

D I P L O M A R B E I T

Inbetriebnahme eines hochzuverlässigen Magnetlagers

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

A.o.Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Johann Wassermann
Projektass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Schulz
E325/A4
Institut für Mechanik und Mechatronik
Abteilung Messtechnik und Aktorik, TU-Wien

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Jonathan Pröll
0352024
Kundmanngasse 7
A-1030 Wien

Wien, Juni 2011

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Durchführung dieser Diplomarbeit so kraftvoll unterstützt haben.

Einen besonderen Dank möchte ich Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johann Wassermann und Projektass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Schulz aussprechen, die mich stets unterstützt haben und mir mit Rat und Tat zur Seite standen.

Widmen möchte ich diese Arbeit meinen Eltern, die mich nicht nur finanziell unterstützt und mir das Studium ermöglicht haben.

Kurzfassung

Als Alternative zu Wälzlagern und Gleitlagern bieten aktive Magnetlager (AMB) einige Vorteile. Dazu gehören unter anderem die Berührungsfreiheit der Lagerung und damit das Fehlen von Materialabrieb sowie die Ölfreiheit und die Veränderbarkeit der Steifigkeit und der Dämpfung während des Betriebs. So kann das Magnetlager schnell an wechselnde Betriebsbedingungen angepasst werden. Zu den Nachteilen der aktiven Magnetlager gehört bis heute die aufgrund der Vielzahl der elektronischen Bauteile nicht immer ausreichende Zuverlässigkeit.

Im Rahmen des FWF-Forschungsprojekts „Ein anspruchsvolles Konzept für höchste AMB Zuverlässigkeit“ wird seit 2006 am Institut für Mechanik und Mechatronik der Technischen Universität Wien von Dr.techn. Alexander Schulz ein hochzuverlässiges Magnetlager entwickelt. Dieses weist vollständig entkoppelte Magnetlagerzweige bestehend aus austauschbaren Elektromagneten mit zugeordneten lokalen Abstandssensoren sowie sogenannten Hot Swap Controller Amplifier Modulen (HCA) auf. Jedes HCA-Modul besitzt einen Regler, Leistungsverstärker sowie eine lokale Fehlererkennung. Tritt während des Betriebs ein Fehler auf, wird der betreffende Magnetlagerzweig abgeschaltet. Alle Komponenten der Magnetlagerzweige können im Betrieb ausgetauscht werden ohne die Funktion des Magnetlagers zu beeinträchtigen. Dadurch kann die Zuverlässigkeit und Lebensdauer des Magnetlagers erheblich gesteigert werden.

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist die Inbetriebsetzung dieses hochzuverlässigen Magnetlagers. Es wurden alle fehlenden und unbekanntesten Bestandteile ausgemessen sowie eine Überwachungssoftware für das Magnetlagersystem mit LabVIEW programmiert.

Aufbauend auf der Arbeit von Klaus Bergkirchner wurde ein Versuchsstand zur Messung der magnetischen Kraft eines Elektromagneten ausgebaut und erweitert. Die B-H-Kennlinie des im Magnetlager verwendeten Materials wurde gemessen um diese in die MATLAB-Simulation des Magnetlagers integrieren zu können. Weiters wurden die lokalen Abstandssensoren kalibriert und die Magnetlagerregelung entsprechend angepasst. Alle Komponenten des Magnetlagers wurden schließlich getestet, sodass am Ende dieser Arbeit ein voll funktionsfähiges Magnetlager für weitere Untersuchungen zur Verfügung steht.

Abstract

As an alternative solution to roller bearings and journal bearings an active magnetic bearing (AMB) has a number of advantages. The main advantages are the contactless force-generation, no mechanical friction, the absence of oil and the adjustable stiffness and damping parameters while operating to adjust to changing conditions. One of the main drawbacks of active magnetic bearings is the not always sufficient reliability, which is decreased by a multitude of electronic elements.

During the FWF-research project „Ein anspruchsvolles Konzept für höchste AMB Zuverlässigkeit“ a highly reliable active magnetic bearing has been developed at the Department of Mechanics and Mechatronics at the Vienna University of Technology by Dr.techn. Alexander Schulz. It features fully decoupled electromagnet-channels with exchangeable electromagnets, local distance sensors and so-called Hot Swap Controller Amplifier modules (HCA-modules). Each HCA consist of a controller, power amplifier and a local error detection. If there occurs an error while operating, the concerning EM-channel is switched off. All the components of each magnet-module can be exchanged while operating without affecting the functioning of the active magnetic bearing. Thus the reliability and durability can be increased extensive.

The aim of this diploma thesis is to bring this high-reliable magnetic bearing into service. All missing and unknown components were measured and a monitoring software was programmed using LabVIEW.

Based on the preparatory work by Klaus Bergkirchner a test rig for measuring the magnetic force of electromagnets was completed and extended. The behavior of the magnetic material was measured and built into a MATLAB simulation of the AMB. Furthermore the distance sensors were calibrated and the control of the magnetic bearing was adjusted to them. Finally all components were assembled and tested to find a fully working magnetic bearing for further investigations at the end of this diploma thesis.

Inhaltsverzeichnis

1. Grundlagen: Magnetlager	8
1.1. Definition Magnetlager	8
1.2. Arten von Magnetlagern	8
1.2.1. Einteilung nach der magnetischen Kraftgenerierung	8
1.2.2. Einteilung nach der Magnetanordnung	10
1.3. Anwendung von AMBs	11
1.3.1. Vor- und Nachteile von aktiven Magnetlagern	11
1.3.2. Anwendungsbeispiele	12
2. Das hochzuverlässige Magnetlager	14
2.1. Überblick	14
2.2. Elektromagnet-Modul	19
2.3. HCA-Modul	19
2.3.1. Energieversorgung	21
2.3.2. Regler und Fehlererkennung	21
2.3.3. Schaltverstärker	21
3. Aufnahme der B-H-Kennlinien	22
3.1. Grundlagen	22
3.1.1. Magnetische Feldstärke, Durchflutungssatz	22
3.1.2. Magnetische Flussdichte, Gauß'sches Gesetz	23
3.1.3. Induktionsgesetz	23
3.2. Zusammenhang: Messgrößen - B-H-Kennlinie	23
3.2.1. Messaufbau	23
3.2.2. Magnetisches Feld H	24
3.2.3. Magnetische Flussdichte B	24
3.3. Auslegung der Messschaltung	25
3.4. Aufnahme der Kennlinien	29
3.4.1. Probenmaterial M111-35N	29
3.4.2. Probenmaterial Vacoflux 50	35
4. Simulation des AMB	42
4.1. MATLAB-Simulation des AMB-Systems	42
4.2. FE-Simulation des magnetischen Flusses	45
4.2.1. Erstellung der Geometrie	45
4.2.2. Definition der Materialien und Grenzen	45

Inhaltsverzeichnis

4.2.3. Lösung mit <i>femm4.2</i>	46
4.3. Analytische Berechnung der Magnetkräfte	47
4.3.1. Magnetische Widerstände der Teilbereiche	48
4.3.2. Magnetischer Fluss und Magnetische Kraft	50
4.4. Anpassung und Berechnung mit M111-35N	52
5. Selsensing-Versuchsstand	54
5.1. Kalibrieren des Referenzwirbelstromsensors	55
5.2. Kalibrierung der DMS-Vollbrücke	55
5.2.1. Ausmessen des Brückenverstärkers	56
5.2.2. Direkte Kalibrierung der DMS-Vollbrücke	58
6. Kalibrieren der EM-Wirbelstromsensoren	59
6.1. Die automatisierte Kennlinienaufnahme	59
6.2. Kennlinien der EM-Wirbelstromsensoren	60
7. Überwachungssoftware	61
7.1. Messsignale	61
7.2. Beschreibung der Überwachungssoftware	62
7.2.1. Eingabeblock	62
7.2.2. Messblock für LiveView	63
7.2.3. Messblock für die Datenerfassungskarte	63
7.2.4. Steuerungsblock	64
7.2.5. Auswerteblock	64
8. Inbetriebnahme des hochzuverlässigen AMB	66
8.1. Empfindlichkeit der Wirbelstromsensoren	66
8.2. AMB-Funktionstest	67
9. Zusammenfassung	71
Abbildungsverzeichnis	73
Literaturverzeichnis	76
A. Kennlinien der EM-Wirbelstromsensoren	78
B. Anleitung für die Überwachungs- software des Magnetlagers	81
B.1. Projekt, VIs, benötigte Dateien	81
B.2. Programmaufruf	82
B.3. Steuerung	82
B.3.1. „LiveView“	82
B.3.2. Module anwählen	83
B.3.3. Stromregelung	83
B.3.4. Positionsregelung	84

Inhaltsverzeichnis

B.3.5.	Datentrigger	84
B.3.6.	Sonstige Befehle	84
B.3.7.	Daten simulieren	84
B.3.8.	Exit	85
B.3.9.	Stopp	85
B.4.	Positionsdarstellung	85
B.4.1.	Datenanzeige	85
B.5.	Registerkarte	86
B.5.1.	Tab: Signalverläufe	86
B.5.2.	Tab: Einstellungen ändern	86
B.5.3.	Tab: WWS kalibrieren	87
B.5.4.	Tab: für Programmierer	88
B.6.	Fehlerbehebung	88
B.6.1.	Das Programm „serielleschnittstelle.exe“ wird nicht gestartet .	88
B.6.2.	Initialisierung von „LiveView“ funktioniert nicht	89
B.6.3.	DAQmx - Fehler	89
B.6.4.	Kontrollwirbelstromsensoren funktionieren nicht	89

1. Grundlagen: Magnetlager

1.1. Definition Magnetlager

Magnetlager ermöglichen die kontaktfreie Lagerung einer Struktur (typischerweise eines Rotors) in einem Magnetfeld. Durch magnetische Kräfte zwischen Lager und Rotor wird der nötige Abstand gehalten damit kein Kontakt entsteht. Je nach Typ des Magnetlagers wird die magnetische Kraft unterschiedlich erzeugt. Die einzelnen Magnetlagertypen werden in Abschnitt 1.2 angeführt.

1.2. Arten von Magnetlagern

Magnetlager können nach verschiedenen Kriterien eingeteilt werden. Hier werden Einteilungen nach der Generierung der Lagerkraft bzw. nach der Magnetanordnung getroffen und die wichtigsten Begriffe erklärt.

1.2.1. Einteilung nach der magnetischen Kraftgenerierung

Passive Magnetlager

Passive Magnetlager halten durch geeignete Anbringung von Dauermagneten den Luftspalt aufrecht. Durch passive Magnetlager können jedoch nicht alle Achsen einer Welle stabil gelagert werden. Mit Hilfe diamagnetischer Materialien könnten rein passive Magnetlager realisiert werden. In diamagnetischen Materialien (z.B.: Bismut) nimmt das Magnetfeld mit der Tiefe ins Material ab. Das heisst, das Material weicht dem Magnetfeld aus. Auch supraleitende Materialien verdrängen das Magnetfeld unterhalb ihrer Sprungtemperatur. Sie haben die Eigenschaft, dass sie unter der Sprungtemperatur keinen messbaren elektrischen Widerstand mehr besitzen und wie diamagnetische Materialien das Magnetfeld verdrängen.

Aktive Magnetlager (AMB - Active Magnetic Bearing)

Bei AMBs wird die magnetische Kraft über Abstandssensoren und geeignete Elektronik geregelt. Abb. 1.1 zeigt das Prinzipschema eines aktiven Magnetlagers. Basierend auf der Abstandsmessung (Gap Sensor) wird über die einzelnen am Eisenkern angebrachten Wicklungen ein Magnetfeld induziert, das eine magnetische Kraft im Luftspalt bewirkt. In Abb. 1.1 übernimmt ein Microprozessor die Regelung der La-

1. Grundlagen: Magnetlager

gerkraft. Leistungsverstärker (Power Amplifier) liefern die erforderliche Stromstärke zur Kraftgenerierung. Ab Kapitel 1.3 werden nur noch AMBs diskutiert.

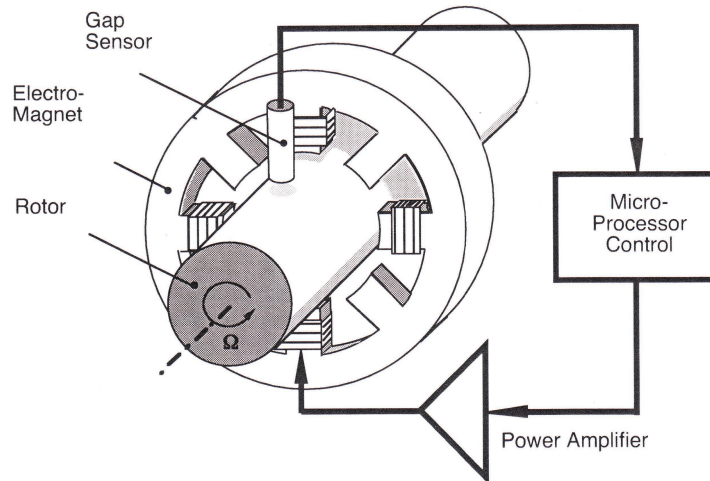


Abbildung 1.1.: Schema eines Magnetlagers aus [10]

Hybridlager

Hybridlager stellen eine Mischung aus passiven und aktiven Magnetlagern dar. Sie bestehen aus einer gewissen Anzahl an Permanentmagneten und mindestens einem Elektromagneten, über den der Luftspalt geregelt wird.

Elektrodynamische Magnetlager

Elektrodynamische Magnetlager kommen ohne aktive Regelung aus. Die nötige Kraftwirkung, um den Luftspalt aufrecht zu erhalten, wird durch starke Wirbelströme erzeugt. Diese Wirbelströme im Magnetmaterial können durch hochfrequenten Wechselstrom oder durch eine schnelle Bewegung zwischen Rotor und Stator erzeugt werden. Je höher die Wirbelströme sind, desto höher sind auch die Lagerverluste, weshalb das elektrodynamische Lager meist mit Supraleitern realisiert wird.

1.2.2. Einteilung nach der Magnetanordnung

Homopolaranordnung

Abb. 1.2 zeigt die Magnetanordnung eines Homopolarlagers. Die Magnete werden in axialer Richtung so angeordnet, dass die Magnetisierungsrichtung immer gleich ist. Das hat den Vorteil geringerer Hystereseverluste im Rotor durch eine einheitliche N-S-Anordnung (siehe Abb.1.2), jedoch können Wirbelstromverluste nicht wie bei der Heteropolaranordnung durch Blechung des Rotors reduziert werden.

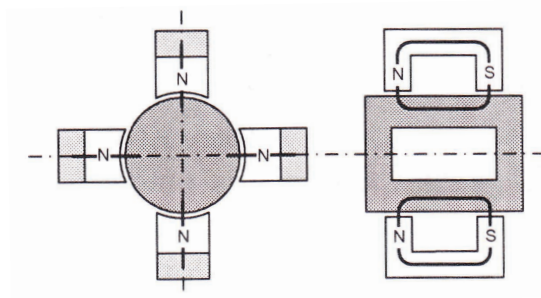


Abbildung 1.2.: Homopolarlager [10]

Heteropolaranordnung

Bei Heteropolarlagern sind die Magnete in tangentialer Richtung angeordnet. Abb. 1.3 zeigt das Schema eines Heteropolarlagers. Die Hystereseverluste sind aufgrund der Anordnung höher als beim Heteropolarlager, da im Rotor bei der Rotation eine ständige Ummagnetisierung auftritt. Die Elektromagnete werden üblicherweise mit N-S-S-N, wie in Abb. 1.3 gezeigt, angeordnet. Im Vergleich zu einer N-S-N-S-Anordnung vermindert das Hysterese- und Wirbelstromverluste. Da bei dieser Magnetanordnung eine Blechung des weichmagnetischen Rotorteils möglich ist, können Wirbelstromverluste sehr gering gehalten werden [10].

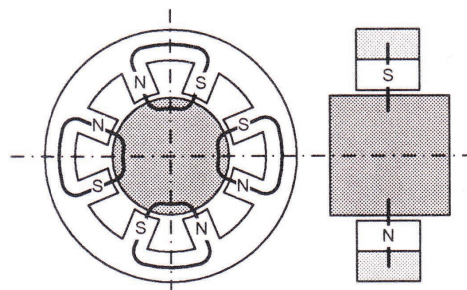


Abbildung 1.3.: Heteropolarlager [10]

1.3. Anwendung von AMBs

1.3.1. Vor- und Nachteile von aktiven Magnetlagern

Die Anwendungsbereiche der aktiven Magnetlager stehen in engem Zusammenhang mit den Vor- und Nachteilen der Magnetlager gegenüber konventionellen Lagern.

AMBs weisen folgende Vorteile auf:

- keine Lagerreibung
 - keine Lagerreibungsverluste
 - keine mechanische Abnutzung
 - keine Schmiermittel erforderlich
- höchste Drehzahlen möglich
- Lagereigenschaften (Dämpfung, Steifigkeit) können auch im Betrieb verändert werden
- Systemüberwachung ist mittels der bereits vorhandenen Sensorik möglich

Nachteile von AMBs sind:

- hohe Systemkomplexität
- geringe Kraftdichte
- Stromversorgung erforderlich

Daraus ergeben sich folgende Hauptanwendungsgebiete:

- Vakuum-Technologie
- Turbinenbau
- Schwungradspeicher (Flywheels)
- Raumfahrt
- Medizintechnik, z.B.: Blutpumpen
- Berührungsfreie Lagerung von Micro-Bauteilen
- Identifikation und Testen von Rotoreigenschaften

Das größte Anwendungsgebiet ist nach [10] der Turbinenbau. Hier reicht die Anwendung von kleinen Turbomolekularpumpen über Kompressoren und Turbinen für Gase bis zu großen Turbinen im Megawatt-Bereich für Kraftwerke.

1.3.2. Anwendungsbeispiele

Pipeline Kompressor

Die Abbildungen 1.4 und 1.5 zeigen das Konzept eines Pipeline-Kompressors der Firma MAN Diesel & Turbo [2] mit einer maximalen Leistung von 22 MW und einer maximalen Drehzahl von 9000 min^{-1} .

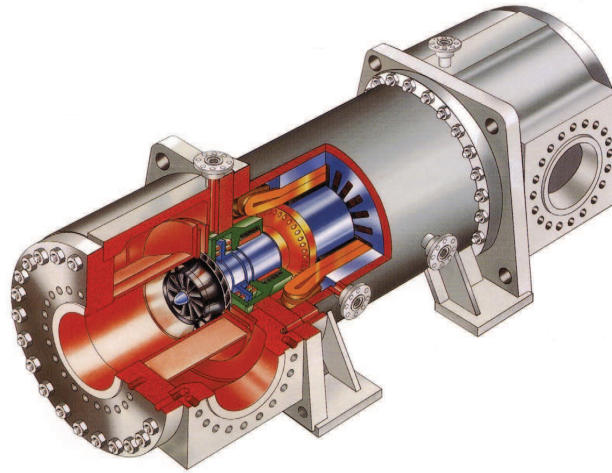


Abbildung 1.4.: Mopico Pipeline-Kompressor [2]

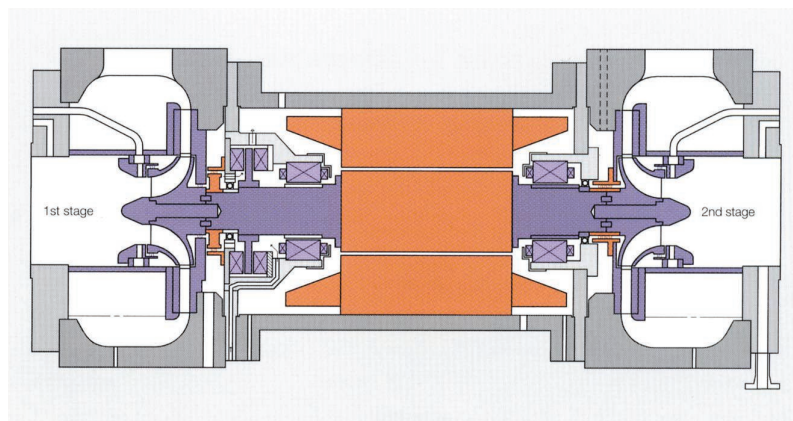


Abbildung 1.5.: Achsschnitt des Mopico Pipeline-Kompressors [2]

1. Grundlagen: Magnetlager

Turbomolekularpumpe

Abb. 1.6 zeigt eine Turbomolekularpumpe der Firma Pfeiffer Vacuum [4]. Sie liefert 2100 l/sec bei einer Drehzahl von 29400 min^{-1} .



Abbildung 1.6.: Turbomolekularpumpe [4]

2. Das hochzuverlässige Magnetlager

2.1. Überblick

Seit 2006 wurde an der Abteilung für Messtechnik und Aktorik des Instituts für Mechanik und Mechatronik der TU-Wien im Rahmen eines FWF-Forschungsprojekts ein hochzuverlässiges Magnetlager entwickelt. Aufgrund der Komplexität und der im Vergleich zu Wälz- und Gleitlagern bisher nicht immer überzeugenden Zuverlässigkeit von AMBs werden diese vielfach nicht verwendet, obwohl deren Anwendung diverse Vorteile brächte. Hier soll das hochzuverlässige Magnetlager Abhilfe schaffen und nicht nur die Zuverlässigkeit einzelner Teile sondern des Gesamtsystems wesentlich steigern. Fehlerhafte Baugruppen können während des Betriebs ausgetauscht werden.

Das hochzuverlässige AMB in einer realisierten Prototypversion besteht aus sechs Elektromagnet-Kanälen (EM-Kanälen, Abb. 2.1), die sich jeweils aus einem „hot-swap controller amplifier module“ (HCA-Modul) und einem Elektromagnet-Modul (EM-Modul) mit eingebautem Wirbelstromabstandssensor zusammensetzen (Abb. 2.1). Die einzelnen EM-Kanäle sind vollständig voneinander entkoppelt. In jedem EM-Kanal übernimmt das HCA-Modul die radiale Positionsregelung. Alle funktionsfähigen EM-Kanäle regeln unabhängig voneinander den Luftspalt zwischen den EMs und der Welle, während sich fehlerhafte Kanäle automatisch abschalten (heiße Redundanz). Die übrigen EMs sind so ausgelegt, dass sie die erforderlichen Lagerkräfte aufbringen können. Der Austausch der defekten Module während des Betriebs ermöglicht einen im Prinzip beliebig langen ausfallfreien Betrieb des Gesamtsystems. Abb. 2.2 und 2.3 zeigen das zusammengebaute Lager, Abb. 2.4 die Verstärkermodule der einzelnen EM-Module.

2. Das hochzuverlässige Magnetlager

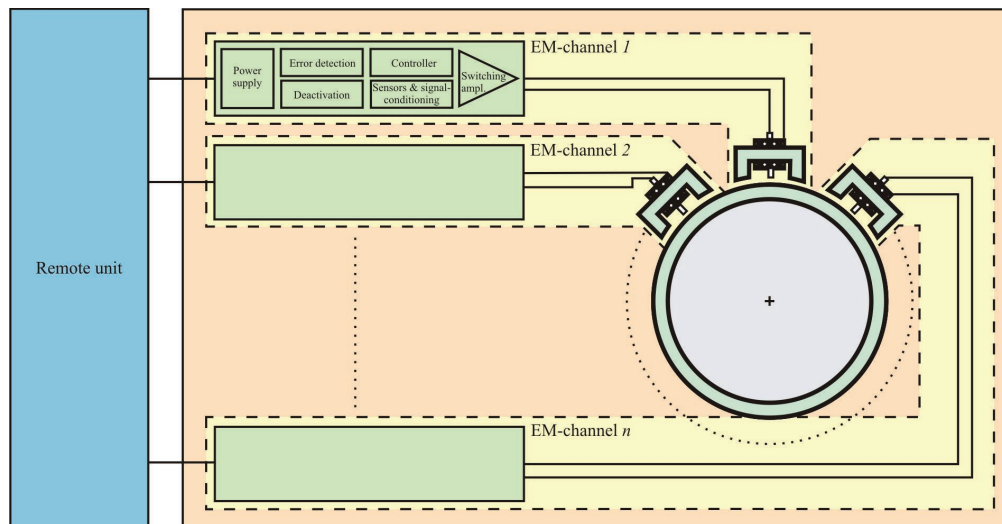


Abbildung 2.1.: Schematischer Aufbau des hochzuverlässigen AMB aus [7]

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden folgende Tätigkeiten durchgeführt, um das Magnetlager in Betrieb setzen zu können.

Die folgenden Aufgaben waren für die Diplomarbeit für das AMB durchzuführen

- Aufnahme der Magnetisierungskennlinien (B-H-Kennlinien, Kapitel 3)
- Integration der gemessenen B-H-Kennlinie des verfügbaren Materials, M11-35N, in das bereits vorhandene MATLAB-Simulationsmodell und simulation des Magnetlagers (Kapitel 4)
- Vervollständigung der Programmierung und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes - im Folgenden als „Selfsensing-Versuchsstand“ bezeichnet - zur Messung der magnetischen Kraft in Abhängigkeit des Luftspalts und des EM-Spulenstroms (Kapitel 5)
- Kalibrieren aller Wirbelstromsensoren zur Luftspaltermittlung (sechs im jeweiligen EM-Modul integrierte Sensoren und Referenzsensoren, Kapitel 6, siehe Abb. 2.2)
- Assemblierung des Magnetlagers bis zum fertigen Zustand in Abb. 2.3
- Erstellen und Testen einer Überwachungssoftware für das hochzuverlässige Magnetlager, Teil der Remote unit in Abb. 2.1
- Inbetriebnahme und Test des Magnetlagersystems, Funktionstest der HCA-Module
- Testen der Auswirkungen eines EM-Ausfalls auf das Magnetlager (Kapitel 8)

2. Das hochzuverlässige Magnetlager

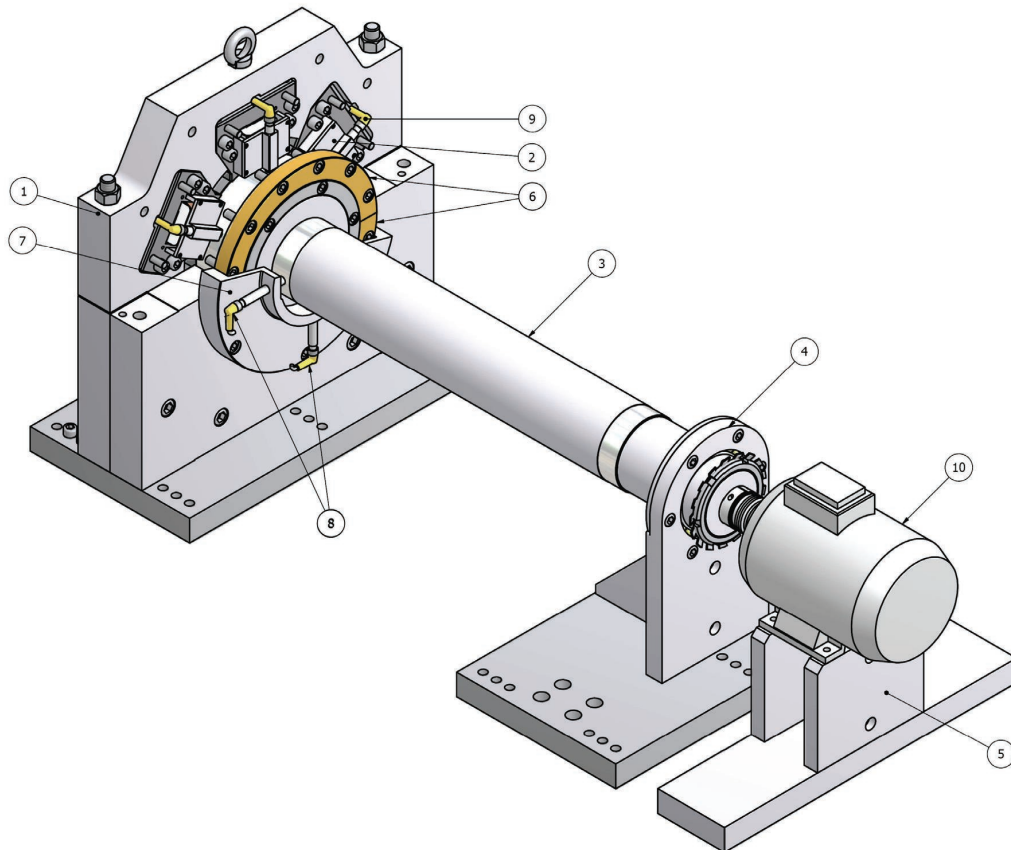


Abbildung 2.2.: 3D-Konstruktion des AMB-Versuchsstandes [6]

(1) Lagergehäuse, (2) EM, (3) Rotor, (4) Wälzlager, (5) Motoraufnahme, (6) Notlager, (7) Abdeckung des AMB, (8) Referenz-Wirbelstromsensoren, (9) lokaler Wirbelstromsensor, (10) Elektromotor

2. Das hochzuverlässige Magnetlager

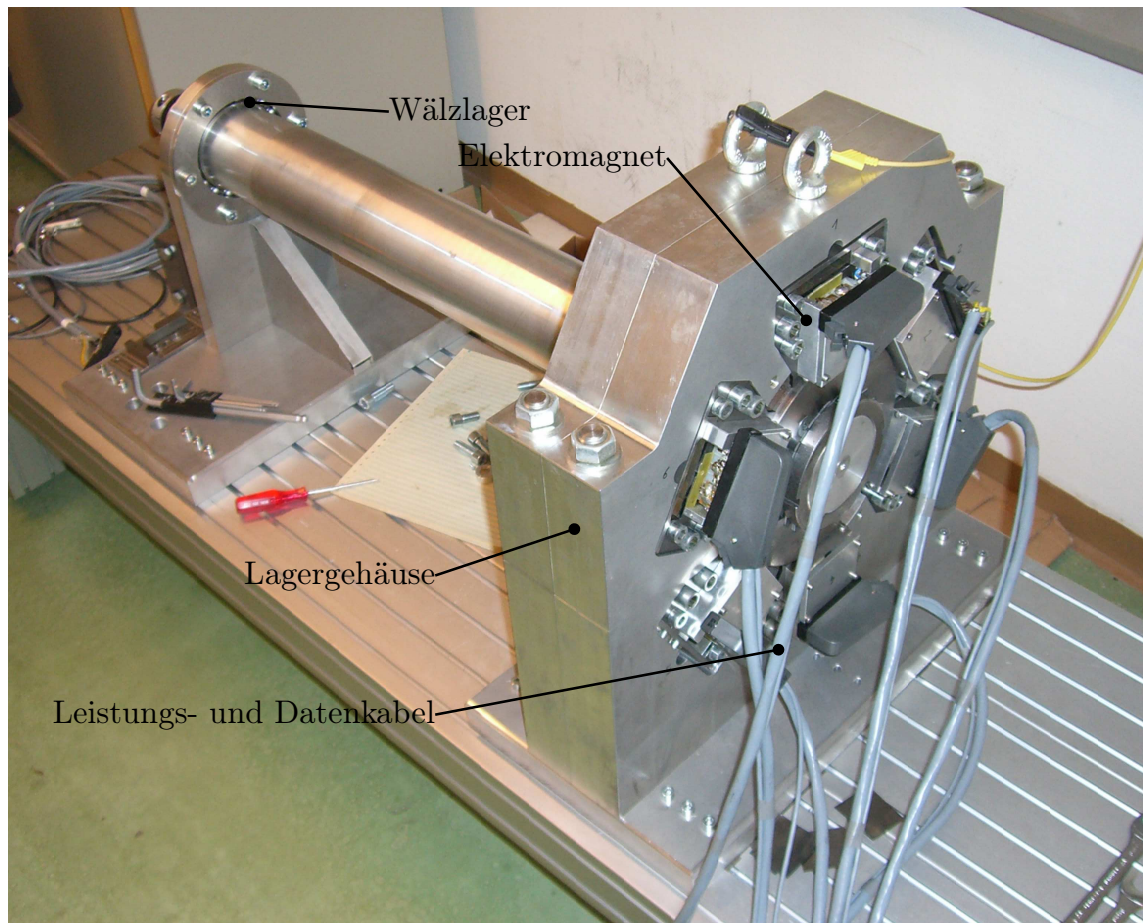


Abbildung 2.3.: Reale Ausführung des AMB-Versuchsstandes

2. Das hochzuverlässige Magnetlager



Abbildung 2.4.: Elektronikschaltschrank: HCA-Module 1, 3 bis 6 von unten nach oben, HCA-Modul 2 für Kontrollmessungen am Tisch, AMB-Versuchsstand im Hintergrund

2.2. Elektromagnet-Modul

Das Elektromagnet-Modul (EM-Modul) hat die Aufgabe, die Positionierung des Elektromagneten und des Wirbelstromsensors im Lagergehäuse sicherzustellen, das Messsignal der Abstandsmessung über die Messleitung an das HCA-Modul weiterzuleiten sowie die erforderliche Lagerkraft zu erzeugen. Es besteht aus einem weichmagnetischem Eisenkern aus M111-35N, einer Spule mit 28 Windungen, einem Wirbelstromsensor sowie Anschlüssen für die Leistungsversorgung und die Datenkommunikation. Abb. 2.5 zeigt eine 3D-Ansicht des EM-Moduls. Das EM-Modul wird über zwei M8 Schrauben mit dem Lagergehäuse verschraubt und mit der Spannvorrichtung gegen das Gehäuse verspannt.

