



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Berechnung und Validierung eines Modells einer Haftkraftwaage
mittels Finite Elemente Methode

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

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Kaltenbacher

E325

Institut für Mechanik und Mechatronik

eingereicht an der Technische Universität Wien

Fakultät für Maschinen und Betriebswissenschaften

von

Johannes Pötscher



Wien, September 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Gliederung der Arbeit	2
2	Magnetschienenbremse	3
2.1	Aufbau und Funktionsweise	4
2.2	Verwendete Materialien	4
2.3	Haftkraftwaage	7
3	Magnetische B-H- Kurven	8
3.1	Magnetische Eigenschaften	8
3.1.1	Hystereseschleife	9
3.1.2	Neukurve- Kommutierungskurve	9
3.1.3	Grundlagen der Messung	12
3.2	Probenform	13
3.2.1	Probenform: Stabproben	15
3.2.2	Ringproben	16
3.3	Messung Kommutierungskurve	21
3.3.1	Messaufbau	21
3.3.2	Adaptive Messung	24
3.3.3	Entmagnetisierung	25
3.3.4	Messfehler	26
3.3.5	Lineare Drift	27
3.3.6	Temperaturabhängigkeit	27
3.3.7	Frequenzabhängigkeit	28
3.3.8	Durchführung der Messung	29
3.4	Messung Neukurve	29
3.4.1	Entmagnetisieren- Aufmagnetisieren	29
3.4.2	Lineare Drift	30
3.4.3	Durchführung der Messung	31
3.5	Verifikation durch Simulation	31
3.5.1	Materialmodell aus Daten	32
3.5.2	Simulationsmodell	33
3.6	Ergebnisse	39
3.6.1	Ergebnisse: Kommutierungskurven	39
3.6.2	Ergebnisse Neukurven	43

Inhaltsverzeichnis

3.6.3	Ergebnisse der Stabproben	43
3.6.4	Vergleich durch Simulation	45
3.7	Diskussion der Ergebnisse	49
3.7.1	Anisotropie	49
3.7.2	Temperaturabhängigkeit	49
3.7.3	Vergleich der einzelnen Stähle	50
3.7.4	Fehler bei den Messungen	54
4	Simulation des vereinfachten Modells	56
4.1	Berechnung von Haftkräften	56
4.2	Modell	58
4.2.1	Ausrichtung	59
4.2.2	Annahmen	60
4.3	Randbedingungen und Erregungen	61
4.4	Vernetzung	63
4.5	Abbruchkriterien	65
4.6	Luftspalt	66
4.6.1	Magnetglied und Schiene in Kontakt	66
4.6.2	Variation des Luftspalts	67
4.6.3	Berechnung mit einem physikalisch korrekten Luftspalt	67
4.7	Längs Verschiebung des Stempels	70
5	Simulation des Magneten	72
5.1	Geometriestudien	72
5.1.1	Radien des Zwischengliedes	72
5.1.2	Verkürztes Modell	73
5.1.3	Luftspalt zwischen den Magnetgliedern	73
5.1.4	Magnetkörper	74
5.1.5	Unmagnetische Zwischenleiste	74
5.1.6	Korrektes Modell mit tatsächlicher Schiene	75
5.1.7	vereinfachtes Haftkraftwaagenmodell mit Stempel	75
5.1.8	Korrektes Modell ohne Luftspalt zwischen Stempel und Schiene	76
5.1.9	Korrektes Modell mit Schienenkopf wie bei der tatsächlichen Haftkraftwaage	77
5.2	Luftspalt	77
5.3	Haftkraftwaage	77
5.3.1	Aufbau des Modells	79
5.3.2	Randbedingungen und Erregungen	80
5.3.3	Extrapolation der gemessenen B-H- Kurven	81
5.3.4	Netz	82
5.3.5	Durchgeführte Simulationen	83

Inhaltsverzeichnis

6	Ergebnisse der Simulationen	85
6.1	Vereinfachtes Modell	85
6.1.1	Magnetglied und Schiene in Kontakt	85
6.1.2	Variieren des Luftspalts	86
6.1.3	Pyhsikalisch korrekter Luftspalt	89
6.1.4	Längs Verschiebung des Stempels	92
6.2	Simulation des Magneten	94
6.2.1	Geometriestudien	94
6.3	Simulation des Magnetgliedes	103
6.3.1	Simulation von R200 mit verschiedenen Luftspalten	103
6.3.2	Simulation der verschiedenen Materialien	103
6.3.3	Simulation der verschiedenen Materialien bei verschiedenen Temperaturen	105
6.4	Diskussion	109
6.4.1	Vereinfachtes Modell	109
6.4.2	Simulation des Magneten	111
7	Abgleich mit Messungen auf der Haftkraftwaage	114
7.1	Aufbau der Messung und verwendete Geräte	114
7.2	Ergebnisse der Messungen	118
7.3	Diskussion	120
8	Zusammenfassung	122
9	Anhang	125
9.1	Gemessene Punkte	125
9.2	Abmessungen der Ringproben	126
9.3	Ergebnisse	126
9.3.1	Schiene R200	127
9.3.2	Schiene R260	130
9.3.3	Schiene R350 HT	131
9.3.4	Zwischenglied C10E	133
	Literatur	134
	Abbildungsverzeichnis	137
	Tabellenverzeichnis	141

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen herzlich bedanken, die mich beim Erstellen und Verfassen meiner Diplomarbeit unterstützt und begleitet haben.

Ein besonderer Dank gilt Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Kaltenbacher und Dipl.-Ing. Dipl.-Ing.(FH) Dr.techn. Dominik Perchtold die mich stets unterstützt haben und mir bei den Messungen mit zahlreichen Tipps zur Seite standen.

Ein großer Dank gilt der Firma Knorr- Bremse und im Speziellen Herrn Dipl.Ing. Dr. techn. Michael Jirout und Herrn Dipl.Ing. Daniel Tippelt, ohne die die Durchführung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Außerdem möchte ich mich bei meiner Lebenspartnerin dafür bedanken, dass sie die Arbeit mehrfach korrekturgelesen hat.

Zuletzt möchte ich mich noch bei meinen Eltern bedanken, da diese meinen Bildungsweg bis zum Abschluss des Studiums mitgetragen und ermöglicht haben.

Danke Euch!

Kurzfassung

Für moderne Züge sind bei der Auslegung von Bremssystemen Magnetschienenbremsen nicht mehr wegzudenken. Deren Berechnung stellt Ingenieure bisweilen vor schwierige Aufgaben. Dafür werden zumeist magnetische Felder auf Basis der Finite Elemente- Methode simuliert. Um diese Simulationen durchführen zu können, benötigt man möglichst genaue Materialdaten.

Diese Diplomarbeit befasst sich mit der Simulation eines Teils einer Magnetschienenbremse. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein möglichst genaues Modell der Messung eines Magneten mit einer Haftkraftwaage, mit welcher die magnetischen Haftkräfte von Magnetschienenbremsen gemessen werden, zu erstellen.

Die dafür erforderlichen B-H- Kurven der diversen Materialien, welche für die Simulation erforderlich sind, wurden bei verschiedenen Temperaturen gemessen, um auch die Auswirkung von erhöhten Temperaturen abschätzen zu können.

Mit den so erhaltenen Daten wurden in Finite Elemente- Simulationen mit einem vereinfachten Modell die grundlegenden Eigenschaften einer Magnetschienenbremse ermittelt. Danach wurde im Zuge mehrerer Geometriestudien ein Simulationsmodell erstellt, welches einen guten Kompromiss zwischen Simulationsdauer und erreichter Genauigkeit darstellt.

Zuletzt wurde, um die Qualität des Modells zu ermitteln, eine Messung der Haftkräfte an der Haftkraftwaage durchgeführt und mit den berechneten Werten verglichen.

Abstract

Magnetic track brakes are essential parts in the design of braking systems in modern trains. The calculation of these systems is very challenging for engineers. Usually, these track breaks are calculated by simulating their magnetic field with the Finite Element method (FEM). It is necessary for FEM- simulations to have reliable material data to perform correct calculations.

This diploma thesis deals with the simulation of a part of an articulated magnet. The aim is to create an accurate model of a magnetic force measurement device, which is used to measure the adhesive force of the magnets.

The therefore necessary B-H- curves of the used rails and magnetic materials which are essential for the calculation with FEM were measured at different temperatures, to later simulate the magnetic fields of the magnet and estimate the influences of high temperatures on the magnetic forces.

With the measured magnetisation curves, finite element simulations were conducted with a simplified model of the magnet. With the help of these models the fundamental characteristics of the braking system was evaluated. Then, the influence of some geometrical details were examined with the help of some geometry- studies and an accurate model was created, which makes a good compromise between simulation time and accuracy.

Finally, the magnetic force measurement device was used to measure the magnetic forces of the magnet. The obtained data was compared to the calculation of the magnet to evaluate the accuracy of the created model.

Symbolverzeichnis

Formelzeichen und Symbole

a_P	Seitenlänge Stabprobe
A	Fläche
A_d	deformierte Querschnittfläche
A_{Fe}	Querschnittfläche Ringprobe
A_{mag}	Querschnittfläche eines Magneten
A_u	undeformierte Querschnittfläche
B	magnetische Flussdichte
B_d	korrigierte Flussdichte
B_r	remanente Flussdichte
B_{korr}	korrigierte und zentrierte Flussdichte
d_i	Innendurchmesser
D_a	Außendurchmesser
D_L	Durchmesser Luftkörper
E	Elastizitätsmodul
f	Frequenz
f_B	Fehler der Flussdichte
f_{HKW}	Fehler bei der Messung der Haftkraft
f_{max}	maximaler Fehler
f_{mess}	Messfrequenz
f_{tol}	Fehlertoleranz
F_H	Haftkraft
F_D	Kraftdifferenz
F_r	magnetische Kraft
h	Elementkantenlänge
h_L	Höhe Luftkörper
h_R	Höhe Ringprobe
H	magnetische Feldstärke
H_c	Koerzitivfeldstärke
I	Strom
I_{err}	Erregung des Magneten
k_a	Faktor für eine Näherung
k_o	Steigung am Beginn
k_t	Korrekturfaktor für Hystereseschleife
l_A	Länge des Stempels der Haftkraftwaage
l_m	mittlere Länge der Ringprobe
l_M	Länge des Magnetgliedes
l_P	Länge Stabprobe
M	Magnetisierung

N	Windungszahl
O	Oberfläche
p_{F1}	Flächenpressung
p_{Zyl}	Druck im Zylinder
R_a	arithmetischer Mittelwert der Oberflächenrauheit
R_z	größte Höhe der Oberflächenrauheit
t	Zeit; Luftspalt zwischen Magnet und Schiene bzw. Stempel
t_o	Luftspalt zwischen den Magnetgliedern
T	Temperatur
T_o	obere Temperaturgrenze
T_u	untere Temperaturgrenze
u	elektrische Spannung
u_{ind}	induzierte Spannung
u_{korr}	korrigierte Sekundärspannung
u_{offset}	Offsetspannung
U_n	Betriebsspannung
V	Volumen
x	Verschiebung in x- Richtung
α	Winkel
ϵ	Verzerrung
Θ	Durchflutung
μ	Permeabilität
μ_0	magnetische Feldkonstante
μ_r	relative Permeabilität
σ	mechanische Spannung
φ	Winkel
Φ	magnetischer Fluss

Indizes

Δ	Differenz
i	allgemeine Lufvariable
max	Maximum
n	normal
prim	primär
t	tangential
x; y; z;	im karthesischen Koordinatensystem

1 Einleitung

Die meisten Bremssysteme für Schienenfahrzeuge sind abhängig vom Kraftschluss zwischen Rad und Schiene. Beispiele hierfür sind Scheiben- und Klotzbremsten, aber auch elektrodynamische Bremsen. Die erreichbare Bremsverzögerung ist damit im wesentlichen abhängig von den Reibbedingungen zwischen Eisenbahnrad und Schiene. Insbesondere bei Straßenbahnen, die ihren Gleiskörper mit anderen Fahrzeugen teilen müssen, werden jedoch höhere Bremsverzögerungen gefordert, die allein durch Ausnutzung der Reibung zwischen Rad und Schiene nicht realisierbar wären.

Um dieses Problem zu umgehen, wurde in England bereits im Jahr 1900 eine elektromagnetische Bremse zum Patent angemeldet. Diese besitzt den Vorteil, dass zusätzlich zu den gebremsten Rädern sich diese als Magnetschienenbremse bezeichnete Zusatzbremse durch die Magnetkräfte an die Schiene anzieht und eine zusätzliche Bremskraft auf den Zug erzeugt. Dadurch können die Bremswege von Schienenfahrzeugen verkürzt werden.

Zur Gestaltung und Prüfung von Magnetschienenbremsen stehen heute Regelwerke und Normen zur Verfügung. In den Regelwerken wird als relativ einfach messbare Größe zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Magnetschienenbremsen die magnetische Anziehungskraft, bzw. Haftkraft, herangezogen. Die Bedingungen zur Messung der Haftkraft werden dabei genau definiert. So werden zum Beispiel eben gefräste Schienenköpfe, sowie Polschuhe der Magnetschienenbremsen gefordert. Für die Messungen wird im Allgemeinen ein Gerät verwendet, bei welchem der Magnet auf zwei Schienenstücken angezogen wird, zwischen denen sich in der Mitte ein Stempel befindet, welcher vom Magneten abgezogen wird, wobei die Kraft gemessen wird. Dieses Gerät wird als Haftkraftwaage bezeichnet.

Bei der Entwicklung müssen Magnetschienenbremsen vor der Fertigung und anschließenden Messung berechnet werden. Dafür werden im Allgemeinen Simulationen mithilfe der Finite-Elemente-Methoden (FEM) durchgeführt. Da die verfügbare Rechenleistung in den letzten Jahren immer weiter zugenommen hat, konnte die mögliche Genauigkeit, mit welcher die Simulationen durchgeführt werden, immer weiter gesteigert werden.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Simulation einer Haftkraftwaage und den Voraussetzungen, um die Simulation möglichst genau durchführen zu können.

Für alle Simulationen müssen die Materialparameter der einzelnen Bauteile bekannt sein, weshalb sich der erste Teil dieser Arbeit auch mit der Ermittlung der Magnetisierungskurven für diverse Schienenmaterialien und der Materialien für den Magneten befasst.

Mithilfe dieser Magnetisierungskurven werden dann Simulationen durchgeführt, bei denen die Haftkraft berechnet wird. Dafür wird zuerst ein vereinfachtes Modell berechnet, um die Eigenschaften der Simulation und die Auswirkungen von einzelnen Details zu erkennen und gleichzeitig nicht zu hohe Rechenzeiten für die einzelnen Simulationen zu benötigen. Um bessere Werte zu ermitteln, soll im Folgenden ein genaues Modell eines Magnetgliedes verwendet werden, welches jedoch hohe Rechenzeiten für die Simulation benötigt.

Die simulierten Werte sollen zuletzt mit tatsächlichen Messungen, welche mithilfe der Haftkraftwaage durchgeführt wurden, verglichen werden, um die Qualität des Simulationsmodells abzuschätzen. Zusätzlich soll eine Einschätzung abgegeben werden, wie genau die Simulation eines Magneten im Vorfeld überhaupt möglich ist, um bei möglichen Neuentwicklungen eventuelle Schwankungen berücksichtigen zu können.

1.1 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in die folgenden Teile:

Im 2. Kapitel soll eine allgemeine Einführung in die Thematik der Magnetschienenbremsen gegeben werden.

Das 3. Kapitel befasst sich mit der Ermittlung der Magnetisierungskurven. Hier wird die Messung selbiger und die dazu notwendige Theorie beschrieben. Außerdem werden die Ergebnisse der durchgeführten Messungen präsentiert.

Im 4. Kapitel ist die Simulation eines vereinfachten Modelles genauer beschrieben.

Das 5. Kapitel befasst sich mit der Simulation des genauen Modelles.

Da die Ergebnisse zusammenhängen, wurde die Entscheidung getroffen, alle Simulationsergebnisse in einem Kapitel zusammenzufassen. Diese befinden sich in Kapitel 6.

Das Kapitel 7 befasst sich mit der Messung auf der Haftkraftwaage und dem Vergleich mit den Simulationsergebnissen.

Im Kapitel 8 werden alle Messungen und Simulationen abschließend zusammengefasst und ausführlich diskutiert.

2 Magnetschienenbremse

Magnetschienenbremsen, im Speziellen elektrische Magnetschienenbremsen, sind Brems-Systeme für Züge, welche unmittelbar auf die Schienen wirken, und so, im Gegensatz zu den ansonsten verwendeten Klotz- oder Scheibenbremsen vom Rad- Schiene Kontakt unabhängig sind [1]. Die Bremswirkung der Magnetschienenbremse (MG-Bremse) beruht auf der Reibung zwischen Magnetkörper und Schiene zufolge der magnetischen Anziehungskraft [2, 3].

Je nach dem, wie diese magnetische Anziehungskraft generiert wird, wird zwischen elektrisch erregten und permanentmagnetisch erregten MG- Bremsen unterschieden. Diese Arbeit befasst sich rein mit der elektrisch erregten Magnetschienenbremse, weshalb im weiteren Verlauf, sofern MG- Bremsen erwähnt werden, immer elektrisch erregte Magnetschienenbremsen gemeint sind. Dabei handelt es sich laut [1] im Prinzip um einen langgezogenen Spulenkern, an welchem hufeisenförmige Magnetkörper befestigt sind. Beim Bremsen wird die Bremse auf die Schienen abgesenkt und die Feldlinien werden über die ebenfalls magnetische Schiene geschlossen, wodurch eine Haftkraft entsteht. Wie bereits erwähnt, wird die Bremskraft über die Reibung zwischen dem Magnetkörper und der Schiene erzeugt [1, 2].

Weiters kann je nach Aufbau in Gliedermagneten (Abbildung 2.1) und Starrmagneten (Abbildung 2.2) unterschieden werden, wobei sich diese Arbeit hauptsächlich mit Gliedermagneten befasst. Eingesetzt werden Magnetschienenbremsen laut [1] im Bahnbereich momentan als Zusatzbremse, die bei Not-, Schnell- und Zwangsbrem-sungen aktiviert wird.

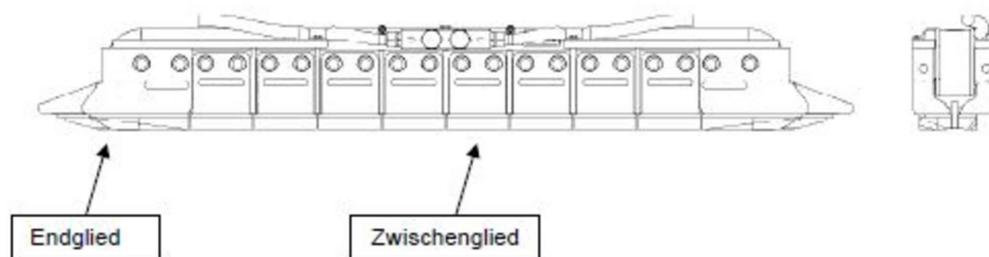


Abbildung 2.1: Gliedermagnet [2]

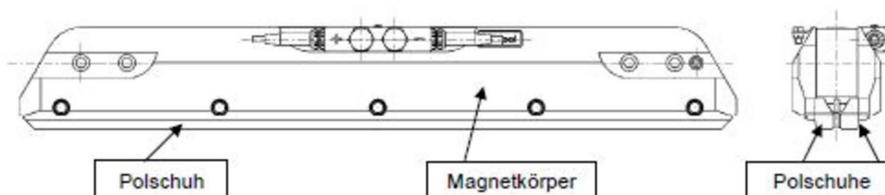


Abbildung 2.2: Starrmagnet [2]

2.1 Aufbau und Funktionsweise

Wie bereits erwähnt, wird hier nur der Gliedermagnet behandelt. Dieser besitzt einen relativ einfachen Aufbau, welcher in Abbildung 2.3 dargestellt ist. Im Wesentlichen besteht dieser aus einer langgezogenen Spule (1), an deren Enden jeweils zwei Endstücke (2) angebracht sind, welche wiederum mit dem Spulenkörper verschraubt sind. Zwischen den Endstücken sind die Zwischenglieder (3) befestigt, zwischen denen sich eine unmagnetische Leiste (4) befindet.

Alle MG- Bremsen werden im Drehgestell in Schienenfahrzeugen eingebaut. Gliedermagneten werden im Gegensatz zu Starrmagneten im Allgemeinen in Hochoaufhängung im Drehgestell befestigt. Bei der Hochoaufhängung wird der Magnet vor dem einschalten auf die Schiene abgesenkt. Im Gegensatz dazu wird der Magnet bei der Tiefaufhängung, was die Standardaufhängung für Starrmagneten ist, nicht abgesenkt, sondern der Magnet muss sich gegen Federn über die magnetische Anzugskraft auf die Schienen absenken.

In Abbildung 2.4 ist nun eine typische Applikation eines Gliedermagneten im Drehgestell eines Vollbahnfahrzeuges dargestellt. Um eine möglichst konstante Bremskraft zu erhalten und die in [2] geforderte Grenze von einem Haftkraftabfall von maximal 5% bei einer verbleibenden Batteriespannung von $U_n = 30\%$ zu erreichen, ist der Magnetkreis so dimensioniert, dass dieser gesättigt ist. Der aufgrund dessen entstehende Haftkraftverlauf ist in Abbildung 2.5 dargestellt und führt dazu, dass trotz eines Abfalles der Betriebsspannung noch eine ausreichende Haftkraft gewährleistet werden kann. [1]

2.2 Verwendete Materialien

Während der Magnetkörper immer aus gewöhnlichem Stahl hergestellt wird, werden für die Polschuhe verschiedene Materialien verwendet. Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Materialien sind in Tabelle 2.1 aufgeführt. Die Werte darin sind

2.2 Verwendete Materialien

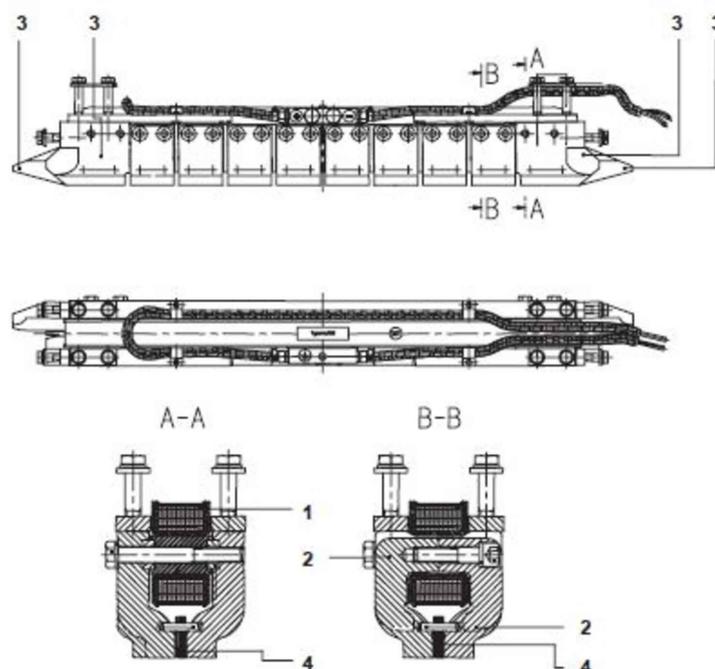


Abbildung 2.3: Grundsätzlicher Aufbau eines Gliedermagneten [1]

jeweils auf Stahl bezogen. Es ist ersichtlich, dass die Bremskraftwerte von Sinter bei 100% liegen, obwohl die Haftkraftwerte deutlich niedriger sind. Dies hängt damit zusammen, dass die Sintermaterialien einen höheren Reibwert aufweisen. Außerdem bilden sich beim Bremsen Aufschweißungen (sog. Aufschieferungen [2]), welche die Bremskraft verringern. Diese treten bei Stahl auf, jedoch nicht bei Sinterpolschuhen, was der Vorteil dieser ist, da diese dadurch weniger Aufwand bei der Wartung benötigen. Diese Arbeit beschränkt sich jedoch auf die Untersuchung von stählernen Polschuhen.

Tabelle 2.1: Polschuhmaterialien [1]

Material	Haftkraft	Bremskraft	Aufschweißungen
Stahl	100%	100%	Ja
Sinter	65%	100%	Nein

2.2 Verwendete Materialien

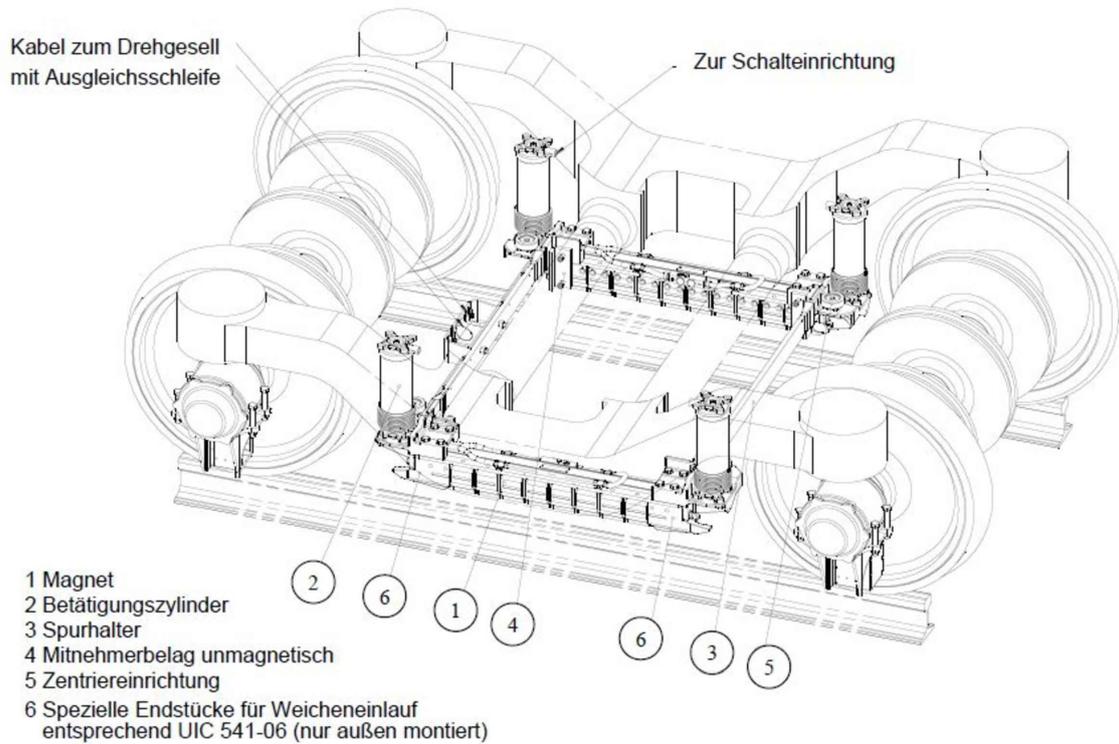


Abbildung 2.4: Typischer Einbau einer MG- Bremse [3]

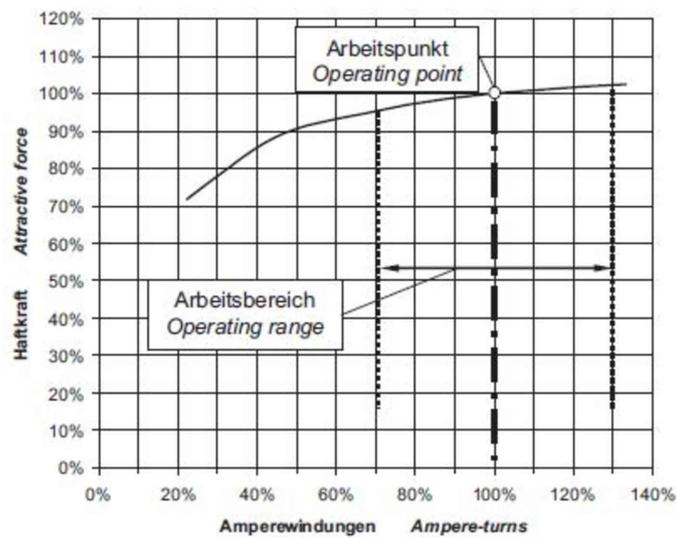


Abbildung 2.5: Typischer Haftkraftverlauf einer MG- Bremse [1]

2.3 Haftkraftwaage

Zur Bestimmung der Haftkraft einer MG- Bremse ist in den beiden Normen ([2, 3]) eine Vorrichtung spezifiziert. Diese ist in Abbildung 2.6 abgebildet und wird im Weiteren als Haftkraftwaage bezeichnet. Die MG- Bremse liegt auf beiden Seiten auf den Schienen auf und in der Mitte befindet sich der Prüfkörper. Dieser besitzt eine spezifizizierte Länge, welche in beiden Normen mit $l_A = 40\text{mm}$ vorgeschlagen wird.

Weiters muss die Länge der Haftkraftwaage so gewählt werden, dass der gesamte Magnet aufliegt. Als Schienenprofil soll das Schienenprofil 49E1, welches in EN 13674-1:2008-01 spezifiziert ist, verwendet werden. Bei diesem ist der Schienenkopf so zu bearbeiten, dass der Magnet flach aufliegt und die Schiene eine Breite von 63 mm aufweist.

Als Werkstoff für die Haftkraftwaage ist der Schienenwerkstoff R200 vorgeschlagen, wobei in [2] vorgeschlagen wird, zur besseren Vergleichbarkeit die Messung mit dem Schienenwerkstoff E360 zu wiederholen.

Es ist weiters vorgeschrieben, dass sowohl die Schiene als auch der Magnet vor der Messung zu bearbeiten sind und eine maximale Rauheit der Oberfläche von $R_a = 1,6\mu\text{m}$ aufweisen. Diese Tatsache ist wichtig für die spätere Ermittlung des Luftspalts durch die Simulation der Bremse mit der Finiten Elemente Methode (FEM).

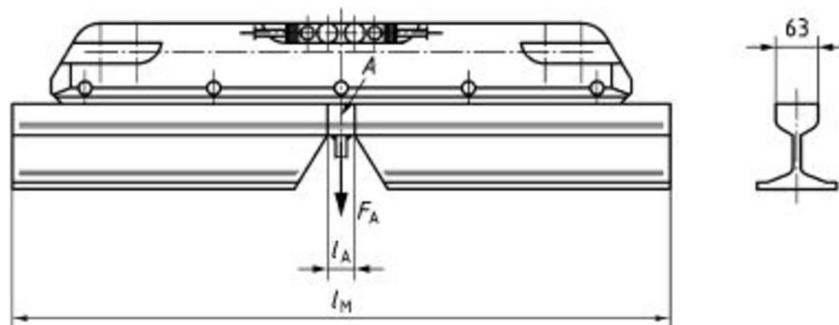


Abbildung 2.6: Haftkraftwaage [3]

3 Magnetische B-H- Kurven

Für die nachfolgenden Simulationen werden Materialparameter benötigt. Für eine lineare magnetische Simulation reicht als Eingabe die magnetische Permeabilität. Da jedoch nichtlineare Simulationen durchgeführt werden, muss als Eingabeparameter der Zusammenhang aus magnetischer Flussdichte B und magnetischer Feldstärke H , also die B-H- Kurve bekannt sein. Zuerst soll jedoch ein kurzer Überblick über die generellen magnetischen Eigenschaften gegeben und die verschiedenen Methoden beschrieben werden, mit denen die magnetischen Eigenschaften von Schienen bestimmt werden können.

3.1 Magnetische Eigenschaften

Magnetismus ist eine Eigenschaft, welche alle Stoffe in irgendeiner Weise zeigen. Beschrieben wird dies durch das folgende Konstitutivgesetz

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}. \quad (3.1)$$

In (3.1) bezeichnet μ die magnetische Permeabilität. Dabei handelt es sich um eine Richtungs- Orts- und Feldstärkeabhängige Tensorgröße [4]. Diese berechnet sich nach [5] zu

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (3.2)$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (Vs/Am)}. \quad (3.3)$$

Dabei ist μ_r die relative Permeabilität. Diese ist im Allgemeinen richtungsabhängig und es handelt sich um eine dimensionslose Größe, welche stoffspezifisch ist [4]. Grundsätzlich unterscheidet man zwei Arten von magnetischen Materialien [5]:

- **Weichmagnetische Materialien:** Diese werden unterschieden in diamagnetische, paramagnetische und ferromagnetische Materialien.
- **Hartmagnetische Materialien:** Aus diesen werden Dauermagneten hergestellt.

Wird nun ein diamagnetischer Körper in ein Magnetfeld eingebracht, so wird das Magnetfeld abgeschwächt. Das passiert, da das innere magnetische Feld dem äußeren entgegengesetzt ist [5]. Die Feldlinien werden auch aus dem Körper gedrängt (siehe Abbildung 3.1a).

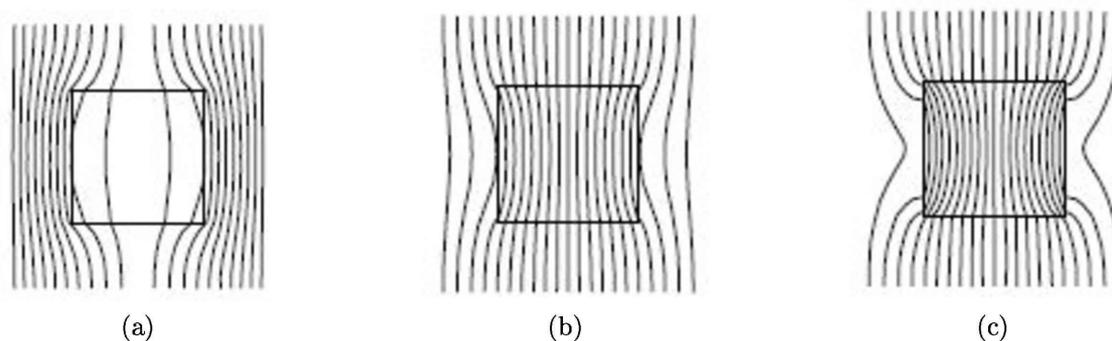


Abbildung 3.1: Körper in einem Magnetfeld [5]; a) diamagnetisch; b) paramagnetisch; c) ferromagnetisch

Bei einem paramagnetischen Körper wird das äußere magnetische Feld leicht verstärkt. Die Magnetisierung im Körper weist bereits die selbe Richtung auf, jedoch ist der Effekt hier eher schwach. Die Feldlinien werden eher durch den Körper laufen (siehe Abbildung 3.1b).

Bei einem ferromagnetischen Material wird das äußere Magnetfeld stark vergrößert. Das Magnetfeld und die Feldlinien konzentrieren sich im Material (siehe Abbildung 3.1c). Wird nun dieses äußere magnetische Feld weggenommen, so verschwindet auch das Feld im Körper und wir sprechen von einem reversiblen Prozess. Wenn jedoch das äußere magnetische Feld einen bestimmten Grenzwert überschreitet, so bleibt eine irreversible remanente magnetische Flussdichte B_r bestehen. Wird nun in die Gegenrichtung magnetisiert, bis diese verschwindet, so ist dazu eine entsprechende Feldstärke erforderlich. Diese wird als Koerzitivfeldstärke H_c bezeichnet (siehe Abbildung 3.2). Die oben erwähnte Einteilung in hartmagnetische und weichmagnetische Werkstoffe erfolgt über die Koerzitivfeldstärke. Hartmagnetische Werkstoffe besitzen eine hohe Koerzitivfeldstärke, also auch eine breite Hystereseschleife, Weichmagnetische eine geringere Koerzitivfeldstärke, also auch eine schmale Hystereseschleife [6]. Abbildung 3.3 zeigt diesen Zusammenhang.

3.1.1 Hystereseschleife

3.1.2 Neukurve- Kommutierungskurve

Der Zusammenhang zwischen B und H kann für diamagnetische und paramagnetische Materialien einfach durch eine Gerade dargestellt bzw. angenähert werden. Diese ist vollständig reversibel und verläuft daher durch den Ursprung.

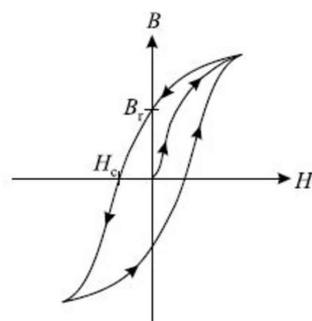


Abbildung 3.2: Hystereseschleife [5]



Abbildung 3.3: Hystereseschleife eines a) hartmagnetischen, b) weichmagnetischen-Werkstoffes [4]

Wird nun ein ferromagnetischer Körper zum ersten Mal aufmagnetisiert, so steigt die Magnetisierung zuerst stark an, bis sie eine Sättigung erreicht. Das Verhältnis zwischen magnetischer Feldstärke und magnetischer Flussdichte bzw. Polarisation ist im Allgemeinen für ferromagnetische Materialien nichtlinear. Die Magnetisierung folgt der sogenannten Neukurve.

Wird nun das äußere Magnetfeld verringert, ergibt sich ein anderer Zusammenhang bzw. eine andere Kurve. Ferromagnetische Materialien zeigen also ein Hystereseverhalten (Abbildung 3.4a). Ferromagnetische Materialien haben also einen nichtlinearen, nicht eindeutigen Zusammenhang der Magnetisierungslinien [4]. Aus diesem Beispiel ist ersichtlich, dass der Zusammenhang zwischen B und H nicht nur vom momentanen, sondern auch von einem früheren Zustand abhängen kann. Die magnetischen Eigenschaften sind außerdem auch temperaturabhängig und werden mit steigender Temperatur schwächer. Bei Überschreiten der sogenannten *Curie-Temperatur* verliert der Körper seine Magnetisierung vollständig.

Möchte man nun das Magnetfeld vollständig beschreiben, ist die Angabe von vielen Hystereseschleifen notwendig. Für die meisten technischen Anwendungen reicht jedoch die Angabe der Neukurve, der Kommutierungskurve und der Grenzkurve aus.

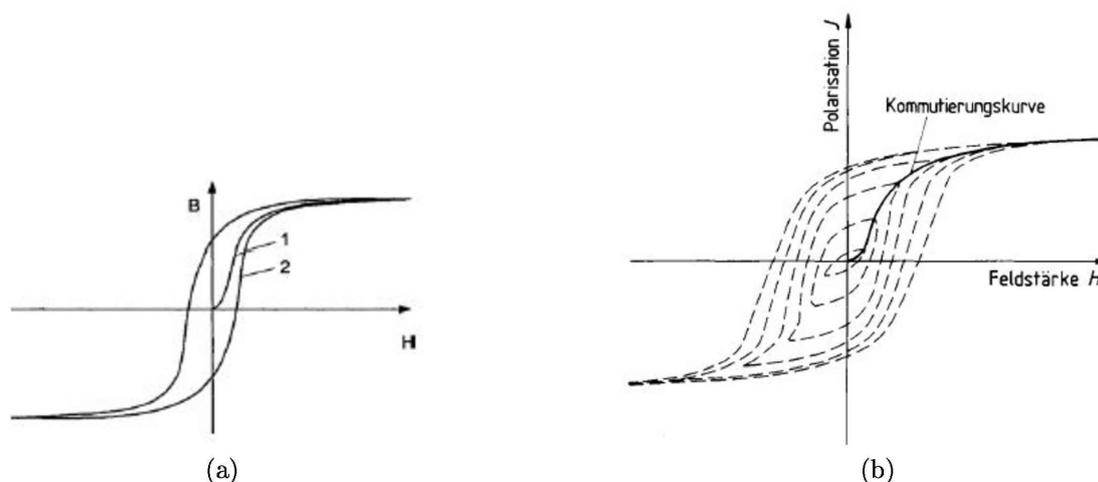


Abbildung 3.4: a) Hysterese (2) mit Neukurve (1) [4]; b) Kommutierungskurve [8]

In den diversen Normen ([7, 8]) sind zwei Möglichkeiten angegeben, um den erwähnten Zusammenhang zu bestimmen:

- Kontinuierliche Aufnahme der B-H Kurve bei einer kleinen zeitlichen Änderung des Magnetfeldes. Mit diesem Verfahren kann die Neukurve aufgenommen werden.
- Aufnahme einer großen Anzahl von Hystereseschleifen und Verbinden der Umkehrpunkte H_{\max} und B_{\max} zu einer Kommutierungskurve (Abbildung 3.4b)

Die beiden Verfahren führen jedoch laut [6] zu nahezu identischen Kurven, weshalb sich im Bezug auf die folgenden FEM- Simulationen die Frage nicht stellt, welches der beiden Verfahren angewendet werden soll.

Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren

Die beiden Messverfahren weisen hauptsächlich Unterschiede in der Ansteuerung der Primärwicklung auf. Bei der Aufnahme der Neukurve wird der Strom in der Spule langsam bis zu einem Maximalwert gesteigert. Dadurch kann die Neukurve auch mit einer Messung komplett erfasst werden. Dafür muss der Strom in der Primärwicklung so langsam gesteigert werden, dass die entstehenden Wirbelströme vernachlässigbar sind und keine Nachwirkungseffekte entstehen. [8]. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass hier hohe Anforderungen an die Messtechnik gestellt werden. Jedoch ist laut [7, 8] die Wiederholgenauigkeit dieses Verfahrens größer [9].

Im Gegensatz dazu stellt die Messung der Kommutierungskurve einen niedrigeren

Anspruch an die Messtechnik. Jedoch ist diese Messung aufwendiger, da jeder Punkt der Kommutierungskurve einzeln aufgenommen werden muss. Eine große Rolle spielt hier die Frequenz des Erregerstroms, bei der die einzelnen Hysteresen aufgenommen werden, vor allem bei massiven Proben, da bei zu hoher Frequenz die Messungen durch die aufgrund der hohen Frequenzen auftretenden großen Wirbelströme, welche der Magnetisierung entgegenwirken, teils stark verfälscht werden.

3.1.3 Grundlagen der Messung

Zunächst sollen die Grundlagen der Messung und die dafür notwendigen Zusammenhänge erläutert werden.

Durchflutungssatz, Gesetz von Ampere

Der Satz von Ampere ist ein empirisches Gesetz. Um einen stromdurchflossenen Leiter bildet sich ein elektromagnetisches Feld aus. Mithilfe dieses Gesetzes kann gezeigt werden, dass der Strom durch den Leiter, durch integrieren der magnetischen Feldstärke \mathbf{H} entlang einer beliebigen geschlossenen Kurve um den Leiter bestimmt werden kann [5]

$$I = \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s}. \quad (3.4)$$

Gesetz von Faraday

Dieses beschreibt den Zusammenhang zwischen der induzierten Spannung u_{ind} in einer offenen leitenden Schleife und dem magnetischen Fluss Φ durch diese Schleife [5]

$$u_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.5)$$

Magnetischer Fluss

Der magnetische Fluss ist als das Querschnittsintegral der Flussdichte \mathbf{B} definiert

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}. \quad (3.6)$$

Magnetische Feldstärke

Diese lässt sich aus dem Durchflutungssatz bestimmen. Laut [4] ist die Erregung einer Spule das Produkt des Stromes I in der Spule und der Windungszahl N und

3.2 Probenform

wird auch als Durchflutung bezeichnet. Dadurch ergibt sich der Zusammenhang für die Erregung Θ der Spule zu

$$\Theta = I_{\text{prim}} N_1 . \quad (3.7)$$

Für die Messung muss nun die Feldstärke in der Probe bestimmt werden. In [10] ist für die Messung die mittlere magnetische Länge, welche die geschlossene Kurve um den Körper bildet, in Abhängigkeit der Abmessungen der Probe angegeben

$$l_m = \frac{D_a + d_i}{2} * \pi . \quad (3.8)$$

Mit (3.8) kann nun das Gesetz von Ampere hergeleitet werden, indem um die Kurve in der Probe integriert wird [10]

$$\mathbf{H} = \frac{I_{\text{prim}} N_1}{l_m} , \quad (3.9)$$

wobei N_1 die Anzahl der Primärwindungen darstellt.

Magnetische Flussdichte

Die magnetische Flussdichte lässt sich mithilfe der Gleichungen (3.5) und (3.6) bestimmen, da die Probe eine konstante Querschnittfläche A_{Fe} aufweist. Aus (3.6) folgt

$$\Phi = \mathbf{B} A_{\text{Fe}} \quad (3.10)$$

und mit (3.5) erhält man

$$\int u_{\text{ind}} dt = -N_2 \Phi \quad (3.11)$$

mit N_2 der Anzahl der Windungen der Sekundärspule. Daraus kann nun mit (3.10) die folgende Gleichung für die magnetische Flussdichte \mathbf{B} hergeleitet werden

$$\mathbf{B} = -\frac{1}{N_2 A_{\text{Fe}}} \int u_{\text{ind}} dt . \quad (3.12)$$

3.2 Probenform

In der Norm [8] sind mehrere mögliche Probenformen spezifiziert. In [9] wurden die B-H- Kurven verschiedener Bleche in mehreren Richtungen, welche über den Winkel zur Walzrichtung definiert wurden, bestimmt, wobei der Autor hier zum Schluss kommt, dass die magnetischen Eigenschaften stark richtungsabhängig sind. Aus diesem Grund wurde vorab angenommen, dass die magnetischen Eigenschaften nicht isotrop sind.

Bei der Messung mit einem in [7] spezifizierten *25cm Eppsteinrahmen*, welcher in

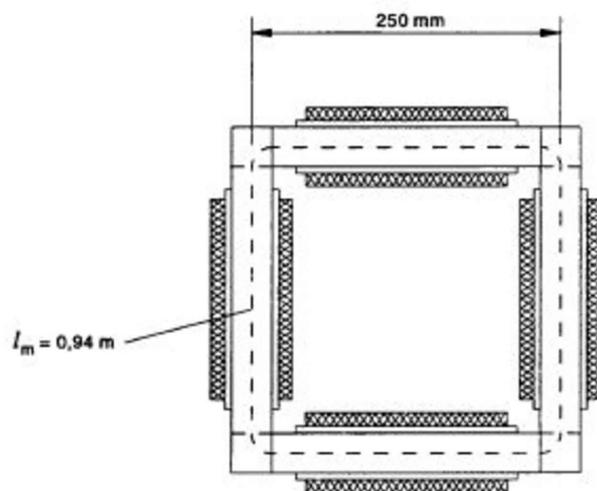


Abbildung 3.5: 25 cm Eppsteinrahmen [7]

Abbildung 3.5 dargestellt ist, müssen die Proben mindestens 28 cm lang sein, was aufgrund der Abmessungen der Schiene eine Messung nur in eine Richtung zulässt.

Weiters sollten über die Höhe des Schienenkopfes mehrere Proben vermessen werden. Da die in [7] spezifizierten Proben eine Breite von 30mm aufweisen, wäre hier nur eine Probe über die Tiefe möglich.

Aus diesem Grund wurde die Entscheidung getroffen, Stabproben, welche in mehrere Richtungen entnommen werden, und Ringproben zu vermessen. Die Messung der Stabproben wurden in Auftrag gegeben. Die magnetische B-H- Kurve wurde mithilfe eines Doppel-C- Joches durchgeführt. Das Verfahren ist in [11] beschrieben und soll hier nicht näher erläutert werden. Das Vermessen der Ringproben wurde im Zuge dieser Arbeit durchgeführt, um die Ergebnisse vergleichen zu können.

Durch diese Wahl der Proben konnten die magnetischen Eigenschaften der Schienen in verschiedenen Tiefen und auch mehreren Richtungen gemessen werden und dadurch festgestellt werden, in welchem Ausmaß das Material anisotropisch ist. Die Entnahmetiefe der einzelnen Proben ist in Abbildung 3.6a für die Stabprobe und in 3.6b für die Ringprobe dargestellt. In Abbildung 3.6c ist die Entnahmerichtung über den Winkel α zur Längsrichtung der Schiene für die Stabproben definiert.

Aus den Magnetgliedern wurde jeweils nur eine Ringprobe entnommen. Dies ist in Abbildung 3.6d dargestellt.

