



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Sergiu Grejdieru

Halbach-Array zur Analyse statischer Störfelder
bei magnetoresistiven Sensoren

*Fakultät Technik und Informatik
Department Informations- und
Elektrotechnik*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Information and
Electrical Engineering*

Sergiu Grejdieru
Halbach-Array zur Analyse statischer Störfelder
bei magnetoresistiven Sensoren

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Elektrotechnik und Informationstechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider
Zweitgutachter: Prof. Dr. Pawel Buczek

Abgegeben am 28. August 2018

Sergiu Grejdieru

Thema der Bachelorthesis

Halbach-Array zur Analyse statischer Störfelder bei magnetoresistiven Sensoren

Stichworte

Halbach-Array, Störfeld, Rotationsvorrichtung, Magnetfeldsimulation, Magnetfeldmessung, FEMM, FreeCAD, Octave

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen eines Testprojektes von Tunnelmagnetoresistiven Sensoren für die Antriebstechnik soll eine Testumgebung erstellt werden. Die Arbeit besteht darin, drei Halbach-Arrays mit verschiedenen Feldstärken und eine Rotationsvorrichtung zu entwerfen.

Sergiu Grejdieru

Title of the paper

Halbach array for analyzing static fields in magnetoresistive sensors

Keywords

Halbach array, interference field, rotation device, magnetic field simulation, magnetic field measurement, FEMM, FreeCAD, Octave

Abstract

As part of a test project for tunnel magnetoresistive sensors for drive systems, a test environment has to be created. The work consists of designing of three Halbach arrays with different field strengths and a rotating device.

Danksagung

Besonderer Dank an Herrn Prof. Riemschneider für die Betreuung der Arbeit und die konstruktive Kritik.

Ein Dank geht an Thorben Schütthe, für die Octave- Tutorien.

Ein Dank an Frau Leonie Herzog und dem Team von 3D Space, welche für den 3D-Druck zuständig waren.

Danke an Firma Zwinge für die Bereitstellung der Werkzeuge und die brüderliche Unterstützung.

Herrn Günter Müller und Pawel Buczek danke ich für die Korrektur und kritische Auseinandersetzung.

Meiner Familie danke ich für die Geduld und Verständnis in schwierige Situationen.

Meinen Freunden und Kommilitonen, welche in Studium mich begleitet und unterstützt haben, möchte ich an dieser Stelle mein Dank aussprechen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung	10
1.1 Motivation	10
1.2 Ziele dieser Arbeit	11
2 Analyse einzelner Magnete	13
2.1 Feldstärkemessung der Magnete	13
2.2 Berechnung der Feldstärke in z-Richtung	14
2.3 Simulation von Magneten in FEMM	15
3 Halbach-Arrays	20
3.1 Ringförmige Dipol-Halbach-Arrays	21
3.2 Positionierung mehrerer Magnete zum Halbach-Array	22
3.3 Simulation des Dipol-Halbach-Arrays in FEMM	25
3.3.1 Verwendung einer linearen B-H Kennlinie	31
3.3.2 Verwendung einer nichtlinearen B-H Kennlinie	41
3.3.3 Konstruktion in FreeCAD	50
3.4 Konstruktion und 3D-Druck von Halbach-Arrays	51
3.5 Messung der Magnetringe	57
4 Entwurf einer Rotationsvorrichtung	60
4.1 Entwicklungsstufen und Entscheidungsmatrix	60
4.2 Aufbau der gewählten Rotationsvorrichtung	61
4.2.1 GT2 Drehzahnrad und die Kopplung zum Motor	63
4.2.2 Einstellungen für den Schrittmotor	64
5 Evaluation der Mess- und Simulationsergebnisse	66
5.1 Mess-, Berechnungs- und Simulationsergebnisse von einzelnen Magneten	66
5.1.1 W10 Magnete	67
5.1.2 W12 Magnete	71
5.1.3 Q10 Magnete	75

5.2	Mess- und Simulationsergebnisse der Dipol-Halbach-Arrays	79
5.3	Messungen mit der TMR - Matrix an der Rotationsvorrichtung	80
5.3.1	Würfelmagnet W10 als Gebermagnet ohne Störfeld	81
5.3.2	Würfelmagnet W10 als Gebermagnet mit Störfeld	82
6	Schlussfolgerung	88
6.1	Fazit	88
6.2	Ausblick	88
	Literaturverzeichnis	89
	Anhang	
A	Geschichte des 3D-Drucks	91
B	Messung der Magnete	92
C	Messung der Magnetringe	94
D	Octave Quellcode	101
E	Technische Zeichnen	152
F	CD	169

Abbildungsverzeichnis

1.1	Messanordnungen für Winkel- und Wegmessungen [1]	10
1.2	Magnetoresistive Sensoren im Auto [1]	12
2.1	Messaufbau mit axialer Hallmesssonde	13
2.2	Eintrag Grenzwert in FEMM	16
2.3	Eintrag H_c in Materialeigenschaft für N42	17
2.4	Magnetfeldstärke für den Würfelmagneten W10 in Abstand von 0 bis 50 mm	17
2.5	Magnetfeldstärke für den Q10 Quadermagneten in Abstand von 0 bis 50 mm	18
2.6	Magnetfeldstärke für den Würfelmagneten W12 im Abstand von 0 bis 50 mm	19
3.1	Einzelmagnet und Magnetanordnung im Halbach-Array [2]	20
3.2	Feld in der Mitte des Halbach-Rings: a)kein Feld, b)2 polig, c)4 polig, d)6 polig [2]	21
3.3	Verschiedene Magnetformen für den Aufbau : a)ideal monolithische Magnetform, b)diskretisierte Form, c)Halbach-Ring aus 16 Quadermagnete, d)oktagonale Form aus 8 Trapezmagnete, e)Viereck Form aus 12 Keilmagnete [3]	22
3.4	Halbach-Array Magnetring mit 36 Einzelmagneten der Kantenlänge 10 mm	23
3.5	Skalierungsfaktor in Matlab/Octave	25
3.6	Octave, FEMM, FreeCAD	25
3.7	Skalierungsfaktor in FEMM	26
3.8	Meshgrid aus Vielzahl von Dreiecken	27
3.9	Meshgrid mit simulierten Magnetfeldlinien	28
3.10	Gittergröße 10 mm	29
3.11	Gittergröße 6.0714 mm	29
3.12	Randbedingung setzen: Eingabe des Kreisradius	30
3.13	Simulation mit linearer Kennlinie	31
3.14	In Octave geplottete Daten des 4 kA/m Magnetringes, simuliert mit linearer Magnetfeldlinie	34
3.15	In Octave geplottete Daten des 6 kA/m Magnetringes, simuliert mit linearer Magnetfeldlinie	36
3.16	In Octave geplottete Daten des 10 kA/m Magnetringes, simuliert mit linearer Magnetfeldlinie	38

3.17	In Octave geplottete Daten des 15 kA/m Magnetringes, simuliert mit linearer Magnetfeldlinie	40
3.18	B-H Diagramm mit nichtlinearer Kennlinie, geplottet in FEMM	41
3.19	Simulation mit nichtlinearer Kennlinie	42
3.20	In Octave geplottete Daten des 4 kA/m Magnetringes, simuliert mit nichtlinearer Magnetfeldlinie	43
3.21	In Octave geplottete Daten des 6 kA/m Magnetringes, simuliert mit nichtlinearer Magnetfeldlinie	45
3.22	In Octave geplottete Daten des 10 kA/m Magnetringes, simuliert mit nichtlinearer Magnetfeldlinie	47
3.23	Vervierfachen der Simulationswerte für den 15kA/m Magnetring	48
3.24	In Octave geplottete Daten des 15 kA/m Magnetringes, simuliert mit nichtlinearer Magnetfeldlinie	49
3.25	Einstellungen: Skalierungsfaktor in FreeCAD	50
3.26	Import einer FEMM Datei in FreeCAD	51
3.27	Erstellen eines Magnetring	52
3.28	3D-Datenfluss	53
3.29	FreeCAD Auswahl der gewünschten Form	54
3.30	FreeCAD Export als *.stl Datei	54
3.31	Test 3D-Druck	55
3.32	Aufbau 4 kA/m Magnetring mit Deckel und Befestigungsschrauben	57
3.33	Messung des Magnetfeldes in der Ringmitte	58
4.1	3D-Rotationsvorrichtung	61
4.2	Aufbau Rotationsvorrichtung	62
5.1	Datenauswertung: Berechnung, Messung, Simulation der W10 Magneten	67
5.2	Absolute Differenz der Messung und Simulation im Vergleich zu Berechnung von W10 Magneten	68
5.3	Gemittelte relative Abweichungen der 51 W10 Magnete	69
5.4	Gemittelte relative Abweichungen der 51 W10 Magneten, ohne Betrag dargestellt	70
5.5	Datenauswertung: Berechnung, Messung, Simulation der W12 Magneten	71
5.6	Absolute Differenz der Messung und Simulation im Vergleich zu Berechnung von W12 Magneten	72
5.7	Aufsummierte Abweichungen der 32 Stück W12 Magnete zur Mittelwert der Messung	73
5.8	Gemittelte relative Abweichungen der 32 W12 Magneten, ohne Betrag dargestellt	74
5.9	Datenauswertung: Berechnung, Messung, Simulation der Q10 Magneten	75
5.10	Absolute Differenz der Messung und Simulation im Vergleich zu Berechnung von Q10 Magneten	76

5.11	Aufsummierte Abweichungen der 20 Q10 Magnete zur Mittelwert der Messung	77
5.12	Gemittelte relative Abweichungen der 20 Q10 Magneten, ohne Betrag dargestellt	78
5.13	Flussdiagramm: Rotationsvorrichtung Programmablauf	81
5.14	Messung ohne Störfeld	82
5.15	Messung mit Störfeld 4 kA/m bei 0°	83
5.16	Messung mit Störfeld 4 kA/m bei 90°	83
5.17	Messung mit Störfeld 6 kA/m bei 0° Störfeldversetzung	84
5.18	Messung mit Störfeld 6 kA/m bei 90° Störfeldversetzung	84
5.19	Messung mit Störfeld 10 kA/m bei 0° Störfeldversetzung	85
5.20	Messung mit Störfeld 10 kA/m bei 90° Störfeldversetzung	85
5.21	Messung mit Störfeld 15 kA/m bei 0° Störfeldversetzung	86
5.22	Messung mit Störfeld 15 kA/m bei 90° Störfeldversetzung	86
5.23	Messung mit Störfeld, vergrößert dargestellt.	87
C.1	Aufzeichnung: Messung 4 kA/m Magnetring	96
C.2	Aufzeichnung: Messung 6 kA/m Magnetring	97
C.3	Aufzeichnung: Messung 7,5 kA/m Magnetring	98
C.4	Aufzeichnung: Messung 10 kA/m Magnetring	99
C.5	Aufzeichnung: Messung 15 kA/m Magnetring	100
E.1	Technische Zeichnung: Magnetring 4 kA/m	152
E.2	Technische Zeichnung: Magnetring 6 kA/m	153
E.3	Technische Zeichnung: Magnetring 10 kA/m	154
E.4	Technische Zeichnung: Magnetring 15 kA/m	155
E.5	Technische Zeichnung: Deckel für Magnetring 4 kA/m und 15 kA/m	156
E.6	Technische Zeichnung: Deckel für Magnetring 6 kA/m	157
E.7	Technische Zeichnung: Deckel für Magnetring 10 kA/m	158
E.8	Technische Zeichnung: Magnetringständer	159
E.9	Technische Zeichnung: MDF Holzständer	160
E.10	Technische Zeichnung: Plexiglass mit 10 mm Dicke	161
E.11	Technische Zeichnung: Plexiglass mit 4 mm Dicke	162
E.12	Technische Zeichnung: Platinenhalter	163
E.13	Technische Zeichnung: GT2 Zahnrad 100 Zähne	164
E.14	Technische Zeichnung: Kugellagerhalter Bauteil 1	165
E.15	Technische Zeichnung: Kugellagerhalter Bauteil 2	166
E.16	Technische Zeichnung: Kugellagerhalter Bauteil 3	167
E.17	Technische Zeichnung: Messschablone 15 Punkte x 15 Punkte	168

Tabellenverzeichnis

2.1	Berechnete Werte der Flussdichte $B(z)$ nach Gleichung 4.1	15
2.2	Feldstärkesimulation in Abhängigkeit vom Abstand z für drei Magnete .	19
3.1	Daten aus der Simulation des Magnetrings 4 kA/m mit linearer Magnetkennlinie	33
3.2	Daten aus der Simulation des Magnetrings 6 kA/m mit linearer Magnetkennlinie	35
3.3	Daten aus der Simulation des Magnetrings 10 kA/m mit linearer Magnetkennlinie	37
3.4	Daten aus der Simulation des Magnetrings 15 kA/m mit linearer Magnetkennlinie	39
3.5	Daten aus der Simulation des Magnetrings 4 kA/m mit nichtlinearer Magnetkennlinie	42
3.6	Daten aus der Simulation des Magnetrings 6 kA/m mit nichtlinearer Magnetkennlinie	44
3.7	Daten aus der Simulation des Magnetrings 10 kA/m mit nichtlinearer Magnetkennlinie	46
3.8	Daten aus der Simulation des Magnetrings 15 kA/m mit nichtlinearer Magnetkennlinie	49
4.1	Vergleich der 3 Konzepte für eine Rotationsvorrichtung	60
5.1	Mittelwerte aller gemessenen Magnete	66
5.2	Vergleich der Magnetringe, Idealwert, Simulation und Messung in der Ringmitte	79
B.1	Messung der 51 W10 Magnete	92
B.2	Messung der 32 W12 Magnete	93
B.3	Messung der 20 Q10 Magnete	93
C.1	Messung Magnetring 4 kA/m	94
C.2	Messung Magnetring 6 kA/m	94
C.3	Messung Magnetring 7,5 kA/m	95
C.4	Messung Magnetring 10 kA/m	95
C.5	Messung Magnetring 15 kA/m	96

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
$L \times B \times H$	Länge x Breite x Höhe
<i>AM</i>	Additive Manufacturing
<i>PLA</i>	Polyactide
<i>FDM</i>	Fused Deposition Modeling
<i>2D</i>	Zwei-Dimensional
<i>3D</i>	Drei-Dimensional
<i>NdFeB</i>	Neodym-Eisen-Bor Legierung
<i>ISAR</i>	Integrated Sensor-ARrays
<i>CAD</i>	Computer-Aided Design
<i>FEMM</i>	Finite Element Method Magnetics
<i>AMR</i>	Anisotrope MagnetoResistive Effekt
<i>MR</i>	MagnetoResistiv
<i>W10</i>	Würfelmagnet 10 mm x 10 mm x 10 mm
<i>W12</i>	Würfelmagnet 12 mm x 12 mm x 12 mm
<i>Q10</i>	Quadermagnet 10 mm x 10 mm x 40 mm
<i>GT2</i>	GaTes 2 mm Zahnrad Standard

1 Einleitung

An der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg wird aktuell an den magneto-resistiven Sensoren im Rahmen des Forschungsprojektes ISAR geforscht. Die MR-Sensoren haben die Eigenschaft, unter Einfluss der elektromagnetischen oder magnetischen erzeugten Felder ihren Widerstandswert zu ändern. Aufgrund dessen kann ein Sensor die Stärke der Magnetfelder erfassen. Sind mehrere Sensoren auf eine Fläche verbaut, werden diese miteinander zu einem Sensor-Array verschaltet. Als Sensor-Array können die Sensoren eine Feldaufnahme der Magnetfelder machen.

1.1 Motivation

Magneto-resistive Sensoren werden vermehrt in der Industrie und Automobilelektronik eingesetzt. Diese kommen vielfältig bei Messaufgaben zum Einsatz, siehe Abbildung 1.1. Die HAW Hamburg arbeitet in Kooperation mit Partnern an dem Forschungsprojekt ISAR, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wird. In dem

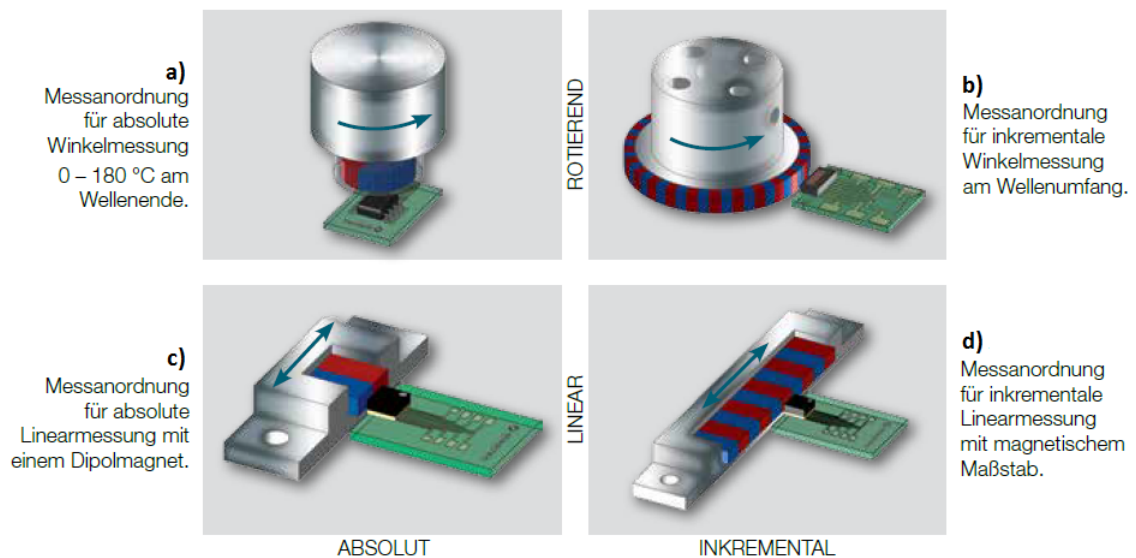


Abbildung 1.1: Messanordnungen für Winkel- und Wegmessungen [1]

Projekt soll ein neuartiges Sensor-Array entwickelt werden. Mit dem Sensor-Array werden Magnetfelder von Permanentmagneten erfasst, um Information über ihre räumliche Lage zu bekommen. In diesem Projekt wird das Verhalten des Sensor-Arrays gegenüber Magnetstörfelder untersucht.

1.2 Ziele dieser Arbeit

Für den Aufbau der Störfelder soll das Konzept des Halbach-Arrays genutzt werden. Der Aufbau besteht aus ringförmig angeordnet Permanentmagnete, sodass sich innerhalb des Ringes ein möglichst homogenes Feld bildet. Die Feldstärke in der Mitte der Magnetringe soll 4, 6, 10 und 15 kA/m betragen. Für die Berechnung der Positionen der Magnete wird auf Vorarbeiten zurückgegriffen. Zunächst wird die Feldstärke innerhalb des Rings mittels Simulation mit der FEMM Software abgeschätzt. Danach soll eine CAD-Konstruktion und 3D-Druck des Aufnahmering für die Permanentmagnete erfolgen. Nach der Fertigung werden die Magnetringe mit einer transversalen Hall-Sonde vermessen und die Messergebnisse dokumentiert. Sowohl eine Testumgebung, bestehend aus einer Rotationsvorrichtung mit einem Gebermagneten soll entworfen und gebaut werden. Die Magnetringe bilden dabei das Störfeld, welches in verschiedenen Winkeln rund um das Sensor-Array 360 Grad versetzbar sein muss.

Winkel- und Längenmessung mit Sensoren Die AMR-Sensoren nutzen die Magnetfelder, um Messinformationen über Winkel- oder Linearpositionen zu verarbeiten. Die Aufgabe besteht darin, das Verhalten der Sensoren gegenüber Störfelder zu testen.

Magneto-resistive Sensoren im Automobil Im Verbrennungsmotor werden MR Sensoren eingesetzt als Winkelsensoren für die Ventilsteuerung, bei der Nockenwellenumdrehung oder elektronische Drosselklappensteuerung sowie als Linearwegsensoren in Pneumatik- oder Hydraulikzylindern.

Die Kommutierung im Elektromotor erfordert eine genaue Winkelmessung pro Millisekunde. Im Vergleich mit den halbleiterbasierten Sensoren ermöglicht das hohe Signal-Rausch-Verhältnis des MR Sensors eine präzise Steuerung.

MR Sensoren decken einen großen Bereich an Messaufgaben ab, bei denen hohe Präzision und berührungloses Abtasten gefordert sind. Antiblockiersysteme (ABS), Servolenkung (EPS) und Elektrohydraulische Bremssysteme (EHB) sind nur einige der möglichen Anwendungen (siehe Abbildung 1.2) [1].

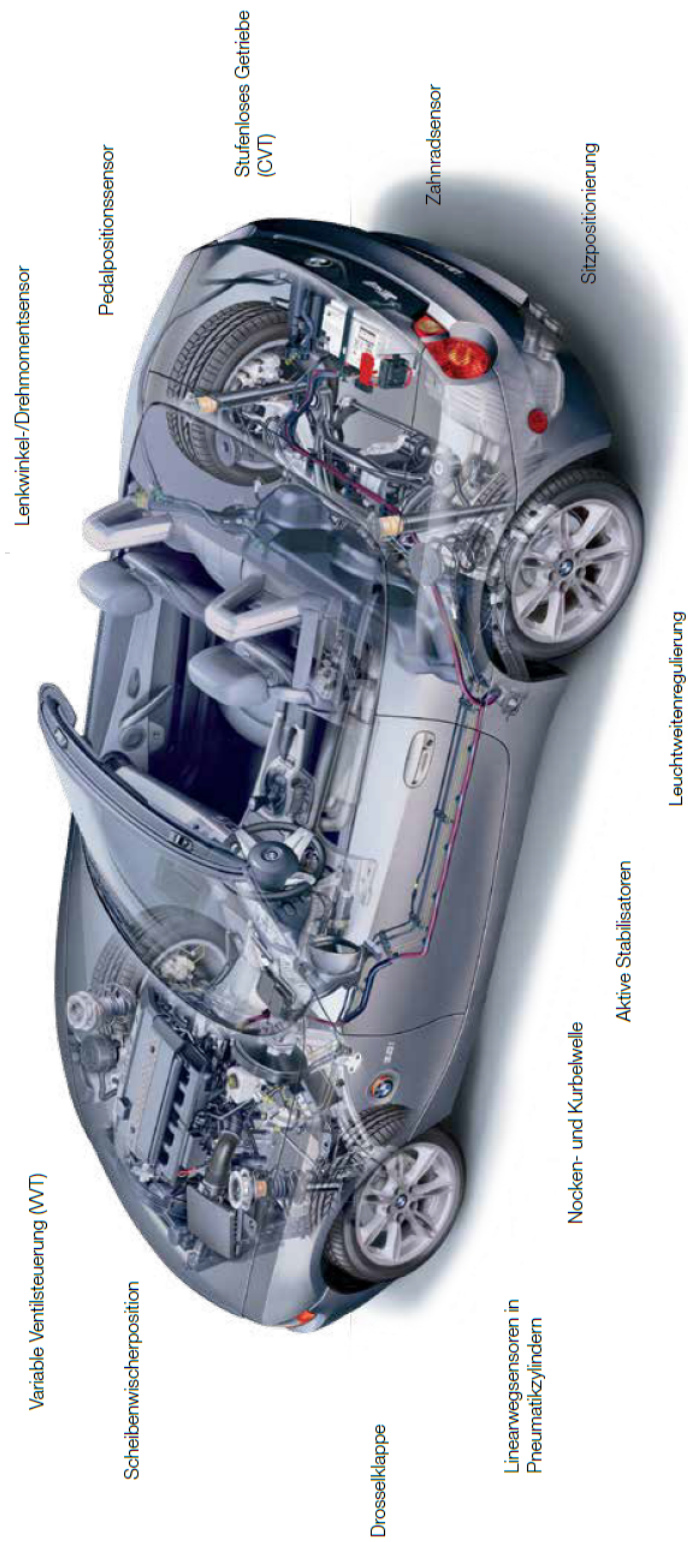


Abbildung 1.2: Magneto-resistive Sensoren im Auto [1]

2 Analyse einzelner Magnete

2.1 Feldstärkemessung der Magnete

Um eine Aussage über die Magnete und deren Qualität zu machen, werden alle eingesetzten Magnete welche in den Halbach-Ringe kommen, vermessen. Das sind drei verschiedene Größen, welche zur Verwendung kommen. Es sind Würfelmagnete von 10 mm x 10 mm x 10 mm (LxBxH), genannt: W10 und 12 mm x 12 mm x 12 mm (LxBxH), genannt: W12 sowie Quadermagnete mit 10 mm x 10 mm x 40 mm (LxBxH), genannt: Q10. Die Messungen erfolgen mit dem Gaussmeter mittels einer axialen Hallmesssonde an einem Messaufbau wie in Abbildung: 2.1. Der Messaufbau besteht aus einem karierten Papier, wo sich eine Skala mit den aufgenommenen Messpunkten befindet. Es werden an 19 Messpunkten mit der axialen Hallsonde Werte in Abstände (in mm) vom Magneten aufgenommen: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 und 50. Die Messschablone wurde beschriftet in eine Folie laminiert.

Die Feldstärke in kA/m wird mit der Messsonde in der Mitte des Magneten am Nordpol aufgenommen.

Eine Tabelle mit den aufgenommenen Messdaten der Magneten befindet sich im Anhang: 2.1

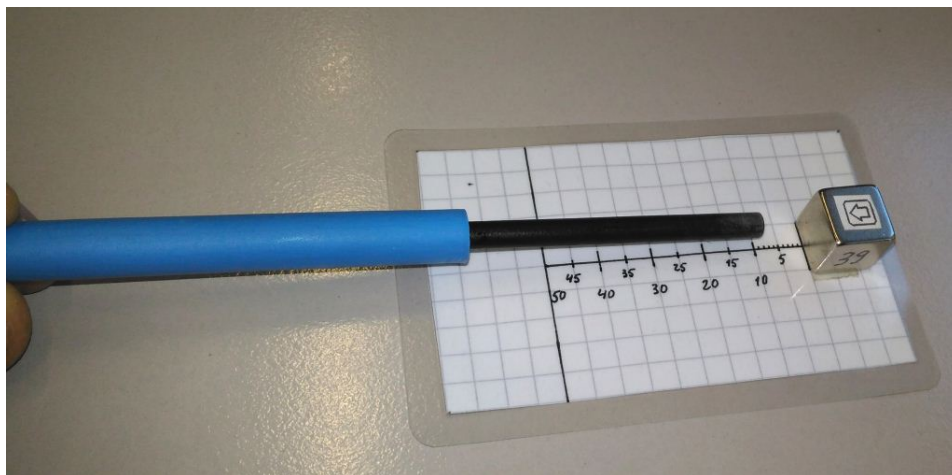


Abbildung 2.1: Messaufbau mit axialer Hallmesssonde

Das FH-55 Gaussmeter hat eine Messgenauigkeit von +/- 0.3%.

Für die Halbach-Magnetringe werden verschiedene Magnetgrößen verwendet. Die Magnete sind mit einem Aufkleber behaftet, welcher auf den Nordpol des Magneten zeigt. Jeder Magnet wird außerdem nummeriert.

Messung der Würfelmagnete W10 Alle 51 Würfelmagnete W10 wurden einzeln in dem Messaufbau vermessen und die Messwerte in Tabelle: B.1 eingetragen.

Messung der Würfelmagnete W12 Alle 32 Würfelmagnete W12 wurden einzeln in dem Messaufbau vermessen und die Messwerte in Tabelle: B.2 eingetragen.

Messung der Quadermagnete Q10 Alle 22 Würfelmagnete W12 wurden einzeln in dem Messaufbau vermessen und in Messwerte eine Tabelle: B.3 eingetragen.

2.2 Berechnung der Feldstärke in z-Richtung

Die Berechnung der Magnete erfolgt, wie bei der Messung, in z- Richtung. Es werden 19 Messpunkte für den Abstand z gewählt, angefangen beim Nordpol ab 0 Millimetern Abstand von Magneten: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50. Die Messpunkte wurden in identischen Schritten wie bei der Messung und Simulation gewählt.

Für die Berechnung wird die Formel 2.1 verwendet. Für den Magnettyp N42, welche bei Würfelmagneten W10 und Quadermagnete Q10 vorkommen wird für das Remanenzfeld $B_r = 1,29$ Tesla verwendet. Für den Magnettyp mit höherer Feldstärke N52, welche bei dem Würfelmagneten W12 vorkommen, wird für $B_r = 1,42$ Tesla verwendet. Das Ergebnis wird mit der Zahl 795,77 multipliziert, um von Einheit Tesla auf kA/m zu kommen. Die berechneten Werte werden in der Tabelle 2.1 eingetragen.

Die Flussdichte $B(z)$ des Magnetes ist abhängig von Abstand z d.h. je näher am Magneten, desto stärker ist die Flussdichte B .

$$B(z) = \frac{B_r}{\pi} \left(\arctan\left(\frac{L \cdot B}{2z \cdot \sqrt{4 \cdot z^2 + L^2 + B^2}}\right) - \arctan\left(\frac{L \cdot B}{2 \cdot (H+z) \cdot \sqrt{4 \cdot (H+z)^2 + L^2 + B^2}}\right) \right) [4] \quad (2.1)$$

mit: B_r - Remanenzfeld, L - Länge des Magneten, B - Breite des Magneten, H - Höhe des Magneten

Die Punkte wurden in identischen Abständen: von 0 - 50 mm wie bei späteren Messung und Simulation gewählt.

Tabelle 2.1: Berechnete Werte der Flussdichte $B(z)$ nach Gleichung 4.1

Abstand z (mm)	$B(z)$ von W10 (kA/m)	$B(z)$ von Q10 (kA/m)	$B(z)$ von W12 (kA/m)
0	394.28	344.08	443.73
1	316.21	292.18	370.82
2	248.42	245.54	304.74
3	193.48	205.93	248.06
4	150.78	173.35	201.29
5	118.27	146.9	163.6
6	93.68	125.46	133.6
7	75.03	108.01	109.83
8	60.79	93.68	90.97
9	49.8	81.82	75.95
10	41.24	71.9	63.92
15	18.34	40.55	30.04
20	9.63	24.95	16.28
25	5.66	16.31	9.76
30	3.6	11.17	6.3
35	2.43	7.94	4.29
40	1.72	5.83	3.06
45	1.26	4.39	2.25
50	0.95	3.38	1.71

2.3 Simulation von Magneten in FEMM

Ziel der Simulation sind Erkenntnisse über die Genauigkeit des zu simulierenden Magnetmodells zu gewinnen sowie der Vergleich zwischen Berechnung und Messung.

Die Simulation erfolgt mit dem Programm FEMM, eine 2D Simulationssoftware. Das Programm kann keine 3D Formen simulieren. Zwar ist es möglich, die Tiefe in mm einzugeben, allerdings bleibt diese Information unberücksichtigt.

Simulation eines Würfelmagneten W10 Nachdem die Einheiten in mm gewählt wurden, wird das Messraster auf 10 mm gesetzt und der Magnet aus 4 Linien in FEMM gezeichnet. Als Material wählt man das Material NdFeB N42 in der Mitte des Magneten. Um den Magnet wird ein Kreis aus 2 Bögen gezeichnet, mit einem Radius von 140 mm. Der Magnet befindet sich in der Mitte des Kreises. Um den Magneten herum befindet sich Luft. Das Material für Luft findet man in der Materialbibliothek. Für Grenzwert(boundary) wird der Wert $1/(\mu_0 \cdot 140 \cdot \text{mm})$ eingegeben, siehe Abbildung 2.2. Richtwert für die Magnetstärke wird der Punkt unmittelbar am Magnet, im Abstand 0,001 mm gewählt. Das ist der Bezugspunkt. Dieser einzige Punkt wird aus der Berechnung in die Simulation importiert. Der Messwert 394.28 kA/m bei 0 mm Abstand vom Magneten ist gleich wie bei Simulation.

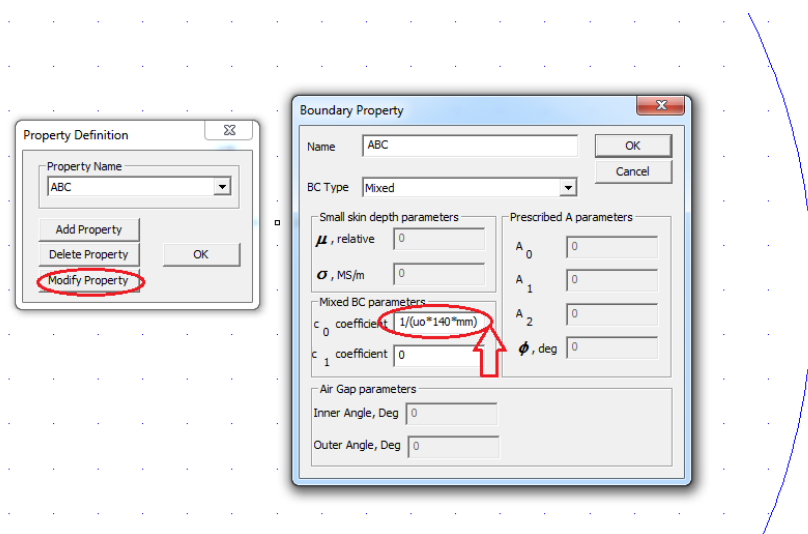


Abbildung 2.2: Eintrag Grenzwert in FEMM

Für den W10 Magneten wird der Eintrag $H_c = 1107582.355 \text{ A/m}$ berechnet, siehe Abbildung 2.3. Die B-H Magnetkennlinie ist die Linearkennlinie. Es wurde auch versucht mit der nichtlinearen B-H Magnetkennlinie zu simulieren, allerdings gab es keinen Unterschied, die Magnetfeldstärke blieb gleich wie bei der linearen B-H Magnetkennlinie. Beim Messen von $z = 0,001 \text{ mm}$ in der Simulation findet man den Wert 394,32 kA/m. Dieser Wert ist nahegleich dem Wert der Berechnung 394.28 kA/m. Es wird nur ein Punkt in der Simulation angegeben, weitere Punkte soll das FEMM Programm berechnen und aufzeichnen. Diese 19 Messpunkte werden aus der Simulation an den Messrasterpunkten abgelesen und in die Tabelle 2.2 eingetragen.

Die Simulation eines Würfelmagneten der Größe W10 in FEMM ist in der Abbildung 2.4 zu sehen. Zu erkennen sind die Magnetfeldlinien, welche geschlossene Kreise zwischen Nord- und Südpol des Magneten bilden. Die Feldstärke ist farblich gekennzeichnet. Je näher am Magneten, mit zunehmender Feldstärke, desto rötlicher die Farbe.

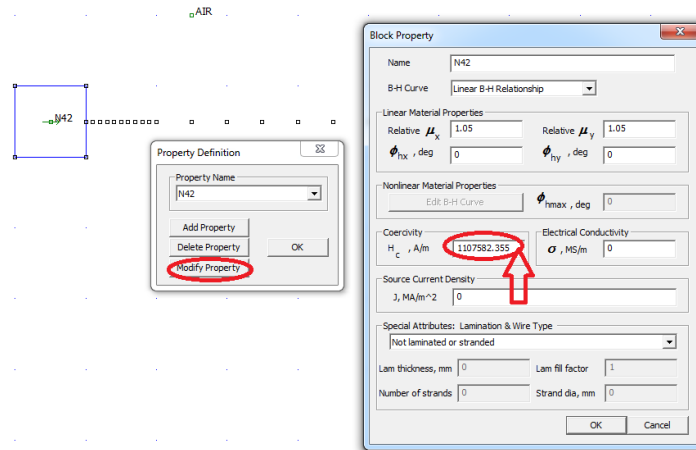


Abbildung 2.3: Eintrag Hc in Materialeigenschaft für N42

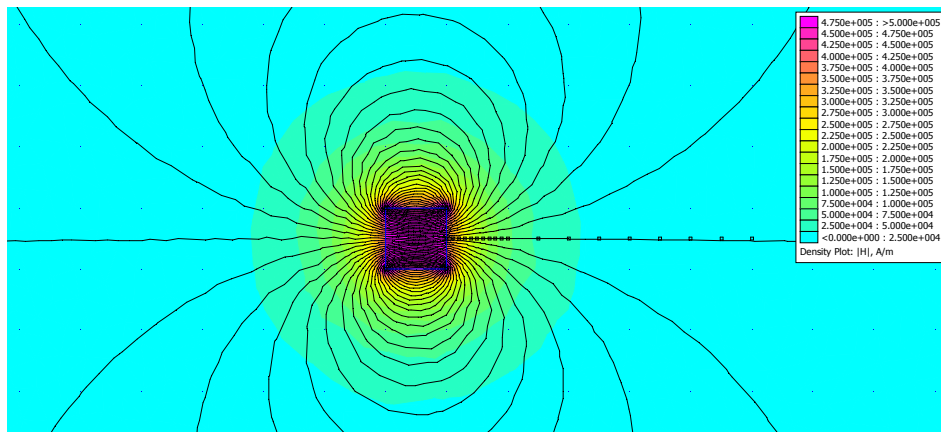


Abbildung 2.4: Magnetfeldstärke für den Würfelmagneten W10 in Abstand von 0 bis 50 mm

Simulation eines Quadermagneten Q10 Nachdem die Einheiten in mm gewählt wurden, wird das Messraster auf 10 mm gesetzt und der Magnet aus 4 Linien in FEMM gezeichnet. Als Material wählt man das Material NdFeB N42 in der Mitte des Magneten. Um den Magneten wird ein Kreis aus 2 Bögen gezeichnet, mit einem Radius von 140 mm. Das Magnet befindet sich in der Mitte des Kreises. Um den Magneten herum befindet sich Luft. Das Material für Luft findet man in der Materialbibliothek. Für den Grenzwert wird der Wert $1/(\mu_0 \cdot 140 \cdot \text{mm})$, siehe Abbildung: 2.2 eingegeben. Als Richtwert für die Magnetstärke wird der Punkt unmittelbar am Magneten im Abstand 0,001 mm gewählt. Das ist der Bezugspunkt. Dieser einzige Punkt wird aus der Berechnung in die Simulation importiert. Der Messwert 344.08 kA/m bei 0 mm Abstand von Magneten ist gleich wie bei Simulation. Für den Q10 Magneten wird der Eintrag Hc 2331843.57 A/m berechnet. Die B-H Magnetkennlinie ist die Linearkennlinie. Bei Messen von $z = 0,001$ mm in der

Simulation findet man den Wert 344.078 kA/m. Es wird nur ein Punkt in der Simulation angegeben, weitere Punkte soll das FEMM Programm berechnen und aufzeichnen. Diese 19 Messwerte werden aus der Simulation an den Messrasterpunkten abgelesen und in die Tabelle 2.2 eingetragen.

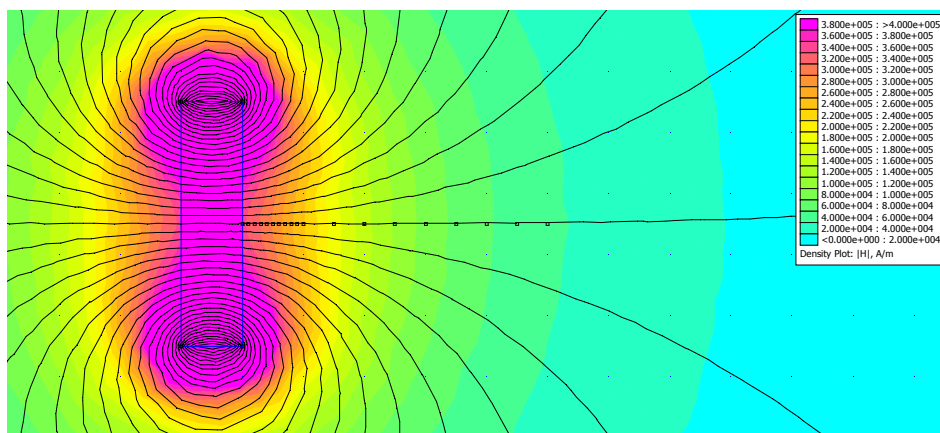


Abbildung 2.5: Magnetfeldstärke für den Q10 Quadermagneten in Abstand von 0 bis 50 mm

Die Simulation eines Quadermagneten Q10 in FEMM ist in der Abbildung 2.5 zu sehen.

Simulation eines Würfelmagneten W12 Nachdem die Einheiten in mm gewählt wurden, wird das Messraster auf 12 mm gesetzt und das Magnet aus 4 Linien in FEMM gezeichnet. Als Material wählt man das Material NdFeB N52 in der Mitte des Magneten. Um den Magnet wird ein Kreis aus 2 Bögen gezeichnet, mit einem Radius von 140 mm. Der Magnet befindet sich in der Mitte des Kreises. Um den Magneten herum befindet sich Luft. Das Material für Luft findet man in der Materialbibliothek. Für den Grenzwert(boundary) wird der Wert $1/(\mu_0 \cdot 140 \cdot \text{mm})$ eingegeben, siehe Abbildung: 2.2. Als Richtwert für die Magnetstärke wird der Punkt unmittelbar am Magnet im Abstand 0,001 mm gewählt. Der Bezugspunkt wird mit dem berechnetem Wert 443.73 kA/m bei 0 mm Abstand abgeglichen. Für den W12 Magneten wird der Eintrag H_c 1245298.66 A/m berechnet. Die B-H Magnetkennlinie ist die Linearkennlinie. Bei der Messung von $z = 0,001$ mm in der Simulation findet man den Wert 443,77 kA/m. Die Einstellungen erfolgen wie bei W10/Q10 Magneten. Diese 19 Messwerte werden aus der Simulation an den Messrasterpunkten abgelesen und in die Tabelle 2.2 eingetragen.

Die Simulation eines Würfelmagneten W12 in FEMM ist in der Abbildung 2.6 zu sehen.

Die Messpunkte sind im Simulationsfenster im Abstand von 0 - 50 Millimeter eingetragen, für jeden Punkt aus der Simulation abgelesen und in die Tabelle: 2.2 eingetragen.

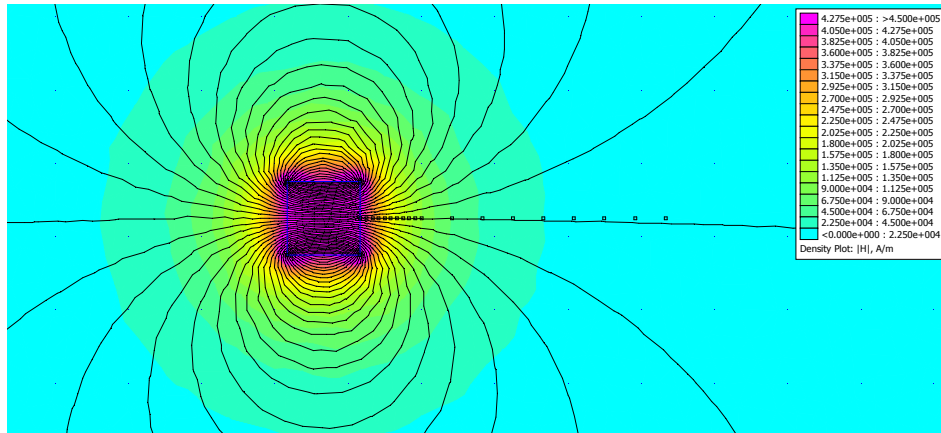


Abbildung 2.6: Magnetfeldstärke für den Würfelmagneten W12 im Abstand von 0 bis 50 mm

Tabelle 2.2: Feldstärkesimulation in Abhängigkeit vom Abstand z für drei Magnete

Abstand z (mm)	$B(z)$ von W10	$B(z)$ von Q10	$B(z)$ von W12
0	394.32	344.08	443.77
1	338.42	336.68	390.86
2	288.76	329.23	344.29
3	241.25	319.95	298.44
4	199.65	308.9	256.88
5	166.93	297.74	219.63
6	141.79	286.36	189.41
7	121.58	274.77	165.59
8	104.13	262.95	144.97
9	90.182	251.75	127.54
10	79.576	241.27	112.59
15	42.201	190.34	66.016
20	28.008	146.46	41.894
25	19.762	116.01	30.162
30	14.639	92.727	22.465
35	11.19	75.362	17.345
40	8.915	62.412	13.723
45	7.2032	52.122	11.145
50	5.9701	44.087	9.3031

3 Halbach-Arrays

Klaus Halbach, ein Deutsch-Amerikanischer Wissenschaftler hat mit Permanentmagnete experimentiert, mit dem Ziel das Magnetfeld mehrerer Magnete in eine gewünschte Form auszurichten. Sein 16-teiliger Quadrupol war der erste dieser Art [5].

Z.Q. Zhu beschreibt in seiner Veröffentlichung die Anwendung der Halbach-Arrays in bürstenlosen Motoren sowie Generatoren. Die speziell ausgerichtete Magnetfelder nach Halbach bieten Vorteile wie Gewichtsreduzierung (da der Eisenring um die Magnete entfällt) und Verbesserung der dynamischen Leistung, was den Wirkungsgrad dieser elektrische Maschinen steigert [6].

Ein einfaches Halbach-Array setzt sich aus mehreren Permanentmagneten zusammen, deren Magnetisierungsrichtung gegeneinander jeweils um 90° gedreht ist. Dadurch rücken die Feldlinien auf einer Seite enger zusammen, was eine Erhöhung der magnetischen Flussdichte bewirkt. Auf der gegenüberliegenden Seite liegen die Feldlinien weniger eng, daher wird das Feld abgeschwächt bzw. verschwindet völlig [7].

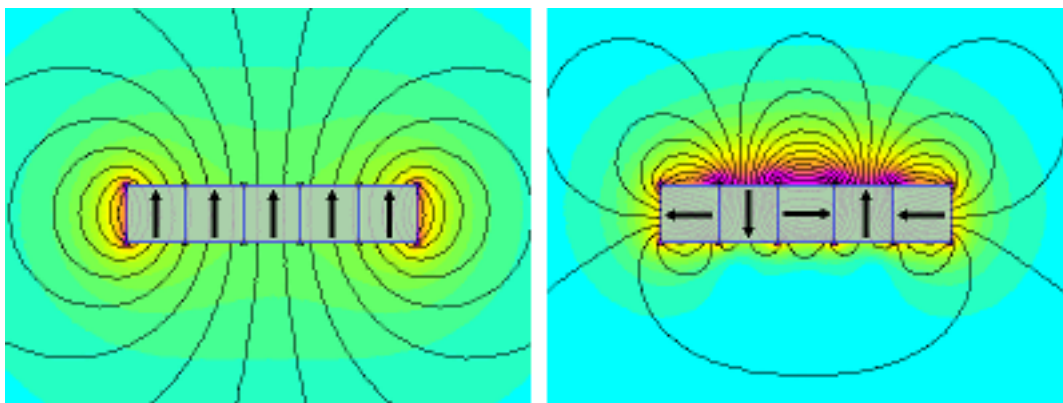


Abbildung 3.1: Einzelmagnet und Magnetanordnung im Halbach-Array [2]

Links in Abbildung 3.1 ist ein einzelner Magnet aus 5 Würfelmagneten gebaut, Nordpol in Pfeilrichtung. Die Feldstärke, welche mit einer Farbskala gekennzeichnet, ist gleich stark oberhalb und unterhalb des Magneten. Rechts: Ein Halbach-Array, auch aus 5 Würfelmagneten aufgebaut nur anders geordnet, hat ein starkes Magnetfeld oben und ein vergleichsweise schwaches Magnetfeld unten.

Ein sehr verbreitetes Halbach-Array sind Haftmagnete (z.B. Dekomagnete am Kühlschrank, Magnetwand). Beim Bau von Generatoren und Elektromotoren kommen ringförmige Halbach-Arrays vor. Weitere Anwendungsgebiete für Halbach-Arrays sind Quadrupole in Teilchenbeschleunigern sowie Halbach-Anordnungen in Magnetschwebbahnen.

3.1 Ringförmige Dipol-Halbach-Arrays

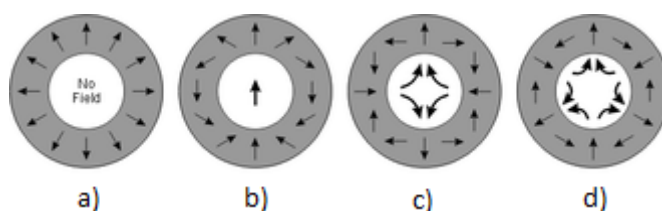


Abbildung 3.2: Feld in der Mitte des Halbach-Rings: a)kein Feld, b)2 polig, c)4 polig, d)6 polig [2]

Neben der in Abbildung 3.1, rechts, dargestellten Stabform des Halbach-Arrays, gibt es zum Beispiel auch eine Ringform. Bei diesem Ring lassen sich die Magnete so positionieren, dass sich innerhalb des Rings ein stärkeres Magnetfeld bildet (Abbildung 3.2 b). Durch die Halbach-Anordnung der Magnete auf dem Ring lassen sich zudem unterschiedliche Magnetfelder, wie z. B. ein Dipol- bzw. homogenes-, Quadrupol- oder Hexapol-Feld nachbilden. Für diese Arbeit kommen nur dipolare Magnetfelder in Frage. Das Magnetfeld in der Mitte des Rings soll homogen sein.

Ein idealer Halbach-Magnetring hat die Form eines unendlich langen Zylinders, bestehend aus einem Permanentmagneten, welcher durchgehend entlang des Radius magnetisiert ist (Abbildung 3.3 a). Bedauerlicherweise eine solche Magnetisierung ist in Realität schwer zu realisieren. Dennoch es gibt viele Wege, sich an die Ideale Lösung anzunähern.

Ein möglicher Ansatz wäre ein kreisförmiger Aufbau, wo die Magnete im Kreis angeordnet sind. Die Form der Permanentmagnete kann: trapez-, quader-, oder zylinderförmig sein, (Abbildung 3.3 b, c). An Stelle eines unendlich hohen Zylinderring im Idealfall, kommt die endliche Höhe des Würfelmagneten entgegen. Die Länge der Magnete in z-Achse ist so groß wie die Seite eines einzelnen Magneten. In unserem Projekt beträgt die maximale Höhe beim Quadermagnet 40 mm.

Die Anzahl der Magnete im Ring ist von der Größe und Form des einzelnen Magneten abhängig.

Hinzu kommt, dass die konventionell erhältliche Magnete eine unterschiedliche Feldstärke von bis zu 11,24% aufweisen können. Das wurde schon beim Vergleich von Messung und

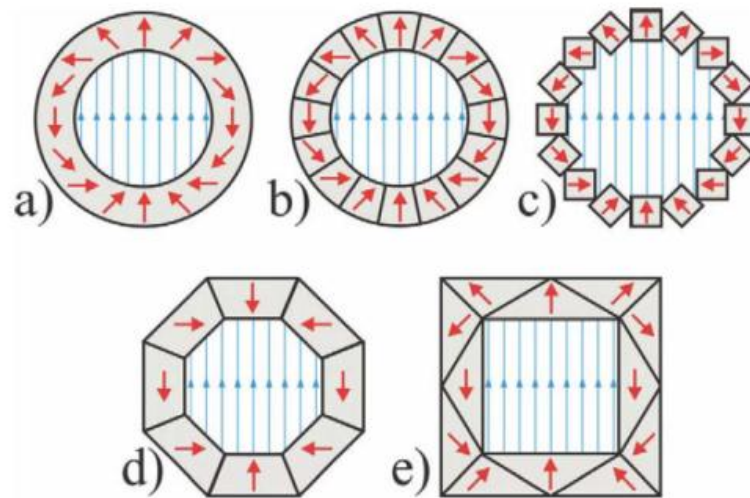


Abbildung 3.3: Verschiedene Magnetformen für den Aufbau : a)ideal monolithische Magnetform, b)diskretisierte Form, c)Halbach-Ring aus 16 Quadermagnete, d)oktagonale Form aus 8 Trapezmagnete, e)Viereck Form aus 12 Keilmagnete [3]

Berechnung der Neodymmagnete in Kapitel 2 untersucht. Um ein möglichst starkes Magnetfeld im Magnetring zu erzeugen, sollten die Magnete stark und viele und so nah wie möglich nebeneinander platziert sein, ohne dass die benachbarten Magnete sich berühren. Es ist zu beachten, dass die Magnete stabil in die Plastikform (PLA) stecken. Aufgrund der Magnetstärke zwischen sich gegenseitig abstoßender Magnete könnte die Plastikform auseinanderreißen. Um das zu vermeiden, sollte die Dicke der Wandstärke im Ring mindestens 1 mm aufweisen.

3.2 Positionierung mehrerer Magnete zum Halbach-Array

Für die Lage der Magnete, wird der beschriebene Ansatz aus der Veröffentlichung angewendet [3]. In der Veröffentlichung werden verschiedene magnetische Formen überprüft, um zu zeigen, dass dies mit einer optimalen Nachbildung eines gleichförmigen Magnetfeldes möglich ist. Die Größe des Magneten wird in Abhängigkeit von der Größe des resultierenden ringförmigen Magneten bestimmt. Da nicht die Möglichkeit besteht, die Magnete nach unseren Wünschen herstellen zu lassen, können die Magnete im Ring aus

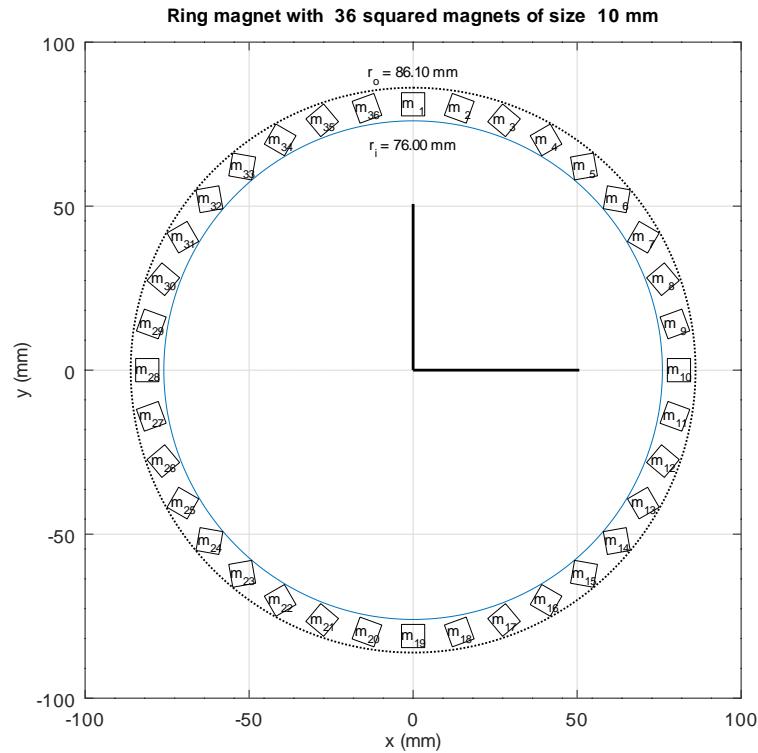


Abbildung 3.4: Halbach-Array Magnetring mit 36 Einzelmagneten der Kantenlänge 10 mm

mehreren nebeneinander platzierten Magneten bestehen und die Form dieser Magnete kann zylinder-, trapez- oder würfelförmig sein. Würfelmagnete sind auf dem Markt verbreitet und können besser im Ring fixiert werden, im Gegensatz zu zylinderförmigen Magnete, die mit mehreren Schrauben gehalten werden müssen. Trapezförmige Magnete sind weniger auf dem Markt verfügbar und sind als Sonderbestellung mit längeren Lieferzeiten zu erhalten. Aus diesen Gründen ist die Entscheidung auf Würfelmagnete gefallen.