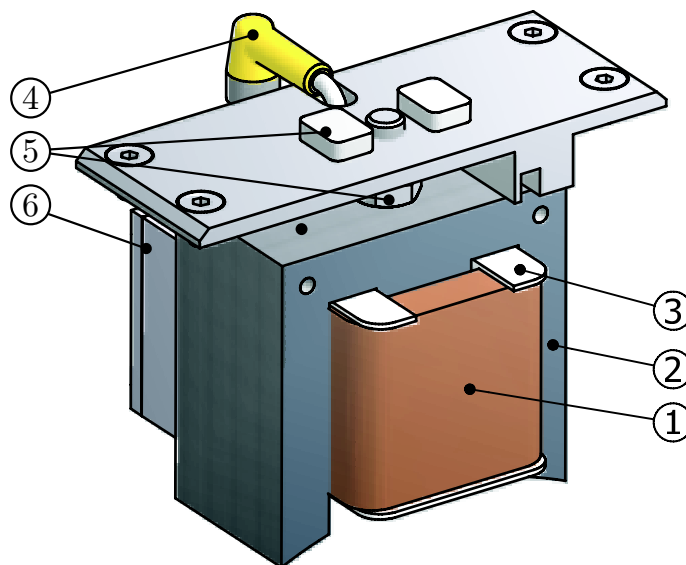


Abbildung 2.5.: 3D-Ansicht eines Elektromagneten sowie Montageplatte und Stecker des Wirbelstromsensors:

(1) Spule mit 28 Windungen, (2) Eisenkern aus M111-35N, (3) Isolation, (4) Wirbelstromsensor, (5) Spannvorrichtung, (6) Abdeckung hinten

2.3. HCA-Modul

Abb. 2.6 zeigt das Blockdiagramm eines HCA-Moduls. Das Modul besteht aus drei wesentlichen Blöcken, der Energieversorgung (Power supply), dem Regler samt Fehlerdetektion (Controller and error detection) und dem Schaltverstärker (switching amplifier) [7].

2. Das hochzuverlässige Magnetlager

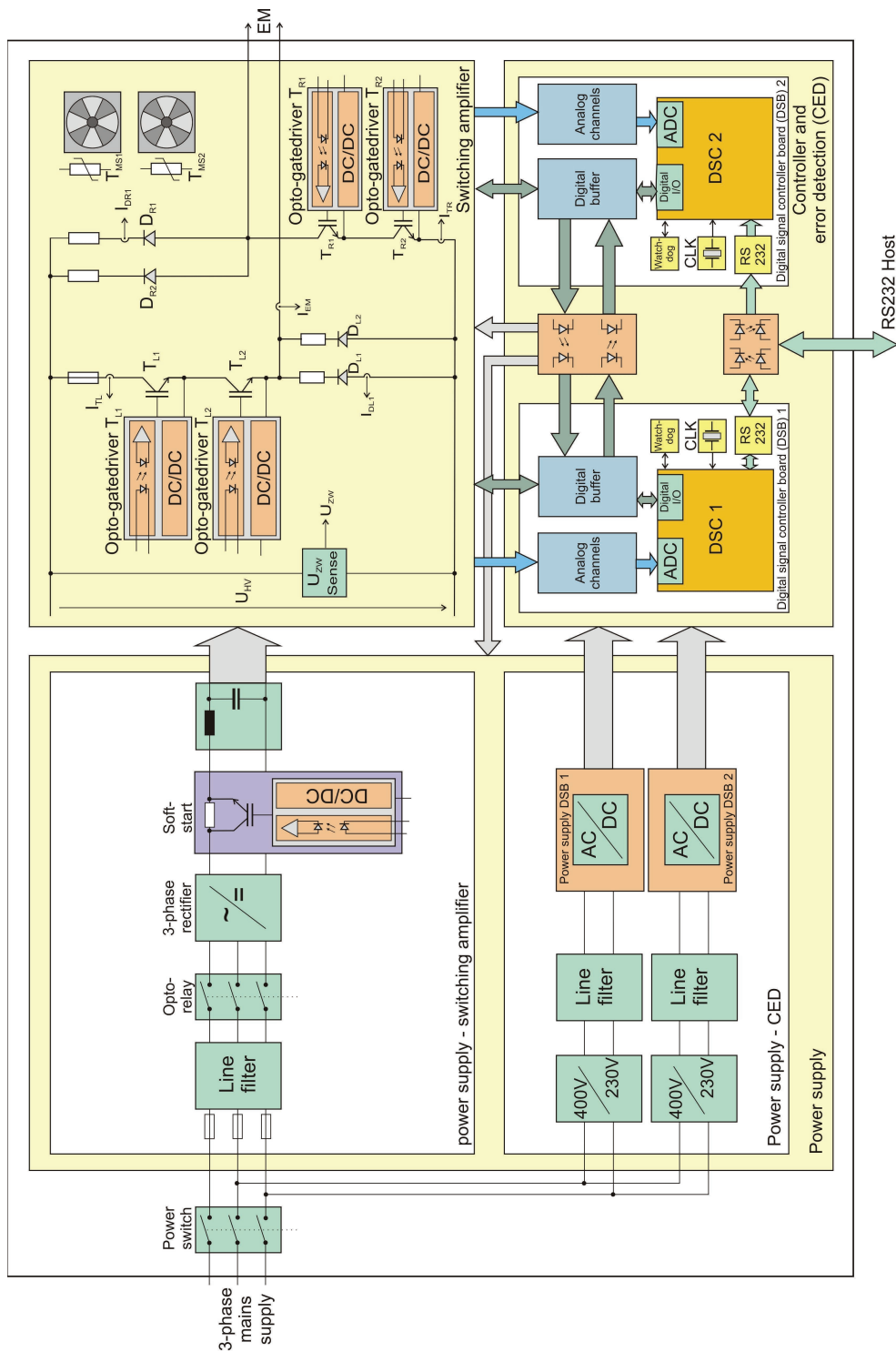


Abbildung 2.6.: Prinzip des HCA-Moduls aus [7]

2.3.1. Energieversorgung

Die Energieversorgung ist in zwei große Blöcke geteilt, die Versorgung des Leistungsteils (Schaltverstärker) und die Versorgung des Reglers und der Fehlererkennung. Die Versorgung des Schaltverstärkers erfolgt durch die Vollweg-Gleichrichtung aus dem Drei-Phasen-Netz. Eine Induktivität ist zur Reduktion von Stromspitzen aus dem Netz während des regulären Betriebs integriert, während ein „Soft-Start“-Kreis den Strom in der Start-Phase begrenzt. Weiters sind parallel Elektrolytkondensatoren geschaltet. Die Versorgung des Reglers und der Fehlererkennung erfolgt über Transformatoren, die die Spannung von 400 VAC auf 230 VAC transformieren, Netzfilter und Analog-Digital-Konverter (ADC).

2.3.2. Regler und Fehlererkennung

Die Reglereinheit und Fehlererkennung bestehen nach [7] aus zwei voneinander unabhängigen digitalen Signalprozessor-Boards (DSB). Die Versorgungsungen beider DSBs sind sowohl von der Hochspannungsversorgung des Schaltverstärkers als auch untereinander galvanisch getrennt. Auf den DSBs befinden sich digitale Signal Controller (DSC) mit integrierten ADC, Pulsweitenmodulatoren und RS232- sowie seriellen Hochgeschwindigkeitsinterfaces. DSC1 beinhaltet den Positionsregler, die Steuerung des Schaltverstärkers und die Fehlererkennung für DSC2. Im DSC2 ist das Programm zur Fehlererkennung für DSC1, für den Schaltverstärker, für die Hochspannungsversorgung und für die Kommunikation mit dem PC gespeichert. Beide DSC deaktivieren den EM-Kanal bei Erkennen eines Fehlers. Über die RS232-Schnittstelle erfolgt - galvanisch getrennt - die Kommunikation zwischen DSC1 und dem PC. DSC2 zeichnet die Kommunikation mit und unterbricht, wenn sie fehlerhaft ist. Das zeigt dem PC ein fehlerhaftes HCA-Modul an. Zwischen den beiden DSC ist die Kommunikation ebenfalls galvanisch getrennt über die serielle Hochgeschwindigkeitsverbindung (SPI) verwirklicht.

2.3.3. Schaltverstärker

Als Zwei-Quadranten-Schaltverstärker ausgeführt verfügt er über jeweils zwei in Serie liegende Transistoren und Freilaufdioden pro Halbbrücke. Dadurch können nach [7] alle Komponenten während des Betriebs auf Fehler geprüft werden und eine sichere Abschaltung trotz Fehler (z.B.: Unterbrechnung, Kurzschluss) gewährleistet werden. Über den Schaltverstärker wird schließlich der EM versorgt.

3. Aufnahme der B-H-Kennlinien

Die B-H-Kennlinie ist von grundlegender Bedeutung für die Anwendung in einem Magnetlager. Sie gibt den Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke H und magnetischer Flussdichte B an. Während H im Magnetlager durch die Durchflutung (Spulenstrom mal Windungszahl), verändert werden kann, ändert sich mit B die magnetische Kraft im Luftspalt. Der Zusammenhang zwischen B und H wird durch das verwendete Material vorgegeben und im B-H-Diagramm dargestellt.

Die wichtigsten Eigenschaften werden durch die relative Permeabilität μ_r , Sättigung und Hysterese des Materials beschrieben. μ_r gibt die relative Änderung von B zufolge einer Änderung von H an, ist also als Steigung im B-H-Diagramm abzulesen. Sie ist eine Funktion der Feldstärke H und der Erregerfrequenz. In der Sättigung hat das magnetische Material seine maximal mögliche Flussdichte B erreicht. Hier ist auch die maximal mögliche magnetische Kraft bei Annahme eines konstanten Luftspalts erreicht. Je breiter die Hystereseschleife ist, desto verlustreicher ist die Ummagnetisierung. Sie ist vom verwendeten Material und von der Erregerfrequenz abhängig.

Aufgrund der Bedeutung der B-H-Kennlinie für den Zusammenhang zwischen erzielter Stromstärke in der Spule und der im Luftspalt wirksamen Kraft, ist sie Bestandteil der MATLAB-Simulation des hochzuverlässigen AMB und muss bekannt sein.

3.1. Grundlagen

3.1.1. Magnetische Feldstärke, Durchflutungssatz

Betrachtet man einen mit dem Strom I durchflossenen Leiter, so bildet sich um diesen ein magnetisches Feld H . Der Zusammenhang zwischen dem Strom I und der magnetischen Feldstärke H ist durch den Durchflutungssatz gegeben:

$$\int_C \vec{H} d\vec{l} = I \quad (3.1)$$

Die Feldstärke H wird über eine beliebige, geschlossene Kurve integriert, die vom Strom durchflossen wird.

3.1.2. Magnetische Flussdichte, Gauß'sches Gesetz

Die magnetische Flussdichte B ist mit dem Fluss Φ definiert durch:

$$\Phi = \int_A \vec{B} d\vec{A} \quad (3.2)$$

Integriert man über eine ein Volumen vollkommen einschließende Fläche A , so ist der magnetische Fluss gleich Null.

$$\int_{A_0} \vec{B} d\vec{A} = 0 \quad (3.3)$$

3.1.3. Induktionsgesetz

Das Induktionsgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses in einer Spule mit N Windungen und der dadurch induzierten Spannung u . Mit Gleichung (3.2) ergibt sich auch ein Zusammenhang zwischen induzierter Spannung u und magnetischer Flussdichte B .

$$u = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.4)$$

3.2. Zusammenhang: Messgrößen - B-H-Kennlinie

3.2.1. Messaufbau

Ein Frequenzgenerator gibt eine Wechselspannung mit der Frequenz f_0 vor. Um den für die volle Aussteuerung des Magnetmaterials notwendigen Strom zu erreichen, wird ein Leistungsverstärker zwischengeschaltet. Im Primärstromkreis wird das Material mit N_1 Windungen umwickelt und der Strom I mit einer Strommesszange induktiv gemessen. Im Sekundärstromkreis wird der magnetische Kern mit N_2 Windungen umwickelt und die Spannung u gemessen. Die Spannung wird über eine Datenerfassungskarte und LabVIEW über den PC ausgewertet. Die Strommesszange generiert eine zum Strom proportionale Spannung, die ebenfalls über die Datenerfassungskarte und LabVIEW gemessen wird. Abb. 3.1 zeigt schematisch den Messaufbau. Gemessen werden der

- Primärstrom und die
- Sekundärspannung.

Ziel der Messung ist es, sich aus dem Primärstrom und der Sekundärspannung die magnetische Feldstärke H und die magnetische Flussdichte B zu berechnen und so ein B-H-Diagramm zu erstellen.

3. Aufnahme der B-H-Kennlinien

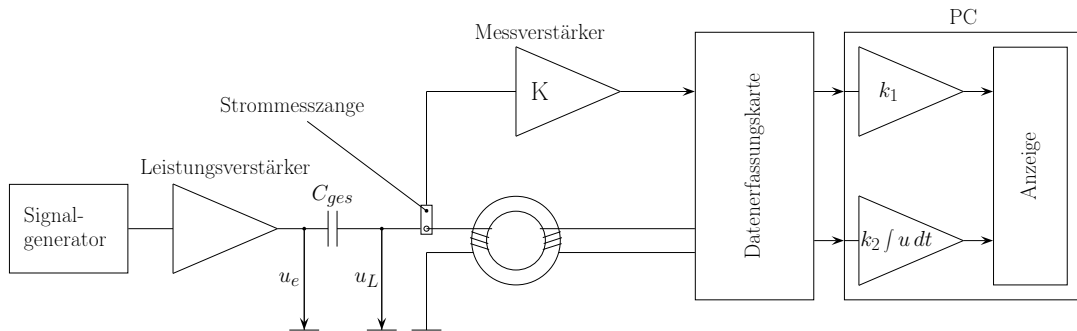


Abbildung 3.1.: Messaufbau zur Aufnahme der B-H-Kennlinie

3.2.2. Magnetisches Feld H

Um das magnetische Feld H berechnen zu können, muss der Primärstrom gemessen werden. Mit dem Primärstrom kann das magnetische Feld über den Durchflutungssatz (3.1) berechnet werden:

$$\int_C \vec{H} d\vec{l} = I \quad (3.5)$$

bzw. ergibt sich mit k verschiedenen Bereichen im magnetischen Kreis und einer Spule mit N Windungen aus dem Durchflutungssatz:

$$\sum_{j=1}^k \vec{H}_j l_j = NI \quad (3.6)$$

In (3.6) ist l der mittlere Weg der Feldlinien durch den Magnetkern. I bezeichnet den Strom der durch die N Windungen der Spule fließt.

In weiterer Folge wird mit skalaren Größen weiter gerechnet. Da der magnetische Kern ein geschlossener Ring ist, bleibt nur ein Summand in (3.6) übrig.

$$Hl = NI \quad (3.7)$$

bzw.

$$H = \frac{IN}{l} \quad (3.8)$$

3.2.3. Magnetische Flussdichte B

An der Sekundärseite wird die Quellspannung gemessen, die in der Spule induziert wird. Aus ihr kann die magnetische Flussdichte berechnet werden. Aus der integralen Schreibweise von Gleichung (3.4) ergibt sich

$$\int_{t_0}^t u d\tau = -N\Phi \quad (3.9)$$

3. Aufnahme der B-H-Kennlinien

bzw. mit (3.2) und der konstanten Querschnittsfläche A

$$\int_{t_0}^t u \, d\tau = -NBA \quad (3.10)$$

Damit folgt für die magnetische Flussdichte B :

$$B = -\frac{1}{NA} \int_{t_0}^t u \, d\tau \quad (3.11)$$

3.3. Auslegung der Messschaltung

Um ein magnetisches Feld von mindestens 1000 A/m für eine volle Aussteuerung des magnetischen Materials bei 20 Windungen der Spule zu erreichen, muss ein entsprechender maximaler Spulenstrom \hat{I} erreicht werden. Aus Abb. 3.2 folgt für die mittlere Pfadlänge

$$l = \frac{28,8 + 20}{2} \pi = 76,7 \text{ mm} \quad (3.12)$$

und daraus der nötige Strom:

$$\hat{I} = \frac{Hl}{N} = \frac{1000 \text{ A/m} \cdot 76,655 \text{ mm}}{20} \quad (3.13)$$

$$\hat{I} = 3,8 \text{ A} \quad (3.14)$$

Bei ersten Versuchen zeigte sich, dass hohe Anforderungen v.a. an den Leistungsverstärker und die Datenerfassungskarte gestellt werden. Der Leistungsverstärker weist einen kleinen Offset auf, wodurch dem Wechselfeld ein konstantes magnetisches Feld überlagert wird und eine Asymmetrie resultiert. Um diesen Effekt auszugleichen wurde ein Hochpass mittels Einfügen eines Serienkondensators (zwei antiseriell geschaltete Elektrolytkondensatoren) in den Primärkreis integriert. Auch die Datenerfassungskarte weist einen kleinen Offset auf. Da über die Spannung integriert wird, ergibt sich im Ergebnis des Integrals eine konstant ansteigende Drift. Zur Beseitigung des Offsets bei der Spannungserfassung durch die Datenerfassungskarte wurde ein Hochpass bei der Signalverarbeitung eingefügt. Dadurch wird die Drift bei der Integration verhindert.

Um den hohen Kapazitätswert zu erreichen, wurden jeweils vier antiseriell geschaltete Elektrolytkondensatorpaare parallel geschaltet. Die Schaltung ist in Abb. 3.3 dargestellt. Das Ergebnis ist ein Serienschwingkreis mit Hochpasscharakter und Resonanzfrequenz f_r .

Die Kapazitäten der Kondensatoren wurden mit C_E gewählt.

$$C_E = 2200 \mu\text{F}$$

3. Aufnahme der B-H-Kennlinien

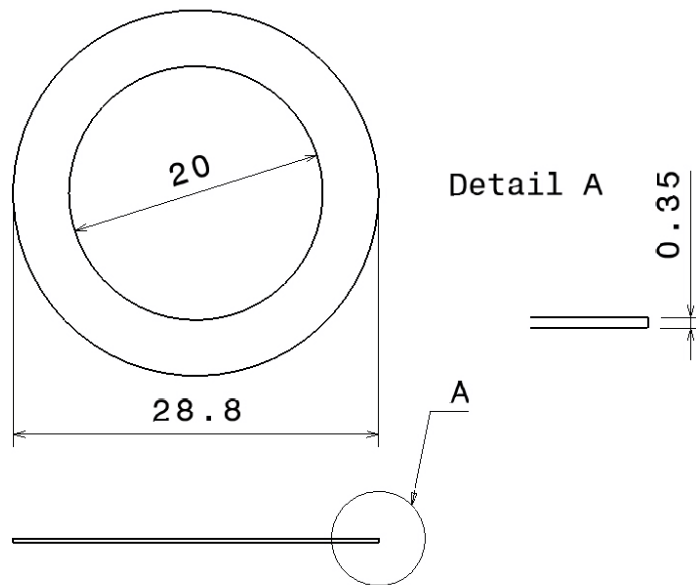


Abbildung 3.2.: Maße der Werkstoffprobe M111-35N

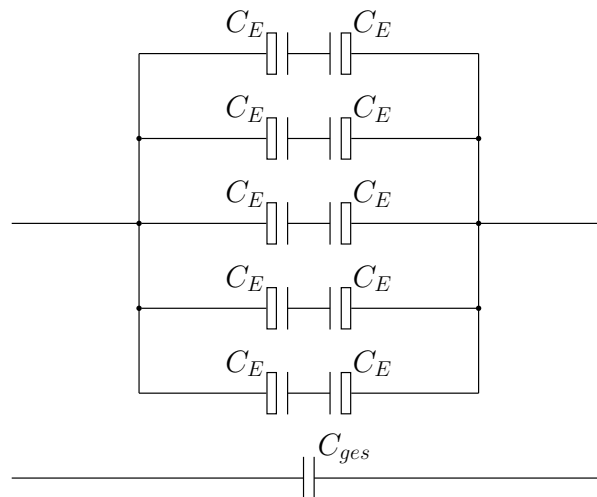


Abbildung 3.3.: In den Schwingkreis eingebrachte Kondensatoren und Ersatzschaltbild C_{ges}

3. Aufnahme der B-H-Kennlinien

$$C_{ges} = 5 \frac{C_E}{2} = 5500 \mu\text{F}$$

Die Induktivität der Spule ergibt sich mit der magnetischen Feldkonstante μ_0 , der relativen Permeabilität μ_r , der Querschnittsfläche A und 79 der in Abb. 3.2 dargestellten Plättchen zu:

$$L = N^2 \frac{\mu_0 \mu_r A}{l} \quad (3.15)$$

Unter der Annahme von $\mu_r = 5000$ und

$$A = \frac{28,8 - 20}{2} \cdot 0,35 \cdot 79 = 121,7 \text{ mm}^2 \quad (3.16)$$

folgt für das im Lager verbaute weichmagnetische Material, M111-35N, eine Induktivität von:

$$L = 3.99 \text{ mH} \quad (3.17)$$

Um die Resonanzfrequenz des Serienschwingkreises zu berechnen, wird die Übertragungsfunktion zwischen der Ausgangsspannung des Leistungsverstärkers u_e und der Spulenspannung u_L berechnet (siehe Abb. 3.1).

$$u_e = I \left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C_{ges}} \right)$$

$$u_L = I j\omega L$$

$$\frac{u_L}{u_e} = \frac{(j\omega)^2 LC_{ges}}{1 + (j\omega)^2 LC_{ges}} = \frac{\omega^2 LC_{ges}}{\omega^2 LC_{ges} - 1} \quad (3.18)$$

Bei Resonanz geht der Nenner gegen Null, es folgt:

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC_{ges}}} = 213,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (3.19)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_{ges}}} = 33,9 \text{ Hz} \quad (3.20)$$

Da im Rahmen der Aufnahme der B-H-Kennlinie die Messungen mit einer minimalen Frequenz von 50 Hz aufgenommen werden, liegt die Resonanzfrequenz außerhalb des Messbereichs und stellt kein Problem dar. In Abb. 3.4 ist die Übertragungsfunktion des Serienschwingkreises dargestellt.

3. Aufnahme der B-H-Kennlinien

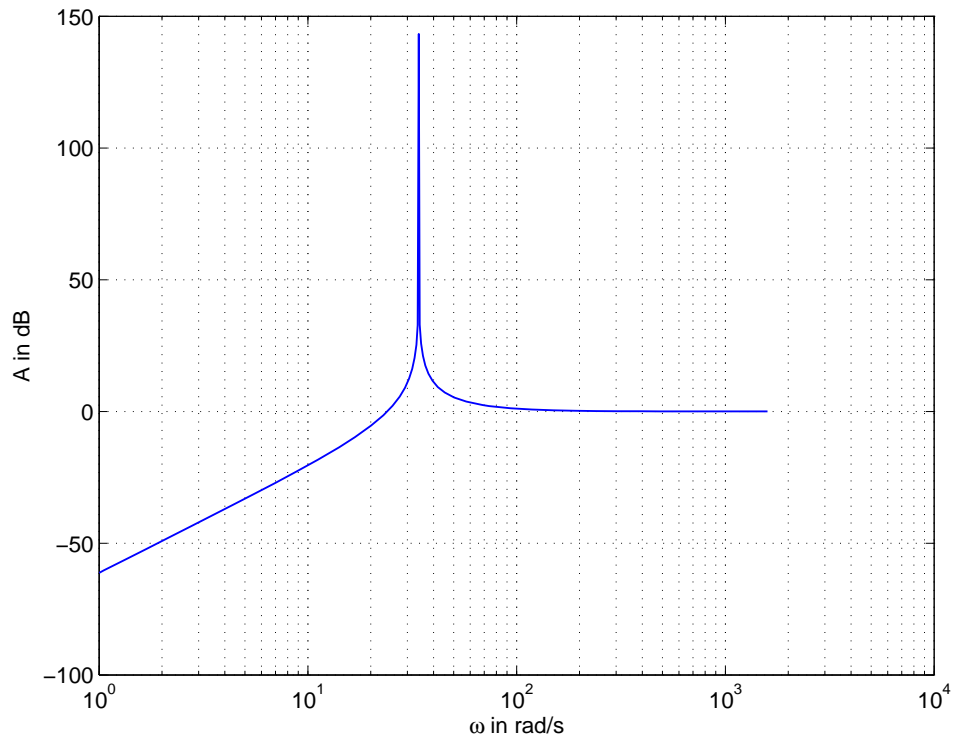


Abbildung 3.4.: Übertragungsverhalten des Serienschwingkreises

3.4. Aufnahme der Kennlinien

Für diese zwei Materialien wurden Kennlinien aufgenommen: M111-35N ist ein kostengünstiges weichmagnetisches Eisen, Vacoflux 50 ist zwar erheblich teurer, weist aber sehr gute magnetische Eigenschaften auf. Die vom Probenmuster im Labor bestimmte Vacoflux-Kennlinie wird im Anschluss mit der vom Hersteller angegebenen Kennlinie verglichen.

3.4.1. Probenmaterial M111-35N

Mit den Gleichungen (3.16) und (3.12) folgt mit den Primär- und Sekundärwindungen N_1 und N_2

$$N_1 = 20, \quad N_2 = 20, \quad (3.21)$$

für die magnetische Feldstärke in Gleichung (3.8) in Abhängigkeit des Stromes

$$H = \frac{N_1 I}{l} = k_1 I \quad (3.22)$$

und für die magnetische Flussdichte nach (3.11)

$$B = -\frac{1}{N_2 A} \int_{t_0}^t u \, d\tau = k_2 \int_{t_0}^t u \, d\tau \quad (3.23)$$

mit

$$k_1 = 260,91, \quad k_2 = -410,98 \quad (3.24)$$

Mit den dargestellten Konstanten k_1 und k_2 sind die Gleichungen (3.22) und (3.23) für SI-Einheiten der verwendeten physikalischen Größen gültig.

