

Johannes Baumann, BSc

**Realisierung einer magnetischen Gewichtskompensation zur
Verbesserung der Lebensdauer von mechanischen Lagern in
Schwungrad-Speichersystemen**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Elektrotechnik
eingereicht an der

TECHNISCHEN UNIVERSITÄT GRAZ

Betreuer

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hannes Wegleiter
Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Schweighofer
Institut für elektrische Messtechnik und Sensorik

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Menschen bedanken, die mich während des Studiums und bei der Erstellung dieser Masterarbeit immer unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer **Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hannes Wegleiter** sowie **Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Schweighofer** für ihr Engagement in jeder Phase meiner Masterarbeit. Ihre Unterstützung ging weit über die Grenzen der Masterarbeit hinaus, vielen Dank dafür!

Weiters gilt mein Dank dem gesamten Institut für elektrische Messtechnik und Sensorik, die mich immer mit offenen Armen empfangen und fachlich wie persönlich bei allen Schwierigkeiten und Herausforderungen unterstützt haben.

Dem Hochspannungszeichensaal, vor allem **Karl Strohmayer** sowie **Andre Achernig** und **Stefan Schiller**, möchte ich meinen Dank aussprechen für die unglaubliche Reise, die wir zusammen gegangen sind und ohne die der Abschluss meines Studiums wohl nie gelungen wäre.

Zu guter Letzt sei auch meiner Familie gedankt, allen voran meinen Eltern **Hermann** und **Emanuela**, die in jedem Abschnitt meines Lebens mit all ihrer Kraft und Fürsorge immer für mich da waren und immer an mich glaubten.

Kurzfassung

Durch die fortschreitende Elektrifizierung im Verkehrssektor wird das Stromnetz immer weiter an seine Grenzen gebracht. Aus diesem Grund wird gezielt an Möglichkeiten geforscht, um (unter anderem) Spitzenlasten, die beispielsweise bei elektrischen Ladevorgängen auftreten, zu umgehen oder abzufangen. Eine mögliche Variante wäre ein Schwungrad-Energiespeichersystem, welches durch langsame Energieaufnahme und bei Bedarf schneller Energieabgabe, zur Entlastung der Energienetze beitragen kann. Solche Energiespeicher besitzen eine hohe Lebensdauer und weisen eine hohe Anzahl an Ladezyklen auf, welche nur durch Abnutzungerscheinungen der Wälzlager limitiert wird. Diese Arbeit beschäftigt sich mit Methoden der elektromagnetischen Gewichtskompensation, um solche mechanische Lager zu entlasten und somit deren Lebensdauer erhöhen zu können.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Methoden zur Gewichtskompensation mechanischer Wälzlager zu erörtern und anschließend auf deren Einsetzbarkeit zu bewerten. Basierend auf den Ergebnissen der Recherche wird eine geeignete Methode ausgewählt und ein Konzept entwickelt, um eine Gewichtskompensation im Schwungradenergiespeichersystem betreiben zu können.

Im ersten Schritt der theoretischen Konzeptentwicklung wird vorerst die Auslegung und Berechnung zweier fundamentaler Komponenten des Elektromagneten, der Spule und dem Eisernkern, durchgeführt. In weiterer Folge werden die berechneten Werte durch eine Simulation von systemkritischen Parametern wie Hubkräfte, Wärmeemissionen und Wirbelströme ergänzt. Basierend auf den Simulationsergebnissen, werden ein Prototyp sowie ein geeigneter Teststand gefertigt. Als abschließenden Teil dieser Arbeit werden diverse systemrelevante Tests am Prototypen durchgeführt, um das Konzept hinsichtlich dessen Praktikabilität zu validieren.

Abstract

The ongoing advance of electrified transportation pushes the power grid further and further towards its limits. Therefore, substantial research is conducted to reduce or circumvent peak loads, that occur for example during electric charging processes. A possibility to achieve a peak load reduction and thus, relieving the power grid, would be a fly wheel energy storage system (FESS), which is capable of slow energy consumption and rapid release upon need. Such storage systems excel through their longevity and the high amount of charging cycles, which is only limited by the wear and tear of the rolling bearings. This thesis revolves around the investigation of methods for electromagnetic weight compensation to reduce the mechanical stress on roller bearings and improve their longevity.

The aim of this thesis is to investigate methods for weight compensation and subsequently evaluate them in terms of applicability. Based on the research results, an appropriate method is selected and a concept to perform weight compensation within the FESS is developed. As a first step in prototype development, the dimensioning of two fundamental components of electromagnets, namely the iron core and the coil, is mathematically determined. In the following, the mathematical computations are expanded via a simulation of system-critical parameters such as lifting force, emission of heat and eddy currents. Based on the simulation results, a prototype as well as a test bench are developed. The concluding part of this thesis is the execution of system relevant testing, to validate the previously concept in terms of practicability.

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung	Einheit	Beschreibung
FESS		Flywheel Energy Storage System
E_{kin}	J	kinetische Energie
J_{Rotor}	$kg \cdot m^2$	Trägheitsmoment des Rotors
ω	$\frac{rad}{s}$	Winkelgeschwindigkeit
H	$\frac{A}{m}$	magnetische Feldstärke
l	m	Länge
B	T	magnetische Flussdichte
μ_r	$\frac{H}{m}$	relative Permeabilität
B_R	T	Remanenz
H_C	$\frac{A}{m}$	Koerzitivfeldstärke
F_p	$\frac{N}{mm^2}$	Druckfestigkeit
$(BH)_{max}$	$\frac{kJ}{m^3}$	maximale magnetische Energiedichte
T_E	°C	Entmagnetisierungstemperatur
A	m^2	Fläche
ϕ	Wb	magnetischer Fluss
k	1	Füllfaktor
θ	A	magnetische Durchflutung
N	1	Windungszahl
κ	$\frac{Sm}{mm^2}$	elektrische Leitfähigkeit
P	W	elektrische Leistung
Θ	A	magnetische Durchflutung
AlNiCo		Aluminium-Nickel-Kobalt
NdFeB		Neodym-Eisen-Bor
SmCo		Samarium-Cobalt
PLA		Polylactic Acid

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	iii
Kurzfassung	iv
Abstract	v
Abkürzungsverzeichnis	vi
1 Einführung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Schwungrad-Energiespeicher	3
2.2 Magnetische Gewichtskompensation	7
2.2.1 Elektromagnet	8
2.2.2 Permanentmagnet	9
2.2.3 Entlastungsmodelle	17
3 Konzept	24
3.1 Aktive Magnetische Entlastung	28
3.2 Eisenkern	29
3.3 Spule	32
3.4 Simulation	35
3.4.1 Simulation der Hubkraft	35
3.4.2 Simulation der Wärmeemission	39
3.4.3 Simulation der Wirbelströme	42
4 Resultate	48
4.1 Prototypenfertigung	48
4.2 Hubkraft	51
4.3 Wärmeemittierung	53

Inhaltsverzeichnis

4.4 Homogenität über Umfang	57
5 Schlussbetrachtung und Ausblick	60
Literaturverzeichnis	64

1 Einführung

Im November 2021 fand in Glasgow die 26. Versammlung der Mitgliedsstaaten der Klimarahmenkonvention von Rio statt [1]. Im Zuge dieses Treffens wurden einmal mehr die verheerenden Ausmaße des anhaltenden Klimawandels aufgezeigt und verdeutlicht. Um diesen zu bremsen oder sogar eine Umkehr herbeizuführen, benötigt es eine Reduktion der Treibhausgasemissionen, allen voran CO₂. Bestärkt wird dieses Ziel durch das Pariser Klimaabkommen, welches die Mitgliedsstaaten verpflichtet, die Erderwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen [2]. Aus diesem Grund wird beabsichtigt, bis zum Jahr 2050 Klimaneutralität zu erreichen und somit ein Äquilibrium zwischen dem Verbrauch und der Erzeugung von CO₂-Emissionen herzustellen [1]. Dieses Vorhaben kann nur durch eine fundamentale Umgestaltung hinsichtlich der Nutzung von fossilen Energieträgern, beispielsweise in den Bereichen Mobilität und Energieversorgung, gelingen.

Eine, wenn nicht sogar die vielversprechendste Möglichkeit um sich im Kraftfahrzeugsbereich völlig von fossilen Energieträgern zu entkoppeln, ist der Umstieg auf Elektromobilität. Im Jahr 2021 war knapp jeder sechste (13,9 %) neu zugelassene PKW mit einem rein elektrischen Antrieb ausgestattet [3]. Durch Fortsetzung dieses Trends müssen weitere Ladestationen zur Versorgung von Elektroautos ausgebaut werden, um den steigenden Energiebedarf zur Erhaltung der Mobilität in der Bevölkerung flächendeckend aufrecht erhalten zu können. Dadurch entsteht eine weitere Herausforderung am Weg zur Klimaneutralität, der Ausbau des Elektrizitätsnetzes. Analysen zeigen, dass eine Umstellung von herkömmlichen fossilen Energieträgern auf rein elektrische Antriebsformen im Kraftfahrzeugsbereich nur durch den Ausbau des Elektrizitätsnetzes, besonders in urbanen Gebieten, möglich ist [4]. Da dieser Ausbau mit hohen Kosten verbunden ist, wird gezielt nach Möglichkeiten gesucht, diesen umgehen

zu können, beispielsweise durch das Reduzieren von Spitzenlasten, welche beim Laden von Elektrofahrzeugen auftreten.

Genau mit dieser Problematik beschäftigt man sich, wie in [5] gezeigt, im Projekt *Flygrid*. Hierbei wird an der Integration eines hochleistungsfähigen Schwungrad-Energiespeichers in eine vollautomatische Ladestation für Kraftfahrzeuge gearbeitet. Mit dieser Technologie können hohe Ladeleistungen und simultane Dämpfung von Spitzenlasten im Niederspannungsverteilstromnetz vereint werden [6]. Eine neben vielen anderen positiven Eigenschaften dieses Systems ist die hohe Zyklenlebensdauer des Schwungrad-Energiespeichers, die hauptsächlich durch die im Energiespeicher befindlichen Wälzlager begrenzt ist.

Daher beschäftigt sich diese Masterarbeit mit Methoden der magnetischen Gewichtskompensation. Ziel ist es, durch Reduktion der Gewichtskraft, welche auf die mechanischen Wälzlager des Schwungrad-Energiespeichers wirkt, eine Erhöhung der Lebensdauer dieser Lager zu bewirken.

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt gegliedert:

In **Kapitel 2** werden Grundlagen zum Thema Schwungrad-Energiespeicher und Magnettypen erörtert.

Kapitel 3 beschreibt die Konzepterstellung des Prototyps einer elektromagnetischen Gewichtskompensation.

In **Kapitel 4** wird das Konzept gefertigt und durch Tests auf korrekte Funktionsfähigkeit überprüft.

Kapitel 5 beinhaltet die Zusammenfassung sowie den Ausblick über diese Arbeit hinaus.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel wird Basiswissen über Schwungrad-Energiespeicher vermittelt, die Grundlagen des Ferromagnetismus sowie die Möglichkeiten einer Magnetfelderzeugung auf Basis elektromagnetischer Prinzipien erörtert. Darauf aufbauend werden die Einsatzmöglichkeiten von Magnetismus im Kontext der magnetischen Gewichtsentslastung zur Effizienzsteigerung von Schwungrad-Energiespeichern erläutert.

2.1 Schwungrad-Energiespeicher

Bei einem Schwungrad-Energiespeicher oder kurz FESS (Flywheel Energy Storage System) handelt es sich um ein System zur mechanischen Energiespeicherung. Bei dieser Methode wird ein Objekt in Rotation versetzt und die dafür aufgewendete Energie in kinetischer- also Rotationsenergie gespeichert.

Wie in [7] gezeigt, fand der historisch erste bekannte Einsatz dieser Technologie in einer Töpferscheibe, wie Abbildung 2.1 zu sehen, Anwendung. Beim Töpfeln wird durch den Einsatz der Hände ein Lehmklumpen, welcher sich auf einer manuell in Rotation versetzten Scheibe befindet, in verschiedenste Objekte geformt. Durch den Druck der Hände auf dem Lehm wird dieser verformt und die Töpferscheibe schnell abgebremst. Um den Prozess des Töpfelns flüssiger zu gestalten, wurde ein Schwungrad am Fußende der Töpferscheibe angebracht. Dadurch kann der Brems- und Beschleunigungseffekt abgefedert und die Systemenergie auf einer konstanten Rotationsgeschwindigkeit gehalten werden.



Abbildung 2.1: Einsatz eines Schwungrad-Energiespeichers in einer Töpferscheibe [8]

Obwohl Schwungräder heutzutage, wie in Abbildung 2.2 schematisch zu sehen, natürlich wesentlich komplexer sind, ist der Kern der Technologie, wie in [9] gezeigt, noch immer der Gleiche. Ein Schwungrad, der sogenannte Rotor, wird durch aufbringen eines Drehmoments an dessen Welle in Rotation versetzt. Im elektromechanischen FESS wird dies mittels Elektromotor realisiert. Um das Schwungrad abzubremsen und somit die in ihm gespeicherte Energie wieder zu rekuperieren, wird der Elektromotor als Generator benutzt und somit kinetische wieder in elektrische Energie umgewandelt. Die maximal speicherbare Energie in einem Schwungrad lässt sich durch folgende Formel berechnen:

$$E_{kin} = \frac{J_{Rotor} \cdot \omega^2}{2} \quad (2.1)$$

Dabei wird ersichtlich, dass die speicherbare Energie E_{kin} nur vom Trägheitsmoment J_{Rotor} und der Winkelgeschwindigkeit des Rotors ω abhängt. Die Winkelgeschwindigkeit ω wird dabei von der Zugfestigkeit des verwendeten Rotormaterials begrenzt, denn je schneller sich der Rotor dreht und je größer der Rotorumfang ist, desto höher ist die auf den Rotor wirkende Zugkraft. Wenn diese Zugkraft die Zugfestigkeit überschreitet, kommt es

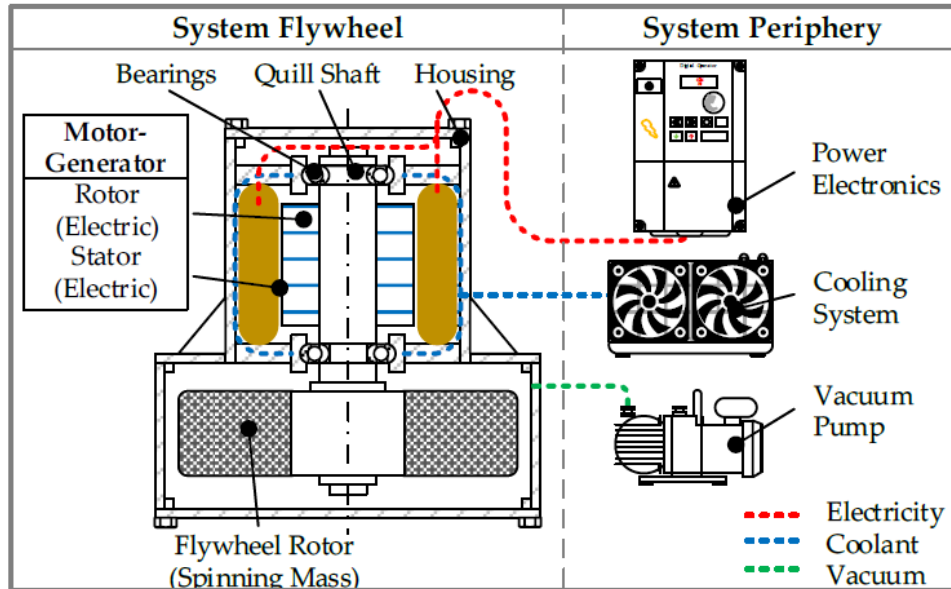


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau eines FESS mitsamt Peripherie, in Anlehnung an [9, 10]

zur Zerstörung des Rotors, er berstet [11]. Genau für solch einen Ernstfall ist der Rotor des FESS von einem Berstschutz umgeben, welcher die enormen Kräfte, die beim Auseinanderbrechen frei werden, absorbiert. Ein negativer Aspekt der Schwungradtechnologie als Energiespeicher sind die Verluste. Diese äußern sich durch Selbstentladung und werden vor allem durch Luftwiderstand, Energieverbrauch der Peripheriegeräte und Lagerverluste hervorgerufen. Um den Luftwiderstand und somit dessen Verluste zu minimieren, wird das Gehäuse des FESS evakuiert und das Schwungrad im Vakuum betrieben. Für die Lagerung eines FESS gibt es zwei Varianten, magnetische und mechanische Lager. Die Höhe der Lagerverluste in mechanischen Lagern werden vor allem durch deren Größe, der Wahl des Schmiermittels, der Rotationsgeschwindigkeit und der auf das Lager wirkenden Kraft, hervorgerufen durch das Rotorgewicht, bestimmt.

Ziel dieser Arbeit ist es die Kompensation des Rotorgewichts durch magnetische Gewichtsentlastung, das zu einer Minderung der Lagerverluste bei gleichzeitiger Verbesserung der Lagerlebensdauer führt, zu untersuchen. Wie in Abbildung 2.3 ersichtlich, gilt es den Betrieb des FESS im

2 Grundlagen

„grün“ gekennzeichneten Bereich anzustreben, was Dauerfestigkeit der Lager garantiert.

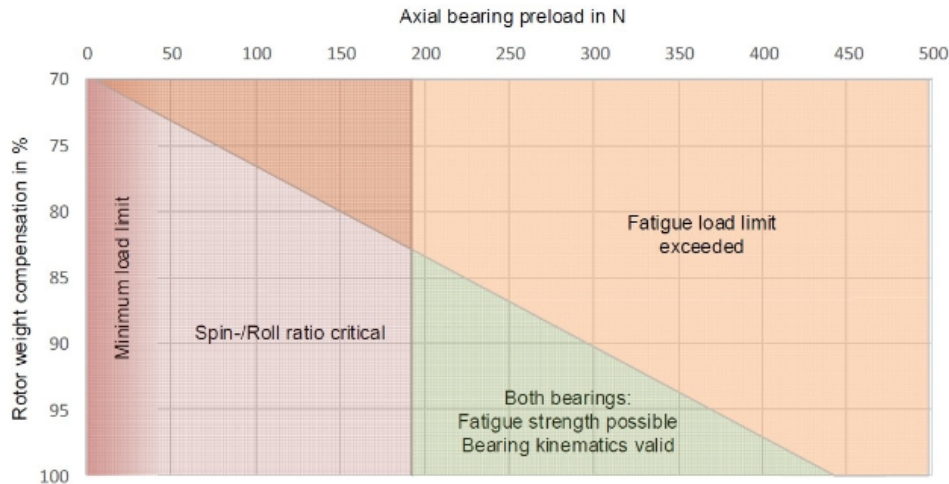


Abbildung 2.3: Wälzlagerfestigkeit in Abhängigkeit von Vorspannung und Entlastungsgrad [12]

Einen Ausblick auf die potentielle Höhe der Lagerverluste gibt Abbildung 2.4, hierbei werden Lagerverluste in Abhängigkeit der Rotorgeschwindigkeit bei verschiedenen Lagervorspannungen abgebildet. Höhere axial wirkende Kräfte, wie das Eigengewicht des Rotors, und höhere Rotorgeschwindigkeiten würden zusätzliche Verluste in den Lagern verursachen, welche durch die angestrebte magnetische Gewichtsentlastung gemindert werden können.

Der negativen Eigenschaft der Selbstentladung stehen viele Gründe gegenüber, die für einen Einsatz eines FESS sprechen. Einer dieser Gründe ist die hohe Lebensdauer/Zyklenzahl, welche hauptsächlich nur von der Lagerung beeinträchtigt wird [6]. Im Gegensatz zu chemischen Energiespeichermethoden kommt es auch zu keinem Kapazitätsverlust. Außerdem werden für die Fertigung keine giftigen oder begrenzt verfügbaren Elemente benötigt. Ebenso führt auch eine Tiefenentladung, beziehungsweise im Fall des FESS der Stillstand des Rotors, zu keiner Schädigung des Systems.

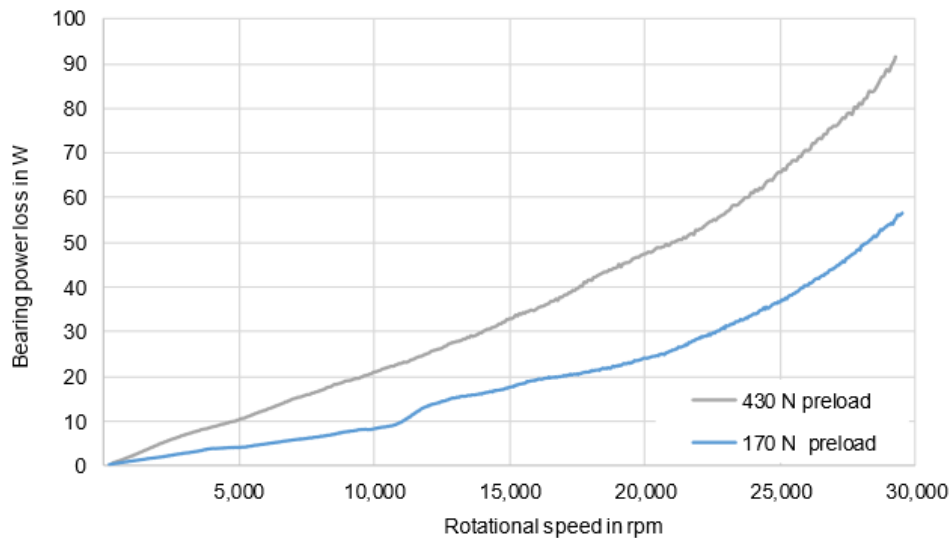


Abbildung 2.4: Lagerverluste in Abhängigkeit der Rotorgeschwindigkeit [12]

Aufgrund der Eigenschaften eines FESS gibt es verschiedenste Anwendungsgebiete in denen diese Technologie überlegen gegenüber herkömmlichen chemischen Energiespeichermethoden wie Batterien und elektrischen Energiespeichern wie Kondensatoren ist, beispielsweise die Netzstabilisierung zur Abdeckung von Spitzenlasten oder als Zwischenspeicher privater Kraftwerke. Dies betrifft vor allem Einsatzbereiche mit einem hohen mittleren Energiedurchsatz, welcher mit einer Entladezeit zwischen 1-100 s und einer Leistung von mehr als 20 kW abgegrenzt werden kann [9, 7].