Die Größe des Magnettrings wird durch die Kantenlängen in X- und Y-Richtung angegeben (sz_x und sz_y), siehe Formel 3.1. Die Richtung der Magnetisierung ist festgelegt auf Y. Der innere Durchmesser des Magnettringes d_i muss angegeben werden.

$$d_0 = d_i + 2\sqrt{sz_x^2 + sz_y^2} \cdot 1.4142 \quad (3.1)$$

Der Mittelpunkt eines Magneten liegt auf dem Radius $r = (d_i + r_o)/2$. Der Wert 1.4142, oder $\sqrt{2}$ ist der Skalierungsfaktor, welche dafür sorgt, dass die berechneten Maße in ein

CAD Programm übernommen werden kann. Die Anzahl der Pole n_{pole} wird hier auf zwei gesetzt, um in der Mitte des Rings ein dipolares Magnetfeld zu bilden. Der Drehwinkel α eines einzelnen Magneten ist von der Anzahl der Magnete n_{mag} abhängig. Je mehr Magnete, desto geringer der Drehwinkel, siehe Formel 3.2

$$\tan \alpha_i = \frac{\cos[\pi i(n_{pole} + 2)/n_{mag}]}{\sin[\pi i(n_{pole} + 2)/n_{mag}]} \quad (3.2)$$

Abbildung 3.4 zeigt einen Ringmagneten mit 36 Würfelmagneten der Kantenlänge 10 mm.

Die Geometrie des Ringes wird in Octave durchgeführt. Hier wird die Größe der Magnete, der Innen- und Außenradius ausgewählt. Es wird mit Bausteinen gebaut, welche in FEMM auch bei der Erstellung einer Geometrie zur Anwendung kommen, bzw. gezeichnet werden wie Punkte, Linien und Bögen. Die Position dieser Bauteile wird erst berechnet, dann in Octave Zeile für Zeile codiert. Zum Schluss wird die Geometrie in eine Datei geschrieben und gespeichert. Diese Datei trägt den Namen POINTS.FEM welche in FEMM geöffnet und weiterverarbeitet wird. Die Erstellung der Datei passiert, wenn der Code in Octave ausgeführt wird!

Der Octave Quellcode für die Magnetringe befindet sich im Anhang:

Quellcode Aufbau 4 kA/m Magnetring: [D.10](#)

Quellcode Aufbau 6 kA/m Magnetring: [D.12](#)

Quellcode Aufbau 7,5 kA/m Magnetring: [D.14](#)

Quellcode Aufbau 10 kA/m Magnetring: [D.13](#)

Quellcode Aufbau 15 kA/m Magnetring: [D.11](#)

Es wurde eine 2D Form des Rings erzeugt, welche für die Simulation im FEMM Programm skaliert werden musste. Damit die Größen in Millimetern 1:1 maßstabsgetreu bleiben, sind die Magnetgröße und Radius mit dem Skalierungsfaktor 1,4142 in Octave zu multiplizieren, wie in der Abbildung: 3.5 gezeigt. Sobald geschehen, kann die erzeugte Ausgabedatei POINTS.FEM jetzt in FEMM simuliert werden, da sonst die Abmessungen mit den Realwerten nicht übereinstimmen. Die Magnetgröße ist dann kleiner, was Einfluss auf die Feldstärke in der Simulation hat. Um sich zu vergewissern, dass die Werte in der Simulation mit den Realwerte übereinstimmen, kann das mit Hilfe des FEMM Messrasters überprüft werden. Abbildung 3.7 zeigt, dass die 10 mm Magnetgröße und 10 mm Gitterraster in FEMM übereinstimmen.

```

14 %-----
15
16 % close all
17 clear all
18 clc
19
20 % inner and outer radian of ring magnet
21 di = 148;
22 % 104.65 * 1.4142 = 148mm
23
24
25 % numebr of magnets
26 n_mag = 30;
27
28 % number of poles; if 4: you create a quadrupole
29 % typical values are 2,4,6,8,10,12,...
30 % only even numbers are allowed
31 n_pole = 2;
32
33 % Magnet size Squared only!
34 %szx = 14.1421312;
35 %1.415
36 szx = 14.14;
37

```

Damit die Größe in FEMM übereinstimmt, muss der Wert mit dem Faktor 1,4142 multipliziert werden
Erst jetzt sind die Ergebnisse in FEMM Maßstabgetreu millimetergenau!

Auch bei der Magnetgröße soll der Faktor berücksichtigt werden! 14,14 mm in MATlab entspricht genau 10 mm in FEMM.

Abbildung 3.5: Skalierungsfaktor in Matlab/Octave

3.3 Simulation des Dipol-Halbach-Arrays in FEMM

Ziel der Simulation ist die Analyse der Magnetfeldstärke von Magnetringaufbauten, die für die formelmäßige Behandlung zu komplex sind [8]. Es wird mit dem Magnetringmodell experimentiert, um Erkenntnisse über den reale Magnetring zu gewinnen. Die Parametrierung erfolgt anhand von Vorarbeiten am Magnetring mit 7.5 kA/m. Um die Magnetringe mit der vorgegebene Feldstärke in der Mitte mit 4, 6, >10 kA/m zu erzeugen, wurden mehrere Programme verwendet. Ein Berechnungstool namens Octave, das Magnetsimulationprogramm FEMM und das CAD Konstruktionsprogramm FreeCAD, siehe Abbildung 3.6.

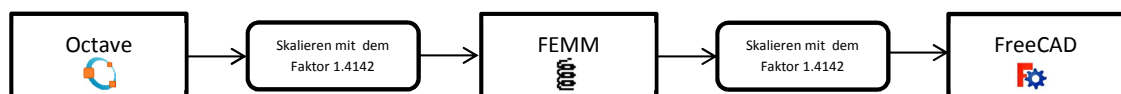


Abbildung 3.6: Octave, FEMM, FreeCAD

Das FEMM Programm ist mit Octave kompatibel. Für die Aufgabe bedeutet das, dass die erstellte Ringform in FEMM weiterhin exportiert werden kann, um hier die Feldstärke des Magnetringes zu simulieren, so dass der Ring die gewünschte Feldstärke von 4, 6, 10, und 15 kA/m aufweist. Sollte die Feldstärke in der Mitte nicht übereinstimmen, wird die Ringgröße verändert und die Magnetanzahl mit eine größere oder kleinere

Magnetanzahl dann in FEMM nochmals simuliert. In der Simulation wird die Mitte des Magnetfeldes abgelesen und mit dem Zielwert verglichen. Und das passiert solange, bis der simulierte mit dem gewünschtem Wert übereinstimmt. Die Simulation ist hiermit ein flexibles Werkzeug, welches Einsparungspotential an Ressourcen bietet.

Sobald die Simulation ohne Fehler durchlaufen ist und der Magnetring die gewünschte Magnetfeldstärke in der Mitte aufweist, erfolgt der Export einer Datei aus FEMM. Die Export-Datei hat die Endung *.dxf, welche mit einem CAD Konstruktionsprogramm kompatibel ist, bzw. kann in FreeCAD weiter bearbeitet werden, um hier eine 3D Form des Magnetring zu erzeugen, basierend auf unser früheren Berechnung in Octave.

FEMM exportiert 2D *.dxf Dateien. Um diese 2D Form in eine 3D Form zu konvertieren wird in FreeCAD, die Option: extrudieren angewendet. Neben X und Y Achse wird in die Form auch die Z Achse in der dritten Dimension berücksichtigt.

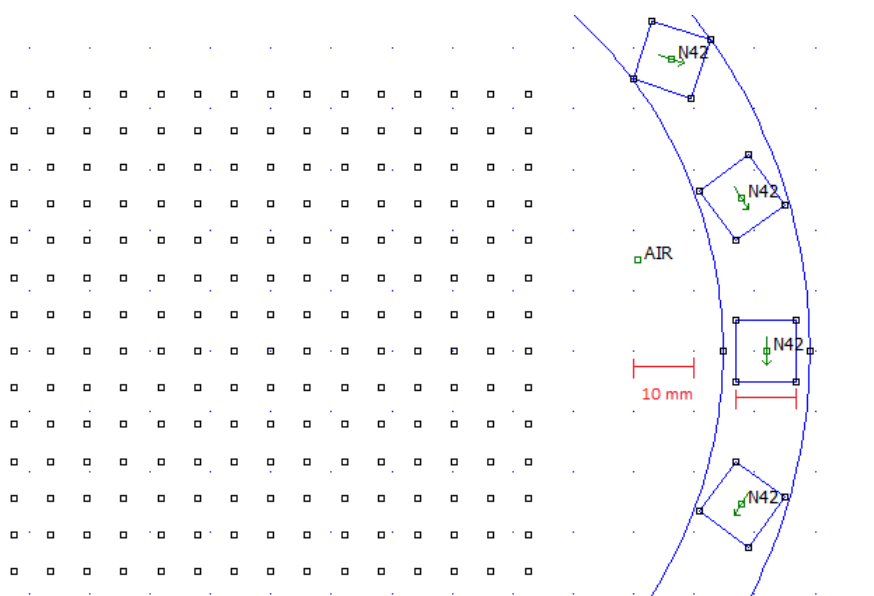


Abbildung 3.7: Skalierungsfaktor in FEMM

In FreeCAD soll der Skalierungsfaktor überprüft werden. Sobald die Abmessungen übereinstimmen, soll der Skalierungsfaktor auf 1,0000 gesetzt werden. Andernfalls rechnet man mit vergrößerten Werten, welche mit den Realwerten nicht übereinstimmen, siehe Abbildung 3.7.

Simuliert wurde mit FEMM (Finite Element Method Magnetics) stabile Version 4.2, wobei eine Vielzahl von Dreiecken als Basiselemente eingesetzt werden.

Abbildung 3.8 zeigt einen Ausschnitt des Magnetrings mit einem Magneten. Hier sind die Dreiecke sichtbar. Diese unterteilte Fläche wird (engl.) Meshgrid genannt. Die Anzahl

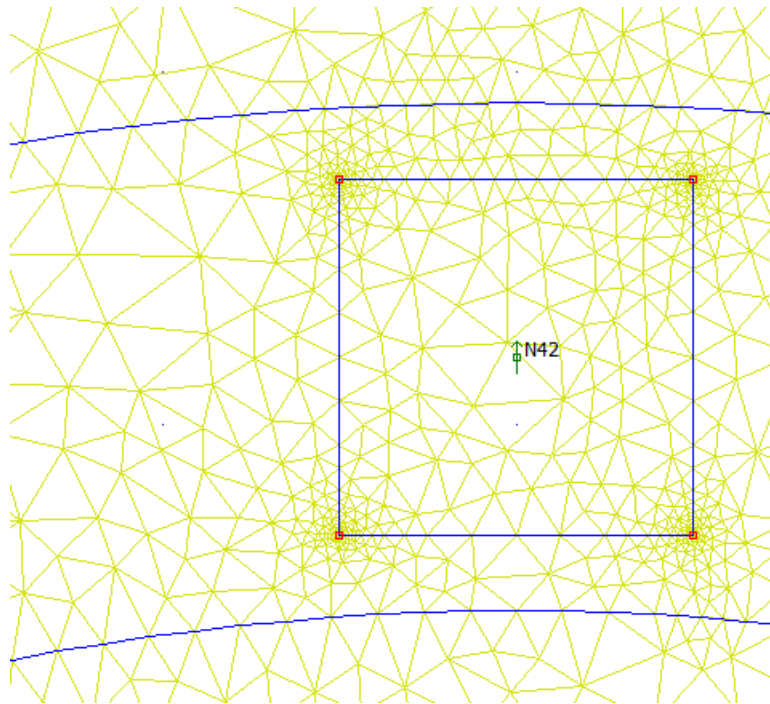


Abbildung 3.8: Meshgrid aus Vielzahl von Dreiecken

von Dreiecken kann vorgegeben oder dem Programm FEMM überlassen werden. In diesem Beispiel wurde das Meshgrid von FEMM erzeugt. Die Dreiecke sind unterschiedlich groß.

Sehr kleine Dreiecke sind vorteilhaft, weil diese genaue Messungen ermöglichen, der Nachteil ist die lange Zeitdauer für die Simulation. Für alle Simulationen wurde das Meshgrid automatisch vom Programm erzeugt.

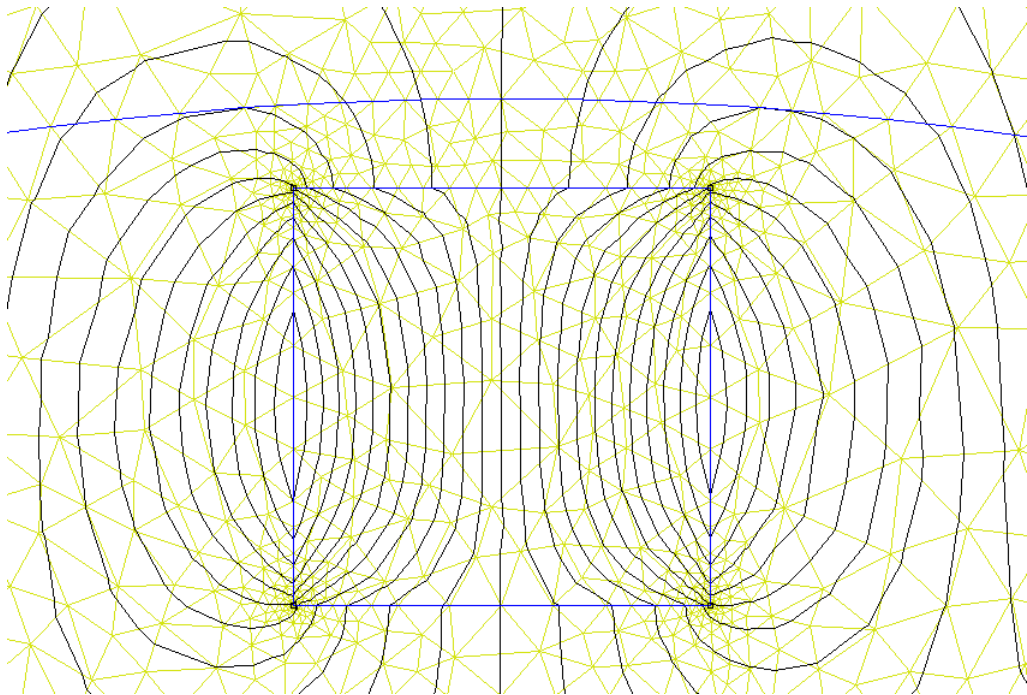


Abbildung 3.9: Meshgrid mit simulierten Magnetfeldlinien

Die simulierten Magnetfeldlinien werden durch das Meshgrid beeinflusst.

Messgitter in FEMM Im Abschnitt Simulation, wurde über den Skalierungsfaktor berichtet. Das Gitterraster (Messgitter) ist eine variable Größe in der FEMM Simulation und kann von Benutzer eingegeben werden. Abbildung 3.10 zeigt eine Messgitter mit 10 mm. In der Abbildung 3.11 ist die Messgitter auf 6.0714 mm eingestellt. Er ist auch ein Kontrollwerkzeug, welches überprüfen kann, ob der Maßstab 1:1 stimmt. Bestimmte Längen können in der Simulation damit abgelesen werden, wenn diese unbekannt sind und nur aus dem Verhältnis mit anderen Längen bestimmt werden können.

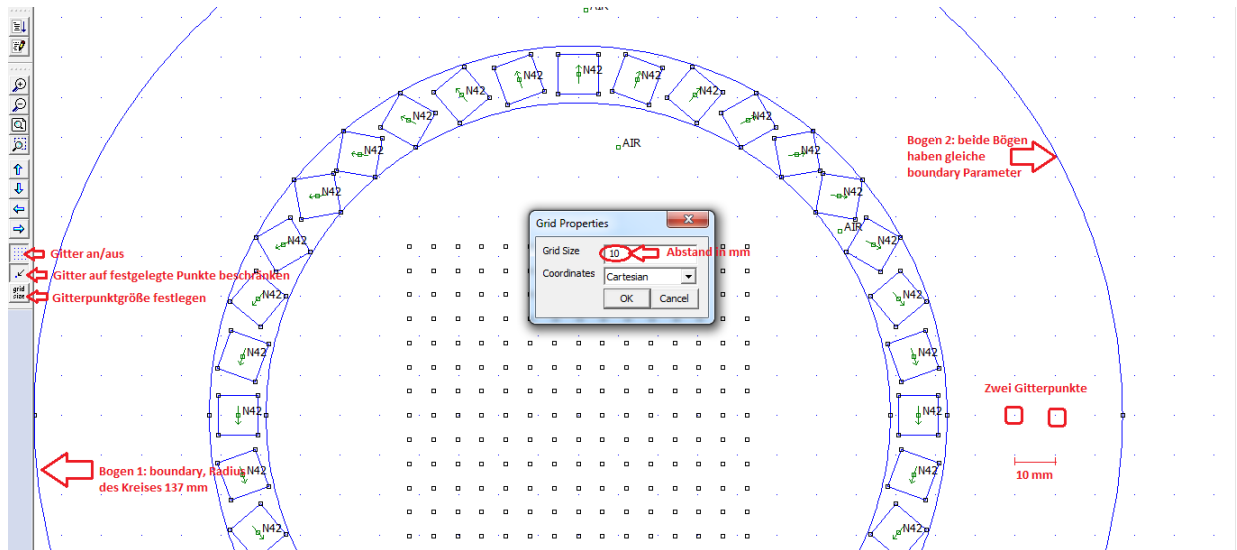


Abbildung 3.10: Gittergröße 10 mm

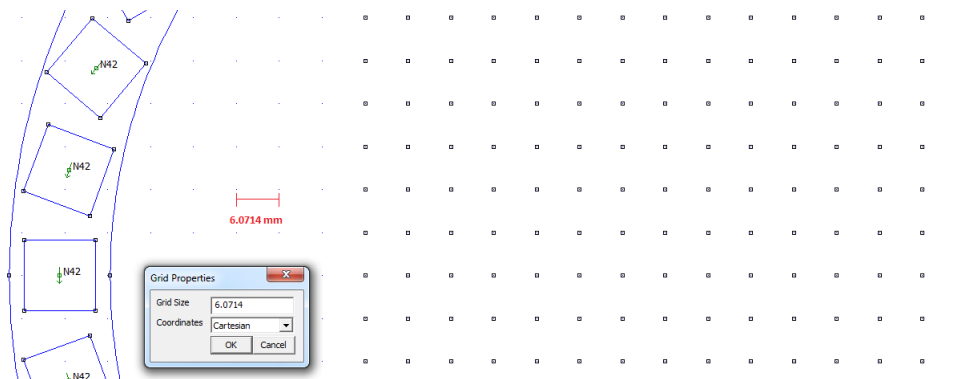


Abbildung 3.11: Gittergröße 6.0714 mm

Randbedingungen setzen (engl. boundaries) In FEMM werden die Randbedingungen für alle Magnetring-Simulationen gleich ausgewählt. Wichtig für die Simulation ist, dass der Radius des Kreises um den Magnetring aus zwei 180° Bögen gezeichnet wird. Beide dieser Bögen zeichnen ein Kreis, so dass für beide Bögen gleiche Randbedingungen bestehen.

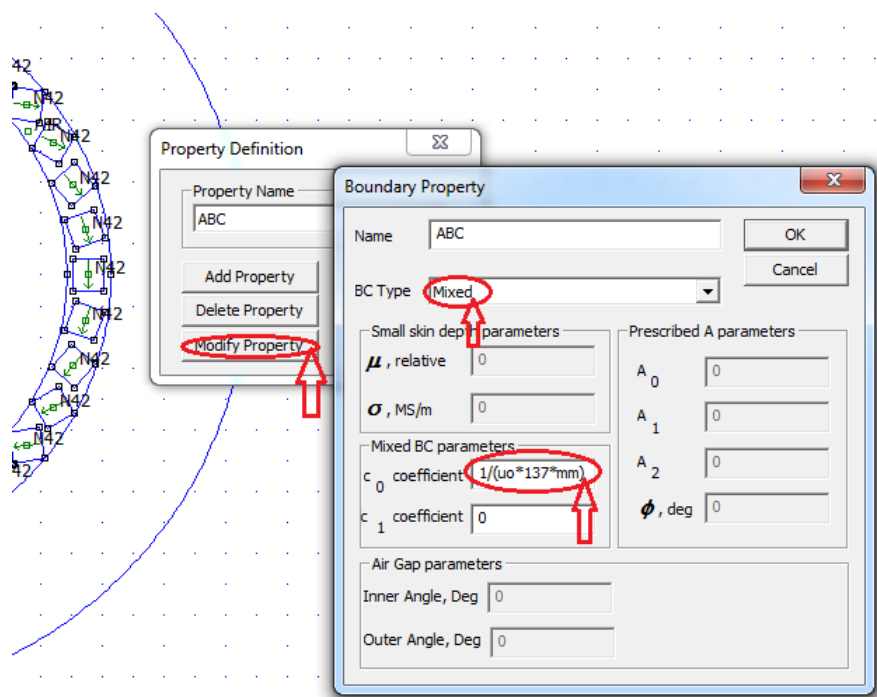


Abbildung 3.12: Randbedingung setzen: Eingabe des Kreisradius

Für alle Magnetring-Simulationen wurde der Radius gleich 137 mm gesetzt. Die Wahl dieses Wertes ist zweitrangig. Wichtig ist, dass sich der Ring in einer "simulierten" Luftumgebung befindet. Erstrangig ist dieser Radius bei der Eingabe im Boundary zu berücksichtigen. Die Randbedingung bekommt den Namen ABC (Asymptotic Boundary Condition) als c_0 Koeffizient wird der Wert $1/(u_0 * radius * mm)$, in diesem Fall $1/(u_0 * 137 * mm)$ eingegeben, siehe Abb. 3.12.

Um die Simulation zu starten, sollten mehr Daten der Magneten bekannt sein. Aus dem Kapitel 2 wissen wir, welche Magnetstärke die verschiedenen Magnete bei 0 bis 50mm Abstände besitzen. Diese Messdaten treffen mehr eine Aussage über die Qualität der Magnete aus. Für die Erstellung des Ringes sind diese Daten nicht ausreichend. In den Datenblättern der Magnethersteller sind die Koerzitivfeldstärke H und die Remanenz B_r angegeben. Mit diesen zwei Angaben kann eine Entmagnetisierungskennlinie gezeichnet werden, welche auch B-H Graph genannt wird und linear verläuft. FEMM unterstützt auch den Import einer Datei mit den B-H Punkten einer nichtlinearen Magnetkennlinie, welche näher der Realität entspricht bzw. genauere Simulationsergebnisse liefert.

FEMM besitzt eine vordefinierte Materialbibliothek. Es befindet sich darin auch Daten über Magnetmaterialien von N42 und N52. Hier sind lineare und nichtlineare Kennlinien zu finden. Aus diesen Materialien wurde das NdFeB Magnetmaterial für die Simulation verwendet.

Zum Vergleich werden zwei Simulationen erstellt eine mit linearer Kennlinie und eine mit nichtlinearer Kennlinie.

3.3.1 Verwendung einer linearen B-H Kennlinie

Der Ausgangspunkt ist der 7,5 kA/m Magnetring, welcher in einem früheren Projekt realisiert wurde.

Der 7,5 kA/m Ring wurde mit dem Gaussmeter und der Messschablone in der Mitte vermessen. Der Wert in der Mitte des Ringes beträgt 7,5 kA/m und ist als Bezugspunkt für weitere Messungen herangezogen worden.

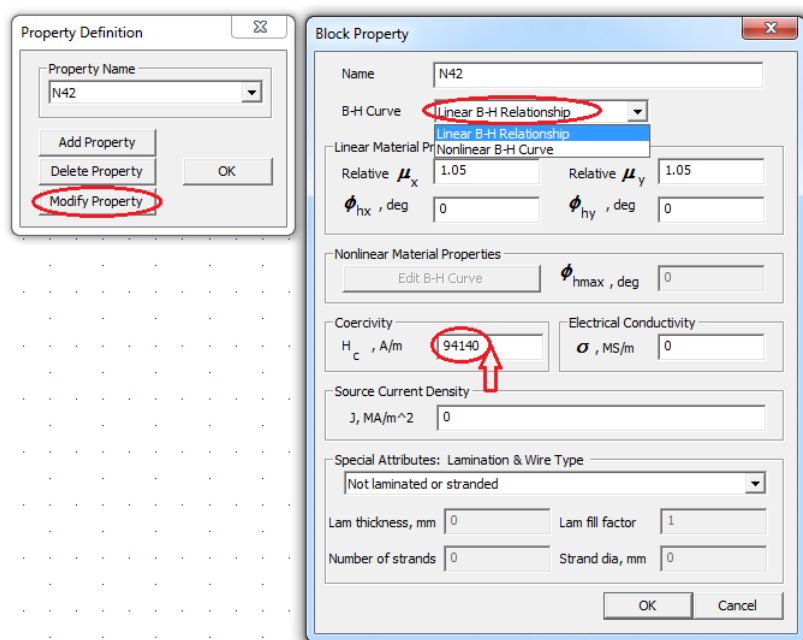


Abbildung 3.13: Simulation mit linearer Kennlinie

Die Koerzitivfeldstärke H_c wurde bei dem Ring mit 7,5 kA/m berechnet und der Wert 94140 ermittelt. Das ist ein Bezugswert, für den simulierten 7,5 kA/m Magnetring mit 36 Magneten, der in der Mitte genau den Wert 7,50047 kA/m hat.

Für alle Magnetringsimulationen ist ein Messraster mit 15 x 15 Punkten in der Mitte des Simulationsring maßstabsgetreu mit der Messschablone erstellt worden. Mit Hilfe des

Messrasters werden die Daten aus der Simulation in äquidistanten Abständen abgelesen und für jeden Magnetringtyp in einer Datei gespeichert.

Simulation des 4 kA/m Magnetringes mit linearer Magnetfeldkennlinie

Für H_c wird der Bezugswert 94140 A/m mit Bezug auf den 7,5 kA/m Magnetring eingegeben, siehe Abbildung: 3.13.

Die Simulation wurde gestartet. Das Messraster in FEMM wird auf 6.0714 mm aufgeteilt. Punkt für Punkt werden die Messpunkte aus dem Messraster einzeln abgelesen und in eine Tabelle eingetragen, siehe Tabelle: 3.1

Die abgelesene Daten werden danach in Octave geplottet, Abb. 3.14.

Im Plot sind drei Abbildungen zu sehen, die erste Abbildung zeigt die Verteilung des Feldes flächig. Die zweite von Rechts, zeigt die Verteilung im Raum. Die dritte Abbildung unten zeigt den Verlauf der Feldstärke Mittig, im Durchschnitt. Diese Linie ist auf dem Plot 1 Senkrecht zu sehen.

Tabelle 3.1: Daten aus der Simulation des Magnetringes 4 kA/m mit linearer Magnetkennlinie

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	4.41745	4.62185	4.64211	4.62572	4.62764	4.6284	4.62721	4.62651	4.62565	4.62688	4.62644	4.62333	4.63655	4.63597	4.47084
2	4.6332	4.62001	4.62831	4.62799	4.62739	4.62731	4.62698	4.62654	4.62626	4.62626	4.62614	4.62639	4.62616	4.61851	4.62494
3	4.64165	4.62936	4.62749	4.62733	4.62714	4.62695	4.62669	4.6265	4.62625	4.62612	4.62606	4.62607	4.62551	4.62585	4.63929
4	4.62448	4.62702	4.62701	4.62683	4.62674	4.62663	4.62651	4.62629	4.62615	4.62601	4.62586	4.6257	4.62565	4.62569	4.62167
5	4.6236	4.62571	4.62613	4.62635	4.62638	4.62636	4.62628	4.62616	4.62605	4.62587	4.62568	4.62546	4.62511	4.62473	4.62386
6	4.62453	4.6252	4.62562	4.62592	4.62611	4.62614	4.62612	4.62604	4.62592	4.62575	4.62557	4.62526	4.62477	4.62433	4.62345
7	4.62428	4.62497	4.62531	4.6257	4.62591	4.62598	4.62601	4.62596	4.62586	4.62566	4.6255	4.62516	4.62464	4.6242	4.62287
8	4.62428	4.62483	4.62518	4.62558	4.62582	4.62591	4.62601	4.62592	4.62583	4.62569	4.62569	4.62518	4.62471	4.62433	4.62381
9	4.6238	4.62485	4.62519	4.62558	4.62581	4.6259	4.62597	4.62596	4.62589	4.62589	4.62559	4.62528	4.6249	4.62462	4.62409
10	4.62486	4.62506	4.62539	4.62567	4.62586	4.62598	4.62606	4.62606	4.626	4.62586	4.62571	4.62548	4.62515	4.62484	4.6251
11	4.62515	4.6254	4.62563	4.62586	4.62604	4.62612	4.62619	4.6262	4.62616	4.62608	4.62592	4.62574	4.62542	4.62504	4.62399
12	4.62531	4.62618	4.62602	4.62606	4.62622	4.62632	4.62637	4.62639	4.62638	4.62631	4.6262	4.62604	4.62597	4.6258	4.62232
13	4.64018	4.62742	4.62575	4.62634	4.62652	4.62657	4.62659	4.62662	4.62666	4.62661	4.62653	4.62643	4.62595	4.62675	4.63595
14	4.61905	4.61694	4.62615	4.62681	4.62684	4.6269	4.62674	4.62681	4.627	4.62702	4.62676	4.62691	4.62621	4.61961	4.62972
15	4.44214	4.62364	4.63422	4.62503	4.62793	4.62767	4.62617	4.62681	4.62742	4.62812	4.627	4.62444	4.63514	4.61009	4.4707

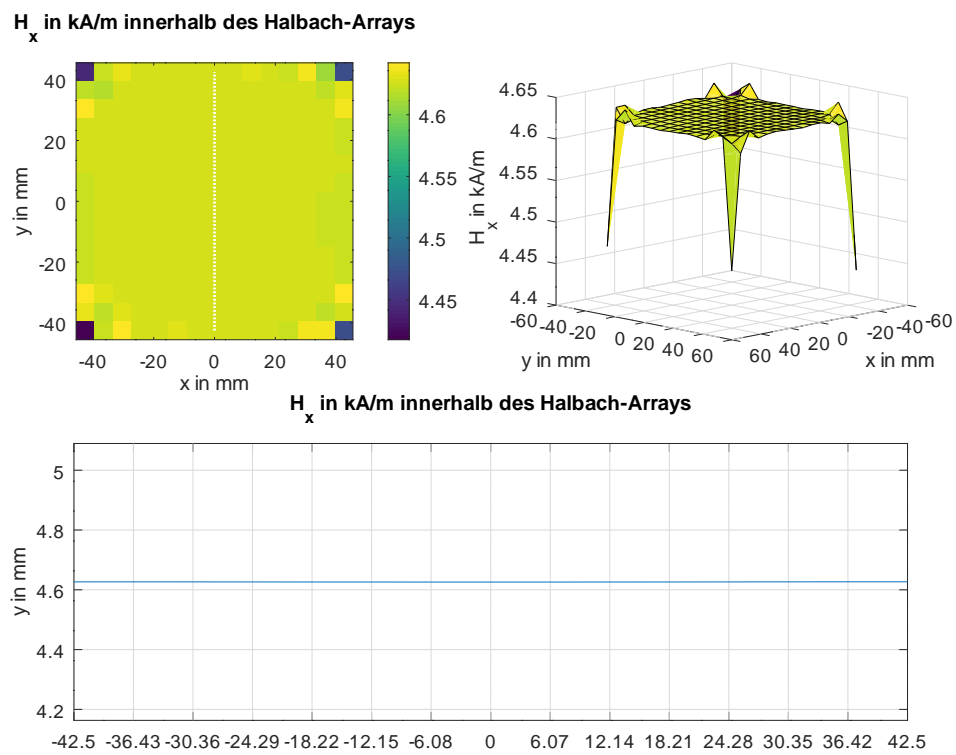


Abbildung 3.14: In Octave geplottete Daten des 4 kA/m Magnetrings, simuliert mit linearer Magnetfeldlinie

Simulation des 6 kA/m Magnetringes mit linearer Magnetfeldkennlinie

Für H_c wird der Bezugswert 94140 A/m mit Bezug auf den 7,5 kA/m Magnetring eingegeben, siehe Abbildung: 3.13.

Die Simulation wurde gestartet. Das Messraster in FEMM wird auf 6.0714 mm eingestellt, siehe Formel 3.3. Wie in der Messung wurde eine Messschablone von 85 mm x 85 mm, so auch in der Simulation wurde eine gezeichnet. Alle Messpunkte werden aus dem Messraster der Simulation einzeln abgelesen und in eine Tabelle eingetragen, Tabelle 3.2

Die abgelesene Daten werden danach in Octave geplottet, Abb. 3.15.

$$Gittergrösse = \frac{85mm}{15 - 1} = 6,0714mm \quad (3.3)$$

Tabelle 3.2: Daten aus der Simulation des Magnetringes 6 kA/m mit linearer Magnetkennlinie

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	6.99261	6.99423	6.99444	6.99291	6.99205	6.99171	6.99166	6.99163	6.9916	6.99161	6.99174	6.99205	6.99377	6.98781	6.99257
2	6.99687	6.99229	6.99296	6.99247	6.99201	6.99176	6.99166	6.99162	6.99162	6.99167	6.99185	6.9922	6.99244	6.99277	6.99951
3	6.99189	6.99201	6.99203	6.99196	6.99181	6.99168	6.99158	6.99158	6.9916	6.99166	6.9918	6.99202	6.99241	6.99319	6.99435
4	6.99108	6.99124	6.99143	6.99152	6.99154	6.99153	6.99151	6.99151	6.99152	6.99156	6.99164	6.99177	6.99198	6.99229	6.99256
5	6.9901	6.99056	6.99094	6.99117	6.9913	6.99136	6.9914	6.99141	6.99142	6.99143	6.99144	6.99144	6.99143	6.99133	6.99112
6	6.98946	6.99007	6.99058	6.99091	6.99111	6.99123	6.9913	6.99133	6.99132	6.9913	6.99123	6.99112	6.99092	6.99057	6.98998
7	6.98911	6.98982	6.99039	6.99077	6.99101	6.99116	6.99124	6.99126	6.99125	6.99119	6.99108	6.99088	6.99056	6.99006	6.98943
8	6.98924	6.98984	6.99039	6.99076	6.991	6.99114	6.99122	6.99124	6.99122	6.99114	6.991	6.99076	6.99038	6.9898	6.98918
9	6.98948	6.99009	6.99058	6.99089	6.99108	6.9912	6.99125	6.99127	6.99124	6.99116	6.99102	6.99077	6.99038	6.98979	6.98903
10	6.98999	6.99058	6.99093	6.99113	6.99124	6.9913	6.99133	6.99133	6.9913	6.99124	6.99113	6.99093	6.99059	6.99007	6.98942
11	6.99111	6.99133	6.99143	6.99145	6.99145	6.99144	6.99142	6.99141	6.9914	6.99138	6.99133	6.99121	6.99099	6.99062	6.99015
12	6.99254	6.99228	6.99198	6.99178	6.99166	6.99157	6.99152	6.9915	6.9915	6.99154	6.99133	6.99159	6.99152	6.99136	6.99123
13	6.99432	6.99317	6.99241	6.99204	6.99183	6.99168	6.99159	6.99154	6.99157	6.99169	6.99188	6.99207	6.99216	6.99217	6.99208
14	6.99875	6.9934	6.99243	6.99224	6.99192	6.99175	6.99161	6.9915	6.99152	6.99173	6.99213	6.99315	6.99315	6.99244	6.99706
15	6.9925	6.98798	6.99432	6.9921	6.9919	6.99179	6.99164	6.99136	6.9913	6.99162	6.9923	6.99322	6.9946	6.99434	6.99272

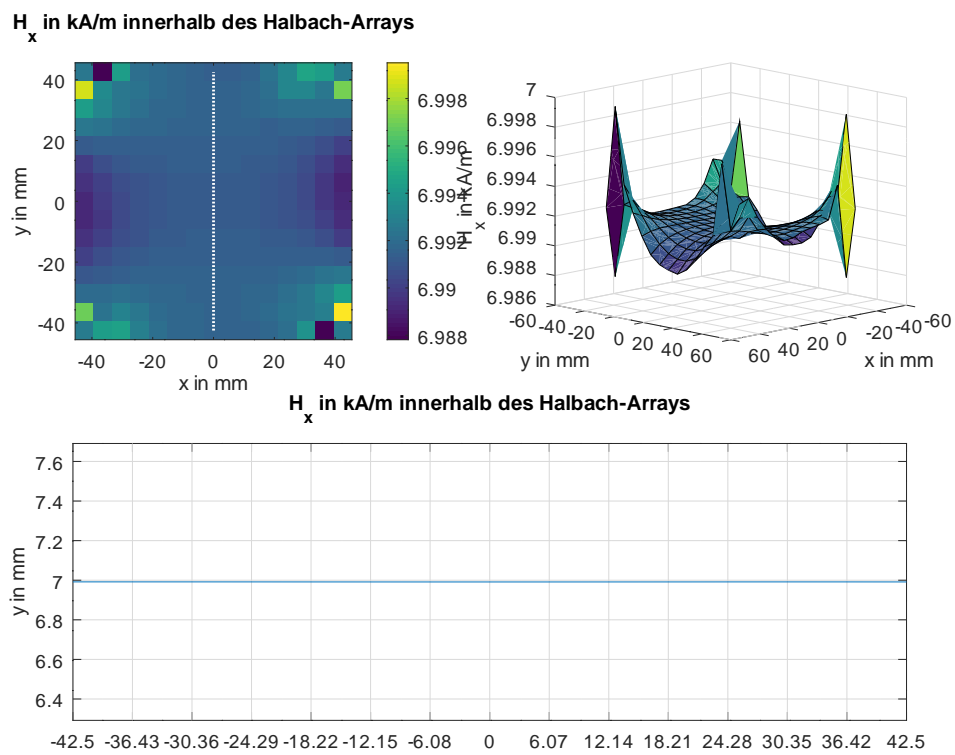


Abbildung 3.15: In Octave geplottete Daten des 6 kA/m Magnetrings, simuliert mit linearer Magnetfeldlinie

Simulation des 10 kA/m Magnetringes mit linearer Magnetfeldkennlinie

Für H_c wird der Verhältniswert 99317,7 A/m mit Bezug auf den 7,5 kA/m Magnetring eingegeben. Bei dem 10 kA/m Magnetring sind N52 W12 Würfelmagnete verbaut. Um eine Relation zwischen N42 und N52 Magnete herzustellen, wird der Quotient zwischen zwei Messpunkte bei 0 mm einbezogen. Für die N52 Magnete ist es der Wert 422 kA/m, für die N42 Magnete ist es 420 kA/m. Die Koerzitivfeldstärke für die N52 Magnete berechnet sich wie folgt:

$$H_c = 94140 \cdot \frac{422}{400} = 99317,7 \text{ A/m} \quad (3.4)$$

Die Simulation wurde gestartet. Das Messraster in FEMM wird auf 6.0714 mm eingestellt, siehe Formel 3.3. Alle Messpunkte aus dem Messraster der Simulation werden einzeln abgelesen und in eine Tabelle eingetragen, Tabelle 3.3.

Die abgelesene Daten werden danach in Octave geplottet, Abb. 3.16.

Tabelle 3.3: Daten aus der Simulation des Magnetringes 10 kA/m mit linearer Magnetkennlinie

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	9.73711	9.7322	9.73178	9.73024	9.72916	9.72817	9.72771	9.72755	9.72787	9.72851	9.72934	9.73071	9.73278	9.73501	9.74044
2	9.73316	9.73197	9.73088	9.73011	9.72909	9.72858	9.72822	9.72816	9.72836	9.72883	9.72955	9.73057	9.73188	9.73366	9.73515
3	9.73145	9.73055	9.73015	9.72952	9.72899	9.72868	9.72846	9.72841	9.72894	9.72894	9.72931	9.73003	9.73097	9.73159	9.73223
4	9.72922	9.72925	9.72916	9.72899	9.72882	9.72859	9.72852	9.72851	9.72861	9.7288	9.72908	9.7294	9.72969	9.72979	9.72944
5	9.72735	9.72816	9.72834	9.7285	9.7285	9.72849	9.72846	9.72847	9.72854	9.72861	9.72871	9.72878	9.72868	9.72848	9.7277
6	9.72637	9.72727	9.72773	9.72806	9.72829	9.72835	9.72839	9.72842	9.72844	9.72843	9.7284	9.72826	9.72787	9.72745	9.72644
7	9.72554	9.72678	9.72731	9.72785	9.72813	9.72824	9.72833	9.72836	9.72835	9.72828	9.72818	9.72791	9.72733	9.72679	9.72557
8	9.72535	9.72662	9.72718	9.72778	9.72809	9.72822	9.7283	9.72832	9.72829	9.72821	9.72808	9.72775	9.72712	9.72652	9.72504
9	9.72567	9.72683	9.72683	9.72789	9.72817	9.72826	9.72833	9.72834	9.72831	9.72821	9.7281	9.7278	9.72722	9.72666	9.72534
10	9.72622	9.7274	9.72788	9.72819	9.72834	9.72839	9.7284	9.72838	9.72836	9.7283	9.72821	9.72807	9.72759	9.72717	9.72609
11	9.72767	9.72837	9.72855	9.7287	9.72862	9.72856	9.72848	9.72842	9.72841	9.72843	9.72844	9.72843	9.72825	9.72802	9.72722
12	9.72958	9.72965	9.7295	9.72926	9.72897	9.72871	9.72853	9.72844	9.72845	9.72856	9.72873	9.72892	9.72907	9.72913	9.72909
13	9.73165	9.73112	9.73067	9.72986	9.72927	9.72878	9.72845	9.72832	9.72835	9.7286	9.72899	9.72945	9.73006	9.73042	9.73129
14	9.73372	9.73295	9.73157	9.7304	9.72955	9.72864	9.72826	9.72806	9.72815	9.72844	9.72914	9.73008	9.73081	9.73181	9.73298
15	9.74109	9.73457	9.73248	9.7307	9.72938	9.72851	9.7277	9.72738	9.7276	9.72819	9.72913	9.7304	9.73194	9.7321	9.73666

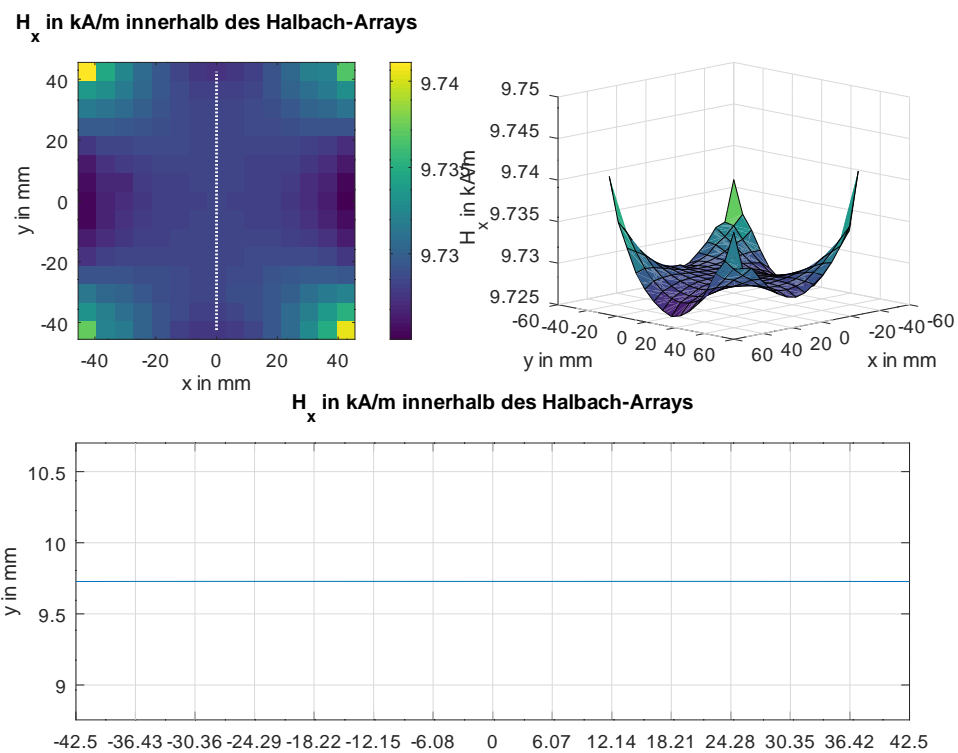


Abbildung 3.16: In Octave geplottete Daten des 10 kA/m Magnetrings, simuliert mit linearer Magnetfeldlinie

Simulation des 15 kA/m Magnetrings mit linearer Magnetfeldkennlinie

Für H_c wird der Verhältnswert 376560 A/m mit Bezug auf den 7,5 kA/m Magnetring eingegeben. Bei dem 15 kA/m Magnetring sind N42 10 mm x 10 mm x 40 mm Stabmagnete verbaut. Das sind 4 mal stärkere Magnete als im 7,5 kA/m Magnetring verbaut. Aus diesem Grund wird der H_c Wert mit dem Faktor 4 multipliziert:

$$H_c = 94140 \cdot 4 = 376560 \text{ A/m} \quad (3.5)$$

Die Simulation wurde gestartet. Das Messraster in FEMM wird auf 6.0714 mm aufgeteilt, siehe Formel: 3.3. Punkt für Punkt werden die Messpunkte aus dem Messraster der Simulation einzeln abgelesen und in eine Tabelle eingetragen, Tabelle 3.3

Die abgelesenen Daten werden danach in Octave geplottet, Abb. 3.16.

Tabelle 3.4: Daten aus der Simulation des Magnetrings 15 kA/m mit linearer Magnetkennlinie

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	17.6698	18.4874	18.5684	18.5029	18.5105	18.5136	18.5089	18.506	18.5026	18.5075	18.5058	18.4933	18.5462	18.5439	17.8834
2	18.5328	18.480	18.5132	18.5119	18.5086	18.5092	18.5079	18.5062	18.5051	18.505	18.5046	18.5056	18.5047	18.474	18.4998
3	18.5666	18.5174	18.5099	18.5093	18.5086	18.5078	18.5068	18.506	18.505	18.5045	18.5043	18.5043	18.502	18.5034	18.5572
4	18.4979	18.5081	18.508	18.5073	18.507	18.5065	18.506	18.5052	18.5046	18.504	18.5034	18.5028	18.5026	18.5028	18.4867
5	18.4944	18.5029	18.5045	18.5054	18.5055	18.5054	18.5051	18.5046	18.5042	18.5035	18.5027	18.5018	18.5005	18.4989	18.4954
6	18.4981	18.5008	18.5025	18.5037	18.5045	18.5045	18.5045	18.5042	18.5037	18.503	18.5023	18.501	18.4991	18.4973	18.4938
7	18.4971	18.4999	18.5012	18.5028	18.5037	18.5039	18.504	18.5038	18.5034	18.5027	18.502	18.5006	18.4986	18.4968	18.4915
8	18.4971	18.4993	18.5007	18.5023	18.5033	18.5036	18.5038	18.5037	18.5033	18.5027	18.502	18.5007	18.4988	18.4973	18.4952
9	18.4952	18.4994	18.5008	18.5023	18.5032	18.5036	18.5039	18.5039	18.5036	18.5029	18.5023	18.5011	18.4996	18.4985	18.4963
10	18.4994	18.5002	18.5016	18.5027	18.5035	18.5039	18.5042	18.5042	18.504	18.5035	18.5028	18.5019	18.5006	18.4993	18.5004
11	18.5006	18.5016	18.5025	18.5034	18.5042	18.5045	18.5047	18.5048	18.5046	18.5043	18.5037	18.503	18.5017	18.5002	18.496
12	18.5012	18.5047	18.5041	18.5043	18.5049	18.5053	18.5055	18.5056	18.5055	18.5053	18.5048	18.5042	18.5039	18.5032	18.4893
13	18.5607	18.5097	18.503	18.5054	18.5061	18.5063	18.5064	18.5065	18.5067	18.5065	18.5061	18.5057	18.5038	18.507	18.5438
14	18.4762	18.4677	18.5046	18.5072	18.5074	18.5076	18.507	18.5072	18.5081	18.5081	18.507	18.5076	18.5049	18.4785	18.5189
15	17.7686	18.4946	18.5369	18.5001	18.5117	18.5107	18.5047	18.5084	18.5097	18.5125	18.508	18.4977	18.5406	18.4404	17.8828

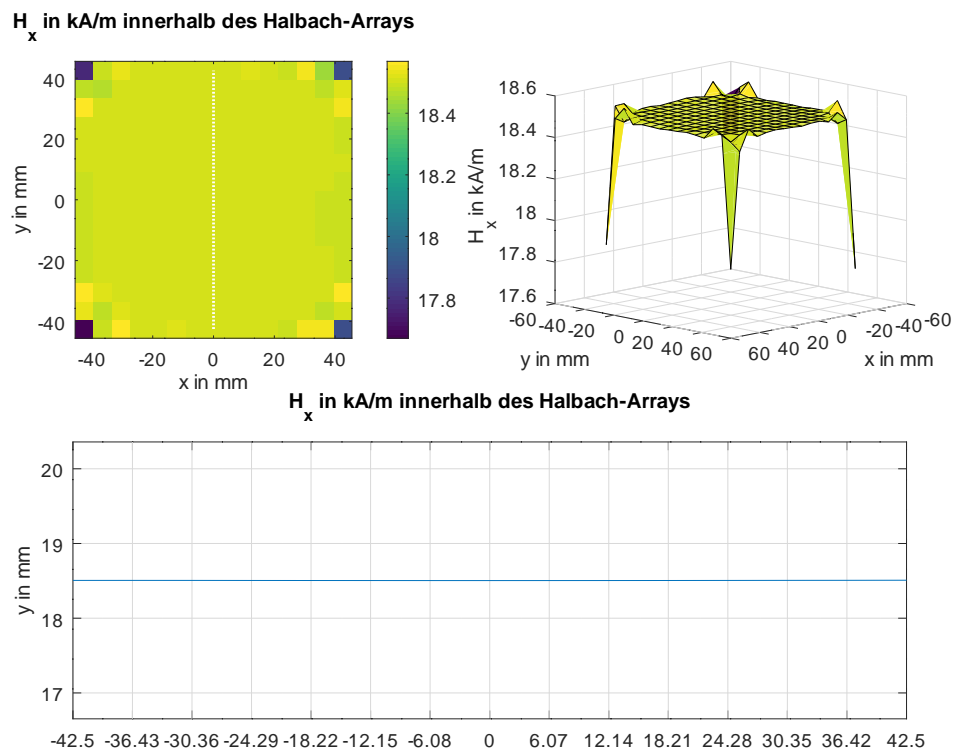


Abbildung 3.17: In Octave geplottete Daten des 15 kA/m Magnetrings, simuliert mit linearer Magnetfeldlinie

3.3.2 Verwendung einer nichtlinearen B-H Kennlinie

Die Koerzitivfeldstärke H_c wurde bei dem Ring mit 7,5 kA/m berechnet und der Wert für die nichtlineare Kennlinie lautet: 37975 A/m. In der Mitte des Rings wird der Wert von $H = 7,50047$ kA/m angestrebt.

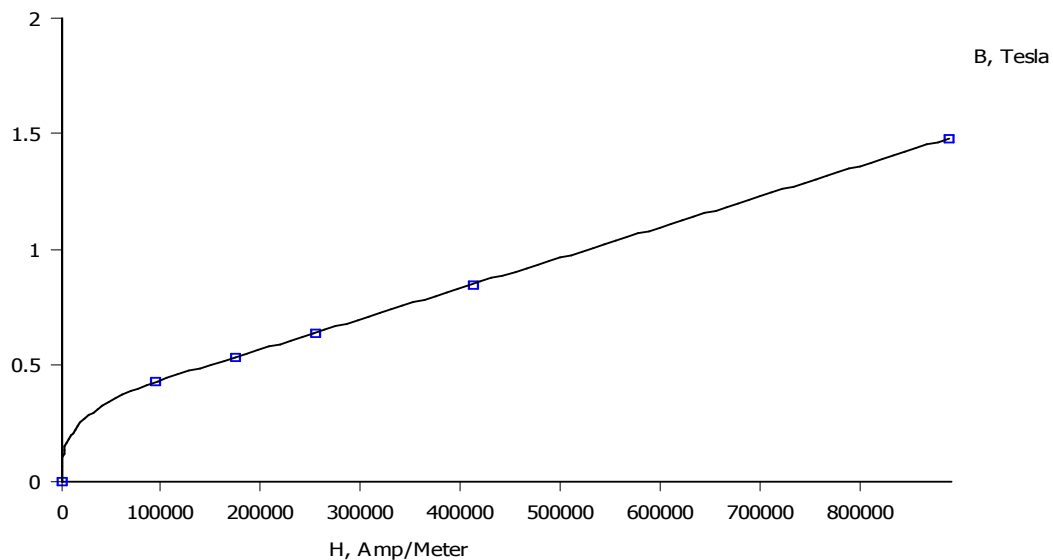


Abbildung 3.18: B-H Diagramm mit nichtlinearer Kennlinie, geplottet in FEMM

Simulation des 4 kA/m Magnetringes bei nichtlinearer Magnetfeldkennlinie

Für H_c wird der Verhältniswert 37975 A/m mit Bezug auf den 7,5 kA/m Magnetring eingegeben.

