

BACHELOR THESIS
Jan Wingens

Tunnel-Magnetoresistiver Stromsensor für die Impedanzspektroskopie in Fahrzeugbatterien

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK
Department Informations- und Elektrotechnik

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

Jan Wingens

Tunnel-Magnetoresistiver Stromsensor für die Impedanzspektroskopie in Fahrzeugbatterien

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang *Bachelor of Science Elektro- 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.-Ing. Frerk Haase

Eingereicht am: 22. April 2025

Jan Wingers

Thema der Arbeit

Tunnel-Magnetoresistiver Stromsensor für die Impedanzspektroskopie in Fahrzeugbatterien

Stichworte

Sensorcharakterisierung, Magnetfeldsimulation, homogene und inhomogene Störfelder, kontaktlose Strommessung über Magnetfelder, Kalibrierung

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit werden verschiedene Aspekte der Anwendung von TMR-Sensoren im Kontext der Impedanzspektroskopie von Fahrzeugbatterien untersucht. Ziel ist es, einen geeigneten Messaufbau zu realisieren, der zuverlässige Messergebnisse liefert und sich mit der TMR-Sensortechnologie umsetzen lässt. Dazu werden Magnetfeldsimulationen für verschiedene Arten von Stromschienen durchgeführt und die Ergebnisse zusammen mit den aufgenommenen Sensorkennlinien ausgewertet. Für die gewählte Leitergeometrie wird eine Sensorplatine entworfen und in einem Messaufbau kalibriert. Zudem werden die Auswirkungen von Störfeldern sowohl mit Simulationen als auch mit Messungen untersucht und bewertet.

Jan Wingers

Title of Thesis

Tunnel magnetoresistive current sensor for impedance spectroscopy in vehicle batteries

Keywords

Sensor characterization, magnetic field simulation, homogeneous and inhomogeneous interference fields, contactless current measurement via magnetic fields, calibration

Abstract

This thesis examines various aspects of the application of TMR sensors in the context of impedance spectroscopy of vehicle batteries. The aim is to realize a suitable measurement setup that provides reliable measurement results and can be implemented with TMR sensor technology. For this purpose, magnetic field simulations are carried out for different types of busbars and the results are evaluated together with the recorded sensor characteristics. A sensor board is designed for the selected conductor geometry and calibrated in a measurement setup. In addition, the effects of interference fields are investigated and evaluated using both simulations and measurements.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Technik	1
1.2	Zielsetzung	2
2	Grundlagen	3
2.1	Magnetfelder	3
2.2	TMR-Sensoren	4
2.3	Vergleich von TMR mit anderen Sensortechnologien	5
3	Sensorcharakterisierung	7
3.1	Allegro MicroSystems CT100	7
3.2	Multidimension Technology TMR2104	10
3.3	Vergleichende Bewertung der Sensoreigenschaften	12
3.4	Aufnahme und Auswertung der Datenpunkte für die Charakterisierung . .	13
4	Simulation von durch elektr. Strom erzeugten Magnetfeldern	15
4.1	Mögliche Leiterquerschnittsgeometrien und Konfigurationen	17
4.1.1	Rechteckige Leitergeometrie	17
4.1.2	Runde Leitergeometrie	20
4.1.3	Leitergeometrie eines geschlitzten runden Leiters	22
4.1.4	Leiteraufbau einer Stromschikane mit entgegenlaufenden Strömen .	24
4.2	Parametervariation für verschiedene Ströme und Störeinflüsse	26
4.2.1	Externe Magnetfelder	27
4.2.2	Verschiedene Stromstärken	28
4.3	Zusammenfassung Simulationsergebnisse	31
5	Aufbau und Inbetriebnahme der gewählten Konstruktionsvariante	33
5.1	Platinenentwurf	33
5.1.1	Designidee und modulares Konzept	34

5.1.2	Bestückung und Funktionstest	36
5.2	Softwaremodule für Versuchsaufbau und Auswertung	38
6	Versuchsreihen und Auswertung	40
6.1	Konzept und Konstruktion des Testaufbaus	40
6.2	Mess- und Versuchsplan	43
6.3	Messreihen zur Kalibrierung der Sensorplatinen	44
6.3.1	Messreihe 1 - Kalibrierung der runden Stromschiene	45
6.3.2	Messreihe 2 - Kalibrierung der runden Stromschiene mit Schlitz	48
6.3.3	Zusammenfassung der ausgewerteten Messreihen zur Kalibrierung	50
6.4	Exemplarische Untersuchung zum Störeinfluss durch externe Magnetfelder	51
6.4.1	Aufbau der Störfeldmessung	52
6.4.2	Erprobung homogener Störfelder mit Helmholtz-Spule	54
6.4.3	Auswertung des Versuchs zu externen homogenen Störeinflüssen	58
7	Schlussfolgerungen	60
7.1	Zusammenfassung	60
7.2	Ausblick	62
	Literaturverzeichnis	63
A	Anhang	65
A.1	FEMM-Simulationsaufbauten	65
A.2	FEMM-Störfeldsimulationen	67
A.3	Verlauf des linearen Bereichs und der Sensorausgangsspannung	69
A.4	MATLAB-Codes	71
A.4.1	Charakterisierung der Sensoren	71
A.4.2	Simulation der Leiterkonfigurationen	77
A.4.3	Störfeld und Maximalstrom	90
A.4.4	Kalibrierung	100
A.4.5	Auswertung homogene Störfelder	103
A.5	Verwendete Software	104
B	Erklärung zur Nutzung von KI-Tools	105
C	CD	106
	Abbildungsverzeichnis	107

Tabellenverzeichnis	109
Listings	110
Glossar	111
Abkürzungen	112
Symbolverzeichnis	113
Selbstständigkeitserklärung	114

1 Einleitung

Magnetoresistive Sensoren sind in der modernen Elektrotechnik kaum wegzudenken. Sie haben sich im Laufe der Zeit zu einer Schlüsseltechnologie der modernen Messtechnik entwickelt. An der Hochschule für Angewandte Wissenschaft Hamburg wird die Überwachung der Zellen für Elektrofahrzeuge durch Einzelzell-Sensoren, insbesondere für die Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS), erforscht. Dies geschieht im Zusammenhang mit einem Verbundprojekt. Dabei wird sich auf die Verwendung von Tunnelmagnetoresistiven Sensoren(TMR) zur Strommessung fokussiert.

Diese Bachelorarbeit soll ihren Teil dazu beitragen, indem verschiedene mögliche Messkonfigurationen sowie Sensoren getestet und für die Nutzung in der EIS erprobt werden. Die EIS ist ein substanzielles Verfahren für die Untersuchung der Alterungsmechanismen und des elektrischen Verhaltens von Batteriezellen. Besonders wichtig ist dabei die präzise Erfassung des Stromes und der Spannung im relevanten Frequenzbereich, um die Impedanz mit hoher Genauigkeit bestimmen zu können.

TMR-Sensoren bieten dabei aufgrund ihrer hohen Empfindlichkeit sowie geringen Störanfälligkeit und Fähigkeit zur Erfassung kleiner Signaländerungen eine vielversprechende Lösung für diese Aufgabe. Die TMR-Sensoren messen das durch den Strom erzeugte Magnetfeld an einem Leiter berührungslos und sind somit galvanisch getrennt.

1.1 Stand der Technik

Viele Sensoren zur Strommessung, die aktuell in der Industrie verwendet werden, basieren entweder auf dem Hall- oder AMR¹-Effekt. Gegenüber diesen Sensoren bietet der TMR-Sensor eine höhere Empfindlichkeit und Genauigkeit sowie niedrigeren Stromverbrauch. Außerdem ist er für kleinere Magnetfelder besser geeignet und kann eine sehr kleine kompakte Bauform annehmen. Aufgrund dieser Vorteile ist der TMR-Sensor besonders gut für Batterieanwendungen nutzbar. In letzter Zeit sind immer mehr Stromsensoren, basierend auf dem TMR-Effekt, auf den Markt gekommen. Diese sind jedoch bezüglich der magnetischen Parameter nicht voll kompatibel mit den älteren Sensortechnologien.

¹Anisotroper Magnetwiderstand (AMR)

Die neuen Systeme müssen entsprechend für die TMR-Sensoren explizit geplant oder angepasst werden.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, eine mögliche Messkonfiguration für die TMR-Sensoren zu finden, welche in der Einzelzellmessung für die EIS in Fahrzeugbatterien verwendet werden kann. Dabei sind mehrere Schritte nötig. Folgende Punkte sind Zwischenziele auf dem Weg zur funktionierenden Strommessung:

- Magnetfeld-Simulation verschiedener Leitergeometrien
- Charakterisierung von ausgewählten Sensoren
- Erstellen von Platinenentwürfen
- Entwicklung eines Testaufbaus zur Erprobung
- Durchführung von Messreihen mit verschiedenen Strömen
- Auswahl eines Sensors für die Messaufgabe

Die Simulation soll das Magnetfeld verschiedener geometrisch geformter Leiter untersuchen. Nach Auswahl eines geeigneten Konzepts soll zudem eine Abschätzung der Strombelastbarkeit des gewählten Aufbaus erfolgen. Abschließend wird das favorisierte Design mit den übrigen zur Auswahl stehenden Varianten verglichen. Bei der Charakterisierung der Sensoren soll das Hystereseverhalten ebenfalls betrachtet werden.

Nach Auswahl eines geeigneten Sensors soll ein Testaufbau zur praktischen Erprobung entwickelt werden. Auf dessen Basis werden mehrere Messreihen durchgeführt, um die Zielstellung experimentell zu untersuchen. Die Messreihen umfassen unterschiedlich hohe Ströme mit den dazugehörigen magnetischen Feldstärken. Die Ergebnisse werden mithilfe eines Oszilloskops aufgezeichnet und anschließend mit MATLAB-Skripten visualisiert sowie ausgewertet.

2 Grundlagen

In den Grundlagen soll eine kurze Einleitung in das Thema der Magnetfelder und der TMR-Sensoren gegeben werden. Dabei soll kurz erklärt werden, wie Magnetfelder entstehen und wie die Sensoren diese messen können. Außerdem wird kurz verglichen, welche alternativen Sensortechnologien verfügbar sind und weshalb für diese Arbeit die TMR-Technologie gewählt wurde.

2.1 Magnetfelder

Ein magnetisches Feld ist ein physikalisches Vektorfeld, das an jedem Ort im Raum sowohl eine Richtung als auch eine Intensität beschreibt. Sie entstehen durch bewegte elektrische Ladungen (Stromfluss) oder gehen von magnetischen Materialien aus [1]. Magnetfelder sind in zahlreichen Bereichen von Bedeutung und treten sowohl in technischen Anwendungen als auch in natürlichen Prozessen auf. Im Alltag finden sie sich beispielsweise in Elektromotoren oder Hochspannungskabeln von Elektrofahrzeugen Anwendung. In der Natur äußert sich das Magnetfeld unter anderem in Form des Erdmagnetfeldes. In der Elektrotechnik ist der elektrische Strom in Leitern – wie etwa bei Stromschienen in Batteriesystemen von Elektroautos – die Hauptursache für das Auftreten magnetischer Felder.

Entstehung magnetischer Felder

Magnetische Felder können durch elektrische Ströme erzeugt werden. Die Stärke und Richtung dieses Feldes ist abhängig von der Stromrichtung und der Leitergeometrie. Dabei wird die magnetische Feldstärke eines unendlich langen Leiters mit dem Ampère'schen Gesetz wie folgt beschrieben:

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot r} \quad (2.1)$$

Um von der magnetischen Feldstärke auf die magnetische Flussdichte schließen zu können, werden die beiden Konstanten, die Feldkonstante μ_0 und die Permeabilität μ_r verwendet. Mit diesen Konstanten folgt für H:

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} \quad (2.2)$$

Für die Umgebung in der Luft wird $\mu_r = 1$ und daraus folgt dann für die magnetische Flussdichte B :

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r} \quad (2.3)$$

Die Feldlinien von der magnetischen Feldstärke \vec{H} bilden sich als Kreise um die Leiterachse des elektrischen Leiters aus. Die Feldstärke wird in *Ampere pro Meter* (A/m) und die Flussdichte in *Tesla* (T) angegeben. Die Stärke des magnetischen Feldes nimmt mit zunehmenden Abstand r von der Leiterachse ab. Die Richtung der Feldlinien und damit die Richtung des Magnetfeldes \vec{B} wird dabei durch die Rechte-Hand-Regel entlang der Stromflussrichtung beschrieben [2].

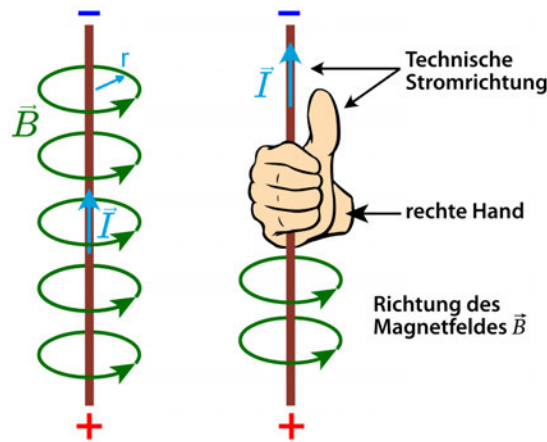


Abbildung 2.1: Visualisierung des Magnetfeld eines geraden Leiters. Die Rechte-Hand-Regel hilft bei der Bestimmung der Richtung der Magnetfeldlinien [3].

In der Realität sind nicht alle elektrischen Leiter lang und gerade, sondern können unterschiedlichste Formen annehmen. Um das Feld von allen möglichen geformten Leitern in der Umgebung von Luft berechnen zu können, wird das Biot-Savart-Gesetz angewandt. Bei diesem wird das Magnetfeld im Gegensatz zum Ampère'schen Gesetz punktwise durch die Integration über kleine Leiterstücke berechnet. Diese einzeln berechneten Punkte überlagern sich und somit kann für jeden beliebigen Punkt im Raum das Magnetfeld bestimmt werden [2].

2.2 TMR-Sensoren

TMR-Sensoren basieren auf dem quantenmechanischen Tunneleffekt. Sie bestehen aus einem Stapel magnetischen Materials, getrennt durch eine dünne isolierende Schicht (Tunnelbarriere). Dabei nutzt man das Phänomen, dass Magnetfelder in Festkörpern zu einer Lokalisierung von Ladungsträgern führen und dadurch den elektrischen Widerstand beeinflussen. Je nach Situation steigt oder fällt der Widerstand. Im Fall von TMR-Sensoren

spricht man vom negativen Magnetowiderstandseffekt. Dieser Effekt wird auch in anderen Sensortechnologien wie AMR, GMR¹ oder CMR² genutzt.

Zu beobachten ist dieser negative magnetoresistive Effekt in ferromagnetischen Materialien wie z.B. Eisen, Nickel und Cobalt. Wenn sich also in diesen Materialien die Magnetisierung ändert, dann verändert sich auch der Widerstand [4].

Weitere Informationen über die Technik und Funktionsweise von TMR-Sensoren und magnetoresistiven Sensoren allgemein sind in dem Vorlesungsskript zur Spinelektronik [4] und im Kapitel 14 des Buches „Automobil-Sensorik 3“ [5] zu finden.

Der innere Aufbau der Sensoren entspricht einer Messbrücke, wie in Abbildung 2.2 dargestellt. Sie besteht aus vier Widerständen, die jeweils eine durch Pfeilrichtungen gekennzeichnete magnetische Ausrichtung aufweisen. Wird die Brücke einem externen Magnetfeld ausgesetzt, so verändert sich – abhängig von der Orientierung der Pfeile relativ zum Magnetfeld – der jeweilige Widerstand. Dadurch ändern sich die differentiellen Ausgangsspannungen $\pm X$ entsprechend dem Verhältnis der Widerstände.

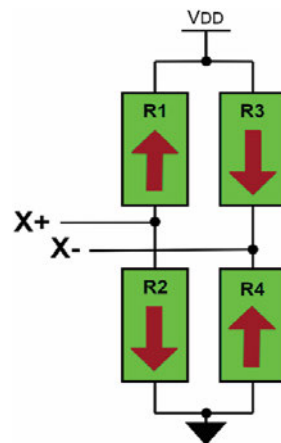


Abbildung 2.2: Messbrücke innerhalb eines TMR-Sensors zur Veranschaulichung der Widerstandsänderung durch externe Magnetfelder [6].

2.3 Vergleich von TMR mit anderen Sensortechnologien

Im Folgenden wird der TMR-Sensor mit anderen Sensortechnologien verglichen, welche auf ähnliche Art und Weise verwendet werden können. Es geht in diesem Vergleich um die Verwendung auf Platinen zur Strommessung in diversen Anwendungen. Es sind noch weitere Technologien zur Strommessung nutzbar, wie z.B. die Rogowski-Spulen oder Fluxgate-Sensoren. Diese sind jedoch nicht für die Platinenanwendung einsetzbar

¹Riesenmagnetwiderstand (GMR)

²Kolossaler Magnetwiderstand (CMR)

oder nicht in derselben relativ kleinen Baugröße möglich, wie die Sensortechnologien im Vergleich.

Bei Shunt-Widerständen handelt es sich um Messwiderstände, die in Reihe zur zu messenden Schaltung geschaltet werden. Sie besitzen einen definierten, meist sehr kleinen Widerstandswert und arbeiten nach dem Ohm'schen Gesetz: Die über dem Widerstand abfallende Spannung wird gemessen, und mithilfe des bekannten Widerstandswerts lässt sich daraus die Stromstärke berechnen. Ein wesentlicher Nachteil dieser Technologie besteht in der entstehenden Verlustleistung, die sich in Form von Wärme im Widerstand bemerkbar macht.

Auch bei Hall-Effekt-Sensoren entsteht eine Verlustleistung. Diese ist aber meist geringer als bei den Shunt-Widerständen, da sie nicht mit steigenden Strom größer wird.

Weitere mögliche Sensortechnologien zur Strommessung auf einer Platine sind die AMR oder GMR Sensoren. Diese nutzen, wie bereits in Abschnitt 2.2 erwähnt, den negativen Magnetowiderstandseffekt. Aber auch diese Technologien weisen Unterschiede zur neueren TMR-Technologie auf. Ein wesentlicher Vorteil der TMR-Sensoren liegt im deutlich höheren Ausgangssignal bei gleicher Anregung durch externe Magnetfelder. Dadurch weisen sie ein verbessertes Signal-zu-Rausch-Verhältnis auf – sowohl im Vergleich zu AMR- und GMR-Sensoren als auch insbesondere gegenüber Hall-Effekt-Sensoren. Wird die Veränderungsrate des Widerstands durch das MR-Verhältnis (Magnetoresistance Ratio) ausgedrückt, so liegt es für TMR-Sensoren bei 100 %, während AMR-Sensoren lediglich auf etwa 3 % und GMR-Sensoren auf etwa 12 % kommen. Dieser Unterschied resultiert daraus, dass der Elektronentransport bei TMR-Sensoren über quantenmechanisches Tunneln erfolgt, anstatt – wie bei AMR und GMR – über die elektrische Leitfähigkeit des Materials. Das ermöglicht nicht nur starke Ausgangssignale, sondern auch eine hohe Empfindlichkeit, was TMR-Sensoren ideal für moderne Anwendungen im Bereich der Magnetfeldmessung macht. So erzeugen beispielsweise TMR-Sensoren von TDK Ausgangssignale von bis zu 3000 mV - das ist 20-mal stärker als AMR- und 6-mal stärker als GMR-Sensoren [7][5].

3 Sensorcharakterisierung

In dieser Arbeit werden die auf dem Tunnelmagneteeffekt basierenden Sensoren von Allegro MicroSystems CT100 [8] und von Multidimension Technology Typ TMR2104 [9] untersucht. Die Auswahl dieser Sensoren erfolgt aus zwei Hauptkriterien: Zum einen stehen sie in großer Stückzahl zur Verfügung, zum anderen sind beide lineare Sensoren, welche laut Datenblatt explizit für die Stromerfassung geeignet sind. Im Folgenden soll die Charakteristik der beiden untersuchten Sensoren aufgenommen und ausgewertet werden.

3.1 Allegro MicroSystems CT100

Die Abbildung (Abb.) 3.1 zeigt die aufgezeichnete Charakterisierungskennlinie des Sensors CT100. Es ist eine relativ große Hysterese in den Bereichen größer, bzw. kleiner als $20 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$ zu erkennen.

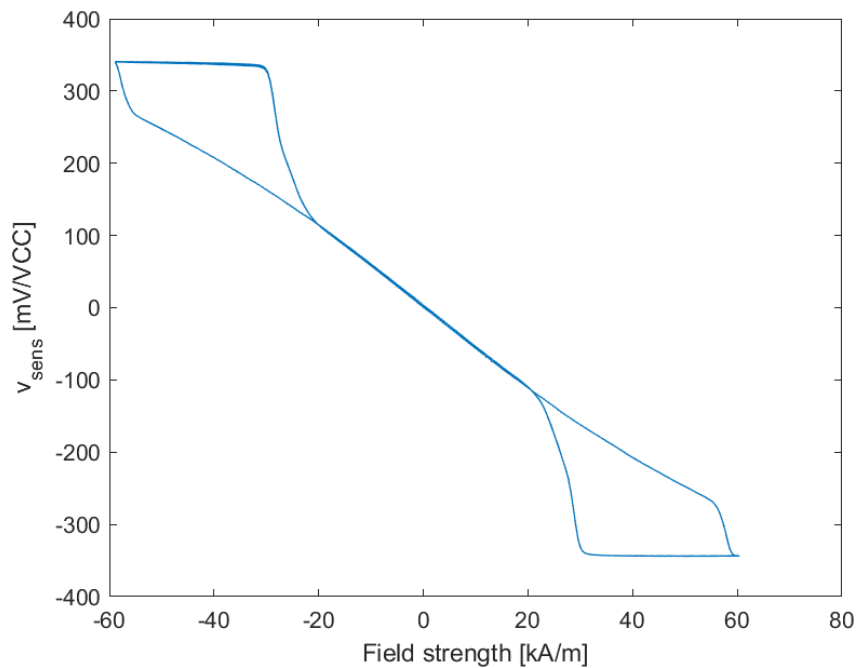


Abbildung 3.1: Charakteristik des CT100

Ebenfalls kann man in Abb. 3.1 im mittleren linearen Bereich erkennen, dass die Linie dort etwas breiter wird. Dies kann auf die vielen hintereinander durchgeführten Messungen zurückgeführt werden. Es liegen also die jeweiligen Messungen nicht ganz übereinander und die Linie wird dadurch etwas dicker. Die Abb. 3.2a zeigt hier einen vergrößerten Bereich der Grafik. Dort kann man die verschiedenen Durchläufe der Messungen erkennen. Außerdem sieht man zwei getrennte Regionen, in welche sich die Messungen eingeteilt haben. Diese Einteilung ist mit dem Effekt der Hysterese vergleichbar, der durch das am Eingang anliegende Dreieckssignal verursacht wird. Der gemessene Feldstärkenverlauf des Sensors CT100 ist zur Verdeutlichung in Abb. 3.2b dargestellt. Die Feldstärke bewegt sich dort in dem Bereich von ca. $\pm 60 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$. Laut Datenblatt kann der Sensor CT100 für einen Bereich von $\pm 50 \text{ mT}$ (entspricht $\pm 39,78 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$) verwendet werden. Auch diese Überschreitung des Nennbereiches des Sensors wird mit zu der beobachteten Hysterese beitragen.

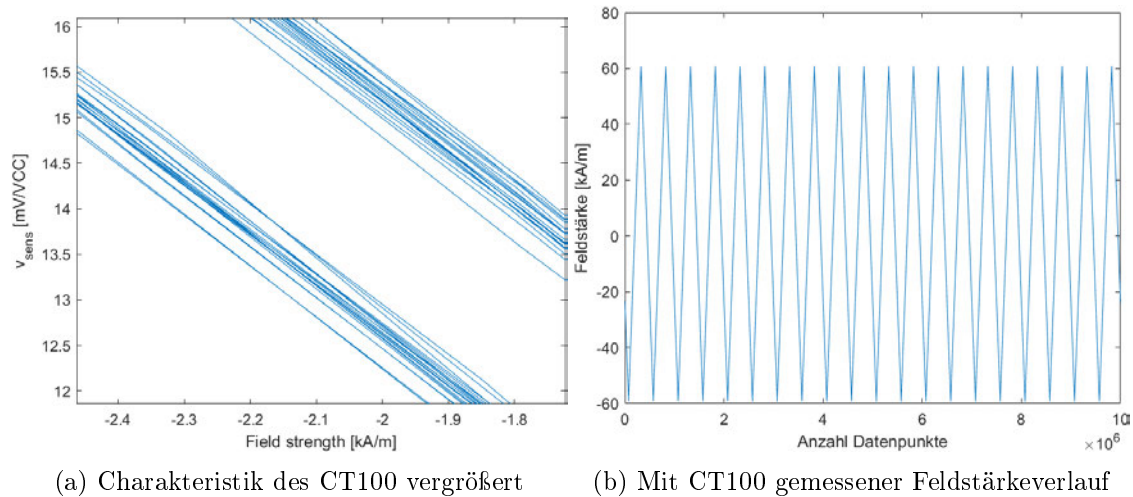


Abbildung 3.2: Nähere Betrachtung der Messergebnisse des Sensors CT100

Zur Auswertung wurde in MATLAB die Steigung der Kennlinie an jedem Punkt berechnet und grafisch dargestellt. Anschließend wurde eine horizontale Referenzlinie über den Verlauf der Steigung gelegt. An den Stellen, an denen die Steigung diese Linie verlässt, endet der lineare Bereich des Sensors. Dieser wurde auf einen Bereich von etwa $\pm 20 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$ festgelegt. Mithilfe der Funktion Polyfit wurde anschließend über die ursprünglichen Daten innerhalb dieses Bereichs die Steigung einer Ausgleichsgeraden bestimmt. Die Polyfit-Funktion führt dabei, wie später in Abschnitt 6.2 genauer erläutert, eine lineare Regression durch und nutzt die Methode der kleinsten Quadrate. In rot ist die resultierende Gerade in Abb. 3.3a/3.3b eingezeichnet. Die grüne Linie besitzt dieselbe Steigung, wurde jedoch bewusst verlängert, um genauer erkennen zu können, ab welchem Punkt die Kurve der Charakterisierung (blau) den linearen Bereich verlässt.

Die Steigungen m und die Y-Achsenabschnitte der steigenden und sinkenden Feldstärke haben folgende Werte:

$$m_{steigend} = -5.6612$$

$$Y(0)_{steigend} = 0.9354$$

$$m_{sinkend} = -5.6563$$

$$Y(0)_{sinkend} = 3.3652$$

Die geringe Abweichung der Steigungen und vor allem der Unterschied im Y-Achsenabschnitt ist auch auf die Hysterese zurückzuführen. Diese Differenz in den Y-Achsenabschnitten ist besonders gut in Abb. 3.2a zu erkennen. Mit der Auswertung der Grafiken konnte ein noch größerer Bereich der Kennlinie des Sensors als linear nachgewiesen werden, als im Datenblatt ursprünglich angegeben wurde. Im Datenblatt des Sensors CT100 [8] wird der lineare Bereich mit ± 20 mT angegeben. Das entspricht einer Feldstärke von $\pm 15,91 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$. Der durch die Messung zur Charakterisierung bestimmte Bereich ist somit um etwa $\pm 4 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$ größer.

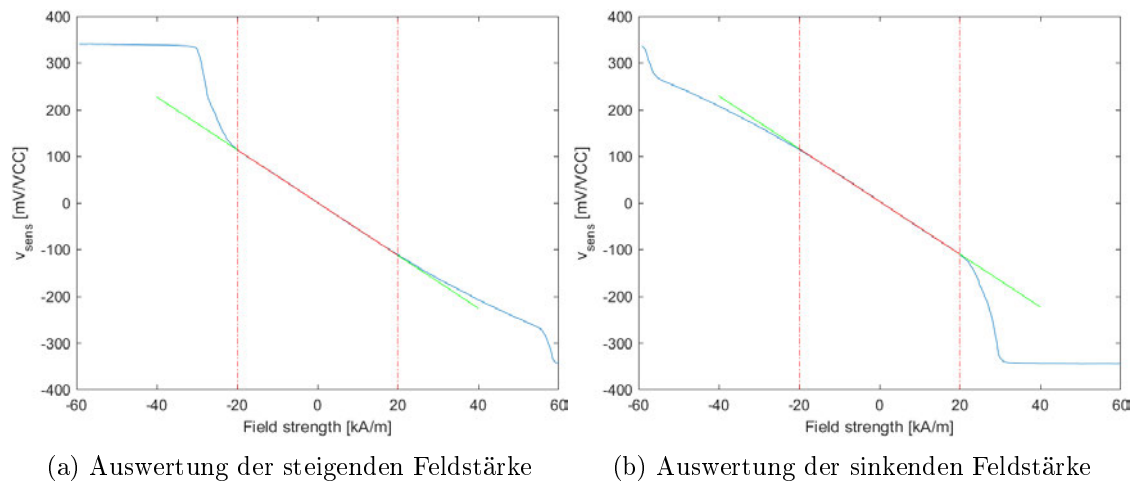


Abbildung 3.3: CT100 Vergleich steigende und sinkende Feldstärke

3.2 Multidimension Technology TMR2104

Der Verlauf in Abb. 3.4 ist die aufgezeichnete Charakterisierungskennlinie des MDT Sensors TMR2104. Im Vergleich zu der Kennlinie des Sensors CT100 ist auf dem ersten Blick keine Hysterese zu erkennen. Der lineare Bereich befindet sich auch hier in der Mitte der Kennlinie. Jedoch ist die Steigung größer im Vergleich zum CT100.

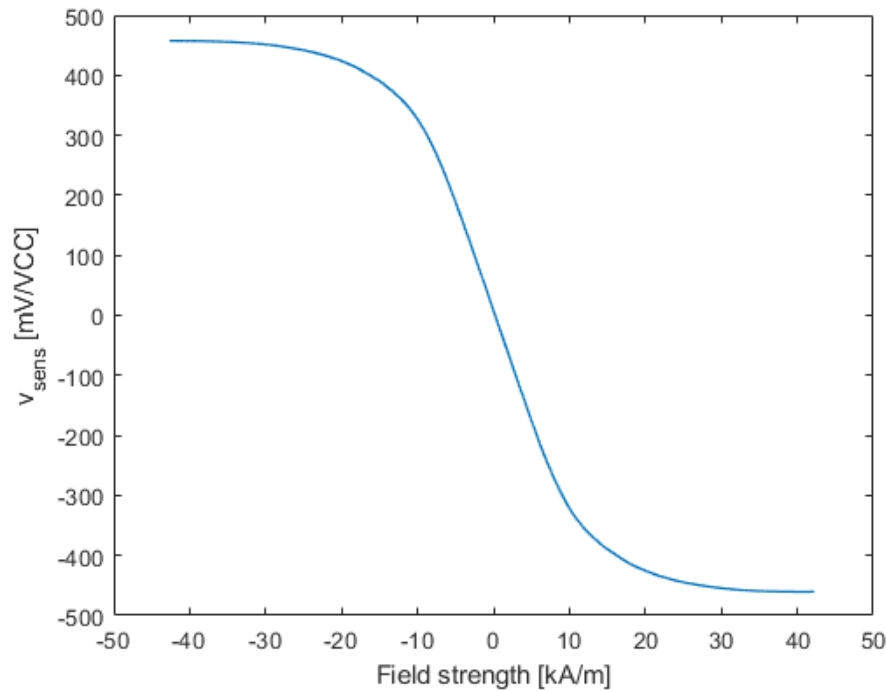


Abbildung 3.4: Charakteristik des TMR2104

Wenn man jetzt hier ebenfalls die Mitte der Kennlinie vergrößert, kann man in Abb. 3.5a erkennen, dass die einzelnen Messdurchläufe, durch die steigenden und fallenden Feldstärken verursacht, sich relativ gleich verteilen und keine explizit getrennten Bereiche aufweisen wie bei dem CT100 in Abb. 3.2a. Der gemessene Feldstärkeverlauf ist in Abb. 3.5b dargestellt. Hier ist im Vergleich zum CT100 ein Unterschied in den gemessenen Maximalwerten zu vernehmen. Der TMR2104 verläuft in dem Bereich von $\pm 40 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$, der CT100 hingegen bis zu $\pm 60 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$. Laut Datenblatt ist der TMR2104 für einen Bereich von $\pm 200 \text{ Gs}$ ($\pm 15,91 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$) gedacht und verhält sich bei $\pm 80 \text{ Gs}$ ($\pm 6,36 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$) linear.

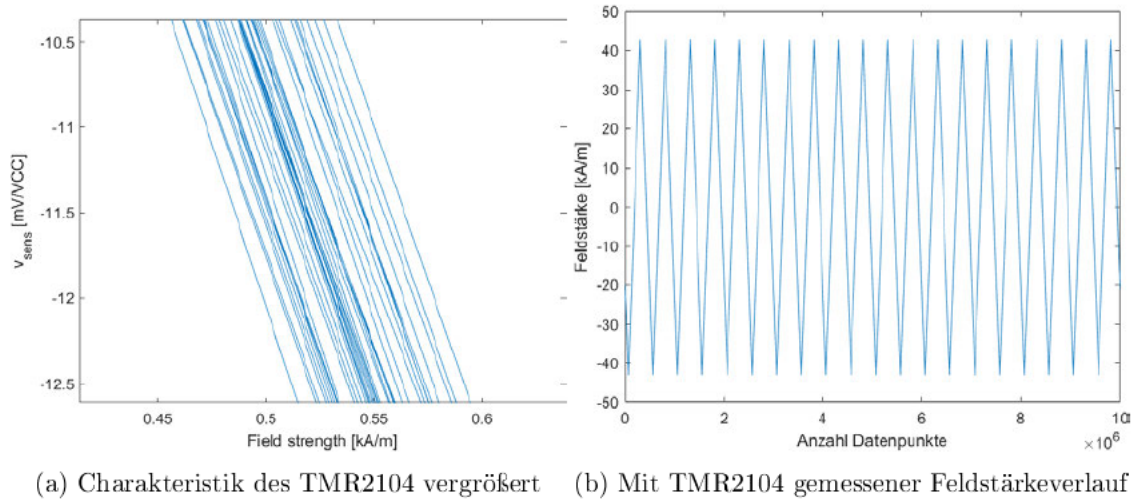


Abbildung 3.5: Nähere Betrachtung der TMR2104 Messergebnisse

Für die Auswertung der Grafik wurde wie schon zuvor mit der grafisch ausgewerteten Steigung abgeschätzt, in welchem Rahmen sich der lineare Abschnitt der Kennlinie befindet. Dieser ist rot in den Abbildungen 3.6a und 3.6b eingezeichnet und liegt bei $\pm 7 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$. Zur Überprüfung der Wahl des linearen Bereichs wurden die mit Polyfit bestimmten Geradenparameter verwendet, um eine verlängerte grüne Referenzlinie einzuzichnen. Anhand dieser lässt sich erkennen, ob die Hauptkennlinie (blau) den linearen Verlauf erst an der Stelle verlässt, an der die rote Linie endet und die grüne Linie weiterführt. Außerdem wurde die Auswertung, zum Überprüfen der Vergleichbarkeit, getrennt für die steigende und sinkende Feldstärke durchgeführt.

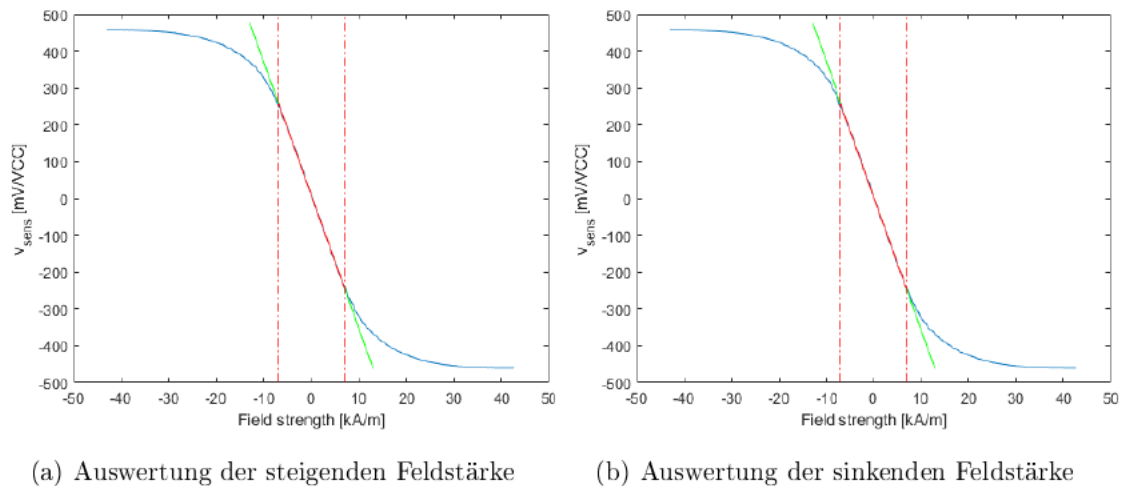


Abbildung 3.6: TMR2104 Vergleich steigende und sinkende Feldstärke

Folgende Steigungen m und Y-Achsenabschnitte der Charakterisierungskennlinie haben sich im Bereich der roten Geraden ergeben:

$$m_{steigend} = -36.1665$$

$$Y(0)_{steigend} = 7.6365$$

$$m_{sinkend} = -36.1579$$

$$Y(0)_{sinkend} = 6.9553$$

Auch die kleine Abweichung in der Steigung ist auf eine Hysterese sowie auf die Verwendung von nur einer Flanke für die steigende und fallende Feldstärke zurückzuführen. Der im Datenblatt beschriebenen lineare Bereich des Sensors konnte mit der Auswertung der Grafiken bestätigt werden.

