wenn es sich um stark verrauschte Signale handelt. Mit der Faltung des gemessenen Signals mit einer Modulationsfunktion, steht ein weiteres Verfahren zur Bestimmung des Anstiegs der Steuerströme zur Verfügung. Dabei handelt es sich um die Verknüpfung zweier Funktionen $f(t)$ und $g(t)$ zu einer Ausgangsfunktion $h(t)$ wie folgt:

$$\begin{aligned} h(t) &= f(t) * g(t) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau \end{aligned} \quad (2)$$

Die Funktion $f(t)$ stellt das Messsignal dar, welches mit der Modulationsfunktion $g(t)$ mittels Faltungsprodukt verknüpft wird [8]. Die modulierende Funktion ist durch sogenannte Fensterfunktionen definiert. Für die vorliegende Anwendung werden typischerweise Hann-, Hamming- oder Blackman-Fenster gewählt. Hierbei handelt es sich um Funktionen, die analytisch differenziert werden können. Führt man die Faltung mit der Ableitung einer solchen Funktion durch, stellt die Ausgangsfunktion $h(t)$ die Ableitung des Messsignals dar. Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Probleme mit Signalen, die einen geringen Rauschabstand aufweisen, treten hierbei nur in einem sehr geringen Umfang auf. Durch die Wahl der Abtastpunkte lässt sich die Qualität der Ausgangsfunktion beeinflussen. In der vorliegenden Arbeit wurde das Blackmann-Fenster implementiert. Die Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen je ein Beispiel mit 16 und 128 Abtastpunkten. Je höher die Anzahl der Abtastpunkte gewählt wird, desto weniger verzerrt ist das Ausgangssignal, weist aber

eine größere Verzögerung auf, wie in Abbildung 8 verdeutlicht wird.

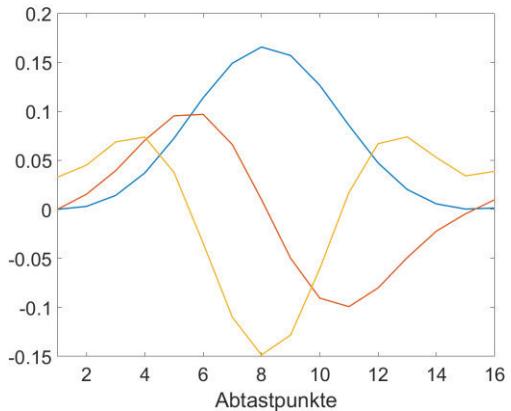


Abbildung 6 Blackman-Fensterfunktion (blau) mit 1. (rot) und 2. Ableitung (gelb). Die Anzahl der Abtastpunkte beträgt 16.

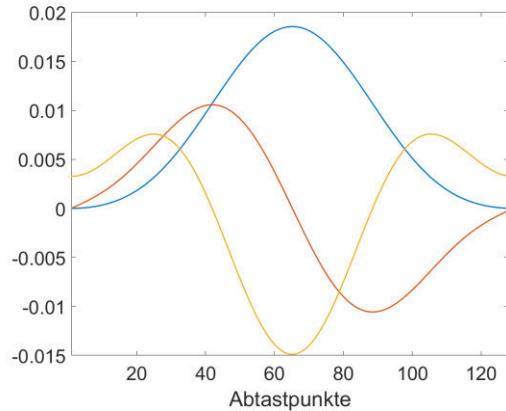


Abbildung 7 Blackman-Fensterfunktion (blau) mit 1. (rot) und 2. Ableitung (gelb). Die Anzahl der Abtastpunkte beträgt 128.

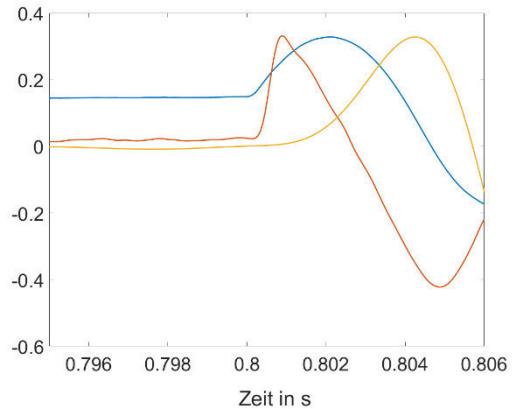


Abbildung 8 Delay des Ausgangssignals in Abhängigkeit der Anzahl der Abtastpunkte. Stromverlauf (blau) und Abgeleitete Funktion mit 16 (rot) und 128 (gelb) Abtastpunkten.