Die Simulation mit nichtlinearer B-H Magnetkennlinie wurde gestartet. Das Messraster in FEMM wird auf 6.0714 mm eingestellt, siehe Formel: 3.3. Punkt für Punkt werden die Messpunkte aus dem Messraster der Simulation einzeln abgelesen und in eine Tabelle eingetragen, Tabelle 3.5

Die abgelesenen Daten werden danach in Octave geplottet, Abb. 3.20.

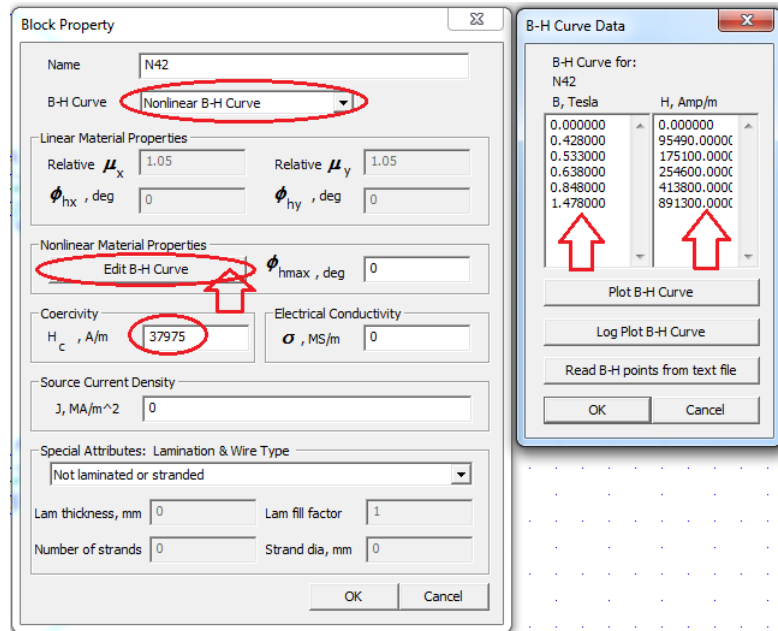


Abbildung 3.19: Simulation mit nichtlinearer Kennlinie

Tabelle 3.5: Daten aus der Simulation des Magnetrings 4 kA/m mit nichtlinearer Magnetkennlinie

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	3.77898	3.94264	3.95426	3.93476	3.9304	3.9276	3.92407	3.92233	3.92292	3.92575	3.92892	3.93227	3.94754	3.95146	3.82211
2	3.96909	3.94706	3.94685	3.94253	3.93684	3.93303	3.93119	3.93004	3.93039	3.93191	3.93576	3.939	3.94553	3.94501	3.95924
3	3.97541	3.95836	3.95148	3.94572	3.94137	3.93832	3.936	3.93535	3.93558	3.93736	3.94003	3.9441	3.94933	3.95409	3.97394
4	3.96113	3.95885	3.95372	3.94903	3.9453	3.94247	3.9408	3.93984	3.94031	3.94166	3.94429	3.94778	3.95233	3.9577	3.95912
5	3.96372	3.95927	3.95608	3.95131	3.94762	3.94548	3.94394	3.94331	3.94349	3.94491	3.94723	3.95039	3.95513	3.95842	3.96478
6	3.9665	3.96051	3.95686	3.95345	3.94943	3.94756	3.94604	3.94551	3.94583	3.94717	3.94897	3.95229	3.95667	3.95978	3.9656
7	3.96661	3.96134	3.95817	3.95391	3.95057	3.94895	3.94726	3.94674	3.94712	3.94866	3.94866	3.95344	3.9577	3.96073	3.96551
8	3.9673	3.9616	3.95847	3.9542	3.9509	3.94914	3.9478	3.9473	3.94771	3.94898	3.9507	3.95389	3.95815	3.96122	3.96704
9	3.96672	3.96129	3.9581	3.95378	3.95044	3.9489	3.94721	3.94674	3.94717	3.94877	3.95037	3.95364	3.95793	3.96116	3.96689
10	3.96698	3.9605	3.95661	3.95273	3.94963	3.9475	3.94579	3.94539	3.94581	3.94755	3.94963	3.95268	3.95658	3.96039	3.96732
11	3.96587	3.959	3.95561	3.95071	3.94705	3.94532	3.94365	3.94319	3.94371	3.94514	3.94764	3.95088	3.95562	3.95877	3.96485
12	3.96173	3.95804	3.95259	3.94804	3.94453	3.94196	3.94043	3.93996	3.94057	3.94221	3.94488	3.94845	3.95298	3.958	3.95978
13	3.97426	3.95637	3.94941	3.94428	3.94031	3.93762	3.93577	3.93528	3.93629	3.93817	3.94046	3.945	3.95039	3.95567	3.97114
14	3.95519	3.94309	3.94459	3.93996	3.93575	3.93264	3.93069	3.93018	3.93111	3.93324	3.93645	3.94097	3.94584	3.94719	3.96466
15	3.79791	3.94129	3.94577	3.93344	3.92956	3.92568	3.92315	3.9232	3.92368	3.92714	3.92988	3.93375	3.94845	3.93228	3.82492

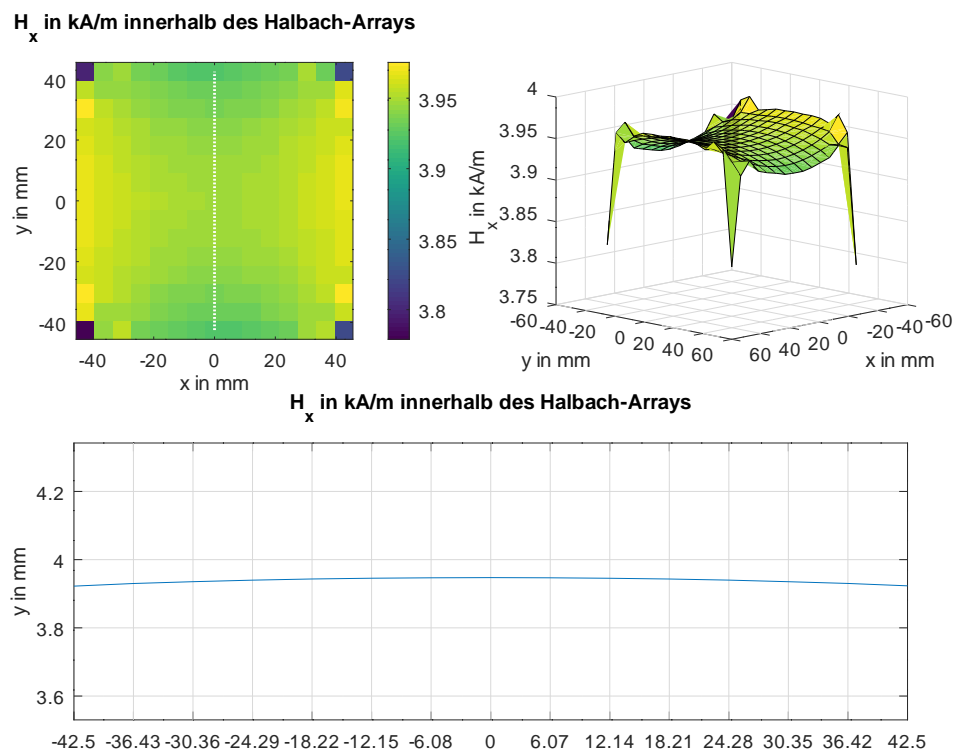


Abbildung 3.20: In Octave geplottete Daten des 4 kA/m Magnetrings, simuliert mit nichtlinearer Magnetfeldlinie

Simulation des 6 kA/m Magnetringes bei nichtlinearer Magnetfeldkennlinie

Für H_c wird der Verhältniswert 37975 A/m mit Bezug auf den 7,5 kA/m Magnetring eingegeben.

Die Simulation mit nichtlinearer B-H Magnetkennlinie wurde gestartet. Das Messraster in FEMM wird auf 6.0714 mm aufgeteilt, siehe Formel: 3.3. Punkt für Punkt werden die Messpunkte aus dem Messraster der Simulation einzeln abgelesen und in eine Tabelle eingetragen, Tabelle 3.6

Die abgelesenen Daten werden danach in Octave geplottet, Abb. 3.21.

Tabelle 3.6: Daten aus der Simulation des Magnetrings 6 kA/m mit nichtlinearer Magnetkennlinie

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	6.55513	6.52811	6.50959	6.48249	6.46233	6.44612	6.43684	6.43281	6.43628	6.44705	6.46098	6.47932	6.50635	6.52639	6.55228
2	6.51912	6.50716	6.4908	6.47917	6.46363	6.45284	6.44573	6.4435	6.44647	6.45176	6.46326	6.47687	6.49139	6.50483	6.51897
3	6.48359	6.48321	6.47813	6.47062	6.46276	6.45613	6.45174	6.4502	6.45171	6.45605	6.46264	6.47051	6.47825	6.48395	6.48564
4	6.46159	6.46664	6.46665	6.46398	6.46022	6.45665	6.45414	6.45324	6.45413	6.45663	6.46023	6.46409	6.46708	6.46653	6.46337
5	6.44841	6.45441	6.45778	6.45834	6.45742	6.45601	6.45485	6.45442	6.45485	6.45602	6.45748	6.45852	6.45818	6.45606	6.44844
6	6.43865	6.44639	6.45159	6.45415	6.45503	6.45503	6.45477	6.45464	6.45477	6.45504	6.45508	6.45429	6.4519	6.44691	6.4404
7	6.4346	6.44192	6.448	6.45161	6.45347	6.45426	6.4545	6.45454	6.45449	6.45424	6.45346	6.45163	6.44808	6.44234	6.43339
8	6.43177	6.44083	6.44689	6.4508	6.45296	6.45398	6.45438	6.45446	6.45435	6.45392	6.45287	6.45068	6.44673	6.44062	6.4315
9	6.43359	6.44251	6.44822	6.45174	6.45354	6.45429	6.45451	6.45453	6.45446	6.45419	6.45337	6.45147	6.44782	6.44169	6.4343
10	6.44053	6.44704	6.45201	6.45438	6.45514	6.45508	6.45479	6.45463	6.45473	6.45495	6.45492	6.45401	6.45141	6.44616	6.43836
11	6.44853	6.45614	6.45826	6.45859	6.45753	6.45605	6.45486	6.4544	6.4548	6.45592	6.4573	6.45819	6.4576	6.45421	6.44819
12	6.46343	6.4666	6.46715	6.46415	6.46028	6.45665	6.45414	6.45323	6.45409	6.45655	6.4601	6.46382	6.46647	6.46646	6.46142
13	6.48568	6.484	6.47832	6.47057	6.46268	6.45607	6.45172	6.45019	6.45169	6.45602	6.46262	6.47044	6.47793	6.48304	6.48347
14	6.51746	6.50711	6.49146	6.47694	6.46334	6.45261	6.44587	6.44348	6.44575	6.4527	6.46331	6.47724	6.49199	6.507	6.51919
15	6.5523	6.52583	6.50644	6.47943	6.46116	6.4467	6.43679	6.43271	6.43634	6.44667	6.45969	6.48225	6.5279	6.5279	6.5553

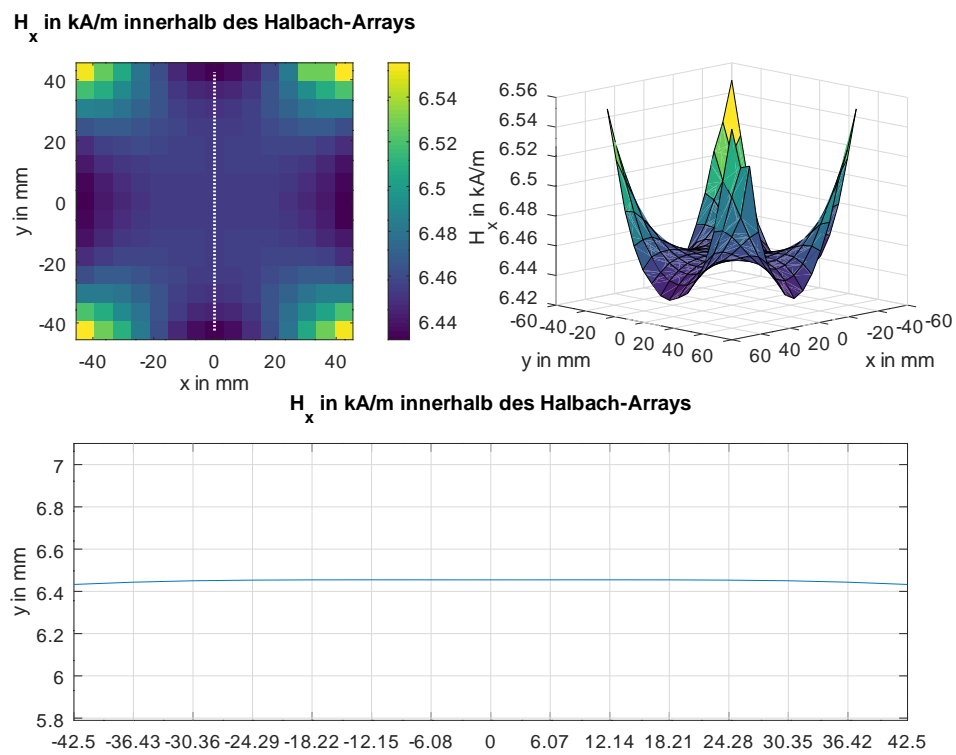


Abbildung 3.21: In Octave geplottete Daten des 6 kA/m Magnetrings, simuliert mit nichtlinearer Magnetfeldlinie

Simulation des 10 kA/m Magnetringes bei nichtlinearer Magnetfeldkennlinie

Bei dem 10 kA/m Ring sind N52 Magnete eingebaut mit einer größeren Feldstärke. Um eine Relation zwischen N42 und N52 Magnete herzustellen, wird der Quotient zwischen zwei Messpunkte bei 0 mm einbezogen. Für die N52 Magnete ist es der Wert : 422 kA/m, für die N42 Magnete ist es 420 kA/m. Die Koerzitivfeldstärke für die N52 Magnete berechnet sich wie folgt:

$$H_c = 37975 \cdot \frac{422}{400} = 40063,625 A/m \quad (3.6)$$

Für H_c wird der Bezugswert 40063,625 A/m mit Bezug auf den 7,5 kA/m Magnetring eingegeben.

Die Simulation mit nichtlinearer B-H Magnetkennlinie wurde gestartet. Das Messraster in FEMM wird auf 6.0714 mm aufgeteilt, siehe Formel: 3.3. Alle Messpunkte werden aus dem Messraster der Simulation einzeln abgelesen und in eine Tabelle eingetragen, Tabelle 3.7

Die abgelesenen Daten werden danach in Octave geplottet, Abb. 3.22.

Tabelle 3.7: Daten aus der Simulation des Magnetringes 10 kA/m mit nichtlinearer Magnetkennlinie

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	10.1163	10.096	10.0631	10.017	9.98831	9.9604	9.9438	9.93676	9.94268	9.96047	9.98461	10.0231	10.0689	10.096	10.1273
2	9.99779	10.0033	9.99552	9.98404	9.96167	9.94928	9.93944	9.93608	9.93954	9.94934	9.96423	9.98273	9.99734	10.009	9.99653
3	9.90691	9.93248	9.94212	9.94321	9.939	9.93414	9.93019	9.92827	9.92953	9.93463	9.93966	9.94461	9.94494	9.93871	9.90797
4	9.84523	9.87212	9.89515	9.90825	9.91385	9.91605	9.91673	9.91681	9.91698	9.91686	9.91516	9.90992	9.89779	9.87426	9.83606
5	9.78126	9.83693	9.8574	9.88176	9.89437	9.89994	9.90414	9.90497	9.9038	9.90185	9.89434	9.88331	9.85984	9.83878	9.78882
6	9.75959	9.8077	9.83592	9.85881	9.88012	9.88794	9.89382	9.89547	9.89407	9.88845	9.88046	9.86328	9.83459	9.81044	9.76077
7	9.74008	9.79255	9.81899	9.85021	9.87049	9.87919	9.88741	9.88962	9.88759	9.8796	9.87086	9.85108	9.81965	9.79407	9.74429
8	9.73585	9.78778	9.81424	9.84642	9.86741	9.87736	9.88447	9.88686	9.88457	9.87756	9.86751	9.84686	9.8148	9.78838	9.73219
9	9.74415	9.79329	9.81966	9.85038	9.87084	9.87904	9.88747	9.88959	9.88749	9.87932	9.87057	9.85062	9.81956	9.79323	9.73956
10	9.75361	9.80947	9.83781	9.86175	9.87807	9.8877	9.89445	9.89585	9.8944	9.88734	9.87781	9.86513	9.833	9.8089	9.7566
11	9.78762	9.83866	9.85865	9.88363	9.89497	9.90077	9.90364	9.90504	9.90398	9.90097	9.89358	9.88209	9.85786	9.83615	9.78185
12	9.84398	9.87575	9.8972	9.90949	9.91485	9.91663	9.91681	9.91671	9.91671	9.91638	9.91433	9.90851	9.89549	9.87252	9.8457
13	9.90292	9.9357	9.94428	9.94426	9.94028	9.93366	9.92959	9.92809	9.92929	9.93352	9.93993	9.94346	9.94237	9.93272	9.9072
14	9.9986	10.007	9.99682	9.9826	9.96619	9.94711	9.93929	9.93582	9.93929	9.94711	9.96369	9.98454	9.99569	10.0032	9.99806
15	10.1208	10.1031	10.0621	10.0254	9.98638	9.96212	9.94144	9.93572	9.94307	9.96075	9.98719	10.0212	10.0684	10.0881	10.1152

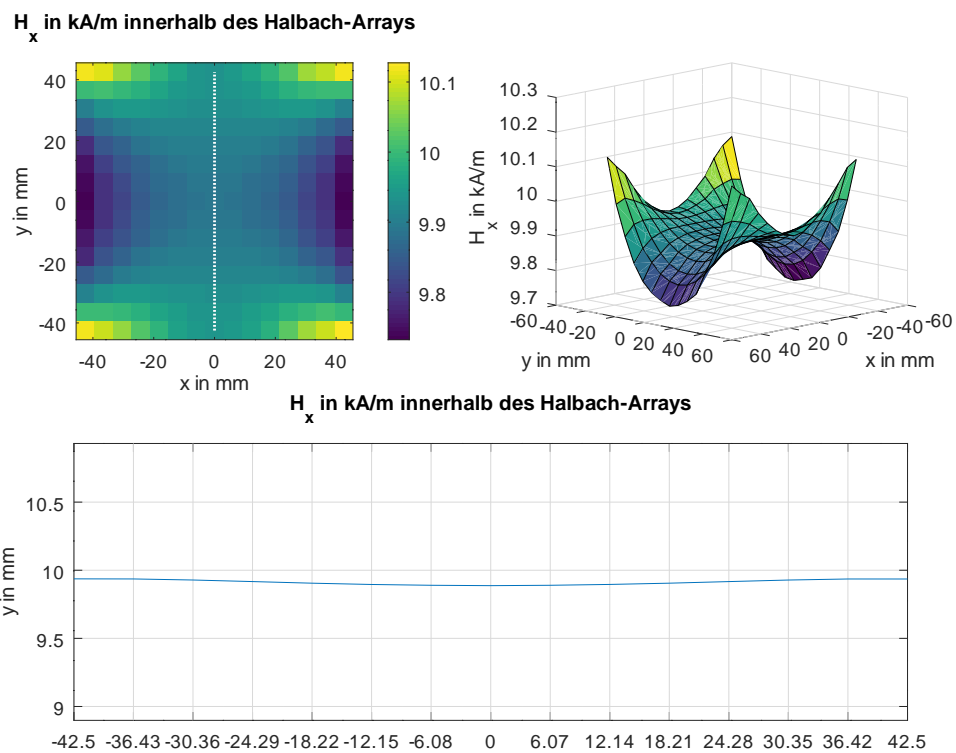


Abbildung 3.22: In Octave geplottete Daten des 10 kA/m Magnetrings, simuliert mit nichtlinearer Magnetfeldlinie

Simulation des 15 kA/m Magnetringes mit nichtlinearer Magnetfeldkennlinie

Für den H_c wird der Verhältniswert 151900 A/m mit Bezug auf den 7,5 kA/m Magnetring eingegeben. Bei dem 15 kA/m Magnetring sind N42 10 mm x 10 mm x 40 mm Stabmagnete verbaut. Das sind 4 mal stärkere Magnete als im 7,5 kA/m Magnetring verbaut. Aus diesem Grund wird der H_c Wert mit dem Faktor 4 multipliziert:

$$H_c = 37975 \cdot 4 = 151900 \text{ A/m} \quad (3.7)$$

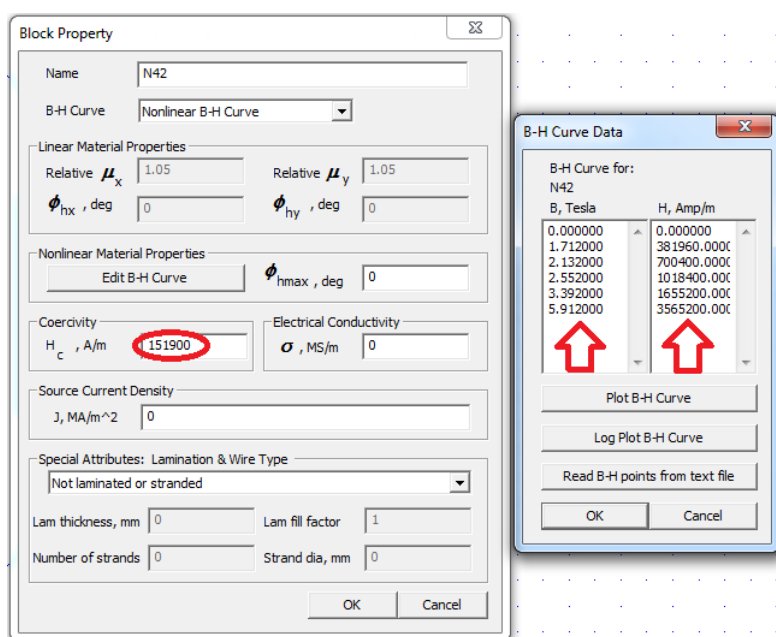


Abbildung 3.23: Vervierfachen der Simulationswerte für den 15kA/m Magnetring

Bei der nichtlinearen Magnetfeldkennlinie werden auch die Werte der Kennlinie mit dem Skalar 4 multipliziert.

Die Simulation mit nichtlinearer B-H Magnetkennlinie wurde gestartet. Das Messraster in FEMM wird auf 6.0714 mm eingestellt, siehe Formel: 3.3. Punkt für Punkt werden die Messpunkte aus dem Messraster der Simulation einzeln abgelesen und in eine Tabelle eingetragen, Tabelle: 3.8

Die abgelesene Daten werden danach in Octave geplottet, Abb. 3.24.

Tabelle 3.8: Daten aus der Simulation des Magnetrings 15 kA/m mit nichtlinearer Magnetkennlinie

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	15.1159	15.7706	15.8171	15.7391	15.7216	15.7104	15.6963	15.6893	15.6917	15.703	15.7157	15.7291	15.7902	15.8058	15.2884
2	15.8764	15.7882	15.7874	15.7701	15.7474	15.7321	15.7248	15.7202	15.7216	15.7276	15.743	15.756	15.7821	15.780	15.837
3	15.9016	15.8334	15.8059	15.7829	15.7655	15.7533	15.744	15.7414	15.7423	15.7494	15.7601	15.7764	15.7973	15.8164	15.8958
4	15.8445	15.8354	15.8149	15.7961	15.7812	15.7699	15.7632	15.7594	15.7612	15.7666	15.7772	15.7911	15.8093	15.8308	15.8365
5	15.8549	15.8371	15.8243	15.8052	15.7905	15.7819	15.7758	15.7732	15.774	15.7796	15.7889	15.8016	15.8205	15.8337	15.8591
6	15.866	15.8421	15.8274	15.8138	15.7977	15.7902	15.7841	15.782	15.7833	15.7887	15.7959	15.8091	15.8267	15.8391	15.8624
7	15.8664	15.8453	15.8327	15.8157	15.8023	15.7958	15.789	15.787	15.7885	15.7947	15.801	15.8138	15.8308	15.8429	15.862
8	15.8692	15.8464	15.8339	15.8168	15.8036	15.7966	15.7912	15.7892	15.7908	15.7959	15.8028	15.8156	15.8326	15.8449	15.8682
9	15.8669	15.8451	15.8324	15.8151	15.8018	15.7956	15.7888	15.787	15.7887	15.7951	15.8015	15.8146	15.8317	15.8446	15.8675
10	15.8679	15.842	15.8265	15.8109	15.7985	15.790	15.7832	15.7816	15.7832	15.7902	15.7985	15.8107	15.8263	15.8446	15.8693
11	15.8635	15.836	15.8225	15.8028	15.7882	15.7813	15.7746	15.7727	15.7749	15.7902	15.7906	15.8035	15.8225	15.8351	15.8594
12	15.8469	15.8322	15.8104	15.7921	15.7781	15.7678	15.7617	15.7598	15.7623	15.7688	15.7795	15.7938	15.8119	15.832	15.8391
13	15.897	15.8255	15.7977	15.7771	15.7612	15.7505	15.7431	15.7411	15.7451	15.7527	15.7618	15.780	15.8016	15.8227	15.8846
14	15.8208	15.7724	15.7784	15.7598	15.743	15.7306	15.7227	15.7207	15.733	15.733	15.7458	15.7639	15.7834	15.7888	15.8587
15	15.1917	15.7652	15.7831	15.7338	15.7183	15.7027	15.6926	15.6928	15.6947	15.7085	15.7195	15.735	15.7938	15.7291	15.2997

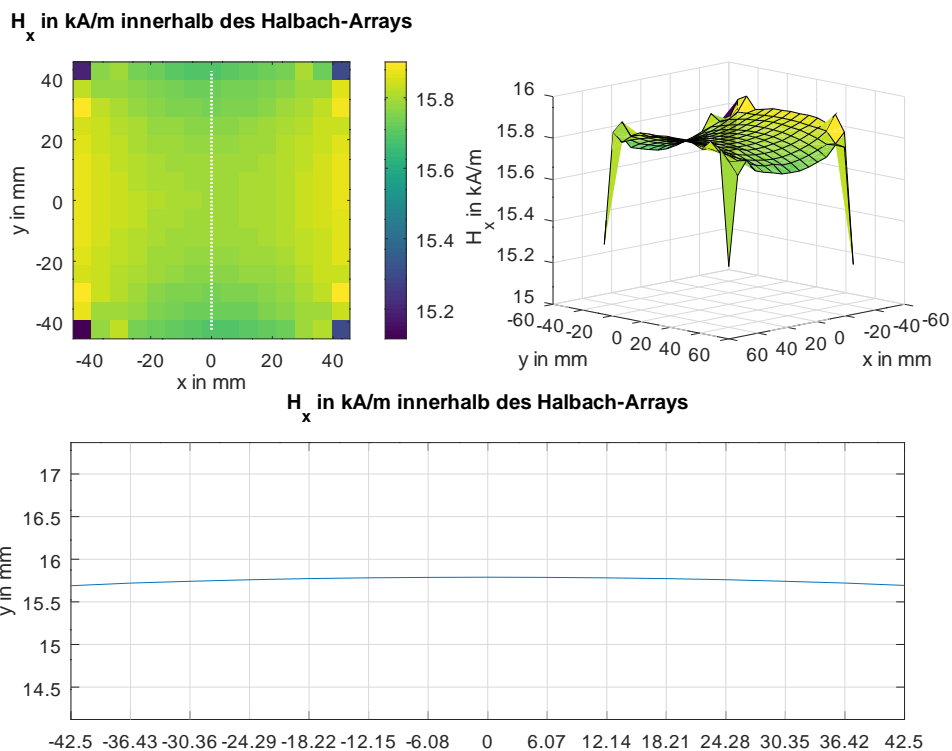


Abbildung 3.24: In Octave geplottete Daten des 15 kA/m Magnetrings, simuliert mit nichtlinearer Magnetfeldlinie

3.3.3 Konstruktion in FreeCAD

FreeCAD ist ein CAD 3D Konstruktionsprogramm, welches frei entwickelt zur Verfügung gestellt ist. In dieser Arbeit wurde FreeCAD, version 0.17 64 bit verwendet. Beim Importieren aus FEMM soll der Skalierungsfaktor überprüft werden. Wenn die Skalierung in Octave schon ausgeführt wurde und die Abmessungen 1:1 übereinstimmen, wird der Skalierungsfaktor auf 1 gesetzt, siehe Bild 3.25.

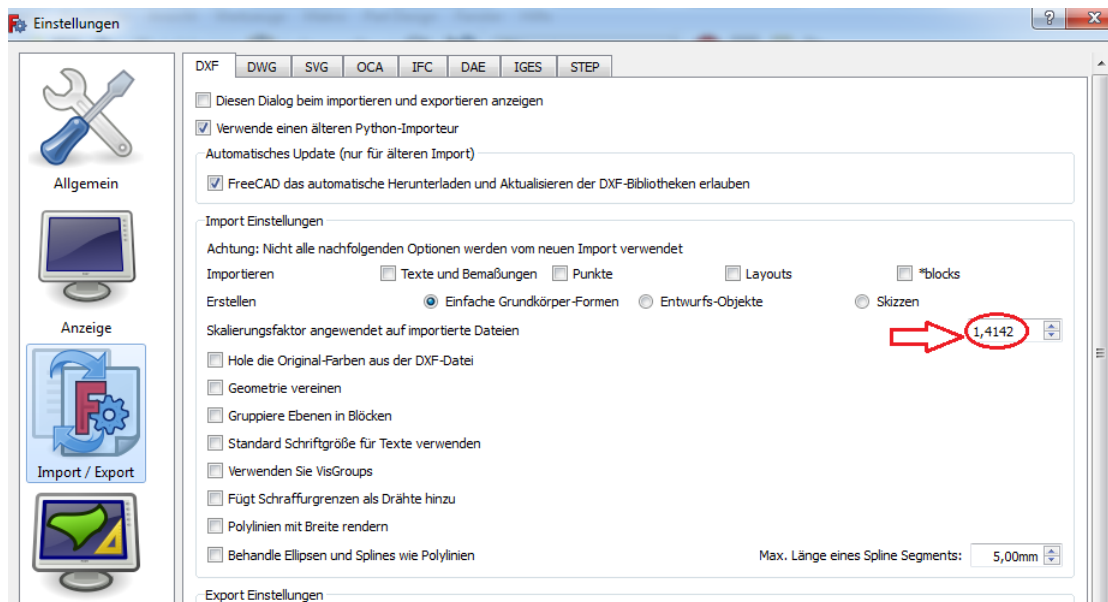


Abbildung 3.25: Einstellungen: Skalierungsfaktor in FreeCAD

Die erstellte Geometrie in Octave muss zuerst in FEMM simuliert werden. Wenn der Wert in der Ringmitte mit dem gesuchtem Feldstärkewert übereinstimmt, wird diese Geometrie in FreeCAD importiert, Abbildung 3.26 (a). Das Programm ist mit FEMM kompatibel und kann 2D Formen aus FEMM importieren, welche in 3D Formen umgewandelt werden.

Im FreeCAD Fenster werden die Formen von FEMM wie Striche, Bögen sichtbar. Alle diese Formen liegen einzeln im Raum und werden für weitere Bearbeitung in Skizzen umgewandelt, Abbildung 3.26 (b), zweitens zusammengeführt, Abbildung 3.26 (c) und drittens extrudiert (von 2D Zeichnung in 3D Körper umgewandelt) Abbildung 3.26 (d).

Der Prozess extrudieren hat aus 2D Vierecken, 3D Würfel erstellt. Alle 3D druckbare Teile wurden in FreeCAD erstellt.

Auch die technische Zeichnungen sind in FreeCAD erstellt worden.

3.4 Konstruktion und 3D-Druck von Halbach-Arrays

Konstruktion der Magnetringe in CAD Ein Kriterium für die Größe eines Magnetrings ist die Größe der Messplatte zu berücksichtigen. Da dieser Messaufbau aus 2 übereinanderliegenden Platinen besteht, wo zusätzlich ein USB Kabelanschluss passen muss, erhöht die Abmessungen zusätzlich. Bei dem Ringhalter, in dem diese beide Platinen in die Mitte passen muss mindestens ein Durchmesser von 152 mm vorhanden sein. Die obere Platine beinhaltet die Magnetsensoren und legt das Messkriterium für die Mindestgröße der Magnetringe. Die obere Platine misst auf der längsten Diagonale 143 mm. Das bedeutet, dass der kleinste Magnetring größer in der Durchmesser sein muss, damit die Messplatte in die Mitte des Rings passt. Diese Abmessungen der Messplatten wurden berücksichtigt.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Befestigung der Magnetringe mit dem Ringhalter.

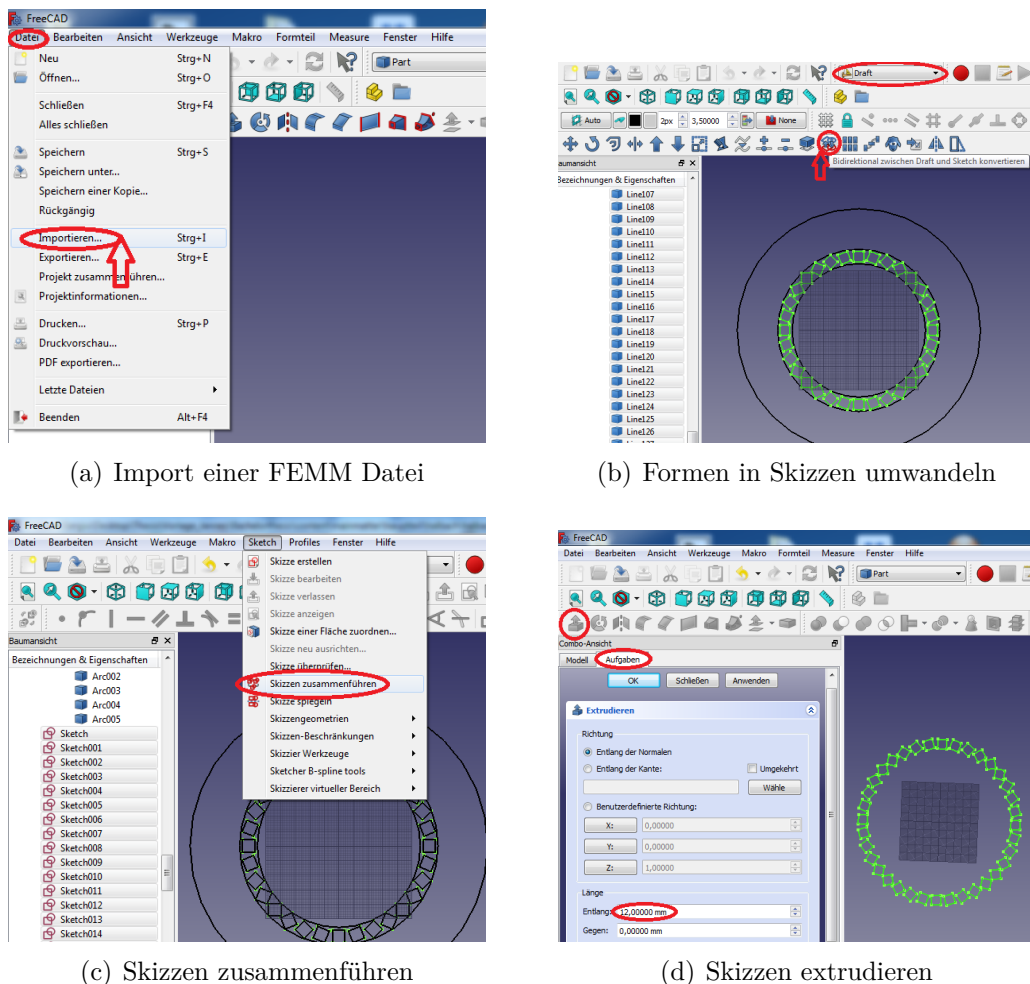
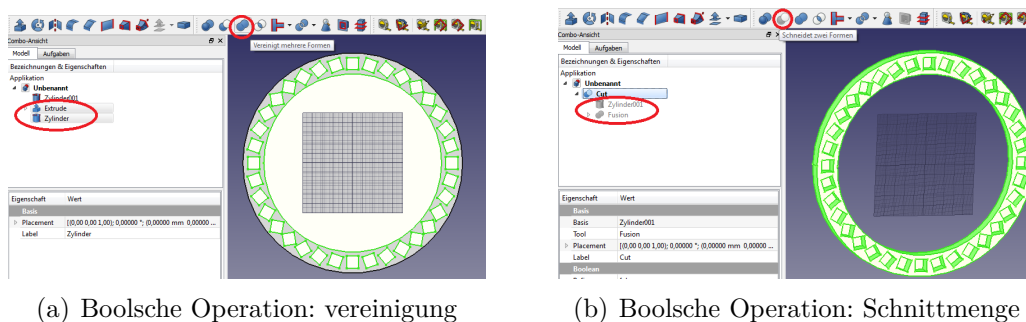


Abbildung 3.26: Import einer FEMM Datei in FreeCAD



(a) Boolesche Operation: vereinigung

(b) Boolesche Operation: Schnittmenge

Abbildung 3.27: Erstellen eines Magnetring

Jeder Magnetring hat 3 Magnetringbefestigungen, welche mit dem Magnetringhalter mit Schrauben befestigt werden. Da die Ringe zuerst erstellt wurden, sind 2 Radien der Magnetringbefestigungen entstanden, welche dazu geführt haben, dass der Magnetringhalter eine doppelte Anzahl von Innengewindemuttern hat, für kleine und große Magnetringe.

Jedes Magnetring besitzt einen Deckel, welcher mit 3-4 Schrauben befestigt wird. Der Deckel schützt den Ring vor Beschädigungen und Kratzern und sorgt auch dafür, dass die Magnete aus dem Ring nicht einfach herausrutschen können. Die Magnete sind aus den Ringen herausnehmbar. Dafür muss nur den Deckel abgeschraubt werden. Mit einem Hilfsmagneten können die Magnete entnommen werden. Bei dem hohen 15 kA/m Magnetring wurden extra Bohrungen im PLA gemacht, um von der anderen Seite mit einem spitzem Hilfsmittel die Magnete bei Bedarf herauszuholen.

Als Werkstoffe im 3D-Drucker werden in unserem Projekt das Material PLA (Polyactide) und Nylon verwendet. PLA ist ein synthetisches Polymer, das zu dem Polyestergruppe gehört. Der Kunststoff weist gute Zugfestigkeit, ist biegsam, der Schmelzpunkt liegt bei 160°C. Nylon hat eine höhere Elastizität sowie einen höheren Schmelzpunkt von 250°C. Daraus werden die Rotationsteile der Rotationsvorrichtung hergestellt, welche höheren Belastungen ausgesetzt werden. In beiden Fällen kommt das Verfahren FDM (Fused Deposition Modeling), dt. Schmelzschichtung, zum Einsatz. Das Werkstück wird schichtweise aus einem schmelzfähigen Kunststoff aufgebaut.

Die Kunststoffe bieten Vorteile gegenüber anderen bekannten Materialien wie Holz oder Aluminium. Aufgrund des geringeres Gewichtes, nichtmagnetische Eigenschaften und hohe Präzision des Ausdrucks bis zu 0,1 mm Toleranz.

In der Abbildung 3.28 wird der Prozess vom Design bis zum 3D Herstellung abgebildet. Sobald das Teil im FreeCAD Programm gezeichnet wurde, wird es ausgewählt. Nachfolgend wird gezeigt, wie eine *.stl Datei exportiert wird.

Das erste was mit dem 3D Drucker gedruckt wurde sind die Testdrucke, siehe Abbildung 3.31. Im Fall der Fälle war gewollt nicht zu viel Druckmaterial zu verschwenden.

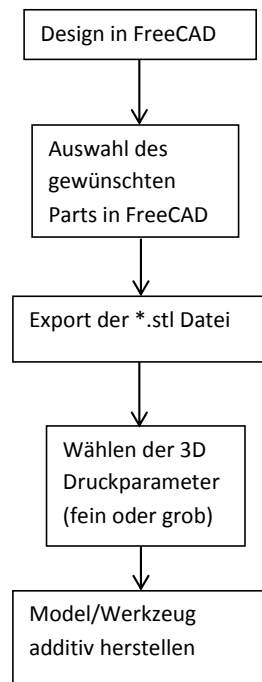


Abbildung 3.28: 3D-Datenfluss

Die ersten 3 Formen sind mit verschiedenen Düsengrößen ausgedruckt worden. Düsengrößenparameter sind: fein, mittel, grob. Die grobe Düse hat das Bauteil schnell ausgedruckt. Nach dem Abkühlen des Bauteils, passte der Magnet nicht hinein. Die Form war zu eng. Die mittlere Düse hat das Bauteil langsamer ausgedruckt, auch hier passte es nicht. Der Magnet passte nicht fest hinein und rutschte einfach heraus. Zum Schluss hat die feine Düse gute Ergebnisse erzielt und der Magnet steckte fest drin und kam nur schwer wieder raus. Mit der feinen Druckerdüse sind alle Magnetringe, alle Teile der Rotationsvorrichtung und der Magnethalter ausgedruckt worden.

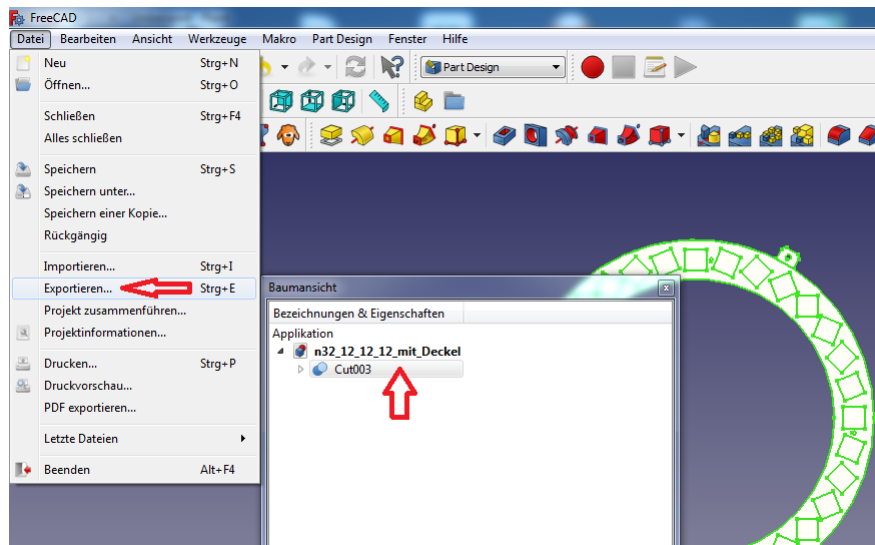


Abbildung 3.29: FreeCAD Auswahl der gewünschten Form

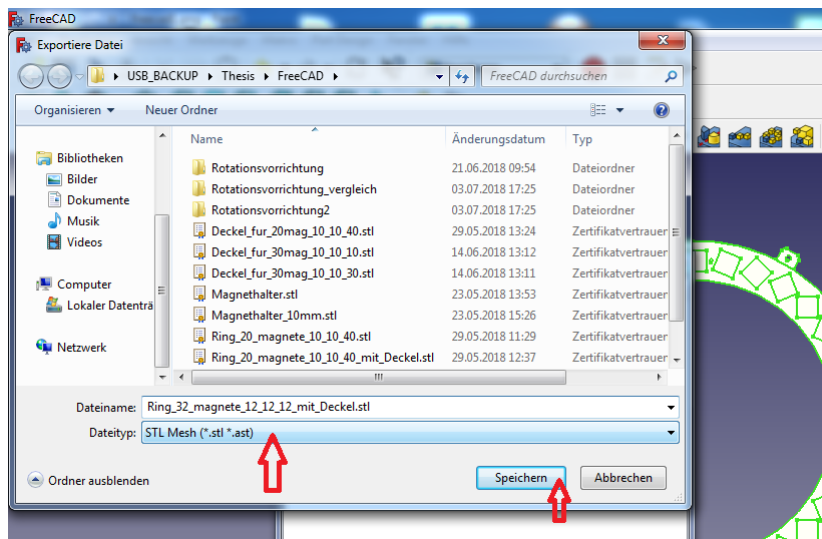


Abbildung 3.30: FreeCAD Export als *.stl Datei

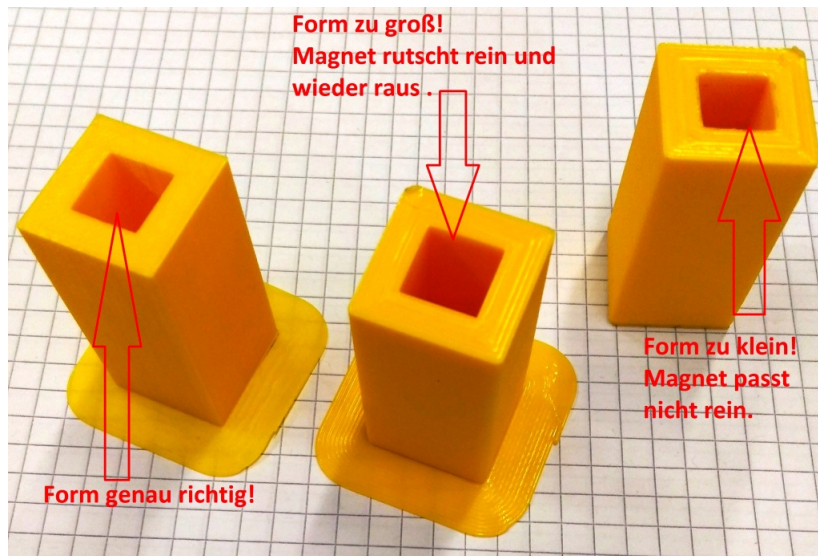


Abbildung 3.31: Test 3D-Druck

Grenzen des 3D-Drucks Die 3D Drucker haben einen begrenzten Druckbereich, welcher eingehalten werden muss:

Ultimaker: 210 mm x 210 mm x 205 mm

uPrint: 203 mm x 203 mm x 152 mm

Ein guter 3D Ausdruck kann Stunden bis Tage dauern. Das ist je nach Druckqualität unterschiedlich. Der längste Ausdruck für das Bauteil der Rotationsvorrichtung hat 5 Stunden gedauert. Der Ausdruck war in der höchsten Qualität, im uPrint Drucker, mit einer Genauigkeit von 0,1 mm! ausgedruckt worden. Laut 3D-Space Personal geht einen von vier Druckvorgänge fehl. Die Fehlerquellen sind:

- Ausgehen des Druckermaterials
- Fremdkörper im Druckraum. Sogar geringe Staubpartikel können den Druck beeinträchtigen, da der flüssige Kunststoff nicht richtig an der Fläche klebt.
- Druckkopfverschleiß, welches mit der Alterung zusammenhängt.
- Motorriemen gerissen, wenn nicht richtig angespannt wurde.

In diesen Fällen wird der Druck unterbrochen und erst nach Beseitigung der Fehlerquellen wiederholt. Dabei geht das PLC Material verloren und die Projektzeit verlängert sich. - Schrumpfen des PLC Kunststoffes Bei fehlenden Stützstrukturen schrumpft der PLC Kunststoff aufgrund der ungleichmäßigen Abkühlung. Stützstrukturen (supports) verhindern als zusätzliches Baumaterial ein Absinken von Bauteilen oder deren Verzug [9].

Diese Stützstrukturen werden nach dem 3D-Druck abgetrennt oder je nach Verfahren in Lauge aufgelöst.

Gewindeschneiden im PLC - Kunststoff Für die Befestigung der Ringe mit der Rotationsvorrichtung sollten die Ringe mit Schrauben befestigt werden. Die M3 Gewinde können mit dem 3D Drucker nicht gebaut werden, da diese zu klein geraten.

Die Gewindebohrung für M3 soll mindestens 2,5 mm betragen. Um ein Gewinde in Kunststoff zu schneiden wird eine M3 Metallschraube benutzt. Diese wurde in die Bohrung eingeschraubt, unter Anpassung der Drehgeschwindigkeit. Wenn die Schraube zu schnell dreht, schmilzt das PLC Material aufgrund der Reibung und verformt dabei das Gewinde. Ein zu schnelles Drehen der Schraube kann das Gewinde beschädigen. Die Drehung der Metallschraube soll langsam erfolgen. Es wurde auch versucht, Gewinde mit dem Gewindeschneider zu schneiden. Dieses ging allerdings fehl, da die Schnittabfall beim Herausdrehen des Gewindeschneiders die Gewinde zerstörten.

Aufbau und Bestückung der Magnetringe mit Magnete Nachdem die 3D PLC Formen gedruckt sind, werden diese mit Magnete bestückt. Alle Magnete haben eine Markierung mit dem Pfeil. Die Pfeilrichtung zeigt auf die unterere Würfelfläche, welche die Nordseite des Magnetes ist. Um die Nordseite zu bestimmen gibt es mehrere Möglichkeiten:

- Mit einem Magneten, der schon markiert ist, einem nicht markierten annähern. Der Nordpol des markierten Magneten wird den Südpol des unmarkierten anziehen.
- Mit einem Kompass. Hier wird der Zeiger, welcher normalerweise nach Norden zeigt, vom Südpol des Magnetes angezogen.
- Eine Kompass-App auf das Handy installieren, welcher das Smartphone als Kompass benutzt.
- Mit der Axial-Hallsonde des Gaussmeters sich dem Magneten annähern. Ist die Feldstärke mit negativen Vorzeichen behaftet, dann ist der Magnetpol der Nordpol.

Beim Einbau der Magnete in PLA Form ist die Pfeilrichtung der Magnete aus der FEMM Programm oder Octave zu entnehmen. Der Reihe nach wird der Ring mit Magneten bestückt. Zu beachten ist dabei, dass die Magnete sich anziehen und abstoßen können. Es erfordert einen gewissen Kraftaufwand. Hier sollte man aufpassen, dass die Magnete nicht aufeinanderstoßen, da sonst diese platzen und Risse oder Brüche im Magnetmaterial entstehen können.

In der Abbildung [3.32](#) ist ein fertig bestückter Magnetring zu sehen, dessen Deckel abgenommen wurde. Der Deckel wird mit 4 Nylonschrauben befestigt. Es sind die Aufkleber der Magnete zu sehen, welche mit einem Pfeil nach Norden der Magnete zeigen.

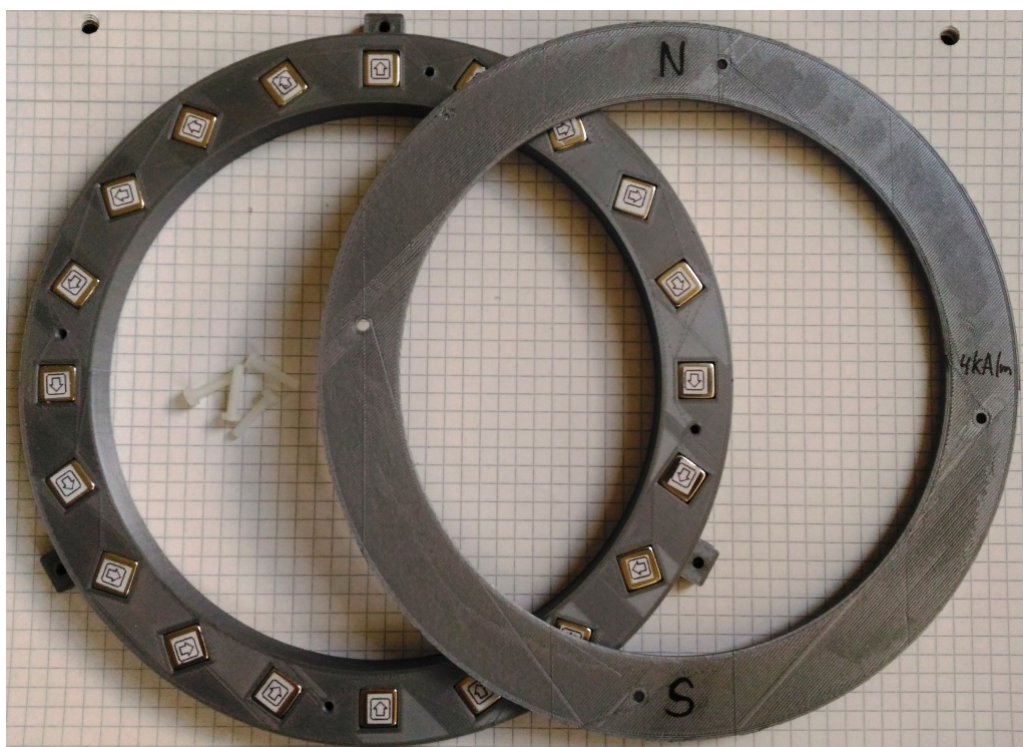


Abbildung 3.32: Aufbau 4 kA/m Magnetrings mit Deckel und Befestigungsschrauben

3.5 Messung der Magnetringse

Erwartet wird ein homogenes Feld in der Mitte des Magnetrings. Dafür wurde eine Messschablone im 3D Drucker ausgedruckt, welche aus einem Array von 15 x 15 Löchern besteht. Die Löcher wurden auf die Spitze der Transversal-Hallsonde angepasst. Jeder einzelne Punkt in der Messschablone wird mit der Hallsonde aufgenommen. Eine Messung eines einzelnen Magnetrings besteht aus einer Matrix mit 255 Messpunkten. Jeder dieser 255 Messpunkte wird mit der Hallmessonde manuell gemessen und in die Tabelle für jeden Ring eingetragen.

Aufbau der Messschablone

Die Messschablone sollte die Fläche decken, welche später die Magnetsensoren beinhalten. Die Messschablone wird wie in der Abbildung: 3.33 in der Mitte des Magnetrings positioniert. Die Abmessungen der Messschablone sind im Anhang E.17 zu finden.