3.2 Probenform

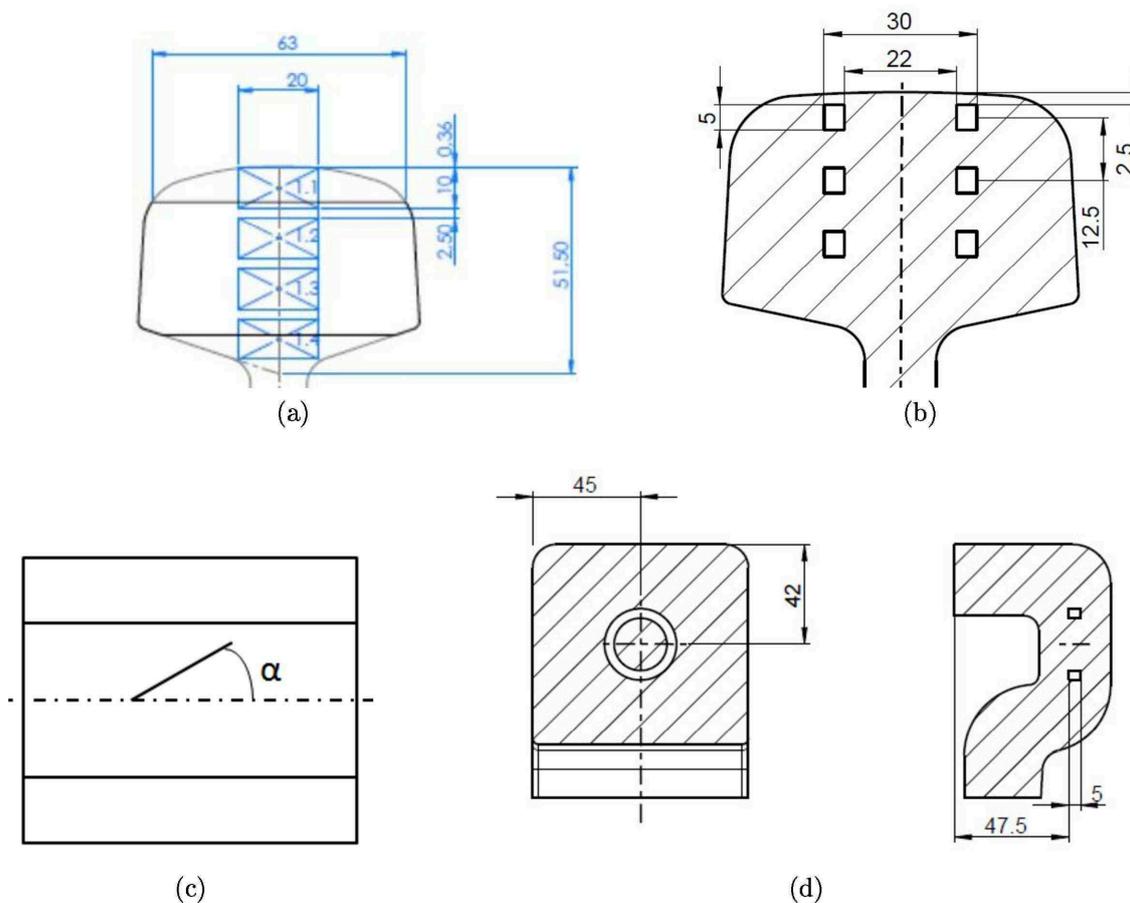


Abbildung 3.6: a) Entnahme der Stabprobe; b) Entnahme der Ringprobe, c) Winkel der Entnahme d) Entnahme aus dem Magnetglied

3.2.1 Probenform: Stabproben

Da die Messung der magnetischen Eigenschaften der Stabproben wie bereits erwähnt in Auftrag gegeben wurden, war die Geometrie durch das Vermessungsinstitut bereits vorgegeben. Es wurde die Entscheidung getroffen, vier Proben über die Tiefe der Schienen zu entnehmen. Der Querschnitt wurde hierfür quadratisch vorgegeben, mit einer Seitenlänge von $a_P = 10\text{mm}$ und einer Länge von $l_P = 20\text{mm}$. Da laut [9, 12, 13, 14] die Herstellung großen Einfluss auf die gemessenen magnetischen Eigenschaften hat, musste die Herstellung der Proben näher betrachtet werden. Da es sich bei Schienen um massive Bauteile handelte, sollten die Ringproben nicht geblecht hergestellt werden. Dadurch wurden die möglichen Herstellerfahren eingeschränkt. In [13] werden geblechte Ringproben behandelt. Darin ist erwähnt, dass durch Bearbeitungsvorgänge wie Schneiden, Stanzen, Überdrehen an den Kanten ein Bereich von 0,5- 1,0 mm verändert wird, sodass sich die Permeabilität in diesem Bereich

verschlechtert. In [9] kommt der Autor zum Schluss, dass Drahterodieren die beste Möglichkeit ist, hier jedoch ebenfalls eine geringe Veränderung der Randschicht stattfindet. Es wurde daher auch aus Kostengründen die Entscheidung getroffen, die Proben zu fräsen, da sämtliche in der Literatur behandelten Verfahren die Probe an den Rändern in ihren magnetischen Eigenschaften verändern. Da die Proben jedoch massiv sind, diese Veränderungen nur in der Randschicht stattfinden und alle vermessenen Proben gefräst wurden, soll angenommen werden, dass die Veränderungen aufgrund der Fertigung bei den einzelnen Proben vergleichbar sind.

Richtungsabhängigkeit

Um nun die Anisotropie des Materials abzubilden, müssen Messungen in verschiedene Richtungen zur Schienenlängsachse durchgeführt werden. Dies wird auch in [15, 16] diskutiert, wobei die Autoren in beiden Fällen zum Schluss kommen, dass die schlechtesten Eigenschaften nicht, wie ev. zu vermuten, in oder quer zur Walzrichtung liegen.

In [15] kommen die Autoren zum Schluss, dass das Material die schlechtesten Eigenschaften 55° zur Walzrichtung besitzt. Weiters kommt der Autor hier zum Schluss, dass die Entnahme von 3 Proben in 0° , 55° , 90° nicht ausreicht. Hier wurde alle 10° eine Probe entnommen und vermessen. Abbildung 3.7 zeigt die in [15] ermittelten richtungsabhängigen Kurven. In [16] wurden nur für die Richtungen zwischen $0^\circ - 90^\circ$ Messungen durchgeführt und angenommen, dass das Material ansonsten symmetrisch ist.

Zur Vermessung wurden nun die Annahme wie auch in [16] getroffen, dass die magnetischen Eigenschaften bezüglich der Längsachse und der Querachse der Schiene symmetrisch sind. Daher wurden nur Proben zwischen $0^\circ - 90^\circ$ entnommen. Um nun ein aussagekräftiges Ergebnis zur Bewertung der Anisotropie des Materials zu erhalten, wurden nun Proben in 0° , 30° , 45° , 60° , 90° zur Walzrichtung entnommen (siehe Abbildung 3.6c) und zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften abgegeben. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Anisotropie des Materials gut erfasst wird.

Die Vermessung mithilfe der Stabproben wurde nur für das Schienenmaterial R200 durchgeführt.

3.2.2 Ringproben

Die Vermessung der B-H- Kurven der Ringproben ist Teil dieser Arbeit. Die Ringproben wurden in verschiedenen Tiefen aus der Schiene entnommen. Es wurden mehrere Schienenmaterialien und jenes des Zwischengliedes vermessen. Die folgen-

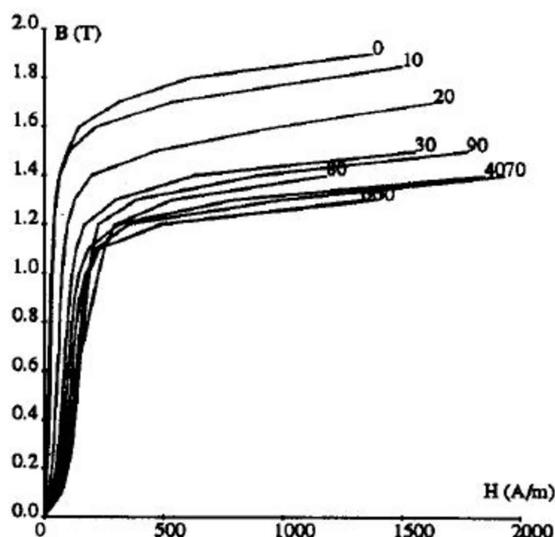


Abbildung 3.7: B-H Kurven eines anisotropischen Materials [15]

den Materialien wurden vermessen:

- Schienenmaterial R200
- Schienenmaterial R260
- Schienenmaterial R350HT
- Material des Zwischengliedes C10E

Die Abmessungen der Proben wurden so gewählt, dass sich mit dem vorhandenen Verstärker eine möglichst hohe magnetische Feldstärke erzeugen lässt, um die B-H-Kurven bis in den Sättigungsbereich bestimmen zu können.

In [10] ist für die Abmessungen der Proben angegeben, dass das Verhältnis von Außen- zu Innendurchmesser $D_a/d_i = 1.25 - 1.4$ betragen soll. Weiters sollte die Höhe der Proben so gewählt werden, dass eine für die Messapparatur gut messbare Spannung in der Sekundärwicklung induziert wird.

Die magnetische Feldstärke berechnet sich nach (3.9). Mit (3.15) konnte aus bereits vorhandenen B-H-Kurven aus älteren Messungen ein Verhältnis μ für eine Feldstärke von $H \approx 50\text{kA/m}$ abgeschätzt werden

$$|\mathbf{B}| = B \quad (3.13)$$

$$|\mathbf{H}| = H \quad (3.14)$$

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3.15)$$

Mithilfe von (3.16) kann die Querschnittsfläche nach [10] bestimmt werden und daraus die Höhe der Proben.

$$A_{Fe} = \frac{D_a - d_i}{2} h \quad (3.16)$$

Damit konnten die Abmessungen der Ringproben und die Windungszahlen der Primärspule (N_1) und der Sekundärspule (N_2) festgelegt werden. Diese sind in Tabelle 3.1 angegeben.

Die beiden Spulen auf der Probe wurden händisch hergestellt. In [10] ist angegeben, dass bei der Wicklung der Luftraum um die Sekundärspule minimiert werden soll und dass diese möglichst nahe an der Probe sein soll. Aus diesem Grund wurde die Sekundärspule auch direkt auf der Probe angebracht und die Primärspule darüber. Um Kurzschlüsse zu vermeiden, wurde die Probe, wie auch in [9] erwähnt, mit einer 0.066mm dicken Kaptonfolie bandagiert. Die einzelnen Wicklungen und deren einzelne Lagen wurden jeweils wieder durch die erwähnte Kaptonfolie getrennt. Abbildung 3.8a zeigt nun das Wickelprinzip der Proben, und 3.8b den Lagenaufbau.

Die Abmessungen und Daten des Ringkerns sind in Tabelle 3.1 spezifiziert, die verwendeten Drähte in Tabelle 3.2. Der Ringkern wurde zuerst, wie bereits erwähnt, mit der Kaptonfolie bandagiert, dann mit dem Draht die Sekundärspule aufgebracht, wieder mit Kaptonfolie bandagiert und die erste Lage der Primärspule aufgebracht. Es wurden 3 Lagen aufgebracht, welche jeweils durch Kaptonfolie voneinander isoliert wurden. Abbildung 3.9 zeigt die fertige Ringprobe.

Für die Proben des Materials R200 wurde zuerst der in der Tabelle 3.1 spezifizierte Drahtdurchmesser für beide Wicklungen verwendet. Dieser ist jedoch nur für Temperaturen bis ca. 150°C spezifiziert. Es sollten jedoch Messungen bis ca. 200°C durchgeführt werden. Deshalb wurden die restlichen Proben (R260, R350HT C10E) mit einem temperaturbeständigeren Draht hergestellt, um die erwähnten 200°C messen zu können. Die verwendeten Drähte sind in Tabelle 3.2 angeführt. Der temperaturbeständigere Draht konnte jedoch nur in einer leicht vom anderen Draht abweichenden Drahtstärke beschafft werden, wie in Tabelle 3.2 zu sehen.

Der in der Tabelle 3.1 spezifizierte Drahtdurchmesser ist für den verwendeten Strom etwas zu gering, ist jedoch für die geringe Messdauer ausreichend, sofern zwischen den einzelnen Messungen die Probe ausreichend abkühlen kann.

Temperaturmessung

Da die Messungen der B-H- Kurven bei verschiedenen Temperaturen erfolgen sollten, und davon ausgegangen wurde, dass sich die Temperatur aufgrund des zu hohen

Tabelle 3.1: Abmessungen der Ringproben

N_1	N_2	h	D_a	d_i	u_{ind}
170	75	5 mm	30 mm	22 mm	$\approx 0.1 \text{ V}$

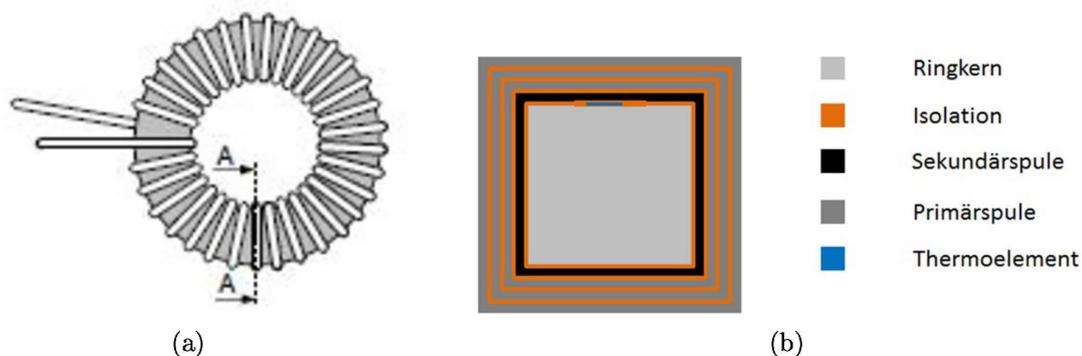


Abbildung 3.8: a) Wickelprinzip der Probe [9]; b) Lagenaufbau

Stromes und der Messdauer verändern würde, wurde die Temperatur mitgemessen. In [10] ist hierzu angeführt: *Wenn die Kenntnis der Temperatur der Probenoberfläche gefordert ist, dann muss die Temperatur durch Anbringen eines kalibrierten unmagnetischen Thermoelements (z. B. eines Thermoelements von Typ T) an die Probe gemessen werden..*

Tabelle 3.2: Verwendete Wickeldrähte

D	Material	Isolierung	T_{max}
0.71 mm	Elektrolytkupfer	Polyurethan	155°C
0.67 mm	Elektrolytkupfer	modifiziertes Polyesterimid mit einem Überzug aus Polyamidimid	200°C

Es wurde jedoch nicht die Temperatur während der Messung bestimmt, sondern nur die Temperatur zwischen den Messungen, um die Starttemperatur der Messung zu bestimmen. D.h. die Probe musste jeweils beheizt bzw. gekühlt werden und die Temperaturmessung wurde zwischen den Messungen verwendet, um die Proben-temperatur zu bestimmen und die Messungen immer bei der selben Temperatur zu starten. Die Erwärmung der Probe erfolgte hauptsächlich aufgrund der Erwärmung des Drahtes der Primärwicklung, da dieser aufgrund des zu geringen Durchmessers für die verwendete Spannung etwas zu gering dimensioniert war. Es wurde für die Messungen der Proben aus R200 ein Thermoelement des Typs K verwendet. Dieses

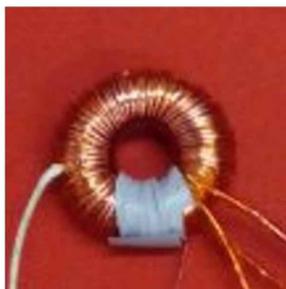


Abbildung 3.9: Fertig gewickelte Ringprobe

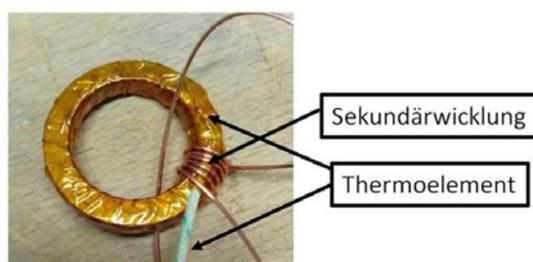


Abbildung 3.10: Ringprobe mit Thermoelement

ist zwar magnetisch beeinflussbar, jedoch ist das verwendete Auslesegerät sehr träge und die Messdauer sehr kurz. Es wird daher nur dazu verwendet, um die Temperatur vor der Messung zu bestimmen, d.h. die Temperatur, bei welcher die Messung gestartet wird.

Es wurden zuletzt bei der Probe R200_I, bei welcher die Spule zuletzt ebenfalls mit dem dünneren Draht erneut hergestellt wurde, sowohl ein Thermoelement des Typs K als auch des Typs T verwendet. Die Messung zeigte jedoch keine Differenzen aufgrund der Magnetisierung. Die Wahl des Typ K- Thermoelementes ist daher für die Messung nicht ideal, jedoch für die erwähnte Vorgehensweise zulässig, da nur die Temperatur zwischen den Messungen bestimmt werden sollte.

Für alle weiteren Messungen wurde ein Thermoelement vom Typ T verwendet. Die Probe wurde zuerst, wie bereits erwähnt, mit Kaptonfolie bandagiert, danach wurde das Thermoelement angebracht und eine weitere Lage Kaptonfolie aufgebracht. Abbildung 3.10 zeigt die Ringprobe mit aufgebrachtem Thermoelement und den ersten Windungen der Sekundärspule

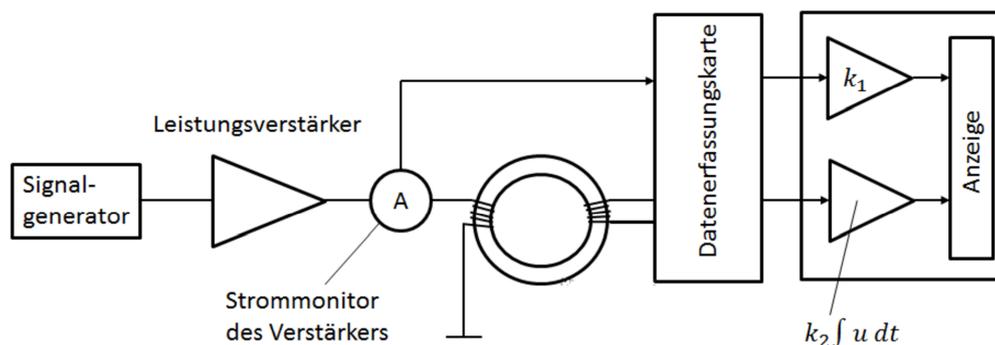


Abbildung 3.11: Schematischer Messaufbau

3.3 Messung Kommutierungskurve

Im Zuge dieser Arbeit werden nun beide oben beschriebenen Messverfahren (Neukurve und Kommutierungskurve) durchgeführt, da die Vermessung der B-H- Kurven der Stabelemente wie bereits erwähnt nicht selbst durchgeführt wurden. Diese wurden extern vermessen, und lagen als Neukurven vor. Da die Aufzeichnung der Neukurve eine hohe Genauigkeit der verwendeten Geräte erfordert, soll jedoch auch die Kommutierungskurve bestimmt werden.

3.3.1 Messaufbau

Die Magnetisierungskennlinie kann durch den Zusammenhang von Strom in der Primärwicklung (H) und der induzierten Spannung in der Sekundärwicklung (B) mit den Gleichungen (3.9) und (3.12) berechnet werden. Abbildung 3.11 zeigt einen schematischen Aufbau, welcher zum Bestimmen der B-H- Kurven verwendet wurde.

Es wurden die folgenden Messgeräte verwendet:

Verstärker

Als Verstärker wurde der folgende verwendet:

- Hersteller: Rohrer
- Type: PFL-2250-28-UDC415-IDC375
- Ausgangsstrom: ± 28 A
- Steuerbar: I/U
- Frequenzgang: 75 kHz (I) 150 kHz (U)
- Verwendete Übersetzung: 5 A/V

Messapparatur

Dieser wurde mittels einer Messapparatur von National Instruments gesteuert und gemessen. Dafür wurden zur Steuerung die folgende Messkarte von National Instruments verwendet:

- Hersteller: National Instruments
- Typ: PXIe 6361
- Analogausgänge: 2
- Auflösung: 16 bit
- Genauigkeit: $\pm 10\text{ V}$ 1.89 mV
 $\pm 5\text{ V}$ 935 μV

Zur Messung der Induzierten Spannung und des Ausgangsstromes wurden die folgenden 2 Digitalmultimeter verwendet:

- Hersteller: National Instruments
- Typ: PXI 4071
- Analogeingänge: 1
- Auflösung: 26 bit
- Auflösungsschritte: 7.5 Digit
- Bereich: $\pm 1000\text{ V}$
- Empfindlichkeit: 100 μV

Die Steuerung der Messapparatur erfolgte mittels *MatLab*, wobei mittels der Messkarte PXIe 6361 eine Spannung ausgegeben wurde, welche vom Verstärker mit der angegebenen Stromübersetzung von 5 A/V in ein Stromsignal übersetzt wurde.

Temperatur

Die Messung der Temperatur erfolgte mittels eines einfachen Digitalthermometers. An dieses wurde das Thermoelement angeschlossen und die Temperatur zwischen den Messungen bestimmt. Es wurde das folgende Gerät verwendet:

- Hersteller: AMPROBE
- Typ: TMD-56
- Auflösung: 0.1 K
- Verwendetes Thermoelement: Typ K; Typ T

Die Steuerung der Temperatur erfolgte manuell. Der verwendete Thermojet hätte zwar die Funktion, die Temperatur direkt über die Messwerte des Thermoelements vom Typ K bzw. T zu steuern, jedoch besitzt dieser einen sehr aggressiven Regler, welcher zu starkem Überschwingen neigt. Daher wurde die Temperatur konstant auf

3.3 Messung Kommutierungskurve

einer um 5-8°C niedrigeren Temperatur gehalten und die Regelung der Temperatur im Bezug auf ein eigenes Thermoelement, welches sich in der verwendeten Thermobox befand, durchgeführt. Dadurch konnte ein starkes Überschwingen vermieden und die Umgebungstemperatur konstant gehalten werden.

Dies ist zulässig, da die Temperatur der Probenoberfläche vor jedem Versuch gemessen wurde, um die Temperatur am Beginn des Versuches konstant zu halten. Der Großteil der Erwärmung fand jedoch offenbar, wie bereits erwähnt, in der Kupferwicklung statt, da die höchste Temperatur nach der Messung jeweils einige Sekunden nach der Messung erst erreicht wurde und sich die Anschlussdrähte ebenfalls erwärmten. Außerdem kann aufgrund der kleinen Abmessungen angenommen werden, dass die Temperatur im Inneren der Probe relativ konstant ist, da die Temperaturänderung bei den einzelnen Messungen sehr langsam durchgeführt wurde und die Temperaturverteilung daher als annähernd isotherm angenommen werden kann. Die Temperaturänderung kann mit ca. 2-2.5°C/min angegeben werden.

Zur Regelung der Temperatur wurde der folgende Thermojet und für die Durchführung der Messungen die mitgelieferte Thermobox verwendet.:

- Hersteller: FTS Systems
- Typ: ThermoJet ES
- Temperaturbereich: -80°C +225°C
- Regelgenauigkeit: 1°C
- Thermobox: Unterteil: CS141604
Oberteil: HD141604
- Abmessungen: jeweils 406x356x101

Abbildung 3.12 zeigt nun die Probe in der Thermobox, Abbildung 3.13 zeigt den fertigen Messaufbau mit Ringprobe in der Thermobox, mit aufgesetztem Thermojet und angeschlossener Messapparatur. Weiters ist darin der Luftfluss durch die Box eingezeichnet. Dieser wurde mittels eines Anschlusses direkt in die Box geleitet.

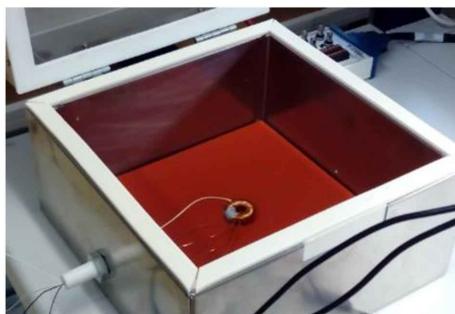


Abbildung 3.12: Ringprobe in der Thermobox

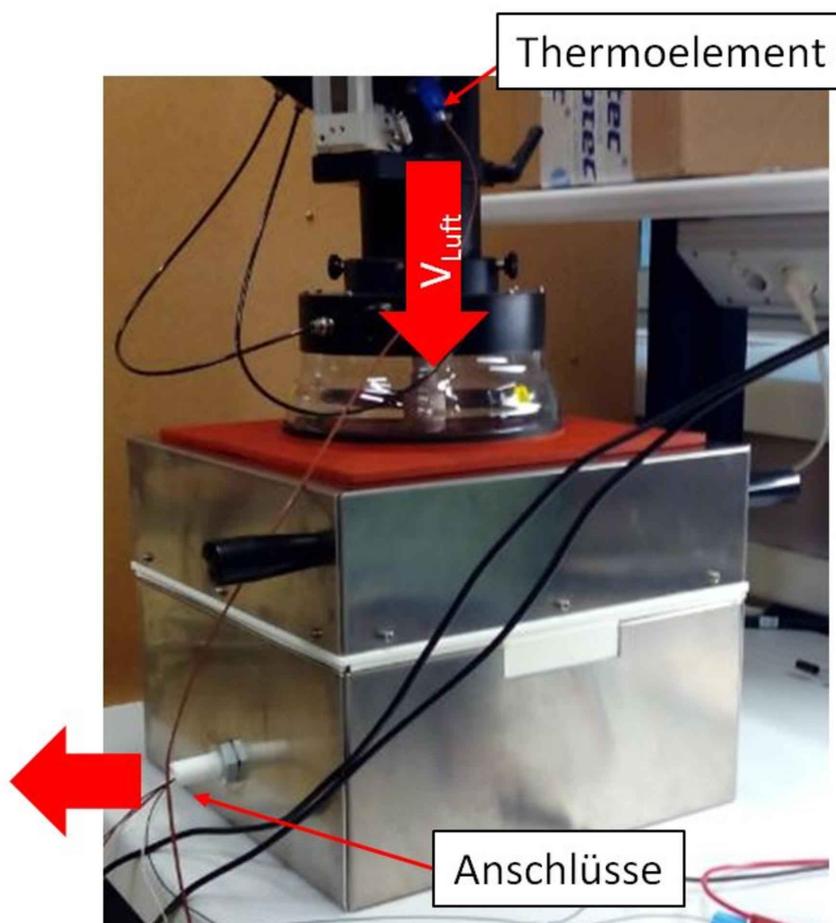


Abbildung 3.13: Fertig aufgebaute Thermobox mit Thermojet

3.3.2 Adaptive Messung

Die Messung wurde, um den Fehler gering zu halten, adaptiv durchgeführt. Die Methode, mit welcher dies durchgeführt wird, bezieht sich im Wesentlichen auf die in [9] beschriebene Methode. Die Steuerung des Primärstromes I_{prim} erfolgt in diesem Fall über eine Spannung U_{prim} , welche wie bereits beschrieben, im Verstärker mit einem Übersetzungsfaktor $k = 5 \text{ A/V}$ mittels eines Stromverlaufes ausgegeben wird. Es soll nun in mehreren Durchläufen jener Spannungsverlauf U_{prim} ermittelt werden, bei dem der Sollverlauf von I_{prim} möglichst genau angenähert wird.

Dafür wird die Fehlernorm f_{max} eingeführt. Diese wird, da die Sekundärspannung U_{sek} später über die Zeit aufintegriert wird, über die beiden Summenflächen der beiden Signale gebildet

$$f_{\text{max}} = \frac{A_{\text{Soll}}}{A_{\text{tats}}} . \quad (3.17)$$

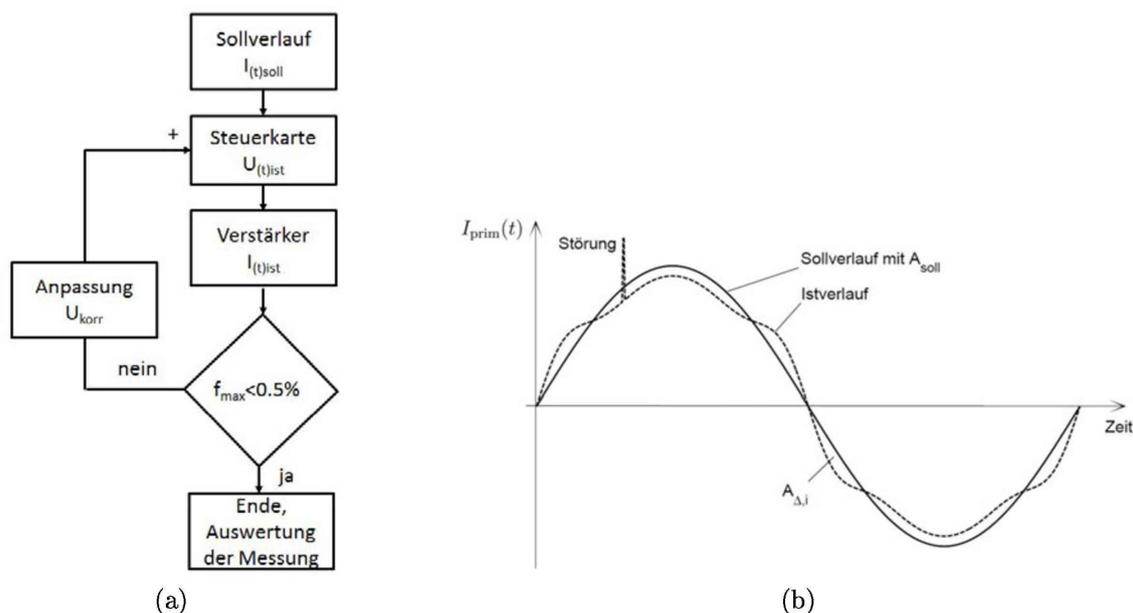


Abbildung 3.14: a) Ablaufdiagramm der adaptiven Messung; b) Soll- Istverlauf [9]

Bei der Messung wird ein kleinstmöglicher Fehler angestrebt. Dieser soll in diesem Fall maximal $f_{max} = 0.5\%$ betragen.

Dafür wird der Fehler nach jeder Messung bestimmt, U_{prim} angepasst und die Messung wiederholt, bis die Abweichungen den vorgegebenen Grenzwert unterschreiten.

Jedoch muss nach jeder Messung überprüft werden, ob eventuell auftretende Stromspitzen, welche flächenmäßig keine großen Abweichungen darstellen, den Stromverlauf nicht zu stark verzerren und die Messung gegebenenfalls wiederholt werden. Abbildung 3.14a zeigt das erwähnte Vorgehen, in 3.14b ist das Prinzip der Fehlermessung dargestellt.

Es konnte jedoch festgestellt werden, dass diese Fehlernorm immer eingehalten wurde bzw. bei den kleineren Erregungen stark unterschritten wurde. Lediglich bei Belasten des Verstärkers an seiner Grenze ($I_{prim} = 28 \text{ A}$, $U_{prim} \approx 400 \text{ V}$) tritt ein größerer Fehler auf, welcher jedoch nicht korrigiert werden kann, da der Strom nicht weiter gesteigert werden kann. Daher sind diese Werte mit Vorsicht zu betrachten.

3.3.3 Entmagnetisierung

In den diversen Normen [7, 8, 10] ist immer eine Entmagnetisierung der Probe durchzuführen. Dafür gibt es mehreren Möglichkeiten:

- Erhitzen der Probe über die Curie- Temperatur

- Ummagnetisieren der Probe in einem Wechselfeld

Die erste genannte Methode ist für die durchzuführenden Messungen nicht zielführend, da die B-H- Kurven der Schienen, wie diese im Schienennetz verbaut sind, untersucht werden sollen und diese oft speziell gehärtet sind, was nach [6] die magnetische B-H- Kurve beeinflusst. Ein Erhitzen über die Curie- Temperatur würde zu Kristallumbildungen führen und die Ergebnisse für den untersuchten Fall unbrauchbar machen.

Das Ummagnetisieren im Wechselfeld ist hier einfacher durchzuführen. In [10] ist hierfür für den Eppsteinrahmen angegeben: *Die Probe muss dann entweder in einem Wechselfeld mit fallender Amplitude oder in einem Feld mit einer Reihe von Feldumkehrungen mit schrittweise reduziertem Wert des Gleichstroms, der durch die Primärwicklung des Epsteinrahmens fließt, abmagnetisiert werden, wobei die Frequenz der Umschaltungen ungefähr 2 je Sekunde beträgt. Der Anfangswert der magnetischen Feldstärke, der durch den abmagnetisierenden Strom erzeugt wird, muss höher sein als derjenige Wert der Feldstärke, der bei den vorausgegangenen Messungen benutzt wurde.*

Es konnte jedoch gezeigt werden, dass der selbe Effekt wie beim Abmagnetisieren erreicht werden kann, wenn man nicht wie in der Norm für Ringproben ([10]) vorgeschrieben, bei der Messung der Kommutierungskurve mit dem niedrigsten Wert beginnt, sondern mit dem höchsten und danach schrittweise verringert.

Da die Methode zum Bestimmen der Kommutierungskurve ohnehin aufwendiger ist, wird hier auf das Abmagnetisieren zwischen den einzelnen Versuchen verzichtet und das oben beschriebene Verfahren, mit Beginn beim größten Wert gewählt. Es soll hierfür eine Messung mit beiden Verfahren durchgeführt und die Ergebnisse verglichen werden.

3.3.4 Messfehler

Um die Messgenauigkeit möglichst gering zu halten, wurde versucht, den zufälligen Fehler möglichst klein zu halten. Dafür wurden jeweils 10 Perioden aufgezeichnet und ausgewertet. Die Werte der Umkehrpunkte wurden danach aus diesen 10 Perioden gemittelt.

Um die Messunsicherheit zu bestimmen, wurde die Kommutierungskurve der Probe R200_I mehrmals und an mehreren verschiedenen Tagen aufgenommen. Daraus wurden dann die jeweiligen Abweichungen von der ersten Messung bestimmt und so der Messfehler, mit welcher die einzelnen Proben vermessen wurden bestimmt.

Da die Messung über 10 Perioden erfolgt und so bereits gut gemittelt ist, und der

Fehler bei der Messung festgestellt wurde, wird jede Probe nur einmal vermessen und daraus die B-H- Kurve bestimmt. Auf eine mehrmalige Messung wird wegen des sehr geringen Fehlers des Messaufbaus verzichtet.

3.3.5 Lineare Drift

Bei den Messungen zeigten sich teilweise starke Abweichungen, welche sich bei näherer Betrachtung als lineare Drift des Gesamtsystems herausstellten. Dieses Phänomen ist auch in [17] behandelt und rührt von einem kleinen Offset des Verstärkers, der Steuerung und der Messkarten her. Da die Sekundärspannung nachfolgend über die Zeit aufintegriert wird, ergibt sich aus diesem Offset eine lineare Drift. In [17] wurde hierfür ein Hochpass in das System eingefügt.

Da sich dieser Fehler jedoch speziell bei der Bestimmung der Kommutierungskurve relativ leicht rechnerisch eliminieren lässt und ein solcher Hochpass bei den verwendeten Leistungen nicht trivial zu realisieren ist, soll die Korrektur rechnerisch erfolgen. Hierfür muss die lineare Drift bestimmt werden. Dafür werden:

- die einzelnen Minima und Maxima der einzelnen Perioden bestimmt,
- jeweils eine Gerade durch diese gelegt und der Fehler mit der Methode der kleinsten Quadrate minimiert,
- aus den Steigungen der beiden Geraden ein Korrekturfaktor $k_{(t)}$ bestimmt und die Hystereseschleifen korrigiert. Weiters wurde die Hystereseschleife über die Extremwerte zentriert. Abbildung 3.15a zeigt eine Hystereseschleife vor der Korrektur und 3.15b nach der beschriebenen Korrektur.

$$\mathbf{B}_{(t) \text{ d}} = (\mathbf{B}_{(t)} - k_{(t)} * t) \quad (3.18)$$

$$\mathbf{B}_{(t) \text{ kor}} = \mathbf{B}_{(t) \text{ d}} + [\max(\mathbf{B}_{(t) \text{ d}}) + \min(\mathbf{B}_{(t) \text{ d}})] \quad (3.19)$$

- Die positive und die negative Fläche der Hystereseschleife werden schließlich aufintegriert und kontrolliert, ob die Abweichungen einen Fehler von $f_B = 0.1\%$ nicht überschreiten.

3.3.6 Temperaturabhängigkeit

Da die magnetischen Eigenschaften unter anderem von der Temperatur abhängen, wurde die Vermessung der Proben bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Es wurde ein Temperaturbereich ausgewählt, welcher möglichst die Anwendungen im Betrieb der Mg- Bremse wiedergeben sollte.

3.3 Messung Kommutierungskurve

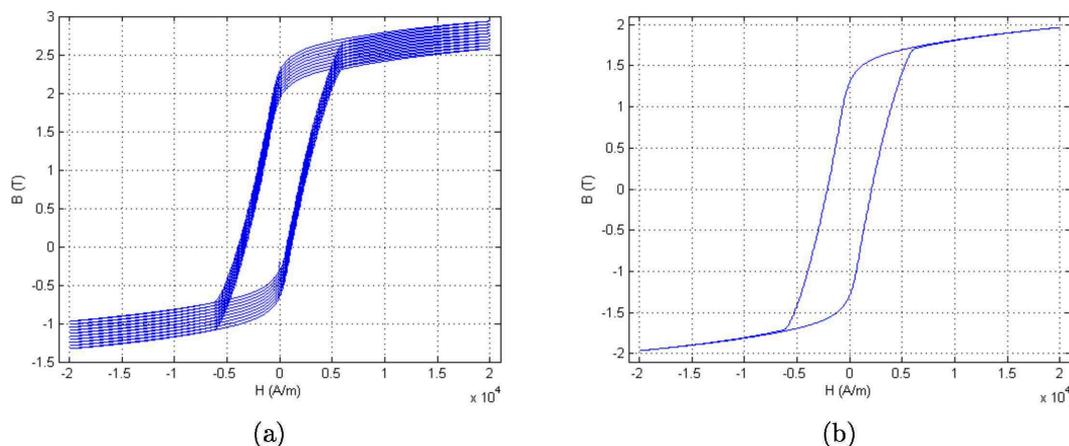


Abbildung 3.15: a) gemessene Hystereseschleife vor der Korrektur; b) korrigierte Hystereseschleife

Als untere Grenze wurde eine Temperatur von $T_u = -25^\circ\text{C}$ gewählt, da ein Betrieb unterhalb nur sehr selten stattfindet.

Als die obere Grenze wurde $T_o = 200^\circ\text{C}$ gewählt. Jedoch konnten konsistente Ergebnisse nur bis ca. $T_o = 150^\circ\text{C}$ gemessen werden, weshalb die Entscheidung getroffen wurde, den Temperaturbereich auf $T_o = 150^\circ\text{C}$ zu beschränken.

3.3.7 Frequenzabhängigkeit

In [6] ist angegeben, dass die Form der Hystereseschleife stark von der Frequenz der Magnetisierung abhängt. Mit zunehmender Frequenz wird diese breiter. Verursacht wird dies durch Wirbelströme, welche der Magnetisierung entgegenwirken. Bei höheren Frequenzen tritt zusätzlich eine Behinderung des Ablaufes der Elementarvorgänge auf [6].

Dem könnte entgegengewirkt werden, indem dünne geschichtete Proben verwendet werden. Da es sich bei den zu vermessenden Materialien um Volumenkörper handelt, wurden massive Ringproben verwendet.

Bei niedrigen Frequenzen gibt es laut [6] jedoch nur eine marginale Veränderung der Grenzwerte. Ab einer bestimmten Frequenz, welche hier auch als Grenzfrequenz bezeichnet wird, gibt es jedoch einen starken Abfall. Diese wird normalerweise laut [6] durch Versuche bei verschiedenen Frequenzen ermittelt. Aus diesem Grund wurden im Vorfeld Messungen bei verschiedenen Frequenzen durchgeführt, um festzustellen, bei welcher Messfrequenz die Messungen durchgeführt werden sollen.

Es wurden hierbei für jeweils eine Probe eine Messung bei einer Feldstärke H von 20kAm bei verschiedenen Frequenzen durchgeführt und die Umkehrpunkte bei der jeweiligen Hystereseschleife bestimmt.

3.3.8 Durchführung der Messung

Nachdem nun der Messaufbau beschrieben ist, soll im Folgenden die Durchführung der Messung für die Kommutierungskurve kurz beschrieben werden.

Als Messpunkte wurden die im Anhang in Tabelle 9.1 ersichtlichen gewählt, da diese als Datenpunkte der Messung der Stabproben bekannt sind, um diese besser vergleichen zu können. Es wurden jedoch noch einige Punkte ergänzt, um eine bessere Auflösung für die spätere Simulation zu erhalten.

Es wurde zuerst die Messung bei $T = 25^\circ\text{C}$ durchgeführt und dann die restlichen Temperaturschritte. Dabei wurde, wie bereits erwähnt, mit der höchsten Feldstärke begonnen und diese nach jedem Versuch gesenkt. Für die Messungen wurden die Proben zuerst auf die Temperatur gebracht, bei welcher die Messung durchgeführt werden sollte, danach wurde die erste Messung durchgeführt und die Temperatur des Thermojet um $5 - 8^\circ\text{C}$ niedriger eingestellt um die erwähnte Erwärmung wieder abzukühlen. Eine Messung wurde immer dann durchgeführt, wenn die Probe wieder die vorgegebene Temperatur erreicht hatte.

Es kann festgestellt werden, dass bei $f_{\text{mess}} = 5\text{ Hz}$ keine Veränderung der Grenzwerte auftritt, weshalb die Messungen bei dieser Frequenz durchgeführt wurden.

Zuletzt wurden die einzelnen Messungen ausgewertet, die Maxima bestimmt und die Kommutierungskurve durch Verbinden der einzelnen Punkte erstellt.

3.4 Messung Neukurve

Zur besseren Vergleichbarkeit wurde die Neukurve ebenfalls aufgenommen.

3.4.1 Entmagnetisieren- Aufmagnetisieren

Da hier die Messung der gesamten Kurve in einem Schritt erfolgt, musste zusätzlich entmagnetisiert werden. Wie im Kapitel 3.3.3 bereits erwähnt, gibt es dazu mehrere Möglichkeiten. Hier wurde auch beschrieben, warum eine Erwärmung über die Curie- Temperatur nicht sinnvoll ist. Deshalb wurde hier die Entscheidung getroffen, die Entmagnetisierung über einen Wechselstrom durchzuführen.

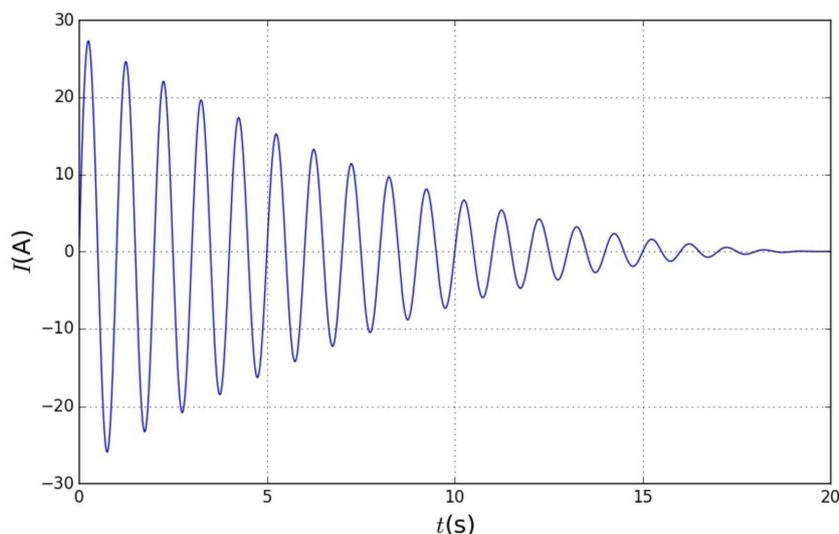


Abbildung 3.16: Entmagnetisierungsverlauf

Hierbei wurde eine Frequenz von 1Hz gewählt, welche geringer als die 2Hz, welche in der Norm [8] angeführt sind, ist. Da jedoch die hohen Ströme zu einer starken Erwärmung der Probe führen und die Belastung des Verstärkers an der Lastgrenze stattfindet, wurde die Entscheidung getroffen, eine quadratisch fallende Amplitude zu verwenden. Es wurde der in Abbildung 3.16 gezeigte Verlauf zum Entmagnetisieren verwendet.

3.4.2 Lineare Drift

Die lineare Drift stellte hier eine größere Hürde dar als bei der Kommutierungskurve, da hier keine Möglichkeit bestand, die Maxima und Minima zu vergleichen und so diesen Effekt einfach rechnerisch zu eliminieren.

Um dies trotzdem durchzuführen, wurden zuerst die Kommutierungskurven dahingehend untersucht. Wie bereits erwähnt, stammt die lineare Drift von einem kleinen Offset des Messsystems. Es wurde nun untersucht, wie groß dieser Offset bei den Kommutierungskurven ist.

Es konnte ermittelt werden, dass dieser im Bereich von $U_{\text{offset}} = 0.4 \text{ mV} \pm 0.1 \text{ mV}$ liegt. Dies ist kleiner als die Toleranz der Steuerkarte. Deshalb wurde nicht versucht, diese zu verbessern, sondern diese wurde rechnerisch korrigiert. Hierbei ergab sich allerdings das Problem, dass der maximal ermittelte Wert der Hystereseschleife zur Korrektur der jeweiligen Neukurve verwendet wurde. Dafür wurde die Korrekturspannung u_{korrr} ermittelt, bei der die beiden Endpunkte der Kurven die selben

Werte aufweisen. Dies geschah mithilfe der folgenden Formel

$$u_{\text{ind korr}} = u_{\text{ind}} - u_{\text{korr}} . \quad (3.20)$$

Diese Vorgehensweise ist aufgrund der in [6] angeführten Bemerkung, wonach die Kommutierungskurve und die Neukurve nahezu identisch sind, zulässig.

Es wurden jeweils 5 Messungen für jede Probe durchgeführt und diese verglichen. Dabei konnte festgestellt werden, dass der Offset nach jeder Messung geringfügig zunimmt, die Abweichungen jedoch sehr klein sind. Diese wurden im Anschluss gemittelt und die Neukurve erstellt.

3.4.3 Durchführung der Messung

Da die Messung der Neukurve nur zu Vergleichszwecken erfolgte und die extern vermessenen Kurven alle bei Raumtemperatur aufgenommen wurden, wurde die Entscheidung getroffen, diese nur bei Raumtemperatur zu vermessen.

Auch hier wurde wieder der Thermojet verwendet um die Probe zu kühlen. Diese wurde vor jeder Messung entmagnetisiert, siehe Abbildung 3.16. Danach wurde die Probe wieder auf Raumtemperatur gekühlt. Die Temperatur wurde wieder mit dem erwähnten digitalen Thermometer bestimmt und bei Erreichen der Raumtemperatur die Messung gestartet.

Das Aufmagnetisieren wurde durchgeführt, indem der Strom in der Ringprobe kontinuierlich bis zum Maximum gesteigert wurde. Dafür wurde ein Zeitraum von 1.5s gewählt, um Wirbelströme und Materialträgheiten möglichst auszuschließen. Die Kurve ist in Abbildung 3.17 dargestellt. Da die Feldstärke direkt über den vorhandenen Strom berechnet wird und die anderen Variablen in (3.9) sowohl konstant, als auch von der Zeit unabhängig sind, kann diese Näherung als gut angesehen werden.

Die Neukurve wurde, wie bereits erwähnt, 5 Mal aufgenommen, wobei nach der Messung direkt die Entmagnetisierung gestartet und die Probe danach abgekühlt wurde. Danach wurde bei erneutem Erreichen der Raumtemperatur die Messung gestartet.

3.5 Verifikation durch Simulation

Der Vergleich der beiden Methoden gestaltet sich etwas schwieriger, da bei den Stabproben die magnetische B-H- Kurve jeweils nur in eine bestimmte Richtung aufgenommen wurde, während bei den Ringproben ein Mittelwert über alle Richtungen gemessen wurde. Um die beiden Verfahren vergleichen zu können, wurde die

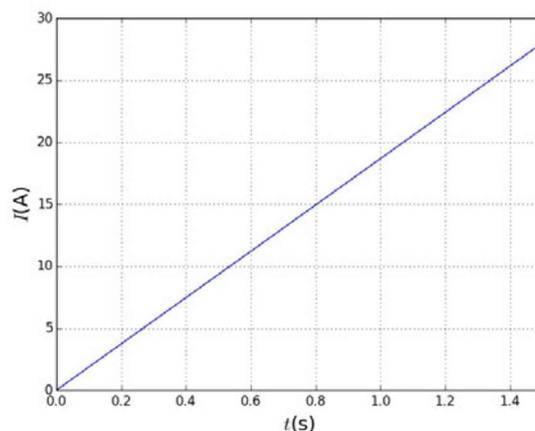


Abbildung 3.17: Aufmagnetisierungsverlauf

Ringprobe simuliert und so die B-H- Kurve der einzelnen Richtungen gemittelt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde die Ringprobe jedoch ebenfalls mit den B-H- Kurven, welche mithilfe der Ringproben gemessen wurden, simuliert. Aus den Daten der Stabproben musste nun ein geeignetes Modell erstellt werden, um die Anisotropie korrekt abzubilden. Dafür kommen zwei anisotrope Materialmodelle in Frage:

- ein elliptisches Materialmodell, für den Fall, dass nur zwei Werte in der Ebene normal auf einander vermessen werden
- ein vollständiges Materialmodell, für alle vorgenommenen Messungen, welches alle Richtungen berücksichtigt .

Es wurde die Entscheidung getroffen, mit einem elliptischen Materialmodell erste Berechnungsversuche durchzuführen und mit dem vollständigen die Berechnung der tatsächlichen Werte. Mit diesen Materialmodellen konnte die Anisotropie des Materials angenähert werden.

Hierfür wurde eine transiente Simulation durchgeführt, da der durchgeführte Versuch simuliert und somit die in der Sekundärspule induzierte Spannung berechnet werden sollte. Diese hängt von der Veränderung der magnetischen Feldstärke ab, weshalb eine einfache magnetostatische Simulation hierfür nicht geeignet wäre.

3.5.1 Materialmodell aus Daten

Das Materialmodell wurde nun aus den gemessenen Daten generiert. Hierbei muss zwischen den beiden Modellen (elliptisches und vollständiges Modell) unterschieden werden. Die Berechnung der Modelle erfolgte mittels Python.

Ellipsenmodell

Dieses Modell dient dazu, ein Materialmodell zu generieren, für den Fall, dass nur die beiden Koordinatenrichtungen normal aufeinander bekannt sind. Dabei wurden die Eigenschaften mittels der Ellipsen- Gleichung in polarer Form berechnet

$$\mathbf{B}(\varphi) = \frac{\mathbf{B}_{0^\circ} \mathbf{B}_{90^\circ}}{\mathbf{B}_{0^\circ}^2 \sin^2(\varphi) + \mathbf{B}_{90^\circ}^2 \cos(\varphi)}. \quad (3.21)$$

Hierbei repräsentieren \mathbf{B}_{0° , \mathbf{B}_{90° die beiden bekannten Werte der magnetischen Flussdichte \mathbf{B} bei der jeweiligen magnetischen Flussdichte \mathbf{H} . Die Variable φ stellt die Richtung dar, in der die Werte ermittelt werden sollten.