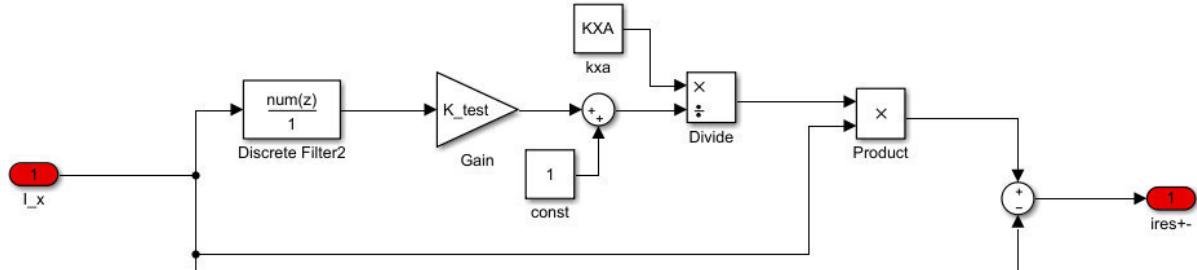


Abbildung 9 MATLAB-Simulink-Modell der Faltung des Steuerstroms der x-Achse.

$$i_{\text{res},a} = i_{\text{res},x} - i_{\text{res},y} \quad (4)$$

Da sich zu große Verzögerungen und zu stark verzerrte Ausgangssignale negativ auf die Kompensation der Feldverzögerung auswirken, muss hier ein günstiger Kompromiss gefunden werden.

4. Implementierung auf einem Echtzeit-system

Die Verarbeitung der gemessenen HALL-Signale und der Steuerströme wurde auf einem echtzeitfähigen DSpace-System mit einer Programmierschnittstelle zu MATLAB-Simulink umgesetzt. Die Faltung der Steuerströme wurde mit Hilfe des Funktionsblocks DISCRETE FILTER, durch Eintragen der ersten Ableitung der Blackman-Funktion in den Zähler realisiert. Diese wird vorab berechnet und im Speicher hinterlegt. Abbildung 9 zeigt das Simulink-Modell zur Signalverarbeitung des Steuerstroms der x-Achse. Zunächst wird die Ableitung des Stroms gebildet. Im Anschluss wird ein resultierender Strom $i_{\text{res},x}$ gegeben durch

$$i_{\text{res},x} = \frac{k_{xa}}{\frac{di_x}{dt} + 1} \cdot i_x \quad (3)$$

berechnet. Bei einem konstanten Strom wird der Nenner Eins und der Steuerstrom unverändert zur Linearisierung des Messsignals genutzt. Kommt es durch Störeinflüsse oder sprungartige Sollwertänderungen der Rotorlage zu einem steilen Ansteigen des Stroms, wird der Nenner größer als Eins, wodurch der resultierende Strom kleiner als der gemessene Steuerstrom wird. Danach schließt sich eine Subtraktion mit dem resultierenden Strom der y-Achse $i_{\text{res},y}$ an.

Dieser ist in der Abbildung 9 mit $i_{\text{res},+}$ bezeichnet und dient neben dem Differenzsignal der beiden HALL-Sensoren an den Positionen OBEN (C1) und UNTEN (C3) als Eingangssignal für eine LookUp-Tabelle. Für die zweite Messsystemachse, die durch das Differenzsignal der Sensoren LINKS (C2) und RECHTS (C4) gegeben ist, wird in gleicher Weise verfahren. Man erhält so die linearisierten Messsystemachsen a (C1-C3) und b (C2-C4). Diese sind bezogen auf die Lagerachsen x und y um 45° verdreht. Um das streuflussbasierte Messsystem für die Regelung der Rotorposition nutzen zu können, ist demnach eine Rotation der a- und b-Achse notwendig. Dies wird durch eine Multiplikation mit einer Drehmatrix D_{rot} gegeben durch

$$D_{\text{rot}} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{-\pi}{4}\right) & \sin\left(\frac{-\pi}{4}\right) \\ -\sin\left(\frac{-\pi}{4}\right) & \cos\left(\frac{-\pi}{4}\right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

erreicht. Nach der Rotation stehen Positionssignale in den Lagerachsen x und y zur Verfügung. Abbildung 10 zeigt die Linearisierung und Rotation beider Messsystemachsen in MATLAB-Simulink.