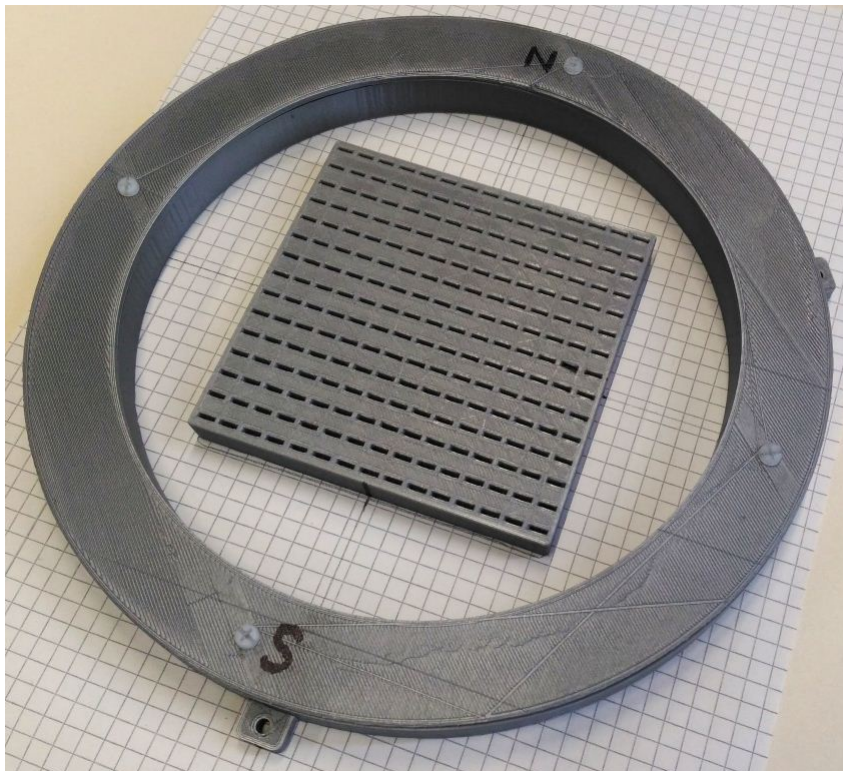


Abbildung 3.33: Messung des Magnetfeldes in der Ringmitte

Messung des 4 kA/m Magnetings Die Tabelle mit den Messwerten befindet sich im Anhang: [C.1](#)

Octave Quellcode für die Darstellung der Messwerte des 4 kA/m Magnetings: [D.15](#)

Die Werte aus der Tabelle wurden in Octave geplottet und befinden sich auch im Anhang: [C.1](#)

Messung des 6 kA/m Magnetings Die Tabelle mit den Messwerten befindet sich im Anhang: [C.2](#)

Die Werte aus der Tabelle wurden in Octave geplottet und befinden sich auch im Anhang: [C.2](#)

Messung des 7,5 kA/m Magnetings Die Tabelle mit den Messwerten befindet sich im Anhang: [C.3](#)

Die Werte aus der Tabelle wurden in Octave geplottet und befinden sich auch im Anhang: [C.3](#)

Messung des 10 kA/m Magnetings Die Tabelle mit den Messwerten befindet sich im Anhang: [C.4](#)

Die Werte aus der Tabelle wurden in Octave geplottet und befinden sich auch im Anhang: [C.4](#)

Messung des 15 kA/m Magnetings Die Tabelle mit den Messwerten befindet sich im Anhang: [C.5](#)

Die Werte aus der Tabelle wurden in Octave geplottet und befinden sich auch im Anhang: [C.5](#)

4 Entwurf einer Rotationsvorrichtung

Es soll eine passende Form entwickelt werden, welche in einen tragbarem Koffer passt. Die Konstruktion soll leicht, nicht magnetisch, zu- und ausbaufähig sein.

Mehrere Konzepte wurden überlegt, welche Vorteile und Nachteile mit sich tragen.

4.1 Entwicklungsstufen und Entscheidungsmatrix

Vergleich Aufbau Rotationsvorrichtung		
Komplett aus 3D Material	Holz und 3D Teile	Metall mit 3D Teile
- brüchig	+ robust	+ sehr robust
- Größe auf Drucker begrenzt	+ Größe frei wählbar	+ Größe frei wählbar
- erfordert Kenntnisse in Statik	+ Kenntnisse im Holzverarbeitung vorhanden	- erfordert Kenntnisse im Metallverarbeitung
- teureres Material	+ günstiges Material	- relativ teuer
+ leichtes Material	- relativ schwer	- relativ schwer
- langer Bearbeitungsaufwand	+ schnellere Bearbeitung	- langer Bearbeitungsaufwand

Tabelle 4.1: Vergleich der 3 Konzepte für eine Rotationsvorrichtung

Aufbau einer Rotationsvorrichtung in 3D Druck Ein Prototyp in 3D wurde in Free-CAD modelliert und ausgedruckt.

Vorteile:

- nicht magnetisch, da alles aus Kunststoff gebaut
- kompakter Aufbau, passt im Koffer

Nachteile:

- nicht ausbaufähig
- biegsam und brüchig. Der Motor wird vibrieren, der Riemen konnte nicht gespannt werden.
- Störfeld des Magnetringes wirkt sich störend auf den Motor aus

Die Idee war, der vorhandenen Messeinrichtung, welche schon ein rotierenden Gebermagneten besaß, einen rotierenden Magnetring hinzuzufügen. Ziel ist die Überlagerung der Magnetfelder bei Rotation der beiden Vorrichtungen, des Gebermagneten und des



Abbildung 4.1: 3D-Rotationsvorrichtung

Magnetringes zu untersuchen. Es hat sich aus früheren Arbeiten herausgestellt, dass er nicht in die vorhandene Messeinrichtung passt, da sie dem Gebermagneten sensibel gegenüber Störfelder der Magnetringe reagiert bzw. unter deren Einfluss sich der Kopf mit dem Gebermagnet verbiegt und Messfehler erzeugt.

Bei dem Versuch überwiegen die Nachteile. Erkenntnis war, dass die 3D - Rotationsvorrichtung nicht in die vorhandene Messeinrichtung integrierbar ist, welche neu entwickelt und aufgebaut werden muss. Somit hat sich der 3D Prototyp nicht durchgesetzt. Dennoch war es eine Erfahrung welche dazu beigetragen hat, die Ziele des Projektes besser zu verstehen und das Programm FreeCAD besser kennenzulernen.

4.2 Aufbau der gewählten Rotationsvorrichtung

Die Rotationsvorrichtung besteht aus mehreren Teilen.

- 1 - Grundplatte aus Holz
- 2 - Magnetringhalter mit Sechskantinnengewindemuttern
- 3 - Plexiglasplatte 10 mm
- 4 - Keramikugellager incl. Rotationsvorrichtung für den Gebermagneten
- 5 - Schrittmotor
- 6 - Mini-USB Anschluß (für das USB Kabel zum PC für die Schrittmotorsteuerung)
- 7 - Mikro-USB Kabel für die Verbindung Platine - PC
- 8 - GT2 Riemen

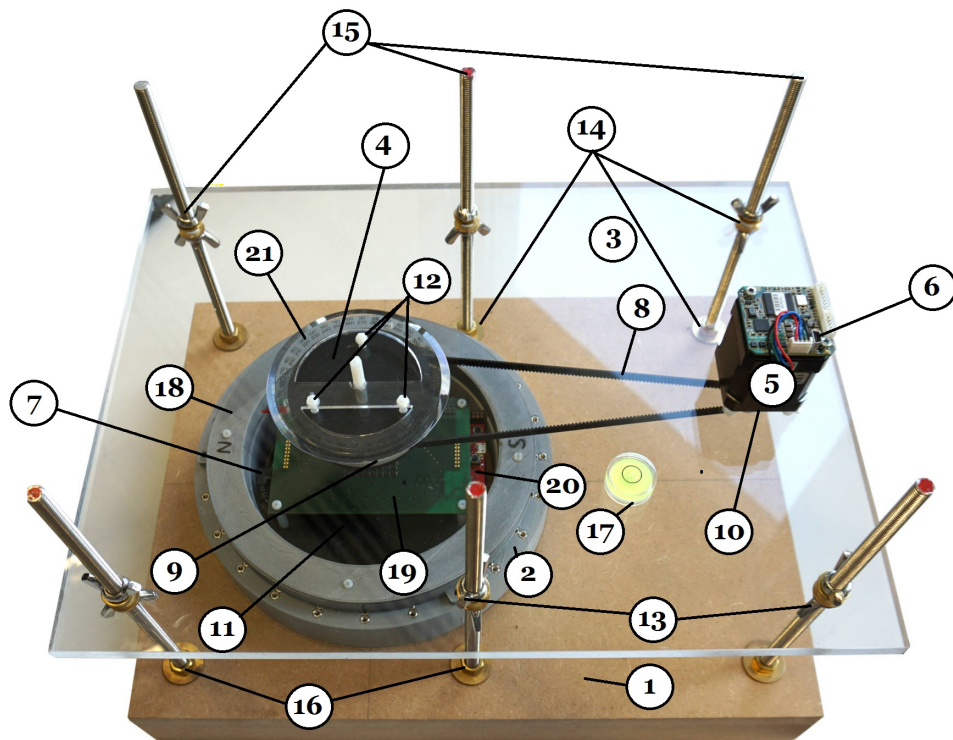


Abbildung 4.2: Aufbau Rotationsvorrichtung

- 9 - GT2 Drehrad groß
- 10 - GT2 Drehrad klein
- 11 - Platinenhalter
- 12 - Befestigungsschrauben
- 13 - Edelstahlflügelmuttern M8
- 14 - Messingscheiben M8
- 15 - 6 Gewindestangen M8
- 16 - Messingmuttern M8
- 17 - Wasserwaage (Libelle)
- 18 - Dipol-Halbach-Array
- 19 - Obere Messplatine mit 8 x 8 TMR-Sensor-Array
- 20 - Untere Hauptplatine mit Mikrocontroller
- 21 - Winkelmesser 360°

Der Holzaufbau wurde mit Holzdübeln befestigt und Holzleim verklebt.

Das Mikro-USB Kabel hat einen 90° Winkelstecker, welcher mit der Hauptplatine passend verbunden ist.

Ein Keramikkugellager ist im Aufbau für den Gebermagneten verbaut und dient zur Reduzierung der Reibung mit dem Vorteil, dass er nicht magnetisch ist.

Der 550 mm lange Zahnriemen hält den Schrittmotor fern vom Störfeld des Magnetringes und sorgt für eine genaue Kraftübertragung.

Im ersten Anlauf sind 4 Gewindestangen verbaut worden. Die Vorrichtung wackelte und war nicht stabil. Auf 6 Gewindestangen saß der ganze Aufbau fest.

Zwischen Edelstahlflügelmuttern und Plexiglas sind Messingscheiben angebracht, um ein Kratzer auf dem Plexiglas zu vermeiden.

Die Rotationsvorrichtung sollte höhenverstellbar sein, was ein Messen mit veränderbarer Höhe und ein Abnehmen des Magnetringes und Gebermagneten ermöglicht.

Alle Arbeiten wurden teils in der HAW, teils in der Werkstatt der Firma Zwinge gefertigt.

Magnetringhalter Auf dem Magnetringhalter können die Magnetringe gedreht und mit 3 Schrauben befestigt werden. In Abständen von 15° kann ein Ring manuell gedreht werden. Bei 360° sind es 24 Positionen. Es wurde ein Konzept überlegt, bei dem sich die Schraubengewinde im Magnetringhalter einbringen lassen. Der Magnetringhalter wurde im 3D Druck erstellt unter Berücksichtigung der Sechskant-Innenschraubenmutter, welche als Gewinde im Kunststoff eingebracht wurden. Diese können aus Nylon-Kunststoff oder aus Messing sein. Die Sechskant-Form für die Sechskant-Innengewindemutter sollte bei Erstellen des 3D Körper im FreeCAD zuerst entworfen werden. Nach dem 3D Druck werden die Sechskant-Muttern eingesteckt. Bei stärkerer Nutzung könnte ein Tropfen Sekundenkleber für mehr Haftung sorgen, so dass die Müttern nicht aus dem Magnetringhalter herausrutschen können. Der Magnetringhalter ist für 2 Magnetringgrößen erstellt worden. Der größere 10 kA/m Magnetring benutzt die äußere Befestigungsgewindereihe. Alle anderen kleineren Magnetringe die untere Reihe.

4.2.1 GT2 Drehzahnrad und die Kopplung zum Motor

Die Verbindung zwischen den zwei GT2 Zahnräder erfolgt über einen GT2 Zahnriemen.

Das größere Zahnrad wurde mit 3D Druck nach Abmessungen aus dem Datenblatt [10] für 2 mm GT2 Standard der Firma Gates erstellt. Mit 2 mm ist der Abstand zwischen den einzelnen Zähnen im Zahnrad gemeint. Laut Datenblatt, Seite 18 soll für das GT2

Zahnrad mit 100 Zähnen ein Innendurchmesser von 63.15 mm und ein Außendurchmesser 63.66 mm gewählt werden. Die Höhe der Zähne ist auf einen Kreisradius von 0.6 mm gesetzt, die Gesamthöhe mit Wandstärke beträgt ca. 0.75 mm. Das größere Zahnrad ist ein wichtiger Teil der Rotationsvorrichtung, es beinhaltet auch das Keramikkugellager. Das Keramikkugellager hat die Abmessungen 30 mm x 55 mm x 13 mm (LxBxH) und wird im größeren Zahnrad fest eingesteckt. Die Wanddicke wurde mit 3,3 mm so gewählt, dass der Kunststoff stabil bei Drehbelastungen bleibt und nicht auseinanderbricht.

Die Geometrie wurde in FreeCAD erstellt und eine technische Zeichnung ist im Anhang zu finden, Abbildung E.13.

Das kleinere GT2 Rad mit 20 Zähnen wurde von eBay gekauft und ist an der Motorachse mit 2 Schrauben befestigt.

Die Verbindung zwischen diesen zwei GT2 Zahnräder erfolgt über einen geschlossenen GT2 Zahnriemen.

Der Zahnriemen ist 550 mm lang und hat 275 Zähne.

Übersetzungsverhältnis Der Quotient zwischen eingehender und ausgehender Drehzahl in einem Rädergetriebe wird als Übersetzungsverhältnis i genannt, [11]. Bei der Rotationsvorrichtung wird der Gebermagnet über ein großes GT2 Rad mit einem Riemen an das zweite kleine GT2 Rad verbunden.

Großes GT2 Zahnrad: 100 Zähne

Kleines GT2 Zahnrad: 20 Zähne

Übersetzungsverhältnis: $i = \frac{100}{20} = 5$

Das Übersetzungsverhältnis wird bei den Einstellungen für den Schrittmotor miteinander berechnet, um die genaue Drehung in Grad zu berechnen.

4.2.2 Einstellungen für den Schrittmotor

Im Projekt wird der Schrittmotor Trinamic PD3-140-42-SE-485 mit integriertem Kontrollboard eingesetzt. Je nach Bedarf der Genauigkeit kann der Schrittmotor mit 16-, 32-, oder 64-fachem Mikroschrittbetrieb angesteuert [12] werden.

Für eine beste Genauigkeit soll 64 fach gewählt werden. Der Motor hat in diesem Fall 200 x 64 Fach ergibt im Mikroschrittbetrieb gesamt 12800 Schritte. Die Auflösung pro Grad:

$$x = \frac{360^\circ}{12800} = 0.028125^\circ \quad (4.1)$$

Die Getriebe 1:5 verbessert die Auflösung:

$$x = \frac{360^\circ}{12800 \cdot 5} = 0.005625^\circ \quad (4.2)$$

Für die Ansteuerung können die Schritte pro Grad($^\circ$) berechnet werden:

$$x = \frac{1 \cdot 12800}{360^\circ} = 35,555555556 \text{ Schritte}/^\circ \quad (4.3)$$

Da es ein Getriebe mit 1:5 gibt, sind es 5x mehr Schritte:

$$x = \frac{1 \cdot 12800 \cdot 5}{360^\circ} = 177,77778 \text{ Schritte}/^\circ \quad (4.4)$$

Für 5° sind es:

$$x = \frac{5^\circ \cdot 12800 \cdot 5}{360^\circ} = 888,8889 \text{ Schritte}/^\circ \quad (4.5)$$

Für 15° sind es:

$$x = \frac{15^\circ \cdot 12800 \cdot 5}{360^\circ} = 2666,6667 \text{ Schritte}/^\circ \quad (4.6)$$

Für eine volle 360° Umdrehung braucht der Motor:

$$x = \frac{360^\circ \cdot 12800 \cdot 5}{360^\circ} = 64000 \text{ Schritte}/^\circ \quad (4.7)$$

5 Evaluation der Mess- und Simulationsergebnisse

5.1 Mess-, Berechnungs- und Simulationsergebnisse von einzelnen Magneten

Bei der Messung der Magnete sind Abweichungen in der Tabellen zu erkennen. Einige Abweichungen sind auf den Messfehler des Gaussmeters FH-55: (+/-0.3%) zurückzuführen. Es sind Abweichungen auch durch Fehler in der Abstandsmessung entstanden z.B. im Bereich zwischen 0 - 10 mm sowie bei 45 - 50 mm sind die Abweichungen größer, wo der Gaussmeter im groben Messbereich gemessen hat. Es wird vermutet dass die Magnete bei der Herstellung schon eine Abweichung in der Feldstärke haben. Diese Abweichungen sind stärker als die Messfehler. Im Datenblatt für N42 Neodymmagnete ist eine Koerzitivfeldstärke H_c in der Magnetisierungskennlinie zwischen 860-955 kA/m angegeben. In diesem Kapitel werden bei den gemessenen Magneten die gemittelten relativen Abweichungen mit den Mittelwert der Gesamtmessung abgeglichen. In der Tabelle 5.1 sind die Mittelwerte in Octave berechnet. Der Octave-Code für Mittelwertbildung der W10 Magneten befindet sich im Anhang: D.16

Tabelle 5.1: Mittelwerte aller gemessenen Magnete

z (mm)	B(z) von W10 (kA/m)	B(z) von Q10 (kA/m)	B(z) von W12 (kA/m)
0	398,06	344,15	425,78
1	332,12	297,43	361,06
2	261,63	251,20	292,88
3	206,48	211,60	238,91
4	160,14	177,80	194,83
5	124,29	149,50	155,86
6	100,37	129,70	129,83
7	79,96	111,20	106,07
8	63,78	94,95	87,09
9	51,02	82,25	71,64
10	42,19	72,60	60,71
15	18,28	40,35	28,20
20	9,51	24,55	15,22
25	5,55	16	9,06
30	3,52	11	5,87
35	2,38	7,95	3,98
40	1,68	5,93	2,81
45	1,23	4	2,07
50	0,93	3	1,54

5.1.1 W10 Magnete

Bei den W10 Würfelmagneten tritt eine relative Abweichung zwischen den berechneten und gemessenen Werten mit einem Maximalwert von 7,14% auf, wie aus Tabelle ?? zu lesen ist. Dieser Fehlerwert setzt sich aus dem Fehler des Messgerätes von bis -0.3% Abweichung und Messfehlern bei Ablesen der Magnetfeldstärke im Messbereich von 0 bis 10 mm zusammen, da in diesem Messbereich die Messung fehleranfälliger ist. Die Simulation hat eine maximale relative Fehlerabweichung von 528,43 % zum berechneten Wert. Ein Grund dafür kann die 3D Form sein, welche FEMM in 2D zeichnet. Der Betrag von der Feldstärke aus der Z -Achse fließt in die X- und Y-Achse ein, so dass die Magnetfeldstärke größer in 2D erscheint. Im Bild 5.1 sind die Berechneten, die Simulierten und die gemessenen Werte zum Vergleich nebeneinander geplottet.

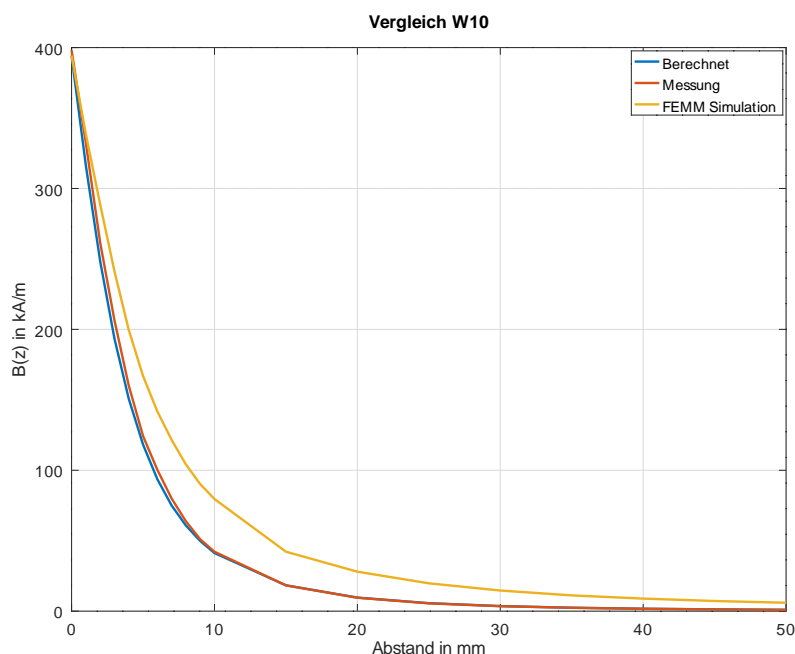


Abbildung 5.1: Datenauswertung: Berechnung, Messung, Simulation der W10 Magneten

Um eine Aussage über die Abweichungen zu machen, werden für jeden der W10 Magnete die gemittelte Summe der relativen Abweichungen über den Mittelwert der Gesamtmessung geplottet. Ein Balkendiagramm zeigt die relative Abweichung im Betrag.

Die relativen Abweichungen sind in der Abbildung: 5.3 zu sehen. Das Balkendiagramm zeigt die Abweichungen jeden der 51 gemessenen W10 Magneten. Der Octave Quellcode befindet sich im Anhang D.7 D.4 D.1

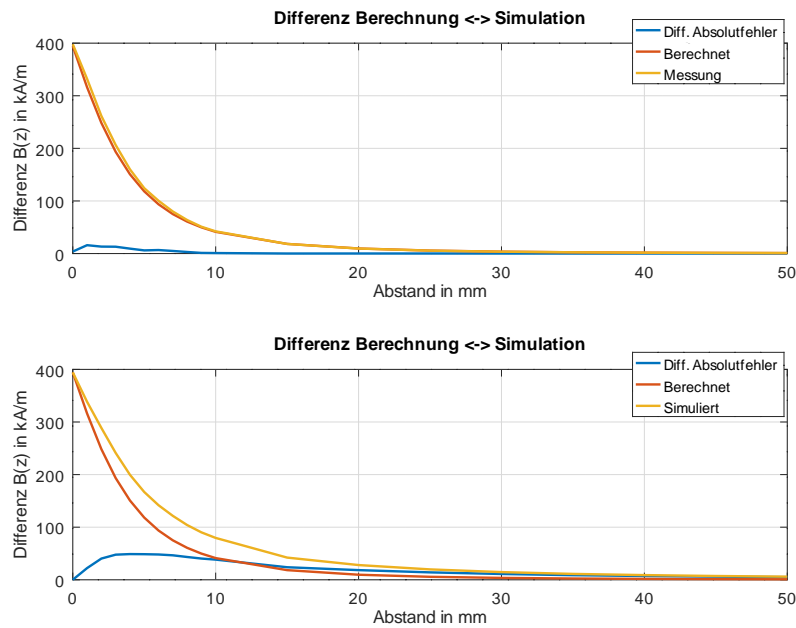


Abbildung 5.2: Absolute Differenz der Messung und Simulation im Vergleich zu Berechnung von W10 Magneten

$$MA(1) = \sum_{i=19}^1 \frac{1}{19} \left| \frac{(\text{Gesamtmittelwert} - \text{AktuellerMesswert})}{\text{Gesamtmittelwert}} \right| \quad (5.1)$$

In der Formel 5.1 ist eine Messung der gemittelten Abweichung für den Magnet 1 dargestellt.

In der Tabelle mit der Messung der W10 Magneten, siehe Tabelle: B.1 sind einzelne Magnete stärker oder schwächer als der Mittelwert der Gesamtmessung. In diesem Plot sind die relativen Abweichungen im Betrag erstellt worden. Ob der Magnet eine stärkere oder schwächere Feldstärke als der Mittelwert aufweist, lässt sich in diesem Plot nicht erkennen.

Auf einem weiteren Plot wurden zum Vergleich die relativen Abweichungen ohne Betrag aufsummiert. Abbildung 5.4

$$MA(1) = \sum_{i=19}^1 \frac{1}{19} \frac{(\text{Gesamtmittelwert} - \text{AktuellerMesswert})}{\text{Gesamtmittelwert}} \quad (5.2)$$

Hier sind Schwankungen nach unten oder nach oben zu erkennen. In diesem Plot wird die

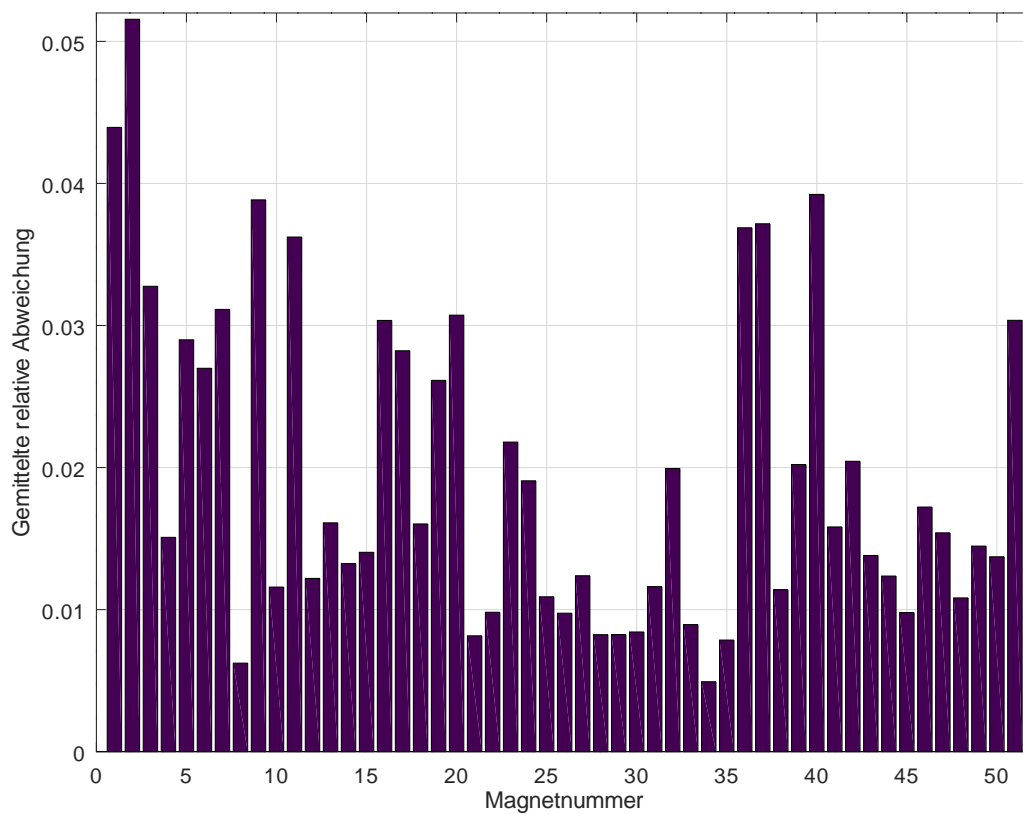


Abbildung 5.3: Gemittelte relative Abweichungen der 51 W10 Magnete

Feldstärke der Magneten deutlich, einzelne Magnete haben eine geringere oder stärkere Feldstärke im Vergleich zu dem Mittelwert.

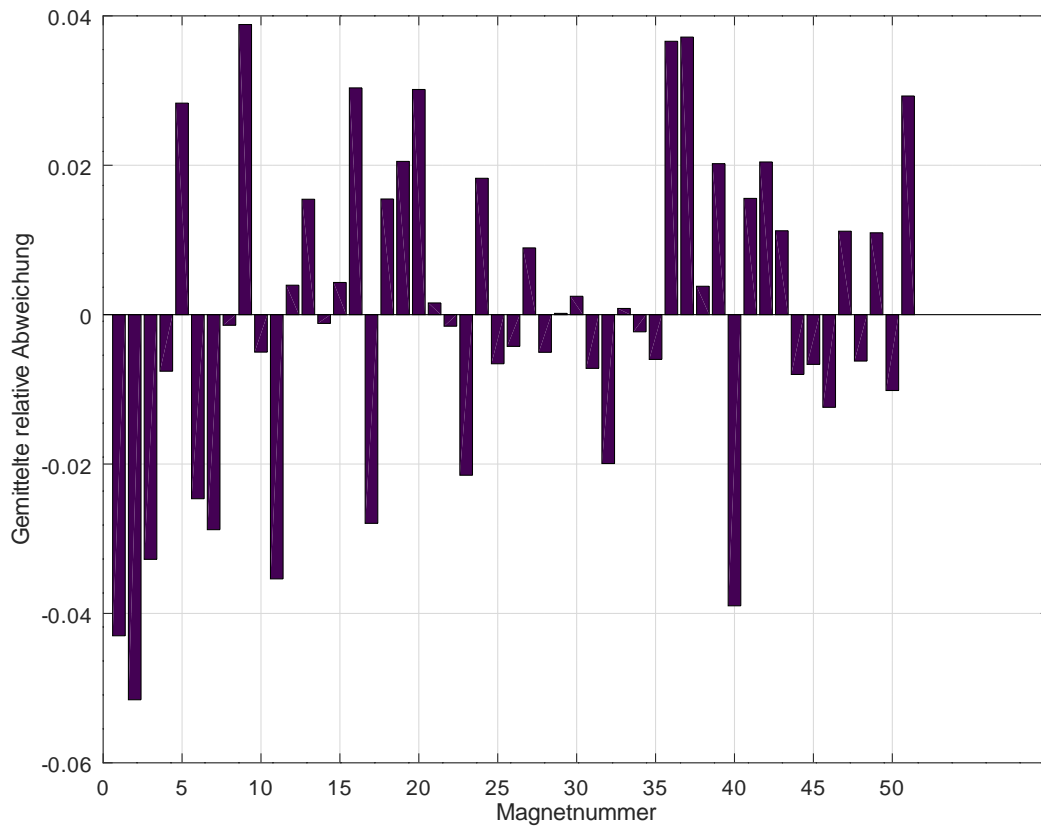


Abbildung 5.4: Gemittelte relative Abweichungen der 51 W10 Magneten, ohne Betrag dargestellt

5.1.2 W12 Magnete

Bei den W12 Würfelmagneten tritt eine relative Abweichung zwischen den berechneten und gemessenen Werten mit einem Maximalwert von 9,72% auf, wie aus Tabelle ?? zu lesen ist. Dieser Fehlerwert liegt auch hier im Fehler des Messgerätes von bis -0.3% Abweichung. Allerdings ist die maximale Abweichung größer im Messbereich von 45-50 mm. Das kann mit dem Messbereich des Gaussmeters zusammenhängen, wo nicht im minimalen Messbereich gemessen wurde und das Messgerät die Werte abrundete. Die Simulation hat eine maximale relative Fehlerabweichung von 444,04 % zum berechneten Wert ergeben.

Dieser Wert ist überraschend klein im Vergleich mit den W10 Würfelmagneten, da bei größerem Magnetvolumen eine höhere Abweichung erwartet wurde.

Ein Grund dafür kann der Materialwert für N52 sein, das in FEMM geringer bzw. nicht gleich wie bei der Berechnung ist. Ein Grund dafür kann die 3D Form sein, welche FEMM in 2D zeichnet. Der Betrag von der Feldstärke aus der Z -Achse fließt in die X- und Y-Achse ein, so dass die Magnetfeldstärke größer in 2D erscheint.

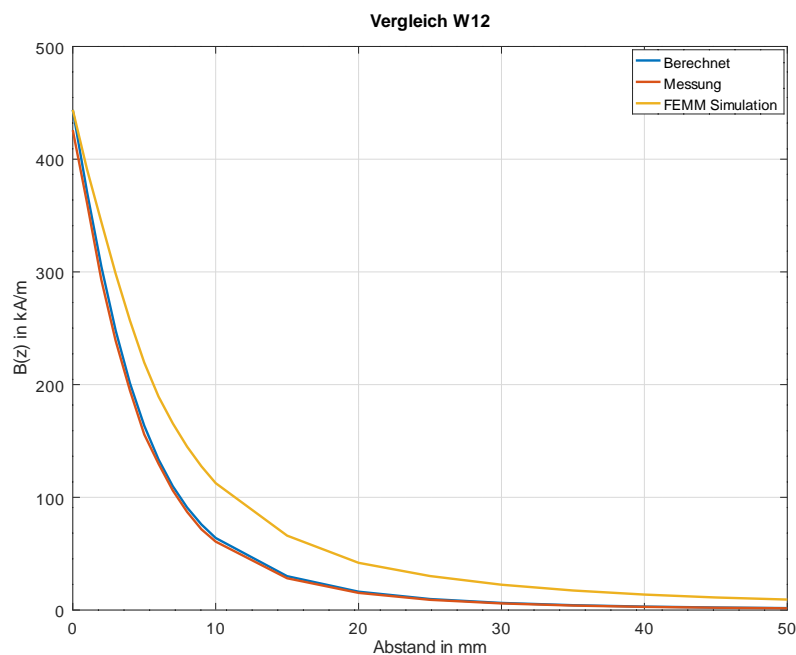


Abbildung 5.5: Datenauswertung: Berechnung, Messung, Simulation der W12 Magneten

Es werden für jeden der W12 Magnete die aufaddierten gemittelten relativen Abweichungen dargestellt, Abbildung 5.7.

Der Octave Quellcode befindet sich im Anhang [D.9](#), [D.3](#), [D.6](#).

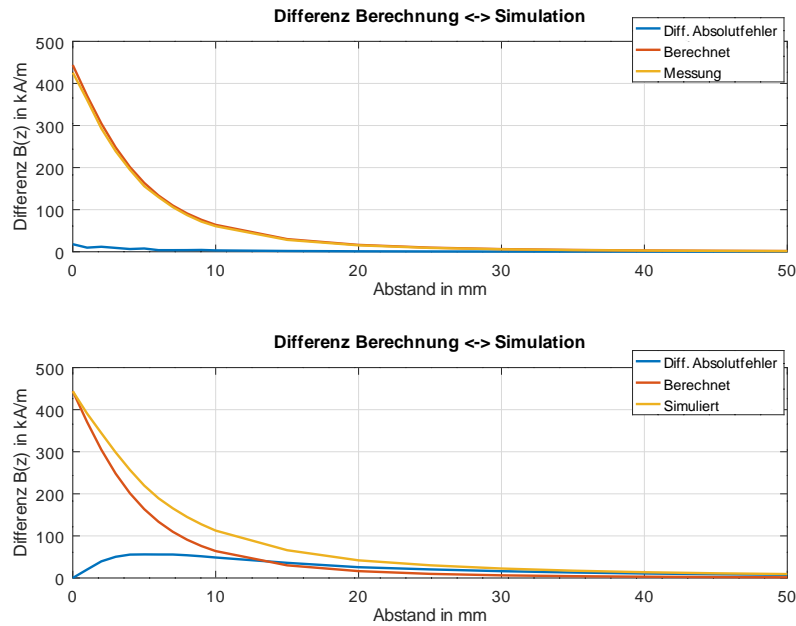


Abbildung 5.6: Absolute Differenz der Messung und Simulation im Vergleich zu Berechnung von W12 Magneten

In der Tabelle mit der Messung der W12 Magneten, Anhang, B.2 sind einzelne Magnete stärker oder schwächer als der Mittelwert der Gesamtmessung. In diesem Plot sind die relativen Abweichungen im Betrag erstellt worden. Ob der Magnet eine stärkere oder schwächere Feldstärke als der Mittelwert aufweist lässt sich in diesem Plot nicht erkennen.

Auf einem weiteren Plot wurden zum Vergleich die relativen Abweichungen ohne Betrag aufsummiert, Abbildung 5.8.

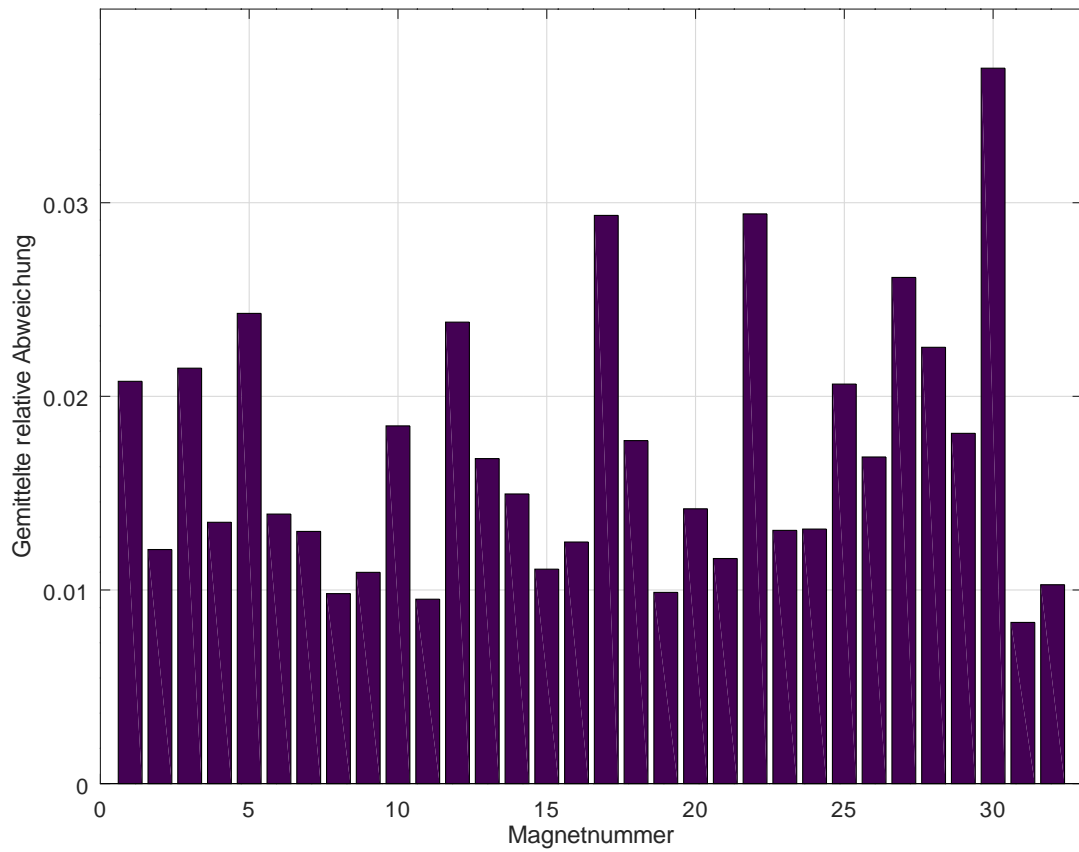


Abbildung 5.7: Aufsummierte Abweichungen der 32 Stück W12 Magnete zur Mittelwert der Messung

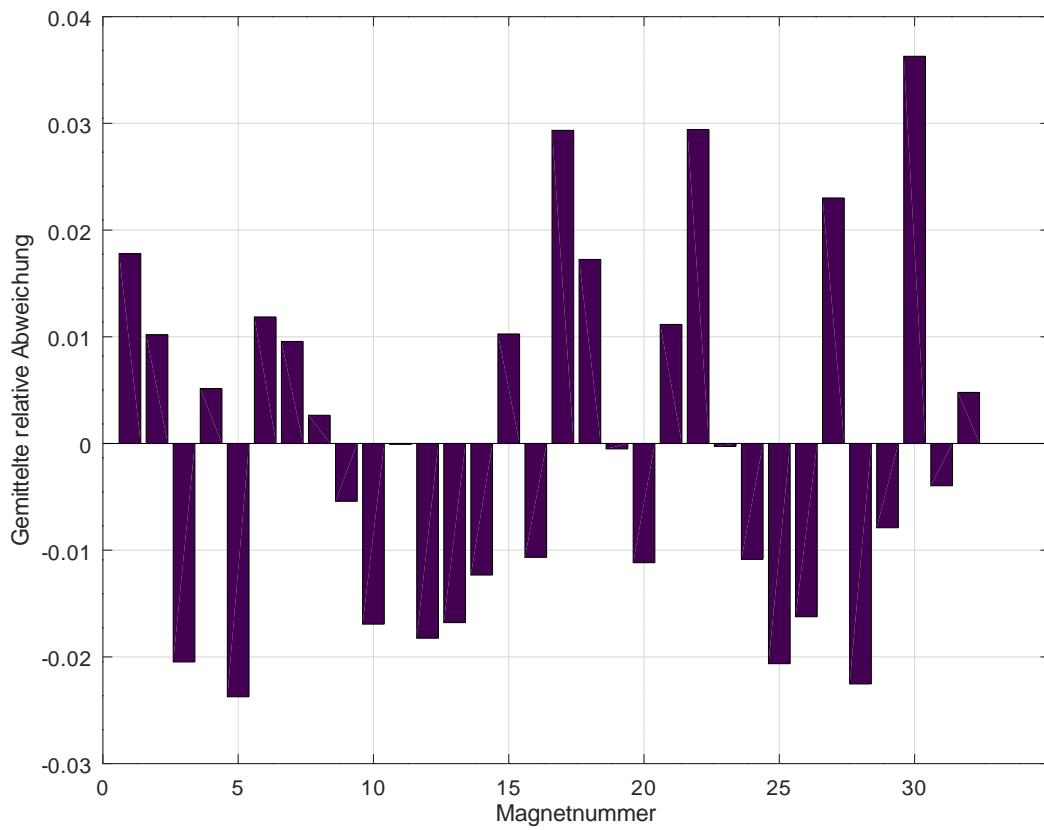


Abbildung 5.8: Gemittelte relative Abweichungen der 32 W12 Magneten, ohne Betrag dargestellt

5.1.3 Q10 Magnete

Bei den Quadermagneten Q10 ist die relative Abweichung zwischen den berechneten und gemessenen Werten bis auf 11,24% Maximalwert gestiegen, wie aus Tabelle ?? zu lesen ist. Dieser Fehlerwert liegt auch hier im Fehler des Messgerätes von bis -0,3% Abweichung. Allerdings ist die maximale Abweichung größer im Messbereich von 45 mm und 50 mm. Das kann vom Messbereich des Gaußmeters abhängen, wo nicht im minimalen Messbereich gemessen wurde und das Messgerät die Werte abrundete. Die Simulation ergibt eine maximale relative Fehlerabweichung bei Quadermagnete Q10 von 1204,35% zum berechnetem Wert. Der Fehler gleicht dem der W10 Würfelmagnete und liegt in der Umwandlung von 2D in 3D.

Die simulierte Werte zeigen die größten Abweichungen im Vergleich zu anderen Werten bei dem Quadermagnet Q10.

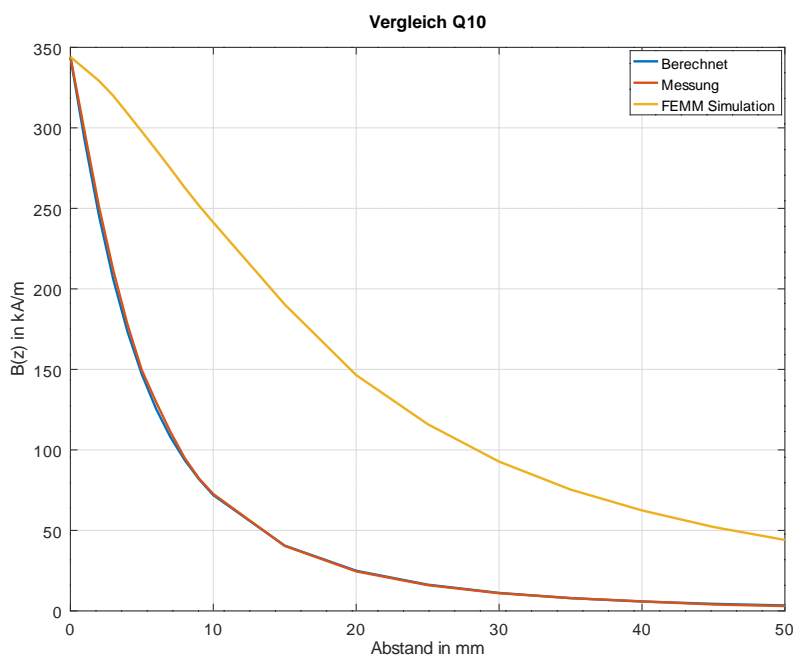


Abbildung 5.9: Datenauswertung: Berechnung, Messung, Simulation der Q10 Magneten

Für jeden der Q10 Magnete werden die aufaddierten gemittelten relativen Abweichungen in Abbildung 5.11 dargestellt, Der Octave Quellcode befindet sich im Anhang D.8, D.5, D.2.

In der Tabelle mit der Messung der Q10 Magneten: B.3, sind einzelne Magnete stärker oder schwächer als der Mittelwert der Gesamtmessung. In diesem Plot sind die relativen Abweichungen im Betrag erstellt worden. Ob der Magnet eine stärkere oder schwächere Feldstärke als der Mittelwert aufweist lässt sich in diesem Plot nicht erkennen.

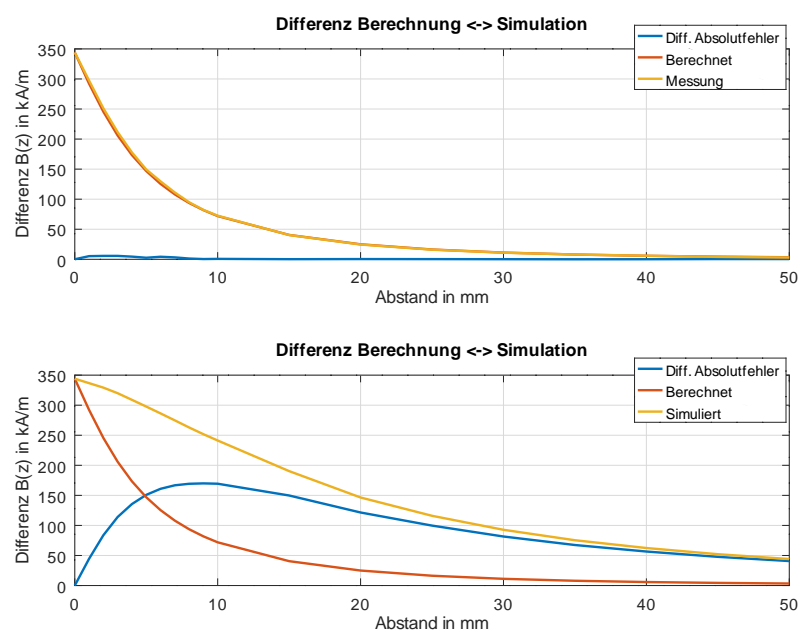


Abbildung 5.10: Absolute Differenz der Messung und Simulation im Vergleich zu Berechnung von Q10 Magneten

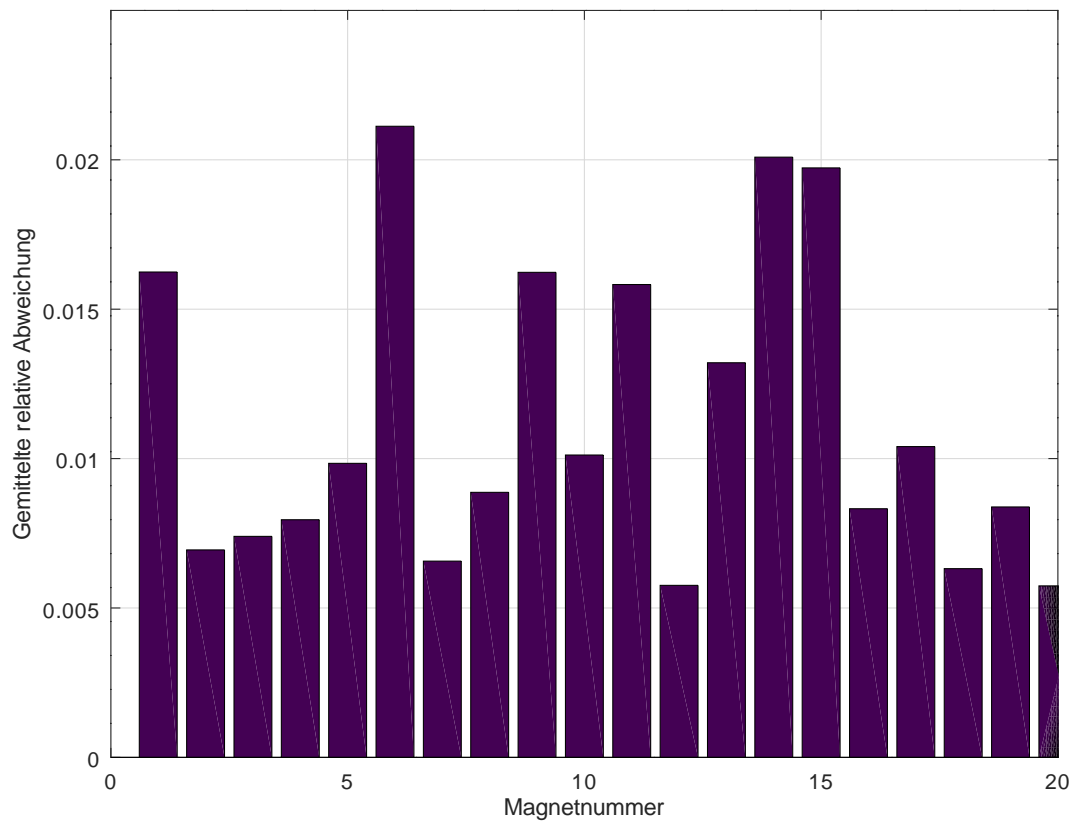


Abbildung 5.11: Aufsummierte Abweichungen der 20 Q10 Magnete zur Mittelwert der Messung

Auf einem weiteren Plot wurden zum Vergleich die relativen Abweichungen ohne Betrag aufsummiert Abbildung 5.12

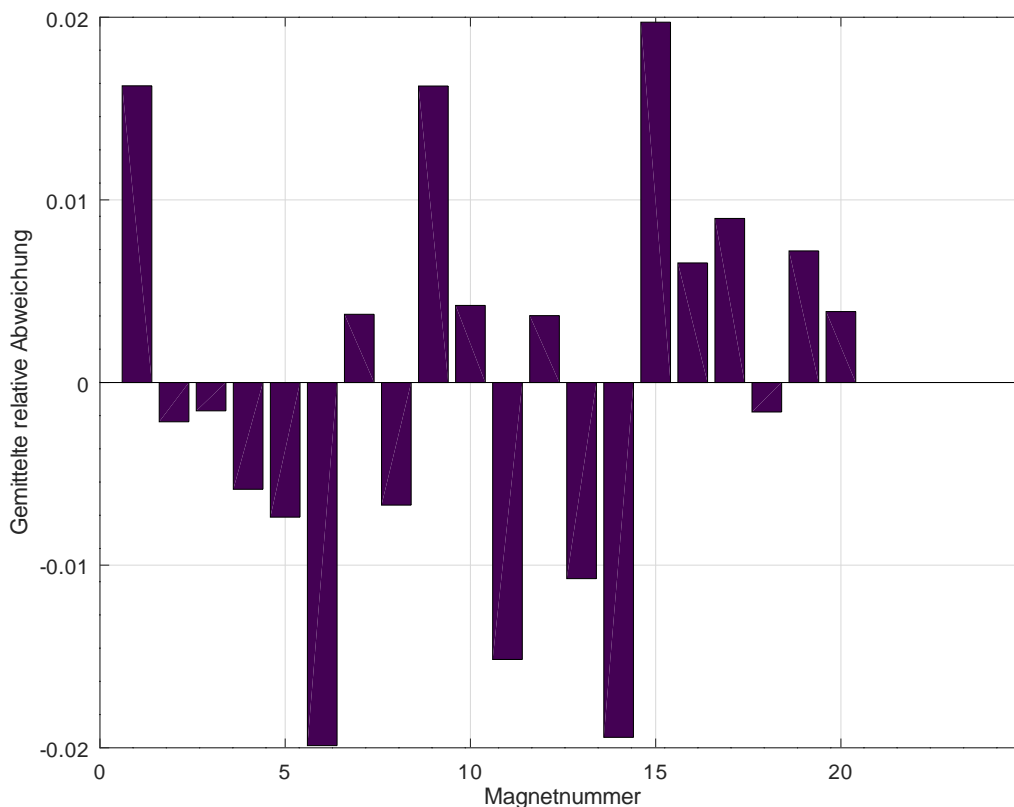


Abbildung 5.12: Gemittelte relative Abweichungen der 20 Q10 Magneten, ohne Betrag dargestellt

Der Feldstärkenverlauf unterscheidet sich von simulierten, berechneten und gemessenem Wert.

Berechnung und Messung weisen im Vergleich nur geringe Differenzen auf. Mehr Differenzen sind auf dem Messbereich von 0 bis 10 mm zu sehen.

In diesem Messbereich kann mit größeren Messfehler gerechnet werden, aufgrund der Messabweichung des Messgerätes FH-55 mit $\pm 0.3\%$ und des fehlerbehafteten Messens in höherem Messbereich, welcher die Nachkommastellen aufrundet bzw. nicht berücksichtigt.

Die Simulierten Werte zeigen größere Abweichungen im Unterschied zu anderen aufgezzeichneten Werte. Am Stärksten ist er bei dem Quadermagnet zu sehen.

Ein Grund dafür kann die 3D Form sein, welche FEMM Flach in 2D aufzeichnet wird. Der Betrag von der Feldstärke aus Z -Achse fließt in die X- und Y-Achse rein bzw. wird

auf die Fläche um den Magnet verteilt aufaddiert, so dass die Magnetfeldstärke stärker erscheint. Nur der Bezugwert weißt geringste Differenz auf. Die "Bezugpunktmethod" ist wichtig da dieser Prinzip bei Simulation von Halbach-Ringe angewendet wird, welche die Feldstärke in der Mitte des jeweiligen Rings bestimmen soll.

