

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik

**Optimierung der Geometrie und Position von  
Permanentmagneten um die Sensorgenauigkeit  
in Automobilanwendungen zu verbessern**

Bachelorarbeit (B.Eng.)

von  
Rebecca Jonas



Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik

**Optimierung der Geometrie und Position von  
Permanentmagneten um die Sensorgenaugigkeit in  
Automobilanwendungen zu verbessern**

S P E R R V E R M E R K

Bachelorarbeit (B.Eng.) von

Rebecca Jonas  
geb. am 12.07.1997  
in Kandel  
Matr.-Nr.: 77698

Betreuer der Firma Schaeffler Automotive Buehl GmbH & Co. KG  
Zhou, Jie

Betreuer der Hochschule Karlsruhe  
Haschka, Markus

Karlsruhe, 08. 07. 2024 bis 08. 11. 2024

Satz und Herstellung:  
L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X / overleaf  
Font: Computer Modern, 12 pt  
Druckdatum: 8. November 2024

## **Erklärung**

Ich versichere hiermit wahrheitsgemäß, die Abschlussarbeit selbstständig angefertigt, alle benutzten Hilfsmittel vollständig und genau angegeben und alles einzeln kenntlich gemacht zu haben, was aus Arbeiten anderer unverändert oder mit Abänderungen entnommen wurde.

Karlsruhe, den 8. November 2024

Unterschrift:

## **S p e r r v e r m e r k**

Die vorliegende Arbeit beinhaltet interne, vertrauliche Informationen der Firma Schaeffler Automotive Buehl GmbH & Co. KG. Die Weitergabe des Inhalts der Arbeit im Gesamten oder in Teilen sowie das Anfertigen von Kopien oder Abschriften - auch in digitaler Form - sind ausdrücklich untersagt. Ausnahmen bedürfen der schriftlichen Genehmigung der Firma Schaeffler Automotive Buehl GmbH & Co.KG

Die Arbeit ist in den Sperrbestand der Hochschule aufzunehmen und darf nur an zwingend mit der Betreuung der Arbeit beauftragten Mitarbeitenden der Hochschule zur Einsicht weitergegeben werden.



## Kurzfassung

# Optimierung der Geometrie und Position von Permanentmagneten um die Sensorgenauigkeit in Automobilanwendungen zu verbessern

Diese Arbeit untersucht die Optimierung von Geometrie und Position von Permanentmagneten um die Sensorgenauigkeit zu verbessern. Im Kontext der Weiterentwicklung von Mobilität spielen präzise Sensoren eine entscheidende Rolle, da diese die genaue Erfassung von Positionen und Bewegungen ermöglichen. Permanentmagnete bieten bei vielen Sensoranwendungen eine stabile Magnetfeldquelle, die eine verlässliche Positionsbestimmung gewährleistet. Sie bilden somit einen entscheidenden Faktor, um eben diese Anwendungen zu verbessern.

Die Analyse fokussiert sich auf Magneten mit zylindrischer Form, welche unterschiedliche Magnetisierungsrichtungen und Bauformen besitzen. Es werden in dieser Arbeit umfangreiche Analysen des magnetischen Feldes von Permanentmagneten angestellt. Implementierte analytische Berechnungen werden mithilfe von erstellten FEM-Modellen validiert. Die Abmessungen sowie die optimalen Sensorposition von Magneten werden durch Parameterstudien untersucht. Es werden die besten Geometrieparameter und Abstände zwischen Magnet und Sensor identifizieren, um eine möglichst störungsfreie Messung zu erzielen und auftretende Messverzerrungen zu minimieren.



## **Abstract**

# **Optimizing the geometry and position of permanent magnets to improve sensor accuracy in automotive applications**

This thesis investigates the optimization of geometry and position of permanent magnets to improve sensor accuracy. In the context of further development of mobility, precise sensors play a crucial role as they enable the accurate detection of positions and movements. In many sensor applications, permanent magnets provide a stable magnetic field source that ensures reliable position determination. They are therefore a decisive factor in improving these applications.

The analysis focuses on magnets with a cylindrical shape, which have different magnetization directions and designs. Extensive analyses of the magnetic field of permanent magnets are carried out in this thesis. Implemented analytical calculations are validated with the help of created FEM models. The dimensions as well as the optimal sensor position of magnets are investigated by parameter studies. The best geometry parameters and distances between magnet and sensor are identified in order to achieve the most interference-free measurement possible and to minimize measurement distortions.



# Nomenklatur

## Lateinische Formelzeichen

$B$	T	Magnetische Flussdichte
$E$	V/m	Elektrische Feldstärke
$F$	N	Kraft
$H$	A/m	Magnetische Feldstärke
$I$	A	Elektrische Stromstärke
$M$	A/m	Magnetisierung
$T_c$	K	Curie-Temperatur
$U$	V	Elektrische Spannung
$j$	A/m <sup>2</sup>	Elektrische Stromdichte
$q$	C	Elektrische Ladung
$v$	m/s	Geschwindigkeit

## Griechische Formelzeichen

$\Phi$	Wb	Magnetischer Fluss
$\mu$		Magnetische Permeabilität / Mittelwert
$\sigma$		Standardabweichung

## Indizes

$a$	außen
$i$	innen
$M$	Magnet
$r$	Richtungsindex, Zylinderkoordinaten
$rem$	remanent

$v$	Verschiebung
$x$	Richtungsindex, kartesische Koordinaten
$y$	Richtungsindex, kartesische Koordinaten
$z$	Richtungsindex, kartesische Koordinaten sowie Zylinderkoordinaten
$\Theta$	Richtungsindex, Zylinderkoordinaten

## Besondere Zeichen

$\Delta$	Differenz
$\propto$	proportional
$\approx$	etwa
$\mathbf{X}$	Vektor X ( $X_1/X_2/X_3$ )
$\bar{x}$	Mittelwert von $x$
$\hat{x}$	Amplitude von $x$
(1.1)	Gleichungsnummer, die erste Zahl gibt die Nummer des Kapitels an, die zweite Zahl ist fortlaufend im Kapitel
[12]	Nummer im Quellenverzeichnis

## Dimensionslose Kennzahlen

$\mu_0 := 1$	Magnetische Permeabilität von Vakuum
--------------	--------------------------------------

## Abkürzungen<sup>1</sup>

FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	schnelle Fourier-Transformation (engl.: fast Fourier transform)
H-KA	Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
MMT	Maschinenbau und Mechatronik
THD	Oberschwingungsgesamtverzerrung (engl.: total harmonic distortion)

---

<sup>1</sup> Abkürzungen, die bereits im Duden stehen, werden nicht aufgeführt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Aufgabenstellung . . . . .	2
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Magnetismus . . . . .	3
2.1.1 Grundlagen des Magnetismus . . . . .	3
2.1.2 Magnetisierung . . . . .	4
2.1.3 Analytische Berechnung Magnetfeld . . . . .	7
2.2 Optimierung . . . . .	10
2.3 Mathematische Grundlagen . . . . .	12
2.3.1 Numerische Integration . . . . .	12
2.3.2 Total Harmonic Distortion . . . . .	15
2.4 Sensoren . . . . .	16
2.5 Stand der Technik . . . . .	20
<b>3 Methodik</b>	<b>23</b>
3.1 Aufbau . . . . .	23
3.1.1 Diametral magnetisierter Zylinder- und Ringmagnet, Sensor neben Achse . . . . .	23
3.1.2 Diametral magnetisierter Zylindermagnet, Sensor auf Achse . . . . .	25
3.1.3 Axial magnetisierter Ringmagnet . . . . .	26
3.2 FEM-Modelle . . . . .	27
3.2.1 Diametral magnetisierter Zylinder- und Ringmagnet, Sensor neben Achse . . . . .	27
3.2.2 Diametral magnetisierter Zylindermagnet, Sensor auf Achse . . . . .	28
3.2.3 Axial magnetisierter Ringmagnet . . . . .	29

3.3	Berechnungen . . . . .	31
3.3.1	Diametral magnetisierter Zylinder- und Ringmagnet, Sensor neben Achse . . . . .	31
3.3.2	Diametral magnetisierter Zylindermagnet, Sensor auf Achse . . . . .	33
3.3.3	Axial magnetisierter Ringmagnet . . . . .	34
3.4	Validierung mittels FEM . . . . .	36
3.4.1	Diametral magnetisierter Zylinder- und Ringmagnet, Sensor neben Achse . . . . .	36
3.4.2	Diametral magnetisierter Zylindermagnet, Sensor auf Achse . . . . .	40
3.4.3	Axial magnetisierter Ringmagnet . . . . .	40
3.5	Optimierung . . . . .	43
3.5.1	Diametral magnetisierter Zylinder- und Ringmagnet, Sensor neben Achse . . . . .	43
3.5.2	Diametral magnetisierter Zylindermagnet, Sensor auf Achse . . . . .	48
3.5.3	Axial magnetisierter Ringmagnet . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>53</b>
4.1	Axial magnetisierter Zylinder- und Ringmagnet, Sensor neben Achse . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>55</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>58</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>		<b>60</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>		<b>61</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>63</b>
A.1	Kontakt Daten . . . . .	63
A.2	Zeit- und Arbeitsplan . . . . .	64

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

In unserer heutigen Welt, in der sich die Automobilbranche schnell weiterentwickelt und autonomes Fahren sowie E-Mobilität zunehmend an Bedeutung gewinnen, bilden präzise Sensoren immer häufiger einen zentralen Bereich der modernen Automobilanwendungen. Insbesondere Positionssensoren spielen hier eine entschiedene Rolle, weil sie Bewegungen und Positionen exakt bestimmen können und somit unverzichtbar sind. Sie bilden eine sicherheitsrelevante Grundlage für viele Anwendungen.

Wichtiger Bestandteil dieser Positionssensoren ist zumeist ein Permanentmagnet, welche ein stabiles Magnetfeld erzeugt, das dann zur Ermittlung der exakten Position des Sensors genutzt wird. Um die Genauigkeit der Sensoren weiter verbessern zu können, ist eine Optimierung dieser Permanentmagneten entscheidend. Hierbei kann die Dimensionierung des Magneten optimiert werden, aber auch die genaue Positionierung des Sensors zum Magneten kann die Messqualität entscheidend beeinflussen. Eine Optimierung dieser Eigenschaften führt zu einer Erhöhung der Signalqualität, sowie zu einer Minimierung von Messfehlern. Dies führt letztendlich zu einer verbesserten Leistung des ganzen Sensorsystems.

Die vorliegende Arbeit zielt aus diesen Gründen darauf ab, mithilfe einer gezielten Modellierung und Analyse des Magnetfeldes und der Anordnung von Magnet und Sensor die Magnetgeometrie und -positionierung zu verbessern. Die Ergebnisse aus dieser Arbeit können als Grundlage zur Entwicklung von Sensoranwendungen dienen, die den steigenden Anforderungen an Effizienz und Genauigkeit in der Mobilität gerecht werden.

## 1.2 Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer optimalen Geometrie und Position für Permanentmagnete zur Anwendung in Positionssensoren. Dabei soll vor allem die Frage beantwortet werden, welche Geometrie und Messpositionierung der Magneten die besten Ergebnisse für spezifische Anwendungsfälle liefert. Mit „Geometrie und Messposition“ sind dabei vor allem zwei Punkte gemeint: Zum einen die Ermittlung der optimalen Feldstärke und zum anderen die Minimierung der Nichtlinearität durch eine geringe Total Harmonic Distortion (THD).

Untersucht werden sollen hierbei unterschiedliche Anwendungen, insbesondere Rotorpositionssensoren. Im Laufe der Arbeit ist das erste Ziel eine Literaturrecherche durchzuführen, die sich auf die grundlegenden Prinzipien von Magneten fokussiert und auf bestehende Ansätze der Positionssensorik eingeht. Im Anschluss daran sollen Finite-Elemente-Methoden-Modelle (FEM-Modelle) der einzelnen Anwendungen erstellt werden. Diese Modelle sollen die verschiedene Magnetgeometrien und Messpositionen abbilden. Parallel dazu sollen Simulationsmodelle entwickelt werden, die gezielt auf die jeweiligen Anwendungen zugeschnitten sind.

Einen weiterer Schwerpunkt der Arbeit stellt die Optimierung und Validierung der Modelle dar. Hierzu soll die Performance der Modelle analysiert und verbessert werden, um eine effiziente und zuverlässige Modellnutzung zu gewährleisten.

Zum Schluss soll eine detaillierte Analyse des Magnetfelds erfolgen, wobei mithilfe einer Parameterstudie die optimale Magnetgeometrie und Messposition ermittelt werden. Bei dieser Untersuchung sollen auch Toleranzfaktoren wie etwa Koaxialität berücksichtigt werden, um ein robustes Design zu gewährleisten.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Magnetismus

In diesem Abschnitt werden die Grundprinzipien des Magnetismus erläutert, die für die späteren Berechnungen und Optimierungen relevant sind. Da in späteren Betrachtungen nur Permanentmagnete untersucht werden, fokussiert sich dieser Abschnitt auf deren Funktionsweise.

#### 2.1.1 Grundlagen des Magnetismus

Magnetismus entsteht durch die Bewegung elektrischer Ladungen, insbesondere durch den Spin und die Umlaufbewegung von Elektronen in Atomen. In Festkörpern lassen sich die magnetischen Eigenschaften eines Materials durch die Anordnung der magnetischen Momente der Atome erklären. Oftmals spricht man, um das Konzept zu vereinfachen, von sogenannten Elementarmagneten anstelle von einzelnen magnetischen Momenten der Atome. Festkörper können sich, aufgrund ihrer unterschiedlichen atomaren Struktur, in fünf Gruppen klassifizieren lassen:

- Ferromagnetisch: In ferromagnetischen Materialien sind die magnetischen Momente der Atome parallel ausgerichtet. Dies führt zu einem vergleichsweise großen Gesamtmoment und macht diese Materialien ideal für Permanentmagnete.
- Ferrimagnetisch: Hierbei sind die magnetischen Momente der Atome teilweise entgegengesetzt es bleibt jedoch ein Restmoment übrig. Ferrimagnetische Materialien zeigen ähnliche Eigenschaften wie ferromagnetische Materialien, allerdings in abgeschwächter Form.
- Antiferromagnetisch: In diesen Materialien sind die magnetischen Momente der Atome entgegengesetzt ausgerichtet, wodurch sie sich gegenseitig aufheben. Es entsteht kein magnetisches Gesamtmoment.

- Paramagnetisch: In paramagnetischen Materialien sind die magnetischen Momente ungeordnet und sie zeigen, wie die geordneten antiferromagnetischen Materialien, ein magnetisches Gesamtmoment von Null auf.
- Superparamagnetisch: Diese Materialien ähneln paramagnetischen Materialien, besitzen jedoch innerhalb kleinen Partikeln eine ferromagnetische Ausrichtung. Diese Ausrichtungen heben sich gegenseitig auf, da die Partikel untereinander wieder ungeordnet sind.

Permanentmagnete bestehen häufig aus ferro- oder ferrimagnetischen Materialien, da sie ohne äußeren Einfluss ein stabiles Magnetfeld erzeugen können. Die magnetischen Eigenschaften von Permanentmagneten werden maßgeblich von der atomaren Struktur und der Herstellungstechnik beeinflusst. Oberhalb der sogenannten Curie-Temperatur ( $T_c$ ) verlieren selbst ferromagnetische Materialien ihre magnetischen Eigenschaften und werden paramagnetisch. [13]

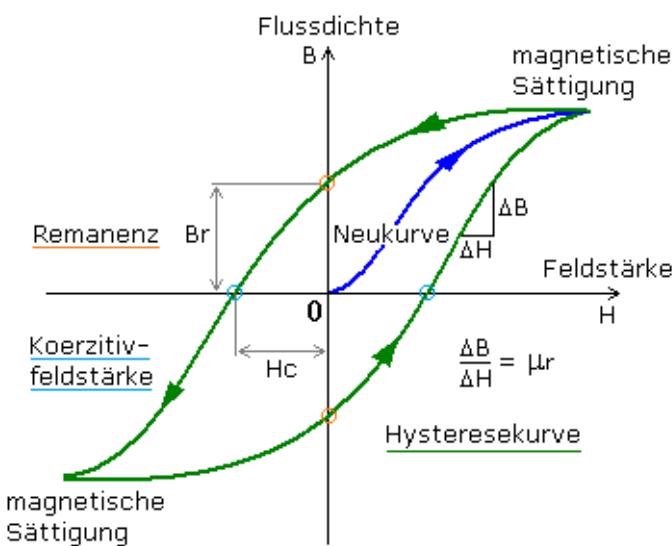
### 2.1.2 Magnetisierung

Für die Analyse von Permanentmagneten benötigen wir die magnetischen Eigenschaften des Materials. Diese können graphisch über eine sogenannte Magnetisierungskurve dargestellt werden. Diese ist im Falle von ferro- und ferrimagnetischen Materialien eine sogenannte Hystereseschleife (s. Bild 2.1). Auf der x-Achse ist die magnetische Feldstärke **H** aufgetragen. Die magnetische Feldstärke, auch magnetische Erregung genannt, wird in Ampere pro Meter [ $A/m$ ] angegeben und beschreibt die Stärke des magnetischen Feldes. Da es sich um eine vektorielle Einheit handelt zeigt sie auch die Richtung des Feldes an. Auf der y-Achse ist die magnetische Flussdichte **B** abgebildet, welche in Tesla [ $T$ ] angegeben wird. Sie beschreibt die Flächendichte des magnetischen Flusses an einem Punkt. Auch bei dieser Größe handelt es sich um eine vektorielle Größe. In manchen Darstellungen wird nicht **B** über **H** aufgetragen, sondern die Magnetisierung **M** [ $A/m$ ] in Abhängigkeit von der Feldstärke dargestellt. Die Magnetisierung eines Materials ist das resultierende magnetische Moment pro Volumeneinheit.

Die drei beschriebenen Größen sind über folgende Beziehung miteinander verknüpft:

$$\mathbf{B} = \mu(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2.1)$$

Die Permeabilität  $\mu$  ist hierbei eine materialabhängige Größe. Im Vakuum gilt  $\mu_0 = 1$ .



**Bild 2.1.** Hysteresekurve [9]

In der Hysteresekurve ist dargestellt, wie sich ein Material verhält, wenn von außen die Feldstärke  $H$  aufgebracht wird. Die Neukurve beschreibt hierbei die Flussdichte des Materials bei der ersten Magnetisierung. Mit steigender Feldstärke steigt auch die Magnetisierung und die magnetische Flussdichte. Dies geschieht so lange, bis die magnetische Sättigung erreicht ist. Zu diesem Punkt sind alle Elementarmagnete des Materials parallel zum äußeren Magnetfeld ausgerichtet. Das Material hat zu diesem Punkt die maximal mögliche Magnetisierung erreicht. Die magnetische Flussdichte steigt weiter an, wenn die äußere Feldstärke ab diesem Punkt weiter erhöht wird, da zur Flussdichte auch die Höhe der Feldstärke beiträgt (2.1).

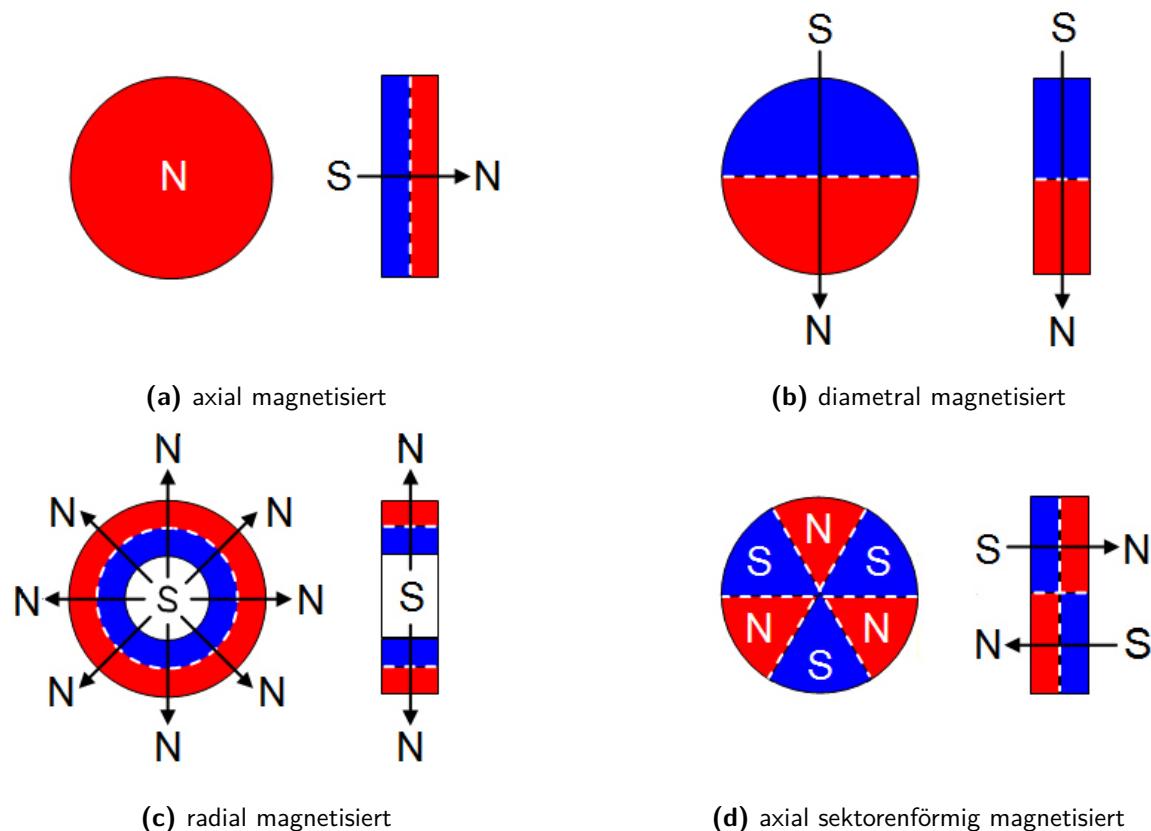
Wird die von außen aufgebrachte Feldstärke wieder verringert, bleibt eine Restmagnetisierung im Material erhalten, wenn es sich um einen permanentmagnetisches Material handelt. Wird kein magnetisches Feld mehr von außen aufgebracht, wird die verbliebene Flussdichte als Remanenzflussdichte  $\mathbf{B}_{rem}$  beschrieben. Für die Remanenzflussdichte  $\mathbf{B}_{rem}$  gilt:

$$\mathbf{B}_{rem} \underset{\mathbf{H}=0}{=} \mu \mathbf{M} \quad (2.2)$$

Wird ein äußeres Magnetfeld aufgebracht, welches der Magnetisierung des Materials entgegen gerichtet ist, nimmt die Flussdichte im Material wieder ab, bis der Punkt erreicht wird, an dem das Material wieder entmagnetisiert ist. Dieser Punkt wird gekennzeichnet durch die Koerzitivfeldstärke  $\mathbf{H}_c$ , also diejenige Feldstärke, die nötig ist, um die magne-

tische Flussdichte im Material auf Null zurück zu bringen oder die Feldstärke, bei der die Magnetisierung des Materials auf Null zurückgeht. [6]

Das Aufmagnetisieren kann auf verschiedene Weisen erfolgen. Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, können für das Aufmagnetisieren der Magnete deutlich höhere Magnetisierungsfeldstärken erforderlich sein als jene, die am Ende im Magneten verbleiben. Je nachdem, wie ein Magnet magnetisiert wird, kann sich auch das entstehende Magnetfeld im Magneten unterscheiden. Dabei spricht man von verschiedenen Magnetisierungsarten, die sich in ihrer Magnetisierungsrichtung voneinander differenzieren. Diese unterschiedlichen Magnetisierungsarten haben wiederum spezifische Anwendungsgebiete. Abhängig davon, welche Art der Magnetisierung gewünscht ist, werden die Magnete mit entsprechend gestalteten Magnetisierungsspulen aufmagnetisiert.