2.2 Magnetische Gewichtskompensation

Die Entlastung der Lager eines Schwungrades erweist sich aufgrund der Rotation als technisch anspruchsvoll. Durch diese Eigenschaft ist es unmöglich, den Aufbau durch ein mechanisches System, wie zum Beispiel durch Verwendung von Zugfedern oder Gegengewichten, zu entlasten. Dadurch erweist sich die Aufgabe der Gewichtskompensation mittels Magneten als sinnvolle Methode [7].

Um ein Magnetfeld zu erzeugen, welches für die Entlastung eines Schwungrads stark genug und somit geeignet ist, bestehen zwei gängige Methoden, nämlich mittels Elektromagnet oder Permanentmagnet.

2.2.1 Elektromagnet

Wie in [13] gezeigt, bildet im Grunde jeder von Strom durchflossene Leiter ein Magnetfeld aus, welches sich aus dem Biot-Savart-Gesetz ableiten lässt. Dessen Feldlinien stehen orthogonal zu diesem Leiter und sind in konzentrischen Kreisen um diesen angeordnet. Durch aufwickeln dieses Leiters zu einer Spule ist es möglich, die Feldlinien und somit die nutzbare magnetische Feldstärke H zu verstärken. Dies lässt sich durch die Formel 2.2 beschreiben, wobei die Feldstärke H im inneren einer Zylinderspule nur vom Strom I durch die Spule, deren Windungszahl N und ihrer Länge l abhängt.

$$H = \frac{I \cdot N}{l} \quad (2.2)$$

Durch das Hinzufügen verschiedenster Stoffe in diese Zylinderspule kann das Magnetfeld geführt und je nach Material, verstärkt oder abgeschwächt werden. Dieser Zusammenhang ist durch die Formel 2.3 der magnetischen Flussdichte B ersichtlich. μ_0 stellt hierbei die magnetische Feldkonstante und μ_r die relative Permeabilität des eingeführten Materials dar.

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (2.3)$$

Die Permeabilität stellt dabei das magnetische Verhalten des Stoffes dar, wenn auf ihn ein äußeres Magnetfeld wirkt. Im Vakuum nimmt die relative Permeabilität μ_r einen Wert von 1 an, was bedeutet, dass keine Änderung des magnetischen Flusses, der durch das Vakuum fließt, stattfindet. Jeder Stoff besitzt seine eigene Permeabilitätszahl, wodurch man sie grob in drei verschiedene Kategorien einteilen kann:

- Diamagnetische Stoffe mit $0 \leq \mu_r < 1$
- Paramagnetische Stoffe mit $\mu_r > 1$
- Ferromagnetische Stoffe mit $\mu_r \gg 1$

Diamagnetische Stoffe besitzen eine Permeabilitätszahl kleiner als 1, was bedeutet, dass ein durch sie fließendes Magnetfeld abgeschwächt wird. Diese entsteht, weil sich durch die Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes im inneren des Stoffes auch ein Magnetfeld aufbaut, welches dem äußeren entgegen gerichtet ist. Dieser Effekt bleibt nur solange aufrecht, solange auch das äußere Magnetfeld vorhanden ist. Alle bisher bekannten diamagnetischen Stoffe (mit der Ausnahme des Supraleiters), wie zum Beispiel Gold, Silber oder auch Kupfer, besitzen eine nur geringfügig kleinere Permeabilität gegenüber der des Vakuums und können dadurch nicht für die Entlastung eines Schwungrades verwendet werden.

Paramagnetische Stoffe besitzen eine geringfügig größere Permeabilität als 1. Durch das Einbringen dieses Stoffes in ein Magnetfeld, richten sich kleine sogenannte Paramagnete im Inneren des Stoffes aus und verstärken das durch sie fließende Magnetfeld. Dieser Effekt ist bei ferromagnetischen Stoffen, welche eine um ein Vielfaches höhere Permeabilität aufweisen, verstärkt. Sie besitzen nicht nur kleine Paramagnete, sondern formen bis zu einem Millimeter große Bereiche, die sogenannten Weiss'schen Bezirke, mit gleicher Magnetisierung. Diese sind im Ruhezustand in ihrer Ausrichtung wahllos verteilt und nicht magnetisch. Die magnetischen Felder der einzelnen Bezirke heben sich gegenseitig auf.

Erst mit dem Einbringen eines ferromagnetischen Stoffes in ein Magnetfeld richten sich diese Bezirke aus und erzeugen so im Inneren ein Magnetfeld und werden somit selbst magnetisch, was eine verstärkende Wirkung auf das sie durchfließende Magnetfeld hat. Diese Weiss'schen Bezirke bleiben auch nach erstmaliger Einbringung in ein Magnetfeld ausgerichtet und der Stoff somit magnetisch. Erst mit steigender Temperatur der Materialien verändert sich diese Ausrichtung und schwächt den entstandenen Magneten. Mit dem Erreichen der sogenannten ferromagnetischen Curie-Temperatur des jeweiligen Stoffes sind auch die Weiss'schen Bezirke wieder wahllos ausgerichtet (entmagnetisiert) und der Stoff verhält sich paramagnetisch.

2.2.2 Permanentmagnet

Wie in [13] gezeigt, werden Stoffe oder Legierungen als Dauer- bzw. Permanentmagnet bezeichnet, die, wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, ferromagne-

tische Eigenschaften aufweisen und durch Einbringung in ein Magnetfeld dauerhaft magnetisiert wurden. Wichtige Unterscheidungsmerkmale sind ihre Koerzitivfeldstärke H_C , die Remanenzflussdichte (Remanenz) B_R und die maximale Betriebstemperatur. Die Koerzitivfeldstärke H_C gibt an, wie stark ein von außen anliegendes Magnetfeld auf den Permanentmagneten einwirken muss, um diesen vollständig zu entmagnetisieren. Als Remanenz B_R bezeichnet man die magnetische Flussdichte, die ohne ein von außen anliegendes Magnetfeld durch den Magneten fließt. Die Position der Koerzitivfeldstärke H_C und der Remanenz B_R liegt genau am Schnittpunkt der jeweiligen Achse ($H=0$ bzw. $B=0$) der Hysteresekurve, welche in Abbildung 2.5 veranschaulicht ist.

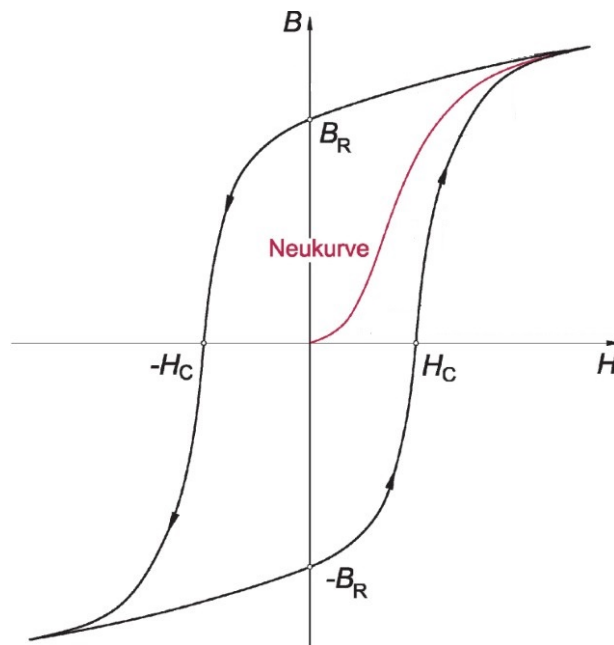


Abbildung 2.5: Hysteresekurve eines ferromagnetischen Stoffes, in Anlehnung an [13]

Diese Materialien werden, wie in Abbildung 2.6 ersichtlich, aufgrund ihrer Koerzitivfeldstärke H_C , also der Fähigkeit ihrer Entmagnetisierung zu widerstehen, in weichmagnetische, magnetisch halbharte und hartmagnetische Werkstoffe eingeteilt.

Handelsübliche Permanentmagnete werden aus folgenden hartmagnetischen Werkstoffen gefertigt [14]:

2 Grundlagen

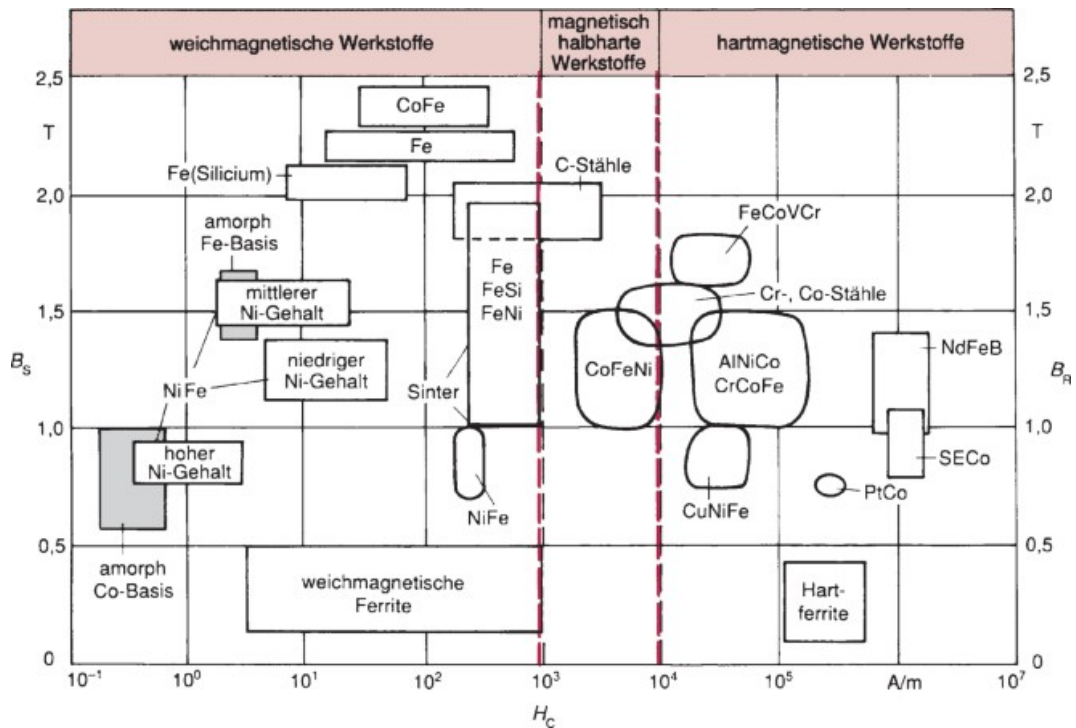


Abbildung 2.6: Klassifizierung von Permanentmagneten durch ihre Koerzitivfeldstärke H_c und Remanenz B_r [13]

- Hartferrit
- Aluminium-Nickel-Cobalt (AlNiCo)
- Neodym-Eisen-Bor (NdFeB)
- Samarium-Cobalt (SmCo)

Um festzustellen, welche dieser magnetischen Stoffe für den Einsatz in einem Schwungrad geeignet sind, konnten die in Tabelle 2.1 angeführten Eigenschaften ermittelt werden.

2 Grundlagen

Werkstoff	Remanenz- flussdichte	Koerzitiv- feldstärke	Druck- festigkeit	max.magn. Energiedichte	Entmagn. Temperatur
	B_R T	H_C kA/m	F_P N/mm^2	$(BH)_{max}$ kJ/m^3	T_E $^{\circ}C$
Hartferrit	210-430	160-500	300-700	8-34	>250
AlNiCo	610-1300	40-140	300-400	10-72	>550
NdFeB	1050-1470	800-3200	750	200-414	-
SmCo	900-1090	400-1990	800-1000	160-230	-

Tabelle 2.1: Auszug aus den Materialeigenschaften von Permanentmagneten [14]

Hartferrit

Wie [14] zeigt, bestehen Hartferritmagnete zu einem hohen Anteil aus Eisenoxid und Strontiumkarbonat, welche in Pulverform vermischt, gepresst, gesintert und magnetisiert werden. Aus diesem Grund sind sie relativ günstig und in verschiedensten Formen erhältlich. Jedoch sind ihre magnetischen Eigenschaften im besten Fall als durchschnittlich im Vergleich mit den anderen Materialien zu betrachten. Die Remanenzflussdichte B_R ist im Vergleich zu den anderen noch folgenden Stoffen klein, wodurch der Magnet unverhältnismäßig groß ausfallen müsste, um in einem Schwungrad Einsatz zu finden. Gepaart wird dies mit einer niedrigen Koerzitivfeldstärke H_C , welche eine Verwendung in repulsiver Anordnung zweier Magnete erschwert und gegebenenfalls zur Entmagnetisierung führen könnte. Auch die Druckfestigkeit von Hartferrit ist schlecht bis durchschnittlich. Deren Einsatz im Rotor des Schwungrades ist daher als unvorteilhaft einzustufen, da Schäden am Magneten und am Schwungrad selbst entstehen können. Die Ursache dafür liegt in den auf den Magneten wirkenden Zentrifugalkräften und der hohen Winkelgeschwindigkeit. Aus diesen Gründen ist dieser Stoff nur als Nischenprodukt in stationären Teilen und in einer anziehenden Anordnung eines Schwungrades einsetzbar.

Abbildung 2.7 zeigt den zweiten Quadranten der Hysterese von drei unterschiedlichen Hartferriten. Der Schnittpunkt der Kurven mit der Abszisse bezeichnet hierbei die benötigte Koerzitivfeldstärke, um die magnetische Induktion im jeweiligen Material verschwinden zu lassen und ihn somit zu

entmagnetisieren. Die Ordinate entspricht der Remanenz und ist somit ein Maß für die magnetische Induktion des Materials.

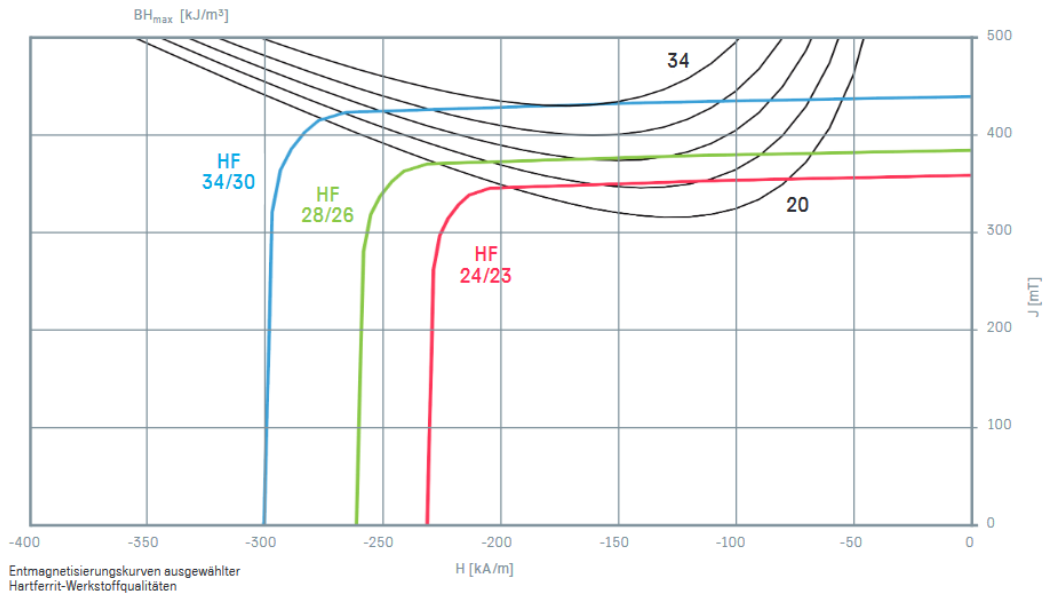


Abbildung 2.7: Entmagnetisierungskennlinie von Hartferrit-Magneten[14]

AlNiCo

Wie [14] zeigt, bestehen diese Magnete zu einem hohen Anteil aus Aluminium, Nickel und Cobalt, es können aber auch andere Metalle wie zum Beispiel Kupfer und Eisen enthalten sein. Das Herstellungsverfahren gleicht dem der Hartferrite und geschieht metallurgisch. Die Druckfestigkeit F_P ist ähnlich schlecht wie bei Hartferriten. Ihre Remanenz ist zwar um ein vielfaches höher als das Hartferrite, jedoch wird ihre Entmagnetisierung aufgrund der sehr geringen Koerzitivfeldstärke H_C zusätzlich begünstigt. Auch die kommerzielle Verfügbarkeit im Handel, durch Seiten wie www.magnet-shop.de (Stand: 2022), bieten eine sehr eingeschränkte Auswahl an Formen (sofern überhaupt erhältlich) und einen um das bis zu 10-fache höheren Preis, als vergleichbare Hartferrit-Magnete.[15] Somit ist der Einsatzbereich dieses Stoffes in einem Schwungrad gleichzusetzen mit einem Magneten aus Hartferrit.

Abbildung 2.8 zeigt den zweiten Quadranten der Hysterese von vier unterschiedlichen AlNiCo-Magneten. Der Schnittpunkt der Kurven mit der Abszisse bezeichnet hierbei die benötigte Koerzitivfeldstärke, um die magnetische Induktion im jeweiligen Material verschwinden zu lassen und ihn somit zu entmagnetisieren. Die Ordinate entspricht der Remanenz und ist somit ein Maß für die magnetische Induktion des Materials.

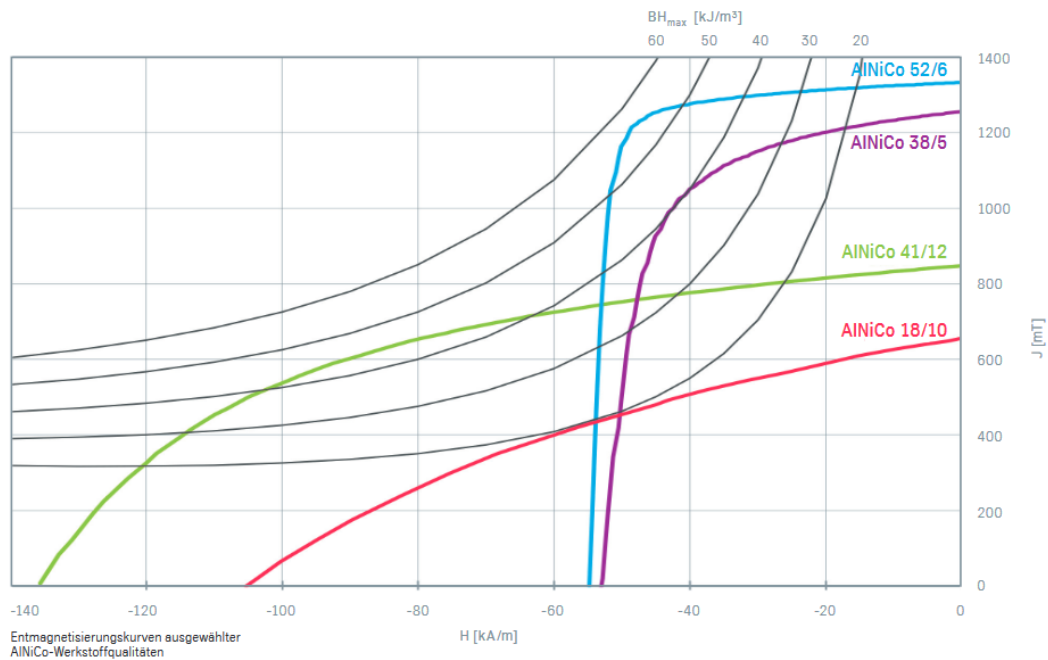


Abbildung 2.8: Entmagnetisierungskennlinie von AlNiCo-Magneten[14]

NdFeB

Wie in [14] gezeigt, bestehen diese Magnete zu einem hohen Anteil aus Eisen, Bor, und dem seltenen Erdmetall Neodym. Um die Qualität des Magneten zu erhöhen werden aber auch andere Stoffe wie Cobalt, Dysprosium und Terbium beigemischt. Diese Magneten werden ebenfalls metallurgisch durch Sinterung hergestellt und sind in etlichen Formen und Größen erhältlich. Sie verfügen über eine sehr hohe Remanenzflussdichte bei gleichzeitig,

anders als Hartferrit- und ALNiCO-Magneten, ausgezeichneten Koerzitivfeldstärken. Auch die Größe der Druckfestigkeit spricht für einen Einsatz dieses Magneten im Rotor eines Schwungrades (abhängig von Position und Winkelgeschwindigkeit). Jedoch stellt die begrenzte Temperaturbeständigkeit ein Problem dar, weswegen es bei diesem Material schon bei geringfügig höheren Temperaturen (im Vergleich zu 20 °C Raumtemperatur) zu einer Verschiebung des Arbeitspunktes und dadurch zu einer Entmagnetisierung kommen kann. Preistechnisch lässt sich diese Form des Magneten genau zwischen Hartferrit und ALNiCO einordnen [15]. Aufgrund der Form und Größenvielfalt, sowie der Druckfestigkeit des Materials ist es, sofern deren Temperatur geregelt werden kann, ein vielversprechender Kandidat für den Einsatz in einem Schwungrad.