5.2 Mess- und Simulationsergebnisse der Dipol-Halbach-Arrays

In diesem Abschnitt werden die simulierten Werte für die Magnetringe verglichen. Da es eine Simulation mit linearer und einer mit nicht linearer Kennlinie gibt, wird die Simulation ausgewählt, die dann genauere Werte liefert.

Bei der Simulation von einzelnen Magnete im Kapitel 2 hat die lineare B-H Magnetkennlinie im Vergleich mit der nichtlineare keine Unterschiede gezeigt. Hingegen bei der Simulation von Magnetringen zeigt sich ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Simulationen. Grund dafür kann die große Anzahl an Magneten sein, welche die Komplexität der Simulationsberechnung erhöhen.

In der Tabelle: 5.2 sind die Feldstärken der simulierten Daten mit linearer und nichtlinearer Kennlinie dargestellt. Die Simulation mit der nichtlineare Kennlinie hat geringere Abweichungen im Vergleich mit dem Idealwert.

Die Simulationsergebnisse mit nichtlinearer Kennlinie haben einen ähnlichen Verlauf der Feldstärke in der Mitte der Magnetringe, wie bei der Messung. Mit einem relativ flachen Verlauf.

Tabelle 5.2: Vergleich der Magnetringe, Idealwert, Simulation und Messung in der Ringmitte

Ringtyp (idealer Wert in kA/m)	7,5	4	6	10	15
Messung Ringmitte in kA/m	7,5	3,8	6,2	10,05	15,2
Abweichung in % zu Idealwert	0	5	3,33333333	0,5	1,33333333
Simulation linear in kA/m	7,50047	4,62592	6,99124	9,72832	18,5037
Abweichung in % zu Idealwert	0,006266667	15,648	16,5206667	2,7168	23,358
Simulation nichtlinear in kA/m	7,50047	3,9473	6,45446	9,88686	15,7892
Abweichung in % zu Idealwert	0,006266667	1,3175	7,57433333	1,1314	5,26133333

5.3 Messungen mit der TMR - Matrix an der Rotationsvorrichtung

Um die Rotationsvorrichtung in Betrieb zu nehmen sind zwei Schritte nötig. Zu einem soll der Schrittmotor eingestellt werden. Er soll mit einer mäßigen Geschwindigkeit anlaufen, und in bestimmten Abständen stoppen, um einen Messwert aufnehmen zu können. Als Zweites soll die Sensormatrix bei jedem Stoppen des Schrittmotors mit Gebermagneten, genug Zeit bekommen, um ein Messwert aufzunehmen. Die Positionierung des Gebermagneten erfolgt manuell. Die Rotationsvorrichtung hat ein 360°Winkelmesser über den Gebermagneten installiert. Jedes Mal, wenn die Messung anfängt soll überprüft werden, ob die Spitze der Rotationseinheit in Richtung 0° zeigt. Wenn es nicht der Fall ist soll der Motor auf 0° Richtung gedreht werden.

Bei den Magnetringen wurde geachtet, dass am Anfang der Nordpol des Magnetringes in Richtung des 0° zeigt.

Es wurden Messungen ohne Störfeld aufgenommen, wo kein Magnetring in der Rotationsvorrichtung lag. Sowie acht Messungen mit Störfeld. Das heißt zwei Messungen pro Magnetring. Eine Messwertaufnahme mit dem Magnetring bei 0 Grad, und eine Messaufnahme mit einer Drehung des Magnetringes um 90° im Uhrzeigersinn. Die Messaufnahmen wurden so gewählt, dass das magnetische Störfeld des Magnetrings abwechselnd die X und Y Achse der Sensormatrix durchquert.

Zwischen dem Gebermagneten und Sensormatrix wurde der Abstand auf 24 mm über die sechs Edelstahlgewindestangen mit Flügelmuttern an der Rotationsvorrichtung eingestellt.

Die Messungen erfolgten in Abständen von 5°. Der Schrittmotor soll in 2 Sekunden eine Drehung um 5° machen, dann stoppen. Bei 360° sind es genau 72 Schritte:

$$\frac{360^\circ}{72} = 5^\circ \quad (5.3)$$

Es wurde folgendes Programmablauf erstellt:

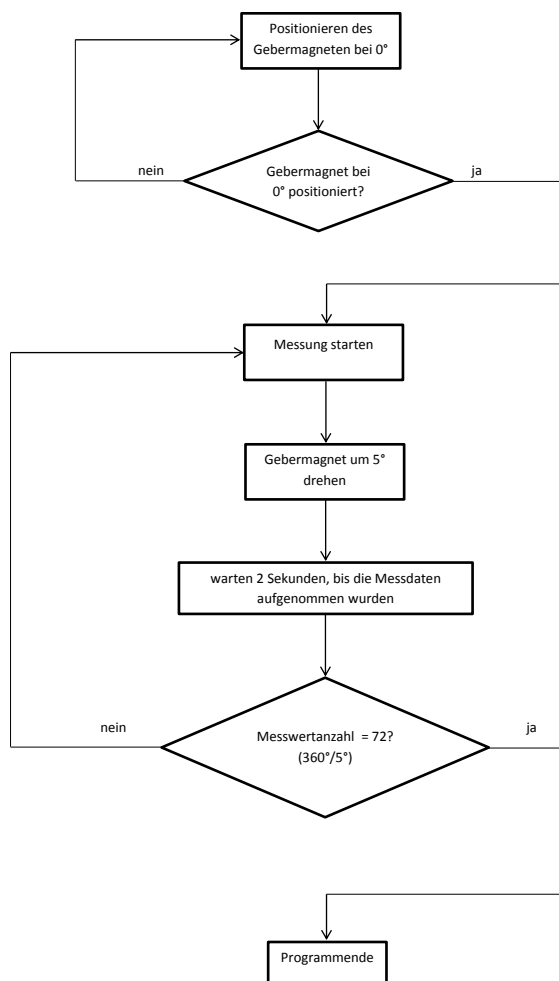


Abbildung 5.13: Flussdiagramm: Rotationsvorrichtung Programmablauf

5.3.1 Würfelmagnet W10 als Gebermagnet ohne Störfeld

Die Erste Messung erfolgt ohne Magnetrings. Der Gebermagnet rotiert über die Sensor-matrix und es werden Werte aufgenommen und geplottet:

In der Abbildung 5.14 sind im linken Bild Kreise zu sehen. Die Kreise geben das Magnet-feld des Gebermagneten wieder. Da der Gebermagnet mittig über die Magnetsensoren sich befindet, ist die Feldstärke in der Mitte größer als am Rande der Sensormatrix zu beobachten. Der Verlauf des SINUS(rot) und COS(blau) Kennlinien ist in den beiden Fällen gut zu erkennen.

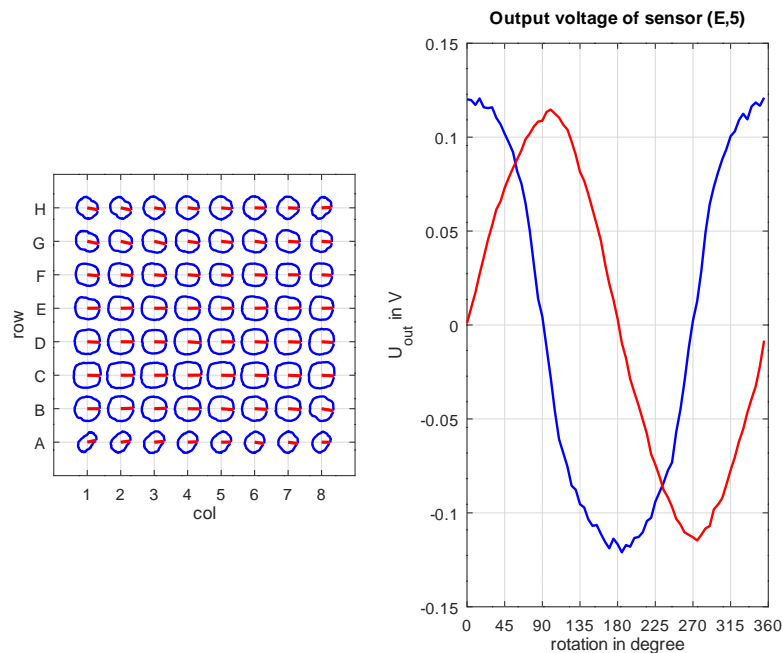


Abbildung 5.14: Messung ohne Störfeld

5.3.2 Würfelmagnet W10 als Gebermagnet mit Störfeld

Als nächstes werden die Magnetringe auf dem Magnetringhalter eingebaut und mit drei Nylonschrauben fixiert. Es wurden zwei Messungen mit je einem Magnetring ausgeführt. Eine bei 0 Grad. Sobald erste Messung ausgeführt ist, wurde der Magnetring um 90°gedreht und folgend die zweite Messung ausgeführt. Alle Magnetringe weisen eine passende Bohrung auf und sind ohne Schwierigkeit mit geeigneten Schrauben befestigt werden. Der hohe 15 kA/m Magnetring musste mit 15 mm hohe Nylonschrauben fixiert werden. Alle anderen Magnetringe sind mit 10 mm Nylonschrauben fixiert. Beim Einbau der 15 kA/m Magnetring mit 41 mm Höhe, musste die Rotationsvorrichtung in der Höhe verstellt werden, um den Magnetring einzubauen. In der Abbildung: ?? sind die Werte der aufgenommene Sensormatrix bei verschiedene Feldstärken für 0 und 90°zu sehen.

Im Vergleich mit der Messung ohne Störfeld sind die blauen Ringe im Linken Bild nicht mehr zu erkennen. Unter Einfluss des Störfelds sind die blauen Ringe "platt" geworden. Eine vergrößerte Darstellung einer Messung des 10 kA/m Magnetringes mit Störfeld bei 0°ist in der Abb.: 5.23 zu sehen.

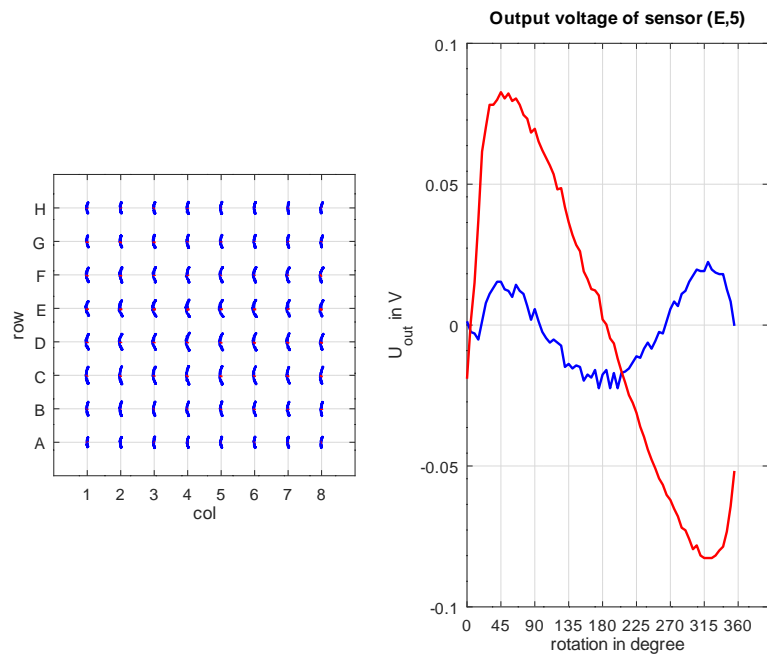


Abbildung 5.15: Messung mit Störfeld 4 kA/m bei 0°

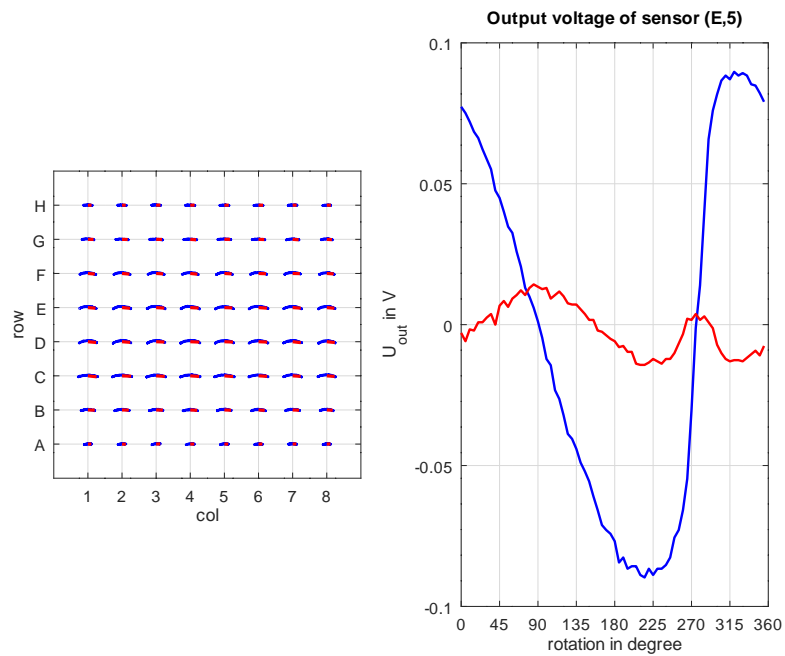
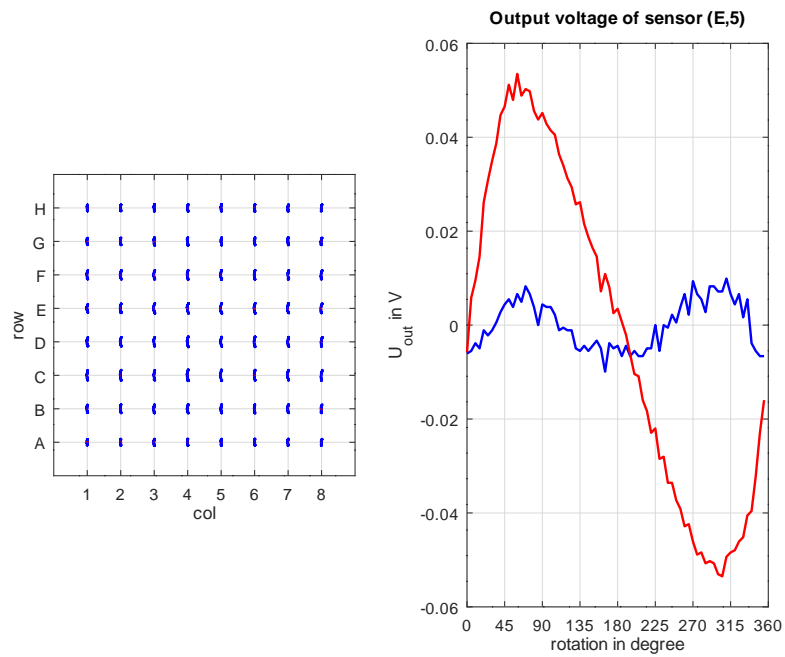
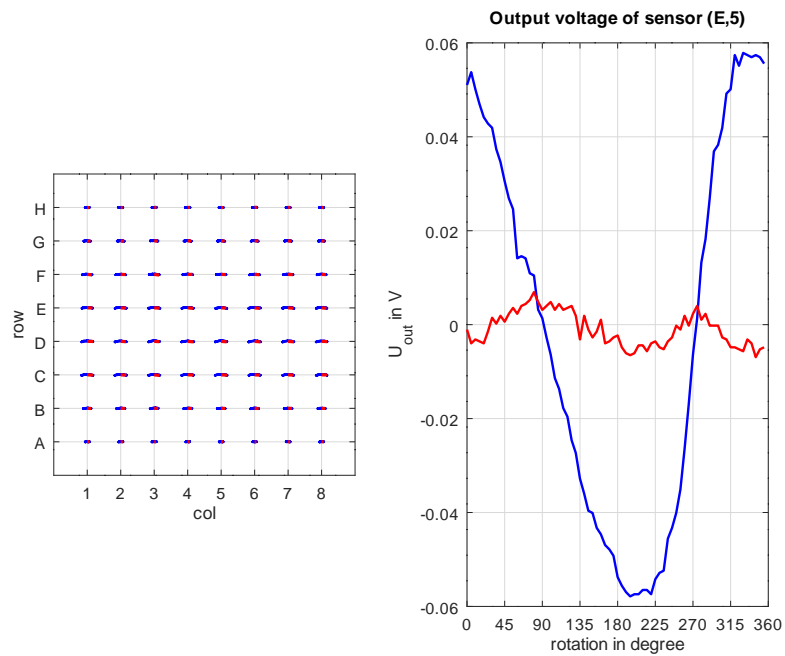


Abbildung 5.16: Messung mit Störfeld 4 kA/m bei 90°

Abbildung 5.17: Messung mit Störfeld 6 kA/m bei 0° StörfeldversetzungAbbildung 5.18: Messung mit Störfeld 6 kA/m bei 90° Störfeldversetzung

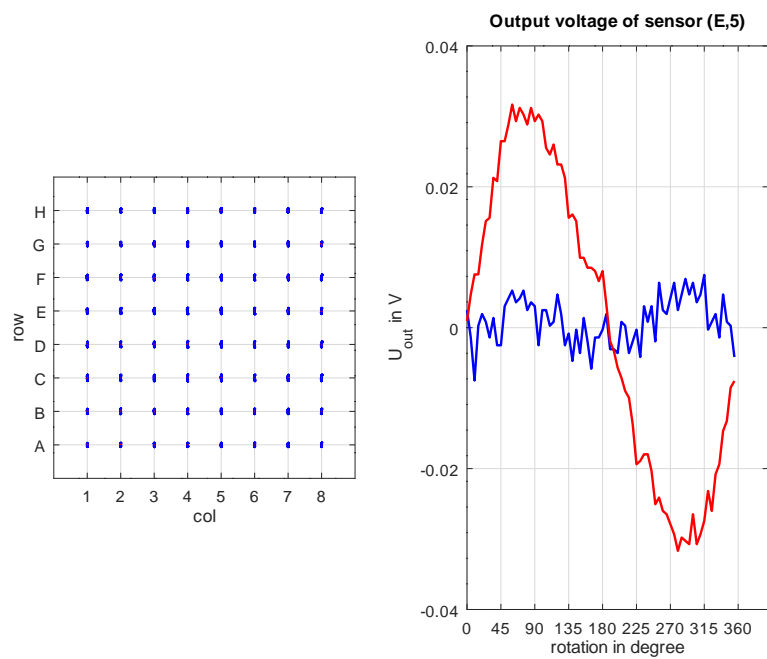


Abbildung 5.19: Messung mit Störfeld 10 kA/m bei 0° Störfeldversetzung

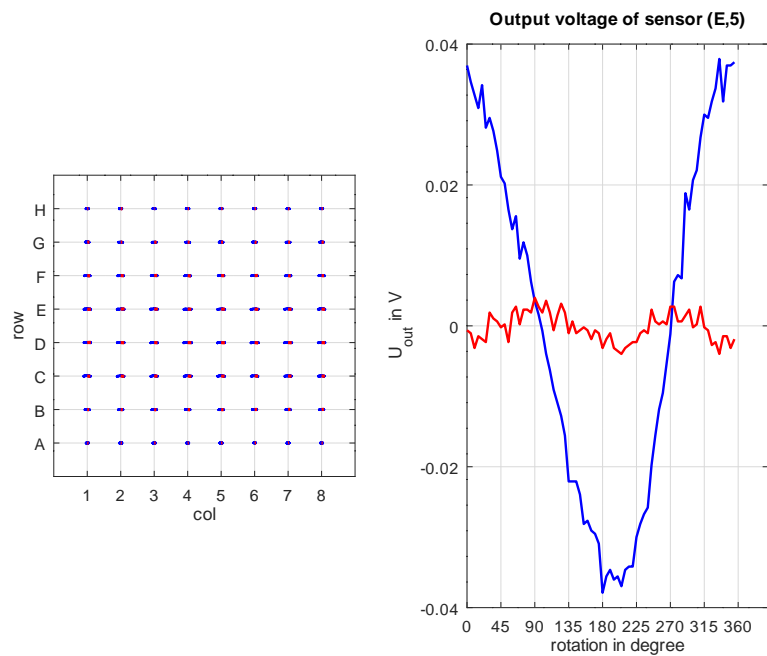


Abbildung 5.20: Messung mit Störfeld 10 kA/m bei 90° Störfeldversetzung

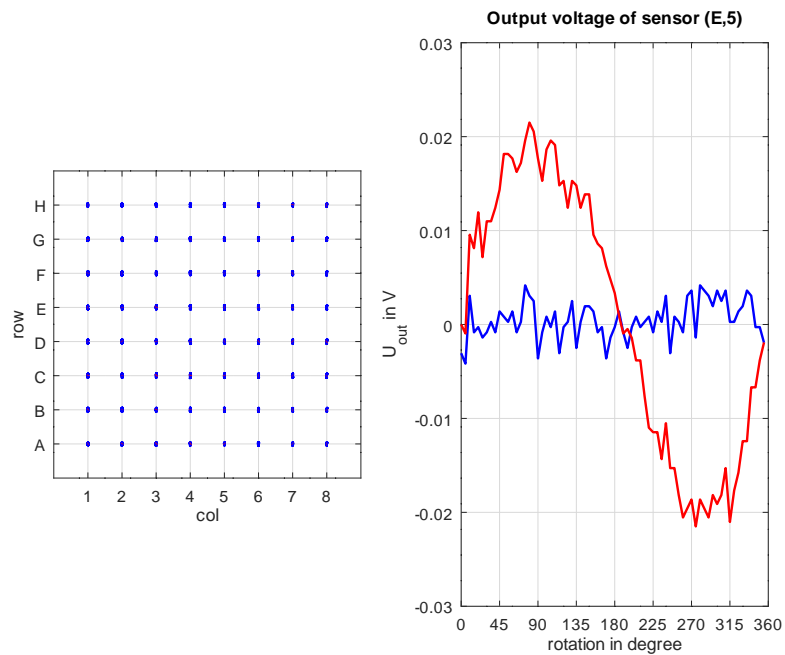


Abbildung 5.21: Messung mit Störfeld 15 kA/m bei 0° Störfeldversetzung

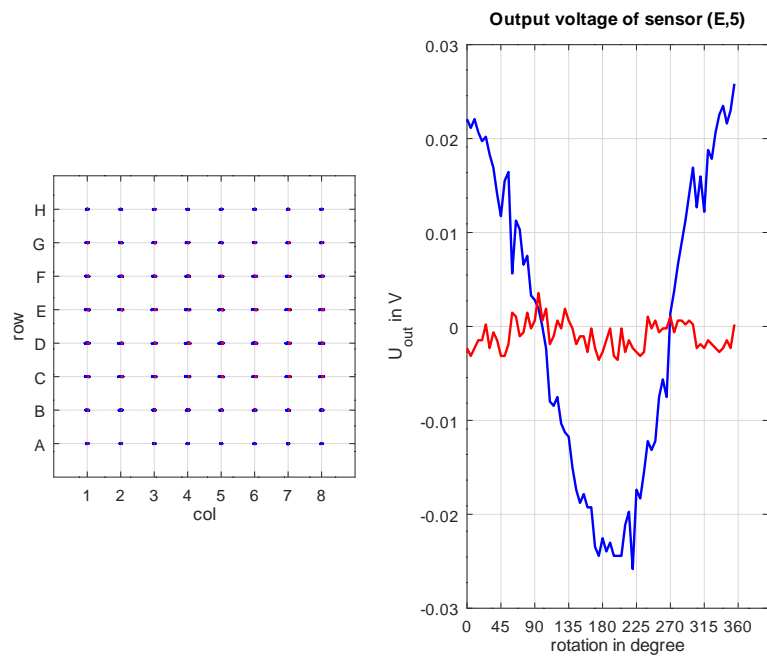


Abbildung 5.22: Messung mit Störfeld 15 kA/m bei 90° Störfeldversetzung

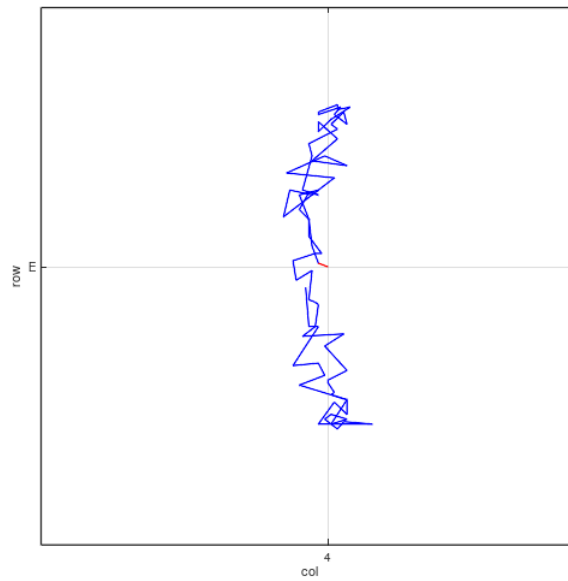


Abbildung 5.23: Messung mit Störfeld, vergrößert dargestellt.

Das Octave Quellcode für die Motorsteuerung und Speicherung der Messdaten in eine Datei befindet sich im Anhang, [D.17](#). Das Octave Quellcode für das Auslesen aus Datei befindet sich auch im Anhang, [D.18](#).

6 Schlussfolgerung

6.1 Fazit

In dieser Bachelorarbeit wurden Halbach-Ringe mittels Simulation erstellt worden. Die FEMM Software kann gut 2D Formen simulieren bzw. berechnet das magnetische Feld relativ genau in einem Punkt, was den Zweck erfüllt hat. FreeCAD hat sich als brauchbare 3D Konstruktionssoftware erwiesen, welche mit der Version 0.17 stabil läuft. Im Internet gibt es zahlreiche Tutorien in Youtube für FreeCAD, LaTeX, die das Erlernen dieser Softwaretools erleichtern.

6.2 Ausblick

Folgendes könnte zukünftig verbessert werden:

- Die Magneten nach Koerzitivfeldstärke sortieren. In Kapitel 5 wurden die Magnete vermessen. Es könnten die Magnete nach stärkeren oder schwächeren Magnetfeldern sortiert werden. Das würde eine Feldstärkenverbesserung bedeuten. Baut man die stärkeren Magneten im Ring ein, könnte die Feldstärke um bis zu 10% erhöht werden. Alle Ringe, auch der aus Vorarbeiten, besitzen Magnete mit unsortierte Koerzitiv-Feldstärke von 860 - 955 kA/m. Angefangen mit dem ersten Magnetring, könnten alle Magnete gemessen und neu eingeordnet werden. Das würde ein homogeneres Feld erzeugen.
- Die Simulation in 3D würde eine genauere Feldstärke im Raum ergeben als in 2D. Auch in diesem Fall sollte man auf eine nichtlineare Kennlinie setzen, in welchen die Entmagnetisierungskennlinie mit dem eingesetztem Magnetmaterial übereinstimmt. Diese Entmagnetisierungskennlinien sollten beim Magnethersteller auffindbar sein. Üblicherweise enthalten die Händlerangaben keine Information über die Entmagnetisierungskennlinien.
- Möglich wäre auch eine Initialisierungsfahrt des Gebermagneten aufzubauen, um den Nullpunkt Startposition der Messung zu bestimmen. Zur Zeit wird der Motor um je 1° gedreht werden, um die Nulllage einzustellen.

Literaturverzeichnis

- [1] SENSITEC, Körber S.: AA700 Magneto-resistive Sensoren. Für Winkel- und Linear-Positionsmessung. In: *Datenblatt* (April 2016)
- [2] K&J MAGNETICS: Beratung, Verkauf von Neodymmagnete. <https://www.kjmagnetics.com>. – Forschungsbericht
- [3] H. SOLTNER, P. B.: Dipolar Halbach Magnet Stacks Made from Identically Shaped Permanent Magnets for Magnetic Resonance. In: *Wiley InterScience* (2010), Nr. 36A, S. 211–222
- [4] Webcraft GmbH, Berechnung der Flussdichte. www.supermagnete.com/faq/flux
- [5] HALBACH, K.: Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material. In: *Nuclear Instruments and Methods* 169 (1980), Februar, 1–10. [http://dx.doi.org/10.1016/0029-554X\(80\)90094-4](http://dx.doi.org/10.1016/0029-554X(80)90094-4). – DOI 10.1016/0029-554X(80)90094-4
- [6] D.HOWE, Z.Q.Zhu: Halbach permanent magnet machines and applications. – Forschungsbericht
- [7] Halbach-Array. In: *Wikipedia* <https://de.wikipedia.org/wiki/Halbach-Array>
- [8] WIKIPEDIA: Simulation. <https://de.wikipedia.org/wiki/Simulation>
- [9] BERGER, Uwe ; HARTMANN, Andreas (Hrsg.) ; SCHMID, Dietmar (Hrsg.): *3D-Druck - Additive Fertigungsverfahren*. 2. Auflage. Haan-Gruiten : Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 2017 (Bibliothek des technischen Wissens). – ISBN 9783808550342. – Literaturangaben
- [10] *SDP, GT2 Pulley, Pitch Diameter, Outside Diameter*. <http://www.sdp-si.com/D265/PDF/D265T016.pdf>
- [11] WIKIPEDIA: [https://de.wikipedia.org/wiki/Übersetzung_\(Technik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Übersetzung_(Technik))
- [12] Beschreibung Schrittmotor Trinamic PD3-140-42-SE-485. https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/Drives_Documents/PD-140-42-SE_manual.pdf

Anhang

A Geschichte des 3D-Drucks

3D Drucker sind schon heute bekannt für die Herstellung von Produkten aller Art, seien es Technische Bauteile, künstlerische Objekte, Produktmodelle, Werkzeuge, Kleidungsstücke oder medizinische Prothesen. Im Jahre 1986 wurde erstmals ein Fertigungsverfahren in den USA von Charles W. Hull entwickelt und patentiert. Als Werkstoff diente ein flüssiger Kunststoff, der durch Belichtung mit einem Laserstrahl stellenweise verfestigt werden konnte. In dünnen Schichten aufbauend ermöglichte es die Fertigung komplexer Teilegeometrien. Derartige in 3D-Technik erfolgende Herstellungsverfahren werden auch als additive oder generative Fertigungsverfahren (AM- Additive Manufacturing) bezeichnet [9].

B Messung der Magnete

Tabelle B.1: Messung der 51 W10 Magnete

N\mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	394	331	264	202	156	122	97	79	61	51	42	18	9	5	3	2	1,6	1,1	0,9
2	396	310	247	197	157,4	121,8	96,6	75	60,7	49,2	39,9	17,4	9,1	5,3	3,4	2,2	1,6	1,1	0,8
3	398	327	255	198	152	117	97	75	62	48,8	40,9	17,7	9,4	5,4	3,4	2,3	1,6	1,2	0,9
4	395	333	264	197,2	162,8	125,7	97,8	77,8	63,6	49,8	41,7	18,2	9,4	5,6	3,5	2,4	1,7	1,2	0,9
5	400	332	261	215	168	126	100	82,2	65,1	52,3	43,8	18,8	9,9	5,7	3,6	2,5	1,7	1,3	1
6	397	318	254	197,5	152,3	120,9	94,8	76,7	61,1	50,1	40,8	17,9	9,3	5,5	3,5	2,4	1,7	1,2	0,9
7	396	325	246	195,5	154,3	118	95,3	77	61,9	49,3	40	17,3	9,3	5,5	3,5	2,4	1,7	1,2	0,9
8	397	334	260	206	160,2	123,6	101,5	79,4	62,1	50,7	42,4	18,18	9,41	5,55	3,54	2,38	1,68	1,24	0,93
9	400	340	269	212,1	165,3	129,5	105,2	87	66,2	53	43,5	18,94	9,96	5,75	3,67	2,47	1,75	1,28	0,971
10	399	328	261	204,7	156,5	121,3	96,7	77,9	63,5	50,1	42,6	18,41	9,51	5,54	3,52	2,38	1,69	1,25	0,94
11	396	315	246	193,5	150,3	116,5	94,7	74	60,4	48,9	40	17,67	9,22	5,49	3,48	2,36	1,67	1,23	0,93
12	400	336	266	205,4	162,4	122,8	102,6	79,2	63	50,4	41,2	18,55	9,56	5,56	3,51	2,41	1,7	1,25	0,94
13	399	338	260	207,8	161,8	127	105	81	65,3	51,9	43,2	18,7	9,55	5,55	3,57	2,4	1,7	1,26	0,95
14	394	340	250	202	162	129	101	78,4	63,8	50,5	42,9	17,9	9,46	5,55	3,54	2,39	1,67	1,23	0,93
15	393	326	252	203,7	159,7	126,7	101,3	79,3	66,2	52,1	42,8	18,31	9,53	5,61	3,55	2,41	1,68	1,25	0,94
16	400	339	263	215,8	165,8	133,3	104,6	81,3	66,4	52,4	42,9	18,8	9,79	5,71	3,64	2,43	1,73	1,27	0,963
17	393	319	250	193,6	148,4	114,6	96,8	79,6	62,2	49,2	42,3	18,05	9,3	5,44	3,48	2,33	1,65	1,21	0,92
18	396	335	265	207,8	164,5	126	101,3	80,5	65,8	52,2	42,8	18,52	9,64	5,61	3,57	2,41	1,71	1,26	0,957
19	404	336	271	216	162,5	130	104,6	82,9	66,2	48,3	43,3	18,67	9,7	5,62	3,57	2,4	1,71	1,25	0,94
20	396	332	271	211,7	165,4	130	105	84,2	67,3	53,6	43,8	18,9	9,87	5,62	3,6	2,43	1,7	1,26	0,95
21	394	325	261	209,4	159,4	124	98,7	81,3	64,4	51,1	42,3	18,27	9,66	5,59	3,55	2,4	1,67	1,23	0,93
22	404	333	262	215	161,2	121,6	98,5	79,7	62,5	51,4	42	18	9,46	5,53	3,5	2,37	1,68	1,23	0,92
23	398	321	257	196	157,5	118	94,5	75,2	63	48,8	41,7	17,8	9,41	5,52	3,52	2,37	1,67	1,23	0,92
24	395	339	271	213	162,3	129,3	103,6	83,1	64,4	52,1	42,8	18,62	9,64	5,66	3,57	2,4	1,7	1,23	0,93
25	399	332	259	209	153	122,8	101,4	80,4	62,1	51,3	41,2	18	9,42	5,51	3,51	2,37	1,67	1,22	0,93
26	398	328	257	205,1	159,5	127,4	101,5	80,6	62,6	49,4	41,6	18,16	9,39	5,55	3,54	2,37	1,67	1,23	0,925
27	394	335	272	209	158,5	129,2	102,7	81	65	52	42	18,44	9,57	5,55	3,52	2,39	1,666	1,23	0,93
28	398	332	260	201,5	162,3	121	101	77,3	63,1	50,5	42,3	18,23	9,54	5,53	3,53	2,37	1,67	1,226	0,928
29	396	331	268	209,2	161	126	98,2	80,3	64,2	50,5	42,4	18,3	9,55	5,54	3,53	2,38	1,66	1,21	0,915
30	398	340	261	201,2	159,1	125,3	101,1	80	63,6	51,8	41,8	18,5	9,55	5,59	3,57	2,4	1,67	1,23	0,92
31	402	330	255	202,9	160,5	122	98,4	81,2	63,4	50	41	18,18	9,43	5,57	3,56	2,36	1,67	1,22	0,92
32	398	322	260	205	153,7	121,5	96,8	75	62,1	49,5	41,5	18	9,44	5,47	3,5	2,35	1,65	1,21	0,91
33	395	327	259	205,6	156,1	125,2	99,2	80,1	63,6	51,6	43	18,4	9,6	5,59	3,54	2,39	1,69	1,24	0,927
34	398	329	262	207	159	124	99,5	79,5	64,4	51,3	42	18,3	9,45	5,52	3,54	2,37	1,67	1,22	0,92
35	396	330	259	207	158,8	121	98,3	80,4	63,1	51,3	41,5	18,33	9,47	5,51	3,51	2,37	1,68	1,22	0,922
36	397	342	279	222	167	131	107,5	85,5	66,2	53,4	44	18,87	9,72	5,65	3,61	2,45	1,7	1,24	0,935
37	404	335	268	215	165,4	131,1	106,5	85,7	67,6	54,6	44,5	19,15	9,9	5,69	3,62	2,43	1,7	1,25	0,94
38	401	342	264	215	157,1	122,4	101,9	79,1	64,6	50,4	41,8	18,24	9,62	5,56	3,51	2,38	1,68	1,23	0,935
39	400	341	270	216	166	124,6	104,4	82,2	64,8	51,8	43,1	18,55	9,63	5,65	3,57	2,43	1,7	1,24	0,934
40	399	325	252	191	151	116,5	92,6	74,4	60,6	48,2	39,8	17,45	9,2	5,4	3,46	2,35	1,65	1,21	0,91
41	399	345	270	209	163,5	131	103	82,4	64,6	52,1	42,1	18,6	9,51	5,55	3,54	2,4	1,69	1,23	0,93
42	404	334	273	214	166,4	128	102	82,2	64,4	51,2	43,5	18,56	9,75	5,69	3,6	2,41	1,7	1,24	0,93
43	397	338	263	213	163,3	126,3	101,8	81,1	65,7	53,2	42,2	18,62	9,65	5,59	3,54	2,38	1,67	1,22	0,914
44	404	338	259	200	160	125	99	80,2	63,2	50,4	41,4	17,67	9,35	5,46	3,51	2,35	1,67	1,22	0,92
45	397	334	263	203,3	162,2	122	100,7	79,5	62,6	50,5	42,3	17,96	9,32	5,49	3,46	2,37	1,67	1,22	0,92
46	401	325	259	200,9	156,4	121,6	99,8	77,7	61,9	49,6	41,9	17,9	9,44	5,49	3,5	2,47	1,67	1,21	0,91
47	393	336	265	208	166	128	103	81,3	64,5	51,6	43,2	18,72	9,77	5,58	3,55	2,35	1,67	1,22	0,92
48	397	333	261	201	161	121,5	101,5	80,7	63,2	51,8	41,8	18,18	9,3	5,51	3,5	2,36	1,66	1,21	0,91
49	399	345	264	212	167,3	126,7	103,8	80,8	64,4	52,3	42,5	18,39	9,47	5,59	3,51	2,37	1,66	1,22	0,92
50	396	334	264	206	157	120	97	78,7	62,8	50,5	41,7	18,03	9,3	5,53	3,48	2,36	1,66	1,25	0,917
51	407	343	271	226	168	123	102	84	66,5	54,2	43,9	18,9	9,76	5,68	3,6	2,4	1,68	1,23	0,926

Tabelle B.2: Messung der 32 W12 Magnete

N\mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	428	366	300	248	200,3	160,4	135,1	108,2	90,6	73,1	61,6	28,4	15,4	9,2	5,9	4	2,9	2,1	1,5
2	423	363	293	247	198	155	133	110,2	87,3	72,9	60,8	28,3	15,2	9,1	5,9	4	2,8	2,1	1,6
3	418	358	294	231	190,8	154,1	122,2	103,5	86,8	64,5	59,4	28	15,1	9	5,8	4,0	2,8	2,0	1,5
4	427	365	288	245	192,2	157,8	124,5	107	88,1	72	61,7	28,1	15,3	9,2	5,9	4	2,8	2,1	1,6
5	428	355	288	236,1	189,5	151,8	122	101,8	83,9	69,3	59,3	27,2	15	8,9	5,8	3,9	2,8	2	1,5
6	422	359	293	245	197	160,8	131,1	107,8	87,9	71,6	62,1	28,5	15,4	9,2	6	4	2,8	2,1	1,6
7	433	364	302	240	198,2	158,3	130,7	107	88,6	73	62,7	28,2	15,3	9,1	5,9	4	2,8	2,1	1,5
8	423	363	295	237	192,3	157	129,2	106	87,6	73,2	60,3	28,3	15,3	9,1	5,9	4	2,9	2,1	1,5
9	430	362	294	238	195,6	154,1	127,8	104,6	82,9	72	60,5	27,7	15,2	9	5,9	4	2,8	2,1	1,5
10	430	355	283	234	191,5	154	126,3	104,4	84,6	69,2	60,3	28	15	8,9	5,9	3,9	2,8	2	1,5
11	423	354	291	239	196	154,4	128	106,1	88,1	71,3	61,2	28,2	15,1	8,9	5,9	4	2,8	2,1	1,6
12	425	346	285	233	190	146,8	125,6	103,4	86	70,2	59,9	27,5	14,8	8,8	5,8	3,9	2,8	2,1	1,6
13	416	355	288	234	191	151	129,6	105,1	85,7	70,5	58,9	28	15,1	9	5,8	3,9	2,8	2	1,5
14	427	355	287	232	193	151	129	105,3	87	69,8	59	27,7	15	9	5,8	4	2,8	2,1	1,5
15	425	366	298	239	196,8	159	132,7	106,2	89,2	72,9	61	28,3	15,2	9,1	5,9	4	2,8	2,1	1,6
16	425	351	289	235	191	154,5	129,9	104,5	86	71,4	59,6	28,1	15,1	9	5,8	3,9	2,8	2,1	1,5
17	428	372	297	245	204	160,1	134,2	109,4	90,4	74,7	62,7	29,2	15,7	9,3	6	4,1	2,9	2,1	1,6
18	426	364	296	243	200	159	132,3	109,1	88,3	73,8	62	29	15,5	9,3	5,9	4	2,8	2,1	1,6
19	425	355	295	234	195	157	127,9	107	87,6	72,8	60	28,2	15,4	9,1	5,9	4	2,8	2,1	1,5
20	438	359	291	236	193	152	129	104,3	86,2	70,4	59,5	28	15,2	9	5,8	3,9	2,8	2	1,5
21	427	369	296	239	197	156,2	133,1	107,4	88,4	73	61	28,4	15,3	9,2	5,9	4	2,8	2,1	1,6
22	427	373	310	248	198,6	159,5	135,9	110	91,3	73,4	62,7	29,1	15,6	9,3	6	4	2,9	2,1	1,6
23	419	358	286	230	196	155,7	130,9	105,6	87,5	72,3	61,3	28,8	15,4	9,1	5,9	4	2,8	2	1,6
24	427	363	290	240	190	154,1	127,1	103,7	84,4	71,2	60,1	28,3	15,1	9	5,8	4	2,8	2	1,5
25	422	358	288	236	190	153,3	127,4	101,3	85	70	59,1	27,3	14,9	8,9	5,8	3,9	2,8	2	1,5
26	426	352	288	234	191	151,2	129,4	102,8	84,7	70,3	59,9	27,9	15	9	5,8	4	2,8	2	1,5
27	415	372	299	248	197	159,8	136,3	109,5	90,5	75	62,8	28,9	15,5	9,2	6	4	2,8	2,1	1,6
28	425	357	289	227	188	151,5	125,6	103,1	84	69,9	60	27,6	14,9	8,9	5,8	3,9	2,8	2	1,5
29	438	370	296	242	192	157,9	130,7	105,1	83,9	70,5	58,4	28,1	15	8,9	5,8	3,9	2,8	2	1,5
30	425	377	304	249	204	166,8	140,9	112,2	91	75,2	62,5	29	15,8	9,2	6	4,1	2,8	2,1	1,6
31	426	360	290	239	198	155,3	128	106,3	86,6	70,9	60,7	28,1	15	9	5,8	4	2,8	2,1	1,5
32	428	358	289	242	197,9	158,2	129,1	106,3	86,7	72,2	61,7	28,1	15,3	9,1	5,8	4	2,8	2,1	1,6

Tabelle B.3: Messung der 20 Q10 Magnete

N\mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	348	308	256	218	183	152	132	115	97	84	74	41	25	16	11	8	6	4	3
2	342	296	249	209	176	148	129	111	94	83	72	40	25	16	11	8	6	4	3
3	341	298	249	215	178	148	128	111	94	81	72	40	25	16	11	8	6	4	3
4	344	298	247	208	175	149	128	111	93	82	72	40	24	16	11	8	6	4	3
5	346	297	248	207	175	146	128	110	94	81	72	40	24	16	11	8	6	4	3
6	344	297	248	206	174	145	127	106	91	81	71	40	24	16	11	7	6	4	3
7	345	300	253	211	181	150	129	112	94	83	73	40	25	16	11	8	6	4	3
8	340	293,5	247	212	174	149	129	109	95	82	71	40	24	16	11	8	6	4	3
9	348	301	255	218	184	155	132	115	97	83	75	41	25	16	11	8	6	4	3
10	345	290	252	217	178	153	131	113	97	83	73	40	24	16	11	8	6	4	3
11	344	289	247	201	174	145	126	110	94	82	72	40	24	16	11	8	5,6	4	3
12	344	302	253	212	178	151	130	110	95	83	73	40	25	16	11	8	6	4	3
13	346	287	248	205	175	147	126	110	94	80	72	40	24	16	11	8	6	4	3
14	342	289	251	205	175	146	126	109	94	81	72	40	24	16	11	8	5	4	3
15	346	312	259	222	183	157	134	114	97	83	74	41	25	16	11	8	6	4	3
16	346	305	255	217	179	149	131	111	96	82	73	40	25	16	11	8	6	4	3
17	344	298	250	212	181	150	134	113	96	84	72	42	25	16	11	8	6	4	3
18	343	296	251	208	176	149	131	111	96	82	73	40	24	16	11	8	6	4	3
19	343	296	256	215	178	151	133	112	96	82	73	41	25	16	11	8	6	4	3
20	342	296	250	214	179	150	130	111	95	83	73	41	25	16	11	8	6	4	3

C Messung der Magnetringe

Tabelle C.1: Messung Magnetring 4 kA/m

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	10.04	9.13	8.25	7.67	7.31	6.95	6.9	6.79	6.93	7.05	7.32	7.7	8.49	9.41	10.4
2	8	6.95	6.61	6.24	6.01	5.82	5.8	5.63	5.85	5.97	6.16	6.36	6.83	7.42	8.4
3	6.7	6.1	5.6	5.36	5.2	4.95	4.86	4.7	4.85	4.9	5.2	5.4	5.7	6.25	6.8
4	5.64	5.4	4.87	4.71	4.54	4.4	4.39	4.34	4.4	4.56	4.6	4.8	4.9	5.02	5.32
5	4.95	4.83	4.56	4.3	4.25	4.15	4.05	4.04	4.08	4.15	4.3	4.48	4.55	4.83	4.95
6	4.68	4.4	4.1	4.15	4	3.9	3.9	3.82	3.9	3.97	4.14	4.27	4.32	4.55	4.7
7	4.5	4.28	4.12	4	3.98	3.95	3.91	3.81	3.91	3.96	4.01	4.1	4.31	4.37	4.56
8	4.47	4.17	4.09	4.07	4	3.9	3.91	3.8	3.91	3.9	4	4.1	4.17	4.29	4.55
9	4.43	4.22	4.13	4.07	4.05	4	3.99	3.98	3.9	3.89	4.12	4.2	4.34	4.42	4.51
10	4.83	4.44	4.42	4.21	4.06	3.97	3.9	3.9	4.02	4.06	4.13	4.2	4.28	4.38	4.52
11	4.84	4.54	4.32	4.38	4.26	4.12	4.11	4.09	4.02	4.12	4.17	4.36	4.54	4.7	5.1
12	5.35	4.9	4.86	4.67	4.57	4.4	4.39	4.39	4.4	4.5	4.58	4.69	5.02	5.16	5.28
13	6.4	5.86	5.55	4.94	4.6	4.57	4.53	4.52	4.6	4.8	5.05	5.21	5.48	5.86	6
14	7.7	6.97	6.35	6.3	5.95	5.73	5.4	5.38	5.79	5.85	5.87	6.02	6.42	6.87	7.5
15	9.8	8.9	7.7	7.42	7.1	6.8	6.79	6.71	6.73	6.97	7.02	7.4	8.2	8.81	9.5

Tabelle C.2: Messung Magnetring 6 kA/m

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	21.06	17.51	15.32	13.95	13.23	12.55	12.45	12.22	12.51	12.7	13.06	14	15.31	17.27	20.48
2	15	13.01	12	11.4	11.2	10.51	10.22	10	10.15	10.3	8.97	9.25	12.06	13.22	14.83
3	11.84	10.95	9.89	9.38	9	8.76	8.6	8.48	8.61	8.75	9.07	9.3	10.11	10.82	11.75
4	10.03	9.2	8.7	8.1	7.99	7.84	7.61	7.59	7.71	7.82	8.1	8.51	8.72	9.21	9.8
5	9	8.33	8.04	7.76	7.33	7.18	7.08	6.96	6.81	7.24	7.58	7.35	8.09	8.25	8.65
6	8.02	7.83	7.45	7.3	7.01	6.82	6.62	6.56	6.62	6.85	7.04	7.15	7.71	7.91	8.2
7	7.65	7.34	6.89	6.75	6.44	6.28	6.19	6.19	6.21	6.32	6.54	6.72	7	7.3	7.62
8	7.5	7.3	7	6.7	6.5	6.4	6.3	6.2	6.3	6.4	6.45	6.76	6.96	7.2	7.65
9	7.8	7.14	6.79	6.7	6.37	6.34	6.48	6.24	6.4	6.41	6.55	6.94	6.99	7.26	7.7
10	7.82	7.2	6.9	6.86	6.81	6.76	6.67	6.51	6.69	6.7	6.76	6.92	7	7.3	7.7
11	8.9	7.9	7.3	7.04	6.71	7.1	6.9	6.8	6.9	6.5	6.8	7.27	7.33	8.02	8.55
12	9.6	8.9	8.41	7.96	7.85	7.71	7.59	7.53	7.62	7.82	7.94	8.03	8.54	8.8	9.58
13	11.37	10.38	9.75	9.15	8.58	8.56	8.37	8.34	8.36	8.51	8.59	9.18	9.75	10.51	11.37
14	14.63	12.78	11.61	10.75	10.3	9.76	8.42	9.15	9.69	9.8	10.19	10.7	11.33	12.38	14.06
15	20.31	16.61	14.41	13.3	12.5	11.99	11.83	11.67	11.79	11.93	12.32	13.25	14.5	16.1	19.02

Tabelle C.3: Messung Magnetring 7,5 kA/m

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	20.36	17.48	16	14.8	13.8	13.1	12.9	12.8	13.2	13.5	14.1	15	16.2	18.2	21.5
2	16.5	14.6	13	12.1	11.8	11.3	11.2	11.15	11.23	11.34	12.35	12.5	13.2	14.5	16.6
3	13.1	12.1	11.2	10.9	10.5	10.1	10	10	10.2	10.3	10.5	10.8	11.5	12	13.3
4	11.2	10.6	10	9.5	9	8.95	8.88	8.7	8.8	9	9.2	9.6	10	10.4	11.7
5	10.2	9.5	9.3	9.1	8.8	8.6	8.5	8.4	8.5	8.6	8.9	9.1	9.2	9.8	10.7
6	9.5	9.3	9	8.7	8.4	8.2	8.05	7.95	8.1	8.2	8.3	8.5	8.8	9.2	9.6
7	9.4	8.7	8.3	8.02	8	7.8	8.1	7.61	7.7	8	8.2	8.3	8.5	8.9	9.4
8	9	8.3	8.3	8.2	7.9	7.7	7.6	7.5	7.6	7.7	7.8	8.1	8.4	8.5	8.7
9	9.1	8.8	8.4	8.2	7.8	7.6	7.7	7.6	7.6	7.9	8	8	8.3	8.6	9.3
10	9.8	9.3	8.9	8.5	8.3	7.9	7.7	7.6	7.9	8.3	8.4	9.1	9.2	9.3	10.1
11	10.4	10.3	9.9	9.2	8.5	8.2	8.2	8.1	8.6	9	9.2	9.3	9.4	9.5	10.4
12	12	10.5	10.08	9.94	9.2	9.2	9.4	8.6	9.2	9.3	9.5	9.7	10.2	10.3	11.3
13	13.4	12.2	11.4	11.2	10.6	10.2	9.8	9.64	10	9.8	10.2	10.6	11.2	12	13
14	16.2	14.8	14	12.9	12.5	12.1	11.8	11.7	11.4	11.3	12	12.6	12.8	13.8	15.6
15	21.62	18.4	16.3	15.3	14.2	13.7	13.4	13.15	13.5	13.7	14.3	14.8	15.7	17.33	20.7

Tabelle C.4: Messung Magnetring 10 kA/m

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	24.8	22	20.12	19.5	18.1	17.45	17.2	16.92	17.26	17.54	17.97	19.04	20.33	22.2	25.1
2	19.33	17.8	16.6	15.9	15.5	14.89	14.9	14.8	15.03	15.06	15.2	16.03	16.83	18.05	19.94
3	16.5	15.4	14.45	14.01	13.45	13.23	12.78	12.98	12.98	12.9	13.49	13.82	14.6	15.6	16.95
4	14.66	13.87	13.2	12.61	12.2	12.05	11.91	11.78	11.82	12.03	12.25	12.4	13.2	13.65	14.71
5	13.32	12.7	12.4	11.5	11.27	11.2	11.05	11.01	11.17	11.24	11.62	11.7	12.14	12.83	13.02
6	12.34	11.74	11.2	11.11	10.83	10.48	10.43	10.52	10.45	10.66	11.08	11.1	11.42	12.14	12.67
7	11.74	10.91	11.03	10.64	10.53	10.12	10	10.05	10.2	10.35	10.74	10.6	11.2	11.52	11.82
8	11.71	11.32	11.01	10.8	10.31	10.2	10.18	10.05	10.16	10.17	10.18	10.45	10.97	11.34	11.9
9	11.7	11.3	10.9	10.67	10.47	10.4	10.09	10.09	10.1	10.13	10.5	10.72	11.98	11.57	11.65
10	12.3	11.92	11.45	11.05	10.85	10.51	10.58	10.58	10.5	10.56	10.57	10.67	11.15	11.2	12.4
11	13.4	12.78	11.75	11.56	11.5	11.13	10.66	11	11.9	11.14	11.38	11.44	11.78	12.3	13
12	14.3	13.6	12.89	12.58	12.32	11.99	11.89	11.85	11.91	11.88	12.08	12.42	12.95	13.38	14.2
13	16.44	15.43	14.73	14.03	13.46	13.08	12.92	13.01	13.11	13.21	13.35	13.91	14.29	15.24	16.67
14	19.9	18.2	16.6	15.8	15.26	14.66	13.89	13.3	14.36	14.66	15.23	15.6	16.55	17.8	19.38
15	25	22.2	19.98	18.61	17.81	17.01	16.87	16.78	16.93	17.1	17.77	18.62	20.04	21.6	24.3