Es wurde jeweils eine Ellipse für jeden Punkt der magnetischen Feldstärke \mathbf{H} ermittelt. Diese Rechnung wurde für alle bekannten Punkte wiederholt und so konnten beliebig viele Richtungen angenähert werden. Dieses Modell geht jedoch von der Annahme aus, dass die magnetischen Eigenschaften von einem Maximalwert in Walzrichtung zu einem Minimalwert normal dazu abnehmen. Wie bereits erwähnt, trifft dies jedoch nicht zu. Daher wurde das zweite Modell erstellt.

Vollständiges Modell

Bei diesem Modell werden auch weitere Richtungen betrachtet. Das Material wird hier auch wieder in Polarkoordinaten aufgeteilt. Um die restlichen Kurven zu ermitteln, wurden jeweils für einen Punkt in der B-H- Kurve bei einer Feldstärke \mathbf{H} die Flussdichten \mathbf{B} der einzelnen Richtungen (0° , 30° , 45° , 60° , 90°) in eine Tabelle eingefügt und sämtliche weitere Richtungen mittels kubischer Splines aus diesen Daten interpoliert.

Die Prozedur wurde mit allen Feldstärken \mathbf{H} wiederholt, bis sämtliche Werte interpoliert waren. Der Vorteil dieses Modells liegt darin, dass hier das Material sehr gut angenähert werden kann. Außerdem können beliebig viele gemessene Kurven in das Materialmodell einfließen. Abbildung 3.18 zeigt nun einen Vergleich der beiden Modelle. Darin ist ersichtlich, dass erhebliche Unterschiede möglich sind, da die für das Ellipsenmodell getroffenen Annahmen nicht zutreffen.

3.5.2 Simulationsmodell

Zur Simulation der Messung wurde ein 3- dimensionales Modell erstellt. Die Verwendung eines 2- dimensionalen Modells wäre zwar möglich, jedoch könnte hier die Anisotropie des Materials nicht berücksichtigt werden.

Das Modell wurde jedoch stark vereinfacht aufgebaut:

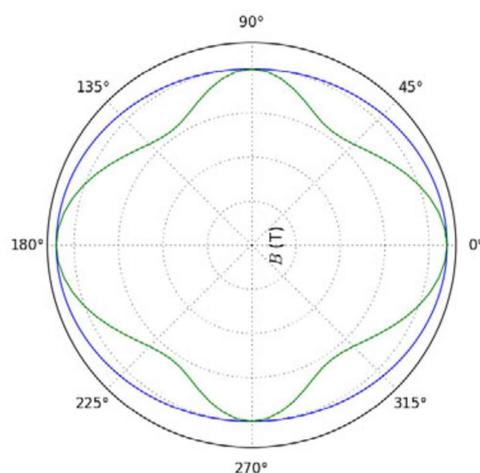


Abbildung 3.18: Vergleich: Ellipsenmodell und vollständiges Modell

- Der Ringkern konnte einfach modelliert werden, da dieser eine einfache Geometrie besitzt.
- Da die tatsächliche Messung simuliert werden sollte, wurde darüber die Sekundärspule angebracht. Die Sekundärspule wurde einlagig modelliert. Es wurde vereinfacht eine Schichtdicke von 1mm angenommen, das heißt um den Ringkern eine 1mm starke Kupferschicht modelliert
- Die Isolierschicht wurde in der Simulation vernachlässigt. Die Isolierung der Sekundärspule vom Ringkern wurde durch eine einfache isolierende Randbedingung erzeugt.
- Die Primärspule wurde ebenfalls als einfache Kupferschicht modelliert. Die Isolierung von der Sekundärspule wurde wieder über eine einfache Isolations-Randbedingung realisiert.
- Die Umgebung wurde einfach als Luft simuliert. Für die Größe des Luftkörpers wurde eine Parameterstudie durchgeführt, bei der der Außendurchmesser der Luft so lange gesteigert wurde, bis keine Veränderungen mehr auftraten. Es wurde ein Außendurchmesser des Luftkörpers von $D_L = 80\text{mm}$ und eine Höhe von $h_L = 40\text{mm}$ gewählt.
- Die Probe weist mehrere Symmetrien auf, wodurch das Modell vereinfacht werden konnte. Aufgrund dieser Symmetrien konnte ein Viertelmodell simuliert werden.

Das so erstellte Modell ist in Abbildung 3.19 abgebildet, in Tabelle 3.3 sind die verwendeten Materialien und deren Eigenschaften angeführt.

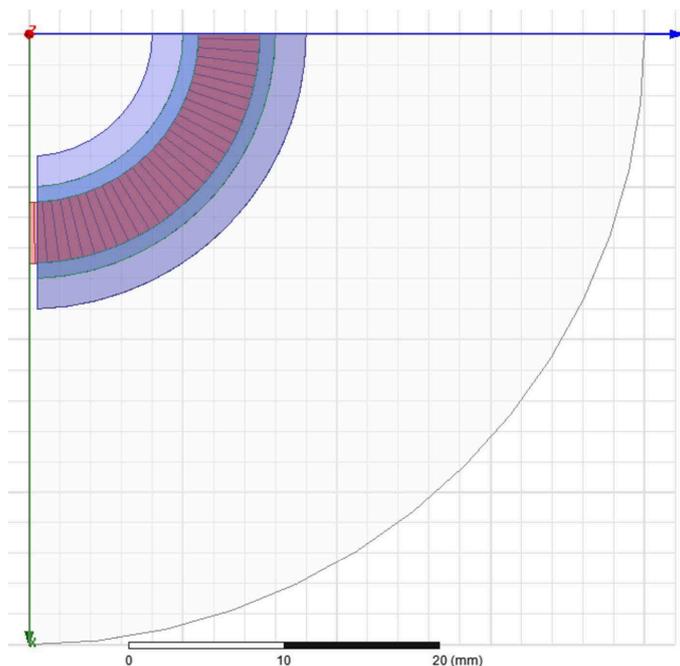


Abbildung 3.19: Viertelmodell des Ringkerns

Tabelle 3.3: Verwendete Materialien

Material	relative Permeabilität μ_r in 1	Leitfähigkeit in S/m
Kupfer	0.999991	5.8E+07
Luft	1	0
Stahl	B-H Kurven	4E+06

Modellierung der Spule

Die Modellierung der Spule in Maxwell erfolgt über einen Volumenkörper, welcher die einzelnen Drähte ersetzt. Eine gute Beschreibung dieses Verfahrens kann in [5, 18] gefunden werden und soll hier nicht näher ausgeführt werden.

Probleme entstehen hier jedoch aufgrund der torusförmigen Wicklung. Das Programm wählt die Start- und Endfläche selbst, kann jedoch aufgrund des geschlossenen Toruses diese nicht festlegen. Aus diesem Grund muss bei dem Torus, welcher die Spule abbildet, an einer beliebigen Stelle ein infinitesimal kleiner Schlitz angebracht werden. Dies gilt auch für das simulierte Viertelmodell der Spule. Hier wurde in der x-z- Ebene ein Schlitz mit einer Breite von $t = 0.05$ mm weggenommen. In Abbildung 3.19 ist dies mit einem größeren Schlitz dargestellt.

Berücksichtigung der Anisotropie

Da diese Modelle dazu dienen, die verschiedenen Kurven miteinander zu vergleichen, muss hier die Anisotropie des Materiales berücksichtigt werden. Dazu würde sich anbieten, die Materialeigenschaften richtungsabhängig zu definieren. Die verwendete Software würde hierfür jedoch dann ein Ellipsenmodell verwenden.

Deshalb wurde die Ringprobe in mehrere Segmente aufgeteilt. Wie in [5] können nun auch hier die Randbedingungen zwischen den Übergängen der einzelnen Segmente betrachtet werden. An den Übergängen kann die Normalkomponente der magnetischen Flussdichte B_n und die Tangentialkomponente der magnetischen Feldstärke H_t ungehindert übergehen. In Abbildung 3.20 ist dieser Zusammenhang für zwei Elemente dargestellt.

Wenn nun näherungsweise für ein Segment die magnetische B-H- Kurve für die Lage des Segmentes $\varphi_{(i)}$ eingesetzt wird, kann das Material angenähert werden. Die Berechnung der induzierten Spannung geschieht mittels (3.11). Diese ist nur von der magnetischen Flussdichte abhängig. Dabei geht näherungsweise die Normalkomponente stetig von einem Segment in das andere über. Wenn nun unendlich viele Segmente aneinander gereiht werden würden, so könnte das Material exakt abgebildet werden.

Da dies jedoch im Rahmen der FEM- Analyse nicht möglich ist, muss eine Anzahl von Segmenten bestimmt werden, bei der diese Näherung annähernd konvergiert. Dies wurde in einer Analyse vorab geklärt. Die Ergebnisse befinden sich im folgenden Kapitel. Es konnte festgestellt werden, dass das Modell die besten Eigenschaften besitzt, wenn mit einer Anzahl von 30 Segmenten pro Viertelkreis, also einer Breite von 3° simuliert wird.

Vernetzung

Da die Ergebnisse stark von der gewählten Netzfeinheit abhängen, musste diese genau definiert werden. Die Netzsteuerung wurde über die Eingabe der maximalen Elementkantenlänge definiert. Für die Berechnung wurden die in Maxwell zur Verfügung stehenden Tetraeder verwendet. Dabei handelt es sich um Kantenelemente mit quadratischen Ansatzfunktionen [18]. Tabelle 3.4 zeigt die verwendeten Elementkantenlängen der Simulation. Abbildung 3.21 zeigt nun das generierte Netz.

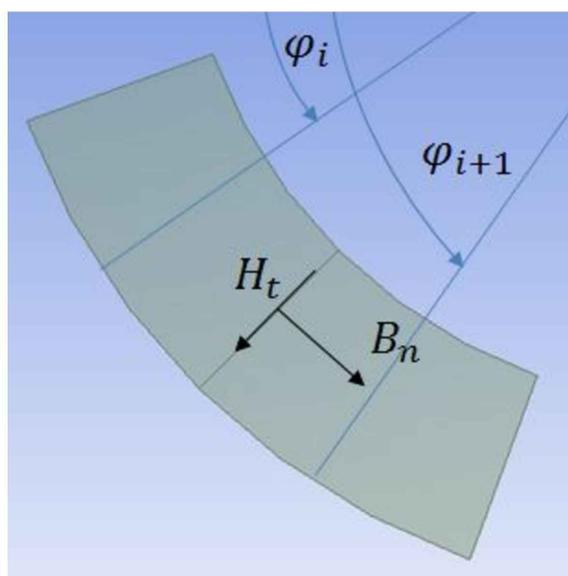


Abbildung 3.20: Übergangsbedingungen an zwei Segmenten

Tabelle 3.4: Verwendete Vernetzung

Körper	max. Elementkantenlänge h in mm
Ringkern	1.2
Spulen	1.5
Umgebung	2

Randbedingungen, Erregungen

Für die Simulation wurden die folgenden Randbedingungen verwendet:

- Die einzelnen Körper wurden durch eine Isolationsrandbedinug voneinander getrennt.
- An den beiden Schnittflächen des Modells mussten die Symmetrierandbedingungen aufgebracht werden. Dies wurde über die Bedinungung *Zero Tangenital Field* realisiert. Dies bewirkt, dass die Feldstärke bzw. die Flussdichte normal zur Schnittfläche ist.
- Die Erregung wurde über den Strom über eine Schnittfläche eingeleitet. Dafür wurde die Funktion *Coil Terminal* verwendet, in welcher die Windungszahl definiert wurde. Hierfür wurde jeweils ein Viertel der jeweiligen Windungen definiert (Viertelmodell).

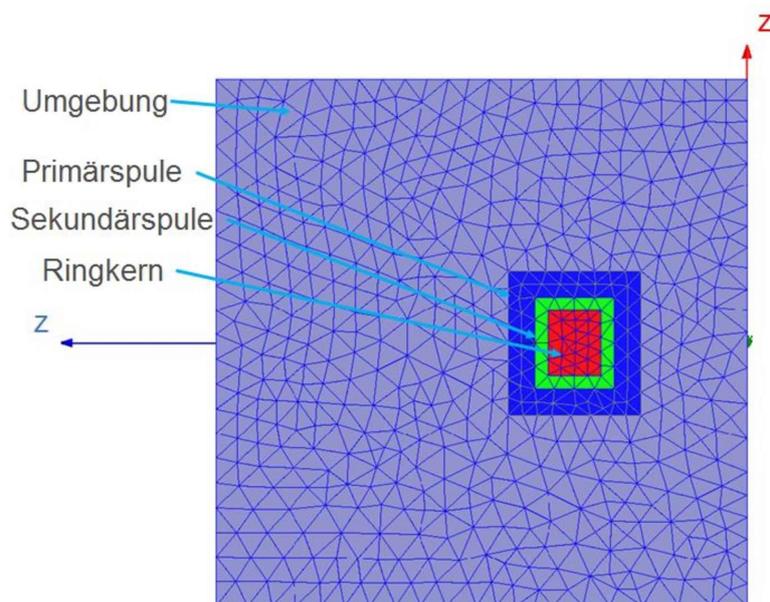


Abbildung 3.21: Generiertes Netz

- Die Windungen an sich wurden über die Funktion *Winding* erzeugt. Hierfür wurde der Stromverlauf mithilfe einer Sinusfunktion spezifiziert. Den Windungen wurde das jeweilige Terminal zugeordnet.

Zeitschritt- Auflösung

Um die B-H- Kurve möglichst gut simulieren zu können, musste die Auflösung der Zeitschritte gut gewählt werden. In durchgeführten Vorversuchen konnte festgestellt werden, dass die Simulation sehr anfällig für eine numerische Dämpfung ist. Dieses Problem kann jedoch vermieden werden, indem eine ausreichend feine Auflösung der Zeit vorgenommen wird. Es wurde zum Vergleich der B-H Kurven jeweils eine halbe Periode simuliert. Dafür wurden als Auflösung 200 Schritte gewählt. Dies ergibt eine Zeitschrittweite Δt von:

$$\Delta t = 1/(200f) = 0.1 \text{ ms}$$

mit f der Frequenz.

Ergebnisauswertung

Zur Auswertung der Ergebnisse wurde die simulierte B-H Kurve berechnet. Hierfür wurden aus dem Stromverlauf, welcher in der Primärspule vorgegeben wurden die magnetische Feldstärke H nach (3.9) berechnet und aus der induzierten Spannung der Sekundärspule die magnetische Flussdichte B nach (3.12) ermittelt.

3.6 Ergebnisse

Im Folgenden sollen nun die Ergebnisse der durchgeführten Messungen beschrieben werden. Es wird hier nur ein Teil der Ergebnisse gezeigt. Die restlichen Kurven befinden sich im Anhang.

3.6.1 Ergebnisse: Kommutierungskurven

Zuerst wurden die Kommutierungskurven aufgenommen. Bevor jedoch mit der eigentlichen Messung begonnen werden konnte, wurde die Auswirkung der Messfrequenz untersucht.

Ermittlung der Messfrequenz

Es wurden hier Messungen bei einer Feldstärke von ca. $H = 20 \text{ kAm}$ durchgeführt, und die Auswirkungen auf die Hysterese und die Maximalwerte verglichen. Abbildung 3.22 zeigt die gemessenen Hystereseschleifen der Probe R200_I bis zu einer Frequenz von $f = 90 \text{ Hz}$. Darin ist der oben beschriebene Effekt sehr gut zu sehen, nämlich, dass mit zunehmender Frequenz die Hysterese aufgrund der Wirbelströme breiter wird.

Betrachtet man jedoch die Maximalwerte der Hystereseschleifen, so kann festgestellt werden, dass bis zu einer Frequenz von $f = 90 \text{ Hz}$ keine nennenswerten Veränderungen der Extremwerte auftreten. Die einzelnen Werte haben nur Abweichungen in der Größe der Genauigkeit der Messung.

In Abbildung 3.23 ist die Hystereseschleife bei $f = 50 \text{ Hz}$ und $f = 100 \text{ Hz}$ für die Probe C10E_I dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei einer Messfrequenz von $f = 100 \text{ Hz}$ eine stark verzerrte Hystereseschleife entsteht. Auch die Extremwerte fallen hier leicht ab und es ist kein eindeutiger Umkehrpunkt mehr festzustellen.

Die selbe Messung wurde jeweils mit der ersten Probe des jeweiligen Materials durchgeführt. Alle Ergebnisse weisen das selbe Verhalten auf. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9.7 für die Probe R260_I, in Abbildung 9.10 für die Probe R350_I und in Abbildung 9.13 für die Probe C10E_I im Anhang dargestellt.

Eine eindeutige Grenzfrequenz, wie sie in [6] beschrieben ist, konnte jedoch nicht festgestellt werden. Es kann jedoch festgestellt werden, dass diese bei $f = 100 \text{ Hz}$ oder darüber liegt.

3.6 Ergebnisse

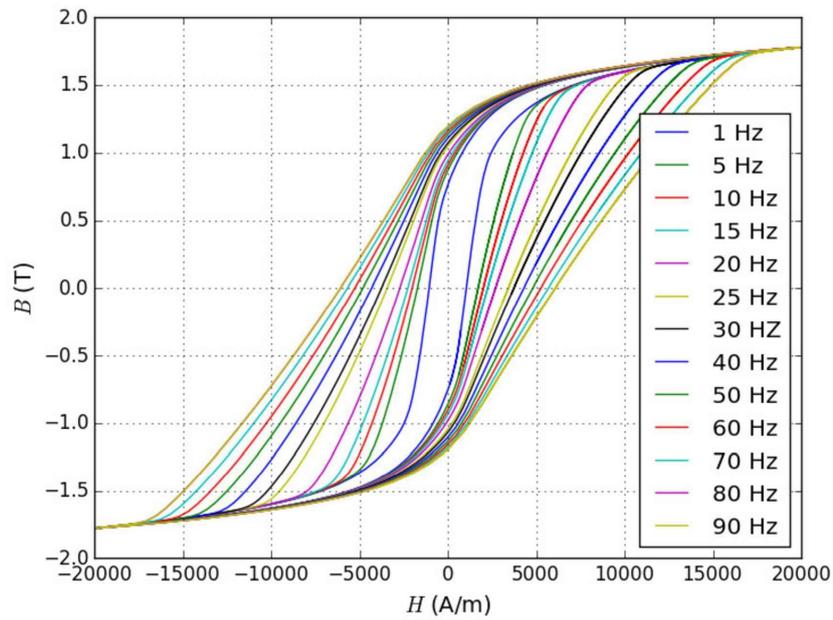


Abbildung 3.22: Hystereseschleifen, bei verschiedenen Frequenzen gemessen

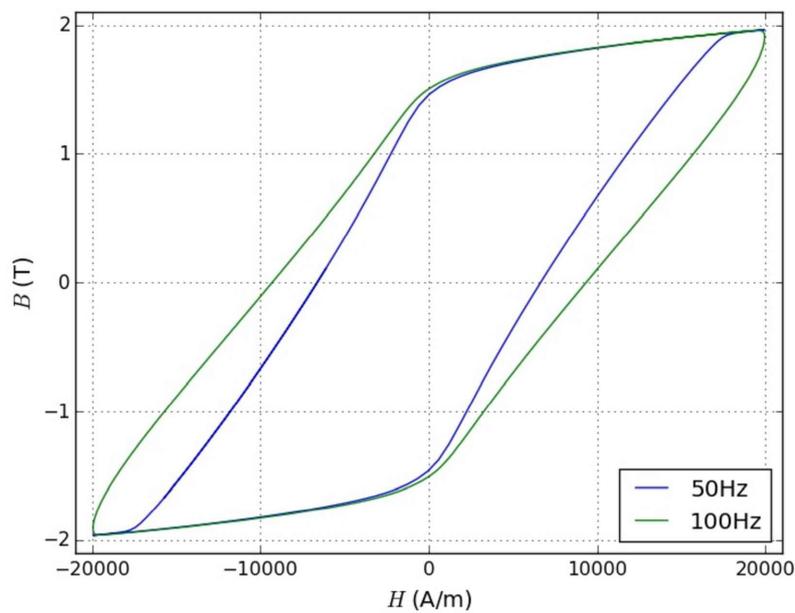


Abbildung 3.23: Abweichungen der Grenzwerte

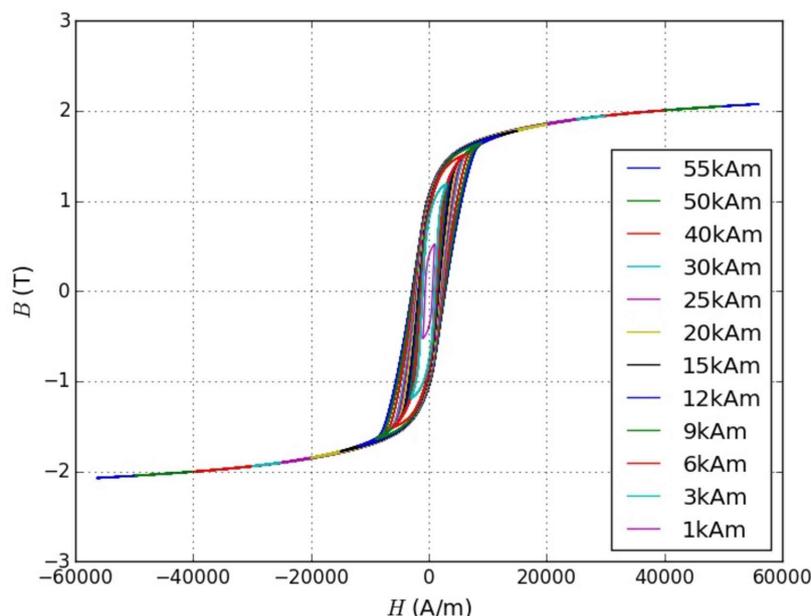


Abbildung 3.24: Kommutierungskurve: Hystereseschleifen

Messungen bei 25°C

Als erste Messung soll nun hier die Messung bei einer Temperatur von $T = 25^\circ\text{C}$ beschrieben werden. Dabei wurden die selben Punkte bestimmt, wie von den externen Messungen bekannt und diese um einige weitere ergänzt. Abbildung 3.24 zeigt nun einige der gemessenen Hystereseschleifen für die Probe R200_II. Diese wurde für alle drei Proben wiederholt. Abbildung 3.25a zeigt die gemessenen B-H- Kurven für die Proben aus R200. Es ist erkennbar, dass diese sehr nahe beieinander liegen, also nur sehr geringe Abweichungen aufweisen. Die höchsten Werte liefert jedoch die Probe II, die niedrigsten die Probe I.

Bei den Proben aus R260 ist dieses Verhalten ebenfalls zu beobachten. Die Kurven sind in Abbildung 3.25b dargestellt.

Bei den Proben R350 liefert die oberste Probe R350_I im ungesättigten Bereich die höchsten Werte, jedoch sind diese im gesättigten Bereich niedriger als die der anderen beiden Proben. Die Kurven sind in Abbildung 3.25c dargestellt.

Auch bei den Proben aus C10E ist das selbe Verhalten zu beobachten. Die beiden Kurven sind in Abbildung 3.25d dargestellt. Vergleicht man die Proben der Schienen, so kann festgestellt werden, dass die Proben aus der Schiene R200 die höchsten Flussdichten liefern. Die Proben aus R260 und R350HT liefern annähernd gleiche Ergebnisse. Die Proben aus den Zwischengliedern aus C10E liefern jedoch

3.6 Ergebnisse

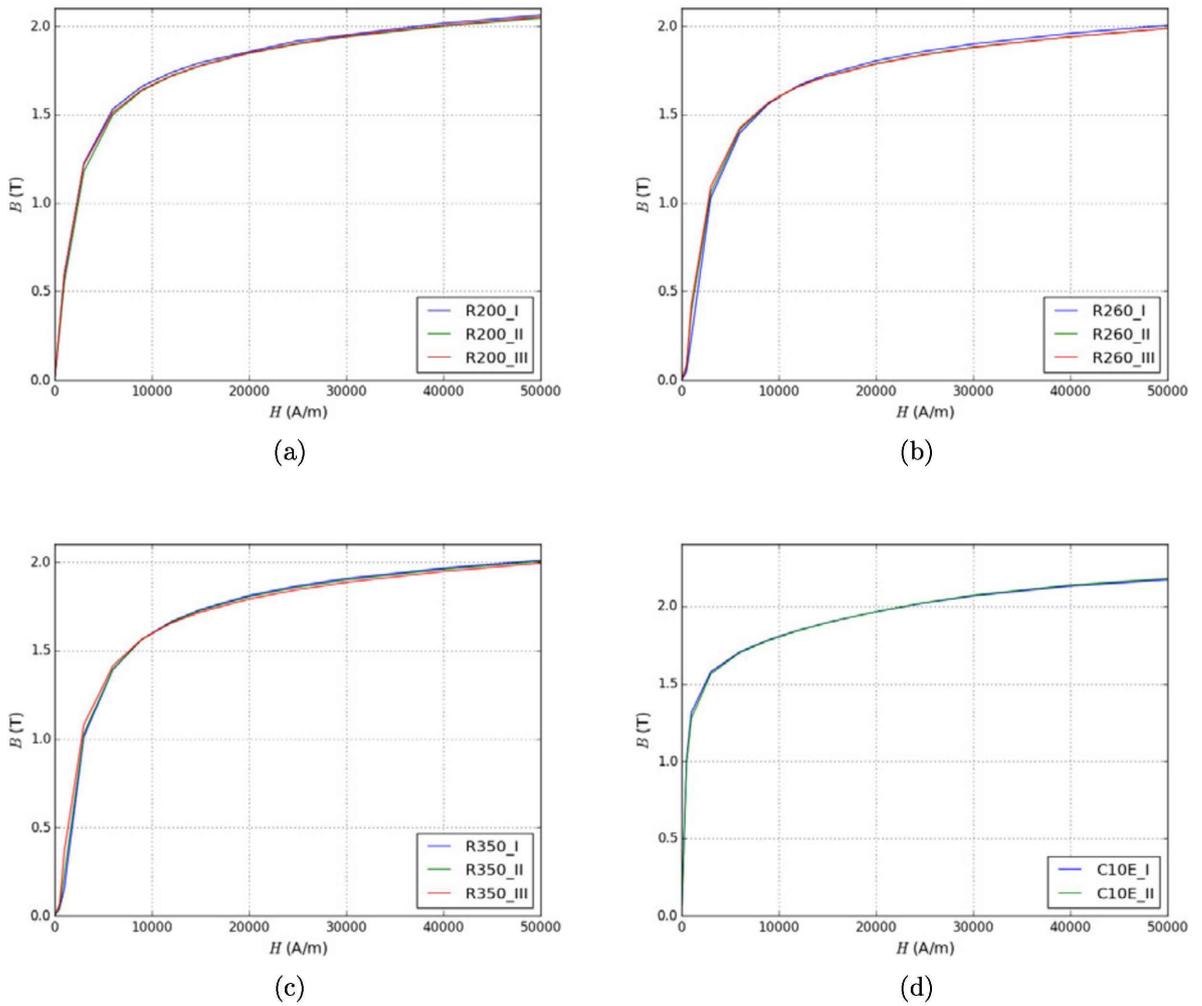


Abbildung 3.25: B-H- Kurven von a) R200; b) R260; c) R350; d) C10E

deutlich höhere Flussdichten als die Schienen.

Temperaturabhängige Messungen

Die oben beschriebene Messung wurde nun für verschiedene Temperaturen wiederholt. In Abbildung 3.26a sind die Ergebnisse für die Probe R200_I abgebildet. Es ist zu erkennen, dass diese, wie zu erwarten, und in [6] beschrieben, zuerst mit steigender Temperatur nur geringfügig abfallen, jedoch der Abfall der Temperaturen ab ca. $T = 50^\circ\text{C}$ stark zunimmt. Die anderen beiden Messungen der R200_II und R200_III bestätigen diesen Abfall und es kann festgestellt werden, dass diese das selbe Verhalten aufweisen. Diese sind im Anhang abgebildet (Abbildung 9.1 und 9.2)

Auch bei den anderen vermessenen Proben ist das selbe Verhalten zu beobachten. Denn auch hier ist zu erkennen, dass der Abfall der magnetischen Flussdichte ab ca. 50°C stark zunimmt, jedoch die Steigerung oberhalb von 150°C wieder abnimmt. Die temperaturabhängigen Kurven der Probe R260_I sind in Abbildung 3.26b dargestellt, die der Probe R350_I in Abbildung 3.26c und die der Probe C10E_I in 3.26d. Die restlichen Kurven sind wieder im Anhang abgebildet. In Abbildung 9.8-9.9 für die Proben R260_II und R260_III, in Abbildung 9.11- 9.12 für die Proben R350_II und R350_III und in Abbildung 9.14 für die Probe C10E_II.

3.6.2 Ergebnisse Neukurven

Die Vermessung der Neukurven wurde nur für $T = 25^\circ\text{C}$ durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass diese jedoch leichte Abweichungen im Bereich des Knicks hin zur Sättigung im Vergleich zu den Kommutierungskurven aufweisen. Die gemessenen Kurven für die Probe R200_II sind in Abbildung 3.27 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass diese speziell bei $H = 6000, 9000 \text{ A/m}$ leicht von der gemessenen Kommutierungskurve abweichen. Diese Abweichung hat jedoch möglicherweise mit der etwas ungenauen rechnerischen Korrektur der Neukurve durch die Drift zu tun, da diese Abweichungen sehr gering sind.

3.6.3 Ergebnisse der Stabproben

Abbildung 3.28 zeigt die Ergebnisse der Stabproben in alle Richtungen für die Proben R200_II_φ. Dieses Ergebnis deckt sich mit den anderen Proben, welche vermessen wurden. Es kann bei diesen Messungen im ungesättigten Bereich keine ausgeprägte Anisotropie festgestellt werden, wie diese z.B. in [6] beschrieben wird.

Im gesättigten Bereich zeigt sich jedoch eine minimale Anisotropie, dies ist in Abbildung 3.29 dargestellt. Darin sind einmal für eine Feldstärke von $H = 25000 \text{ A/m}$ die Abweichungen der Kurve dargestellt. Abbildung 3.29a zeigt die Ergebnisse als

3.6 Ergebnisse

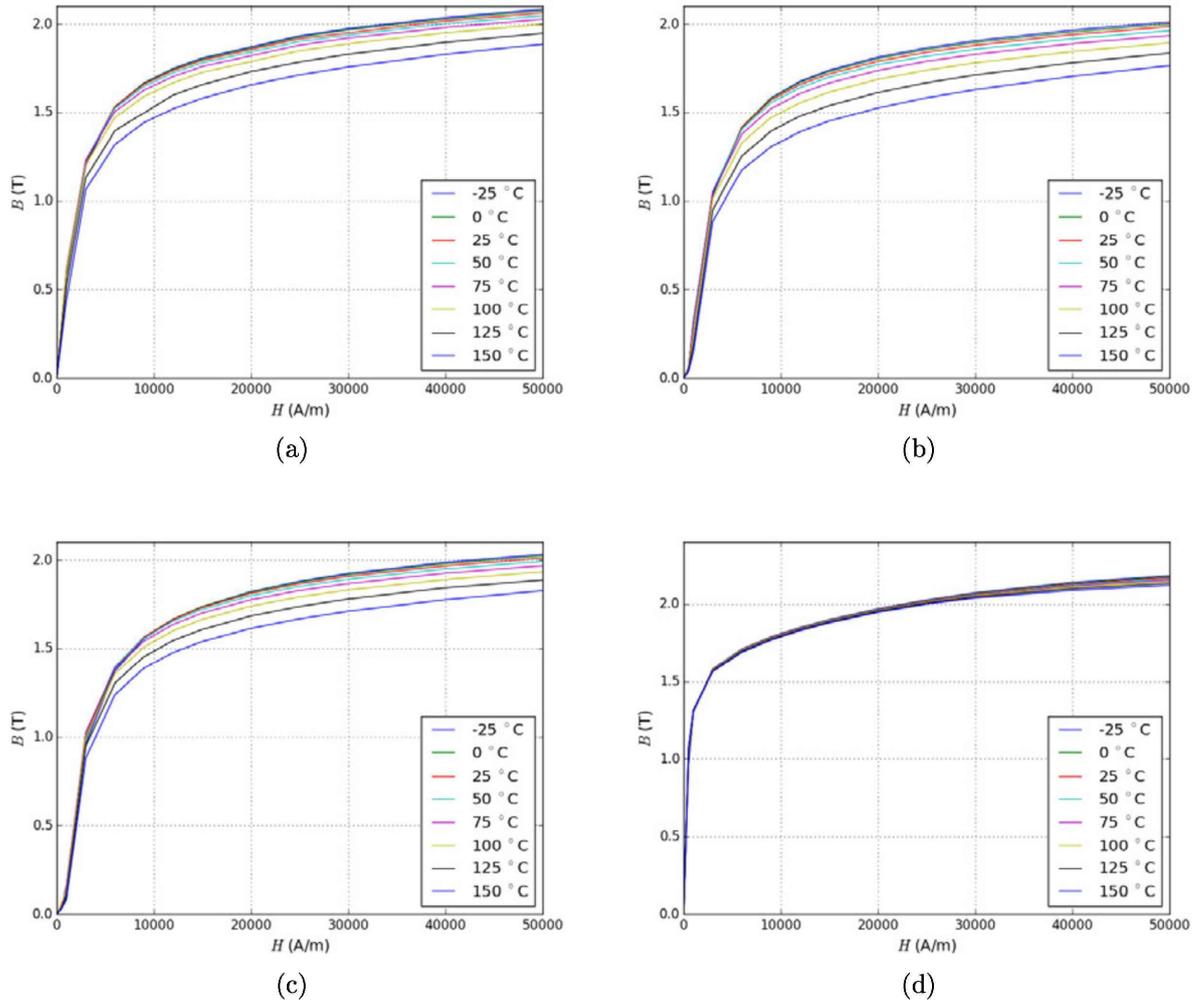


Abbildung 3.26: Temperaturabhängige B-H- Kurven aus a) R200; b) R260; c) R350; d) C10E

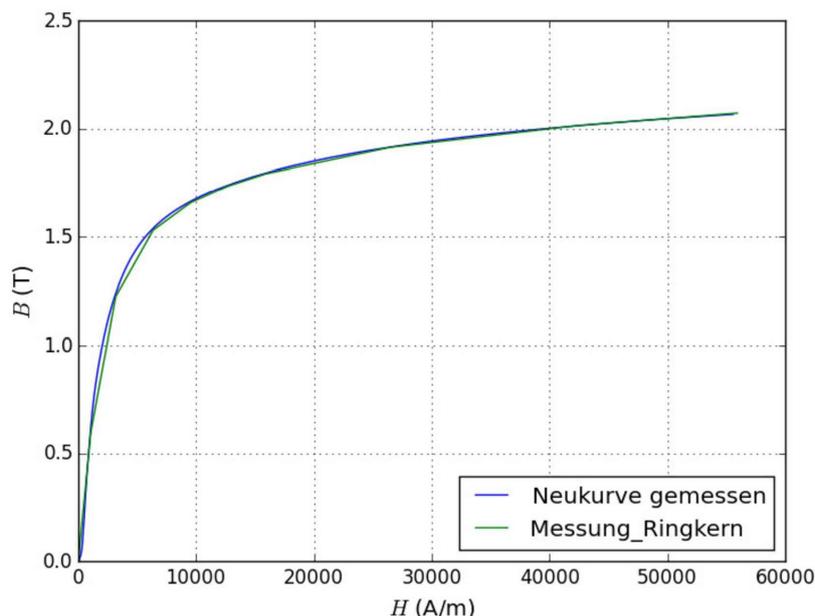


Abbildung 3.27: Neukurve,-Kommutierungskurve

Differenz von $B = 1.85\text{T}$ über den Winkel. Die Kurve wurde mittels eines kubischen Splines interpoliert. Es ist hier eine sehr kleine Anisotropie zu erkennen. In Abbildung 3.29b ist die Abweichung für $H = 200000\text{A/m}$ von $B = 2.25\text{T}$ dargestellt. Abbildung 3.30 zeigt die Ergebnisse aller Proben in Längsrichtung, also 0° . Es ist zu erkennen, dass die Proben hier voneinander abweichen, wobei sie zu höheren Werten von H sehr ähnlich werden, mit Ausnahme der Kurve R200_II_0°. Diese weicht hier ab, in allen anderen Richtungen sind die Kurven jedoch ähnlich.

Die Restlichen Kurven befinden sich im Anhang in Abbildung 9.3 für die Proben R200_I und in Abbildung 9.4 für die Proben R200_III.

3.6.4 Vergleich durch Simulation

Hierbei wurde, sowohl mit den Werten der Stabproben als auch mit den durch die Ringproben ermittelten Werten simuliert. Es konnte festgestellt werden, dass die besten Ergebnisse mit einer Anzahl von 30 Segmenten pro Viertelkreis erzeugt werden. Abbildung 3.31a zeigt die im Zuge der Parameterstudie berechneten Hysteresen der Probe. Diese entstehen aufgrund der simulierten Wirbelströme. Abbildung 3.31b zeigt die maximale Flussdichte für verschiedene Segmentanzahlen. Es ist ersichtlich, dass die Kurve bei 30 Segmenten bereits sehr flach ist. Simuliert wurde wie bereits erwähnt mit dem vollständigen Modell. Abbildung 3.32 zeigt die simulierten B-H-

3.6 Ergebnisse

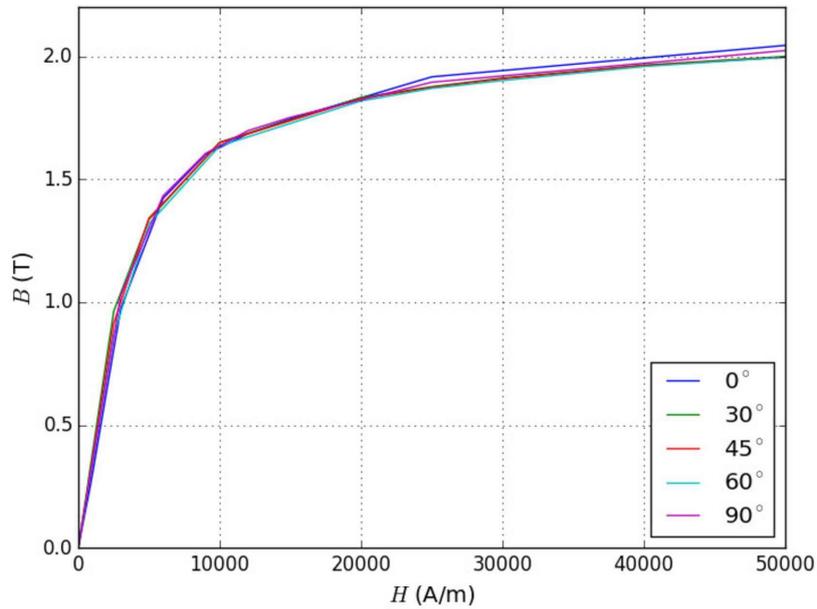


Abbildung 3.28: B-H- Kurven, Stabproben R200_II_φ

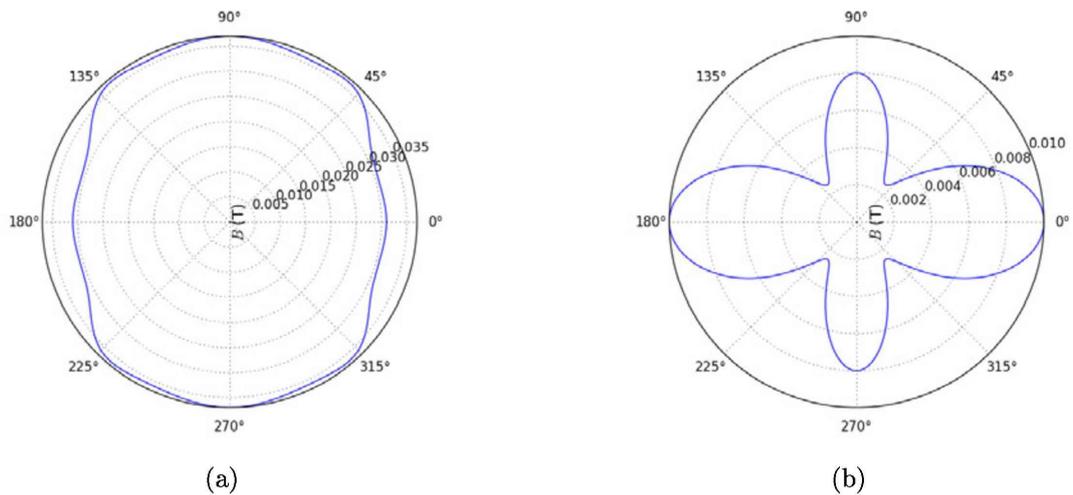


Abbildung 3.29: Anisotropie a) $H = 25000$ A/m, $B = B - 1.85$ T; b) $H = 200000$ A/m, $B = B - 2.25$ T

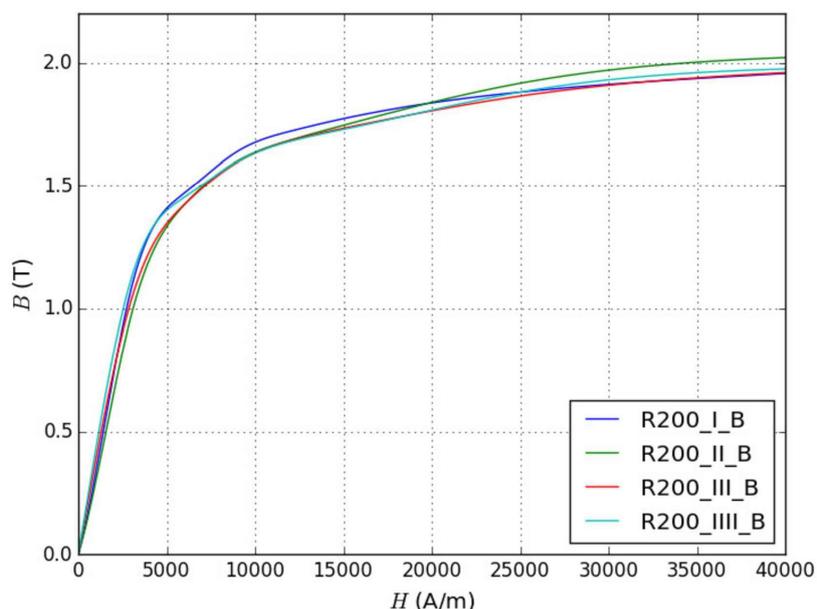


Abbildung 3.30: B-H- Kurven in 0°

Kurven für die Proben R200_I. Es kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Ringproben sich ähneln, jedoch die Ergebnisse der Stabproben vor allem vor der Sättigung geringere Werte aufweisen. Dieses Ergebnis trifft auf alle simulierten Proben zu.

Zusätzlich ist in Abbildung 3.32 noch die mit der Ringprobe vermessene Kuve abgebildet. Es ist zu erkennen, dass diese im ungesättigten Bereich zwischen den beiden Kurven liegt, im gesättigten Bereich jedoch darunter. D.h. die beiden berechneten Kurven überschätzen die Messung.

Die berechneten Kurven für die Proben R200_II und R200_III befinden sich im Anhang in Abbildung 9.5 (R200_II) und 9.6 (R200_III) In Abbildung 3.33b wird das Modell für den Ringkern, und in 3.33c für das segmentierte Modell gezeigt. Es ist zu sehen, dass sich die Ergebnisse sehr ähneln.

3.6 Ergebnisse

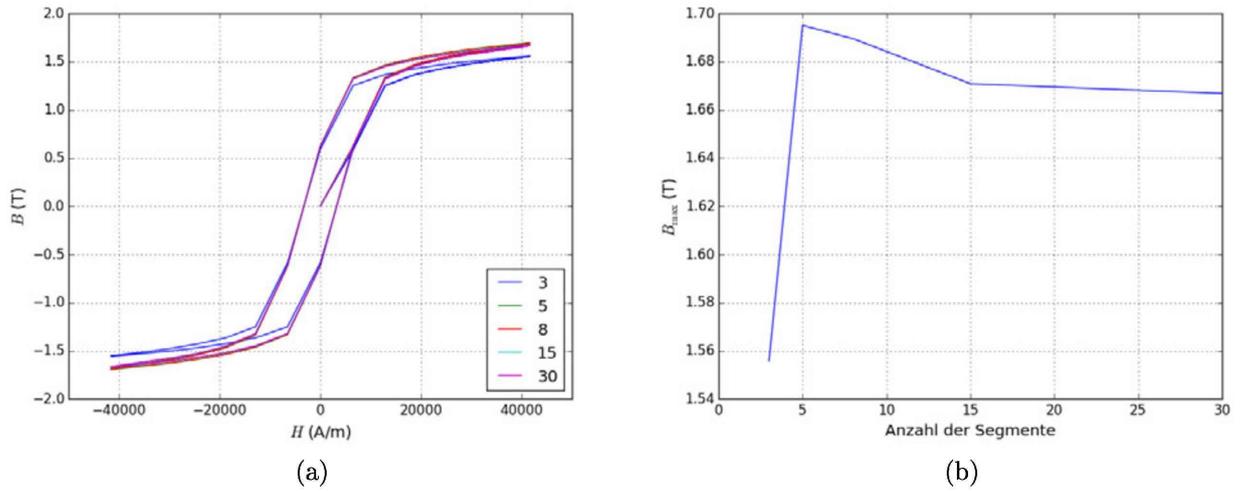


Abbildung 3.31: Parameterstudie zum Ermitteln der Segmentanzahl, a) Berechnete Hystereseen, b) B_{\max} für verschiedene Segmentanzahlen

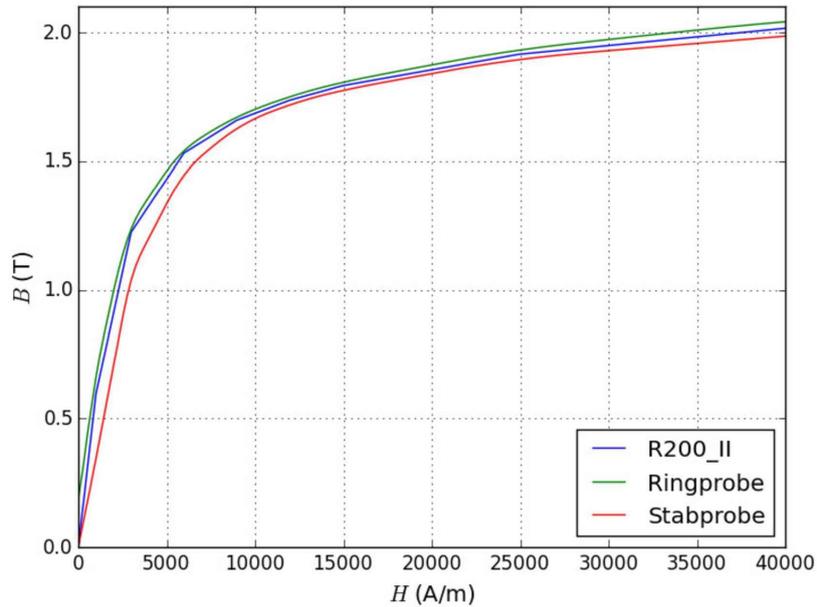


Abbildung 3.32: Vergleich Stabproben Ringprobe

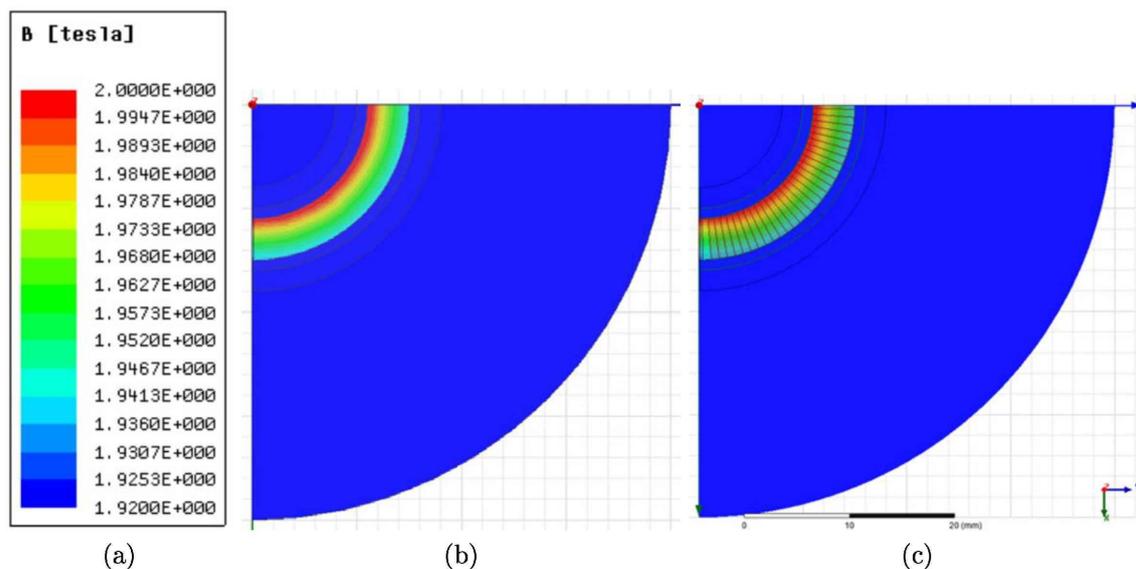


Abbildung 3.33: Plot der magnetischen Flussdichte B , a) Legende; b) 1 Segment c) 30 Segmente

3.7 Diskussion der Ergebnisse

3.7.1 Anisotropie

Bei den durchgeführten Messungen mit den Stabproben aus dem Material R200 konnte festgestellt werden, dass alle Kurven innerhalb einer bestimmten Abweichung liegen. Es konnte eine kleine Anisotropie festgestellt werden, vor allem im gesättigten Bereich der Kurven. Diese entspricht auch in etwa dem in [15] beschriebenen Verhalten, da der kleinste Wert in etwa bei $50-55^\circ$ liegt. Im ungesättigten Bereich konnte jedoch keine ausgeprägte Anisotropie festgestellt werden.