3.3 Vergleichende Bewertung der Sensoreigenschaften

Anhand der Charakterisierungskennlinien der beiden verschiedenen TMR-Sensoren kann nun ein Favorit gewählt werden, welcher für den Anwendungsfall dieser Arbeit besser geeignet ist. Grundsätzlich sieht der TMR2104 von der Charakteristik besser aus, da die Hysterese auf dem ersten Blick nicht zu erkennen ist. Außerdem weist der TMR2104 eine höhere Steigung im linearen Bereich auf. Dadurch kann in der Schaltung später die Verstärkung der Messfehler durch den Einfluss externer Störgrößen, insbesondere bei kleineren Strömen, reduziert werden. Denn die ausgegebenen Spannungen der Sensoren werden über eine weitere Platine durch eine Verschaltung mehrerer Verstärker verstärkt und ausgewertet. Somit ist es mit dem Sensor TMR2104 möglich mit einer geringeren Verstärkung, die selbe Größe der Verstärkerausgangsspannung zu erreichen, wie mit dem Sensor CT100. Der Schematische Aufbau dieser Verstärkerschaltung ist in Abb. 5.4 zu sehen.¹

Die in dem Anwendungsfall für die EIS in dieser Arbeit erwarteten Ströme² von bis zu 20 A führen in der gewählten Sensoranordnung³ auf der erstellten Platine⁴ zu einer Feldstärke von bis zu $0,48 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$. Diese Feldstärke liegt bei beiden Sensoren im linearen Bereich und deshalb könnten grundsätzlich beide Sensoren verwendet werden. Wie im Absatz zuvor schon genannt ist es jedoch besser, wenn mögliche auftretende Messfehler durch externe Störeinflüsse nicht verstärkt werden. Aus diesem Grund und wegen der höheren Steigung der Sensorkennlinie wird sich für den TMR2104 Sensor entschieden.

¹ siehe Abschnitt 5.1.2 auf Seite 36

² siehe Kapitel 4 Seite 15

³ siehe Abschnitt 4.3 Seite 31

⁴ siehe Abbildung 5.2 Seite 36

3.4 Aufnahme und Auswertung der Datenpunkte für die Charakterisierung

Aufnahme der Charakteristik:

Die Abb. 3.7 zeigt den Messaufbau, welcher für die Charakterisierung der beiden verwendeten TMR-Sensoren genutzt wurde. In das Innere der Spule werden eine Hall-Sonde, die mit einem Feldstärkemessgerät verbunden ist, sowie die zu charakterisierenden Sensoren über die Platine eingebracht. Die Kontakte der Spule sind über die Leitungen an einen Leistungsverstärker [10] angeschlossen, welcher ein Dreieckssignal von einem Funktionsgenerator [11] erhält und das verstärkte Signal auf die Spule gibt.

Auf diese Weise werden die beiden Sensoren unterschiedlichen magnetischen Feldstärken ausgesetzt. Die differentiellen Ausgangssignale der Sensoren werden dann an den SMA-Anschlüssen ausgegeben, mit einem Oszilloskop [12] gemessen und mit einem MATLAB-Skript parallel aufgezeichnet. Außerdem werden auch die Messwerte vom Feldstärkemessgerät mithilfe desselben Skriptes gespeichert. Die aufgenommenen Messergebnisse der Charakterisierung wurden jeweils für einen Sensor in einer Datei vom Typ „mat“ für die anschließende Auswertung exportiert.

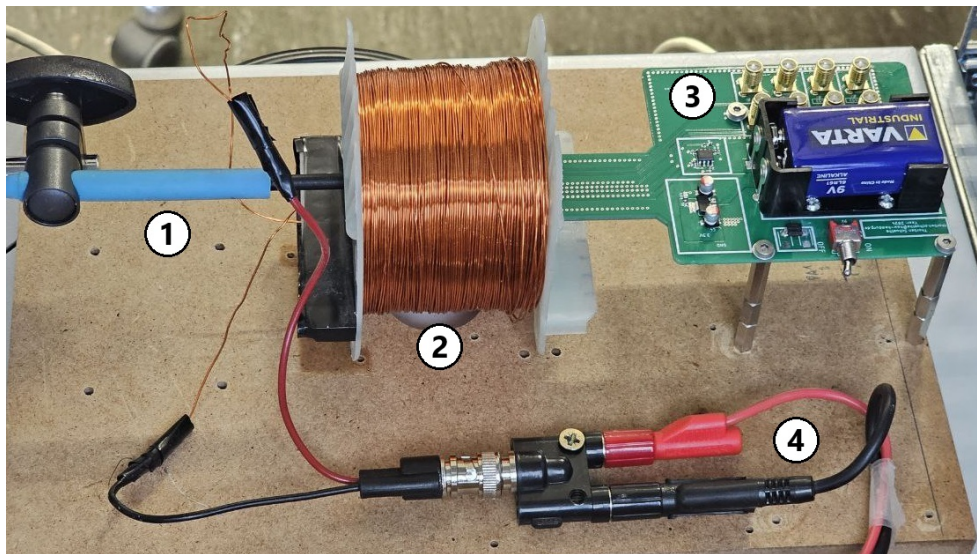


Abbildung 3.7: Messaufbau für Charakterisierung der TMR Sensoren. Gekennzeichnet sind ①: blauer Griff der Hall-Sonde; ②: Spule; ③: Sensorplatine; ④: Anschlussleitungen zum Leistungsverstärker.

Auswertung der aufgezeichneten Daten:

Für die Verarbeitung der aufgenommenen Daten beider Sensoren wurde ein neues MATLAB-Skript geschrieben, siehe Anhang A.1. Dort wird die „mat“-Datei mit folgenden aufgezeichneten Werten zuerst geladen:

- Feldstärke in [A/m]
- Zeitvektor in [s]
- Sensorspannung v_{sens} in [V]
- Versorgungsspannung in [V]

Nachdem die Messwerte geladen wurden, werden die Vektoren als erstes in der Anzahl an Punkten verringert, damit diese für eine grobe Übersicht schneller verarbeitet werden können. Danach werden die Einheiten in passende Dimensionen umgerechnet. Die Feldstärke wird in [kA/m] und die Sensorspannung wird in [mV] umgerechnet sowie auf die Versorgungsspannung bezogen. Somit erhält man einen Vektor, an dem jeder Punkt in [mV/V_{cc}] angegeben ist.

Anschließend wird im Skript ab Zeile 29 die graphische Darstellung der Sensorkennlinie, anhand der zur ersten Ansicht verringerten Anzahl an Datenpunkten, gezeichnet.

Nun werden die zur Verarbeitung verwendeten Daten auf eine steigende oder fallende Flanke des Dreiecksignals beschränkt und separat betrachtet. Dadurch wird verhindert, dass sich die mehrfachen Durchläufe der Messung gegenseitig in der Auswertung beeinflussen und der lineare Bereich in der anschließenden Datenverarbeitung durch die Polyfit-Funktion gut genähert werden kann (Zeile 52 bis 96). Die grafische Ausgabe beinhaltet hier zum einen die geglättete Kurve mit gemittelten Y-Werten sowie eine Gerade mit der zuvor berechneten Steigung im betrachteten linearen Bereich.

Die letzten beiden Abschnitte können verwendet werden, um bei einer bekannten magnetischen Feldstärke anhand der ermittelten Geradengleichung die Sensorausgangsspannung zu berechnen oder den Mittelwert der Sensorausgangsspannungen innerhalb eines Toleranzbereichs um die eingegebene Feldstärke herum auszugeben (Zeile 97 bis 139).

Der restliche MATLAB-Code in dem Skript ist eine Wiederholung derselben Auswertung, jedoch für den zweiten Sensor.

4 Simulation von durch elektr. Strom erzeugten Magnetfeldern

In diesem Abschnitt werden verschiedene Geometrien und Dimensionen des Stromführenden Leiters simuliert und abgewägt, welche Geometrie für den Anwendungsfall dieser Bachelorarbeit am besten geeignet ist.

Zur Simulation wurde die Methode der finiten Elemente mit der Software „Finite Element Method Magnetics (FEMM)“ verwendet [13]. Es besteht die Möglichkeit, diese Software mit MATLAB zu verknüpfen, sodass die einzelnen Simulationsaufbauten und Konfigurationen nicht für jede einzelne Simulationsiteration neu gezeichnet werden müssen. FEMM ist ein Simulationstool, welches die Zweidimensionale Darstellung (2D) verwendet. Somit kann auch nur eine flache Ebene, also ein Querschnitt, bei der Simulation betrachtet werden.

Es wurde ein maximaler Strom von 20 A angenommen, da der Leistungsverstärker [10] im späteren Versuchsaufbau keine höheren Ströme ausgeben kann. Der Mindestquerschnitt wurde anhand der Norm DIN 43671¹ bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C und einer Leitertemperatur von 50 °C auf 4,91 mm² mit einem Durchmesser von 2,5 mm für runde Stromschienen abgeschätzt. Damit wäre eine Stromtragfähigkeit von ungefähr 32 A möglich. Es konnte nur grob abgeschätzt werden, da die Norm als kleinsten Querschnitt 19,6 mm² für einen Leiterdurchmesser von 5 mm angibt.

Die Abschätzung des Durchmessers für runde Stromschienen erfolgte mit den Werten aus Tabelle 4.1 folgendermaßen:

- 5 mm im Verhältnis zu 10 mm Durchmesser hat ein Viertel des Querschnittes
- der Strom hingegen erreicht 40 % des maximalen Stroms vom größeren Durchmesser
- somit wird für 2,5 mm Durchmesser ein Strom von $0,4 \cdot 85 \text{ A} = 34 \text{ A}$ angenommen
- der Temperaturfaktor $k_2 = 0,94$ aus der Norm verringert diesen Strom auf ca. 32 A

¹Norm für Stromschienen aus Kupfer und deren Bemessungsdauerstrom[14]

Tabelle 4.1: Auszug aus DIN 43671 Tabelle 3 „Dauerströme für runde Stromschienen“ [14]

Durchmesser [mm]	Querschnitt [mm ²]	Dauerstrom Gleichstrom Kupfer blank[A]
5	19,6	85
8	50,3	159
10	78,5	213

Für die Dimensionierung der rechteckigen Leiter wurden die Formeln zur Berechnung von Leiterbahnen auf Platinen verwendet. Denn bei den relativ geringen erwarteten Strömen ist es durchaus möglich, diese über eine Platine zu leiten. Die Faktoren k , b und c in der Rechnung 4.1 sind Konstanten, welche aus der Kurvenanpassung an die IPC-2221 [15] Kurven entstanden sind. Die verschiedenen Werte für interne und externe Schichten sind in der Formelerklärung auf der Kalkulationswebsite von Digikey zu finden [16]. In diesem Fall wurden die Werte für externe Schichten auf einem Printed Circuit Board (PCB), auch genannt Platine, verwendet. Folgende Rechnungen wurden mithilfe des Kalkulators durchgeführt:

$$\begin{aligned}
\text{Querschnitt } A [\text{mils}^2] &= \left(\frac{I}{k \cdot T_{rise}^b} \right)^{\frac{1}{c}} \\
A [\text{mils}^2] &= \left(\frac{33 \text{ A}}{0,048 \cdot 25^\circ C^{0,44}} \right)^{\frac{1}{0,725}} = 1161,65 \text{ mils}^2 \\
\text{Querschnitt } A [\text{mm}^2] &= \frac{A [\text{mils}^2]}{1550} \\
A [\text{mm}^2] &= \frac{1161,65 \text{ mils}^2}{1550} = 0,75 \text{ mm}^2
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Es wird in der folgenden Rechnung 4.2 für die Leiterbahnbreite von einer Kupferdicke $t = 2 \text{ oz}$ (oz steht für Unze, siehe Symbolverzeichnis) ausgegangen. Die Angabe in Unzen ist in der Leiterplattenindustrie ein international angewandter Standard.

$$\begin{aligned}
2 \text{ oz} &\approx 0,07 \text{ mm} \\
\text{Breite } W [\text{mm}] &= \frac{A [\text{mm}^2]}{t} \\
W [\text{mm}] &= \frac{0,75 \text{ mm}^2}{0,07 \text{ mm}} = 10,7 \text{ mm}
\end{aligned} \tag{4.2}$$

Die hier errechneten Werte werden für alle folgenden Simulationen verwendet, um eine gewisse Vergleichbarkeit hinsichtlich der maximalen Sensorauslastung zu gewährleisten. Dabei werden die Leiterbahnen/Kupferschienen mit einem Querschnitt von $0,75 \text{ mm}^2$ für eine maximale Strombelastbarkeit von 33 A dimensioniert. Der simulierte Strom jedoch wird auf die durch den Leistungsverstärker begrenzten 20 A eingestellt.

4.1 Mögliche Leiterquerschnittsgeometrien und Konfigurationen

Bei der Simulation sind zwei grundlegend verschiedene Anordnungen zu betrachten. Zum einen gibt es die Möglichkeit den elektrischen Leiter als Leiterbahn auf einer Platine direkt zu verwenden, zum anderen können Busbars aus Kupfer mit verschiedenen Formen verwendet werden. Dies soll in diesem Teil der Arbeit mit den Simulationen unterschieden und verglichen werden.

4.1.1 Rechteckige Leitergeometrie

Der rechteckige Leiteraufbau könnte zwei verschiedene Anwendungen widerspiegeln. Einmal kann man damit eine Leiterbahn auf der Platine simulieren und ebenfalls eine Busbar. In beiden Fällen würde der Sensor mittig über dem elektrischen Leiter platziert werden, und der zweite Sensor für die differenzielle Messung unterhalb des Leiters.

Der rechteckige Aufbau bietet den Vorteil, dass er insbesondere auf Platinen einfach zu realisieren ist. Denn es ist lediglich erforderlich, die Dimensionierung anhand der benötigten Strombelastung vorzunehmen und die Sensoren mittig zur Leiterbahn zu positionieren. Die Sensoren können entweder auf der obersten und untersten Schicht der Platine integriert werden oder auf einer separaten Platine montiert, ausgerichtet und die PCB dann mittels Verschraubung an der Stromführenden fixiert werden. Befänden sich die Sensoren auf derselben PCB wie die Leiterbahn, müsste diese im Inneren der Platine verlaufen. Aufgrund der schlechteren Wärmeableitung könnte sie bei gleicher Dimensionierung dann nicht mehr so hohe Ströme führen. Dies müsste bei der Planung mit beachtet werden. Ebenso wie die Komplikationen, die eine genaue Ausrichtung der Sensoren mit einer separaten Platine über und unter der Leiterbahn verursachen würden.

Die Abb. 4.1 zeigt, wie die Simulation in FEMM aufgebaut wurde. Dabei sieht man in der Mitte die relativ dünne Kupferleiterbahn. Um diese ist ein Rechteck gezeichnet, welches den Bereich kennzeichnet, in welchem später die Ergebnismatrix aus Abb. 4.2 erzeugt wird. Ganz außen um den Messaufbau herum sind mit mehreren Kreisen die Randbedingungen für die Simulation mit FEMM erzeugt worden. Diese sind nötig, damit die Simulation korrekt abläuft. Die verschiedenen Materialien werden mit Bezeichnern versehen. In diesem Fall gibt es eine Kupferfläche (englisch Copper) und um diese herum befindet sich nur Luft (englisch Air). Der Bereich der Ergebnismatrix bekommt keine Materialien zugewiesen, da dieser erst nach der Simulation eingezeichnet wird und nur zur visuellen Kontrolle dient, dass die Ergebnisse auch aus dem gewünschten Bereich

entnommen werden. Der Quellcode zum Zeichnen dieser verschiedenen Objekte und der Aufbau der Simulation ist im Anhang A.2 (Seite 77) nachzulesen.

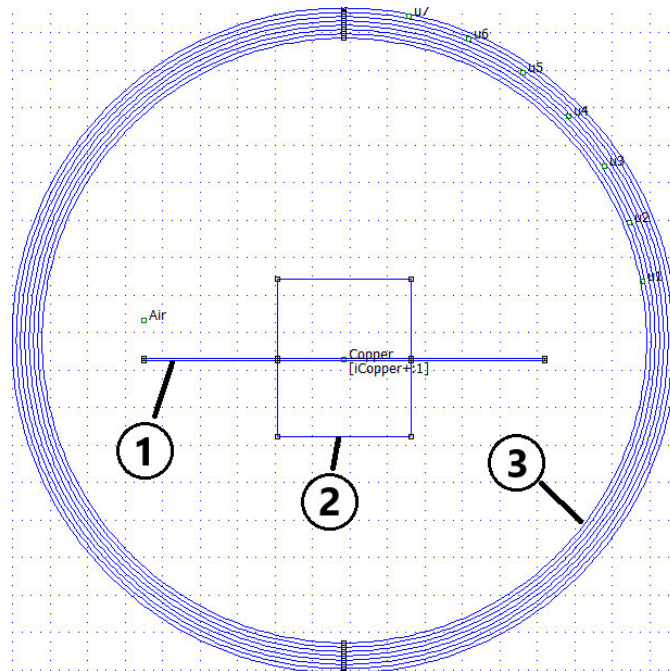


Abbildung 4.1: Simulationsaufbau in FEMM für Leiterbahn aus Abb. 4.3 mit eingezeichneten Bereich für Ergebnismatrix in MATLAB. Gekennzeichnet sind ①: Kupferleiterbahn; ②: Bereich der Ergebnismatrix; ③: FEMM-Randbedingungen.

Im MATLAB-Skript A.2 wurde der Betrag der magnetischen Flussdichte, mithilfe der erstellten Ergebnismatrix in Abb. 4.2, für die ungefähre Position ausgelesen, an der sich die Sensorfläche befindet. Die ausgelesenen Werte wurden dann mit der in der Charakterisierung im Kapitel 3.2 ermittelten maximalen magnetischen Flussdichte für den linearen Bereich des Sensors TMR2104 ins Verhältnis gesetzt. Dies wurde zum einen für den Fall betrachtet, dass die Sensoren auf derselben Platine sind wie auch die Leiterbahn selbst. Ebenso aber auch für den Fall, dass es eine separate Sensorplatine gibt, welche über der Leiterbahn positioniert wird. Als Ergebnis ist dabei herausgekommen, dass der Sensor TMR2104 zu 11,2 % den linearen Bereich ausnutzt, wenn sich der Sensor auf der selben Platine befindet wie die Leiterbahn. Wird sich für die Alternative entschieden, bei dem es eine separate Sensorplatine gibt, dann wäre der lineare Bereich zu 12,6 % in Verwendung für die Strommessung.

Die Ergebnismatrix zeigt die Verlaufsrichtung der magnetischen Feldlinien in dem Bereich, in welchem die Sensoren positioniert werden. Die roten Markierungen sind jeweils die Position oberhalb und unterhalb der Leiterbahn für die Fälle, dass der Sensor auf einer externen Platine ist oder auf derselben PCB wie die Leiterbahn. Die näher an der

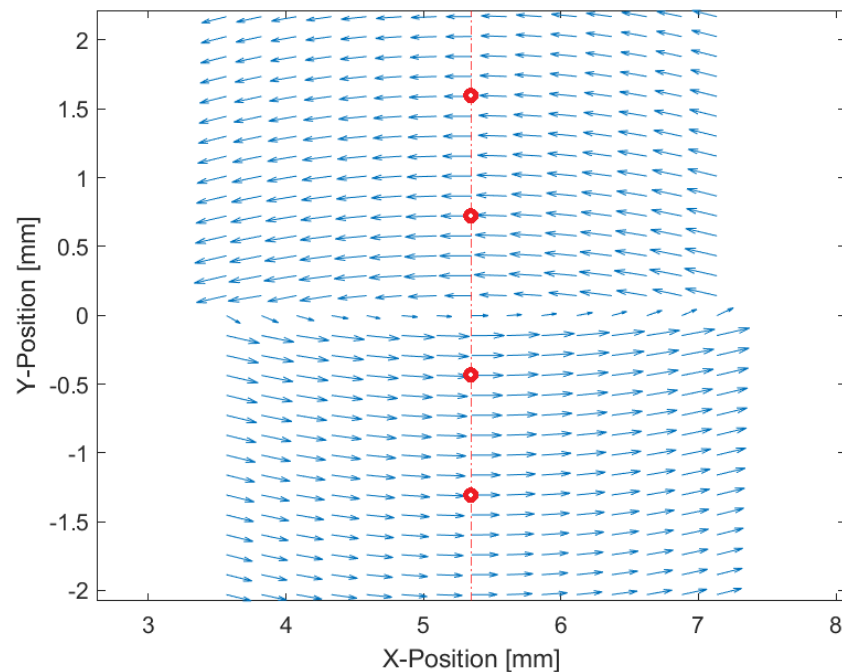


Abbildung 4.2: Ergebnismatrix für eine Leiterbahn mit einer Dicke von 70 μm , einer Breite von 10,7 mm und einem Strom von 20 A. Rote Punkte kennzeichnen die betrachteten Sensorpositionen.

Y-Position null liegenden Punkte sind die ungefähren Positionen der Sensorflächen, falls eine externe Sensorplatte verwendet wird. Die äußeren Markierungen sind dementsprechend für den Fall, dass die Leiterbahn im Inneren des PCB liegt und die Sensoren auf der oberen und unteren Platinenschicht angebracht wurden.

Die folgende Grafik 4.3 zeigt die Simulationsausgabe aus FEMM für eine Leiterbahn mit einer Breite von 10,7 mm, einer Dicke von 70 μm (2 oz) und durchflossen von einem Strom von 20 A. Es ist zu erkennen, dass die größte magnetische Flussdichte an den Enden der Leiterbahn auftritt. In der Mitte der Leiterbahn, wo sich auch die beiden Sensoren befinden würden, liegt die Flussdichte im oberen Mittelfeld des gesamten auftretenden Bereichs. Außerdem sieht man, dass die Richtung der magnetischen Flussdichte sich verändert und nichtlinear ist. Der Y-Anteil der magnetischen Flussdichte nimmt zu, je weiter entfernt von der Mitte der Leiterbahn die Flussdichte betrachtet wird. Selbst wenn die Sensorfläche sich in der Mitte der Leiterbahn befindet, lässt sich ein nicht zu vernachlässigender Anteil der magnetischen Flussdichte in Y-Richtung messen. Dieser Y-Anteil geht in der geplanten Messung vollständig verloren, da die Sensoren linear sind und nur in einer Ebene - hier der X-Richtung - messen können.

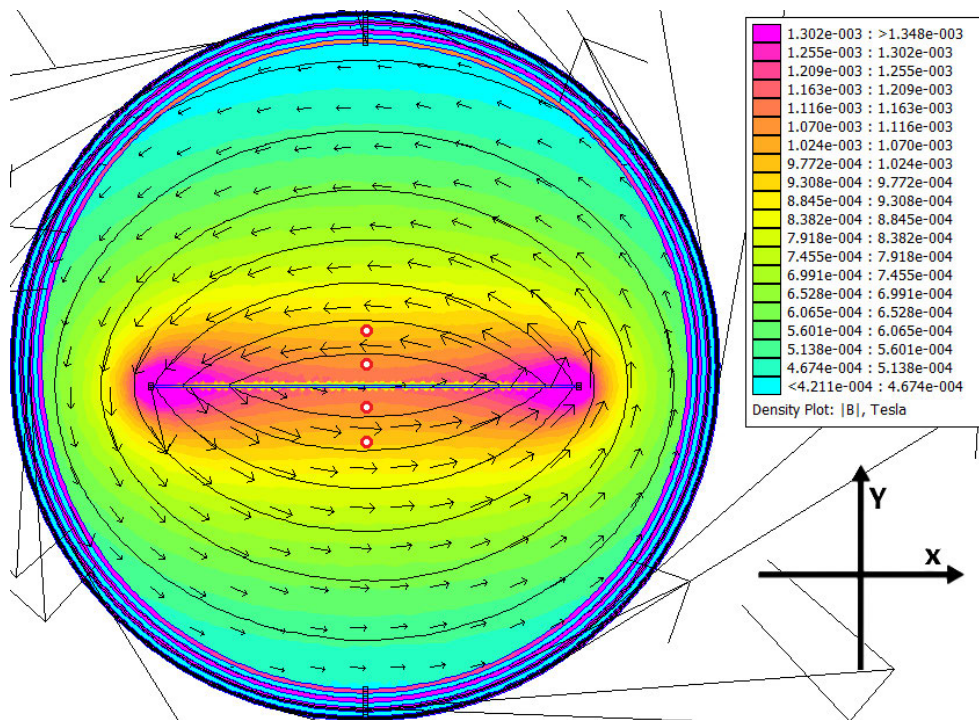


Abbildung 4.3: FEMM Simulationsausgabe von einer Leiterbahn mit einer Dicke von $70\text{ }\mu\text{m}$, einer Breite von $10,7\text{ mm}$ und einem Strom von 20 A . Rote Punkte kennzeichnen die betrachteten Sensorpositionen.

4.1.2 Runde Leitergeometrie

Der runde Aufbau des elektrischen Leiters stellt den Anwendungsfall einer Kupferstange, bzw. einer simplen runden Busbar dar. Die Stromsensoren werden dabei jeweils mittig gegenüber voneinander positioniert. Die Sensitivität der Sensoren zeigt dabei in dieselbe Richtung.

Der Vorteil dieses Aufbaus ist dabei, dass leichte Abweichungen in der Positionierung keine gravierenden Einflüsse auf die Messergebnisse haben werden. Zum einen, weil die Messung kalibriert werden muss, zum anderen dadurch, dass die Feldstärke sich gleichmäßig um den Leiter herum verteilt und nur mit zunehmenden Abstand zur Mitte des runden elektrischen Leiters von der Intensität abnimmt. Somit ist es kein Problem für die Messung, wenn die Sensoren nicht genau 180° versetzt angeordnet sind.

Im Vergleich zum rechteckigen Aufbau, müssen die Sensoren jedoch auf einer separaten Platine angebracht werden. Dieses PCB wird dann zu 90° versetzt zur Busbar ausgerichtet und befestigt. Der Durchmesser von $2,5\text{ mm}$ wird entsprechend der Abschätzung zu Beginn des Simulationskapitels gewählt.

Das Simulationsergebnis für die runde Busbar aus Kupfer kann in Abb. 4.4 betrachtet werden. Die Simulation zeigt deutlich die zuvor beschriebene einheitliche Verteilung der Feldstärke um den runden Leiter. Ebenso kann man die gleichmäßige Abnahme der Feldstärke mit zunehmenden Abstand erkennen. Auch in diesem Aufbau hat die magnetische Flussdichte eine X- sowie eine Y-Komponente. Das bedeutet, dass auch in diesem Fall der lineare Sensor nicht die komplette Flussdichte messen kann und die Ergebnisse somit gerade bei niedrigen Strömen ungenauer werden können.

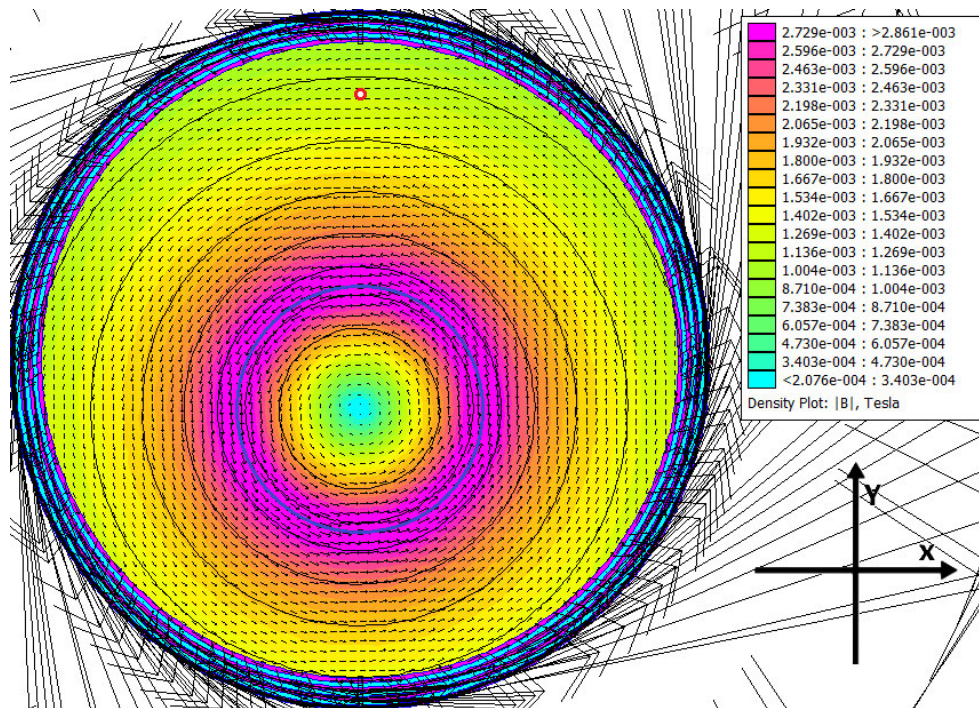


Abbildung 4.4: FEMM Simulationsausgabe von einer runden Busbar mit einem Durchmesser von 2,5 mm und einem Strom von 20 A. Der blaue Kreis in der Mitte markiert den Kupferleiter und der rote Punkt die betrachtete Sensorposition.

Das MATLAB-Skript A.3 erstellt die FEMM-Simulation und wertet die Ergebnismatrix in Abbildung 4.5 hinsichtlich der Höhe der magnetischen Flussdichte sowie der prozentualen Ausnutzung des linearen Bereichs des Sensors aus. Der Simulationsaufbau mit der Position der Ergebnismatrix kann dem Anhang A.1 (Seite 65) entnommen werden. Die Ergebnismatrix betrachtet hier nur eine Seite der Busbar, es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Ergebnisse im Betrag auf beiden Seiten identisch sind. Nachdem das Ergebnis aus der Matrix für die Position der Sensorfläche ausgelesen wurde und mit der in Kapitel 3.2 bestimmten maximalen magnetischen Flussdichte für den linearen Bereich des Sensors TMR2104 verglichen wurde, ergibt sich eine maximale Nutzung des linearen Bereichs des Sensors von 14,3 %. Auch in dieser Ergebnismatrix ist der Verlauf der ma-

netischen Feldlinien anhand der Pfeile zu sehen und die für die Auswertung genutzte Position des Sensors mit einem roten Punkt markiert.

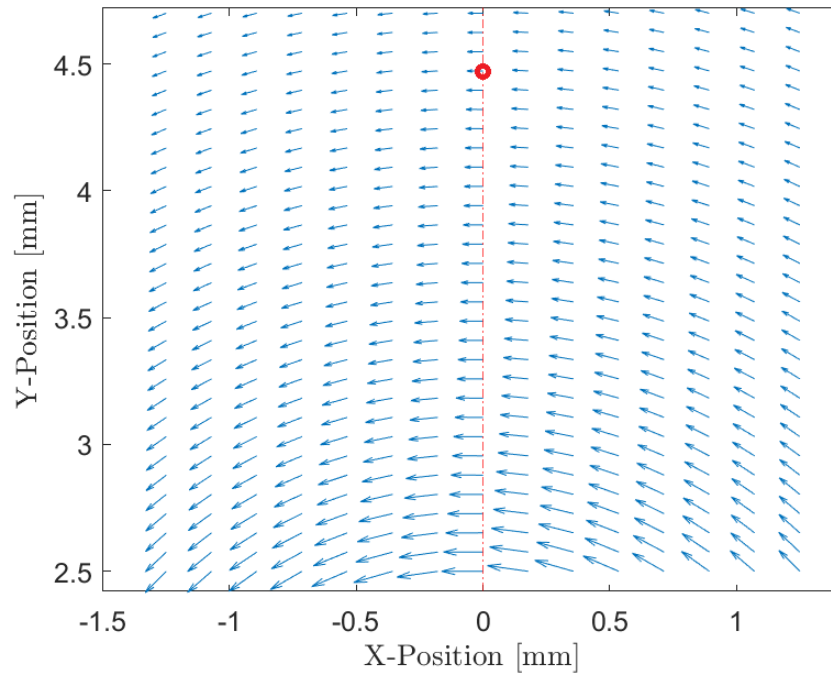


Abbildung 4.5: Ergebnismatrix für eine runde Busbar mit einem Durchmesser von 2,5 mm und einem Strom von 20 A. Der rote Punkt markiert die betrachtete Sensorposition.

4.1.3 Leitergeometrie eines geschlitzten runden Leiters

Eine Abwandlung des runden Stromschienenaufbaus aus Abschnitt 4.1.2 beinhaltet zwei Schlitz, die in diesen gefräst werden müssen. Diese dienen dazu, dass die Sensoren innerhalb des Schlitzes platziert werden können und somit möglicherweise geringere Störeinflüsse von externen Feldern abbekommen sowie anstelle des runden Feldes sich in einem homogenen Feld befinden. Dadurch können die linearen Sensoren einen größeren Anteil der vorhandenen magnetischen Flussdichte in X-Richtung messen. Der gesamte Y-Anteil kann von den Sensoren nicht erfasst werden und verringert somit bei kleinen Strömen die Empfindlichkeit der Messung.

Aufgrund der Größe des Footprints der Sensoren von ca. 3x3 mm muss der Schlitz in der Stromschiene groß genug sein um die Sensoren aufnehmen zu können. Da die vorherige Simulation einen Durchmesser von 2,5 mm hatte und somit kleiner ist, als der Schlitz bereits sein muss, wird der Durchmesser der Stromschiene für diesen Aufbau angepasst und auf 10 mm erhöht. Der Querschnitt steigt somit von ungefähr $4,9 \text{ mm}^2$ auf etwa 50 mm^2 . Anhand der Tabelle 4.1 kann man durch die Querschnittserhöhung von einem

maximalen Strom von mehr als $k_2 \cdot I = 0,94 \cdot 159 \text{ A} = 149,5 \text{ A}$ ausgehen. Der höhere mögliche Strom ist darauf zurückzuführen, dass in der Tabelle in Zeile zwei von einem runden Querschnitt ausgegangen wird. Die verwendete Stromschiene weist jedoch zwei Schlitz auf, wodurch ihre Oberfläche vergrößert wird. Dies führt zu einer verbesserten Wärmeableitung und trägt somit zur effizienteren Kühlung des Kupfers bei.

In der Simulationsausgabe aus FEMM für die geschlitzte runde Stromschiene aus Kupfer, siehe Abb. 4.6, ist das zuvor genannte homogene Feld gut zu erkennen. Die Y-Komponente der magnetischen Flussdichte in diesem Feld, welches sich in beiden Schlitz bildet, ist nahezu bei Null. Der Anteil der Y-Richtung im Messpunkt des Sensors beträgt lediglich $5,7 \text{ pT}$. Dies entspricht ca. $\frac{1}{10}$ der magnetischen Flussdichte des Erdmagnetfeldes in Deutschland [17] und ist somit sehr gering. Die gesamte messbare magnetische Flussdichte kann dadurch von dem verwendeten Sensor aufgenommen und verarbeitet werden. Es entstehen so gut wie keine Messverluste, welche das Endergebnis in der Genauigkeit beeinflussen könnten.