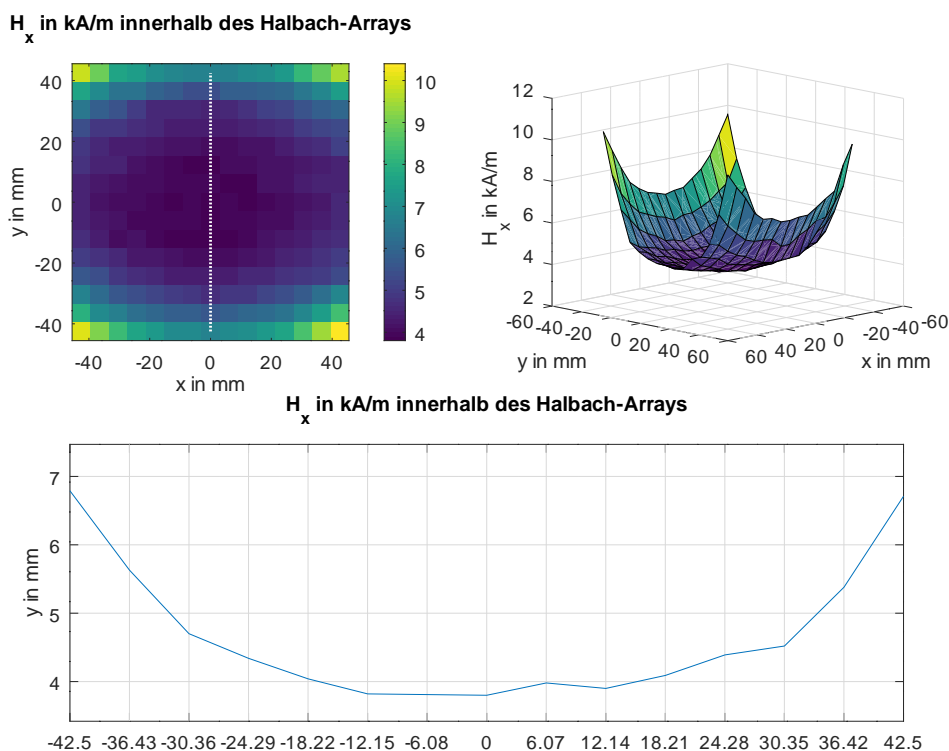


Abbildung C.1: Aufzeichnung: Messung 4 kA/m Magnetring

Tabelle C.5: Messung Magnetring 15 kA/m

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	30	29.1	27.6	26.4	25.2	24.6	24.1	24	24.1	24.3	25.1	26.1	27.1	28.8	30.2
2	26.6	25	23.5	23	22	21.6	21.21	21	20.86	21.29	21.8	22.6	23.6	24.9	26.8
3	23.9	22.3	21.25	20.34	19.81	19.56	19.3	19.12	19	19.1	19.5	20.6	21	22.1	23.5
4	21	19.9	19.3	18.7	18.2	17.8	17.6	17.5	17.7	17.7	18	18.6	19.1	20	21
5	19.6	18.7	17.7	17.4	16.9	16.7	16.6	16.45	16.5	16.6	16.8	17.2	17.5	18.5	19.3
6	18.4	17.6	16.8	16.6	16.2	15.9	15.6	15.55	15.9	16.1	16.3	16.6	17.1	17.4	18.3
7	17.84	16.9	16.4	15.8	15.6	15.5	15.3	15.2	15.2	15.25	15.3	15.9	16.5	17.3	17.6
8	17.9	16.8	16.3	16.2	15.6	15.5	15.4	15.2	15.5	15.4	15.7	15.9	16.5	17	17.6
9	17.8	17.7	17.1	16.3	16.2	15.8	15.5	15.3	15.4	15.5	15.6	16.3	16.7	17	17.9
10	19	18	17.3	16.8	16.3	16.2	16.1	15.8	16.1	16	16.4	16.7	17.2	17.9	18.5
11	19.8	18.8	18	17.3	16.8	16.7	16.6	16.5	16.6	16.7	17	17.4	18	19	19.6
12	21.4	20.1	19	18.4	18.1	17.7	17.5	17.3	17.5	17.8	18.2	18.5	19.2	20.3	21.4
13	23.7	22	21	20.4	19.8	19.2	19.1	18.9	19	19.2	19.6	20.2	21	22.1	23.5
14	26.8	25.1	24	23	22.1	21.5	21.3	21.1	21.6	22	22.4	23.21	23.6	24.8	26.8
15	30	29.2	27.4	26	25	24.2	24	23.8	24.1	24.3	26	26.3	27.1	28.9	30.4

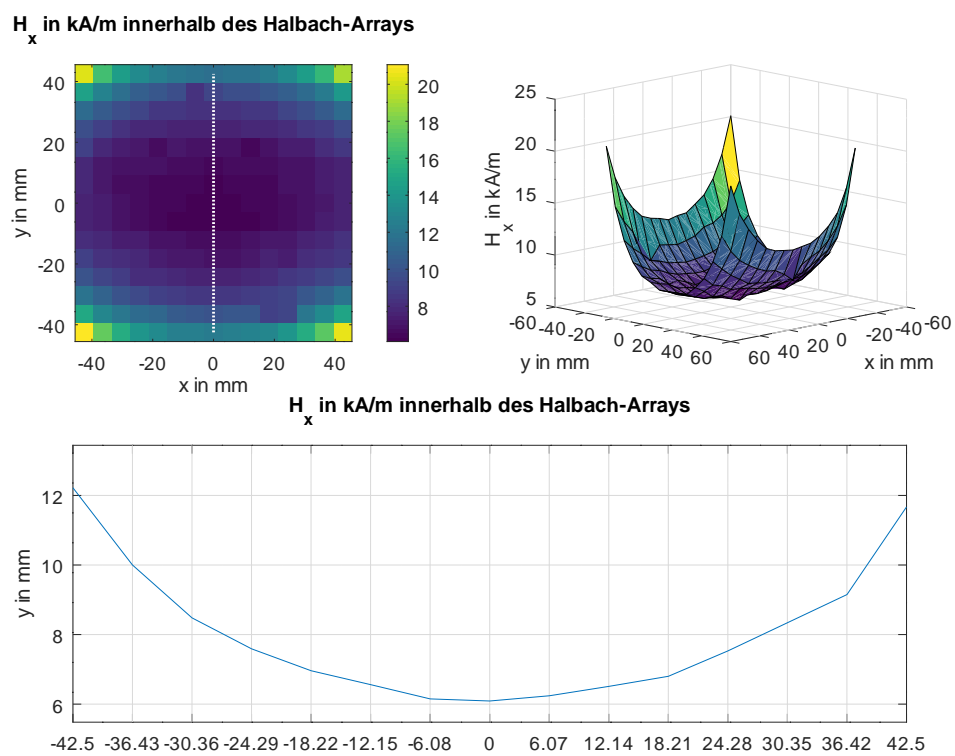


Abbildung C.2: Aufzeichnung: Messung 6 kA/m Magnetring

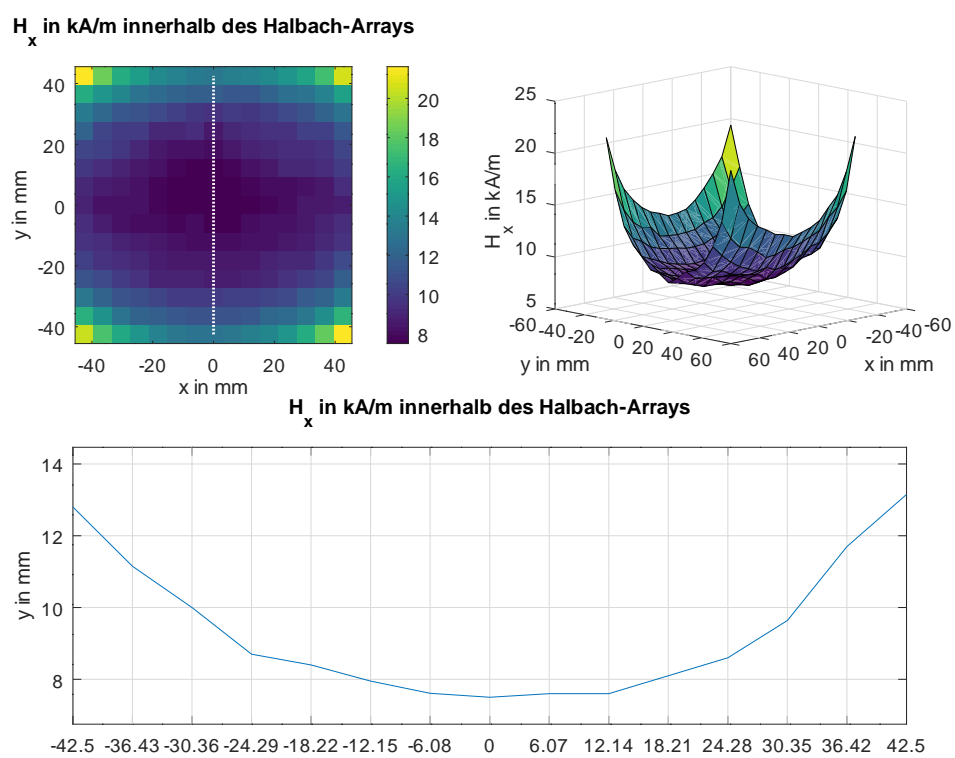


Abbildung C.3: Aufzeichnung: Messung 7,5 kA/m Magnetring

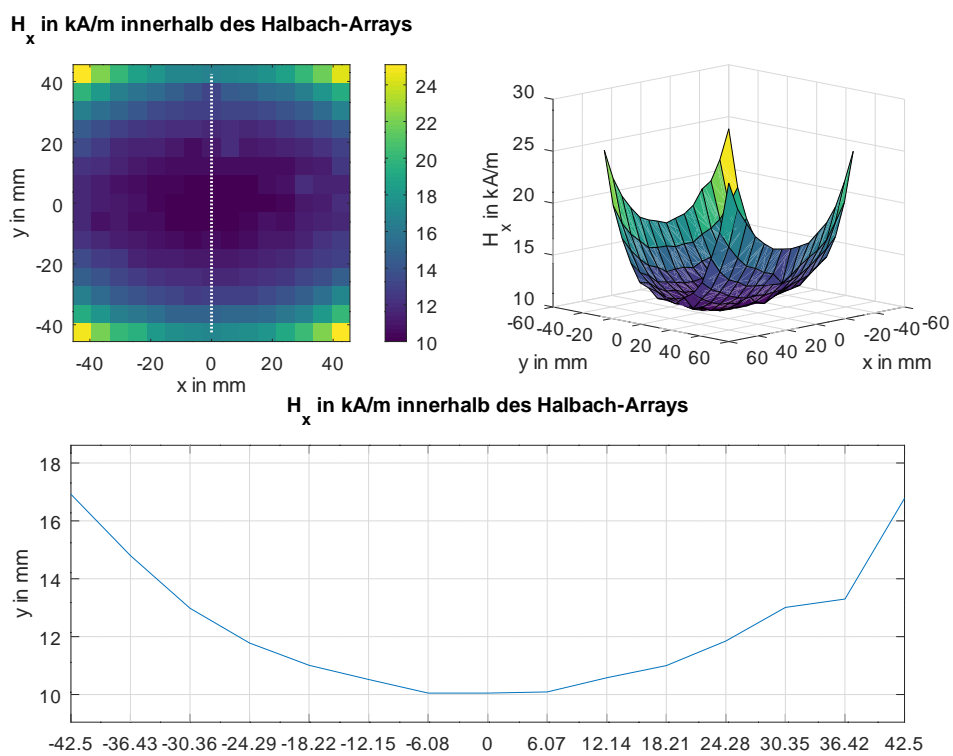


Abbildung C.4: Aufzeichnung: Messung 10 kA/m Magnetring

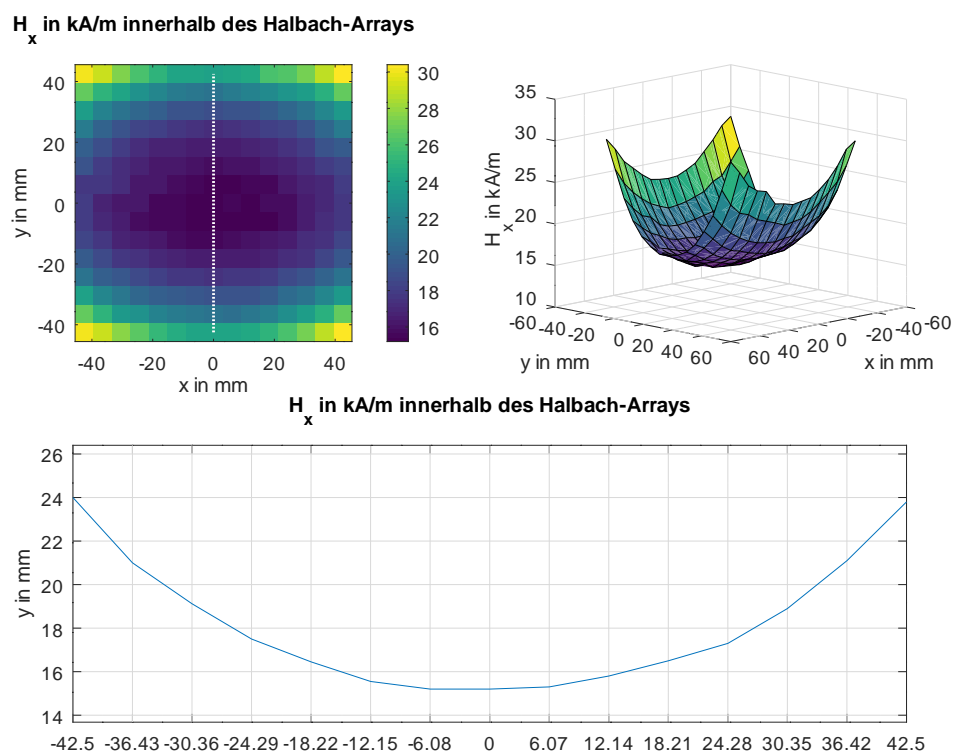


Abbildung C.5: Aufzeichnung: Messung 15 kA/m Magnetring

D Octave Quellcode

Listing D.1: Octave Quellcode: Messung, Berechnung und Simulation von W10 Magneten

```
1
2 %Vergleich: Messung, Berechnung, Simulation von W10 Magneten
3 %Author: Sergiu Grejdieru
4 %Datum: 05.08.2018
5
6
7 close all
8 clear all
9 clc
10
11 A = dlmread('berechnen_10_10_10_N42.txt');
12 D = dlmread('Mittelwert_Messung_10_10_10.txt');
13 E = dlmread('Simulation_10_10_10_linear.txt');
14
15 figure(1)
16     plot(A(:,1),A(:,2), 'linewidth',1.5,...
17         D(:,1),D(:,2), 'linewidth',1.5,...
18         E(:,1),E(:,2), 'linewidth',1.5)
19
20
21     legend('Berechnet', 'Messung', 'FEMM Simulation')
22     title('Vergleich W10')
23     xlabel('Abstand in mm')
24     ylabel('B(z) in kA/m')
25     grid on
```

Listing D.2: Octave Quellcode: Messung, Berechnung und Simulation von Q10 Magneten

```
1 %Vergleich: Messung, Berechnung, Simulation von Q10 Magneten
2 %Author: Sergiu Grejdieru
3 %Datum: 05.08.2018
4
5 close all
6 clear all
```

```
7  clc
8
9  A = dlmread('berechnen_10_10_40_N42.txt');
10 D = dlmread('Mittelwert_Messung_10_10_40.txt');
11 E = dlmread('Simulation_10_10_40_linear.txt');
12
13 figure(1)
14
15     plot(A(:,1),A(:,2), 'linewidth',1.5,...
16         D(:,1),D(:,2), 'linewidth',1.5,...
17         E(:,1),E(:,2), 'linewidth',1.5)
18
19     legend('Berechnet', 'Messung', 'FEMM Simulation')
20     title('Vergleich 10 mm x 10 mm x 40 mm')
21     xlabel('Abstand in mm')
22     ylabel('B(z) in kA/m')
23     grid on
```

Listing D.3: Octave Quellcode: Messung, Berechnung und Simulation von W12 Magneten

```
1  %Vergleich: Messung, Berechnung, Simulation von W12 Magneten
2  %Author: Sergiu Grejdieru
3  %Datum: 05.08.2018
4
5
6  close all
7  clear all
8  clc
9
10 A = dlmread('berechnen_12_12_12_N52.txt');
11 D = dlmread('Mittelwert_Messung_12_12_12.txt');
12 E = dlmread('Simulation_12_12_12_linear.txt');
13
14 figure(1)
15
16     plot(A(:,1),A(:,2), 'linewidth',1.5,...
17         D(:,1),D(:,2), 'linewidth',1.5,...
18         E(:,1),E(:,2), 'linewidth',1.5)
19
20
21     legend('Berechnet', 'Messung', 'FEMM Simulation')
22     title('Vergleich 12 mm x 12 mm x 12 mm')
23     xlabel('Abstand in mm')
```



```

24     ylabel('B(z) in kA/m')
25     grid on

```

Listing D.4: Octave Quellcode: Absolute Differenz von Messung, Berechnung und Simulation von W10 Magneten

```

1
2
3 %Vergleich: Differenzplot_Berechnung_Messung_Simulation der W10
   Magneten
4 %Author: Sergiu Grejdieru
5 %Datum: 05.08.2018
6
7 close all
8 clear all
9 clc
10
11 A = dlmread('berechnen_10_10_10_N42.txt');
12 D = dlmread('Mittelwert_Messung_10_10_10.txt');
13 E = dlmread('Simulation_10_10_10_linear.txt');
14
15
16
17 diff_A_D = abs(A(:,2) - D(:,2)); %Differenz Berechnung<->
   Messung
18 diff_A_E = abs(A(:,2) - E(:,2)); %Differenz Berechnung<->
   Simulation
19
20
21 subplot(2,1,1)
22     plot(A(:,1), diff_A_D, 'linewidth', 1.5, ...
23         A(:,1), A(:,2), 'linewidth', 1.5, ...
24         D(:,1), D(:,2), 'linewidth', 1.5)
25     legend('Diff. Absolutfehler', 'Berechnet', 'Messung')
26     title('Differenz Berechnung <-> Simulation')
27     xlabel('Abstand in mm')
28     ylabel('Differenz B(z) in kA/m')
29     grid on
30 subplot(2,1,2)
31     plot(A(:,1), diff_A_E, 'linewidth', 1.5, ...
32         A(:,1), A(:,2), 'linewidth', 1.5, ...
33         E(:,1), E(:,2), 'linewidth', 1.5)
34     legend('Diff. Absolutfehler', 'Berechnet', 'Simuliert')
35     title('Differenz Berechnung <-> Simulation')

```

```

36     xlabel('Abstand in mm')
37     ylabel('Differenz B(z) in kA/m')
38     grid on

```

Listing D.5: Octave Quellcode: Absolute Differenz von Messung, Berechnung und Simulation von Q10 Magneten

```

1  %Vergleich: Differenzplot_Berechnung_Messung_Simulation der Q10
    Magnetten
2  %Author: Sergiu Grejdieru
3  %Datum: 05.08.2018
4
5  close all
6  clear all
7  clc
8
9  A = dlmread('berechnen_10_10_40_N42.txt');
10 D = dlmread('Mittelwert_Messung_10_10_40.txt');
11 E = dlmread('Simulation_10_10_40_linear.txt');
12
13 diff_A_D = abs(A(:,2) - D(:,2)); %Differenz Berechnung<->
    Messung
14 diff_A_E = abs(A(:,2) - E(:,2)); %Differenz Berechnung<->
    Simulation
15
16 subplot(2,1,1)
17     plot(A(:,1), diff_A_D, 'linewidth', 1.5, ...
18         A(:,1), A(:,2), 'linewidth', 1.5, ...
19         D(:,1), D(:,2), 'linewidth', 1.5)
20     legend('Diff. Absolutfehler', 'Berechnet', 'Messung')
21     title('Differenz Berechnung <-> Simulation')
22     xlabel('Abstand in mm')
23     ylabel('Differenz B(z) in kA/m')
24     grid on
25 subplot(2,1,2)
26     plot(A(:,1), diff_A_E, 'linewidth', 1.5, ...
27         A(:,1), A(:,2), 'linewidth', 1.5, ...
28         E(:,1), E(:,2), 'linewidth', 1.5)
29     legend('Diff. Absolutfehler', 'Berechnet', 'Simuliert')
30     title('Differenz Berechnung <-> Simulation')
31     xlabel('Abstand in mm')
32     ylabel('Differenz B(z) in kA/m')
33     grid on

```

Listing D.6: Octave Quellcode: Absolute Differenz von Messung, Berechnung und Simulation von W12 Magneten

```
1
2
3 %Vergleich: Differenzplot_Berechnung_Messung_Simulation der W12
  Magneten
4 %Author: Sergiu Grejdieru
5 %Datum: 05.08.2018
6
7 close all
8 clear all
9 clc
10
11 A = dlmread('berechnen_12_12_12_N52.txt');
12 D = dlmread('Mittelwert_Messung_12_12_12.txt');
13 E = dlmread('Simulation_12_12_12_linear.txt');
14
15
16
17 diff_A_D = abs(A(:,2) - D(:,2)); %Differenz Berechnung<->
  Messung
18 diff_A_E = abs(A(:,2) - E(:,2)); %Differenz Berechnung<->
  Simulation
19
20
21
22 subplot(2,1,1)
23     plot(A(:,1), diff_A_D, 'linewidth', 1.5, ...
24          A(:,1), A(:,2), 'linewidth', 1.5, ...
25          D(:,1), D(:,2), 'linewidth', 1.5)
26     legend('Diff. Absolutfehler', 'Berechnet', 'Messung')
27     title('Differenz Berechnung <-> Simulation')
28     xlabel('Abstand in mm')
29     ylabel('Differenz B(z) in kA/m')
30     grid on
31 subplot(2,1,2)
32     plot(A(:,1), diff_A_E, 'linewidth', 1.5, ...
33          A(:,1), A(:,2), 'linewidth', 1.5, ...
34          E(:,1), E(:,2), 'linewidth', 1.5)
35     legend('Diff. Absolutfehler', 'Berechnet', 'Simuliert')
36     title('Differenz Berechnung <-> Simulation')
37     xlabel('Abstand in mm')
```

```
38     ylabel('Differenz B(z) in kA/m')
39     grid on
```

Listing D.7: Octave Quellcode: relative Abweichungen der W10 Magneten

```
1
2 %Gemittelte relative Abweichungen von W10 Magneten
3 %Author: Sergiu Grejdieru
4 %Datum: 05.08.2018
5
6 close all
7 clear all
8 clc
9
10 M1 = dlmread('1.txt');
11 M2 = dlmread('2.txt');
12 M3 = dlmread('3.txt');
13 M4 = dlmread('4.txt');
14 M5 = dlmread('5.txt');
15 M6 = dlmread('6.txt');
16 M7 = dlmread('7.txt');
17 M8 = dlmread('8.txt');
18 M9 = dlmread('9.txt');
19 M10 = dlmread('10.txt');
20 M11 = dlmread('11.txt');
21 M12 = dlmread('12.txt');
22 M13 = dlmread('13.txt');
23 M14 = dlmread('14.txt');
24 M15 = dlmread('15.txt');
25 M16 = dlmread('16.txt');
26 M17 = dlmread('17.txt');
27 M18 = dlmread('18.txt');
28 M19 = dlmread('19.txt');
29 M20 = dlmread('20.txt');
30 M21 = dlmread('21.txt');
31 M22 = dlmread('22.txt');
32 M23 = dlmread('23.txt');
33 M24 = dlmread('24.txt');
34 M25 = dlmread('25.txt');
35 M26 = dlmread('26.txt');
36 M27 = dlmread('27.txt');
37 M28 = dlmread('28.txt');
38 M29 = dlmread('29.txt');
39 M30 = dlmread('30.txt');
```

```
40 M31 = dlmread( '31.txt' );
41 M32 = dlmread( '32.txt' );
42 M33 = dlmread( '33.txt' );
43 M34 = dlmread( '34.txt' );
44 M35 = dlmread( '35.txt' );
45 M36 = dlmread( '36.txt' );
46 M37 = dlmread( '37.txt' );
47 M38 = dlmread( '38.txt' );
48 M39 = dlmread( '39.txt' );
49 M40 = dlmread( '40.txt' );
50 M41 = dlmread( '41.txt' );
51 M42 = dlmread( '42.txt' );
52 M43 = dlmread( '43.txt' );
53 M44 = dlmread( '44.txt' );
54 M45 = dlmread( '45.txt' );
55 M46 = dlmread( '46.txt' );
56 M47 = dlmread( '47.txt' );
57 M48 = dlmread( '48.txt' );
58 M49 = dlmread( '49.txt' );
59 M50 = dlmread( '50.txt' );
60 M51 = dlmread( '51.txt' );
61
62 %Mittelwertbildung
63 SUMME(1,1) = 0;
64 SUMME(2,1) = 1;
65 SUMME(3,1) = 2;
66 SUMME(4,1) = 3;
67 SUMME(5,1) = 4;
68 SUMME(6,1) = 5;
69 SUMME(7,1) = 6;
70 SUMME(8,1) = 7;
71 SUMME(9,1) = 8;
72 SUMME(10,1) = 9;
73 SUMME(11,1) = 10;
74 SUMME(12,1) = 15;
75 SUMME(13,1) = 20;
76 SUMME(14,1) = 25;
77 SUMME(15,1) = 30;
78 SUMME(16,1) = 35;
79 SUMME(17,1) = 40;
80 SUMME(18,1) = 45;
81 SUMME(19,1) = 50;
82
```

```

83 for i=1:19,
84 % Summe der Mittelwerte
85
86 SUMME(i,2) = (M1(i,2) + M2(i,2) + M3(i,2) + M4(i,2) + M5(i,2) +
      M6(i,2) ...
87 + M7(i,2) + M8(i,2) + M9(i,2) + M10(i,2) + M11(i,2) + M12(i,2)
      + ...
88 M13(i,2) + M14(i,2) + M15(i,2) + M16(i,2) + M17(i,2) + M18(i
      ,2) + ...
89 M19(i,2) + M20(i,2) + M21(i,2) + M22(i,2) + M23(i,2) + M24(i
      ,2) + ...
90 M25(i,2) + M26(i,2) + M27(i,2) + M28(i,2) + M29(i,2) + M30(i
      ,2) + ...
91 M31(i,2) + M32(i,2) + M33(i,2)+ M34(i,2)+ M35(i,2)+ M36(i,2)
      ...
92 + M37(i,2)+ M38(i,2)+ M39(i,2)+ M40(i,2)+ M41(i,2)+ M42(i,2)+
      M43(i,2) ...
93 + M44(i,2)+ M45(i,2)+ M46(i,2)+ M47(i,2)+ M48(i,2)+ M49(i,2)+
      M50(i,2) ...
94 + M51(i,2))/51;
95 end
96
97 i = 0;
98
99 for i=1:51,
100 % Abweichungen bestimmen
101
102 A = dlmread([num2str(i) '.txt']);
103
104 GA(i) = ((abs(A(1,2) - SUMME(1,2))/SUMME(1,2)) + (abs(A(2,2)
      - SUMME(2,2))/SUMME(2,2)) ...
105 + (abs(A(3,2) - SUMME(3,2))/SUMME(3,2)) + (abs(A(4,2) -
      SUMME(4,2))/SUMME(4,2)) ...
106 + (abs(A(5,2) - SUMME(5,2))/SUMME(5,2)) + (abs(A(6,2) -
      SUMME(6,2))/SUMME(6,2)) ...
107 + (abs(A(7,2) - SUMME(7,2))/SUMME(7,2)) + (abs(A(8,2) -
      SUMME(8,2))/SUMME(8,2)) ...
108 + (abs(A(9,2) - SUMME(9,2))/SUMME(9,2)) + (abs(A(10,2)
      - SUMME(10,2))/SUMME(10,2)) ...
109 + (abs(A(11,2) - SUMME(11,2))/SUMME(11,2)) + (abs(A
      (12,2) - SUMME(12,2))/SUMME(12,2)) ...
110 + (abs(A(13,2) - SUMME(13,2))/SUMME(13,2)) + (abs(A
      (14,2) - SUMME(14,2))/SUMME(14,2)) ...

```

```
111     + (abs(A(15,2) - SUMME(15,2))/SUMME(15,2)) + (abs(A
      (16,2) - SUMME(16,2))/SUMME(16,2)) ...
112     + (abs(A(17,2) - SUMME(17,2))/SUMME(17,2)) + (abs(A
      (18,2) - SUMME(18,2))/SUMME(18,2)) ...
113     + (abs(A(19,2) - SUMME(19,2)))/SUMME(19,2))/19;
114
115 end
116
117 bar(GA)
118 title('Gemittelte relative Abweichung fuer jeden W10 Magneten')
119     xlabel('Magnetnummer')
120     ylabel('Gemittelte relative Abweichung')
121 grid on;
122 xlim([0 52])
123 ylim([0 0.052])
124 set(gca, 'Xtick', [0:5:51])
```

Listing D.8: Octave Quellcode: relative Abweichungen der Q10 Magneten

```
1
2 %Gemittelte relative Abweichung von Q10 Magneten
3 %Author: Sergiu Grejdieru
4 %Datum: 05.08.2018
5
6 close all
7 clear all
8 clc
9
10 M1 = dlmread('1.txt');
11 M2 = dlmread('2.txt');
12 M3 = dlmread('3.txt');
13 M4 = dlmread('4.txt');
14 M5 = dlmread('5.txt');
15 M6 = dlmread('6.txt');
16 M7 = dlmread('7.txt');
17 M8 = dlmread('8.txt');
18 M9 = dlmread('9.txt');
19 M10 = dlmread('10.txt');
20 M11 = dlmread('11.txt');
21 M12 = dlmread('12.txt');
22 M13 = dlmread('13.txt');
23 M14 = dlmread('14.txt');
24 M15 = dlmread('15.txt');
25 M16 = dlmread('16.txt');
```

```
26 M17 = dlmread('17.txt');
27 M18 = dlmread('18.txt');
28 M19 = dlmread('19.txt');
29 M20 = dlmread('20.txt');
30
31 %Mittelwertbildung
32 SUMME(1,1) = 0;
33 SUMME(2,1) = 1;
34 SUMME(3,1) = 2;
35 SUMME(4,1) = 3;
36 SUMME(5,1) = 4;
37 SUMME(6,1) = 5;
38 SUMME(7,1) = 6;
39 SUMME(8,1) = 7;
40 SUMME(9,1) = 8;
41 SUMME(10,1) = 9;
42 SUMME(11,1) = 10;
43 SUMME(12,1) = 15;
44 SUMME(13,1) = 20;
45 SUMME(14,1) = 25;
46 SUMME(15,1) = 30;
47 SUMME(16,1) = 35;
48 SUMME(17,1) = 40;
49 SUMME(18,1) = 45;
50 SUMME(19,1) = 50;
51
52 for i=1:19,
53 % Summe der Mittelwerte
54
55 SUMME(i,2) = (M1(i,2) + M2(i,2) + M3(i,2) + M4(i,2) + M5(i,2) +
56             M6(i,2) ...
57             + M7(i,2) + M8(i,2) + M9(i,2) + M10(i,2) + M11(i,2) + M12(i,2)
58             + M13(i,2) + M14(i,2) + M15(i,2) + M16(i,2) + M17(i,2) + M18(i
59             ,2) + ...
60             M19(i,2) + M20(i,2))/20;
61
62
63 i = 0;
64
65 for i=1:20,
```



```

66 % Gesamtabweichungen bestimmen
67 A = dlmread([num2str(i) '.txt']);
68
69 GA(i) = ((abs(A(1,2) - SUMME(1,2))/SUMME(1,2)) + (abs(A(2,2)
    - SUMME(2,2))/SUMME(2,2)) ...
70 + (abs(A(3,2) - SUMME(3,2))/SUMME(3,2)) + (abs(A(4,2) -
    SUMME(4,2))/SUMME(4,2)) ...
71 + (abs(A(5,2) - SUMME(5,2))/SUMME(5,2)) + (abs(A(6,2) -
    SUMME(6,2))/SUMME(6,2)) ...
72 + (abs(A(7,2) - SUMME(7,2))/SUMME(7,2)) + (abs(A(8,2) -
    SUMME(8,2))/SUMME(8,2)) ...
73 + (abs(A(9,2) - SUMME(9,2))/SUMME(9,2)) + (abs(A(10,2)
    - SUMME(10,2))/SUMME(10,2)) ...
74 + (abs(A(11,2) - SUMME(11,2))/SUMME(11,2)) + (abs(A
    (12,2) - SUMME(12,2))/SUMME(12,2)) ...
75 + (abs(A(13,2) - SUMME(13,2))/SUMME(13,2)) + (abs(A
    (14,2) - SUMME(14,2))/SUMME(14,2)) ...
76 + (abs(A(15,2) - SUMME(15,2))/SUMME(15,2)) + (abs(A
    (16,2) - SUMME(16,2))/SUMME(16,2)) ...
77 + (abs(A(17,2) - SUMME(17,2))/SUMME(17,2)) + (abs(A
    (18,2) - SUMME(18,2))/SUMME(18,2)) ...
78 + (abs(A(19,2) - SUMME(19,2))/SUMME(19,2)))/19;
79 end
80
81 bar(GA)
82 title('Gemittelte relative Abweichung fuer jeden Q10 Magneten')
83 xlabel('Magnetnummer')
84 ylabel('Gemittelte relative Abweichung')
85 grid on;
86 xlim([0 20])
87 ylim([0 0.025])
88 set(gca, 'Xtick', [0:5:20])

```

Listing D.9: Octave Quellcode: relative Abweichungen der W12 Magneten

```

1
2 %Gemittelte relative Abweichung von W12 Magneten
3 %Author: Sergiu Grejdieru
4 %Datum: 05.08.2018
5
6 close all
7 clear all
8 clc
9

```

```
10 M1 = dlmread('1.txt');
11 M2 = dlmread('2.txt');
12 M3 = dlmread('3.txt');
13 M4 = dlmread('4.txt');
14 M5 = dlmread('5.txt');
15 M6 = dlmread('6.txt');
16 M7 = dlmread('7.txt');
17 M8 = dlmread('8.txt');
18 M9 = dlmread('9.txt');
19 M10 = dlmread('10.txt');
20 M11 = dlmread('11.txt');
21 M12 = dlmread('12.txt');
22 M13 = dlmread('13.txt');
23 M14 = dlmread('14.txt');
24 M15 = dlmread('15.txt');
25 M16 = dlmread('16.txt');
26 M17 = dlmread('17.txt');
27 M18 = dlmread('18.txt');
28 M19 = dlmread('19.txt');
29 M20 = dlmread('20.txt');
30 M21 = dlmread('21.txt');
31 M22 = dlmread('22.txt');
32 M23 = dlmread('23.txt');
33 M24 = dlmread('24.txt');
34 M25 = dlmread('25.txt');
35 M26 = dlmread('26.txt');
36 M27 = dlmread('27.txt');
37 M28 = dlmread('28.txt');
38 M29 = dlmread('29.txt');
39 M30 = dlmread('30.txt');
40 M31 = dlmread('31.txt');
41 M32 = dlmread('32.txt');
42
43 %Mittelwertbildung
44 SUMME(1,1) = 0;
45 SUMME(2,1) = 1;
46 SUMME(3,1) = 2;
47 SUMME(4,1) = 3;
48 SUMME(5,1) = 4;
49 SUMME(6,1) = 5;
50 SUMME(7,1) = 6;
51 SUMME(8,1) = 7;
52 SUMME(9,1) = 8;
```

```
53 SUMME(10,1) = 9;
54 SUMME(11,1) = 10;
55 SUMME(12,1) = 15;
56 SUMME(13,1) = 20;
57 SUMME(14,1) = 25;
58 SUMME(15,1) = 30;
59 SUMME(16,1) = 35;
60 SUMME(17,1) = 40;
61 SUMME(18,1) = 45;
62 SUMME(19,1) = 50;
63
64 for i=1:19,
65 % Summe der Mittelwerte
66
67 SUMME(i,2) = (M1(i,2) + M2(i,2) + M3(i,2) + M4(i,2) + M5(i,2) +
68             M6(i,2) ...
69             + M7(i,2) + M8(i,2) + M9(i,2) + M10(i,2) + M11(i,2) + M12(i,2)
70             + ...
71             M13(i,2) + M14(i,2) + M15(i,2) + M16(i,2) + M17(i,2) + M18(i
72             ,2) + ...
73             M19(i,2) + M20(i,2) + M21(i,2) + M22(i,2) + M23(i,2) + M24(i
74             ,2) + ...
75             M25(i,2) + M26(i,2) + M27(i,2) + M28(i,2) + M29(i,2) + M30(i
76             ,2) + ...
77             M31(i,2) + M32(i,2))/32;
78
79 end
80
81 i = 0;
82
83 for i=1:32,
84 % Gesamtabweichungen bestimmen
85 A = dlmread([num2str(i) '.txt']);
86
87 GA(i) = ((abs(A(1,2) - SUMME(1,2))/SUMME(1,2)) + (abs(A(2,2)
88             - SUMME(2,2))/SUMME(2,2)) ...
89             + (abs(A(3,2) - SUMME(3,2))/SUMME(3,2)) + (abs(A(4,2) -
90             SUMME(4,2))/SUMME(4,2)) ...
91             + (abs(A(5,2) - SUMME(5,2))/SUMME(5,2)) + (abs(A(6,2) -
92             SUMME(6,2))/SUMME(6,2)) ...
93             + (abs(A(7,2) - SUMME(7,2))/SUMME(7,2)) + (abs(A(8,2) -
94             SUMME(8,2))/SUMME(8,2)) ...
```

```

87     + (abs(A(9,2) - SUMME(9,2))/SUMME(9,2)) + (abs(A(10,2)
      - SUMME(10,2))/SUMME(10,2)) ...
88     + (abs(A(11,2) - SUMME(11,2))/SUMME(11,2)) + (abs(A
      (12,2) - SUMME(12,2))/SUMME(12,2)) ...
89     + (abs(A(13,2) - SUMME(13,2))/SUMME(13,2)) + (abs(A
      (14,2) - SUMME(14,2))/SUMME(14,2)) ...
90     + (abs(A(15,2) - SUMME(15,2))/SUMME(15,2)) + (abs(A
      (16,2) - SUMME(16,2))/SUMME(16,2)) ...
91     + (abs(A(17,2) - SUMME(17,2))/SUMME(17,2)) + (abs(A
      (18,2) - SUMME(18,2))/SUMME(18,2)) ...
92     + (abs(A(19,2) - SUMME(19,2))/SUMME(19,2))/19;
93 end
94
95 bar(GA)
96 title('Gemittelte relative Abweichung fuer jeden W12 Magneten')
97     xlabel('Magnetnummer')
98     ylabel('Gemittelte relative Abweichung')
99 grid on;
100 xlim([0 33])
101 ylim([0 0.04])
102 set(gca, 'Xtick', [0:5:32])

```

Listing D.10: Octave Quellcode: Erstellen des 4 kA/m Magnetring

```

1 %
2 %   Magnetring mit 4kA/m in der Mitte
3 %   Simuliert am: 11.06.2018
4 %   Hier wird ein Ringmagnet aus mehreren einzelnen Magneten
5 %   zusammengesetzt.
6 %   Nachdem der Magnetring erstellt wurde, wird mit dem Tool
   FEMM
7 %
   %=====
8
9 % close all
10 clear all
11 clc
12
13 % inner and outer radian of ring magnet
14 di = 154;
15 % 109 * 1.4142 = 154mm
16
17

```

```
18 % numebr of magnets
19 n_mag = 20;
20
21 % number of poles; if 4: you create a quadrupole
22 %   typical values are 2,4,6,8,10,12,...
23 %   only even numbers are allowed
24 n_pole = 2;
25
26 % Magnet size Squared only!
27 %szx = 10 * 1.4142 = 14.142;
28 szx = 14.142;
29
30 r_mag = szx/2;
31
32 % use number of edges for hexa or octagon magnetic form
33 n_eck = 4;
34
35
36 t_mag = [0:2*pi/(n_eck):2*pi];
37 px = r_mag.*cos(t_mag+2*pi/(n_eck*2));px(end) = [];
38 py = r_mag.*sin(t_mag+2*pi/(n_eck*2));py(end) = [];
39
40
41
42
43 diamo = di+2*sqrt(szx.^2)*1.4142;
44 %


---



---


45 %   start computation
46 %


---



---


47 ri = di/2;
48 ro = diamo/2;
49 r = (ri+ro)/2;
50
51
52 ri2 = ri;
53 ro2 = ro;
54
55
56 ri2 = ri2;
```

```

57 ro2 = ro2;
58
59 ct = 1;
60 for n = 0 : 2*pi/n_mag : 2*pi-2*pi/n_mag
61     M.x(ct) = r*sin(n);
62     M.y(ct) = r*cos(n);
63     ct = ct+1;
64 end
65
66 ct = 1;
67 for n = 0 : 2*pi/360 : 2*pi
68     CIRC.c1x(ct) = ri2*sin(n);
69     CIRC.c1y(ct) = ri2*cos(n);
70     CIRC.c2x(ct) = ro2*sin(n);
71     CIRC.c2y(ct) = ro2*cos(n);
72     ct = ct+1;
73 end
74 kk = 1;
75 xc = px;
76 yc = py;
77 nt = n_pole+2;
78 for i = 1 : length(M.x)
79     rot(i) = atan2(cos((nt*pi/n_mag)*(i-1)), ...
80                  sin((nt*pi/n_mag)*(i-1))).*180./pi;
81     R      = [cosd(rot(i))  -sind(rot(i))
82              sind(rot(i))   cosd(rot(i))];
83     R(abs(R)<1e-10) = 0;
84     for j = 1 : length(xc)
85         [F] = R * [xc(j);yc(j)];
86         p.x(i,j) = M.x(i)+ F(1);
87         p.y(i,j) = M.y(i)+ F(2);
88     end
89     if i == 1
90         dist(kk) = sqrt((p.x(1,1)-p.x(1,2)).^2);
91     end
92
93 end
94 disp(dist)
95
96 fs = 10;
97 h = figure(1);
98 set(h, 'units', 'centimeters')

```

```

99 set(h, 'position', [1, 10, 18, 18]); %[ left , bottom, width,
    height]
100
101 s1 = sprintf('Ring magnet with %3.0d squared magnets of size
    %3.0d mm', n_mag, szx);
102 plot(CIRC.c1x, CIRC.c1y, CIRC.c2x, CIRC.c2y, 'linewidth', 1, '
    color', 'k', 'linestyle', ':')
103 hold on
104 axis square, ylim([-ro2 ro2]), xlim([-ro2 ro2])
105 for n = 1 : length(M.x)
106     s = sprintf('m_{%2.0d}', n);
107     text(M.x(n), M.y(n), s, 'FontSize', 8, 'HorizontalAlignment',
        'center')
108     for n_seg = 1 : length(xc)-1
109         line([p.x(n, n_seg) p.x(n, n_seg+1)], ...
110             [p.y(n, n_seg) p.y(n, n_seg+1)])
111     end
112     line([p.x(n, n_seg+1) p.x(n, 1)], ...
113         [p.y(n, n_seg+1) p.y(n, 1)])
114 end
115 line([0 ri2/1.5], [0 0], 'linewidth', 1.5)
116 line([0 0], [0 ri2/1.5], 'linewidth', 1.5)
117 s = sprintf('r_i = %3.2f mm', ri2);
118 text(0, ri2-ri2*0.1, s, 'FontSize', 8, 'HorizontalAlignment', '
    center')
119 s = sprintf('r_o = %3.2f mm', ro2);
120 text(0, ro2+ro2*0.05, s, 'FontSize', 8, 'HorizontalAlignment', '
    center')
121 hold off
122 box on
123 xlabel('x (mm)', 'FontSize', fs)
124 ylabel('y (mm)', 'FontSize', fs)
125 grid on
126 title(s1, 'FontSize', fs)
127
128 %%
129 npts = 1;
130 bb = 1;
131 for i = 1 : length(M.x)
132     for j = 1 : length(xc)
133         P(npts, :) = [p.x(i, j), p.y(i, j), 0, 0];
134         npts = npts+1;
135     end

```

```

136     mm_mag(i,:) = [ mean(p.x(i,:))  mean(p.y(i,:))  1      -1
                    0  rot(i)  0  1  0];
137 %     dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0];bb = bb+1;
138 %     dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0];bb = bb+1;
139 %     dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0];bb = bb+1;
140 %     dr(bb,:) = [bb bb-3 -1 0 0 0];bb = bb+1;
141     for n_seg = 1 : length(xc)-1
142         dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0];bb = bb+1;
143     end
144         dr(bb,:) = [bb bb+1-length(xc) -1 0 0 0];bb = bb+1;
145 end
146 ri2 = ri2;
147 ro2 = ro2;
148
149 %% Schreiben der berechneten Daten in ein *.femm file
150
151 fileID = fopen('POINTS.FEM','w');
152 createHEADER(fileID)
153 fprintf(fileID, '[NumPoints] = %5.0f\n',length(P)+7);
154 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n',0,0,0,0);
155 for n = 1 : length(P)
156     fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n',P(n,:));
157 end
158 % Definition of circle
159 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n',ri2,0,0,0);
160 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n',-ri2,0,0,0);
161 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n',ro2,0,0,0);
162 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n',-ro2,0,0,0);
163 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n',-(ro2*1.5)
    ,0,0,0);
164 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n',(ro2*1.5)
    ,0,0,0);
165 fprintf(fileID, '[NumSegments] = %5.0f\n',length(dr));
166 for np = 1 : length(dr)
167     fprintf(fileID, '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f\n',dr(np,1),
        dr(np,2),dr(np,3),dr(np,4),dr(np,5));
168 end
169
170 fprintf(fileID, '[ [NumArcSegments] = 6\n',...
171 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n',...
172 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n',...
173 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n',...
174 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n',...

```



```

175 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n' , ...
176 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n' , ...
177 '[NumHoles] = 0\n' ] , ...
178 length(dr)+2,length(dr)+1 , ...
179 length(dr)+1,length(dr)+2 , ...
180 length(dr)+4,length(dr)+3 , ...
181 length(dr)+3,length(dr)+4 , ...
182 length(dr)+6,length(dr)+5 , ...
183 length(dr)+5,length(dr)+6);
184
185 fprintf(fileID , '[NumBlockLabels] = %3.0f\n' ,length(mm_mag)+3);
186 fprintf(fileID , '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f
    %6.0f\n' ,1,-2,2,-1,0,0,0,1,0);
187 fprintf(fileID , '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f
    %6.0f\n' ,2,(ro2),2,-1,0,0,0,1,0);
188 fprintf(fileID , '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f
    %6.0f\n' ,2,ri2+0.001*ri2,2,-1,0,0,0,1,0);
189 [row,col] = size(mm_mag);
190 for np = 1 : row
191     fprintf(fileID , '%6.8f %6.8f %6.0f %6.0f %6.0f %6.5f %6.0f
        %6.0f %6.0f\n' , ...
192             mm_mag(np,1) , ...
193             mm_mag(np,2) , ...
194             mm_mag(np,3) , ...
195             mm_mag(np,4) , ...
196             mm_mag(np,5) , ...
197             mm_mag(np,6) , ...
198             mm_mag(np,7) , ...
199             mm_mag(np,8) , ...
200             mm_mag(np,9) );
201 end
202
203
204 fclose(fileID);

```

Listing D.11: Octave Quellcode: Erstellen des 15 kA/m Magnetring

```

1 %
2 %   Magnetring mit 15 kA/m in der Mitte
3 %   Simuliert am: 11.06.2018
4 %   Hier wird ein Ringmagnet aus mehreren einzelnen Magneten
5 %   zusammengesetzt.
6 %   Nachdem der Magnetring erstellt wurde, wird mit dem Tool
    FEMM

```

```
7 %  
  %=====
```

```
8  
9 % close all  
10 clear all  
11 clc  
12  
13 % inner and outer radian of ring magnet  
14 di = 154;  
15 % 109 * 1.4142 = 154mm  
16  
17  
18 % numebr of magnets  
19 n_mag = 20;  
20  
21 % number of poles; if 4: you create a quadrupole  
22 %   typical values are 2,4,6,8,10,12,...  
23 %   only even numbers are allowed  
24 n_pole = 2;  
25  
26 % Magnet size Squared only!  
27 %szx = 14.142;  
28 szx = 14.142;  
29  
30 r_mag = szx/2;  
31  
32 % use number of edges for hexa or octagon magnetic form  
33 n_eck = 4;  
34  
35  
36 t_mag = [0:2*pi/(n_eck):2*pi];  
37 px = r_mag.*cos(t_mag+2*pi/(n_eck*2));px(end) = [];  
38 py = r_mag.*sin(t_mag+2*pi/(n_eck*2));py(end) = [];  
39  
40  
41  
42  
43 diamo = di+2*sqrt(szx.^2)*1.4142;  
44 %  
  %=====
```

```
45 %   start computation
```

```
46 %  


---



---

  
47 ri = di/2;  
48 ro = diamo/2;  
49 r = (ri+ro)/2;  
50  
51  
52 ri2 = ri;  
53 ro2 = ro;  
54  
55  
56 ri2 = ri2;  
57 ro2 = ro2;  
58  
59 ct = 1;  
60 for n = 0 : 2*pi/n_mag : 2*pi-2*pi/n_mag  
61     M.x(ct) = r*sin(n);  
62     M.y(ct) = r*cos(n);  
63     ct = ct+1;  
64 end  
65  
66  
67 ct = 1;  
68 for n = 0 : 2*pi/360 : 2*pi  
69     CIRC.c1x(ct) = ri2*sin(n);  
70     CIRC.c1y(ct) = ri2*cos(n);  
71     CIRC.c2x(ct) = ro2*sin(n);  
72     CIRC.c2y(ct) = ro2*cos(n);  
73     ct = ct+1;  
74 end  
75  
76 kk = 1;  
77  
78 xc = px;  
79 yc = py;  
80  
81 nt = n_pole+2;  
82 for i = 1 : length(M.x)  
83     rot(i) = atan2(cos((nt*pi/n_mag)*(i-1)), ...  
84                 sin((nt*pi/n_mag)*(i-1))).*180./pi;  
85  
86     R      = [cosd(rot(i))  -sind(rot(i))
```

```

87         sind(rot(i))   cosd(rot(i))];
88     R(abs(R)<1e-10) = 0;
89     for j = 1 : length(xc)
90         [F] = R * [xc(j);yc(j)];
91         p.x(i,j) = M.x(i)+ F(1);
92         p.y(i,j) = M.y(i)+ F(2);
93     end
94     if i == 1
95         dist(kk) = sqrt((p.x(1,1)-p.x(1,2)).^2);
96     end
97
98 end
99
100 disp(dist)
101
102
103 fs = 10;
104 h = figure(1);
105 set(h, 'units', 'centimeters')
106 set(h, 'position', [1, 10, 18, 18]); %[ left, bottom, width,
    height]
107
108 s1 = sprintf('Ring magnet with %3.0d squared magnets of size
    %3.0d mm', n_mag, szx);
109
110 plot(CIRC.c1x, CIRC.c1y, CIRC.c2x, CIRC.c2y, 'linewidth', 1, '
    color', 'k', 'linestyle', ':')
111 hold on
112 axis square, ylim([-ro2 ro2]), xlim([-ro2 ro2])
113
114 for n = 1 : length(M.x)
115     s = sprintf('m_{%2.0d}', n);
116     text(M.x(n), M.y(n), s, 'FontSize', 8, 'HorizontalAlignment'
        , 'center')
117     for n_seg = 1 : length(xc)-1
118         line([p.x(n, n_seg) p.x(n, n_seg+1)], ...
119             [p.y(n, n_seg) p.y(n, n_seg+1)])
120     end
121     line([p.x(n, n_seg+1) p.x(n, 1)], ...
122         [p.y(n, n_seg+1) p.y(n, 1)])
123 end
124 line([0 ri2/1.5], [0 0], 'linewidth', 1.5)
125 line([0 0], [0 ri2/1.5], 'linewidth', 1.5)

```

```

126     s = sprintf('r_i = %3.2f mm', ri2);
127     text(0, ri2-ri2*0.1, s, 'FontSize', 8, 'HorizontalAlignment', '
        center')
128     s = sprintf('r_o = %3.2f mm', ro2);
129     text(0, ro2+ro2*0.05, s, 'FontSize', 8, 'HorizontalAlignment', '
        center')
130     hold off
131     box on
132     xlabel('x (mm)', 'FontSize', fs)
133     ylabel('y (mm)', 'FontSize', fs)
134     grid on
135     title(s1, 'FontSize', fs)
136
137
138 %%
139 npts = 1;
140 bb = 1;
141 for i = 1 : length(M.x)
142     for j = 1 : length(xc)
143         P(npts,:) = [p.x(i,j), p.y(i,j), 0, 0];
144         npts = npts+1;
145     end
146     mm_mag(i,:) = [ mean(p.x(i,:))  mean(p.y(i,:))  1  -1
        0 rot(i) 0 1 0];
147 %     dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0]; bb = bb+1;
148 %     dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0]; bb = bb+1;
149 %     dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0]; bb = bb+1;
150 %     dr(bb,:) = [bb bb-3 -1 0 0 0]; bb = bb+1;
151     for n_seg = 1 : length(xc)-1
152         dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0]; bb = bb+1;
153     end
154     dr(bb,:) = [bb bb+1-length(xc) -1 0 0 0]; bb = bb+1;
155 end
156 ri2 = ri2;
157 ro2 = ro2;
158
159 %% Schreiben der berechneten Daten in ein *.femm file
160
161 fileID = fopen('POINTS.FEM', 'w');
162 createHEADER(fileID)
163 fprintf(fileID, '[NumPoints] = %5.0f\n', length(P)+7);
164 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n', 0, 0, 0, 0);
165 for n = 1 : length(P)

```

```

166     fprintf(fileID , '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n' ,P(n,:) );
167 end
168 % Definition of circle
169 fprintf(fileID , '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n' ,ri2 ,0,0,0) ;
170 fprintf(fileID , '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n' ,-ri2 ,0,0,0) ;
171 fprintf(fileID , '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n' ,ro2 ,0,0,0) ;
172 fprintf(fileID , '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n' ,-ro2 ,0,0,0) ;
173 fprintf(fileID , '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n' ,-(ro2*1.5)
    ,0,0,0) ;
174 fprintf(fileID , '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n' ,(ro2*1.5)
    ,0,0,0) ;
175 fprintf(fileID , '[NumSegments] = %5.0f\n' ,length(dr)) ;
176 for np = 1 : length(dr)
177     fprintf(fileID , '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f\n' ,dr(np,1) ,
        dr(np,2) ,dr(np,3) ,dr(np,4) ,dr(np,5) ) ;
178 end
179
180 fprintf(fileID ,[ '[NumArcSegments] = 6\n' ,...
181 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n' ,...
182 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n' ,...
183 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n' ,...
184 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n' ,...
185 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n' ,...
186 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n' ,...
187 '[NumHoles] = 0\n' ] ,...
188 length(dr)+2,length(dr)+1 ,...
189 length(dr)+1,length(dr)+2 ,...
190 length(dr)+4,length(dr)+3 ,...
191 length(dr)+3,length(dr)+4 ,...
192 length(dr)+6,length(dr)+5 ,...
193 length(dr)+5,length(dr)+6) ;
194
195 fprintf(fileID , '[NumBlockLabels] = %3.0f\n' ,length(mm_mag)+3) ;
196 fprintf(fileID , '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f
    %6.0f\n' ,1,-2,2,-1,0,0,0,1,0) ;
197 fprintf(fileID , '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f
    %6.0f\n' ,2,(ro2) ,2,-1,0,0,0,1,0) ;
198 fprintf(fileID , '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f
    %6.0f\n' ,2,ri2+0.001*ri2 ,2,-1,0,0,0,1,0) ;
199 [row , col] = size(mm_mag) ;
200 for np = 1 : row
201     fprintf(fileID , '%6.8f %6.8f %6.0f %6.0f %6.0f %6.5f %6.0f
        %6.0f %6.0f\n' ,...