In den Abbildungen 3.5 bis 3.14 werden die aufgenommenen Kennlinien dargestellt. Sie zeigen eine Abschätzung der Hysterese nach oben, da der Primärstrom höher harmonische Signalanteile enthält. Für eine genaue Bestimmung der B-H-Kennlinie wäre eine Stromregelung erforderlich, die nach [1] für niedrige Frequenzen sehr gut mit dieser Abschätzung übereinstimmt. Sie wurden bei 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 500 Hz und 1 kHz gemessen. Zusätzlich werden die Verläufe von Primärstrom und Sekundärspannung gezeigt.

Anzumerken ist hier, dass bei höheren Frequenzen die Ummagnetisierungsverluste stark steigen, zu erkennen an der breiter werdenden Hystereseschleife. Das ist größtenteils auf die Materialstärke der verwendeten Proben zurückzuführen. M111-35N hat eine Stärke von 0,35 mm, Vacoflux 50 eine Materialstärke von 0,05 mm (siehe Abb. 3.15). Je dünner das Material, umso geringer werden Wirbelströme und die damit einhergehenden Verluste.

3. Aufnahme der B-H-Kennlinien

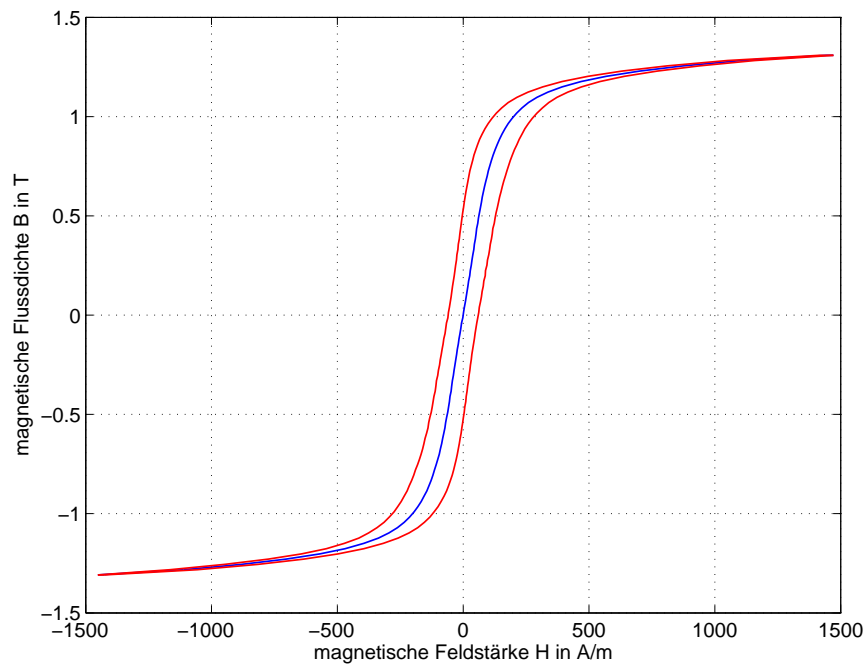


Abbildung 3.5.: B-H-Kennlinie bei 50 Hz, M111-35N

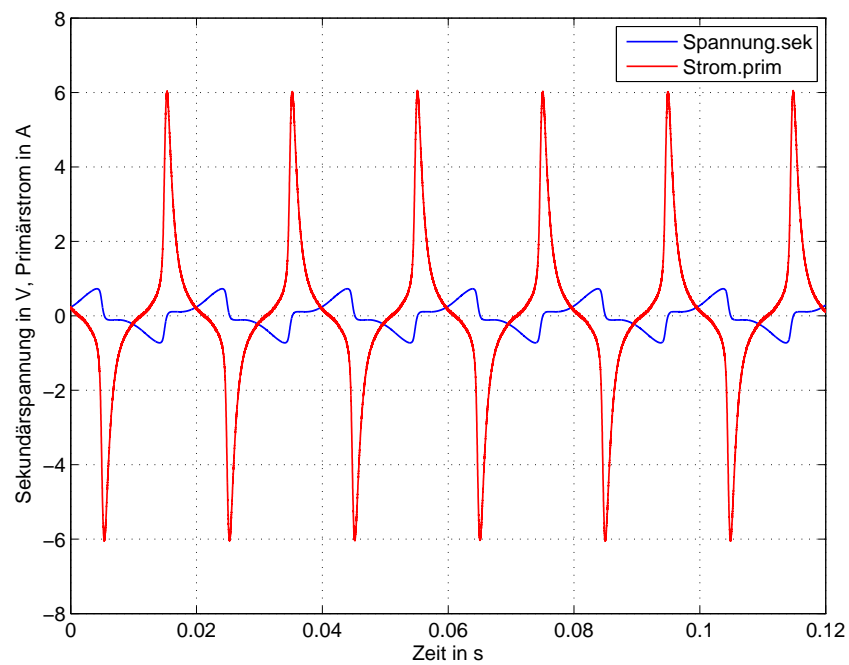


Abbildung 3.6.: Primärstrom und Sekundärspannung bei 50 Hz, M111-35N

3. Aufnahme der B-H-Kennlinien

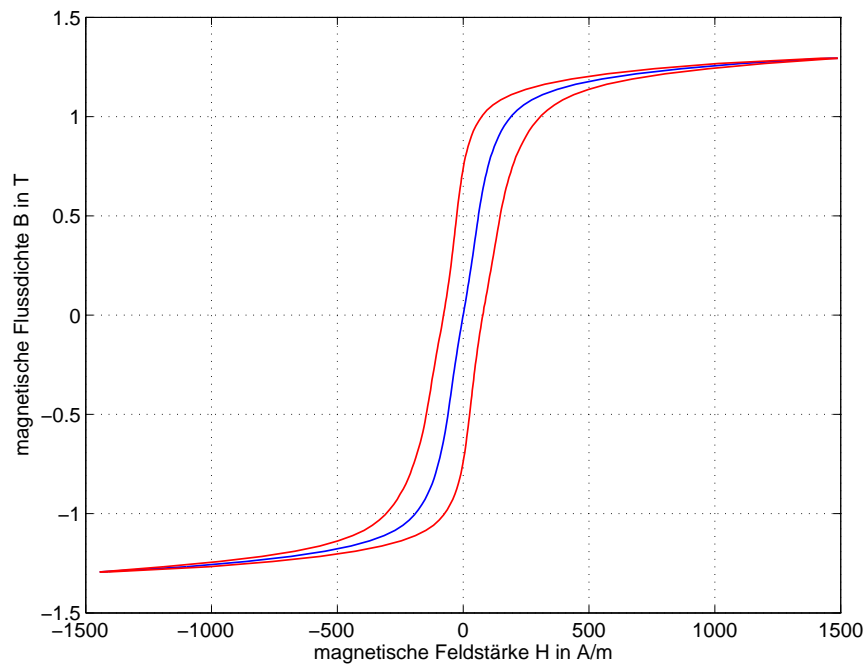


Abbildung 3.7.: B-H-Kennlinie bei 100 Hz, M111-35N

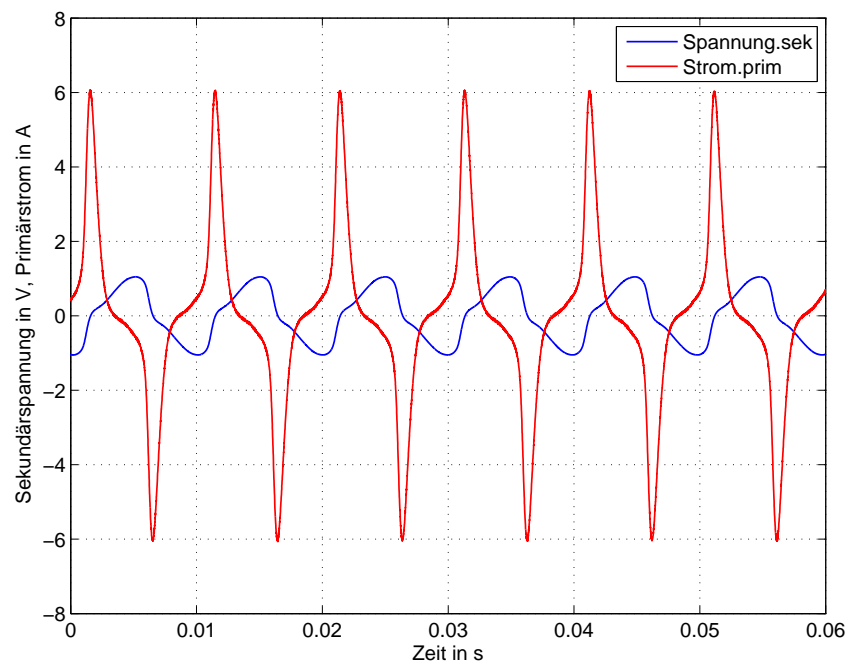


Abbildung 3.8.: Primärstrom und Sekundärspannung bei 100 Hz, M111-35N

3. Aufnahme der B-H-Kennlinien

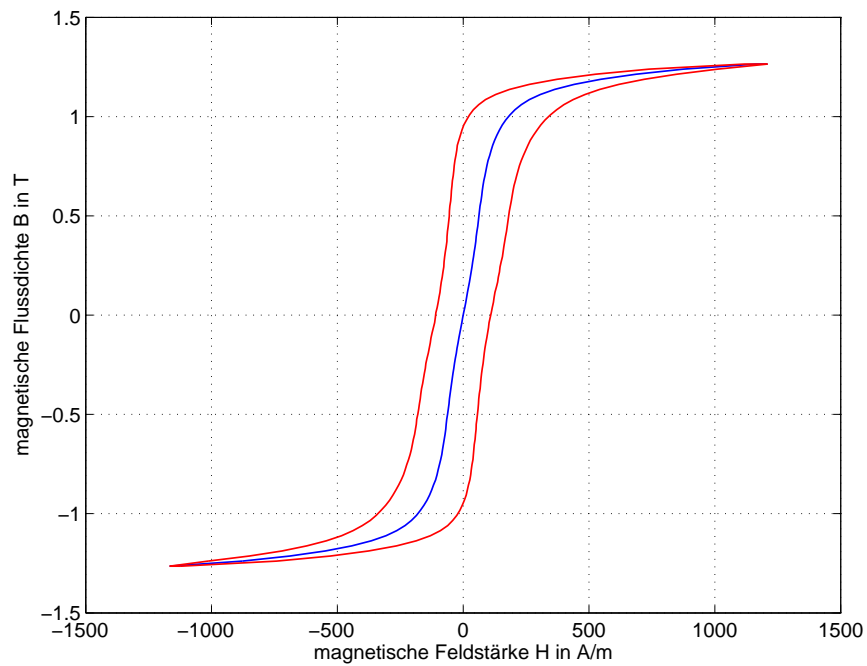


Abbildung 3.9.: B-H-Kennlinie 200 Hz, M111-35N

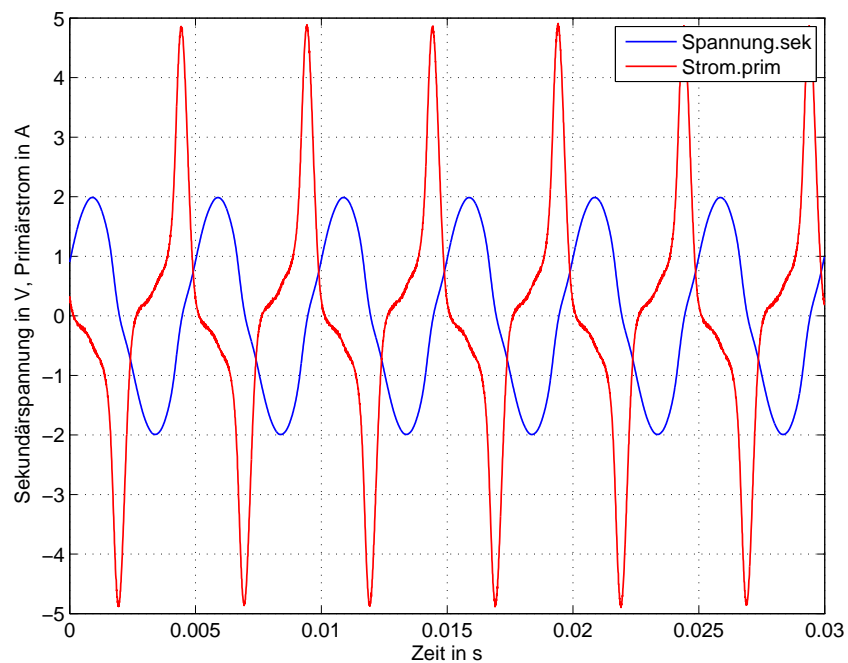


Abbildung 3.10.: Primärstrom und Sekundärspannung bei 200 Hz, M111-35N

3. Aufnahme der B-H-Kennlinien

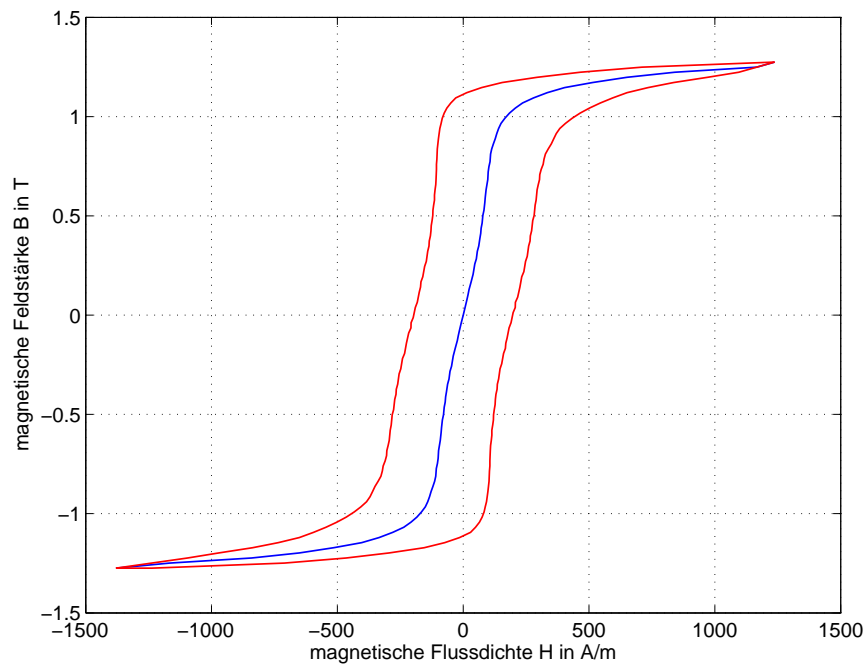


Abbildung 3.11.: B-H-Kennlinie bei 500 Hz, M111-35N

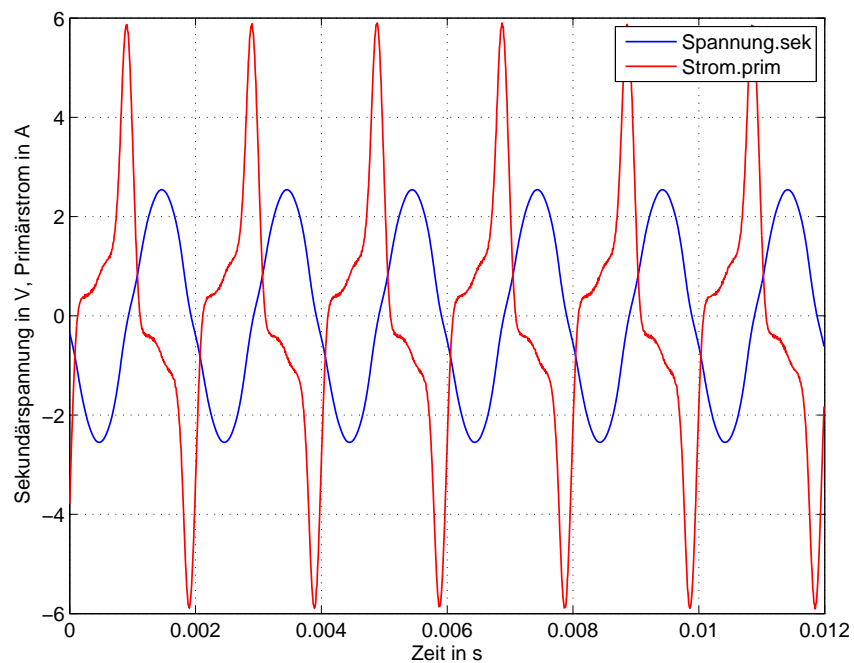


Abbildung 3.12.: Primärstrom und Sekundärspannung bei 500 Hz, M111-35N

3. Aufnahme der B-H-Kennlinien

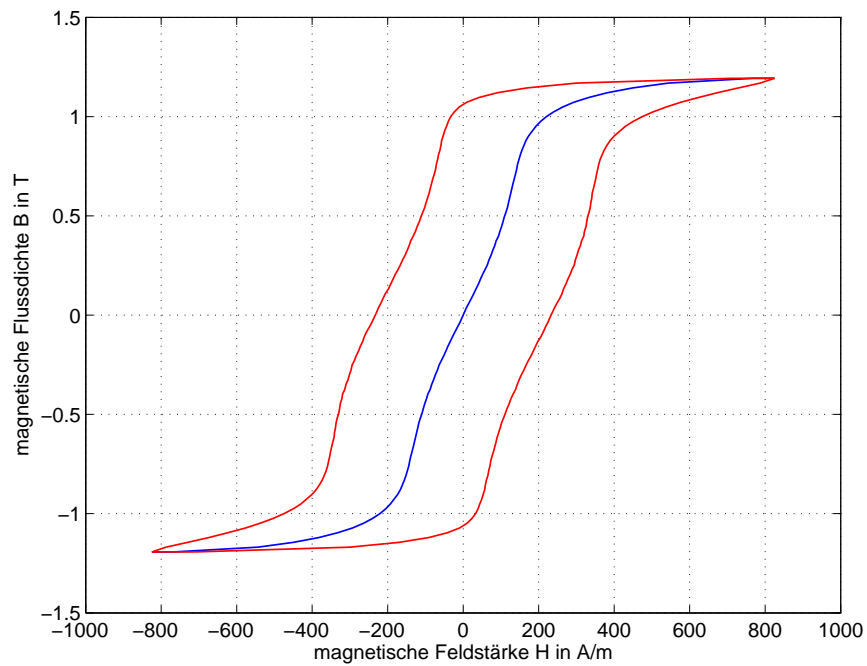


Abbildung 3.13.: B-H-Kennlinie bei 1 kHz, M111-35N

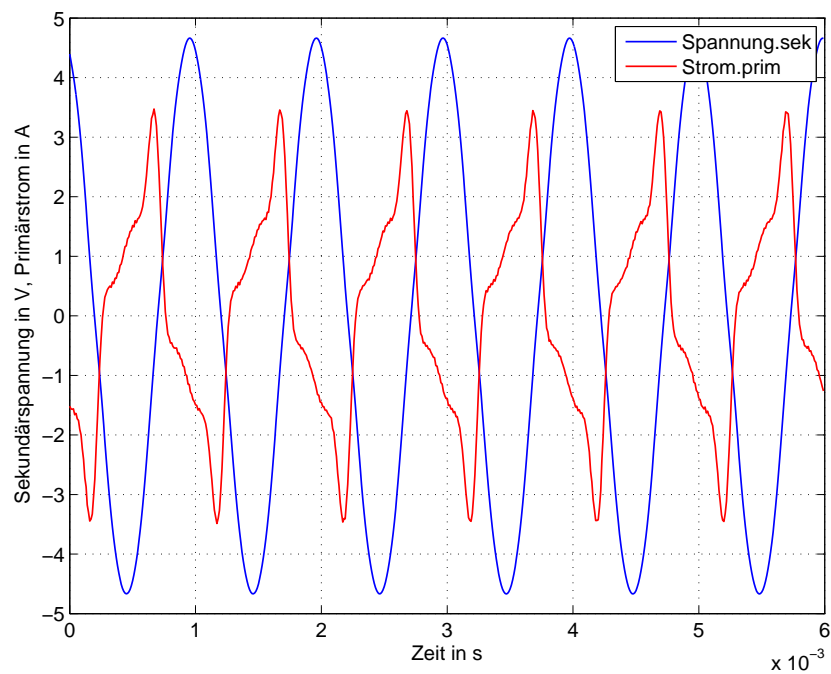


Abbildung 3.14.: Primärstrom und Sekundärspannung bei 1 kHz, M111-35N

3.4.2. Probenmaterial Vacoflux 50

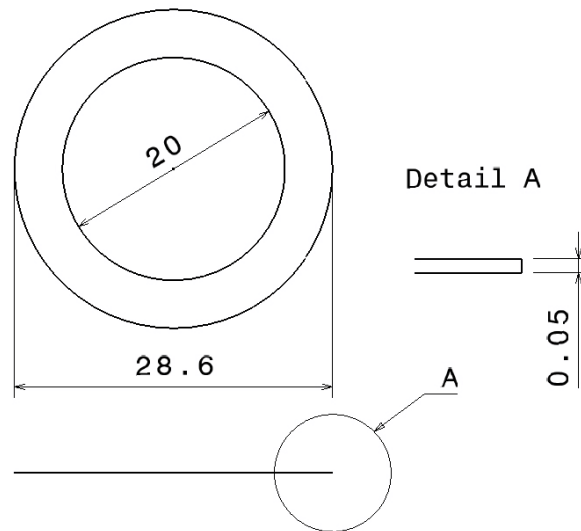


Abbildung 3.15.: Maße der untersuchten Werkstoffprobe Vacoflux 50

Die mittlere Pfadlänge für das Probenmaterial und die Querschnittsfläche A bei 74 gestapelten Plättchen betragen nach Abb.3.15

$$l = 76,3 \text{ mm}, \quad A = 15,9 \text{ mm}^2 \quad (3.25)$$

Mit den Windungszahlen

$$N_1 = 20, \quad N_2 = 20 \quad (3.26)$$

folgt nach (3.8) analog zu (3.22) für die magnetische Feldstärke und die Flussdichte:

$$H = k_1 I = 262 I \quad (3.27)$$

Mit (3.11) und (3.26) folgt analog zu (3.23):

$$B = k_2 \int_{t_0}^t u \, d\tau = -3142,7 \int_{t_0}^t u \, d\tau \quad (3.28)$$

Mit den dargestellten Konstanten k_1 und k_2 sind die Gleichungen (3.27) und (3.28) wieder für SI-Einheiten der verwendeten physikalischen Größen gültig. In weiterer Folge werden wieder die gemessenen B-H-Kennlinien und die aufgetretenen Primärströme und Sekundärspannungen dargestellt.

Erwartungsgemäß sind aufgrund der sehr geringen Materialstärke bei diesen Probenmaterial die Ummagnetisierungsverluste bei höheren Frequenzen sehr gering. Das Material weist eine hohe Sättigungsflussdichte aus. Sättigungserscheinungen beginnen erst bei etwa 1,5 T. Die maximale Flussdichte beträgt etwa 2,4 T.

Die gemessenen Daten stimmen sehr gut mit der verfügbaren statischen Kennlinie des Herstellers [11] überein (siehe Abb. 3.26). zeigen die Daten des Herstellers. In schwarz ist die Kennlinie einer statischen Messung dargestellt.