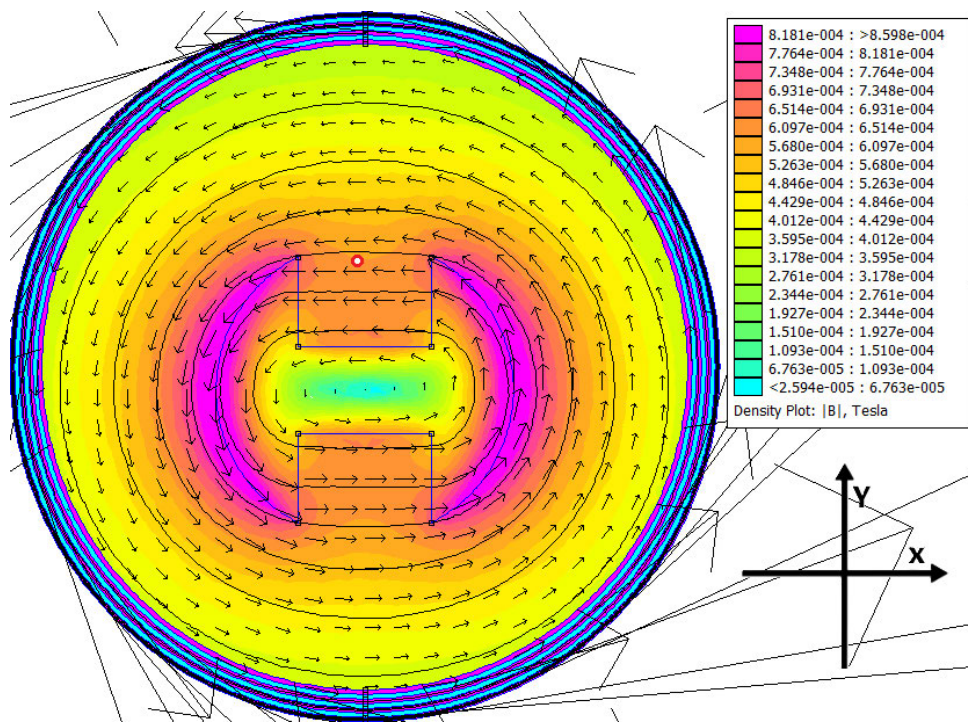


Abbildung 4.6: FEMM Simulationsausgabe von einer runden Busbar mit einem Durchmesser von 10 mm, zwei 4,5 mm breiten Schlitz und einem Strom von 20 A. Der rote Punkt markiert die betrachtete Sensorposition.

Die Ergebnismatrix in Abb. 4.7, welche durch das MATLAB-Skript im Anhang A.4 erzeugt wurde, zeigt einen Bereich des homogenen Feldes innerhalb des oberen Schlitzes der Busbar. Der genaue ausgewertete Bereich für die Matrix ist im Anhang A.2 (Seite 66)

eingezeichnet. Der ausgelesene Wert an der rot markierten Position in der Matrix sorgt für eine Aussteuerung des Sensors zu 7 % bei dem anliegenden Strom von 20 A. Die Y-Achsenbeschriftung fängt in diesem Fall bei 5 mm an, da als Nullpunkt der Simulation die untere Kante der Busbar gewählt wurde. Dadurch ist die Mittellinie der runden Busbar mit Schlitz bei 5 mm und die Ergebnismatrix betrachtet von dort aus startend den darüber liegenden Bereich. Die gestrichelte rote Linie markiert die X-Position der Sensorfläche und liegt ca. 0,3 mm links der Mitte von der Busbar.

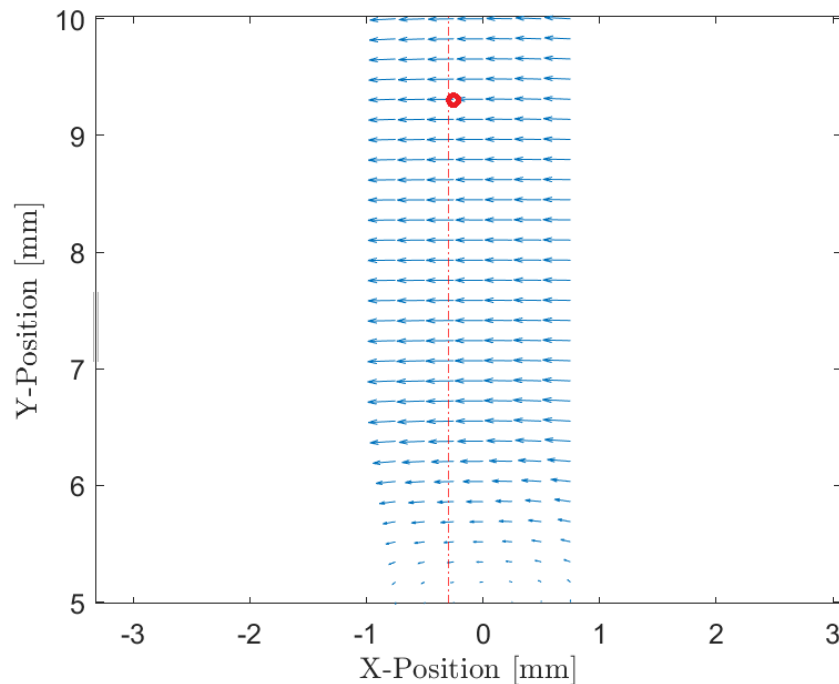


Abbildung 4.7: Ergebnismatrix für eine runde Busbar mit einem Durchmesser von 10 mm, zwei 4,50 mm breiten Schlitzen und einem Strom von 20 A. Der rote Punkt markiert die betrachtete Sensorposition.

4.1.4 Leiteraufbau einer Stromschikane mit entgegenlaufenden Strömen

Bei der Messschikane handelt es sich um eine Alternative zur einfachen rechteckigen Leiterbahn. Dieser Aufbau kann - wie bereits in Abschnitt 4.1.1 erwähnt - sowohl als Kupferbusbar oder als auch als Leiterbahn auf einem PCB verwendet werden. Der Strom fließt, betrachtet man den Querschnitt, auf einer Seite in die Ebene hinein und auf der anderen Seite aus der Ebene heraus. Die beiden Sensoren sind jeweils über den Abschnitten des elektrischen Leiters positioniert, wobei ihre Sensitivitätsachsen in die gleiche Richtung ausgerichtet sind. Dadurch entsteht ein differenzielles Signal zwischen den Sensoren: Einer der Sensoren misst einen positiven Wert, während der andere denselben Wert mit

umgekehrtem Vorzeichen erfasst. Zur Bestimmung der Messgröße wird die Differenz der beiden Sensorsignale gebildet. Da sich das Nutzsignal dabei verdoppelt, muss das Ergebnis noch halbiert werden, um die korrekte Messgröße zu erhalten. Diese ist frei von externen Störeinflüssen, solange die Störung sich auf die beiden Sensoren identisch auswirkt. Falls die Störungen unterschiedlich stark auftreten, verbleibt ein entsprechender Fehleranteil im Ergebnis.

Wenn man sich die von der Simulation erzeugten Ergebnisse in Abb. 4.8 anschaut, ist zu erkennen, wie eine gleichmäßige Verteilung der Feldstärke und dessen Verlauf um den elektrischen Leiter in beide Richtungen vorliegt. Im gesamten Bereich um die elektrischen Leiter herum hat der Y-Anteil eine nicht zu vernachlässigenden Größe. Deshalb ist die genaue Platzierung der beiden Sensoren auf derselben Höhe besonders wichtig. So haben sie ungefähr den gleichen Y-Anteil, welcher nicht zum Messergebnis beiträgt, aber insgesamt dadurch als Messgröße fehlt. Der Bereich zwischen den Kupferleiterbahnen ist relativ linear, jedoch kann dort zumindest mit der Platinenbauweise kein Sensor ordentlich positioniert werden.

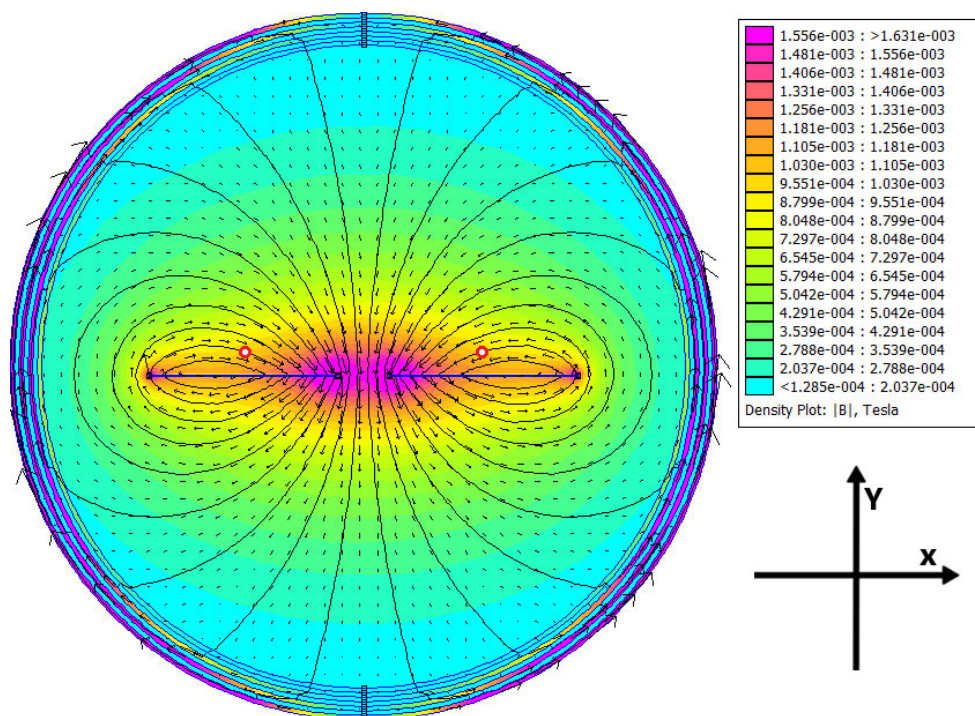
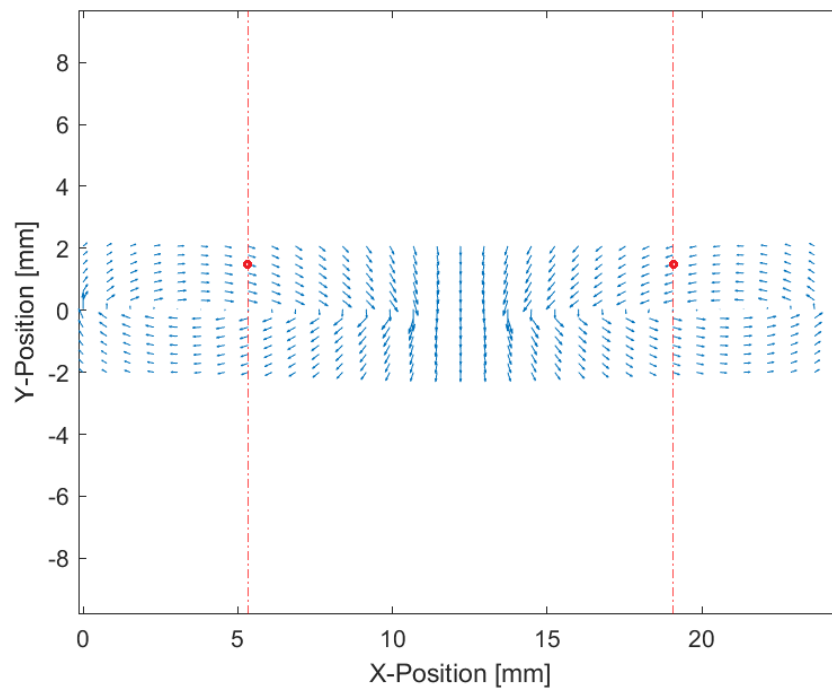


Abbildung 4.8: FEMM Simulationsausgabe von einer Stromschikane mit einer Leiterbahnbreite von 10,7 mm, Dicke von 70 μm und einem Strom von 20 A. Rote Punkte markieren die betrachteten Sensorpositionen.

In der Abb. 4.9 ist die Ergebnismatrix für den Sensoraufbau abgebildet, welche mit dem MATLAB-Skript aus dem Anhang A.4 erstellt wurde. Welcher Bereich der Simulation

mit der Matrix ausgelesen wurde, kann im Anhang A.3 (Seite 66) mit dem Simulationsaufbau nachvollzogen werden. Die Pfeile in der Matrix lassen deutlich erkennen, in welchem Bereich sich die Leiterbahnen befinden. Somit ist die Position der beiden Sensoren leicht erklärt. Sie befinden sich beide zentral über der jeweiligen Leiterbahn, hier markiert mit den Punkten auf der rot gestrichelten Linie. Der Abstand zwischen Sensorfläche und Leiterbahn ist definiert durch die Leiterbahndicke und die Positionierung der Sensorfläche innerhalb des Sensors. Es wird dabei vereinfacht davon ausgegangen, dass sich die Leiterbahn in der Mitte des PCB befindet. Die Aussteuerung des in 3.2 definierten linearen Bereichs an den gekennzeichneten Positionen der Sensoren liegt bei 10,8 % mit einem simulierten Strom von 20 A.



Abbildungung 4.9: Ergebnismatrix für eine Strommessschikane mit einer Leiterbahnbreite von 10,7 mm, Dicke von 70 μm und einem Strom von 20 A. Rote Punkte markieren die betrachteten Sensorpositionen.

4.2 Parametervariation für verschiedene Ströme und Störeinflüsse

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, wie sich externe Magnetfelder auf die Messergebnisse jeweils auswirken können. Außerdem wird betrachtet, inwieweit sich die prozentuale Ausnutzung des linearen Sensorbereiches bei verschiedenen Stromstärken verändert und bei welchem Strom der lineare Bereich maximal ausgeschöpft ist.

4.2.1 Externe Magnetfelder

Für das Betrachten externer Magnetfelder wird in der FEMM-Simulation ein zweites Objekt mit Strom durchflossen, welches dann ein Störfeld erzeugt. Dieses zusätzliche stromführende Objekt könnte eine weitere Stromschiene oder eine andere Leitung sein, die ein Magnetfeld erzeugt und in die Umgebung einwirken lässt. Der Einfluss von homogenen Feldern auf die Strommessung wird direkt experimentell im Kapitel 6 unter 6.4.2 betrachtet.

Als Beispiel wird im Folgenden die runde Stromschiene mit gegenüberliegenden Schlitzen aus Abschnitt 4.1.3 hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber Störeinflüssen untersucht. Die Ergebnisse werden mit den anderen Aufbauten in der Tabelle 4.2 verglichen. Die Simulationsbilder für die verbleibenden Leitergeometrien sind im Anhang A.2 beigelegt.

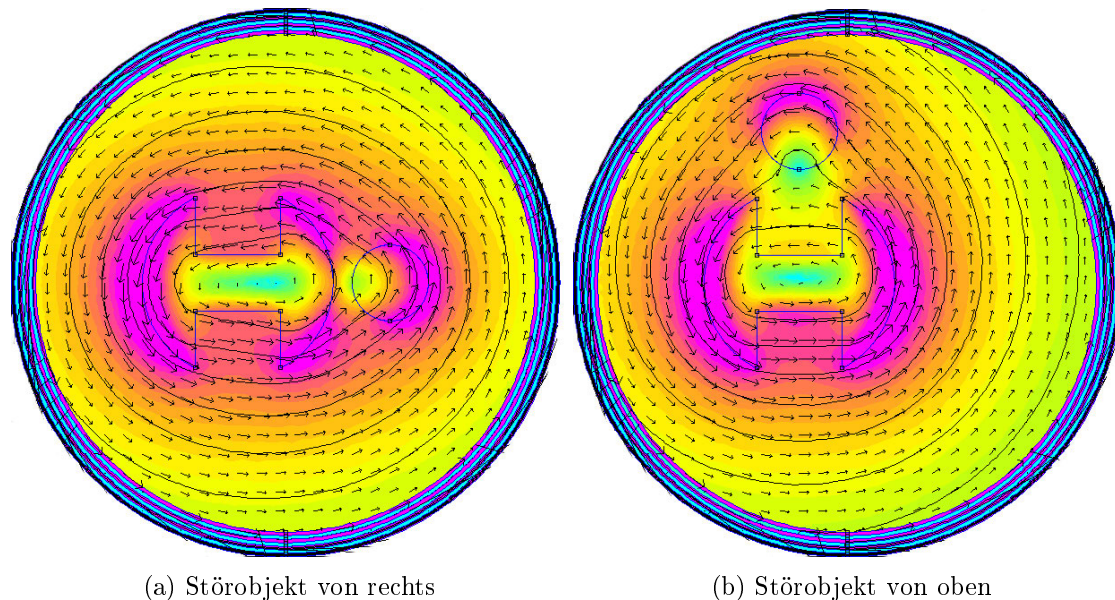


Abbildung 4.10: Störeinflüsse auf geschlitzter runder Stromschiene mit Störstrom von 5 A und Leiterstrom von 20 A.

In den Abbildungen 4.10a und 4.10b sind die Simulationsergebnisse aus FEMM für den geschlitzten runden Leiter mit inhomogenen Störeinflüssen von verschiedenen Positionen zu sehen. Durch die Störung verändern die Feldlinien ihren Verlauf im Vergleich zu ihrem ursprünglichen Verlauf ohne Störung (vgl. Abb. 4.6). Diese Änderung verhält sich unterschiedlich auf die beiden Sensoren, je nachdem in welcher Position das Störobjekt sich befindet. Dadurch kann die differenzielle Messung die Störeinflüsse nicht korrekt herausrechnen und das Messergebnis ist fehlerbehaftet. Die Werte aus Tabelle 4.2 für den

differenziellen Wert mit Störung im Vergleich zum Ergebnis ohne Störung in Tabelle 4.3 zeigen dies deutlich.

In der folgenden Tabelle 4.2 ist der Sensor 1 der obere oder linke im Messaufbau. Sensor 2 dementsprechend der untere oder rechte Sensor in der Messung. „Diff.“ steht für das differenziell ausgewertete Messergebnis der beiden Sensoren.

Tabelle 4.2: Simulationsergebnisse von magnetischen Feldern mit externer Störung.

Leitergeometrie	Störung von rechts [mT]			Störung von oben [mT]		
	Sensor 1	Sensor 2	Diff.	Sensor 1	Sensor 2	Diff.
rechteckig	-1,0017	0,99289	0,99730	-0,83484	1,0786	0,95672
rund	-1,399	1,396	1,397	-1,643	1,422	1,533
rund geschlitzt	-0,66108	0,66078	0,66093	-0,33675	0,69181	0,51428
Stromschikane	0,9381	-0,9688	0,9534	0,9789	-0,8715	0,9252

Tabelle 4.3: Simulation von magnetischen Feldern - Differenzielle Ergebnisse ohne Störeinfluss.

Leitergeometrie	Differenzielles Ergebnis [mT]	Unterschied zur Diff. mit Störung	
		von rechts	von oben
rechteckig	0,97726	20,04 μ T	20,54 μ T
rund	1,24439	152,61 μ T	288,61 μ T
rund geschlitzt	0,61121	49,72 μ T	96,93 μ T
Stromschikane	0,94192	11,48 μ T	16,72 μ T

In Tabelle 4.3 wurde die Differenz zwischen den Ergebnissen mit und ohne Störung durch externe inhomogene Felder berechnet. Es ist zu erkennen, dass die Störung bei jeder Leitergeometrie zu einer Abweichung der differenziellen Ergebnisse von den Werten ohne Störung führt. Dieser Einfluss der Störgröße ist je nach gewählter Leitergeometrie unterschiedlich stark. Es fällt beim Vergleich der Werte auf, dass die Abweichungen meist höher sind, wenn die Sensoren durch die Leitergeometrie weiter voneinander entfernt sind. Besonders stark ist dieser Effekt bei dem runden Leiter zu beobachten. Dort sind die Sensoren in der Y-Achse am weitesten voneinander entfernt. In der Impedanzspektroskopie ist jedoch eine höchstmögliche Messgenauigkeit erforderlich, um die geringen Innenwiderstände der zu messenden Zellen präzise zu bestimmen. Somit muss für die Unterdrückung der inhomogenen Störeinflüsse auf das Messergebnis eine magnetische Abschirmung vorgesehen werden.

4.2.2 Verschiedene Stromstärken

Im Rahmen der Untersuchung wird betrachtet, wie sich die Messergebnisse der TMR-Sensoren bei variierenden Stromstärken verändern. Besonders interessant für den späte-

ren potenziellen Einsatz in einem Elektrofahrzeug ist die maximal mögliche Stromstärke, die erreicht werden kann, bevor die Stromsensoren den linearen Messbereich verlassen. Die Simulationsergebnisse werden dabei wieder in einer Tabelle für die verschiedenen Konfigurationen zusammengefasst.

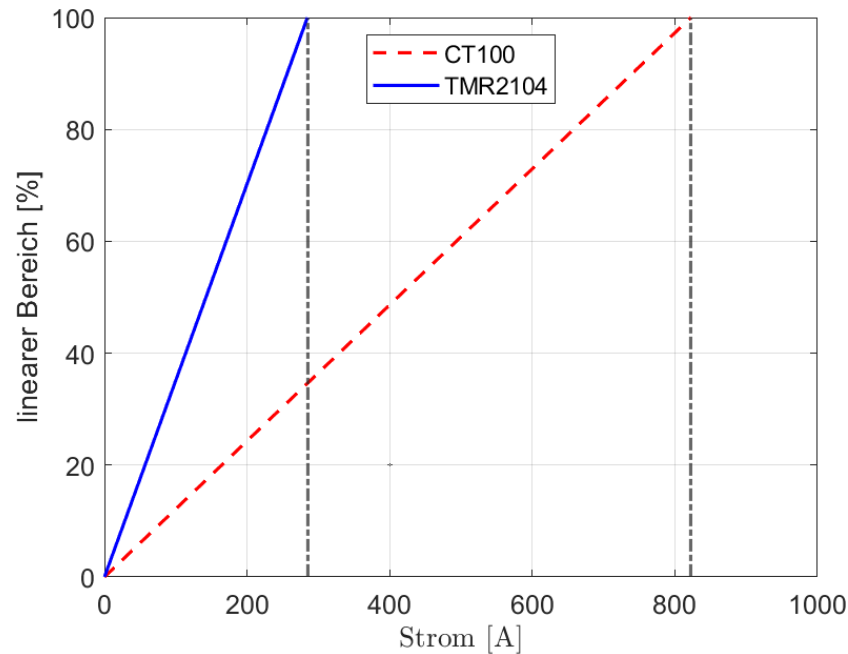


Abbildung 4.11: Vergleich der linearen Bereiche der Stromsensoren bei verschiedenen Strömen und runder geschlitzter Stromschiene.

Als Beispiel wird hier der Aufbau des runden Kupferleiters mit zwei gegenüberliegenden Schlitzten aus Abschnitt 4.1.3 betrachtet. In Abb. 4.11 lässt sich der Verlauf des linearen Bereichs der beiden verschiedenen Stromsensoren bei ansteigenden Strömen betrachten. Beim Vergleich beider Sensortypen fällt auf, dass der Sensor TMR2104 bei gleichem Strom einen größeren Teil des linearen Bereichs ausnutzt, was bereits in Kapitel 3 bei der Sensorcharakterisierung deutlich wurde. Denn die Steigung der Kennlinie des Sensors TMR2104 im linearen Bereich ist größer als die des Sensors CT100. Das bedeutet aber im Umkehrschluss, dass mit dem TMR2104 Sensor nicht so hohe Ströme gemessen werden können wie mit dem Sensor CT100. Zumindest ist das der Fall, sollten die Sensoren an der selben Stelle positioniert werden. Wird der Sensor TMR2104 weiter weg vom stromführenden Leiter positioniert, um höhere Ströme messen zu können, würde dies im gleichen Zuge die Empfindlichkeit im niedrigen Strombereich beeinflussen und verschlechtern.

Der maximal zu erreichende Strom im linearen Bereich für die jeweiligen Sensortypen und Leiterkonfigurationen kann der Tabelle 4.4 entnommen werden. Der höchste mögliche Strom tritt bei beiden Sensoren für eine runde Stromschiene mit dem Durchmesser

von 10 mm auf. Diese Simulation wurde zusätzlich durchgeführt, um einen direkten Vergleich mit dem Durchmesser der geschlitzten Stromschiene zu ermöglichen. Zudem kam der Aufbau mit einem Durchmesser von 10 mm auch bei den Kalibrierungsmessungen in Abschnitt 6.3 zum Einsatz, sodass ein direkter Vergleich mit den dort erzielten Ergebnissen möglich ist.

Tabelle 4.4: Maximaler Strom im linearen Bereich der Sensoren und unterschiedlichen Leitergeometrien.

Leitergeometrie	max. Strom CT100 [A]	max. Strom TMR2104 [A]
rechteckig	512	177
rund	403	140
rund 10 mm Durchmesser	872	302
rund geschlitzt	825	285
Stromschikane	533	185

Die Abbildung 4.12 zeigt die Ausgangsspannung von beiden Sensoren in mV pro VCC für die Ströme im Bereich bis kurz über einem Ampere. Dies ist auch hier wieder für den Aufbau der runden Stromschiene mit zwei gegenüberliegenden Schlitzten dargestellt. Wie es nach der Kennlinienaufnahme und Auswertung in der Charakterisierung zu erwarten war hat der Sensor TMR2104 eine höhere Ausgangsspannung als der Sensor CT100. Das bedeutet gerade im niedrigen Strombereich ist der Sensor CT100 anfälliger für Störungen, weil er für denselben Strombereich einen viel kleineren Ausgangsspannungsbereich besitzt. In der Abbildung ist erkennbar, dass die Steigung geringer ausfällt. Zudem beträgt die Ausgangsspannung des Sensors CT100 etwa $\frac{1}{8}$ der des Sensors TMR2104. Somit können bereits kleine Störeinflüsse, die beispielsweise geringe Spannungen induzieren, dazu führen, dass das Nutzsignal vollständig überlagert wird.

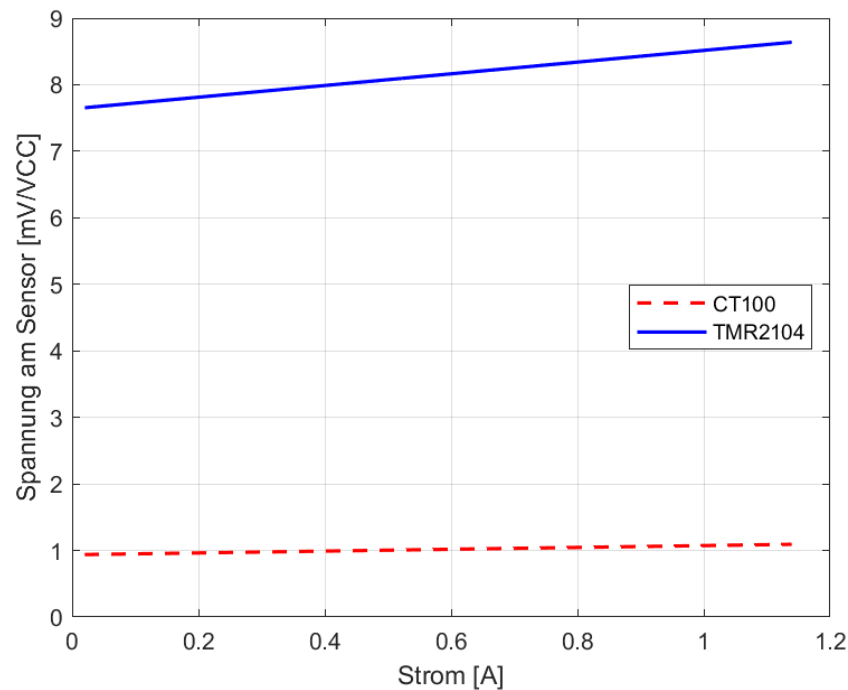


Abbildung 4.12: Sensorausgangsspannung der Stromsensoren bei verschiedenen Strömen und runder geschlitzter Stromschiene.

4.3 Zusammenfassung Simulationsergebnisse

Die Simulationen der verschiedenen Leitergeometrien und Sensorkonfigurationen haben gezeigt, dass es durchaus einen Unterschied macht, wie die Sensoren angeordnet sind und was für eine Stromleitergeometrie ausgewählt wird. Zum einen haben die Simulationen die unterschiedlichen Aussteuerungen des linearen Bereichs bei selber Strombelastung hervorgehoben. Außerdem konnte im Abschnitt für die Störeinflüsse analysiert werden, dass die verschiedenen Konfigurationen unterschiedlich stark auf externe inhomogene Störung reagieren. Zu guter Letzt beeinflusst die gewählte Konfiguration auch den maximalen Strom, welcher gemessen werden kann ohne den linearen Bereich der Sensoren zu verlassen.

Folgende Tabelle vergleicht die Aussteuerungen der Sensoren bei einem Strom von 20 A für die unterschiedlichen Leitergeometrien:

Tabelle 4.5: Vergleich der prozentualen Nutzung des linearen Bereichs vom Sensor TMR2104 bei den unterschiedlichen Leitergeometrien.

Leitergeometrie	max. Nutzung [%] vom TMR2104
rechteckig	11,2 bis 12,6
rund	14,3
rund 10 mm Durchmesser	6,6
rund geschlitzt	7,0
Stromschikane	10,8

Anhand der erstellten Simulationen und deren Ergebnisse wird sich für den Leiteraufbau mit der geschlitzten runden Stromschiene aus Abschnitt 4.1.3 entschieden. In dem Aufbau messen die Sensoren durch das relativ homogene Feld in den Schlitten den größten Anteil der entstandenen magnetischer Feldstärke an der jeweiligen Sensorposition. Dadurch ist gerade bei geringeren Strömen das Verhältnis von der messbaren zur nicht messbaren magnetischer Flussdichte am besten und somit das Messergebnis möglichst genau. Darüber hinaus erlaubt der Versuchsaufbau mit einem Leiterdurchmesser von 10 mm die Erfassung der höchsten Ströme (vgl. Tabelle 4.4), ohne dabei den linearen Bereich der Sensoren zu überschreiten. Damit können Stromspitzen bis etwa 285 A mit dem Sensor TMR2104 gemessen werden. Zwar ist der maximal mögliche Strom bei der runden Stromschiene ohne Schlitz geringfügig höher, jedoch fällt der Vorteil der Messung im homogenen Feld stärker ins Gewicht als die minimal höhere Stromtragfähigkeit dieses Aufbaus.

5 Aufbau und Inbetriebnahme der gewählten Konstruktionsvariante

In dem Simulationskapitel 4 wurden verschiedene Möglichkeiten untersucht, wie die Sensoren um unterschiedlichste Leitergeometrien angeordnet werden könnten. Die Entscheidung fiel dabei auf die runde Stromschiene aus Kupfer mit zwei gegenüberliegenden Schlitzten (siehe Abb. 4.6). Die genauere Begründung ist dem Abschnitt 4.3 zu entnehmen. Zusammenfassend lässt sich insbesondere das homogene Feld aufgrund der sehr guten Ausnutzung des linearen Messbereichs in X-Richtung im Vergleich zur Y-Richtung sowie der Möglichkeit, die höchsten Ströme in der Spitze messen zu können, als Vorteil anführen.

5.1 Platinenentwurf

Für das Platinendesign wurde die Software Autodesk EAGLE in der Version 9.6.2 verwendet. Dies hat den Vorteil, dass dort die Platine mit einem CAD-Programm¹ (Fusion 360) desselben Herstellers verbunden werden kann. Somit konnte im CAD die aktuellste Version der Platine gut synchronisiert werden. Die CAD-Software wurde verwendet, um einen Platinenhalter zu entwickeln, welcher die Platine zentriert und im 90° Winkel zu der „runden“ Busbar hält. All dies ist nötig, um möglichst wiederholbare, genaue Messergebnisse zu erhalten und eine mechanische Stabilität der Platinen während der Messreihen zu gewährleisten.

¹Computer-Aided Design (computergestützte Konstruktion) (CAD)

5.1.1 Designidee und modulares Konzept

Die Platine soll folgende Designkriterien erfüllen:

- Auswahl der verwendeten Sensoren über Widerstandsbrücken
- Anschluss externer Verarbeitungsplatine über Stecker
- Befestigungsmöglichkeit der Platine an Halter auf der Busbar
- Platzierungsmöglichkeit von jeweils 2 Sensorpaaren pro Platine
- Leicht modifizierbar zur Nutzung für runde Stromschienen mit und ohne gefräste Schlitze für Sensoren

Die beschriebenen Punkte sorgen zum Großteil dafür, dass die Platine in Abb. 5.2 mit einem Design mehrere Anwendungsfälle abdeckt. Somit kann durch die Anpassung des Footprints für die Sensoren ganz einfach ein weiterer Sensortyp verwendet werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, die in die Mitte ragenden Teile der Platine für die Sensoren mit den Bezeichnungen IC1 und IC2 abzutrennen und dadurch Platz für eine runde Stromschiene ohne Schlitze zu schaffen. Die Sensoren mit den Bezeichnungen IC3 und IC4 können dann weiterhin die magnetische Feldstärke messen, welche durch den Stromfluss durch die Kupferstromschiene erzeugt wird. Diese Messung mit den äußeren Sensoren ist als bestätigende Kontrollmessung für die Simulation gedacht und spiegelt den späteren geplanten Anwendungsfall nicht wider. Die vier Bohrungen für M3-Schrauben in der Platine dienen zur Befestigung dieser auf dem Halter. Der Halter wiederum wird auf der Stromschiene montiert und sorgt dafür, dass die Platine exakt im 90°-Winkel zur Stromschiene ausgerichtet ist.

Das 3D-Design für den Halter der Platine, welcher in Abb. 5.1 schwarz dargestellt ist, wurde gleichzeitig mit der Platine entworfen, damit die Befestigungslöcher auf der Platine auch passend hinzugefügt werden konnten. Dabei musste darauf geachtet werden, dass die Schraubenköpfe keine Kollision mit Bauteilen verursachen und der Halter später mit geringem Spiel auf der Stromschiene sitzt. Zusätzlich sollte der Halter mit einer M3-Schraube gegen Verrutschen gesichert werden können. Die geplanten Schrauben sind dabei aus Nylon. Dies hat den Grund, dass keine metallischen Bauteile die magnetischen Felder um den elektrischen Leiter beeinflussen können.

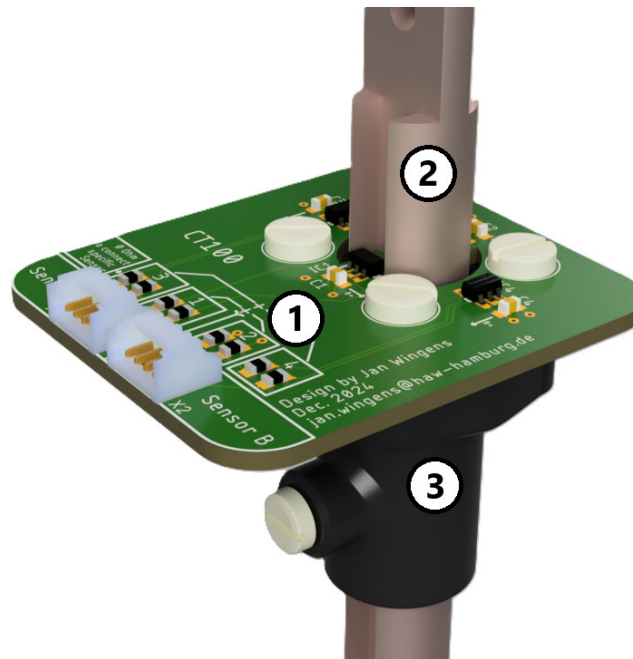


Abbildung 5.1: Rendering der Sensorplatine samt Busbar und Halter, erstellt mit Fusion 360. Gekennzeichnet sind ①: Sensorplatine; ②: Busbar mit Schlitz; ③: Platinenhalter.

Tabelle 5.1: Widerstandskonfiguration zur Auswahl entsprechender Sensoren auf der Platine. Es können jeweils nur die Sensorpaare 1&2 oder 3&4 verwendet werden.

Sensor	Stecker	R1 & R2	R3 & R4	R5 & R6	R7 & R8
IC1	X1	x			
IC2	X2		x		
IC3	X1			x	
IC4	X2				x

Die benötigten Stecker für den Anschluss an die separate Platine zur Verstärkung und Auswertung der Signale wurden an den Rand der Platine gesetzt. Zwischen den Sensoren und den Steckern sind je Anschluss Footprints in 0603 Größe² für 0Ω Widerstände vorgesehen. Es wurde sich für diesen Aufbau entschieden, damit mit einem Platinendesign verschiedene Versuche durchgeführt werden können. Somit ist es möglich, über die jeweiligen 0Ω Widerstände auszuwählen, welche Sensoren an die Stecker angeschlossen werden. Die Sensoren mit der Bezeichnung IC1 und IC2 sind für die geschlitzte Stromschiene gedacht und werden über die Widerstände³ R1 bis R4 an die Sensorstecker X1 und X2 angeschlossen. Wenn andere Sensoren verwendet werden sollen, ist dies dementsprechend über die Widerstände⁴ R5 bis R8 möglich. In Tabelle 5.1 sind die für die

²0603 ist eine genormte SMD Bauteilgröße für PCB's

³siehe Abb. 5.2 Kästen 1 & 2

⁴siehe Abb. 5.2 Kästen 3 & 4

Ansteuerung der jeweiligen Sensoren zu verwendenden Widerstände aufgeführt, um eine Übersicht darüber zu geben, welche Widerstände bestückt werden und welche frei bleiben. Ein Auszug aus der Platinendesignsoftware zeigt im Folgenden Abb. 5.2 das Design für die Platine mit dem Footprint für den Sensor CT100.