```

```
202         mm_mag(np,1) ,...
203         mm_mag(np,2) ,...
204         mm_mag(np,3) ,...
205         mm_mag(np,4) ,...
206         mm_mag(np,5) ,...
207         mm_mag(np,6) ,...
208         mm_mag(np,7) ,...
209         mm_mag(np,8) ,...
210         mm_mag(np,9) );
211 end
212
213
214 fclose(fileID);
```

Listing D.12: Octave Quellcode: Erstellen des 6 kA/m Magnetring

```
1
2 %
3 %   Magnetring mit 6 kA/m in der Mitte
4 %   Simuliert am: 11.06.2018
5 %   Hier wird ein Ringmagnet aus mehreren einzelnen Magneten
6 %   zusammengesetzt.
7 %   Nachdem der Magnetring erstellt wurde, wird mit dem Tool
   FEMM
8 %
   %=====
9
10 % close all
11 clear all
12 clc
13
14 % inner and outer radian of ring magnet
15 di = 148;
16 % 104.65 * 1.4142 = 148mm
17
18
19 % numebr of magnets
20 n_mag = 30;
21
22 % number of poles; if 4: you create a quadrupole
23 %   typical values are 2,4,6,8,10,12,...
24 %   only even numbers are allowed
25 n_pole = 2;
```

```
26
27 % Magnet size Squared only!
28 %szx = 14.142;
29 szx = 14.142;
30
31 r_mag = szx/2;
32
33 % use number of edges for hexa or octagon magnetic form
34 n_eck = 4;
35
36
37 t_mag = [0:2*pi/(n_eck):2*pi];
38 px = r_mag.*cos(t_mag+2*pi/(n_eck*2)); px(end) = [];
39 py = r_mag.*sin(t_mag+2*pi/(n_eck*2)); py(end) = [];
40 diamo = di+2*sqrt(szx.^2)*1.4142;
41 %

```

```
42 % start computation
43 %

```

```
44 ri = di/2;
45 ro = diamo/2;
46 r = (ri+ro)/2;
47
48 ri2 = ri;
49 ro2 = ro;
50
51 ri2 = ri2;
52 ro2 = ro2;
53
54 ct = 1;
55 for n = 0 : 2*pi/n_mag : 2*pi-2*pi/n_mag
56     M.x(ct) = r*sin(n);
57     M.y(ct) = r*cos(n);
58     ct = ct+1;
59 end
60
61 ct = 1;
62 for n = 0 : 2*pi/360 : 2*pi
63     CIRC.c1x(ct) = ri2*sin(n);
64     CIRC.c1y(ct) = ri2*cos(n);
```



```

65         CIRC.c2x(ct) = ro2*sin(n);
66         CIRC.c2y(ct) = ro2*cos(n);
67         ct = ct+1;
68     end
69
70     kk = 1;
71
72     xc = px;
73     yc = py;
74
75     nt = n_pole+2;
76     for i = 1 : length(M.x)
77         rot(i) = atan2(cos((nt*pi/n_mag)*(i-1)),...
78                       sin((nt*pi/n_mag)*(i-1))).*180./pi;
79
80         R      = [cosd(rot(i))  -sind(rot(i))
81                 sind(rot(i))   cosd(rot(i))];
82         R(abs(R)<1e-10) = 0;
83         for j = 1 : length(xc)
84             [F] = R * [xc(j);yc(j)];
85             p.x(i,j) = M.x(i)+ F(1);
86             p.y(i,j) = M.y(i)+ F(2);
87         end
88         if i == 1
89             dist(kk) = sqrt((p.x(1,1)-p.x(1,2)).^2);
90         end
91
92     end
93
94     disp(dist)
95
96     fs = 10;
97     h = figure(1);
98     set(h, 'units', 'centimeters')
99     set(h, 'position', [1, 10, 18, 18]); %[ left, bottom, width,
100         height]
101     s1 = sprintf('Ring magnet with %3.0d squared magnets of size
102         %3.0d mm', n_mag, szx);
103
104     plot(CIRC.c1x, CIRC.c1y, CIRC.c2x, CIRC.c2y, 'linewidth', 1, '
105         color', 'k', 'linestyle', ':')
106     hold on

```

```

105     axis square ,ylim([-ro2 ro2]),xlim([-ro2 ro2])
106
107     for n = 1 : length(M.x)
108         s = sprintf('m_{%2.0d}',n);
109         text(M.x(n),M.y(n),s,'FontSize',8,'HorizontalAlignment',
110             , 'center')
111         for n_seg = 1 : length(xc)-1
112             line([p.x(n,n_seg) p.x(n,n_seg+1)],...
113                 [p.y(n,n_seg) p.y(n,n_seg+1)])
114         end
115         line([p.x(n,n_seg+1) p.x(n,1)],...
116             [p.y(n,n_seg+1) p.y(n,1)])
117     end
118     line([0 ri2/1.5],[0 0],'linewidth',1.5)
119     line([0 0],[0 ri2/1.5],'linewidth',1.5)
120     s = sprintf('r_i = %3.2f mm',ri2);
121     text(0,ri2-ri2*0.1,s,'FontSize',8,'HorizontalAlignment',
122         , 'center')
123     s = sprintf('r_o = %3.2f mm',ro2);
124     text(0,ro2+ro2*0.05,s,'FontSize',8,'HorizontalAlignment',
125         , 'center')
126     hold off
127     box on
128     xlabel('x (mm)','FontSize',fs)
129     ylabel('y (mm)','FontSize',fs)
130     grid on
131     title(s1,'FontSize',fs)
132
133 %%
134 npts = 1;
135 bb = 1;
136 for i = 1 : length(M.x)
137     for j = 1 : length(xc)
138         P(npts,:) = [p.x(i,j),p.y(i,j),0,0];
139         npts = npts+1;
140     end
141     mm_mag(i,:) = [ mean(p.x(i,:)) mean(p.y(i,:)) 1 -1
142                   0 rot(i) 0 1 0];
143 %     dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0];bb = bb+1;
144 %     dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0];bb = bb+1;
145 %     dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0];bb = bb+1;
146 %     dr(bb,:) = [bb bb-3 -1 0 0 0];bb = bb+1;
147     for n_seg = 1 : length(xc)-1

```

```

144         dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0];bb = bb+1;
145     end
146         dr(bb,:) = [bb bb+1-length(xc) -1 0 0 0];bb = bb+1;
147 end
148 ri2 = ri2;
149 ro2 = ro2;
150
151 %% Schreiben der berechneten Daten in ein *.femm file
152
153 fileID = fopen('POINTS.FEM','w');
154 createHEADER(fileID)
155 fprintf(fileID, '[NumPoints] = %5.0f\n',length(P)+7);
156 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n',0,0,0,0);
157 for n = 1 : length(P)
158     fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n',P(n,:));
159 end
160 % Definition of circle
161 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n',ri2,0,0,0);
162 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n',-ri2,0,0,0);
163 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n',ro2,0,0,0);
164 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n',-ro2,0,0,0);
165 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n',-(ro2*1.5)
    ,0,0,0);
166 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n',(ro2*1.5)
    ,0,0,0);
167 fprintf(fileID, '[NumSegments] = %5.0f\n',length(dr));
168 for np = 1 : length(dr)
169     fprintf(fileID, '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f\n',dr(np,1),
    dr(np,2),dr(np,3),dr(np,4),dr(np,5));
170 end
171
172 fprintf(fileID, '[NumArcSegments] = 6\n',...
173 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n',...
174 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n',...
175 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n',...
176 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n',...
177 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n',...
178 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n',...
179 '[NumHoles] = 0\n',...
180 length(dr)+2,length(dr)+1,...
181 length(dr)+1,length(dr)+2,...
182 length(dr)+4,length(dr)+3,...
183 length(dr)+3,length(dr)+4,...

```

```

184 length(dr)+6,length(dr)+5,...
185 length(dr)+5,length(dr)+6);
186
187 fprintf(fileID, '[NumBlockLabels] = %3.0f\n',length(mm_mag)+3);
188 fprintf(fileID, '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f
    %6.0f\n',1,-2,2,-1,0,0,0,1,0);
189 fprintf(fileID, '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f
    %6.0f\n',2,(ro2),2,-1,0,0,0,1,0);
190 fprintf(fileID, '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f
    %6.0f\n',2,ri2+0.001*ri2,2,-1,0,0,0,1,0);
191 [row,col] = size(mm_mag);
192 for np = 1 : row
193     fprintf(fileID, '%6.8f %6.8f %6.0f %6.0f %6.0f %6.5f %6.0f
        %6.0f %6.0f\n',...
194             mm_mag(np,1) ,...
195             mm_mag(np,2) ,...
196             mm_mag(np,3) ,...
197             mm_mag(np,4) ,...
198             mm_mag(np,5) ,...
199             mm_mag(np,6) ,...
200             mm_mag(np,7) ,...
201             mm_mag(np,8) ,...
202             mm_mag(np,9) );
203 end
204 fclose(fileID);

```

Listing D.13: Octave Quellcode: Erstellen des 10 kA/m Magnetring

```

1
2 %
3 %   Magnetring mit 10 kA/m in der Mitte
4 %   Simuliert am: 11.06.2018
5 %   Hier wird ein Ringmagnet aus mehreren einzelnen Magneten
6 %   zusammengesetzt.
7 %   Nachdem der Magnetring erstellt wurde, wird mit dem Tool
    FEMM
8 %
    %=====
9
10 % close all
11 clear all
12 clc
13

```

```
14 % inner and outer radian of ring magnet
15 di = 158;
16
17 % 111,72 * 1.4142 = 158mm
18 % numebr of magnets
19 n_mag = 32;
20
21 % number of poles; if 4: you create a quadrupole
22 %   typical values are 2,4,6,8,10,12,...
23 %   only even numbers are allowed
24 n_pole = 2;
25
26 % Magnet size Squared only!
27 szx = 16.97;
28 % 12 * 1,4142 = 16,9704
29
30 1.415
31 r_mag = szx/2;
32
33 % use number of edges for hexa or octagon magnetic form
34 n_eck = 4;
35
36
37 t_mag = [0:2*pi/(n_eck):2*pi];
38 px = r_mag.*cos(t_mag+2*pi/(n_eck*2));px(end) = [];
39 py = r_mag.*sin(t_mag+2*pi/(n_eck*2));py(end) = [];
40
41
42 diamo = di+2*sqrt(szx.^2)*1.4142;
43 %


---


44 %   start computation
45 %


---


46 ri = di/2;
47 ro = diamo/2;
48 r = (ri+ro)/2;
49
50
51 ri2 = ri;
52 ro2 = ro;
```

```

53
54
55 ri2 = ri2;
56 ro2 = ro2;
57
58 ct = 1;
59 for n = 0 : 2*pi/n_mag : 2*pi-2*pi/n_mag
60     M.x(ct) = r*sin(n);
61     M.y(ct) = r*cos(n);
62     ct = ct+1;
63 end
64
65
66 ct = 1;
67 for n = 0 : 2*pi/360 : 2*pi
68     CIRC.c1x(ct) = ri2*sin(n);
69     CIRC.c1y(ct) = ri2*cos(n);
70     CIRC.c2x(ct) = ro2*sin(n);
71     CIRC.c2y(ct) = ro2*cos(n);
72     ct = ct+1;
73 end
74
75 kk = 1;
76
77 xc = px;
78 yc = py;
79
80 nt = n_pole+2;
81 for i = 1 : length(M.x)
82     rot(i) = atan2(cos((nt*pi/n_mag)*(i-1)), ...
83                 sin((nt*pi/n_mag)*(i-1))).*180./pi;
84
85     R = [cosd(rot(i))  -sind(rot(i))
86         sind(rot(i))   cosd(rot(i))];
87     R(abs(R)<1e-10) = 0;
88     for j = 1 : length(xc)
89         [F] = R * [xc(j);yc(j)];
90         p.x(i,j) = M.x(i)+ F(1);
91         p.y(i,j) = M.y(i)+ F(2);
92     end
93     if i == 1
94         dist(kk) = sqrt((p.x(1,1)-p.x(1,2)).^2);
95     end

```

```

96
97 end
98
99 disp(dist)
100
101
102 fs = 10;
103 h = figure(1);
104 set(h, 'units', 'centimeters')
105 set(h, 'position', [1, 10, 18, 18]); %[ left, bottom, width,
    height]
106
107 s1 = sprintf('Ring magnet with %3.0d squared magnets of size
    %3.0d mm', n_mag, szx);
108
109 plot(CIRC.c1x, CIRC.c1y, CIRC.c2x, CIRC.c2y, 'linewidth', 1, '
    color', 'k', 'linestyle', ':')
110 hold on
111 axis square, ylim([-ro2 ro2]), xlim([-ro2 ro2])
112
113 for n = 1 : length(M.x)
114     s = sprintf('m_{%2.0d}', n);
115     text(M.x(n), M.y(n), s, 'FontSize', 8, 'HorizontalAlignment',
        'center')
116     for n_seg = 1 : length(xc)-1
117         line([p.x(n, n_seg) p.x(n, n_seg+1)], ...
118             [p.y(n, n_seg) p.y(n, n_seg+1)])
119     end
120     line([p.x(n, n_seg+1) p.x(n, 1)], ...
121         [p.y(n, n_seg+1) p.y(n, 1)])
122 end
123 line([0 ri2/1.5], [0 0], 'linewidth', 1.5)
124 line([0 0], [0 ri2/1.5], 'linewidth', 1.5)
125 s = sprintf('r_i = %3.2f mm', ri2);
126 text(0, ri2-ri2*0.1, s, 'FontSize', 8, 'HorizontalAlignment', '
    center')
127 s = sprintf('r_o = %3.2f mm', ro2);
128 text(0, ro2+ro2*0.05, s, 'FontSize', 8, 'HorizontalAlignment', '
    center')
129 hold off
130 box on
131 xlabel('x (mm)', 'FontSize', fs)
132 ylabel('y (mm)', 'FontSize', fs)

```

```

133     grid on
134     title(s1, 'FontSize', fs)
135
136 %%
137 npts = 1;
138 bb = 1;
139 for i = 1 : length(M.x)
140     for j = 1 : length(xc)
141         P(npts,:) = [p.x(i,j), p.y(i,j), 0, 0];
142         npts = npts+1;
143     end
144     mm_mag(i,:) = [ mean(p.x(i,:))  mean(p.y(i,:))  1      -1
145                    0 rot(i) 0 1 0];
146 %     dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0]; bb = bb+1;
147 %     dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0]; bb = bb+1;
148 %     dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0]; bb = bb+1;
149 %     dr(bb,:) = [bb bb-3 -1 0 0 0]; bb = bb+1;
150     for n_seg = 1 : length(xc)-1
151         dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0]; bb = bb+1;
152     end
153     dr(bb,:) = [bb bb+1-length(xc) -1 0 0 0]; bb = bb+1;
154 end
155 ri2 = ri2;
156 ro2 = ro2;
157 %% Schreiben der berechneten Daten in ein *.femm file
158
159 fileID = fopen('POINTS.FEM', 'w');
160 createHEADER(fileID)
161 fprintf(fileID, '[NumPoints] = %5.0f\n', length(P)+7);
162 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n', 0, 0, 0, 0);
163 for n = 1 : length(P)
164     fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n', P(n,:));
165 end
166 % Definition of circle
167 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n', ri2, 0, 0, 0);
168 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n', -ri2, 0, 0, 0);
169 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n', ro2, 0, 0, 0);
170 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n', -ro2, 0, 0, 0);
171 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n', -(ro2*1.5)
172         , 0, 0, 0);
173 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n', (ro2*1.5)
174         , 0, 0, 0);

```



```

173 fprintf(fileID , '[NumSegments] = %5.0f\n' , length(dr));
174 for np = 1 : length(dr)
175     fprintf(fileID , '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f\n' , dr(np,1) ,
        dr(np,2) , dr(np,3) , dr(np,4) , dr(np,5) );
176 end
177
178 fprintf(fileID , [ '[NumArcSegments] = 6\n' , ...
179 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n' , ...
180 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n' , ...
181 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n' , ...
182 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n' , ...
183 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n' , ...
184 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n' , ...
185 '[NumHoles] = 0\n' ] , ...
186 length(dr)+2,length(dr)+1 , ...
187 length(dr)+1,length(dr)+2 , ...
188 length(dr)+4,length(dr)+3 , ...
189 length(dr)+3,length(dr)+4 , ...
190 length(dr)+6,length(dr)+5 , ...
191 length(dr)+5,length(dr)+6);
192
193 fprintf(fileID , '[NumBlockLabels] = %3.0f\n' , length(mm_mag)+3);
194 fprintf(fileID , '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f
    %6.0f\n' , 1 , -2 , 2 , -1 , 0 , 0 , 0 , 1 , 0);
195 fprintf(fileID , '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f
    %6.0f\n' , 2 , (ro2) , 2 , -1 , 0 , 0 , 0 , 1 , 0);
196 fprintf(fileID , '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f
    %6.0f\n' , 2 , ri2+0.001*ri2 , 2 , -1 , 0 , 0 , 0 , 1 , 0);
197 [row , col] = size(mm_mag);
198 for np = 1 : row
199     fprintf(fileID , '%6.8f %6.8f %6.0f %6.0f %6.0f %6.5f %6.0f
        %6.0f %6.0f\n' , ...
200             mm_mag(np,1) , ...
201             mm_mag(np,2) , ...
202             mm_mag(np,3) , ...
203             mm_mag(np,4) , ...
204             mm_mag(np,5) , ...
205             mm_mag(np,6) , ...
206             mm_mag(np,7) , ...
207             mm_mag(np,8) , ...
208             mm_mag(np,9) );
209 end
210

```

```
211 fclose(fileID);
```

Listing D.14: Octave Quellcode: Erstellen des 7,5 kA/m Magnetring

```
1
2 %
3 %   Magnetring mit 7.5 kA/m in der Mitte
4 %   Simuliert am: 11.06.2018
5 %   Hier wird ein Ringmagnet aus mehreren einzelnen Magneten
6 %   zusammengesetzt.
7 %   Nachdem der Magnetring erstellt wurde, wird mit dem Tool
   FEMM
8 %
   %=====
9
10 % close all
11 clear all
12 clc
13
14 % inner and outer radian of ring magnet
15 di = 154.1;
16 % 109 * 1.4142 = 1541mm
17
18
19 % numebr of magnets
20 n_mag = 36;
21
22 % number of poles; if 4: you create a quadrupole
23 %   typical values are 2,4,6,8,10,12,...
24 %   only even numbers are allowed
25 n_pole = 2;
26
27 % Magnet size Squared only!
28 %szx = 14.1421312;
29 szx = 14.142;
30
31 r_mag = szx/2;
32
33 % use number of edges for hexa or octagon magnetic form
34 n_eck = 4;
35
36
37 t_mag = [0:2*pi/(n_eck):2*pi];
```

```
38 px = r_mag.*cos(t_mag+2*pi/(n_eck*2));px(end) = [];  
39 py = r_mag.*sin(t_mag+2*pi/(n_eck*2));py(end) = [];  
40  
41  
42  
43  
44 diamo = di+2*sqrt(szx.^2)*1.4142;  
45 %  
  
46 % start computation  
47 %  
  
48 ri = di/2;  
49 ro = diamo/2;  
50 r = (ri+ro)/2;  
51  
52 ri2 = ri;  
53 ro2 = ro;  
54  
55 ri2 = ri2;  
56 ro2 = ro2;  
57  
58 ct = 1;  
59 for n = 0 : 2*pi/n_mag : 2*pi-2*pi/n_mag  
60     M.x(ct) = r*sin(n);  
61     M.y(ct) = r*cos(n);  
62     ct = ct+1;  
63 end  
64  
65 ct = 1;  
66 for n = 0 : 2*pi/360 : 2*pi  
67     CIRC.c1x(ct) = ri2*sin(n);  
68     CIRC.c1y(ct) = ri2*cos(n);  
69     CIRC.c2x(ct) = ro2*sin(n);  
70     CIRC.c2y(ct) = ro2*cos(n);  
71     ct = ct+1;  
72 end  
73  
74 kk = 1;  
75  
76 xc = px;
```

```

77 yc = py;
78
79 nt = n_pole+2;
80 for i = 1 : length(M.x)
81     rot(i) = atan2(cos((nt*pi/n_mag)*(i-1)),...
82                  sin((nt*pi/n_mag)*(i-1)).*180./pi);
83
84     R      = [cosd(rot(i))  -sind(rot(i))
85              sind(rot(i))   cosd(rot(i))];
86     R(abs(R)<1e-10) = 0;
87     for j = 1 : length(xc)
88         [F] = R * [xc(j);yc(j)];
89         p.x(i,j) = M.x(i)+ F(1);
90         p.y(i,j) = M.y(i)+ F(2);
91     end
92     if i == 1
93         dist(kk) = sqrt((p.x(1,1)-p.x(1,2)).^2);
94     end
95
96 end
97
98 disp(dist)
99
100 fs = 10;
101 h = figure(1);
102 set(h, 'units', 'centimeters')
103 set(h, 'position', [1, 10, 18, 18]); %[ left, bottom, width,
    height]
104
105 s1 = sprintf('Ring magnet with %3.0d squared magnets of size
    %3.0d mm', n_mag, szx);
106
107 plot(CIRC.c1x, CIRC.c1y, CIRC.c2x, CIRC.c2y, 'linewidth', 1, '
    color', 'k', 'linestyle', ':')
108 hold on
109 axis square, ylim([-ro2 ro2]), xlim([-ro2 ro2])
110
111 for n = 1 : length(M.x)
112     s = sprintf('m_{%2.0d}', n);
113     text(M.x(n), M.y(n), s, 'FontSize', 8, 'HorizontalAlignment'
    , 'center')
114     for n_seg = 1 : length(xc)-1
115         line([p.x(n, n_seg) p.x(n, n_seg+1)], ...

```

```

116             [p.y(n,n_seg) p.y(n,n_seg+1)])
117         end
118         line( [p.x(n,n_seg+1) p.x(n,1)] ,...
119             [p.y(n,n_seg+1) p.y(n,1)])
120     end
121     line([0 ri2/1.5],[0 0], 'linewidth',1.5)
122     line([0 0],[0 ri2/1.5], 'linewidth',1.5)
123     s = sprintf('r_i = %3.2f mm',ri2);
124     text(0,ri2-ri2*0.1,s, 'FontSize',8, 'HorizontalAlignment', '
125         center')
126     s = sprintf('r_o = %3.2f mm',ro2);
127     text(0,ro2+ro2*0.05,s, 'FontSize',8, 'HorizontalAlignment', '
128         center')
129     hold off
130     box on
131     xlabel('x (mm)', 'FontSize',fs)
132     ylabel('y (mm)', 'FontSize',fs)
133     grid on
134     title(s1, 'FontSize',fs)
135 %%
136 npts = 1;
137 bb = 1;
138 for i = 1 : length(M.x)
139     for j = 1 : length(xc)
140         P(npts,:) = [p.x(i,j),p.y(i,j),0,0];
141         npts = npts+1;
142     end
143     mm_mag(i,:) = [ mean(p.x(i,:)) mean(p.y(i,:)) 1 -1
144         0 rot(i) 0 1 0];
145 %     dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0];bb = bb+1;
146 %     dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0];bb = bb+1;
147 %     dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0];bb = bb+1;
148 %     dr(bb,:) = [bb bb-3 -1 0 0 0];bb = bb+1;
149     for n_seg = 1 : length(xc)-1
150         dr(bb,:) = [bb bb+1 -1 0 0 0];bb = bb+1;
151     end
152     dr(bb,:) = [bb bb+1-length(xc) -1 0 0 0];bb = bb+1;
153 end
154 ri2 = ri2;
155 ro2 = ro2;
156 %% Schreiben der berechneten Daten in ein *.femm file

```

```

156
157 fileID = fopen('POINTS.FEM', 'w');
158 createHEADER(fileID)
159 fprintf(fileID, '[NumPoints] = %5.0f\n', length(P)+7);
160 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n', 0,0,0,0);
161 for n = 1 : length(P)
162     fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n', P(n,:));
163 end
164 % Definition of circle
165 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n', ri2,0,0,0);
166 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n', -ri2,0,0,0);
167 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n', ro2,0,0,0);
168 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n', -ro2,0,0,0);
169 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n', -(ro2*1.5)
    ,0,0,0);
170 fprintf(fileID, '\t%10.8f %10.8f %10.8f %10.8f\n', (ro2*1.5)
    ,0,0,0);
171 fprintf(fileID, '[NumSegments] = %5.0f\n', length(dr));
172 for np = 1 : length(dr)
173     fprintf(fileID, '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f\n', dr(np,1),
        dr(np,2), dr(np,3), dr(np,4), dr(np,5));
174 end
175
176 fprintf(fileID, ['[NumArcSegments] = 6\n', ...
177 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n', ...
178 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n', ...
179 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n', ...
180 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n', ...
181 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n', ...
182 '%4.0f %4.0f 180 1 0 0 0\n', ...
183 '[NumHoles] = 0\n'], ...
184 length(dr)+2, length(dr)+1, ...
185 length(dr)+1, length(dr)+2, ...
186 length(dr)+4, length(dr)+3, ...
187 length(dr)+3, length(dr)+4, ...
188 length(dr)+6, length(dr)+5, ...
189 length(dr)+5, length(dr)+6);
190
191 fprintf(fileID, '[NumBlockLabels] = %3.0f\n', length(mm_mag)+3);
192 fprintf(fileID, '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f
    %6.0f\n', 1, -2, 2, -1, 0, 0, 0, 1, 0);
193 fprintf(fileID, '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f
    %6.0f\n', 2, (ro2), 2, -1, 0, 0, 0, 1, 0);

```

```

194 fprintf(fileID, '%6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f %6.0f
    %6.0f\n', 2, ri2+0.001*ri2, 2, -1, 0, 0, 0, 1, 0);
195 [row, col] = size(mm_mag);
196 for np = 1 : row
197     fprintf(fileID, '%6.8f %6.8f %6.0f %6.0f %6.0f %6.5f %6.0f
    %6.0f %6.0f\n', ...
198             mm_mag(np, 1) , ...
199             mm_mag(np, 2) , ...
200             mm_mag(np, 3) , ...
201             mm_mag(np, 4) , ...
202             mm_mag(np, 5) , ...
203             mm_mag(np, 6) , ...
204             mm_mag(np, 7) , ...
205             mm_mag(np, 8) , ...
206             mm_mag(np, 9) );
207 end
208
209 fclose(fileID);

```

Listing D.15: Octave Quellcode: Darstellung der Messmatrix des 4 kA/m Magnetring

```

1
2 %
3 %   Darstellung der Messwerte von Magnetring mit 4 kA/m
4 %
5 %
6 %=====
7
8 close all
9 clear all
10 clc
11 Hx = [10.04      9.13      8.25      7.67      7.31      6.95      6.9
        6.79      6.93      7.05      7.32      7.7      8.49      9.41
        10.4
12      8 6.95      6.61      6.24      6.01      5.82      5.8      5.63
        5.85      5.97      6.16      6.36      6.83      7.42
        8.4
13      6.7      6.1      5.6      5.36      5.2      4.95      4.86
        4.7      4.85      4.9      5.2      5.4      5.7
        6.25      6.8
14      5.64      5.4      4.87      4.71      4.54      4.4      4.39

```

```

          4.34    4.4    4.56    4.6    4.8    4.9
        5.02    5.32
15    4.95    4.83    4.56    4.3    4.25    4.15    4.05
        4.04    4.08    4.15    4.3    4.48    4.55
        4.83    4.95
16    4.68    4.4    4.1    4.15    4    3.9    3.9
        3.82    3.9    3.97    4.14    4.27    4.32
        4.55    4.7
17    4.5    4.28    4.12    4    3.98    3.95    3.91
        3.81    3.91    3.96    4.01    4.1    4.31
        4.37    4.56
18    4.47    4.17    4.09    4.07    4    3.9    3.91
        3.8    3.91    3.9    4    4.1    4.17
        4.29    4.55
19    4.43    4.22    4.13    4.07    4.05    4    3.99
        3.98    3.9    3.89    4.12    4.2    4.34
        4.42    4.51
20    4.83    4.44    4.42    4.21    4.06    3.97    3.9
        3.9    4.02    4.06    4.13    4.2    4.28
        4.38    4.52
21    4.84    4.54    4.32    4.38    4.26    4.12    4.11
        4.09    4.02    4.12    4.17    4.36    4.54
        4.7    5.1
22    5.35    4.9    4.86    4.67    4.57    4.4    4.39
        4.39    4.4    4.5    4.58    4.69    5.02
        5.16    5.28
23    6.4    5.86    5.55    4.94    4.6    4.57    4.53
        4.52    4.6    4.8    5.05    5.21    5.48
        5.86    6
24    7.7    6.97    6.35    6.3    5.95    5.73    5.4
        5.38    5.79    5.85    5.87    6.02    6.42
        6.87    7.5
25    9.8    8.9    7.7    7.42    7.1    6.8    6.79
        6.71    6.73    6.97    7.02    7.4    8.2
        8.81    9.5]
26 %Hx = interpn(Hx,1);
27
28 L = length(Hx);
29 sz = 85;
30 x = [-sz/2:sz/(L-1):sz/2];
31 y = [-sz/2:sz/(L-1):sz/2];
32
33 [xx,yy] = meshgrid(x,y);

```



```

34
35
36 subplot(2,2,1)
37 imagesc(x,y,Hx)
38 hold on
39 line([xx(1,8) xx(1,8)],[yy(1,8) yy(15,8)], 'color','w', '
    linewidth',1.5, 'linestyle',':')
40 hold off
41 set(gca, 'Ydir', 'normal')
42 axis square
43 colorbar
44 title('H_x in kA/m innerhalb des Halbach-Arrays')
45 xlabel('x in mm')
46 ylabel('y in mm')
47
48 subplot(2,2,2)
49 surf(interpn(xx,0),...,
50       interpn(yy,0),...,
51       interpn(Hx,0))
52 view([15,15,5])
53 xlabel('x in mm')
54 ylabel('y in mm')
55 zlabel('H_x in kA/m')
56
57 subplot(2,2,3:4)
58 plot(yy(:,8),Hx(:,8))
59 ylabel('y in mm')
60 title('H_x in kA/m innerhalb des Halbach-Arrays')
61 set(gca, 'Xtick',[floor(y*100)/100])
62 grid on
63 xlim([y(1) y(end)])
64 ylim([min(Hx(:,8))*0.9 max(Hx(:,8))*1.1])

```

Listing D.16: Octave Quellcode: Mittelwertbildung der W10 Magnete

```

1 %Mittelwertbildung der Messung von 51 W10 Magneten
2
3 close all
4 clear all
5 clc
6
7 M1 = dlmread('1.txt');
8 M2 = dlmread('2.txt');
9 M3 = dlmread('3.txt');

```

```
10 M4 = dlmread('4.txt');
11 M5 = dlmread('5.txt');
12 M6 = dlmread('6.txt');
13 M7 = dlmread('7.txt');
14 M8 = dlmread('8.txt');
15 M9 = dlmread('10.txt');
16 M10 = dlmread('11.txt');
17 M11 = dlmread('12.txt');
18 M12 = dlmread('13.txt');
19 M13 = dlmread('14.txt');
20 M14 = dlmread('16.txt');
21 M15 = dlmread('17.txt');
22 M16 = dlmread('18.txt');
23 M17 = dlmread('19.txt');
24 M18 = dlmread('20.txt');
25 M19 = dlmread('21.txt');
26 M20 = dlmread('22.txt');
27 M21 = dlmread('23.txt');
28 M22 = dlmread('25.txt');
29 M23 = dlmread('26.txt');
30 M24 = dlmread('27.txt');
31 M25 = dlmread('28.txt');
32 M26 = dlmread('29.txt');
33 M27 = dlmread('30.txt');
34 M28 = dlmread('31.txt');
35 M29 = dlmread('32.txt');
36 M30 = dlmread('33.txt');
37 M31 = dlmread('34.txt');
38 M32 = dlmread('35.txt');
39 M33 = dlmread('36.txt');
40 M34 = dlmread('37.txt');
41 M35 = dlmread('38.txt');
42 M36 = dlmread('39.txt');
43 M37 = dlmread('40.txt');
44 M38 = dlmread('41.txt');
45 M39 = dlmread('42.txt');
46 M40 = dlmread('43.txt');
47 M41 = dlmread('44.txt');
48 M42 = dlmread('45.txt');
49 M43 = dlmread('46.txt');
50 M44 = dlmread('47.txt');
51 M45 = dlmread('48.txt');
52 M46 = dlmread('49.txt');
```

```
53 M47 = dlmread( '50.txt' );
54 M48 = dlmread( '52.txt' );
55 M49 = dlmread( '53.txt' );
56 M50 = dlmread( '54.txt' );
57 M51 = dlmread( '55.txt' );
58
59
60 %Mittelwertbildung
61 SUMME(1,1) = 0;
62 SUMME(2,1) = 1;
63 SUMME(3,1) = 2;
64 SUMME(4,1) = 3;
65 SUMME(5,1) = 4;
66 SUMME(6,1) = 5;
67 SUMME(7,1) = 6;
68 SUMME(8,1) = 7;
69 SUMME(9,1) = 8;
70 SUMME(10,1) = 9;
71 SUMME(11,1) = 10;
72 SUMME(12,1) = 15;
73 SUMME(13,1) = 20;
74 SUMME(14,1) = 25;
75 SUMME(15,1) = 30;
76 SUMME(16,1) = 35;
77 SUMME(17,1) = 40;
78 SUMME(18,1) = 45;
79 SUMME(19,1) = 50;
80
81 for i=1:19,
82
83
84 SUMME(i,2) = (M1(i,2) + M2(i,2) + M3(i,2) + M4(i,2) + M5(i,2) +
      M6(i,2) ...
85 + M7(i,2) + M8(i,2) + M9(i,2) + M10(i,2) + M11(i,2) + M12(i,2)
      + ...
86 M13(i,2) + M14(i,2) + M15(i,2) + M16(i,2) + M17(i,2) + M18(i
      ,2) + ...
87 M19(i,2) + M20(i,2) + M21(i,2) + M22(i,2) + M23(i,2) + M24(i
      ,2) + ...
88 M25(i,2) + M26(i,2) + M27(i,2) + M28(i,2) + M29(i,2) + M30(i
      ,2) + ...
89 M31(i,2) + M32(i,2) + M33(i,2)+ M34(i,2)+ M35(i,2)+ M36(i,2)
      ...
```

```
90 + M37(i,2)+ M38(i,2)+ M39(i,2)+ M40(i,2)+ M41(i,2)+ M42(i,2)+
    M43(i,2) ...
91 + M44(i,2)+ M45(i,2)+ M46(i,2)+ M47(i,2)+ M48(i,2)+ M49(i,2)+
    M50(i,2) ...
92 + M51(i,2))/51;
93
94
95 end
```

Listing D.17: Octave Quellcode: Motorsteuerung und speichern der Datei in eine Datei

```
1 % Programm zur Steuerung des Schrittmotors: PD3-140-42SE-485
2 % Datum: 22.08.2018
3 %
4 %
5 %
6
7 close all
8 clear all
9 clc
10
11 pkg load instrument-control
12 pkg load communications
13 more off
14
15 try
16     s1 = serial("/dev/ttyACM2", 115200, 1) % initialize serial
        port 1
17 catch
18 end
19 try
20     s2 = serial("/dev/ttyACM1", 115200, 1) % initialize serial
        port 1
21 catch
22 end
23
24 try
25     % Motor min speed set
26     addr_out = 1;
27     com_out = 5;
28     typ_out = 4;
29     mot_out = 0;
30     value_out = 50;
31
```

```

32     dataout=zeros(9,1,'uint8');
33     dataout(1)=addr_out;    % address
34     dataout(2)=com_out;    % instruction
35     dataout(3)=typ_out;    % type
36     dataout(4)=mot_out;    % motor
37     dataout(8:-1:5)=typecast(int32(value_out),'uint8');
38     dataout(9)=bitand(sum(dataout(1:8)),255);    % checksum
39
40
41     % Flush input and output buffers
42     srl_flush(s1);
43     % Blocking write call, currently only accepts strings
44     srl_write(s1, dataout) ;
45     % pause(0.25)
46     % Blocking read call, returns uint8 array of exactly 12
47         bytes read
48     data = srl_read(s1,200) ;
49     % Convert uint8 array to string,
50     cmdout = char(data);
51     C      = strsplit(cmdout,'break\n');
52     DAT_IN = str2num(C{1,1});
53     c(a,:) =DAT_IN(1,1);
54     c2(a,:) =DAT_IN(1,2);
55 catch
56 end
57 for n = 1:72
58     try
59         % Motor Move to relative position 5 degree
60         addr_out = 1;
61         com_out  = 4;
62         typ_out  = 1;
63         mot_out  = 0;
64         value_out = 888.8889;    % 5 degree
65         % 1 degree = 177.6666
66         % 15 degree = 2665
67         % 360 degree = 64000
68
69         % wait 2 seconds
70         disp ("bitte 2 Sekunden warten...");
71         pause (2);
72
73         % Flush input and output buffers

```

```

74     srl_flush(s2);
75     % Blocking write call, currently only accepts strings
76     srl_write(s2, "-test") ;
77     pause(0.1)
78     % Blocking read call, returns uint8 array of exactly 12
       bytes read
79     data = srl_read(s2,1800);
80     pause(0.1)
81     % Convert uint8 array to string,
82     cmdout = char(data);
83     C = strsplit(cmdout, 'break');
84     COS_SIG = str2num(C{1,1});
85     SIN_SIG = str2num(C{1,2});
86
87     DAT(n).SIN_SIG_raw = SIN_SIG;
88     DAT(n).SIN_SIG_f   = SIN_SIG./4095.*3.3;
89     DAT(n).COS_SIG_raw = COS_SIG;
90     DAT(n).COS_SIG_f   = COS_SIG./4095.*3.3;
91     DAT(n).alpha       = (n-1)*15;
92
93
94
95
96     clc;
97
98     dataout=zeros(9,1,'uint8');
99     dataout(1)=addr_out;    % address
100    dataout(2)=com_out;     % instruction
101    dataout(3)=typ_out;     % type
102    dataout(4)=mot_out;     % motor
103    dataout(8:-1:5)=typecast(int32(value_out),'uint8');
104    dataout(9)=bitand(sum(dataout(1:8)),255); % checksum
105
106
107    % Flush input and output buffers
108    srl_flush(s1);
109    % Blocking write call, currently only accepts strings
110    srl_write(s1, dataout) ;
111    % pause(0.25)
112    % Blocking read call, returns uint8 array of exactly 12
       bytes read
113    data = srl_read(s1,200) ;
114    % Convert uint8 array to string,

```

```
115     cmdout = char(data);
116     C = strsplit(cmdout, 'break\n');
117     DAT_IN = str2num(C{1,1});
118     c(a,:) = DAT_IN(1,1);
119     c2(a,:) = DAT_IN(1,2);
120
121
122     % Motor Stop
123     addr_out = 1;
124     com_out = 3;
125     typ_out = 0;
126     mot_out = 0;
127     value_out = 0; % velocity 0 ...-- MAX 500 -- Do not
        use higher values
128 catch
129 end
130 end
131 close(s1)
132 close(s2)
133 save('test_DAT.mat', 'DAT') % save data to file
134 disp('ready')
```

Listing D.18: Octave Quellcode: Lesen der Messmatrix aus der Datei

```
1 % Programm zur Lesen der Daten aus Datei
2 % Datum: 22.08.2018
3 %
4 %
5 %
6
7 clear all
8 clc
9
10 load('test_DAT_mit_storfeld_10k_N_Ring_bei_0_grad.mat')
11
12 m = 1;
13 for n = 1 : length(DAT)
14     c_val(m,:) = DAT(n).COS_SIG_raw(:);
15     s_val(m,:) = DAT(n).SIN_SIG_raw(:);
16     alpha(m,:) = DAT(n).alpha(:) ./ 15.*5;
17     m = m+1;
18 end
19
20 A = 1 : 64;
```

```

21 A = reshape(A,8,8);
22
23 c_val = c_val./max(abs(c_val(:)));
24 s_val = s_val./max(abs(s_val(:)));
25
26 for n = 1 : 8
27     for m = 1 : 8
28
29         row = n;
30         col = m;
31
32
33         c = c_val(:,A(row,col));
34         c = c - (max(c)+min(c))/2;
35         s = s_val(:,A(row,col));
36         s = s - (max(s)+min(s))/2;
37
38         s = s.*3;
39         c = c.*3;
40
41         subplot(1,2,1)
42         plot(c+m,s+n,'color','b','linewidth',1.5)
43         hold on
44         line([m c(1)+m],[n s(1)+n],'color','r','linewidth',2)
45         axis square
46     end
47 end
48 hold off
49
50 xlim([0 9])
51 ylim([0 9])
52 set(gca,'Xtick',[1:8])
53 set(gca,'Ytick',[1:8],'YtickLabel',['A':'H'])
54 grid on
55 xlabel('col')
56 ylabel('row')
57
58 subplot(1,2,2)
59 plot(alpha,c_val(:,A(5,5))-(max(c_val(:,A(5,5)))+min(c_val(:,A
    (5,5))))/2,'color','b','linewidth',1.5),hold on
60 plot(alpha,s_val(:,A(5,5))-(max(s_val(:,A(5,5)))+min(s_val(:,A
    (5,5))))/2,'color','r','linewidth',1.5),hold off
61 xlabel('rotation in degree')

```

```
62 ylabel('U_{out} in V')
63 title('Output voltage of sensor (E,5)')
64 set(gca, 'Xtick', [0:45:360])
65 xlim([0 360])
66 grid on
```