3. Aufnahme der B-H-Kennlinien

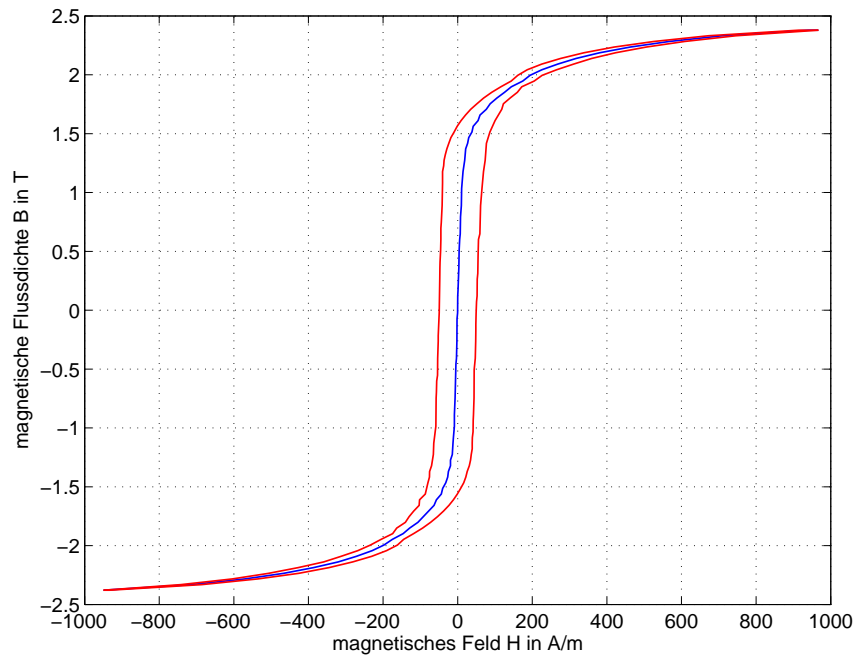


Abbildung 3.16.: B-H-Kennlinie Vacoflux 50 bei 50 Hz

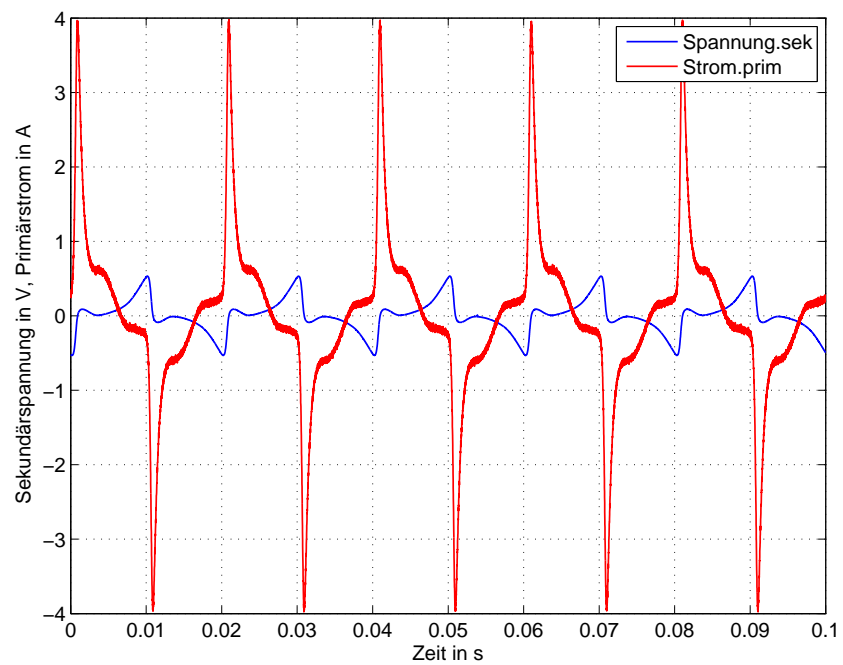


Abbildung 3.17.: Primärstrom und Sekundärspannung bei 50 Hz, Vacoflux 50

3. Aufnahme der B-H-Kennlinien

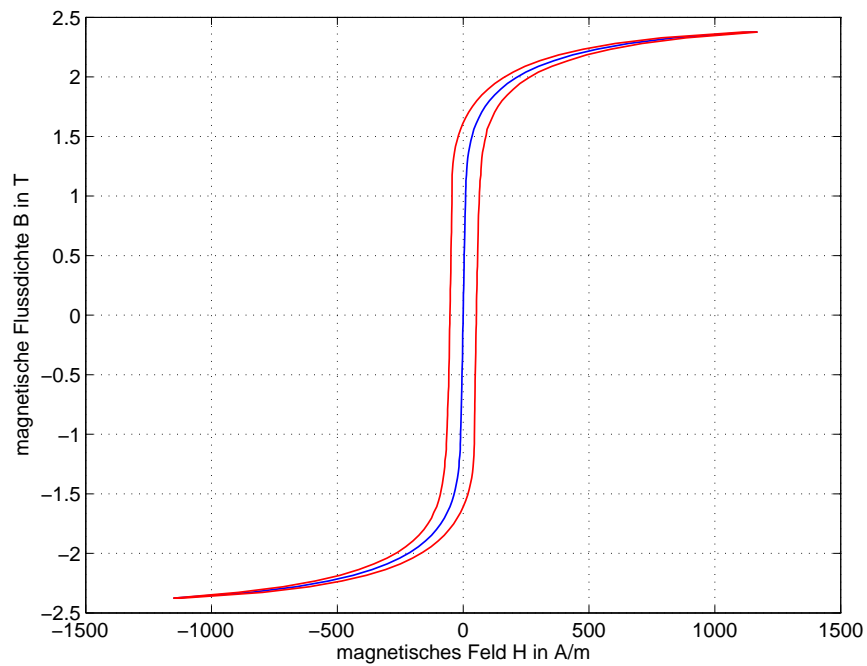


Abbildung 3.18.: B-H-Kennlinie Vacoflux 50 bei 100 Hz

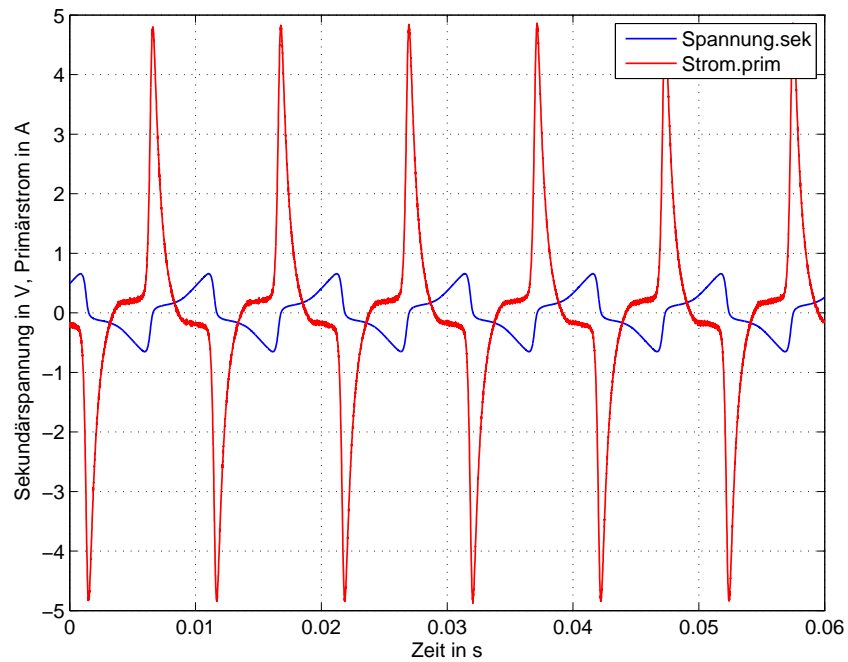


Abbildung 3.19.: Primärstrom und Sekundärspannung bei 100 Hz, Vacoflux 50

3. Aufnahme der B-H-Kennlinien

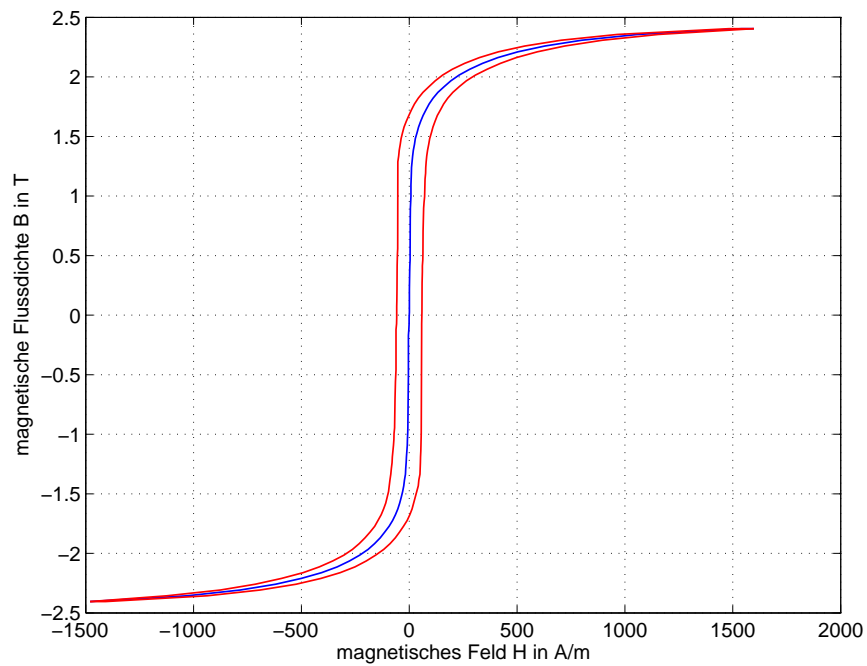


Abbildung 3.20.: B-H-Kennlinie Vacoflux 50 bei 200 Hz

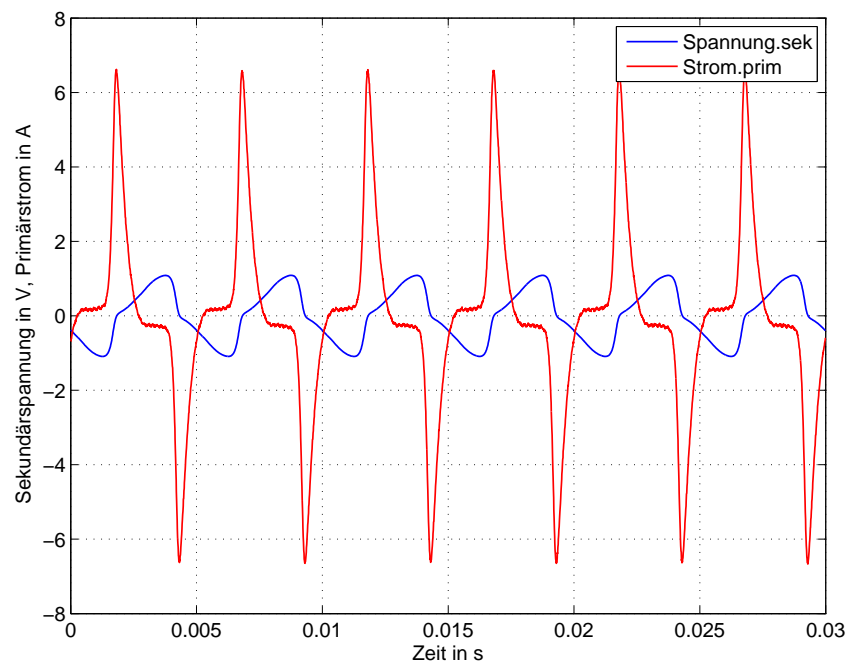


Abbildung 3.21.: Primärstrom und Sekundärspannung bei 200 Hz, Vacoflux 50

3. Aufnahme der B-H-Kennlinien

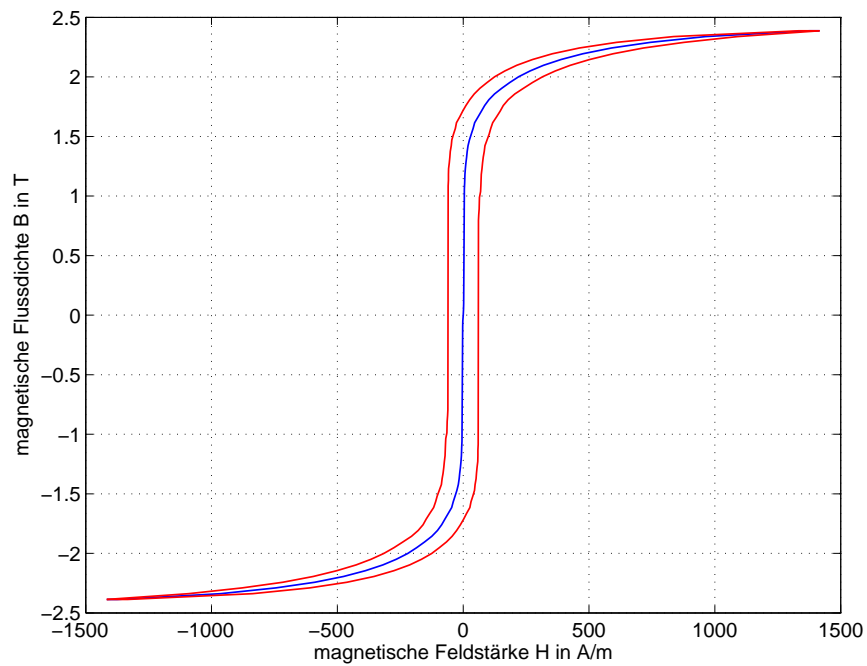


Abbildung 3.22.: B-H-Kennlinie Vacoflux 50 bei 500 Hz

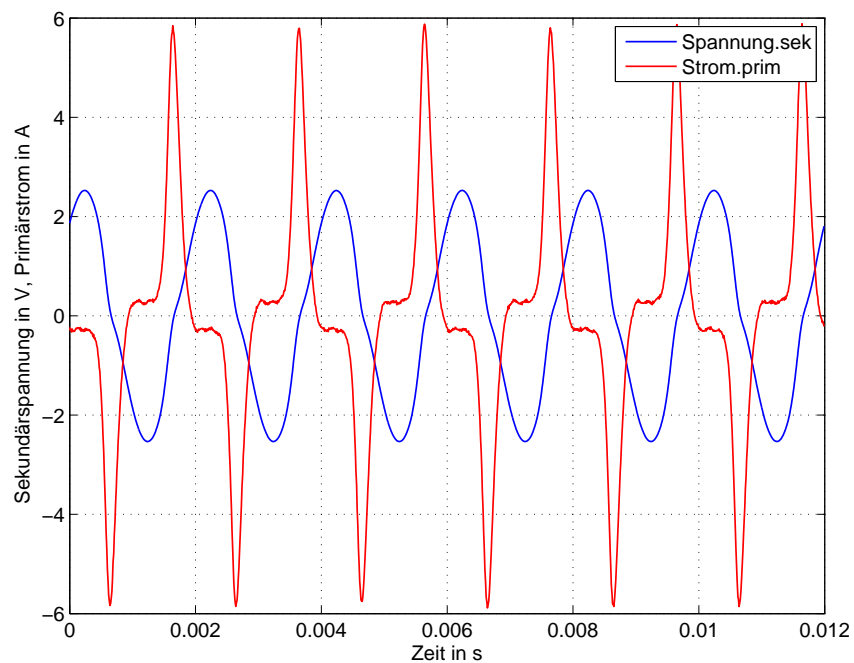


Abbildung 3.23.: Primärstrom und Sekundärspannung bei 500 Hz, Vacoflux 50

3. Aufnahme der B-H-Kennlinien

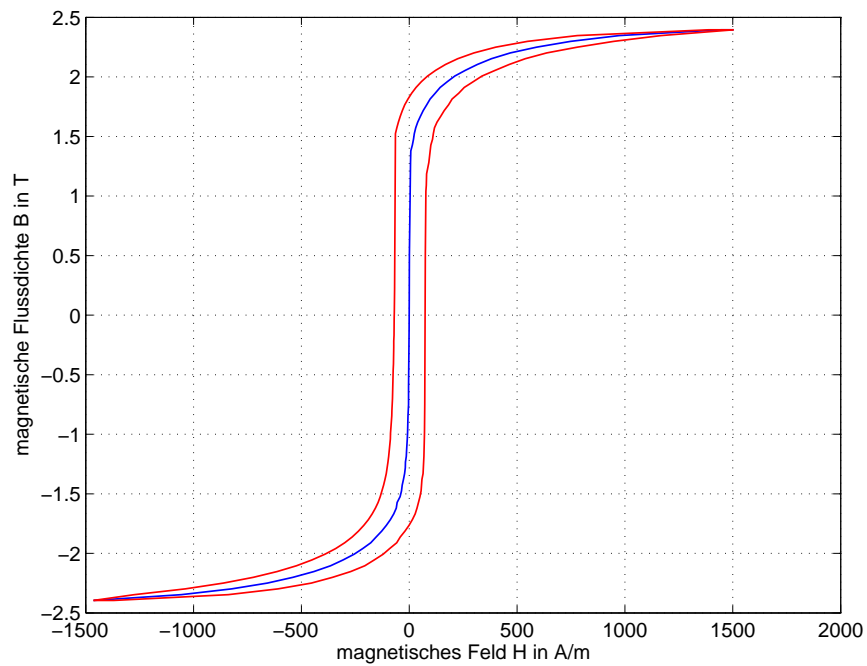


Abbildung 3.24.: B-H-Kennlinie Vacoflux 50 bei 1 kHz

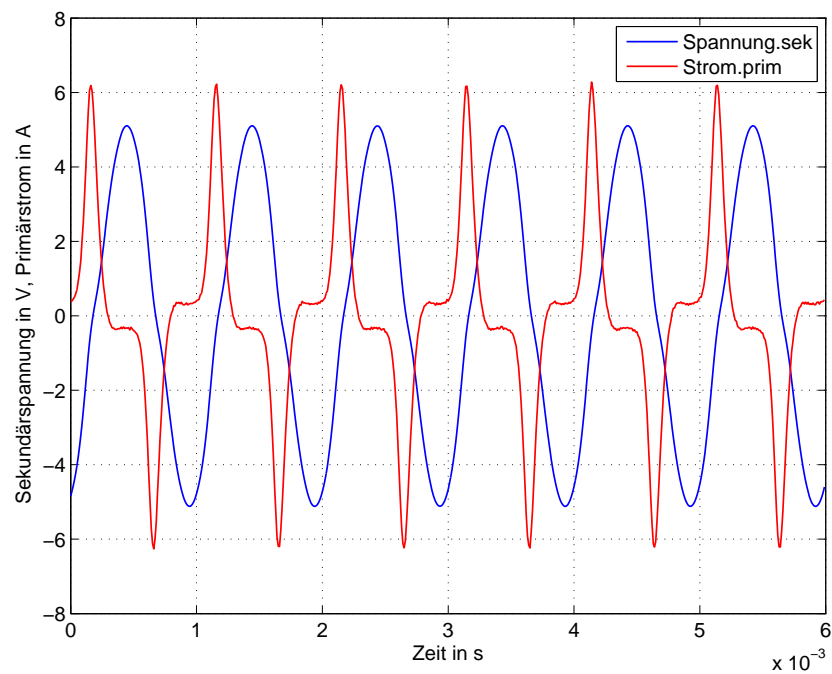


Abbildung 3.25.: Primärstrom und Sekundärspannung bei 1 kHz, Vacoflux 50

3. Aufnahme der B-H-Kennlinien

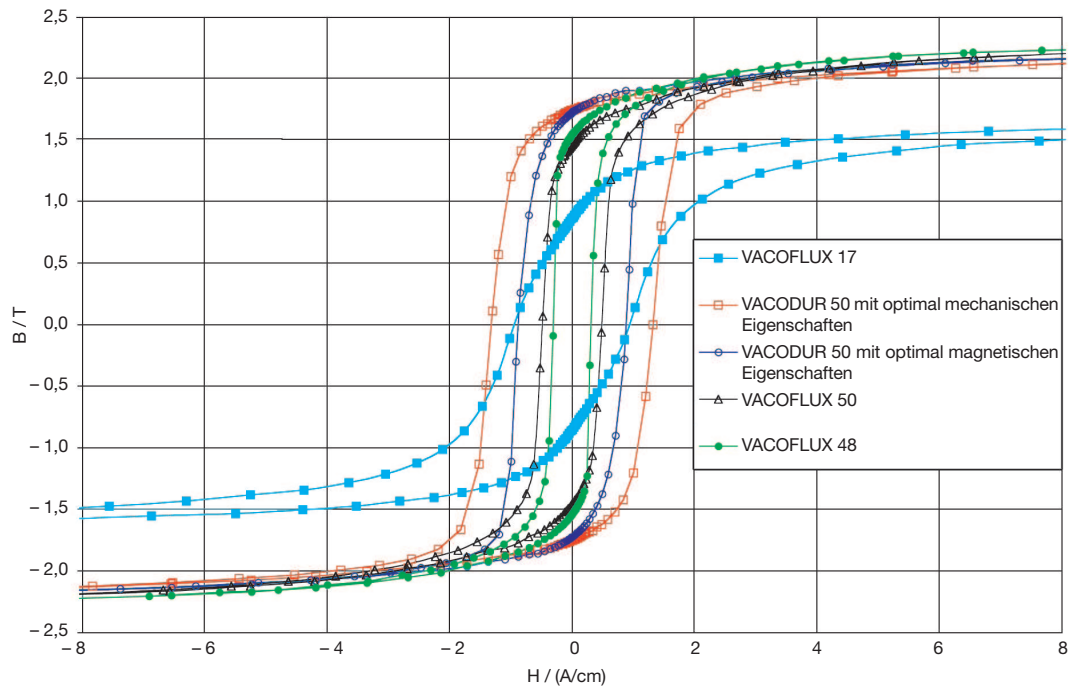


Abbildung 3.26.: Angaben des Herstellers [11] zu Vacoflux 50 (statische Messung)

4. Simulation des AMB

In diesem Kapitel wird einerseits eine MATLAB-Simulation des AMB-Systems und andererseits eine FE-Simulation des Magnetfeldes mit dem Freewaretool *femm4.2* gezeigt. *femm4.2* ist ein Freeware finite Elemente Programm, mit den magnetische und elektrostatische Kräfte berechnet werden können.

4.1. MATLAB-Simulation des AMB-Systems

Nach der Messung der B-H-Kennlinie konnte die B-H-Kennlinie des tatsächlich eingesetzten Materials, M111-35N, in die in [6] erstellte MATLAB/Simulink-Simulation integriert werden. Hierbei wurde die anhysteretische Kurve aus dem B-H-Kennlinienverlauf abgeschätzt. Das Ergebnis der Simulation wird in den Abb. 4.2 bis 4.4 dargestellt.

Der Rotor wird zum Zeitpunkt $t = 0$ s in der Mitte des Magnetlagers losgelassen. Sofort sinkt der Rotor unter dem Eigengewicht von 45,14 kg auf ca. $12 \mu\text{m}$ ab. Da die einzelnen EM jeweils von PD-Reglern geregelt werden, wird die Abweichung vom Sollwert nicht ausgeglichen.

Zum Zeitpunkt $t = 0,02$ s wird eine Kraft von 2 kN im Winkel von 45° entgegen der Lotrechten aufgebracht. Abb. 4.1 zeigt die Wirkung der Störkraft auf den Rotor. Der Rotor bewegt sich sowohl nach oben in Richtung der positiven y-Achse als auch zur Seite in Richtung der positiven x-Achse. Sofort reagieren die HCA-Module und Erhöhen die Stromstärke in den EM-Modulen vier, fünf und sechs und damit auch die magnetische Kraft, während sie in den übrigen EM-Modulen gesenkt wird (Abb. 4.3 und Abb. 4.4). Nach kurzem Überschwingen stellt sich eine Abweichung von ca. $50 \mu\text{m}$ in vertikaler bzw. $65 \mu\text{m}$ in horizontaler Richtung ein.

Nach $t = 0,04$ s wird der Ausfall von EM-Kanal eins simuliert. Sofort sinkt der Rotor und wird bei ca. $20 \mu\text{m}$ aufgefangen. Auch die horizontale Position ändert sich, da die Störkraft noch wirkt. Der Ausfall bewirkt in Abb. 4.3 und Abb. 4.4 ein Absinken der magnetischen Kraft und des Stroms auf Null. Nach dem Ausfall erhöhen EM-Kanal zwei und sechs ihren Strom und damit die magnetische Kraft um die Last aufzunehmen, während Kanal drei, vier und fünf die magnetischen Anzugskräfte reduzieren.

Zum Zeitpunkt $t = 0,06$ s wird das ausgeschaltete Verstärkermodul über einen Softstart wieder eingeschaltet. D.h., der Stromanstieg ist in der Startphase des neu dazugeschalteten EM-Kanals begrenzt.

4. Simulation des AMB

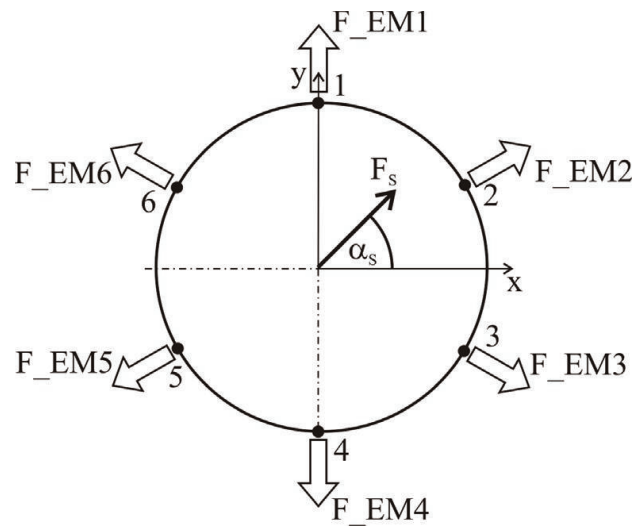


Abbildung 4.1.: Richtung der Magnetkräfte und Lage der Störkraft in der Simulation

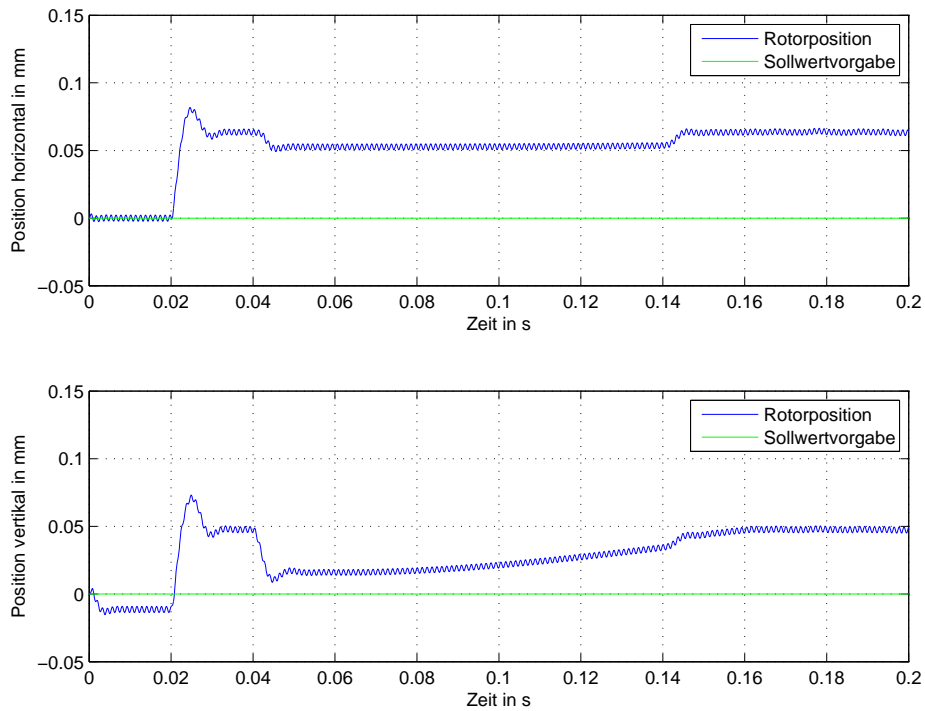


Abbildung 4.2.: Simulation der Rotorposition

4. Simulation des AMB

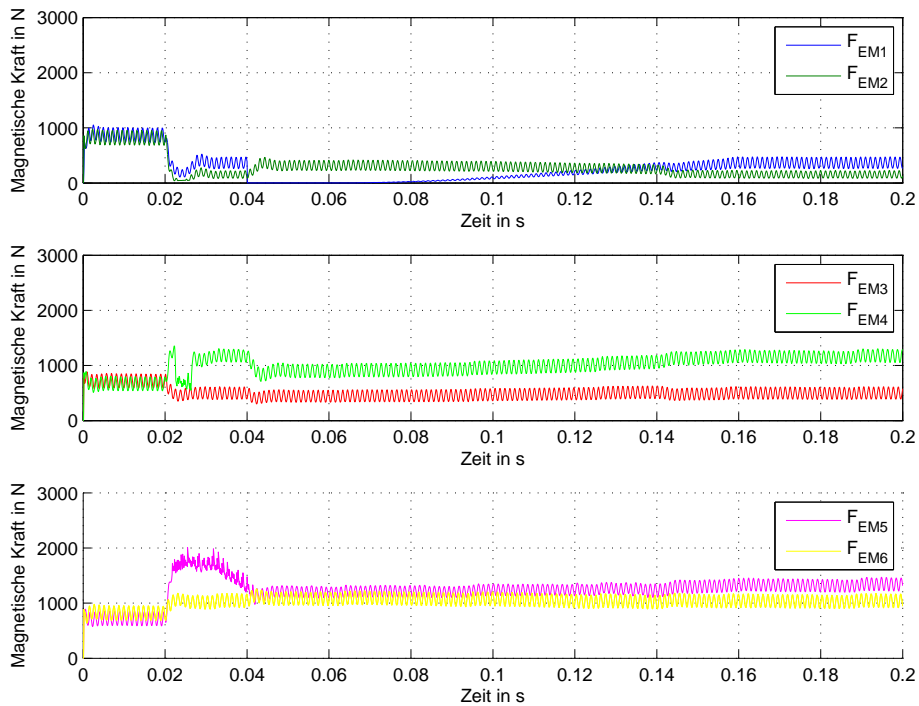


Abbildung 4.3.: Simulation der auf den Rotor wirkenden magnetischen Kräfte

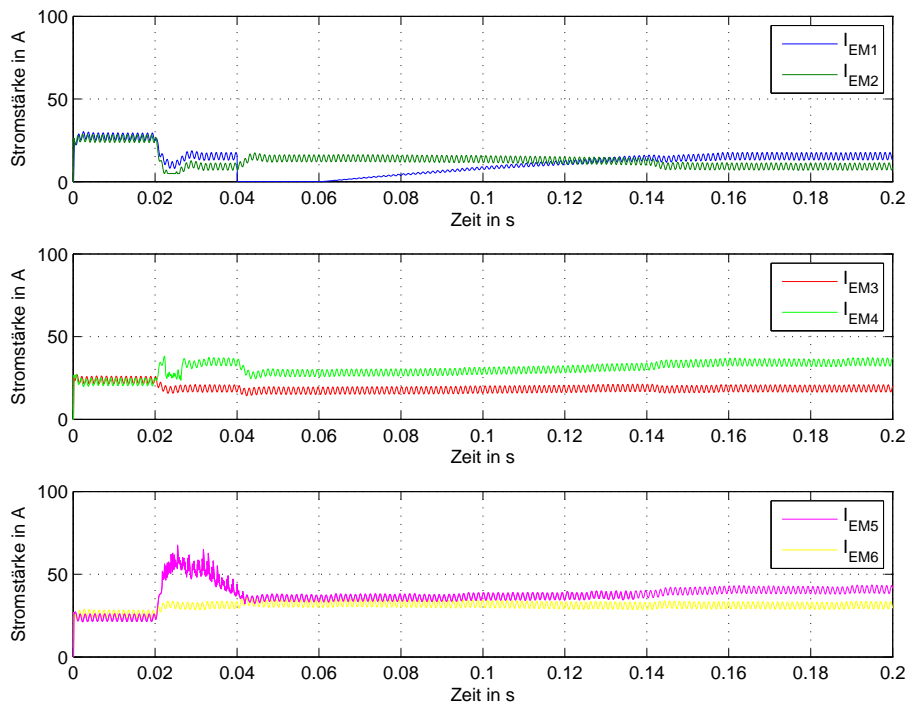


Abbildung 4.4.: Simulation der in den Magnetspulen fließenden Ströme

4.2. FE-Simulation des magnetischen Flusses

Zur Bestimmung des magnetischen Flusses durch den Eisenkern des EM und den Rotor, wurde eine FE-Simulation mit *femm4.2* durchgeführt. Die auftretenden Lagerkräfte eines EM des hochzuverlässigen Magnetlagers wurden mittels FE-Simulation berechnet und mittels analytischer Rechnung geprüft. Die folgenden Kapitel beschreiben die Vorgehensweise von der Erstellung der Lagergeometrie bis zur Auswertung und dem Vergleich der Ergebnisse.

4.2.1. Erstellung der Geometrie

Die Eingabe der Geometrie erfolgt zweidimensional. Über die Angabe der Tiefe oder einer Rotationsachse können auch bestimmte räumliche Probleme gelöst werden. Heteropolarlager können über die Angabe der Tiefe der EM berechnet werden. Das Wellenstück (Abb. 4.5) und der Elektromagnet (Abb. 4.6) wurden hierzu in *femm4.2* konstruiert. Auf den Teil des Rotors mit $\text{Ø}180$ sind Bleche aus M111-35N-Material aufgeschoben. Die Welle selbst besteht aus Aluminium.

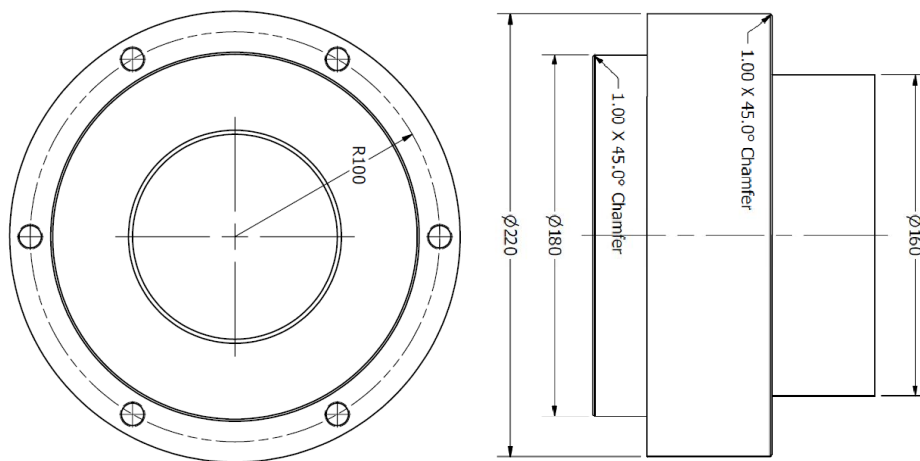


Abbildung 4.5.: Rotorstück im Magnetlager

Eine technische Zeichnung des weichmagnetischen Teils des EM ist in Abb. 4.6 dargestellt. Um den mittleren Pfad des EM befindet sich eine Spule mit 28 Windungen (Abb. 4.7).