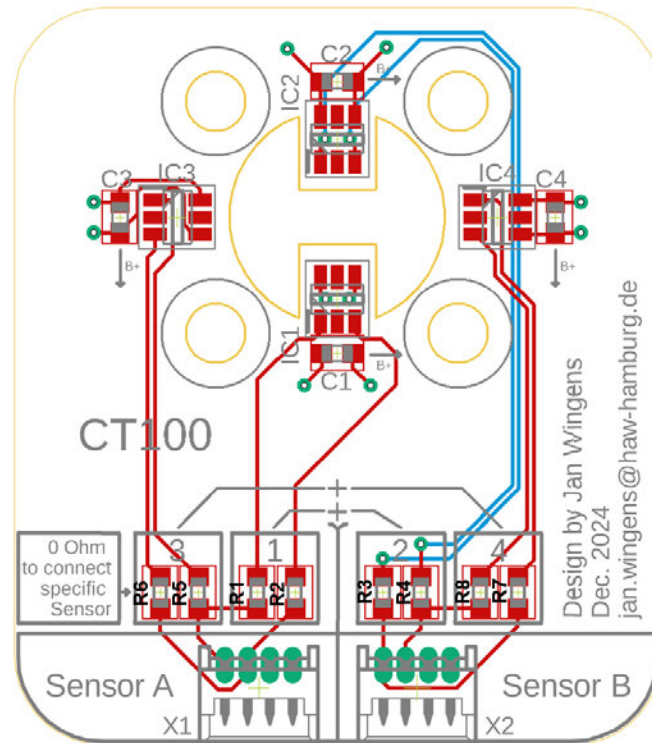
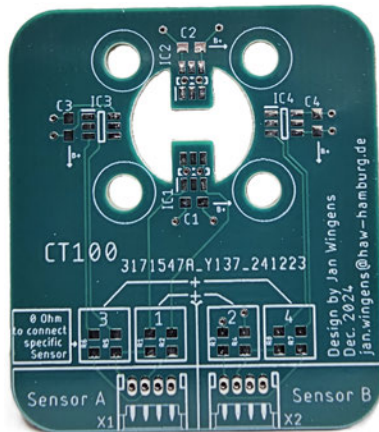


Abbildung 5.2: Auszug aus EAGLE mit dem Platinendesign für den Sensor CT100.

5.1.2 Bestückung und Funktionstest

Beim Bestücken der vier verschiedenen Platinen⁵ sollte auf eine möglichst genaue Platzierung der Sensoren geachtet werden. Das hat den Grund, dass die Sensoren nur in einer Achse Messwerte aufnehmen. Diese muss deshalb präzise orientiert sein, sonst würde der Anteil an gemessenen Feldlinien geringer werden und die Messung wird vor allem im niedrigen Strombereich ungenauer. Die Signale der beiden Sensoren werden zusammengeführt und so verarbeitet, dass die von externen Quellen erzeugten homogenen Magnetfelder, also Felder, die nicht von der Stromschiene stammen, herausgerechnet werden können. Diese Verrechnung erfolgt durch die differenzielle Verarbeitung der Messsignale über die Verstärker, wie in Abb. 5.4 dargestellt.

⁵rund und geschlitzt mit jeweils einmal dem Sensor CT100 und TMR2104



(a) Platine für den Sensor CT100



(b) bestückte Platine für den Sensor TMR2104

Abbildung 5.3: Unbestückte und bestückte Platinen im Vergleich.

Die Schaltung sorgt dafür, dass die vier einzelnen Signale von insgesamt zwei Sensoren zusammengefasst werden zu einem Ausgangssignal. Die Signale $V+$ und $V-$ von den Sensoren A und B sind differenziell zueinander und verlaufen rund um den Mittelpunkt von der halben Betriebsspannung, also $\frac{3,3V}{2} = 1,65V$. Die Signale durchlaufen zunächst die erste Stufe der Verstärkerschaltung, einen AD8604-Verstärker. Dieser arbeitet mit einer Verstärkung von 1 und dient primär der Impedanzwandlung. Da der AD8604 über einen hochohmigen Eingang verfügt, wird die Sensorbrücke nicht belastet. In der zweiten Stufe der Verstärkerschaltung werden die Signale durch den AD8277 differenziell verarbeitet, das heißt, sie werden voneinander subtrahiert. Der AD8277 arbeitet mit einer Referenzspannung von $1,65V$, wodurch das Ausgangssignal einen entsprechenden DC-Offset erhält und somit um diesen Wert angehoben wird. In der dritten und letzten Verstärkerstufe werden die zuvor durch die beiden Vorstufen aufbereiteten Signale der Sensoren A und B mithilfe des einstellbaren Instrumentenverstärkers AD8231 differenziell verarbeitet. Das resultierende Ausgangssignal liegt – abhängig von der gewählten Verstärkung – im Bereich von $0V$ bis $3,3V$.

Als Funktionstest der Platinen wurde nach dem Löten die Niederohmigkeit der Verbindung vom Stecker bis zu den Sensoren mit einem Multimeter überprüft. Bevor dann die Kalibriermessungen durchgeführt werden konnte, wurden die Sensorplatinen im Testaufbau verbaut und haben einen Strom von ca. $1,5A$ über die Stromschiene vorgegeben bekommen. Dann konnte über ein Oszilloskop überprüft werden, ob der jeweils verbaute Sensor auch ein plausibles Ausgangssignal liefert. Ebenso wurde überprüft, ob die Sensoren im Leerlauf ohne vorgegebenen Strom in der Mitte der Versorgungsspannung liegen, sich also im nicht angeregten Zustand im Nullpunkt befinden.

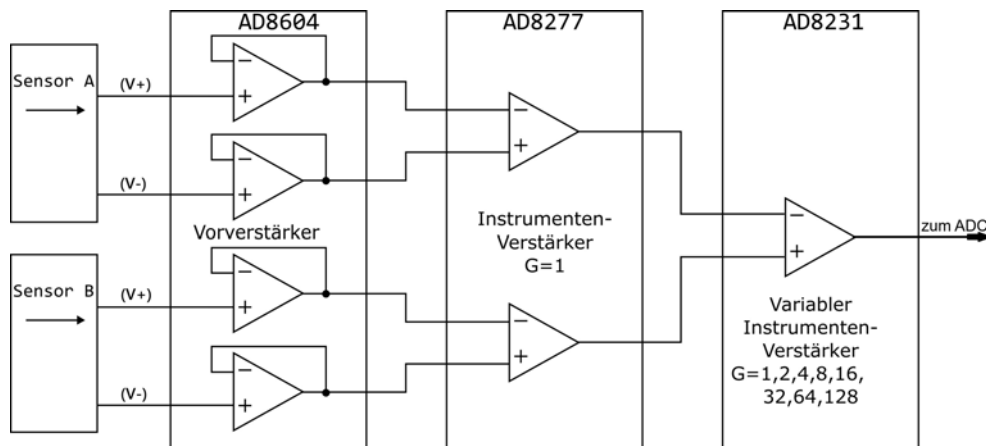


Abbildung 5.4: Verstärkerbeschaltung der externen Verarbeitungsplatine [18].

Die einzelnen Verstärkerstufen besitzen folgende Funktion:

1. Stufe: Impedanzwandler; 2. Stufe: Subtrahierer mit Gain von 1; 3. Stufe: Subtrahierer mit einstellbarer Verstärkung.

5.2 Softwaremodule für Versuchsaufbau und Auswertung

Für die Auswertung der Messreihen wurden mehrere Skripte in MATLAB vorbereitet. Eines der Skripte wird verwendet, um die Sensoren zu kalibrieren⁶. Das heißt, dass definierte Ströme vorgegeben werden und die mit der erstellten Platine aufgezeichneten Messergebnisse mit diesen Strömen verglichen werden. Dadurch ergibt sich eine spezifische Ausgangskennlinie für die vorliegende Sensorplatine. Bereits leichte Abweichungen in der Genauigkeit von der Platzierung der Sensoren auf den Löt pads der Platine können die Messergebnisse beeinflussen. Die im ersten MATLAB-Skript erstellte Kennlinie kann anschließend im auswertenden Mikrocontroller implementiert werden, wodurch eine auf die Sensorplatine angepasste und damit präzise Verarbeitung der Messergebnisse im späteren Anwendungsfall ermöglicht wird. Zudem erstellt das Skript eine Matrix, in der die Parameter der Geradengleichungen für alle Verstärkungsstufen sowie die daraus resultierenden maximal messbaren positiven und negativen Ströme hinterlegt sind.

Ein weiteres MATLAB-Skript⁷ wird erstellt, um die im geänderten Versuchsaufbau aufgezeichneten Daten hinsichtlich des Einflusses externer homogener Störfelder auszuwerten. Die aufgenommenen Daten umfassen den zeitlichen Verlauf des Stroms, der das externe homogene Störfeld erzeugt. Zusätzlich werden die Spannungen der Sensoren sowohl vor als auch nach der Verstärkung sowie ein Zeitvektor aufgezeichnet. Da die Messungen bei unterschiedlichen Verstärkungsstufen des Instrumentenverstärkers durchgeführt werden, wird die jeweils aktive Verstärkung ebenfalls den entsprechenden Datenpunkten zuge-

⁶siehe Anhang A.9 Seite 101

⁷siehe Anhang A.10 Seite 103

ordnet. Anschließend werden die aufgezeichneten Daten zeitlich aufgetragen und grafisch dargestellt, sodass sie im weiteren Verlauf analysiert und interpretiert werden können.

6 Versuchsreihen und Auswertung

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Messreihen beschrieben und die Ergebnisse analysiert. Zudem erfolgt ein Vergleich mit den Simulationen aus Kapitel 4.

6.1 Konzept und Konstruktion des Testaufbaus

Ein präzise definierter Strom ist erforderlich, um eine verlässliche Referenz für die Kalibrierung der Messungen bereitzustellen. Der Strom soll steuerbar sein und wird deshalb vom Leistungsverstärker [10] erzeugt. Zur Kontrolle dieses Stromes werden Shunt-Widerstände verwendet, welche in Reihe mit der Stromschiene geschaltet sind. Da der Strom keinen festen Wert haben soll, wird der Leistungsverstärker von einem Signalgenerator [11] gespeist und somit der Verlauf vorgegeben.

In der folgenden Abb. 6.1 ist einer der Messaufbauten zu sehen. Sämtliche Messungen finden am Messplatz innerhalb der in der Abbildung gezeigten Anordnung statt. Es werden lediglich einzelne Bauteile ausgetauscht und teilweise für die Messung unterschiedliche Verbindungen hergestellt. Der Aufbau in der Abbildung wird für die Kalibrierung und für Testmessungen der Sensoren mit der runden und geschlitzten Stromschiene verwendet. Der Funktionsgenerator, das Oszilloskop [12] sowie der Leistungsverstärker sind im Versuchsaufbau integriert. Die Messergebnisse werden direkt auf dem PC in MATLAB aufgezeichnet. Dabei erfolgt die Datenübertragung über eine USB-Verbindung zum Oszilloskop sowie zur Auswerteplatine, die die Sensordaten der Sensorplatine¹ erfasst und verarbeitet.

¹siehe Kapitel 5 Seite 35 Abb. 5.1

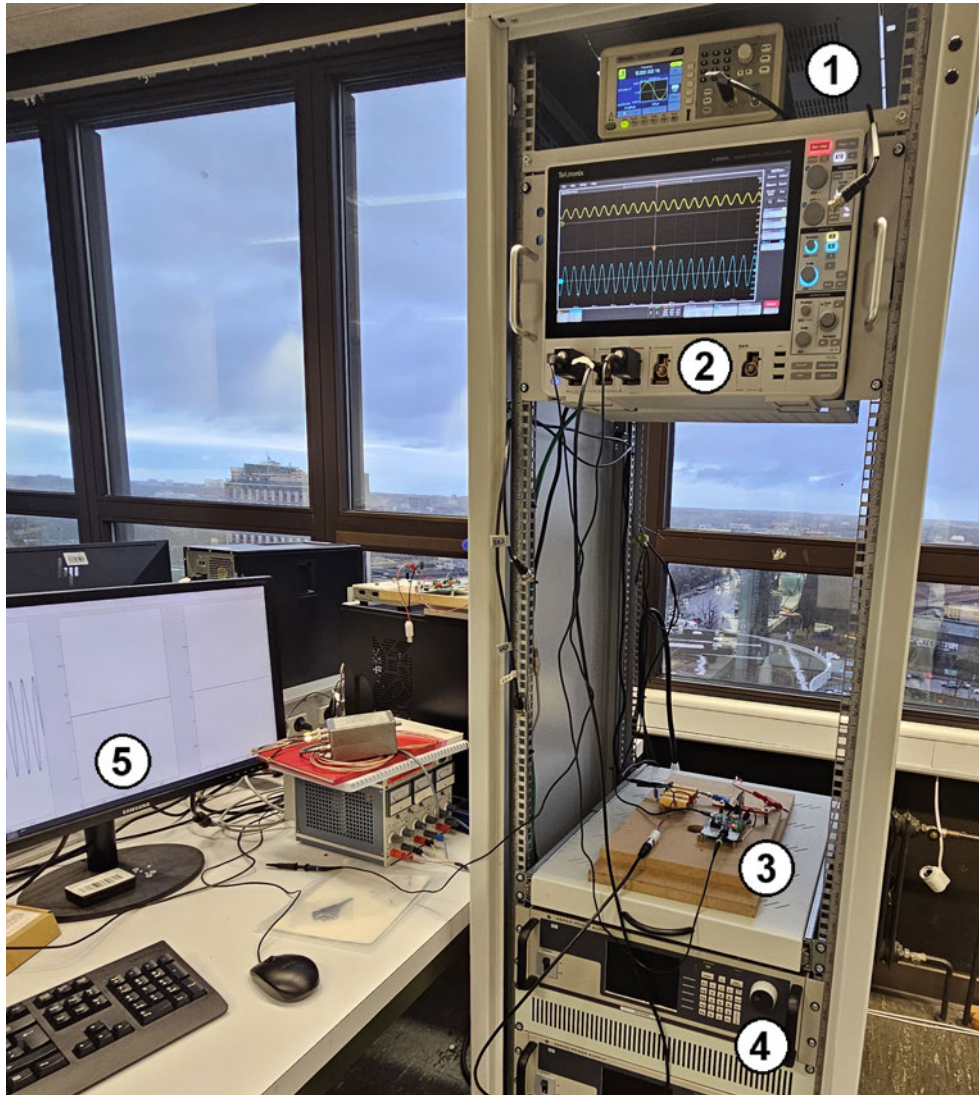


Abbildung 6.1: Messaufbau für diverse Versuchsmessungen. Hier mit dem Aufbau für die Kalibrierung der Sensoren. Gekennzeichnet sind ①: Funktionsgenerator [11]; ②: Oszilloskop [12]; ③: Stromschiene, Sensorplatine, Shunt-Widerstände und Auswertungsplatine montiert auf Holzplatte; ④: Leistungsverstärker [10]; ⑤: Bildschirm vom PC, welcher Daten mit MATLAB-Skript aufgezeichnet hat.

Der Messaufbau erfolgt gemäß der vorherigen Beschreibung in einem modularen Metallgestell. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Sensorplatine wird in Kapitel 5, Abschnitt 5.1, hinsichtlich Konzept, Aufbau und Funktion beschrieben. Als Referenz für den gemessenen Strom werden Leistungswiderstände verwendet, welche zu einem Messwiderstand mit $1\,\Omega$ verschaltet wurden. Der detaillierte Aufbau der Sensorplatine in Verbindung mit der Stromschiene, den Messwiderständen sowie der auswertenden Platine ist in Abb. 6.2 dargestellt. Für die Störfeldmessung wird dieser Aufbau angepasst und mit einer Helmholtzspule erweitert. Das Bild für diesen Aufbau ist im Abschnitt 6.4 zu sehen.

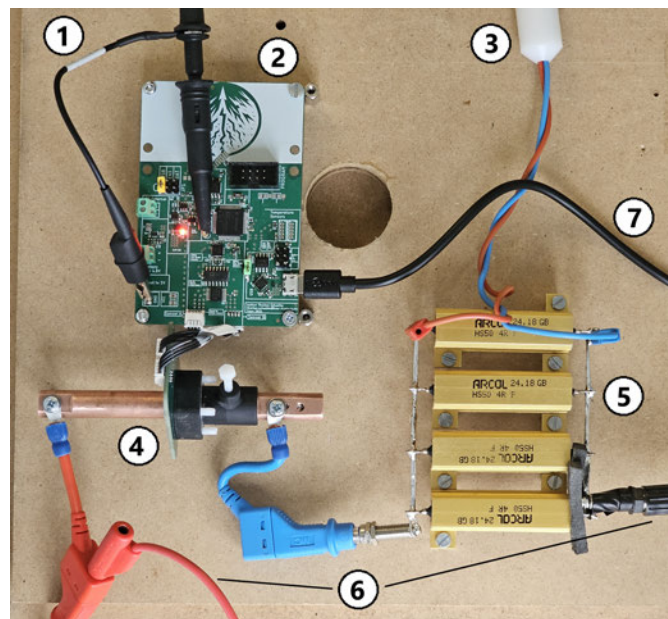


Abbildung 6.2: Messaufbau der Sensorplatine für die Kalibrierung und Strommessung. Gekennzeichnet sind ①: Messung am Ausgang der Verstärkerschaltung (s. Abb. 5.4); ②: Platine zur Auswertung der Messergebnisse; ③: Strommessung über Messwiderstand; ④: Kupferbusbar mit Sensorplatine (s. Abb. 5.1); ⑤: Messwiderstände verschaltet zu $1\,\Omega$; ⑥: Ausgänge des Leistungsverstärkers; ⑦: Versorgungsspannung, Kommunikation, Einstellung der Verstärkung über USB.

Zur übersichtlicheren Darstellung des Messaufbaus wurde die Skizze in Abb. 6.3 angefertigt.

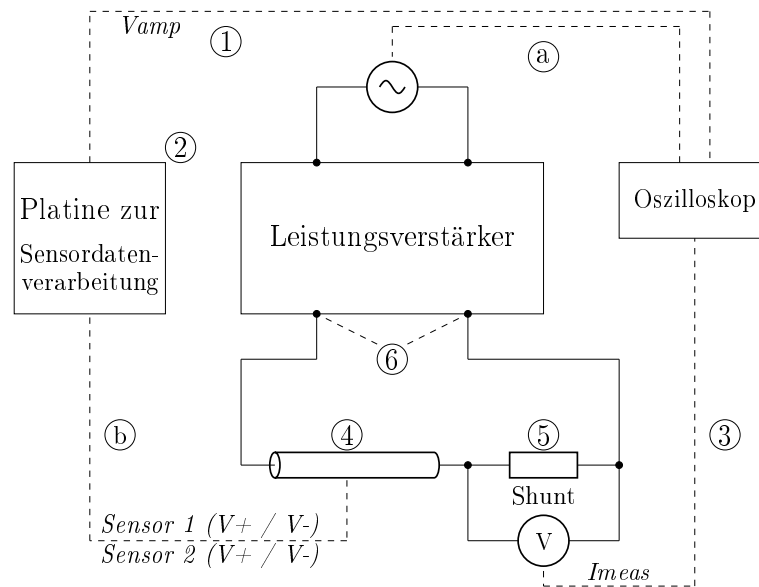


Abbildung 6.3: Blockschaltbild für den Messaufbau der Kalibrierungsmessung. Gekennzeichnet sind ①: Tastkopf zur Messung am Ausgang der Verstärkerschaltung; ②: Platine zur Auswertung der Messergebnisse mit integrierter Verstärkerschaltung; ③: BNC-Kabel mit Messadapter zur Messung der Spannung über dem Shuntwiderstand; ④: Stromschiene mit Sensorplatine (aufgebaut wie in Abb. 6.2); ⑤: Shunt-Messwiderstände verschaltet zu einem Wert von $1\,\Omega$; ⑥: Ausgänge des Leistungsverstärkers; ⑦: BNC-Kabel zur Messung des Signals vom Funktionsgenerator, welches den Leistungsverstärker speist; ⑧: Anschlussleitungen zwischen Sensorplatine und Platine zur Sensordatenverarbeitung.

Für die verschiedenen Messungen wird die Sensorplatine im Messaufbau² ausgetauscht, sodass mit beiden Sensoren separat gemessen werden kann. Zur Durchführung der Störfeldmessung mit einem homogenen Feld wird der im Bild unter ⑤ aufgeführte Teil durch eine Helmholtzspule ersetzt, die zur Erzeugung des Störfeldes mit Strom durchflossen wird. Die Sensorplatine wird dann in der Spule platziert und mit einem Permanentmagneten angeregt. Näheres dazu kann dem Abschnitt 6.4 entnommen werden.

6.2 Mess- und Versuchsplan

Ziel der Messungen ist, die Sensorplatine mit den verbauten Sensoren zu kalibrieren. Außerdem sollen die Ergebnisse der Kalibrierung mit den Ergebnissen aus der Simulation verglichen werden. Dabei spielt insbesondere der maximal mögliche Strom eine Rolle, bei dem das System noch im linearen Messbereich arbeitet und der Spannungsbereich von 0 V bis 3.3 V weder über- noch unterschritten wird.

²siehe Abb. 6.3, Nummer ④

Kalibrierung:

Die bereits genannten Messwiderstände aus Abb. 6.2 werden für die Vergleichsmessung genutzt, wobei die erfassten Messwerte als Grundlage für die Kalibrierung dienen. Diese Messwerte werden mit einer Abtastrate von 50 kHz aufgezeichnet und durch den sich mit 10 Hz periodisch wiederholenden Strom, welcher von dem Leistungsverstärker [10] erzeugt und durch den Frequenzgenerator [11] gesteuert wird, kann eine Mittelwertbildung erzielt werden. Um die Kalibrierung abzuschließen, wird dann dem Messergebnis der Sensorplatine der jeweilige Stromwert aus der Referenzmessung zugeteilt und eine Kalibrierungskennlinie erzeugt. Diese Kennlinie kann dann in dem auswertenden Mikrocontroller hinterlegt werden. Zum Erstellen dieser Kennlinie wird eine lineare Regression durchgeführt, wobei in MATLAB die Funktion „polyfit“ eingesetzt wird, die unter Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate die optimalen linearen Koeffizienten berechnet. Die Funktion passt eine lineare Funktion der Art „ $y = m \cdot x + b$ “ an die Datenpunkte an, wobei die Gerade so gewählt wird, dass die Summe der quadratischen Abweichungen zwischen den Y-Werten der Datenpunkte und der Regressionsgeraden minimal ist. Diese Methode wurde verwendet, da sie robust gegen zufällige Messfehler ist und sie wird als Standardmethode für die lineare Regression verwendet.

Testverfahren für externe homogene Störfelder:

Die letzte Messreihe beschäftigt sich mit externen Störfeldern. In diesem Fall soll überprüft werden, ob die differenzielle Verarbeitung der Messergebnisse durch die Verstärkerschaltung homogene Störfelder aus den Ergebnissen entfernt, sodass fehlerfreie Daten vorliegen. Das Störfeld wird dabei durch eine Helmholtzspule vorgegeben und die Sensorplatine erhält durch einen Permanentmagneten eine Anregung der Sensoren. Der konkrete Ablauf lässt sich wie folgt beschreiben:

Zuerst liegt kein Störfeld an und die Sensoren befinden sich im Leerlauf. Dann wird das Störfeld kurz angeschaltet und wieder abgeschaltet. Daraufhin wird der Permanentmagnet zum Sensor geführt, um diesen in einen Arbeitspunkt zu bringen. Dort wird dann wieder kurz das Störfeld an- und wieder abgeschaltet. Abschließend wird der Magnet wieder entfernt und die Sensoren befinden sich im Leerlauf. Während der Messung werden im MATLAB-Skript wieder alle Daten für die spätere Auswertung aufgezeichnet.

6.3 Messreihen zur Kalibrierung der Sensorplatinen

Zur Evaluation der erstellten Platinen und zur Überprüfung der Simulation werden mehrere Messreihen durchgeführt. Dabei werden sowohl die runde Stromschiene als auch die Variante mit gegenüberliegenden Schlitten untersucht. Obwohl sich zuvor für die Stromschiene mit den Schlitten entschieden wurde, werden beide Konfigurationen kalibriert,

um die Ergebnisse mit den vorherigen aus den Simulationen zu vergleichen. Das Ziel besteht darin, die Stromschienen mit einem definierten Stromverlauf zu beaufschlagen und die von der Sensorplatine erfassten Messwerte aufzuzeichnen und auszuwerten. Anhand der erhobenen Daten können dann Kennlinien erstellt werden. Mit diesen ist es möglich, die Sensoren in der ausgewählten Messkonfiguration für die Strommessung einzusetzen.

6.3.1 Messreihe 1 - Kalibrierung der runden Stromschiene

Die Kalibrierung wurde nach dem zuvor beschriebenen Ablauf durchgeführt. Zur Auswertung wurde das MATLAB-Skript im Anhang A.9 verwendet. Das Skript lädt zuerst die aufgezeichneten Daten in den MATLABB-Workspace. Dann enthält der Code zwei große Schleifen, welche jeweils acht Durchläufe für einen der Sensoren vollziehen. Jeder Durchlauf ist für die Auswertung einer Verstärkung gedacht. Die Datenpunkte für jede Verstärkung werden in einer Grafik eingezeichnet³ und mithilfe der Funktion „polyfit“ wird eine Geradengleichung gefunden, welche die Verteilung der Datenpunkte möglichst genau beschreibt. Die polyfit-Funktion führt dabei, wie in Abschnitt 6.2 bereits erwähnt, eine lineare Regression durch und nutzt die Methode der kleinsten Quadrate. Alle Ergebnisse werden in einer Matrix gespeichert und sind der Tabelle 6.1 zu entnehmen.

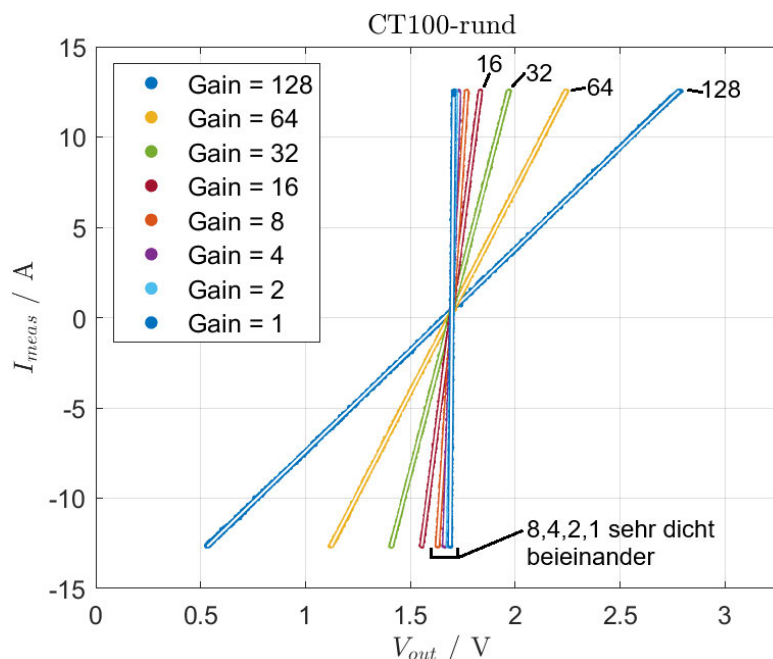


Abbildung 6.4: Kennlinien bei Kalibrierung des Sensors CT100 und runder Stromschiene für mehrere Verstärkungen. Die weiße Linie innerhalb der Datenpunkte stellt für die jeweiligen Verstärkungen die erstellte Kennlinie anhand der Geradengleichung nach der Kalibrierung dar.

³ siehe Abb. 6.4 und 6.5

In Abb. 6.4 stellt die X-Achse die jeweilige Ausgangsspannung nach der Verstärkerschaltung mit einstellbarer Verstärkung dar, während die Y-Achse den dazugehörigen Strom in Ampere zeigt. Der gesamte angezeigte Bereich in X-Richtung entspricht den möglichen Ausgangsspannungen der Verstärkerschaltung. Diese kann Spannungen zwischen 0 V und 3,3 V ausgeben. Die Abb. 6.5 hat die gleichen Achseinstellungen. Auffällig ist jedoch, dass die Y-Werte bei der Messung für den Sensor TMR2104 geringer ausfallen als für den Sensor CT100. Das liegt an der steileren Geraden für die Sensorausgangsspannung, welche bereits bei der Charakterisierung in Kapitel 3 ermittelt wurde. Diese steilere Kennlinie sorgt dafür, dass die messbaren Ströme für den Sensor TMR2104 mit derselben Verstärkung wie der Sensor CT100 viel geringer ausfallen.

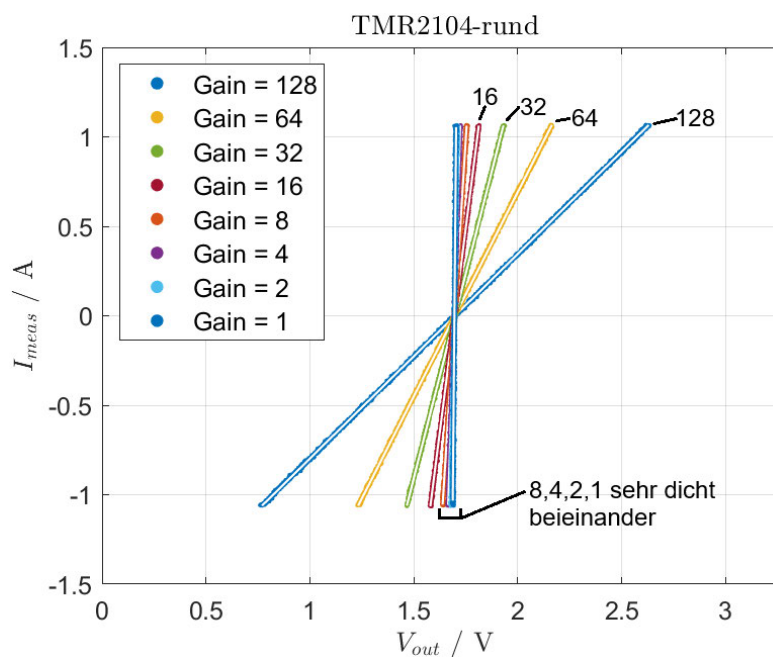


Abbildung 6.5: Kennlinien bei Kalibrierung des Sensors TMR2104 und runder Stromschiene für mehrere Verstärkungen. Die weiße Linie innerhalb der Datenpunkte stellt für die jeweiligen Verstärkungen die erstellte Kennlinie anhand der Geradengleichung nach der Kalibrierung dar.

In der Tabelle 6.1 sind alle Ergebnisse enthalten, die den Kennlinien entnommen werden können. Es ist für beiden Sensoren bei allen möglichen einzustellenden Verstärkungen die Steigung mit dem Y-Achsenabschnitt für die Geradengleichung angegeben. Außerdem wurden mit der Geradengleichung die maximalen Ströme in positiver und negativer Richtung berechnet, die im Spannungsbereich von 0 V bis 3,3 V für den Ausgang der Verstärkerschaltung gemessen werden können. Die Ergebnisse dieser Messungen bestätigen die Tendenzen der Simulationen aus dem Simulationskapitel im Abschnitt 4.2.2. Die Maximalstromwerte wurden dort durch die Simulation von verschiedenen Stromflüssen durch die Sammelschienen ermittelt. Beim direkten Vergleich weichen die Werte aus

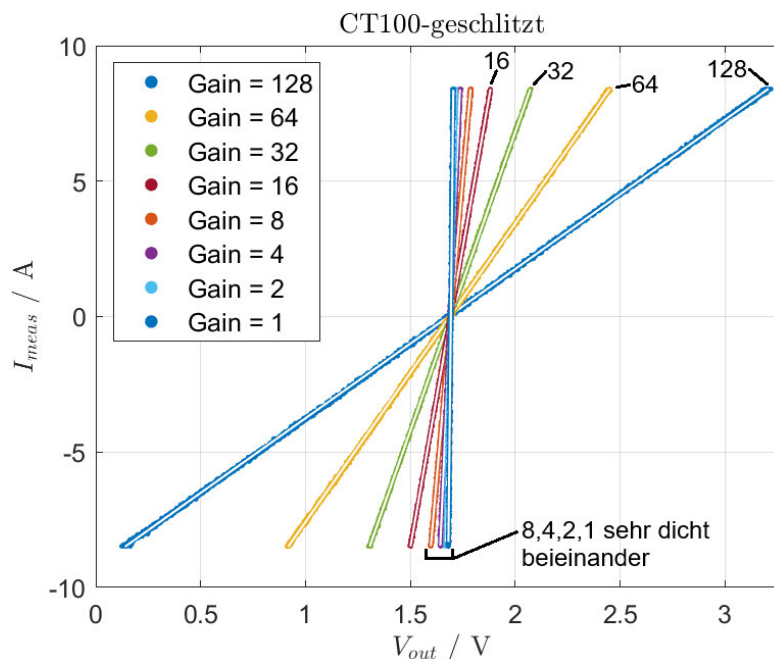
dem Simulationskapitel jedoch von denen der Kalibrierungsmessung ab. Ein Grund dafür ist, dass die Positionen der Sensoren im Leiteraufbau aufgrund von Fertigungstoleranzen nicht exakt übereinstimmen. Zudem beeinflusst die manuelle Positionierung der Sensoren auf der Platine im Messaufbau die Messergebnisse.

Tabelle 6.1: Ergebnisse nach Kalibrierung für die **runde** Stromschiene. In der Tabelle enthalten sind die Steigung und der Y-Achsenabschnitt für die Kalibriergerade der jeweiligen Verstärkung, sowie der jeweils maximal mögliche positive und negative Strom.

Sensor	Verstärkung	Steigung	Y-Achsenabschnitt/min. Strom [A]	max. Strom [A]
TMR2104	128	1,14	-1,94	1,83
	64	2,28	-3,87	3,65
	32	4,57	-7,76	7,32
	16	9,12	-15,47	14,63
	8	18,31	-31,06	29,37
	4	36,57	-61,95	58,74
	2	71,36	-120,96	114,53
	1	128,44	-217,74	206,12
CT100	128	11,21	-18,63	18,38
	64	22,48	-37,86	36,33
	32	45,0	-76,06	72,44
	16	90,14	-152,73	144,75
	8	180,93	-307,37	289,72
	4	365,53	-620,20	586,06
	2	733,62	-1246,3	1174,7
	1	1432,0	-2431,4	2294,2

6.3.2 Messreihe 2 - Kalibrierung der runden Stromschiene mit Schlitz

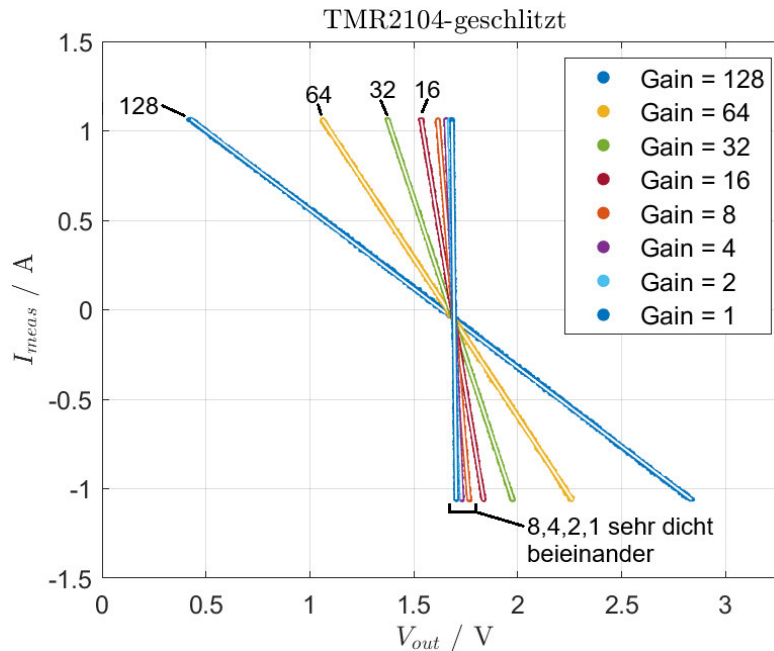
Auch für die Stromschiene mit zwei gegenüberliegenden Schlitz wurde eine Messung zur Kalibrierung der Sensorplatine durchgeführt. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte auf die gleiche Weise wie bei der Kalibrierung der runden Stromschiene. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Abschnitt 6.3.1. Alle Ergebnisse dieser Auswertung mit dem MATLAB-Skript sind in Tabelle 6.2 aufgeführt.



Abbildungung 6.6: Kennlinien bei Kalibrierung des Sensors CT100 und geschlitzter Stromschiene für mehrere Verstärkungen. Die weiße Linie innerhalb der Datenpunkte stellt für die jeweiligen Verstärkungen die erstellte Kennlinie anhand der Geradengleichung nach der Kalibrierung dar.