5. Ergebnisse

Das in Abbildung 11 dargestellte Versuchslager ist zusätzlich mit einem kapazitiven Messsystem ausgestattet, das als Referenzsystem dient. Um das streuflussbasierte Messsystem bewerten zu können, wurde eine Sprungantwort der Rotorposition in der x-Achse aufgenommen. Es zeigt sich, wie in Abbildung 12 zu sehen, dass das streuflussbasierte Messsystem die tatsächliche Rotorposition, die durch das Referenzmesssystem repräsentiert wird, gut

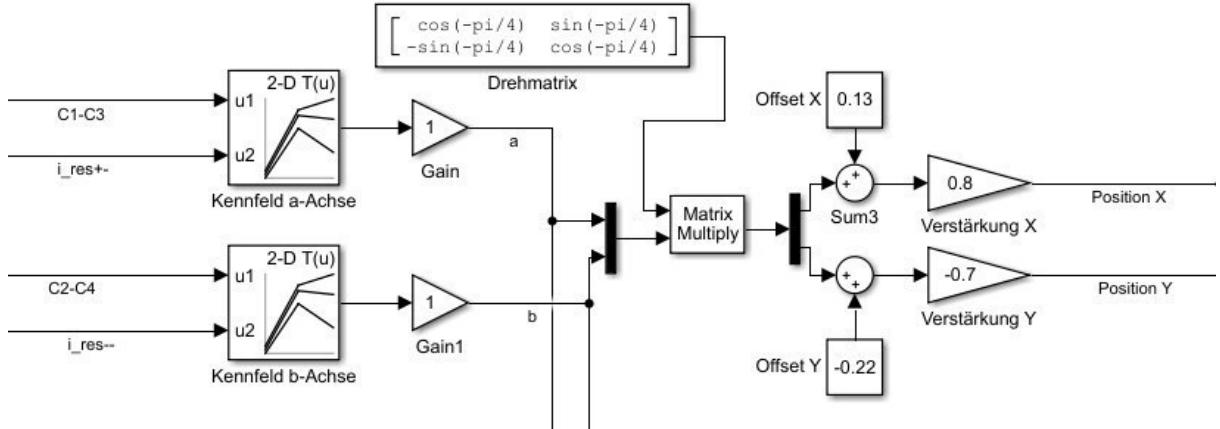


Abbildung 10 MATLAB-Simulink-Modell der Linearisierung durch LookUp-Tabellen mit hinterlegten Kennfeldern für die beiden Messsystemachsen a und b mit anschließender Rotation in die Lagerachsen x und y durch Multiplikation mit einer Drehmatrix.

abbildet. Es treten keine Abweichungen auf, die durch die Effekte der Feldverzögerung hervorgerufen werden. Da bei einem Positionssprung des Rotors mit sehr großen Stromanstiegen zu rechnen ist, muss davon ausgegangen werden, dass die genannten Effekte in solch einem Fall verstärkt zu beobachten sind.

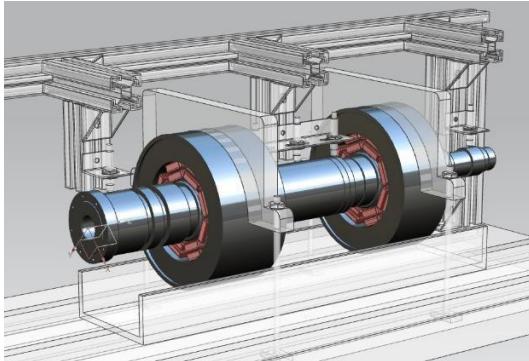


Abbildung 11 CAD-Modell des Versuchslagers.

Verglichen mit dem Signal des kapazitiven Referenzmesssystems, weist das streuflussbasierte Messsystem jedoch einen deutlich kleineren Rauschabstand auf. Die Ursachen hierfür sind zum einen in der Positionierung der HALL-Sensoren zu suchen. Diese befinden sich in unmittelbarer Nähe zu den Lagerspulen. Ein weiterer Aspekt der sich ungünstig auf die Signalqualität auswirkt sind die geringen Flussdichten der Streuflüsse und die sehr kleine Änderung dieser bei Variation der Rotorposition. Unter diesen Voraussetzungen konnte ein Schweben des Rotors erreicht werden. Die Robustheit gegen Störungen war jedoch gering.