Da die gemessene Anisotropie jedoch sehr kleine Werte annimmt und die Genauigkeit der nachfolgenden Simulation wesentlich geringer ist, wird für die folgenden Simulationen und die weiteren Messungen als Näherung angenommen, dass das Material isotrop ist. Für die anderen beiden Werkstoffe wird deshalb keine Messung der Anisotropie mehr durchgeführt, sondern es wird angenommen, dass hier das Material annähernd isotrop ist.

3.7.2 Temperaturabhängigkeit

Die Temperaturabhängigkeit der Proben zeigt ein ähnliches Verhalten wie in [6] beschrieben. Die Kurve fällt mit zunehmender Temperatur immer steiler ab. Dieses Phänomen ist in allen vermessenen Proben zu beobachten. In Abbildung 3.34 sind die Temperaturkurven für die verschiedenen Proben bei $H = 40000$ A/m dargestellt.

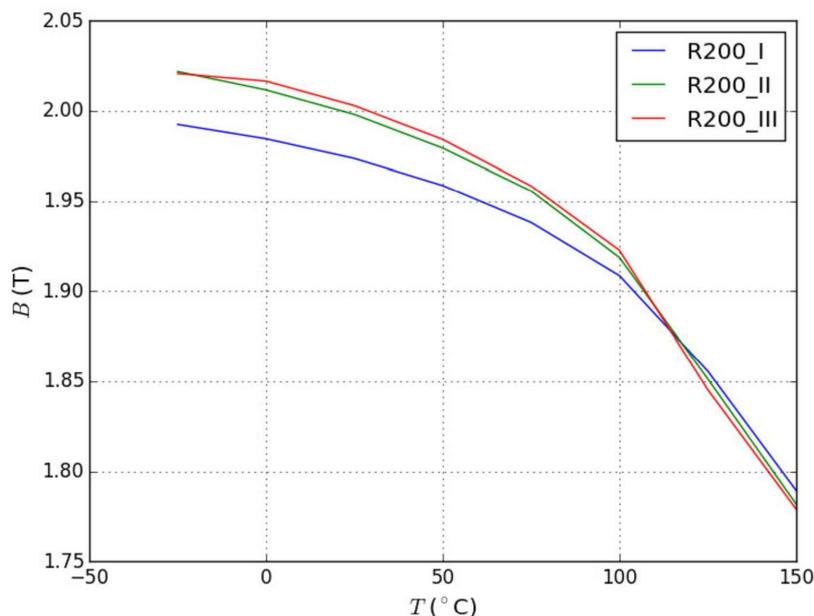


Abbildung 3.34: Temperaturkurven, Proben R200

Darin ist ersichtlich, dass die schlechtesten Werte in der ersten Proben (I) auftreten, diese sich jedoch bei höheren Temperaturen an die anderen beiden Proben annähern.

Vergleicht man nun die Messungen der Schienen (Abbildung 3.26a - 3.26c) und die des Zwischengliedes (Abbildung 3.26d), so kann festgestellt werden, dass die Temperatur hier einen wesentlich geringeren Einfluss hat.

3.7.3 Vergleich der einzelnen Stähle

In Abbildung 3.35 sind die gemessenen B-H- Kurven bei einer Temperatur von $T = 25^{\circ}\text{C}$ abgebildet. Es ist zu erkennen, dass von den vermessenen Schienenmaterialien das Material R200 die höchsten Werte aufweist und die Schienenmaterialien R260 und R350 annähernd die selben Eigenschaften.

In [6] sind die Einflüsse verschiedener Legierungselemente auf die magnetischen Eigenschaften von Stahl angegeben. Darin ist angemerkt, dass der Kohlenstoffgehalt einen starken Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften der Schiene hat.

In [19] sind nun die folgenden C- Gehalte für die einzelnen Schientypen angeführt und in [20] die Werte für C10E.

Daraus ist zu erkennen, dass die C- Gehalte bei R200 die niedrigsten Werte auf-

Tabelle 3.5: Zusammensetzung der verschiedenen Materialien nach [19, 20]

Material	C in %	Si in %	Mn in %	P in %	S in %	Cr in %
R200	0.40-0.60	0.15-0.58	0.70-1.20	≤0.035	≤0.035	≤0.15
R260	0.62-0.80	0.15-0.58	0.70-1.20	≤0.025	≤0.025	≤0.15
R350HT	0.72-0.80	0.15-0.58	0.70-1.20	≤0.020	≤0.025	≤0.15
C10E	0.07-0.13	≤0.40	0.30-0.60	≤0.035	≤0.035	—

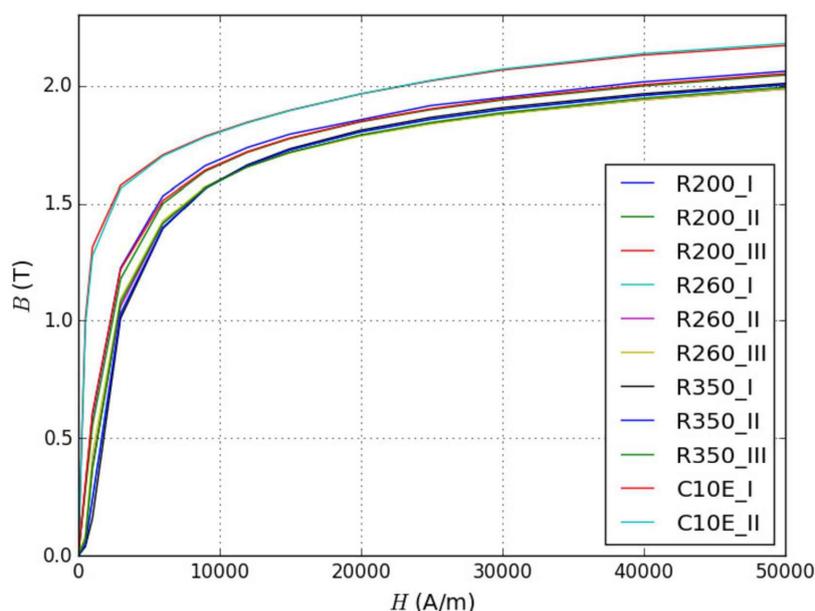


Abbildung 3.35: B-H- Kurven der Proben bei 25°C

weisen, sich der Bereich der Schienen R260 und R350HT überschneidet. Weiters ist zu erkennen, dass die beiden Schienen R260 und R350HT sich von der Zusammensetzung kaum unterscheiden. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Schienenmaterialtypen ist, dass die Schienen aus R350HT am Schienenkopf gehärtet werden, wodurch diese ein feinperlitisches Materialgefüge aufweisen [19]. Dies würde auch die annähernd gleichen Werte erklären. Jedoch spielen auch noch weitere chemische Elemente hier eine Rolle.

Um festzustellen, wie die tatsächliche Zusammensetzung der Schienen aussieht, wurde eine Materialanalyse durchgeführt. Dies wurde mittels Materialspektroskopie erledigt. Das Verfahren ist in [21] beschrieben. Für die Schiene, aus der die Proben R200 entnommen wurden, wurde in den selben Tiefen jeweils eine Messung durchgeführt. Für die Materialien R260 und R350 wurde im Kopfbereich der Schiene jeweils

3.7 Diskussion der Ergebnisse

nur ein Mittelwert bestimmt und für die beiden Proben aus C10E wurde wieder jeweils an der Entnahmestelle die Zusammensetzung bestimmt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.6 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Zusammensetzung den Spezifikationen entspricht. Abbildung 3.36 zeigt nun verschiedene den Zusammenhang zwischen Kohlenstoffgehalt und der Flussdichte B bei $H = 50000$ A/m. Obwohl im allgemeinen die Flussdichte mit steigendem Kohlenstoffgehalt sinkt, kann hier jedoch kein eindeutiger Zusammenhang festgestellt werden.

Die Abweichungen der Flussdichten im ungesättigten Bereich sind jedoch wesent-

Tabelle 3.6: Tatsächliche Zusammensetzung der verschiedenen Materialien

Material	C in %	Si in %	Mn in %	P in %	S in %	Cr in %	Ni in %
R200_I	0.52	0.293	1.02	0.024	0.029	0.023	0.023
R200_II	0.54	0.296	1.03	0.023	0.026	0.020	0.023
R200_III	0.526	0.293	1.04	0.023	0.029	0.020	0.023
R260	0.68	0.305	1.03	0.015	0.019	0.039	0.011
R350HT	0.74	0.426	1.08	0.020	0.014	0.034	0.013
C10E_I	0.113	0.068	0.395	0.015	0.010	0.054	0.032
C10E_II	0.073	0.182	0.51	0.021	0.021	0.124	0.099

lich größer als im gesättigten, jedoch mit größer werdenden Feldstärken werden diese kleiner, bis die Differenz nur noch sehr klein ist. Am Ende des gemessenen Bereiches weisen beide jedoch annähernd die selbe Steigung auf.

Die Auswirkungen speziell des Kohlenstoffgehaltes nehmen mit höherem Gehalt zu. Vergleicht man die Proben aus C10E, so haben diese trotz großer Differenzen in der Zusammensetzung annähernd die selben B-H- Kurven. Im Vergleich dazu kann bei den restlichen Proben mit steigendem C- Gehalt eine größere Abweichung der Kurven aufgrund von Schwankungen des Kohlenstoffgehaltes festgestellt werden. Auch die Auswirkungen der erhöhten Temperatur sind bei C10E am geringsten. Auch hier dürfte dies am C- Gehalt liegen.

Magnetische Eigenschaften über die Tiefe

Hier konnte festgestellt werden, dass die Eigenschaften des Materials über die Tiefe für alle 3 vermessenen Schienenwerkstoffe variieren. Aus Abbildung 3.25 geht hervor,

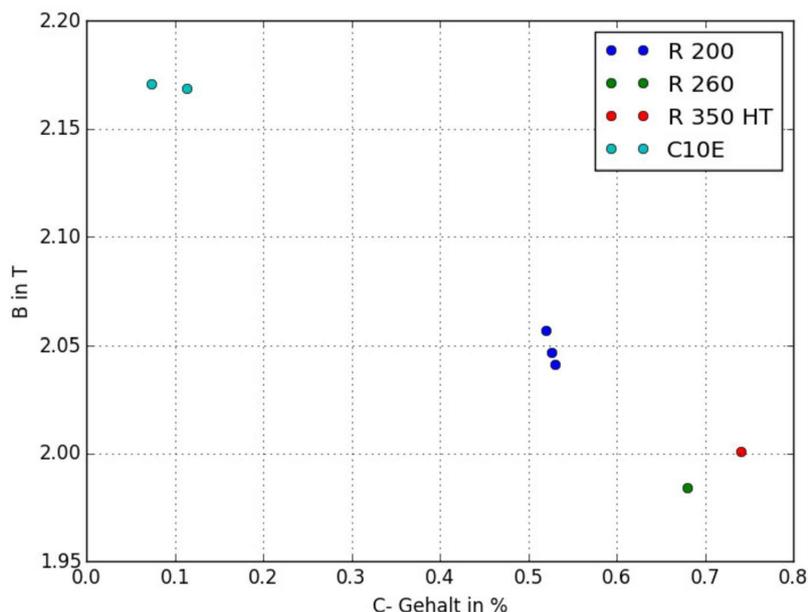


Abbildung 3.36: Vergleich Kohlenstoffgehalt Flussdichte

dass die schlechtesten Eigenschaften jeweils an der Oberfläche der Schienen auftreten und die besten in den Schichten darunter. Das selbe Ergebnis zeigen auch die Ergebnisse der Stabproben im gesättigten Bereich.

Es kann jedoch festgestellt werden, dass die Abweichungen der obersten Probe von den anderen mit größeren Kohlenstoffgehalten größer wird. Die kleinsten Abweichungen zeigt der Werkstoff R200, die größten der Werkstoff R350.

Diese ist an der Oberfläche speziell einsatzgehärtet. Dadurch besitzt dieser Schienentyp hier einen anderen Kohlenstoffanteil. Dies könnte eine Erklärung sein, weshalb die Oberste Probe bei allen Kurven von R350HT die geringsten Flussdichten aufweisen.

Vergleich: Neukurve Kommutierungskurve

Wie in Abbildung 3.27 zu sehen, gleichen sich die beiden Kurven großteils. Da für die Neukurve jedoch keine exakte Messung möglich ist, da die beiden Kurven aufeinander bezogen werden müssen, um diese zu korrigieren, und da die Korrektur eventuell größere Ungenauigkeiten aufweist, wird in Folge auf die Messung der Neukurve verzichtet.

Es kann jedoch festgestellt werden, dass sich die Neukurve und die Kommutierungs-

kurve, welche gemessen wurde, sehr ähneln, weshalb angenommen werden kann, wie in [6] beschrieben, dass diese die selben Werte liefern.

Vergleich Ringproben Stabproben

Der Vergleich der Ringproben und der Stabproben zeigt deutlich, dass die Stabproben im Bereich unterhalb der Sättigung geringere Werte aufweisen. Dies ist in Abbildung 3.32 dargestellt. Hier sind die Werte der Simulationen verglichen. Vergleicht man die Simulation mit der Messung der Ringproben, so kann festgestellt werden, dass die Simulation höhere Werte liefert als die gemessenen B-H- Kurven. Die Abweichungen liegen jedoch in einem Bereich von weniger als 1%.

Der Vergleich der beiden Simulationen zeigt, dass die Werte im ungesättigten Bereich voneinander abweichen. Ein direkter Vergleich der gemessenen Werte liefert das selbe Ergebnis, wobei die einzelnen Kurven der Stabproben wieder voneinander abweichen. Die Werte stimmen jedoch im gesättigten Bereich sehr gut überein.

Die Ursache für diese Abweichung dürfte darin liegen, dass die Stabproben mit einem anderen Verfahren vermessen wurden. Jedoch kann festgestellt werden, dass im gesättigten Bereich die Ergebnisse besser übereinstimmen.

3.7.4 Fehler bei den Messungen

Es wurde die selbe Messung der Hysterese der Probe R200_I bei $H = 50000 \text{ A/m}$ an mehreren Tagen mit den selben Parametern durchgeführt. Bei der Auswertung ergaben sich für die Mittelwerte von ΔH und ΔB die folgenden Streuungen:

- ΔH : 0.02%- 0.1%
- ΔB : 0.015%-0.09%

Daraus ist ersichtlich, dass die Messung sehr genau durchgeführt werden konnte. Die größten Fehler ergaben sich beim herstellen von einer neuen Primär und Sekundärspule an der Probe. Es kann jedoch festgestellt werden, dass der Fehler, welcher bei der Messung auftritt sehr gering ist.

Es ergeben sich folgende weitere Messfehler:

- Da sich die Dimensionen direkt auf das Ergebnis auswirken und diese kleine Werte aufweisen, ist eine genaue Vermessung der Probendimensionen wichtig. Die Proben wurden außen mit einer Mikrometerschraube mit einer Genauigkeit von $\pm 0.005 \text{ mm}$ vermessen. Der Innendurchmesser wurde mit einer Innenmikrometerschraube mit einer Genauigkeit von ebenfalls $\pm 0.005 \text{ mm}$ vermessen.

3.7 Diskussion der Ergebnisse

- Die Messapparatur besitzt einen Fehler. Dieser ist jedoch sehr klein, und kann mit Ausnahme des Offsets vernachlässigt werden.

4 Simulation des vereinfachten Modells

Als erstes Modell des Magneten wurde ein stark vereinfachtes Modell mit einem einzelnen Gliedermagneten simuliert.

Eine genaue Beschreibung der Grundlagen der FE- Methode für niederfrequente Magnetfelder ist z.B. in [5, 22] zu finden und soll hier nicht gesondert erwähnt werden. Da die Berechnungen des Magneten statisch erfolgen, sind die Ansätze für eine niederfrequente Analyse hier ausreichend.

Ziel dieser Simulationen ist es, die Haftkraft F_H des Magneten möglichst genau vorherzusagen. Hierfür ist eine Kraftberechnung notwendig. Dies stellte sich teils als nichttrivial heraus. Zuerst sollen jedoch kurz einige Grundlagen zur Kraftberechnung mit der FEM- Methode erwähnt werden. Zur Simulation der Haftkräfte wurde das Softwarepaket *Maxwell 3D 16.0* der Firma *ANSYS* verwendet.

4.1 Berechnung von Haftkräften

Für die Berechnung von magnetischen Kräften werden in der Literatur mehrere Möglichkeiten genannt:

- Die Kraft kann mit dem Maxwell' schen Tensor durch Integrieren über die Oberfläche berechnet werden. [23]
- Eine weitere Möglichkeit ist, die Haftkraft mit der Methode der virtuellen Arbeiten zu berechnen [23, 24]
- Eine weitere in der Literatur erwähnte Möglichkeit ist es, die Kräfte mit der Methode der äquivalenten Quellen [25] zu berechnen.

In der verwendeten Software ist zur Berechnung der magnetischen Kräfte die Methode der virtuellen Arbeiten implementiert. Diese ist in [5] beschrieben.

Die Berechnung der Kraft erfolgt dabei nach der Formel

$$\mathbf{F}_r = -\frac{\delta}{\delta r} \int_V \left(\int_0^B \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B} \right) dV. \quad (4.1)$$

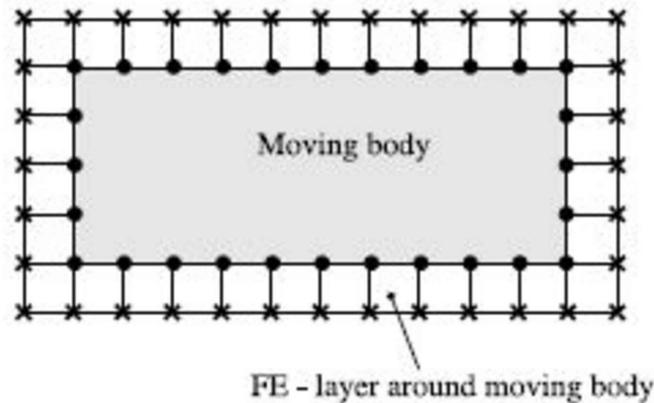


Abbildung 4.1: Beweglicher Körper mit deformierbaren Elementen [5]

Bei der Berechnung wird der magnetische Fluss B konstant gehalten. Das Problem, welches hier nun auftritt ist, dass sich um den Körper eine Schicht aus Elementen befinden muss, welche virtuell verzerrt wird. Dies ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Darin ist ein beweglicher Körper dargestellt, der von einer dünnen Schicht deformierbarer Elemente umgeben ist.

Für die Methode der virtuellen Arbeiten bedeutet das, dass zwischen dem Körper, welcher die Anziehungskraft erzeugt, und dem Körper, auf welchen die Anziehungskraft wirkt, immer eine dünne Schicht des ihn umgebenden Materials sein muss. Um dieses Problem zu lösen, gibt es verschiedene Methoden:

- Variieren des Luftspaltes und Extrapolieren der Haftkraft für den Fall, dass beide Körper in Kontakt sind.
- In der Literatur findet sich zudem die Methode des virtuellen Luftspaltes, welche jedoch in den diversen FEM- Programmen nicht implementiert ist.

Eine ausführliche Beschreibung der Methode der virtuellen Kräfte ist z.B in den Artikeln [23, 24] gegeben, eine Beschreibung, wie diese Verfahren in ein FEM- Programm implementiert werden können, ist in [5] angegeben.

Eine Weitere Möglichkeit, Haftkräfte zu berechnen ist mit dem Maxwell' schen Tensor. Diese benötigt jedoch auch einen dünnen Luftspalt zwischen den beiden Kontaktpartnern. Im Folgenden wird angenommen, dass sich eine sehr dünne Luftschicht zwischen den Kontaktpartnern befindet. Zunächst wird die Bedingung am Übergang zwischen zwei Materialien betrachtet. Dabei kann festgestellt werden, dass

- die magnetische Flussdichte in normaler Richtung B_n stetig von einem Körper in den anderen übergeht.

- die magnetische Feldstärke in tangentialer Richtung H_t ebenso stetig übergeht.

Betrachtet man nun den kleinen Luftspalt zwischen zwei Körpern und die beiden Übergänge, so kann festgestellt werden, dass an beiden Seiten jeweils die beiden erwähnten Komponenten B_n und H_t stetig von einem Material in das andere übergehen. Lässt man nun den Luftspalt gegen 0 gehen, so besteht dieser nur noch aus den beiden Übergängen. Man erhält für den Luftspalt die folgende vereinfachte Oberflächenkraftdichte

$$f_{(O)} = \frac{B_n^2}{2\mu_0} - \frac{H_t^2 \mu_0}{2}. \quad (4.2)$$

Daraus lässt sich die Anziehungskraft berechnen, indem diese Kraftdichte über die Oberfläche integriert wird

$$F_H = \int_O \left(\frac{B_n^2}{2\mu_0} - \frac{H_t^2 \mu_0}{2} \right) dO. \quad (4.3)$$

Dies ist jedoch eine Vereinfachung, welche nur die Kraft normal zur betrachteten Ebene liefert.

Für die Ermittlung der Haftkräfte sollen im Folgenden beide Varianten benutzt, und ihre Werte verglichen werden, da die Berechnung mit dem Maxwell' schen Oberflächenkraft- Tensor relativ leicht in *Maxwell 3D* implementiert werden kann.

4.2 Modell

Als einfaches Modell wurde die Geometrie eines Magnetgliedes verwendet. Jedoch wurden

- sämtliche Radien vernachlässigt,
- ein stark vereinfachtes Schienenprofil verwendet,
- der gesamte Magnetkörper entfernt.

Als Werkstoff für das Magnetglied wurde S235 verwendet. Die magnetische B-H-Kurve für das Material S235JR war bereits vorhanden und wurde als Neukurve mithilfe von Stabproben ermittelt. Abbildung 4.2 zeigt nun das verwendete vereinfachte Berechnungsmodell. Dieses besteht aus den in Tabelle 4.1 angeführten Teilen und Materialien.

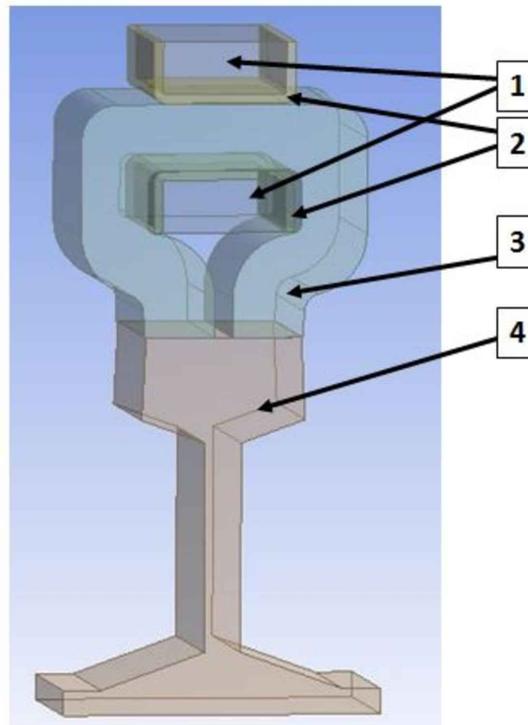


Abbildung 4.2: Vereinfachtes Berechnungsmodell

Tabelle 4.1: Vereinfachtes Modell

	Teil	Material
1	Spule	Kupfer
2	Magnetkörper	S235
3	Magnetglied	S235
4	Schiene	div. Messwerte

Als Umgebungsmedium wurde Luft verwendet. Die Materialparameter für Kupfer und für Luft wurden aus der *Maxwell 3D*-Materialdatenbank übernommen (copper; air).

Das Modell wurde im *Design Modeler* von *ANSYS* erstellt und anschließend über die integrierte Schnittstelle an *Maxwell 3D* übergeben (siehe Abbildung 4.3).

4.2.1 Ausrichtung

Für alle folgenden Modelle wurde ein Standardkoordinatensystem gewählt, welches die Richtungen für alle weiteren Simulationen festlegt:

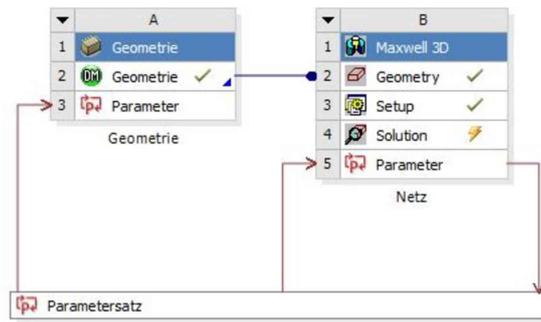


Abbildung 4.3: Verknüpfung von *Design Modeller* und *Maxwell 3D*

- Die x- Achse wurde in Fahrrichtung des Zuges in der Mitte der Schienenoberseite festgelegt.
- Die y- Achse wurde normal darauf festgelegt, in der Mitte der Ebene der Schienenoberseite, nach außen zeigend.
- Die z- Achse ist die Vertikale auf die Ebene der Schienenoberseite.

Abbildung 4.4 zeigt das Modell der vereinfachten Schiene mit dem gewählten Koordinatensystem. Dieses Koordinatensystem wird im Folgenden immer verwendet, wobei bei den genauen Modellen der Koordinatenursprung an der Oberfläche der Bearbeitung der Schiene definiert wird.

4.2.2 Annahmen

Für alle folgenden Simulationen wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Es wurde ein niederfrequenter Ansatz verwendet, da nur statische Analysen durchgeführt werden.
- Es wurde die Annahme getroffen, dass die Veränderung der magnetischen Eigenschaften von den mechanischen Spannungen unabhängig ist, da diese eher gering ausfällt.
- Die Materialien sind magnetisch und mechanisch isotrop. Dies trifft zwar nicht vollständig zu, wie bereits im ersten Teil der Arbeit gezeigt wurde, jedoch ist diese Näherung für die zu erreichende Genauigkeit ausreichend.
- Die Auswirkungen der Haftkräfte auf den Luftspalt werden vernachlässigt, außer in den Simulationen mit "physikalisch korrektem Luftspalt".
- Bei den Simulationen haben alle Teile eine konstante Temperatur von 25°C.

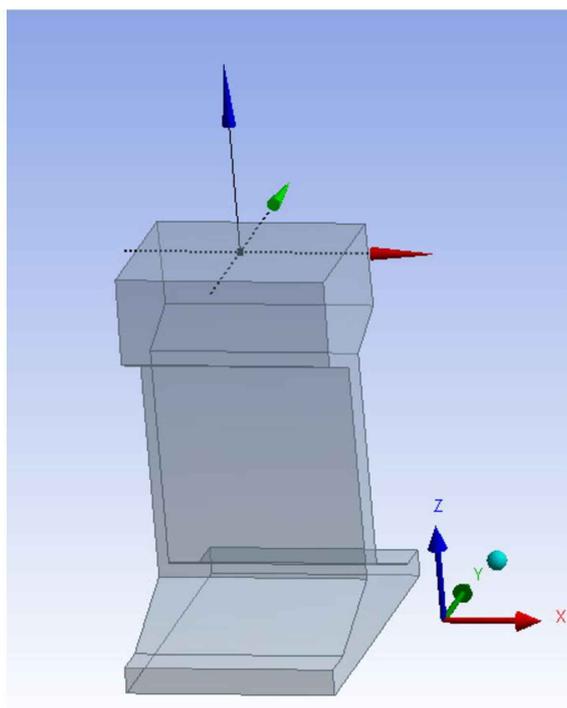


Abbildung 4.4: Koordinatensystem für die Simulation der MG- Bremsen Modelle

4.3 Randbedingungen und Erregungen

Als Randbedingungen für den Körper wurden die folgenden festgelegt:

- Die Isolierschicht zwischen Magnetkörper und Spule wurde wieder, wie bereits bei der Simulation des Ringkerns, vernachlässigt und durch eine unendlich dünne Isolierbedingung ersetzt.
- Um die Simulationszeit und die Komplexität des Modells zu verringern, wurde nur ein Magnetglied berechnet. Es wird angenommen, dass das mittlere Magnetglied des Magneten simuliert wird, siehe Abbildung 4.5. Darin ist das Simulationsbeispiel markiert. Da an beiden Seiten des Teilungsbleches symmetrische Teile folgen, wird angenommen, dass das Magnetfeld in der Mitte des Teilungsbleches annähernd Tangential zur Teilungsebene verläuft. Dies wurde mit der Randbedingung „Symmetry odd“ realisiert, welche von der Software automatisch an den Außenflächen festgelegt wird. Diese definiert das umgebende magnetische Feld (\mathbf{B}) am Rand so, dass dieses tangential an die Ränder der Umgebung verläuft. So wurde die angenommene Symmetrie korrekt modelliert.

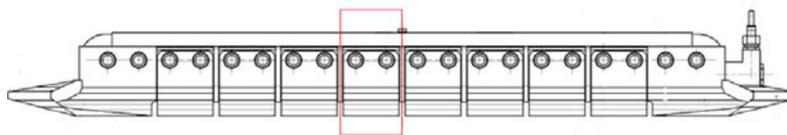


Abbildung 4.5: Simuliertes Magnetglied

- Das Umgebungsmedium wurde mit einem Abstand von 75mm von der Außenkante der Körper in $+y$, $-y$, $+z$, $-z$ Richtung gewählt. Dies ist zwar eine eher geringe Größe es konnte jedoch in im Vorfeld durchgeführten Simulationen gezeigt werden, dass diese Größe ausreicht.

Ansonsten mussten keine weiteren Randbedingungen mehr gesetzt werden, da die von Maxwell vorausgesetzten die Physik korrekt abbilden.

Als Erregung wurde an den beiden Spulen, jeweils in entgegengesetzte Richtung, ein Strom definiert. Die Spulen wurden als Volumenkörper mit einer Windung definiert. Es sollte eine Erregung von 1000–4000 AW in Schritten von 1000 AW simuliert werden. Als Strom, welcher in der Spule fließt wurde aufgrund der Windungszahl $N = 1$ $I = 4000$ A festgelegt. Es ergibt sich jedoch kein Unterschied, wenn mit einer Windungszahl von $N = 100$ und einem Strom von $I = 40$ A simuliert wird.

Im Folgenden soll, sofern von einer Erregung gesprochen wird, immer die Stromstärke mit der Windungszahl multipliziert werden. Die Einheit AW (Ampere-windungen) ist zwar physikalisch nicht korrekt, da hier Ampere A zu verwenden wären, dies wird jedoch hier nicht gemacht, um die Erregung zu kennzeichnen. Abbildung 4.6 zeigt die aufgebrachten Randbedingungen und Erregungen.

Es wurde hier auf eine Berechnung mit höheren Erregungen als $\Theta = 4000$ AW verzichtet, da bei höheren Erregungen die magnetischen Flussdichten B in der Simulation höher wären als die gemessenen. Eine Simulation mit höheren Erregungen soll erst später bei den genauen Simulationen durchgeführt werden, siehe dazu Kapitel 5.3.5.

Die Haftkraft wurde als Kraft auf die Schiene ermittelt. Es wurde hierfür die virtuelle Kraft auf die Schiene definiert.

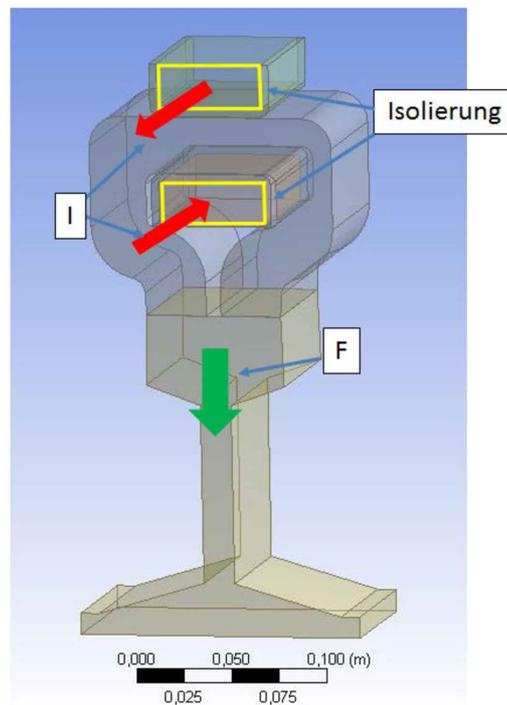


Abbildung 4.6: Randbedingungen und Erregungen des Modelles

4.4 Vernetzung

Bevor mit der Berechnung begonnen werden konnte, musste, um eine geeignete Vernetzung zu wählen, zuerst eine Konvergenzstudie durchgeführt werden, um die Vernetzung festzulegen.

Die verwendete Software besitzt zwar einen *adaptiven Vernetzungsalgorithmus*, jedoch führt dieser speziell bei den kleinen verwendeten Luftspalten zwischen dem Magnetglied und der Schiene zu größeren Abweichungen, sofern dieser nicht genauer definiert wird. Im Folgenden wird, sofern nicht näher erläutert, wenn der Luftspalt erwähnt wird, immer auf den Luftspalt zwischen dem Magnetglied und der Schiene Bezug genommen.

Als Elementtyp mit den zugehörigen Ansatzfunktionen können nur die in *Maxwell 3D* standardmäßig verwendeten Tetraederelemente mit quadratischen Ansatzfunktionen [18] verwendet werden. Es ist hier nicht möglich, im Luftspalt eine Vernetzung mit Hexaeder-Elementen durchzuführen. Dies führt speziell im Luftspalt dazu, dass die Elemente stark verzerrt werden. Abbildung 4.7a zeigt das Netz, welches ohne Vernetzungssteuerung im Luftspalt generiert wurde. Jedoch wurde der Luftspalt hier auf $t = 0.1$ mm vergrößert, um das Netz besser darstellen zu können. Abbildung 4.7b

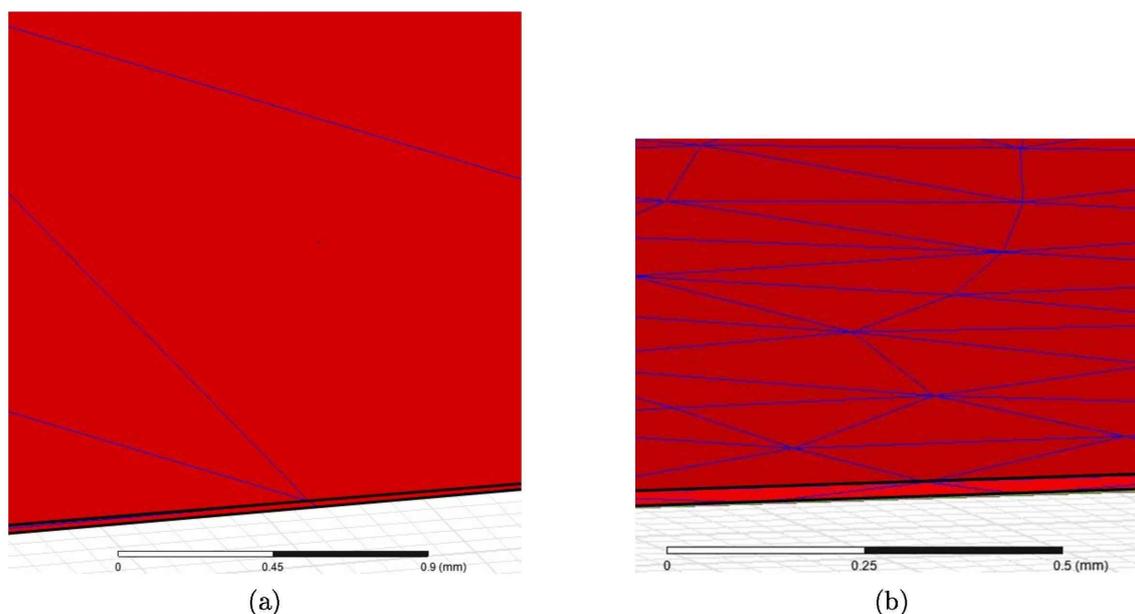


Abbildung 4.7: Netz im Luftspalt a) ohne Verfeinerung; b) $h=0.5\text{mm}$

zeigt das bereits verfeinerte Netz mit einer Elementkantenlänge von $h = 0.5\text{ mm}$. Es ist zu erkennen, dass, trotz erreichter Fehlertoleranz, im Netz ohne Verfeinerung, dieses stark verzerrt ist.

Es wurde nun speziell für die Elementkantenlänge h im Luftspalt eine Konvergenzstudie durchgeführt. Das hierfür generierte Modell weist die selbe Querschnittsfläche auf wie das tatsächliche Modell. Jedoch wurde die Länge des Modells auf 5 mm reduziert, um die Elementanzahl zu verringern und somit die Berechnungszeit zu verkürzen. Außerdem wurde die Elementkantenlänge auf der Schienenoberseite (wo sich Magnet und Schienen berühren) mit verschiedenen Elementkantenlängen h definiert. Hierfür wurde ein Luftspalt von $t = 0.02\text{ mm}$ und eine Erregung von $\Theta = 2000\text{ AW}; 4000\text{ AW}$ gewählt.

Das Ergebnis dieser Konvergenzstudie ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass die Kraft ab einer Elementkantenlänge von $h \leq 1.2\text{ mm}$ gegen einen fixen Wert für die ermittelte Haftkraft konvergiert, bzw. die Abweichungen wesentlich kleiner sind als die verwendete Fehlertoleranz.

Es wurde gleichzeitig auch die dafür benötigte Simulationszeit berücksichtigt. Dabei konnte, wie zu erwarten, festgestellt werden, dass sich diese mit kleineren Werten für die Elementkantenlänge stark vergrößert.

Für die Simulation des vereinfachten Modells wurde, da hier nur das generelle

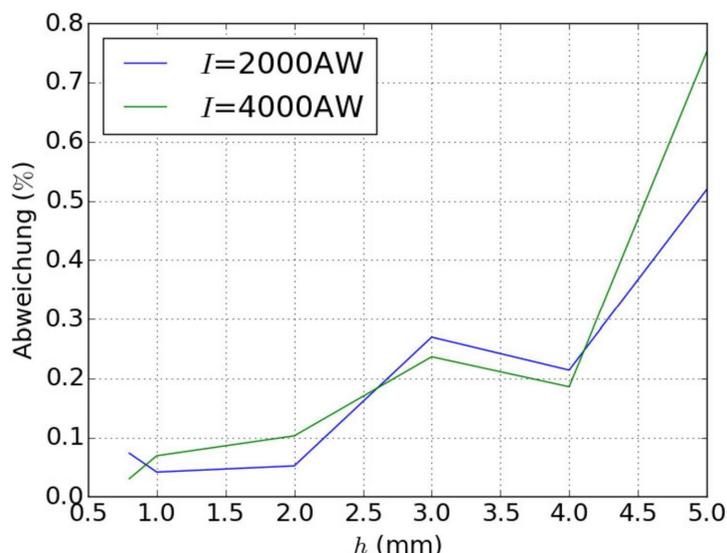


Abbildung 4.8: Konvergenzstudie, vereinfachtes Modell

Verhalten des Modells ermittelt werden sollte, mit einer Elementkantenlänge von $h = 1.2 \text{ mm}$ gerechnet, da dies für die Berechnung des vereinfachten Modells, an welches keine sehr hohen Anforderungen gestellt werden, einen guten Kompromiss darstellt.

4.5 Abbruchkriterien

Da es sich bei elektromagnetischen Kraftberechnungen immer um nichtlineare Rechnungen handelt [5], musste ein geeignetes Abbruchkriterium gewählt werden. Dafür wurden zwei Kriterien gewählt, welche beide erfüllt werden mussten:

- Es wurde das in *Maxwell 3D* implementierte Standardverfahren, welches das Residuum der Energie berechnet, mit einer maximalen Fehlertoleranz von 0.5% verwendet.
- Zusätzlich wurde bei jedem Schritt die Kraft berechnet. Hier wurde ebenfalls das Residuum nach jedem Schritt berechnet und mit einem maximalen Fehler von 1% spezifiziert. Dies stellt einen guten Kompromiss zwischen Rechenfehler und Berechnungszeit dar, da in Vorversuchen festgestellt werden konnte, dass die Genauigkeit der Lösung nur geringfügig steigt, bei einer kleineren Fehlertoleranz jedoch die Berechnungszeit stark zunimmt (Abbildung 4.9).

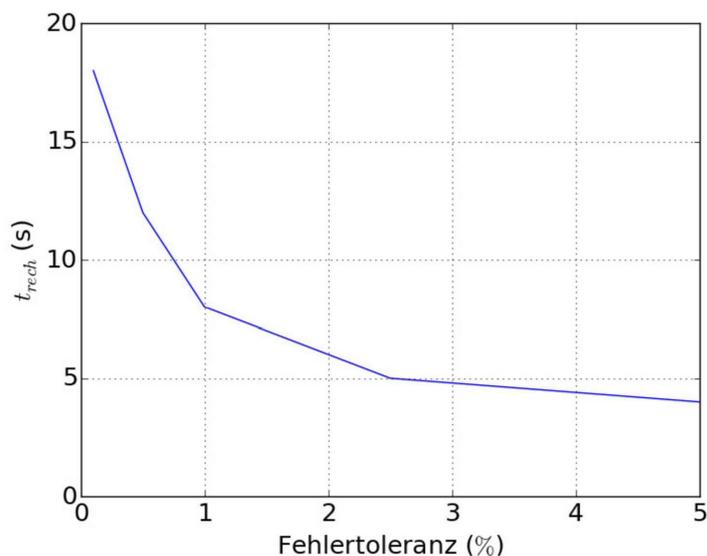


Abbildung 4.9: Fehler-Zeit Zusammenhang $t = 0.02$ mm

4.6 Lufspalt

Bei der Generierung des Modells für den Magneten tritt das Problem auf, dass ein Luftspalt von $t = 0$ mm mithilfe der virtuellen Arbeiten zwar berechnet werden kann, jedoch die Lösung unphysikalisch ist. Aus diesem Grund wurden mehrere Berechnungen durchgeführt, um den Luftspalt physikalisch korrekt zu modellieren.

4.6.1 Magnetglied und Schiene in Kontakt

Als erster Fall wurde die Haftkraft berechnet, unter der Annahme, dass der Magnet und die Schiene in Kontakt stehen und dass sich keine Luft zwischen den beiden Körpern befindet. Hierbei wurde die Berechnung der Haftkräfte F_H des Magneten auf der Schiene über die virtuelle Arbeit zwar durchgeführt, es zeigte sich jedoch, dass diese, sofern nicht ein extrem feines Netz verwendet wird, keine korrekten Werte liefert.

Die für die Auswertung verwendeten Werte wurden in diesem Fall mit dem Maxwell'schen Spannungstensor berechnet, wie dieser in Kapitel 4.1 beschrieben ist. Diese Simulation geht jedoch von der Annahme aus, dass beide Oberflächen ideal glatt sind und zu 100% aufeinander aufliegen.

4.6.2 Variation des Luftspalts

Da mit der Methode der virtuellen Arbeiten zur Ermittlung eines physikalisch korrekten Ergebnisses ein Luftspalt erforderlich ist, wurde als zweites Verfahren ein Luftspalt zwischen beiden Körpern modelliert. Dieser wurde variiert und die verschiedenen Haftkräfte F_H zwischen Magnet und Schiene berechnet.

Die Haftkraft für den Fall ohne Luftspalt wurde danach aus den berechneten Kurven, bei welchen ein Luftspalt modelliert wurde, extrapoliert und mit der Berechnung des Maxwell' schen Spannungstensors verglichen.

Die Extrapolation wurde durchgeführt, indem ein Polynom sechster Ordnung an die simulierten Werte angenähert wurde. Dafür wurde der Luftspalt von $t = 0.02 - 0.2$ mm variiert und die Haftkräfte ermittelt.

4.6.3 Berechnung mit einem physikalisch korrekten Luftspalt

Betrachtet man die Oberfläche des Magneten und der Haftkraftwage, so kann festgestellt werden, dass die Annahme, dass die beiden Körper in Kontakt stehen, physikalisch nicht korrekt ist. Die Qualität der Oberflächen beider Körper ist in den diversen Normen (z.B. [2, 3]) mit einer Oberflächengüte von $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ spezifiziert. Dies stellt einen gemittelten Wert der Rautiefe dar und kann mithilfe von Tabellen umgerechnet werden.

Für den Wert von $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ kann in [26] ein Wert von $R_z = 15 - 25 \mu\text{m}$ bestimmt werden. Die Rautiefe R_z gibt die Differenz von der kleinsten zur größten Abweichung der Oberfläche innerhalb eines Messintervalls an und ist über mehrere solcher Intervalle gemittelt (Abbildung 4.10). Eine genaue Beschreibung befindet sich in [26].

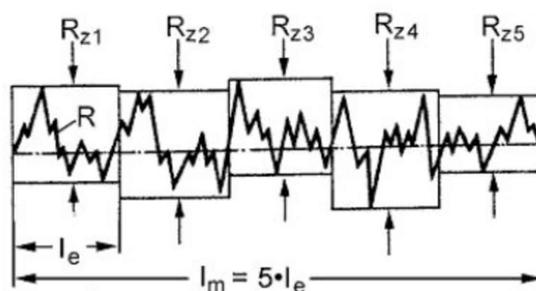


Abbildung 4.10: Ermittlung von R_z [26]

Betrachtet man nun die Oberflächen, so kann man feststellen, dass diese nur punktu-

4.6 Lufspalt

ell aufeinander liegen werden. Es wird dadurch jedoch im Mittel ein kleiner Luftspalt zwischen beiden Körpern bleiben.

Unter der Annahme, dass die Berge und Täler der Oberfläche volumenmäßig den selben Anteil an Stahl und Luft haben, kann nun vereinfacht angenommen werden, dass der Luftspalt, sofern keine Kräfte zwischen den beiden Körpern anliegen, zwischen den beiden Maximalwerten ein Abstand von ca. $t = 2R_Z$ auftritt.

Hier muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich dieser Luftspalt mit steigender Haftkraft verringert. Im Folgenden soll nun gezeigt werden, wie ein Zusammenhang zwischen Haftkraft und Luftspalt hergeleitet wurde.

Ausgehend von der Annahme, dass zwei Berge aufeinandertreffen, welche exakt symmetrisch sind, können die folgenden Annahmen getroffen werden:

- Die mechanischen Eigenschaften des Materials werden als linear elastisch angenommen.
- Es wird ein inkompressibles homogenes isotropes Material vorausgesetzt, das heißt, es gilt die Volumskonstanz.
- Die Riefen im Material werden als gerade über die gesamte Breite des Magnetglieders reichend angenommen.
- Es wird ein ebener Verzerrungszustand vorausgesetzt.

Mit diesen Annahmen kann das dreidimensionale Problem auf ein 2D- Problem reduziert werden, da sich nur die Querschnittfläche des Spaltbereiches ändert. Das verwendete Modell ist in Abbildung 4.11 dargestellt, wobei 4.11a den Ausgangszustand darstellt und 4.11b den deformierten Zustand.

Darin ist zu sehen, dass für eine ersten Näherung angenommen wird, dass sämtliche Spitzen aufeinanderliegen. Betrachtet man nun den deformierten Zustand, so kann über die Volumskonstanz festgestellt werden, dass die beiden Flächen der deformierten und undeformierten Rille den selben Wert aufweisen. Diese berechnen sich nach

$$A_u = \frac{R_Z * b}{2} \quad A_d = \frac{(b + \Delta b) * (R_Z - \Delta l)}{2}. \quad (4.4)$$

A_u ist die undeformierte und A_d die deformierte Fläche.