Abbildung 2.9 zeigt den zweiten Quadranten der Hysterese von vier unterschiedlichen NdFeB-Magneten. Der Schnittpunkt der Kurven mit der Abszisse bezeichnet hierbei die benötigte Koerzitivfeldstärke, um die magnetische Induktion im jeweiligen Material verschwinden zu lassen und ihn somit zu entmagnetisieren. Die Ordinate entspricht der Remanenz und ist somit ein Maß für die magnetische Induktion des Materials.

SmCo

Wie in [14] gezeigt, bestehen diese Magnete wie NdFeB aus einer Legierung eines seltenen Erdmetalls, in diesem Fall Samarium mit Cobalt. Es können auch andere Metalle wie Eisen, Kupfer oder Zirkon beigemischt werden. Verarbeitet wird das Material in Pulverform durch Schmelzung und Formpressung. Auf den ersten Blick ähneln sich SmCo- und NdFeB-Magnete sehr in ihren magnetischen Eigenschaften bezüglich Remanenz und Koerzitivfeldstärke (Anm. SmCo-Werte sind geringfügig niedriger je nach Typ). Besonders oder Außergewöhnlich gut ist im Vergleich zu den anderen Magnetformen die Druckfestigkeit, die einen Rotoreinsatz (hohe Fliehkräfte) möglich werden lässt. Auch die Temperaturbeständigkeit ist im Vergleich zu NdFeB-Magneten sehr gut. Es entsteht bei höheren Temperaturen zwar eine Schwächung der magnetischen Eigenschaften wie Remanenz, Koerzitivfeldstärke und dem Energieprodukt $(BH)_{max}$, diese ist jedoch weitgehend durch Wiedererreichen der Ausgangstemperatur reversibel. Bei

2 Grundlagen

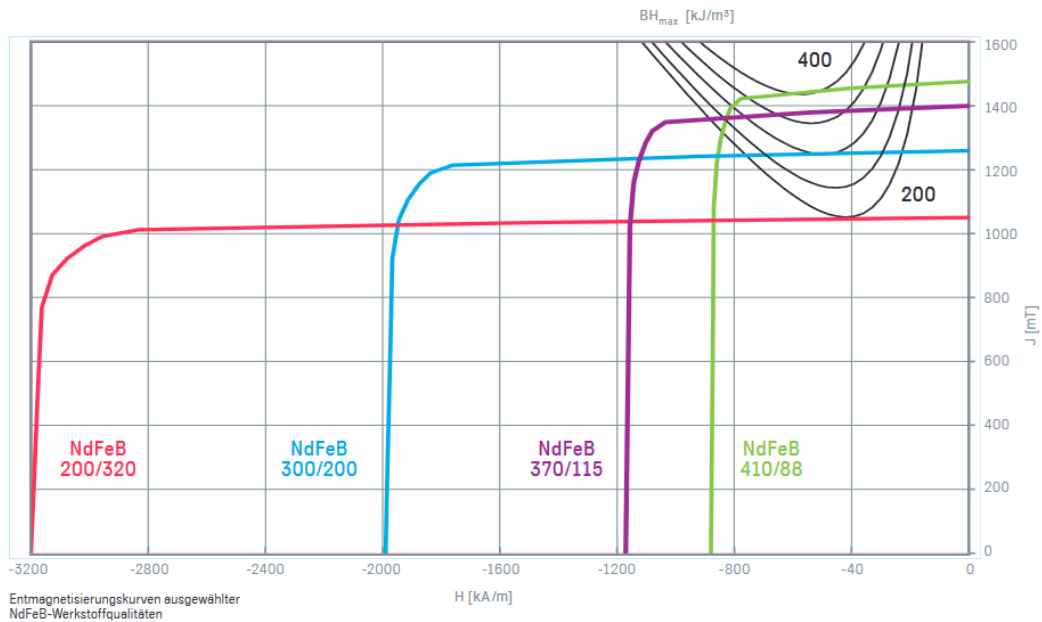


Abbildung 2.9: Entmagnetisierungskennlinie von NdFeB-Magneten[14]

SmCo-Magneten handelt es sich um die teuersten der in diesem Kapitel beschriebenen Magnetarten. Aufgrund der Kombination aller guten bis herausragenden Materialeigenschaften dieses Stoffes ist er die beste Variante für einen Einsatz in einem passiv magnetischen Entlastungsmodell im Rotor eines FESS.

Abbildung 2.10 zeigt den zweiten Quadranten der Hysterese von vier unterschiedlichen SmCo-Magneten. Der Schnittpunkt der Kurven mit der Abszisse bezeichnet hierbei die benötigte Koerzitivfeldstärke, um die magnetische Induktion im jeweiligen Material verschwinden zu lassen und ihn somit zu entmagnetisieren. Die Ordinate entspricht der Remanenz und ist somit ein Maß für die magnetische Induktion des Materials.

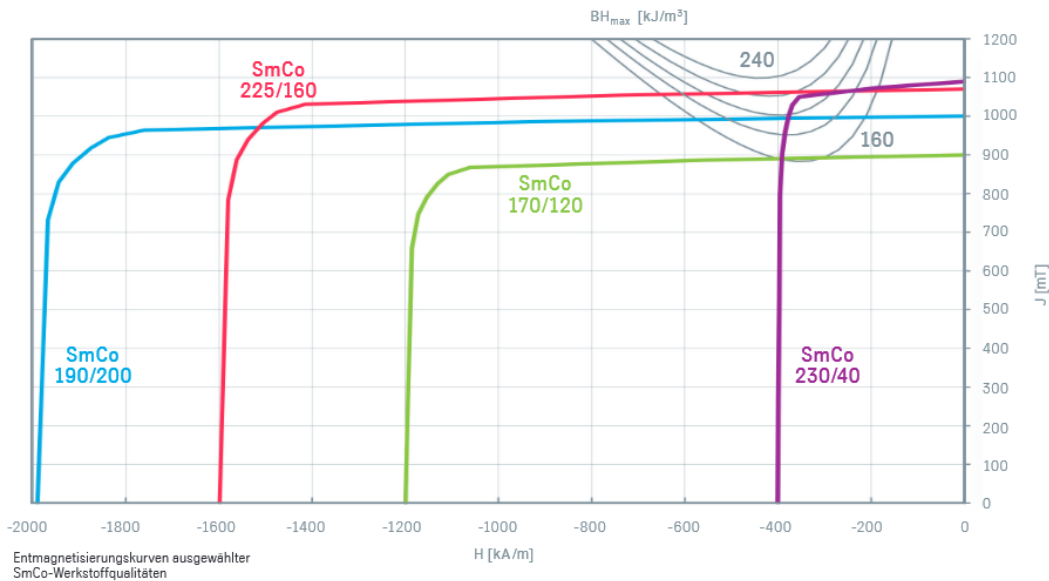


Abbildung 2.10: Entmagnetisierungskennlinie von SmCO-Magneten[14]

2.2.3 Entlastungsmodelle

Um, wie in [16] gezeigt, ein Objekt, in unserem Fall den Rotor eines FESS, axial mittels Magneten anzuheben und somit eine Reduktion der auf die Lager wirkenden Gewichtskraft des Rotors zu erreichen, gibt es im Grundprinzip zwei unterschiedliche Modelle. Sie bestehen jeweils aus zwei Magneten und unterscheiden sich in der Anordnung, beziehungsweise Ausrichtung, zueinander. Diese Magnete können durch Permanentmagnete als auch durch Elektromagnete realisiert werden, wobei jeder Typ eigene Vor- und Nachteile mit sich bringt.

Elektromagnete können in unterschiedlichsten Geometrien und Größen mit relativ geringen Kosten und Aufwand hergestellt werden. Sie können in Abhängigkeit vom Spulenstrom und der generellen Spulenparameter sehr starke Magnetfelder erzeugen, die durch einen Kern, z.B. aus Eisen, verstärkt und geführt werden. Durch diese Führung entsteht nur eine sehr kleine Varianz der Homogenität entlang der Schenkelflächen eines Elektromagneten, welche nur von der Rauheit der Oberfläche des verwendeten Materials beeinträchtigt wird. Als negativer Aspekt ist die benötigte Leistung im Betrieb, die sich in der Effizienz beziehungsweise Selbstentladungsrate ei-

nes FESS widerspiegelt. Dafür kann die Magnetfeldstärke stufenlos durch Variation des Stromes geregelt werden. Durch den ohm'schen Widerstand der Spule wird im Betrieb Wärme emittiert, welcher durch Kühlung des Elektromagneten entgegengewirkt werden muss. Dies kann beispielsweise durch einen Kühlkanal oder durch Umgebungsluft erreicht werden. Des Weiteren ist es durch die nötige Bestromung nicht sinnvoll möglich einen Elektromagneten im rotierendem Teil des Schwungradspeichers anzubringen. Einen zusätzlichen Nachteil stellt der Funktionsverlust des Systems im Falle einer Versorgungsunterbrechung dar.

Permanent- bzw. Dauermagnete, vorallem aus NdFeB und SmCo sind auch geeignete Magnetfelderzeuger für ein FESS. Sie überzeugen vorallem, da sie nicht mit Strom versorgt werden müssen und damit nur etwaige Wirbelströme, aufgrund inhomogener Magnetfelder der Permanentmagnete selbst, zur Selbstentladung beitragen. Negative Aspekte sind die Kosten sowie die Verfügbarkeit von geeigneten Permanentmagneten. Aufgrund der verfügbaren Größen bestehen Permanentringmagnete (aus SmCo und NdFeB) in der Anwendung einer Entlastungsmodells eines FESS meist aus kleinen Segmenten einzelner Magnete, wie zum Beispiel in [17] gezeigt und in Abbildung 2.11 veranschaulicht wird. Dieser Aufbau ist sehr arbeitsintensiv, da sich die einzelnen Magnetsegmente aufgrund der gleichen Polarität voneinander abstoßen und nur mit einem geeigneten Verfahren, beispielsweise durch Verklebung, in Position gehalten werden können. Zusätzlich wird die Homogenität des Magnetfeldes von solch einem Verbundmagnet als sehr fraglich eingestuft [16]. Kein Hersteller gibt eine Auskunft über die Homogenität seiner Permanentmagnete, weder im Bezug auf das Magnetfeld eines Magnets/Segments noch auf die Materialstreuung zwischen einzelnen Magneten. Diese Inhomogenitäten können im Betrieb Wirbelströme ausbilden, die dadurch den Rotor bremsen und auch Wärme in den Rotor induzieren, was wiederum durch Kühlung des Rotors ausgeglichen werden muss und sich in einer erhöhten Selbstentladungsrate widerspiegelt. Diese Inhomogenitäten erzeugen entlang des Umfangs des Magneten eine ungleichmäßig starke Anziehungskraft, die sich als umlaufender Kraftvektor beschreiben lässt. Durch diesen Kraftvektor kommt es in den Wälzlager zu einer ungleichförmigen Belastung bis hin zu Resonanzen. Besonders starke Inhomogenitäten können sogar zu einem unruhigen Rotorlauf und somit zu Lebensdauerbeeinträchtigung der Wälzlager führen. Außerdem gilt es zu berücksichtigen, dass das vom Permanentmagnet erzeugte Magnetfeld

anders als bei Elektromagneten nicht aktiv geregelt, sondern nur durch Abstandsänderung zum Zielobjekt erreicht wird. Ein positiver Aspekt zur Nutzung ist die Ausfallsicherheit des Permanentmagneten, welcher auch während eines Stromausfalles das Entlastungsmoment, im Gegensatz zum Elektromagneten, aufrecht erhält.

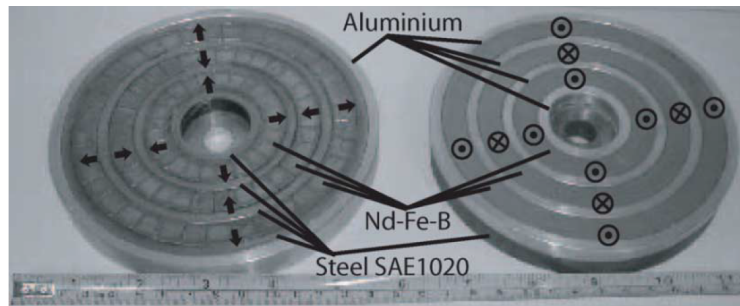


Abbildung 2.11: Segmentierter Permanentmagnet aus NdFeB [17]

Attraktive Anordnung

Wie in [16] gezeigt, spricht man von einer attraktiven oder auch anziehenden Anordnung bei magnetisch gleichsinnig angeordneten Magneten, bei denen der magnetische Nordpol des Einen in Richtung des magnetischen Südpols des Anderen Magneten zeigt. Eine einfaches Ausführungsmodell dieser Anordnung ist in Abbildung 2.12 dargestellt.

Die zwei Magnete sind hier als Ringe konzipiert, der Eine wird am Gehäuse angebracht und das Gegenstück in den Rotor eingebaut. Der Ringmagnet am Gehäuses kann entweder aus einem Elektromagnet oder aus einem Permanentmagnet bestehen. Aufgrund der fehlenden elektrischen Verbindungsmöglichkeit kann ein Elektromagnet nicht als Ringmagnet im Rotor verwendet werden. Die Rotoren von FESS bestehen im Normalfall zumindest teilweise (bezogen auf Rotorwelle und Teile der Nabe) aus ferromagnetischem Stahl, wodurch zusätzlich zum Verbau eines externen Permanentmagneten auch die Möglichkeit besteht, den Rotor mit nur einem am Gehäuse angebrachten Magneten anzuheben. Beide Varianten sind technisch möglich und bieten ihre eigenen Vor- und Nachteile.

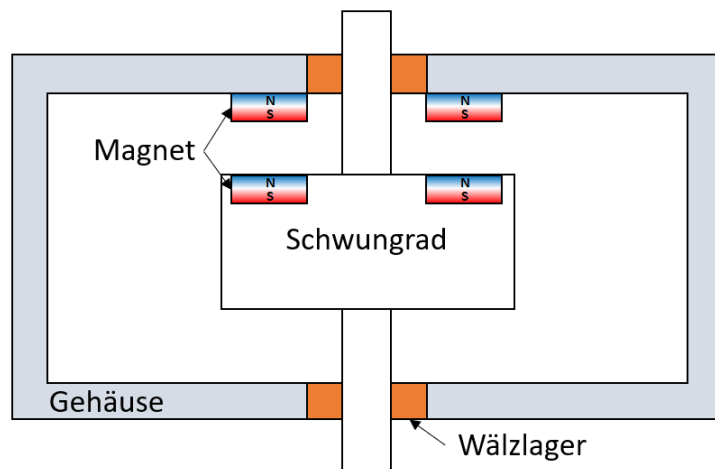


Abbildung 2.12: Anziehende Anordnung von Elektromagneten in einem FESS

Eine anziehende Anordnung mit zwei Magneten bietet die folgenden Vor- und Nachteile gegenüber einer Variante mit nur einem Magneten durch Ausnutzung des ferromagnetischen Rotors:

Vorteile:

- weniger starke Ausbildung von Wirbelströmen
- Magnet am Gehäuse kann kleiner/schwächer ausgeführt sein

Nachteile:

- Eingriff in das Rotordesign notwendig
- Permanentmagnet im Rotor bildet eine mögliche Schwachstelle
- Einbau und Lebensdauer des Rotormagneten ist als kritisch anzusehen

Eine anziehende Anordnung mit einem Magnet durch Ausnutzung des ferromagnetischen Rotors bietet die folgenden Vor- und Nachteile gegenüber einer anziehenden Anordnung mit zwei Magneten:

Vorteile:

- Kostenreduktion durch das Wegfallen eines Magneten
- Kein Eingriff in das Rotordesign notwendig

Nachteile:

- Nur möglich wenn der Rotor aus ferromagnetischem Stahl besteht
- Potentiell hohe Wirbelströme durch Inhomogenitäten

Anzumerken ist auch, dass beide Varianten sich eine negative Systemeigenschaft teilen, die fehlende Selbstregulierung der Hubkraft. Die Kraft mit der sich die attraktiv angeordneten Magnete anziehen vergrößert sich mit kleiner werdendem Abstand und vice versa. Durch den Einsatz eines Elektromagneten am Gehäuse könnte die Stärke des Magnetfeldes reguliert und stabilisiert werden. Eine anziehende Anordnung der magnetischen Entlastung muss nicht zwingend im Schwungrad selbst oder innerhalb des Gehäuses stattfinden. Eine magnetische Gewichtsentlastung kann auch über die Welle des Rotors, wie in Abbildung 2.13 durch Anbringen von Magneten am oberen Wellenende, stattfinden.

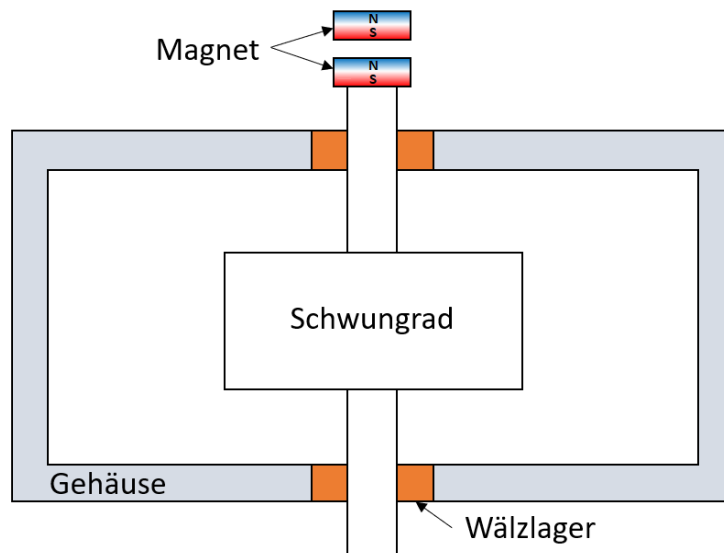


Abbildung 2.13: Anziehende Anordnung von Magneten am Wellenende eines FESS

Vorteilhaft für diese Methode ist die Möglichkeit der Verwendung von zylinderförmigen Magneten. Diese können durch das fehlende Loch kompakter ausfallen und sind daher radial gesehen kleiner als vergleichbar starke Ringmagnete. Somit können Magnete mit geringerer Zugfestigkeit verbaut werden. Jedoch sind viele FESS Konzepte durch Anbauten an der

Rotorwelle, wie Elektromotor oder Magnet-Kupplung, nicht geeignet um mit diesem Konzept entlastet zu werden.

Repulsive Anordnung

Wie in [16] gezeigt, spricht man von einer repulsiven oder abstoßenden Anordnung, wenn Magnete magnetisch gegensinnig zueinander, der magnetischer Norpol des Einen in Richtung des magnetischen Nordpols des anderen Magneten zeigt, stehen. Ein solches Ausführungsmodell ist in Abbildung 2.14 veranschaulicht.

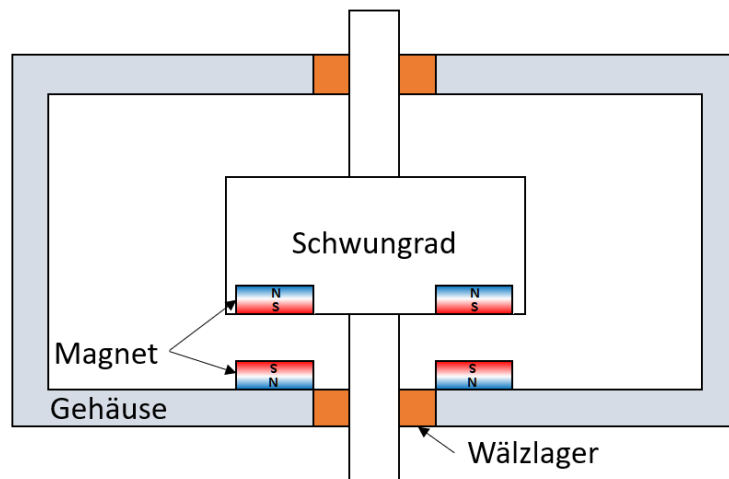


Abbildung 2.14: Abstoßende Anordnung von Magneten in einem FESS

Der Aufbau ähnelt dem der anziehenden Anordnung mit dem Unterschied, dass die Magnete auf der Unterseite des Schwungrades angebracht werden. Auch die Auswahlmöglichkeit zwischen Elektro- und Permanentmagnet ist die Selbe. Ausgenommen sei hier das ferromagnetische Material des Rotors, da ein auf ihn wirkendes Magnetfeld ein anziehendes Moment entwickelt, welches für diese Anordnung nicht geeignet ist, da hier die repulsive Kraft von Magnetfeldern genutzt wird. Der Nachteil dieses Konzepts gegenüber einer attraktiven Anordnung liegt in der zwingenden Notwendigkeit eines Permanentmagneten im Rotor und den daraus entstehenden Nachteilen,

wie im Abschnitt 2.2.3 erläutert. Der große Vorteil gegenüber einer anziehenden Anordnung besteht durch die Systemeigenschaft der Selbstregulierung, hierbei wird der abstoßende Effekt mit kleinerem Abstand immer größer und reguliert sich somit selbst in einen stabilen Zustand. Es gilt auf die richtige Magnetwahl zu achten, da es bei Magneten mit zu niedriger Koerzitivfeldstärke H_C zu einer Entmagnetisierung kommen kann.

Wie bei der anziehenden Anordnung der Magnete ist es auch hier nicht zwingend notwendig, die magnetische Gewichtsentlastung mithilfe des Rotors zu vollführen. Man könnte hier durch Anbringung von Magneten am Wellenende, wie in Abbildung 2.15 ersichtlich, eine Gewichtsentlastung erreichen.