In den Abbildungen 6.6 und 6.7 ist die X-Achse auf den Bereich von 0 V bis 3,3 V beschränkt, da dieser Spannungsbereich – wie bereits bei der Kalibrierung der runden Stromschiene – den gesamten Ausgangsbereich der Verstärkerschaltung abdeckt. Wie bei der vorherigen Messung fällt auch hier auf, dass die Y-Werte für den Sensor CT100 einen größeren Bereich abdecken als für den Sensor TMR2104. Die Begründung bleibt dieselbe und lässt sich auf die größere Steigung der Geraden der Sensorausgangsspannung im Kapitel 3 zur Charakterisierung zurückführen. Durch die größere Steigung für den Sensor TMR2104 steigt die verstärkte Sensorausgangsspannung bei steigendem Strom schneller an als bei dem Sensor CT100. Dadurch ist der nutzbare Strommessbereich insgesamt geringer, sorgt aber gerade bei kleineren Strömen für eine höhere Genauigkeit der

Messung. Zudem besitzen die Kalibrierungskennlinien für den Sensor TMR2104 auf der geschlitzten Stromschiene eine negative Steigung. Das liegt vermutlich daran, dass die Stecker der Sensoren zwischen der Sensorplatine und der verarbeitenden Platine mit der Verstärkerschaltung beim Messaufbau vertauscht wurden.



Abbildungung 6.7: Kalibrierungskennlinien des Sensors TMR2104 und geschlitzter Stromschiene für mehrere Verstärkungen. Die weiße Linie innerhalb der Datenpunkte stellt für die jeweiligen Verstärkungen die erstellte Kennlinie anhand der Geradengleichung nach der Kalibrierung dar. Vermutlich aufgrund vertauschter Sensoranschlüsse im Messaufbau liegt eine negative Steigung vor.

Die Ergebnisse der ausgewerteten Kalibrierungsmessung für die geschlitzte Stromschiene können der Tabelle 6.2 entnommen werden. Dort sind die Steigungen sowie die Y-Achsenabschnitte für die Geraden der unterschiedlichen Verstärkungen eingetragen. Außerdem wurde im MATLAB-Skript⁴ anhand der Werte der Regressionsgeraden der maximal positive und negative Strom berechnet, der im Ausgangsspannungsbereich von 0 V bis 3,3 V liegt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle aufgeführt. Auch hier bestätigen sie die in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Tendenzen der vorherigen Simulation. Die exakten Werte aus der Simulation werden nicht erreicht. Wie bereits erwähnt, ist dies auf die abweichende Position der Sensoren im Leiteraufbau aufgrund von Fertigungstoleranzen sowie auf deren manuelle Platzierung auf der Platine zurückzuführen.

⁴siehe Anhang A.9 Seite 101

Tabelle 6.2: Ergebnisse nach Kalibrierung für die **geschlitzte** Stromschiene. In der Tabelle enthalten sind die Steigung und der Y-Achsenabschnitt für die Kalibriergerade der jeweiligen Verstärkung sowie der jeweils maximal mögliche positive und negative Strom.

Sensor	Verstärkung	Steigung	Y-Achsenabschnitt	min. Strom [A]	max. Strom [A]
TMR2104	128	-0,88	1,44	-1,47	1,44
	64	-1,76	2,93	-2,89	2,93
	32	-3,53	5,91	-5,74	5,91
	16	-7,07	11,92	-11,42	11,92
	8	-14,04	23,74	-22,60	23,74
	4	-28,23	47,79	-45,38	47,79
	2	-55,39	93,71	-89,08	93,71
	1	-103,88	175,94	-166,86	175,94
CT100	128	5,51	-9,26	-9,26	8,92
	64	11,02	-18,60	-18,60	17,76
	32	22,03	-37,26	-37,26	35,46
	16	44,26	-74,90	-74,90	71,17
	8	88,94	-150,56	-150,56	142,96
	4	179,62	-303,48	-303,48	289,26
	2	361,67	-612,16	-612,16	581,36
	1	716,76	-1213,4	-1213,4	1151,9

6.3.3 Zusammenfassung der ausgewerteten Messreihen zur Kalibrierung

Die Kalibrierungsmessungen der Sensorplatinen zeigen, dass der Sensor TMR2104 insbesondere im unteren Strombereich eine höhere Auflösung bietet als der Sensor CT100. Dies lässt sich anhand der Regressionsgeraden für die unterschiedlichen Verstärkungen erkennen. Der TMR2104 ist in der Lage, geringe Ströme über den gesamten Ausgangsspannungsbereich hinweg aufzulösen. Dadurch ist der maximal messbare Strom im Vergleich zum CT100 zwar deutlich geringer, jedoch bietet der TMR2104 eine höhere Präzision. Diese erhöhte Genauigkeit ist in der Impedanzspektroskopie von besonderem Vorteil. Die Ergebnisse der Messungen haben gezeigt, dass die Sensoren mit der runden Stromschiene ohne Schlitz höhere Ströme erreichen können. Dieses Ergebnis bestätigt die Beobachtungen aus den Simulationen im Abschnitt 4.2.2. Abweichungen bestehen lediglich in den konkreten Messwerten – diese stimmen nicht exakt mit den simulierten Werten überein – sowie in den deutlich höheren Strömen, die beim Sensor CT100 bei einer Verstärkung von 1 auftreten. Eine mögliche Erklärung hierfür liegt sowohl in der mechanischen Komponente der Sensorpositionierung als auch in der elektrischen Verstärkerschaltung, die zu der Abweichung beitragen kann. Darüber hinaus sind die sensitiven Bereiche innerhalb der Sensoren – anders als in der Simulation – nicht in einem Punkt gebündelt, sondern

räumlich voneinander getrennt. Dies führt zu weiteren Abweichungen in der Messung im Vergleich zur Simulation. Der Sensor TMR2104 weist dennoch einen deutlich geringeren Maximalstrom im Vergleich zum Sensor CT100 auf.

Je nach Einsatzbereich sind die messbaren Ströme mit dem Sensor TMR2104 möglicherweise nicht ausreichend. Es gibt dabei mehrere Ansätze, die man verfolgen könnte, um das Problem zu umgehen. Entweder könnte man die Verstärkung der Verstärkerschaltung dynamisch anpassen und somit an den benötigten Strombereich angleichen. Jedoch selbst wenn dies möglich ist, könnte es zu Problemen führen, wenn schnelle Stromimpulse auftreten. Auf diese könnte die dynamische Anpassung höchstwahrscheinlich nicht reagieren und die aufgetretene Stromspitze wird somit nicht gemessen.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin mehrere Sensorplatinen hintereinander auf der Stromschiene zu befestigen. Die auf den Platinen implementierten Verstärkerschaltungen sollten mit unterschiedlichen Verstärkungsfaktoren betrieben werden. Im Rahmen der Messdatenanalyse ist zu überprüfen, ob eine Verstärkerschaltung ihre maximale Ausgangsamplitude überschreitet und es dadurch zu Clipping, also einer Begrenzung bzw. Verzerrung des Ausgangssignals, kommt. Zudem ist sicherzustellen, dass die Sensoren vor der Signalverstärkung im linearen Bereich ihrer Kennlinie arbeiten. Bei hohen Strömen könnte dies eine Neukonzeption der Platinen erforderlich machen, bei der die Sensoren weiter von der Stromschiene entfernt angeordnet sind, um die lokale magnetische Feldstärke zu verringern.

6.4 Exemplarische Untersuchung zum Störeinfluss durch externe Magnetfelder

Nachdem im Kapitel 4 die Wirkung eines inhomogenen Störfelds aus verschiedenen Richtungen auf unterschiedliche Leitergeometrien simuliert wurde, wird in diesem Kapitel der Einfluss eines homogenen externen Störfelds analysiert. Dabei soll insbesondere überprüft werden, ob durch die differenzielle Verarbeitung der Sensordaten homogene Störeinflüsse effektiv unterdrückt werden können und so die Messergebnisse weitgehend unbeeinflusst bleiben.

6.4.1 Aufbau der Störfeldmessung

Der Messaufbau ist vergleichbar mit dem in Abbildung 6.1 (siehe Seite 41). Anstelle der dort unter ③ gezeigten Bauteile wird eine Helmholtzspule eingesetzt, die ein homogenes Magnetfeld erzeugt. In deren Mitte befindet sich die Sensorplatine, um das Feld zu messen. Der Messaufbau in Zusammenhang mit der Helmholtzspule ist in der folgenden Abbildung 6.8 dargestellt.

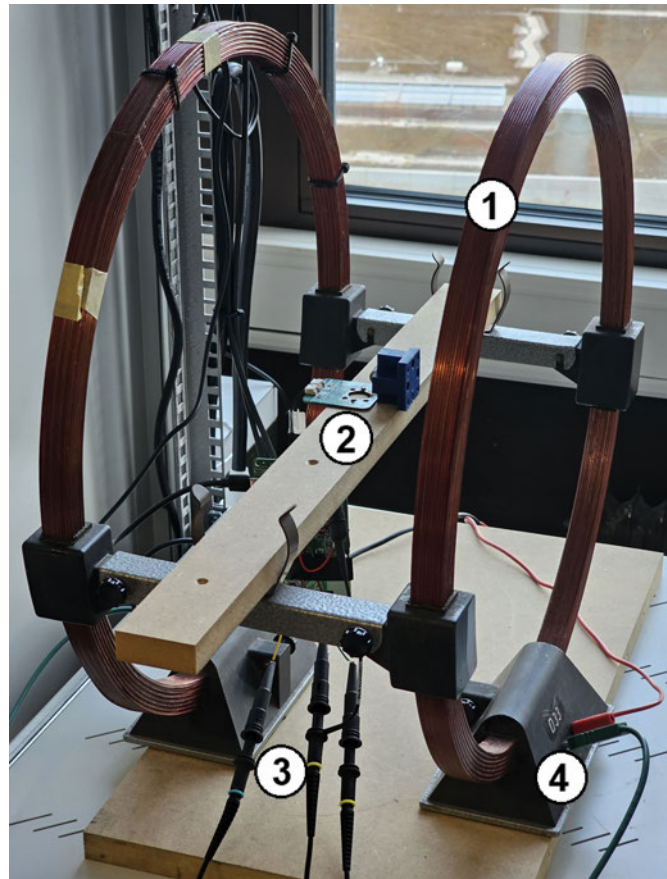


Abbildung 6.8: Helmholtzspule mit Sensorplatine und Permanentmagneten im Messaufbau zur externen Störfeldmessung. Gekennzeichnet sind ①: Helmholtzspule; ②: Sensorplatine mit Permanentmagneten(blau) und angeschlossener Verarbeitungsplatine nach unten hängend; ③: Tastköpfe zur Messung der einzelnen Sensorwerte und dem Ausgang nach der Verstärkung; ④: Anschlüsse der Helmholtzspule, angeschlossen an den Leistungsverstärker.

Das Magnetfeld verläuft innerhalb der Helmholtzspule homogen. Da das Feld jedoch in der Nähe der Spulen nicht ganz homogen ist, muss die Sensorplatine in der Mitte positioniert werden. Zur Veranschaulichung des Magnetfeldverlaufs wurde eine Simulation in

FEMM erstellt. Das Simulationsergebnis mit dem Verlauf des Magnetfeldes ist in Abb. 6.9 zu erkennen.

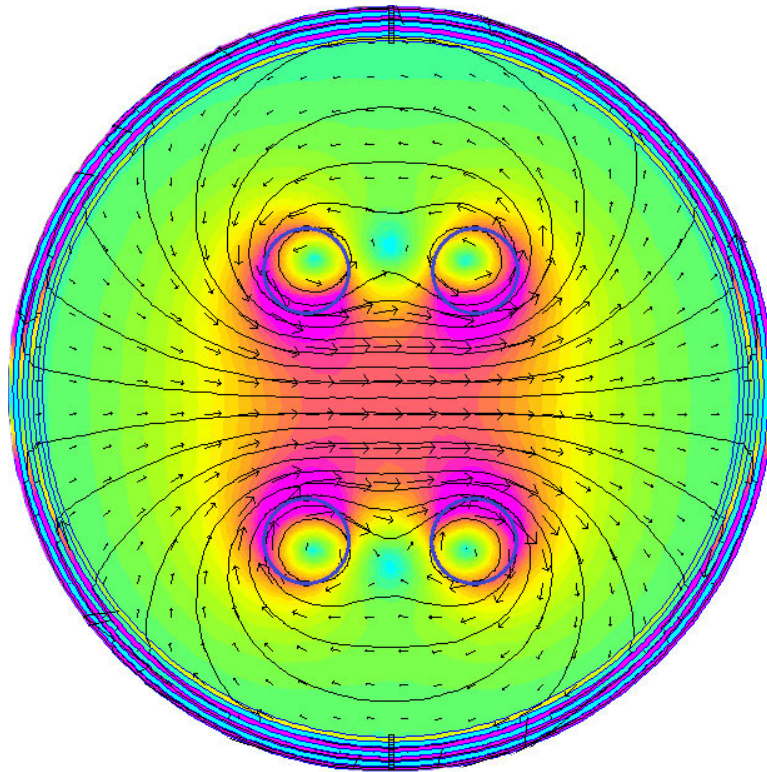


Abbildung 6.9: Visualisierung des Magnetfeldverlaufs einer Helmholtzspule mittels Simulation.

Einen Gesamtüberblick über den Messaufbau gibt die Skizze in Abb. 6.10. Diese zeigt schematisch, wie die verschiedenen im Messaufbau verwendeten Geräte untereinander verbunden sind. Der Aufbau ermöglicht es, durch das manuelle Hinzuführen oder Entfernen eines Magneten ein definiertes statisches Signal auf der Sensorplatine zu erzeugen. Auf diese Weise kann ein Stromfluss und das dadurch entstehende magnetische Feld simuliert werden.

Das Oszilloskop erfasst alle relevanten Signale und speichert sie zur späteren Auswertung. Aufgezeichnet werden die Signale beider Sensoren – jeweils vor und nach der Verstärkung durch den Instrumentenverstärker – sowie der Stromverlauf durch die Helmholtzspule. Diese dient der Erzeugung des homogenen Störfeldes. Zur Bestimmung der Feldstärke wird eine Hall-Sonde verwendet, die mit einem Feldstärkemessgerät verbunden ist. Die genauen Messwerte sind in der Versuchsauswertung im nächsten Abschnitt dargestellt.

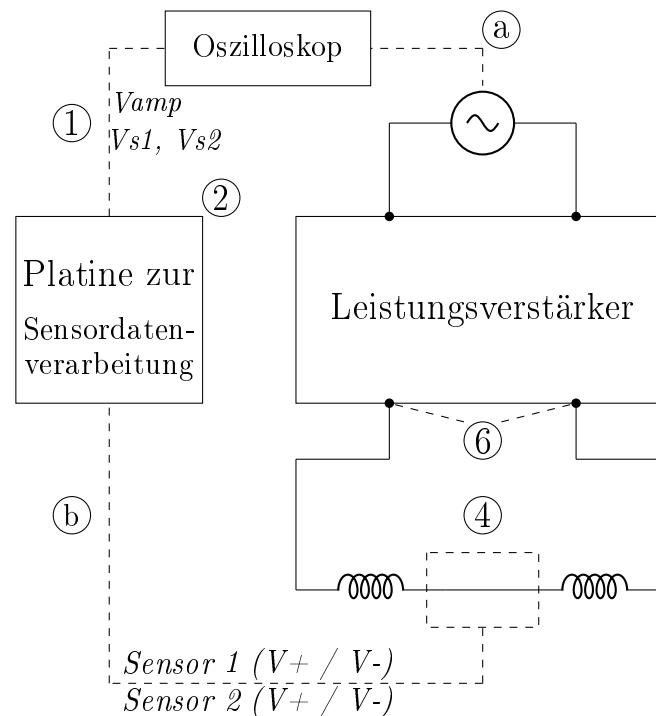


Abbildung 6.10: Blockschaltbild für den Messaufbau Störfeldmessung im homogenen Feld. Gekennzeichnet sind ①: Tastköpfe zur Messung vor und hinter dem einstellbaren Instrumentenverstärker; ②: Platine zur Auswertung der Messergebnisse mit integrierter Verstärkerschaltung; ④: Sensorplatte mit/ohne Permanentmagnet im Zentrum des homogenen Feldes (Helmholtzspule); ⑥: Ausgänge des Leistungsverstärkers; a: BNC-Kabel zur Messung des Signals vom Funktionsgenerator, welches den Leistungsverstärker speist und den Stromverlauf durch die Helmholtzspule darstellt; b: Anschlussleitungen zwischen Sensorplatte und Platine zur Sensordatenverarbeitung.

6.4.2 Erprobung homogener Störfelder mit Helmholtz-Spule

Zur Erprobung des Verhaltens der Sensoren in einem homogenen Störfeld werden zwei Messreihen durchgeführt. Die Messung wird einmal für den Sensor CT100 und einmal für den Sensor TMR2104 durchgeführt. Im nächsten Abschnitt 6.4.3 werden die Ergebnisse untereinander verglichen.

Die Abb. 6.11 ist in mehrere Abschnitte unterteilt. Diese stellen jeweils einen Teil des Ablaufs der Messung dar. Im Abschnitt ① bis ③ befinden sich die Sensoren im Leerlauf und dann wird im Abschnitt ② das Störfeld einmal kurz aktiviert und wieder deaktiviert. Danach wird ein Magnet zu den Sensoren gebracht, welcher dann einen elektrischen Stromfluss simuliert. Sobald sich die Änderung des magnetischen Feldes eingependelt hat bleibt die Ausgangsspannung ab dem Abschnitt ⑤ relativ konstant. Auch das Aktivieren

des Störfeldes im Zeitabschnitt ⑥ führt zu keiner Veränderung der Ausgangssituation. Ab Zeitabschnitt ⑧ wird der Magnet langsam entfernt, sodass sich die Sensoren anschließend wieder im Leerlauf befinden. Der MATLAB-Code, mit dem die Daten ausgewertet und die folgenden Grafiken erzeugt werden, ist im Anhang A.10 zu finden.

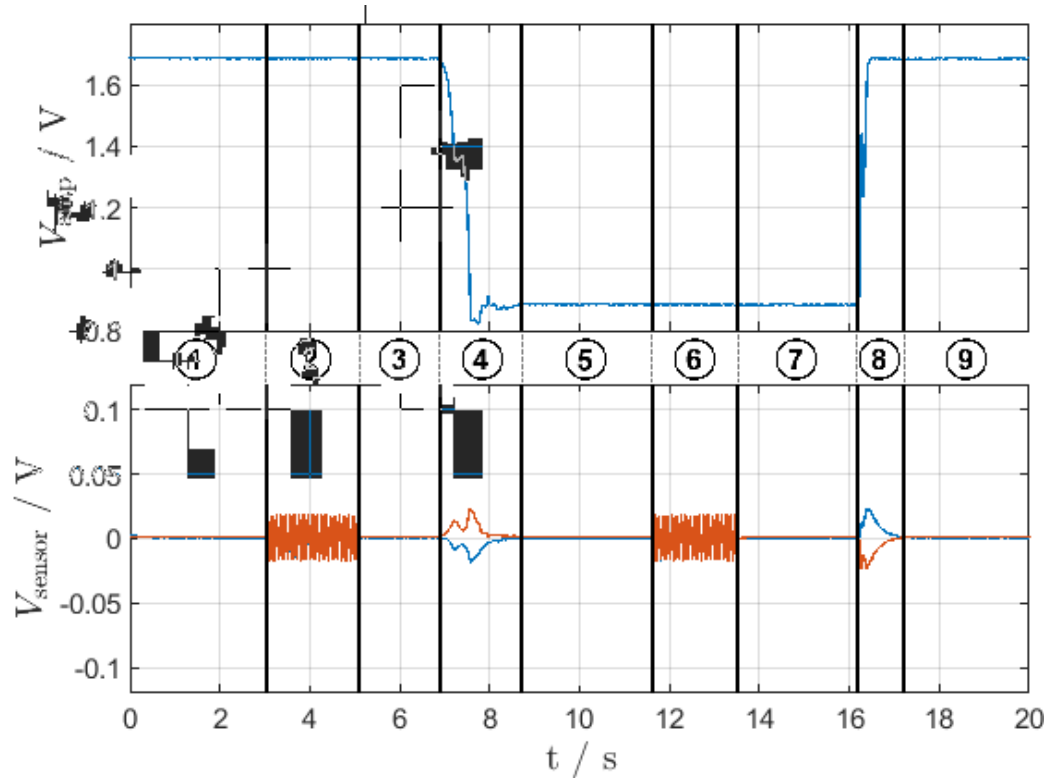
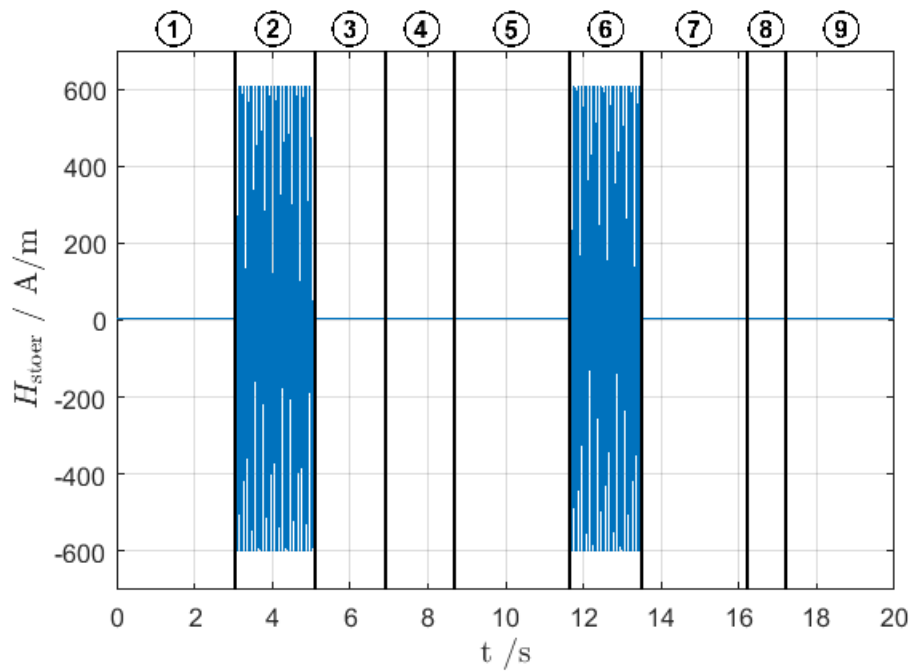
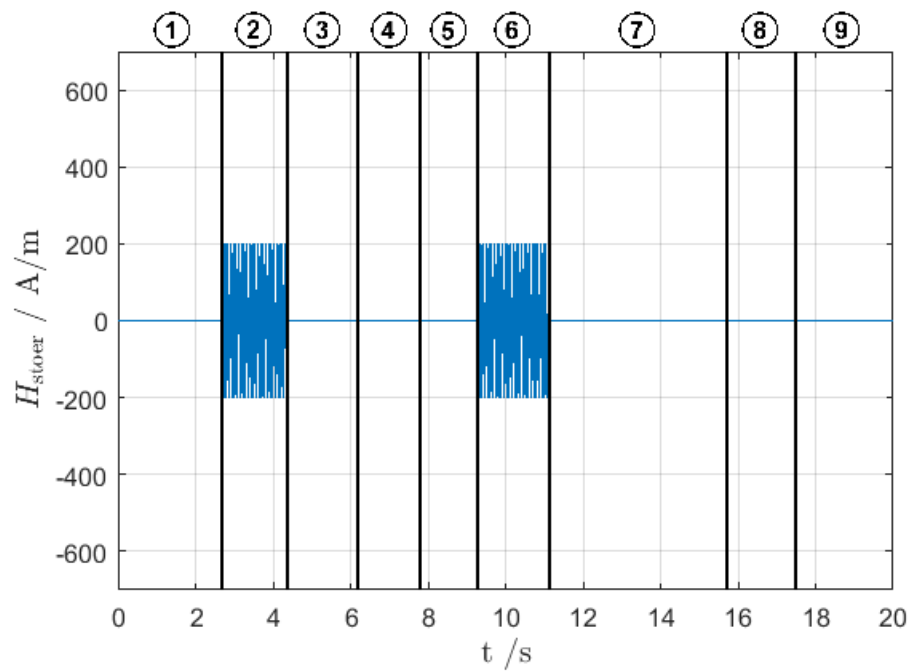


Abbildung 6.11: Visualisierung der Sensorspannungen des Sensors CT100 vor und nach der Verstärkung durch den Instrumentenverstärker. Die nummerierten Bereiche lassen sich wie folgt beschreiben: ①③⑨: kein Störfeld aktiv und kein Magnet zur Stromsimulation; ⑤⑦: kein Störfeld aktiv und Magnet simuliert einen Strom in beiden Sensoren; ②: Störfeld ist aktiv und kein Strom durch Magnet simuliert; ⑥: Störfeld aktiv und Magnet simuliert einen Strom; ④⑧: Momente in denen Magnet zu den Sensoren geführt und wieder entfernt wird.

Die Messung der verstärkten Ausgangsspannung erfolgte in DC-Kopplung, um den vollständigen Signalverlauf inklusive Gleichanteil erfassen zu können. Die Sensorspannungen im unteren Bereich der Abbildung hingegen wurden mit AC-Kopplung gemessen, wodurch ausschließlich zeitlich veränderliche Signalanteile dargestellt werden. Der Offset der Spannung liegt dabei bei 0 V. Das externe, durch die Helmholtzspule erzeugte homogene Störfeld sowie dessen zeitlicher Verlauf ist in Abbildung 6.12a dargestellt. Das resultierende magnetische Wechselfeld erreicht sowohl positive als auch negative Feldstärken von jeweils etwa $600 \frac{\text{A}}{\text{m}}$. Auch im unteren Bereich der Abbildung 6.11 lässt sich dieser Verlauf gut beobachten.



(a) Verlauf für Messung mit Sensor CT100



(b) Verlauf für Messung mit Sensor TMR2104

Abbildung 6.12: Visualisierung des Feldstärkeverlaufs für die Störfeldmessung beider Sensoren im homogenen Feld. Die nummerierten Bereiche lassen sich wie folgt beschreiben: ①③④⑤⑦⑧⑨: Störfeld durch Helmholtzspule ist nicht aktiv; ②⑥: Homogenes Störfeld wird durch die Helmholtzspule erzeugt.

Wenn man die Abb. 6.12b betrachtet und den Feldstärkeverlauf für die Störfeldmessung mit dem Sensor TMR2104 mit dem Verlauf des Sensors CT100 vergleicht, fällt auf, dass die magnetische Feldstärke bei ca. $\frac{1}{3}$ derjenigen des Sensors CT100 liegt. Der Grund dafür ist die steilere Kennlinie des Sensors TMR2104. Bei der Messung ist es somit möglich, mit einem geringeren magnetischen Feld bereits ein sichtbares Ergebnis zu erzielen. Dies wird in Abb. 6.13 dargestellt.

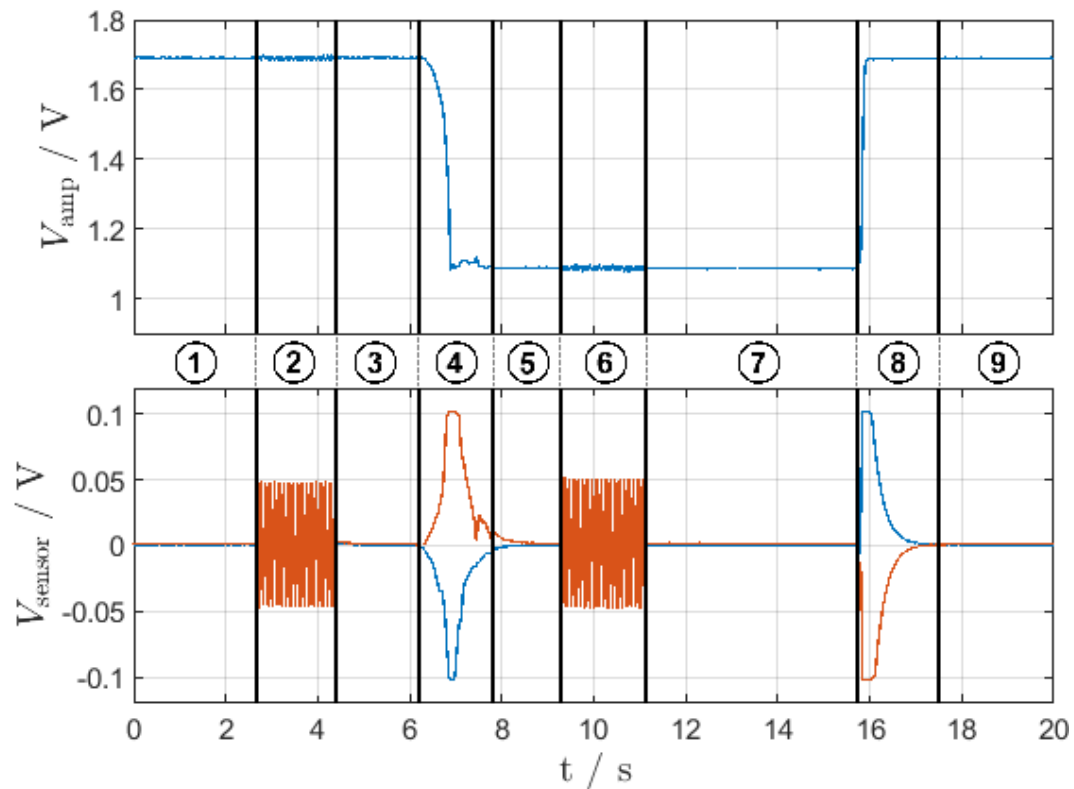


Abbildung 6.13: Visualisierung der Sensorspannungen des Sensors TMR2104 vor und nach der Verstärkung durch den Instrumentenverstärker. Die nummerierten Bereiche sind identisch zu denen für den Sensor CT100 in Abb.6.11.

Der Ablauf der Messung mit dem Sensor TMR2104 entsprach dem bereits beschriebenen Vorgehen beim anderen Sensor. Auch hier wurden die Sensorspannungen vor der Verstärkung im unteren Teil der Abbildung mit AC-Kopplung gemessen und die verstärkte Sensorspannung im oberen Abbildungsteil mit DC-Kopplung. Der Vergleich der Ergebnisse beider Sensoren und die genauere Betrachtung der Grafiken werden im nachstehenden Abschnitt durchgeführt.

6.4.3 Auswertung des Versuchs zu externen homogenen Störeinflüssen

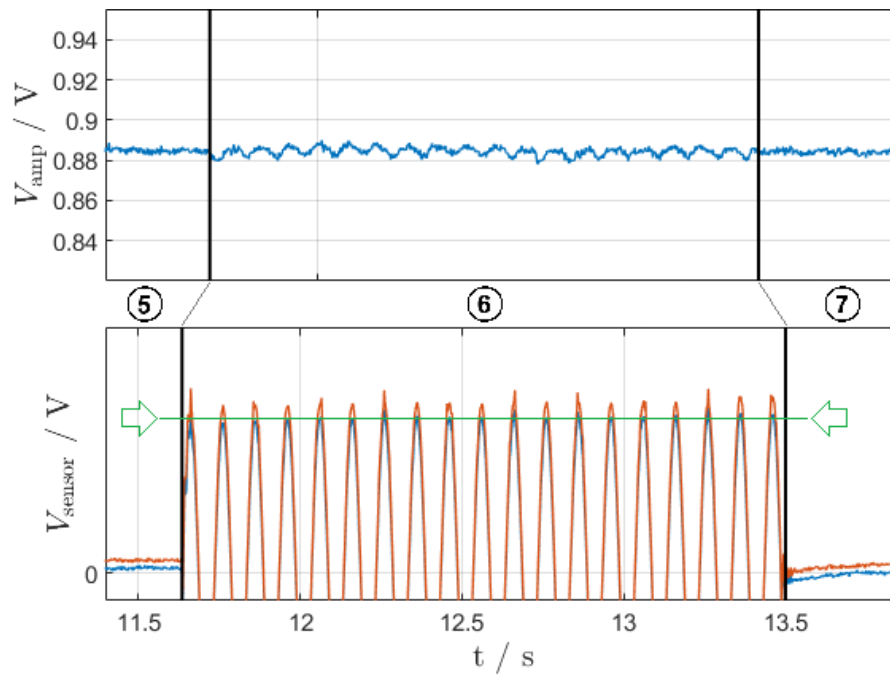
Wenn die Abbildungen 6.11 und 6.13, die die Sensorspannungen vor und nach dem Verstärker zeigen, verglichen werden, lässt sich beobachten, dass beim Sensor TMR2104 im unteren Teil der Grafik – also bei den Spannungen vor dem Instrumentenverstärker – ein deutlich größerer Ausschlag beim Hinzugeben und Entfernen des Magneten in den Bereichen ④ und ⑧ auftritt. Dies hängt damit zusammen, dass der Sensor TMR2104 empfindlicher ist und bei gleicher magnetischer Feldstärke⁵ eine größere Spannung ausgibt als der Sensor CT100. Dieses Verhalten wurde bereits in früheren Abschnitten dieser Arbeit beobachtet und erläutert. Dementsprechend ist die Sensorspannung, im Moment des aktiven Störfeldes bei den Nummern ② und ⑥, ebenfalls größer im Vergleich zum Sensor CT100.

Vergleicht man den oberen Teil der Grafiken, so zeigt sich beim Sensor TMR2104 ein Störbereich in der verstärkten Spannungskurve in den Bereichen ② und ⑥, was auf eine Beeinflussung des Signals durch das äußere Magnetfeld hindeutet.

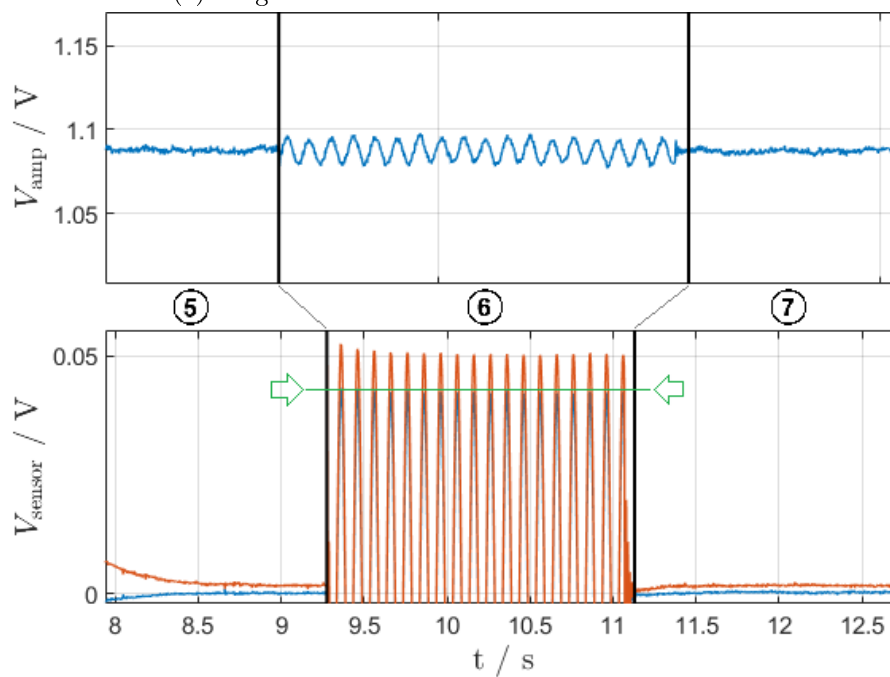
Um diese These zu stützen, ist in den nachfolgenden Abbildungen der Bereich um die Nummer ⑥ für beide Sensoren vergrößert worden. In Abbildung 6.14b ist deutlich zu erkennen, dass die verstärkte Sensorausgangsspannung eine größere Amplitude aufweist als die des anderen Sensors. Dabei sollte jedoch auch die unterschiedliche Skalierung der Achsen berücksichtigt werden. Auffällig ist zudem, dass die größere Amplitude der Ausgangsspannung in jenen Bereichen auftritt, in denen die Spannungen vor dem Instrumentenverstärker eine größere Differenz zueinander aufweisen. Diese Unterschiede sind vermutlich auf den internen Aufbau des Sensor-Packages, die Ausrichtung auf der Platine sowie auf produktionsbedingte Streuungen der Innenwiderstände zurückzuführen.

Insgesamt kann durch die Messungen jedoch bestätigt werden, dass beide Sensoren problemlos in einem homogenen Störfeld eingesetzt werden können. Dabei muss lediglich darauf geachtet werden, dass eine differenzielle Messung mit den Sensoren realisiert wird. Denn erst die differenzielle Verarbeitung ermöglicht es, das Störfeld herauszurechnen und ein verwertbares Ergebnis zu erhalten. Der Störanteil in der Messung mit dem Sensor TMR2104 beträgt etwa 3,2 % des eigentlichen Messwerts. Beim Sensor CT100 liegt dieser Wert bei rund 1,3 %. Um zu verhindern, dass die geringen Anteile des externen homogenen Störfelds das Messergebnis verfälschen, kann eine Mittelwertbildung der Messwerte erfolgen. Abhängig von der geforderten Reaktionszeit bzw. der Notwendigkeit zur Bereitstellung von Echtzeitwerten müssen jedoch die Zeitabstände oder die Anzahl der einbezogenen Messpunkte entsprechend begrenzt werden.