In (4.4) ist R_Z die Rautiefe der Oberfläche, b die Breite einer Riefe, Δb die Breite der Auflagefläche der deformierten Riefe und Δl die Veränderung des Luftspalts

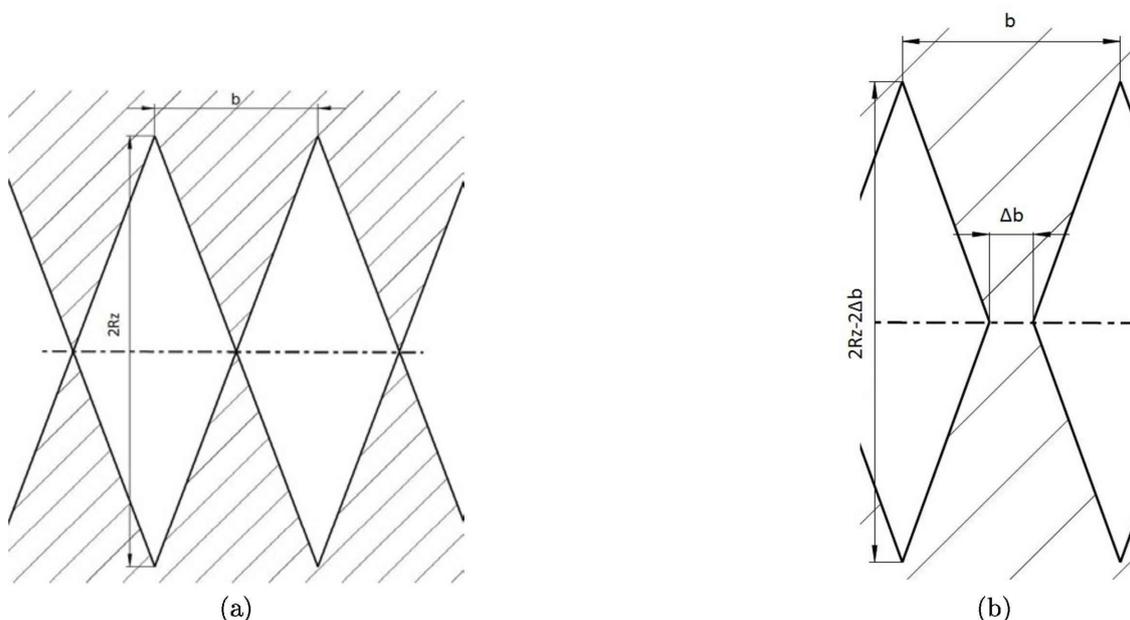


Abbildung 4.11: Modell für die Deformation des Luftspalts a) Ausgangszustand; b) Deformierter Zustand

darstellt. Mit dem folgenden Zusammenhang kann nun eine Gleichung hergeleitet werden, welche die Haftkraft über die Veränderung des Luftspalts berechnet.

$$\epsilon E = \frac{F}{A} = \sigma \quad (4.5)$$

$$F_H = E * \frac{\Delta l}{R_Z} * \left(\frac{R_Z b}{R_Z - \Delta l} - b \right) h \quad (4.6)$$

Da die Wahrscheinlichkeit, dass der theoretisch untersuchte Fall tatsächlich auftritt, sehr gering ist, wurde angenommen, dass 10% der Spitzen aufeinanderliegen, d.h. nur ein Zehntel der Fläche zur Übertragung der Kräfte verwendet wird. Mit dieser Annahme wurde nun die Berechnung der Haftkraft durchgeführt.

Für diese Berechnung wurde das mechanische mit dem elektromagnetischen System in der Form gekoppelt, sodass die Berechnung der Haftkraft rein magnetisch durchgeführt wurde. Mit der so ermittelten Haftkraft wurde die Veränderung des Luftspalts ermittelt, dieser variiert und die Berechnung erneut durchgeführt. Hierbei wurde ebenfalls wieder eine Fehlertoleranz eingeführt. Es wurde jeweils die Differenz eines Rechenschrittes mit dem vorherigen gebildet. Die so ermittelte Differenz wurde mit der des vorherigen Schrittes verglichen. Die Berechnung wurde abgebrochen, wenn die Differenz kleiner als der maximal zulässige Fehler von $f_{tol} = 0.1\%$ war. Abbildung 4.12 zeigt das Schema des Algorithmus.

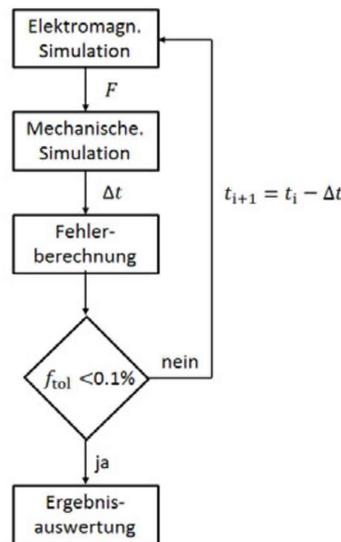
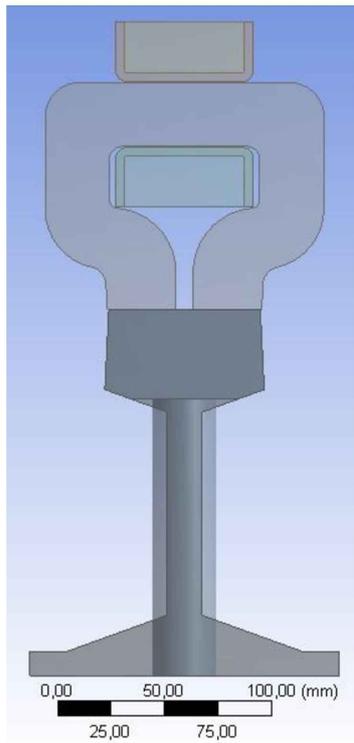


Abbildung 4.12: Schema der Berechnung der Luftspaltveränderung

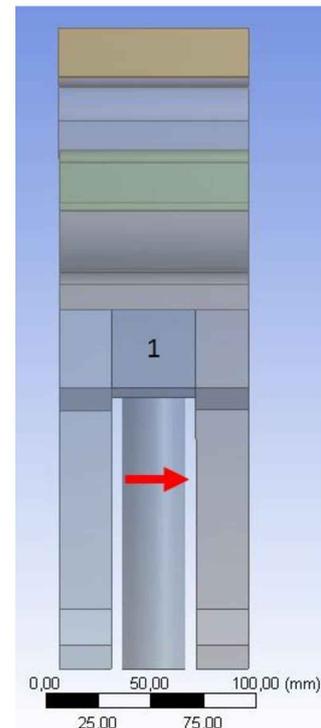
4.7 Längs Verschiebung des Stempels

Da die Haftkraftwaage einen Stempel besitzt und dieser einen kleinen Luftspalt zu den beiden seitlich angebrachten Schienen besitzt, sollte außerdem noch die Auswirkung einer Verschiebung des Stempels untersucht werden. Grund dafür ist die Befürchtung, dass bei einer seitlichen Verschiebung des Stempels in x- Richtung dieser aufgrund der nicht mehr vorhandenen symmetrischen Anordnung an eines der beiden Schienenstücke angezogen wird. Dies würde aufgrund der Reibung zwischen Stempel und Schiene die gemessene Haftkraft vergrößern und die Messung unbrauchbar machen.

Hierfür wurde das vereinfachte Schienenmodell um ein stark vereinfachtes Modell des Stempels erweitert. Als Luftspalt wurde auf beiden Seiten ein Spalt von $t_s = 0.2 \text{ mm}$ angenommen. Dies entspricht in etwa dem tatsächlichen Spalt der Haftkraftwaage. Um die Auswirkungen zu simulieren, wurde nun der Stempel in positiver x- Richtung verschoben und die Haftkraft F_H und die beiden Kräfte in x- und y- Richtung F_x ; F_y berechnet. Als Luftspalt wurde hier ein Wert von $t = 0.02 \text{ mm}$ gewählt, da dies einem physikalisch korrekten Luftspalt entspricht. Abbildung 4.13 zeigt das für diese Simulation erstellte Modell mit Stempel. Die Richtung der Verschiebung des Stempels (1) ist mit dem roten Pfeil dargestellt.



(a)



(b)

Abbildung 4.13: Vereinfachtes Modell der Haftkraftwaage a) von Vorne; b) von der Seite

5 Simulation des Magneten

In diesem Kapitel soll nun die genaue Simulation des Magnetgliedes der Haftkraftwaage, welches im vorigen Kapitel vereinfacht simuliert wurde, beschrieben werden. Bevor jedoch mit den Simulation begonnen werden konnte, wurden verschiedene Geometriestudien durchgeführt, um die Auswirkungen der einzelnen Geometrielemente auf die Haftkraft F_H zu untersuchen.

5.1 Geometriestudien

Für alle Geometriestudien wurde für das Zwischenglied noch das Material S235JR verwendet, da die Bestimmung der Materialeigenschaften von C10E parallel dazu erfolgte. Für die Geometriestudien wurden die Modelle wie in Kapitel 4 aufgebaut. Es gelten die selben Annahmen, Vernetzungsvorgaben, Randbedingungen und Erregungen. Als Luftspalt zwischen Magnetglied und Schiene wird hier der vorhin ermittelte physikalisch korrekte Luftspalt von $t = 0.02$ mm für alle Geometriestudien verwendet.

5.1.1 Radien des Zwischengliedes

Als Erstes wurden die Auswirkungen der Radien auf die Haftkraft F_H des Magnetgliedes untersucht. Es wurden hier zwei Varianten untersucht:

- Zuerst wurden alle Radien des Zwischengliedes modelliert, um den Unterschied zwischen dem vereinfachten Modell und dem Modell mit Radien zu ermitteln.
- Da kleinere Radien normalerweise keine Auswirkungen auf das Ergebnis haben, werden alle Radien R2,5 vernachlässigt.

Beide simulierten Modelle sind in Abbildung 5.1 dargestellt, wobei in Abbildung 5.1a das Modell mit allen Radien (R2,5 und R10) dargestellt ist, in 5.1b nur mit den R10 Radien. Das Umgebungsmedium ist hier ausgeblendet.

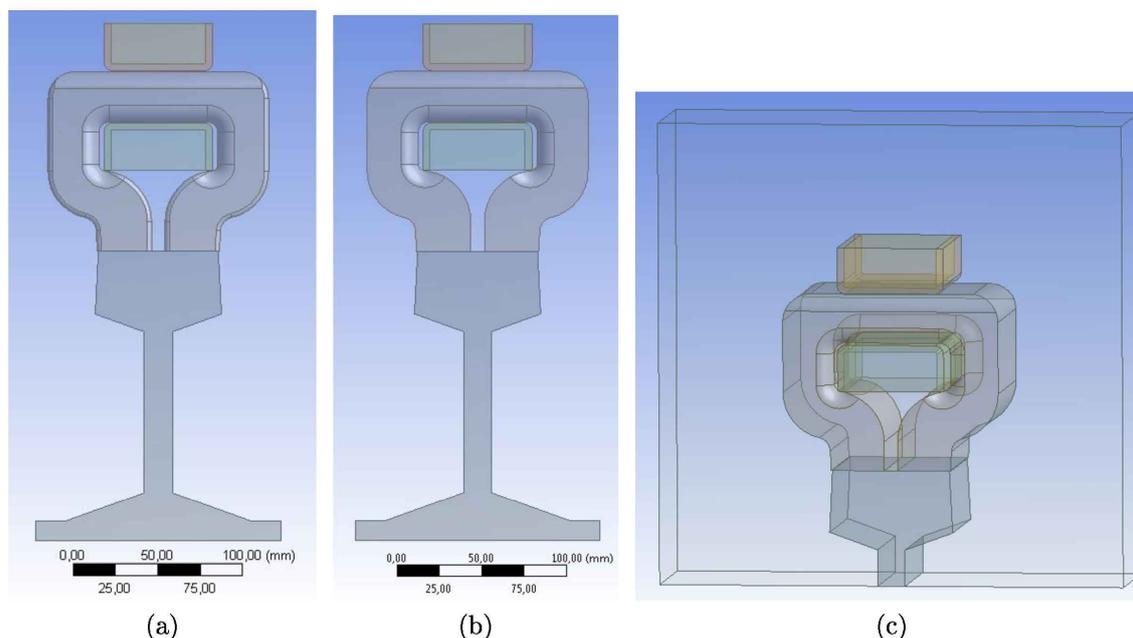


Abbildung 5.1: Geometriestudien. a) Modell mit allen Radien; b) nur Radien R10; c) gekürztes Modell

5.1.2 Verkürztes Modell

Da der Schienensteg keinen wirklichen Einfluss auf das Ergebnis hat, wurde versucht, das Modell zu verkürzen. Hierfür wurde die Schiene so abgeschnitten, dass sie eine Höhe von insgesamt 70 mm aufweist. Das Modell mit den großen Radien wurde als Ausgangsmodell für diese Variante verwendet.

Da angenommen wurde, dass der Einfluss des Magnetfeldes in der Umgebung der Schnittfläche vernachlässigbar groß ist, wurde die Umgebung so gewählt, dass die Schnittfläche die untere Außenfläche des Modells berührt. Es wurde also ein Abstand in negativer z- Richtung von 0 mm gewählt. Abbildung 5.1c. zeigt das generierte Modell inklusive der umgebenden Luft.

5.1.3 Luftspalt zwischen den Magnetgliedern

Der magnetische Kreis durch das Zwischenglied weist tatsächlich insgesamt drei Luftspalte auf:

- 2 Luftspalte zwischen Schiene und Magnetglied (1.), siehe Abbildung 5.2.
- Einen weiteren Luftspalt zwischen den beiden Teilen des Magnetgliedes. (2.), siehe Abbildung 5.2.

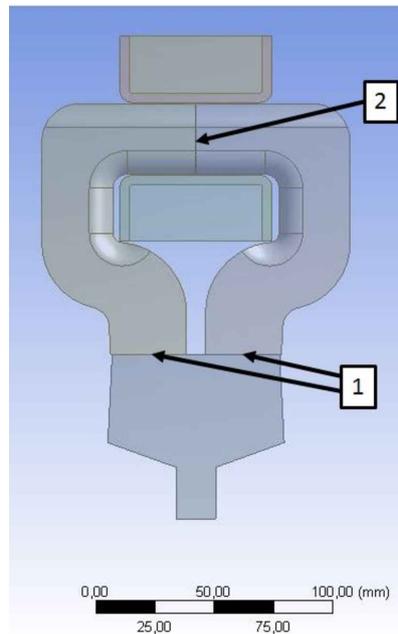


Abbildung 5.2: Modell mit Luftspalt zwischen den Magnetgliedern

Es wurde folgend der Luftspalt zwischen den beiden Magnetgliedern untersucht. Hierfür wurde am vereinfachten Modell mit den großen Radien ein Luftspalt zwischen Magnetgliedern und Schiene von $t = 0.02$ mm modelliert. Als Luftspalt zwischen den Magnetgliedern wurde der Luftspalt von $t = 0.00$ mm bis $t = 0.06$ mm variiert und anschließend wurden die Auswirkungen auf die Haftkräfte F_H berechnet. Abbildung 5.2 zeigt das verwendete Modell.

5.1.4 Magnetkörper

Weiters sollte der Einfluss des Magnetkörpers untersucht werden. Der Magnetkörper besteht aus S235. Dieses Material wurde auch für die Simulation gewählt. Das Modell ist in Abbildung 5.3a von der Seite dargestellt und in 5.3b von vorne.

5.1.5 Unmagnetische Zwischenleiste

Es wurde außerdem noch der Einfluss der unmagnetischen Zwischenleiste untersucht. Hierfür wurde diese in das Modell eingefügt. Als Material wurde das in der Maxwell Bibliothek vorhandene Material „steel stainless“ verwendet. Das simulierte Modell ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Hierbei handelt es sich um das bereits optimierte Modell des Magnetglieders. Daher soll dieses in Folge auch korrektes Modell bezeich-

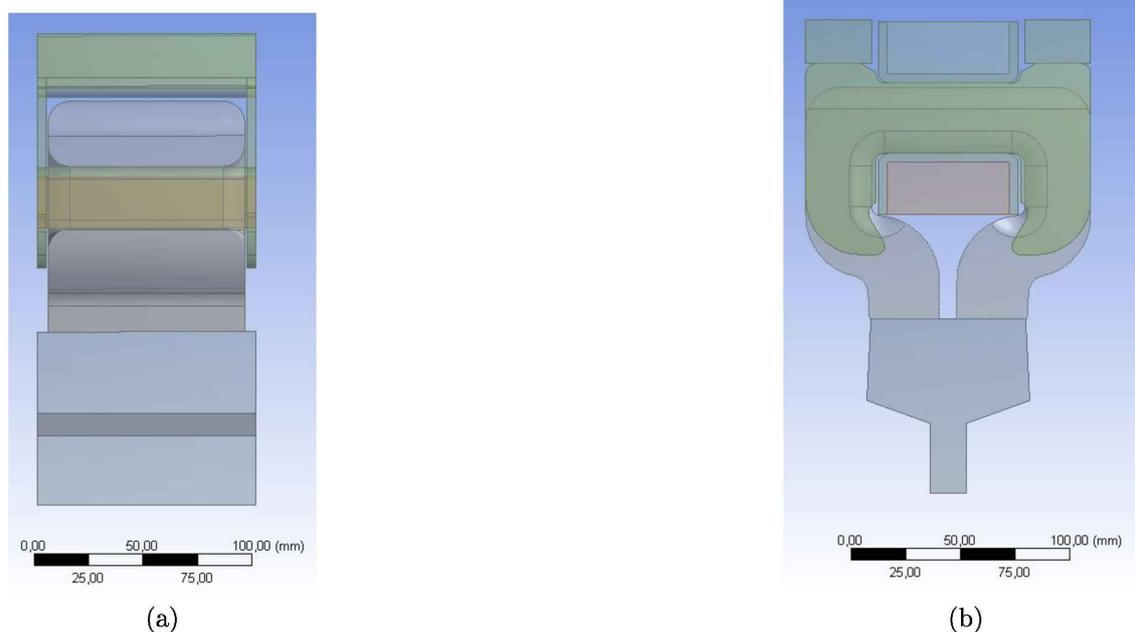


Abbildung 5.3: Modell mit Magnetkörper. a) von Vorne; b) von der Seite

net werden, da es das tatsächliche Magnetglied darstellt. Alle weiteren Änderungen beziehen sich nun auf die Schiene.

5.1.6 Korrektes Modell mit tatsächlicher Schiene

Außerdem wurde das selbe Modell simuliert, wobei die tatsächliche Schiene der Haftkraftwaage modelliert wurde, wie diese in [2, 3] spezifiziert ist. Das Modell ist in Abbildung 5.5a und 5.5b dargestellt. Hier wurde die Schiene wieder in die drei Sektionen unterteilt und die jeweiligen B-H- Kurven für die Berechnung verwendet.

Zusätzlich wurde die Geometrie des Magnetkörpers leicht vereinfacht. Es wurden einige kleine Geometriedetails verändert, um die Vernetzung dieser Stellen zu vereinfachen. Dies bewirkt eine merkbar kleinere Elementanzahl und damit eine geringere Berechnungsdauer. Die Vereinfachungen am Magnetkörper sind in Abbildung 5.5d dargestellt.

5.1.7 vereinfachtes Haftkraftwaagenmodell mit Stempel

Es wurde die selbe Geometrie verwendet wie oben, jedoch wurde der Stempel der Haftkraftwaage zwischen den Schienen modelliert. Zwischen dem Stempel und den beiden Schienenstücken wurde jeweils ein Abstand von 0.1 mm eingefügt.

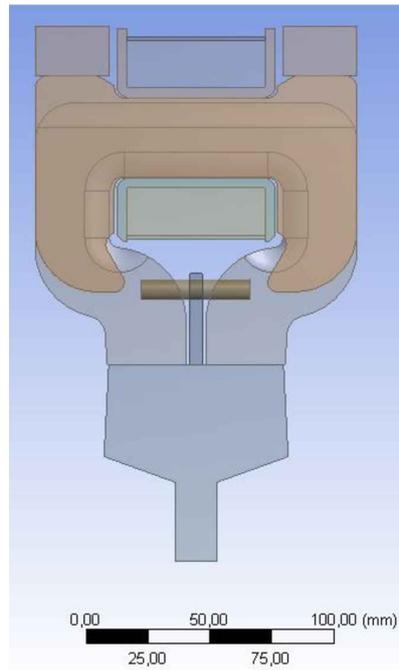


Abbildung 5.4: Modell mit unmagnetischer Zwischenleiste

Das verwendete Modell ist in Abbildung 5.5e zu sehen. Diese Simulation wurde durchgeführt, um zu untersuchen, ob ein Unterschied besteht, wenn das Modell mit einer durchgehenden Schiene simuliert wird und nachträglich über die Länge des Stempels die Haftkraft auf für einen Stempel berechnet wird und dem Fall, dass direkt der Stempel berechnet wird.

$$F_{\text{Stempel}} = \frac{F_{\text{Schiene}} * l_{\text{Stempel}}}{l_{\text{Magnet}}} \quad (5.1)$$

5.1.8 Korrektes Modell ohne Luftspalt zwischen Stempel und Schiene

Bei der vorhergehenden Simulation mit dem Stempel und allgemein aus den vorhergehenden Simulationen war bekannt, dass div. Luftspalte die Anzahl der Elemente und somit die Rechenzeit erheblich erhöhen. Aus diesem Grund wurde versucht, den Luftspalt zwischen dem Stempel und den Schienen zu vernachlässigen.

Dafür wurde das selbe Modell wie in Abbildung 5.5e simuliert, jedoch ohne Luftspalt zwischen dem Stempel und den beiden Schienenteilen.

5.1.9 Korrektes Modell mit Schienenkopf wie bei der tatsächlichen Haftkraftwaage

Zuletzt wurde ein Modell simuliert, bei welchem der Schienenkopf auf die tatsächliche Höhe der Haftkraftwaage gekürzt wurde. Das verwendete Modell ist in Abbildung 5.5c dargestellt.

5.2 Luftspalt

Die verschiedenen Modellierungsweisen für den Luftspalt wurden im vorhergehenden Kapitel diskutiert. Die Simulation mittels der Methode der virtuellen Arbeiten weist, wie bereits erwähnt, das Problem auf, dass hier ein Luftspalt vorhanden sein muss, um die Simulation durchzuführen.

Dies bietet jedoch auch die Möglichkeit, die Ergebnisse eines Simulationsmodells mit tatsächlichen Messungen abzugleichen. Da bei einem Simulationsmodell immer einige Idealisierungen getroffen werden und einige Geometrien vernachlässigt werden, werden die Messergebnisse von der Simulation in diesem Fall im allgemeinen überschätzt.

Das Abgleichen kann nun erfolgen, indem der Luftspalt vergrößert wird, um so die Simulationsergebnisse an die tatsächlichen Messergebnisse anzupassen. Dies soll nun auch im Folgenden versucht werden. Dazu wird das Modell mit verschiedenen Luftspalten simuliert und die Ergebnisse dann im nächsten Kapitel mit einer realen Messung der Haftkräfte F_H zu verglichen.

Für alle Simulationen welche im folgenden durchgeführt werden, wird nun, sofern dies nicht extra erwähnt wird, der vorhin erwähnte physikalisch korrekte Luftspalt von $t = 0.02$ mm verwendet.

5.3 Haftkraftwaage

Aus den unter Kapitel 5.1 beschriebenen Variantenstudien des Modelles der Haftkraftwaage konnte nun ein Modell für die selbige generiert werden. Es konnte festgestellt werden:

- Die größeren Radien besitzen jeweils einen Einfluss auf die Haftkräfte; die kleineren Rundungen an den Außenkanten können vernachlässigt werden. Daher wurden nur die R10 Radien modelliert.
- Der Luftspalt zwischen den Magnetgliedern hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Ergebnis. Der erwähnte Luftspalt wurden in der Simulation des

5.3 Haftkraftwaage

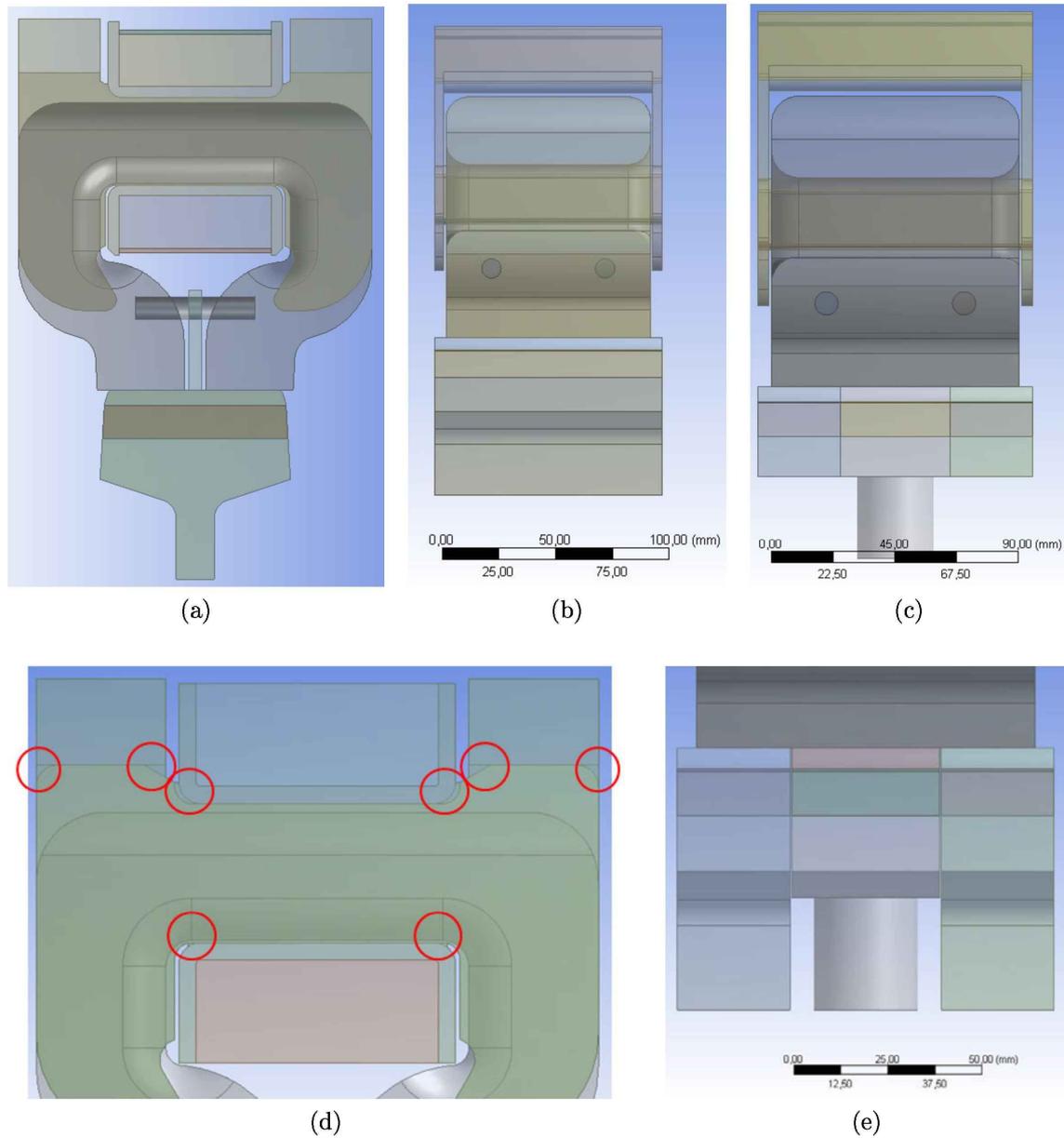


Abbildung 5.5: Verschiedene Geometriestudien a) Modell mit tatsächlicher Schiene von vorne; b) von der Seite; c) Modell mit Schiene wie bei der tatsächlichen Haftkraftwaage; d) durchgeführte Vereinfachungen am Magnetkörper; e) Modell mit Stempel der Haftkraftwaage

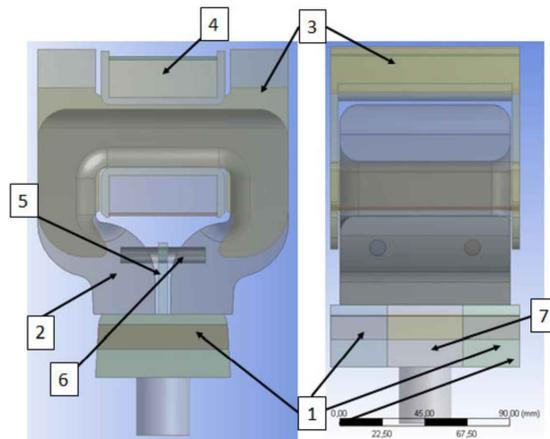


Abbildung 5.6: Verwendetes Simulationsmodell der Haftkraftwaage

Modells nicht berücksichtigt.

- Der Magnetkörper erhöht die Haftkräfte wesentlich. Es wurden, wie bereits erwähnt, einige kleinere Geometriedetails idealisiert.
- Die Simulation der Gesamtschiene und nachträgliche Umrechnung auf die Stempelkraft unterscheidet sich von der direkten Simulation des Stempels, weshalb der Stempel separat simuliert werden muss.
- Der Luftspalt zwischen Stempel und Schiene hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Ergebnis.
- Die kürzere Schiene hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Ergebnis. Die Schiene, wie sie tatsächlich in der Haftkraftwaage angewendet wird, besitzt einen kleinen Einfluss auf das Ergebnis.

Mit diesen Ergebnissen konnte das Modell für die Haftkraftwaage erstellt werden.

5.3.1 Aufbau des Modells

Das verwendete Modell ist in Abbildung 5.6 zu sehen. Es besteht aus den folgenden in Tabelle 5.1 spezifizierten Teilen.

Tabelle 5.1: Modell der Haftkraftwaage

Nr.	Teil	Material
1	Schiene	R200; R260; R350HT
2	Zwischenglied	C10E
3	Magnetkörper	S235
4	Spule	Kupfer
5	unmagnetische Zwischenleiste	steel stainles
6	Stifte	steel stainles
7	Stempel	R200; R260; R350HT

Als Materialien für die Simulation wurden für die Schienenteile die jeweils vermessenen Materialdaten verwendet, da die magnetischen B-H-Kurven über die Tiefe variieren. Um dies korrekt darzustellen, wurde die Schiene in drei Teile geteilt, wobei die Schiene jeweils in der Mitte zwischen zwei entnommenen Proben geteilt wurde, also alle 12.5 mm. Das erste Segment ist jedoch aufgrund des Abfräsens nur ca. 3 mm hoch. Dadurch entstanden jeweils 3 Teile der Schiene. Für diese wurden dann jeweils die gemessenen Materialwerte eingefügt. Dadurch sollten die Schienen möglichst genau abgebildet werden.

Für die Magnetglieder wird für die folgenden Simulationen die gemessene B-H-Kurve von C10E verwendet. Die Materialdaten der Schienen ähneln jedoch, wie in Kapitel 3 zu sehen, teilweise stark.

5.3.2 Randbedingungen und Erregungen

Als Randbedingungen für den Körper wurden die selben wie die unter Kapitel 4.3 beschriebenen verwendet. Für die Berechnung der Haftkraft wurde diese jedoch hier für den gesamt Stempel definiert. Der einzige Unterschied ist, dass für die tatsächliche Simulation höhere Erregungen verwendet wurden. Für die Geometriestudien wurden Erregungen von 1000AW bis 4000AW in 1000AW Schritten simuliert, für die Simulation der Haftkraftwaage wurden höhere Erregungen von 1000AW bis 6000AW simuliert.

In einer ersten Simulation konnte jedoch festgestellt werden, dass die Werte für die magnetische Flussdichte B die Messwerte übersteigen. In diesem Fall interpoliert Maxwell die Werte, indem als Steigung, die zwischen den letzten beiden Punkten ermittelt wird, und die Kurve mit dieser Steigung fortgesetzt wird.

Die Messungen der Stabproben erfolgte bis zu höheren magnetischen Feldstärken H . Daraus ist bekannt, dass die Steigung hier jedoch weiter abfällt, wodurch ein Fehler entsteht. Aus diesem Grund mussten die Messwerte extrapoliert werden, um

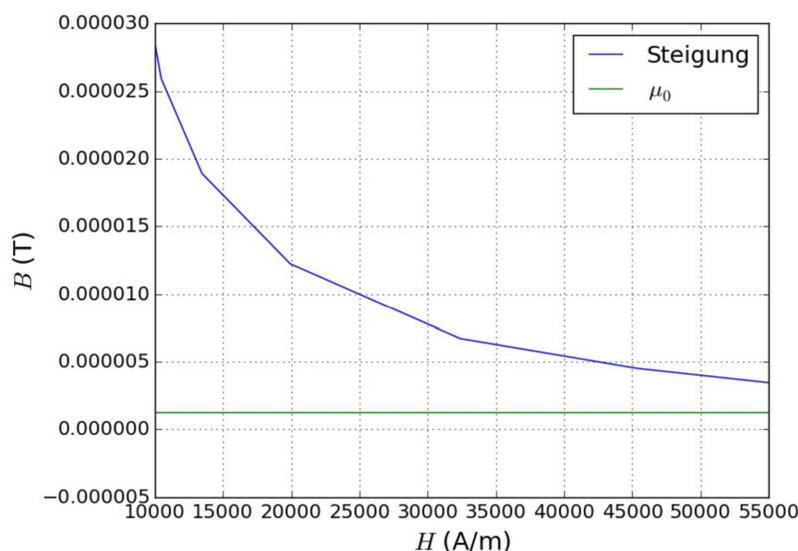


Abbildung 5.7: Steigung der Magnetisierungskurve

korrekte Ergebnisse zu erhalten. Dies wird im folgenden Unterkapitel beschrieben.

5.3.3 Extrapolation der gemessenen B-H- Kurven

Aus den Ergebnissen der Stabproben und aus [4, 27] ist bekannt, dass die Steigung der Kurven gegen $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ konvergiert. Laut [27] lässt sich die magnetische Flussdichte B nach der folgenden Formel berechnen

$$B = \mu_0 H + M, \quad (5.2)$$

wobei M die Magnetisierung darstellt. Diese konvergiert gegen einen konstanten Wert M_s , was zu dem eben beschriebenen linearen Zusammenhang zwischen B und H mit der erwähnten Steigung μ_0 führt. Abbildung 5.7 zeigt nun die Steigung der gemessenen Kurve der Probe R260_I von $H = 10000$ A/m- 55000 A/m.

Die Ergebnisse der Stabproben sind jedoch zu ungenau angegeben, um daraus eine Funktion zu extrapolieren. Dafür kann festgestellt werden, dass diese in etwa bei 100000 – 200000 A/m die Steigung von μ_0 erreicht hat. Daraus entstehen nun zwei Möglichkeiten, um die Kurven zu extrapolieren:

- Berechnen der Differenz zwischen den Punkten der Messergebnisse der Stabproben und fortsetzen der gemessenen Ergebnisse der Ringproben mit diesen Differenzen. Hier entsteht jedoch das Problem, dass dies nur für das Material R200 zulässig ist, jedoch auch weitere Proben vermessen wurden.

- Ermitteln einer Funktion, welche die Kurve bis zu einem definiertem Punkt extrapoliert, wo diese μ_0 beträgt

Es wurde die Entscheidung getroffen, die zweite erwähnte Methode zu verwenden. Als Funktion wurde eine e- Potenz gewählt, da diese in etwa den gemessenen Kurven entspricht. In der Literatur ist angegeben, dass die Permeabilität μ im Unendlichen gegen μ_0 konvergiert. Die Steigung der Kurve liegt am Ende jedoch bereits in der Größenordnung von μ_0 . Mit den Messergebnissen der Stabproben wurde nun die Entscheidung getroffen, die Steigung ab $H = 150000$ A/m mit μ_0 anzunähern. Die Funktion muss also die Kurve bei den höchsten gemessenen Werten bis $H = 150000$ A/m fortsetzen und verläuft dann mit der konstanten Steigung μ_0 . Zusätzlich muss jedoch auch die Ableitung der Kurve stetig sein. Es wurde die folgende Näherung für die Steigung verwendet

$$k = k_0 * e^{k_a*(H-H_0)}, \quad (5.3)$$

wobei k_0 die Steigung am Beginn der Extrapolation darstellt und a einen kurvenabhängigen zu ermittelnden Faktor. Die Steigung k_0 wurde mittels einer Interpolation der einzelnen B-H- Kurven mit einem kubischen Spline zwischen $H_0 = 50000$ A/m und $H_0 = 56000$ A/m ermittelt und für die drei Proben pro Material gemittelt. Dadurch soll ein zufälliger Messfehler verringert werden. Der Faktor k_a lässt sich nun ermitteln, indem am Ende bei $H_0 = 150000$ A/m die Steigung μ_0 eingesetzt wird. Aus dieser Gleichung kann nun durch Integrieren der Zusammenhang für die zu extrapolierende Kurve gewonnen werden

$$B = k_0 * \frac{e^{k_a*(H-H_0)}}{k_a} + B_0 - \frac{B_0}{k_a}, \quad (5.4)$$

wobei B_0 die Mittelung der magnetischen Flussdichte zwischen $H_0 = 50000$ A/m und $H_0 = 56000$ A/m darstellt.

Die Kurve kann nun beliebig extrapoliert werden, indem diese danach mit einer Steigung von μ_0 fortgesetzt wird. Abbildung 5.8 zeigt die Kurve für die Probe R200_I und die gemessene Kurve der Stabprobe. Die Werte der Kurve wurden bis $H = 56000$ A/m gemessen.

5.3.4 Netz

Das Netz wurde wieder wie unter Kapitel 4.4 erstellt. Es wurden wieder die vom Programm *Maxwell 3D* verwendeten Tetraederelemente mit quadratischen Ansatzfunktionen verwendet. Ein Vergleich mit anderen Softwarepaketen wie z.B. *ANSYS EMAG* zeigt zwar deutlich, dass speziell in den Luftspalten die Verwendung von Hexaederelementen von Vorteil wäre, jedoch sind in Maxwell nur Tetraederelemente verfügbar.

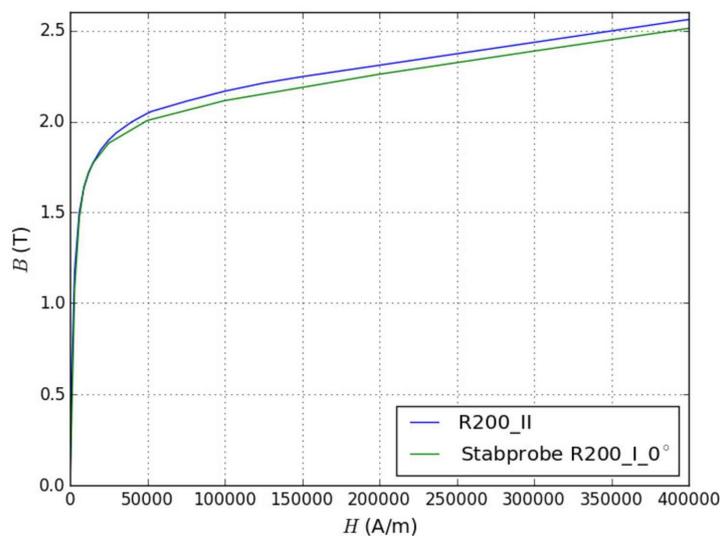


Abbildung 5.8: Extrapolierte B-H- Kurve

Aus diesem Grund musste eine geeignete Vernetzungssteuerung verwendet werden. Es wurde dafür die Elementkantenlänge im Spalt definiert, da diese den größten Einfluss auf das Ergebnis besitzt. Aus den Netzsteuerungen ist bekannt, dass eine Elementkantenlänge von $h = 1$ mm günstig ist. Daher wurde hier auch diese Elementkantenlänge gewählt. Weitere Verfeinerungen brachten jedoch keine Verbesserungen des Ergebnisses, weshalb diese nicht durchgeführt wurden.

Dem adaptiven Vernetzungsalgorithmus wurden maximal 12 Schritte vorgegeben, wobei zumeist 5 Schritte ausreichen.

5.3.5 Durchgeführte Simulationen

Die folgenden Simulationen wurden, wie bereits erwähnt, mit einer Erregung von 1000AW - 6000AW durchgeführt.

- Zuerst wurden die Haftkräfte F_H zwischen dem Magnetglied und dem Stempel für das Schienenmaterial R200 mithilfe der gemessenen und extrapolierten Kurven berechnet, und zwar bei verschiedenen Luftspalten: $t = 0.02; 0.04; 0.06; 0.08; 0.1$ mm
- Danach wurde die Simulation mit allen gemessenen Materialien für die verschiedenen Schienen durchgeführt. Diese wurden miteinander verglichen, um die Auswirkungen von verschiedenen Schienenmaterialien zu bestimmen. Hierfür wurde ein physikalisch korrekter Luftspalt von $t = 0.02$ mm verwendet.
- Danach wurden die Haftkräfte für die einzelnen Materialien bei verschiedenen

5.3 Haftkraftwaage

Temperaturen berechnet, um die Auswirkungen dieser auf die Ergebnisse zu ermitteln. Die Simulationen wurden jedoch nicht bei allen gemessenen Temperaturen durchgeführt, sondern nur bei $T = -25^{\circ}\text{C}$; 25°C ; 50°C ; 100°C ; 150°C und mit einem Luftspalt von $t = 0.02\text{ mm}$.

6 Ergebnisse der Simulationen

Es sollen an dieser Stelle die Ergebnisse der Simulationen der beiden Modelle beschrieben werden. Zuerst wird die Simulation des vereinfachten Modelles Kapitel 4 beschrieben. Danach werden die Durchgeführten Geometriestudien beschrieben, mit denen ein besseres Modell erstellt wurde, mit welchem zuletzt die Haftkräfte des Magnetgliedes für verschiedene Luftspalte, und verschiedene Materialien bei verschiedenen Temperaturen berechnet wurde.

6.1 Vereinfachtes Modell

Es wurden verschiedene Berechnungen der Haftkraft durchgeführt, mit verschiedenen Methoden. Zuerst wird die Simulation mit Magnetglied und Schiene in Kontakt beschrieben, danach wird der Luftspalt variiert und der Fall, dass sich Magnetglied und Schiene berühren extrapoliert. Weiters werden einige Überlegungen zu einem physikalisch Korrekten Luftspalt angestellt und zuletzt wird eine Verschiebung des Stempels längs der x- Achse der Haftkraftwaage berechnet.

6.1.1 Magnetglied und Schiene in Kontakt

Es wurden mithilfe des Maxwell' schen Tensors, welcher über die Oberfläche des Schienenkopfes integriert wurde, die Haftkraft F_H zwischen Schiene und Magnetglied ermittelt. Dies ergab die in Abbildung 6.1 abgebildeten Werte. Es ist zu erkennen, dass sich das Modell ab einer Erregung von $\Theta = 2000$ AW bereits in der magnetischen Sättigung befindet, da die Steigung der Kurve hier bereits sehr gering ist und mit steigender Erregung weiter abnimmt.

Die Ergebnisse der magnetischen Feldstärke sind in Abbildung 6.2 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass, wie bereits erwähnt, sich das Modell bereits bei $\Theta = 2000$ Aw in der Sättigung befindet. Die Flussdichten im Magnetglied liegen hier bereits bei ca. $B = 1.8$ T. Die Werte der ermittelten Kräfte sind in Tabelle 6.1 angegeben. Betrachtet man nun die B-H- Kurven in Abbildung 3.35, so kann erkannt werden, dass speziell das Magnetglied sich in der Sättigung befindet. Außerdem ist in Tabelle 6.1 zu erkennen, dass die Haftkräfte, welche mithilfe der Methode der virtuellen Arbeiten ermittelt wurden, höhere Werte liefern als die Haftkräfte, welche mit dem Maxwell'schen Tensor berechnet wurden.

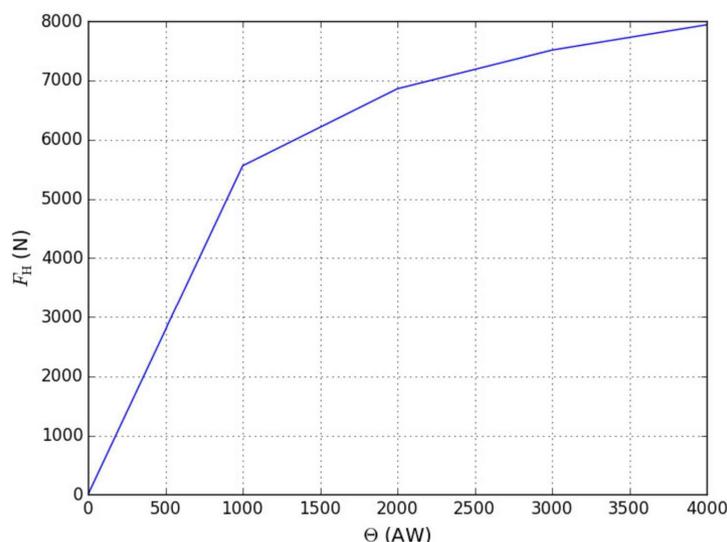


Abbildung 6.1: Haftkräfte für Kontaktmodell

Tabelle 6.1: Ergebnisse der Simulation $t=0\text{mm}$

Erregung in AW	F_H Maxwell in N	F_H virt. Versch. in N
1000	7942.5	8083.4
2000	7514.1	7681.0
3000	6860.4	7014.8
4000	5558.4	5682.8

6.1.2 Variieren des Luftspalts

Als Nächstes wurde die Größe des Luftspalts variiert und wieder die Größe der Haftkraft F_H zwischen Magnetglied und Schiene berechnet. In Abbildung 6.3 sind nun einige Ergebnisse der Simulationen für die verschiedenen Luftspalte t dargestellt, diese wurde mit der Methode der virtuellen Arbeiten ermittelt.

Es ist zu erkennen, dass, wie zu erwarten, mit kleinerem Luftspalt die Haftkraft größer wird. Für eine Erregung von $\Theta = 4000$ AW wurde nun ein Kraft- Abstands- Diagramm erstellt. Hier wurde der Luftspalt jedoch noch weiter variiert, bis $t = 3$ mm. Es ist zu erkennen, dass die Haftkraft mit kleiner werdendem Luftspalt in etwa quadratisch zunimmt. Dieses ist in Abbildung 6.4 zu sehen.