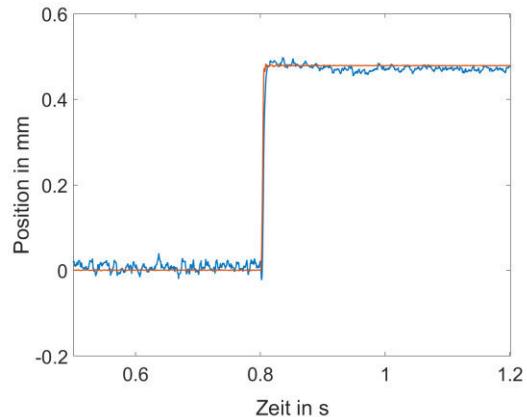


Abbildung 12 Sprungantwort der Position in der x -Achse. Das Referenzmesssystem ist rot und das streuflussbasierte Messsystem blau dargestellt.

6. Ausblick und Zusammenfassung

Mit den beschriebenen Maßnahmen konnte die Qualität des streuflussbasierten Messsystems deutlich verbessert werden. Hinsichtlich der Linearität des Messverfahrens konnte durch die Implementierung von Kennfeldern mittels LookUp-Tabellen eine gute Abbildung der Rotorposition erreicht werden. Die negativen Auswirkungen einer, durch Feldverzögerungseffekte verursachten Überkompensation der Stromeinflüsse, wurde auf ein Minimum reduziert. Die Verbesserung der Signalqualität der gemessenen Steuerströme und HALL-Spannungen steht bisher noch. In weiterführenden Untersuchungen ist zu klären, wie der Signalrauschabstand verbessert werden kann. Mögliche Optionen hierfür sind, verbesserte Filteralgorithmen oder

Schätzverfahren, bei denen ein Modell des Lagers zum Einsatz kommt. Gelingt es die Signalqualität zu verbessern, stellt das streuflussbasierte Messsystem eine kostengünstige Alternative zu konventionellen Messverfahren dar. Besonders die Kollokation von Mess- und Lagerebene zeichnet dieses Verfahren gegenüber typischerweise eingesetzten Systemen aus, bei denen die Abstandssensoren meist nicht in der gleichen Ebene angeordnet sind, in der auch die Kraftwirkung auf den Rotor zu finden ist. Dies kann bei ungünstigen Rotorformen, wie z.B. verhältnismäßig langen Rotoren, zu unerwünschten Dislokationseffekten führen.

Literatur

- [1] Skricka.N, "Entwicklung eines sensorlosen aktiven Magnetlagers", VDI, 2004
- [2] Herzog. R et al."SELF-SENSING OF NON-LAMINATED AXIAL MAGNETIC BEARINGS: MODELLING AND VALIDATION", 11th International Symposium on Magnetic Bearings, August 26-29, Nara, Japan, 2008
- [3] Gruber W., Stöckler M. "On the self-sensing technique based on the interlink voltage of two serially connected phase coils", 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, p. 645-651, ISSN: 2164-5256, Sydney, June 2015
- [4] Bahr F. et al. "Flux Based Control and Monitoring of Active Magnetic Bearings Using Ultra-Thin and Flexible Bismuth Hall Sensors", 9. Workshop Magnetlagertechnik Zittau/Chemnitz, p. 96, Oct. 2013.(in German)
- [5] Rudolph J. et al. "Measurement of the rotor position of an active magnetic bearing using interpolar stray flux", 1st Brazilian Workshop on Magnetic Bearings, 2013, Rio de Janeiro
- [6] Maximov I. "Bestimmung der Wellenposition in einem aktiven magnetischen Lager in Abhängigkeit auftretender Streuflüsse", Diplomarbeit, Technische Universität Chemnitz, 2013
- [7] Rudolph J. et al. „Effect of Eddy Currents on the Stray Flux Based Measurement System for Magnetic Bearing“, 14th International Symposium on Magnetic Bearings, August 11-14, Linz, Austria, 2014
- [8] Vogt M. "Weiterentwicklung von Verfahren zur online-Parameterschätzung und Untersuchung von Methoden zur Erzeugung zeitlicher Ableitungen", Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt, 1998