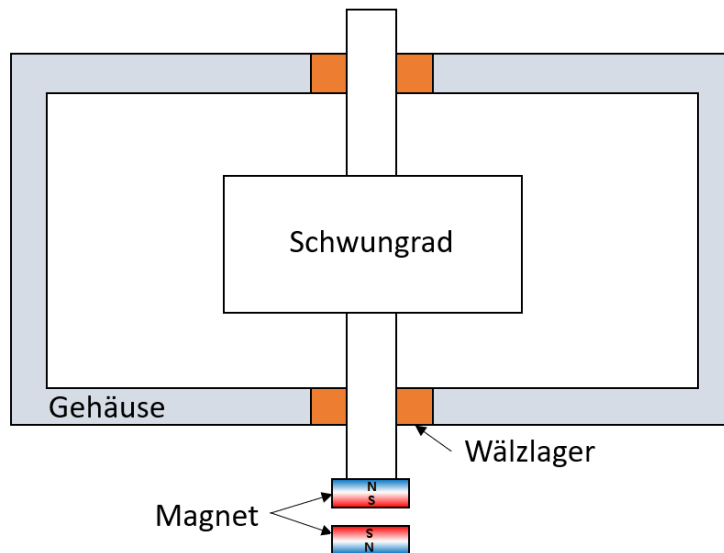


Abbildung 2.15: Abstoßende Anordnung von Magneten am Wellenende eines FESS

Dieses Konzept teilt sich alle positiven und negativen Eigenschaften der in Abbildung 2.14 vorgestellten Anordnung mit dem Zusatz, dass auch hier, wie in der Erläuterung des Konzepts von Abbildung 2.13, kleinere zylinderförmige Magnete verbaut werden könnten.

3 Konzept

Nach Betrachtung der möglichen Entlastungsmodelle in Abschnitt 2.2.3, welche in der Praxis ihre Anwendung finden, wurden die zwei für das Projekt „Flygrid“ geeignetsten ausgewählt und näher betrachtet. Die engere Auswahl fiel aufgrund der geometrischen Rahmenbedingungen auf eine repulsive und attraktive Magnetanordnung für das Entlastungsmodell.

Beim Projekt „Flygrid“ handelt es sich um ein Energiespeichersystem, welches mittels Elektromotor/Generator elektrische Energie umwandelt und sie als kinetische Bewegungsenergie speichert. Dieses System besitzt als Ausgangspunkt dieser Arbeit einen Energiespeicherinhalt von 5 kWh und kann mit 22 kW geladen, beziehungsweise mit 100 kW entladen werden.

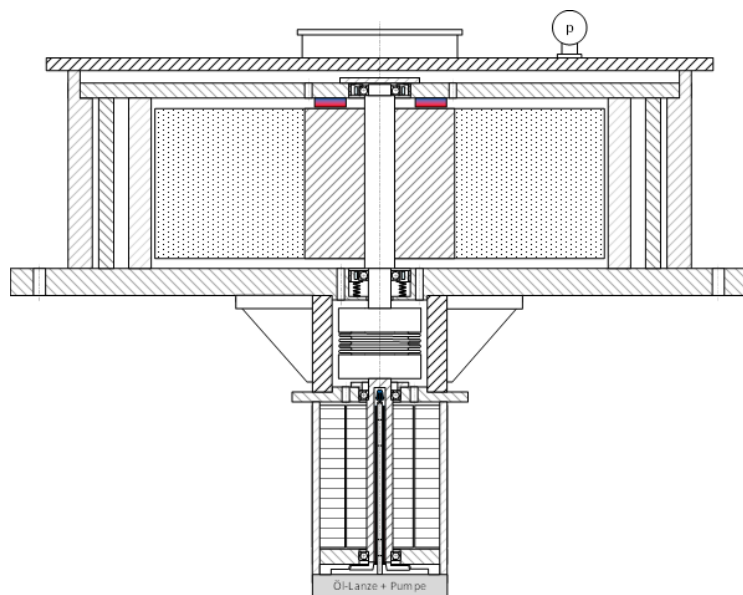


Abbildung 3.1: Konzept des Projekts Fly Grid (Quelle: Peter Haidl)

Um die kinetische Energie zu speichern, wird ein Schwungrad, wie in Abbildung 3.1, verwendet. Bei diesem Schwungrad handelt es sich um eine 120 kg schwere Stahlnabe, welche von aufgepressten Kohlefaserringen umgeben ist. Diese Kombination von Werkstoffen wird gewählt, um den erforderlichen Energieinhalt realisieren zu können. Der Energieinhalt des Schwungrades hängt von vier Faktoren ab [18]:

- Winkelgeschwindigkeit
- axialen Baulänge
- radialen Baulänge
- Werkstoffdichte des Schwungrades

Der Stahlrotor kann aufgrund der Auslegung der hohen Rotationsgeschwindigkeit von bis zu 60000 U/min im Durchmesser nicht größer gewählt werden, da das Material aufgrund der Zentrifugalkräfte an die Belastungsgrenze kommt. Zur Steigerung der Effizienz ist das Schwungrad eingehaust und läuft in einem Vakuum und wird durch Wälzlager an beiden Enden in Position gehalten.

Aufgrund dieser technischen Spezifikationen ist die Positionierung der magnetischen Entlastung der Wälzlager nur genau über oder unter der Stahlkomponente des Schwungrades sinnvoll und auch möglich.

Die zwei ausgewählten Konzepte sind wie in den Abbildungen 3.2 und 3.3 ersichtlich.

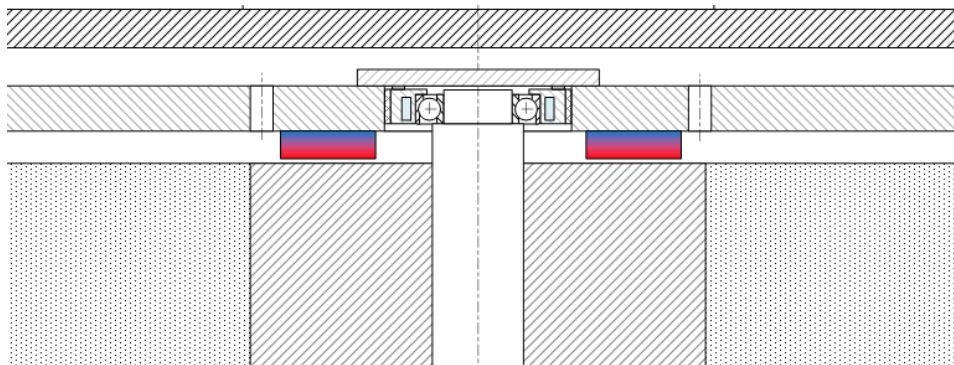


Abbildung 3.2: Konzept anziehende Anordnung, in Anlehnung an 3.1 (Quelle: Peter Haidl)

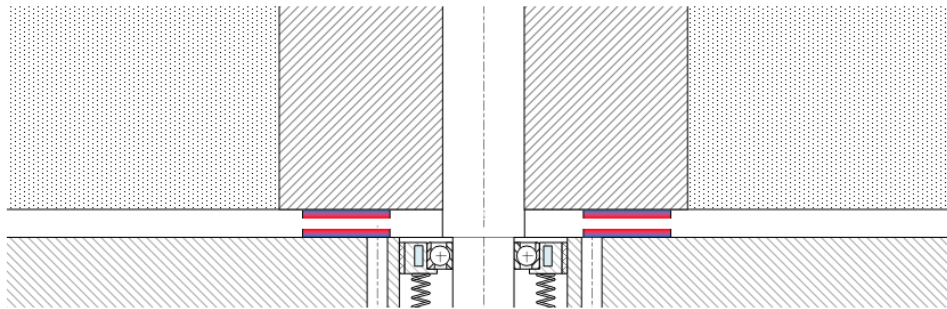


Abbildung 3.3: Konzept abstoßende Anordnung, in Anlehnung an 3.1 (Quelle: Peter Haidl)

Jedes dieser Konzepte könnte im „Flygrid“ seinen Einsatz finden, jedoch gehen beide mit Vor- und Nachteilen einher, welche in Tabelle 3.1 zusammengefasst sind. Daraus ist ersichtlich, dass mit der Ausführungsart des Konzepts auch die Frage des Magnetisierungskonzept (Elektromagnet, Permanentmagnet oder Hybridlösung) beantwortet werden muss.

Ausführungen	Anziehend	Abstoßend
rein permanentmagnetisch	möglich	möglich
rein elektromagnetisch	möglich	nicht möglich
Ausfallssicher	nicht möglich	möglich
Rotoranbau	nicht nötig	zwingend nötig

Tabelle 3.1: Vor und Nachteile der Ausführungsarten

Eine abstoßende Anordnung müsste, wie in Abbildung 3.3 veranschaulicht, zwischen der Unterseite der Stahlnabe und Einhausung angebracht werden. Da zur Abstoßung zwei gegeneinander gerichtete Magnetfelder benötigt werden, muss ein weiterer Magnet an die Stahlnabe befestigt werden. Da es keine Möglichkeit gibt dies mit einem Elektromagneten umzusetzen, wie im Abschnitt 2.2.3 erörtert, kann dieses Magnetfeld nur durch Verwendung eines Permanentmagneten an gewünschter Position realisiert werden. Ein Vorteil dieser Anordnung wäre eine die Sicherheit vor Stromausfällen für den Fall, dass beide Magnetfelder durch einen Permanentmagneten erzeugt wurden, welche eine versorgungsunabhängige Entlastung der Wälzlager gewährleistet. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, können verschiedene permanentmagnetische Materialien für diese Aufgabe verwendet werden. Das

Anforderungsprofil setzt sich aus einer angestrebten Entlastungskraft von 1200 N, hoher Fliehkräfte aufgrund einer Rotationsgeschwindigkeit von 60000 U/min und einem Materialdurchmesser von 200 mm zusammen. Nur ein segmentierter Samarium-Cobalt Magnet (SmCo) ist in der Lage, ein solches Anforderungsprofil zu erfüllen.

Diese Materialauswahl führt zu weiteren Problemstellungen, zum Beispiel die der Befestigung der Segmente an der Rotornabe. Durch Fräsung eines Kanals an der Rotornabe und einkleben der Magnete könnte dies bewerkstelligt werden. Allerdings kann bei dieser Befestigungsmethode nicht gewährleistet werden, dass die Magnetsegmente dauerhaft in ihrer designierten Position verbleiben und dass es aufgrund der auf die Magneten einwirkenden Zentrifugalkraft zu einer Abnutzung kommt, die längerfristig die Zerstörung der Magnete zur Folge hat. Das endgültige Ausschlusskriterium für die Anbringung eines Magneten an der Stahlnabe ist die Homogenität des Permanentmagneten bzw. der Magnetsegmente. Bei segmentierten Varianten, wie sie hier zum Einsatz kommen müssen, kommt es aufgrund eines Einbruchs des Magnetfeldes zwischen zwei Elementen zu Inhomogenitäten, deren Auswirkung proportional zur Rotationsgeschwindigkeit des Schwungrades ansteigt und zu Wirbelstromverlusten führt. Durch die hohe Rotationsgeschwindigkeit des Rotors können auftretende Inhomogenitäten außerdem ein Schwingen des Rotors herbeiführen, was im schlimmsten Fall eine Zerstörung des Schwungrades mit sich bringt.

Aufgrund der Herausforderungen der abstoßenden Anordnung und dessen Komplikationen im Bezug auf Material und Umsetzbarkeit wurde die anziehende Anordnung als praktikabelste Lösung identifiziert. Um dem oben erwähnten Homogenitätsproblemen zu entgehen, wurde auch hier von der permanentmagnetischen Variante abgesehen und somit auch von etwaigen Anbauten am Rotor. Im Gegensatz zu den in der Literatur zuvor präsentierten Ansätzen, wie zum Beispiel in [19, 20, 21, 22] ersichtlich, zielt die vorliegende Arbeit auf eine effektive low-cost Variante eines Entlastungsmodells ab. Daraus ergibt sich, dass eine aktive magnetische Entlastung mittels Elektromagnet als das angestrebte Konzept zur Umsetzung festgelegt wurde.

3.1 Aktive Magnetische Entlastung

Wie in Kapitel 2.2 ausführlich beschrieben, handelt es sich bei einer magnetischen Gewichtskompensation im Grunde genommen um ein System aus mindestens zwei Magneten, die sich durch ihre geometrische Lage (verschiedene nicht starr verbundene Teile eines Systems) und ihre magnetische Ausrichtung zueinander entweder abstoßen oder anziehen und dadurch eine entgegen der Gewichtskraft wirkende Kraft an einem Teil des Systems erzeugen. Wenn sich bei mindestens einem der im System befindlichen Magnete um einen Elektromagnet handelt, spricht man von einer aktiven magnetischen Entlastung. Dieses kann aus einem oder mehreren Magneten, je nach Geometrie und Auslegung aufgebaut sein. Um dieses System auf eine gewisse Gewichtskraft einstellen zu können, wird das ganze System in eine Regelstrecke eingegliedert.

Da es sich bei diesem Projekt um die Gewichtsentlastung eines FESS handelt, welches mit einer hohen Umfangsgeschwindigkeit rotiert (30000 U/min), wirken Zentrifugalkräfte im Bereich von 631 N bis 1026 N auf den Rotor (berechnet durch Formel 3.1 im vorgesehenen Bereich des Magneten mit einem Radius von 64 und 104 mm normalisiert auf ein Gewicht von 1 g), welche das Fixieren von Anbauten maßgeblich erschweren. Deswegen wurde nach einer Variante gesucht, welche eine minimale Anzahl von zusätzlichen Komponenten im Rotor benötigt. Beim Rotormaterial handelt es sich um Stahl (42CrMo4) mit einer hervorragenden magnetischen Leitfähigkeit. Diese Materialeigenschaften wurden sich zu Nutzen gemacht, um eine anziehende Anordnung der magnetischen Entlastung zu entwickeln, welche den Rotor direkt mittels Elektromagneten anhebt und keine Modifikation des Rotors benötigt.

$$F_{ZF} = m\omega^2 r \quad (3.1)$$

Der Elektromagnet wurde nach dem Vorbild eines Hufeisenmagnets entworfen und besteht aus einer Spule die von einem Eisenkern umgeben wird. Im Abschnitt 2.2.3 wurde die hier angewandte Methode der attraktiven Anordnung mit Nutzung des ferromagnetischen Rotormaterials schon erarbeitet und auch auf mögliche Homogenitätsprobleme bezüglich des Magnetfeldes hingewiesen. Aus diesem Grund wurde der Elektromagnet

als Hohlzylinder entworfen, da dadurch die Homogenität des magnetischen Feldes in radialer Richtung gewährleistet werden kann.

3.2 Eisenkern

Zur Führung des elektromagnetischen Feldes wurde um die Spule ein Eisenkern gelegt. Dieser besteht aus dem selben Material wie die Stahlnabe des Schwungrads ($42\text{CrMo}4$). Der Prototyp dieses Eisenkerns ist in Abbildung 3.4 ersichtlich.

Die radiale Ausdehnung des Eisenkerns, sowie dessen Höhe wurde in radialer Richtung durch die Stahlnabe des Schwungrads und in horizontaler Richtung durch dessen Einhausung, des sogenannten Berstschutzes, limitiert. Zusätzlich wird in die Stahlnabe am radialen Ende eine Ausnehmung gefräst, um später etwaige Wuchtgewichte am Schwungrad anbringen zu können. Dieser Wuchtkanal darf aufgrund des magnetischen Feldes natürlich nicht unter oder in der Nähe des Elektromagneten sein und limitiert somit die radiale Ausdehnung zusätzlich.

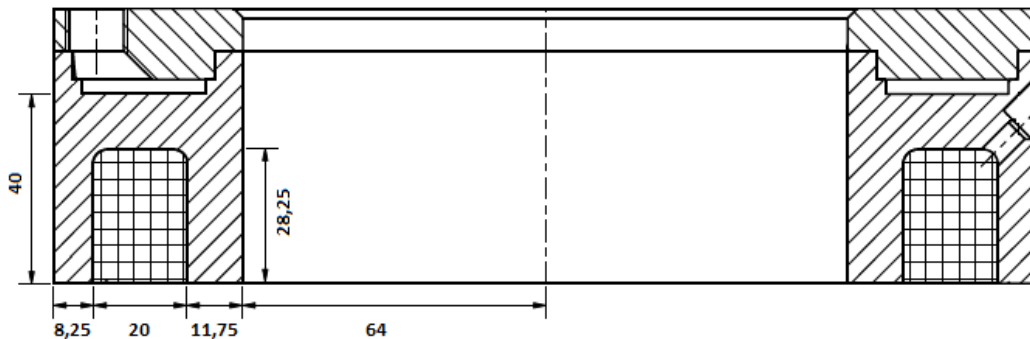


Abbildung 3.4: Zeichnung des Eisenkerns (Quelle: Christof Birgel)

Zur genauen Ermittlung der benötigten Größe des Eisenkerns wurden Simulationen, welche in Kapitel 3.4 beschrieben werden, durchgeführt. Das Hauptaugenmerk hierbei liegt auf der benötigten magnetischen Flussdichte im Eisenkern, welcher durch die Spule induziert wird. Diese sollte im Bereich von maximal $1,2\text{ T}$ liegen, da das Material ansonsten in Sättigung geht

und die benötigte magnetische Erregung durch die Spule unverhältnismäßig ansteigen würde [23]. Eine erste Abschätzung über den auftretenden magnetischen Fluss im Eisenkern wird im folgenden Beispiel berechnet.

$$F = \frac{B^2 \cdot A}{2\mu_0} \quad (3.2)$$

Die Kraft F ergibt sich aus der magnetischen Flussdichte im Stahl und der Fläche A , die sie durchdringt. Anhand dieser Formel wird klar, dass die gesamte Kraft des Elektromagneten aus der Summe der Kräfte, entstehend aus den beiden, zum Schwungrad zeigenden, Schenkelflächen A_1 und A_2 , besteht.

$$F = F_1 + F_2 = \frac{B_1^2 \cdot A_1}{2\mu_0} + \frac{B_2^2 \cdot A_2}{2\mu_0} \quad (3.3)$$

Da der magnetische Fluss ϕ durch beide Schenkel gleich ist und die magnetischen Eigenschaften des Materials beider Schenkel des Eisenkerns so gut wie möglich ausgenutzt werden sollten, müssen die magnetischen Flussdichten B_1 und B_2 , sowie die durchflossenen Schenkelflächen A_1 und A_2 , jeweils gleich groß sein.

$$\phi = B \cdot A = B_1 \cdot A_1 = B_2 \cdot A_2 \rightarrow B_1 \hat{=} B_2 \rightarrow A_1 = A_2 \quad (3.4)$$

Daraus ergibt sich die Begründung für die Dicke des inneren Schenkels, welcher wie in Abbildung 3.4 veranschaulicht, um den Faktor 1,42 dicker als der äußere Schenkel ist. Aufgrund der Form eines Hohlzylinders ist der Radius des inneren Schenkels kleiner, was zur Folge hat, dass er stärker ausgeführt werden muss, um die gleiche Fläche wie der Äußere zu besitzen. Da es fertigungstechnisch nur begrenzt möglich ist, zwei exakt gleich große Flächen zu generieren, muss in den folgenden Berechnungen A_1 und A_2 getrennt betrachtet werden.

Durch Zusammenführung der Formeln 3.2 und 3.4 erhält man für F nun:

$$F_1 = \frac{\phi^2}{2\mu_0 A_1} \quad F_2 = \frac{\phi^2}{2\mu_0 A_2} \quad (3.5)$$

$$F = \frac{\phi^2}{2\mu_0 A_1} + \frac{\phi^2}{2\mu_0 A_2} \quad (3.6)$$

Durch Umformung der Formel 3.6 erhält man den benötigten magnetischen Fluss ϕ um die Kraft F von 1200 N zu erreichen:

$$F = \frac{\phi^2(A_1 + A_2)}{2\mu_0 A_1 A_2} \rightarrow \phi = \sqrt{\frac{A_1 \cdot A_2}{A_1 + A_2} 2\mu_0 F} \quad (3.7)$$

$$\phi = \sqrt{\frac{49 \text{ cm}^2 \cdot 52 \text{ cm}^2}{49 \text{ cm}^2 + 52 \text{ cm}^2} \cdot 2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \cdot 1200 \text{ N}} = 2,7 \text{ mWb} \quad (3.8)$$

Durch Umwandlung der Formel 3.4 kann nun die magnetische Flussdichte durch die Schenkelflächen des Eisenkerns berechnet werden:

$$B_1 = \frac{\phi}{A_1} = \frac{2,7 \text{ mWb}}{49 \text{ cm}^2} = 0,56 \text{ T} \quad B_2 = \frac{\phi}{A_2} = \frac{2,7 \text{ mWb}}{52 \text{ cm}^2} = 0,53 \text{ T} \quad (3.9)$$

Anzumerken ist, dass der Eisenkern aus zwei Ringhälften, die mittels Hartlötprozess miteinander verbunden werden, besteht. Dieser Arbeitsschritt wurde eingeführt, um einen Kühlkanal im Eisenkern zu erhalten. Dieser wird benötigt, um die durch den Stromfluss der Spule entstehenden Wärme abführen zu können, da sich das Schwungrad und somit auch der Elektromagnet in einem Vakuum befinden. Die Wärme könnte ansonsten nicht ausreichend aus der Spule abgeführt werden, was zu einer konstanten Erwärmung der Spule und im Endeffekt zu dessen Zerstörung führen würde. Weitere Betrachtungen der Kühlung werden im Kapitel 3.4.2 abgehandelt.