Außerdem wurden die so berechneten Haftkräfte für $t = 0$ mm extrapoliert. Dies ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Als Näherungsfunktion wurde ein Polynom quadrati-

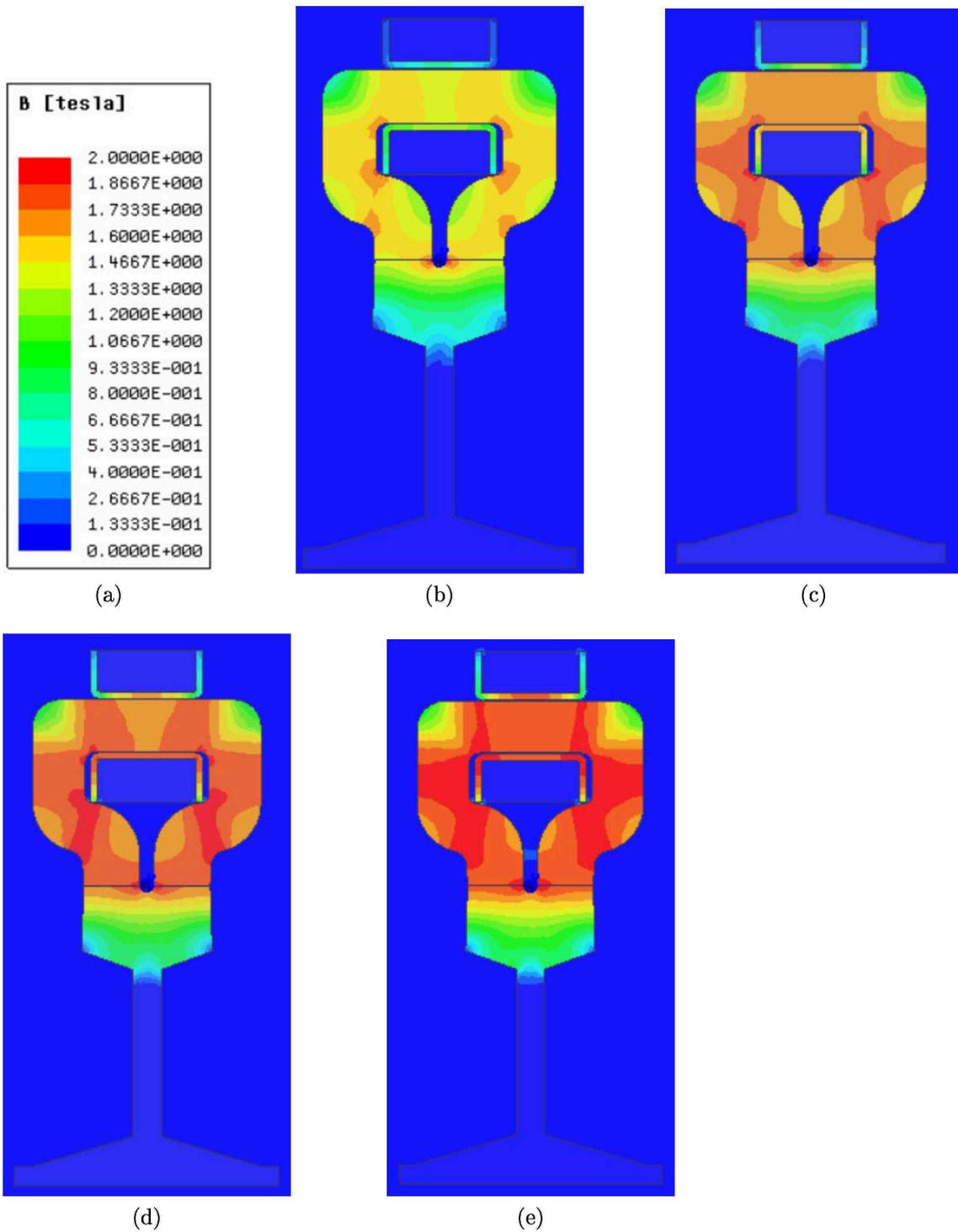


Abbildung 6.2: B- Feld a) Legende; b) $\Theta = 1000 \text{ AW}$; c) $\Theta = 2000 \text{ Aw}$; d) $\Theta = 3000 \text{ AW}$; e) $\Theta = 4000 \text{ Aw}$

6.1 Vereinfachtes Modell

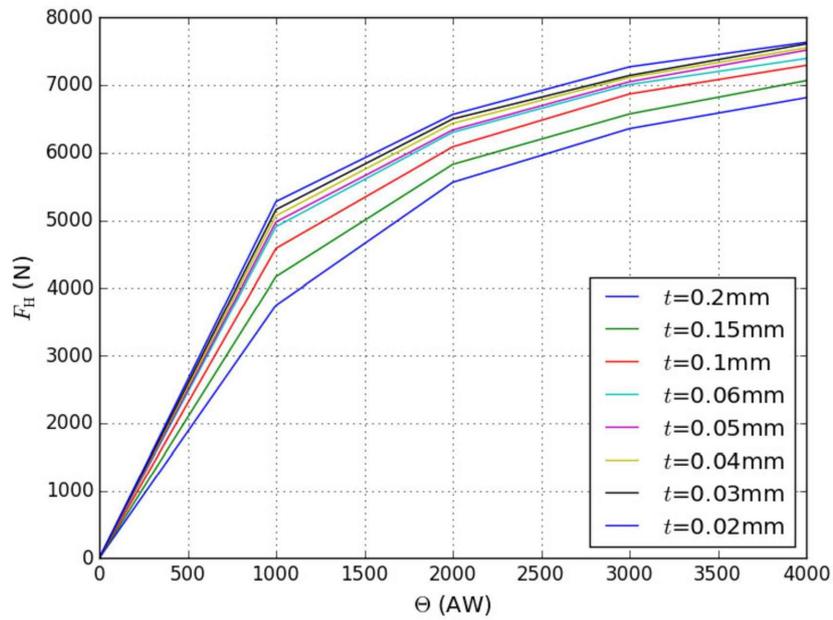


Abbildung 6.3: Haftkräfte für verschiedene Luftspalte t

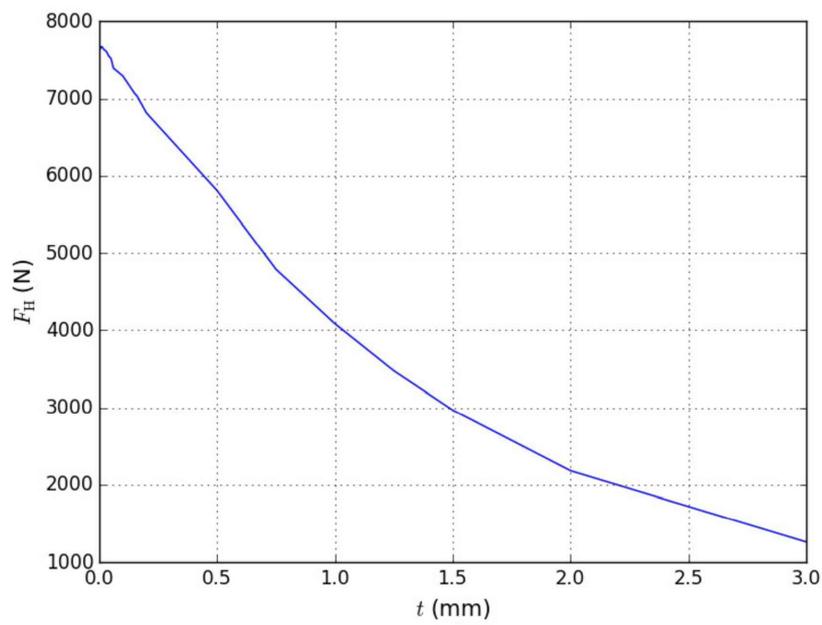


Abbildung 6.4: Kraft- Abstandsdiagramm für $\Theta = 4000$ AW

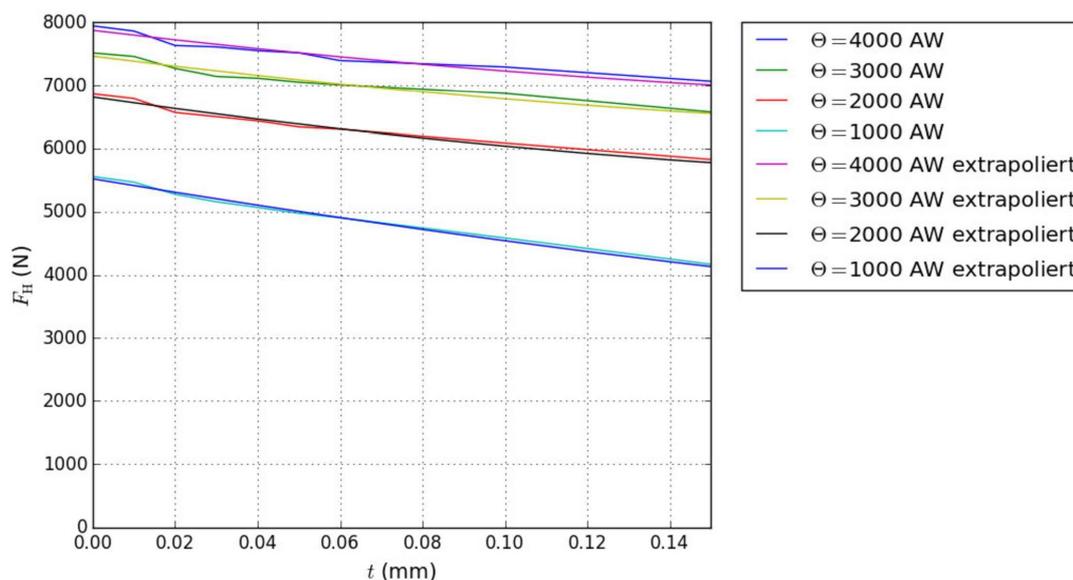


Abbildung 6.5: Extrapolierte Kurve

scher Ordnung verwendet. Dieses wurde mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate an die berechneten Haftkräfte bei den jeweiligen Erregungen (z.B. $\Theta = 4000$ AW) angenähert. Es ist zu erkennen, dass zwischen den extrapolierten und den simulierten Werten bei $t = 0$ mm, für sämtliche Erregungen, nur geringe Abweichungen der Haftkräfte auftreten. Außerdem kann erkannt werden, dass die simulierten Haftkräfte bei sehr kleinen Luftspalten ($t < 0.06$ mm) eine gewisse Streuung aufweisen. Der Grund dafür dürfte die bereits erwähnte Verzerrung der Tetraederelemente im Luftspalt, welche auch bereits weiter oben diskutiert wurde, sein.

Weiters ist in Abbildung 6.5 zu erkennen, dass die extrapolierten und die mithilfe des Maxwell'schen Tensors berechneten Werte sehr gut zusammenpassen. Die Ergebnisse für den Fall das Kontakt besteht und die Abweichungen sind in Tabelle 6.2 dargestellt.

Zuletzt wurden noch die magnetischen Flussdichten in Abbildung 6.6 dargestellt. Zusätzlich wurde, um die Flussrichtung in Zwischenglied und Schiene darzustellen, die Flussdichtevektoren dargestellt (siehe Abbildung 6.6f).

6.1.3 Physikalisch korrekter Luftspalt

Als Ausgangswert für diese Simulation wurde angenommen, dass im Mittel ein Luftspalt von $t = 20\mu\text{m}$ vorhanden ist. Damit wurde, wie unter Kapitel 4.6.3 beschrieben, wieder die Haftkraft F_H zwischen Magnetglied und Schiene berechnet. Die ermittel-

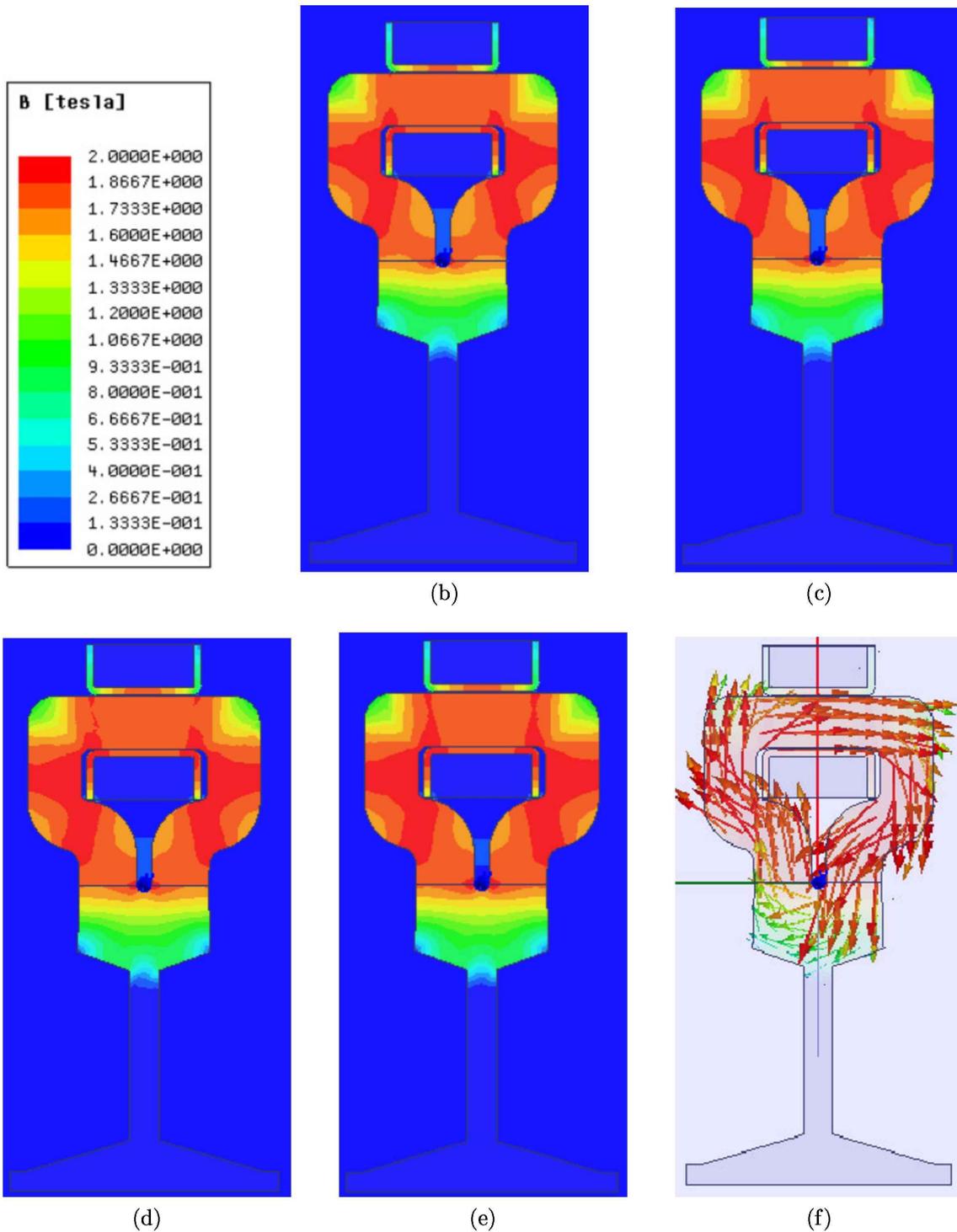


Abbildung 6.6: B - Feld, $\Theta = 4000\text{AW}$ a) Legende; b) $t = 0.2\text{mm}$; c) $t = 0.15\text{mm}$; d) $t = 0.1\text{mm}$; e) $t = 0.05\text{mm}$; f) Vektordarstellung für $t = 0.02$

Tabelle 6.2: Ergebnisse für Kontakt extrapoliert

Erregung in AW	F_H berechnet in N	F_H extrapoliert in N	Abweichung in %
4000	7942.5	7960.4	0.22
3000	7514.1	7470.2	0.58
2000	6860.4	6907.0	0.67
1000	5558.4	5524.6	0.61

ten Zusammenhänge von Luftspaltänderung Δt bezogen auf die Haftkraft F_H für das gesamte Modell (100%) und für ein nur teilweises Aufliegen (10%) sind in Abbildung 6.7 abgebildet.

Diese wurden nun mit einem Polynom 6. Ordnung angenähert. Das ermittelte Polynom ist in Tabelle 6.3 angeführt, sowohl für das gesamte (100%), als auch für das Modell mit teilweisem Aufliegen (10%).

Tabelle 6.3: Angenäherte Polynome für das Modell

Modell	x^6	x^5	x^4	x^3	x^2	x^1	x^0
100%	1.13e-05	1.14e-08	-5.86e-13	1.92e-17	-3.31e-22	2.82e-27	-9.39e-33
10%	1.13e-05	1.14e-07	-5.86e-11	1.92e-14	-3.31e-18	2.82e-22	-9.39e-27

Die Berechnungen wurden hier nur für eine Erregung von $\Theta = 4000\text{AW}$ durchgeführt, um die Änderung des Luftspaltes Δt zu betrachten, wobei hier nur eine geringe Flächenpressung zwischen Magnet und Schiene vorliegt. Diese kann leicht, mithilfe der Annahme, abgeschätzt werden dass die Kraft ca. 7700N beträgt und der Magnet vollständig aufliegt

$$p_{FI} \approx \frac{7700N}{32 \cdot 90 \cdot 2} \approx 1.33 \text{ N/mm}^2.$$

Die ermittelten Veränderungen des Luftspaltes für das Modell, deren Kräfte und der dadurch entstehende Fehler der Haftkräfte sind in Tabelle 6.4 angeführt. Dabei zeigt

Tabelle 6.4: Veränderungen des Luftspaltes und Fehler der Haftkräfte

Modell	Δt in μm	Haftkraft bei t in N	Haftkraft bei $t+\Delta t$ in N	Fehler in %
100%	0.0721	7662.5	7665.3	0.0365
10%	0.2232	7662.5	7663.4	0.0117

te sich, dass die Auswirkungen der Haftkraft auf den Luftspalt sehr gering sind.

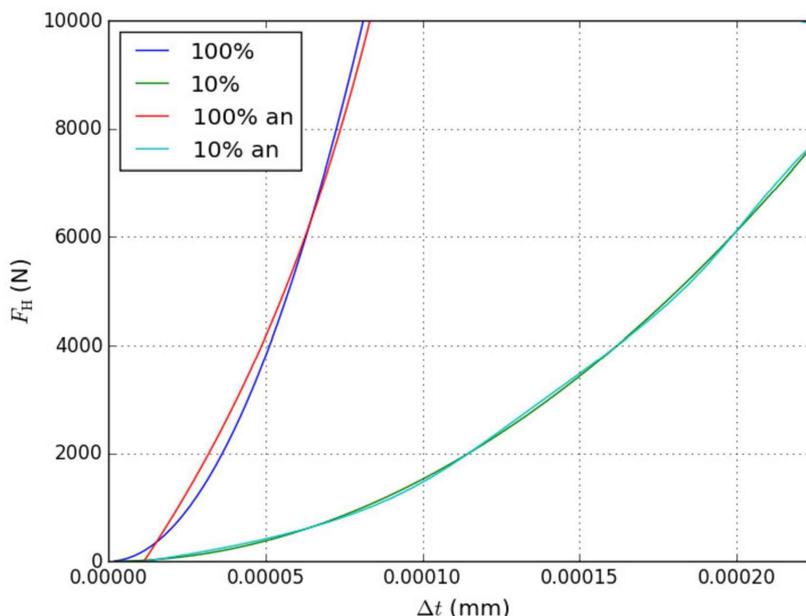


Abbildung 6.7: Kraftverlauf bei Luftspaltänderung

6.1.4 Längs Verschiebung des Stempels

Zuletzt wurde noch die Verschiebung der Position des Stempels in x - Richtung betrachtet. Die Kräfte wurden in diesem Fall mit der Methode der virtuellen Arbeiten auf diesen berechnet. Dafür wurde der physikalisch korrekte Luftspalt verwendet. Die berechneten Kräfte für die Verschiebungen x sind in Abbildung 6.8 dargestellt, wobei F_x die Kraft in x - Richtung, also in Richtung der Verschiebung und F_y die Kraft normal dazu darstellt (siehe Abbildung 4.4).

Es ist zu erkennen, dass diese nur sehr geringe Werte aufweisen, welche prozentual im Vergleich zu den Hauptkräften in z - Richtung kleiner sind als die berechnete Fehlertoleranz und kein Trend erkennbar ist. Die Haftkräfte schwanken hier mit einer Streuung, welche durch die Fehlertoleranz begründet werden kann. Zusätzlich wurden bei jeder Simulation die Haftkräfte zwischen Magnetglied und Stempel (F_H) berechnet. Diese sind in Abbildung 6.9 für die jeweilige seitliche Verschiebung des Stempels abgebildet. Da der Stempel im Vergleich zur simulierten Schiene welche eine Länge von 100 mm aufweist, nur eine Länge von 40 mm aufweist, sind die berechneten Werte deutlich geringer.

6.1 Vereinfachtes Modell

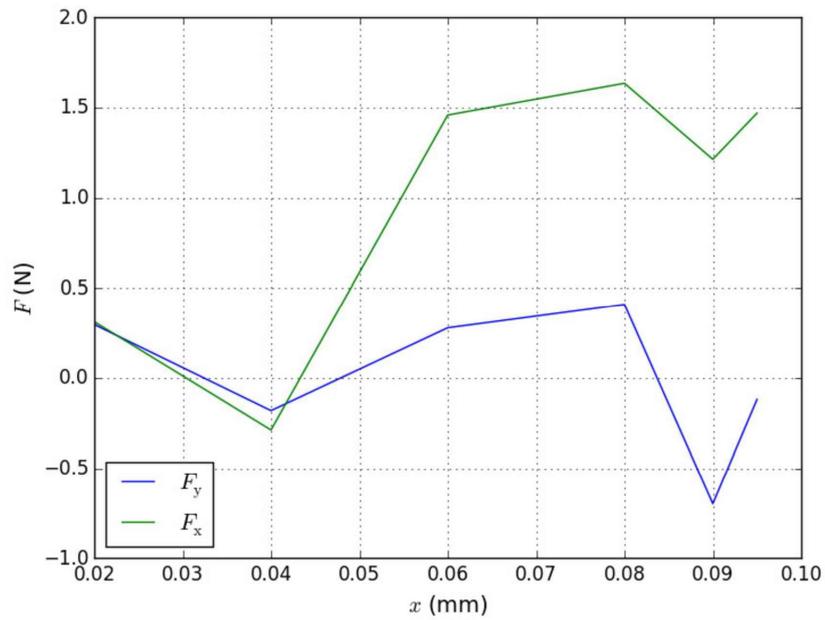


Abbildung 6.8: Kräfte bei Verschiebung des Stempels

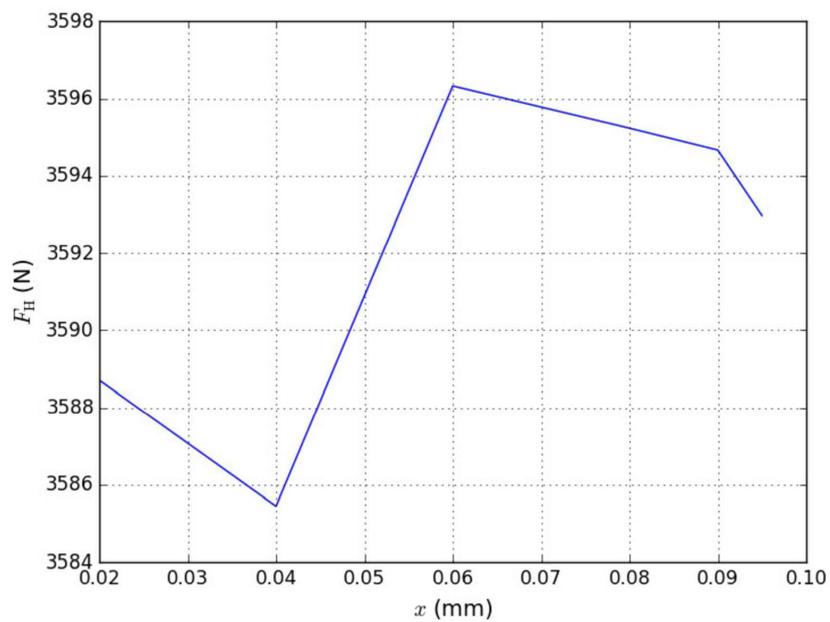


Abbildung 6.9: Haftkraft bei Verschiebung des Stempels

6.2 Simulation des Magneten

Hier sollen nun die Ergebnisse des Kapitels 5 dargestellt werden. Zuerst wurden die diversen Geometriestudien durchgeführt, um ein bestmögliches Modell zu erstellen.

6.2.1 Geometriestudien

Die Ergebnisse beziehen sich auf das jeweilige Kapitel in 5.1. Es wurde hier jeweils die Haftkraft zwischen dem Magnetglied und der Schiene, bzw. dem Stempel der Haftkraftwaage berechnet. Als Luftspalt wurde hier wie bereits erwähnt $t = 0.02$ mm verwendet.

Radien des Zwischengliedes

Bei den Radien wurden, wie erwähnt, zwei Varianten berechnet, mit allen und nur mit den großen R10 Radien. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.10 im Vergleich zum vereinfachten Modell aus dem vorigen Kapitel dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass das Modell mit Radien etwas geringere Haftkräfte aufweist, als das vereinfachte Modell, dass die beiden Modelle mit Radien jedoch annähernd gleiche Ergebnisse liefern. Deshalb wird bei der weiteren Berechnung das Modell, welches nur die großen R10 Radien enthält, verwendet. Zusätzlich ist in Abbildung 6.11b die magnetische Flussdichteverteilung B für das Modell mit allen Radien abgebildet. Es ist zu erkennen, dass im Bereich des Magnetgliedes die Flussdichten B sehr hohe Werte aufweisen, jedoch diese in der Schiene mit Abstand zum Magneten abnehmen, bis sie im Schienensteg (1) nahezu verschwinden.

Verkürztes Modell

In Abbildung 6.10 ist zusätzlich die Simulation des verkürzten Modells abgebildet. Hier entsteht, wie vermutet, ebenfalls ein vernachlässigbarer Unterschied zu dem Modell mit den großen Radien, welches mit Ausnahme der Schiene gleich ist. Dies zeigt bereits die Betrachtung der magnetischen Flussdichte B im Schienensteg in Abbildung 6.11b, wie bereits beschrieben. In Abbildung 6.11c ist das verkürzte Modell abgebildet. Es ist in Abbildung 6.11b und 6.11c zu erkennen, dass im Schienensteg die Flussdichte nahezu verschwindet.

Luftspalt zwischen den beiden Teilen des Magnetgliedes

Als Nächstes wurde mit einem Luftspalt zwischen den rechten und dem linken Teil des Magnetgliedes t_0 simuliert. Hier würde man, wenn die selben Betrachtungen wie unter Kapitel 6.1.3 durchführt würden, da hier die selben Rauheiten auf den Kontaktflächen zwischen den Teilen des Magnetgliedes vorgeschrieben sind wie auf

6.2 Simulation des Magneten

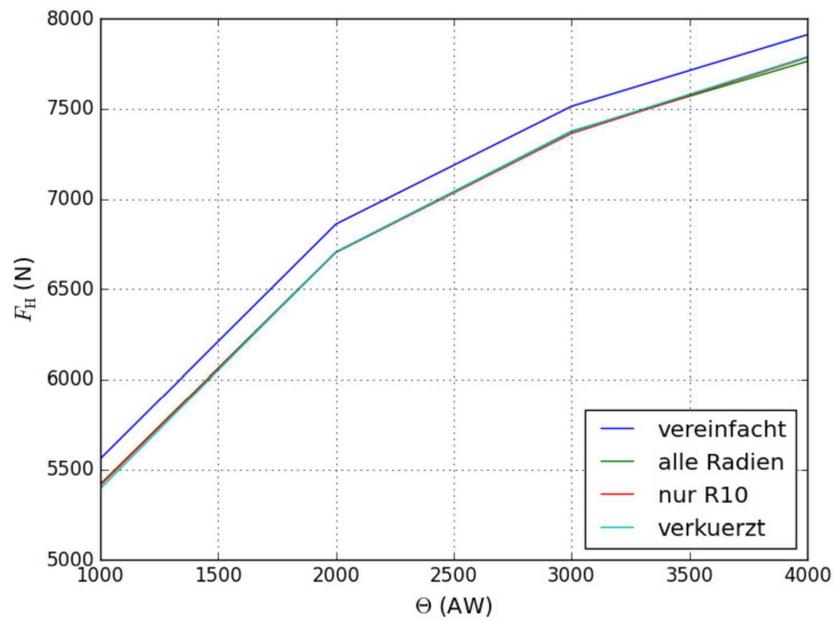


Abbildung 6.10: Geometriestudien: Radien und Verkürzen des Modells

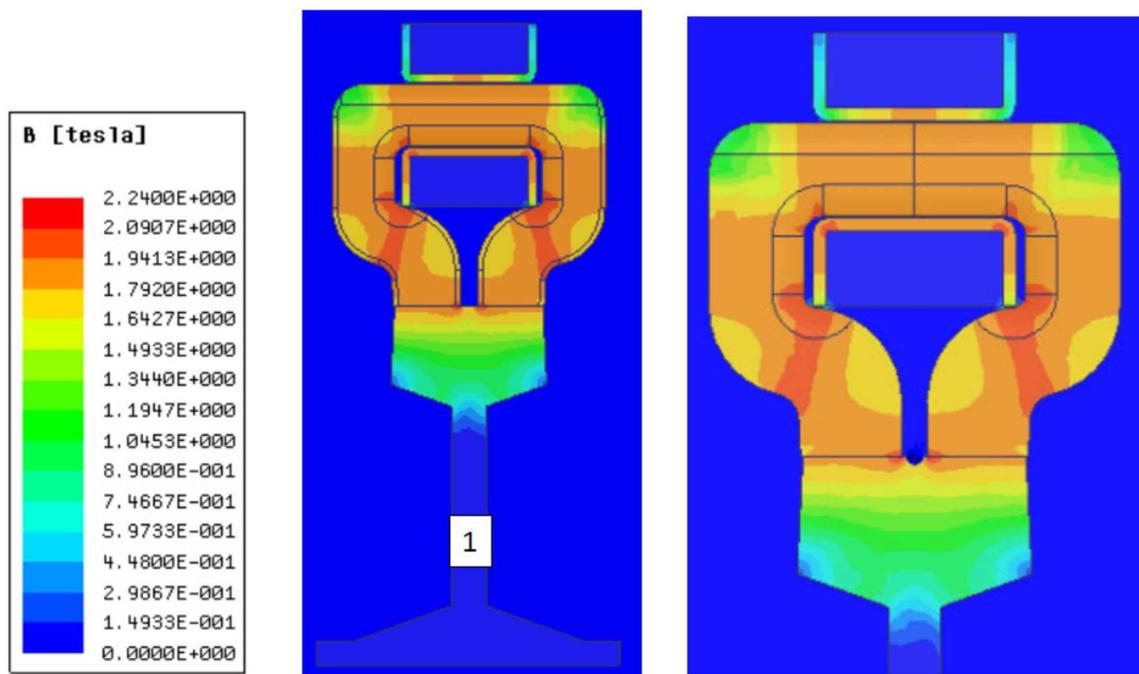


Abbildung 6.11: B -Feld für alle Radien. a) Legende; b) mit allen Radien; c) verkürzt

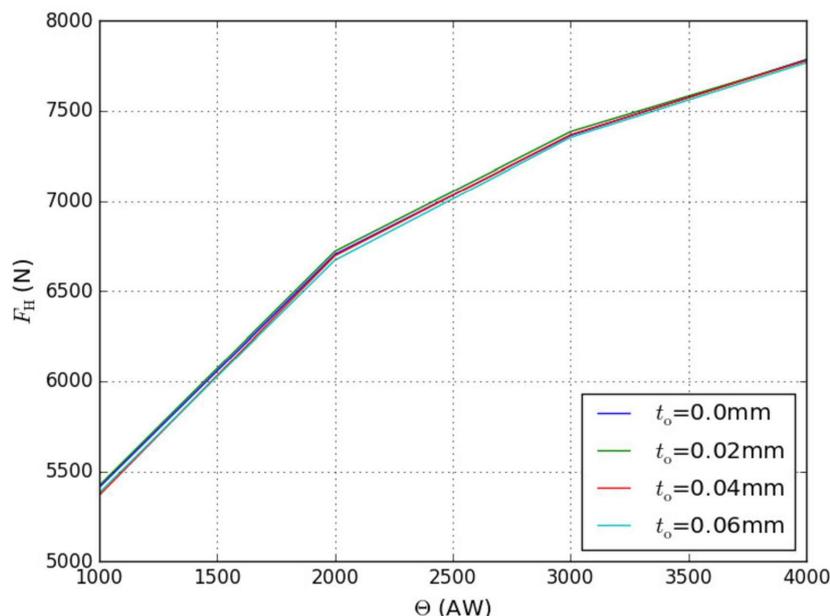


Abbildung 6.12: Haftkräfte für einen Luftspalt zwischen den Magnetgliedern

der Kontaktfläche zwischen Schiene und Magnet, wieder auf einen physikalisch korrekten Luftspalt von ca. $t_o = 0.02$ mm kommen. Die Ergebnisse der berechneten Haftkräfte F_H sind in Abbildung 6.12 dargestellt. Zusätzlich ist die Haftkraftkurve des Modells ohne Luftspalt zwischen den Teilen des Magnetgliedes eingezeichnet. Hierbei handelt es sich um das Modell, mit den R10 Radien.

In Abbildung 6.13 ist die Abweichung von der Kurve ohne Luftspalt zwischen den beiden Teilen des Magnetgliedes ($t_o = 0.0$ mm) angeführt. Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen bei den verschiedenen modellierten Luftspalten im Vergleich zu dem Modell ohne diesem Luftspalt wesentlich geringer als die Fehlertoleranz für die Iterationen von 1% und daher vernachlässigbar sind.

Die verschiedenen magnetischen Flussdichten B der Modelle mit und ohne Luftspalt ($t_o = 0$ und mit $t_o = 0.06$ mm) sind in Abbildung 6.14 dargestellt. Es sind hier mit freiem Auge jedoch keine, bzw. nur kleinste Unterschiede feststellbar.

Magnetkörper; unmagnetische Zwischenleiste; korrektes Modell mit tatsächlicher Schiene

Hier sind die Auswirkungen der folgenden drei Modelle dargestellt: Als erstes das Modell mit Magnetkörper, jedoch ohne die unmagnetische Zwischenleiste. Als zweites das Modell mit der unmagnetischen Zwischenleiste und zuletzt das tatsächliche

6.2 Simulation des Magneten

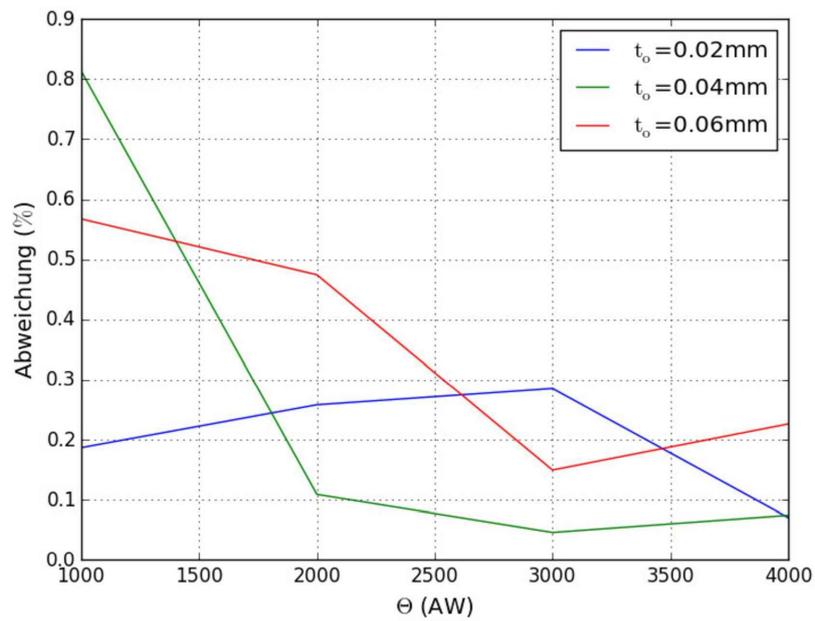


Abbildung 6.13: Abweichungen für einen Luftspalt zwischen den Magnetgliedern

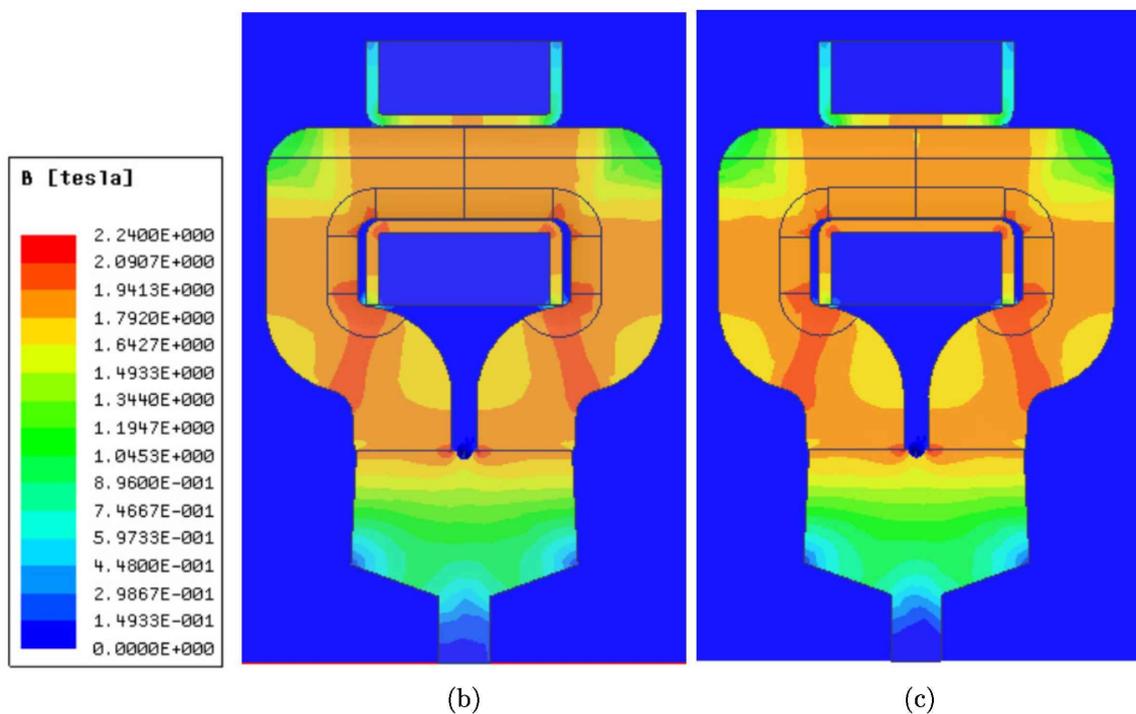


Abbildung 6.14: B - Feld a) Legende; b) $t_o = 0.0$ mm; c) $t_o = 0.06$ mm

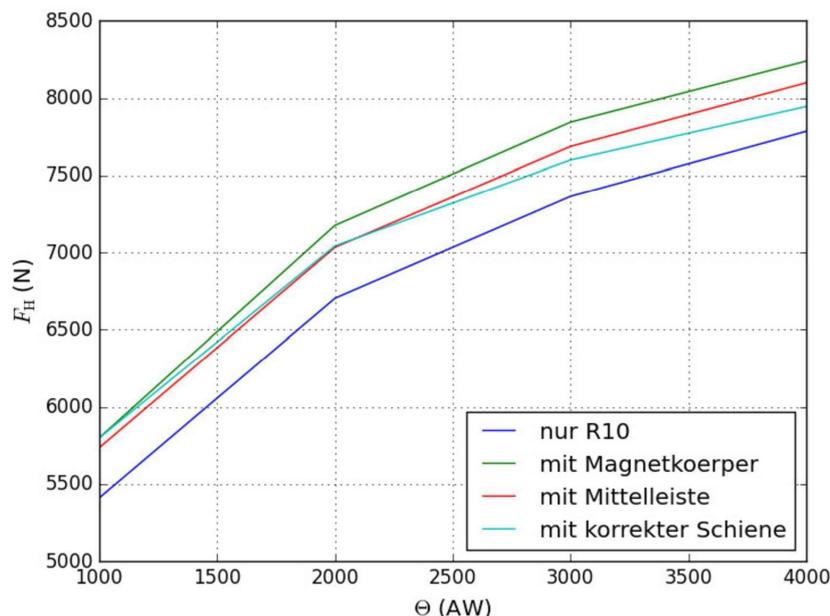


Abbildung 6.15: Verschiedene Geometriestudien

Modell des Magnetgliedes wie dieses auch für die genauen Simulationen verwendet wird, mit der Schiene, wie diese auch in der tatsächlichen Haftkraftwaage verwendet wird, jedoch ohne Abfräsuren im Schienensteg. Die Ergebnisse der berechneten Haftkräfte F_H sind in Abbildung 6.15 dargestellt.

Darin ist zu erkennen, dass der Magnetkörper, wie erwartet, einen großen Einfluss auf das Ergebnis hat, da dieser das Magnetfeld verstärkt. Die Zwischenleiste besitzt ebenfalls einen kleinen Einfluss, da diese das Ergebnis leicht abschwächt. Auch die Schiene schwächt das Ergebnis leicht ab, vor allem bei den höheren Erregungen. Die Schienenform hat jedoch einen eher geringen Einfluss.

Die magnetische Flussdichte des Modells mit der tatsächlich verwendeten Schiene ist in Abbildung 6.16c dargestellt. Zum Vergleich ist hier noch einmal das verkürzte Modell mit der vereinfachten Schiene (Abbildung 6.16b) daneben abgebildet. Es sind deutlich die Auswirkungen der tatsächlich verwendeten Schiene am Übergang zwischen Magnet und Schiene zu sehen, aber auch der des unmagnetischen Stiftes. Auf die Abbildung der anderen beiden Geometriestudien soll an dieser Stelle jedoch verzichtet werden, da diese keine weiteren Erkenntnisse liefern, da kaum Unterschiede erkennbar sind.

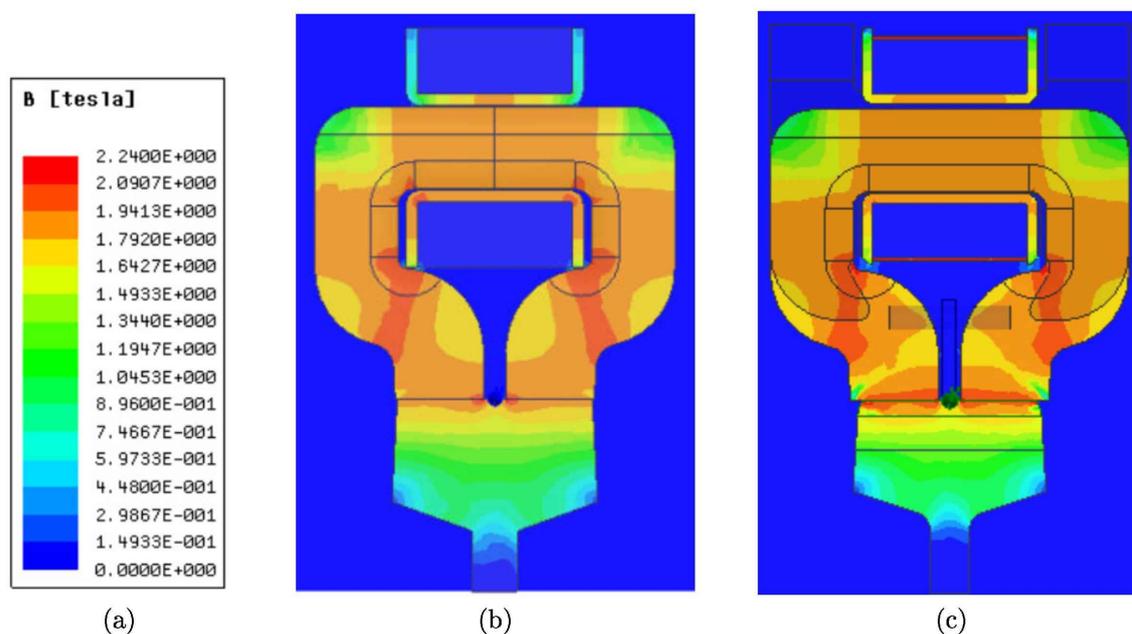


Abbildung 6.16: B- Feld a) Legende; b) verkürztes Modell; c) komplettes Modell mit korrekter Schiene

Vergleich Modell mit und ohne Stempel

Es wurden zuerst die Haftkräfte zwischen Schiene und Magnetglied aus der Simulation mit der tatsächlichen Schiene von vorhin mithilfe von (5.1) berechnet und mit dem Ergebnis, bei welchem mit einem Stempel der Haftkraftwaage simuliert wurde und somit direkt die Haftkraft auf den Stempel berechnet wurde, verglichen. Dies ist in Abbildung 6.17 dargestellt. Da der Stempel im Vergleich zu den simulierten Schienen, welche eine Länge von 100 mm aufwiesen, nur eine Länge von 40 mm hat, sind die berechneten Werte für die folgenden Modelle mit Stempel deutlich geringer.

Es ist zu erkennen, dass große Abweichungen zwischen dem Modell mit (mit Stempel simuliert) und dem Modell ohne Stempel (umgerechnet) bestehen, siehe Abbildung 6.17. Deshalb wird im folgenden mit Stempel simuliert.

Korrektes Modell ohne Luftspalt zwischen Stempel und Schiene; Modell mit Schienenkopf wie bei der tatsächlichen Haftkraftwaage

Die letzten beiden Geometriestudien, welche durchgeführt wurden, dienen zum Vergleich des Modells ohne einem Luftspalt zwischen dem Stempel des Haftkraftwaagenmodells und den Schienenteilen (*Stempel ohne Luftspalt*) mit einem Modell mit einem solchen Luftspalt (*Stempel mit Luftspalt*). Weiters wird der Einfluss des korrekten Schienenkopfes der tatsächlichen Haftkraftwaage untersucht (*mit kor. Geom.*

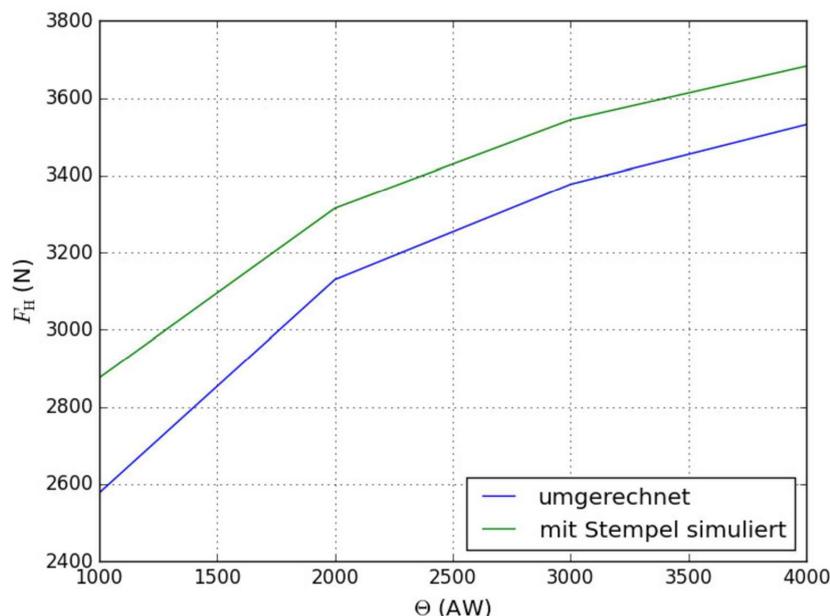


Abbildung 6.17: Vergleich Simulation mit Stempel und ohne Stempel, umgerechnet auf Stempellänge

der HKW). Diese sind in Abbildung 6.18 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass das Vernachlässigen des Luftspalts zu geringfügig niedrigeren Ergebnissen führt. Jedoch sinkt gleichzeitig die Simulationszeit erheblich, weshalb diese Vernachlässigung durchgeführt werden soll. Der dadurch entstehende Fehler ist im Bereich von $<1\%$ angesiedelt.

Die Geometrie der tatsächlichen Haftkraftwaage führt, wie zu erwarten, zu leicht niedrigeren Kräften. Dies ist aufgrund des geringeren Volumens der Schiene im Bereich der Simulation zu erklären.

Ein Vergleich der magnetischen Flussdichten des Modells ohne Luftspalt zwischen dem Stempel und den beiden Schienenteilen des tatsächlichen Haftkraftwaagenmodells ist in Abbildung 6.19 dargestellt. Zwischen den Modellen mit und ohne Luftspalt ist kaum ein Unterschied zu bemerken, deshalb ist das Modell mit Luftspalt nicht dargestellt. Das korrekte Modell der Haftkraftwaage zeigt deutlich, dass das geringere Volumen der Schiene im Bereich des Stempels negative Einflüsse auf die Haftkraft besitzt. Die beiden Stempel sind zum Vergleich in Abbildung 6.20 dargestellt. Darin ist deutlich das verringerte Volumen des tatsächlichen Stempels zu erkennen. Die Auswirkungen dadurch sind aber eher klein sind. Es ist zu erkennen,

6.2 Simulation des Magneten

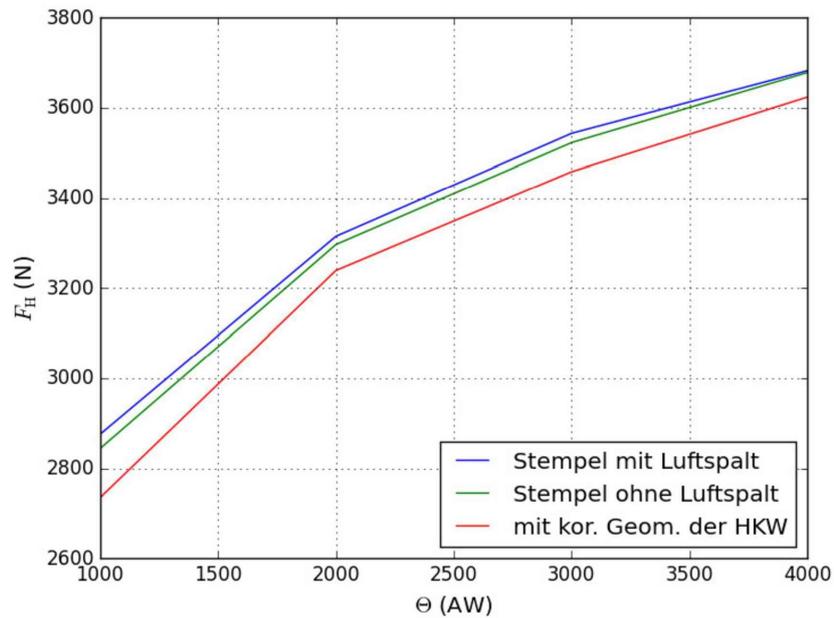


Abbildung 6.18: Verschiedene Geometriestudien, korrektes Modell

dass das Magnetfeld im Stab am unteren Ende des Stempels nicht verschwindet.

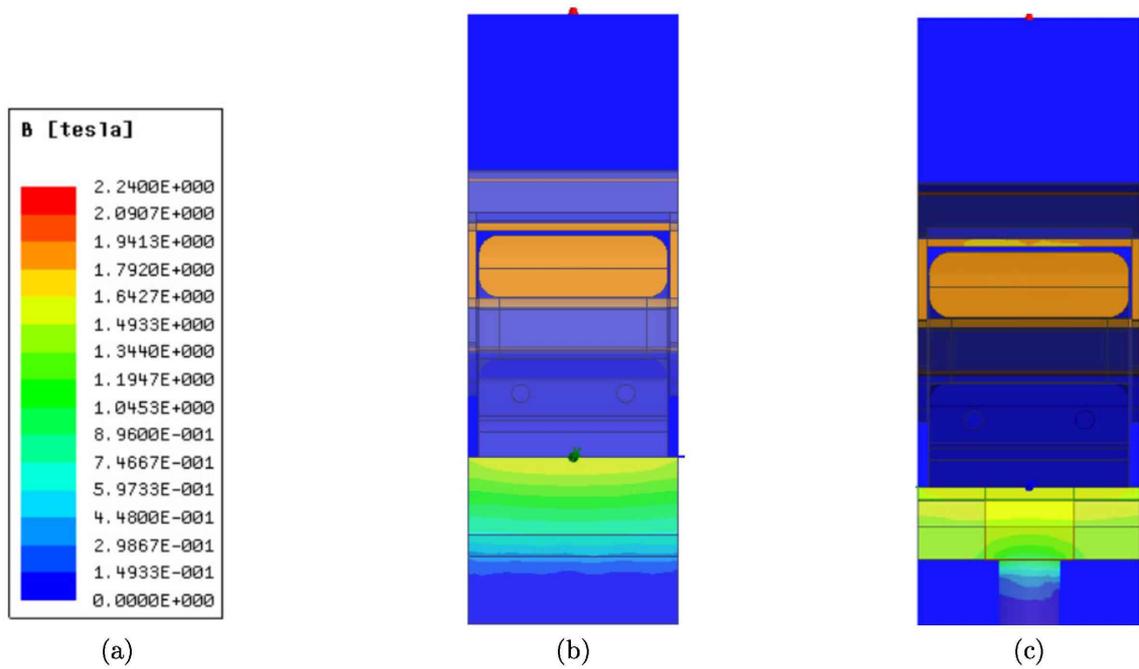


Abbildung 6.19: B - Feld a) Legende; b) komplettes Modell mit Stempel; c) tatsächliche Geometrie der Haftkraftwaage

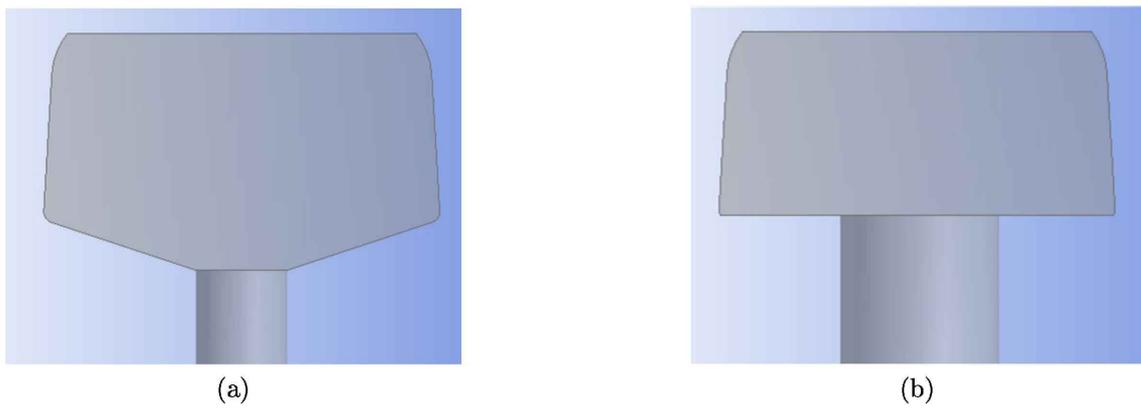


Abbildung 6.20: Vergleich der beiden Stempelformen a) vereinfachter Stempel; b) tatsächlich verwendeter Stempel der Haftkraftwaage

6.3 Simulation des Magnetgliedes

6.3.1 Simulation von R200 mit verschiedenen Luftspalten

Mit dem mithilfe der Geometriestudien ermittelten Modells, welches in Kapitel 5.3 beschrieben ist, wurden nun die genauen Simulationen des Magnetgliedes durchgeführt. Zuerst wurden die Haftkräfte F_H des Materials R200 mit $T = 25^\circ\text{C}$ mit verschiedenen Luftspalten t simuliert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.21 abgebildet.