⁵beim Magneten eine magnetische Feldstärke im Sensor von 2 kA/m



(a) Vergrößerter Störbereich beim Sensor CT100



(b) Vergrößerter Störbereich beim Sensor TMR2104

Abbildung 6.14: Visualisierung des vergrößerten Störbereiches in der Störfeldmessung für beide Sensoren im homogenen Feld. Die Linie zwischen den Pfeilen markiert die durchschnittliche Amplitude von einem der beiden Sensorsignale. Die nummerierten Bereiche lassen sich wie folgt beschreiben: ⑤⑦: Störfeld aus und Sensoren durch Magnet angeregt; ⑥: Störfeld aktiv und Sensoren durch Magnet angeregt.

7 Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Aspekte der Anwendung von TMR-Sensoren im Kontext der Impedanzspektroskopie von Fahrzeugbatterien untersucht. Ziel war es, einen geeigneten Messaufbau zu realisieren, der zuverlässige Messergebnisse liefert und sich mit der TMR-Sensortechnologie umsetzen lässt. In der Zusammenfassung werden die zentralen Ergebnisse der einzelnen Kapitel zusammengeführt und ein Ausblick auf zukünftige Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten gegeben.

7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Ansätze zur Strommessung mit TMR-Sensoren im Rahmen der elektrochemischen Impedanzspektroskopie untersucht. Mithilfe von Magnetfeldsimulationen konnte ein geeigneter Aufbau ausgewählt werden. Daraufhin wurde eine eigene Sensorplatine entworfen, um diesen Aufbau praktisch zu erproben.

Zur Auswahl eines geeigneten TMR-Sensors wurden die Charakterisierungskennlinien zweier Sensortypen aufgenommen und miteinander verglichen. Der Sensor TMR2104 zeigte im linearen Bereich eine höhere Steigung sowie keine erkennbare Hysterese, was insbesondere bei kleineren Strömen zu einer geringeren Verstärkung potenzieller Störeinflüsse in der nachgeschalteten Verstärkerschaltung führt. Beide Sensoren arbeiten im erwarteten Feldstärkebereich der Anwendung für Ströme bis 20 A ($0,48 \frac{\text{kA}}{\text{m}}$) linear. Aufgrund der besseren Signalqualität bei geringen Strömen und der höheren Störunempfindlichkeit fiel die Wahl auf den Sensor TMR2104.

Die durchgeführten Magnetfeldsimulationen zeigten deutlich, dass sowohl die Geometrie des Stromleiters als auch die Anordnung der Sensoren einen entscheidenden Einfluss auf das Messergebnis haben. Unterschiede zeigten sich insbesondere im Aussteuerverhalten des linearen Sensorbereichs bei gleicher Strombelastung sowie in der Reaktion auf externe inhomogene Störfelder. Zusätzlich beeinflusst die Wahl der Konfiguration den maximal messbaren Strom ohne Verlassen des linearen Bereichs.

Auf Basis dieser Ergebnisse fiel die Entscheidung auf die Verwendung einer geschlitzten runden Stromschiene. Diese ermöglicht durch ein relativ homogenes Magnetfeld in

den Schlitten eine hohe Messgenauigkeit, insbesondere bei kleinen Strömen, da an den Sensorpositionen ein großer Anteil der magnetischen Flussdichte detektiert werden kann. Gleichzeitig erlaubt der gewählte Leiterdurchmesser von 10 mm Strommessungen bis etwa 285 A, ohne den linearen Bereich des TMR2104 zu überschreiten. Trotz einer minimal höheren Stromtragfähigkeit bei der ungeschlitzten Variante, überwiegt der Vorteil des homogenen Feldes in der geschlitzten Ausführung.

Beim Platinenentwurf wurde auf Vielseitigkeit geachtet: Das Layout unterstützt beide Sensortypen durch das Austauschen der Footprints vor der Platinenfertigung. Zudem erlaubt es zwei Messkonfigurationen: Zum einen eine Messung mit einer normalen runden Stromschiene, aber auch für eine Stromschiene mit gegenüberliegenden Schlitten, um dort ein homogenes Feld für die linearen Sensoren zu erzeugen. Um die Platine für die Nutzung mit einer runden Stromschiene umzurüsten, müssen lediglich die kleinen Platinenstücke, welche in den Schlitten liegen, entfernt werden und mithilfe der Widerstandsbrücken die anderen Sensorpositionen mit den Steckern verbunden werden.

Die Kalibrierungsmessungen zeigten, dass der TMR2104 im unteren Strombereich eine deutlich höhere Auflösung als der CT100 bietet, was sich in den Steigungen der Regressionsgeraden für die verschiedenen Verstärkungen widerspiegelt. Zwar ist der maximal messbare Strom beim TMR2104 geringer, doch sorgt seine überlegene Präzision gerade in der Impedanzspektroskopie für exaktere Messergebnisse. Der CT100 erreicht im Vergleich zum Sensor TMR2104 höhere Spitzenströme, bestätigt durch die Versuche an der runden Stromschiene ohne Schlitz. Beide Sensoren weichen mit den genauen Messwerten jedoch von der Simulation ab. Mechanische Toleranzen bei der Sensorplatzierung, das Verarbeiten über die Verstärkerschaltung und räumlich verteilte Sensitivemente innerhalb der Sensoren erklären diese Abweichungen.

Bei dem Verhalten auf externe homogene Störfelder macht der Vergleich der Sensorspannungen vor und nach dem Instrumentenverstärker deutlich: Der Sensor TMR2104 reagiert auf äußere homogene Störfelder mit größeren Ausschlägen als der CT100, sowohl in den Rohsignalen als auch in den verstärkten Kurven. Bei genauerer Betrachtung mithilfe von vergrößerten Bereichen in der Grafik wird dieses Erkenntnis deutlich. Dies ist auf die höhere Empfindlichkeit und unterschiedliche interne Chip-Positionen in den Sensor-Packages zurückzuführen. Trotz dieser Unterschiede lassen sich beide Sensoren problemlos in homogenen Störfeldern einsetzen, sofern eine differenzielle Messung zur Unterdrückung des Störsignals erfolgt. Der Störanteil im Signal beträgt dabei in dieser Messung etwa 3,2 % beim Sensor TMR2104 und 1,3 % beim Sensor CT100. Zur weiteren Verbesserung der Messergebnisse können Mittelwertbildungen genutzt werden, wobei die erforderliche Reaktionszeit bzw. Echtzeitfähigkeit die Anzahl und Zeitabstände der Messpunkte limitiert.

7.2 Ausblick

Es gibt mehrere Möglichkeiten an die Erkenntnisse dieser Arbeit anzuknüpfen und weitere Aufbauten oder Sensoren zu testen. Da in dieser Arbeit der Sensor TMR2104 gewählt wurde, der eine höhere Auflösung im niedrigen Strombereich bei gleichzeitig geringerer maximaler Stromtragfähigkeit bietet, könnte ein modifizierter Messaufbau dieses Problem umgehen. Wie bereits in Abschnitt 6.3.3 erläutert, könnte man mehrere Sensorplatinen hintereinander auf der Stromschiene anordnen und die Verstärkerschaltungen jeweils unterschiedlich anpassen. Damit lässt sich ein weites Stromfeld abdecken, das in allen Bereichen eine gute Auflösung gewährleistet. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass sich die Sensoren aus dem linearen Bereich der Kennlinie nicht herausbewegen, um potenzielle Fehler über längere Nutzungsdauer zu vermeiden.

Außerdem könnten noch weitere Leitergeometrien hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile für die Strommessung im Rahmen der EIS analysiert werden. Möglicherweise können diese anders aufgebauten Stromschienen ebenfalls homogene Felder für die linearen Sensoren hervorrufen. Ebenso könnten noch weitere Sensortypen ausgetestet werden, welche ebenfalls eine lineare Sensitivitäts-Achse aufweisen oder im Zusammenhang mit speziellen Stromschienen könnten Sensoren für Stromschikanen verwendet werden, welche mit zwei sensitiven Flächen innerhalb des Sensorgehäuses gegenläufige Magnetfelder auswerten und somit automatisch externe Störeinflüsse kompensieren können.

In dieser Arbeit wurden homogene Störfelder experimentell untersucht sowie inhomogene Störfelder aus zwei Richtungen simuliert. Man könnte die Störeinflüsse weitergehend analysieren und einen besseren Schutz gegen Störungen durch magnetische Abschirmung oder erweiterte Signalverarbeitungstechniken erreichen.

Unverzichtbar bleibt jedoch eine Kalibrierung jedes Sensors und der zugehörigen Platine im jeweiligen Messaufbau. Gegebenenfalls ist zusätzlich eine Gesamtsystemkalibrierung im eingebauten Zustand erforderlich – angepasst an die jeweilige Anwendung, in dieser Arbeit also an die elektrochemische Impedanzspektroskopie in Fahrzeugbatterien.

Literaturverzeichnis

- [1] StudySmarter, *Magnetische Felder*, letzter Zugriff 12. April 2025. [Online]. Available: <https://www.studysmarter.de/ausbildung/ausbildung-in-chemie/physik-laborant-ausbildung/magnetische-felder/>
- [2] Marlene Marinescu, *Elektrische und magnetische Felder*. Springer, 2012.
- [3] LEIFI Physik, *Magnetfeld eines geraden Leiters*, letzter Zugriff 13. April 2025. [Online]. Available: <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/magnetisches-feld-spule/grundwissen/magnetfeld-eines-geraden-leiters>
- [4] Rudolf Gross, Achim Marx, *Spinelektronik, "Vorlesungsskript zur Vorlesung im SS 2004"*, 2004, verwendet wurde Kapitel 2, letzter Zugriff 18. April 2025. [Online]. Available: https://www.wmi.badw.de/fileadmin/WMI/Lecturenotes/Spin_Electronics/ME_Kapitel2.pdf
- [5] Thomas Tille, Thorben Schütthe, Oleg Petrak, Klaus Jünemann, and Karl-Ragmar Riemschneider, *Automobil-Sensorik 3 - Kapitel 14 : "Positionserfassung mittels Sensor-Array aus Tunnel-Magnetoresistiven Vortex-Dots und lernender Signalverarbeitung"*. Springer, 2020.
- [6] ALLEGROMicrosystems, *"TMR FOR PRECISION LINEAR MEASUREMENT", Application Information*, 2023, rev. 1, letzter Zugriff 18. April 2025. [Online]. Available: https://www.allegromicro.com/-/media/files/application-notes/an121-tmr-for-linear-motion-sensing.pdf?sc_lang=en
- [7] TDK-Micronas GmbH, *Magnetischer Tunnelwiderstand (TMR)*, letzter Zugriff 18. April 2025. [Online]. Available: <https://www.micronas.tdk.com/en/technologies/tmr-angle-sensors>
- [8] ALLEGROMicrosystems, *"CT100-1D Linear Sensor", Datenblatt, Rev. 6*, Dec. 2024, letzter Zugriff 19. Februar 2025. [Online]. Available: https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/ct100-datasheet.pdf?sc_lang=en
- [9] MultiDimension Technology Co., Ltd., *"MDT TMR2104 General-purpose Multi-function TMR Linear Sensor", Datenblatt, V 2.1*, letzter Zugriff 19. Februar 2025. [Online]. Available: <https://www.dowaytech.com/en/1800.html>

- [10] Kepco Inc., "*BOP 50-20-GL 1kW Power Supply*", *Datenblatt*, 2011, letzter Zugriff 25. Februar 2025. [Online]. Available: <https://www.kepcopower.com/1461971.pdf>
- [11] Tektronix, "*AFG1062 Arbitrary Function Generator*", *Datenblatt*, Feb. 2023, letzter Zugriff 25. Februar 2025. [Online]. Available: <https://www.tek.com/en/datasheet/arbitrary-function-generator>
- [12] —, "*MSO44 Mixed Signal Oscilloscope*", *Datenblatt*, Sep. 2024, letzter Zugriff 25. Februar 2025. [Online]. Available: <https://www.tek.com/de/datasheet/4-series-mso>
- [13] David Meeker, *FEMM Simulationssoftware für Magnetismus, Elektrostatik, Waermeleitung und Stromfluss*, Apr. 2019, letzter Zugriff 25. Februar 2025. [Online]. Available: <https://www.femm.info/wiki/HomePage>
- [14] "*DIN 43671, Stromschienen aus Kupfer - Bemessung für Dauerstrom*", 1975.
- [15] IPC-Institute for Printed Circuits, "*IPC-2221, Basisrichtlinie für das Design von Leiterplatten*", 1998.
- [16] Digikey, *Kalkulator für Leiterbahnbreiten*, letzter Zugriff 25. Februar 2025. [Online]. Available: <https://www.digikey.de/de/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-pcb-trace-width>
- [17] PTB, *Messung des Erdmagnetfeldes in der PTB*, letzter Zugriff 21. Februar 2025. [Online]. Available: <https://www.ptb.de/cms/nc/ptb/fachabteilungen/abt2/fb-25/ag-251/live-daten-erdmagnetfeldmessung.html>
- [18] Thorben Schütthe, *Schematische Verstärkerbeschaltung auf Sensorverarbeitungsplatine*, Jan. 2025, persönliche Kommunikation.
- [19] OpenAI, *ChatGPT [Large language model]*, letzter Zugriff April 2025, persönliche Kommunikation. [Online]. Available: <https://chatgpt.com>

A Anhang

A.1 FEMM-Simulationsaufbauten

Die Simulationsaufbauten basieren auf Zeichnungen aus der Software FEMM, die mithilfe von MATLAB-Skripten erstellt wurden. Alle Objekte sind mit den entsprechenden Materialien und Strömen dargestellt. Anschließend erfolgt die Simulation, und die Objekte liefern die entsprechenden Simulationsergebnisse. Der rechteckig eingezeichnete Bereich wird erst nach der Simulation hinzugefügt, um die Ergebnismatrix zu visualisieren und zu überprüfen, ob sie im geplanten Bereich erstellt wurde.

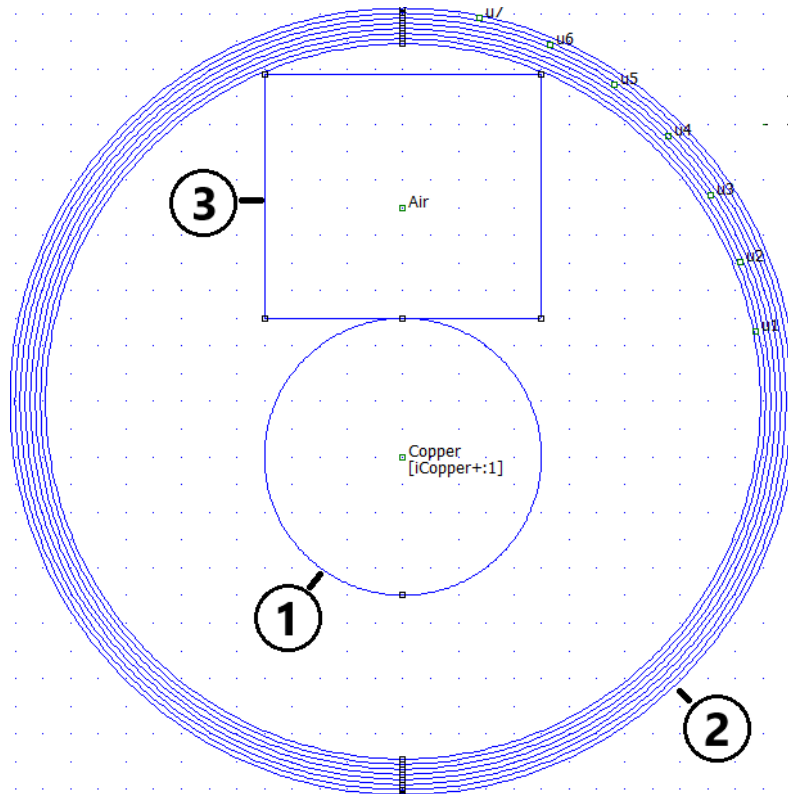


Abbildung A.1: Simulationsaufbau in FEMM für runde Busbar aus Abb. 4.4 mit eingezeichnetem Bereich für Ergebnismatrix in MATLAB. Gekennzeichnet sind ①: Kupfer-Busbar; ②: FEMM Randbedingungen; ③: Bereich der Ergebnismatrix.

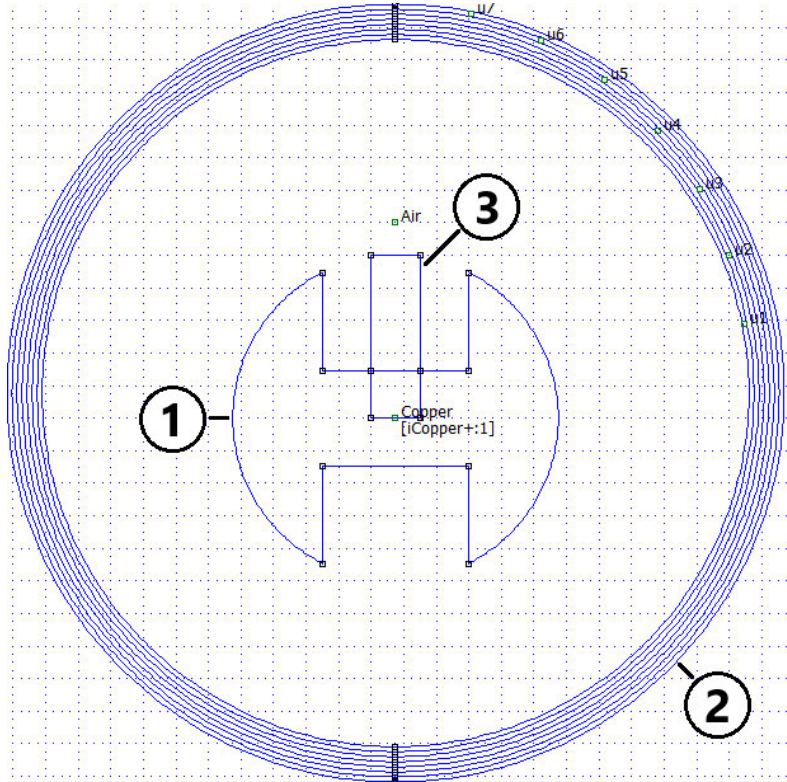


Abbildung A.2: Simulationsaufbau in FEMM für runde Busbar mit zwei gegenüberliegend gefrästen Schlitten aus Abb. 4.6 mit eingezeichnetem Bereich für Ergebnismatrix in MATLAB. Gekennzeichnet sind ①: Kupfer-Busbar; ②: FEMM Randbedingungen; ③: Bereich der Ergebnismatrix.

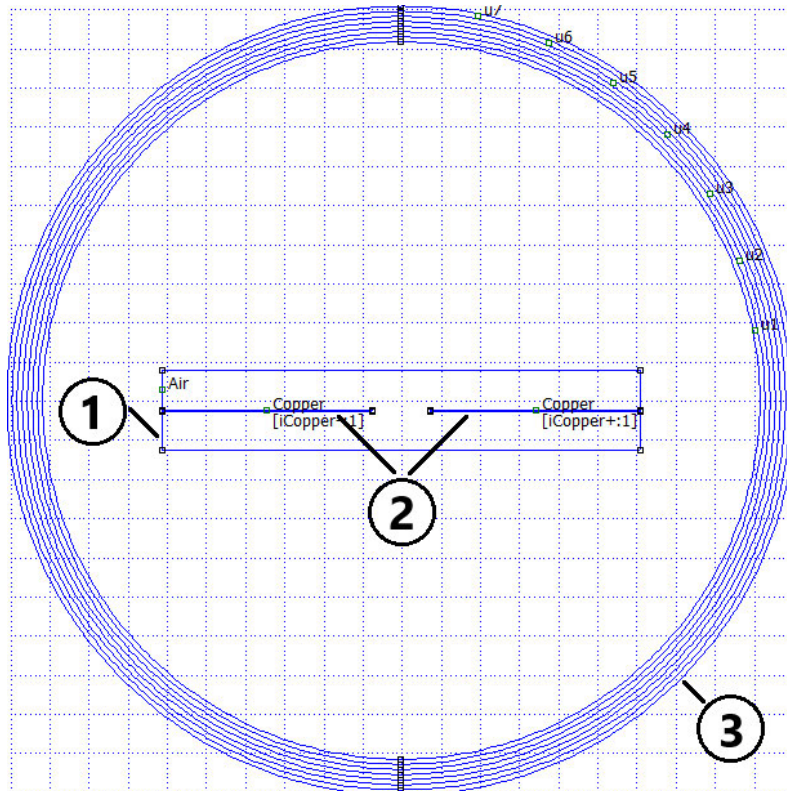


Abbildung A.3: Simulationsaufbau in FEMM Strommessschikane auf Platine aus Abb. 4.8 mit eingezeichnetem Bereich für Ergebnismatrix in MATLAB. Gekennzeichnet sind ①: Bereich der Ergebnismatrix; ②: Kupfer-Leiterbahnen; ③: FEMM Randbedingungen.

A.2 FEMM-Störfeldsimulationen

Die Ergebnisse für alle weiteren Störfeldsimulationen mit einem inhomogenen Störfeld sind den folgenden Abbildungen zu entnehmen. Die Objekte, welche die Störfelder erzeugen, wurden hier jeweils als kreisförmiger Kupferleiter dargestellt und simuliert. In der ersten Simulation befindet sich das Störfeldobjekt rechts neben der Stromschiene, in der zweiten Simulation darüber. Dies wurde so gewählt, um den Einfluss der gerichteten magnetischen Feldstärke auf die verbauten Sensoren an verschiedenen Positionen zu untersuchen.

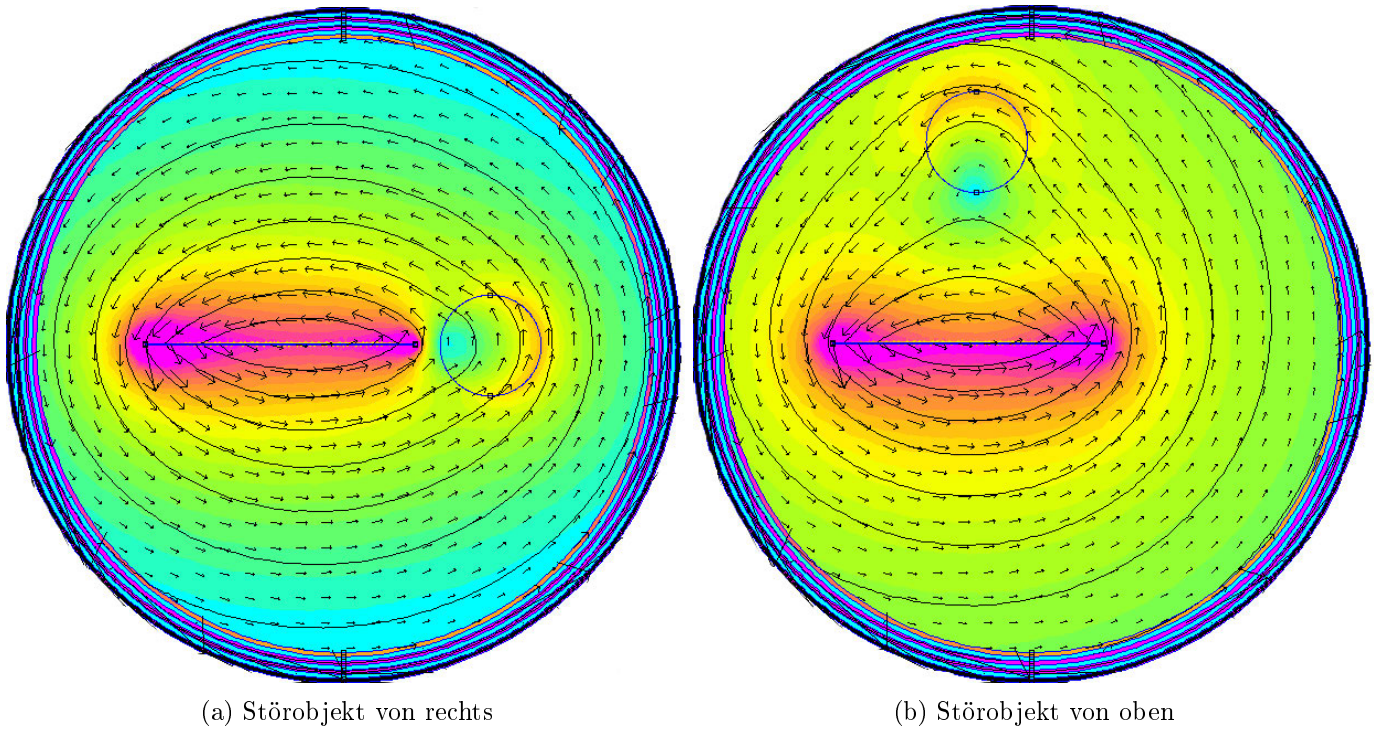


Abbildung A.4: Störeinflüsse auf rechteckiger Stromschiene mit Störstrom von 5 A und Leiterstrom von 20 A.

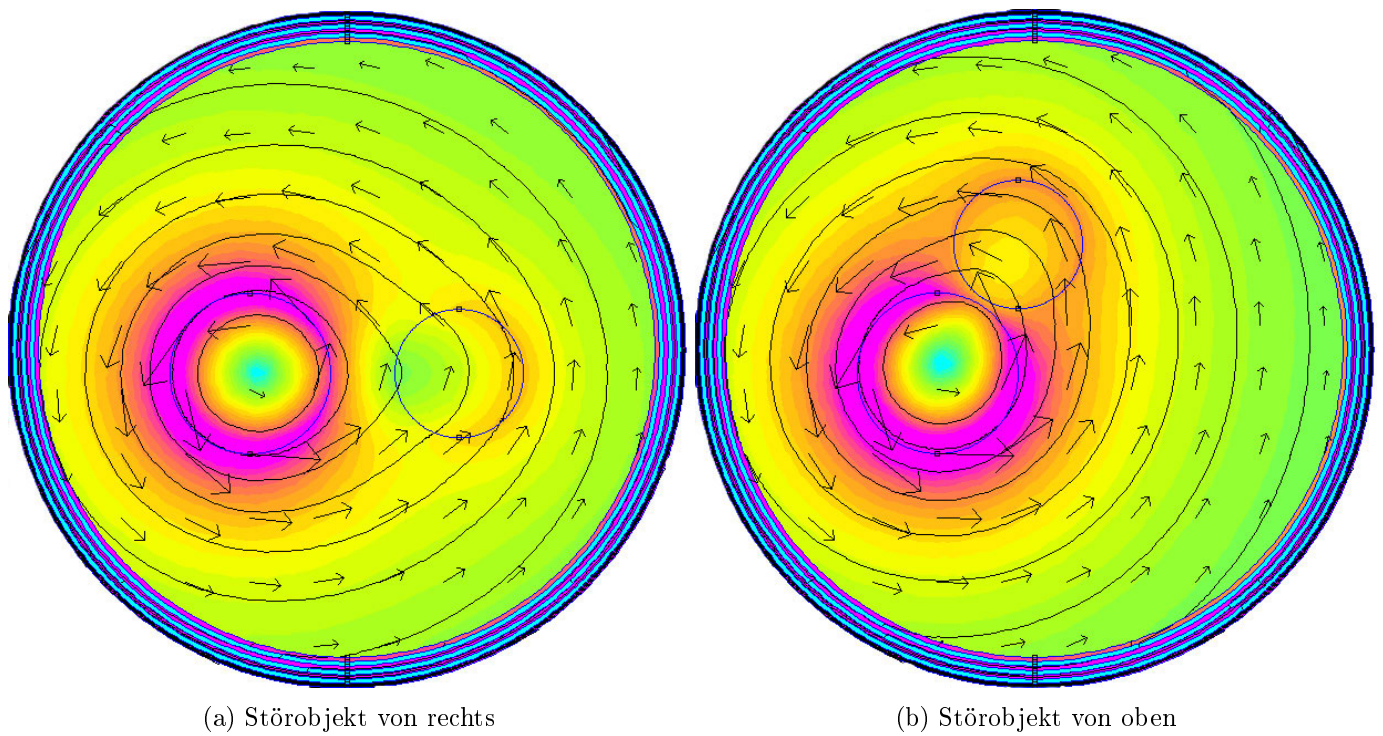


Abbildung A.5: Störeinflüsse auf runde Stromschiene mit Störstrom von 5 A und Leiterstrom von 20 A.

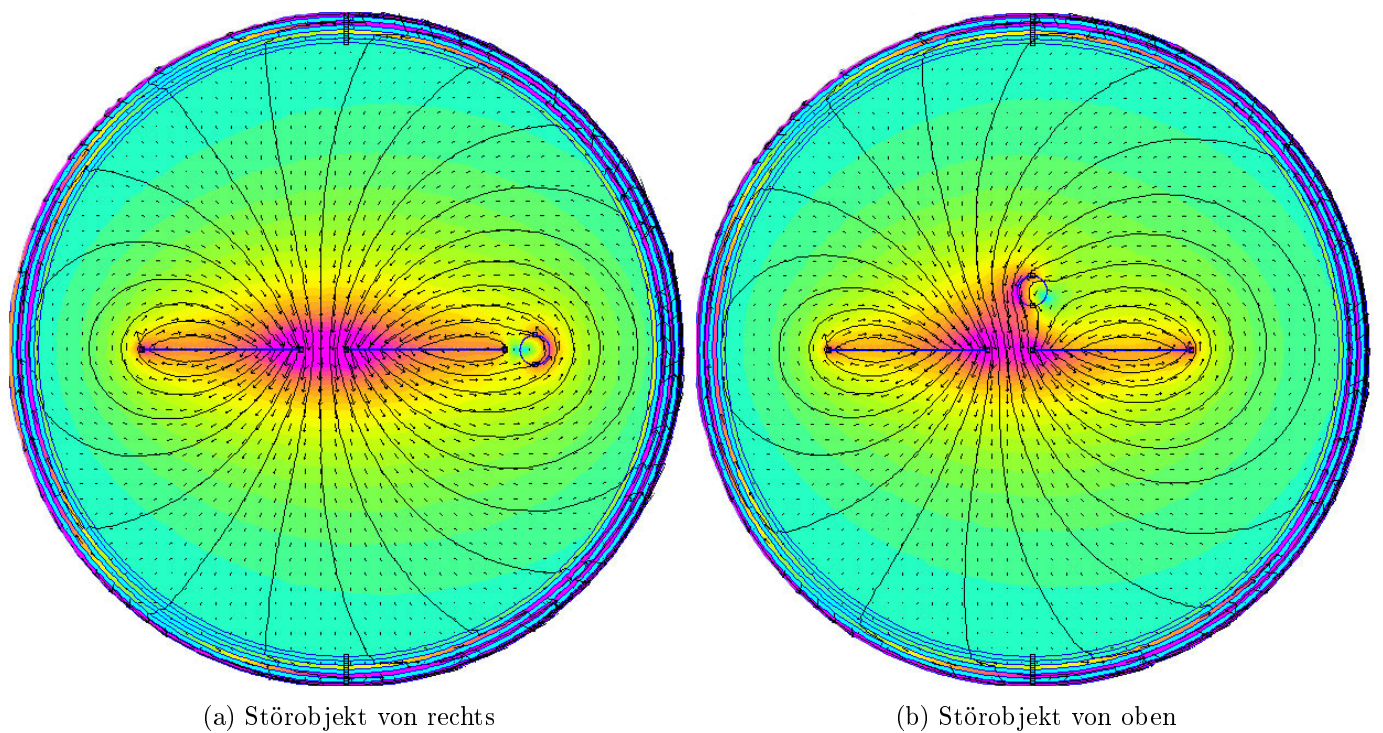


Abbildung A.6: Störeinflüsse auf Stromschikane mit Störstrom von 5 A und Leiterstrom von 20 A.

A.3 Verlauf des linearen Bereichs und der Sensorausgangsspannung

Die folgenden Grafiken stellen den Verlauf des linearen Sensorausgangsbereichs im Verhältnis zum Strom und die Sensorausgangsspannung im niedrigen Strombereich dar. In der Grafik zum linearen Bereich kann man erkennen, welcher Strom vom jeweiligen Sensor in der entsprechenden Konfiguration maximal gemessen werden kann. Der Verlauf der Sensorausgangsspannung im niedrigen Strombereich erlaubt Rückschlüsse auf die Genauigkeit der Sensoren sowie deren Empfindlichkeit gegenüber Störungen in den verschiedenen Konfigurationen.

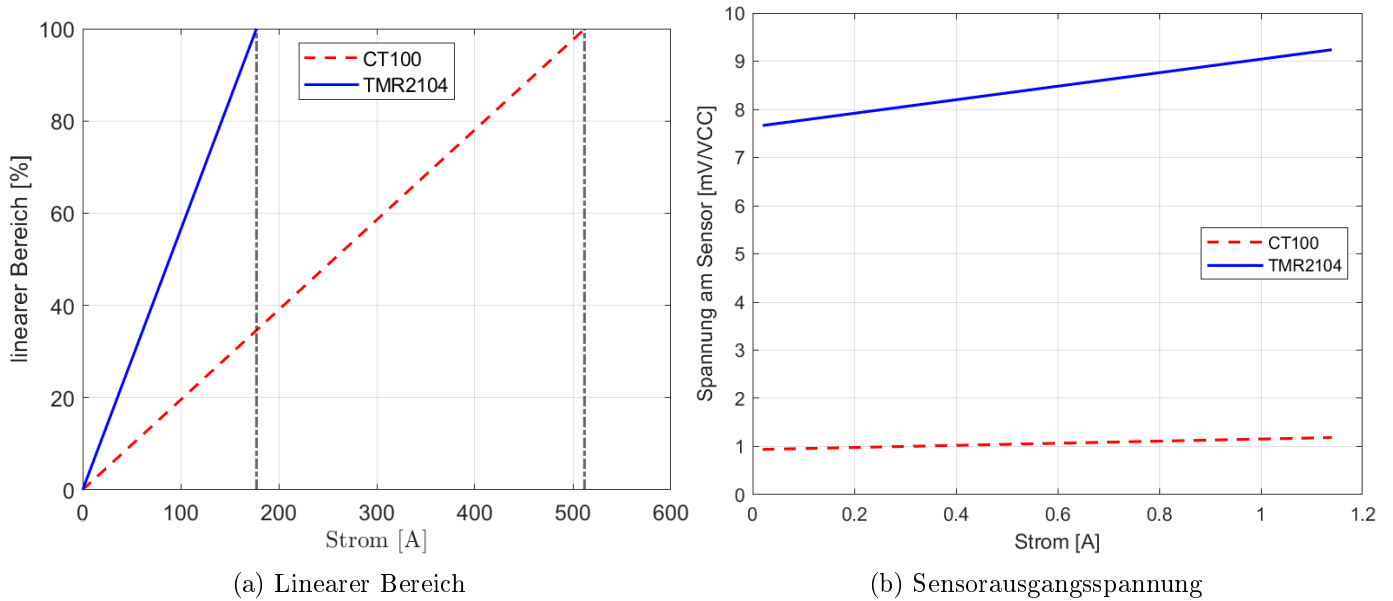


Abbildung A.7: Vergleich der linearen Bereiche und der Sensorausgangsspannung für die eckige Stromschiene.

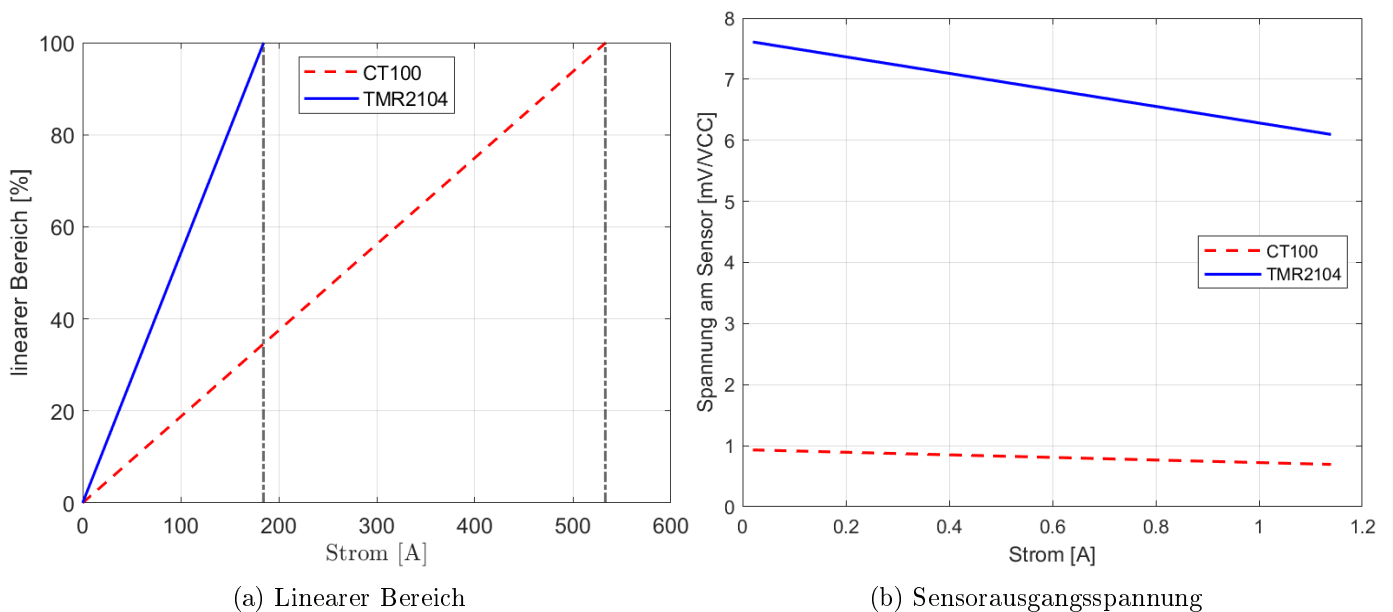


Abbildung A.8: Vergleich der linearen Bereiche und der Sensorausgangsspannung für die Stromschikane.