3.3 Spule

Um die Spule, welche für den karierten Bereich der Abbildung 3.4 vorgesehen ist, erfolgreich konzeptionieren zu können, musste zuerst eine Methode zur Befestigung der Spule im Eisenkern gefunden werden. Das Hauptproblem ist, dass die Öffnung für die Spule nach unten, also Richtung Schwungrad, zeigt. Da der Elektromagnet nur wenige Millimeter von der Stahlnabe des Schwungrades entfernt sein darf, damit das Entlastungskonzept funktioniert, muss sichergestellt werden, dass die gesamte Spule sich in keinem Fall bewegen oder Teile davon aus dem dafür vorgesehenen Bereich hervorstehen dürfen. Um dies zu garantieren, muss die Spule mittels Epoxidharz in den Spulenkanal eingeklebt werden, was in der Auslegung der Spule berücksichtigt werden muss.

Eine erste Abschätzung der Spulenparameter (Drahtlänge, Windungszahl, Drahtdurchmesser) kann über die Berechnung der benötigten magnetischen Erregung H entlang des Erregerkreises (entlang des Eisenkerns und über den Luftspalt) durchgeführt werden. Der magnetische Widerstand der Stahlnabe wurde aufgrund der Stärke des Materials vernachlässigt. Um sicherzustellen, dass die magnetische Entlastung auch bei einer größeren Distanz zwischen Magnet und Stahlnabe funktioniert, wurde die Spule für einen Abstand von 3 mm ausgelegt. H_{Luft_1} und H_{Luft_2} seien hier die benötigte magnetische Erregung über den Luftspalt und die letzten drei Terme stellen die Strecke über den Eisenkern dar. Für μ_{Fe} ist hierbei $611 \frac{Vs}{Am}$ angenommen worden. [23]

$$H_{Luft_1} = \frac{B_1}{\mu_0} \quad (3.10)$$

$$H_{Luft_2} = \frac{B_2}{\mu_0} \quad (3.11)$$

$$H_1 = \frac{B_1}{\mu_0 \mu_{Fe}} \quad (3.12)$$

$$H_2 = \frac{B_2}{\mu_0 \mu_{Fe}} \quad (3.13)$$

$$\theta = H_{Luft_1}d + H_{Luft_2}d + H_1h + \frac{H_1 + H_2}{2}b_{Spule} + H_2h \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \theta &= 4,42 \cdot 10^5 \frac{A}{m} \cdot 0,003 m + 4,19 \cdot 10^5 \frac{A}{m} \cdot 0,003 m + 723 \frac{A}{m} \cdot 0,04 m + \\ &+ \frac{723 \frac{A}{m} + 687 \frac{A}{m}}{2} \cdot 0,02 m + 687 \frac{A}{m} \cdot 0,04 m = 2660 A \end{aligned} \quad (3.15)$$

Durch die Berechnung der magnetischen Durchflutung θ , welche das Weingintegral über die magnetische Erregung darstellt, kann nun Rückschluss auf die benötigte Anzahl der Windungen der Spule, sowie des benötigten Stroms gemacht werden. Hierzu ist es nötig die in den Spulenkanal passende Windungsanzahl zu berechnen. Die Spule wird als „wilde“ Wicklung ausgeführt werden und somit ist ein Füllfaktor k von 70 Prozent annehmbar. Der temperaturbeständige isolierte Draht wurde aus dem Inventar des Instituts ausgewählt und hat einen Querschnitt A_{Cu} von $0,5 \text{ mm}^2$.

$$N = \frac{A_{Spule} \cdot k}{A_{Cu}} = \frac{0,000584 \text{ m}^2 \cdot 0,7}{0,5 \text{ mm}^2} = 817,95 \text{ Windungen} \quad (3.16)$$

Die berechnete Windungszahl N wurde noch auf 500 abgerundet um Planungssicherheit zu erhalten, da die Spule nicht direkt in den Eisenkern gewickelt werden kann. Mit dieser ist es schlussendlich möglich, den benötigte Strom I wie folgt, zu berechnen:

$$I = \frac{\theta}{N} = \frac{2660 A}{500 \text{ Windungen}} = 5,31 A \quad (3.17)$$

Weitere Spulenparameter von Interesse sind der ohmsche Spulenwiderstand R_{Cu} , die entstehende Verlustleistung P_v , welche sich durch Wärmeemittierung äußert, und die Spulenspannung U_{Cu} . Die Länge r_{mittel} beträgt 85,5 mm und stellt den mittleren Spulenradius dar.

$$R_{Cu} = \frac{r_{mittel} \cdot 2\pi N}{\kappa_{Cu} A_{Cu}} = \frac{0,085 m \cdot 2\pi \cdot 500 \text{ Windungen}}{56 \frac{Sm}{\text{mm}^2} \cdot 0,5 \text{ mm}^2} = 9,54 \text{ Ohm} \quad (3.18)$$

$$P_v = I^2 R_{Cu} = (5,31 A)^2 \cdot 9,54 Ohm = 268,99 W \quad (3.19)$$

$$U_{Cu} = R_{Cu} I = 9,54 Ohm \cdot 5,31 A = 50,66 V \quad (3.20)$$

Die durchgeführten Berechnungen ergeben, dass alle Parameter des konzipierten Elektromagneten in der Praxis realisierbare Werte darstellen, wodurch das Konzept als funktionsfähig angesehen werden kann. Zum Zweck der Absicherung wurde das Konzept, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, zusätzlich simuliert.

3.4 Simulation

Zur Verifikation des Konzepts wurde dieses computerunterstützt nachgebildet und simuliert. Als Software wurde „COMSOL Multiphysics“ (Comsol Multiphysics GmbH, Deutschland), verwendet. Dies ist eine Simulationssoftware für physikalische Vorgänge, welche durch Differentialgleichungen dargestellt werden können und basiert auf der Finite-Elemente-Methode (FEM).

Da die Software zur Simulation eines breiten Spektrums bei physikalischen Vorgängen einsetzbar ist, muss zu Beginn der Modellbildung das zugrundeliegende physikalische Modell der jeweiligen gesuchten Parameter, die Art der Untersuchung (in Comsol gibt es unter dem Namen Studie eine Auswahl aus u.a. stationär, zeitabhängig) und vor allem das Koordinatensystem, welches nicht nur die Erstellbarkeit der Geometrie, sondern auch die Rechenintensivität beeinflusst, ausgewählt werden.

3.4.1 Simulation der Hubkraft

Zur generellen Überprüfung der Korrektheit des Konzepts wurde als erstes ein Modell zur Simulation der Hubkraft erstellt. Die Untersuchungsart wurde als stationär angenommen, da die Hubkraft zeitlich konstant bleiben soll/wird. Dies kann angenommen werden, da der geometrische Aufbau rotationssymmetrisch, sowie das von der Spule erzeugte Magnetfeld homogen ist und somit keine zeitabhängige Veränderung der elektrischen Flussdichte \vec{D} auftreten kann. Es ist anzumerken, dass der Elektromagnet durch ein stromgeregeltes Netzteil versorgt wird, was bedeutet, dass auch bei einer Temperaturänderung der Spule und somit des ohmschen Widerstandes, die magnetische Erregung H sich nicht verändert, da diese nur vom Strom I durch die Spule und ihrer Windungszahl N , wie durch Formel 3.21 des Durchflutungsgesetzes beschrieben, abhängt.

$$\oint_S \vec{H} \cdot d\vec{s} = I \cdot N = \Theta \quad (3.21)$$

Da alle simulationstechnisch relevanten Komponenten (Eisenkern, Spule und Stahlnabe) rotationssymmetrisch sind, wurde auch das geometrische Modell der Simulation als 2-D-rotationssymmetrisch gewählt. Dies erleichtert nicht nur die Bildung des geometrischen Modells, sondern beschleunigt auch die Berechnung der Simulation, welche nur in zwei Dimensionen mit Extrapolierung und nicht dreidimensional erfolgen muss.

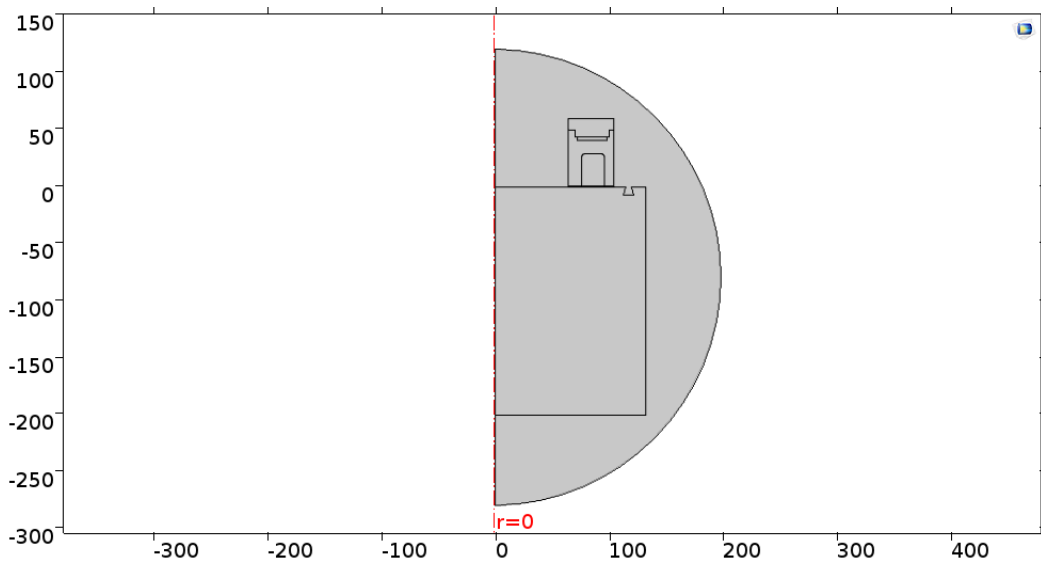


Abbildung 3.5: 2D-Geometrie des Elektromagneten mit Schwungrad in COMSOL

Die Größe des Simulationsmodells in Abbildung 3.5 entspricht dem Konzept und ist im Maßstab 1:1. Des Weiteren wurden alle geometrischen Eigenschaften, wie der Kühlkanal des Eisenkerns und die trapezförmige Wuchtkanalausnehmung des Rotors, die später auch im Prototypen implementiert werden, in die Simulation eingebaut.

Die Distanz zwischen Eisenkern und Stahlnabe wurde als variabel angenommen und in 5 Punkten zwischen ein und drei Millimetern Abstand simuliert. Dadurch musste der Strom durch die Spule für jeden Abstand adaptiert werden um die Hubkraft von 1200 N zu gewährleisten.

Die Abbildungen 3.7 und 3.8 zeigen die Simulation der magnetischen Flussdichte für zwei unterschiedliche Abstände, bei gleicher resultierender

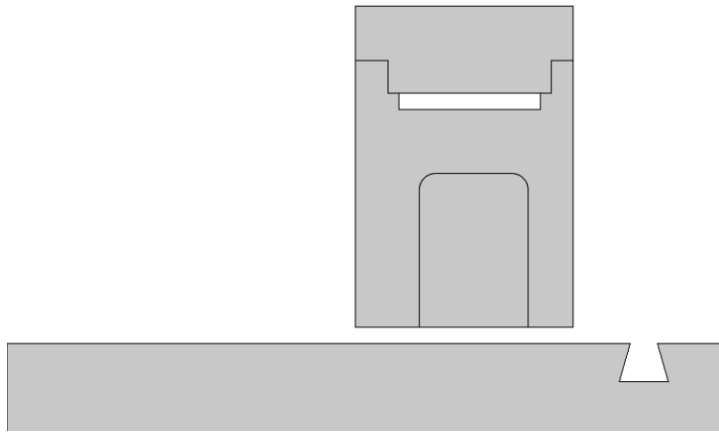


Abbildung 3.6: Gezoomte 2D-Geometrie des Elektromagneten mit Schwungrad in COMSOL

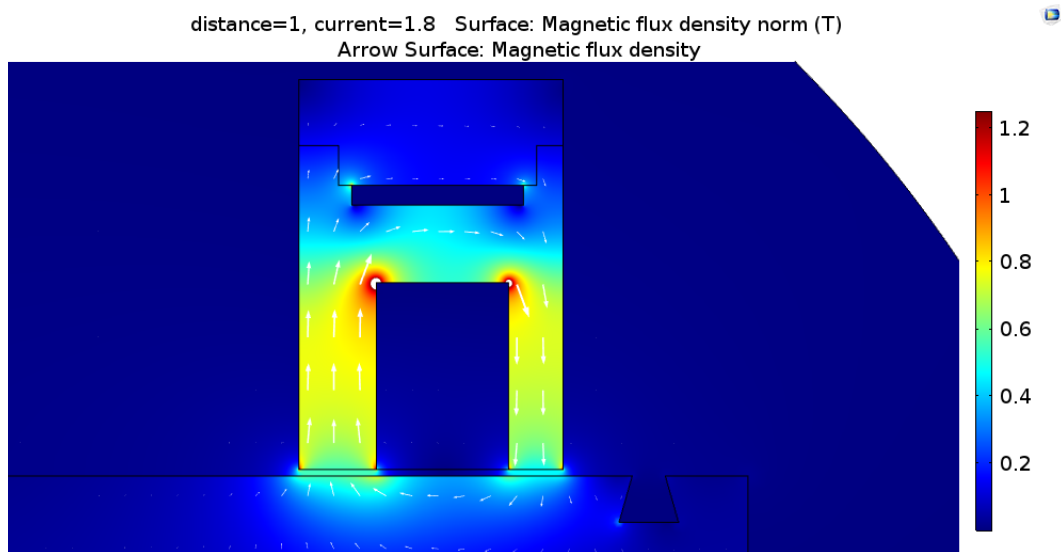


Abbildung 3.7: Simulation der magnetischen Flussdichte für 1 mm Abstand

Hubkraft. Die weißen Pfeile spiegeln Größe und Richtung des magnetischen Flusses wider. Zur besseren Veranschaulichung wurde zusätzlich die magnetische Flussdichte als Heatmap dargestellt. Hier ist anzumerken,

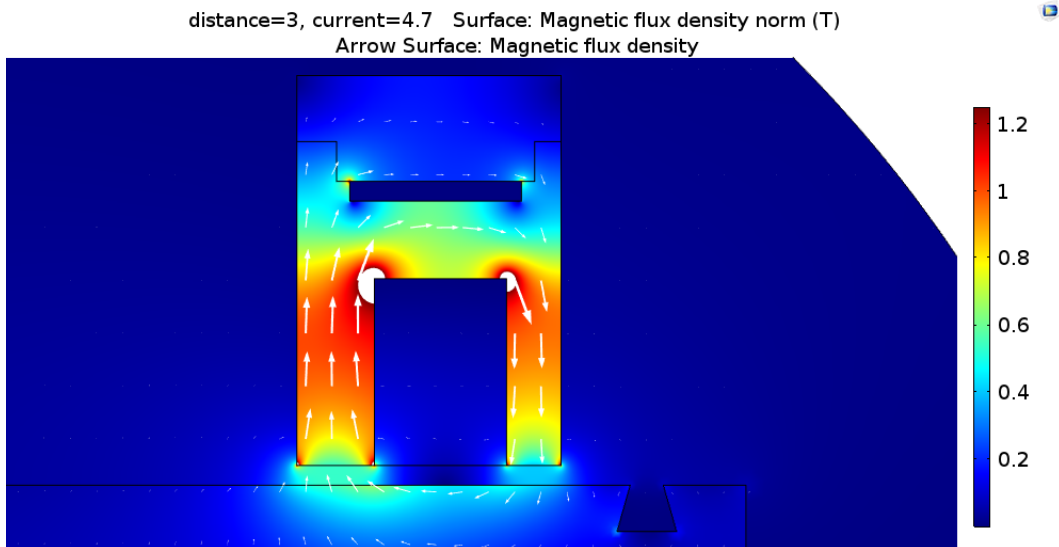


Abbildung 3.8: Simulation der magnetischen Flussdichte für 3 mm Abstand

dass die weißen Bereiche an den oberen Ecken der Spule eine magnetische Flussdichte oberhalb von 1,2 T aufweisen und sich somit das Material an dieser Stelle in Sättigung befindet [23]. Diese Bereiche sind in der Abbildung 3.8 aufgrund der höheren benötigten magnetischen Erregung stärker ausgeprägt als beim Abstand von einem Millimeter, dennoch sollten die höheren Flussdichten in diesen Bereichen keine Komplikationen für die Funktionsfähigkeit der Gewichtsentlastung darstellen, da der Bereich um ihn herum nicht in Sättigung und somit noch genug Material zur Führung des magnetischen Flusses vorhanden ist. Auch Kühl- und Wuchtkanal bereiten keine sichtbaren Komplikationen in der Simulation. Aus den durchgeführten Simulationen resultiert, dass der Rotor mittels Elektromagneten auf einem Abstand von mindestens 3 mm mit der erforderlichen Kraft entlastet werden kann.

In der folgenden Tabelle sind die Resultate der Simulation der magnetischen Flussdichte zusammengefasst:

Abstand	I_{Cu}	U_{Cu}	R_{Cu}	P_v
mm	A	V	Ω	W
1	1,8	16,2	8,98	29
1,5	2,55	22,9	8,98	58
2	3,3	29,6	8,98	98
2,5	4,0	35,9	8,98	144
3	4,7	42,2	8,98	198

Tabelle 3.2: Resultate der Simulation der Hubkraft

3.4.2 Simulation der Wärmeemission

Obwohl der Elektromagnet über die nötige Hubkraft verfügt, um die Stahl-nabe wie gewünscht zu entlasten, muss auch zusätzlich gewährleistet sein, dass die benötigte Leistung P_v auch abgeleitet werden kann. Da Elektromagnet und Stahl-nabe im Vakuum operieren, kann keine Luftwärmeableitung erfolgen, was eine Problemstellung darstellt. Aus diesem Grund wurde in den Eisenkern ein Kühlkanal eingebaut, um die Wärmeableitung durch ein beliebiges flüssiges Kühlmedium zu realisieren.

Um die Wärmeemittierung simulieren zu können, wurden drei Randbedingungen definiert, die emittierte Verlustleistung von der Spule P_v , welche im Abschnitt 3.4.1 in Abhängigkeit des Abstands ermittelt wurde, die konstante Temperatur des Kühlkanals T_K und die Wärmeleitfähigkeit k der Materialien des Elektromagneten. Das Resultat der Simulation ist eine Temperaturerhöhung ΔT im Elektromagneten, welche unabhängig von der Kühlmitteltemperatur ist. Aus diesem Grund wird die Kühlkanaltemperatur T_K mit 0°C angenommen.

Für die dritte Randbedingung wurde die Wärmeleitfähigkeit des Eisenkerns $k_{42CrMo4}$ mit $42,6 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ angenommen. Da die Spule mittels Epoxidharz in den Elektromagneten eingeklebt werden soll, wird das Volumen des Spulenraums überschlagsmäßig aus 70 % Kupfer mit einer Leitfähigkeit k_{Cu} von $401 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ und zu 30 % aus Epoxidharz mit k_{Epoxy} von $0,21 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ angenommen, was eine Wärmeleitfähigkeit k_{Spule} von $0,70 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ ergibt.

$$\frac{1}{k_{Spule}} = \frac{0.7}{k_{Cu}} + \frac{0.3}{k_{Epoxy}} \rightarrow k_{Spule} = 0.70 \quad (3.22)$$

Abbildung 3.9 zeigt die Simulation der Wärmeableitung bei einem Abstand von 3 mm, für die maximal benötigte Leistung von 198,37 W. Es veranschaulicht die gute Leitfähigkeit des Eisenkerns durch ein ΔT von kleiner als 10 °C. Der Hitzepol befindet sich aufgrund des schlechten Wärmeleitwerts des Epoxidharzes natürlich in dem Bereich der Wärmeemittation der Spule, was sich negativ auf die Langlebigkeit der Spule auswirken könnte. Aus diesem Grund und da es fertigungstechnisch nicht möglich ist die Spule exakt passgenau für den Eisenkern zu wickeln, kann ein lückenloser Aufbau zwischen Spule und Eisenkern nicht umgesetzt werden.

Diese Lücke manifestiert sich in einem Mantel der die Spule umschließt und diese wärmeleittechnisch vom Eisenkern abkapselt. Dieser Effekt ist in Abbildung 3.10 sichtbar, äußert sich in einer um 20 °C höheren Kerntemperatur der Spule und das bei einer Mantelstärke von nur 1 mm. Aufgrund dieses Phänomens muss die Spule mit hoher Passgenauigkeit/Präzision gefertigt werden, um die Wärmeleitung zu optimieren. Eine weitere Möglichkeit wäre die Verwendung eines Epoxidharzes höherer Wärmeleitfähigkeit oder eines anderen Klebers, welcher bessere Wärmeleiteigenschaften aufweist.