**Bild 2.2.** Magnetisierungsrichtungen von Permanentmagneten [2]

Prinzipiell können die unterschiedlichsten Formen von Permanentmagneten hergestellt werden. Ring-, Zylinder- und Blockmagnete sind die am häufigsten zu findenden Bau-

formen. In 2.2 sind einige der häufigsten verwendeten Magnetisierungsrichtungen zylindrischer Permanentmagneten dargestellt. [5]

### 2.1.3 Analytische Berechnung Magnetfeld

Eine Berechnung des Magnetfeldes kann über unterschiedliche Ansätze durchgeführt werden. Man kann die Berechnungen mithilfe eines FEM-Programms ausführen. Eine andere Methode ist die Berechnung über analytische Formeln, welche in der Literatur gefunden oder selber hergeleitet werden können. Die Formeln, welche in dieser Arbeit relevant sind, werden in diesem Kapitel aufgeführt.

In der hier verwendeten Darstellung der Formeln gelten alle mit  $M$  markierten Werte als Werte des Magneten. Zum Beispiel bezeichnet  $r_M$  den Radius des Magneten. Die nicht mit einem Index versehenen Werte sind die Koordinaten des Punktes an dem das Magnetfeld ermittelt wird  $P(r/\Theta/z)$ .

#### B-Feld eines Zylindermagneten

Das B-Feld eines zylindrischen Magneten, welcher diametral entlang der x-Achse magnetisiert ist kann über folgende Formeln beschreiben werden:

$$B_r(r, \Theta, z) = \frac{B_{rem}r_M}{4\pi} \int_{z(1)}^{z(2)} \int_0^{2\pi} \cos(\Theta_M) [r - r_M \cos(\Theta - \Theta_M)] \\ \times g^3(r, \Theta, z; r_M, \Theta_M, z_M) d\Theta_M dz_M \quad (2.3)$$

$$B_\Theta(r, \Theta, z) = \frac{B_{rem}r_M^2}{4\pi} \int_{z(1)}^{z(2)} \int_0^{2\pi} \cos(\Theta_M) \times \sin(\Theta - \Theta_M) \\ \times g^3(r, \Theta, z; r_M, \Theta_M, z_M) d\Theta_M dz_M \quad (2.4)$$

$$B_z(r, \Theta, z) = \frac{B_{rem}r_M}{4\pi} \int_{z(1)}^{z(2)} \int_0^{2\pi} \cos(\Theta_M) (z - z_M) \\ \times g^3(r, \Theta, z; r_M, \Theta_M, z_M) d\Theta_M dz_M \quad (2.5)$$

wobei gilt:

$$g(r, \Theta, z; r', \Theta', z') = \frac{1}{\sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\Theta - \Theta') + (z - z')^2}} \quad (2.6)$$

Für einen Ring-Magneten gilt :

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}) = \mathbf{B}_{\mathbf{r}_{M,a}}(\mathbf{x}) - \mathbf{B}_{\mathbf{r}_{M,i}}(\mathbf{x}) \quad (2.7)$$

Wobei  $r_{M,a}$  der Außenradius und  $r_{M,i}$  der Innenradius des Magneten ist.

Für einen Zylindermagneten, welcher in axiale Richtung magnetisiert ist und mehrere Pole besitzt, berechnet man das Magnetfeld eines Sektors mit folgenden Formeln:

$$B_r(r, \Theta, z) = \frac{B_{rem}}{4\pi} \sum_{s=1}^N \sum_{j=1}^2 (-1)^{j+s+1} \left\{ \int_{z(1)}^{z(2)} \int_{\Theta(1)}^{\Theta(2)} (z - z_M) \cos(\Theta - \Theta_M) g(r, \Theta, z; r_M, \Theta_M, z_M)^3 \Big|_{r_M=r(j)} r(j) d\Theta_M dz_M \right. \\ \left. + \int_{z(1)}^{z(2)} \int_{r(1)}^{r(2)} (z - z_M) \sin(\Theta - \Theta_M) g(r, \Theta, z; r_M, \Theta_M, z_M)^3 \Big|_{\Theta_M=\Theta(j)} dr_M dz_M \right\} \quad (2.8)$$

$$B_\Theta(r, \Theta, z) = \frac{B_{rem}}{4\pi} \sum_{s=1}^N \sum_{j=1}^2 (-1)^{j+s} \left\{ \int_{z(1)}^{z(2)} \int_{\Theta(1)}^{\Theta(2)} (z - z_M) \sin(\Theta - \Theta_M) g(r, \Theta, z; r_M, \Theta_M, z_M)^3 \Big|_{r_M=r(j)} r(j) d\Theta_M dz_M \right. \\ \left. - \int_{z(1)}^{z(2)} \int_{r(1)}^{r(2)} (z - z_M) \cos(\Theta - \Theta_M) g(r, \Theta, z; r_M, \Theta_M, z_M)^3 \Big|_{\Theta_M=\Theta(j)} dr_M dz_M \right\} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned}
B_z(r, \Theta, z) = & \frac{B_{rem}}{4\pi} \sum_{s=1}^N \sum_{j=1}^2 (-1)^{j+s} \\
& \left\{ \int_{z(1)}^{z(2)} \int_{\Theta(1)}^{\Theta(2)} r * \cos(\Theta - \Theta_M) - r_M g(r, \Theta, z; r_M, \Theta_M, z_M)^3 \Big|_{r_M=r(j)} r(j) d\Theta_M dz_M \right. \\
& \left. + \int_{z(1)}^{z(2)} \int_{r(1)}^{r(2)} r * \sin(\Theta - \Theta_M) g(r, \Theta, z; r_M, \Theta_M, z_M)^3 \Big|_{\Theta_M=\Theta(j)} dr_M dz_M \right\}
\end{aligned} \tag{2.10}$$

Es gilt:

$$\begin{aligned}
r(1) &= r_{M,i} \\
r(2) &= r_{M,a}
\end{aligned} \tag{2.11}$$

$$z(2) - z(1) = l_M \tag{2.12}$$

Sowie für einen Magneten mit N Polen:

$$\begin{aligned}
\Theta(1) &= \frac{\pi}{N} * (2s - 3) \\
\Theta(2) &= \frac{\pi}{N} * (2s - 1)
\end{aligned} \tag{2.13}$$

[6]

## 2.2 Optimierung

Da sich die vorliegende Arbeit zu einem Großteil mit der Optimierung befasst, soll in diesem Kapitel kurz auf die Grundlagen dieses Gebietes und die angewendeten Prinzipien eingegangen werden. Grundlage der Optimierung ist das Ziel der Verbesserung einer oder mehrerer Systemeigenschaften. Dabei werden diejenigen Systemeigenschaften gesucht, welche zu einer Verbesserung bestimmter Zielgrößen (Qualitätsmerkmale) des Systems führen. Die Zielgrößen sollen dabei meistens entweder minimiert oder maximiert werden. Um eine Optimierung einfacher zu gestalten sollten die einzelnen Optimierungsziele immer in ein Maximierungsproblem umgewandelt werden.

Bei der Berücksichtigung mehrerer Zielgrößen lässt sich meist keine Kombination der Faktoren finden, die alle Zielgrößen gleichzeitig minimiert bzw. optimiert. Stattdessen wird eine Lösung angestrebt, bei der die verschiedenen Zielgrößen bestmöglich miteinander kombiniert werden und somit eine bestmögliche Gesamtoptimierung erzielt wird.

Diese Lösungen nennt man Pareto-optimale Ergebnisse. Sie sind dadurch definiert, dass keine Zielgröße mehr optimiert werden kann ohne gleichzeitig eine andere Zielgröße zu verschlechtern. Es gibt für ein Optimierungsproblem meist mehrere Pareto-Optimale Ergebnisse, welche auf der sogenannten Pareto-Grenze liegen. Um nun das beste der Pareto-Optimalen Ergebnisse zu finden, kann es helfen eine Gewichtung der Zielgrößen vorzunehmen. Dadurch wird definiert, welche dieser Größen wie wichtig ist, sodass diese Größen näher an ihrem Optimum liegen als die nicht so Wichtigen. [11]

Im Folgenden werden nun die zwei Arten der in dieser Arbeit genutzten Optimierungsverfahren erläutert.

### 1) Schrittweise Optimierung:

Die wohl einfachste Form der Optimierung ist die sogenannte schrittweise Optimierung. Bei diesem Verfahren wird jede Zielgröße hintereinander optimiert, wobei die Optimierung einer Größe den Bereich definiert in dem die nächste Größe optimiert werden kann.

### 2) Optimierung mittels Zielfunktion:

Bei der Optimierung mittels Zielfunktion wird eine neue Zielfunktion erstellt, welche dann optimiert werden soll. In dieser Zielfunktion sind die geforderten Ziel-

größen  $f_i$  mit einem Faktor  $w_i$  je nach Priorität gewichtet. [1]

$$f_{total} = \sum_{i=n}^n w_i \cdot f_i^2 \quad (2.14)$$

[1]

## 2.3 Mathematische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die mathematischen Grundlagen vorgestellt, die für die nachfolgende Analyse und Berechnung erforderlich sind. Ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit ist die numerische Integration, mit der Integrale näherungsweise bestimmt werden, insbesondere wenn analytische Lösungen nicht möglich sind. Darüber hinaus wird die Signalverarbeitung thematisiert, wobei auf die Bedeutung der Total Harmonic Distortion (THD) eingegangen wird.

### 2.3.1 Numerische Integration

Die numerische Integration beschreibt das Vorgehen zur näherungsweisen Bestimmung von Integralen. Numerische Integration ist dann von Nöten, wenn quantifizierte Daten ohne eine Funktionsbeschreibung vorliegen, da in solchen Fällen keine analytische Integration ausgeführt werden kann. In einem solchen Fall gibt es unterschiedliche numerische Methoden zur Integration, welche in diesem Kapitel vorgestellt werden sollen. [4]

Alle Verfahren zur numerischen Integration beruhen auf der gleichen Grundidee: das Bestimmen eines Integrals, indem das zu integrierende Intervall in Teilintervalle unterteilt wird. Für jedes Teilintervall wird eine einfache Funktion verwendet, die leicht zu integrieren ist. Die Methoden unterscheiden sich in der Art und Weise, wie diese Funktionen approximiert werden.

Betrachtet wird das Integral:

$$\int_a^b f(x) dx \quad (2.15)$$

Die Anzahl der Teilintervalle wird mit  $n$  bezeichnet. Wenn die Teilintervalle gleichmäßig unterteilt werden, ergibt sich die Länge eines jeden Teilintervalls zu:

$$h = \frac{b - a}{n} \quad (2.16)$$

Die verschiedenen Methoden zur numerischen Integration weisen unterschiedliche Komplexitäten bei der Annäherung auf, was sich auch in ihrer Genauigkeit niederschlägt.

Im Folgenden werden die wichtigsten Verfahren vorgestellt und die Fehlerabschätzungen der einzelnen Verfahren erläutert.

### Rechteckregel

Bei der Approximation mittels der Rechteckregel, welches die einfachste der hier vorgestellten Verfahrenen ist, kann das Integral auf drei verschiedene Weisen angenähert werden. Prinzipiell wird für jedes der Teilintervalle je ein fester Wert für die Integration angenommen, welche dann aufsummiert werden. Dies kann der rechte Wert sein, dann gilt:

$$R_r(h) = h(f(x_0) + f(x_1) + \cdots + f(x_{n-1})) \quad (2.17)$$

Wird der linke Wert angenommen, dann gilt:

$$R_l(h) = h(f(x_1) + \cdots + f(x_{n-1}) + f(x_n)) \quad (2.18)$$

Oder es wird der Mittelwert des Intervalls angenommen, dann gilt:

$$R_m(h) = h \left( \frac{f(x_0) + f(x_1)}{2} + \frac{f(x_1) + f(x_2)}{2} + \cdots + \frac{f(x_{n-1}) + f(x_n)}{2} \right) \quad (2.19)$$

Für die Rechteckregel gilt die Fehlerabschätzung:

$$\left| \int_a^b f(x) dx - T(h) \right| \leq \frac{b-a}{2} h \max_{a \leq x \leq b} |f'(x)| \quad (2.20)$$

Diese Fehlerabschätzung zeigt, dass der Fehler dieses Verfahrens für  $n \rightarrow \infty$  gegen 0 geht der Fehler aber nur proportional zu  $n$  abnimmt. Dies bedeutet, dass wenn die Genauigkeit des Verfahrens um eine Dezimalstelle verbessert werden soll, 10 mal so viele Teilintervalle gebildet werden müssen.

### Trapezregel

Für die sogenannte Trapezregel wird das Integral durch ein lineares Polynom approximiert. Dieses Polynom hat die Form:

$$T(h) = h \left( \frac{1}{2}f(x_0) + f(x_1) + \cdots + f(x_{n-1}) + \frac{1}{2}f(x_n) \right) \quad (2.21)$$

der Fehler der Trapetzregel lässt sich abschätzen mit:

$$\left| \int_a^b f(x) dx - T(h) \right| \leq \frac{b-a}{12} h^2 \max_{a \leq x \leq b} |f''(x)| \quad (2.22)$$

Der Verfahrensfehler der Trapetzregel nimmt also proportional zu  $n^2$  ab.

### Simpsonregel

Wendet man die Simpsonregel an, so nähert man mithilfe einer quadratischen Polynoms der Form

$$S(h) = \frac{h}{6} \left( f(x_0) + 4f\left(\frac{x_0+x_1}{2}\right) + 2f(x_1) + 4f\left(\frac{x_1+x_2}{2}\right) + \cdots + 2f(x_{n-1}) + 4f\left(\frac{x_{n-1}+x_n}{2}\right) + f(x_n) \right) \quad (2.23)$$

das Integral an.

Der Fehler der Simpsonregel lässt sich abschätzen mit:

$$\left| \int_a^b f(x) dx - S(h) \right| \leq \frac{b-a}{180} h^4 \max_{a \leq x \leq b} |f^{(4)}(x)| \quad (2.24)$$

Dieser Verfahrensfehler nimmt proportional zu  $n^4$  ab.

[8][12]

### 2.3.2 Total Harmonic Distortion

Die Total Harmonic Distortion (THD) ist ein Maß für die Nichtlinearität eines Signals und beschreibt das Verhältnis der Amplitude der harmonischen Frequenzen zur Amplitude der Grundfrequenz. Diese harmonischen Frequenzen sind Vielfache der Grundfrequenz des Signals. Die Berechnung der THD erfolgt nach der folgenden Formel:

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (2.25)$$

Dabei ist  $U_1$  die Amplitude der Grundfrequenz und  $U_i$  die Amplituden der höheren harmonischen Frequenzen. Ein THD-Wert von 0 % zeigt an, dass das Signal keine Verzerrungen aufweist und somit einen idealen Sinus veranschaulicht. Je höher der THD-Wert, desto stärker sind die Verzerrungen im Signal. [10]

## 2.4 Sensoren

Das Anwendungsgebiet dieser Arbeit ist die Verbesserung von Magnetposition und Abmessung innerhalb von Sensoranwendungen. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel zunächst kurz auf die Funktionsweise von Winkel- und Positionssensoren eingegangen.

Ein wichtiger Bestandteil solcher Sensoranwendungen ist der Einsatz von Permanentmagneten, deren Magnetfeld mithilfe eines Hall-Sensors gemessen wird. Der Hall-Sensor nutzt den sogenannten Hall-Effekt, um das Magnetfeld zu erfassen. Dieser Effekt tritt in stromdurchflossenen Halbleitern oder Leitern auf, wenn diese in einem Magnetfeld positioniert sind. Befindet sich der Leiter in einem senkrecht zum Stromfluss ausgerichtetem Magnetfeld, wie in Abbildung 2.3 durch das grün dargestellte Feld verdeutlicht, entsteht eine messbare Spannung zwischen zwei Punkten, die sogenannte Hall-Spannung  $U_H$ . Diese Spannung lässt sich zwischen den Punkten 1 und 2 des Leiters nachweisen und steht in direktem Zusammenhang mit der Stärke des durchdringenden Magnetfeldes.

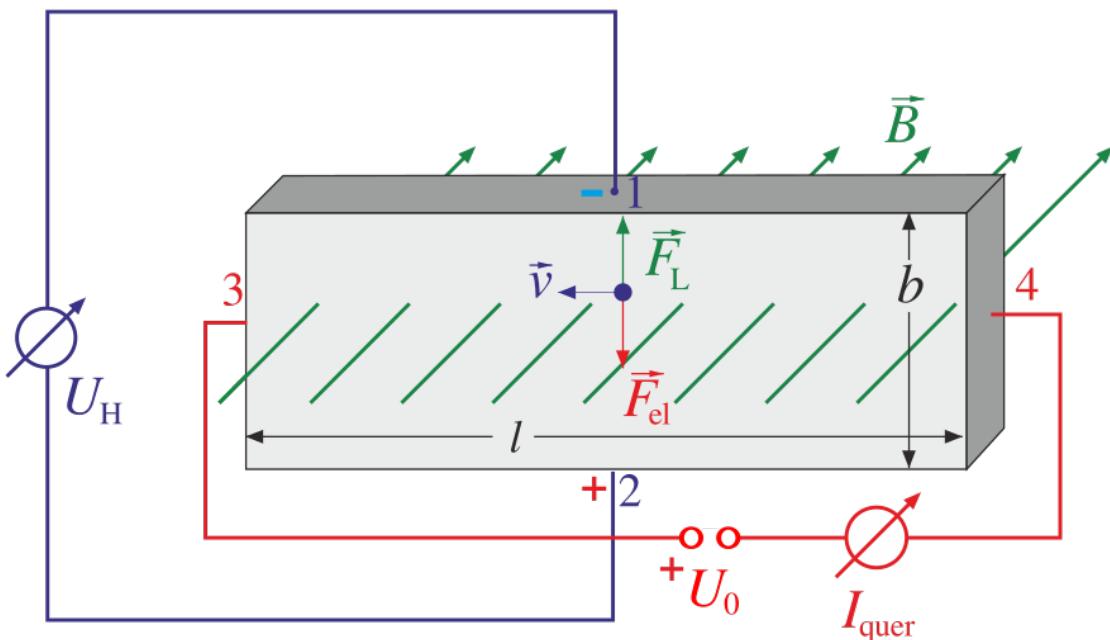


Bild 2.3. Hall-Effekt [3]

Dieses Phänomen lässt sich folgendermaßen erklären: Durch die Leiterplatte fließt der Strom  $I_{quer}$ . Wenn das senkrecht zu diesem Strom verlaufende Magnetfeld auf die Elektronen im Leiter wirkt, erfahren diese die Lorentzkraft  $F_L$ , die in die eingezeichnete Richtung wirkt. Die Lorentzkraft wird mit folgender Gleichung beschreiben:

$$F_L = -qvB \quad (2.26)$$

Hierbei bezeichnet q die Ladung des Elektrons, v die Geschwindigkeit des Elektrons in die eingezeichnete Richtung und B die magnetische Flussdichte in die eingezeichnete Raumrichtung.