4.2.2. Definition der Materialien und Grenzen

Für die Welle wurde ein nichtmagnetischer Aluminium-Werkstoff gewählt. Um das Nachrechnen zu vereinfachen wurden dem Magnetkern und den Blechen an der Welle vorerst „Pure Iron“ zugewiesen. Hier wird eine lineare B-H-Kennlinie mit $\mu_r = 14872$

4. Simulation des AMB

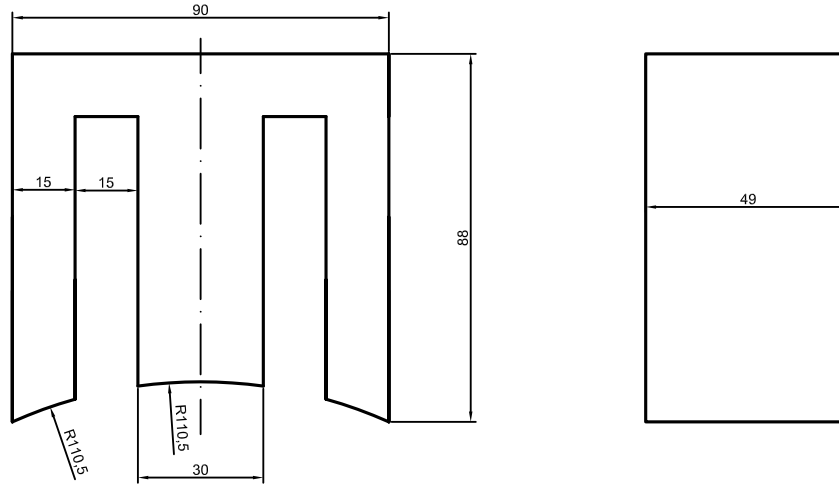


Abbildung 4.6.: Elektromagnet

angenommen. Die Kupferspulen wurden wie im hochzuverlässigen AMB mit 28 Windungen modelliert. Weiters muss ein Lösungsraum definiert werden. Der äußerste Kreisbogen in Abb. 4.8 wird nach [3] mit folgender Randbedingung belegt:

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r R_0} \frac{\partial A}{\partial n} + c_0 A + c_1 = 0 \quad (4.1)$$

In Gleichung (4.1) symbolisieren μ_0 die magnetische Feldkonstante, μ_r die relative Permeabilität von Luft, A das magnetische Vektorpotential und n die Normale zur Randbedingung. Die Konstanten c_0 und c_1 wurden nach [3] wie folgt gewählt, wobei R_0 den Radius des Kreises für die Randbedingung bezeichnet:

$$c_0 = \frac{1}{\mu_0 \mu_r R_0} \quad (4.2)$$

$$c_1 = 0 \quad (4.3)$$

Dadurch ergibt sich eine asymptotische Randbedingung, die als gute Näherung für einen unendlich großen Raum gilt. Je größer der Randkreis ist, umso besser ist diese Näherung. Die Parameter der Werkstoffe und der Luft können aus der Materialbibliothek von *femm4.2* mit linearer Näherung der Kennlinie übernommen werden.

4.2.3. Lösung mit *femm4.2*

Die Vernetzungsdichte kann für jeden Block einzeln eingestellt werden und wurde so gewählt, dass in den Volumina, in denen eine hohe Flussdichte zu erwarten ist, eine hohe Vernetzungsdichte herrscht, und in unbedeutenden Gebieten das Netz mit geringerer Auflösung generiert wird. Abb. 4.8 zeigt die Vernetzung des zu Vergleichszwecken herangezogenen EM bzw. Rotors.

4. Simulation des AMB

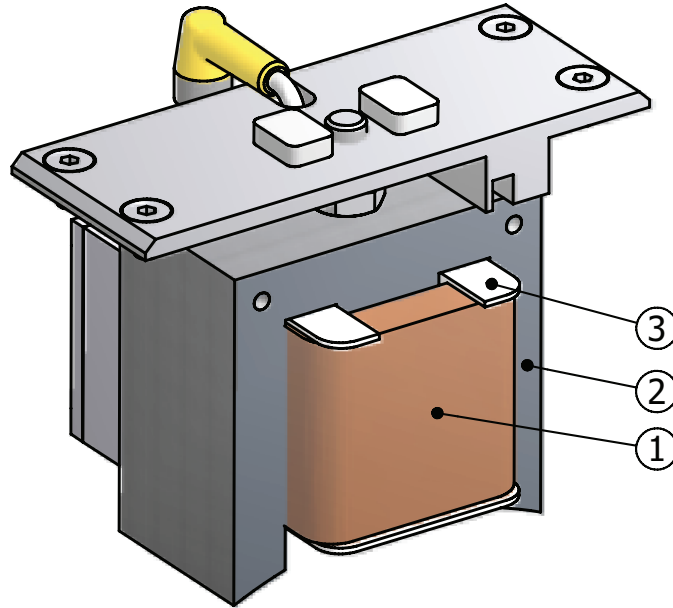


Abbildung 4.7.: (1) Spule mit 28 Windungen, (2) ferromagnetischer Kern

Vorerst wird ein einzelner Magnet mit 10 A bestromt. Die Finite Elemente Lösung ist in Abb. 4.9 dargestellt. Bereiche hoher Flussdichte befinden sich ausschließlich im Kern des EM und im ferromagnetischen Rotorteil. Die von *femm4.2* errechneten Kräfte auf die Welle sind:

$$F_x = -0,08 \text{ N}; F_y = 138.6 \text{ N} \quad (4.4)$$

4.3. Analytische Berechnung der Magnetkräfte

Für die analytische Berechnung wird der magnetische Kreis in vier Teilbereiche gegliedert: der Magnetkern, das magnetische Rotormaterial, der mittlere Luftspalt zwischen Magnet und Rotor und die äußeren Luftspalte zwischen Magnet und Rotor. Die Zahl der Windungen, die Stromstärke und die Summe der magnetischen Widerstände stehen mit dem magnetischen Fluss in folgendem Zusammenhang.

$$\Phi \sum_i R_{m,i} = NI \quad (4.5)$$

Gleichung (4.5) setzt die Konstanz des magnetischen Flusses über alle Teilbereiche voraus. Es wird angenommen, dass Streuflüsse vernachlässigbar sind. Der magnetische Widerstand des einzelnen Teilbereichs wird mit der Pfadlänge l_i des Teilbereichs, $\mu_i = \mu_0 \mu_{r,i}$ und A_i als Querschnittsfläche des Teilbereichs aus (4.6) berechnet.

$$R_{m,i} = \frac{l_i}{\mu_i A_i} \quad (4.6)$$

4. Simulation des AMB

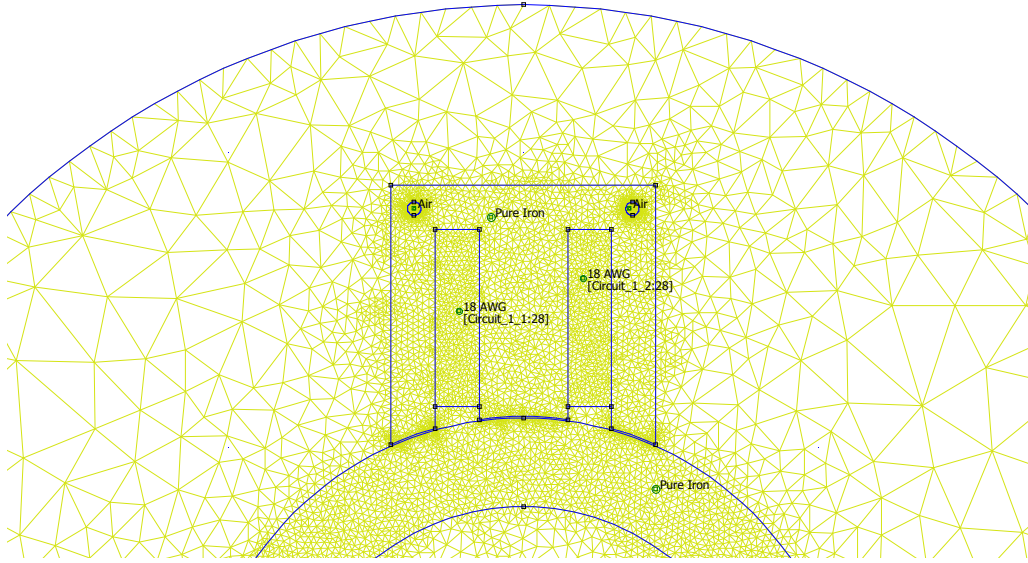


Abbildung 4.8.: Finite Elemente Netz um einen EM und Rotor

Mit dem Gauss'schen Gesetz (3.2) folgt bei konstanter Querschnittsfläche A_i für die Flussdichten B_i der Teilbereiche

$$B_i = \frac{A_i}{\Phi} \quad (4.7)$$

und mit dem Energieerhaltungssatz die magnetische Kraft F_m in den Luftspalten zu

$$F_m = \frac{B_L^2 A_L}{2\mu_0}, \quad (4.8)$$

wobei der Index L den Luftspalt bezeichnet.

4.3.1. Magnetische Widerstände der Teilbereiche

Da die Summe der äußeren Querschnittsflächen gleich der mittleren ist, werden die beiden Flusspfade, in die sich der mittlere aufspaltet, zusammengefasst. Dadurch folgt nach Abb. 4.10 und 4.6 für den EM-Kern eine konstante Querschnittsfläche von A_M und eine Pfadlänge von l_M laut Gleichung (4.9) und (4.10). Die Tiefen b_M und b_R des EM und des Rotors betragen jeweils 49 mm.

$$A_M = l_M b_M = 30 \text{ mm} \cdot 49 \text{ mm} = 1470 \text{ mm}^2 \quad (4.9)$$

Die Länge des Flusspfades l_M durch den EM ergibt sich zu

$$l_M = 197 \text{ mm} \quad (4.10)$$

Mit der relativen Permeabilität des in der FE-Simulation verwendeten Eisens

$$\mu_{r,M} = 14872 \quad (4.11)$$

4. Simulation des AMB

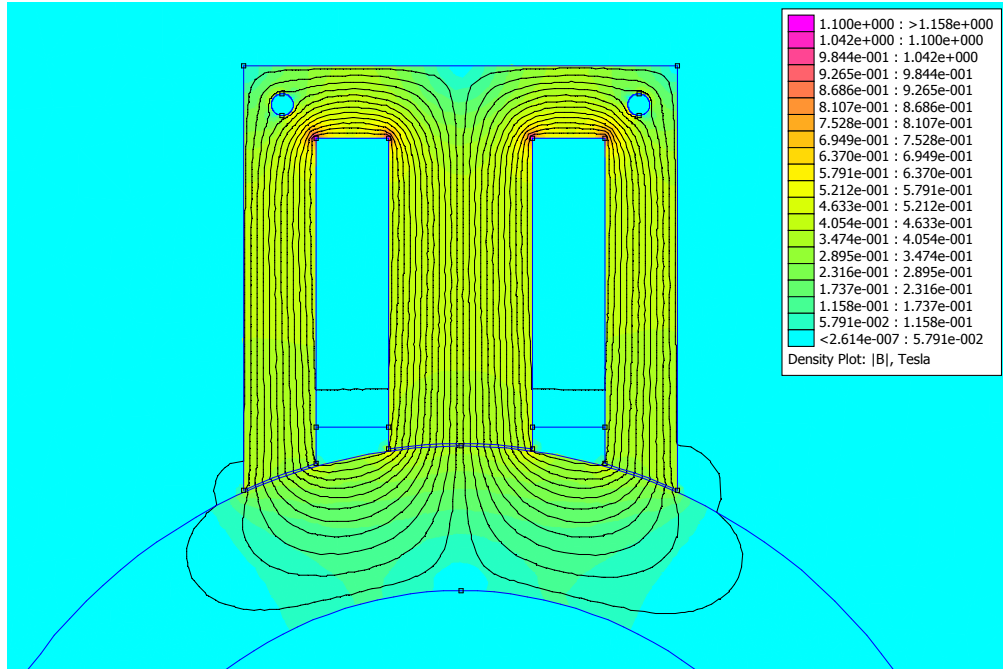


Abbildung 4.9.: Flussdichte des Magnetfeldes eines EM

folgt nach (4.6) für den magnetischen Widerstand des Eisenkerns:

$$R_{m,M} = \frac{l_M}{\mu_M A_M} = 7170,8 \text{ H}^{-1} \quad (4.12)$$

Die Querschnittsflächen in den Luftspalten werden als Ebenen angenähert. $A_{L,1}$ gibt dabei den Luftquerschnitt am mittleren Pfad an, $A_{L,2+3}$ mit α nach Abb. 4.10 die Summe der Querschnitte an den äußeren Teilen des Pfades.

$$A_{L,1} = A_M = a_M b_M = 1470 \text{ mm}^2 \quad (4.13)$$

$$A_{L,2+3} = 2l_{L,2}b_M = 2 \frac{a_M}{2 \cos(\alpha)} b_M = 1562,7 \text{ mm}^2 \quad (4.14)$$

Der magnetische Widerstand ergibt sich mit einem Luftspalt von 0,5 mm zu

$$R_{m,L,1} = \frac{l_{L,1}}{\mu_L A_{L,1}} = 270671,7 \text{ H}^{-1} \quad (4.15)$$

$$R_{m,L,2+3} = \frac{l_{L,2}}{\mu_L A_{L,2+3}} = 254608,5 \text{ H}^{-1} \quad (4.16)$$

Der Querschnitt für den magnetischen Fluss im Rotor ergibt sich aus Breite und Tiefe der Eisenringe um die nichtmagnetische Welle. Da sich auch hier der Fluss teilt, wird der Querschnitt wieder verdoppelt.

$$A_R = 2a_R b_R = 2 \cdot 20 \text{ mm} \cdot 49 \text{ mm} = 1960 \text{ mm}^2 \quad (4.17)$$

4. Simulation des AMB

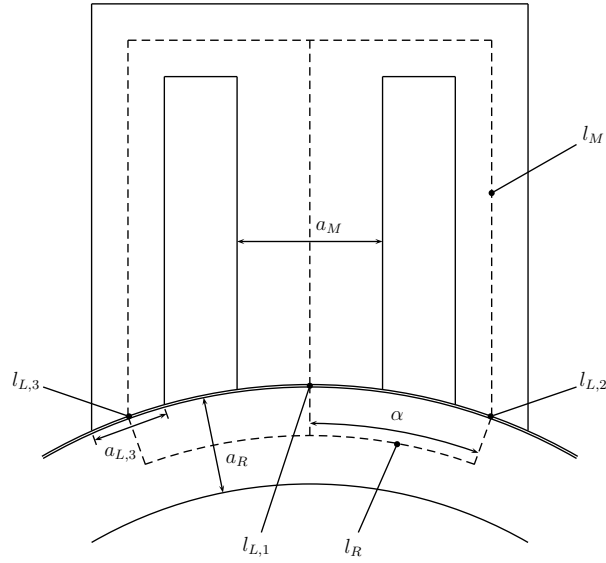


Abbildung 4.10.: Pfad des magnetischen Flusses Φ

Der Weg durch den Rotor l_R wird entlang des Umfangs in der Mitte der Bleche $R_{Pfad,R}$ und radial nach außen angenommen (siehe Abb. 4.10). Mit α im Bogenmaß ergibt sich

$$l_R = 2 \frac{a_R}{2} + \alpha R_{Pfad,R} = 10 \text{ mm} + \alpha \cdot 100 \text{ mm} = 54,6 \text{ mm} \quad (4.18)$$

Analog zu (4.12) folgen aus obigen Gleichungen der magnetische Widerstand des Rotors $R_{m,R}$.

$$R_{m,R} = 1491,3 \text{ H}^{-1} \quad (4.19)$$

4.3.2. Magnetischer Fluss und Magnetische Kraft

Gleichung (4.20) zeigt das Ergebnis für den magnetischen Fluss nach (4.5) mit $N = 28$ Windungen und einem Strom von $I = 10 \text{ A}$.

$$\Phi = \frac{NI}{\sum_i R_{m,i}} = 5,24 \cdot 10^{-4} \text{ Vs} \quad (4.20)$$

Nach (4.7) folgt für die Flussdichte B in den Luftspalten

$$B_{L,1} = \frac{\Phi}{A_{L,1}} = 0,36 \text{ T} \quad (4.21)$$

$$B_{L,2} = \frac{\Phi}{A_{L,2}} = 0,34 \text{ T} \quad (4.22)$$

4. Simulation des AMB

und für die magnetische Kraft in den Luftspalten nach (4.8)

$$F_{m,1} = \frac{B_{L,1}^2 A_{L,1}}{2\mu_0} = 74,4 \text{ N} \quad (4.23)$$

$$F_{m,2} = \frac{B_{L,2}^2 A_{L,2}}{2\mu_0} = 70 \text{ N} \quad (4.24)$$

Für die radiale magnetische Kraft folgt mit dem Winkel *alpha*:

$$F_{ges} = F_{m,1} + F_{m,2} \cos(\alpha) = 140,3 \text{ N} \quad (4.25)$$

Mit einem Unterschied von weniger als 1% stimmen die beiden Ergebnisse aus FE-Simulation und analytischer Rechnung sehr gut überein.

4.4. Anpassung und Berechnung mit M111-35N

Nachdem *femm4.2* mit einem Parametersatz verifiziert wurde, erfolgte eine Simulation mit mehreren EM. Ausserdem wurde das in Kapitel 3.4.1 gemessene M111-35N für die FE-Simulation verwendet. Dazu wurde die angenäherte Anhystereseurve in *femm4.2* eingefügt und damit die nichtlineare Beziehung zwischen Feldstärke H und Flussdichte B des Magnetmaterials berücksichtigt.

Für die Simulation wurden die Ströme der Matlab-Simulation aus Abb. 4.4 zum Zeitpunkt $t = 0,05\text{s}$ verwendet. Zu diesem Zeitpunkt wirkt eine Kraft von 2 kN bei ausgeschaltetem HCA-Kanal 1 auf den Rotor. Tabelle 4.1 und 4.2 zeigen die Positions- und Stromwerte der MATLAB-Simulation zum Zeitpunkt $t = 0,05\text{s}$.

x-Richtung	53,6 μm
y-Richtung	18,9 μm

Tabelle 4.1.: Rotorposition bei $t = 0,05\text{s}$ der MATLAB-Simulation

EM-Kanal	Stromstärke
1	0 A
2	13,39 A
3	18,87 A
4	30,18 A
5	36,44 A
6	30,77 A

Tabelle 4.2.: Ströme der EM bei $t = 0,05\text{s}$ der MATLAB-Simulation

Abb. 4.11 zeigt ein Flussdichtediagramm als ein Ergebnis der FE-Simulation. Tabelle 4.3 zeigt den Unterschied von ca. 5% zwischen der analytischen Lagerkraftermittlung der MATLAB-Simulation und der FE-Simulation.

	MATLAB	<i>femm4.2</i>
x-Richtung	-1249,8 N	-1197,3 N
y-Richtung	-1237,8 N	-1185,9 N

Tabelle 4.3.: Vergleich der Simulationsergebnisse

4. Simulation des AMB

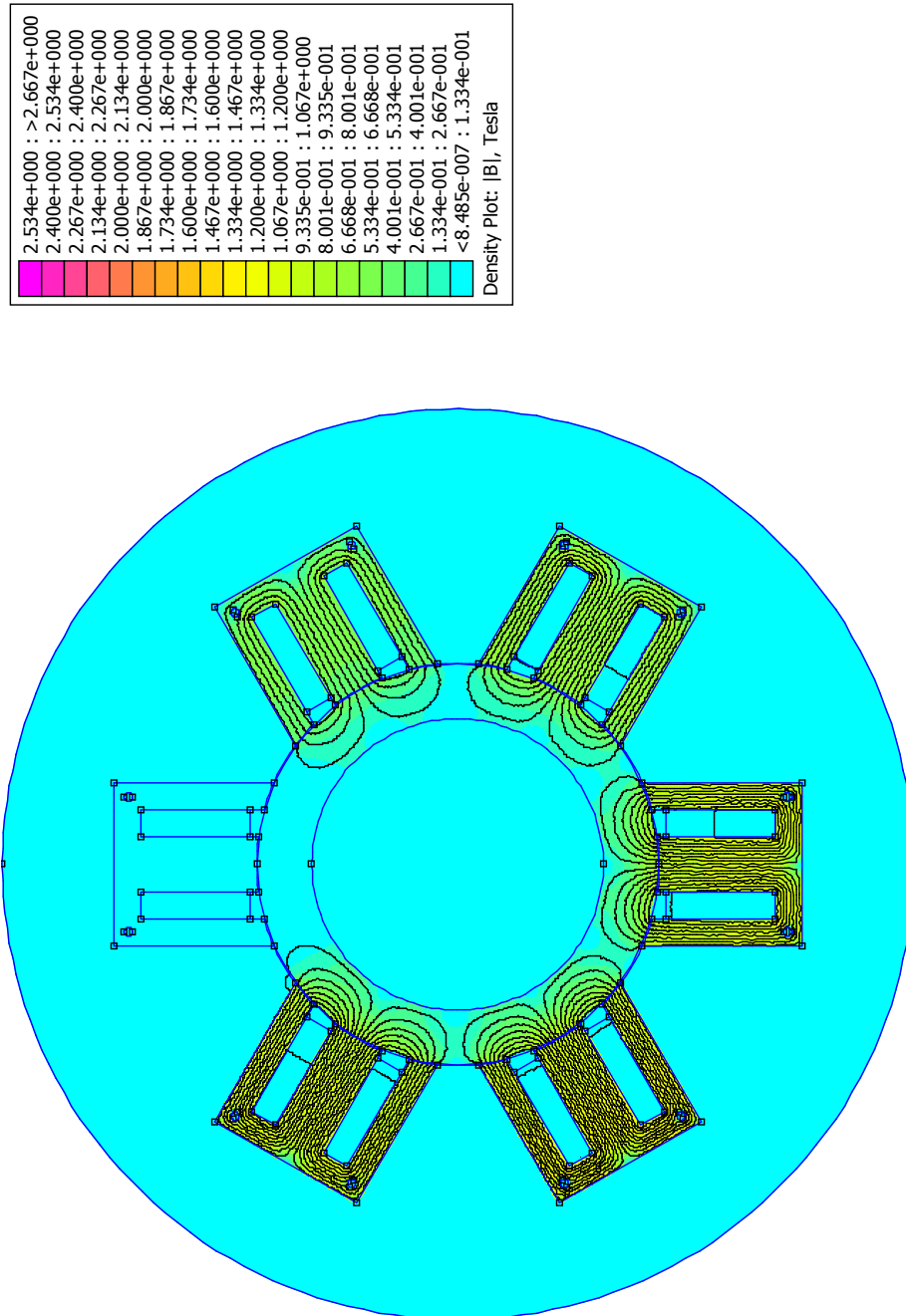


Abbildung 4.11.: Flussdichtediagramm der FE-Simulation mit M111-35N

5. Selsensing-Versuchsstand

In der Abteilung für Messtechnik und Aktorik am Institut für Mechanik und Mechatronik der TU-Wien wurde ein Versuchsstand zur Aufnahme von Strom-Kraft-Abstands-Kennfeldern von Elektromagneten entwickelt (Abb. 5.1). Der Versuchsstand besteht aus einem Magnetmodul, einem den Maßen des AMBs entsprechenden magnetischen Rotorstück, einem Schrittmotor, der über ein Gewinde den Luftspalt zwischen Rotorstück und EM verändern kann, und Sensoren zur Strom-, Kraft- und Abstandsmessung.

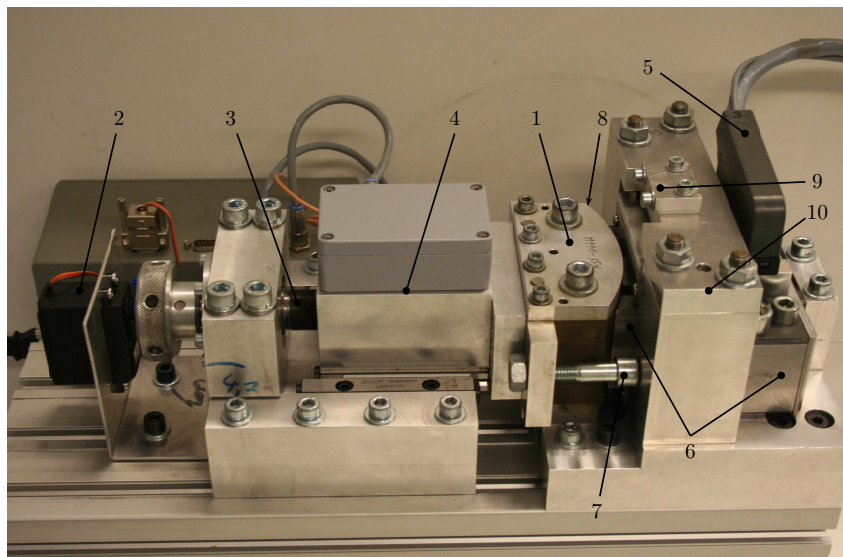


Abbildung 5.1.: Selsensing-Versuchsstand: (1) Rotorstück, (2) Schrittmotor, (3) Gewinde, (4) Kraftmesszelle mit DMS-Vollbrücke und Verstärker, (5) Anschluss zum HCA-Modul, (6) Elektromagnet, (7) Anschlagsschraube, (8) Referenz-Wirbelstromsensor, (9) Kameramodul (Kamera abgenommen), (10) Kamerabrücke

Neben der Aufnahme von Kennfeldern soll der Versuchsstand zur Prüfung von Selsensing¹-Techniken dienen. Deshalb wird dieser Versuchsstand im Folgenden als Selsensing-Versuchsstand bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit wurde der Selsensing-Versuchsstand dazu verwendet, die lokalen Wirbelstromsensoren der EM-Module zu kalibrieren.

¹Beim Selsensing wird der Abstand nicht über einen eigenen Sensor sondern über die Steilheit von Flanken im Strom berechnet, die sich mit der Induktivität - mit dem Abstand - verändert.

5. *Selfsensing-Versuchsstand*

Die Sensorik des Selfsensing-Versuchsstandes besteht aus

- einem Wirbelstromsensor zur Messung des Luftspalts zwischen EM und Rotor,
- einer DMS-Vollbrücke zur Messung der auf den Rotor wirkenden Kraft.

Der durch die EM-Spule fließende Strom wird vom HCA-Modul geregelt und der aktuell gemessene Wert über LabVIEW ausgegeben.

Die Auswertung der Messungen erfolgt über eine Datenerfassungskarte (NiDaqPad-6015) und LabVIEW auf einem Labor-PC. Über ein im Rahmen dieser Arbeit erweitertes LabVIEW-Programm ist es neben der Aufzeichnung der Messergebnisse möglich, den Abstand zwischen EM und Wellenstück zu regeln sowie eine Sollwertvorgabe für den durch den EM fließenden Strom an das HCA-Modul zu übermitteln. Die Steuerung des Schrittmotors erfolgt über die Datenerfassungskarte. Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde das LabVIEW-Programm dahingehend erweitert, dass automatisierte Serienmessungen für die Strom-Abstand-Kraft-Kennfeldaufnahme möglich sind. Als Nebeneffekt ist es dadurch möglich auch die im EM-Modul integrierten Wirbelstromsensoren automatisiert zu kalibrieren.

Neben der Programmierung des Mess- und Steuerprogrammes mit LabVIEW wurden folgende Tätigkeiten zur Inbetriebnahme des Selfsensing-Versuchsstandes durchgeführt werden:

- Kalibrieren eines Referenzwirbelstromsensors des Selfsensing-Versuchsstandes zur Abstandsmessung,
- Kalibrieren der DMS-Vollbrücke zur Kraftmessung.

5.1. **Kalibrierung des Referenzwirbelstromsensors im Selfsensing-Versuchsstand**

Die Kalibrierung des Referenzwirbelstromsensors erfolgte mittels Fühlerlehre. Dazu wurde der Luftspalt auf Null eingestellt und die Abstandsschraube mit der Kamerabrücke (siehe 5.1) in Kontakt gebracht und gekontert. Anschließend wurden Bleche unterschiedlicher Stärke zwischen Abstandsschraube und Kamerabrücke geklemmt und die Spannung am Wirbelstromsensor-Verstärker abgegriffen. Nach fünf Messreihen ergaben sich die in Abb. 5.2 dargestellten Kennlinien mit Berechnung der kleinsten Fehlerquadrate (least squares) und Konfidenzintervall auf 5% Signifikanzniveau.