3 Konzept

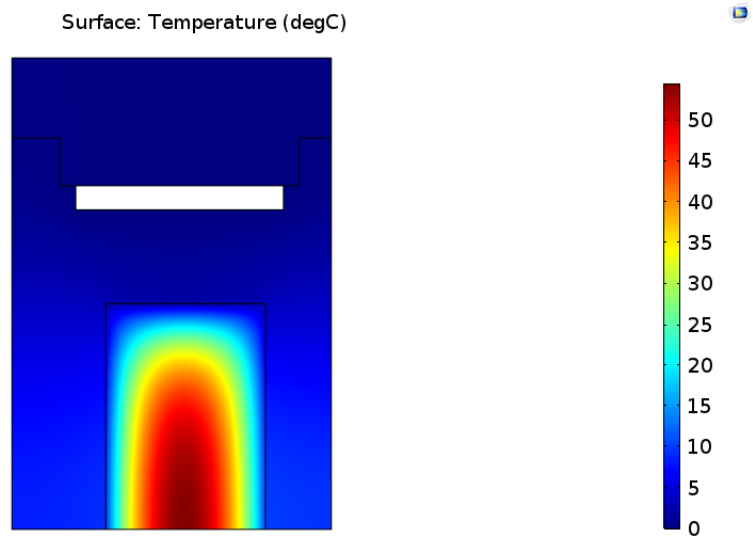


Abbildung 3.9: Simulation der Wärmeemittierung für 3 mm Abstand ohne Epoxidmantel

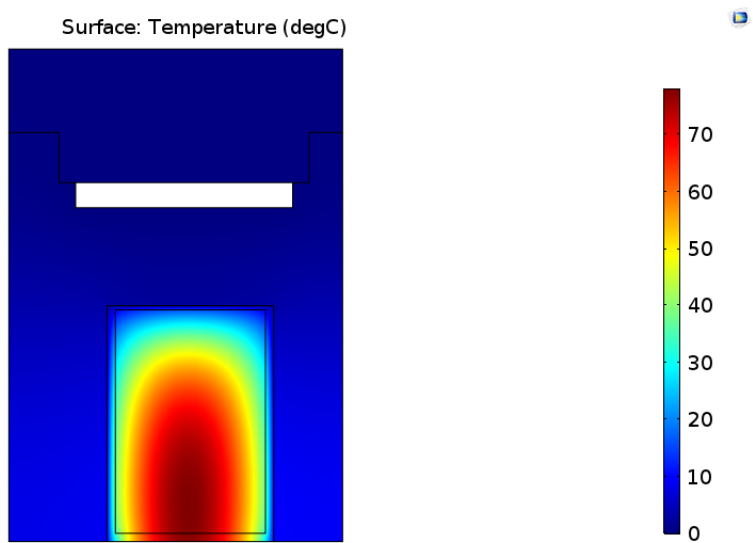


Abbildung 3.10: Simulation der Wärmeemittierung für 3 mm Abstand mit Epoxidmantel

3.4.3 Simulation der Wirbelströme

Im letzten simulationstechnisch relevanten Punkt wurde die Frage nach der Größe der Wirbelströme im Rotor behandelt. Diese entstehen durch Rotation des Rotors, welcher sich orthogonal zum Magnetfelds des Elektromagneten bewegt. Da diese Simulation nicht mit dem in den vorherigen Simulationen genutzten 2D-Modell gemacht werden kann, wurde ein 3D-Modell, welches in Abbildung 3.11 zu sehen ist, des FESS konzipiert.

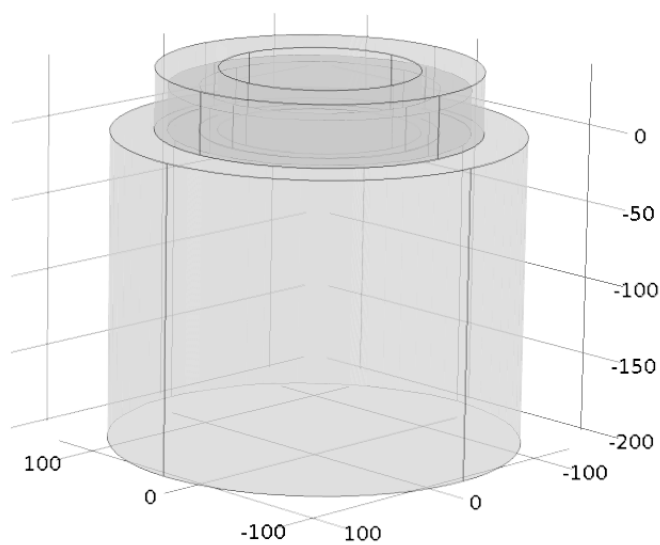


Abbildung 3.11: 3D-Modell des Schwungradspeichers

Als Randbedingung wurde auch hier vom maximalen Abstand d von 3 mm und des dafür benötigten Stroms I von 4,7 A ausgegangen. Des Weiteren wurde eine Rotorgeschwindigkeit von 40.000 U/min definiert.

Abbildung 3.12 veranschaulicht die Übereinstimmung des magnetischen Flusses durch Elektromagnet und Stahlhabe des 3D-Modells mit der zwei-dimensionalen Variante. Abbildung 3.13 und 3.14 zeigen den Wirbelstrom, als Draufsicht auf- und als Durchschnitt durch den Rotor, welcher durch die Rotation der Stahlhabe entsteht. Der Wirbelstrom entsteht exakt unter dem Elektromagneten und bildet eine Schleife, welche sich radial gesehen vor und nach dem Elektromagneten ausprägt und in Abbildung 3.14

3 Konzept

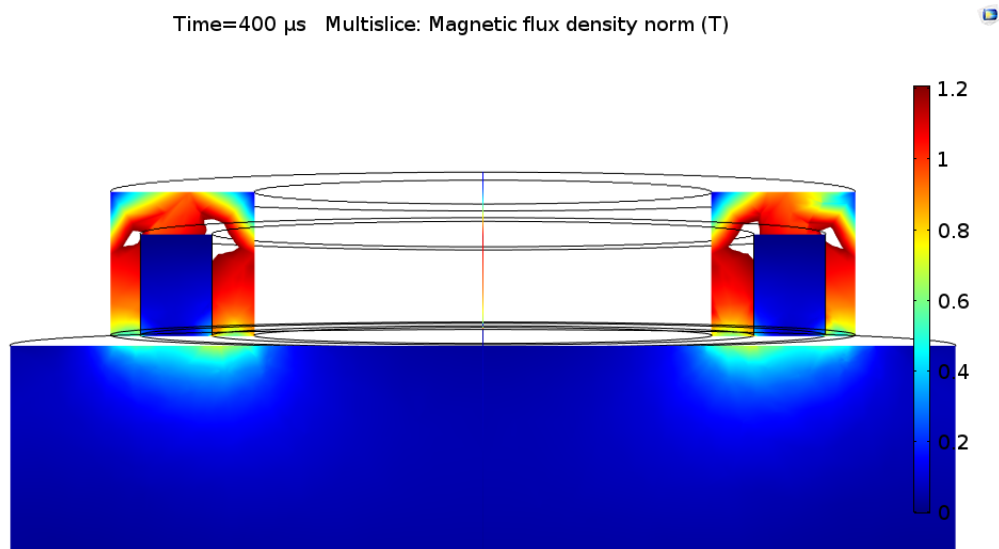


Abbildung 3.12: Magnetische Flussdichte im 3D-Modell

veranschaulicht ist. Die Pfeile des abfließenden Stroms, welche genau auf der Oberfläche der Stahlnabe stattfinden, können aufgrund der durch die Rechenleistung begrenzt gewählten Auflösung nicht angezeigt werden. Anhand dieser Simulation liegen die Wirbelströme in einem Bereich von maximal $90 \frac{A}{m^2}$ und die daraus resultierende Verlustleistung beträgt $0,78 \text{ W}$. Abschließend ist somit davon auszugehen, dass die entstehenden Wirbelströme keine Auswirkung auf die Funktionsweise des Schwungrads haben sollten.

Time=400 μs Volume: Current density norm (A/m^2)

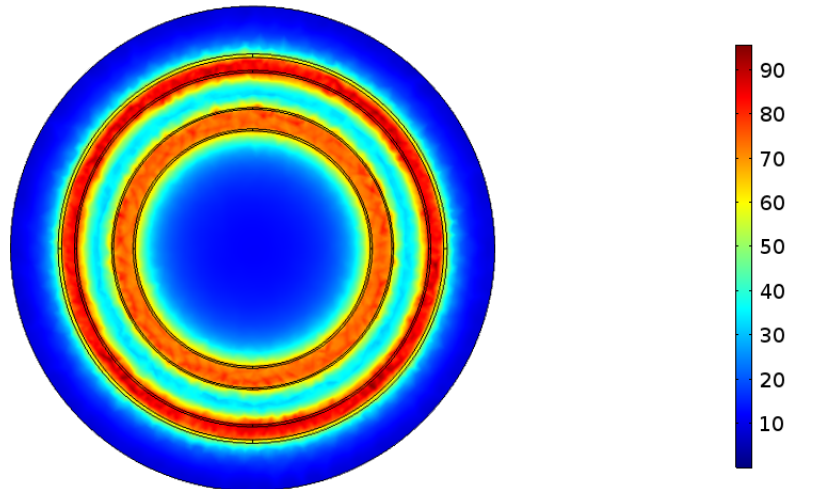


Abbildung 3.13: Stromdichte im Rotor als Draufsicht

Time=400 μs Slice: Current density norm (A/m^2) Arrow Volume: Current density

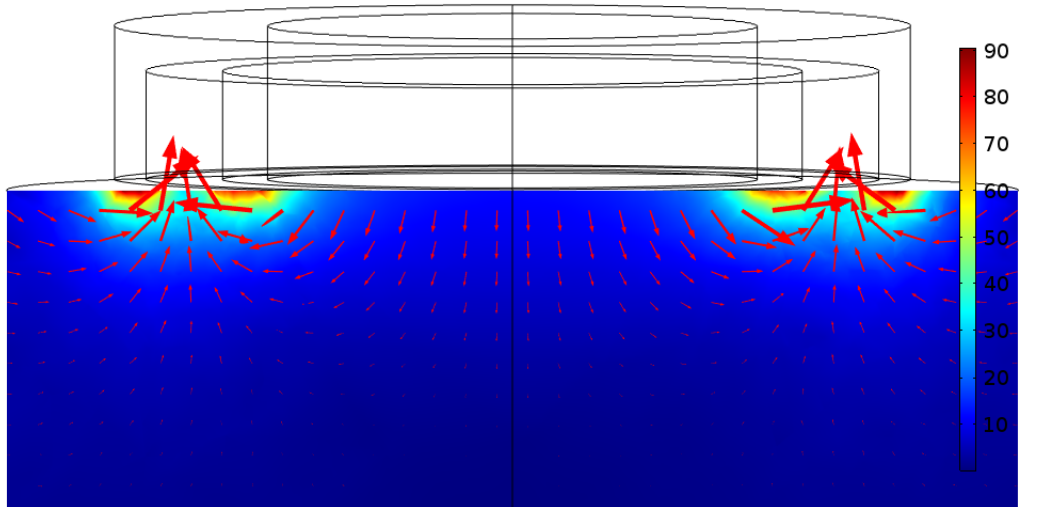


Abbildung 3.14: Stromdichte im Rotor als Rotorschnitt

Zusätzlich wurde in einer weiteren Simulation noch der Einfluss einer Neigung der Stahlnabe zum Elektromagneten untersucht. Diese Neigung wurde mit einem Winkel von 0,5 Grad gewählt, groß genug um den Nei-

gunseinfluss zu veranschaulichen und klein genug damit sich Rotor und Elektromagnet nicht berühren. Dies bedeutet das sich der Abstand zwischen Elektromagnet und Stahlnabe verändert, am höchsten Punkt beträgt er 3,9 mm und am Niedrigsten 2,1 mm. Wie diese Änderung den Fluss des Magnetfeldes verändert, ist in Abbildung 3.15 veranschaulicht und zeigt einen Eisenkern der auf der rechten Halbebene stark in Sättigung ist.

Die Abbildungen 3.16 und 3.17 zeigen abermals die Stromdichte im Rotor, der Einfluss der Neigung spiegelt sich in der Konzentration der Wirbelströme im Bereich des kleinsten Abstandes zwischen Rotor und Elektromagnet wider. Hierbei sind die Wirbelströme örtlich konzentrierter, mit dem Spitzenwert im Bereich des geringsten Abstands zwischen Rotor und Elektromagnet, und dadurch um ein Vielfaches größer als bei der Simulation ohne Neigung. Die Wirbelströme liegen dort in einem Bereich von maximal $500 \frac{A}{m^2}$. Obwohl dies ein mehr als 5-fach so hoher Wert gegenüber der Simulation ohne Neigung darstellt, ergab die simulierte Verlustleistung mit 1,33 W nur einen fast doppelt so hohen Wert, welcher aufgrund der Verluste des Elektromagneten und des gesamten FESS-Systems vernachlässigbar ist, was durch die in [24] beschriebenen Verluste nochmals unterstrichen wird. Es sei erwähnt, dass es bei dieser Simulation keine Möglichkeit zur Überprüfung, ob die Hubkraft noch 1200 N beträgt, gab. Jedoch ist aufgrund von Abbildung 3.15 anzunehmen, dass sich diese durch die Neigung verändert hat, da die rechte Hälfte des Elektromagneten sich fast vollständig in Sättigung befindet, weshalb darauf zu achten ist, den Aufbau mit höchstmöglicher Präzision durchzuführen.

Durch den in Sättigung befindlichen Bereich des Rotors ist es zusätzlich notwendig eine Abschätzung der Hystereseverluste durchzuführen. Die Energie des magnetischen Feldes kann durch Formel 3.23 berechnet werden.

$$E = \frac{BHV}{2} \quad (3.23)$$

Der in Sättigung befindliche Bereich weist im Mittel eine magnetische Flussdichte B von 1,2 T auf und die Koerzitivfeldstärke H_C wird mit $\pm 100 \frac{A}{m}$ geschätzt. Für die Abschätzung der Hystereseverluste wurde die Verlustfläche unter der Hystereseschleife als Rechteck angenommen, womit sich die spezifische Energiedichte mithilfe von Formel 3.24 berechnen lässt.

$$E_{spez} = \frac{B(-H_C^- + H_C^+)}{2} = BH_C = 1,2 \text{ T} \cdot 100 \frac{\text{A}}{\text{m}} = 120 \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \quad (3.24)$$

Anschließend wird das von den Hystereseverlusten betroffene Volumen im Rotor berechnet. Um das Volumen abschätzen zu können, wird in erster Instanz die in Sättigung befindliche Rotorfläche, wie in Abbildung 3.15 ersichtlich, wo Feldstärken im Mittel von 1,2 T herrschen, als Trapez angenähert. Hierbei ergibt sich eine Fläche A_{Trapez} von 3 cm^2 . Durch den mittleren Umfang des Trapezes im Rotor von $0,5 \text{ m}$ ergibt sich daraus ein Volumen von $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$. Daraus ergeben sich Hystereseverluste pro Umdrehung von 18 mJ. Bei voller Drehzahl von 30000 U/min ergibt das somit eine Hystereseverlustleistung von 9 W. Die Hystereseverluste sind somit deutlich größer als die Wirbelstromverluste, aber eine endgültige Aussage über deren genaue Aufteilung kann nur durch eine Vermessung am Prüfstand getroffen werden.

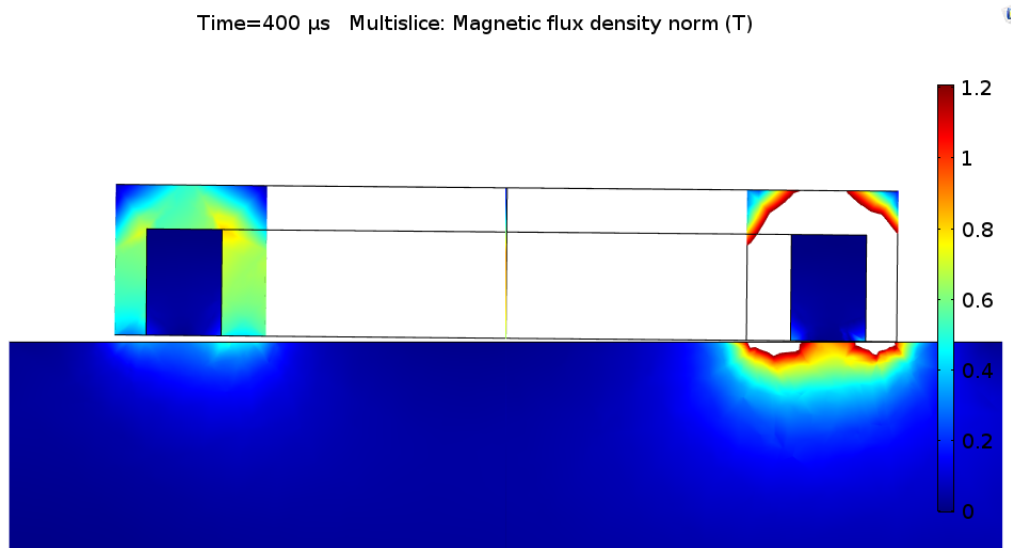


Abbildung 3.15: Magnetische Flussdichte im 3D-Modell mit einer $0,5^\circ$ Neigung

3 Konzept

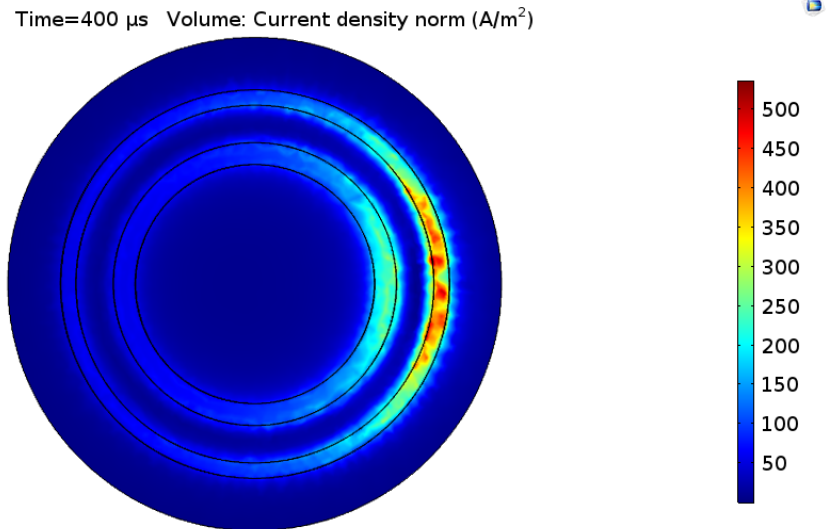


Abbildung 3.16: Stromdichte im Rotor als Draufsicht mit $0,5^\circ$ Neigung

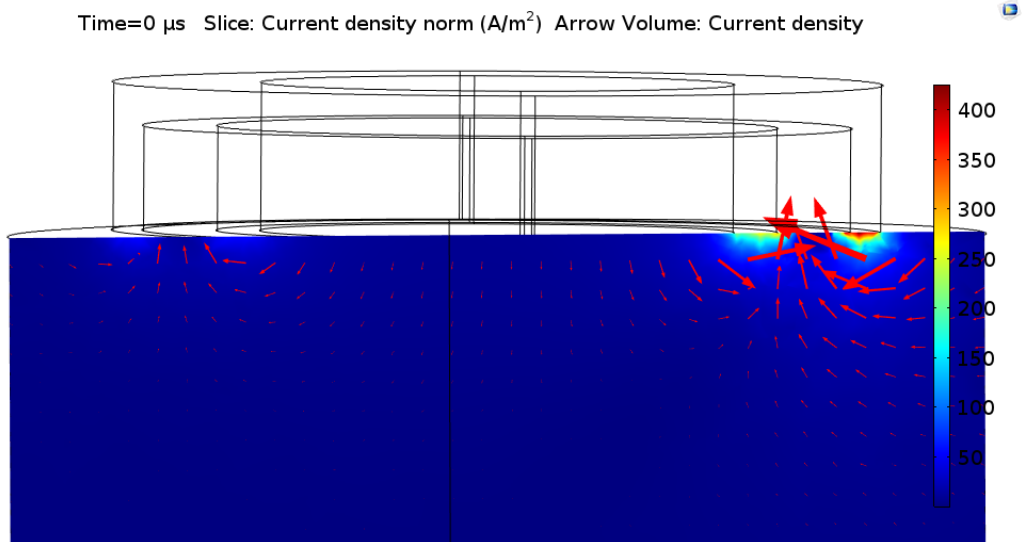


Abbildung 3.17: Stromdichte im Rotor als Rotorschnitt mit $0,5^\circ$ Neigung

4 Resultate

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Verifikation der Berechnungen aus Kapitel 3 und mit der Fertigung des Elektromagneten.

4.1 Prototypenfertigung

Die Fertigung des Prototypen wird in drei Bereiche unterteilt: Spule, Eisenkern und die Zusammenführung/Verklebung der Teile.

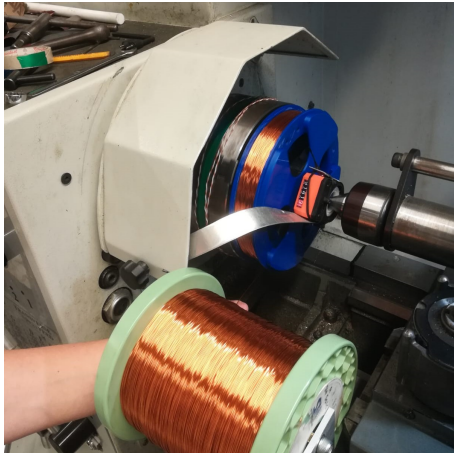
Da die Spule, aufgrund der räumlichen Geometrie innerhalb des Eisenkerns, nicht direkt hinein gewickelt werden kann, wurde ein Spulenträger dafür benötigt. Dieser wurde mit einem 3D-Drucker (Ultimaker S5) aus PLA (polylactic acid) gedruckt und so entworfen, dass die Spule darauf aufgewickelt und danach im Eisenkern verklebt werden kann. Da der Spulenkörper zu groß für die am Institut vorhandenen Wickelgeräte ist, wurde diese mittels Drehmaschine, wie in Abbildung 4.1(a) aufgewickelt. Die Spule wurde als „wilde Wicklung“ ausgeführt und deren Parameter sind ident zu den Berechnungen und der Simulation in Kapitel 3, ein Kupferdraht mit $0,5 \text{ mm}^2$ Durchmesser mit 500 Windungen. Mittels 4-Leiter-Methode wurde ein Widerstand von $10,20 \text{ Ohm}$ bei 20 °C festgestellt. Zur späteren Validierung der Spulentemperatur wurde ein Temperatursensor während des Wickelprozesses in die Mitte der Wicklung eingebracht.