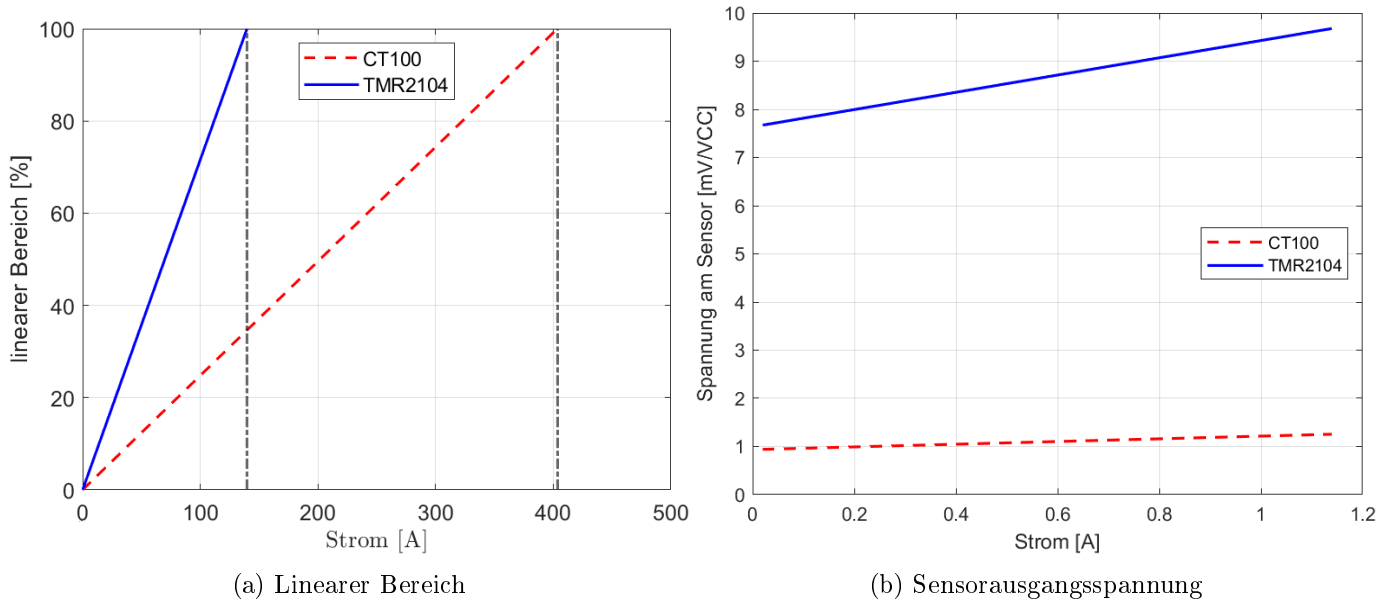


Abbildung A.9: Vergleich der linearen Bereiche und der Sensorausgangsspannung für die runde Stromschiene.

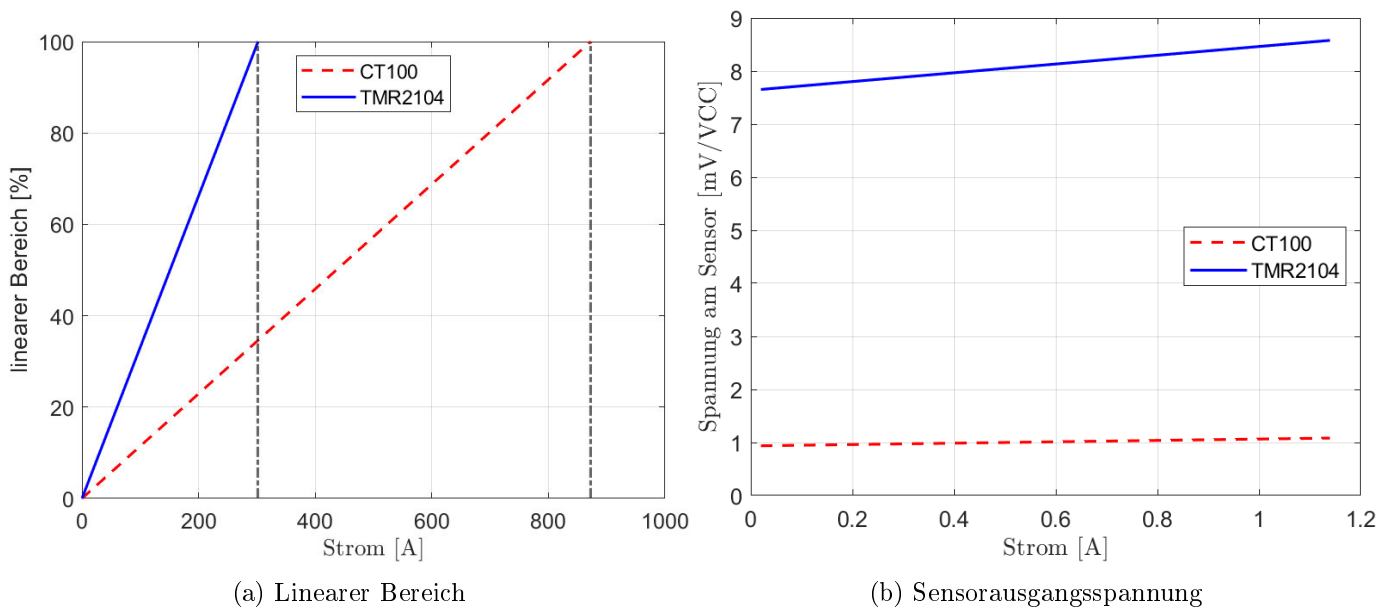


Abbildung A.10: Vergleich der linearen Bereiche und der Sensorausgangsspannung für die runde Stromschiene mit einem Durchmesser von 10 mm.

A.4 MATLAB-Codes

A.4.1 Charakterisierung der Sensoren

Der MATLAB-Code zur Charakterisierung wird verwendet, um aus den aufgenommenen Messdaten Kennlinien zu erstellen. Diese Kennlinien beschreiben das Verhalten der Sensoren, wenn sie unterschiedlichen magnetischen Feldstärken ausgesetzt sind.

Listing A.1: Auswertung der Charakterisierungsmessungen

```
1 %% CT100 Verarbeitung
2 clear;
3 clc;
4
5 % laden der Messwerte aus der Charakterisierungsmessung
6 load('2024_11_19_Charakteristik_CT100.mat')
7
8 % Punkte reduzieren auf 1000 Punkte pro Messgroesse
9 timevec_decim = decimate(timevec,1000);
10 v_field_strength_decim = decimate(v_field_strength,1000);
11 field_strength_ampere_per_meter_decim = decimate(field_strength_ampere_per_meter,1000);
12 v_sens_decim = decimate(v_sens,1000);
13
14 % x-Achse auf kA/m aendern, vorher war es A/m
15 field_strength_kA_per_meter_decim = field_strength_ampere_per_meter_decim / 1000;
16 field_strength_kA_per_meter = field_strength_ampere_per_meter / 1000;
17
18 % Sensorausgabe von V auf mV/V aendern
19 v_field_strength_mV_per_VCC_decim = (v_field_strength_decim * 1000) / VCC;
20 v_field_strength_mV_per_VCC = (v_field_strength * 1000) / VCC;
21 v_sens_mV_per_VCC_decim = (v_sens_decim * 1000) / VCC;
22 v_sens_mV_per_VCC = (v_sens * 1000) / VCC;
23
24 % Sensitivitaet berechnen
25 Sensitivity = v_sens_mV_per_VCC / field_strength_kA_per_meter;
26 %oder
27 %Sensitivity = v_field_strength_per_VCC / field_strength_kA_per_meter
28
29 %% plot
30 % Kurve mit reduzierten Datenpunkten zeichnen zur ersten Ansicht
31
32 figure(1);
33 plot(field_strength_kA_per_meter_decim,v_sens_mV_per_VCC_decim);
34 title('Charakteristik CT100');
35 xlabel('Field strength [kA/m]');
36 ylabel('v_{sens} [mV/VCC]');
37
38 %% steigende Feldstaerke durch das Input-Dreiecksignals
39
40 % Bereich der Daten auswaehlen (hier steigende Feldstaerke)
41 % kann sich angesehen werden, wenn plot(field_strength_kA_per_meter)
42 H = field_strength_kA_per_meter(74019:325007);
```

```
43 U = v_sens_mV_per_VCC(74019:325007);
44
45 %% sinkende Feldstaerke durch das Input-Dreiecksignals
46
47 % Bereich der Daten auswaehlen (hier sinkende Feldstaerke)
48 % kann sich angesehen werden, wenn plot(field_strength_kA_per_meter)
49 H = field_strength_kA_per_meter(325007:573417);
50 U = v_sens_mV_per_VCC(325007:573417);
51
52 %% Daten Filtern
53 figure(2);
54 tiledlayout(1,2)
55
56 %plot von allen steigenden und fallenden Flanken (Hysterese sichtbar)
57 nexttile
58 plot(field_strength_kA_per_meter_decim,v_sens_mV_per_VCC_decim);
59 title('Charakteristik CT100 Rohdaten');
60 xlabel('Field strength [kA/m]');
61 ylabel('v_{sens} [mV/VCC]');
62
63 Npts = 1e3; % Anzahl Punkte auf verschiedene X-Werte verteilt
64 hx = linspace(-60,60,Npts); % X-Vektor fuer Feldstaerke von -60 bis 60 kA/m
65 ux = zeros(1,Npts); % X-Vektor fuer Spannung vom Sensor ausgegeben
66 rg = 50./1e3; % Range in der Messwerte liegen duerfen (Abweichung)
67
68 % fuer jeden Punkt auf X-Vektor werden alle Feldstaerkenwerte innerhalb der
69 % Range gefunden und danach der Mittelwert dieser Werte gebildet
70 % Dadurch werden die vielen einzelnen Messwerte fuer selben X-Wert innerhalb
71 % der Range gemittelt auf einen Wert
72 for n = 1 : Npts
73     pos = find(H>hx(n)-rg & H<hx(n)+rg);
74     ux(n) = mean(U(pos));
75 end
76
77 % polyfit um vom geraden Bereich die lineare Funktion zu finden
78 % Bereich von -20 bis 20 wird als gerade angenommen
79 p_lin = find(hx > -20 & hx < 20);
80 fit = polyfit(hx(p_lin),ux(p_lin),1);
81 val = polyval(fit,hx(p_lin));
82
83 nexttile
84 plot(hx,ux) %zeichnet "geglattete" Kurve mit einem gemitteltem Wert pro X-Wert
85 hold on
86 y = fit(1,1) .* (-40:40) + fit(1,2); % berechnet y-Werte fuer laengere Gerade
87 plot((-40:40),y,'Color','green'); % zeichnet Gerade mit Daten aus polyfit laenger als
    nutzbarer Bereich
88 plot(hx(p_lin),val,'Color','red'); % zeichnet polyfit gerade im in polyfit
    festgelegten geradem Bereich
89
90 title('Charakteristik CT100 verarbeitet');
91 xlabel('Field strength [kA/m]');
92 ylabel('v_{sens} [mV/VCC]');
```

```

93     xline(-20, '-.r ');
94     xline(20, '-.r ');
95 hold off
96
97 %% SUCHE mit gefilterten Daten und mit Polyfit Geradengleichung
98 % hier kann fuer eine Gewuenschte Feldstaerke die zu erwartende
99 % Ausgangsspannung des Sensors berechnet werden
100 % y = -5.6612 * x + 0.9354 bei steigender Feldstaerke
101 % y = -5.6563 * x + 3.3652 bei sinkender Feldstaerke
102
103 SucheNach = -16;
104 if(SucheNach < -20 | SucheNach > 20)
105     disp('Ausserhalb des Linearen Bereichs!!!')
106 else
107     %ErgebnisSuche = -5.6612 * SucheNach + 0.9354;
108     ErgebnisSuche = fit(1,1) * SucheNach + fit(1,2);
109     TEXT = ['Die Ausgangsspannung des CT100 bei einer Feldstaerke von ', num2str(SucheNach), '
            kA/m liegt bei ', num2str(ErgebnisSuche), ' mV/Vcc. '];
110     disp(TEXT)
111 end
112
113 %% SUCHE mit ungefilterten Daten nach kA/m field strength suchen und mv/V ausgeben
114 Suchvariable = -19.0;
115 Streuung = 0.05;
116 %Suchindex = find(round(field_strength_kA_per_meter)==round(Suchvariable));
117 %Suchindex = find(field_strength_kA_per_meter==Suchvariable);
118 Suchindex = find(field_strength_kA_per_meter > (Suchvariable-Streuung) &
            field_strength_kA_per_meter < (Suchvariable+Streuung));
119 Suchergebnis_kA_per_m = field_strength_kA_per_meter(Suchindex);
120 Suchergebnis_mV_per_V = v_sens_mV_per_VCC(Suchindex);
121
122 % Suchergebnisse Plotten
123 figure(3)
124 stem(Suchergebnis_kA_per_m, Suchergebnis_mV_per_V);
125 title('Suchergebnisse fuer field strength');
126 xlabel('Field strength [kA/m]');
127 ylabel('v_{sens} [mV/VCC]');
128 hold on
129
130 % Mittelwert bilden
131 Mittelwert_mV_per_V = mean(Suchergebnis_mV_per_V);
132 Mittelwert_kA_per_m = mean(Suchergebnis_kA_per_m);
133 plot(Suchergebnis_kA_per_m, Mittelwert_mV_per_V, 'marker', '_', 'color', 'r');
134 legend('Ergebnisse', 'Mittelwert')
135 hold off
136
137 TEXT = ['Die Ausgangsspannung des CT100 bei einer Feldstaerke von ', num2str(Suchvariable), '
            kA/m mit einer Tolleranz von ', num2str(Streuung), ' liegt bei ', num2str(
            Mittelwert_mV_per_V), ' mV/Vcc. '];
138 disp(TEXT)
139
140 %% TRENNUNG von beiden Sensoren

```



```
193
194 % Bereich der Daten auswaehlen (hier sinkende Feldstaerke)
195 % kann sich angesehen werden, wenn plot(field_strength_kA_per_meter)
196 H = field_strength_kA_per_meter(315490:565542);
197 U = v_sens_mV_per_VCC(315490:565542);
198
199 %% Daten Filtern
200 figure(5);
201 tiledlayout(1,2)
202
203 %plot von allen steigenden und fallenden Flanken (Hysteresis sichtbar)
204 nexttile
205 plot(field_strength_kA_per_meter_decim,v_sens_mV_per_VCC_decim);
206 title('Charakteristik TMR2104 Rohdaten');
207 xlabel('Field strength [kA/m]');
208 ylabel('v_{sens} [mV/VCC]');
209
210 Npts = 1e3; % Anzahl Punkte auf verschiedene X-Werte verteilt
211 hx = linspace(-60,60,Npts); % X-Vektor fuer Feldstaerke von -60 bis 60 kA/m
212 ux = zeros(1,Npts); % X-Vektor fuer Spannung vom Sensor ausgegeben
213 rg = 50./1e3; % Range in der Messwerte liegen duerfen (Abweichung)
214
215 % fuer jeden Punkt auf X-Vektor werden alle Feldstaerkenwerte innerhalb der
216 % Range gefunden und danach der Mittelwert dieser Werte gebildet
217 % Dadurch werden die vielen einzelnen Messwerte fuer selben X-Wert innerhalb
218 % der Range gemittelt auf einen Wert
219 for n = 1 : Npts
220     pos = find(H>hx(n)-rg & H<hx(n)+rg);
221     ux(n) = mean(U(pos));
222 end
223
224 % polyfit um vom geraden Bereich die lineare Funktion zu finden
225 % Bereich von -20 bis 20 wird als gerade angenommen
226 p_lin = find(hx > -7 & hx < 7);
227 fit = polyfit(hx(p_lin),ux(p_lin),1);
228 val = polyval(fit,hx(p_lin));
229
230 nexttile
231 plot(hx,ux) %zeichnet "geglattete" Kurve mit einem gemitteltem Wert pro X-Wert
232 hold on
233 y = fit(1,1) .* (-13:13) + fit(1,2); % berechnet y-Werte fuer laengere Gerade
234 plot((-13:13),y,'Color','green'); % zeichnet Gerade mit Daten aus polyfit laenger als
    nutzbarer Bereich
235 plot(hx(p_lin),val,'Color','red'); % zeichnet polyfit gerade im in polyfit
    festgelegten geradem Bereich
236
237 title('Charakteristik TMR2104 verarbeitet');
238 xlabel('Field strength [kA/m]');
239 ylabel('v_{sens} [mV/VCC]');
240 xline(-7,'-r');
241 xline(7,'-r');
242 hold off
```

```
243
244 %%SUCHE mit gefilterten Daten und mit Polyfit Geradengleichung
245 % hier kann fuer eine Gewuenschte Feldstaerke die zu erwartende
246 % Ausgangsspannung des Sensors berechnet werden
247 % y = -36.1665 * x + 7.6365 bei steigender Feldstaerke
248 % y = -36.1579 * x + 6.9553 bei sinkender Feldstaerke
249
250 SucheNach = -6.3;
251 if(SucheNach < -7 | SucheNach > 7)
252     disp('Ausserhalb des Linearen Bereichs!!!')
253 else
254     %ErgebnisSuche = -36.1665 * SucheNach + 7.6365;
255     ErgebnisSuche = fit(1,1) * SucheNach + fit(1,2);
256     TEXT = ['Die Ausgangsspannung des TMR2104 bei einer Feldstaerke von ', num2str(SucheNach)
257         , ' kA/m liegt bei ', num2str(ErgebnisSuche), ' mV/Vcc. '];
258     disp(TEXT)
259 end
260 %%SUCHE mit ungefilterten Daten nach kA/m field strength suchen und mv/V ausgeben
261 Suchvariable = -6.3;
262 Streuung = 0.05;
263 %Suchindex = find(round(field_strength_kA_per_meter)==round(Suchvariable));
264 %Suchindex = find(field_strength_kA_per_meter==Suchvariable);
265 Suchindex = find(field_strength_kA_per_meter > (Suchvariable-Streuung) &
266     field_strength_kA_per_meter < (Suchvariable+Streuung));
267 Suchergebnis_kA_per_m = field_strength_kA_per_meter(Suchindex);
268 Suchergebnis_mV_per_V = v_sens_mV_per_VCC(Suchindex);
269
270 % Suchergebnisse Plotten
271 figure(6)
272 stem(Suchergebnis_kA_per_m, Suchergebnis_mV_per_V);
273 title('Suchergebnisse fuer field strength');
274 xlabel('Field strength [kA/m]');
275 ylabel('v_{sens} [mV/VCC]');
276 hold on
277
278 % Mittelwert bilden
279 Mittelwert_mV_per_V = mean(Suchergebnis_mV_per_V);
280 Mittelwert_kA_per_m = mean(Suchergebnis_kA_per_m);
281 plot(Suchergebnis_kA_per_m, Mittelwert_mV_per_V, 'marker', '_', 'color', 'r');
282 legend('Ergebnisse', 'Mittelwert')
283 hold off
284
285 TEXT = ['Die Ausgangsspannung des TMR2104 bei einer Feldstaerke von ', num2str(Suchvariable),
286     ' kA/m mit einer Tolleranz von ', num2str(Streuung), ' liegt bei ', num2str(
287     Mittelwert_mV_per_V), ' mV/Vcc. '];
288 disp(TEXT)
```

A.4.2 Simulation der Leiterkonfigurationen

Die MATLAB-Codes für die Simulation mit der Software FEMM wurden insbesondere verwendet, um die Simulation durch Codezeilen zu erstellen. Auf diese Weise war es möglich, durch kleine Anpassungen im Code die simulierten Objekte zu modifizieren oder Schleifen zu implementieren, in denen Daten in einer Ergebnismatrix gespeichert und weiterverarbeitet werden konnten.

Listing A.2: Simulation eines rechteckigen elektrischen Leiters

```
1 clear;
2 clc;
3
4 h = 0.07; %2oz
5 % h = 0.035; %1oz
6 b = 10.7;
7 Strom = 20;
8 Abstand = 2;
9
10 openfemm;
11 newdocument(0);
12
13 %% Aufbau und Analyse des magnetischen Problems
14 %zeichne Kupferteil
15 mi_drawrectangle(0,0,b,h);
16
17 %Schaltungseigenschaft fuer Strom
18 mi_addcircprop('iCopper+', Strom, 1); %aus Ebene
19
20 %fuege Material Labels hinzu
21 mi_addblocklabel(0+b/2,0+h/2); %Kupfer
22 mi_addblocklabel(0,h+Abstand/2); %Luft
23
24 mi_getmaterial('Copper'); %hole Materialien aus Bibliothek
25 mi_getmaterial('Air');
26
27 mi_selectlabel(0+b/2,0+h/2); %Kupfer
28 mi_setblockprop('Copper',0,0,'iCopper+',0,0,0);
29 mi_clearselected();
30
31 mi_selectlabel(0,h+Abstand/2); %Luft
32 mi_setblockprop('Air',0,0,'None',0,0,0);
33 mi_clearselected();
34
35 %fuege runde Randbedingungen hinzu
36 mi_makeABC();
37
38 %Problem Definition
39 mi_probdef(0,'millimeters','planar',1.e-8,1,30,0);
40
41 %speichere Daten ab
42 mi_saveas('A_1_Rechteck.fem');
43 mi_savedxf('A_1_Rechteck.dxf');
```

```
44
45 %Analysieren und Laden von Loesungen und Plots
46 mi_analyze();
47 mi_loadsolution();
48 mo_showvectorplot(1,1);
49 mo_zoomnatural();
50 mo_showdensityplot(1,0,0,0,'mag');
51 mi_loadsolution();
52 mo_savebitmap(char(strrep(cd + "\frames\Rechteck_BA_20A_10_7mm_2oz.bmp", '\', '\\')));
53
54 %% Daten in einer Matrix mit konfigurierbarer Groesse speichern
55 StartX = b/3;
56 EndX = (2/3)*b;
57 StartY = h-(1.6/2)-1.3;
58 EndY = h+(1.6/2)+1.3;
59
60 PointsH = 30; %Anzahl an Punkten in Hoehe
61 PointsW = 15; %Anzahl an Punkten in Breite
62 spaceBetweenPointsH = (EndY-StartY)/(PointsH-1); %Schrittweite in Hoehe
63 spaceBetweenPointsW = (EndX-StartX)/(PointsW-1); %Schrittweite in Breite
64
65 mi_drawrectangle(StartX,StartY,EndX,EndY); %zeichne Matrixregion zum visualisieren
66
67 MatrixX(PointsH+1,PointsW+1) = zeros; %Matrix fuer Einfluss in x-Richtung
68 MatrixY(PointsH+1,PointsW+1) = zeros; %Matrix fuer Einfluss in y-Richtung
69
70 %Schleife fuer Zeilen
71 for z = 1:PointsH
72     MatrixX(z+1,1) = StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH; %Y-Koordinaten in 1. Spalte eintragen
73     MatrixY(z+1,1) = StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH; %Y-Koordinaten in 1. Spalte eintragen
74     %Schleife fuer Spalten
75     for s = 1:PointsW
76         MatrixX(1,s+1) = StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW; %X-Koordinaten in 1. Zeile
77             eintragen
78         MatrixY(1,s+1) = StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW; %X-Koordinaten in 1. Zeile
79             eintragen
80         res = mo_getb(StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW,StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH); %
81             erhaelt die magnetische Flussdichte (Ergebnis in x- und y-Richtung)
82         MatrixX(z+1,s+1) = res(1,1); %Ergebnis in x-Richtung an aktuellen Koordinaten, die
83             sich in der 1. Zeile/Spalte befinden
84         MatrixY(z+1,s+1) = res(1,2); %Ergebnis in y-Richtung an aktuellen Koordinaten, die
85             sich in der 1. Zeile und 2. Spalte befinden
86     end
87 end
88
89 InfluenceX = MatrixX(2:PointsH+1,2:PointsW+1); %Einfluss in X-Richtung
90 InfluenceY = MatrixY(2:PointsH+1,2:PointsW+1); %Einfluss in Y-Richtung
91 quiver(MatrixX(1,2:(PointsW+1)),MatrixX(2:(PointsH+1),1),InfluenceX(:,,:),InfluenceY(:,,:)); %
92     quiver mit Pfeilen fuer Ergebnismatrix
93
94 axis equal
95 xlabel('X-Position [mm]');
96 ylabel('Y-Position [mm]');
```

```
90 xline(b/2,'-r'); %rote Linie in der Mitte der Leiterbahn, an der sich die Sensoren befinden
91
92
93 %Maximalwert (absolut) in x- und y-Richtung
94 MaxWertX = max(abs(InfluenceX),[], "all");
95 TEXT = ['Der Maximalwert (Absolut) in der Einflussrichtung X ist: ', num2str(MaxWertX*1e3), '
    mT. '];
96 disp(TEXT)
97 %MaxWertY = max(abs(InfluenceY),[], "all");
98 %TEXT = ['Der Maximalwert in der Einflussrichtung Y ist: ', num2str(MaxWertY), ' T. '];
99 %disp(TEXT)
100
101 %Werte aus Matrix nahe an Position der Sensorflaechen
102 Wert1_amSensor_auf_Platine = InfluenceX(25,8);
103 Wert2_amSensor_auf_Platine = InfluenceX(5,8);
104 Mittelwert_Sens_auf_Platine = (abs(Wert1_amSensor_auf_Platine)+abs(
    Wert2_amSensor_auf_Platine))/2;
105 Wert1_amSensor_auf_separater_Platine = InfluenceX(11,8);
106 Wert2_amSensor_auf_separater_Platine = InfluenceX(19,8);
107 Mittelwert_Sens_auf_separater_Platine = (abs(Wert1_amSensor_auf_separater_Platine)+abs(
    Wert2_amSensor_auf_separater_Platine))/2;
108
109 TEXT = ['Das sind ', num2str((MaxWertX/20e-3)*100), ' % von den maximalen 20mT, die der CT100
    linear koennen soll.'];
110 disp(TEXT)
111 TEXT = ['Das sind ', num2str((MaxWertX/25.13e-3)*100), ' % von den maximalen 25.13mT, die der
    CT100 laut Charakterisierung linear ist.'];
112 disp(TEXT)
113 TEXT = ['Das sind ', num2str((MaxWertX/8e-3)*100), ' % von den maximalen 8mT, die der MDT
    TMR2104 linear koennen soll.'];
114 disp(TEXT)
115 TEXT = ['Das sind ', num2str((MaxWertX/8.7e-3)*100), ' % von den maximalen 8.7mT, die der MDT
    TMR2104 laut Charakterisierung linear ist.'];
116 disp(TEXT)
117 TEXT = ['Sensorbereich(Sensor auf selben Platine) ', num2str((Mittelwert_Sens_auf_Platine
    /25.13e-3)*100), ' % von den maximalen 25.13mT, die der CT100 laut Charakterisierung
    linear ist.'];
118 disp(TEXT)
119 TEXT = ['Sensorbereich(Sensor auf separater Platine) ', num2str((
    Mittelwert_Sens_auf_separater_Platine/25.13e-3)*100), ' % von den maximalen 25.13mT, die
    der CT100 laut Charakterisierung linear ist.'];
120 disp(TEXT)
121 TEXT = ['Sensorbereich(Sensor auf selben Platine) ', num2str((Mittelwert_Sens_auf_Platine/8.7
    e-3)*100), ' % von den maximalen 8.7mT, die der MDT TMR2104 laut Charakterisierung linear
    ist.'];
122 disp(TEXT)
123 TEXT = ['Sensorbereich(Sensor auf separater Platine) ', num2str((
    Mittelwert_Sens_auf_separater_Platine/8.7e-3)*100), ' % von den maximalen 8.7mT, die der
    MDT TMR2104 laut Charakterisierung linear ist.'];
124 disp(TEXT)
125
126 %% Stromtragfaehigkeit
```

```

127 % PCB Leiterbahn Rechner
128
129 %https://www.digikey.de/de/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-pcb-trace-
    width
130 %https://www.advancedpcb.com/en-us/tools/trace-width-calculator/
131
132 %innere Schichten
133 % kc = 0.024;
134 % bc = 0.44;
135 % cc = 0.725;
136
137 %aussere Schichten
138 kc = 0.048;
139 bc = 0.44;
140 cc = 0.725;
141
142 Trise = 25; %wie viel grad C darf sich das Kupfer erwaermen
143
144 %Flaeche in mm^2
145 areaMM = h * b;
146
147 %Flaeche in mils^2
148 % 1 mm^2 = 1550 mils^2
149 areaMILS = areaMM * 1550;
150
151 %Strom in A fuer PCB Leiterbahn
152 Ic = nthroot(areaMILS,(1/cc))*(kc*Trise^bc);
153
154 %closefemm;

```

Listing A.3: Simulation einer runden Stromschiene

```

1 clear;
2 clc;
3
4 d = 2.5;
5 Abstand = 2;
6 Strom = 20;
7
8 openfemm;
9 newdocument(0);
10
11 %% Aufbau und Analyse des magnetischen Problems
12 %zeichne runde Kupferbusbar
13 mi_drawarc(0,0,0,d,180,1);
14 mi_selectarcsegment(0,0);
15 mi_seteditmode('arcsegments')
16 mi_mirror(0,0,0,d)
17
18 %Schaltungseigenschaft fuer Strom

```

```
19 mi_addcircprop('iCopper+', Strom , 1); %aus Ebene
20
21 %fuege Material Labels hinzu
22 mi_addblocklabel(0,d/2);           %Kupfer
23 mi_addblocklabel(0,d+Abstand/2); %Luft
24
25 mi_getmaterial('Copper');          %hole Materialien aus Bibliothek
26 mi_getmaterial('Air');
27
28 mi_selectlabel(0,d/2);             %Kupfer
29 mi_setblockprop('Copper',0, 0, 'iCopper+',0, 0, 0);
30 mi_clearselected();
31
32 mi_selectlabel(0,d+Abstand/2);     %Luft
33 mi_setblockprop('Air',0, 0, 'None',0, 0, 0);
34 mi_clearselected();
35
36 %fuege runde Randbedingungen hinzu
37 mi_makeABC();
38
39 %Problem Definition
40 mi_probdef(0,'millimeters','planar', 1.e-8, 1, 30, 0);
41
42 %speichere Daten ab
43 mi_saveas('A_2_Rund.fem');
44 mi_savedxf('A_2_Rund.dxf');
45
46 %Analysieren und Laden von Loesungen und Plots
47 mi_analyze();
48 mi_loadsolution();
49 mo_showvectorplot(1,1);
50 mo_zoomnatural();
51 mo_showdensityplot(1,0,0,0,'mag');
52 mi_loadsolution();
53 mo_savebitmap(char(strrep(cd + "\\frames\Rund_BA_20A_2_5mm.bmp", '\\', '\\\\')));
54
55 %% Daten in einer Matrix mit konfigurierbarer Groesse speichern
56 StartX = -(d/2);
57 EndX = d/2;
58 StartY = d;
59 EndY = d+2.2;
60
61 PointsH = 30;           %Anzahl an Punkten in Hoehe
62 PointsW = 15;           %Anzahl an Punkten in Breite
63 spaceBetweenPointsH = (EndY-StartY)/(PointsH-1); %Schrittweite in Hoehe
64 spaceBetweenPointsW = (EndX-StartX)/(PointsW-1); %Schrittweite in Breite
65
66 mi_drawrectangle(StartX,StartY,EndX,EndY); %zeichne Matrixregion zum visualisieren
67
68 MatrixX(PointsH+1,PointsW+1) = zeros; %Matrix fuer Einfluss in x-Richtung
69 MatrixY(PointsH+1,PointsW+1) = zeros; %Matrix fuer Einfluss in y-Richtung
70
```

```

71 %Schleife fuer Zeilen
72 for z = 1:PointsH
73     MatrixX(z+1,1) = StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH; %Y-Koordinaten in 1. Spalte eintragen
74     MatrixY(z+1,1) = StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH; %Y-Koordinaten in 1. Spalte eintragen
75 %Schleife fuer Spalten
76     for s = 1:PointsW
77         MatrixX(1,s+1) = StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW; %X-Koordinaten in 1. Zeile
78         MatrixY(1,s+1) = StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW; %X-Koordinaten in 1. Zeile
79         res = mo_getb(StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW, StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH); %
80         MatrixX(z+1,s+1) = res(1,1); %Ergebnis in x-Richtung an aktuellen Koordinaten, die
81         MatrixY(z+1,s+1) = res(1,2); %Ergebnis in y-Richtung an aktuellen Koordinaten, die
82         sich in der 1. Zeile und 2. Spalte befinden
83     end
84 end
85 InfluenceX = MatrixX(2:PointsH+1,2:PointsW+1); %Einfluss in X-Richtung
86 InfluenceY = MatrixY(2:PointsH+1,2:PointsW+1); %Einfluss in Y-Richtung
87 quiver(MatrixX(1,2:(PointsW+1)), MatrixX(2:(PointsH+1),1), InfluenceX(:, :), InfluenceY(:, :)); %
88     quiver mit Pfeilen fuer Ergebnismatrix
89 axis equal
90 xlabel('X-Position [mm]');
91 ylabel('Y-Position [mm]');
92 xline(0, '-r'); %rote Linie in der Mitte der Leiterbahn, an der sich die Sensoren befinden
93 % Maximalwert (absolut) in X und Y Richtung
94 MaxWertX = max(abs(InfluenceX), [], "all");
95 TEXT = ['Der Maximalwert (Absolut) in der Einflussrichtung X ist: ', num2str(MaxWertX*1e3), '
96     mT. '];
97 disp(TEXT)
98 %MaxWertY = max(abs(InfluenceY), [], "all");
99 %TEXT = ['Der Maximalwert in der Einflussrichtung Y ist: ', num2str(MaxWertY), ' T. '];
100 %disp(TEXT)
101 %Wert aus Matrix nahe an Position der Sensorflaeche
102 Wert_amSensor_auf_Platine = abs(InfluenceX(27,8));
103
104 TEXT = ['Das sind ', num2str((MaxWertX/20e-3)*100), ' % von den maximalen 20mT, die der CT100
105     linear koennen soll.'];
106 disp(TEXT)
107 TEXT = ['Das sind ', num2str((MaxWertX/25.13e-3)*100), ' % von den maximalen 25.13mT, die der
108     CT100 laut Charakterisierung linear ist.'];
109 disp(TEXT)
110 TEXT = ['Das sind ', num2str((MaxWertX/8e-3)*100), ' % von den maximalen 8mT, die der MDT
111     TMR2104 linear koennen soll.'];
112 disp(TEXT)
113 TEXT = ['Das sind ', num2str((MaxWertX/8.7e-3)*100), ' % von den maximalen 8.7mT, die der MDT
114     TMR2104 laut Charakterisierung linear ist.'];
115 disp(TEXT)

```



```
112 TEXT = [ 'Sensorbereich ', num2str((Wert_amSensor_auf_Platine/25.13e-3)*100), ' % von den  
          maximalen 25.13mT, die der CT100 laut Charakterisierung linear ist. '];  
113 disp(TEXT)  
114 TEXT = [ 'Sensorbereich ', num2str((Wert_amSensor_auf_Platine/8.7e-3)*100), ' % von den  
          maximalen 8.7mT, die der MDT TMR2104 laut Charakterisierung linear ist. '];  
115 disp(TEXT)  
116  
117 %closefemm;
```