5.2. **Kalibrierung der DMS-Vollbrücke**

Für die direkte Kalibrierung der DMS-Brücke wurde ein Kraftaufnehmer vom Typ U2A der Firma HBM verwendet. Das Signal wurde vom Brückenverstärker AE101,

5. Selsensing-Versuchsstand

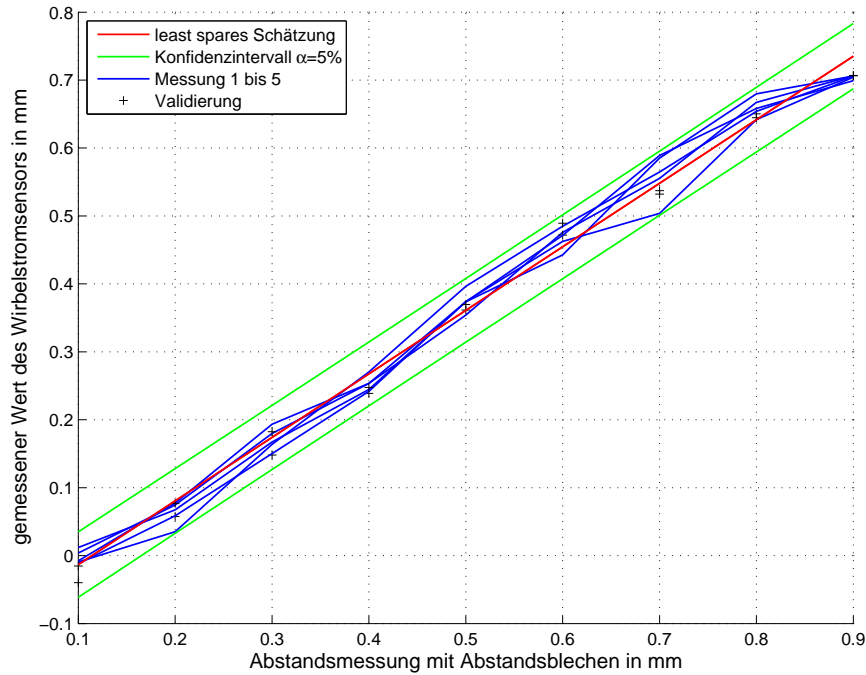


Abbildung 5.2.: Kalibrieren des Referenz-Wirbelstromsensors über Abstandsbleche

ebenfalls von HBM, verstärkt, von der Datenerfassungskarte Ni DAQPad-6015 digitalisiert und über LabVIEW und MATLAB ausgewertet.

5.2.1. Ausmessen des Brückenverstärkers

Der Brückenverstärker (BV) wurde auf die vom Kraftaufnehmer (HBM) vorgegebene maximale Kraftamplitude von $2 \frac{\text{mV}}{\text{V}}$ eingestellt, um den maximalen Spannungsbereich am Ausgang von $\pm 10 \text{ V}$ nützen zu können. Nach einem Offset-Abgleich des Brückenverstärkers wurde dieser über das Kalibriergerät HBM K3602 (KG) ausgemessen. Dabei gibt das Kalibriergerät verschiedene Messbrücken und damit verschiedene Brückenausgangsspannungen vor, die dem Brückenverstärker als Eingang anliegen. Am Ausgang des Brückenverstärkers wird die Spannung gemessen und über der Vorgabe des Kalibriergerätes aufgetragen. Sieben Messreihen, fünf zur Identifikation, zwei zur Validierung wurden durchgeführt und sind in Abb. 5.3 mit least squares Schätzung und 5%-Konfidenzintervall dargestellt.

Die Berechnung der Empfindlichkeit des Brückenverstärkers E_{BV} ist in den Gleichungen (5.1) bis (5.3) angegeben. Dabei wird die Vorgabe des Kalibriergerätes mit W_{KG} und die Ausgangsspannung des Brückenverstärkers mit U_{BV} bezeichnet. $\hat{s}_{i,xy}$ entspricht der Kovarianz zwischen W_{KG} und U_{BV} , \hat{s}_i der Varianz der Messreihe.

5. Selsensing-Versuchsstand

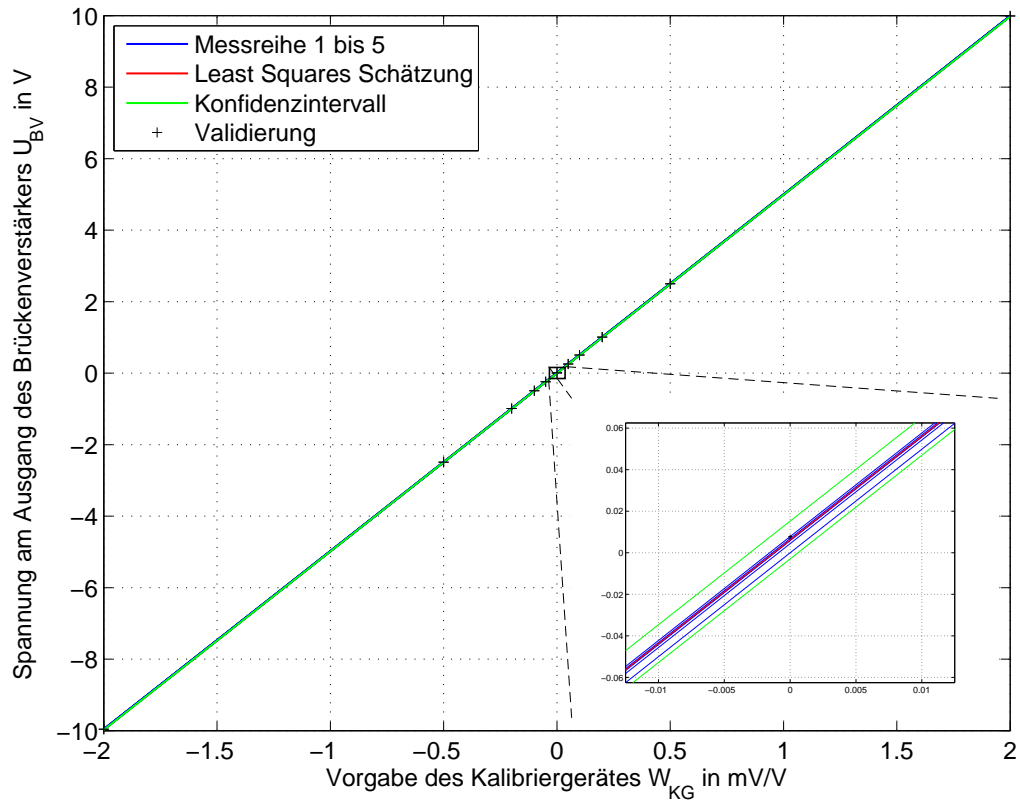


Abbildung 5.3.: Abhängigkeit der Ausgangsspannung am Brückenverstärker zur Vorgabe des Kalibriergerätes

$$E_{i,BV} = \frac{\hat{s}_{i,xy}}{\hat{s}_i} \quad (5.1)$$

$$E_{BV} = \frac{\sum_{i=1}^5 E_{i,BV}}{5} \quad (5.2)$$

$$E_{BV} = \frac{dU_{BV}}{dW_{KG}} = 4,99 \frac{\text{V}}{\frac{\text{mV}}{\text{V}}} \quad (5.3)$$

Mit der Empfindlichkeit des Brückenverstärkers und der Empfindlichkeit des HBM-Kraftaufnehmers E_{HBM} aus dem Datenblatt kann die Empfindlichkeit für die gesamte Messkette berechnet werden.

$$E_{HBM} = \frac{2 \frac{\text{mV}}{\text{V}}}{200 \text{ kg}} \quad (5.4)$$

$$E_{F,HBM} = \frac{dW_{HBM}}{dF} \frac{dU_{BV}}{dW_{HBM}} = E_{HBM} E_{BV} = 5,08 \frac{\text{mV}}{\text{N}} \quad (5.5)$$

5.2.2. Direkte Kalibrierung der DMS-Vollbrücke

Über der durch den HBM-Kraftaufnehmer gemessenen Kraft werden Kennlinien der verstärkten Brückenspannung vom Selsensing-Versuchsstand aufgenommen. Mit fünf Messreihen und least squares Schätzung wurde identifiziert, mit zwei weiteren Messreihen validiert. Das Ergebnis der Messungen und Identifikation ist in Abb. 5.4 dargestellt.

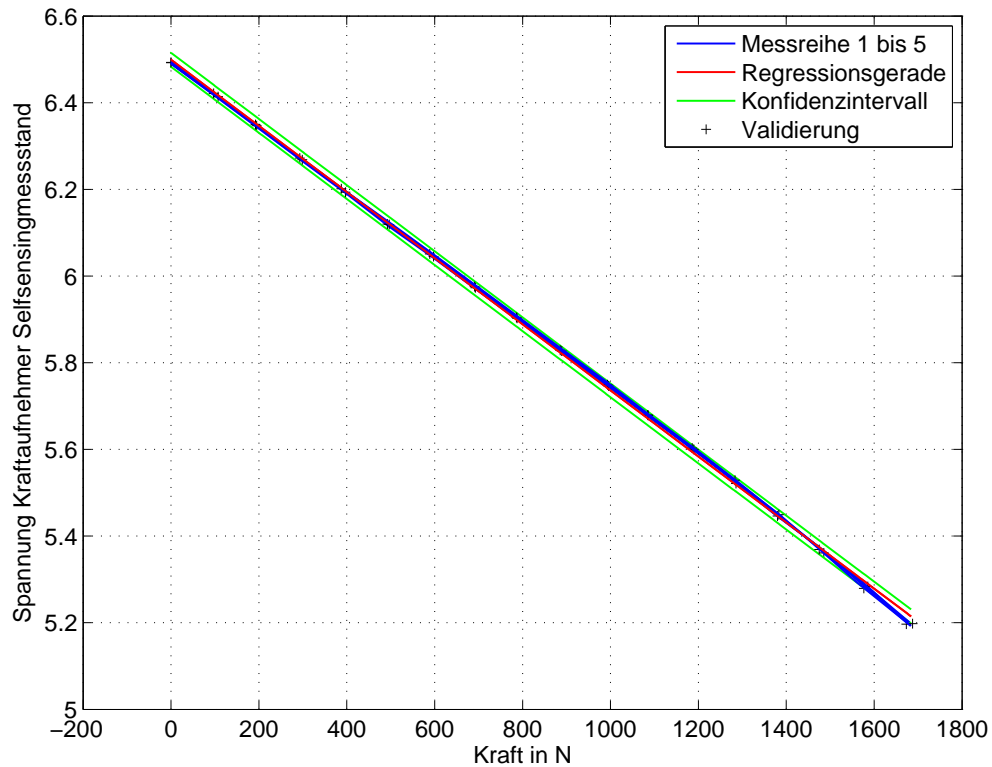


Abbildung 5.4.: Direkte Kalibrierung der DMS-Vollbrücke des Selsensing-Versuchsstandes

Analog zu den Gleichungen 5.1 bis 5.3 ergibt sich die Empfindlichkeit der Kraftmesskette des Selsensing-Versuchsstandes E_{DMS} zu:

$$E_{DMS} = \frac{\sum_{i=1}^5 \frac{\hat{s}_{i,xy}}{\hat{s}_i}}{5} \quad (5.6)$$

$$E_{DMS} = -7,6301 \cdot 10^{-4} \frac{\text{V}}{\text{N}} \quad (5.7)$$

6. Kalibrieren der EM-Wirbelstromsensoren

Zur Messung des Luftspalts zwischen EM und Rotor sind in den EM-Modulen des AMBs Wirbelstromsensoren integriert. Sie erfassen den Rotorabstand zum Stator und geben so die Messgröße für die Abstandsregelung vor. Zusätzlich erfassen zwei Referenzwirbelstromsensoren die Rotorposition. Von den Wirbelstromsensoren Way-Con IC12-02 wurden im Selsensing-Versuchsstand (Abb. 5.1) Kalibrierkennlinien für den Betriebsbereich aufgenommen um die Eignung der Sensoren feststellen zu können und die Schaltung zu testen. Die Messkette inkludiert dabei nicht das HCA-Modul sondern besteht aus einem Wirbelstromsensorverstärker und der Datenerfassungskarte NiDaqPad-6015. Auch der Referenz-Wirbelstromsensor des Selsensing-Versuchsstandes verfügt über einen Verstärker, dessen Ausgangsspannung mit der Datenerfassungskarte gemessen wird. Die Aufzeichnung der Messergebnisse erfolgt mittels LabVIEW am PC, die Datenaufbereitung unter Einsatz von MATLAB.

6.1. Die automatisierte Kennlinienaufnahme

Mit Kenntnis der Kennlinie des Referenzwirbelstromsensors des Selsensing-Versuchsstandes konnte eine automatisierte Kalibrierung der EM-Wirbelstromsensoren durchgeführt werden. Dabei wurde über dem gemessenen Abstand des bereits kalibrierten Referenzsensors das EM-Wirbelstromsensordesignal aufgetragen.

Die automatisierte Kennlinienaufnahme weist folgende Charakteristika auf:

1. Der Strom ist über die ganze Messung auf 0 A gestellt.
2. Das Rotorstück wird auf einen vorgewählten Abstand zum Magnet gefahren (Standby-Abstand).
3. Ein Offset-Abgleich des Kraftsignals wird durchgeführt.
4. Das Rotorstück wird so lange Richtung EM bewegt, bis LabVIEW-Mess- und Steuerprogramm den mechanischen Kontakt in Form eines Kraftanstiegs registriert.
5. Hier wird der Offset-Abgleich des Referenzabstandssignals des Selsensing-Versuchsstandes durchgeführt.

6. Kalibrieren der EM-Wirbelstromsensoren

- Über den Referenzwirbelstromsensor wird mit Hilfe des LabVIEW-Programmes die Größe des Luftspalts auf voreingestellte Werte geregelt.
- Für jeden Abstand wird das Signal des EM-Sensors gespeichert.
- Danach wird eine neue Messreihe mit Punkt 2 begonnen.
- Nach Beendigung aller Messreihen können die aufgenommenen Werte gespeichert und mit einer vorbereiteten MATLAB-Routine ausgewertet werden.

6.2. Kennlinien der EM-Wirbelstromsensoren

Die gemessenen Kennlinien sind mit Least Squares Schätzung und Konfidenzintervall auf 5% Signifikanzniveau in Abb. 6.1 und Abb. A.1 bis Abb. A.5 in Anhang A angegeben. Zur Schätzung wurden fünf Messreihen verwendet, mit zwei Weiteren wurde das Ergebnis validiert.

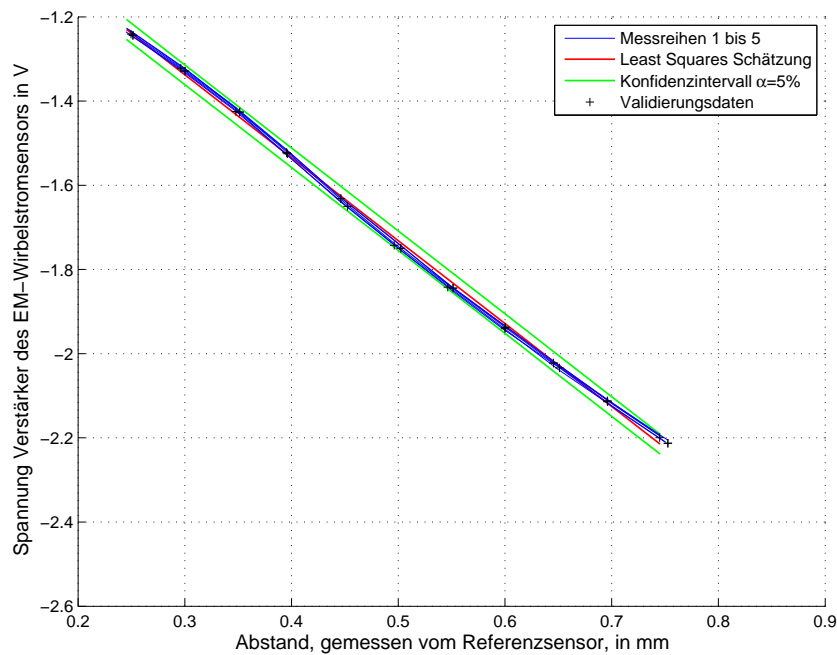


Abbildung 6.1.: Kennlinie für EM-Wirbelstromsensor 1

7. Überwachungssoftware

7.1. Messsignale

Um den Betrieb des AMBs überwachen zu können, wurde eine LabVIEW-Applikation geschrieben. Mit dieser Software lassen sich sowohl online Messdaten der HCA-Module („LiveView“) als auch Messdaten einer Datenerfassungskarte erfassen.

Tabelle 7.1 zeigt die Messdaten, die von „LiveView“ während des Betriebes des AMB-Versuchsstandes zur Verfügung gestellt werden.

Messgröße	Erklärung
HCA Nr.	Nummer des HCA-Moduls
Modus	Modus, in dem sich das HCA-Modul befindet
Timestamp	Timestamp des DSC
T_{max}	maximale Temperatur während des letzten Arbeitszyklus in bit des ADC
d_{ADC}	Luftspalt zwischen EM und Rotor in bit des ADC
I_{min}	minimaler Strom während des letzten Arbeitszyklus in bit des ADC
I	aktuell gemessener Strom I, gemittelt über den letzten Arbeitszyklus in bit des ADC
I_{max}	maximaler Strom während des letzten Arbeitszyklus in bit des ADC
$U_{zw,min}$	minimale Zwischenkreisspannung während des letzten Arbeitszyklus in bit des ADC
U_{zw}	aktuell gemessene Zwischenkreisspannung, gemittelt über den letzten Arbeitszyklus in bit des ADC
$U_{zw,max}$	maximale Zwischenkreisspannung während des letzten Arbeitszyklus in bit des ADC
End of Set	Bezeichnet den Abschluss des Übermittlungsblocks

Tabelle 7.1.: Messgrößen, die von „LiveView“ erfasst werden

Die Datenerfassungskarte digitalisiert im Betrieb das Signal der Referenzwirbelstromsensoren (siehe Abb. 2.2), womit eine von den HCA-Modulen unabhängige Messung der Rotorposition zur Verfügung steht.

7.2. Beschreibung der Überwachungssoftware

Die Überwachungssoftware besteht aus vier Blöcken:

- Eingabeblock
- Messblock für die HCA-Module
- Messblock für die Datenerfassungskarte
- Steuerungsblock für die HCA-Module
- Auswerteblock zur Darstellung der Messergebnisse

7.2.1. Eingabeblock

Der Eingabeblock besteht aus einer Schleife, die über eine Ereignisstruktur gesteuert wird. Die Ereignisstruktur wartet auf eine Benutzereingabe, ein „Event“, und führt die zu dieser Eingabe passende Aktionen aus. Tabelle 7.2 zeigt die wichtigsten Eingaben und die ausgelösten Aktionen. In Abb. 7.1 kann man die Ereignisstruktur in der For-Schleife für die Eingabe „Stromsetzen“ erkennen. Jedes „Event“ der Ereignisstruktur schreibt die zur Ausführung benötigten Daten in „Queues“, die zur Kommunikation zwischen den fünf Blöcken dienen.

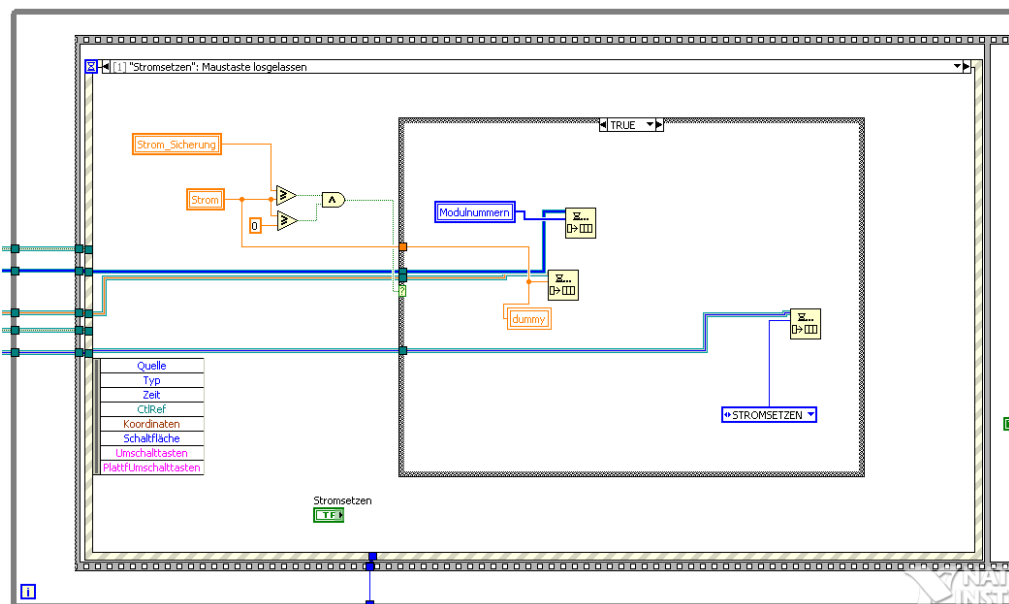


Abbildung 7.1.: Eingabeblock; die Eingaben des Users werden verarbeitet und an die „Befehls-Queues“ weitergesendet

7. Überwachungssoftware

Event der Ereignisstruktur	Aktion
Stromsetzen	Soll-Stromstärke wird auf den gewählten Wert gesetzt
Strom Wertänderung	Soll-Stromstärke wird auf den gewählten Wert gesetzt
Stromregelung EIN	Startet die Stromregelung mit dem Wert des Eingabefeldes als Sollwert
Stromregelung AUS	stoppt die Stromregelung, es fließt kein Strom
LiveView Start	Startet das Einlesen von Messwerten über „LiveView“
LiveView Stopp	Stoppt das Einlesen von Messwerten über „LiveView“
Positionsregelung Start	Startet die Positionsregelung in den gewählten Modulen
Positionsregelung Stopp	Stoppt die Positionsregelung in den gewählten Modulen, der Strom ist 0 A
Alle Module wählen	alle funktionierenden Module werden angewählt
Datentrigger	DSC1 speichert über einen Zyklus alle Messwerte
Sende Daten	DSC1 sendet die zuvor gespeicherten Daten des Zyklus
Exit	„serielleschnittstelle.exe“ wird geschlossen
Stopp	die Überwachungssoftware wird beendet

Tabelle 7.2.: Überblick über die wichtigsten Benutzereingaben und deren Folgen

7.2.2. Messblock für LiveView

Der in Abb. 7.2 dargestellte Messblock für die HCA-Module ruft mit einer Wiederholungsrate von 100 Hz über „LiveView“ die in Tab. 7.1 dargestellten Messergebnisse ab. Bei Beendigung des Programms können die hier aufgenommenen Werte gespeichert werden. Im Zentrum des Blocks steht ein Unterprogramm, das die Kommunikation mit „LiveView“ übernimmt und die Daten in der lokalen Variablen „Daten_gemessen“ speichert. Weiters wird in jedem Schleifendurchlauf die Systemzeit ermittelt und analog zu den gemessenen Daten als Array in einer lokalen Variablen gespeichert.

7.2.3. Messblock für die Datenerfassungskarte

Zusätzlich zu den über die HCA-Module gemessenen Signalen wird die Rotorposition über die Referenzwirbelstromsensoren und die Datenerfassungskarte NiDaqPad-6015 im in Abb. 7.3 dargestellten Block ermittelt. Analog zum Messblock für die HCA-Module ist auch hier die Abfragerate 100 Hz, zusätzlich erfolgt die Aufzeichnung der Systemzeit.

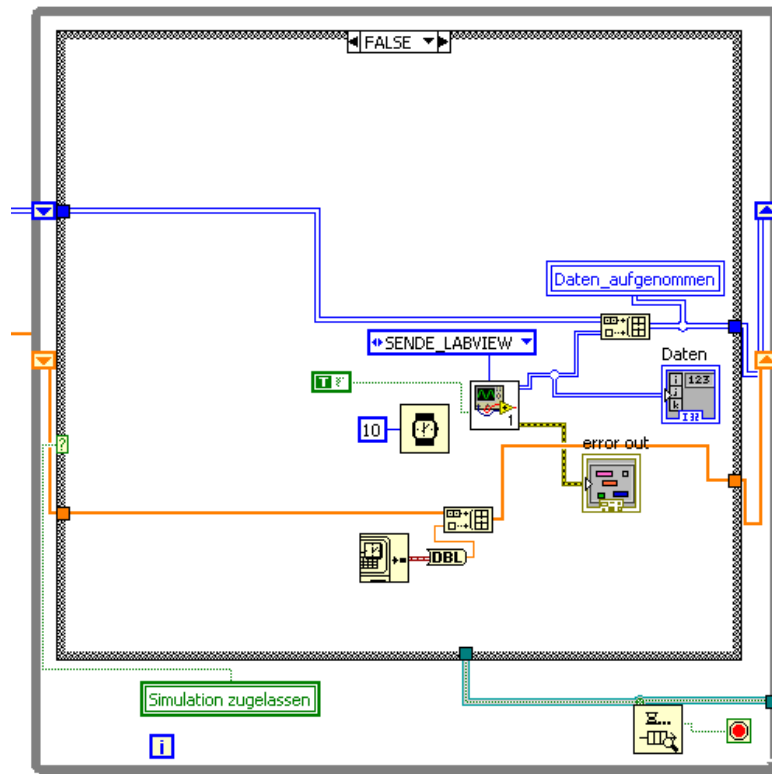


Abbildung 7.2.: Messblock für den Empfang der Messdaten von „LiveView“

7.2.4. Steuerungsblock

Der in Abb. 7.4 dargestellte Block ermöglicht dem Anwender, Befehle über „LiveView“ gezielt an bestimmte HCA-Module zu senden. Alle Informationen für die Steuerung der HCA-Module werden vom Block „User Eingabe“ in Form von „Queues“ gesendet. Die Eingabeinformationen sind der Befehl, der ausgeführt werden soll, die HCA-Nummern, an die der Befehl gesendet werden soll, und ein Sollwert für die Stromstärke, die vom Anwender vorgegeben wird. Diese drei Queues werden dem Unterprogramm eingegeben, das analog zum Messblock für die HCA-Module die Kommunikation mit „LiveView“ übernimmt.

7.2.5. Auswerteblock

Im Auswerteblock werden die in den lokalen Variablen „Daten_gemessen“ und „Referenzsensoren“ gespeicherten Signale verarbeitet, nach HCA-Nummern aufsteigend sortiert (vgl. Tabelle 7.1) und für die Anzeige im Frontpanel aufbereitet. D.h.: die Positionswerte, die in ADC-Einheiten vom Messblock für „LiveView“ bzw. in elektrischen Spannungen vom Messblock für die Datenerfassungskarte vorliegen, wer-

7. Überwachungssoftware

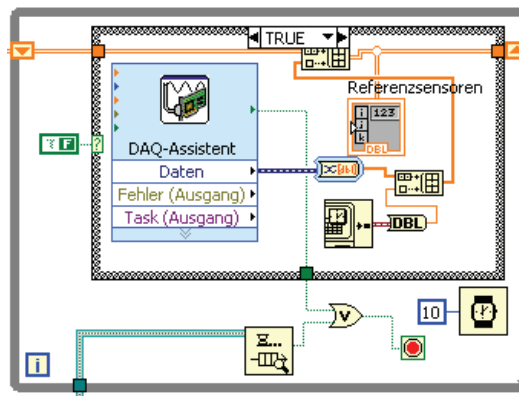


Abbildung 7.3.: Messblock für die Datenerfassungskarte

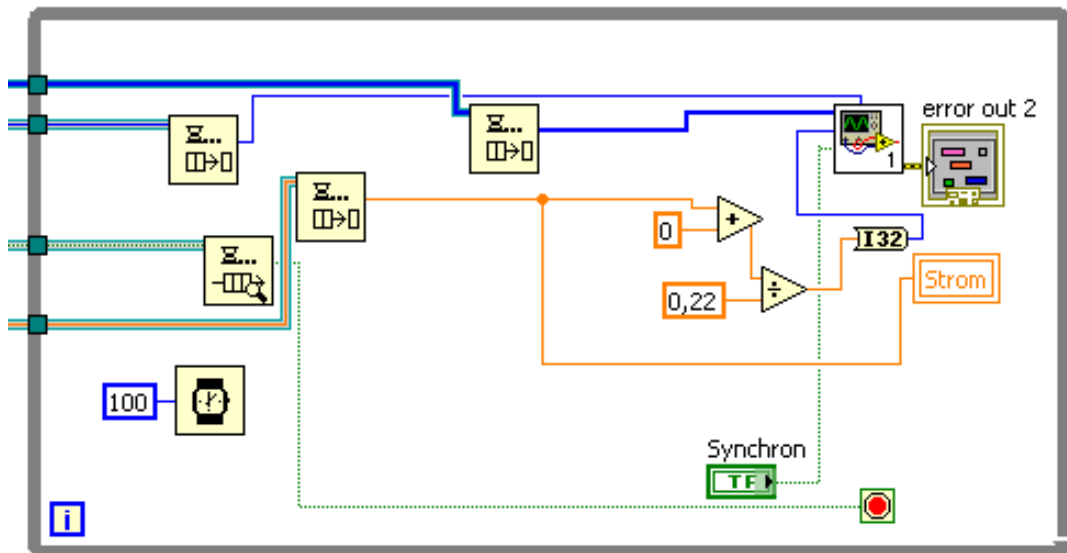


Abbildung 7.4.: Steuerungsblock der HCA-Module

den in Millimeter und die Stromstärken in Ampere umgerechnet, bevor sie grafisch dargestellt werden. Um Rechenzeit zu sparen wird dieser Block nur alle 200 ms durchlaufen. Auf diese Weise erfolgt eine geblockte Verarbeitung der mit 100 Hz in Messblöcken erfassten Daten.

Für weitere Ausführungen, das Aussehen des Frontpanels und detaillierter Funktionsbeschreibung der Überwachungssoftware wird an dieser Stelle auf Anhang B „Anleitung Überwachungssoftware“ verwiesen.

8. Inbetriebnahme des hochzuverlässigen AMB

Nach der Assemblierung des AMB-Versuchstandes musste für die EM-Wirbelstromsensoren noch die Empfindlichkeit gemessen und ein Offset-Ableich durchgeführt werden. Im Vergleich zu den in Kapitel 6 aufgenommenen Messungen werden hier die EM-Module und Sensoren wie im späteren Betrieb direkt über die HCA-Module betrieben.