Die angreifende Lorentzkraft führt nun zu einer Verschiebung der Elektronen in Richtung des Punktes 1. Diese Verschiebung führt zu einem Elektronenüberschuss am oberen Rand der Leiterplatte, was durch das negative Vorzeichen an Punkt 1 gekennzeichnet ist. Gleichzeitig entsteht ein Elektronenmangel, der an Punkt 2 durch das positive Vorzeichen dargestellt wird. Dieser Elektronenüberschuss und -mangel führen zur Bildung eines elektrischen Feldes, das eine elektrische Kraft in entgegengesetzter Richtung zur Lorentzkraft auf die Elektronen ausübt. Diese elektrische Kraft ist mit  $F_{el}$  gekennzeichnet und kann durch die Gleichung:

$$F_{el} = -qE \quad (2.27)$$

bestimmt werden, wobei E die elektrische Feldstärke darstellt. Diese beiden Kräfte  $F_L$  und  $F_{el}$  wirken einander entgegen, bis ein Gleichgewicht erreicht ist, was mathematisch beschrieben werden kann durch:

$$-qE = -qvB \quad (2.28)$$

Durch die Beschreibung des elektrischen Feldes  $E = U/b$  lässt sich die Gleichung umstellen zu

$$U_H = vBb \quad (2.29)$$

Die Geschwindigkeit der Elektronen v lässt sich berechnen zu

$$v = \frac{j}{ne} \quad (2.30)$$

wobei n die Anzahl der Elektronen pro Volumeneinheit und e die Elementarladung  $e = 1,602 * 10^{-19}$  As ist. Die Stromdichte j berechnet sich zu  $j = \frac{I_{quer}}{b*d}$  wobei d die Dicke

der Leiterplatte beschreibt.

Zusätzlich kann der Hall-Koeffizient  $A_H$  eingeführt werden.

$$A_H = \frac{1}{ne} \quad (2.31)$$

Somit ergibt sich für die Hall-Spannung folgende Gleichung:

$$U_H = \frac{A_H B}{d} I \quad (2.32)$$

Es wird deutlich, dass die Hall-Spannung mit dem magnetischen Fluss linear ansteigt. Durch Berücksichtigung des Hall-Koeffizienten des verwendeten Materials und der bekannten anderen Größen kann somit das Magnetfeld ermittelt werden.

Wie bereits erwähnt, wird der Hall-Effekt in Hall-Sensoren genutzt, die für die Magnetfeldmessung eingesetzt werden. Auch Abstandssensoren und Rotationssensoren profitieren von diesem Prinzip.

Die Vorteile von Hall-Sensoren liegen in ihrer Unempfindlichkeit gegenüber Schmutz und Flüssigkeiten. Auch sind sie beständig gegenüber Verschleiß, da kein mechanischer Kontakt vorhanden ist. Zudem sind sie in der Lage, statische Zustände zu erfassen, im Gegensatz zu den häufig verwendeten induktiven Sensoren. [7]

Hall-Sensoren werden in unterschiedlichen Aufbauten zur Magnetfeldmessung eingesetzt. Hierfür wird ein Hallelement zusammen mit der Mess- sowie der Auswerteelektronik in einem elektrischen Schaltkreis erweitert und alles zusammen in ein Gehäuse gefasst. Dieses Gehäuse mit Inhalt hat meistens eine flache, rechteckige Form in der die Komponenten so angeordnet sind, dass sie durch die größte Seite des Gehäuses verlaufende Magnetfeldkomponente gemessen wird.

Es gibt einige typische Anwendungen in denen Hallsensoren zum Einsatz kommen. Diese sind zum einen die Erkennung von linearen Bewegungen bei denen der Sensor parallel zur Bewegungsrichtung angeordnet ist. In diesem Fall kann die Magnetisierung sowohl parallel als auch senkrecht zur Hallsensorebene sein. Bei der senkrechten Ausrichtung des Magnetfeldes ist die Flussdichte umso höher, je mehr Überdeckung zwischen Magnet und Sensor herrscht. Bei der parallelen Ausrichtung des Magnetfeldes wird vor allem

der Polwechsel des Magneten detektiert, da das Magnetfeld an diesem Punkt eine hohe Steigung aufweist. Diese Anordnung wird oft für kleine Wege genutzt. Zudem kann eine Aufnahme senkrecht zur Hallsensorebene erfolgen. In diesem Fall ist sowohl der Weg des Magneten zum Hallelement senkrecht als auch die Magnetisierung des Magneten. In dieser Anordnung nimmt das Signal ab, je weiter sich der Magnet von dem Hallelement entfernt.

Zusätzlich zu linearen Bewegungen können auch Rotationsbewegungen gut mit Hallsensoren erfasst werden. Auch bei dieser Anwendung finden unterschiedliche Anordnungen von Magnet und Hallelement Gebrauch. Es kann die Detektion des Magnetfeldes bei einem rotierenden Magneten erfolgen. Dies geschieht, indem das Sensorelement radial oder axial neben dem Magneten das Magnetfeld aufnimmt. Dadurch kann ein Sinus-Signal erzeugt werden, welches im Anschluss ausgewertet wird. Eine weitere Möglichkeit ist eine Anordnung mit einem Eisenblech, welches Lücken aufweist und rotiert. Durch dieses Eisenblech wird der Sensor in bestimmten Intervallen von dem Permanentmagneten abgeschirmt und es entsteht ein Signal, durch welches man auf die Rotationsgeschwindigkeit des Eisenbleches schließen kann. [5]

## 2.5 Stand der Technik

In diesem Kapitel sollen der aktuelle Stand der Technik dargestellt werden. Hierzu zählt vor allem das kürzlich erschienene Paper *"Development of an Optimization Tool for Advanced Magnet Design in Sensor Accuracy Enhancement for Automotive Application"* [1], das ein neues Optimierungswerkzeug zur Verbesserung der Präzision von Sensoren vorstellt. Die folgenden Abschnitte bieten eine Zusammenfassung der Ansätze und Methoden, die in dieser Arbeit vorgestellt werden.

Das Paper untersucht einen zylindrischen Magneten, der entlang der z-Achse axial magnetisiert ist und für Anwendungen wie Linearsensoren in Betracht gezogen wird. Die Messposition befindet sich radial neben dem Magneten, um das Magnetfeld in verschiedenen Positionen zu erfassen.

Im Paper werden zwei Hauptmethoden zur Quantifizierung des Magnetfelds des zylindrischen Magneten beschrieben: die Finite-Elemente-Methode (FEM) und die Analyse mithilfe analytischer Gleichungen. Bei der FEM ist für genaue Ergebnisse ein homogenes und sehr feines Mesh erforderlich. Aufgrund der Komplexität und der notwendigen Präzision würden jedoch selbst vereinfachte Modelle einen erheblichen Rechenaufwand darstellen.

Im Gegensatz dazu ermöglicht die Methode der analytischen Berechnung eine effizientere Bestimmung des Magnetfeldes durch Verwendung mathematischer Formeln. Diese Methode ist aufgrund des geringeren Rechenaufwands praktikabler und wird im Paper weiterverfolgt.

Da es sich um ein axial-symmetrisches Problem handelt, konzentrieren sich die Berechnungen auf das radiale ( $B_r$ ) und das axiale ( $B_z$ ) Magnetfeld. Die Berechnungen zeigen, dass die Magnetfeldkomponenten entlang der z-Achse sinusförmig verlaufen, jedoch unterschiedliche Wellenlängen ( $\lambda_r$  und  $\lambda_z$ ) aufweisen. Um mögliche Messfehler aufgrund dieser Diskrepanz zu minimieren, wird ein Optimierungsfaktor  $\Omega$  eingeführt:

$$\Omega = \frac{\lambda_r}{\lambda_z} - 1 \quad (2.33)$$

Zur Optimierung des Magneten definiert das Paper mehrere Zielkriterien:

- Minimierung des Wellenlängenfaktors  $\Omega$  zur Reduktion von Diskrepanzen in der Wellenlänge der Feldrichtungen.

- Maximierung der Magnetfeldstärke zur Erhöhung der Signalqualität in den Richtungen  $B_r$  und  $B_z$ .
- Minimierung von Signalverzerrungen mittels THD und MSD, um eine störungsfreie Messung sicherzustellen.
- Kostenoptimierung, die durch die folgende Kostenfunktion erreicht wird:

$$f_{cost} = p \cdot \varrho \cdot \pi \cdot r_M^2 \cdot l_M \quad (2.34)$$

Hierbei bezeichnet  $p$  den Preis pro Volumeneinheit und  $\varrho$  die Materialdichte. Diese Funktion dient zur Auswahl des kostengünstigsten Materials.

Es wird aufgeführt, dass es zwei mögliche Optionen für eine Optimierung gibt. Diese sind zum einen eine Step-by-Step-Optimierung und zum anderen die Nutzung einer Zielfunktion welche dann optimiert wird.

Aufgrund der Nichtlinearität der Funktion empfiehlt das Paper vor der Interpolation das Signal zu glätten, um lokale Minima zu reduzieren. Hierzu werden der FFT-Filter und der gleitende Mittelwert verglichen, wobei letzterer effektiver ist, da er lokale Minima glättet, ohne die Gesamtstruktur zu verfälschen.

Zur Sicherstellung der Stabilität werden Grenzen für die Optimierung festgelegt, wie etwa eine maximale THD von 5 % und eine maximale Auflösung von 1°. Zudem wird empfohlen, die globale Optimierung durch zufällige Startpunkte innerhalb des gesamten Parameterbereichs durchzuführen, um das Risiko nur lokale Minima zu finden zu minimieren, also um sicherzustellen, dass die bestmögliche Lösung erreicht wird. [1]



## 3 Methodik

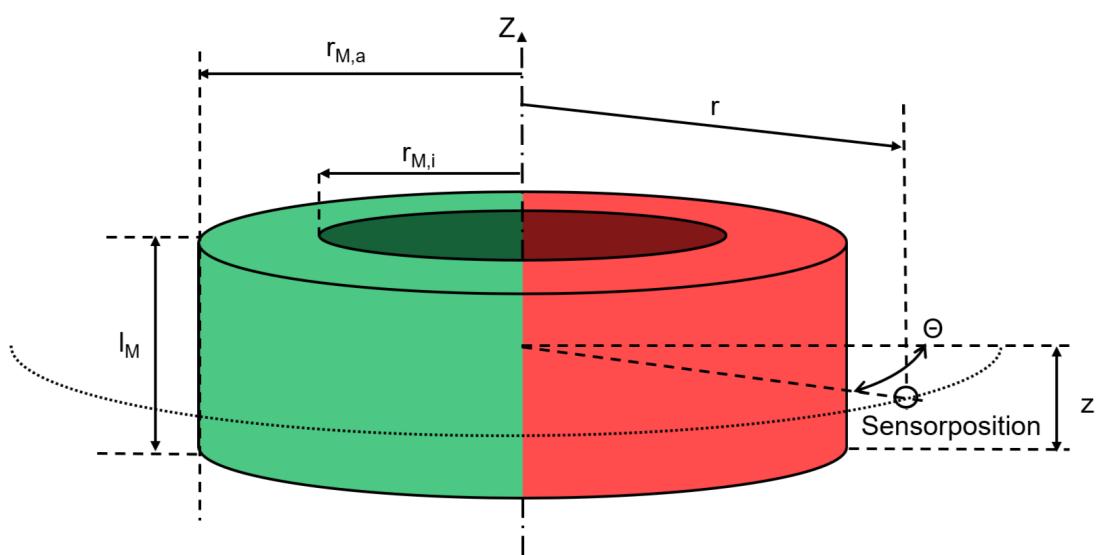
In diesem Kapitel werden die im Rahmen der Arbeit bearbeiteten Aufgaben von einer grundlegenden Beschreibung des untersuchten Modells bis hin zur Optimierung verschiedener Parameter beschrieben. Dabei wird innerhalb der einzelnen Kapitel auf die verschiedenen unterschiedlichen Sensorbauformen eingegangen. Bei allen Bauformen folgt die Vorgehensweise einem ähnlichen Schema.

### 3.1 Aufbau

#### 3.1.1 Diametral magnetisierter Zylinder- und Ringmagnet, Sensor neben Achse

Zuerst wird der Aufbau für die Nutzung eines zweipoligen Zylindermagneten untersucht, welcher diametral magnetisiert ist. Dies bedeutet der Magnet besitzt einen Nord- und einen Südpol und das Magnetfeld verläuft senkrecht zur z-Achse. Diese Magnetisierung wird in 3.1 durch die zwei unterschiedlichen Farben angedeutet, die die zwei Pole darstellen sollen. Analysiert wird das Verhalten des Magneten in einer Anwendung zur Rotationsmessung. Hierzu wird das Szenario betrachtet, in dem sich der Sensor, also der Messpunkt an dem das Magnetfeld aufgenommen wird, seitlich neben dem Magneten befindet. Man spricht in diesem Fall von einer radialen Anordnung von Sensor und Magnet.

Es sollen verschiedene Optimierungsparameter betrachtet werden: Zum einen soll der optimale Abstand zwischen dem Magneten und dem Sensor ermittelt werden, um eine präzise Messung zu gewährleisten. Zum anderen sollen die optimalen Abmessungen der Magneten bestimmt werden. Bei einem Zylindermagneten sind dies die Länge  $l_M$  und der Radius  $r_M$ . Im Fall des Ringmagneten differenziert sich der Radius, zu Außenradius  $r_{M,a}$  und Innenradius  $r_{M,i}$  welche die Geometrie des Magneten definieren.



**Bild 3.1.** Aufbau: diametral magnetisierter Ringmagnet, Sensor neben Achse

Im Fall der radialen Anordnung von Zylinder und Magnet kann das Problem auf zwei Dimensionen reduziert werden, da das Magnetfeld entlang der z-Achse nahezu konstant bleibt, solange sich der Sensor neben dem Magneten befindet und nicht über dessen Rand hinaus nach oben oder unten wandert. Dadurch vereinfacht sich die Analyse, und es müssen nur die Komponenten des Magnetfelds in radialer Richtung  $B_r$  und in tangentialer Richtung  $B_\Theta$  berücksichtigt werden.

Neben der Optimierung der geometrischen Parameter wird auch untersucht, wie sich eine Koaxialität zwischen dem Messpunkt und dem Zylindermagneten beziehungsweise dem Ringmagneten auf die Messgenauigkeit auswirkt. Zu diesem Zweck wird ein Verschiebungsparameter  $x_v$  eingeführt, welcher die Verschiebung zwischen der z-Achse des Zylindermagneten und der Achse, um die sich der Sensor bewegt, beschreibt. Dieser Parameter muss in die verwendeten Zylinderkoordinaten übertragen werden und somit ergibt sich der neue Messradius zu:

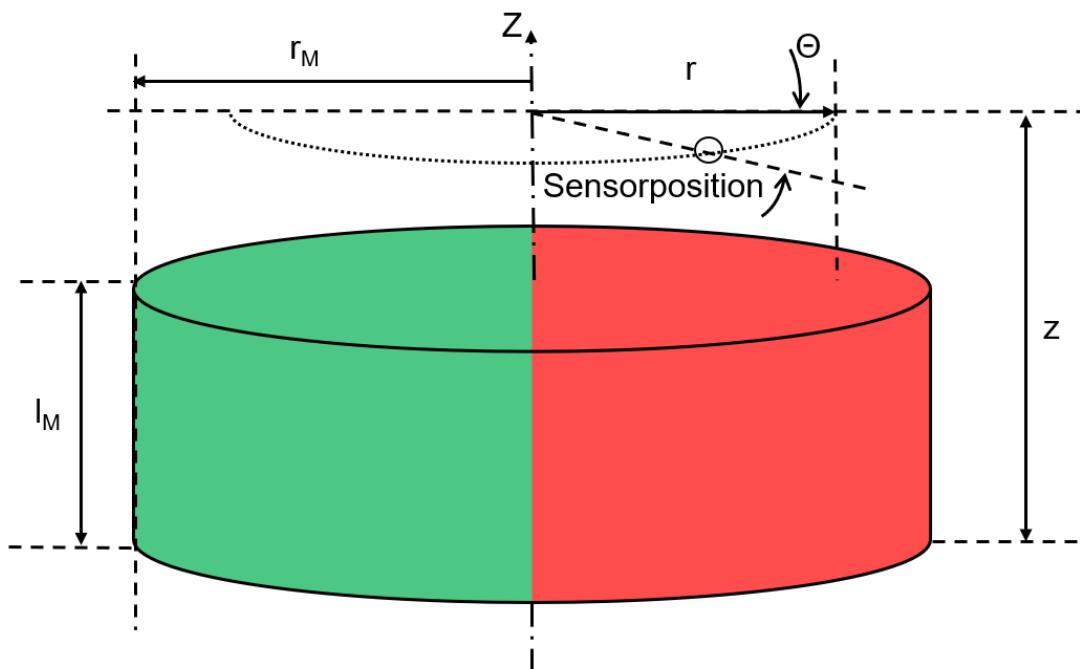
$$r_v = \sqrt{((r * \cos(\Theta)) + x_v)^2 + (r * \sin(\Theta))^2} \quad (3.1)$$

bei gleichbleibendem Messwinkel  $\Theta$ .

### 3.1.2 Diametral magnetisierter Zylindermagnet, Sensor auf Achse

In einer zweiten Anordnung wird ein ebenfalls zweipoliger Zylindermagnet untersucht, welcher dasselbe Magnetfeld besitzt wie der in 3.1.1 beschriebene Magnet. Im Gegensatz zu der in diesem Kapitel beschriebenen Anordnung wird nun das Magnetfeld mit einem Erfassungspunkt auf der Achse des Magneten untersucht. Die z-Koordinaten der Sensorposition sind immer  $z > l_m$ . Für eine Untersuchung des Magneten kann in der Berechnung aufgrund der Symmetrie des Magneten auch ein  $z < 0$  genutzt werden.

Idealerweise befindet sich der Sensor genau auf der z-Achse des Magneten, was dazu führt, dass nur die Position des Sensors in z-Richtung variiert und nur diese Variation untersucht wird. In realen Anwendungen kann es jedoch zu einer Koaxialität zwischen Sensorposition und Magnet kommen. Der Einfluss dieser Koaxialität auf die Sensorgenaugigkeit wird ebenfalls untersucht. Dies kann in dieser Anwendung ohne das einführen eines neuen Parameters realisiert werden. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass eine Koaxialität dazu führt, dass sich der Sensor nicht mehr am Punkt S(z/0/0) befindet sondern auch ein veränderlicher Radius, welcher die Größe der Koaxialität beschreibt, hinzu kommt und der Sensor sich an der Stelle S(z/r/ $\Theta$ ) befindet. Die Winkelposition  $\Theta$  wird über einen Bereich von 0 bis  $2\pi$  untersucht. Diese Zusammenhänge sind in 3.2 veranschaulicht.

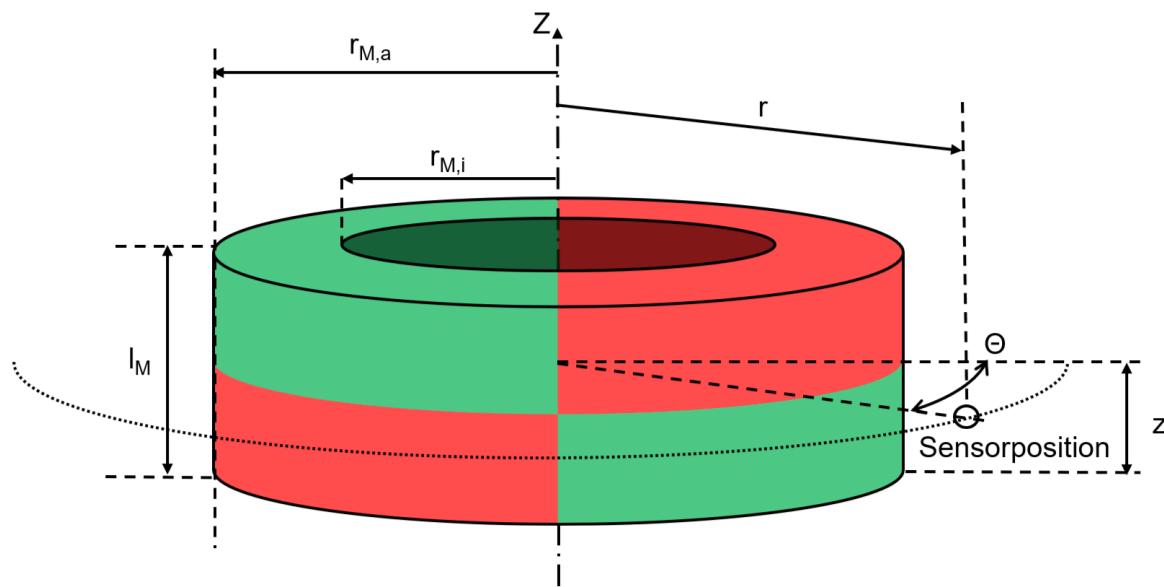


**Bild 3.2.** Aufbau: diametral magnetisierter Zylindermagnet, Sensor auf Achse

### 3.1.3 Axial magnetisierter Ringmagnet

Für die dritte Untersuchung wird ein anderer Magnet gewählt. Es handelt sich ebenfalls um einen Zylindermagneten, welcher 2 Pole besitzt. Allerdings führt eine unterschiedliche Art der Magnetisierung in diesem Fall dazu, dass sich das Magnetfeld auch in z-Richtung ausbildet, man spricht von einem axial magnetisierten Zylindermagneten. Dieser kann in unterschiedlichen Anwendungen zur Rotationsmessung eingesetzt werden. Es können unterschiedliche Arten dieser Magneten eingesetzt werden, welche sich in der Anzahl ihrer Pole unterscheiden. Die Anordnung ist in all diesen Fällen dieselbe und auch die Berechnung verändert sich nur minimal wodurch sie durch die gleichen Funktionen beschrieben werden können.