Darin ist, wie zu erwarten, zu erkennen, dass die Haftkräfte mit größer werdendem Luftspalt kleiner werden. Dies deckt sich auch mit den Erkenntnissen aus der Simulation des vereinfachten Magneten. Bei $t = 0.1\text{ mm}$ und $\Theta = 6000\text{ AW}$ weicht die Kurve leicht von der Form ab, welche sie theoretisch aufweisen sollte. Der ermittelte Wert der Haftkraft ist zu hoch.

In Abbildung 6.22 sind nun die magnetischen Flussdichten B für den größten und kleinsten Luftspalt dargestellt. Hierin sind jedoch nur geringe Unterschiede zu erkennen.

6.3.2 Simulation der verschiedenen Materialien

Beim vorigen Modell wurde der Luftspalt variiert. Für alle weiteren Haftkraftberechnungen wird der Luftspalt nun, wie bereits erwähnt, mit $t = 0.02\text{ mm}$ festgelegt. Weiters wurden mit den verschiedenen Schienenmaterialien die Haftkräfte zwischen dem Stempel der Haftkraftwaage und dem Magnetglied ermittelt. Dabei wurde mit den verschiedenen Schienenmaterialien, bei welchen die magnetische B-H- Kurve gemessen wurde (R200; R260; R350HT) simuliert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.23 dargestellt.

Die Kurven der Haftkräfte F_H von R260 und R350HT verlaufen annähernd parallel und weisen nur bei $\Theta = 3000\text{ AW}$ eine kleine Abweichung auf, welche jedoch mit 0.87% innerhalb der Schwankungsbreite der Simulation liegen. Beide Kurven weisen jedoch Unterschiede zur Haftkraftkurve von der mit der Schiene R200 berechneten auf. Diese weisen niedrigere Haftkräfte auf. Abbildung 6.24 zeigt die B - Felder der verschiedenen Simulationen bei einer Erregung von $\Theta = 6000\text{ AW}$.

Es ist zu erkennen, dass die Materialien R260 und R350HT im Vergleich zu R200 geringfügig niedrigere Werte für die magnetischen Flussdichten B aufweisen.

6.3 Simulation des Magnetgliedes

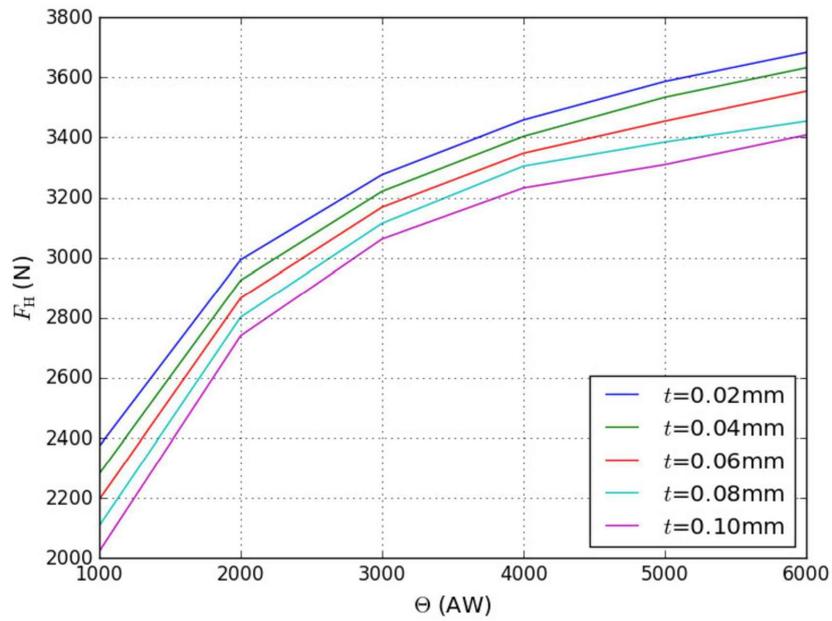


Abbildung 6.21: Haftkräfte für verschiedene Luftspalte t

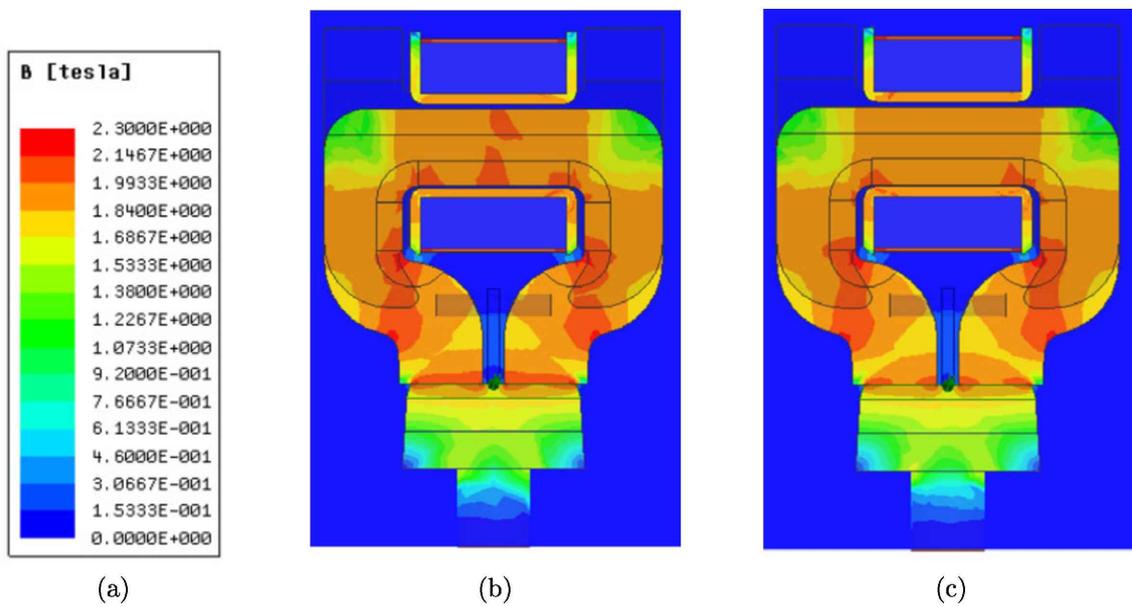


Abbildung 6.22: B - Feld a) Legende; b) $t = 0.02$ mm; c) $t = 0.1$ mm

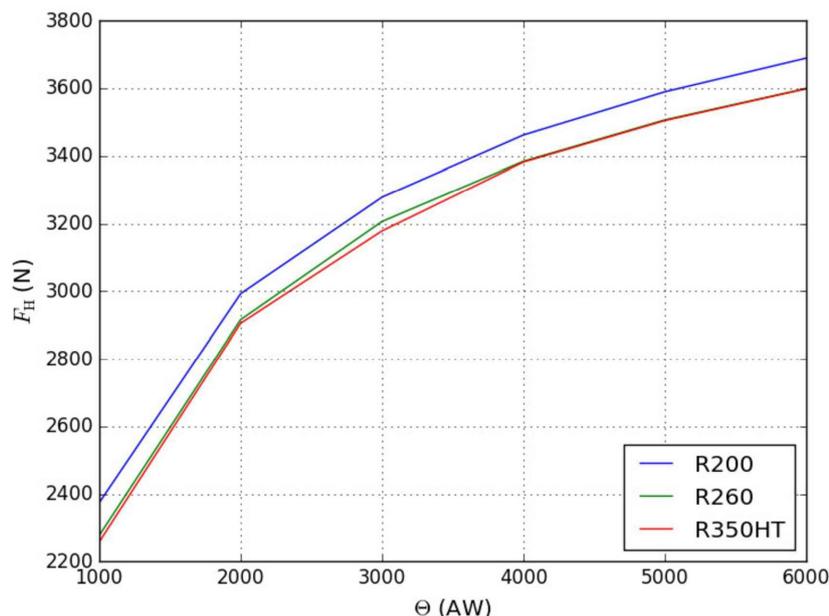


Abbildung 6.23: Haftkräfte für verschiedene Materialien

6.3.3 Simulation der verschiedenen Materialien bei verschiedenen Temperaturen

Zuletzt wurden die B-H- Kurven der verschiedenen Materialien bei den verschiedenen Temperaturen extrapoliert und die Haftkräfte F_H simuliert. Abbildung 6.25 zeigt die Kurven für R200, Abbildung 6.26 die Kurven für R260 und Abbildung 6.27 die Ergebnisse für R350HT.

Es ist zu erkennen, dass die Veränderungen bis zu einer Temperatur von $T = 50^\circ\text{C}$ nur sehr gering sind. Hier befinden sind die Veränderungen in etwa innerhalb von 2%. Die Simulationsgenauigkeit beträgt hier jedoch ca. 1%. Danach werden die Haftkräfte immer geringer. Dies deckt sich auch mit den gemessenen B-H- Kurven. Außerdem wurden für eine Schiene aus R200 für $T = -25^\circ\text{C}$; 150°C die jeweiligen Flussdichtefelder B dargestellt (siehe Abbildung 6.28).

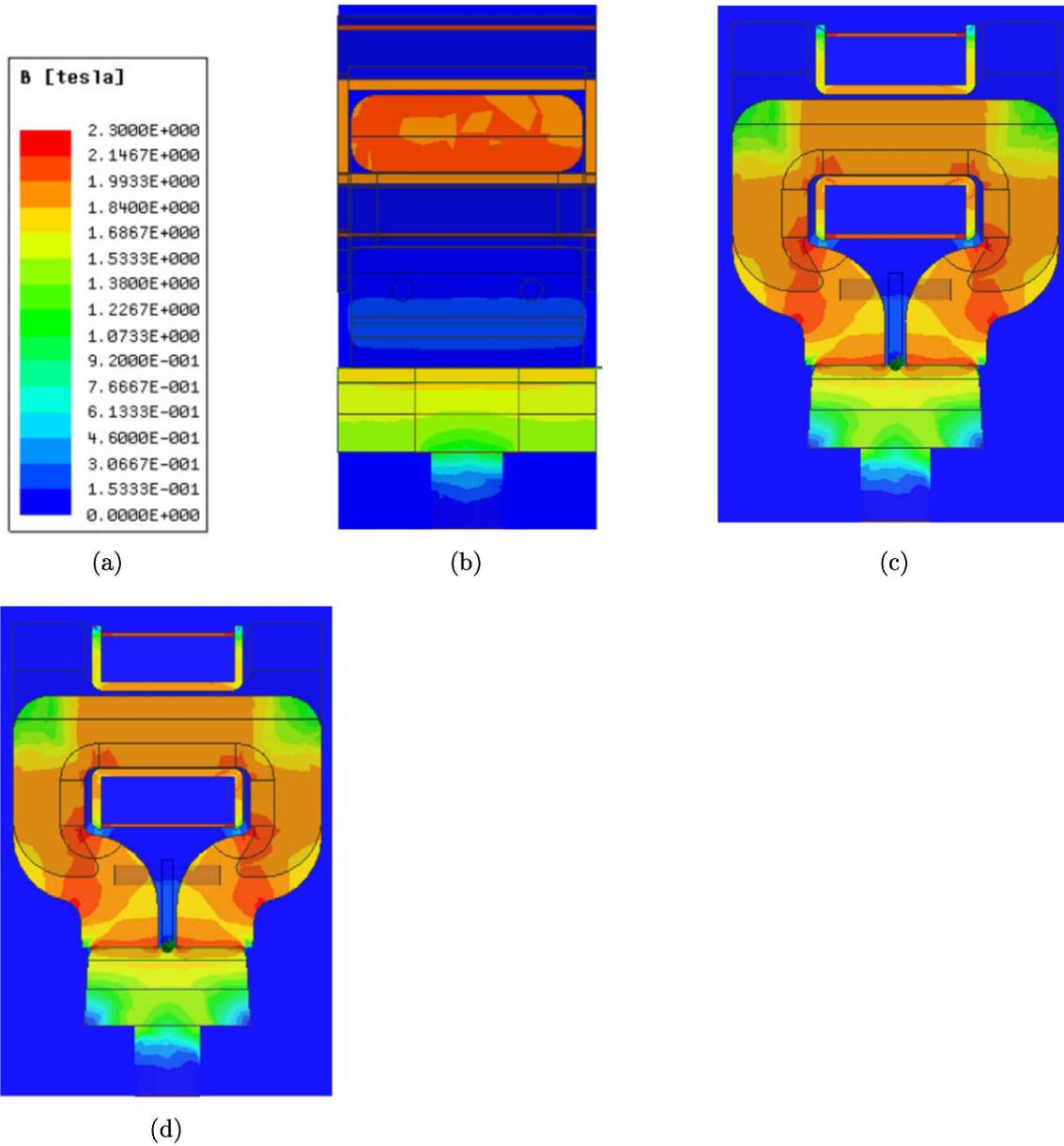


Abbildung 6.24: *B*- Feld a) Legende; b) R200 seitlich c) R260; d) R350HT

6.3 Simulation des Magnetgliedes

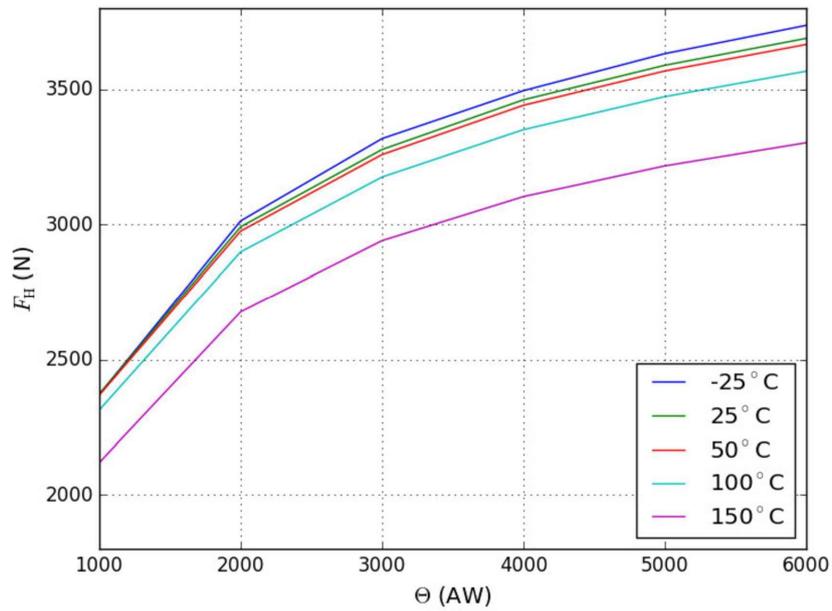


Abbildung 6.25: Temperaturabhängige Haftkräfte R200

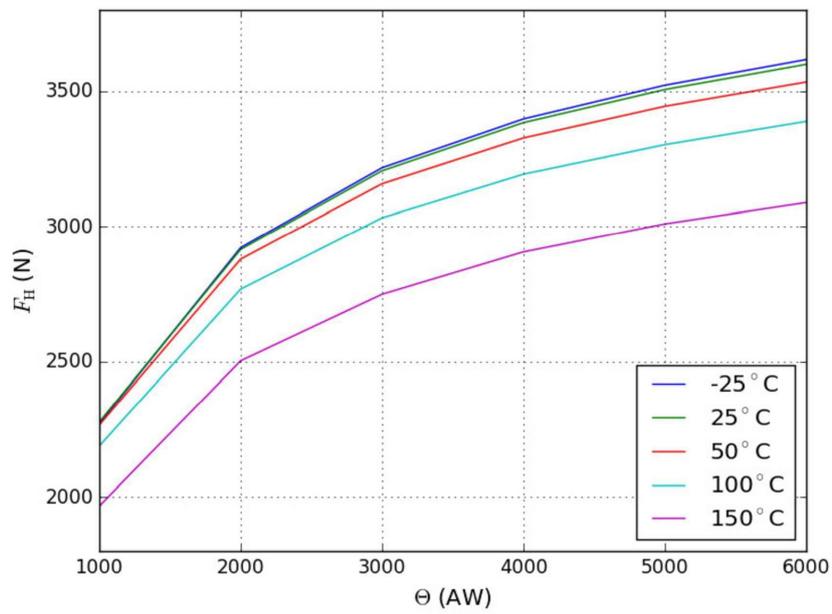


Abbildung 6.26: Temperaturabhängige Haftkräfte R260

6.3 Simulation des Magnetgliedes

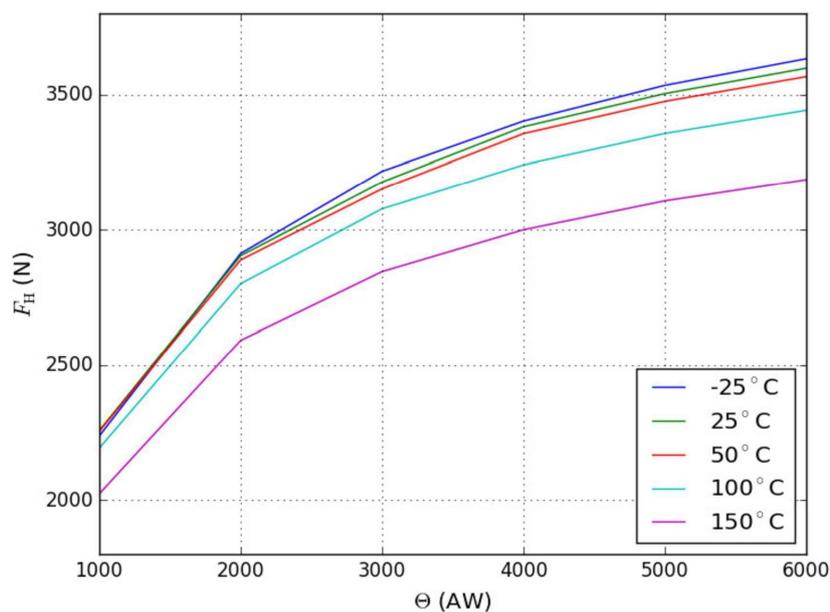


Abbildung 6.27: Temperaturabhängige Haftkräfte R350HT

Tabelle 6.5: Haftkräfte bei $\Theta = 6000$ AW für verschiedene Materialien bei verschiedenen Temperaturen

Modell	R200 in (N)	Abweichung in %	R260 in N	Abeichung	R350HT in N	Abweichung in %
-25°C	3737.5	+1.3	3617.5	+0.5	3633.4	+1.0
25°C	3689.3	—	3599.6	—	3598.5	—
50°C	3666.7	-0.6	3534.4	-1.8	3567.3	-0.9
100°C	3567.8	-3.3	3388.8	-5.9	3442.7	-4.3
150°C	3303.3	-10.5	3089.1	-14.2	3186.8	-11.4

Die jeweiligen Haftkräfte bei $\Theta = 6000$ AW und die Abweichungen dieser von denen bei $T = 25^\circ\text{C}$ sind in Tabelle 6.5 dargestellt.

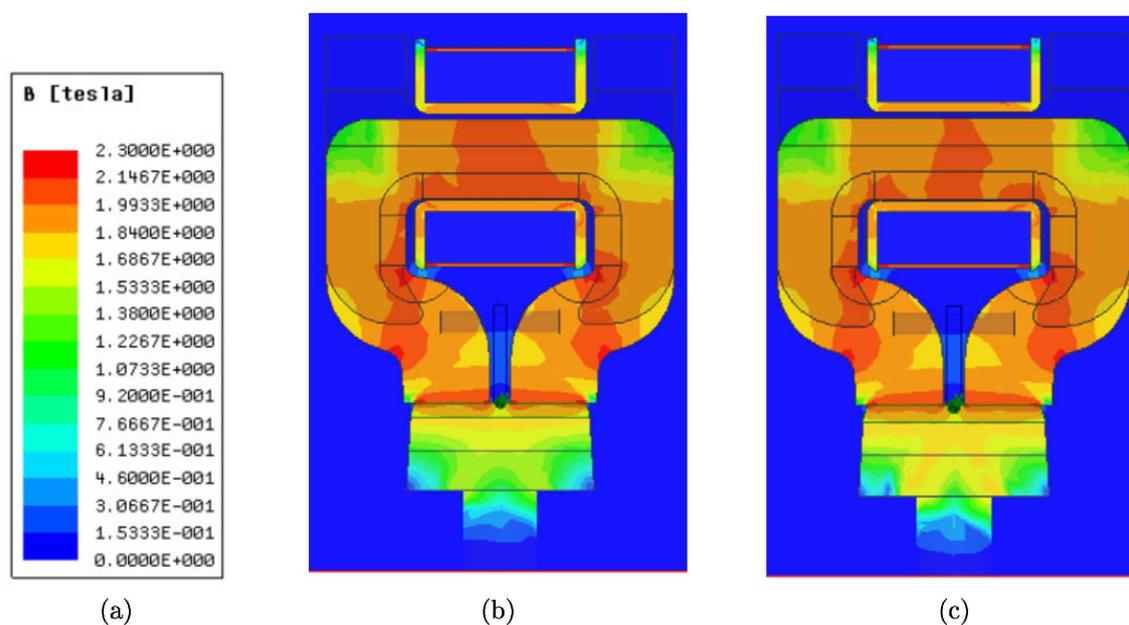


Abbildung 6.28: B - Feld a) Legende; b) R200 -25°C c) R200 150°C

6.4 Diskussion

6.4.1 Vereinfachtes Modell

Die verschiedenen Luftspaltvarianten sollen die verschiedenen Berechnungsmöglichkeiten aufzeigen. Aus der ersten Variante mit beiden Teilen in Kontakt konnte festgestellt werden, dass bei einem Netz welches fein genug ist, die Ergebnisse aus der virtuellen Arbeit und dem Maxwell'schen Tensor, welcher über die Oberfläche integriert wird, ähnlich sind. Jedoch trifft dies nur zu, wenn das Netz mithilfe der Elementkantenlänge stark verfeinert wird und fein genug ist ($h < 1\text{ mm}$). Je gröber das Netz ist, desto ungenauer die Ergebnisse, wobei diese Ungenauigkeiten bis zu ca. 50% betragen können.

Die Vermutung, dass die Berechnung der Haftkraft F_H mithilfe der Methode der virtuellen Arbeiten für Modelle ohne Luftspalt dadurch zulässig ist, ist jedoch falsch. Die Ergebnisse sind zwar brauchbar, jedoch mit großer Vorsicht zu genießen, da die Berechnung physikalisch inkorrekt ist und nur mit einem sehr feinen Netz brauchbare Ergebnisse liefert. Aus diesem Grund wird hier davon abgeraten, vor allem da die Berechnung mit dem Maxwell'schen Tensor nur einen geringen Mehraufwand bedeutet, da dieser sehr einfach in die Berechnung zu implementieren ist.

Vergleicht man die Ergebnisse der berechneten Haftkräfte F_H , welche mithilfe der

Methode der virtuellen Arbeiten extrapoliert wurden, mit denen des Modells, wo die beiden Teile in Kontakt sind so kann festgestellt werden, dass die Haftkräfte sehr ähnlich sind. Betrachtet man die Ergebnisse in Tabelle 6.2 so sieht man, dass die Abweichungen weniger als 1% betragen. Es wurde jedoch zum Berechnen dieser Werte eine Genauigkeit von 1% als Abbruchkriterium verwendet. Die erreichte Genauigkeit ist also in der Schwankungsbreite beider Ergebnisse. Darum kann festgestellt werden, dass die Berechnung mit dem Maxwell' schen Tensor, welcher über die Oberfläche integriert wird, zu brauchbaren Ergebnissen führt.

Weiters ist zu sehen, dass die Kräfte mit zunehmendem Luftspalt in etwa quadratisch abnehmen. Dies ist besonders gut im Kraft- Abstands- Diagramm (siehe Abbildung 6.4) zu erkennen. Dies deckt sich mit der Näherungsformel für die Kraft von Elektromagneten

$$F_H \approx \mu_0 A_{\text{mag}} \frac{N^2 I^2}{4t^2} . \quad (6.1)$$

In (6.1) ist A_{mag} die Querschnittfläche des Magneten und N die Windungszahl der Spule des Elektromagneten.

Zur Berechnung des Magnetgliedes mit einem physikalisch korrektem Luftspalt kann festgestellt werden, dass die Änderungen des Luftspalts sehr marginal sind und auf die berechneten Haftkräfte praktisch keinen Einfluss haben. Dies liegt auch an der geringen Flächenpressung zwischen Magnet und Schiene. Der Fehler bei Nicht- Berücksichtigen dieser Veränderung (siehe Tabelle 6.4) ist geringer als 1% was als Abbruchkriterium für die Simulation verwendet wurde. Die dadurch entstehende Veränderung der Haftkraft ist so gering, dass es sich wahrscheinlich hauptsächlich um den Abbruchfehler der nichtlinearen Simulation handelt. Der tatsächlich daraus entstehende Fehler kann mit diesem Modell nicht ermittelt werden, da die Simulation dafür zu ungenau ist.

Der durch Verändern des Luftspalts entstehende Mehraufwand bei der Berechnung wird in der Folge nicht mehr in Kauf genommen, das heißt, diese Berechnung wird für keinen weiteren Punkt mehr durchgeführt.

Die Berechnung der längs Verschiebung der x- Position des Stempels brachte praktisch keine Ergebnisse. Die Kräfte (F_x ; F_y), welche ermittelt wurden, verschwinden in der Fehlertoleranz der Simulation. Darum kann festgestellt werden, dass praktisch kein Einfluss der seitlichen Kräfte bei Verschiebung des Stempels auf selbigen bestehen. Auch die Haftkräfte F_H , also die Kräfte in z-Richtung ändern sich kaum bei einer Verschiebung des Stempels, weshalb deshalb im folgenden angenommen wird, dass die seitliche Verschiebung des Stempels keinen Einfluss auf das Ergebnis

hat.

6.4.2 Simulation des Magneten

Im Vergleich zu den vereinfachten Simulationen wurde hier ein genaueres Modell mithilfe von Geometriestudien erstellt. Dabei konnte folgendes festgestellt werden:

- Die großen Radien oben am Magnetglied haben einen Einfluss auf das Ergebnis, da sich dadurch das Volumen deutlich verkleinert, jedoch die kleinen fertigungsbedingten R2.5 Radien an den Außenkanten keinen Einfluss auf das Ergebnis haben, weshalb diese vernachlässigt werden können. Dies ist in Abbildung 6.10 zu erkennen.
- Die Flussdichte B im Schienensteg verschwindet annähernd, weshalb ein gekürztes Modell, bei welchem nur ein Teil des Stegs simuliert wurde, praktisch die selben Ergebnisse liefert, wie in Abbildung 6.10 erkannt werden kann. damit wird im Folgenden ein gekürztes Modell berechnet. Dies bringt eine wesentliche Zeitersparnis. Es wäre theoretisch auch ein noch kürzeres Modell möglich, jedoch würde hier die Umgebung (Luftkörper) wieder einen, wenn auch geringen, Einfluss auf das B - Feld haben.
- Es besteht kein wesentlicher Einfluss eines Luftspaltes zwischen den beiden Teilen des Magnetgliedes, weshalb dieses Detail vernachlässigt wird. Dies ist in Abbildung 6.12 abgebildet.
- Der Magnetkörper hat, wie vermutet, einen Einfluss auf das Ergebnis. Es wurden hier jedoch einige kleine Details geändert, da diese einen wesentlichen Vorteil beim Vernetzten bringen. Die unmagnetische Leiste hat nur einen geringen Einfluss, da diese nahezu die selben Eigenschaften besitzt, wie die umgebende Luft. Der Einfluss ist jedoch groß genug und der Mehraufwand gering, weshalb die Leiste modelliert wird. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.15 dargestellt.
- Es ist ein Unterschied feststellbar, zwischen einem modellierten Stempel und dem Fall, dass das Ergebnis für die gesamte Schiene auf den Stempel umgerechnet wird.
- Die tatsächliche Schiene hat einen merkbaren Einfluss auf das Ergebnis, da die tatsächliche Schiene ein geringeres Volumen besitzt als die vereinfachte. Dies ist in Abbildung 6.18 und 6.17 dargestellt. Bei der Simulation mit der tatsächlichen Schiene ist zu erkennen, dass bei kleineren Erregungen das B -Feld noch nicht zu tief in den Schienenkopf reicht, weshalb die Ergebnisse ähnlich sind. Bei höheren Erregungen ergeben sich jedoch aufgrund des kürzeren Schienenkopfes merkliche Veränderungen der Haftkraft.

Diese Überlegungen führten zu dem in Abbildung 5.4 abgebildeten Simulationsmodell.

Bei den Simulationen mit den tatsächlichen Materialien wurde mit der Geometrie der tatsächlichen Haftkraftwaage simuliert. Die Ergebnisse sind wie erwartet. Bei größer werdendem Luftspalt wird auch die Haftkraft geringer wie in Abbildung 6.21 zu sehen. Dies deckt sich auch mit den Erkenntnissen aus dem vereinfachten Modell.

Bei der Simulation mit den verschiedenen Schienenmaterialien (Abbildung 6.21) sind die Ergebnisse ebenfalls wie erwartet. Die B-H Kurven von R260 und R350HT weisen niedrigeren Flussdichten B auf wie die B-H- Kurve von R200. Genauso verhält es sich bei den berechneten Haftkräften F_H . Die Haftkräfte von R260 und R350HT sind nahezu gleich, wie bereits die B-H- Kurven dieser Materialien. Beide Kurven weisen jedoch niedrigere Haftkräfte auf, als die Kurve, welche für ein Schienenmaterial R200 ermittelt wurde. Dies deckt sich ebenfalls mit den B-H- Kurven. Es ist also von einem eindeutiger Zusammenhang vom für die Haftkraftwaage verwendeten Schienenmaterial und der berechneten Haftkraft zwischen Schiene und Stempel auszugehen.

Bei den Berechnungen mit verschiedenen Temperaturen (Abbildung 6.25- 6.27 und Tabelle 6.5) konnte festgestellt werden, dass ähnlich wie bei den temperaturabhängigen B-H- Kurven bis zu einer Temperatur von ca. $T = 50^\circ\text{C}$ nur eine geringfügige Änderung der Haftkraft feststellbar ist. Dies gilt für alle untersuchten Schienenmaterialien, wobei für diese Simulationen nur die Materialwerte der Schienen und der Zwischenglieder verändert wurden. Deshalb sind die Ergebnisse nicht vollständig korrekt, da bei tatsächlichen temperaturabhängigen Berechnungen die restlichen Materialwerte (S235JR, Kupfer, Edelstahl) ebenfalls temperaturabhängig simuliert werden müssten. Hierfür waren jedoch keine Materialwerte bei den jeweiligen Temperaturen bekannt, weshalb hier nur vereinfachte Simulationen durchgeführt wurden. Die Simulierten Werte gelten hier also nur für den Fall, dass sich beim Bremsen nur die Schiene und das Magnetglied erwärmen.

Betrachtet man jedoch die temperaturabhängigen B-H- Kurven von C10E (Abbildung 3.25d und Abbildung 9.14) so kann die Vermutung aufgestellt werden, dass auch bei S235JR keine großen Auswirkungen der Temperatur zu bemerken sein werden. Die Auswirkungen der unmagnetischen Zwischenleiste sind, wie vorhin bereits bemerkt, gering und bei der Kupferwicklung ist die größte, durch die erhöhte Temperatur verursachte, Wirkung ein größerer Innenwiderstand. Darum können die Ergebnisse zum Vergleich herangezogen werden.

Oberhalb von den erwähnten $T = 50^\circ\text{C}$ sinken die berechneten Haftkräfte ab. Der

6.4 Diskussion

erwähnte Abfall der Haftkräfte ist hier jedoch wesentlich und beträgt z.B für einen R200 bei $T = 150^{\circ}\text{C}$ im Vergleich zu $T = 25^{\circ}\text{C}$ $F_D = 386\text{N}$. Hieraus ist zu erkennen, dass es für eine eventuelle Messung an der Haftkraftwaage nicht unwesentlich ist, wie stark sich der Magnet erwärmt!

7 Abgleich mit Messungen auf der Haftkraftwaage

Da in den vorigen Kapiteln die B-H- Kurven von verschiedenen Schienen gemessen wurden, unter anderem auch von der in der Haftkraftwaage verwendeten R200 Schiene, und mit diesen die Haftkräfte mithilfe eines Modells berechnet wurden, sollen diese im Folgenden mit tatsächlich gemessenen Haftkräften verglichen werden.

Dazu wurde ein Magnet mit Magnetgliedern bestückt und auf der Haftkraftwaage die Haftkräfte F_H eines Gliedes gemessen.

7.1 Aufbau der Messung und verwendete Geräte

Die genaue Vorgehensweise bei der Vermessung einer MG- Bremse ist in [2, 3] beschrieben. Darin ist jedoch die Vermessung der gesamten Bremse beschrieben. Hier soll jedoch nur die Messung eines einzelnen Gliedes durchgeführt werden.

In [2] ist für jede Stelle vorgeschrieben, dass mindestens drei Messungen durchgeführt werden. Danach ist umzupolen. Es werden im Folgenden jedoch immer fünf Messungen durchgeführt. Die verwendete Haftkraftwaage ist in Abbildung 7.1 abgebildet. Für die Messung wurde der Magnet, welcher zu sehen ist und welcher mit drei Magnetgliedern bestückt ist, verwendet. Die Kraft wird über einen pneumatisch betätigten Zylinder aufgebracht und mittels einer Kraftmessdose gemessen. Dieser Aufbau ist in Abbildung 7.2 zu sehen. Hier ist 1. der Zylinder, 2. die Kraftmessdose und 3. der Stempel der Haftkraftwaage abgebildet. Der Stempel ist kardanisch gelagert, damit er sich in alle Richtungen verschieben kann und sich auch innerhalb gewisser Grenzen frei drehen kann. Er besitzt also theoretisch sechs Freiheitsgrade, sofern er nicht an irgendeiner Fläche anliegt. Dies ist auch in Abbildung 7.2 zu erkennen.

Die Steuerung der Messung wird über ein Ventil vorgenommen, welches von einem Messsystem angesteuert wird und den Druck im Zylinder regelt. Der Strom wird über eine Gleichstromquelle erzeugt.

Die Messung erfolgt mithilfe eines *IMC Cronos* Systems, welches mit der internen

7.1 Aufbau der Messung und verwendete Geräte

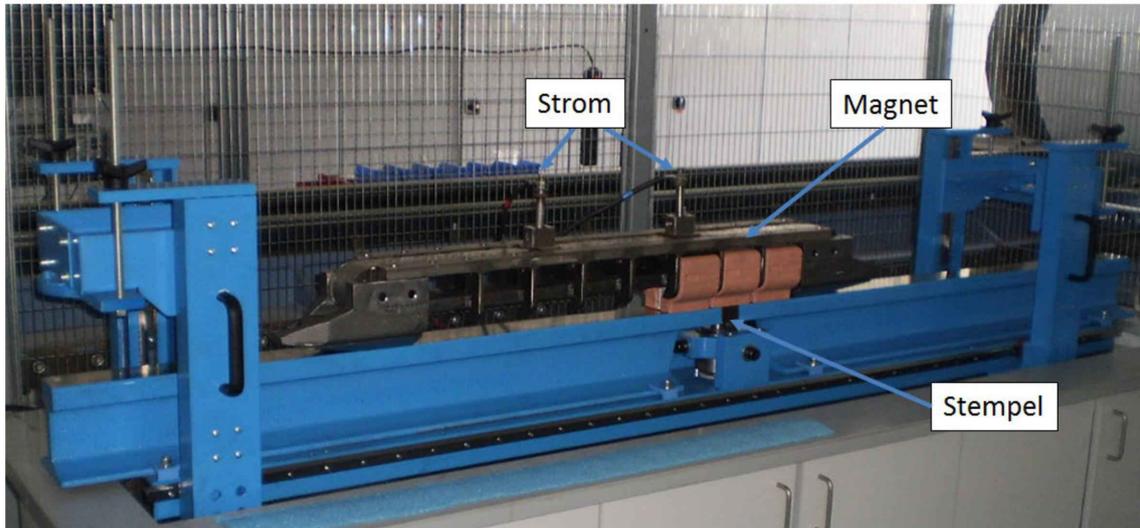


Abbildung 7.1: Haftkraftwaage



Abbildung 7.2: Zylinder- Stempel Haftkraftwaage

7.1 Aufbau der Messung und verwendete Geräte

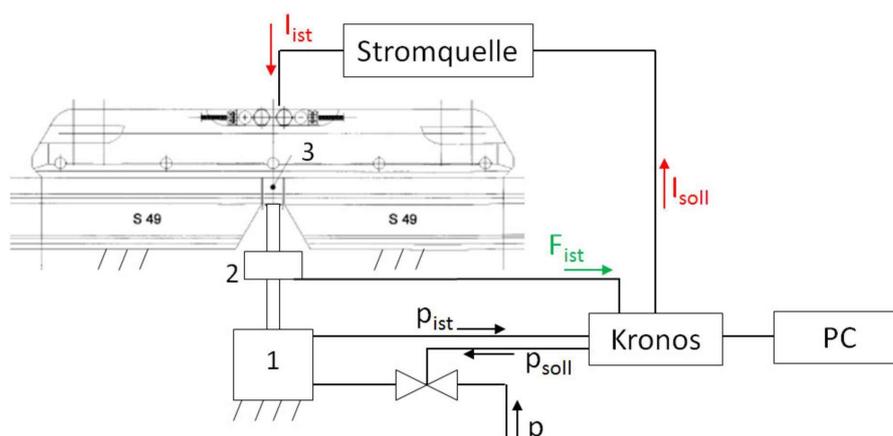


Abbildung 7.3: Schematischer Messkreis der Haftkraftwaage

Strommessung der Stromquelle verbunden ist und diese steuert. Die Kraftmessung erfolgt über eine Kraftmessdose. Die Ansteuerung des Zylinders erfolgt mit einem Ventil, über welches die *Cronos* den Druck im Messzylinder regelt. Der Druck wird dazu von einem Drucksensor gemessen. Die Auswertung erfolgt mithilfe eines PCs, welcher mittels LAN mit dem Messsystem verbunden ist. Abbildung 7.3 zeigt nun ein Bild des Messsystems.

Für die Messung wurden die folgenden Messgeräte verwendet:

Als Messsystem wurde eine *Cronos* von IMC verwendet:

- Hersteller: IMC
- Typ: *Cronos*
- Analogausgänge: 4
- Auflösung: 16 bit
- Messbereich: $\pm 10\text{ V}$; $\pm 5\text{ V}$
- Genauigkeit: 1.89 mV ; $935\ \mu\text{V}$

Die Stromquelle wird ebenfalls über die *Cronos* gesteuert und hat folgende Daten:

- Hersteller: Elektro- Automatik GmbH
- Typ: PS 8160-170 3U 19" 3HE 10000W
- Ausgang I : $0 - 170\text{ A DC}$
- Ausgang U : $0 - 160\text{ V DC}$
- Ausgang P_{\max} : 10 kW
- Ausgang SNR: 1298120002

Als Kraftmessdose wurde die folgende verwendet:

7.1 Aufbau der Messung und verwendete Geräte

- Hersteller: HBM
- Typ: U3
- Messbereich: 0 – 10 kN
- Ausgang: 10 kN=2 mV/V
- SNR:168410040

Als Ventil wurde das folgende verwendet:

- Hersteller: Rexroth
- Typ: FD14W16
- Regelbereich: 0 – 10 bar $p_{\max} = 12$ bar
- Eingangsspannung: 0 – 10 V
- SNR: 561021456

Als Drucksensor wurde der folgende verwendet:

- Hersteller: HBM
- Typ: P8AP
- Messbereich: 0 – 10 bar
- SNR: 084110328

In der Cronos werden für die Messung die Daten der Kraftmessdose und des Drucksensors eingestellt, deshalb werden die Kraft und der Druck direkt gemessen.

Für die Messung wird von den niedrigen Erregungen des Magneten zu den hohen gemessen. Es sollen die selben Erregungen gemessen werden wie bei der Simulation des Magneten.

Die Messung wird durchgeführt, indem zuerst der Stempel an den Magneten gelegt wird. Danach wird die Stromquelle eingeschaltet und der Strom auf den geforderten Wert geregelt. Dann wird über den Zylinder die Kraft aufgebracht, bis sich der Stempel vom Magneten löst, also abreißt. Die Kraft wird während der gesamten Zeit gemessen. Nach dem Abreißen wird die Stromquelle abgeschaltet und der Stempel wieder an den Magneten gelegt.

Die Haftkraft wird nun ermittelt, indem die Maximalwerte jeder Erregung gemittelt werden. Es hat sich gezeigt, dass der erste gemessene Wert immer größer ist als die restlichen gemessenen. Darum wird der erste Wert der Messung nicht verwendet und die Haftkraft aus den restlichen vier ermittelt. Dies erfolgt, indem einfach das arithmetische Mittel nach der folgenden Formel gebildet wird

$$F_i = \frac{F_{i2} + F_{i3} + F_{i4} + F_{i5}}{4} . \quad (7.1)$$

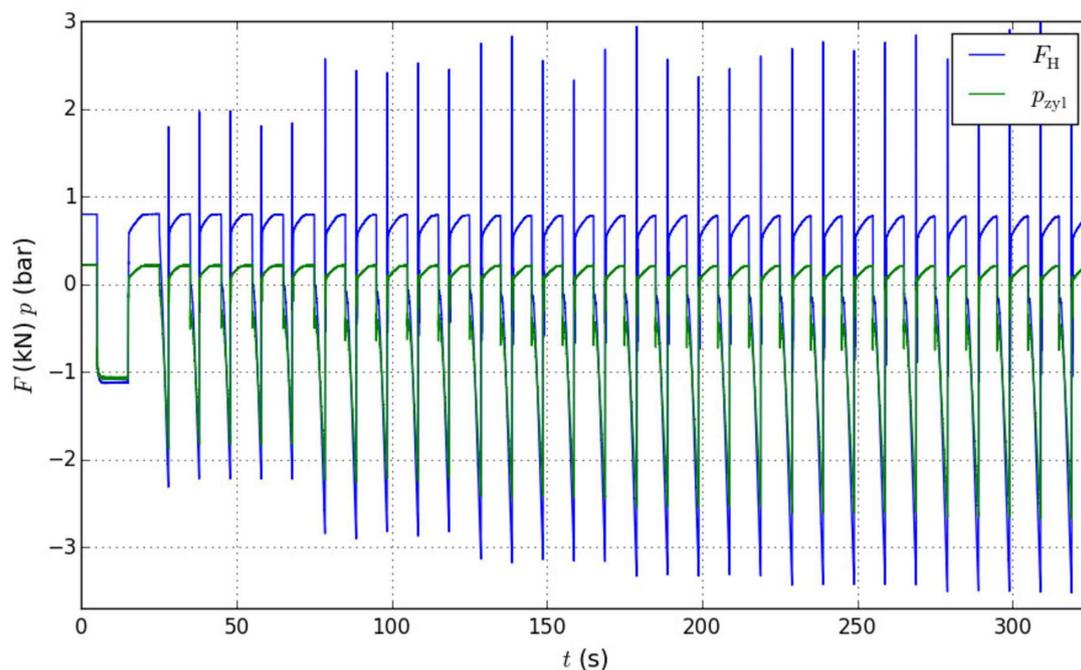


Abbildung 7.4: Kraft und Druck der Haftkraftwaage während einer Messung

7.2 Ergebnisse der Messungen

Die Aufzeichnungen der gemessenen Haftkraft F_H und des Druckes im Zylinder p_{zy1} einer Messung sind nun in Abbildung 7.4 dargestellt. Es sind deutlich die einzelnen Erregungen, an den unterschiedlich hohen Ausschlägen der Messung, zu erkennen. Die Aufzeichnung der Zugrichtung erfolgt bei der Messung in negativer Richtung. Weiters ist der oben beschriebene Effekt zu erkennen, dass die ersten Messungen höhere Werte liefern speziell, bei der ersten Messreihe mit $\Theta = 1000AW$. Diese ist einzeln in Abbildung 7.5 dargestellt.

Die Messung wurde sechs Mal durchgeführt, wobei jedes Magnetglied dreimal gemessen wurde. Die einzelnen Ergebnisse, welche aus je drei Messungen für ein Magnetglied gemittelt wurden, sind in Abbildung 7.6 abgebildet. Es kann hier schon eine gewisse Ähnlichkeit mit den berechneten Kurven festgestellt werden.

7.2 Ergebnisse der Messungen

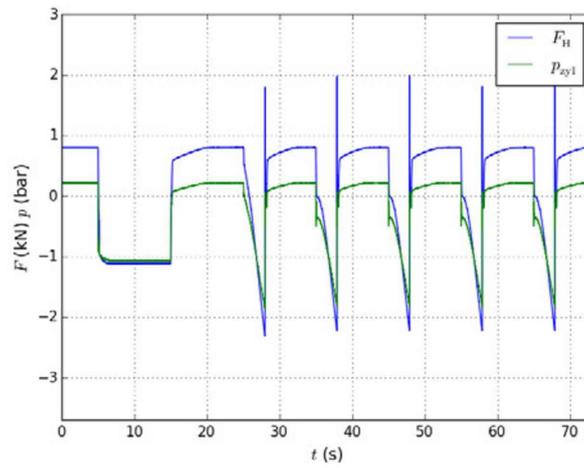


Abbildung 7.5: Haftkraftmessungen bei $\Theta = 1000\text{AW}$

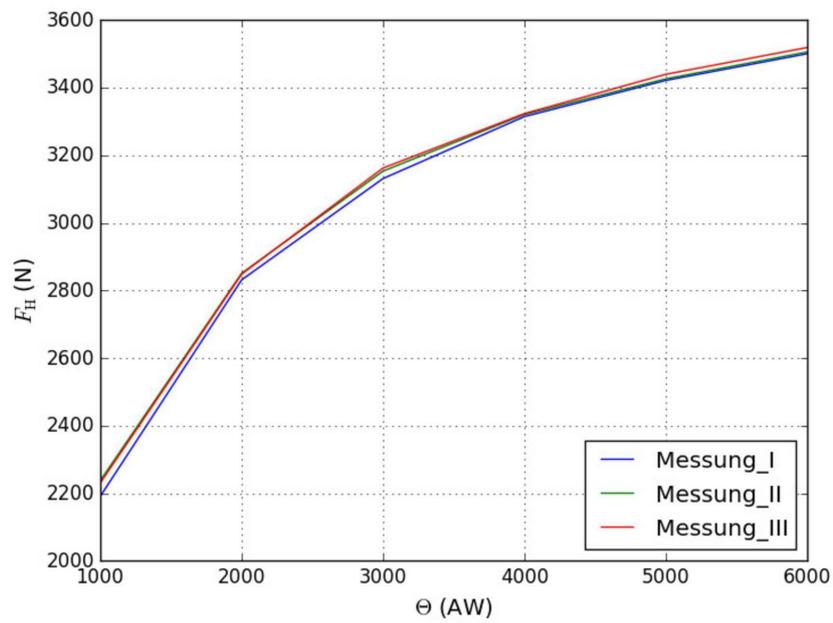


Abbildung 7.6: Gemessene Kräfte

7.3 Diskussion

Vergleicht man nun die gemessenen mit den berechneten Ergebnissen, so kann festgestellt werden, dass diese ähnliche Werte liefern. Die Streuung innerhalb der einzelnen Messungen bei der Haftkraftwaage beträgt in etwa $f_{\text{HKW}} = 1\%$. Im Vergleich mit den Simulationen können jedoch einige Unsicherheitsfaktoren festgestellt werden:

- Es sind keine genauen Materialdaten von dem Magneten bekannt. Die Materialwerte von S235JR, aus welchem der Magnetkörper hergestellt ist, und die der Glieder, welche aus C10E hergestellt sind, können aufgrund des in der Norm zulässigen Kohlenstoffgehaltes mehr oder weniger große Schwankungen aufweisen. Diese Schwankungen führen jedoch nur zu geringen Änderungen der Haftkräfte.
- Der Magnet erwärmt sich während der Messung, was zu kleinen Änderungen in den Haftkräften führt.
- Es sind keine genauen Werte für den tatsächlichen Luftspalt bekannt. Diese müssten für das tatsächliche Magnetglied ermittelt werden, wobei hier alle anderen Parameter bekannt sein müssten, was nicht der Fall ist.