8.1. Empfindlichkeit der Wirbelstromsensoren

Zur Messung der Empfindlichkeit der EM-Wirbelstromsensoren wird jeder Magnet einmal so stark aufmagnetisiert, dass er den Rotor anhebt und zu sich zieht. Über den gesamten Vorgang werden Messwerte aufgezeichnet, sodass nach Abschluss der Prozedur die Maximal- und Minimalwerte der einzelnen Positionsmessungen über den Nennluftspalt von 0,5 mm zur Berechnung der Empfindlichkeit herangezogen werden können.

Die Empfindlichkeit E der Messkette vom EM-Wirbelstromsensor über den ADC bis zum DSC1 des jeweiligen HCA-Moduls wird in Tabelle 8.1 dargestellt.

EM-Kanal	1	2	3	4	5	6
E in ADC-bit/mm	2230,9	2256,4	1961,8	2445,5	2360	2421,1

Tabelle 8.1.: Empfindlichkeit der Messketten vom Wirbelstromsensor bis zum DSC1 des HCA-Moduls

Zur Offset-Messung wurde eine Position möglichst zentral im Notlager gewählt. Abb. 8.1 zeigt, wie der Rotor mit Abstandsblechen in der Mittelposition fixiert wurde. In dieser Lage wurden die Distanzwerte aller HCA-Module mit Hilfe der Überwachungssoftware ausgelesen. Tabelle 8.2 zeigt die Offsets, mit denen die Mittellage für jeden der sechs EM-Kanäle definiert ist.

Sowohl die Programmierung des DSC1 jedes HCA-Moduls als auch die Überwachungssoftware wurden auf die in den Tabellen 8.1 und 8.2 gezeigten Werte angepasst. Die Umrechnung des ADC-Wertes d_{ADC} auf den tatsächlichen Abstand d in mm erfolgt nach Gleichung (8.1).

$$d = (d_{ADC} - d_{Offset,ADC})E \tag{8.1}$$

8. Inbetriebnahme des hochzuverlässigen AMB

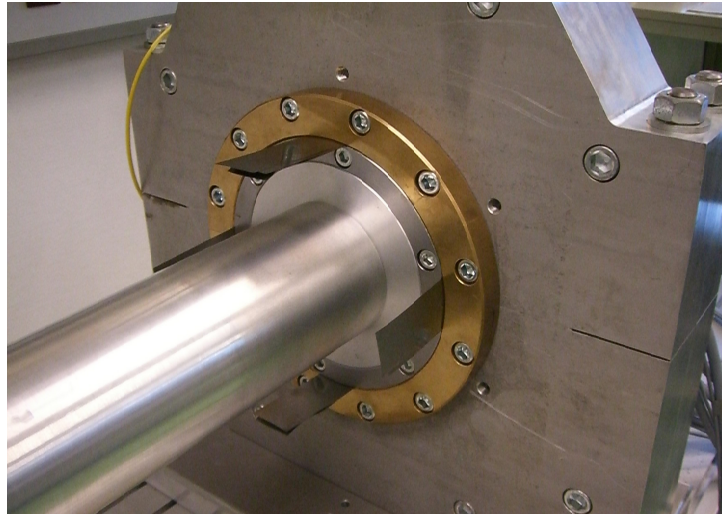


Abbildung 8.1.: Mit Abstandsblechen in Mittellage positionierter Rotor

EM-Kanal-Nr.	1	2	3	4	5	6
$d_{Offset,ADC}$ in ADC-bit	1681	1448	1621,8	2184,7	1754,5	1442,8

Tabelle 8.2.: Offsets $d_{Offset,ADC}$ bei vordefinierter Mittellage

8.2. AMB-Funktionstest

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der Inbetriebnahme zusammengefasst¹. Für die ersten Tests wurde eine Strombegrenzung von 20 A für den Spulenstrom vorgegeben.

Abb. 8.2 zeigt die von der Überwachungssoftware aufgezeichneten Ströme während des Einschaltens - Umlegen des Hauptschalters - der HCA-Module. Auffällig sind die extrem hohen Stromspitzen von mehr als 25 A. Nach genauer Überprüfung mittels Oszilloskop stellte sich heraus, dass es sich dabei nur um falsche Werte während des Einschaltens der Stromversorgung und Initialisierung der DSCs handelt und nicht um tatsächlich auftretende Ströme.

Nach 15 s sind alle HCA-Module eingeschaltet, die EM aber noch stromlos. Mit der Überwachungssoftware ist es möglich, in allen HCA-Modulen gleichzeitig den Positionsregelmodus zu aktivieren, um den Rotor anzuheben (vgl. Anhang: B). Da im Rahmen dieser Diplomarbeit kein Softstart implementiert wurde, steigen die Ströme mit maximaler Anstiegsgeschwindigkeit bis zum vorgegebenen Strom im Arbeitspunkt (Bias-Strom) überlagert von der Regelgröße an (Abb. 8.4).

¹Im HCA-Modul 5 konnte die Positionsregelung nicht erfolgreich aktiviert werden. Der Fehler konnte im Rahmen der Diplomarbeit nicht gefunden werden. Aufgrund der Architektur gewährleisten die fünf anderen funktionierenden EM-Kanäle die Funktion des hochzuverlässigen AMB.

8. Inbetriebnahme des hochzuverlässigen AMB

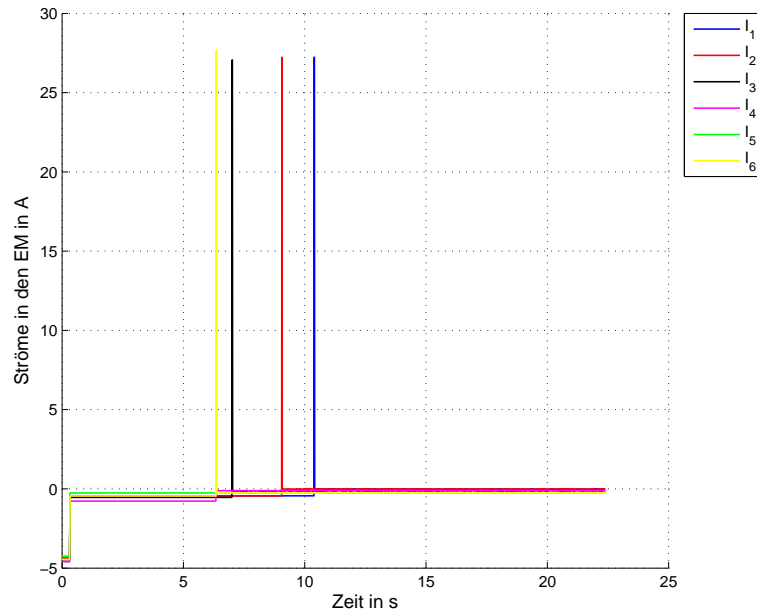


Abbildung 8.2.: Während des Einschaltens der Energieversorgung und der Initialisierung der DSC werden falsche Werte übertragen, die hier als Stromspitzen dargestellt werden. Eine Messung mittels Oszilloskop zeigt, dass diese hohen Ströme nicht vorhanden sind.s

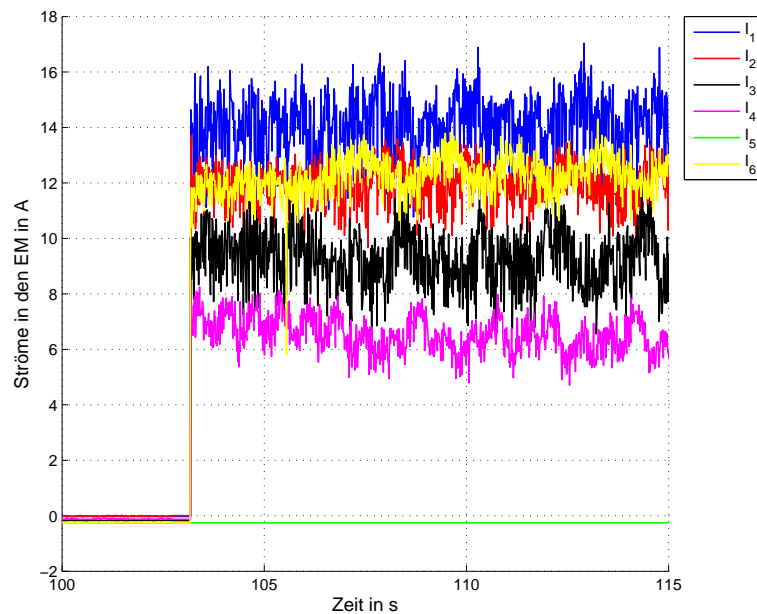


Abbildung 8.3.: Stromsignale während des Einschaltens der Positionsregelung in allen HCA-Modulen

8. Inbetriebnahme des hochzuverlässigen AMB

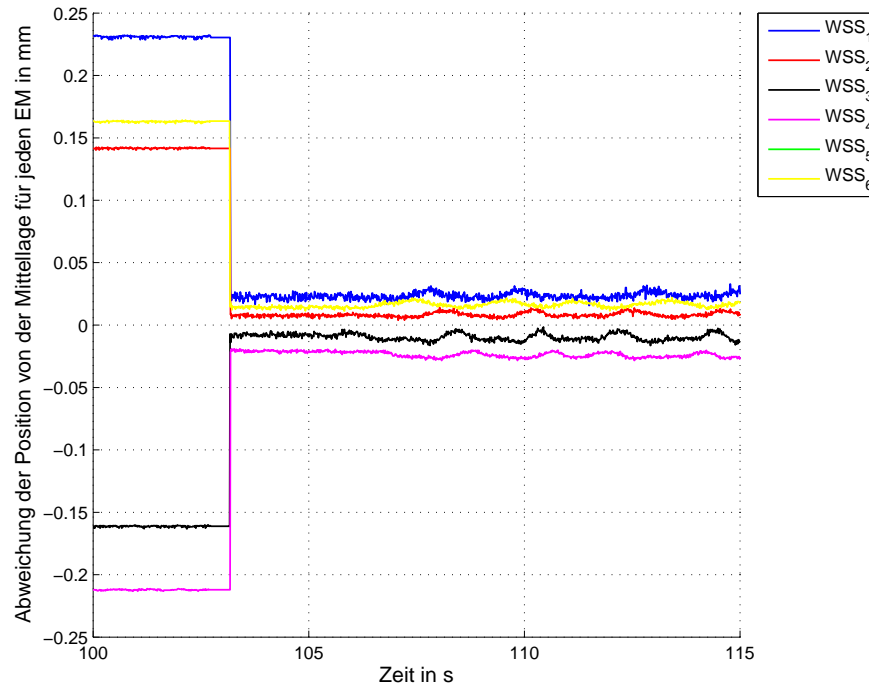


Abbildung 8.4.: Abstand vom Sollwert während des Einschaltens der Positionsregelung in allen HCA-Modulen

Wird der Rotor durch Wirken einer Kraft ausgelenkt, werden die EM, in deren Richtung der Luftspalt verringert wird, schwächer, während die anderen EM über einen Anstieg der Stromstärke die magnetische Kraft erhöhen. Bei konstanter Kraft bleibt ein Regelfehler, der vom PD-Regler nicht auf Null korrigiert werden kann. Abb. 8.5 und Abb. 8.6 zeigen das Verhalten des Magnetlagers unter Belastung. Man erkennt, dass EM-Kanal 1, der vertikal nach oben wirkt, den Strom bis zur Strombegrenzung erhöht und EM-Kanal 4, der vertikal nach unten wirkt, den Strom auf Null regelt. Um auch bei dieser Auslenkung eine Positionsregelung durch EM-Kanal 1 und EM-Kanal 4 zu ermöglichen, wären größere Maximal- und Biasströme nötig. Bemerkenswert ist auch der Stromverlauf von EM-Kanal 2 unter Belastung. Nach Analyse des fehlerhaften Verhaltens stellte sich heraus, dass die Strombegrenzung im DSC2 auf 17 A eingestellt war.

Abschließend sei vermerkt, dass die Funktionalität der Lagerung trotz Ausfall von EM-Kanal 5 des hochzuverlässigen Magnetlagers gegeben ist.

8. Inbetriebnahme des hochzuverlässigen AMB

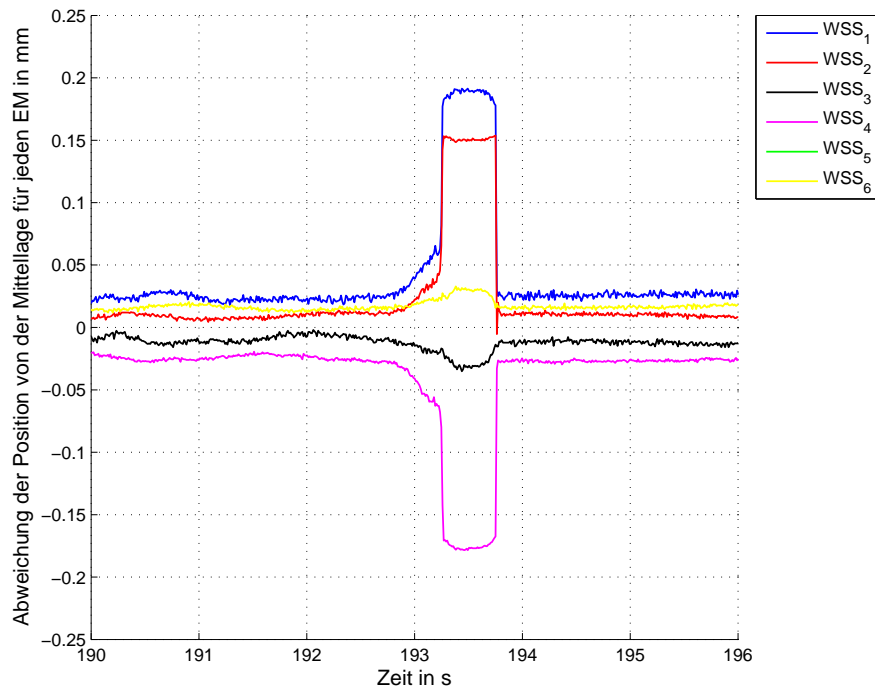


Abbildung 8.5.: Stromsignale unter Belastung der Welle

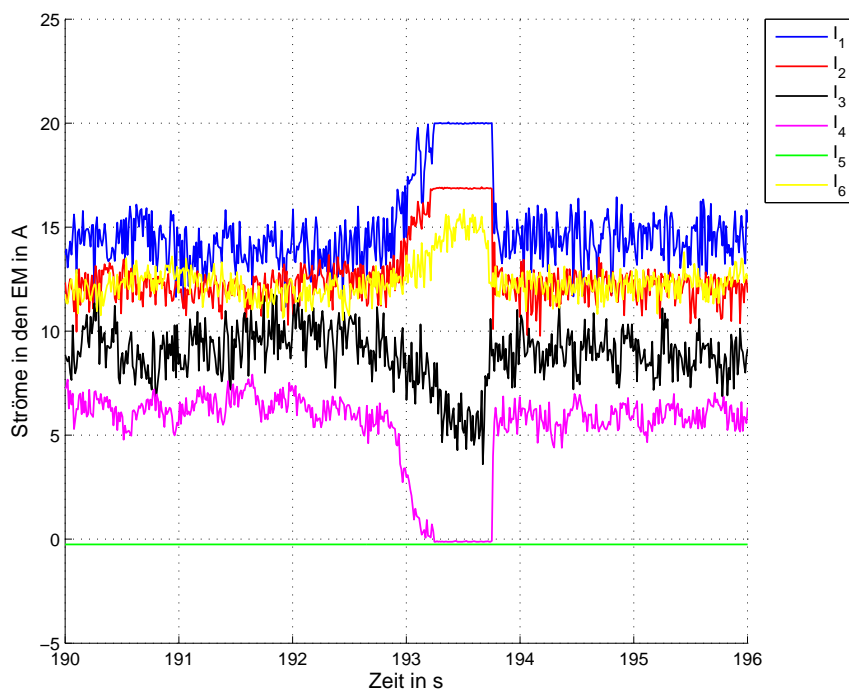


Abbildung 8.6.: Abstand vom Sollwert unter vertikaler Belastung

9. Zusammenfassung

Aufgrund der sehr hohen Komplexität und der Vielzahl elektronischer Bauteile ist die nicht immer ausreichende Zuverlässigkeit bis heute ein Nachteil aktiver Magnetlager. Im Rahmen des FWF-Forschungsprojekts „Ein anspruchsvolles Konzept für höchste AMB Zuverlässigkeit“ wurde seit 2006 am Institut für Mechanik und Mechatronik der Technischen Universität Wien ein hochzuverlässiges Magnetlager entwickelt. Zentrale Elemente des Konzepts sind die Redundanz der elektronischen Bauteile und deren Fehlererkennung, die dezentrale Regelung der Lagerkräfte sowie die Austauschbarkeit von fehlerhaften Komponenten während des Betriebs.

Im Vorfeld wurden bereits alle mechanischen Komponenten des Magnetlagers gefertigt und die einzelnen Module (Versuchsstand, Elektromagnet, Regel- und Verstärkereinheit) zusammengebaut und die für die Regelung und Fehlererkennung verantwortlichen Digital Signal Controller (DSC) programmiert. Das Ziel dieser Diplomarbeit, die Inbetriebnahme des hochzuverlässigen Magnetlagers, erforderte das Ausmessen des Magnetmaterials, das Kalibrieren der Abstandssensoren sowie die Programmierung eines Überwachungs- und Steuerprogramms für das Magnetlager. Um die MATLAB-Simulation des hochzuverlässigen Magnetlagers zu vervollständigen, wurde die B-H-Kennlinie des Magnetmaterials, M111-35N, aufgenommen und eingefügt. Als Vergleich zum Werkstoff des Prototypen dient die Aufnahme der B-H-Kennlinie eines erheblich teureren Werkstoffs mit sehr guten magnetischen Eigenschaften - Vacoflux 50. Die Simulation des Magnetlagers zeigt eine stabile Regelung durch sechs bzw. fünf Elektromagneten, nachdem einer der sechs abgeschaltet wurde. Jeder Elektromagnet-Kanal regelt entkoppelt von den anderen Elektromagnet-Kanälen den Luftspalt zwischen Rotor und zugehörigem Elektromagnet, wodurch die Aufrechterhaltung des Betriebs bei Abschaltung eines Elektromagneten gewährleistet wird.

Um die DSC an die Empfindlichkeiten ihrer zugeordneten Wirbelstromsensoren anzupassen, wurden alle zur Positionsregelung verwendeten Wirbelstromsensoren kalibriert und deren Empfindlichkeiten und Offsets in die DSC übertragen.

Zur Überwachung des Magnetlager-Versuchsstandes wurde ein LabVIEW- Programm geschrieben, das die Steuerung der Regel- und Verstärkermodule (HCA - Hot Swap Amplifier Module) ermöglicht und die gemessene Rotorposition, die Ströme und die Temperaturen der HCA-Module darstellt. Schließlich werden die Messungen der Inbetriebnahme gezeigt.

Neben der Möglichkeit, die Lagerparameter (Steifigkeit, Dämpfung) leicht über die Anpassung der Software des DSC zu ändern, sind folgende Maßnahmen zu nennen, die die Lagereigenschaften verbessern können:

9. Zusammenfassung

- Die Verwendung eines leistungsfähigeren Magnetmaterials (z.B.: Vacoflux 50). Dadurch wird eine höhere magnetische Flussdichte und damit eine höhere Kraftdichte möglich (siehe Kapitel chap:AufnahmeB-H-Kennlinie).
- Eine dünnere Blechung des Magnetmaterials sowie des weichmagnetischen Rotormaterials führt zu einer Verringerung von Wirbelstromverlusten.
- Die Verwendung mehrerer Elektromagnete führt zu einer höheren Zuverlässigkeit und zu stabileren Lagereigenschaften bei Ausfall eines Magnetmoduls.

Weiterführende Arbeiten über den Magnetlager-Versuchsstand könnten sich mit Selsensing-Techniken beschäftigen. Bei dieser Methode wird der Luftspalt nicht durch Abstandssensoren gemessen, sondern aus der abfallenden bzw. ansteigenden Flanke des Spulenstroms berechnet.

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Schema eines Magnetlagers aus [10]	9
1.2.	Homopolarlager [10]	10
1.3.	Heteropolarlager [10]	10
1.4.	Mopico Pipeline-Kompressor [2]	12
1.5.	Achsschnitt des Mopico Pipeline-Kompressors [2]	12
1.6.	Turbomolekularpumpe [4]	13
2.1.	Schematischer Aufbau des hochzuverlässigen AMB aus [7]	15
2.2.	3D-Konstruktion des AMB-Versuchsstandes [6]	16
2.3.	Reale Ausführung des AMB-Versuchsstandes	17
2.4.	Elektronikschaltschrank	18
2.5.	3D-Ansicht des Elektromagneten	19
2.6.	Prinzip des HCA-Moduls	20
3.1.	Messaufbau zur Aufnahme der B-H-Kennlinie	24
3.2.	Maße der Probe M111-35N	26
3.3.	Kondensatoren im Schwingkreis, Ersatzschaltbild	26
3.4.	Übertragungsverhalten des Serienschwingkreises	28
3.5.	B-H-Kennlinie bei 50 Hz, M111-35N	30
3.6.	Primärstrom und Sekundärspannung bei 50 Hz, M111-35N	30
3.7.	B-H-Kennlinie bei 100 Hz, M111-35N	31
3.8.	Primärstrom und Sekundärspannung bei 100 Hz, M111-35N	31
3.9.	B-H-Kennlinie 200 Hz, M111-35N	32
3.10.	Primärstrom und Sekundärspannung bei 200 Hz, M111-35N	32
3.11.	B-H-Kennlinie bei 500 Hz, M111-35N	33
3.12.	Primärstrom und Sekundärspannung bei 500 Hz, M111-35N	33
3.13.	B-H-Kennlinie bei 1 kHz, M111-35N	34
3.14.	Primärstrom und Sekundärspannung bei 1 kHz, M111-35N	34
3.15.	Maße der untersuchten Werkstoffprobe Vacoflux 50	35
3.16.	B-H-Kennlinie Vacoflux 50 bei 50 Hz	36
3.17.	Primärstrom und Sekundärspannung bei 50 Hz, Vacoflux 50	36
3.18.	B-H-Kennlinie Vacoflux 50 bei 100 Hz	37
3.19.	Primärstrom und Sekundärspannung bei 100 Hz, Vacoflux 50	37
3.20.	B-H-Kennlinie Vacoflux 50 bei 200 Hz	38
3.21.	Primärstrom und Sekundärspannung bei 200 Hz, Vacoflux 50	38
3.22.	B-H-Kennlinie Vacoflux 50 bei 500 Hz	39

Abbildungsverzeichnis

3.23. Primärstrom und Sekundärspannung bei 500 Hz, Vacoflux 50	39
3.24. B-H-Kennlinie Vacoflux 50 bei 1 kHz	40
3.25. Primärstrom und Sekundärspannung bei 1 kHz, Vacoflux 50	40
3.26. Angaben des Herstellers [11] zu Vacoflux 50 (statische Messung)	41
4.1. Richtung der Magnetkräfte und Lage der Störkraft in der Simulation	43
4.2. Simulation der Rotorposition	43
4.3. Simulation der auf den Rotor wirkenden magnetischen Kräfte	44
4.4. Simulation der in den Magnetspulen fließenden Ströme	44
4.5. Rotorstück im Magnetlager	45
4.6. Elektromagnet	46
4.7. (1) Spule mit 28 Windungen, (2) ferromagnetischer Kern	47
4.8. Finite Elemente Netz um einen EM und Rotor	48
4.9. Flussdichte des Magnetfeldes eines EM	49
4.10. Pfad des magnetischen Flusses Φ	50
4.11. Flussdichtediagramm der FE-Simulation mit M111-35N	53
5.1. Foto des Selsensing-Versuchsstand	54
5.2. Kalibrieren des Referenz-Wirbelstromsensors über Abstandsbleche	56
5.3. Messergebnisse Brückenverstärker	57
5.4. Direkte Kalibrierung der DMS-Vollbrücke	58
6.1. Kennlinie für EM-Wirbelstromsensor 1	60
7.1. Eingabeblock; die Eingaben des Users werden verarbeitet und an die „Befehls-Queues“ weitergesendet	62
7.2. Messblock für den Empfang der Messdaten von „LiveView“	64
7.3. Messblock für die Datenerfassungskarte	65
7.4. Steuerungsblock der HCA-Module	65
8.1. Mit Abstandsblechen in Mittellage positionierter Rotor	67
8.2. Stromsignale während des Einschaltens des HCA-Moduls	68
8.3. Stromsignale während des Einschaltens der Positionsregelung	68
8.4. Position während des Einschaltens der Positionsregelung	69
8.5. Stromsignale unter Belastung der Welle	70
8.6. Abstand vom Sollwert unter vertikaler Belastung	70
A.1. Kennlinie für EM-Wirbelstromsensor 2	78
A.2. Kennlinie für EM-Wirbelstromsensor 3	79
A.3. Kennlinie für EM-Wirbelstromsensor 4	79
A.4. Kennlinie für EM-Wirbelstromsensor 5	80
A.5. Kennlinie für EM-Wirbelstromsensor 6	80
B.1. Projektdateien	81
B.2. Steuerung der HCA-Module	82

Abbildungsverzeichnis

B.3. Messeinrichtung des AMB-Versuchsstandes	83
B.4. Datenvisualisierung	85
B.5. Steuerung der Verstärker	87

Literaturverzeichnis

- [1] GROSS, B.: *Regelung eines Wechselstrommagnetjochs*. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Wien, 2005.
- [2] MAN DIESEL & TURBO. Url: <http://www.mandieselturbo.com/files/news/files/12079/27.49.10.40e.pdf>, zugegriffen am 12.7.2010.
- [3] MEEKER, D. Url.: <http://www.femm.info/Archives/doc/tutorial-magnetic.pdf>, zugegriffen am 5.3.2009.
- [4] PFEIFFER VACUUM GMBH. Url: <http://www.pfeiffer-vacuum.de/cnt/de/1265/3035/showDetail.oc>, zugegriffen am 12.7.2010.
- [5] SCHAMMASS, A.: *A self-sensing active magnetic bearing: Modulation approach*. Doktorarbeit, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2003.
- [6] SCHULZ, A.: *Simulation eines ausfallsicheren aktiven Magnetlagers*. In: *Proceedings of SIRM 2009 - 8. Internationale Tagung Schwingungen in rotierenden Maschinen*, Wien, Österreich, 2009.
- [7] SCHULZ, A., B. GROSS, M. NEUMANN und J. WASSERMANN: *A sophisticated active magnetic bearing system with supreme reliability*. In: *Proceedings of 10th International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms*, 2008.
- [8] SCHULZ, A., M. SCHNEEBERGER und J. WASSERMANN: *A Reliability Analysis of Switching Amplifier Concepts for Active Magnetic Bearings*. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) 2006*, S. 1460 –1465, 15-17 Mumbai, 2006.
- [9] SCHULZ, A., J. WASSERMANN und M. SCHNEEBERGER: *A reliable switching amplifier for active magnetic bearings*. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) 2003*, Bd. 1, S. 198 – 202 Vol.1, 10-12 S. 198 - 202, Maribor, Slovenia 2003.
- [10] SCHWEITZER, GERHARD; MASLEN, E. H. E. (Hrsg.): *Magnetic Bearings: theory, design, and application to rotating machinery*. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [11] VACUUMSCHMELZE GMBH & Co. KG. Url: http://www.vacuumschmelze.de/fileadmin/documents/broschueren/htbrosch/Pht-004_d.pdf, zugegriffen am 17.3.2009.

Literaturverzeichnis

- [12] WASSERMANN, J., A. SCHULZ und M. SCHNEEBERGER: *Active magnetic bearings of high reliability*. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) 2003*, Bd. 1, S. 194 – 197 Vol.1, 10-12 S. 194 - 197, Maribor, Slovenia, 2003.

- [13] WAYCON POSITIONSMESSTECHNIK GMBH. Url: http://www.waycon.de/fileadmin/pdf/Wirbelstrom_Sensor_IC.pdf, zugegriffen am 3.5.2009.

A. Kennlinien der EM-Wirbelstromsensoren

Hier werden die Kennlinien der EM-Wirbelstromsensoren 2 bis 6 angegeben, deren Aufnahme in Kapitel 6 beschrieben ist.