In 3.3 wird die Anordnung für diese Analyse dargestellt. Wie schon erläutert verläuft das Magnetfeld in z-Richtung, in dieser Abbildung wieder dargestellt durch die unterschiedliche Fargebung. Von  $\Theta = -\pi \dots \pi$  verläuft das Magnetfeld innerhalb des Magneten in positive z-Richtung und von  $\Theta = \pi \dots -\pi$  in negative z-Richtung.



**Bild 3.3.** Aufbau: axial magnetisierter Ringmagnet

Auch in diesem Anwendungsfall wird die Aufnahme des Magnetfeldes radial neben dem Magnetfeld untersucht. Somit gelten die in 3.1.1 getroffenen Erläuterungen zur Untersuchung der Koaxialität analog.

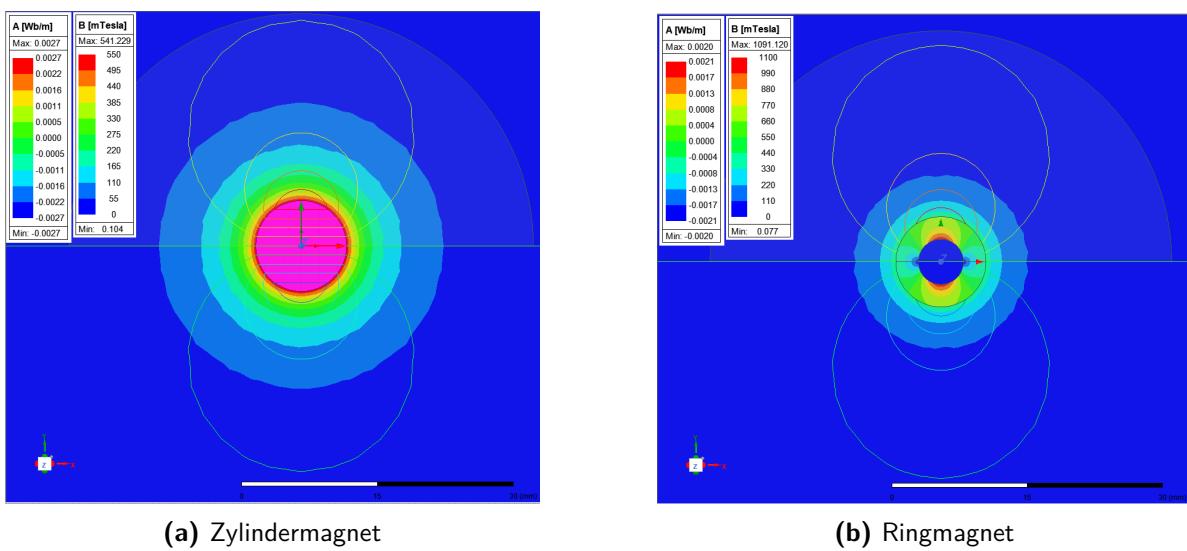
## 3.2 FEM-Modelle

In einem ersten Schritt der Analyse werden FEM-Modelle für die verschiedenen Magnetbauformen erstellt. Diese Modelle dienen zum einen dazu ein grundlegendes Verständnis der Magnetfelder und deren Verteilung, bei den jeweiligen Bauformen, zu entwickeln. Zum anderen stellen sie eine wichtige Grundlage dar, um in späteren Schritten die Genauigkeit der analytischen Berechnungen durch einen Vergleich mit den Simulationsergebnissen zu validieren. Für die Berechnung der Magnetfelder wird das FEM-Programm Ansys Maxwell verwendet. Alle Simulationen werden mit einem Neodymmagneten durchgeführt.

### 3.2.1 Diametral magnetisierter Zylinder- und Ringmagnet, Sensor neben Achse

Um die Simulation zu beschleunigen, und um somit Rechnerressourcen effizient zu nutzen, wird das Modell des Zylinder- und Ringmagneten für die FEM-Analyse vereinfacht. Anstelle eines vollständigen 3D-Modells wird eine zweidimensionale (2D) Analyse durchgeführt, da sich das Magnetfeld in der z-Richtung nicht signifikant verändert. Diese Vereinfachung reduziert die Komplexität des Modells erheblich und ermöglicht gleichzeitig eine schnelle und dennoch präzise Erfassung des Magnetfeldverhaltens.

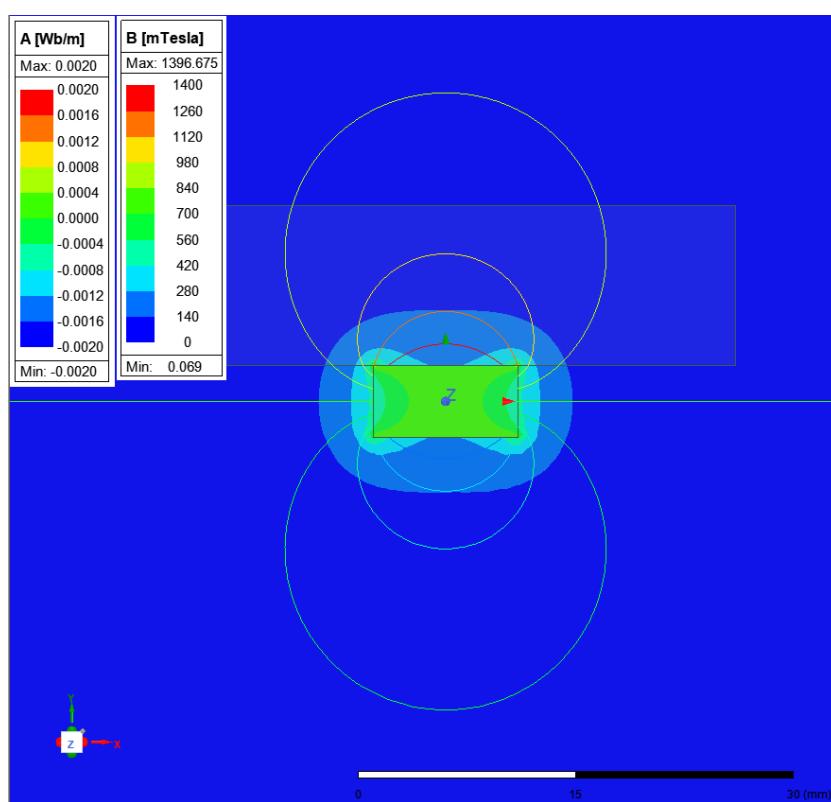
In den Abbildungen 3.4a und 3.4b sind die Ergebnisse der FEM-Analyse für die in diesen Kapiteln behandelten Magnetbauformen dargestellt. Dargestellt ist zum einen das Magnetfeld  $\mathbf{B}$  in mT, welches durch eine Färbung des Feldes dargestellt ist. Zusätzlich dazu sind Magnetfeldlinien eingezeichnet, welche in Wb/m angegeben werden und durch Linien in unterschiedlichen Farben angedeutet sind.



**Bild 3.4.** FEM-Analysen: diametral magnetisiert

### 3.2.2 Diametral magnetisierter Zylindermagnet, Sensor auf Achse

Auch für die Anordnung des Sensors auf der Achse des Magneten werden FEM - Berechnungen durchgeführt. Diese werden nicht zur Validierung der Berechnungen genutzt, da die gleichen analytischen Formeln wie für den vorangegangenen Aufbau genutzt werden. Dennoch wird nicht auf die Erstellung eines FEM-Modells verzichtet um einen Eindruck vom Magnetfeld zu erhalten. Als Modell wird wieder auf ein 2 dimensionales Modell vereinfacht. Da eine andere Anordnung von Sensor und Magnet betrachtet wird, ist die Betrachtung der z-Achse von Bedeutung und kann nicht vernachlässigt werden. Aus diesem Grund wird ein Schnitt durch die z-x-Ebene des Magneten gezogen und das Magnetfeld betrachtet (3.5).

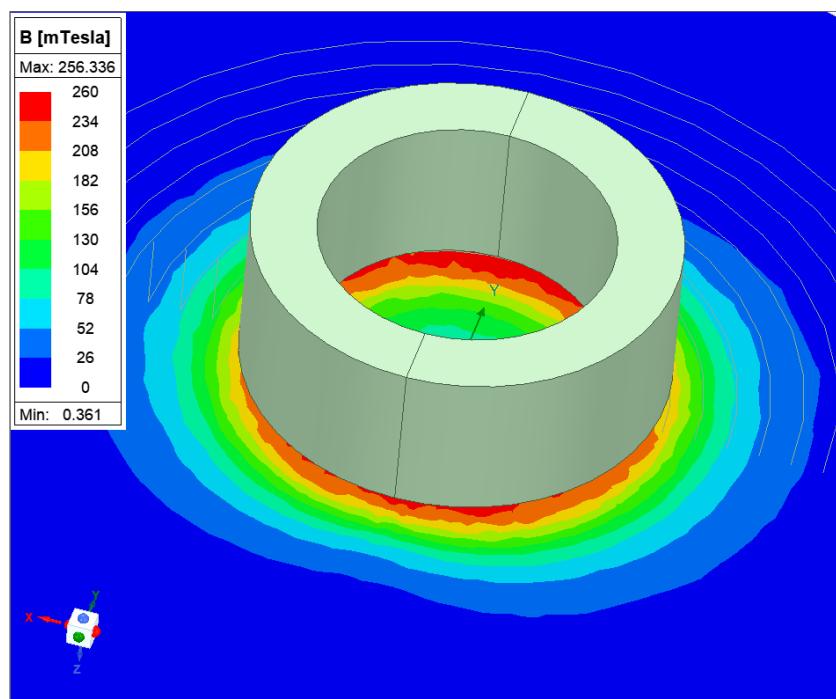


**Bild 3.5.** FEM-Analyse: diametral magnetisierter Zylindermagnet

### 3.2.3 Axial magnetisierter Ringmagnet

Das Magnetfeld des axial magnetisierten Ringmagneten wird durch andere analytische Formeln beschrieben, als die vorher betrachteten Magneten. Daher ist das FEM-Modell wieder von entscheidender Bedeutung um die implementierten Formeln zu validieren. Im Fall des Ringmagneten könnte bei einer Anordnung des Sensors neben dem Magneten das  $B_r$ - sowie das  $B_\Theta$ -Feld vernachlässigt werden, da hier hauptsächlich ein Magnetfeld in z-Richtung vorliegt. Für das FEM-Modell wird sich aber nicht nur auf diese Raumrichtung fokussiert um zum einen alle Bestandteile des Magnetfeldes validieren zu können und zum anderen um das Modell bei einer erneuten Betrachtung des Messpunkten oberhalb des Magneten wieder heranziehen zu können.

Die Ergebnisse dieses Models sind in 3.6 zu sehen. Dargestellt ist nur das Magnetfeld **B**. Dieses wird auf einer Fläche, welche sich 1 mm unterhalb des Magneten befindet durch eine Färbung abgebildet.



**Bild 3.6.** FEM-Analyse: axial magnetisierter Ringmagnet

## 3.3 Berechnungen

Im Folgenden werden erste Berechnungen des Magnetfeldes durchgeführt. Alle hier angeführten Berechnungen erfolgen mithilfe von Matlab-Skripten. Hierzu werden zunächst die analytischen Funktionen mithilfe von speziell entwickelten Matlab-Funktionen ausgeführt. Die Matlab Funktionen arbeiten mit dem Befehl "quad2d" zur numerischen Lösung der Integrale. Dieser Befehl basiert auf einer numerischen Lösung mittels Simpsonregel (2.3.1).

Da es sich um komplexe Gleichungen handelt, wird die Implementierung durch ein FEM-Modell validiert, wie in Abschnitt 3.4 beschrieben. Diese Validierung stellt sicher, dass die analytischen Funktionen korrekt implementiert werden und die Simulationsergebnisse zuverlässige Daten liefern. Anschließend können mit diesen Funktionen die Berechnungen durchgeführt werden.

### 3.3.1 Diametral magnetisierter Zylinder- und Ringmagnet, Sensor neben Achse

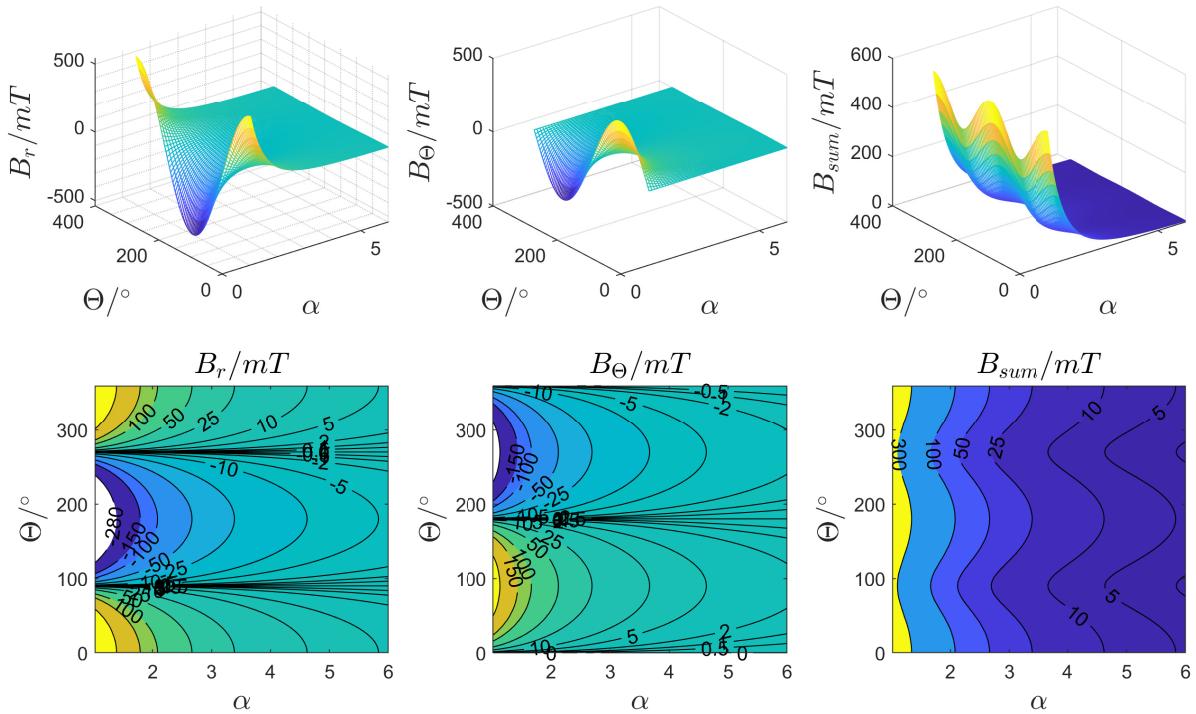
Für die analytische Betrachtung des Magnetfeldes werden die Formeln 2.3 und 2.4 herangezogen. Im Falle des Ringmagneten wird zusätzlich die Beziehung 2.7 berücksichtigt.

Parallel zur Validierung der Berechnungen, welche in 3.4 dargestellt wird, konnten die ersten Berechnungen zur Bestimmung der Magnetfeldstärken durchgeführt werden.

In diesen Berechnungen wird ein Magneten mit festgelegtem Radius und festgelegter Länge betrachtet. Es wird nur der Einfluss von veränderten Parametern des Messpunktes auf die aufgenommenen Magnetfelder untersucht. Die Länge des Magneten wird auf 10 mm und der Radius auf 5 mm festgelegt. Als Messpunkt wird die z-Koordinate  $z = z_M/2$  gewählt, da hier das homogenste Magnetfeld zu erwarten ist. Der Radius des Messpunktes variiert von 5,1 mm bis 30 mm wobei 50 Werte betrachtet werden. Der Winkel wird von 0 bis  $2\pi$  verändert wobei 100 Werte ermittelt werden. Die gewählte Remanenzflussdichte beträgt 1 T. Das errechnete Magnetfeld ist in 3.7 für einen Zylindermagneten dargestellt.

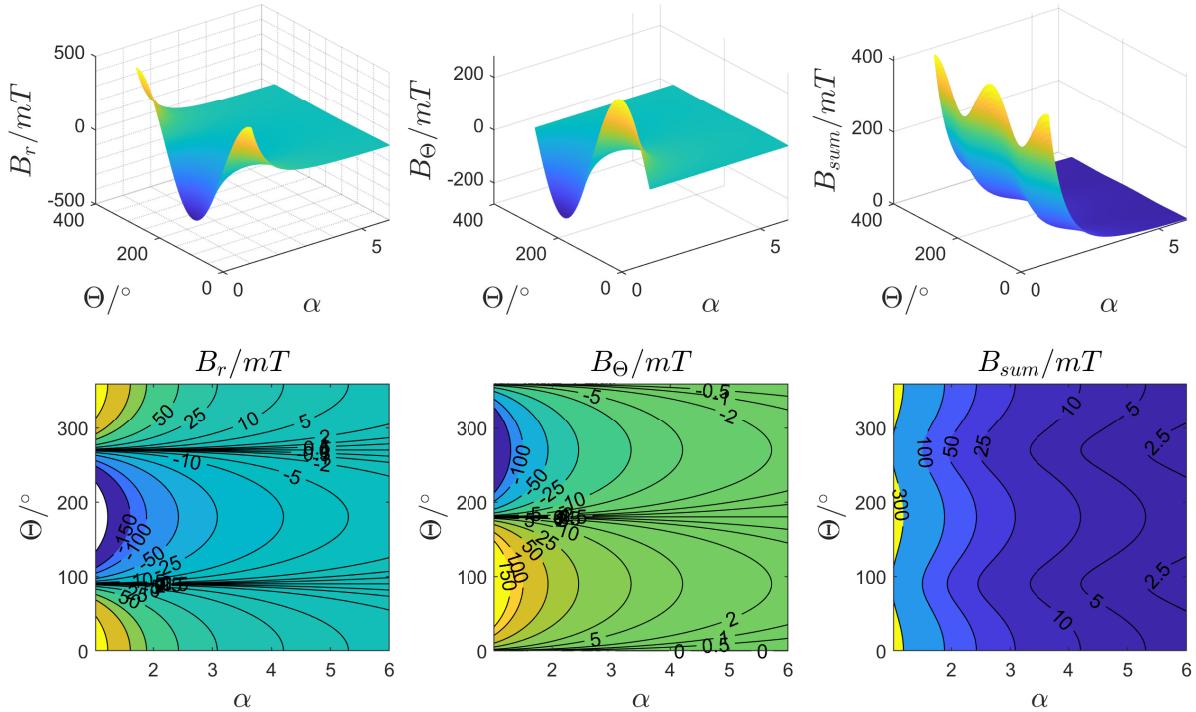
Die Variable  $\alpha$  wird eingeführt um den relativen radialen Abstand darzustellen.

$$\alpha = \frac{r}{r_M} \tag{3.2}$$



**Bild 3.7.** Magnetfeld: diametral magnetisierter Zylindermagnet, Sensor neben Achse

Für den Ringmagneten werden dieselben Werte wie für den Zylindermagneten gewählt. Zusätzlich dazu wird der Innenradius des Magneten auf 2,5 mm festgelegt. Wie in 3.8 zu erkennen ist hat das Magnetfeld des Ringmagneten den gleichen Verlauf wie der des Zylindermagneten bei jedoch deutlich geringerer Magnetfeldstärke.



**Bild 3.8.** Magnetfeld: diametral magnetisierter Ringmagnet, Sensor neben Achse

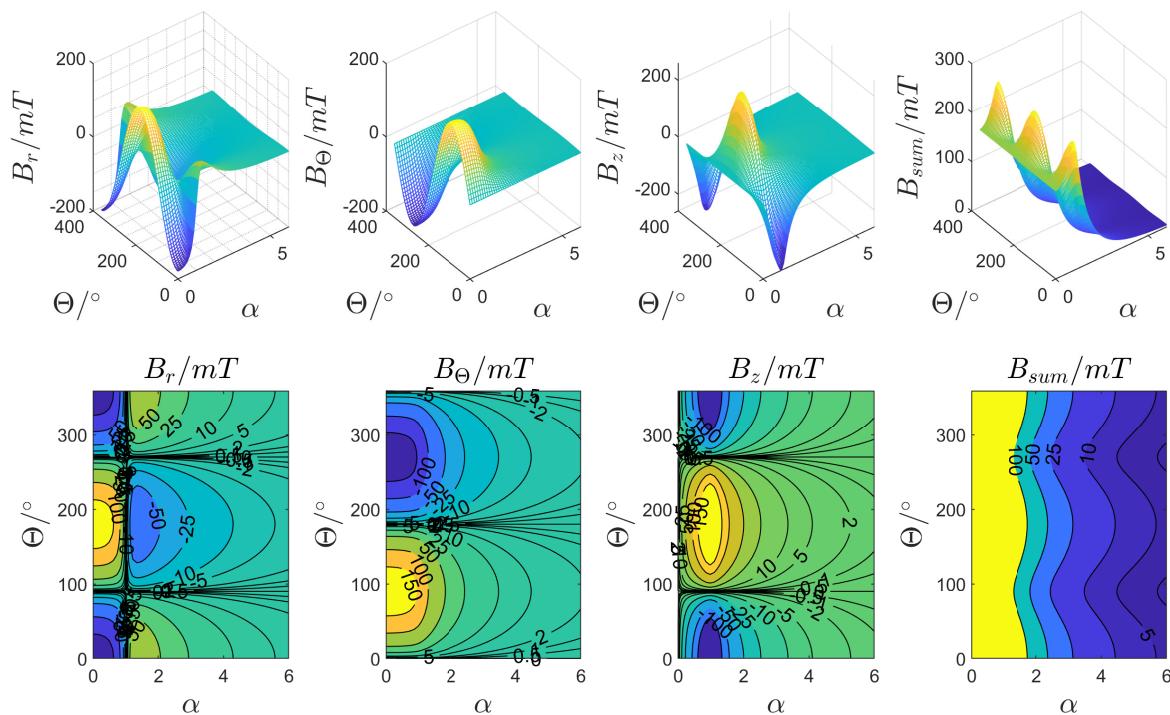
### 3.3.2 Diametral magnetisierter Zylindermagnet, Sensor auf Achse

Auch in diesem Aufbau werden die Formeln 2.3 und 2.4 jedoch zusätzlich die z-Komponente des Magnetfeldes 2.5 berücksichtigt.