Der Eisenkern wurde genau nach Zeichnung (Abbildung 3.4) aus einem einzigen Stück Stahl mit einer Drehmaschine, wie in Abbildung 4.1(b) ersichtlich, gefertigt. Die Abbildung 4.1(d) zeigt den finalen Eisenkern nach dem Zerspanungsprozess. Das Loch am äußeren Schenkel des Eisenkerns dient zur Ausführung der Anschlusskabel der Spule. Anzumerken ist noch,

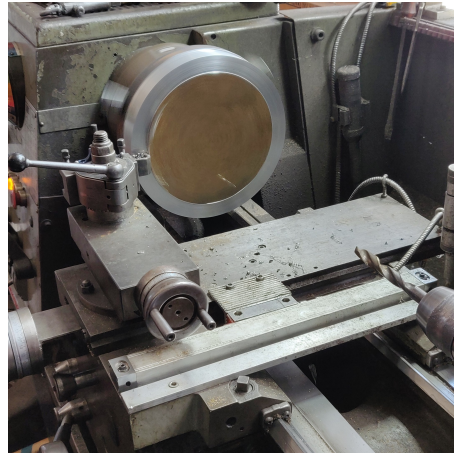
dass während des Zerspanungsprozesses großer Wert auf eine glatte Schenkelloberfläche gelegt wurde. Hintergrund dafür ist, dass die magnetischen Feldlinien orthogonal (wie in [25] gezeigt) aus den Schenkelflächen des Eisenkerns austreten und somit deren Oberflächenbeschaffenheit Einfluss auf die Homogenität des magnetischen Felds haben könnte. Der Oberteil des Eisenkerns, der den Deckel des Kühlkanals darstellt, wurde mittels 3D-Drucker (Ultimaker S5) gedruckt und mit dem Stahlteil verklebt, um den Kanal abzudichten.

Beim Einsetzen der Spule in den Eisenkern wurde ein Problem sichtbar. Obwohl die Spule radial perfekt in den Eisenkern passte, ragte die Spule aus diesem heraus. Der Grund dafür war, dass der Spulenkörper beim Wickelprozess nachgegeben bzw. sich verformt hatte und der Gesamtkorpus dadurch zu breit/hoch geworden ist. Deswegen wurde der Spulenträger entfernt und die Spule ohne diesen in den Eisenkern eingebracht. Um die Spule in Form halten zu können, wurde sie während der Entfernung des Spulenträgers mit einem Trafoband, wie in Abbildung 4.1(c) ersichtlich, stellenweise umwickelt. Zum Verkleben wurde ein Epoxidharz (Hersteller: Epodex) verwendet, welches in mehreren Schichten eingegossen wurde. Um sicher zu stellen, dass die Spule nicht auf dem Epoxidharz aufschwimmt und keine große Isolationsschicht zwischen Spule und Eisenkern entsteht, wurde sie mit einem Gewicht beschwert, um sie am Boden des Eisenkernkanals während des Trocknungsprozesses zu fixieren. Abbildung 4.1(e) zeigt die Spule nach dem vergießen der ersten Schicht. Die darauf ersichtlichen weißen Teflon Zylinder dienen zur Kraftübertragung der vorher erwähnten Beschwerung. Als Isolationsschicht wird in diesem Zusammenhang eine Schicht aus Epoxidharz bezeichnet, welche eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit im Gegensatz zu Eisen und Kupfer hat und somit die Wärmeableitung vom inneren der Spule in Richtung Eisenkern, indem sich der Kühlkanal befindet, negativ beeinflussen kann. Um Luftblasenbildung zu vermeiden, wurde der Elektromagnet nach Einbringen des Epoxidharzes in eine Vakuumkammer platziert. Nach dem Aushärtungsprozess wurde das überstehende Epoxidharz mittels Drehmaschine entfernt. Das Produkt all dieser Fertigungsschritte ist in Abbildung 4.1(f) ersichtlich.

4 Resultate



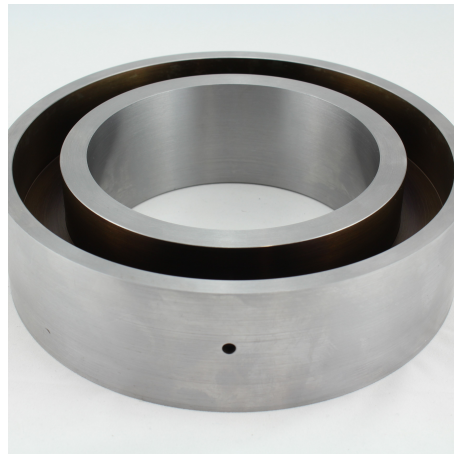
(a) Wicklungsprozess der Spule



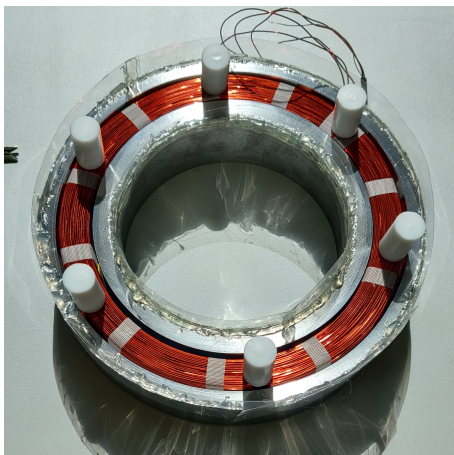
(b) Zerspanung des Eisenkerns



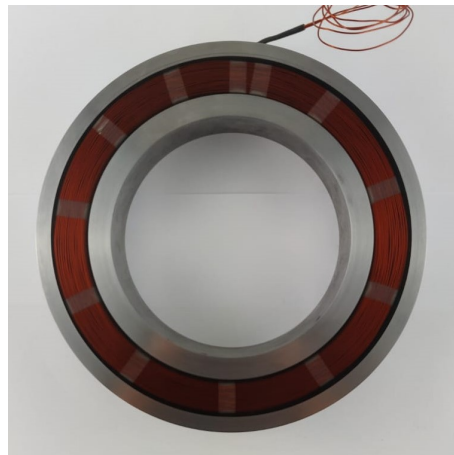
(c) Spule des Elektromagneten



(d) Eisenkern des Elektromagneten



(e) Vergussprozess mit Epoxidharz



(f) Finaler Prototyp

Abbildung 4.1: Fertigungsprozess von Spule und Eisenkern

4.2 Hubkraft

Zur Verifikation der Simulationen für die Hubkraft aus Kapitel 3.4.1 musste ein Teststand wie in Abbildung 4.2 aufgebaut werden. Der Elektromagnet wurde dafür auf den Kopf gestellt und am Tisch mittels drehbarer Spannvorrichtung befestigt. Als Rotorersatz dient eine ferromagnetische Stahlscheibe, die über drei Dehnmessstreifen, durch welche die Hubkraft ausgewertet werden, an einem Gerüst befestigt ist. Zusätzlich kann der Abstand zwischen Elektromagnet und Stahlscheibe eingestellt werden.

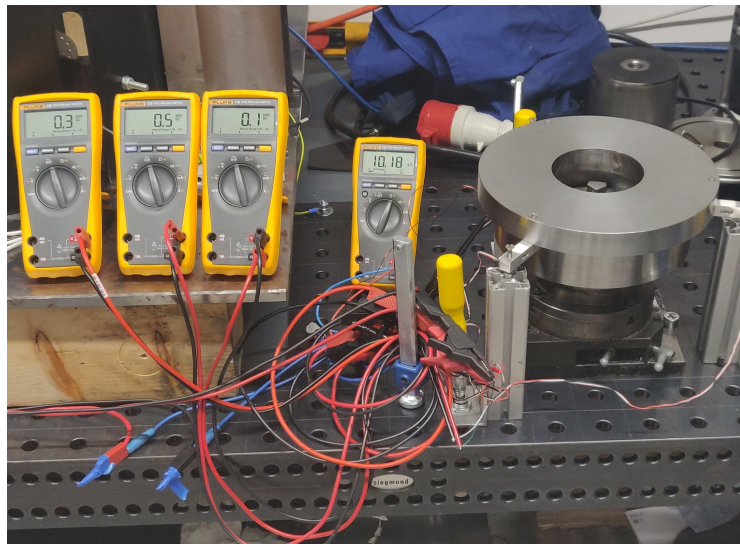


Abbildung 4.2: Testaufbau des Elektromagneten

Bei der Durchführung des Tests wurde als Erstes der Abstand zwischen Elektromagnet und Stahlscheibe auf den jeweiligen Wert (1-3 mm) voreingestellt und die Dehnmessstreifen im Nullpunkt abgeglichen. Im nächsten Schritt wurde die Spule bestromt, dies geschah schrittweise bei 0,1 A beginnend, bis die gewünschte Hubkraft erreicht wurde. Dieser Vorgang war notwendig, da der Testaufbau nicht komplett starr war, beziehungsweise die Dehnmessstreifen bei Kraftanwendung temporär leicht verformt werden können. Durch diese Verformung verringert sich der Abstand zwischen Stahlscheibe und Elektromagnet, was eine Erhöhung der Hubkraft zur Folge hat. Somit musste nach jeder Stromerhöhung der Abstand kontrolliert

und gegebenenfalls nachjustiert werden. Nach Erreichen der gewünschten Werte für Hubkraft und Abstand wurde der Test solange fortgeführt bis die Leistungsaufnahme der Spule, beziehungsweise der Temperatur, eingeschwungen und somit konstant war. Wider Erwarten war der gewünschte Kühleffekt der Umgebungsluft nicht immer ausreichend, um einen stationären Zustand zu erreichen, deshalb wurden die Tests mithilfe von Kühlung über den im Eisenkern befindlichen Kühlkanal durchgeführt. Die Kühlmitteltemperatur wurde auf 30 °C eingestellt, es wurde ein Durchfluss 3,75 Liter pro Minute gemessen und somit konnte die Spulentemperatur auf ein konstantes Niveau gebracht und dort stabil gehalten werden.

Die folgende Tabelle enthält die Auswertung des Tests:

Abstand	U_{Cu}	I_{Cu}	R_{Cu}	P_v	T_{Cu}
mm	V	A	Ω	W	°C
1	19,35	1,70	11,38	32,90	49,4
1,5	28,10	2,43	11,56	68,28	60,4
2	36,72	3,07	11,96	112,73	76,1
2,5	46,72	3,71	12,59	173,33	98,3
3	58,58*	4,380	13,37*	256,58*	123,18*

Tabelle 4.1: Auswertung der Hubkrafttests

Anzumerken ist hier, dass beim Test mit drei Millimeter Abstand aufgrund der limitierten Kühlleistung des Wärmetauschers keine konstante Temperatur der Spule erreicht werden konnte. Dies bedeutet, dass es sich bei den mit „*“ versehenen Werte um Momentaufnahmen handelte.

Abbildung 4.3 zeigt eine grafische Gegenüberstellung der Verlustleistung P_v von Simulation und Messung, die Kurve P_{v-s} stellt dabei die simulierten und P_{v-m} die gemessenen Werte dar. Da in die Simulation aber die Spulenerwärmung nicht einfließt und mit einem konstanten Widerstand von 8,98 Ohm bei 20 °C rechnet, können die Werte nicht qualitativ mit der Messung verglichen werden. Aus diesem Grund wurde der gemessene Spulenwiderstand R_{Cu} für 20 °C berechnet und die Messwerte von P_v somit auf die gleiche Simulationstemperatur abgeglichen, was die Werte der Kurve P_{v-m-20} widerspiegelt. Diese Kurve deckt sich annähernd mit der zuvor

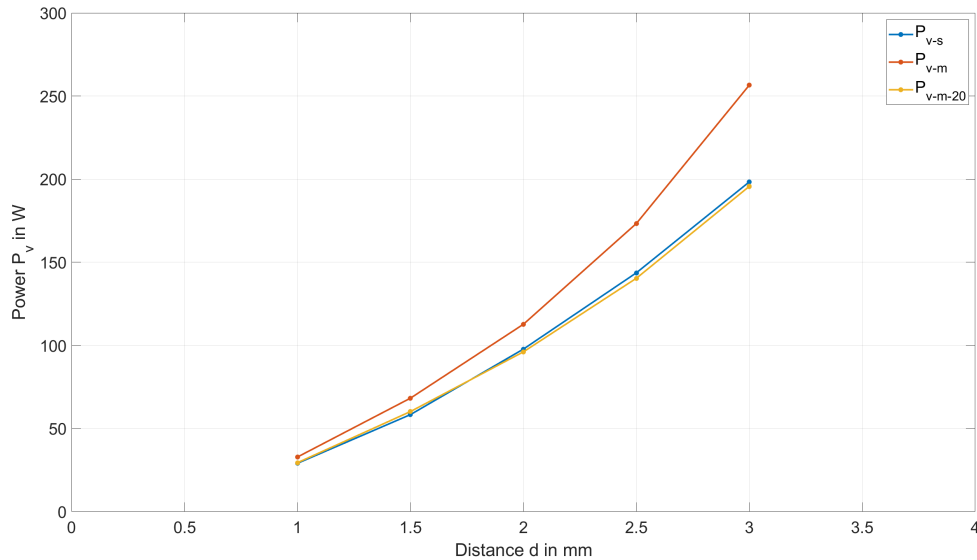


Abbildung 4.3: Vergleich der Simulations- und Testwerte der Verlustleistung des Magneten

durchgeführten Simulation und bestätigt die einwandfrei korrekte Funktion des Elektromagneten bezüglich der Hubkraft. Des Weiteren veranschaulicht die Abbildung 4.3 sehr gut die Abhängigkeit der benötigten Verlustleistung P_v vom Abstand d zwischen Rotor und Magnet. Diese steigt mit dem Quadrat des Abstands an und erreicht bei einem Abstand d einen Maximalwert von 198 W. Um die magnetische Entlastung so effektiv wie möglich zu betreiben, sollte der Abstand d zwischen Magnet und Rotor so gering wie technisch möglich ausgeführt und somit eine Minimierung der elektrischen Verlustleistung P_v der Spule erreicht werden.

4.3 Wärmeemittierung

Im Zuge der Tests aus Kapitel 4.2 wurde auch die Temperatur der Spule aufgezeichnet, um die gemessenen Temperaturwerte mit den Ergebnissen der Simulation vergleichen zu können. Ermittelt wurde diese Temperaturen mittels Temperatursensor (NTC), der zuvor schon während des Wickelpro-

zesses mittig, vom Querschnitt her gesehen, in die Spule eingebracht wurde. Dieser Sensor gibt einen Widerstandswert entsprechend der Temperatur an und wurde mittels Multimeter gemessen. Die Auswertung dieser Daten ist in Abbildung 4.4 zu sehen, die Kurve ΔT_m zeigt dabei die gemessenen und Kurve ΔT_s die Temperaturwerte aus der Simulation. Die erhebliche Abweichung zwischen den gemessenen und simulierten Werten können auf eine Diskrepanz zwischen Simulationsmodell und Prototyp zurückgeführt werden. Vermutet wurde, dass aufgrund des im Verklebungsprozess entfernten Spulenträgers sich eine Epoxidharzschicht zwischen Spule und Eisenkern gebildet hat, welche die Spule ummantelt. Da Epoxidharz einen sehr schlechten Wärmeleitwert, im Gegensatz zu Eisen und Kupfer, hat, ist es möglich, dass diese Schicht die Wärmeleitung von der Spule zum Kühlkanal kompromittiert und entsprechend ineffizient werden lässt. Somit kann dies der ausschlaggebende Grund für die große Temperaturdifferenz zwischen den gemessenen und simulierten Werten sein. Deshalb wurde in erster Instanz die Kurve $\Delta T_{s-p-1mm}$ in das Diagramm eingefügt, sie zeigt die simulierten Werte der Wärmeemittierung für eine von 1mm Epoxidharz ummantelte Spule, welche eine bessere, aber noch nicht ausreichende, Übereinstimmung mit den gemessenen Werten aufweist.

Aus diesem Grund wurden die Abmessungen der Spule im Elektromagneten, zu sehen in Abbildung 4.5, noch einmal vermessen und dabei wurde ein Epoxid gefüllter Spalt von 2 mm zwischen Spule und Eisenkern festgestellt, der durch den nicht eingebrachten Spulenkörper entstanden ist. Der Abstand zwischen Spule und Eisenkern am Boden des Eisenkerns konnte nicht messtechnisch erfasst werden und daher wurde er auf 2 mm geschätzt. Aus diesem Grund wurde die Simulation der Temperatur mit einem 2mm Mantel aus Epoxidharz wiederholt und die Auswertung dafür in Diagramm 4.6 abgebildet.

Nach Anpassung der Simulationsparameter sind beide Kurven beinahe ident, wodurch sich die Abweichungen der Messung zur ersten Simulation erklären lassen. Ein solcher Temperaturverlauf könnte sich negativ auf die Lebensdauer der einzelnen Komponenten auswirken und somit ein Problem für den Betrieb darstellen. Durch die hohe Temperatur ΔT , bei Abständen d größer als 2mm, besteht die Möglichkeit, dass sich die Lebensdauer des Elektromagneten aufgrund von unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Komponenten (Kupfer, Epoxidharz, Stahl)

4 Resultate

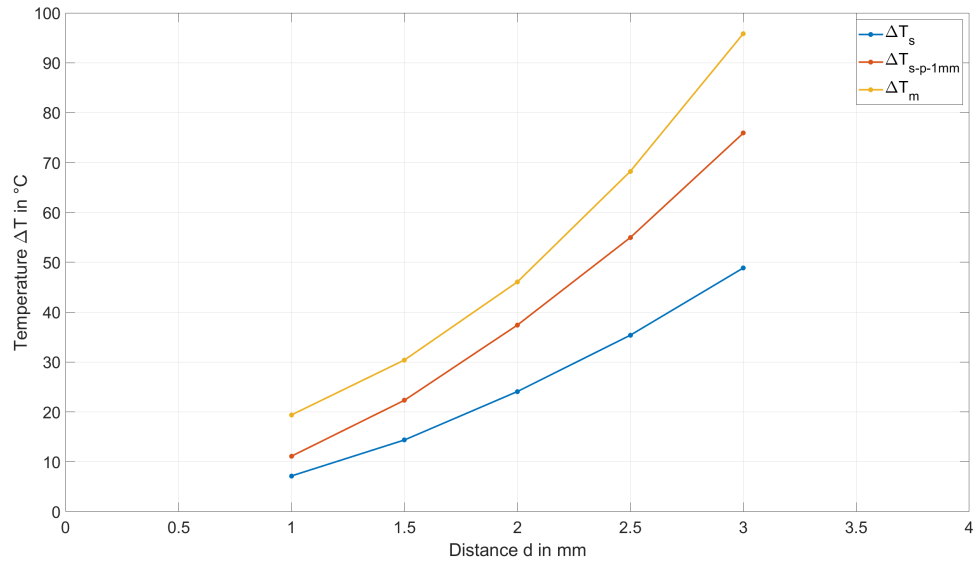


Abbildung 4.4: Vergleich der Simulations- und Testwerte der Wärmeemittierung

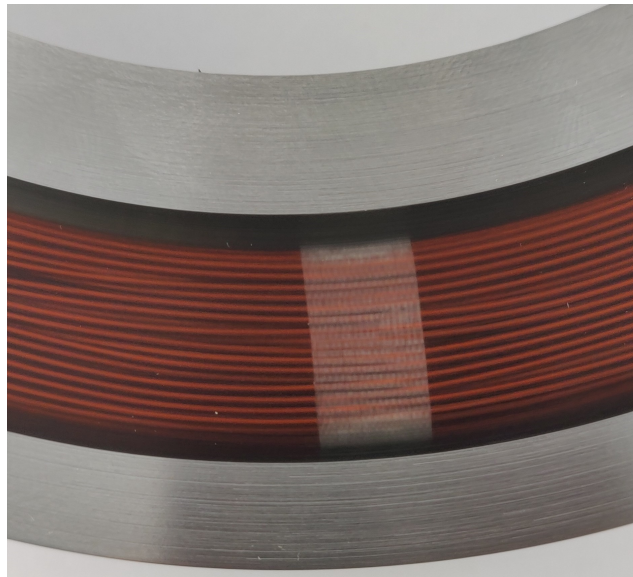


Abbildung 4.5: Nahaufnahme des Elektromagneten

4 Resultate

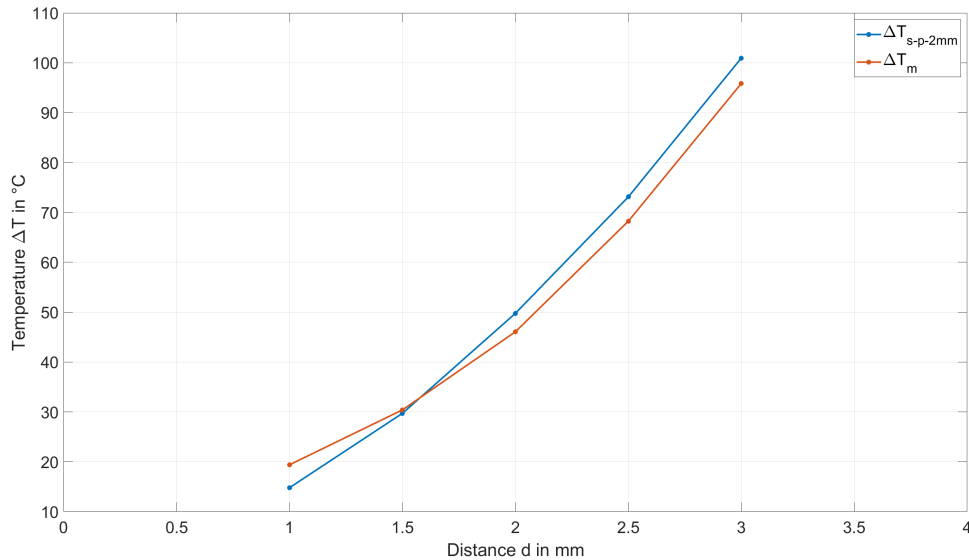


Abbildung 4.6: Vergleich der Simulations- und Testwerte der Wärmeemittierung

verringert. Deshalb wird eine niedrige Kühlmitteltemperatur im Bereich von wenigen $^{\circ}\text{C}$ benötigt, um die Temperatur des Elektromagneten regulieren zu können. Jedoch gilt es bei weiteren Prototypen den Spulenraum des Eisenkerns bestmöglich mit der Spule selbst auszufüllen, um so wenig Epoxidharz wie möglich zu benötigen. Ansonsten könnte die Wärmeleitfähigkeit des Gesamtsystems trotz genügend starker Kühlleistung nicht ausreichen, um die Spulentemperatur, auch bei geringen Abständen d mit niedriger Verlustleistung P_v konstant zu halten, was im Ernstfall zum „thermal runaway“ führt. Eine weitere Möglichkeit die Wärmeleitfähigkeit des Gesamtsystems zu verbessern, wäre die Verwendung eines Epoxidharzes mit besserer Wärmeleitfähigkeit.