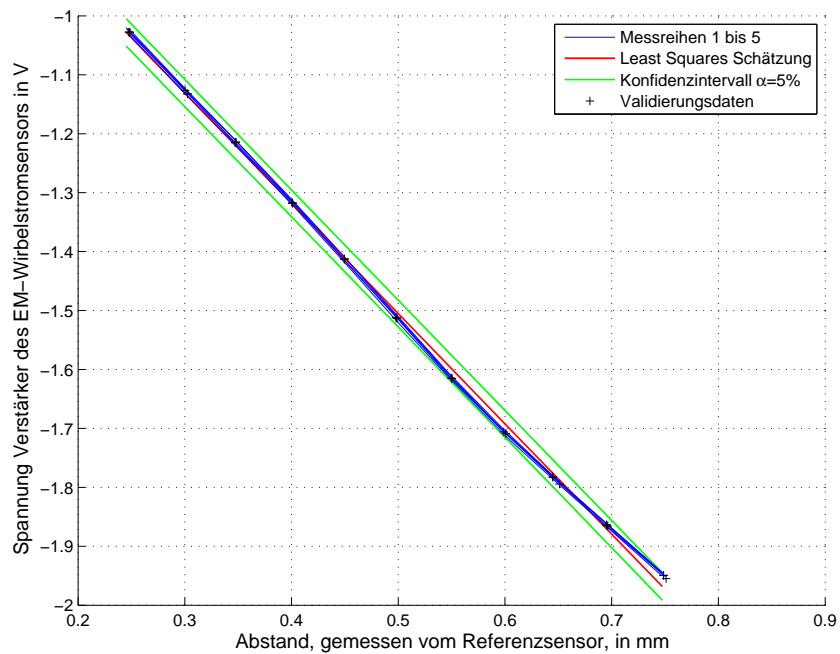


Abbildung A.1.: Kennlinie für EM-Wirbelstromsensor 2

A. Kennlinien der EM-Wirbelstromsensoren

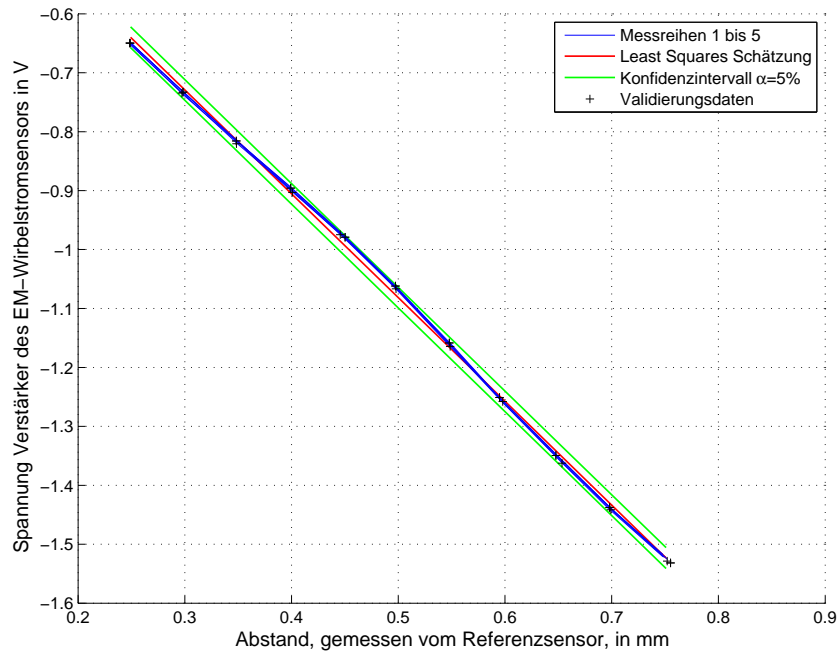


Abbildung A.2.: Kennlinie für EM-Wirbelstromsensor 3

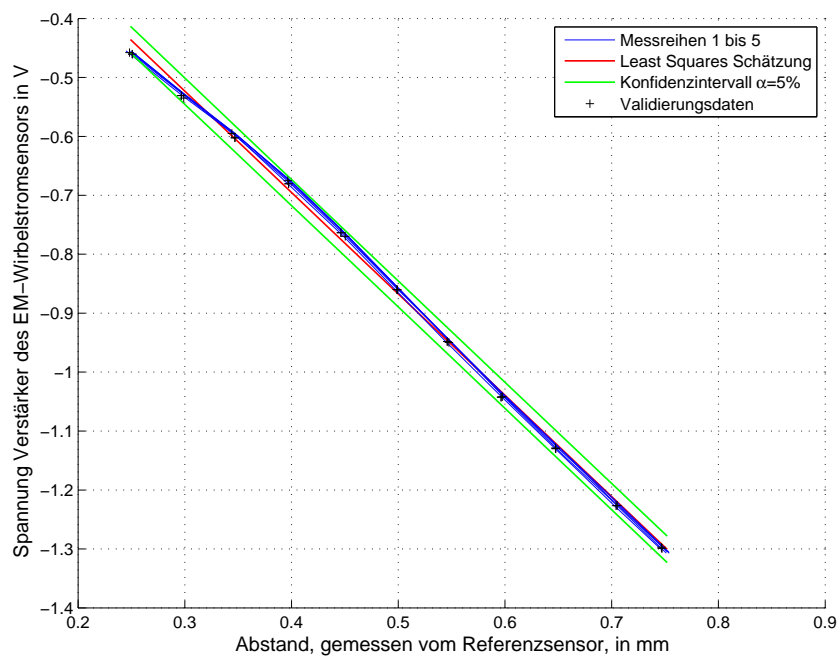


Abbildung A.3.: Kennlinie für EM-Wirbelstromsensor 4

A. Kennlinien der EM-Wirbelstromsensoren

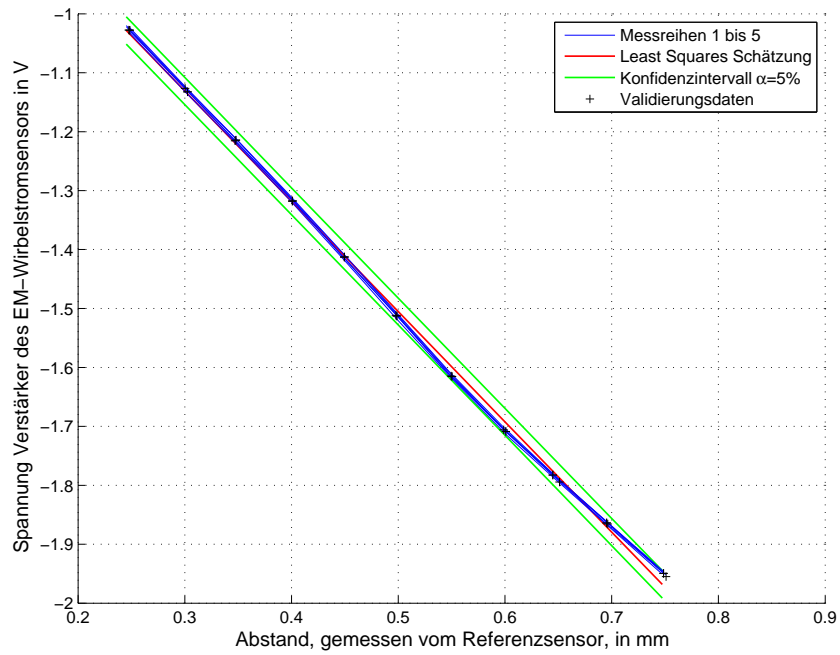


Abbildung A.4.: Kennlinie für EM-Wirbelstromsensor 5

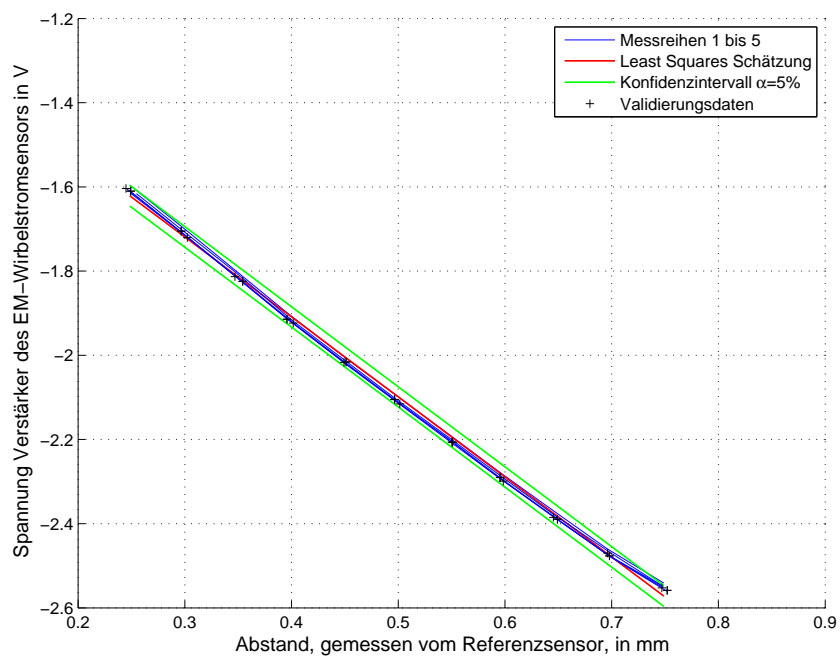


Abbildung A.5.: Kennlinie für EM-Wirbelstromsensor 6

B. Anleitung für die Überwachungs- software des Magnetlagers

B.1. Projekt, VIs, benötigte Dateien

Das Überwachungsprogramm für das ausfallsichere Magnetlager wurde in einem LabVIEW-Projekt unter dem Projektnamen „Seriellekommunikation.lvproj“ realisiert. Abb. B.1 zeigt die dem Projekt zugeordneten Programme (VIs - virtuelle Instrumente). Das Hauptprogramm wurde mit dem File-Namen „Testprogramm _benutzerfreundlich_v5.vi“ erstellt. Die anderen VIs sind Unterprogramme, die im Zuge der Ausführung des Hauptprogramms aufgerufen werden.

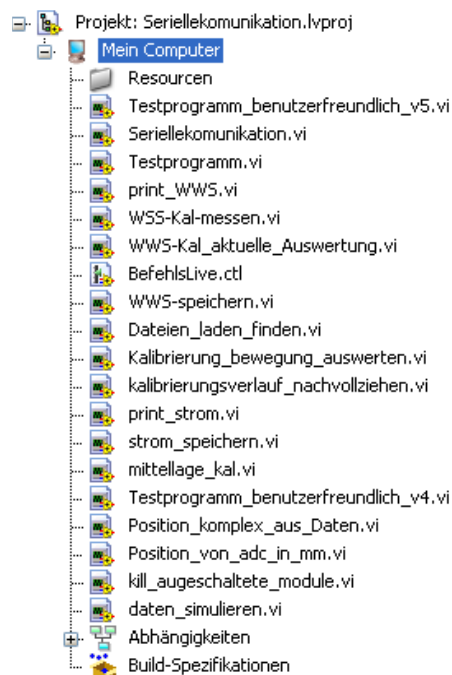


Abbildung B.1.: Projektdateien

Weiters muss sich die Datei „serielleschnittstelle.exe“ relativ zum Hauptordner in „\serielleschnittstellemessstand\release\“ befinden. Diese Datei wird bei Aufruf des Hauptprogramms geöffnet und ermöglicht die Kommunikation mit der Messeinrichtung des Magnetlager-Versuchsstand.

B.2. Programmaufruf

Nach dem Starten des Programms wird mit dem Ausführen der Datei „serielle-schnittstelle.exe“ begonnen. Sie initialisiert die Kommunikation mit der Messeinrichtung des Magnetlager-Versuchsstandes und ist verantwortlich für die Kommunikation zwischen LabVIEW und dem HCA-Modul.

B.3. Steuerung

Im linken oberen Teil sind die Befehle, die für die Steuerung des Lagers notwendig sind, zusammengefasst, siehe Abb. B.2

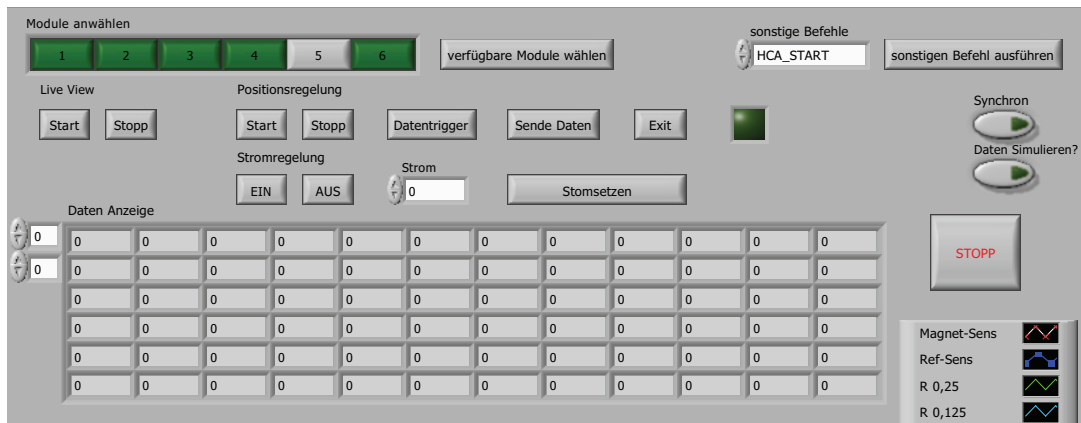


Abbildung B.2.: Steuerung der HCA-Module

Im Folgenden werden die einzelnen Befehle, die an die HCA-Module weitergegeben werden können, näher erläutert.

B.3.1. „LiveView“

Um vom PC aus den Überblick zu behalten, sollte als erstes „LiveView“ eingeschaltet werden. Das ermöglicht die ständige Kontrolle der Rotorposition, Temperaturen und der EM-Ströme. Zum Einschalten von „LiveView“ ist der Button „LiveView Start“ zu klicken (Abb. B.2).

Nach dem Starten von „LiveView“ werden die Messergebnisse der HCA-Module auf den PC übertragen und von LabVIEW verarbeitet. Diese Ergebnisse entstehen aus einer Mittelung der einzelnen gemessenen Größen über einen Arbeitszyklus des Digital Signal Controller (DSC). Die Aktivierung ist sowohl in der „seriellen-schnittstelle.exe“ als auch im Feld Datenanzeige erkennbar. Die über „LiveView“ erhaltenen Daten werden paketierrt und alle 500 ms als Signalverläufe dargestellt. Die jeweils aktuellsten Werte werden im Fenster „Datenanzeige“ ausgegeben.

B. Anleitung für die Überwachungs- software des Magnetlagers

Über „LiveView Stopp“ wird der Datenverkehr zwischen PC und Messeinrichtung des Versuchsstandes wieder gestoppt.

Wichtig: Um eine korrekte Steuerung zu ermöglichen, müssen im Feld Datenanzeige die Modulnummern (HCA-Nummern, Tabelle B.1) in richtiger Reihenfolge geordnet sein, da sonst die Befehlszuordnung nicht korrekt ist. Ist die Reihenfolge nicht richtig, wird empfohlen, die seriellen Stecker an der Messeinrichtung des Versuchsstandes zu korrigieren, sodass die Reihenfolge stimmt (Abb. B.3).



Abbildung B.3.: Messeinrichtung zur Abnahme der DSC-Daten samt Weitergabe an den PC

B.3.2. Module anwählen

Um weitere Befehle an die Module weitergeben zu können, müssen erst die Module ausgewählt werden, an die die Befehle gesendet werden sollen. Über die sechs Buttons im Feld „Module anwählen“ können die gewünschten Module ausgewählt werden. Wenn alle Module ausgewählt werden sollen, genügt ein Klick auf den Button „Verfügbare Module wählen“. Damit werden alle kommunikationsfähigen Module ausgewählt. Die Buttons der ausgewählten Module färben sich grün.

B.3.3. Stromregelung

Wichtig: Bevor Befehle zur Stromregelung gesendet werden können, müssen diejenigen Module ausgewählt werden, an die die Befehle geschickt werden sollen (Abschnitt B.3.2).

Zum Aktivieren der Stromregelung kann eine der folgenden drei Möglichkeiten eingesetzt werden:

- Klicken des Buttons „Stromregelung Ein“

B. Anleitung für die Überwachungs- software des Magnetlagers

- Klicken des Buttons „Stromsetzen“
- Ändern des Wertes im Eingabefeld „Strom“

In allen drei Fällen wird der Strom auf den Wert des Eingabefeldes „Strom“ gesetzt. Während der Stromregelung läuft das Modul im Modus 4. Mehr zu den verschiedenen Modi der HCA-Module wird in Abschnitt B.4.1 beschrieben.

Zum Ausschalten der Stromregelung wird der Button „Stromregelung Aus“ geklickt. Das Modul wechselt in Modus 3.

B.3.4. Positionsregelung

Wichtig: Bevor Befehle zur Positionsregelung gesendet werden können, müssen diejenigen Module ausgewählt werden, an die die Befehle geschickt werden sollen.

Um die Positionsregelung zu aktivieren muss der Button „Positionsregelung Start“ geklickt werden. Ein Modul kann nur die Positionsregelung starten, wenn es davor im Status 3 war. Hierzu muss bei Bedarf die Stromregelung beendet werden. Während der Positionsregelung wird Modus 5 angezeigt (Abschnitt B.4.1).

B.3.5. Datentrigger

Allgemein mittelt der DSC alle gemessenen Werte über einen Arbeitszyklus und sendet diese gemittelten Werte über „LiveView“ an den PC. Über den Button „Datentrigger“ speichert der DSC ab dem nächsten Arbeitszyklus jeden einzelnen Messwert und gibt diese innerhalb eines Arbeitszyklus aufgenommenen Werte über den Button „Sende Daten“ aus. Auch hier werden die Befehle nur an die zuvor ausgewählten Module übermittelt.

B.3.6. Sonstige Befehle

Hier kann ein beliebiger Befehl gesendet werden. Aus einer vordefinierten Sammlung kann ein Befehl ausgewählt werden und über den Button „sonstigen Befehl senden“ gesendet werden. Diese Befehle verstehen sich jedoch mehr als eine Befehlsammlung für die serielle Kommunikation als tatsächlich verwendbare Steuerbefehle. Von der Verwendung „sonstiger Befehle“ ist ohne Kenntnis der Programmierung des LabVIEW-Projekts und der „serielleschnittstelle.exe“ abzuraten.

B.3.7. Daten simulieren

Hier können zuvor gemessene Daten geladen werden und eine simulierte Messung zu Präsentationszwecken durchgeführt werden. Dazu ist der Button „Daten simulieren?“ zu klicken und die geforderten Daten auszuwählen.

B.3.8. Exit

Mit dem Button „Exit“ wird das Programm „serielleschnittstelle.exe“ geschlossen. Ab diesem Zeitpunkt ist die Kommunikation zwischen PC und HCA-Modulen nicht mehr möglich. Um die Kommunikation wieder herzustellen muss das Programm „serielleschnittstelle.exe“ manuell neu gestartet werden oder das Überwachungsprogramm beendet und neu gestartet werden.

B.3.9. Stopp

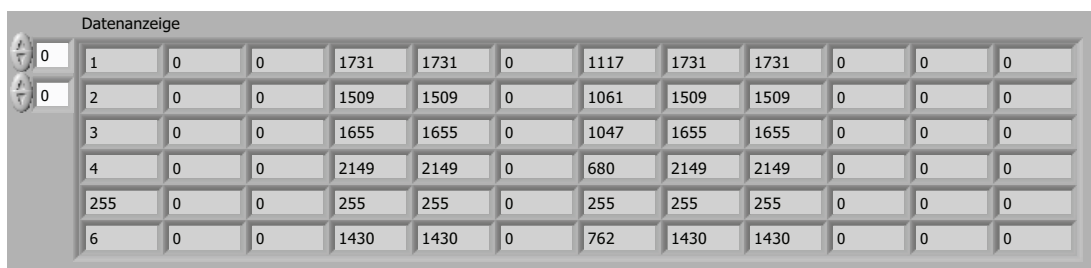
Mit Klicken des Buttons „Stopp“ wird das Überwachungsprogramm beendet und auch das Programm „serielleschnittstelle.exe“ geschlossen.

B.4. Positionsdarstellung

Rechts oben befindet sich ein Graph, in dem die aktuelle Rotorposition dargestellt wird. Die Rotorposition wird einerseits als Mittelung der Signale der EM-Wirbelstromsensoren (rotes Kreuz), andererseits durch Mittelung der Referenzsensoren (blauer Punkt) berechnet. Die Signale der Referenzsensoren werden unabhängig von den HCA-Modulen über Sensorverstärker und eine Datenerfassungskarte gemessen. Weiters sind Kreise angegeben, die eine Abweichung von 0,25 mm bzw. 0,5 mm vom Sollwert darstellen.

B.4.1. Datenanzeige

Hier werden die Daten - wie sie vom DSC übermittelt werden - angezeigt (Abb. B.4). Die Bedeutung der Spalten sind Tabelle B.1 zu entnehmen. Zu betonen ist, dass es sich bei dieser Anzeige um bit des ADC handelt.



Datenanzeige												
0	1	0	0	1731	1731	0	1117	1731	1731	0	0	0
0	2	0	0	1509	1509	0	1061	1509	1509	0	0	0
	3	0	0	1655	1655	0	1047	1655	1655	0	0	0
	4	0	0	2149	2149	0	680	2149	2149	0	0	0
	255	0	0	255	255	0	255	255	255	0	0	0
	6	0	0	1430	1430	0	762	1430	1430	0	0	0

Abbildung B.4.: Datenvisualisierung in bit

Spalten	Bedeutung	Erklärung
1	HCA Nr.	Nummer des Hot Swap Controller Amplifier Moduls
2	Modus	Modus, in dem sich das HCA-Modul befindet
3	Timestamp	Timestamp des DSC
4	T_{max}	maximale Temperatur während des letzten Arbeitszyklus in bit des ADC
5	d_{ADC}	Distanz zur Welle in bit des ADC
6	I_{min}	minimaler Strom während des letzten Arbeitszyklus in bit des ADC
7	I	aktuell gemessener Strom I, gemittelt über den letzten Arbeitszyklus in bit des ADC
8	I_{max}	maximaler Strom während des letzten Arbeitszyklus in bit des ADC
9	$U_{zw,min}$	minimale Zwischenkreisspannung während des letzten Arbeitszyklus in bit des ADC
10	U_{zw}	aktuell gemessene Zwischenkreisspannung, gemittelt über den letzten Arbeitszyklus in bit des ADC
11	$U_{zw,max}$	maximale Zwischenkreisspannung während des letzten Arbeitszyklus in bit des ADC
12	End of Set	Bezeichnet den Abschluss des Sets

Tabelle B.1.: Bedeutung der Spalten im Feld Datenanzeige

B.5. Registerkarte

B.5.1. Tab: Signalverläufe

Im Tab Signalverläufe werden die Verläufe von Position und Strom aller Verstärker dargestellt (Abb. B.5). Links daneben kann gewählt werden, welche Messergebnisse dargestellt werden sollen. Auch hier ist zu beachten, dass die Reihenfolge im Fenster „Datenanzeige“ korrekt sein muss (Abschnitt B.4.1).

B.5.2. Tab: Einstellungen ändern

In diesem Tab können verschiedene Einstellungen geändert werden. Eine Änderung der Einstellungen ohne vorherige Messungen führt zu einer falschen Darstellung der Messergebnisse.

Es können folgende Einstellungen getroffen werden:

- Offsets und Empfindlichkeiten für die internen Positionssensoren (nur zur korrekten Anzeige, keine Auswirkung auf den DSC)

B. Anleitung für die Überwachungs- software des Magnetlagers

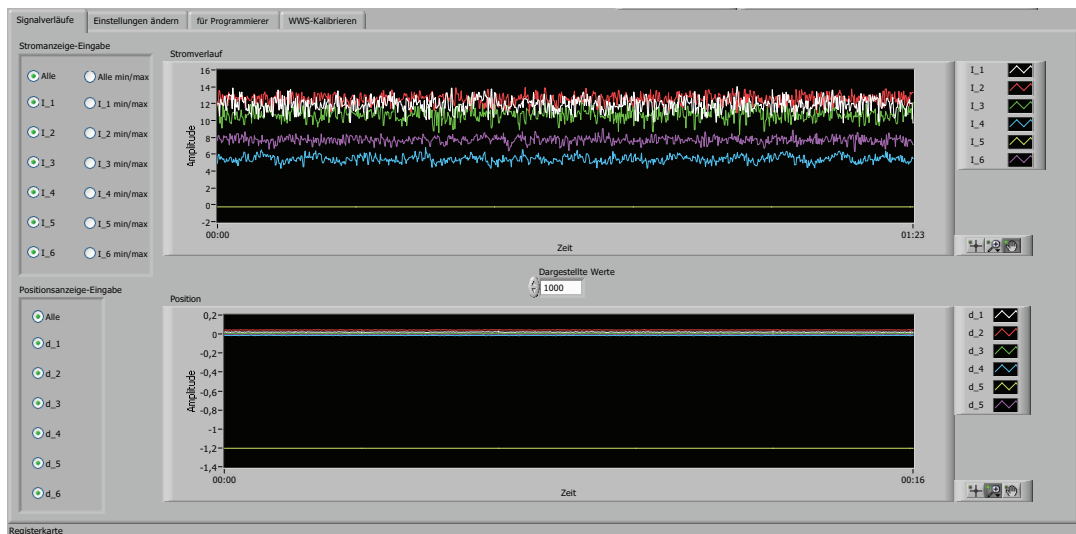


Abbildung B.5.: Steuerung der Verstärker

- Offsets und Empfindlichkeiten für die Referenz-Positionssensoren (nur zur korrekten Anzeige, keine Auswirkung auf den DSC)
- Die Spaltennummer für verschiedene Messgrößen. Sie bezieht sich auf die Spalte des Feldes Datenanzeige, aus der die Messergebnisse über Offsets und Empfindlichkeiten errechnet werden.
- Stromsicherung: Hier kann der im Betriebsmodus „Stromregeln“ maximal zulässige EM-Strom eingegeben werden, um nicht unabsichtlich einen zu hohen Strom zu vorgeben zu können.

B.5.3. Tab: WWS kalibrieren (nicht in Verwendung, ev. ausbaubar)

Dieses Tab war ursprünglich dazu gedacht, eine schnelle Kalibrierung der internen Wirbelstromsensoren zu ermöglichen. Das Vorhaben ist jedoch an einigen Punkten gescheitert. Sobald das Tab geöffnet wird, werden Optionsfelder in der Positionsanzeige rechts oben sichtbar gemacht. Wenn man daraufhin den Schalter im Tab in Richtung genaue Position stellt, kann man wie folgt die Positionssensoren kalibrieren:

1. gewünschte Position in der Positionsanzeige durch die Optionsfelder auswählen
2. Rotor genau in diese Position bewegen und dort halten (Sichtichtung: Magnete sichtbar)
3. Button „internPosDSC messen START“ klicken
4. Sobald die grüne LED erlischt, kann die Position verändert werden

B. Anleitung für die Überwachungs- software des Magnetlagers

5. Alle vorangegangenen Schritte für die äußeren Positionen wiederholen
6. Als Ergebnis werden die Offsets zur Mittelposition und die Empfindlichkeiten aller in den Magnetmodulen verbauten Positionssensoren über den Nennluftspalt berechnet und dargestellt

Wenn keine bestimmte Position gefordert ist, ist der Ablauf wie folgt:

1. Button „internPosDSC messen START“ anklicken
2. den Rotor manuell so bewegen, dass alle Randwerte abgefahren werden
3. Button „internPosDSC messen STOPP“ klicken
4. Empfindlichkeiten und Offsets werden über den Nennluftspalt berechnet und angezeigt
5. Mit Button „Bewegung nachvollziehen“ wird die eben durchgeführte Bewegung des Rotors im Positionsfenster angezeigt.

Mit den Buttons „Empfindlichkeit in Einstellungen schreiben“ und „Offset in Einstellungen schreiben“ können die erzielten Ergebnisse direkt in die Messeinstellungen übernommen werden. Danach müssen sie noch als Standardwerte gespeichert werden um für zukünftige Programmaufrufe zur Verfügung zu stehen.

Mit dem Buttons „im Kreis bewegen“ und „Abbruch“ (bricht die Kreisbewegung ab) wurde ein Versuch unternommen, den Rotor mit Hilfe der EM nur über die Stromregelung am Notlager entlang zu bewegen und somit die Extremwerte der Rotorposition zur Kalibrierung der Wirbelstromsensoren zu erhalten.

Wichtig: Diese Verfahren können derzeit nicht zur Kalibrierung der EM-Wirbelstromsensoren herangezogen werden.

B.5.4. Tab: für Programmierer

Hier sind einige der Anzeigeelemente zusammengefasst, die während der Programmierung zur Überprüfung gewisser Werte eingefügt wurden, für den Anwender aber unwichtig sind. Wenn sie nicht zur Programmierung benötigt werden, kann dieses Tab auf „nicht sichtbar“ geschaltet werden.

B.6. Fehlerbehebung

Hier werden die bekannten Bugs und deren Behebung angegeben.

B.6.1. Das Programm „serielleschnittstelle.exe“ wird nicht gestartet

„serielleschnittstelle.exe“ ist an einem falschen Speicherort. Der richtige Pfad ist im Hauptordner unter „\serielleschnittstellemessstand\release\“.

B.6.2. Initialisierung von „LiveView“ funktioniert nicht

Wenn die Initialisierung von „LiveView“ nicht gelingt, arbeitet entweder die Messeinrichtung des AMB-Versuchsstandes nicht richtig (Abb. B.3), ein DSC hat nur ein Code-Fragment eines Befehls erhalten und kann die Kommunikation nicht wieder zurücksetzen oder mehrere Instanzen des Programms „serielleschnittstelle.exe“ sind geöffnet.

Die Messeinrichtung bzw. das HCA-Modul muss neu gestartet werden und die alle Instanzen des Programms „serielleschnittstelle.exe“ sind zu schließen.

B.6.3. DAQmx - Fehler

Gibt LabVIEW einen Fehler im Zusammenhang mit DAQmx aus, ist keine Verbindung zur Datenerfassungskarte möglich. Die Datenerfassungskarte muss neu gestartet werden.

B.6.4. Kontrollwirbelstromsensoren funktionieren nicht

Wenn unrealistische Positionswerte von den Kontrollsensoren angezeigt werden, ist die Stromversorgung für die Sensorverstärker zu überprüfen. Mögliche Ursache ist eine zu geringe Stromentnahme vom Gleichspannungsnetzteil durch die Referenzsensor-Verstärker.