Auch in diesem Fall wird ein Magnet mit den gleichen festgelegten Maßen wie bei der vorangegangenen Anordnung berechnet, um eine Vergleichbarkeit zu schaffen. Diese Maße sind:  $l_M = 10\text{mm}$  und  $r_M = 5\text{mm}$ . Zusätzlich hat der simulierte Magnet eine Remanenzflussdichte von 1 T. Der Messpunkt liegt auf der z-Achse 1 mm von der Oberfläche des Magneten entfernt und der Messradius variiert von 0 bis 30 mm, wobei 50 Punkte berechnet werden. Auch werden wieder 100 Punkte in Winkelrichtung ermittelt, wobei die ermittelten Werte von  $0^\circ$  bis  $280^\circ$  liegen.

Die ermittelten Magnetfelder sind in 3.9 dargestellt. Klar zu erkennen ist der Punkt an welchem der Messpunkt nicht mehr über dem Magneten liegt und  $r = r_M$  ( $\alpha = \frac{r}{r_M} = 1$ ). An diesem Punkt wechselt das Magnetfeld in radialer Richtung ( $B_r$ ) sein Vorzeichen.

Zusätzlich nehmen ab diesem Punkt die beiden anderen Komponenten kontinuierlich ab.



**Bild 3.9.** Magnetfeld: diametral magnetisierter Zylindermagnet, Sensor auf Achse

### 3.3.3 Axial magnetisierter Ringmagnet

Im dritten Aufbau mussten, Aufgrund der geänderten Magnetisierungsrichtung des Magneten, die Formeln 2.8, 2.9 und 2.10 implementiert werden.

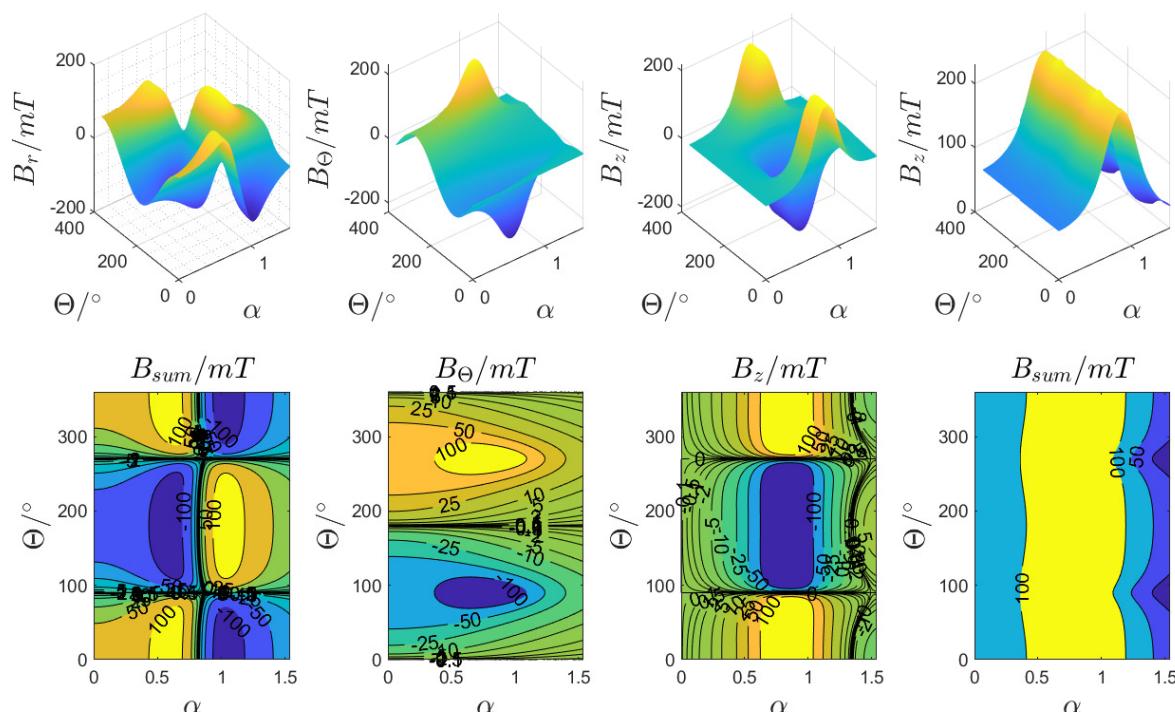
Nachdem diese in einer Matlab-Funktion implementiert werden, können erste Berechnungen des Magnetfeldes angestellt werden.

Der simulierte Magnet hat folgende Abmessungen: Länge  $l_M = 5\text{mm}$ , Innenradius  $r_{M,i} = 4,5\text{mm}$ , Außenradius  $r_{M,a} = 6,5\text{mm}$  sowie eine Remanenzflussdichte von 1 T.

Der Messpunkt wird unabhängig von dem Aufbau der späteren Optimierung oberhalb des Magneten gewählt. Dies geschieht, da neben dem Magneten nur ein Magnetfeld in z-Richtung Auftritt und  $B_r$  sowie  $B_\Theta$  verschwindend gering sind. Dies würde bei einer Berechnung an dieser Stelle dazu führen, dass die analytischen Berechnungen in 2 von 3 Raumrichtungen nicht validiert werden könnten.

Der Messpunkt befindet sich wie im vorangegangenen Aufbau 1 mm oberhalb des Magneten und der Messradius wird auf 200 Werten von 0 mm bis 10 mm variiert. Es wird erneut über einen Winkel von 280° gemessen wobei 500 Werte ermittelt werden.

In 3.10 sind die Ergebnisse dargestellt. Zu erkennen ist hier sehr gut der Wechsel der Magnetfehlrichtung für  $B_r$ , welcher in der Mitte des Magneten liegt ( $\alpha = \frac{r_{M,mitte}}{r_{M,a}} = \frac{5,5\text{mm}}{6,5\text{mm}} = 0,846$ ). Zusätzlich sind gerade bei  $B_z$  sowie  $B_{sum}$  der Innen- sowie der Außenradius ( $\alpha = \frac{r_{M,i}}{r_{M,a}} = 0,692$  sowie  $\alpha = 1$ ) an dem innerhalb dieser Grenzen hohen Magnetfeld zu erkennen.



**Bild 3.10.** Magnetfeld: axial magnetisierter Ringmagnet

## 3.4 Validierung mittels FEM

In diesem Kapitel wird darauf eingegangen, wie mithilfe der FEM-Modelle die analytischen Berechnungen validiert werden.

### 3.4.1 Diametral magnetisierter Zylinder- und Ringmagnet, Sensor neben Achse

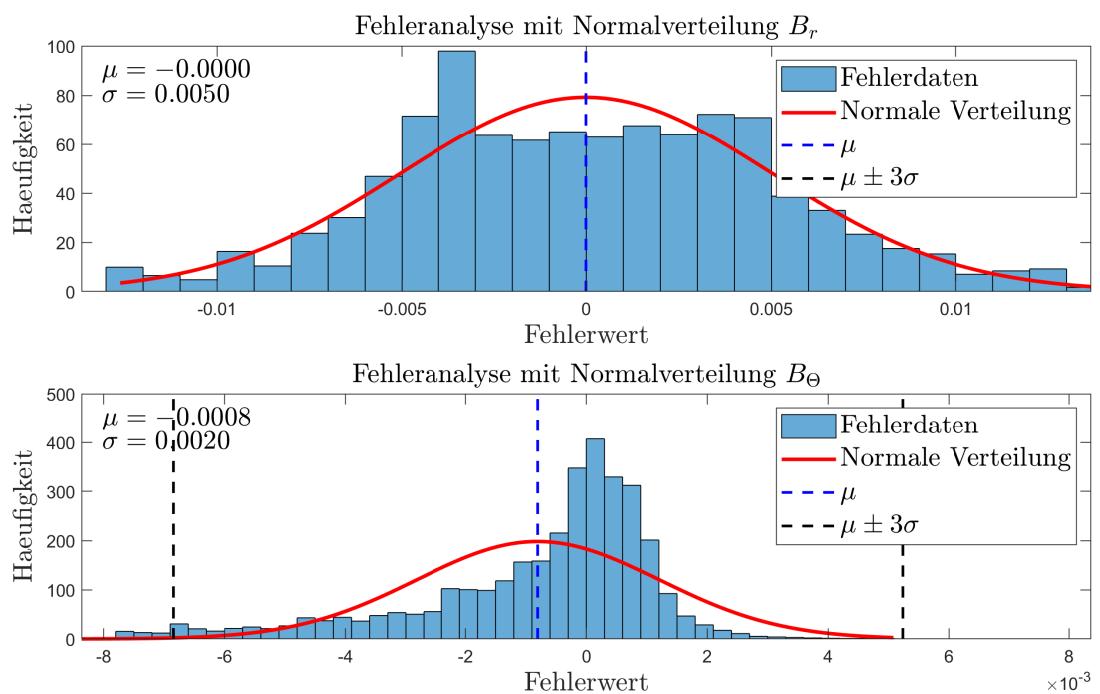
Wie schon bei der FEM-Analyse (3.2.1) erwähnt wird sich bei diesem System auf eine 2D-Analyse beschränkt. Aus diesem Grund werden auch für die Validierung nur  $\mathbf{B}_r$  und  $\mathbf{B}_\Theta$  untersucht.

Es wird analytisch, mithilfe von Matlab, Punkte im Umkreis eines Magneten mit den Abmessungen  $r_M = 5\text{mm}$  und  $z_M = 100\text{mm}$  berechnet. Diese Abmessung wird gewählt, da in den 2D-FEM-Berechnungen die Werte ermittelt werden, die für einen quasi unendlich langen Magneten gelten. Um diese vergleichen zu können wird ein möglichst langer Magnet analytisch untersucht ohne den Rechenaufwand unnötig hoch zu setzen.

Untersucht wird das Magnetfeld in unterschiedlichen Abständen vom Magneten bei einem Messradius von 5,5mm bis 14,5 mm in 1 mm Abständen . Die Werte werden auf einer Kreisbahn ermittelt. Da es sich um ein symmetrisches Magnetfeld handelt werden nur der Bereich von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  untersucht. Es werden 1001 Werte /  $180^\circ$  ermittelt.

Die gleichen Werte werden mittels FEM ermittelt und die errechneten Magnetfelder werden miteinander verglichen.

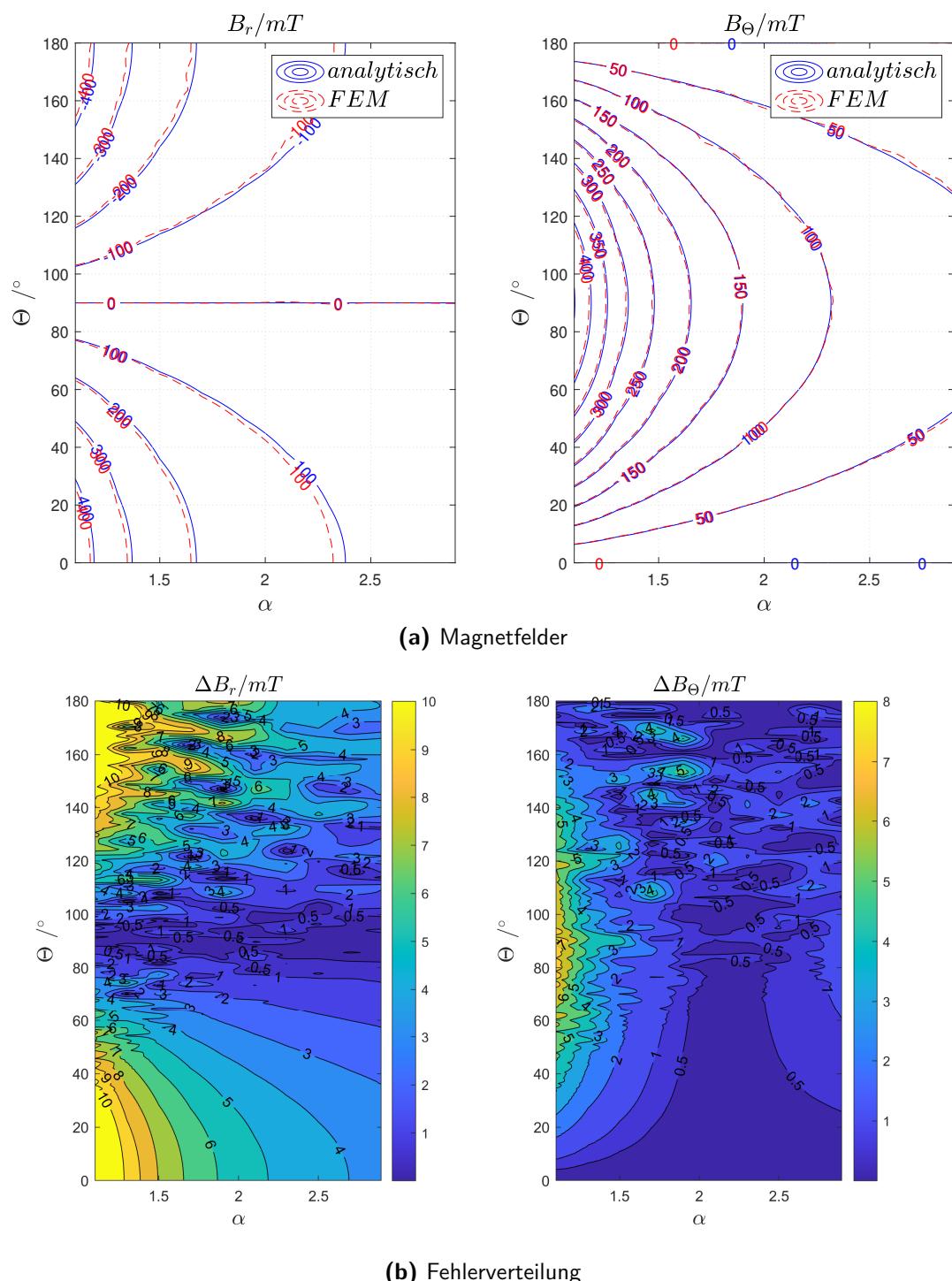
Zum Vergleichen werden die mittels FEM ermittelten Werte normiert und in Matlab importiert. Anschließend wird überprüft, ob gleich viele Werte für die FEM-Berechnung wie mithilfe der analytischen Gleichungen vorhanden sind. Im nächsten Schritt wird die Differenz zwischen den FEM-Daten und den analytischen Daten ermittelt. Diese Differenz kann als Fehler der analytischen Lösung bezeichnet werden, da davon ausgegangen wird, dass die FEM-Daten die reellen Felder darstellen. Für diesen nun bekannten Fehler wird der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Diese betragen für  $\Delta B_r$ :  $\mu = -0,0000$  und  $\sigma = 0,0050$ . Für  $\Delta B_\Theta$  betragen sie  $\mu = -0,0008$  und  $\sigma = 0,0020$ . Fehleranalyse und Normalverteilung werden anschließend dargestellt (3.11).



**Bild 3.11.** Fehleranalyse und Normalverteilung: diametral magnetisierter Zylindermagnet

Bei einer so geringen Standardabweichung und einem Mittelwert welcher nahe 0 liegt, kann die analytische Lösung als vergleichbar mit den FEM-Berechnungen bezeichnet werden. Nicht nur können die Ergebnisse als plausibel erachtet werden auch für weitere Berechnung kann auf ein FEM-Modell verzichtet werden und es kann allein mit den analytischen Berechnungen weitergearbeitet werden.

Trotz der Validierung der Daten kann es interessant sein, zu betrachten an welchen Stellen die größten Abweichungen zwischen FEM und den analytischen Berechnungen vorkommen. Aus diesem Grund wird die Verteilung der Fehler im Raum graphisch dargestellt (3.12b).

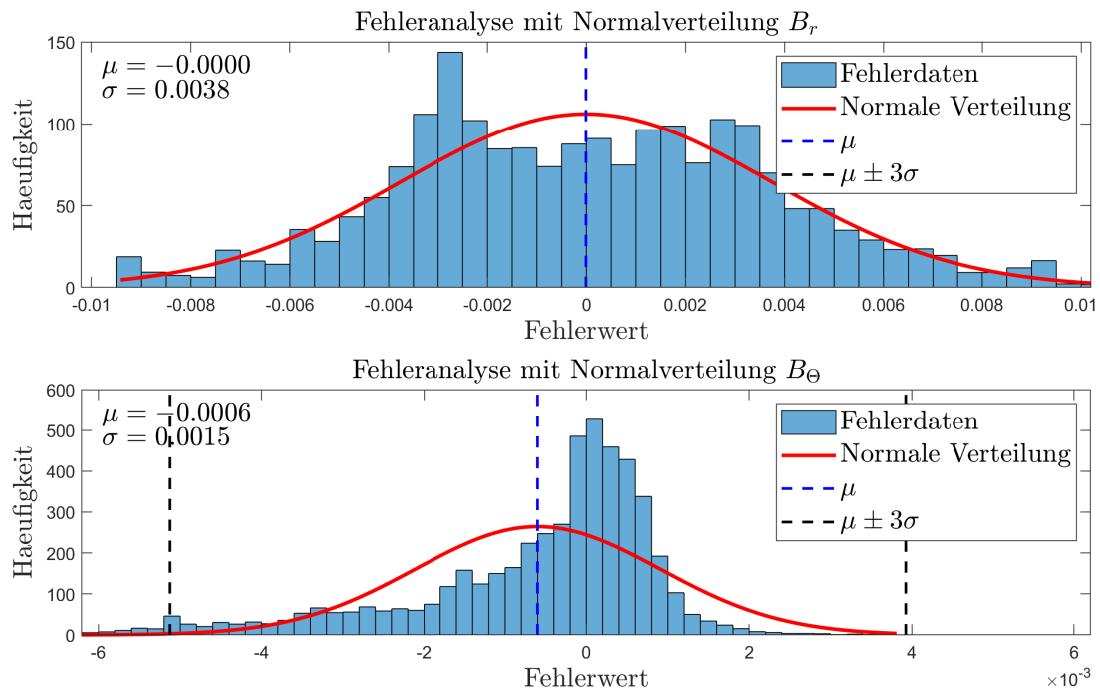


**Bild 3.12.** Magnetfelder und deren Fehlerverteilung: diametral magnetisierter Zylindermagnet

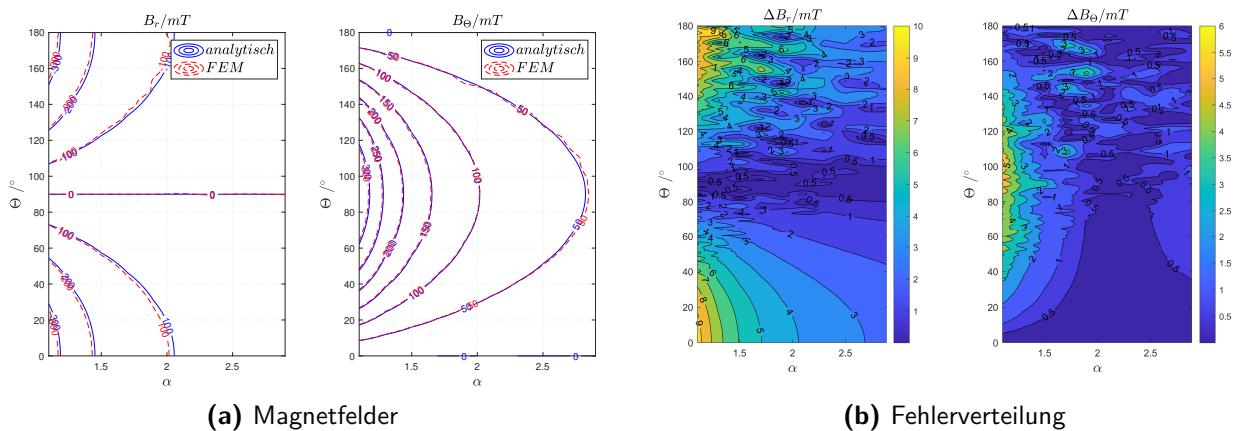
Zu erkennen ist, dass sich die Fehler unabhängig vom der Magnetfeldrichtung erhöhen, je näher das Feld am Magneten erfasst wird. Zusätzlich ist zu erkennen, dass sich die Fehler der einzelnen Magnetfeldrichtungen maximieren je näher man sich zum Scheitelpunkt

der Welle bewegt.