E Technische Zeichnen

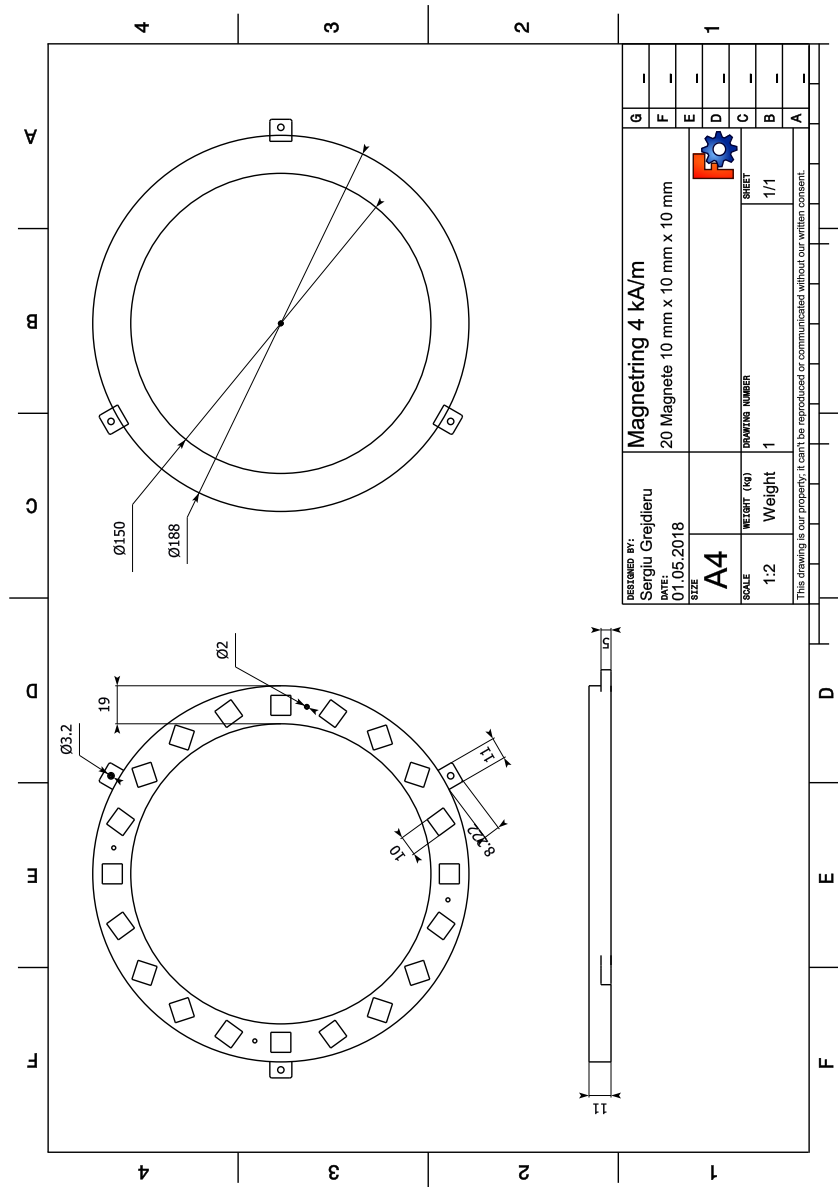


Abbildung E.1: Technische Zeichnung: Magnetring 4 kA/m

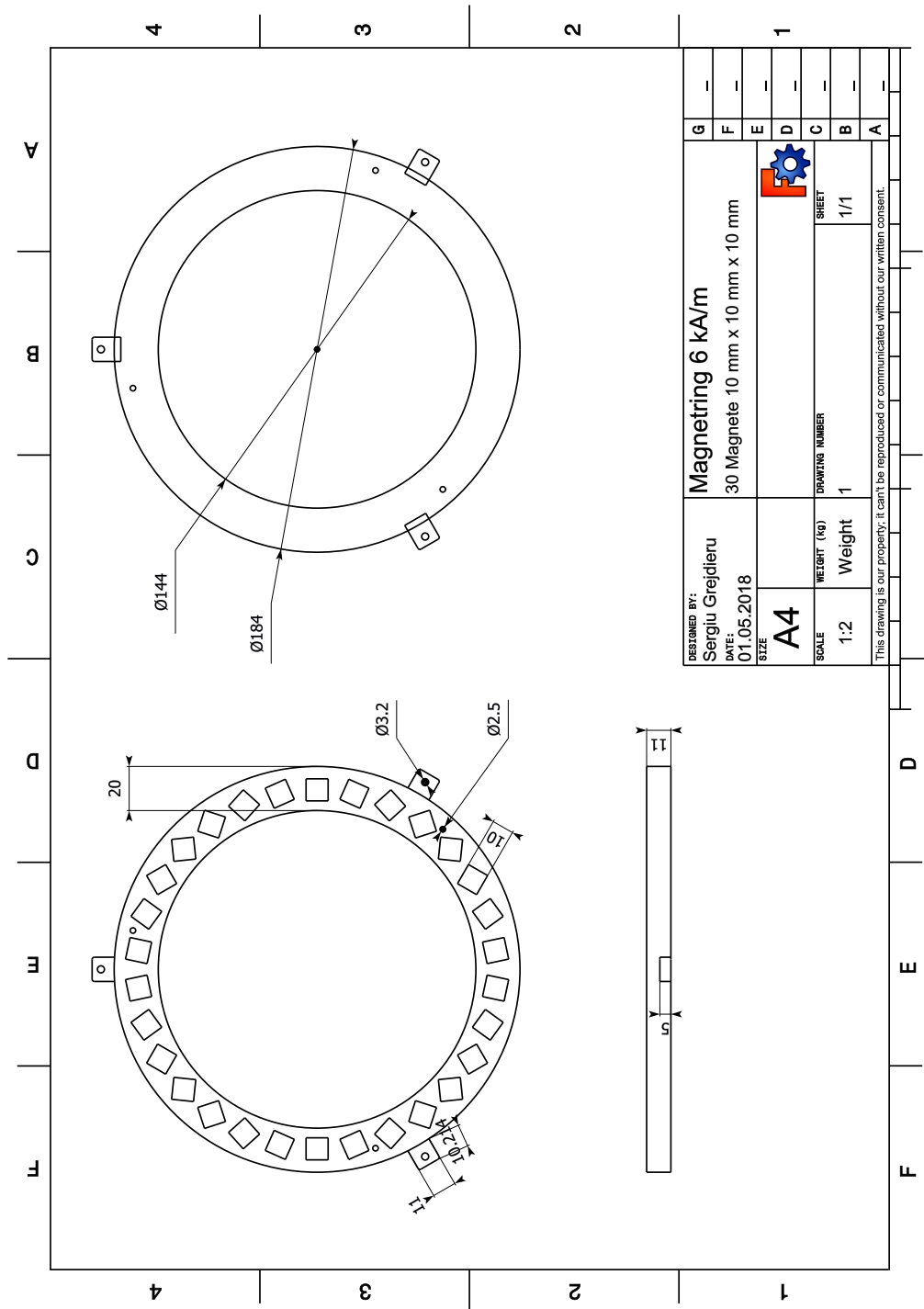


Abbildung E.2: Technische Zeichnung: Magnetring 6 kA/m

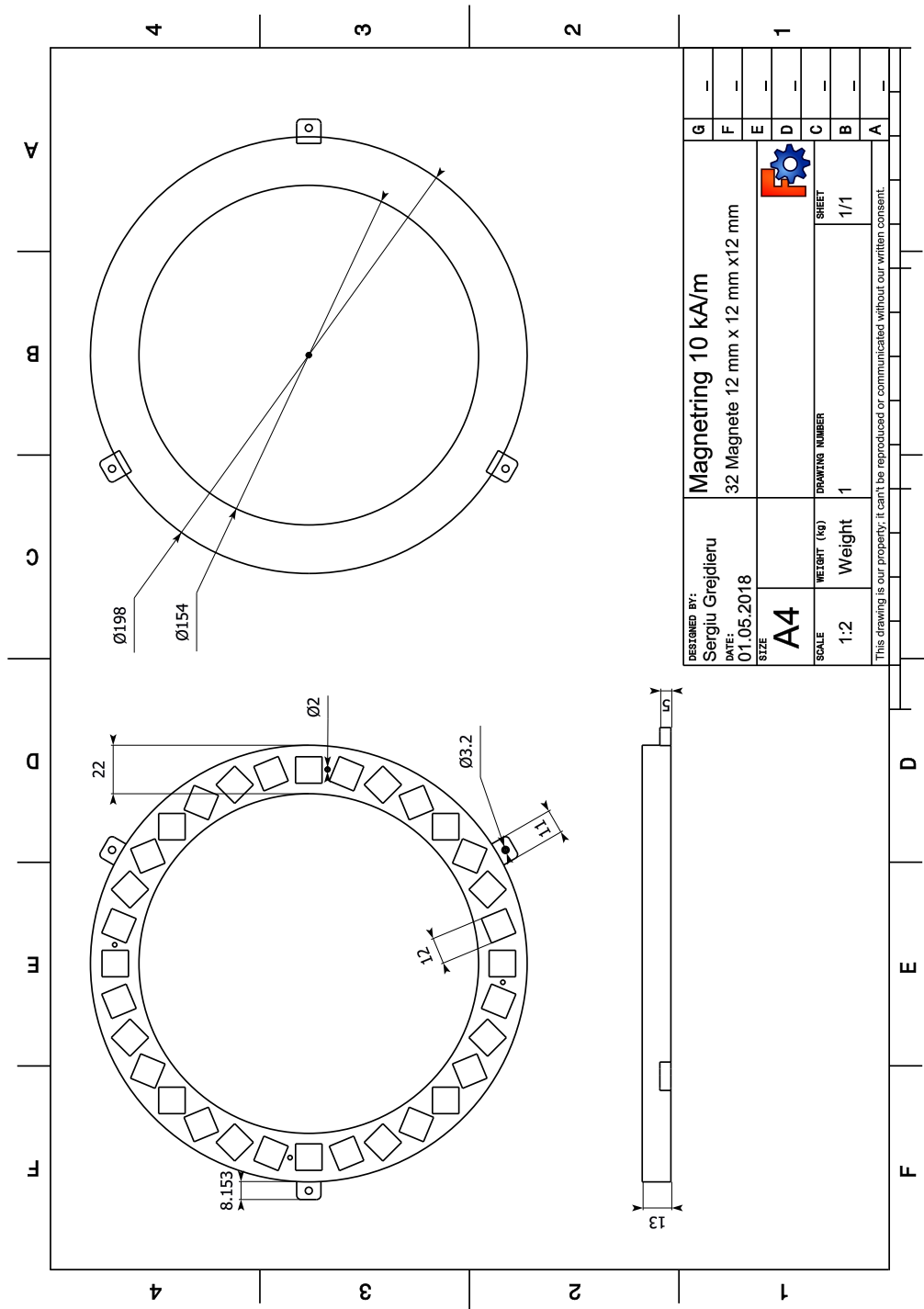


Abbildung E.3: Technische Zeichnung: Magnetring 10 kA/m

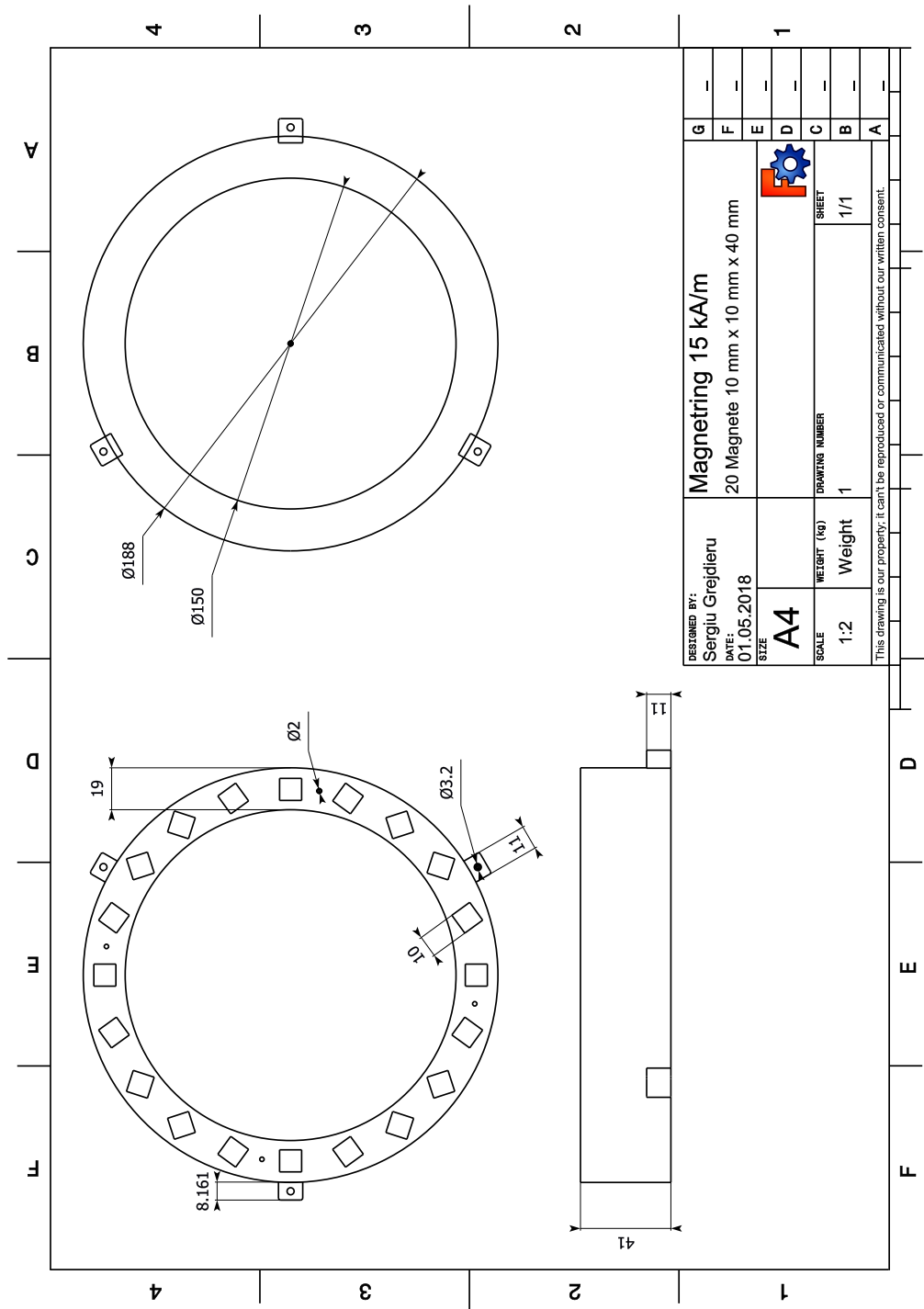


Abbildung E.4: Technische Zeichnung: Magnetring 15 kA/m

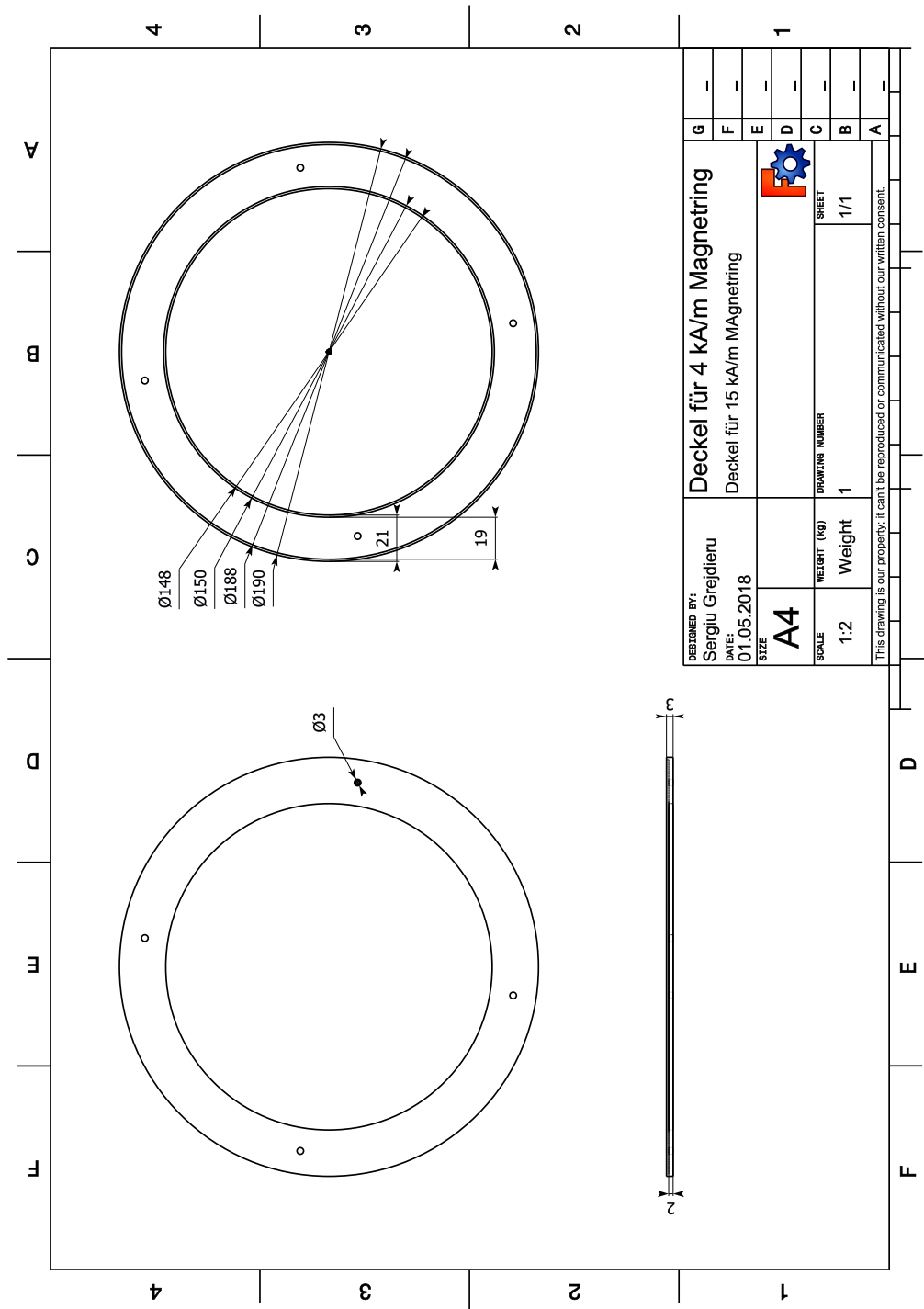


Abbildung E.5: Technische Zeichnung: Deckel für Magnetring 4 kA/m und 15 kA/m

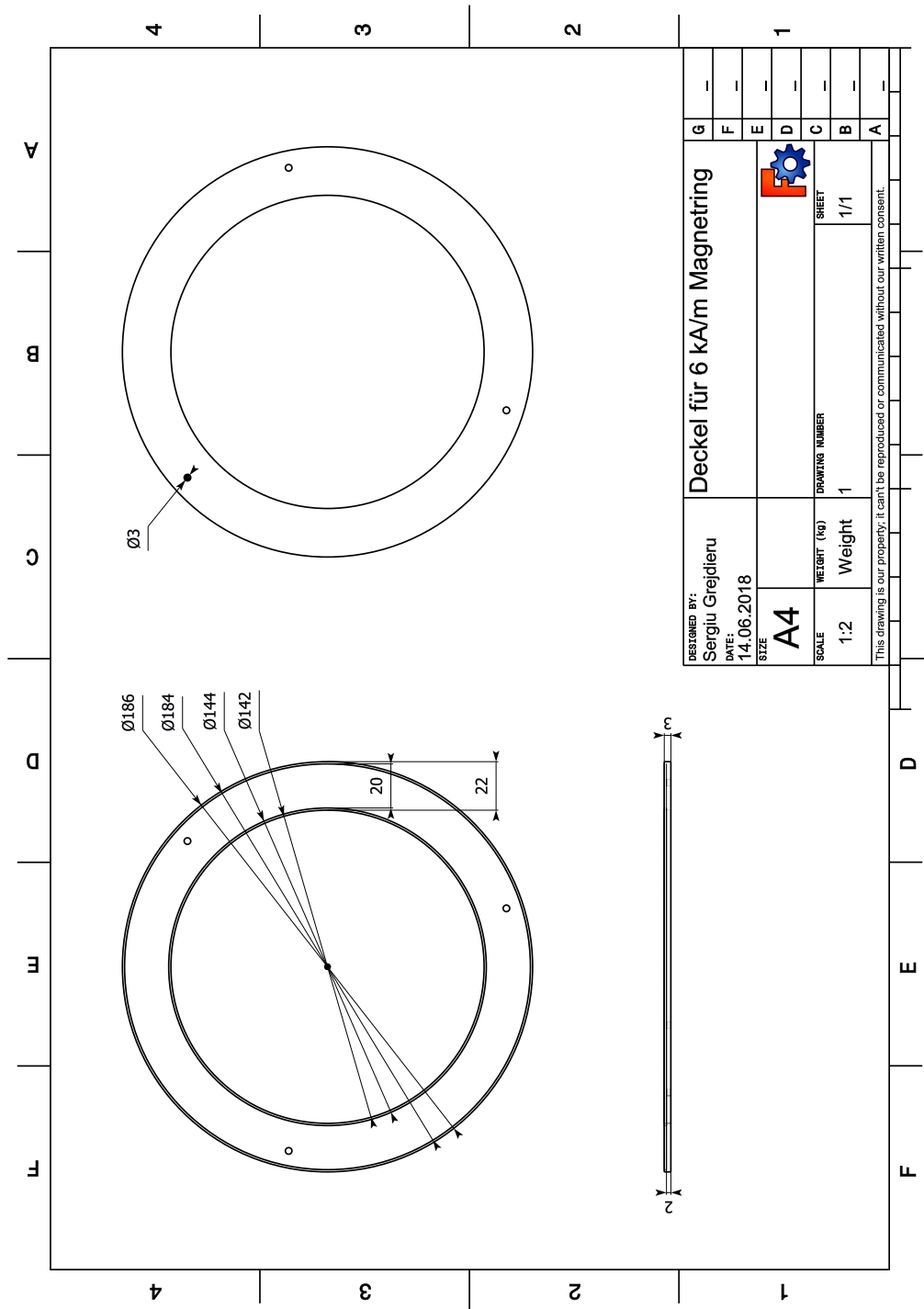


Abbildung E.6: Technische Zeichnung: Deckel für Magnetring 6 kA/m

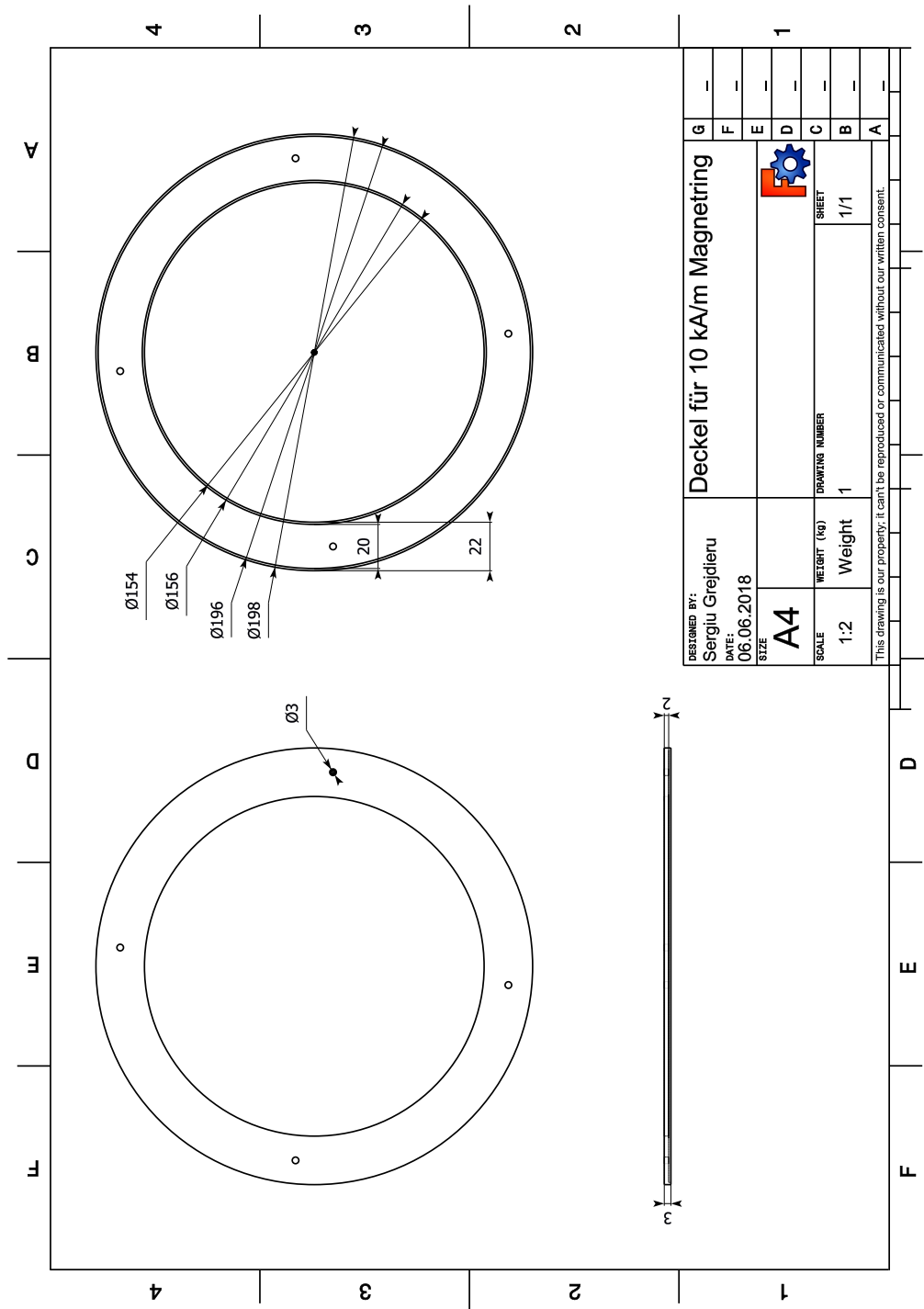


Abbildung E.7: Technische Zeichnung: Deckel für Magnetring 10 kA/m

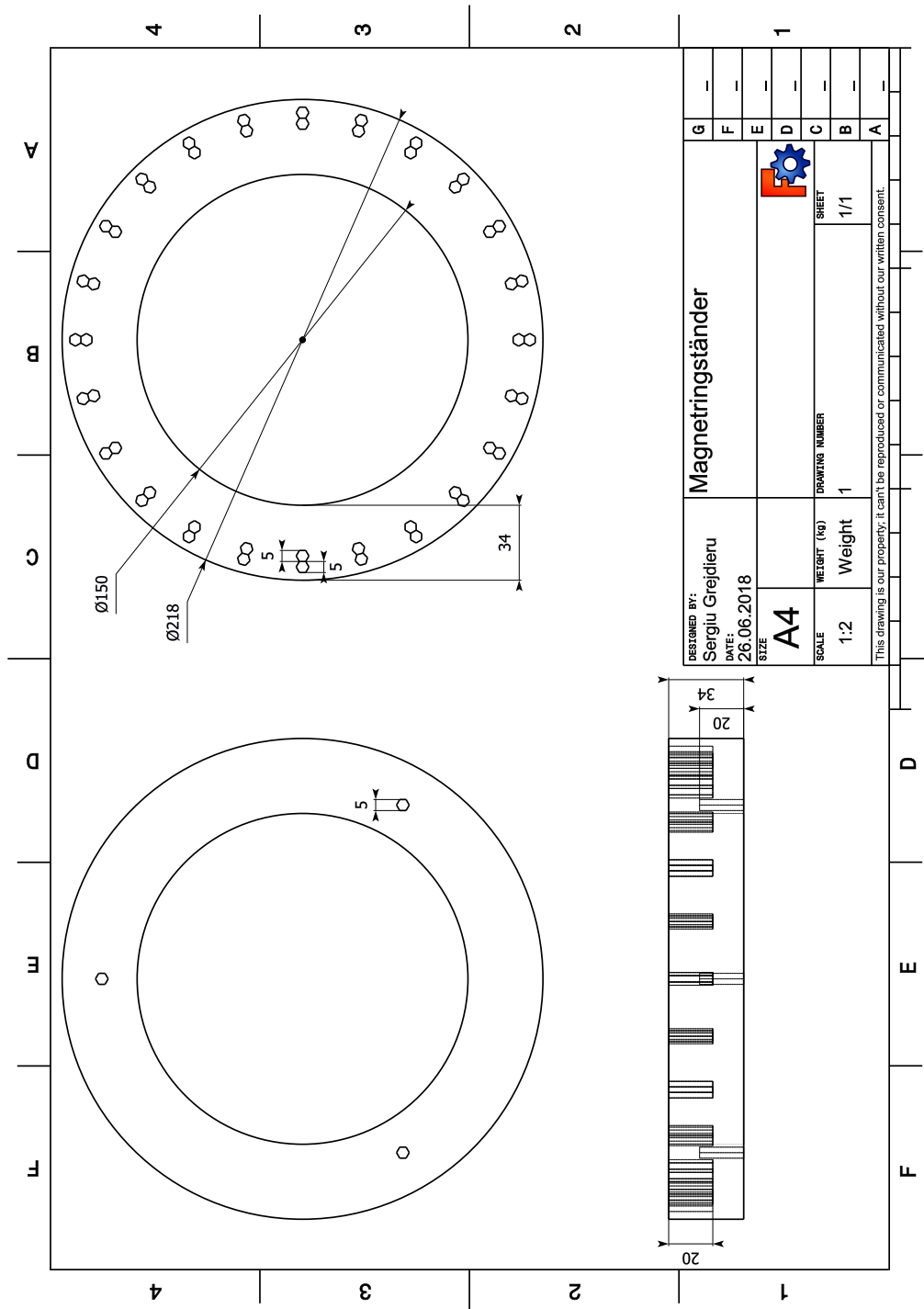


Abbildung E.8: Technische Zeichnung: Magnetringsänder

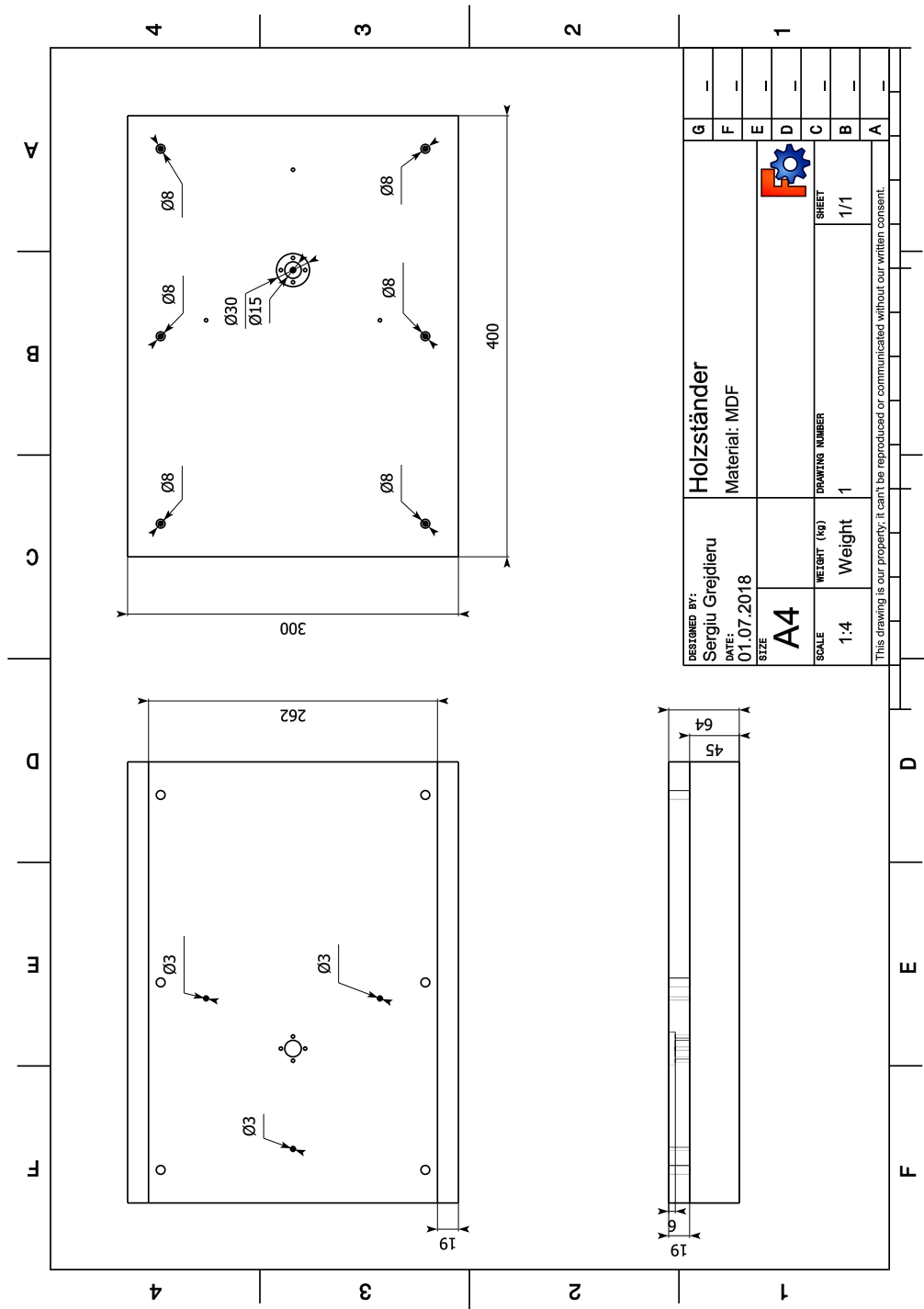


Abbildung E.9: Technische Zeichnung: MDF Holzständer

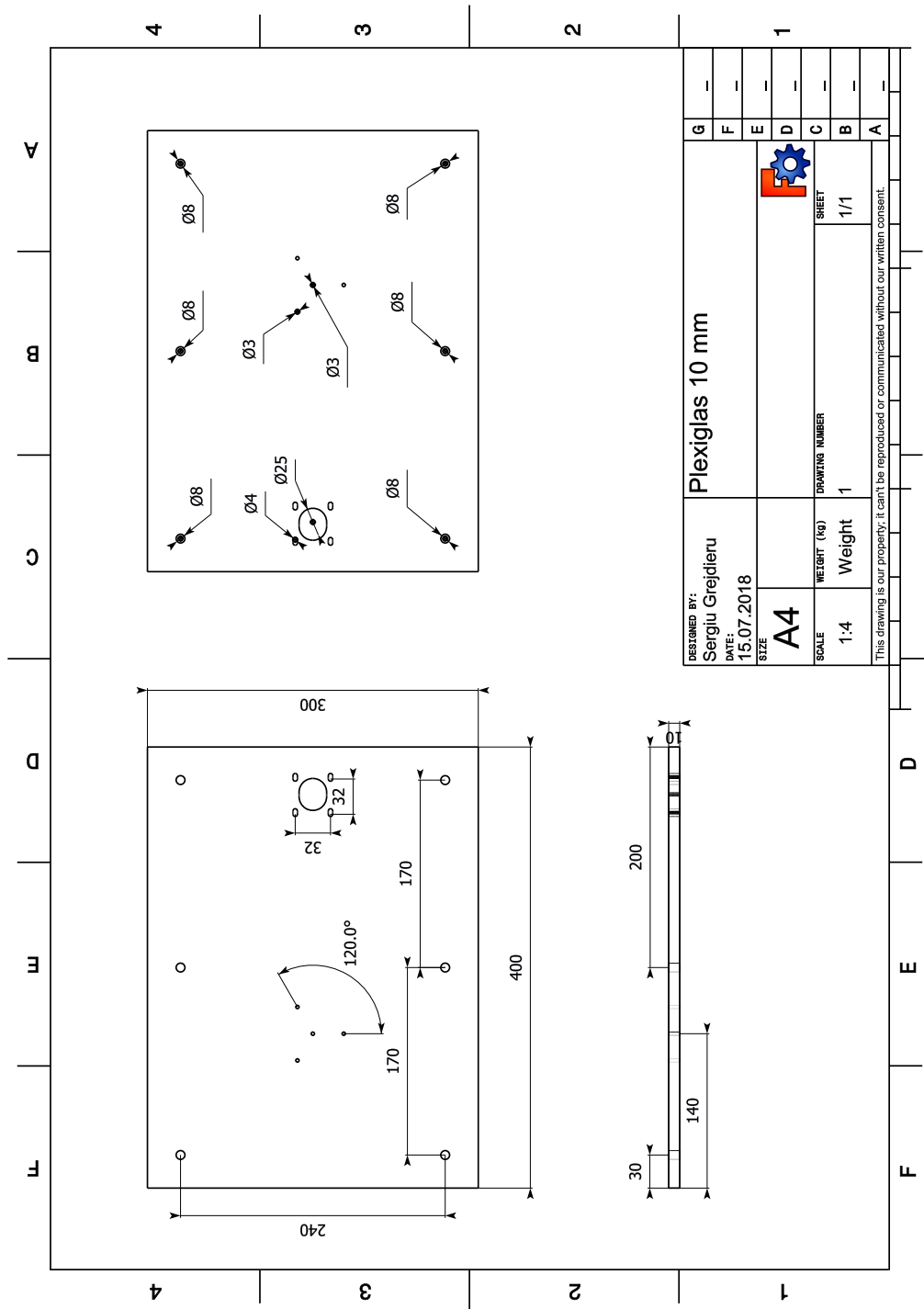


Abbildung E.10: Technische Zeichnung: Plexiglas mit 10 mm Dicke

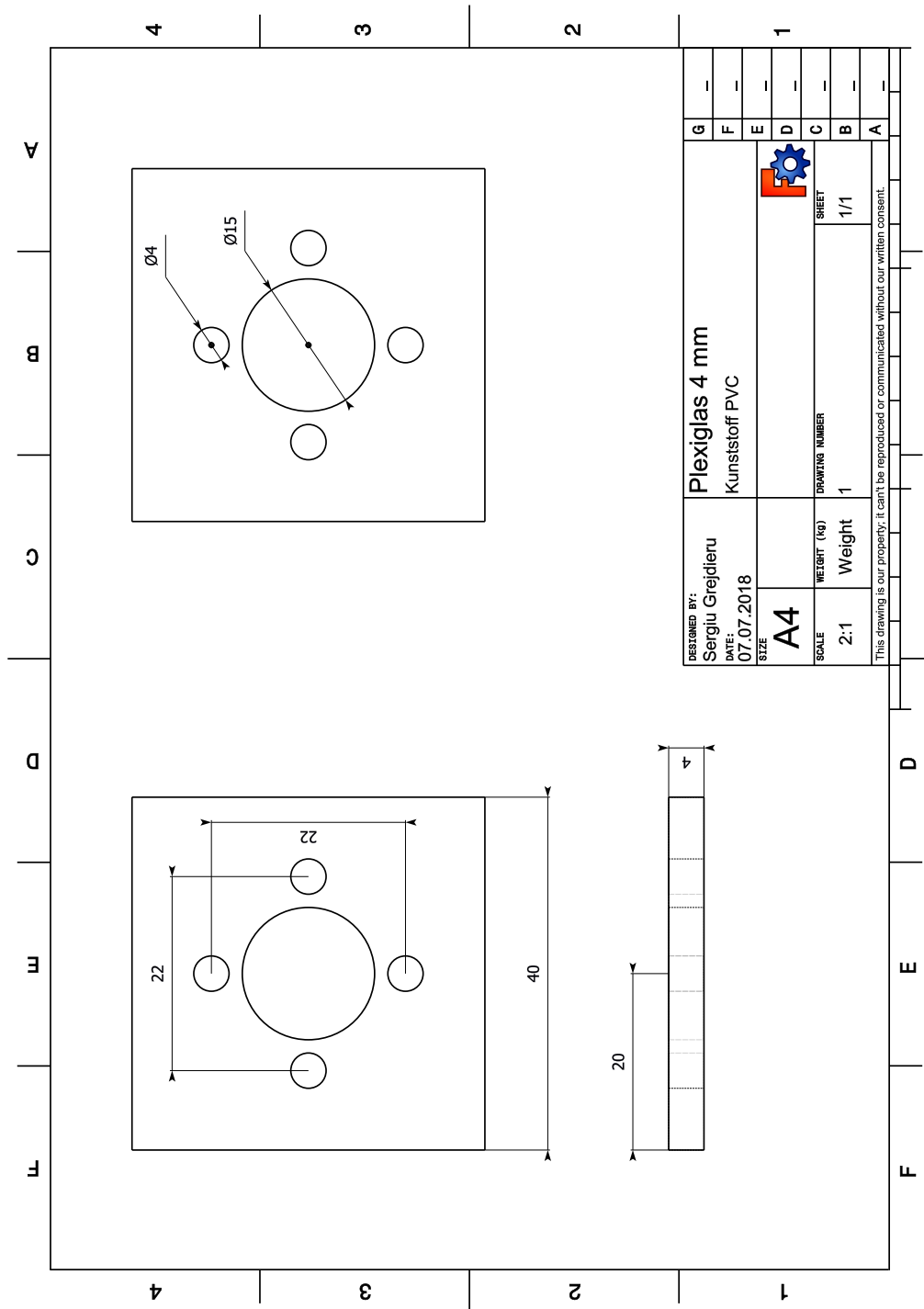


Abbildung E.11: Technische Zeichnung: Plexiglass mit 4 mm Dicke

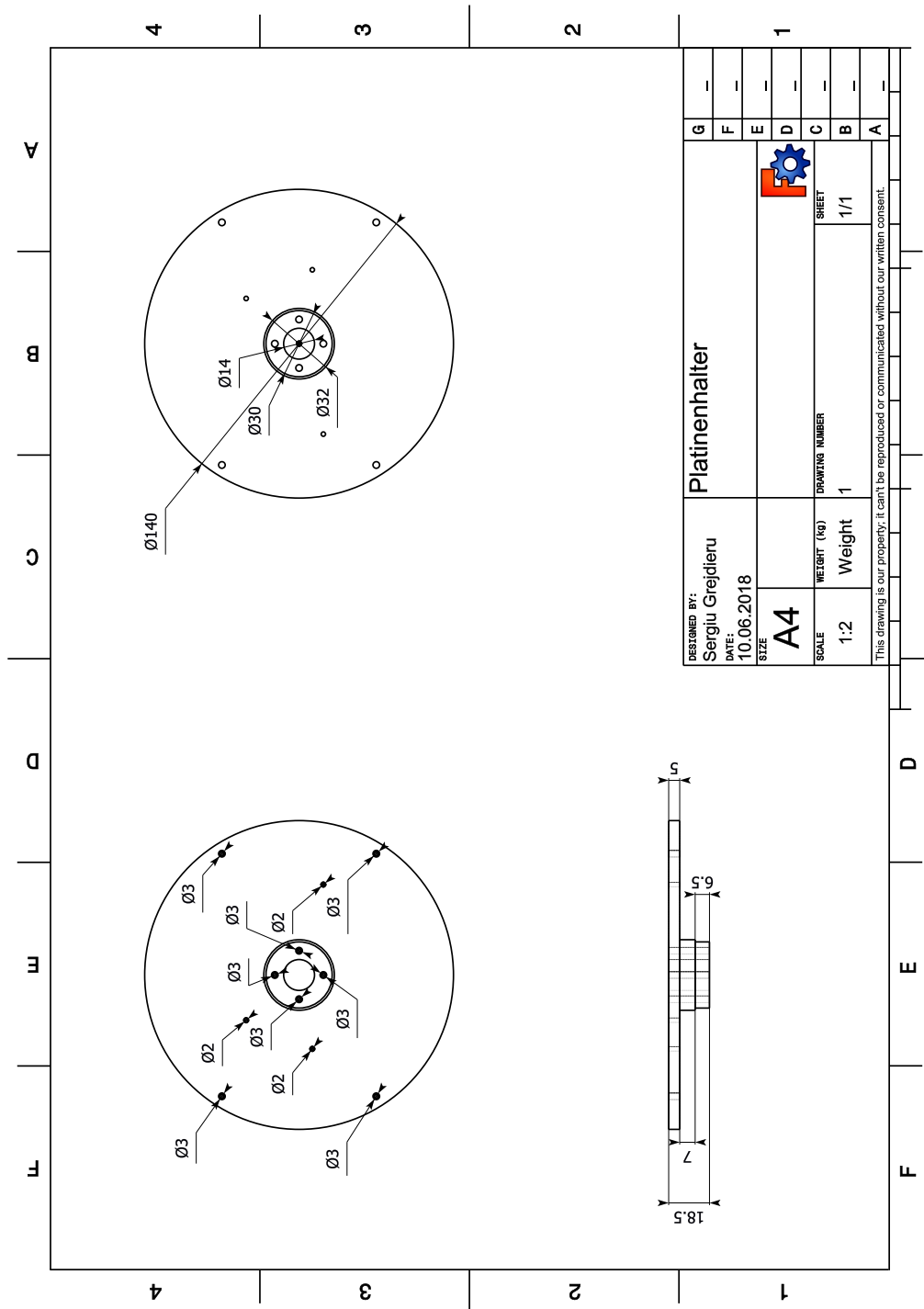


Abbildung E.12: Technische Zeichnung: Platinenhalter

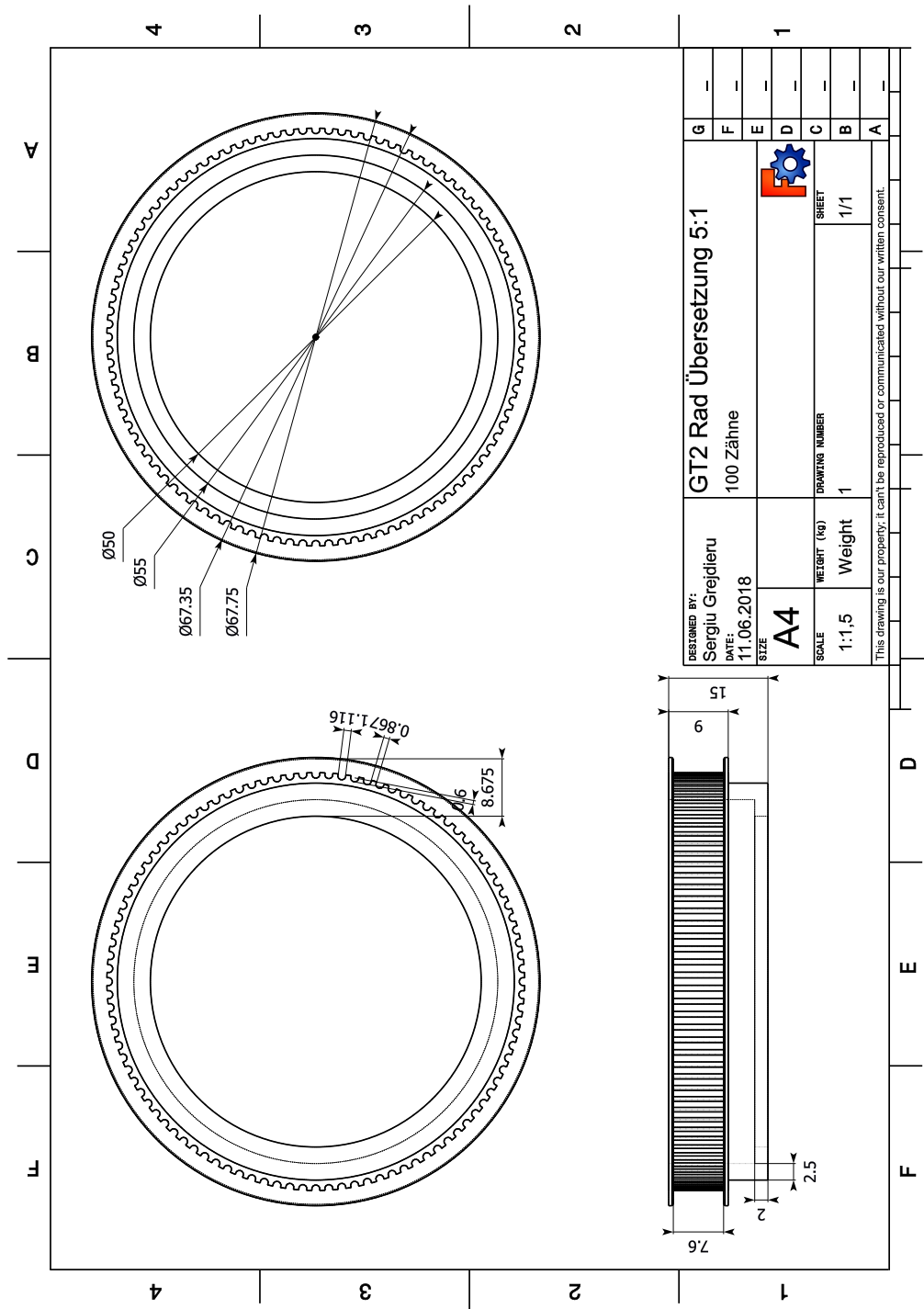


Abbildung E.13: Technische Zeichnung: GT2 Zahnrad 100 Zähne

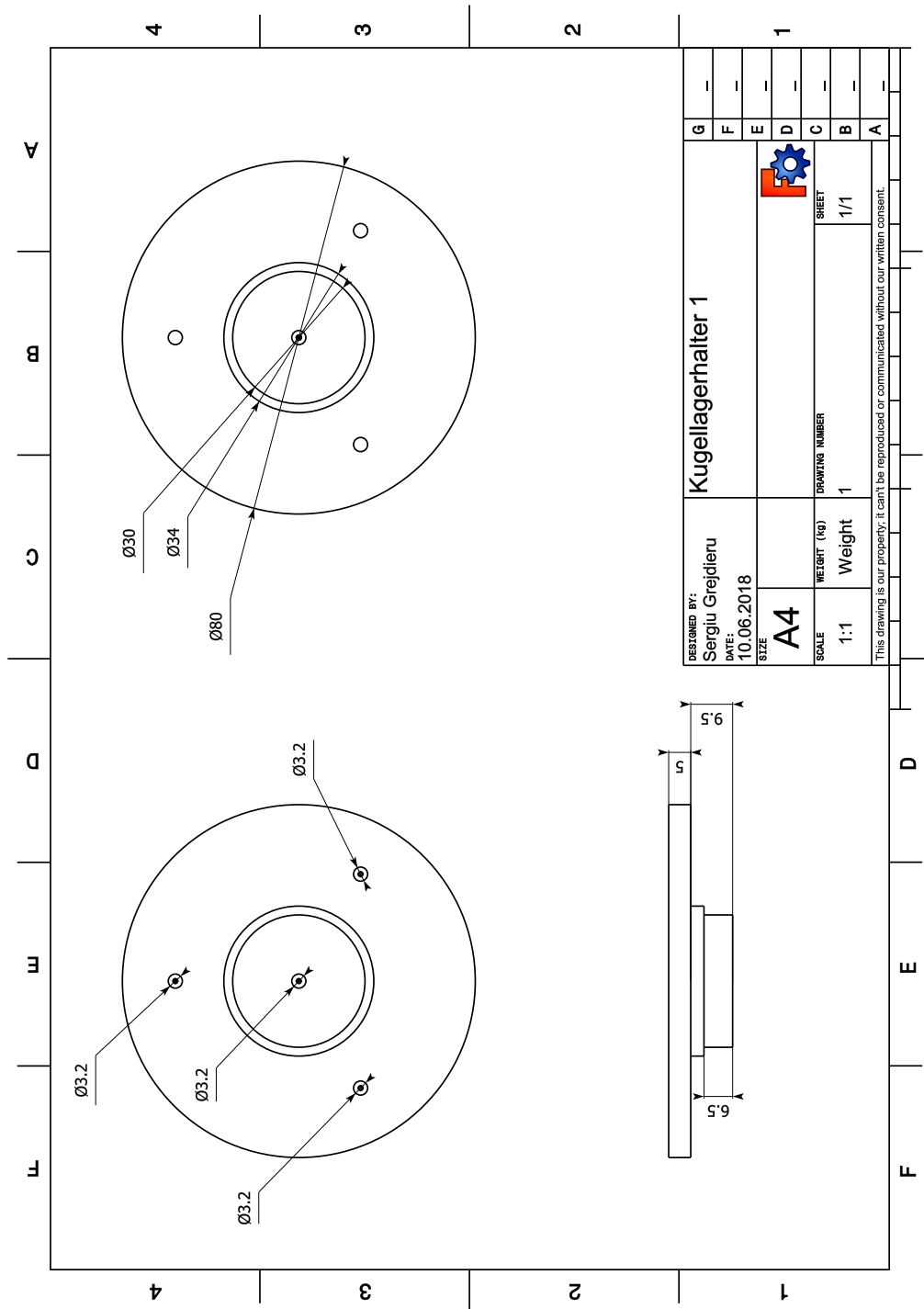


Abbildung E.14: Technische Zeichnung: Kugellagerhalter Bauteil 1

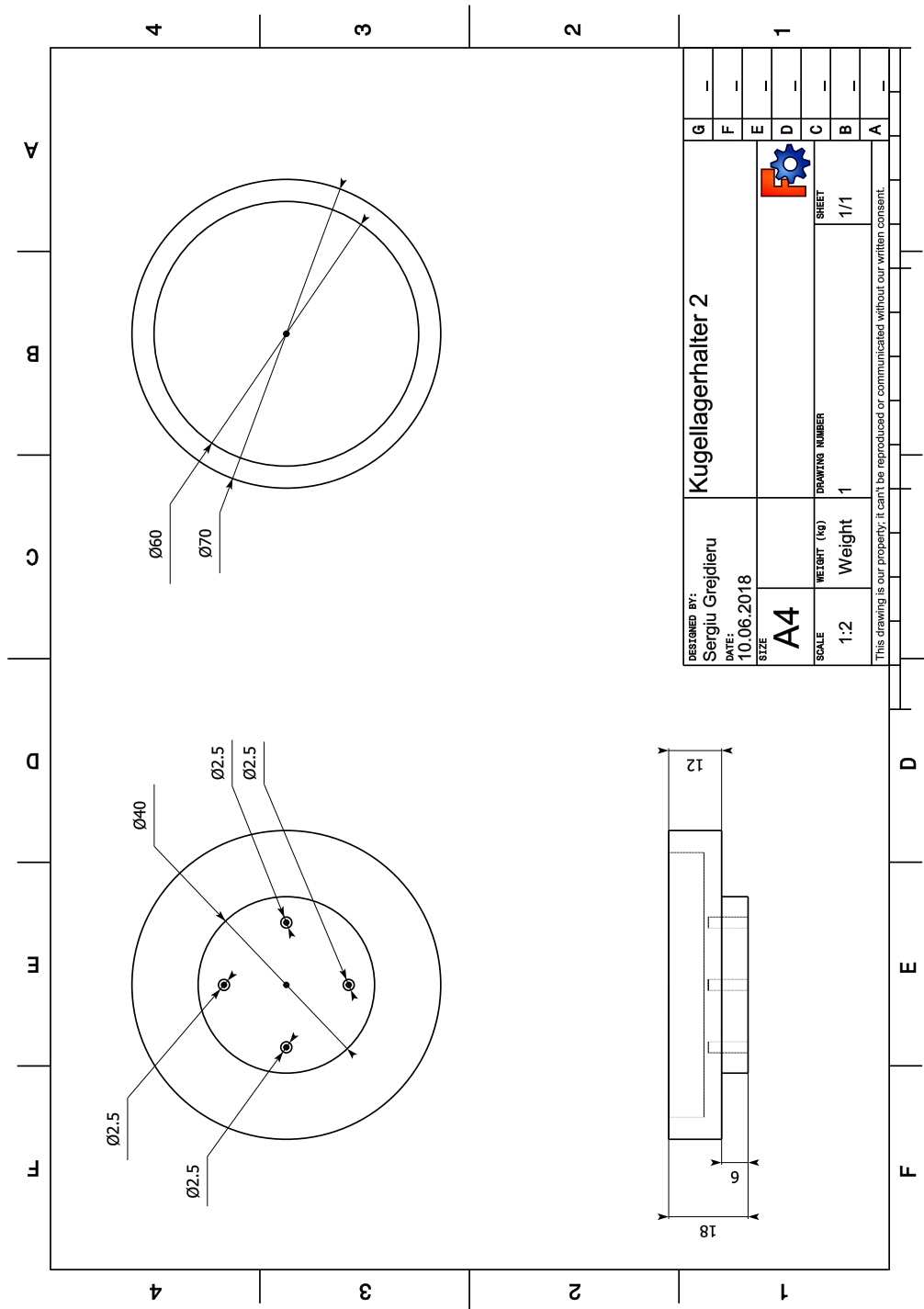


Abbildung E.15: Technische Zeichnung: Kugellagerhalter Bauteil 2

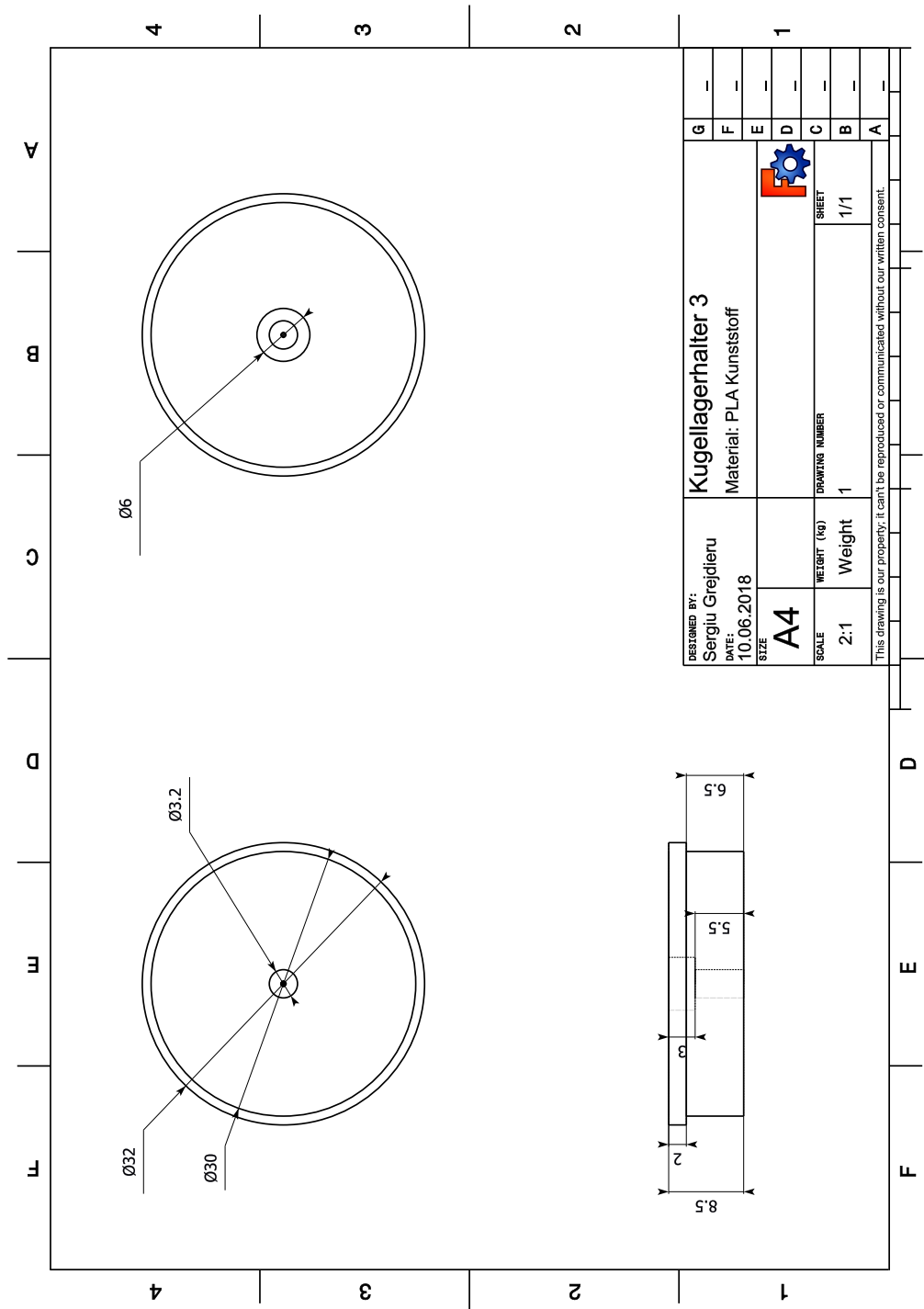


Abbildung E.16: Technische Zeichnung: Kugellagerhalter Bauteil 3

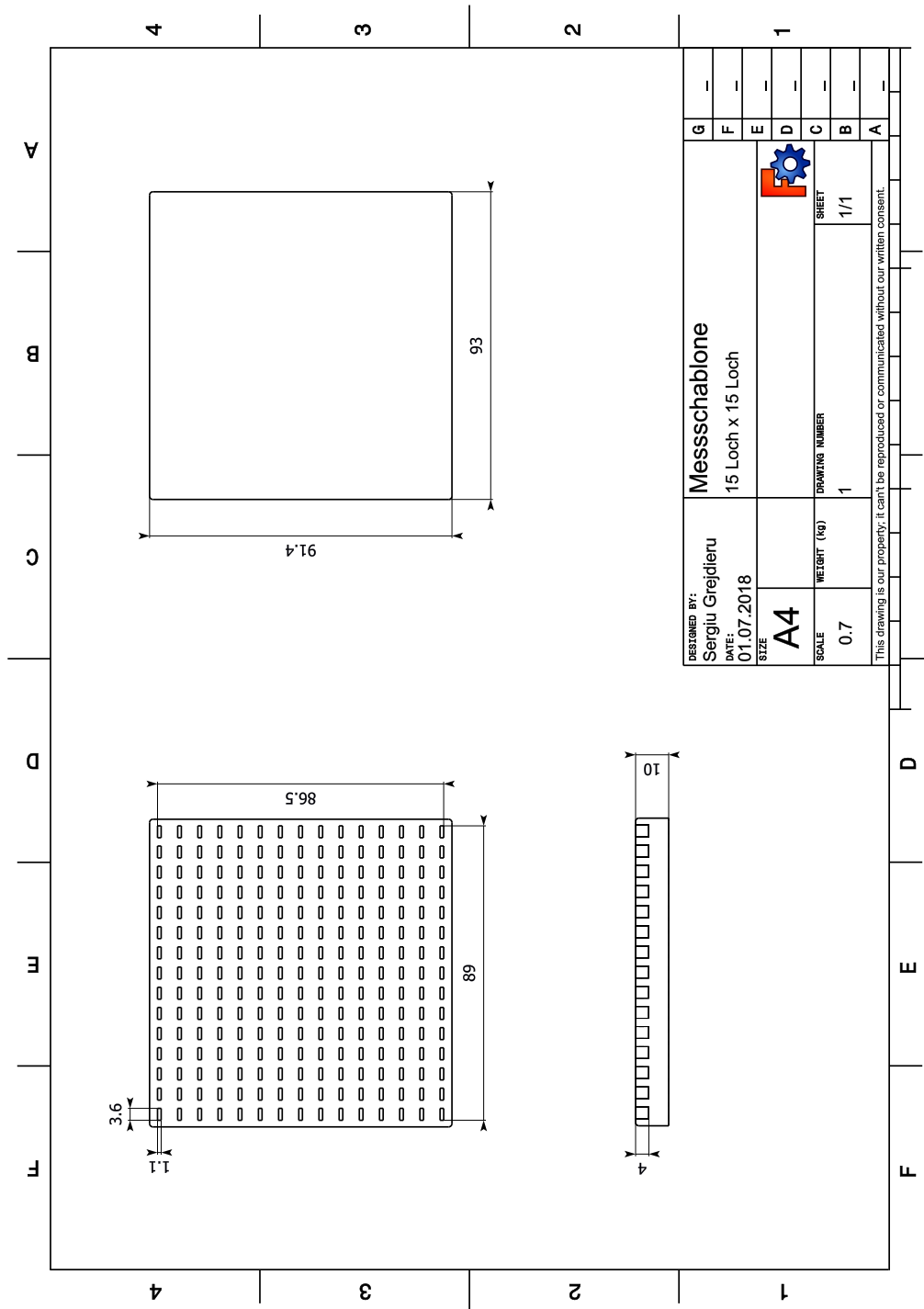


Abbildung E.17: Technische Zeichnung: Messschablone 15 Punkte x 15 Punkte

F CD

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 28. August 2018

Ort, Datum

Unterschrift