4.4 Homogenität über Umfang

Eine weitere Aufgabe war die Überprüfung der Homogenität des magnetischen Feldes über den Umfang, die einen Umbau des Teststands aus Kapitel 4.2 erforderte. Aufgrund des geringen Luftspalts zwischen Elektromagnet und Stahlscheibe von unter 3 mm war es nicht möglich, handelsübliche Magnetometer zu verwenden. Aus diesem Grund wurde beschlossen den magnetischen Fluss mit einer selbst gebauten Schaltung aus Hall Sensoren zu messen. Dabei wurden zwei Hall Sensoren verwendet, um beide Schenkelflächen des Eisenkerns zugleich vermessen zu können. Die Schaltung konnte keinem Eichungsprozess zugeführt werden, was bedeutet das keine qualitative Aussage über die Höhe des Magnetfelds der einzelnen Messpunkte getroffen werden kann, wohl aber über die prozentuelle Abweichung zueinander, was für eine Aussage betreffend der Homogenität ausreichend ist. Diese Hall Sensoren wurden, wie in Abbildung 4.7 veranschaulicht, direkt über beiden Schenkeln des Elektromagneten mittig angebracht und starr am vorhandenen Gerüst befestigt. Um die Feldstärke auf verschiedenen Positionen entlang des Umfangs zu messen, konnte der Elektromagnet über dessen Spannvorrichtung gedreht werden. Durch die starke Anziehungskraft des Magneten während des Testbetriebs war es jedoch nicht möglich den Elektromagneten im Betrieb zu drehen. Deswegen musste zwischen jedem Messpunkt die Bestromung des Elektromagneten unterbrochen werden, wodurch es beim Wiedereinschalten zu einer Änderung der Größe des Luftspalts d kam. Ursache dieses Problems wird in 4.2 beschrieben. Da dieser Luftspalt mit der angedachten Testprozedur nicht konstant war, lieferten die ersten Testreihen über die Homogenität keine brauchbaren Ergebnisse. Abhilfe schuf eine 1,5 mm starke Aluminiumplatte, die zwischen Elektromagneten und Stahlscheibe platziert wird und eine Aussparung für die Hall Sensoren hat. Durch diese Anpassung konnte die Hubkraft nicht mehr ordnungsgemäß gemessen werden, die aber durch Einstellung der zuvor ermittelten benötigten Ströme aus Kapitel 4.2 nicht nötig ist.

In Abbildung 4.8 ist die Auswertung des Homogenitätstest über den Umfang abgebildet. Die Kurve **S-out** zeigt die Varianz des gemessenen magnetischen Flusses entlang des äußeren Schenkels über den Umfang und die Kurve **S-in** spiegelt das Äquivalent, die Varianz über den inneren Schenkel, wi-

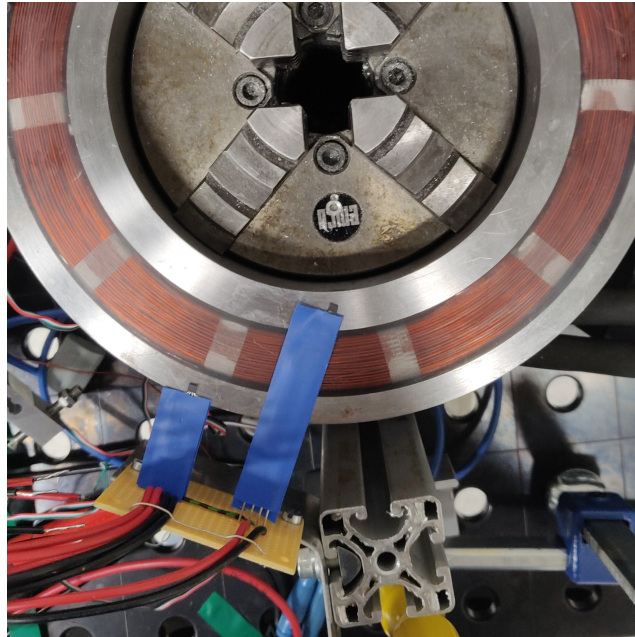


Abbildung 4.7: Testaufbau mit angebrachten Hall Sensoren

der. Die sinusförmigen Schwankungen von $\pm 1,5\%$ entlang des Umfangs werfen Fragen bezüglich Herkunft und Auswirkung auf den Betrieb des Schwungrads auf.

Die Schwankungen der Höhe des elektrischen Feldes kann auf eine Ursache zurückgeführt werden. Die limitierte bautechnische Genauigkeit des Aufbaus, die leichte Beugung der Aluminiumplatte oder die nicht komplett gerade Ausrichtung des Elektromagneten auf der drehbaren Spannungsvorrichtung kann als ausschlaggebender Grund in Frage kommen. Die Formel 3.15 veranschaulicht, dass schon bei einer Differenz des Abstands d von nur $50\ \mu\text{m}$ zwischen einem Messpunkt zum Anderen sich die magnetische Durchflutung um $1,5\%$ ändert. Andere Gründe dafür, wie Schwankungen des erzeugten Feldes des Magneten selbst, können aufgrund der als gegeben angesehenen Homogenität des Elektromagneten, wie in [26] veranschaulicht, ausgeschlossen werden.

Aufgrund der Fertigungstoleranzen bei mechanischen Bearbeitungsprozessen muss festgestellt werden, welche Auswirkung eine Schwankung der Höhe des Magnetfeldes auf den Betrieb haben könnte. Durch Rückeinset-

4 Resultate

zen der Schwankung des magnetischen Felds von Formel 3.15 bis hin zu Formel 3.7 wird ersichtlich, dass sich der Einfluss der Abstandsdifferenz quadratisch auf die wirkende Kraft F auswirkt. Dies bedeutet, dass der Elektromagnet durch eine Fehlstellung von $50 \mu\text{m}$ gegenüber dem Rotor diesen entlang des Umfangs mit einer schwankenden Kraft von $\pm 2,25 \%$, sprich $\pm 27 \text{ N}$ (bezogen auf die maximale Entlastung von 1200 N) anzieht. Da diese Kraftwirkung nicht punktuell auf den Rotor sondern sich entlang des Umfangs verteilt, sollte diese „elektrische Unwucht“ keine Auswirkungen auf den Rotorlauf haben. Auch andere Effekte wie Wirbelstrombildung durch die Schiefstellung können durch Betrachtung von Kapitel 3.4.3, bei der die Simulation eine viel größere Schiefstellung aufwies, als nicht betriebskritisch abgehandelt werden. Zusammenfassend kann eine Homogenität des Magnetfeldes als gegeben angesehen werden, welche durch höhere Präzision in Fertigungs- und Aufbauprozess weiter optimierbar wäre.

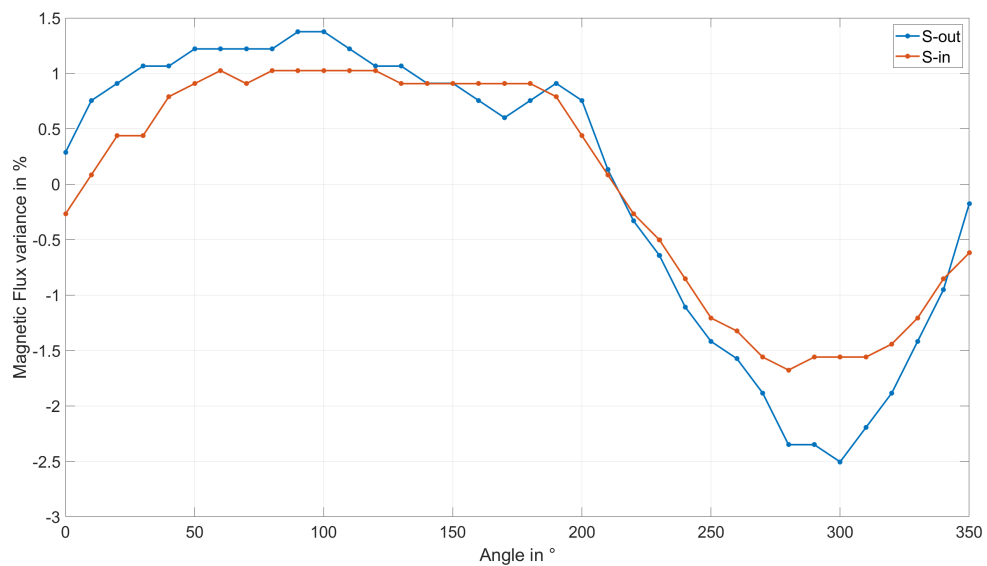


Abbildung 4.8: Varianz der magnetischen Feldstärke über den Umfang

5 Schlussbetrachtung und Ausblick

Das Ziel dieser Masterarbeit war die Erhöhung der Lebensdauer von mechanischen Lagern mittels Konzeptionierung einer elektromagnetischen Gewichtskompensation, angewandt in einem Schwungradspeichersystem. Aufgrund des gegebenen Anforderungsprofils des Schwungradspeichers wurde eine anziehende Variante mittels aktiver magnetischer Entlastung gewählt.

Die Auslegung von Eisenkern und Spule erfolgte im ersten Schritt rein arithmetisch mit dem Ziel größtmögliche Flexibilität im Aufbau, welche sich im maximalen Abstand d von 3 mm widerspiegelt, zu gewährleisten. Die geometrischen Abmaße des Elektromagneten wurden in Anbetracht des verfügbaren Raums im Schwungradspeichersystem und der Abmaße der Stahlnabe des Schwungradrotors bestmöglich ausgenutzt.

Die Validierung des Konzepts und der arithmetischen Berechnungen erfolgten im weiteren Schritt durch Simulationen von Hubkraft, Wärmeemission und Wirbelströme. Durch die Simulation der Wärmeemission des Elektromagneten wurde die zwingende Notwendigkeit eines Kühlkanals, besonders bei großen Abständen d , ersichtlich. Die Entstehung von großen Wirbelströmen in der Stahlnabe durch deren Rotation konnte durch die Simulation widerlegt werden.

Um das Konzept in der Praxis testen zu können, wurde eigenhändig der Elektromagnet in mehreren Arbeitsschritten gefertigt. Zuerst wurde der Eisenkern durch Zerspanungsprozesse geformt. In diesen Eisenkern wurde eine eigens dafür konstruierte Spule gelegt und abschließend wurden diese zwei Komponenten mittels Epoxidharz verklebt. Auch der Prüfstand wurde

im Rahmen der Diplomarbeit zur Validierung der Simulationen entwickelt und aufgebaut.

Bei den Tests der Hubkraft konnte nicht nur die Simulation und die arithmetische Berechnung validiert, sondern auch die zwingende Notwendigkeit einer Kühlung aufgezeigt werden. Ohne angeschlossenen Kühlkreislauf war es unmöglich, die Temperatur des Elektromagneten und somit die benötigte Leistung konstant zu halten. Dies spiegelt die Auswertung des Tests in Tabelle 4.2 sehr gut wider. Hier konnte für den Abstand d von 3 mm nur eine Momentaufnahme aufgezeichnet werden, da die Kühlleistung des vorhandene Kühlers für diesen Punkt nicht ausreichte, was bei längerfristigem Betrieb zu einer thermischen Entgleisung und somit zur Zerstörung des Prototyps geführt hätte. Anzumerken ist auch, dass die benötigte elektrische Leistung nur vom Spulenwiderstand, welcher wiederum an die Spulentemperatur gekoppelt ist, abhängt. Somit könnte in zukünftigen Konzepten mittels effizienterer Kühlung eine niedrigere Spulentemperatur erreicht werden, was eine kleinere Verlustleistung P_v sowie eine höhere Lebensdauer der Komponenten zur Folge hätte. Eine solche Verbesserung könnte beispielsweise durch einen stärkeren Kühler oder durch ein geeigneteres Kühlmittel, welches auch bei negativen Temperaturen flüssig ist, herbeigeführt werden.

Durch die Gegenüberstellung der Ergebnisse von Simulation und Praxistest der Wärmeemission in Abbildung 4.4 wurde eine Diskrepanz zwischen den Beiden klar ersichtlich. Grund dafür ist ein mit Epoxidharz gefüllter Raum zwischen Spule und Eisenkern, welcher zuerst nicht in der Simulation berücksichtigt wurde. Dieser entstand, weil es anfangs geplant war die Wicklung mitsamt Wickelkörper in den Eisenkern einzubringen. Aufgrund der Verformung des Wickelkörpers beim Wickelprozess konnte dies jedoch nicht wie geplant umgesetzt werden. Durch Rekapitulation der Simulation mit einem Mantel aus Epoxidharz, der die Spule umschließt, konnte auch hier eine Übereinstimmung zwischen Simulation und Praxis gefunden werden. Dennoch stellen für diesen Aufbau die großen Temperaturwerte für ΔT bei Abständen größer als 2mm ein Problem dar. Diese hohen Temperaturen können aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien und der Auswirkung auf diese selbst eine beträchtliche Reduktion der Lebensdauer zur Folge haben. Für zukünftige Konzepte ist anzuraten, den Raum der Spule im Eisenkern so effizient wie

möglich mit der Spule auszufüllen und zusätzlich Epoxidharz mit guter Wärmeleitfähigkeit zu verwenden, um eine bestmögliche Wärmeableitung gewährleisten zu können.

Um die Homogenität des magnetischen Flusses über den Umfang, welcher durch das Konzept als gegeben angesehen wurde, zu überprüfen, wurden Hallsensoren in den Testaufbau integriert. Da erste Tests aufgrund des im Abstand d verstellbaren Aufbaus nicht zufriedenstellend ausfielen, wurde eine Aluminiumplatte als Abstandshalter zwischen Elektromagnet und Eisenplatte eingebracht. Die Homogenität konnte somit als gegeben gesehen werden und die verbleibende Varianz auf die limitierte Einstellmöglichkeit des Testaufbaus zurückgeführt werden.

Eine Validierung der Wirbelstromsimulation konnte aufgrund des nicht dafür ausgelegten Teststandes nicht vollzogen werden. Dieser Test sowie Verbesserungen am Elektromagneten selbst könnten im Zuge der Prototypentests des „FlyGrid“ Projekts erfolgen und mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen werden.

Abschließend sei erwähnt, dass das Bestreben, den Klimawandel aufzuhalten und somit die Erde auch für künftige Generationen bewohnbar zu machen, nur durch eine fundamentale Umgestaltung in allen Bereichen des menschlichen Alltags realisiert werden kann. Innovationen wie ein FESS könnten mithilfe von Verbesserungen, wie dauerfeste Lager durch eine Gewichtsentslastung des Rotors von beispielsweise 90 % (Abbildung 2.3) (500 h Lebensdauer ohne Gewichtsentslastung [9]), weiter in den Fokus als umweltfreundliche Energiespeichermethode rücken und so einen kleinen Beitrag für eine lebenswertere Zukunft leisten.

Appendix

Literaturverzeichnis

- [1] Dipl. Ing. Edgar Freund. Vom klimawandel zur klimakrise. *Wasser und Abfall*, 12/2021.
- [2] Renate Neubäumer. Ist das pariser abkommen der durchbruch zu einem weltweiten klimaabkommen? *Wirtschaftsdienst*, 101(10):781–788, oct 2021.
- [3] Statistik Austria. „krafftfahrzeug neuzulassungen“. Available: <http://www.statistik.at/web>, [Online] 2021.
- [4] Oliver D. Doleski. *Realisierung Utility 4.0 Band 1*. Springer-Verlag GmbH, October 2019.
- [5] TU Graz. „Übersicht projekt flygrid“. Available: <https://www.tugraz.at/projekte/flygrid/overview/>, [Online] 2021.
- [6] A. Buchroithner, A. Haan, R. Pressmair, M. Bader, B. Schweighofer, H. Wegleiter, and H. Edtmayer. Decentralized low-cost flywheel energy storage for photovoltaic systems. In *2016 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)*. IEEE, oct 2016.
- [7] Abdul Hai Alami. *Mechanical Energy Storage for Renewable and Sustainable Energy Resources*. Springer-Verlag GmbH, December 2019.
- [8] How it works daily. „töpferscheibe“. Available: <https://www.howitworksdaily.com/how-pottery-was-made/>, [Online] 2021.
- [9] Haidl, Buchroithner, Schweighofer, Bader, and Wegleiter. Lifetime analysis of energy storage systems for sustainable transportation. *Sustainability*, 11(23):6731, nov 2019.

- [10] Armin Buchroithner, Hannes Wegleiter, and Bernhard Schweighofer. Flywheel energy storage systems compared to competing technologies for grid load mitigation in EV fast-charging applications. In *2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. IEEE, jun 2018.
- [11] Armin Buchroithner, Peter Haidl, Christof Birgel, Thomas Zarl, and Hannes Wegleiter. Design and experimental evaluation of a low-cost test rig for flywheel energy storage burst containment investigation. *Applied Sciences*, 8(12):2622, dec 2018.
- [12] Peter Haidl and Armin Buchroithner. Design of a low-loss, low-cost rolling element bearing system for a 5 kWh/100 kW flywheel energy storage system. *Energies*, 14(21):7195, nov 2021.
- [13] Ekbert Hering, Rolf Martin, and Martin Stohrer. *Physik für Ingenieure*. Springer-Verlag GmbH, September 2021.
- [14] Thyssenkrupp. „magnettechnik“. Available: <https://www.thyssenkrupp-schulte.de/magnettechnik/de/downloads/>, [Online] 2022.
- [15] magnetshop. „preise für gängige magnete“. Available: <https://www.magnet-shop.net>, [Online] 2022.
- [16] Armin Buchroithner. *Schwungradspeicher in der Fahrzeugtechnik*. Springer-Verlag GmbH, December 2019.
- [17] G.G. Sotelo, A.C. Ferreira, and R. deAndrade. Halbach array superconducting magnetic bearing for a flywheel energy storage system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15(2):2253–2256, jun 2005.
- [18] B. Schweighofer M. Bader, H. Wegleiter. Aspects of mechanical engineering and material sciences during the design of flywheel energy storage for mobile applications,“ in *eevc - european electric vehicle congress*. Brüssel, 2011.
- [19] J.R. Fang, L.Z. Lin, L.G. Yan, and L.Y. Xiao. A new flywheel energy storage system using hybrid superconducting magnetic bearings. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 11(1):1657–1660, mar 2001.

- [20] Milad Alizadeh, Tir Seyyed, Mehdi Mirimani, Fabrizio Marignetti, Maziar University, Faculty of Electrical, Computer University, of Cassino, and Southern Lazio. A novel structure of passive magnetic bearing with axial magnetization. In *The 5th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC 2014), Feb 5-6, 2014, Tehran, Iran* [IPEDSTC-J'. IEEE, 2011.
- [21] Study on High, Temperature Superconducting, Magnetic Bearing, for kWh Flywheel, and Energy. Ieee transactlons on applied superconductivity, vol. 11, no. i , march 2001 i. IEEE, 2011.
- [22] Xu Yanliang, Dun Yueqin, Wang Xiuhe, and Kong Yu. Analysis of hybrid magnetic bearing with a permanent magnet in the rotor by FEM. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(4):1363–1366, apr 2006.
- [23] Klinger, Firma: voestalpine Stahl, GmbH, and Prüfdatum: 24.03.2014 CTQ. Prüfbericht: Induktionsmessung an ringproben nach din 17405. 2014.
- [24] Alexander Schulz, Stefan Hartl, Harald Sima, Thomas Hinterdorfer, and Johann Wassermann. Innovative schwungradspeicher mit hoher energieeffizienz und zuverlässigkeit. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 132(8):481–490, nov 2015.
- [25] Axel Rossmann. *Strukturbildung und Simulation technischer Systeme*. Springer Berlin Heidelberg, November 2020.
- [26] Cihat Karaali. *Grundlagen der Elektrotechnik*. Springer-Verlag GmbH, June 2021.