Auch für den Ringmagneten werden entsprechende Daten erhoben.



**Bild 3.13.** Fehleranalyse und Normalverteilung: diametral magnetisierter Ringmagnet



**Bild 3.14.** Magnetfelder und deren Fehlerverteilung: diametral magnetisierter Ringmagnet

An den Ergebnissen des Ringes ist zu erkennen wie vergleichbar Ring- und Zylindermagnet bezüglich der Berechnungen sind. Es zeigen sich sehr ähnliche Fehlerkurven bei der Normalverteilung und auch die Fehlergröße im Raum sind gleich verteilt.

### 3.4.2 Diametral magnetisierter Zylindermagnet, Sensor auf Achse

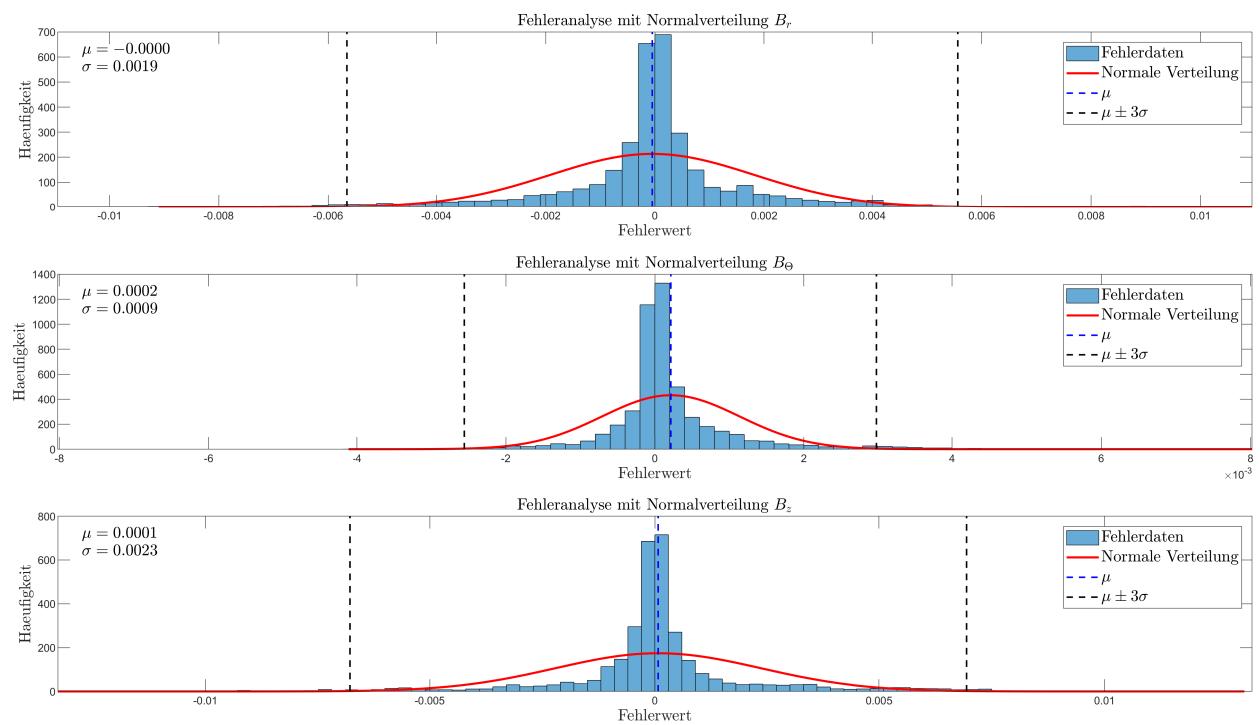
Für den diametral magnetisierten Zylindermagnet, bei dessen zweiter Anordnung der Sensor auf der Achse des Magneten liegt, werden nicht erneut die analytischen Berechnungen validiert. Trotz einer erneuten Erstellung des FEM-Modells wird darauf verzichtet, da die analytischen Berechnungen sich nicht verändern und die gleichen Berechnungsvorschriften genutzt werden, welche schon im vorangegangenen Kapitel validiert werden konnten.

### 3.4.3 Axial magnetisierter Ringmagnet

Für den axial magnetisierten Zylinder- beziehungsweise Ringmagneten kann sich nicht nur auf die Betrachtung von  $B_r$  und  $B_\Theta$  beschränkt werden. Vielmehr ist, je nach Anwendung, nur  $B_z$  relevant. Aus diesem Grund werden alle drei Werte zwischen FEM-Modell und analytischer Lösung verglichen.

Es werden wie auch bei der Validierung der vorherigen Berechnung (3.4.1) Punkte im Umkreis eines Magneten berechnet. Dieser Magnet besitzt die Abmessungen  $r_{M,a} = 6,5\text{mm}$ ,  $r_{M,i} = 4,5\text{mm}$  und  $z_M = 5\text{mm}$ . Untersucht wird das Magnetfeld in den gleichen Abständen wie bei der vorangegangenen Validierung, also bei einem Messradius von 5,5mm bis 14,5mm in 1mm Abständen. Es werden wieder 1001 Werte auf einer Kreisbahn bei einem Winkel von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  ermittelt. Der Messpunkt befindet sich immer 1mm oberhalb des Magneten, um alle Magnetfeldkomponenten validieren zu können. Bei einer Wahl des Messpunktes neben dem Magneten könnte nur  $B_z$  validiert werden.

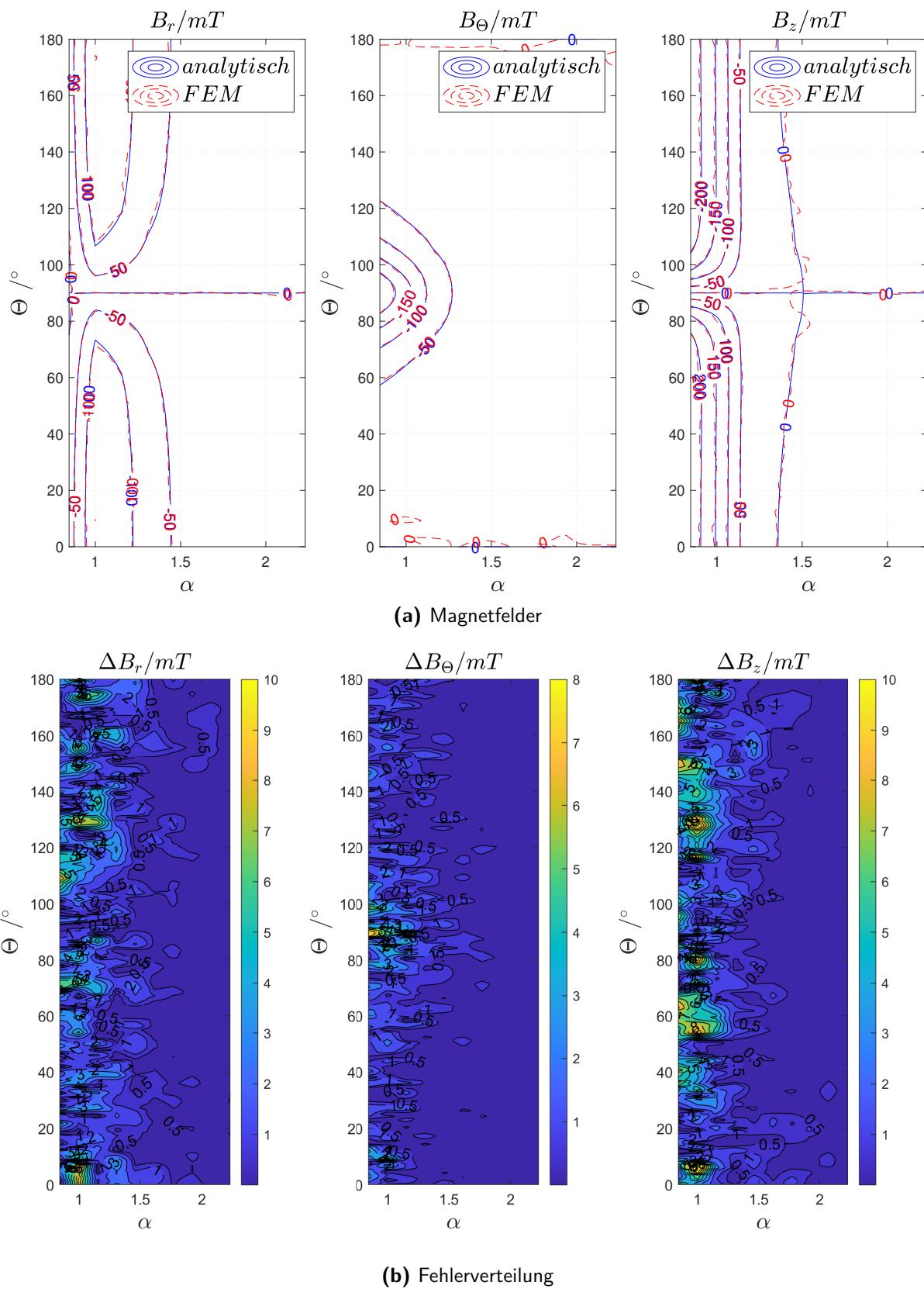
Die ermittelten Werte werden analog zu den vorangegangenen Auswertungen mit denen aus der FEM-Analyse verglichen.



**Bild 3.15.** Fehleranalyse und Normalverteilung: axial magnetisierter Ringmagnet

Bei der Fehleranalyse ist zu erkennen, dass die Berechnungen bei einem Mittelwert des Fehlers von  $\mu_r = 0,0000$ ,  $\mu_\Theta = 0,0002$  und  $\mu_z = 0,0001$  alle sehr nahe an einem optimalen Mittelwert von 0 liegen. Zusätzlich dazu liegt die Standardabweichung bei  $\sigma_r = 0,0019$ ,  $\sigma_\Theta = 0,0019$  und  $\sigma_z = 0,0023$ . Diese Standardabweichungen sind klein genug um die Aussage treffen zu können, dass die Berechnungen sehr nahe an dem FEM-Modell liegen und ausreichend für die weiteren Schritte sind. Zusätzlich kann festgehalten werden, dass die Berechnungen für diese Art von Magnet im Schnitt genauer sind als die vorangegangene Berechnung der diametral magnetisierten Magneten.

Dies lässt sich auch in der Fehlerverteilung im Raum grafisch erkennen. Es sind keine großen Strukturen mehr zu erkennen. Lediglich die Beobachtung, dass die Fehler größer sind je näher man am Magneten misst, lässt sich treffen. Dies ist jedoch dadurch zu erklären, dass hier auch höhere Feldstärken auftreten.



**Bild 3.16.** Magnetfelder und deren Fehlerverteilung: axial magnetisierter Ringmagnet

## 3.5 Optimierung

Für eine Optimierung der Magnetabmessungen gibt es zwei sinnvolle Methoden. Die erste ist die schrittweise Optimierung. Hierbei wird ein Parameter optimiert und danach der nächste. Am sinnvollsten werden die Parameter, welche eine höhere Priorität haben zu Anfang optimiert. Der Vorteil einer solchen Optimierung ist die Einfachheit und der geringe Aufwand. Allerdings kann es sein, dass durch die Vorgehensweise nicht die tatsächlichen Optima gefunden werden, welche alle Parameter gleichwertig berücksichtigen. Auch kann eine Beeinflussung der Parameter gegenseitig nicht erfasst werden.

Zusätzlich wird nun im Optimierungsschritt die THD (total harmonic distortion) relevant. Diese ist ein Maß für die Nichtlinearität der Messung. In der Optimierung soll eine Messposition gefunden werden, welche eine möglichst geringe Nichtlinearität aufweist.

Eine andere Optimierungsmethode ist die Erstellung einer Zielfunktion, die alle Parameter welche optimiert werden sollen enthält [2.14](#). In unserem Fall besteht diese Zielfunktion aus der Funktion für die Kosten [2.34](#) sowie den Funktionen für das Magnetfeld  $f_{\hat{B}_r}$  sowie  $f_{\hat{B}_\Theta}$ . Zusätzlich die Funktionen für die Minimierung der THDs  $f_{THDr}$  und  $f_{THD_\Theta}$ . Da insgesamt eine Minimierung erfolgen soll, müssen die Funktionen für die Magnetfelder, welche Maximal sein sollen umgewandelt werden zu  $f_{\hat{B}_r}^* = \log_2 \left( \frac{B_{Erde}}{f_{\hat{B}_r}} \right)$  und  $f_{\hat{B}_\Theta}^* = \log_2 \left( \frac{B_{Erde}}{f_{\hat{B}_\Theta}} \right)$ . [1]

### 3.5.1 Diametral magnetisierter Zylinder- und Ringmagnet, Sensor neben Achse

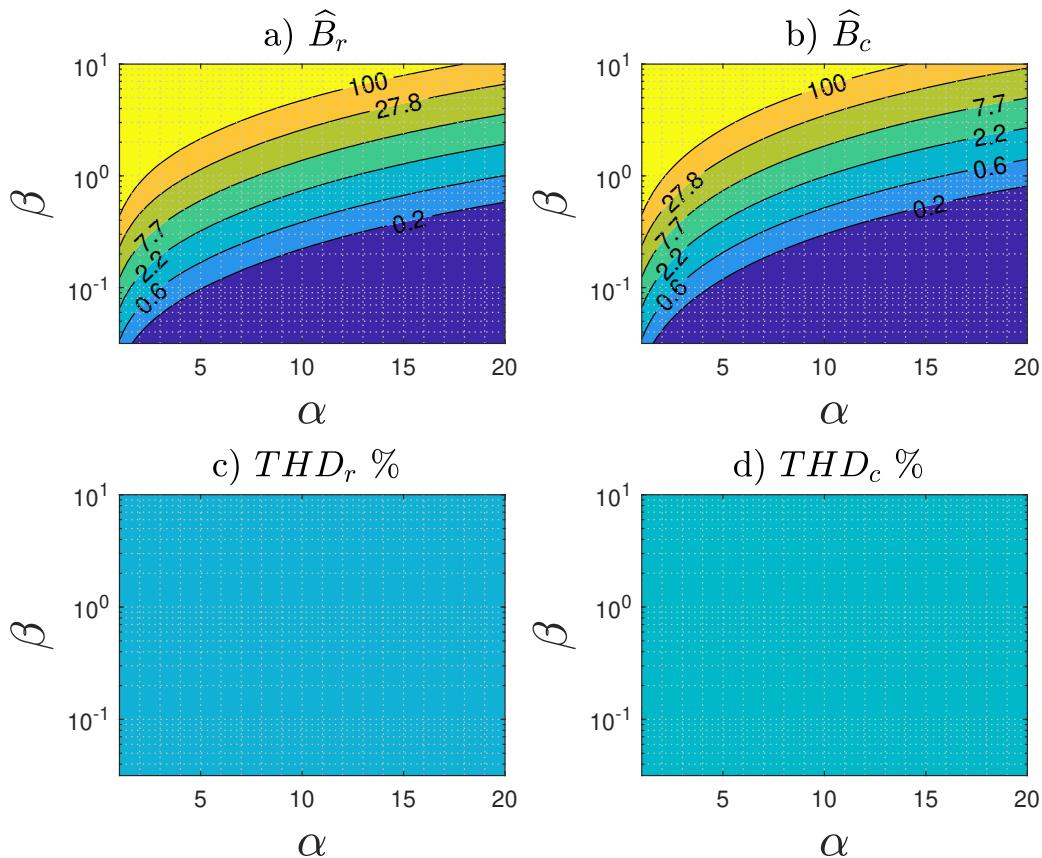
Nach den ersten Berechnungen werden weitere angestellt, welche für die Optimierung genutzt werden sollen. Hierbei wird nicht ein Magnet mit festen Abmessungen untersucht, sondern einer, bei welchem der Magnetradius variiert wird. Hierzu wird für den Magneten eine feste Länge von  $z_M = 10mm$  gewählt. Im Fall des Ringmagneten wird auch der Innenradius festgelegt auf  $r_{M,i} = 2,5mm$ . Der Radius des Magneten variiert von 1mm bis 20mm wobei 100 Werte ermittelt werden. Die Variation des Messpunktes bleibt wie in der vorangegangenen Berechnung bestehen, wobei aber die Anzahl der Werte erhöht wird um eine höhere Genauigkeit zu gewährleisten.

Zusätzlich zur quantitativen Bestimmung des Magnetfeldes wird in dieser Berechnung zusätzlich die Qualität des Magnetfeldes ermittelt. Dies geschieht durch die Erfassung

der THD der Magnetfelder. Sie sollte nach der Optimierung möglichst klein ausfallen um zu gewährleisten, dass das Signal möglichst störfrei ist.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in 3.17 dargestellt. Um eine bessere Darstellung zu ermöglichen wird zusätzlich zu dem schon bekannten Faktor  $\alpha$  (3.2) noch ein weiterer Faktor eingeführt, welcher das Verhältnis von Länge und Breite des Magneten darstellt.

$$\beta = \frac{r_M}{l_M} \quad (3.3)$$



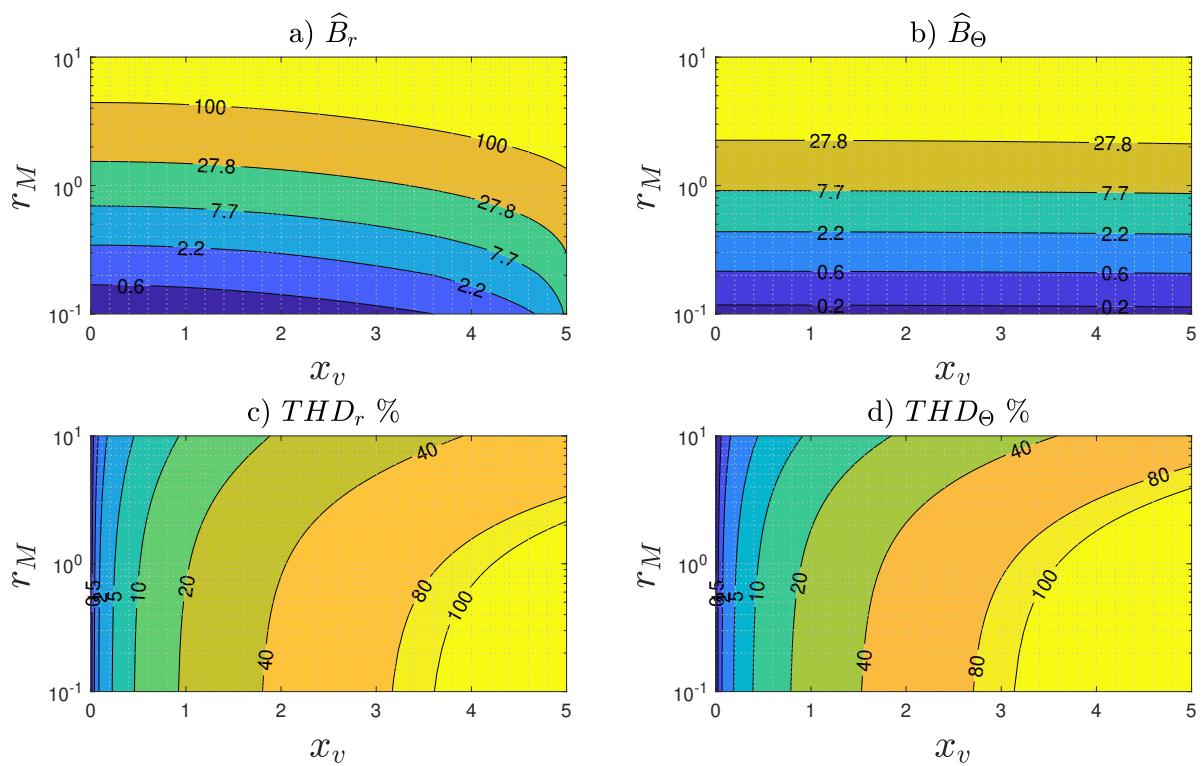
**Bild 3.17.** Magnetfeldmaxima und THD des Zylindermagneten ohne Koaxialität (diametral magnetisiert, Sensor neben Achse)

Gut zu erkennen ist, dass die THD unabhängig von  $r_M$  und  $r$  einen konstanten Wert einnimmt. Eine Optimierung ist hier nicht notwendig, da schnell erkennbar ist, das der Magnet mit einem möglichst großen Radius und einem möglichst geringen Messabstand

genutzt werden sollte. Auch zu erkennen ist, dass das Magnetfeld größer wird, je näher der Messpunkt am Magneten liegt. Zusätzlich ist zu erkennen, dass das Magnetfeld steigt, je größer der Magnet gewählt wird. Prinzipiell kann empfohlen werden den Magneten möglichst groß zu wählen und die Messposition möglichst nah an den Magneten zu setzen.

Da zusätzlich zum Einfluss der Magnetgeometrie auch der Einfluss einer Koaxialität untersucht werden soll, wird dies in einer erneuten Berechnung getan. Hierzu wird wieder die vorher erläuterte Berechnung 3.1 angestellt. Anstelle einer Parametervariation von  $r$  wird nun  $x_v$  variiert. Dies ist zulässig, da durch die vorangegangene Berechnung schon erkannt wurde, dass eine Platzierung des Sensors möglichst nahe am Magneten von Vorteil ist. In dieser erneuten Analyse wird  $x_v$  von 0 mm bis 5 mm variiert, wobei der Messradius konstant auf  $r = r_M + 5mm$  festgelegt wird. Die Ergebnisse sind in 3.18 dargestellt.