Die Ergebnisse wurden in die berechneten Ergebniskurven, welche in Abbildung 6.21 zu sehen sind, eingezeichnet. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Kurven zwischen denen der Luftspalte für $t = 0.06 \text{ mm}$ und $t = 0.08 \text{ mm}$ liegen. Dies ist in Abbildung 7.7 dargestellt. Daraus kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Messung und die der Simulation gut übereinstimmen. Die Simulation liefert also brauchbare Ergebnisse und kann zum Vergleich von eventuell durchzuführenden Verbesserungen verwendet werden.

Es soll jedoch auch hier noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die Simulationengenauigkeit von ca. 1% in etwa mit der Streuung der Messungen an der Haftkraftwaage übereinstimmt.

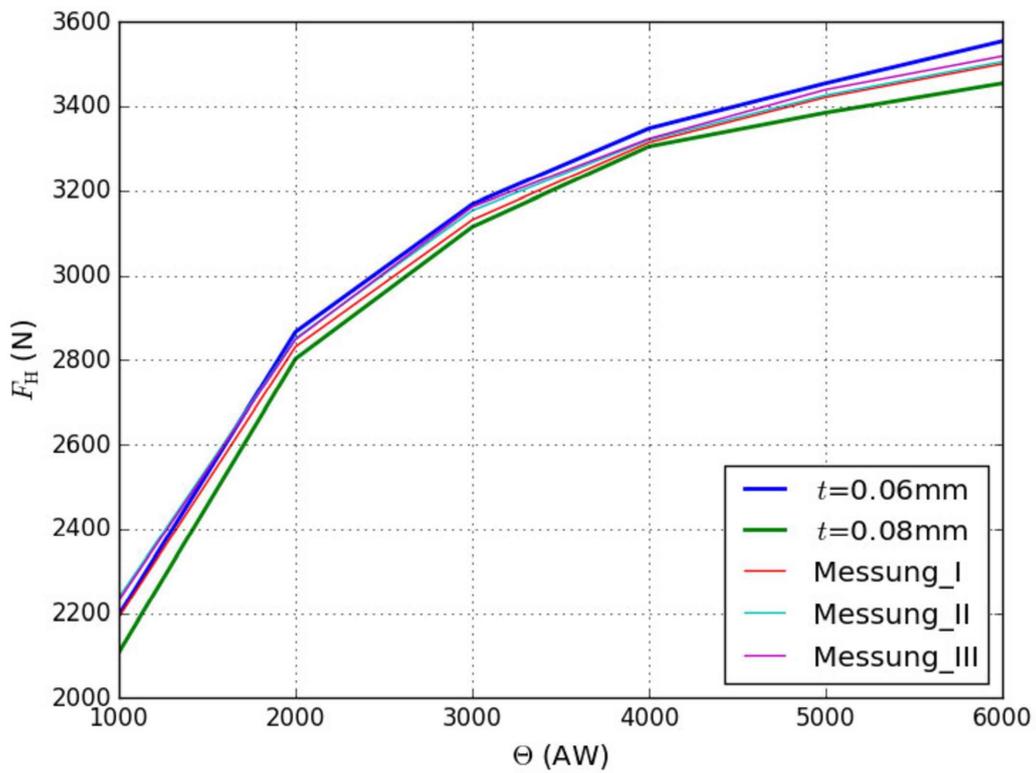


Abbildung 7.7: Gemessene Kräfte für das jeweilige Magnetglied

8 Zusammenfassung

Im ersten Teil der Arbeit wurden mehrere Stähle magnetisch untersucht. Als erstes Material wurde R200 betrachtet. Hierbei handelt es sich um das in den diversen Normen für Magnetschienenbremsen [2, 3] vorgeschlagene Material, aus welchem die Schiene einer Haftkraftwaage bestehen soll. Es wurden zuerst die magnetischen B-H- Kurven des Materials, mithilfe von Ringproben, bestimmt. Die Abmessungen dieser wurden so gewählt, um eine Messung bis in den gesättigten Bereich ($H \approx 55000 \text{ A/m}$) mit dem vorhandenen Verstärker, welcher einen maximalen Strom von $I = 28 \text{ A}$ liefert, durchführen zu können. Es wurden mehrere Proben aus verschiedenen Positionen des Schienenkopfes entnommen und vermessen. Dabei konnte festgestellt werden, dass diese unterschiedliche B-H- Kurven aufweisen. Die oberste Schicht des Schienenmaterials liefert die schwächsten magnetischen Flussdichten B , die beiden darunterliegenden Schichten liefern etwas höhere Werte.

Um die Anisotropie innerhalb des Materials zu untersuchen, wurden Stabproben aus den selben Schichten in verschiedenen Richtungen entnommen und die B-H- Kurven aufgezeichnet. Hierbei konnte festgestellt werden, dass das Material eine geringe Anisotropie aufweist. Da diese im Vergleich mit den in der Literatur z.B. für diverse Bleche angegebenen Anisotropien jedoch sehr gering ist, wurde der Entschluss gefasst, für die folgenden Simulationen und Messungen anzunehmen, dass das Material isotrop ist. Diese Annahme ist zulässig, da die Materialdaten in weiterer Folge für Simulationen mit FEM verwendet wurden und die Genauigkeit hier wesentlich geringer ist als die Auswirkungen der festgestellten Anisotropien.

Es wurden noch weitere Schienenmaterialien (R260 und R350HT) vermessen und auch das Material des Zwischengliedes einer MG- Bremse (C10E). Die bestimmten Werte der magnetischen Flussdichten für die beiden Schienenmaterialien R260 und R350HT blieben beide niedriger als die des Materials R200. Die Kurven von R260 und R350HT sind jedoch sehr ähnlich. Betrachtet man die chemische Zusammensetzung der Schienenmaterialien, so kann festgestellt werden, dass den wenigsten Kohlenstoff R200 aufweist, jedoch die größten Flussdichten. Die beiden Materialien R260 und R350HT unterscheiden sich hauptsächlich dahingehend, dass R350HT gehärtet ist. Dies zeigte sich auch in den B-H- Kurven dahingehend, dass R260 und R350HT annähernd die selben B-H- Kurven aufweisen. Beide weisen jedoch höhere Kohlenstoffgehalte und niedrigere B-H- Kurven als R200.

Bei C10E konnte festgestellt werden, dass die vermessenen Proben wesentlich höhere gemessene Flussdichten B aufweisen als die anderen vermessenen Proben. Dies liegt an dem wesentlich geringeren Kohlenstoffgehalt. Betrachtet man die Zusammensetzungen und B-H- Kurven der beiden C10E Proben, so kann festgestellt werden, dass diese bei unterschiedlichen Zusammensetzungen annähernd die selben B-H- Kurven liefern.

Zusätzlich wurden für alle Materialien temperaturabhängige B-H- Kurven bestimmt. Dabei ist festzustellen, dass sich die B-H- Kurven bis 50°C für alle Proben nur geringfügig ändern, danach werden die Abweichungen jedoch immer größer.

Bei den anschließend durchgeführten Simulationen konnten zuerst mithilfe eines vereinfachten Modells die verschiedenen Möglichkeiten, den Luftspalt zwischen Magnetglied und Schiene zu modellieren, untersucht werden. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Methode mit dem Maxwell' schen Oberflächenkrafttensor für Modelle ohne Luftspalt zwischen Magnet und Schiene im Vergleich zu der Methode der virtuellen Arbeiten mit einem Luftspalt realistische Ergebnisse liefert.

Weiters wurden Überlegungen für einen physikalisch korrekten Luftspalt angestellt. Es konnte festgestellt werden, dass eine Veränderung des Luftspalts zufolge der Flächenpressung zwischen Magnetglied und Schiene keine merklichen Auswirkungen auf das Ergebnis besitzt. Der physikalisch korrekte Luftspalt wurde im Zuge dieser Arbeit mit $t = R_z = 0.015 - 0.02 \text{ mm}$ festgelegt.

Mithilfe von Geometriestudien wurden im Folgenden die Auswirkungen der verschiedenen Geometriedetails untersucht, wobei einige Radien vernachlässigt wurden und ein verkürztes Modell berechnet wurde, da sich dadurch die Ergebnisse nur geringfügig verändern.

Zuletzt wurde das so erstellte Modell mit den verschiedenen Materialien simuliert. Zuerst wurde der Luftspalt variiert, wobei eine in etwa quadratische Abnahme der Haftkraft festgestellt werden konnte, welche mit der diversen Literatur übereinstimmt.

Bei der Simulation mit den verschiedenen Materialien konnte gezeigt werden, dass die höchsten Haftkräfte mit dem Schienenmaterial R200 und etwas niedrigere mit R260 und R350HT erzeugt werden können. Die berechneten Haftkräfte von R260 und R350HT sind wieder annähernd gleich.

Die Simulation mit den bei den verschiedenen Temperaturen gemessenen Materialdaten brachte das selbe Ergebnis wie die Messung der B-H- Kurven: Die Auswirkungen sind bis ca. 50°C sehr gering, werden danach jedoch immer größer und

sind daher oberhalb von 50°C nicht vernachlässigbar. Dies zeigte sich für alle drei Schienenmaterialien (R200, R260 und R350HT).

Bei der zuletzt durchgeführten Messung an der zuvor simulierten Haftkraftwaage zeigte sich schließlich, dass die simulierten Kurven mit den gemessenen gut übereinstimmen. Der Vergleich zeigte, dass die gemessenen Kurven zwischen denen für den Luftspalt von $t = 0.06$ und $t = 0.08$ mm liegen. Beachtet man nun, dass die berechneten Werte eine Genauigkeit von ca. 1% aufweisen und die Streuungen bei der Messung ca. 3% betragen, so kann festgestellt werden, dass die durchgeführten Simulationen durchaus brauchbare Werte liefern, welche für Simulationen, um ev. Verbesserungen an der MG- Bremse durchzuführen, gute Voraussetzungen darstellen.

Es muss jedoch festgehalten werden, dass mögliche Verbesserungen an der MG- Bremse nur berechnet werden können, sofern der Effekt durch selbige größer ist als die für die Simulation verwendete Fehlertoleranz. Im Falle dieser Simulationen müssten mögliche Verbesserungen größer als 1% sein, um mit ihnen Verbesserungen festzustellen.

9 Anhang

9.1 Gemessene Punkte

Im Zuge der Messungen wurden die folgenden Punkte gemessen:

Tabelle 9.1: Gemessene Punkte der Kommutierungskurven

H in A/m	Proben
56800	R200; R260; R350HT; C10E
50000	R200; R260; R350HT; C10E
40000	R200; R260; R350HT; C10E
30000	R260; R350HT; C10E
25000	R200; R260; R350HT; C10E
20000	R260; R350HT; C10E
15000	R200; R260; R350HT; C10E
12000	R200; R260; R350HT; C10E
9000	R200; R260; R350HT; C10E
6000	R200; R260; R350HT; C10E
3000	R200; R260; R350HT; C10E
1000	R200; R260; R350HT; C10E
500	R260; R350HT; C10E

Für die Proben aus R200 wurden nicht so detaillierte Kurven aufgenommen. Da diese Proben zuerst aufgenommen wurden, konnten die Auswirkungen der Messpunkte auf die Simulation nicht abgeschätzt werden.

Für $H = 500 \text{ A/m}$, $H = 20000 \text{ A/m}$ und $H = 30000 \text{ A/m}$ konnte in Messungen festgestellt werden, dass diese Punkte bei R200 keine weiteren Erkenntnisse liefert. Daher wurde im Nachhinein beschlossen die fehlenden Punkte nicht in nachträglichen Messungen zu bestimmen. Diese sind für die Simulationen von Vorteil, jedoch nicht erforderlich.

9.2 Abmessungen der Ringproben

Tabelle 9.2: Abmessungen der Ringproben

Probe	Material	d_i	D_a	h
R200_I	R200	21.99	30.00	5.05
R200_II	R200	22.01	30.01	5.06
R200_III	R200	22.03	30.00	5.04
R260_I	R260	21.98	30.01	5.11
R260_II	R260	21.98- 22.0	30.01	5.13
R260_III	R260	21.97- 22.0	30.01	5.15
R350_I	R350HT	22.0	30.01	5.07
R350_II	R350HT	22.03	29.98	5.05-5.08
R350_III	R350HT	21.99- 22.01	30.0	5.07- 5.1
C10E_I	C10E	21.96	30.04	5.24
C10E_II	C10E	21.97	30.05	5.24

9.3 Ergebnisse

An dieser Stelle sollen die Ergebnisse präsentiert werden, welche keinen Platz in den jeweiligen Kapiteln gefunden haben.

9.3.1 Schiene R200

Temperaturabhängige B-H- Kurven

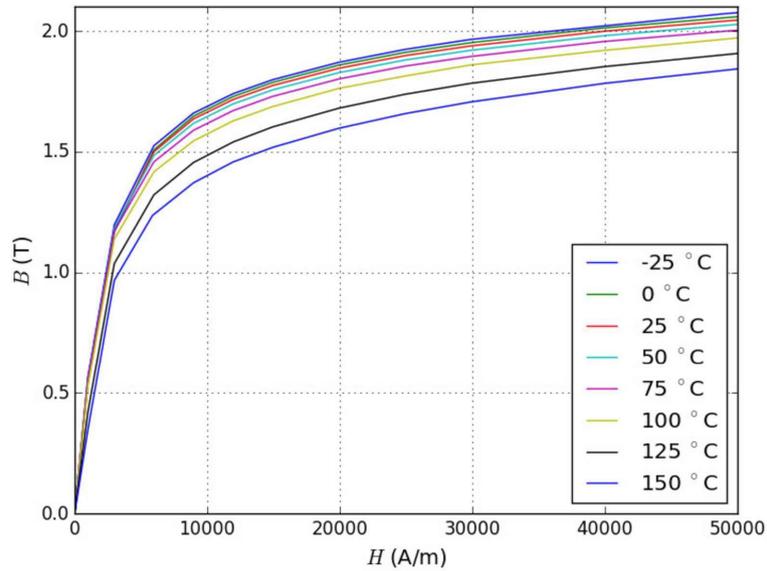


Abbildung 9.1: Temperaturabhängige B-H- Kurven von R200_II

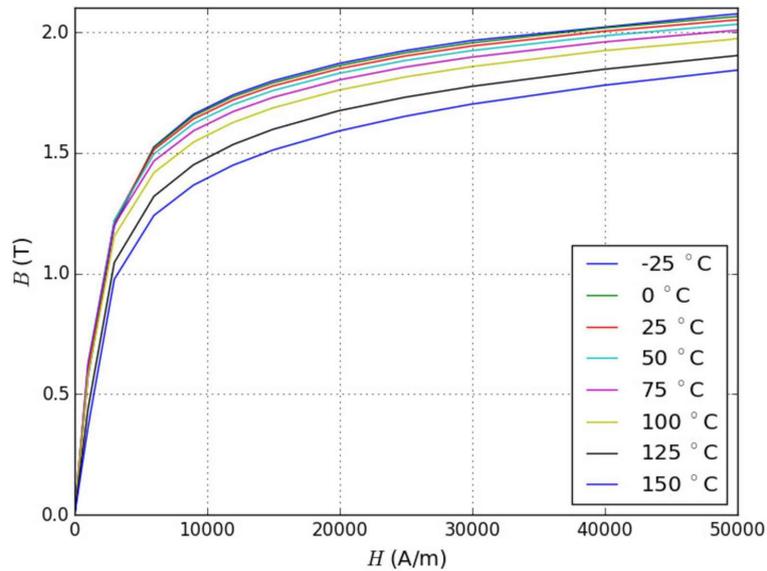


Abbildung 9.2: Temperaturabhängige B-H- Kurven von R200_III

Stabproben R200

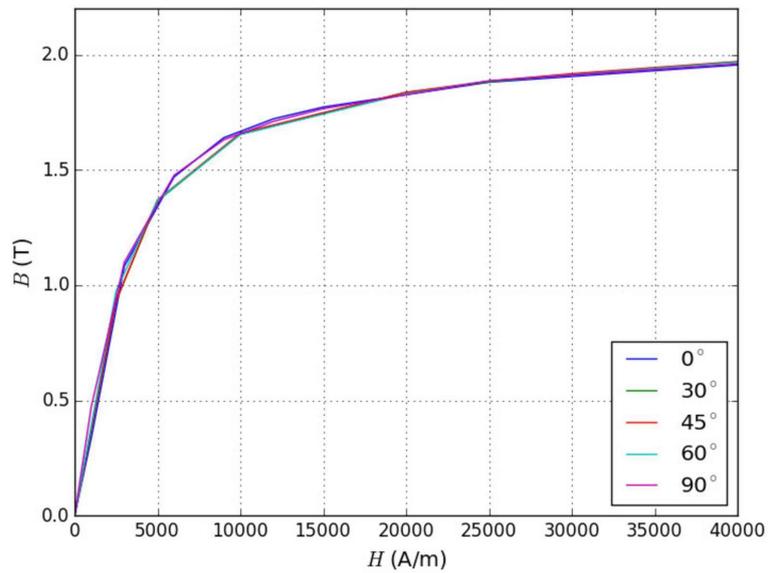


Abbildung 9.3: B-H- Kurven für verschiedene Richtungen R200_I

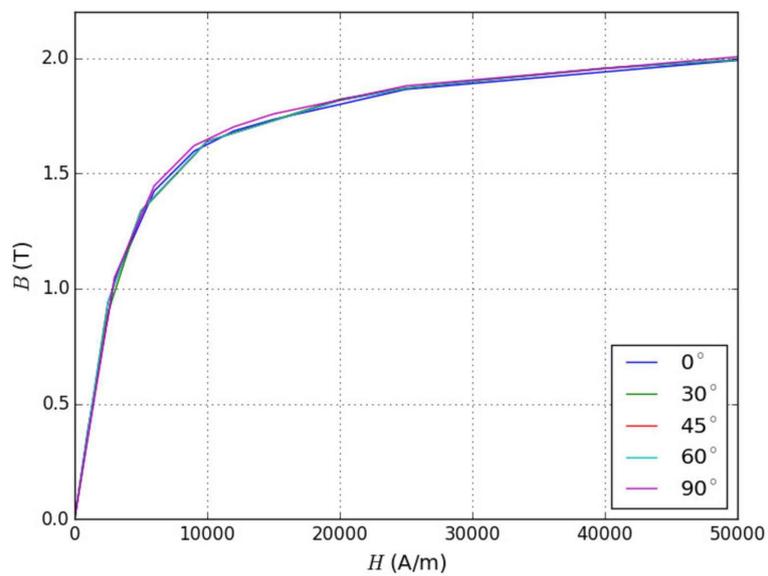


Abbildung 9.4: B-H- Kurven für verschiedene Richtungen R200_III

Simulationsergebnisse

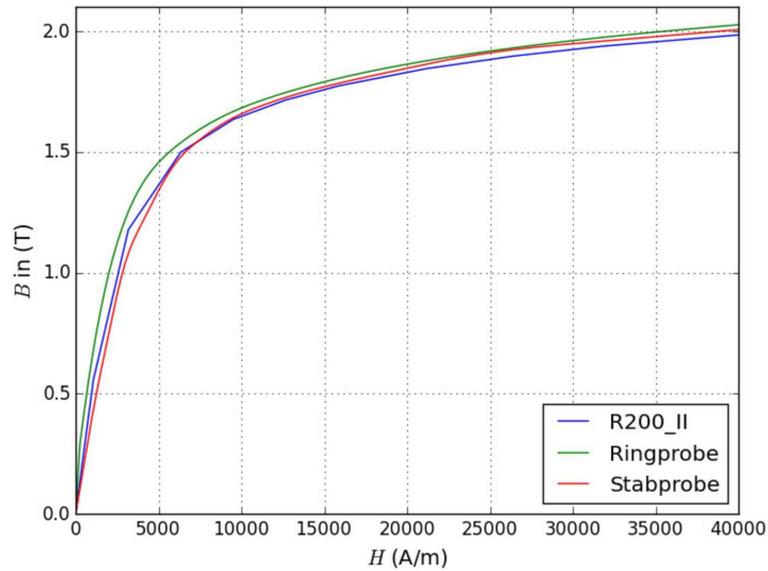


Abbildung 9.5: Vergleich der simulierten und gemessenen B-H- Kurven für die Proben R200_II

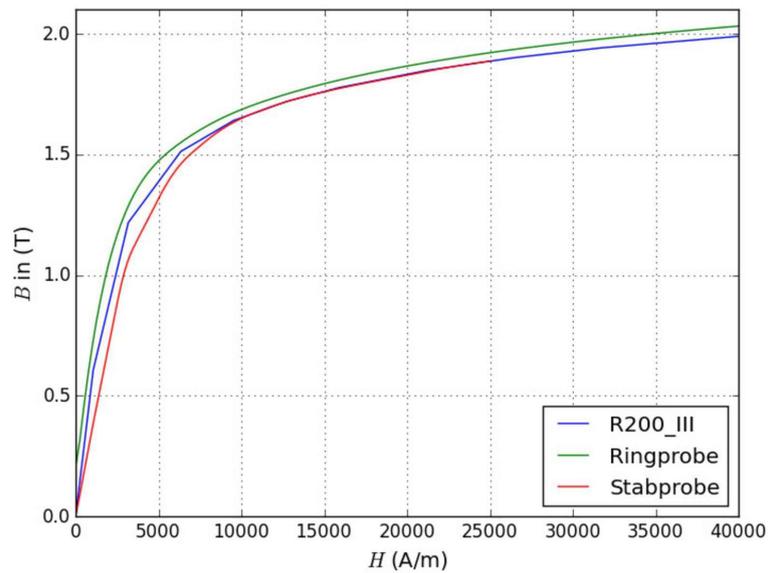


Abbildung 9.6: Vergleich der simulierten und gemessenen B-H- Kurven für die Proben R200_III

9.3.2 Schiene R260

Messfrequenz

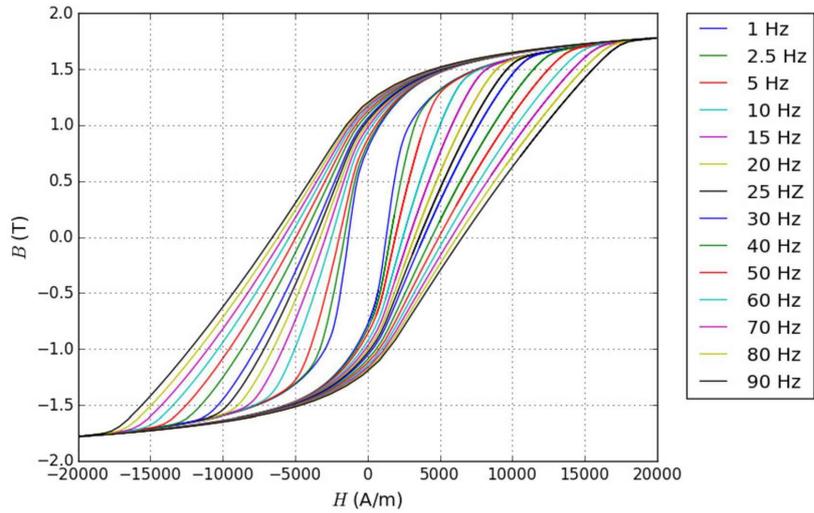


Abbildung 9.7: Hystereseschleifen, bei verschiedenen Frequenzen gemessen für R260

Temperaturabhängige B-H- Kurven

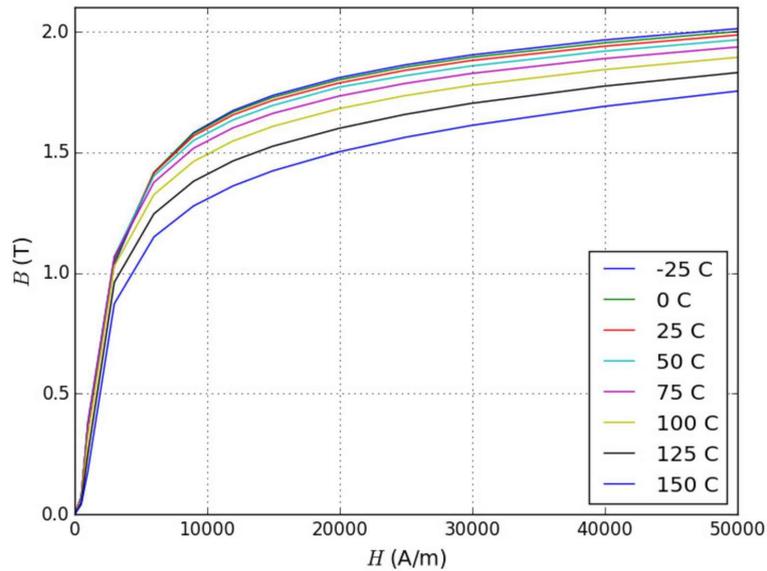


Abbildung 9.8: Temperaturabhängige B-H- Kurven von R260_II

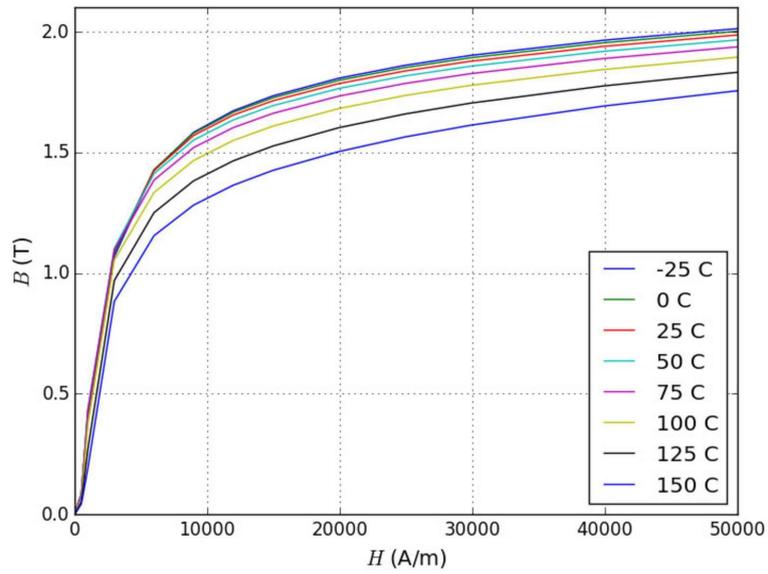


Abbildung 9.9: Temperaturabhängige B-H- Kurven von R260_III

9.3.3 Schiene R350 HT

Messfrequenz

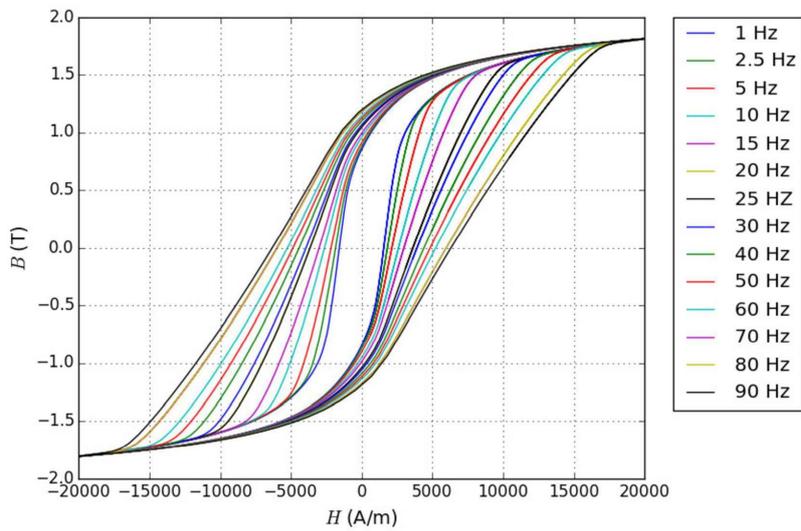


Abbildung 9.10: Hystereseschleifen, bei verschiedenen Frequenzen gemessen für R350

Temperaturabhängige B-H- Kurven

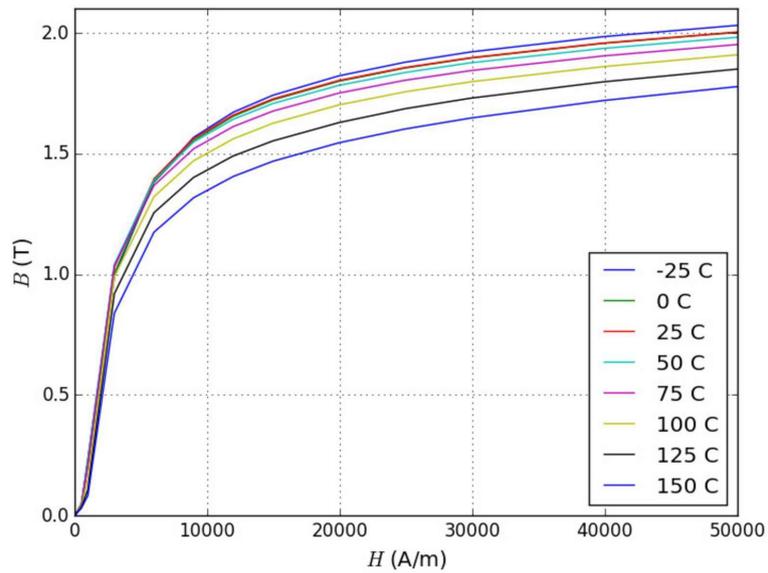


Abbildung 9.11: Temperaturabhängige B-H- Kurven von R350_II

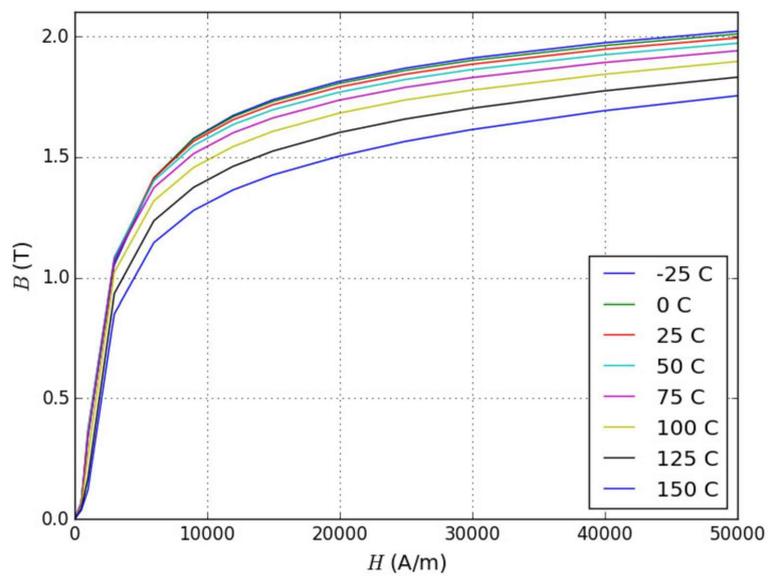


Abbildung 9.12: Temperaturabhängige B-H- Kurven von R350_III

9.3.4 Zwischenglied C10E

Messfrequenz

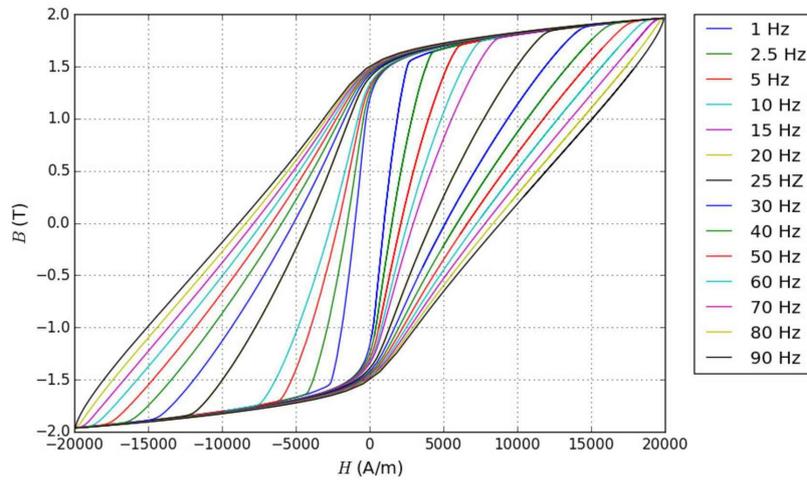


Abbildung 9.13: Hystereseschleifen, bei verschiedenen Frequenzen gemessen für C10E

Temperaturabhängige B-H- Kurven

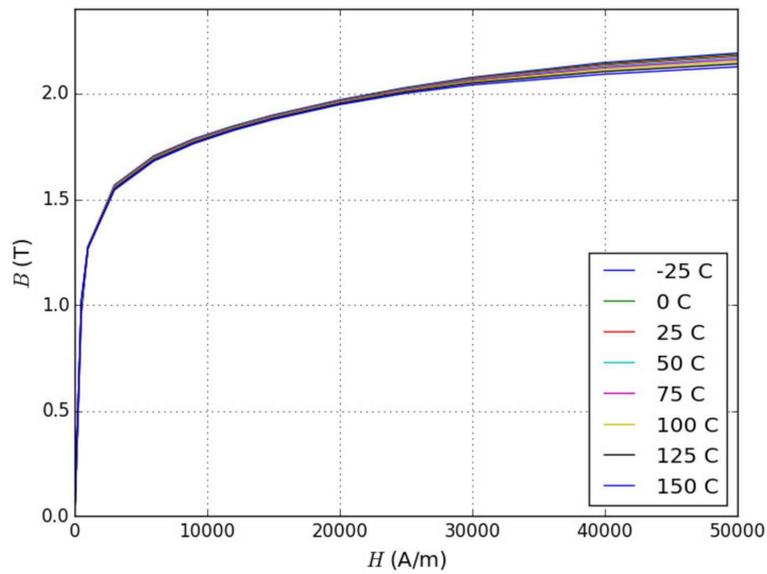


Abbildung 9.14: Temperaturabhängige B-H- Kurven von R260_II

Literatur

- [1] Knorr-Bremse GmbH. *Schienenbremsen / Track Brakes*. Beethovengasse 43–45 A-2340 Mödling, 2014.
- [2] DB. *Ergänzungsregelung Nr. B 012 für die technische Gestaltung der Magnetschienenbremse in Schienenfahrzeugen*. VDB/VDV/DB-Arbeitsgruppe, 2010.
- [3] DIN EN 16207. *Bahnanwendungen – Bremse – Anforderungen an Funktion und Leistungsfähigkeit von Magnetschienenbremssystemen für Schienenfahrzeuge*. Deutsche Fassung EN 16207:2014, Nov. 2014.
- [4] E. Kallenbach; R. Eick; P. Quendt; T. Ströhla; K. Feindt; M. Kallenbach. *Elektromagnete : Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung, 3. Aufl.* Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2008.
- [5] Manfred Kaltenbacher. *Numerical simulation of mechatronic sensors and actuators; Finite Elements for Multiphysics 3rd ed.* Berlin: Springer, 2015.
- [6] Richard Boll. *Weichmagnetische Werkstoffe, Einführung in den Magnetismus VAC-Werkstoffe und ihre Anwendungen 4. Auflage*. Hannau: VACUUMSCHMELZE GMBH, 1990.
- [7] DIN EN 60404-2. *Magnetische Werkstoffe - Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Elektroband und -blech mit Hilfe eines Epsteinrahmens*. (IEC 60404-2:2009): Deutsche Fassung EN 60404-2:2009, Jan. 2009.
- [8] DIN 50460. *Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von weichmagnetischen Werkstoffen Allgemeines, Begriffe, Grundlagen der Prüfverfahren*. Aug. 1988.
- [9] Zdeno Neuschl. *Rechnerunterstützte experimentelle Verfahren zur Bestimmung der lastunabhängigen Eisenverluste in permanentmagnetisch erregten elektrischen Maschinen mit additionalem Axialfluss*. Technische Universität Cottbus Brandenburg: Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen, Okt. 2004.
- [10] DIN EN 60404-6. *Magnetische Werkstoffe - Teil 6: Verfahren zur Messung der magnetischen Eigenschaften weichmagnetischer und pulverförmiger Werkstoffe bei Frequenzen im Bereich 20 Hz bis 200 kHz mit Hilfe von Ringprobe*. (IEC 60404-6:2003): Deutsche Fassung EN 60404-6:2003, Okt. 2004.

- [11] Magnet-Messtechni Jürgen Ballanyi e.K. *WEICHEISENPRÜFER WP-C*. URL: <http://www.magmess-ballanyi.de/pdf/P-D-WP-C.pdf>.
- [12] A. Schoppa; J. Schneider; J.-O. Roth. “Influence of the cutting process on the magnetic properties of non-oriented electrical steels”. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 215-216 (2000), S. 100–102.
- [13] K. Oberretl. “Eisenverluste, Flußpulsation und magnetische Nutkeile in Käfigläufermotoren”. In: *Electrical Engineering* 82 (2000), S. 301–311.
- [14] A. Schoppa; J. Schneider; C.-D. Wuppermann. “Influence of the manufacturing process on the magnetic properties of non-oriented electrical steels”. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 215-216 (2000), S. 74–78.
- [15] G.H. Liu J. ; Shirkoohi. “Anisotropic magnetic material modelling using Finite Element Method”. In: *IEEE* 29(6) (Nov. 1993), S. 2458–2460.
- [16] M. Jesenik; V. Gorican; M. Trlep; A. Hamler; B. Stumberger. “Transient Analysis of Magnetic Field Including Anisotropic Magnetic Material Characteristics”. In: *IEEE* 42 (Apr. 2006), S. 2458–2460.
- [17] Jonathan Pröll. *Inbetriebnahme eines hochzuverlässigen Magnetlagers*. TU Wien: DIPLOMARBEIT Institut für Mechanik und Mechatronik Abteilung Messtechnik und Aktorik, 2011.
- [18] ANSYS. “Help”. In: (2015).
- [19] Wolfgang Fengler Lothar Fendrich. *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Berlin: Springer Vieweg; 2 edition, Feb. 2014.
- [20] Lucefin Group. *Technical card C10E*. URL: http://www.lucefin.com/wp-content/files_mf/01c10e49.pdf.
- [21] Fasching Rainer J. *Materialanalyse basierend auf der Massenspektroskopie laserionisierter zerstäubter Teilchen: experimentelle Realisierung und Messungen*. Wien: TU- Wien Masterarbeit, 1991.
- [22] Ercan Dede; Jaewook Lee; Tsuyoshi Nomura. *Multiphysics Simulation Electromechanical System Applications and Optimization*. London: Springer-Verlag, 2014.
- [23] J.L. Coulomb. “A methodology for the determination of global electromechanical quantities from a finite element analysis and its application to the evaluation of magnetic forces, torques and stiffness”. In: *IEEE MAG-19*, NO.6 (Nov. 1983), S. 2514–2519.
- [24] J.L. Coulomb; G. Meunier. “Finite Element implementation of virtual work principle for magnetic or electric Force and Torque computation”. In: *IEEE MAG-20*, No. 5 (Mai 1984), S. 1894–1896.

- [25] Scipione Bobbio; Federico Delfino; Paola Girdinio; Paolo Molino. “Equivalent Sources Methods for the Numerical Evaluation of Magnetic Force with Extension to Nonlinear Materials”. In: *IEEE* VOL. 36, NO. 4 (Juli 2000), S. 663–666.
- [26] Adolf Frischherz; Wilhelm Dax; Klaus Gundelfinger; Werner Häffner; Helmut Itschner; Günter Kotsch. *Tabellenbuch für Metalltechnik*. Wien: Bohmann Verlag, 1988.
- [27] *Magnetische Felder, Ferromagnetismus*. URL: <http://www.physik.uni-regensburg.de/studium/praktika/chem/Versuche/Ferromagnetismus.pdf>.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Gliedermagnet [2]	3
2.2	Starrmagnet [2]	4
2.3	Grundsätzlicher Aufbau eines Gliedermagneten [1]	5
2.4	Typischer Einbau einer MG- Bremse [3]	6
2.5	Typischer Haftkraftverlauf einer MG- Bremse [1]	6
2.6	Haftkraftwaage [3]	7
3.1	Körper in einem Magnetfeld [5]; a) diamagnetisch; b) paramagnetisch; c) ferromagnetisch	9
3.2	Hystereseschleife [5]	10
3.3	Hystereseschleife eines a) hartmagnetischen, b) weichmagnetischen- Werkstoffes [4]	10
3.4	a) Hysterese (2) mit Neukurve (1) [4]; b) Kommutierungskurve [8]	11
3.5	25 cm Eppsteinrahmen [7]	14
3.6	a) Entnahme der Stabprobe; b) Entnahme der Ringprobe, c) Winkel der Entnahme d) Entnahme aus dem Magnetglied	15
3.7	B-H Kurven eines anisotropischen Materials [15]	17
3.8	a) Wickelprinzip der Probe [9]; b) Lagenaufbau	19
3.9	Fertig gewickelte Ringprobe	20
3.10	Ringprobe mit Thermoelement	20
3.11	Schematischer Messaufbau	21
3.12	Ringprobe in der Thermobox	23
3.13	Fertig aufgebaute Thermobox mit Thermojet	24
3.14	a) Ablaufdiagramm der adaptiven Messung; b) Soll- Istverlauf [9]	25
3.15	a) gemessenen Hystereseschleife vor der Korrektur; b) korrigierte Hys- tereseschleife	28
3.16	Entmagnetisierungsverlauf	30
3.17	Aufmagnetisierungsverlauf	32
3.18	Vergleich: Ellipsenmodell und vollständiges Modell	34
3.19	Viertelmodell des Ringkerns	35
3.20	Übergangsbedingungen an zwei Segmenten	37
3.21	Generiertes Netz	38
3.22	Hystereseschleifen, bei verschiedenen Frequenzen gemessen	40
3.23	Abweichungen der Grenzwerte	40
3.24	Kommutierungskurve: Hystereseschleifen	41

3.25	B-H- Kurven von a) R200; b) R260; c) R350; d) C10E	42
3.26	Temperaturabhängige B-H- Kurven aus a) R200; b) R260; c) R350; d) C10E	44
3.27	Neukurve,-Kommutierungskurve	45
3.28	B-H- Kurven, Stabproben R200_II_φ	46
3.29	Anisotropie a) $H = 25000A/m$, $B = B - 1.85T$; b) $H = 200000A/m$, $B = B - 2.25T$	46
3.30	B-H- Kurven in 0°	47
3.31	Parameterstudie zum Ermitteln der Segmentanzahl, a) Berechnete Hysteresen, b) B_{max} für verschiedene Segmentanzahlen	48
3.32	Vergleich Stabproben Ringprobe	48
3.33	Plot der magnetischen Flussdichte B , a) Legende; b) 1 Segment c) 30 Segmente	49
3.34	Temperaturkurven, Proben R200	50
3.35	B-H- Kurven der Proben bei 25°C	51
3.36	Vergleich Kohlenstoffgehalt Flussdichte	53
4.1	Beweglicher Körper mit deformierbaren Elementen [5]	57
4.2	Vereinfachtes Berechnungsmodell	59
4.3	Verknüpfung von <i>Design Modeller</i> und <i>Maxwell 3D</i>	60
4.4	Koordinatensystem für die Simulation der MG- Bremsen Modelle	61
4.5	Simuliertes Magnetglied	62
4.6	Randbedingungen und Erregungen des Modelles	63
4.7	Netz im Luftspalt a) ohne Verfeinerung; b) $h=0.5mm$	64
4.8	Konvergenzstudie, vereinfachtes Modell	65
4.9	Fehler-Zeit Zusammenhang $t = 0.02 mm$	66
4.10	Ermittlung von R_z [26]	67
4.11	Modell für die Deformation des Luftspalts a) Ausgangszustand; b) Deformierter Zustand	69
4.12	Schema der Berechnung der Luftspaltveränderung	70
4.13	Vereinfachtes Modell der Haftkraftwaage a) von Vorne; b) von der Seite	71
5.1	Geometriestudien. a) Modell mit allen Radien; b) nur Radien R10; c) gekürztes Modell	73
5.2	Modell mit Luftspalt zwischen den Magnetgliedern	74
5.3	Modell mit Magnetkörper. a) von Vorne; b) von der Seite	75
5.4	Modell mit unmagnetischer Zwischenleiste	76
5.5	Verschiedene Geometriestudien a) Modell mit tatsächlicher Schiene von vorne; b) von der Seite; c) Modell mit Schiene wie bei der tat- sächlichen Haftkraftwaage; d) durchgeführte Vereinfachungen am Ma- gnetkörper; e) Modell mit Stempel der Haftkraftwaage	78
5.6	Verwendetes Simulationsmodell der Haftkraftwaage	79

5.7	Steigung der Magnetisierungskurve	81
5.8	Extraolierte B-H- Kurve	83
6.1	Haftkräfte für Kontaktmodell	86
6.2	B- Feld a) Legende; b) $\Theta = 1000 \text{ AW}$; c) $\Theta = 2000 \text{ Aw}$; d) $\Theta = 3000 \text{ AW}$; e) $\Theta = 4000 \text{ Aw}$	87
6.3	Haftkräfte für verschiedene Luftspalte t	88
6.4	Kraft- Abstandsdiagramm für $\Theta = 4000 \text{ AW}$	88
6.5	Extrapolierte Kurve	89
6.6	B- Feld, $\Theta = 4000 \text{ AW}$ a) Legende; b) $t = 0.2 \text{ mm}$; c) $t = 0.15 \text{ mm}$; d) $t = 0.1 \text{ mm}$; e) $t = 0.05 \text{ mm}$; f) Vektordarstellung für $t = 0.02$	90
6.7	Kraftverlauf bei Luftspaltänderung	92
6.8	Kräfte bei Verschiebung des Stempels	93
6.9	Haftkraft bei Verschiebung des Stempels	93
6.10	Geometriestudien: Radien und Verkürzen des Modells	95
6.11	B- Feld für alle Radien. a) Legende; b) mit allen Radien; c) verkürzt	95
6.12	Haftkräfte für einen Luftspalt zwischen den Magnetgliedern	96
6.13	Abweichungen für einen Luftspalt zwischen den Magnetgliedern	97
6.14	B- Feld a) Legende; b) $t_o = 0.0 \text{ mm}$; c) $t_o = 0.06 \text{ mm}$	97
6.15	Verschiedene Geometriestudien	98
6.16	B- Feld a) Legende; b) verkürztes Modell; c) komplettes Modell mit korrekter Schiene	99
6.17	Vergleich Simulation mit Stempel und ohne Stempel, umgerechnet auf Stempellänge	100
6.18	Verschiedene Geometriestudien, korrektes Modell	101
6.19	B- Feld a) Legende; b) komplettes Modell mit Stempel; c) tatsächliche Geometrie der Haftkraftwaage	102
6.20	Vergleich der beiden Stempelformen a) vereinfachter Stempel; b) tatsächlich verwendeter Stempel der Haftkraftwaage	102
6.21	Haftkräfte für verschiedene Luftspalte t	104
6.22	B- Feld a) Legende; b) $t = 0.02 \text{ mm}$; c) $t = 0.1 \text{ mm}$	104
6.23	Haftkräfte für verschiedene Materialien	105
6.24	B- Feld a) Legende; b) R200 seitlich c) R260; d) R350HT	106
6.25	Temperaturabhängige Haftkräfte R200	107
6.26	Temperaturabhängige Haftkräfte R260	107
6.27	Temperaturabhängige Haftkräfte R350HT	108
6.28	B- Feld a) Legende; b) R200 -25°C c) R200 150°C	109
7.1	Haftkraftwaage	115
7.2	Zylinder- Stempel Haftkraftwaage	115
7.3	Schematischer Messkreis der Haftkraftwaage	116
7.4	Kraft und Druck der Haftkraftwaage während einer Messung	118

7.5	Haftkraftmessungen bei $\Theta = 1000\text{AW}$	119
7.6	Gemessene Kräfte	119
7.7	Gemessene Kräfte für das jeweilige Magnetglied	121
9.1	Temperaturabhängige B-H- Kurven von R200_II	127
9.2	Temperaturabhängige B-H- Kurven von R200_III	127
9.3	B-H- Kurven für verschiedene Richtungen R200_I	128
9.4	B-H- Kurven für verschiedene Richtungen R200_III	128
9.5	Vergleich der simulierten und gemessenen B-H- Kurven für die Proben R200_II	129
9.6	Vergleich der simulierten und gemessenen B-H- Kurven für die Proben R200_III	129
9.7	Hystereseschleifen, bei verschiedenen Frequenzen gemessen für R260 .	130
9.8	Temperaturabhängige B-H- Kurven von R260_II	130
9.9	Temperaturabhängige B-H- Kurven von R260_III	131
9.10	Hystereseschleifen, bei verschiedenen Frequenzen gemessen für R350 .	131
9.11	Temperaturabhängige B-H- Kurven von R350_II	132
9.12	Temperaturabhängige B-H- Kurven von R350_III	132
9.13	Hystereseschleifen, bei verschiedenen Frequenzen gemessen für C10E .	133
9.14	Temperaturabhängige B-H- Kurven von R260_II	133

Tabellenverzeichnis

2.1	Polschuhmaterialien [1]	5
3.1	Abmessungen der Ringproben	19
3.2	Verwendete Wickeldrähte	19
3.3	Verwendete Materialien	35
3.4	Verwendete Vernetzung	37
3.5	Zusammensetzung der verschiedenen Materialien nach [19, 20]	51
3.6	Tatsächliche Zusammensetzung der verschiedenen Materialien	52
4.1	Vereinfachtes Modell	59
5.1	Modell der Haftkraftwaage	80
6.1	Ergebnisse der Simulation $t=0\text{mm}$	86
6.2	Ergebnisse für Kontakt extrapoliert	91
6.3	Angenäherte Polynome für das Modell	91
6.4	Veränderungen des Luftspalts und Fehler der Haftkräfte	91
6.5	Haftkräfte bei $\Theta = 6000 \text{ AW}$ für verschiedene Materialien bei verschiedenen Temperaturen	108
9.1	Gemessene Punkte der Kommutierungskurven	125
9.2	Abmessungen der Ringproben	126