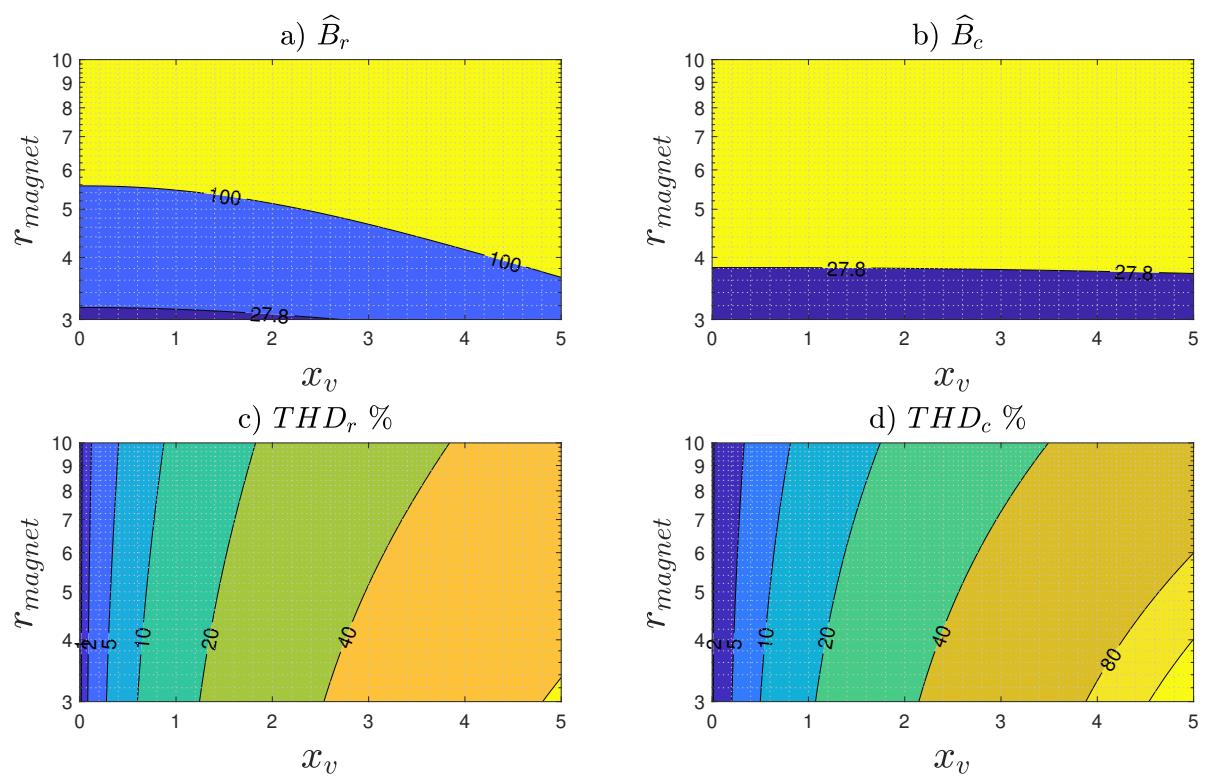
Da ohne den Einfluss der THD auf die Messungen eine weiter Optimierung nicht möglich ist wird zusätzlich der Einfluss einer möglichen Koaxialität untersucht. Hierfür wird der Verschiebungsfaktor  $x_v$  eingeführt. Es wird wieder eine Parameterstudie durchgeführt in der nun weiterhin der Radius des Magneten und der Messwinkel variiert werden. Anstelle einer Variation des Messradius wird nun der Verschiebungsfaktor variiert und der Messradius wird konstant auf  $r = r_M + 5mm$  festgelegt.



**Bild 3.18.** Magnetfeldmaxima und THD des Zylindermagneten mit Koaxialität (diametral magnetisiert, Sensor neben Achse)

Zu erkennen ist, dass das Magnetfeld in radialer Richtung mit steigender Koaxialität leicht zunimmt, in Winkelrichtung jedoch nahezu konstant bleibt. Die THD steigt in beiden Fällen mit zunehmender Koaxialität an und nimmt mit steigendem Magnetradius ab.

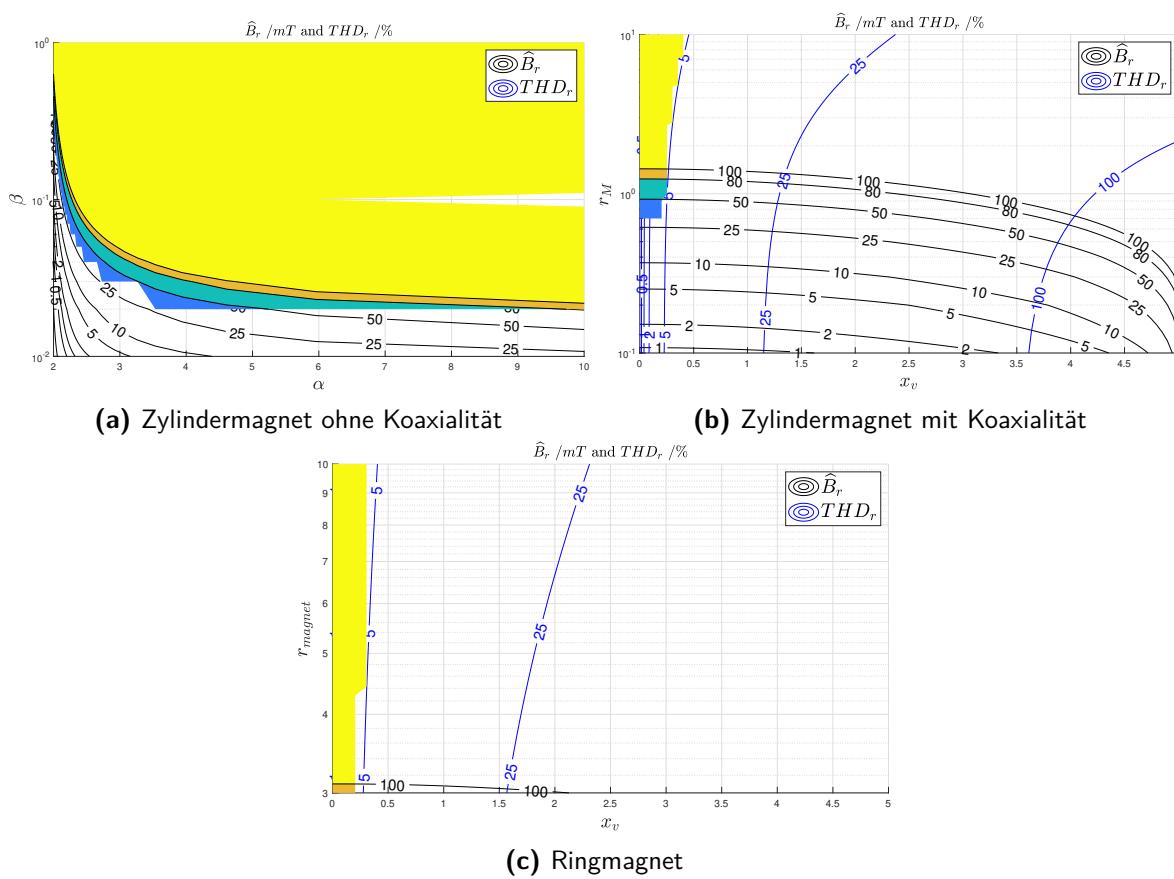
Für den Ringmagneten wird auf eine Untersuchung ohne Koaxialität verzichtet da ähnliche Ergebnisse wie beim Zylindermagneten zu erwarten sind. Es wird eine Parameterstudie angefertigt in der, analog zum Zylindermagneten, der Messradius, sowie Messwinkel und die Koaxialität variiert wird. Auch der Außendurchmesser wird variiert während der Innendurchmesser konstant auf  $r_{M,i}=2,5\text{mm}$  festgelegt wird.



**Bild 3.19.** Magnetfeldmaxima und THD des Ringmagneten mit Koaxialität  
(diametral magnetisiert, Sensor neben Achse)

Auch bei dem Ringmagneten ist zu erkennen, dass das Magnetfeld mit steigendem Magnetradius ansteigt. Auch die THD steigt analog zum Zylindermagneten mit steigender Koaxialität an.

Aufgrund dieser Parameterstudien kann eine erste Optimierung erfolgen. Diese schrittweise Optimierung ist in 3.20 beispielhaft für  $B_r$  und THD dargestellt. Markiert ist der Bereich, welcher die optimalen Abmessungen für weitere Optimierungsschritte darstellt.



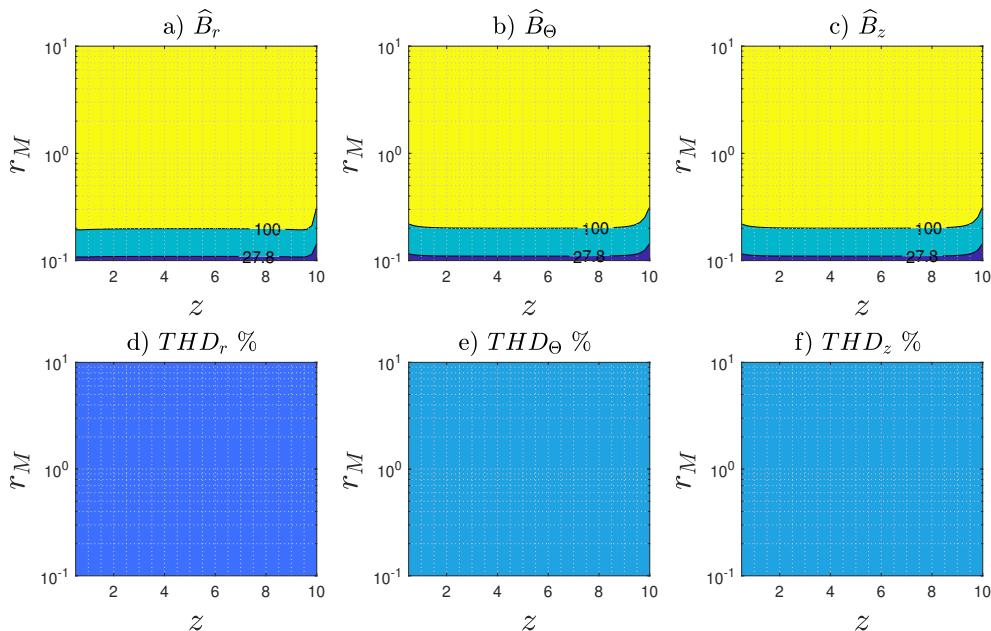
**Bild 3.20.** Step-by-Step Optimierung für Zylinder- und Ringmagnet (diametral magnetisiert, Sensor neben Achse)

Im nächsten Schritt wird das von Schaeffler entwickelte Optimierungstool [1] genutzt um eine multivariable Optimierung mittels Zielfunktion durchzuführen. Die Ergebnisse werden in Kapitel 4 dargestellt.

### 3.5.2 Diametral magnetisierter Zylindermagnet, Sensor auf Achse

Auch für die zweite Bauform wird zunächst nur der Magnetradius von  $r_M = 0,1mm$  bis  $r_M = 10mm$  sowie der Messabstand in z-Richtung von  $z = 0,5mm$  bis  $z = 10mm$  variiert. Da der Sensor idealerweise auf dem Punkt  $r=0$  liegt hier aber keine Veränderung des Magnetfeldes bei einer Drehung um  $360^\circ$  erkennbar wäre wird der Messpunkt auf  $r=0,5mm$  gelegt. In 3.21 sind die Maxima der Magnetfelder sowie die THDs der Magnetfelder dargestellt. Zu erkennen ist das hier alle THDs konstant sind. Dies bedeutet, dass das Rauschen der Magnetfelder konstant ist und nicht minimiert werden

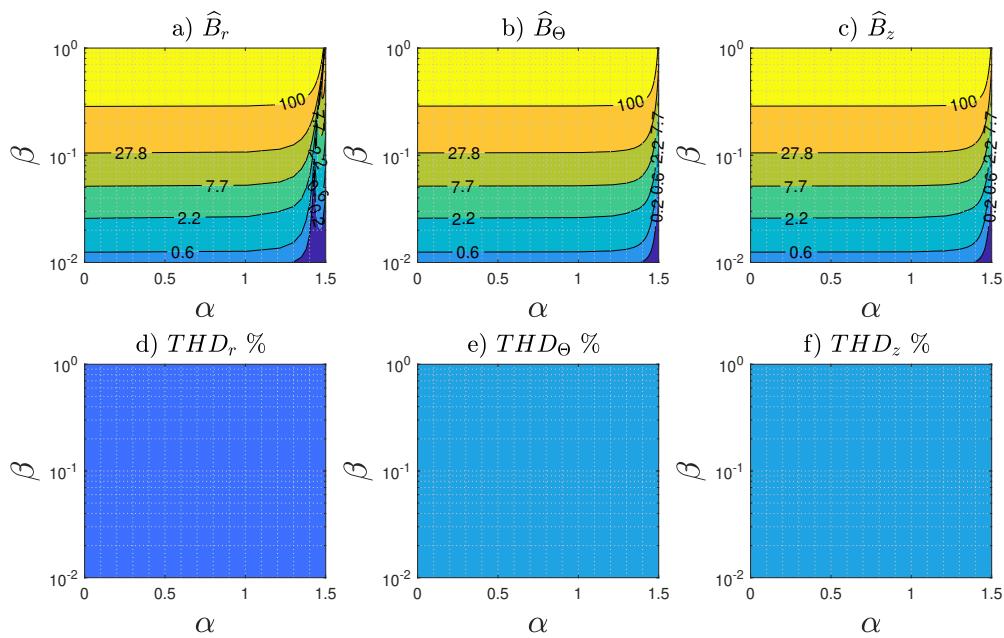
kann. Zusätzlich ist zu erkennen das die Magnetfeder über den größten Teil in der z-Achse nahezu konstant bleiben. Aus diesem Grund wird in der weiteren Berechnung, in welcher die Koaxialität untersucht werden soll, der Abstand in z-Richtung konstant gehalten. Es kann aber jedoch festgehalten werden, dass ein Magnet wieder mit einem möglichst großen Radius gewählt werden soll und der Abstand in z-Richtung zwischen dem Magneten und dem Messpunkt einen geringen Einfluss auf die Messung hat.



**Bild 3.21.** Magnetfeldmaxima und THD des Zylindermagneten ohne Koaxialität (diametral magnetisiert, Sensor auf Achse)

In der zweiten Parameterstudie wird auch die Koaxialität untersucht. Aus diesem Grund wird der z-Abstand zwischen Magnet und Messpunkt konstant auf 2 mm gesetzt. Der Radius des Magneten, sowie der Winkel variiert genau wie in der vorangegangenen Studie. Der Radius des Messpunktes, welcher der Koaxialität entspricht wird von  $r = 0\text{mm}$  bis  $r = 15\text{mm}$  variiert. Es werden 100 Werte für den Winkel und den Magnetradius ermittelt und 400 Werte für den Winkel.

Die Ergebnisse, dargestellt in 3.23, bestätigen die vorher schon erfasste Annahme, dass der Magnet möglichst groß gewählt werden sollte. Zusätzlich ist aber zu erkennen, dass die Koaxialität keinen erheblichen Einfluss auf das Magnetfeld hat, solange sich der Messpunkt nicht außerhalb des Magnetradius liegt. Die THDs sind weiterhin konstant was hier eine Optimierung unerheblich macht.



**Bild 3.22.** Magnetfeldmaxima und THD des Zylindermagneten mit Koaxialität (diametral magnetisiert, Sensor auf Achse)

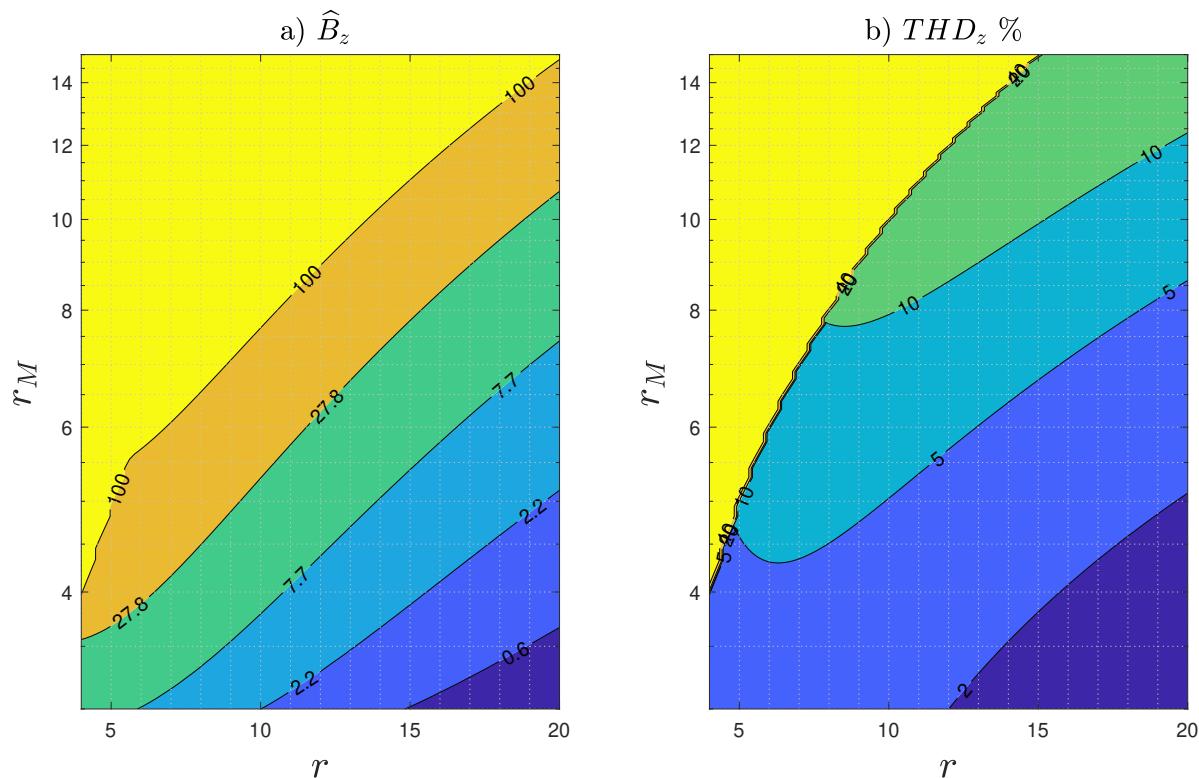
Durch die Konstanten THDs in den beschriebenen Parameterstudien kann für eine Step-by-Step Optimierung empfohlen werden Magneten zu wählen, welche maximale Magnetfelder aufweisen, das heißt innerhalb des gelben Bereichs der Figuren 3.21 sowie 3.22 liegen.

### 3.5.3 Axial magnetisierter Ringmagnet

Im Fall des axial magnetisierten Ringmagnete spielt für eine Anordnung nur die Magnetfeldrichtung  $B_z$  eine Rolle, da sowohl  $B_r$  als auch  $B_\Theta$  neben dem Magneten vernachlässigbar gering ist. Aus diesem Grund wird bei der Optimierung nur  $B_z$  betrachtet.

Im ersten Fall werden wieder Berechnungen ohne Berücksichtigung einer Koaxialität durchgeführt. Hierzu wird der Magnet bei einer Remanenzflussdichte  $B_{rem} = 1T$  und einer Länge von  $z_M = 10mm$  untersucht. Der Innenradius beträgt  $r_{M,i} = 2,5mm$  während der Außenradius mit 100 Werten auf der Länge von 3 mm bis 15 mm variiert wird. Zusätzlich wird der Messradius von 4 mm bis 20 mm mit 100 Werten, und der Winkel über  $380^\circ$  mit 400 Werten untersucht. Der Messpunkt in z-Achse wird auf die halbe Länge des Magneten festgelegt. Die Ergebnisse dieser Parameterstudie sind in 3.23 dargestellt.

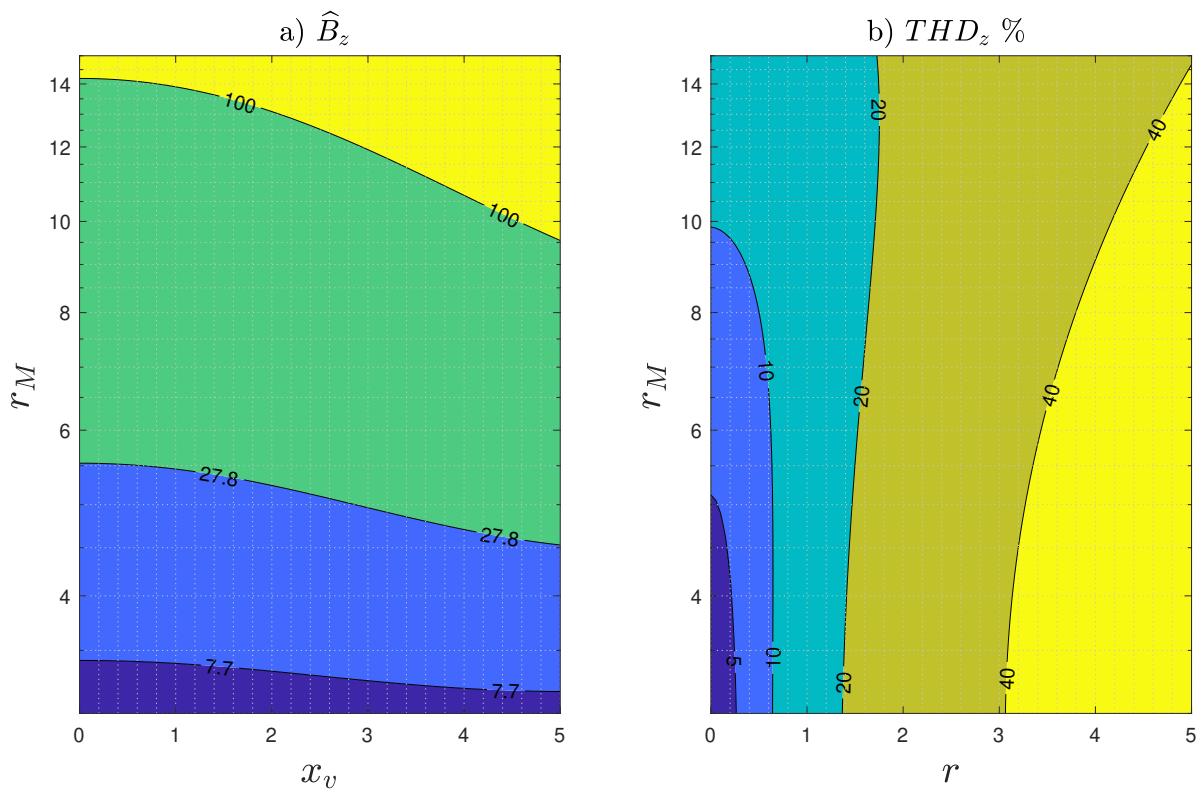
Zu erkennen ist, dass wie in allen vorangegangenen Untersuchungen wieder ein Messpunkt möglichst nah am Magneten die besten Ergebnisse liefert. Auch wieder zu erkennen ist, dass ein größerer Magnet ein höheres Magnetfeld liefert. Auf die THD trifft die Aussage zu das auch sie größer ist, je größer der Magnet ist und je näher sich der Messpunkt am Magneten befindet. Dies macht eine Optimierung schwierig, da ein möglichst großes Magnetfeld und eine möglichst kleine THD angestrebt wird.



**Bild 3.23.** Magnetfeldmaxima und THD des Ringmagneten ohne Koaxialität  
(axial magnetisiert, Sensor neben Achse)

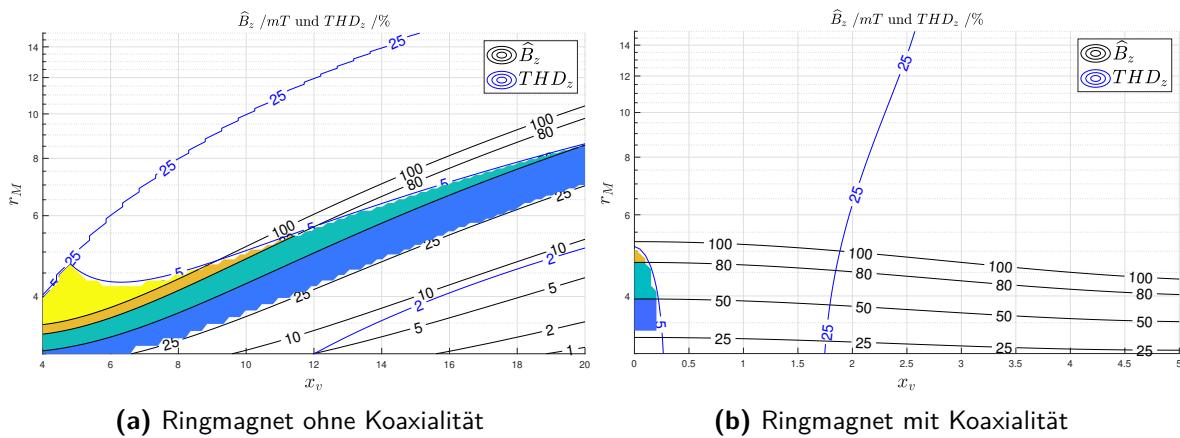
Im folgenden wird eine weitere Parameterstudie angefertigt um die Koaxialität zu untersuchen. Die Abmessungen des Magneten sind dieselben wie in den vorherigen Berechnungen. Lediglich die Variation des Messradius wird durch eine Variation der Koaxialität ausgetauscht. Dies bedeutet der Messradius wird auf  $r = r_{M,a} + 5\text{mm}$  festgelegt und die Koaxialität wird von  $x_v = 0\text{mm}$  bis  $x_v = 5\text{mm}$  mit 100 Werten variiert. Diese Ergebnisse sind in 3.24 abgebildet.

Hier ist sichtbar, dass das Maximum des Magnetfeldes mit steigender Koaxialität steigt. Jedoch steigt auch die THD mit wachsender Koaxialität.



**Bild 3.24.** Magnetfeldmaxima und THD des Ringmagneten mit Koaxialität  
(axial magnetisiert, Sensor neben Achse)

Eine Step-by-Step-Optimierung ist in diesen beiden Fällen wieder dargestellt worden in [3.25](#). Markiert ist der Bereich, in welchem die Amplitude des Magnetfeldes über 0,025 T beträgt und die THD unterhalb von 5 % liegt.



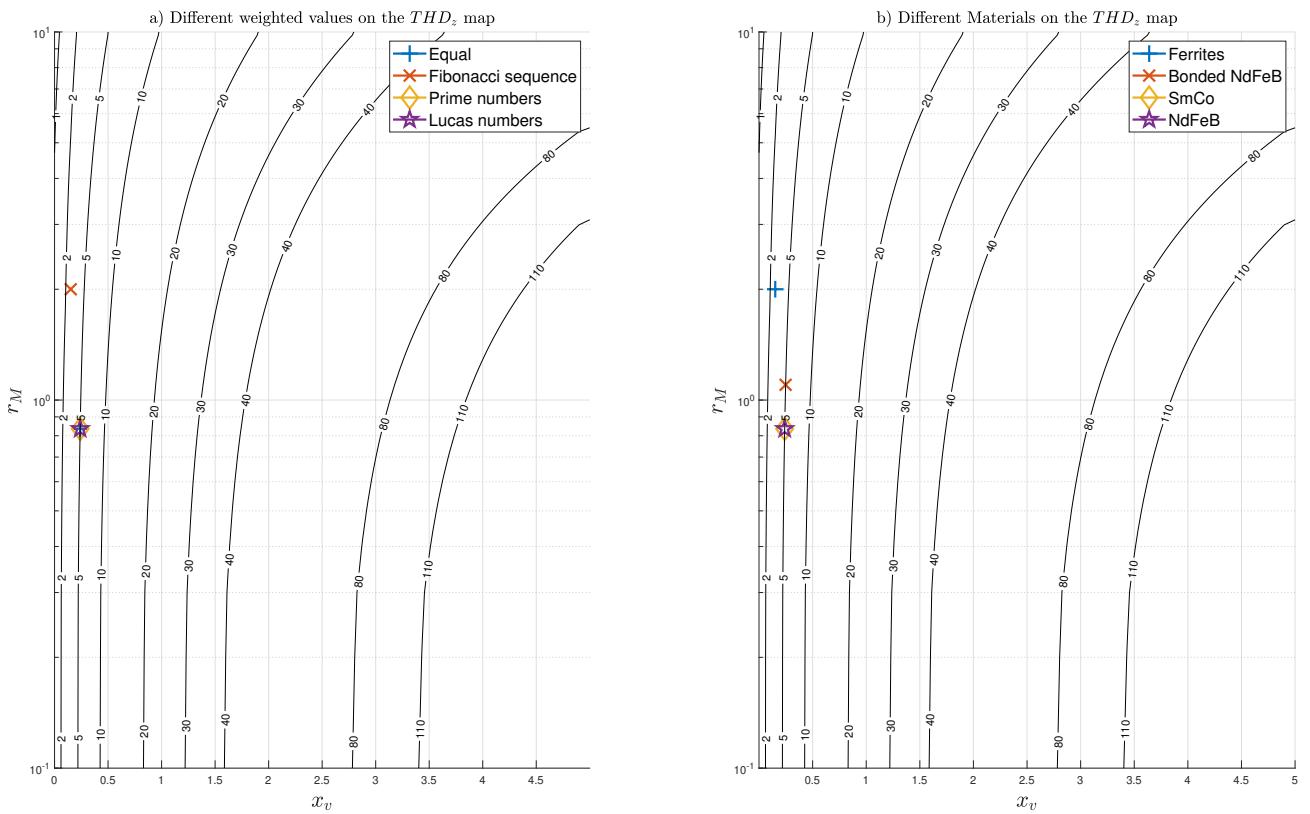
**Bild 3.25.** Step-by-Step Optimierung für Ringmagnet  
(axial magnetisiert, Sensor neben Achse)

## 4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Optimierung mittels einer Zielfunktion dargestellt. Die Ergebnisse werden mithilfe eines Optimierungstools erreicht, bei welchem Anpassungen gemacht werden, sodass die Zielfunktion den betrachteten Magneten abbildet. Die Ergebnisse der in Kapitel 3.5 dargestellten Parameterstudien finden Eingang in die Optimierung.

### 4.1 Axial magnetisierter Zylinder- und Ringmagnet, Sensor neben Achse

In dem Plot 4.1 ist der Radius des Magneten über dem Verschiebungsfaktor  $x_v$  aufgetragen. Mit den Punkten sind die optimierten Abmessungen markiert. Dargestellt sind einmal die Optimierte Punkte für unterschiedlich gewählten Gewichtungsfaktoren zum anderen sind die Punkte dargestellt für unterschiedlich gewählte Magnetmaterialien.



**Bild 4.1.** Optimierungsergebnisse: axial magnetisierter Zylindermagnet, Sensor neben Achse

Die Ergebnisse zeigen, dass für einen Ferritmagneten ein größerer Radius optimal ist, als für die anderen Materialien. Bei den anderen Materialien kann die Koaxialität jedoch größer gewählt werden als bei Feritmagneten.

Leider können für die weiteren Anordnungen keine Finalen Ergebnisse erzielt werden. Dies hat zum einen den Grund, dass in einigen Fällen keine Variation der THDs auftritt und eine Optimierung nur anhand des Magnetfeldes keine Notwendigkeit darstellt. Zum anderen kann bei den Berechnungen das entwickelte Optimierungstool nicht ohne Anpassungen angewandt werden. Bei diesen Anpassungen sind bis zur Abgabe dieser Arbeit weiterhin Fehler aufgetreten sodass die erzielten Optimierungsergebnisse nicht plausibel sind und somit keinen Eingang in diese Arbeit finden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend wurden in dieser Arbeit umfangreiche Analysen des magnetischen Feldes von Permanentmagneten angestellt. Diese analytischen Berechnungen konnten mittels erstellter FEM-Modelle validiert werden. Aufgrund der Berechnungen konnten unterschiedliche Parameterstudien verschiedener Magnetbauformen angefertigt werden, welche genutzt wurden, um den Einfluss bestimmter Parameter auf die Systemeigenschaften Magnetfeld und THD zu untersuchen.

Durch diese Parameterstudien konnten Optimierungen begonnen werden, um die besten Magnetgeometrien sowie die optimalen Sensorpositionen für die jeweiligen Anwendungen herauszufinden.

Das nächste Ziel würde darin bestehen, die verbliebenen Fehler bei der Optimierung zu beheben und diese somit zu vervollständigen um für alle behandelten Szenarien optimierte Abmessungen zu liefern.

Danach wäre es möglich die Optimierungsansätze der vorliegenden Arbeit in eine webbasierte Anwendung zu überführen. Diese könnte Entwickler bei der Auswahl der optimalen Permanentmagnete für individuelle Anwendungen unterstützen.

Des Weiteren wäre es sinnvoll, die Untersuchung auf weitere Magnetbauformen auszuweiten, etwa mehrfach magnetisierte Ringe oder Blockmagnete. Auch die Effekte einer Verkipfung von Magnet und Sensor, die in realen Anwendungen oft auftreten können, zu untersuchen, wäre eine mögliche Ergänzung.



# Literatur

- [1] Jie Zhou et al. *Development of an Optimization Tool for Advanced Magnet Design in Sensor Accuracy Enhancement for Automotive Application*. 2020.
- [2] Anonymous. *Auswahl der wichtigsten Magnetisierungsarten*. <https://www.bba.ch/de/technische-infos/technische-infos/magnetisierungsarten>. Accessed: 2024-10-22.
- [3] Anonymous. *Hall-Effekt*. <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/bewegte-ladungen-feldern/aufgabe/hall-effekt-abitur-1993-gk-a1-2>. Accessed: 2024-10-15.
- [4] Günter Bärwolff und Caren Tischendorf. *Numerik für Ingenieure, Physiker und Informatiker* /. 4. Auflage. Springer eBook Collection. Berlin ; Springer Spektrum, [2022]. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-65214-5>.
- [5] Rainer Rapp Dietmar Schwegler. *Permanentmagnete. Werkstoffe, Magnettechnik, Anwendungen*. Die Bibliothek der Technik. München ; Süddeutscher Verlag on-pact GmbH, [2016]. ISBN: 978-3-86236-100-7.
- [6] Edwar P. Furlani. *Permanent Magnet and Electromechanical Devices*. Academic Press, 2001. ISBN: 0-12-269951-3.
- [7] Ekbert Hering. *Sensoren in Wissenschaft und Technik* : 3., erweiterte und aktualisierte Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, [2023]. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-39491-2>.
- [8] Christian Karpfinger. *Höhere Mathematik in Rezepten* : 4. Auflage. Springer eBook Collection. Berlin ; Springer Spektrum, [2022]. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-63305-2>.
- [9] Detlef Mietke. *Hysteresekurve*. <https://www.elektroniktutor.de/elektrophysik/magkurve.html>. Accessed: 2024-09-13.
- [10] D. Shmilovitz. „On the definition of total harmonic distortion and its effect on measurement interpretation“. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* 20.1 (2005), S. 526–528. DOI: [10.1109/TPWRD.2004.839744](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.839744).

- [11] Karl Siebertz und David van Bebber. *Statistische Versuchsplanung* : 2. Aufl. 2017. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2017. ISBN: 978-3-662-55743-3. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-55743-3>.
- [12] Ulrich Telle. *Numerische Integration*. <https://www.telle-online.de/fernuni/studium/prosem1092.pdf>. Accessed: 2024-10-20.
- [13] Peter Wellmann. *Materialien der Elektronik und Energietechnik* : SpringerLink. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2017. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-14006-9>.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Hysteresekurve [9] . . . . .	5
2.2	Magnetisierungsrichtungen von Permanentmagneten [2] . . . . .	6
2.3	Hall-Effekt [3] . . . . .	16
3.1	Aufbau: diametral magnetisierter Ringmagnet, Sensor neben Achse . . . . .	24
3.2	Aufbau: diametral magnetisierter Zylindermagnet, Sensor auf Achse . . . . .	25
3.3	Aufbau: axial magnetisierter Ringmagnet . . . . .	26
3.4	FEM-Analysen: diametral magnetisiert . . . . .	28
3.5	FEM-Analyse: diametral magnetisierter Zylindermagnet . . . . .	29
3.6	FEM-Analyse: axial magnetisierter Ringmagnet . . . . .	30
3.7	Magnetfeld: diametral magnetisierter Zylindermagnet, Sensor neben Achse	32
3.8	Magnetfeld: diametral magnetisierter Ringmagnet, Sensor neben Achse	33
3.9	Magnetfeld: diametral magnetisierter Zylindermagnet, Sensor auf Achse	34
3.10	Magnetfeld: axial magnetisierter Ringmagnet . . . . .	35
3.11	Fehleranalyse und Normalverteilung: diametral magnetisierter Zylindermagnet . . . . .	37
3.12	Magnetfelder und deren Fehlerverteilung: diametral magnetisierter Zylindermagnet . . . . .	38
3.13	Fehleranalyse und Normalverteilung: diametral magnetisierter Ringmagnet	39
3.14	Magnetfelder und deren Fehlerverteilung: diametral magnetisierter Ringmagnet . . . . .	39
3.15	Fehleranalyse und Normalverteilung: axial magnetisierter Ringmagnet . . . . .	41
3.16	Magnetfelder und deren Fehlerverteilung: axial magnetisierter Ringmagnet	42
3.17	Magnetfeldmaxima und THD des Zylindermagneten ohne Koaxialität (diametral magnetisiert, Sensor neben Achse)	44
3.18	Magnetfeldmaxima und THD des Zylindermagneten mit Koaxialität (diametral magnetisiert, Sensor neben Achse)	46
3.19	Magnetfeldmaxima und THD des Ringmagneten mit Koaxialität (diametral magnetisiert, Sensor neben Achse)	47

3.20 Step-by-Step Optimierung für Zylinder- und Ring-	48
magnet (diametral magnetisiert, Sensor neben Ach-	
se)	
3.21 Magnetfeldmaxima und THD des Zylindermagneten ohne Ko-	49
axialität (diametral magnetisiert, Sensor auf Achse)	
3.22 Magnetfeldmaxima und THD des Zylindermagneten mit Ko-	50
axialität (diametral magnetisiert, Sensor auf Achse)	
3.23 Magnetfeldmaxima und THD des Ringmagneten ohne Ko-	51
axialität (axial magnetisiert, Sensor neben Achse)	
3.24 Magnetfeldmaxima und THD des Ringmagneten mit Koaxia-	52
lität (axial magnetisiert, Sensor neben Achse)	
3.25 Step-by-Step Optimierung für Ringmagnet	52
(axial magnetisiert, Sensor neben Achse)	
4.1 Optimierungsergebnisse: axial magnetisierter Zylindermagnet, Sensor ne-	
ben Achse	54
A.1 Formular: Wichtige Namen, Anschriften und Telefonnummern	63
A.2 Zeit- und Arbeitsplan	64

# Stichwortverzeichnis

- Aufbau, 23
- Aufgabenstellung, 2
- B-Feld eines Zylindermagneten, 7
- Berechnungen, 31
- Einleitung, 1
- Ergebnisse, 53
- FEM-Modelle, 27
- Formeln, 7
- Grundlagen, 3
- Grundlagen des Magnetismus, 3
- Magnetisierung, 4
- Magnetismus, 3
- Mathematische Grundlagen, 12
- Methodik, 23
- Numerische Integration, 12
- Optimierung, 10, 43
- Rechteckregel, 13
- Sensoren, 16
- Simpsonregel, 14
- Stand der Technik, 20
- Trapezregel, 14
- Validierung mittels FEM, 36
- Zusammenfassung und Ausblick, 55



# A Anhang

## A.1 Kontakt Daten

<b>Wichtige Kontaktdaten</b>		
<b>Thema:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Bachelorarbeit	<input type="checkbox"/> Masterarbeit
<b>Vorname und NAME der Kandidatin bzw. des Kandidaten</b>	Rebecca Sara Jonas	
Heimatanschrift:	Rheindammstraße 25 76744 Wörth	
Semester-/Wochentagsanschrift:	-	
Telefon	+49 176 46002219	
E-Mail	jore1012@h-ka.de / rebecca_jonas@web.de	
<b>Name der Organisation</b>	Schaeffler Automotive Buehl GmbH & Co.KG	
Anschrift	Industriestraße 3 77815 Bühl	
Telefon (Zentrale)		
Telefon -Druchwahl	+49 (69) 667781663	
E-Mail (Organisation)	jonasrbe@schaeffler.com	
<b>Name der Betreuerin/des Betreuers</b>	Zhou, Jie	
Titel (z. B. Dipl.-Ing.)	Dipl.-Ing.	
Position (z. B. Abteilungsleiter)	Development Sensor	
Abteilung	Development Motor & Integration Sensor	
Telefon	+49 722 39418728	
E-Mail (Organisation)	jie.zhou@schaeffler.com	

**Bild A.1.** Wichtige Namen, Anschriften und Telefonnummern

## A.2 Zeit- und Arbeitsplan

Name <b>Rebecca Jones</b>	Teil der Abschlussarbeit <b>Optimierung der Geometrie und Position von Permanentmagneten um die Sensorgenaugkeit in Automobilanwendungen zu erreichen</b>
Aktionen	Termin
Nr.	Bearbeitungs- status: <b>0.9</b>
	Jahr Monat Kalenderwoche
Offizieller Starttermin:	<b>01.07.2024</b>
1 Einarbeitung	9
2 Literaturrecherche	9
3 Vorberatungen Uni (Betreuer finden/nachmelden)	9
4 Thema/Gliederung formulieren	9
5 Berechnungen/Optimierung Bauform 1	8
6 Berechnungen/Optimierung Bauform 2	7
7 Berechnungen/Optimierung Bauform 3	7
8	0
9 Schriftliche Ausarbeitung	9
10 Korrektur, Drucken, Binden	7
Mellenteine	<b>Abgabetermin:</b> 01.11.2024
Firmenferien	
Betreuer in der Firma nicht erreichbar	
Betreuer in der Hochschule nicht erreichbar	
Prüfungszeit und Vorbereitungen	
Eigener Urlaub	
Mellenteine	Termin (für Orientierung)
1 Kontaktdaten legen vor	
2 Aufgabenstellung schriftlich	
3 Anmeldung im Sekr.	
4 Gliederung im Sekr.	
5 Erster schriftlicher Entwurf liegt dem Betreuer vor	
6 Vorlage des fertigen Manuskriptes beim Betreuer	
7 Abgabetermin im Sekr. MMT	
8 Abschlußprüfung	

1/1

INTERNAL

JONAS\_Kontakte\_Zeit-Arbeitspla\_2024-05-24.xlsZeit-Arbeitsplan  
07.11.2024 22:23