Listing A.4: Simulation einer runden Stromschiene mit zwei Schlitzen

```
1 clear;  
2 clc;  
3  
4 d = 10;      %Kreisdurchmesser  
5 r = d/2;     %Kreisradius  
6 b = 4.5;     %Schlitzbreite  
7 sd = 3;      %Schlitztiefe  
8 Abstand = 2;  
9 Strom = 20;  
10  
11 openfemm;  
12 newdocument(0);  
13  
14 %% Aufbau und Analyse des magnetischen Problems  
15 %Kreissehne in Winkel umrechnen  
16 %https://www.studysmarter.de/schule/mathe/geometrie/kreissehne/  
17 sWinkel = 2*(asind(b/(2*r)));  
18 %X-Verschiebung nach links vom Nullpunkt nach links  
19 %Ankathete/hypotenuse = cos(winkel)  
20 xVersch = cosd((180-sWinkel)/2)*r;  
21 %Y-Verschiebung, also weniger als d  
22 yhalfLength = sind((180-sWinkel)/2)*r;  
23 yVersch = (d - 2*yhalfLength)/2;  
24  
25 %zeichne "runde" Kupferbusbar mit Schlitz  
26 % linker Bogen  
27 mi_drawarc(-xVersch, yVersch, -xVersch, yVersch+2*yhalfLength, 180-sWinkel, 1);  
28 mi_selectarcsegment(-xVersch, yVersch);  
29 mi_seteditmode('arcsegments')  
30 mi_moverotate(-xVersch, yVersch+yhalfLength, 180);  
31 mi_clearselected();  
32  
33 % rechter Bogen  
34 mi_drawarc(b/2, yVersch, b/2, yVersch+2*yhalfLength, 180-sWinkel, 1);  
35  
36 % Schlitz  
37 mi_addnode(-xVersch, sd+yVersch);  
38 mi_addnode(b/2, sd+yVersch);  
39 mi_addnode(-xVersch, (d/2)+yhalfLength-sd);
```

```
40 mi_addnode(b/2,(d/2)+yhalfLength-sd);
41
42 % zeichne unteren Ausschnitt
43 mi_drawline(-xVersch,yVersch,-xVersch,sd+yVersch);
44 mi_drawline(-xVersch,sd+yVersch,b/2,sd+yVersch);
45 mi_drawline(b/2,sd+yVersch,b/2,yVersch);
46
47 % zeichne oberen Ausschnitt
48 mi_drawline(-xVersch,(d/2)+yhalfLength-sd,b/2,(d/2)+yhalfLength-sd);
49 mi_drawline(-xVersch,(d/2)+yhalfLength-sd,-xVersch,yVersch+2*yhalfLength);
50 mi_drawline(b/2,(d/2)+yhalfLength-sd,b/2,yVersch+2*yhalfLength);
51
52 %Schaltungseigenschaft fuer Strom
53 mi_addcircprop('iCopper+',Strom,1); %aus Ebene
54
55 %fuege Material Labels hinzu
56 mi_addblocklabel(0,d/2); %Kupfer
57 mi_addblocklabel(0,d+Abstand/2); %Luft
58
59 mi_getmaterial('Copper'); %hole Materialien aus Bibliothek
60 mi_getmaterial('Air');
61
62 mi_selectlabel(0,d/2); %fuege Eigenschaft dem Label hinzu
63 mi_setblockprop('Copper',0,0,'iCopper+',0,0,0);
64 mi_clearselected();
65
66 mi_selectlabel(0,d+Abstand/2); %fuege Eigenschaft dem Label hinzu
67 mi_setblockprop('Air',0,0,'None',0,0,0);
68 mi_clearselected();
69
70 %fuege runde Randbedingungen hinzu
71 mi_makeABC();
72
73 %Problem Definition
74 mi_probdef(0,'millimeters','planar',1.e-8,1,30,0);
75
76 %speichere Daten ab
77 mi_saveas('A_3_Rund_Schlitz.fem');
78 mi_savedxf('A_3_Rund_Schlitz.dxf');
79
80 %Analysieren und Laden von Loesungen und Plots
81 mi_analyze();
82 mi_loadsolution();
83 mo_showvectorplot(1,1);
84 mo_zoomnatural();
85 mo_showdensityplot(1,0,0,0,'mag');
86 mi_loadsolution();
87 %mo_savebitmap(char(strrep(cd + "\frames\frame - Rund_Schlitz_20A_10mm" + ".bmp", '\', '\\')));
88
89 %% Daten in einer Matrix mit konfigurierbarer Groesse speichern
90 StartX = (-b/2)/3;
```

```
91 EndX = (b/2)/3;
92 StartY = d/2;
93 EndY = d;
94
95 PointsH = 30;          %Anzahl an Punkten in Hoehe
96 PointsW = 7;           %Anzahl an Punkten in Breite
97 spaceBetweenPointsH = (EndY-StartY)/(PointsH-1); %Schrittweite in Hoehe
98 spaceBetweenPointsW = (EndX-StartX)/(PointsW-1); %Schrittweite in Breite
99
100 mi_drawrectangle(StartX,StartY,EndX,EndY); %zeichne Matrixregion zum visualisieren
101
102 MatrixX(PointsH+1,PointsW+1) = zeros; %Matrix fuer Einfluss in x-Richtung
103 MatrixY(PointsH+1,PointsW+1) = zeros; %Matrix fuer Einfluss in y-Richtung
104
105 %Schleife fuer Zeilen
106 for z = 1:PointsH
107     MatrixX(z+1,1) = StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH; %Y-Koordinaten in 1. Spalte eintragen
108     MatrixY(z+1,1) = StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH; %Y-Koordinaten in 1. Spalte eintragen
109     %Schleife fuer Spalten
110     for s = 1:PointsW
111         MatrixX(1,s+1) = StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW; %X-Koordinaten in 1. Zeile
112         MatrixY(1,s+1) = StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW; %X-Koordinaten in 1. Zeile
113         res = mo_getb(StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW,StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH); %
114         MatrixX(z+1,s+1) = res(1,1); %Ergebnis in x-Richtung an aktuellen Koordinaten, die
115         MatrixY(z+1,s+1) = res(1,2); %Ergebnis in y-Richtung an aktuellen Koordinaten, die
116         sich in der 1. Zeile und 2. Spalte befinden
117     end
118 end
119 InfluenceX = MatrixX(2:PointsH+1,2:PointsW+1); %Einfluss in X-Richtung
120 InfluenceY = MatrixY(2:PointsH+1,2:PointsW+1); %Einfluss in Y-Richtung
121 quiver(MatrixX(1,2:(PointsW+1)),MatrixX(2:(PointsH+1),1),InfluenceX(:,2),InfluenceY(:,2)); %
122     quiver mit Pfeilen fuer Ergebnismatrix
123 axis equal
124 xlabel('X-Position [mm] ');
125 ylabel('Y-Position [mm] ');
126
127 % Maximalwerte (Absolut) in X und Y Richtung
128 MaxWertX = max(abs(InfluenceX),[],'all');
129 TEXT = ['Der Maximalwert (Absolut) in der Einflussrichtung X ist: ',num2str(MaxWertX*1e3),'
130     mT. '];
131 disp(TEXT)
132 %MaxWertY = max(abs(InfluenceY),[],'all');
133 %TEXT = ['Der Maximalwert in der Einflussrichtung Y ist: ',num2str(MaxWertY),' T. '];
134 %disp(TEXT)
```

```

135 %Wert aus Matrix nahe an Position der Sensorflaeche
136 Wert_amSensor_auf_Platine = abs(InfluenceX(26,3));
137
138 TEXT = [ 'Das sind ', num2str((MaxWertX/20e-3)*100), ' % von den maximalen 20mT, die der CT100
        linear koennen soll.'];
139 disp(TEXT)
140 TEXT = [ 'Das sind ', num2str((MaxWertX/25.13e-3)*100), ' % von den maximalen 25.13mT, die der
        CT100 laut Charakterisierung linear ist.'];
141 disp(TEXT)
142 TEXT = [ 'Das sind ', num2str((MaxWertX/8e-3)*100), ' % von den maximalen 8mT, die der MDT
        TMR2104 linear koennen soll.'];
143 disp(TEXT)
144 TEXT = [ 'Das sind ', num2str((MaxWertX/8.7e-3)*100), ' % von den maximalen 8.7mT, die der MDT
        TMR2104 laut Charakterisierung linear ist.'];
145 disp(TEXT)
146 TEXT = [ 'Sensorbereich ', num2str((Wert_amSensor_auf_Platine/25.13e-3)*100), ' % von den
        maximalen 25.13mT, die der CT100 laut Charakterisierung linear ist.'];
147 disp(TEXT)
148 TEXT = [ 'Sensorbereich ', num2str((Wert_amSensor_auf_Platine/8.7e-3)*100), ' % von den
        maximalen 8.7mT, die der MDT TMR2104 laut Charakterisierung linear ist.'];
149 disp(TEXT)
150
151 %% Querschnittsflaeche berechnen
152
153 %Flaeche in mm^2
154 %ist eine Annaeherung, da kleiner Bereich ueber und unter dem Ausschnitt
155 %nicht mit abgezogen wird.
156 areaMM = (pi * (d/2)^2) - (2*(b*sd));
157
158 %closefemm;

```

Listing A.5: Simulation einer Stromschikane auf einer Platine

```

1 clear;
2 clc;
3
4 h = 0.07;    %Dicke
5 b = 10.7;    %Breite
6 sb = 3;      %Schlitzbreite
7 Abstand = 2;
8 Strom = 20;
9
10 openfemm;
11 newdocument(0);
12
13 %% Aufbau und Analyse des magnetischen Problems
14 %Zeichne Kupfer
15 mi_drawrectangle(0,0,b,h);
16 mi_drawrectangle(b+sb,0,(2*b)+sb,h);
17

```

```
18 %Schaltungseigenschaft fuer Strom
19 mi_addcircprop('iCopper+', Strom , 1); %aus Ebene
20 mi_addcircprop('iCopper-', -Strom , 1); %in Ebene
21
22 %fuege Material Labels hinzu
23 mi_addblocklabel(0+b/2,0+h/2); %Kupfer1
24 mi_addblocklabel(0+b+sb+b/2,0+h/2); %Kupfer2
25 mi_addblocklabel(0,h+Abstand/2); %Luft
26
27 mi_getmaterial('Copper'); %hole Materialien aus Bibliothek
28 mi_getmaterial('Air');
29
30 mi_selectlabel(0+b/2,0+h/2); %Kupfer1
31 mi_setblockprop('Copper',0, 0, 'iCopper-',0, 0, 0);
32 mi_clearselected();
33
34 mi_selectlabel(0+b+sb+b/2,0+h/2); %Kupfer2
35 mi_setblockprop('Copper',0, 0, 'iCopper+',0, 1, 0);
36 mi_clearselected();
37
38 mi_selectlabel(0,h+Abstand/2); %Luft
39 mi_setblockprop('Air',0, 0, 'None',0, 0, 0);
40 mi_clearselected();
41
42 %fuege runde Randbedingungen hinzu
43 mi_makeABC();
44
45 %Problem Definition
46 mi_probdef(0,'millimeters','planar', 1.e-8, 1, 30, 0);
47
48 %speichere Daten ab
49 mi_saveas('A_4_Messschikane.fem');
50 mi_savedxf('A_4_Messschikane.dxf');
51
52 %Analysieren und Laden von Loesungen und Plots
53 mi_analyze();
54 mi_loadsolution();
55 mo_showvectorplot(1,1);
56 mo_zoomnatural();
57 mo_showdensityplot(1,0,0,0,'mag');
58 mi_loadsolution();
59 mo_savebitmap(char(strep(cd + "\frames\frame - Messschikane_20A_10_7mm_2oz" + ".bmp", '\',
    '\\')));
60
61 %% Daten in einer Matrix mit konfigurierbarer Groesse speichern
62 StartX = 0;
63 EndX = (2*b)+sb;
64 StartY = -2;
65 EndY = h+2;
66
67 PointsH = 15; %Anzahl an Punkten in Hoehe
68 PointsW = 33; %Anzahl an Punkten in Breite
```

```

69 spaceBetweenPointsH = (EndY-StartY)/(PointsH-1); %Schrittweite in Hoehe
70 spaceBetweenPointsW = (EndX-StartX)/(PointsW-1); %Schrittweite in Breite
71
72 mi_drawrectangle(StartX,StartY,EndX,EndY); %zeichne Matrixregion zum visualisieren
73
74 MatrixX(PointsH+1,PointsW+1) = zeros; %Matrix fuer Einfluss in x-Richtung
75 MatrixY(PointsH+1,PointsW+1) = zeros; %Matrix fuer Einfluss in y-Richtung
76
77 %Schleife fuer Zeilen
78 for z = 1:PointsH
79     MatrixX(z+1,1) = StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH; %Y-Koordinaten in 1. Spalte eintragen
80     MatrixY(z+1,1) = StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH; %Y-Koordinaten in 1. Spalte eintragen
81     %Schleife fuer Spalten
82     for s = 1:PointsW
83         MatrixX(1,s+1) = StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW; %X-Koordinaten in 1. Zeile
            eintragen
84         MatrixY(1,s+1) = StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW; %X-Koordinaten in 1. Zeile
            eintragen
85         res = mo_getb(StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW,StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH); %
            erhaelt die magnetische Flussdichte (Ergebnis in x- und y-Richtung)
86         MatrixX(z+1,s+1) = res(1,1); %Ergebnis in x-Richtung an aktuellen Koordinaten, die
            sich in der 1. Zeile/Spalte befinden
87         MatrixY(z+1,s+1) = res(1,2); %Ergebnis in y-Richtung an aktuellen Koordinaten, die
            sich in der 1. Zeile und 2. Spalte befinden
88     end
89 end
90
91 InfluenceX = MatrixX(2:PointsH+1,2:PointsW+1); %Einfluss in X-Richtung
92 InfluenceY = MatrixY(2:PointsH+1,2:PointsW+1); %Einfluss in Y-Richtung
93 quiver(MatrixX(1,2:(PointsW+1)),MatrixX(2:(PointsH+1),1),InfluenceX(:,:),InfluenceY(:,:)); %
    quiver mit Pfeilen fuer Ergebnismatrix
94 axis equal
95 xlabel('X-Position [mm]');
96 ylabel('Y-Position [mm]');
97 xline(b/2,'-r'); %rote Linie in der Mitte der Leiterbahn, an der sich die Sensoren befinden
98 xline(b+sb+(b/2),'-r'); %rote Linie in der Mitte der Leiterbahn, an der sich die Sensoren
    befinden
99
100 % Maximalwerte (Absolut) in X und Y Richtung
101 MaxWertX = max(abs(InfluenceX),[],'all');
102 TEXT = ['Der Maximalwert (Absolut) in der Einflussrichtung X ist: ',num2str(MaxWertX*1e3),'
    mT. '];
103 disp(TEXT)
104 %MaxWertY = max(abs(InfluenceY),[],'all');
105 %TEXT = ['Der Maximalwert in der Einflussrichtung Y ist: ',num2str(MaxWertY),' T. '];
106 %disp(TEXT)
107
108 %Wert aus Matrix nahe an Position der Sensorflaeche
109 Wert_amSensor_auf_Platine_links = abs(InfluenceX(13,8));
110 Wert_amSensor_auf_Platine_rechts = abs(InfluenceX(13,26));
111 Mittelwert_Absolut = (Wert_amSensor_auf_Platine_links + Wert_amSensor_auf_Platine_rechts)/2;
112

```

```
113 TEXT = [ 'Das sind ', num2str((MaxWertX/20e-3)*100), ' % von den maximalen 20mT, die der CT100
        linear koennen soll.'];
114 disp(TEXT)
115 TEXT = [ 'Das sind ', num2str((MaxWertX/25.13e-3)*100), ' % von den maximalen 25.13mT, die der
        CT100 laut Charakterisierung linear ist.'];
116 disp(TEXT)
117 TEXT = [ 'Das sind ', num2str((MaxWertX/8e-3)*100), ' % von den maximalen 8mT, die der MDT
        TMR2104 linear koennen soll.'];
118 disp(TEXT)
119 TEXT = [ 'Das sind ', num2str((MaxWertX/8.7e-3)*100), ' % von den maximalen 8.7mT, die der MDT
        TMR2104 laut Charakterisierung linear ist.'];
120 disp(TEXT)
121 TEXT = [ 'Sensorbereich ', num2str((Mittelwert_Absolut/25.13e-3)*100), ' % von den maximalen
        25.13mT, die der CT100 laut Charakterisierung linear ist.'];
122 disp(TEXT)
123 TEXT = [ 'Sensorbereich ', num2str((Mittelwert_Absolut/8.7e-3)*100), ' % von den maximalen 8.7
        mT, die der MDT TMR2104 laut Charakterisierung linear ist.'];
124 disp(TEXT)
125
126 %% Stromtragfaehigkeit
127 % PCB Leiterbahn Rechner
128
129 %https://www.digikey.de/de/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-pcb-trace-
        width
130 %https://www.advancedpcb.com/en-us/tools/trace-width-calculator/
131
132 %innere Schichten
133 % kc = 0.024;
134 % bc = 0.44;
135 % cc = 0.725;
136
137 %aussere Schichten
138 kc = 0.048;
139 bc = 0.44;
140 cc = 0.725;
141
142 Trise = 25; %wie viel grad C darf sich das Kupfer erwaermen
143
144 %Flaeche in mm^2
145 areaMM = h * b;
146
147 %Flaeche in mils^2
148 % 1 mm^2 = 1550 mils^2
149 areaMILS = areaMM * 1550;
150
151 %Strom in A fuer PCB Leiterbahn
152 Ic = nthroot(areaMILS, (1/cc)) * (kc*Trise^bc);
153
154 %closefemm;
```

A.4.3 Störfeld und Maximalstrom

Zur Simulation von Störfeldern und zur Ermittlung des theoretisch maximal messbaren Stroms wurde die Simulation zunächst ähnlich wie zuvor aufgebaut. Die Objekte wurden auf die gleiche Weise erstellt, jedoch wurden Iterationsschleifen eingefügt, die es ermöglichten, die Einflüsse der magnetischen Felder auf die Positionen der Sensoren bei verschiedenen Strömen zu untersuchen, wobei unterschiedliche Ströme durch die Stromschiene und das Störobjekt flossen. Da die Codes größtenteils ähnlich wie die im vorherigen Abschnitt aufgebaut sind, werden hier als Beispiel lediglich die beiden Codes für die geschlitzte, runde Busbar in ihrer Gesamtheit gezeigt. Die relevanten Codezeilen für die anderen Leiterkonfigurationen sind gekürzt dargestellt. Diese können entsprechend des Aufbaus aus den Codes A.6 und A.7 in Verbindung mit den Simulationscodes aus dem vorherigen Abschnitt zusammengeführt werden.

Listing A.6: Simulation ansteigender Ströme bei runder geschlitzter Stromschiene

```

1  clear ;
2  clc ;
3
4  d = 10;      %Kreisdurchmesser
5  r = d/2;    %Kreistradius
6  b = 4.5;    %Schlitzbreite
7  sd = 3;     %Schlitztiefe
8  Abstand = 2;
9
10 Startstrom = 20e-3;
11 Endstrom = 850;
12 % Logarithmisch verteilt zwischen Start und Endstrom
13 Stromvector = exp(linspace(log(Startstrom), log(Endstrom), 30));
14 StromErgebnisMatrix(6,length(Stromvector)) = zeros;
15
16 openfemm;
17 newdocument(0);
18
19 %% Aufbau und Analyse des magnetischen Problems
20 %Kreissehne in Winkel umrechnen
21 %https://www.studysmarter.de/schule/mathe/geometrie/kreissehne/
22 sWinkel = 2*(asind(b/(2*r)));
23 %X-Verschiebung nach links vom Nullpunkt nach links
24 %Ankathete/hypotenuse = cos(winkel)
25 xVersch = cosd((180-sWinkel)/2)*r;
26 %Y-Verschiebung, also weniger als d
27 yhalfLength = sind((180-sWinkel)/2)*r;
28 yVersch = (d - 2*yhalfLength)/2;
29
30 %zeichne "runde" Kupferbusbar mit Schlitz
31 % linker Bogen
32 mi_drawarc(-xVersch,yVersch,-xVersch,yVersch+2*yhalfLength,180-sWinkel,1);
33 mi_selectarcsegment(-xVersch,yVersch);
34 mi_seteditmode('arcsegments');
35 mi_moverotate(-xVersch,yVersch+yhalfLength,180);
36 mi_clearselected();
37

```



```
38 % rechter Bogen
39 mi_drawarc(b/2,yVersch,b/2,yVersch+2*yhalfLength,180-sWinkel,1);
40
41 % Schlitz
42 mi_addnode(-xVersch,sd+yVersch);
43 mi_addnode(b/2,sd+yVersch);
44 mi_addnode(-xVersch,(d/2)+yhalfLength-sd);
45 mi_addnode(b/2,(d/2)+yhalfLength-sd);
46
47 % zeichne unteren Ausschnitt
48 mi_drawline(-xVersch,yVersch,-xVersch,sd+yVersch);
49 mi_drawline(-xVersch,sd+yVersch,b/2,sd+yVersch);
50 mi_drawline(b/2,sd+yVersch,b/2,yVersch);
51
52 % zeichne oberen Ausschnitt
53 mi_drawline(-xVersch,(d/2)+yhalfLength-sd,b/2,(d/2)+yhalfLength-sd);
54 mi_drawline(-xVersch,(d/2)+yhalfLength-sd,-xVersch,yVersch+2*yhalfLength);
55 mi_drawline(b/2,(d/2)+yhalfLength-sd,b/2,yVersch+2*yhalfLength);
56
57 %fuege runde Randbedingungen hinzu
58 mi_makeABC();
59
60 %fuege Material Labels hinzu
61 mi_addblocklabel(0,(d/2)-0.1); %Kupfer
62 mi_addblocklabel(0,d+Abstand/3); %Luft
63
64 mi_getmaterial('Copper'); %hole Materialien aus Bibliothek
65 mi_getmaterial('Air');
66
67 mi_selectlabel(0,(d/2)-0.1); %fuege Eigenschaft dem Label hinzu
68 mi_setblockprop('Copper',0,0,'iCopper+',0,0,0);
69 mi_clearselected();
70
71 mi_selectlabel(0,d+Abstand/3); %fuege Eigenschaft dem Label hinzu
72 mi_setblockprop('Air',0,0,'None',0,0,0);
73 mi_clearselected();
74
75 %Problem Definition
76 mi_probdef(0,'millimeters','planar',1.e-8,1,30,0);
77
78 %speichere Daten ab
79 mi_saveas('A_3_Rund_Schlitz.fem');
80 mi_savedxf('A_3_Rund_Schlitz.dxf');
81
82 %Konfiguration fuer Ergebnismatrix vor Schleife
83 StartX = (-b/2)/3;
84 EndX = (b/2)/3;
85 StartY = 0;
86 EndY = d;
87
88 PointsH = 60; %Anzahl an Punkten in Hoehe
89 PointsW = 7; %Anzahl an Punkten in Breite
```

```
90 spaceBetweenPointsH = (EndY-StartY)/(PointsH-1); %Schrittweite in Hoehe
91 spaceBetweenPointsW = (EndX-StartX)/(PointsW-1); %Schrittweite in Breite
92
93 MatrixX(PointsH+1,PointsW+1) = zeros; %Matrix fuer Einfluss in x-Richtung
94 MatrixY(PointsH+1,PointsW+1) = zeros; %Matrix fuer Einfluss in y-Richtung
95
96 % Start von Sweep Schleife
97 for i = 1:length(Stromvector)
98 %Schaltungseigenschaft fuer Strom anpassen
99 mi_addcircprop('iCopper+', Stromvector(i) , 1); %aus Ebene
100
101 %Analysieren und Laden von Loesungen und Plots
102 mi_analyze();
103 mi_loadsolution();
104 mo_showvectorplot(1,1);
105 mo_zoomnatural();
106 mo_showdensityplot(1,0,0,0,'mag');
107 mi_loadsolution();
108
109 %% Daten in einer Matrix mit konfigurierbarer Groesse speichern
110
111 %Schleife fuer Zeilen
112 for z = 1:PointsH
113     MatrixX(z+1,1) = StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH; %Y-Koordinaten in 1. Spalte eintragen
114     MatrixY(z+1,1) = StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH; %Y-Koordinaten in 1. Spalte eintragen
115     %Schleife fuer Spalten
116     for s = 1:PointsW
117         MatrixX(1,s+1) = StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW; %X-Koordinaten in 1. Zeile
118             eintragen
119         MatrixY(1,s+1) = StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW; %X-Koordinaten in 1. Zeile
120             eintragen
121         res = mo_getb(StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW,StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH); %
122             erhaelt die magnetische Flussdichte (Ergebnis in x- und y-Richtung)
123         MatrixX(z+1,s+1) = res(1,1); %Ergebnis in x-Richtung an aktuellen Koordinaten, die
124             sich in der 1. Zeile/Spalte befinden
125         MatrixY(z+1,s+1) = res(1,2); %Ergebnis in y-Richtung an aktuellen Koordinaten, die
126             sich in der 1. Zeile und 2. Spalte befinden
127     end
128 end
129
130 InfluenceX = MatrixX(2:PointsH+1,2:PointsW+1); %Einfluss in X-Richtung
131 InfluenceY = MatrixY(2:PointsH+1,2:PointsW+1); %Einfluss in Y-Richtung
132
133 %Werte aus Matrix nahe an Position der Sensorflaeche
134 Wert_amSensor_auf_Platine_oben = InfluenceX(56,3);
135 Wert_amSensor_auf_Platine_unten = InfluenceX(5,3);
136 Diff_ergebnis = (Wert_amSensor_auf_Platine_oben - Wert_amSensor_auf_Platine_unten)/2;
137
138 %% Stromsweep + Stoerfeldsweep abspeichern in Matrix
139 %Zeile 1 = Strom
140 %Zeile 2 = magn. Flussdichte in Sensorflaeche oben
141 %Zeile 3 = magn. Flussdichte in Sensorflaeche unten
```

```

137 %Zeile 4 = max % Nutzung des linearen Bereichs vom CT100 Sensor
138 %Zeile 5 = max % Nutzung des linearen Bereichs vom TMR2104 Sensor
139 %Zeile 6 = Diff_ergebnis
140 StromErgebnisMatrix(1,i) = Stromvector(i);
141 StromErgebnisMatrix(2,i) = Wert_amSensor_auf_Platine_oben;
142 StromErgebnisMatrix(3,i) = Wert_amSensor_auf_Platine_unten;
143 StromErgebnisMatrix(4,i) = (max(abs(Wert_amSensor_auf_Platine_oben),abs(
    Wert_amSensor_auf_Platine_unten)) / 25.13e-3)*100;
144 StromErgebnisMatrix(5,i) = (max(abs(Wert_amSensor_auf_Platine_oben),abs(
    Wert_amSensor_auf_Platine_unten)) / 8.7e-3)*100;
145 StromErgebnisMatrix(6,i) = Diff_ergebnis;
146 end %Ende von Stromsweep Schleife
147
148 %Ausgabe Sweep Ergebnis des Verlaufes vom linearen Bereich
149 plot(StromErgebnisMatrix(1,:),StromErgebnisMatrix(4,:), '—r','LineWidth', 1.5);
150 hold on;
151 plot(StromErgebnisMatrix(1,:),StromErgebnisMatrix(5,:), '—b','LineWidth', 1.5);
152 grid on;
153 legend('CT100', 'TMR2104','Location','north');
154 xlabel('Strom [A]');
155 ylabel('linearer Bereich [%]');
156 % fuer MATLAB
157 xline([284.73 822.4475], '-.','LineWidth', 1.5 , 'HandleVisibility', 'off');
158 ylim([0 100]);
159 % fuer Octave
160 %line(xlim(), [100 100], 'Color', 'r', 'LineStyle', '—');
161 %line([284.73 284.73], ylim(), 'Color', 'r', 'LineStyle', '—');
162 %line([822.4475 822.4475], ylim(), 'Color', 'r', 'LineStyle', '—');
163
164 %Ausgabe Sweep Ergebnis in mV/VCC
165 %y = -5.6612 * x + 0.9354 bei steigender Feldstaerke CT100
166 %y = -36.1665 * x + 7.6365 bei steigender Feldstaerke TMR2104
167 % 1kA/m = 1.2566370614359172 mT
168 % 1mT = 0.79577471545947673925 kA/m
169 figure(2);
170 mT_to_kAm = 0.79577471545947673925;
171 T_to_kAm = 795.77471545947673925;
172 CT100_mV_per_VCC = -5.6612 * (T_to_kAm * StromErgebnisMatrix(6,:)) + 0.9354;
173 TMR2104_mV_per_VCC = -36.1665 * (T_to_kAm * StromErgebnisMatrix(6,:)) + 7.6365;
174
175 % sucht Wert ab welchem Strom ueber 1A ist
176 for g = 1:length(StromErgebnisMatrix)
177     value = StromErgebnisMatrix(1,g);
178     if value > 1
179         break;
180     end
181 end
182 plot_mV_Matrix(6,g) = zeros;
183 plot_mV_Matrix(1,:) = StromErgebnisMatrix(1,1:g);
184 plot_mV_Matrix(2,:) = CT100_mV_per_VCC(1:g);
185 plot_mV_Matrix(3,:) = TMR2104_mV_per_VCC(1:g);
186

```

```
187 % Plot vom Spannungsverlauf im Ausgang vom Sensor ueber Strom
188 plot(plot_mV_Matrix(1,:),plot_mV_Matrix(2,:), '—r','LineWidth', 1.5);
189 hold on;
190 plot(plot_mV_Matrix(1,:),plot_mV_Matrix(3,:), '—b','LineWidth', 1.5);
191 grid on;
192 legend('CT100', 'TMR2104','Location','east');
193 xlabel('Strom [A]');
194 ylabel('Spannung am Sensor [mV/VCC]');
195
196 closefemm;
```

Listing A.7: Simulation mit Störfeld bei runder geschlitzter Stromschiene

```
1 clear;
2 clc;
3
4 d = 10; %Kreisdurchmesser
5 r = d/2; %Kreisradius
6 b = 4.5; %Schlitzbreite
7 sd = 3; %Schlitztiefe
8 Abstand = 2;
9
10 Startstrom = 20e-3;
11 Endstrom = 200;
12 % Logarithmisch verteilt zwischen Start und Endstrom
13 Stromvector = exp(linspace(log(Startstrom), log(Endstrom), 5));
14 StromErgebnisMatrix(15,length(Stromvector)) = zeros;
15
16 openfemm;
17 newdocument(0);
18
19 %% Aufbau und Analyse des magnetischen Problems
20 %Kreissehne in Winkel umrechnen
21 %https://www.studysmarter.de/schule/mathe/geometrie/kreissehne/
22 sWinkel = 2*(asind(b/(2*r)));
23 %X-Verschiebung nach links vom Nullpunkt nach links
24 %Ankathete/hypotenuse = cos(winkel)
25 xVersch = cosd((180-sWinkel)/2)*r;
26 %Y-Verschiebung, also weniger als d
27 yhalfLength = sind((180-sWinkel)/2)*r;
28 yVersch = (d - 2*yhalfLength)/2;
29
30 %zeichne "runde" Kupferbusbar mit Schlitz
31 % linker Bogen
32 mi_drawarc(-xVersch,yVersch,-xVersch,yVersch+2*yhalfLength,180-sWinkel,1);
33 mi_selectarcsegment(-xVersch,yVersch);
34 mi_seteditmode('arcsegments')
35 mi_moverotate(-xVersch,yVersch+yhalfLength,180);
36 mi_clearselected();
37
```

```
38 % rechter Bogen
39 mi_drawarc(b/2,yVersch,b/2,yVersch+2*yhalfLength,180-sWinkel,1);
40
41 % Schlitz
42 mi_addnode(-xVersch,sd+yVersch);
43 mi_addnode(b/2,sd+yVersch);
44 mi_addnode(-xVersch,(d/2)+yhalfLength-sd);
45 mi_addnode(b/2,(d/2)+yhalfLength-sd);
46
47 % zeichne unteren Ausschnitt
48 mi_drawline(-xVersch,yVersch,-xVersch,sd+yVersch);
49 mi_drawline(-xVersch,sd+yVersch,b/2,sd+yVersch);
50 mi_drawline(b/2,sd+yVersch,b/2,yVersch);
51
52 % zeichne oberen Ausschnitt
53 mi_drawline(-xVersch,(d/2)+yhalfLength-sd,b/2,(d/2)+yhalfLength-sd);
54 mi_drawline(-xVersch,(d/2)+yhalfLength-sd,-xVersch,yVersch+2*yhalfLength);
55 mi_drawline(b/2,(d/2)+yhalfLength-sd,b/2,yVersch+2*yhalfLength);
56
57 % Stoerfeldobjekt
58 mi_drawarc((d/2)+3,3,(d/2)+3,7,180,1);
59 mi_selectarcsegment((d/2)+3,3);
60 mi_mirror((d/2)+3,3,(d/2)+3,7);
61 mi_selectarcsegment((d/2)+3,3);
62 mi_setgroup(1);
63
64 %fuege runde Randbedingungen hinzu
65 mi_makeABC();
66
67 %fuege Material Labels hinzu
68 mi_addblocklabel(0,(d/2)-0.1); %Kupfer
69 mi_addblocklabel(0,d+Abstand/3); %Luft
70
71 mi_getmaterial('Copper'); %hole Materialien aus Bibliothek
72 mi_getmaterial('Air');
73
74 mi_selectlabel(0,(d/2)-0.1); %fuege Eigenschaft dem Label hinzu
75 mi_setblockprop('Copper',0,0,'iCopper+',0,0,0);
76 mi_clearselected();
77
78 mi_selectlabel(0,d+Abstand/3); %fuege Eigenschaft dem Label hinzu
79 mi_setblockprop('Air',0,0,'None',0,0,0);
80 mi_clearselected();
81
82 %Stoerfeld Eigenschaften
83 mi_addcircprop('iInterference',0,1); %Stoerfeld Erzeugung
84 mi_addblocklabel((d/2)+3,5); %Label fur Stoerfeldobjekt
85 mi_selectlabel(d+1,3);
86 mi_setblockprop('Copper',0,0,'iInterference',0,0,0);
87 mi_setgroup(1);
88 mi_clearselected();
89
```

```
90 %Problem Definition
91 mi_probdef(0, 'millimeters', 'planar', 1.e-8, 1, 30, 0);
92
93 %speichere Daten ab
94 mi_saveas('A_3_Rund_Schlitz.fem');
95 mi_savedxf('A_3_Rund_Schlitz.dxf');
96 % drei Messungen:
97 % 1: ohne Stoeferfeld
98 % 2: mit Stoeferfeld von rechts
99 % 3: mit Stoeferfeld von oben
100 for f = 1:3
101     if f>1 %Stoeferfeld Erzeugung ab zweiter Messung
102         mi_addcircprop('iInterference', 5, 1);
103     end
104     if f>2 %sorgt fuer verschobenes Stoeferfeld
105         mi_selectgroup(1);
106         mi_movetranslate(-8,8);
107     end
108 % Start von Sweep Schleife
109 for i = 1:length(Stromvector)
110 %Schaltungseigenschaft fuer Strom neu erstellen
111 mi_addcircprop('iCopper+', Stromvector(i), 1); %aus Ebene
112
113 %Analysieren und Laden von Loesungen und Plots
114 mi_analyze();
115 mi_loadsolution();
116 mo_showvectorplot(1,1);
117 mo_zoomnatural();
118 mo_showdensityplot(1,0,0,0, 'mag');
119 mi_loadsolution();
120 mo_savebitmap(char(strrep(cd + "\frames\frame - Rund_Schlitz_20A_10mm" + "_" + f + "_" + i +
    ".bmp", '\ ', '\\ ')));
121
122 %% Daten in einer Matrix mit konfigurierbarer Groesse speichern
123 StartX = (-b/2)/3;
124 EndX = (b/2)/3;
125 %StartY = d/2;
126 StartY = 0;
127 EndY = d;
128
129 PointsH = 60; %Anzahl an Punkten in Hoehe
130 PointsW = 7; %Anzahl an Punkten in Breite
131 spaceBetweenPointsH = (EndY-StartY)/(PointsH-1); %Schrittweite in Hoehe
132 spaceBetweenPointsW = (EndX-StartX)/(PointsW-1); %Schrittweite in Breite
133
134 MatrixX(PointsH+1,PointsW+1) = zeros; %Matrix fuer Einfluss in x-Richtung
135 MatrixY(PointsH+1,PointsW+1) = zeros; %Matrix fuer Einfluss in y-Richtung
136
137 %Schleife fuer Zeilen
138 for z = 1:PointsH
139     MatrixX(z+1,1) = StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH; %Y-Koordinaten in 1. Spalte eintragen
140     MatrixY(z+1,1) = StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH; %Y-Koordinaten in 1. Spalte eintragen
```

```

141     %Schleife fuer Spalten
142     for s = 1:PointsW
143         MatrixX(1,s+1) = StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW; %X-Koordinaten in 1. Zeile
144             eintragen
145         MatrixY(1,s+1) = StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW; %X-Koordinaten in 1. Zeile
146             eintragen
147         res = mo_getb(StartX+(s-1)*spaceBetweenPointsW, StartY+(z-1)*spaceBetweenPointsH); %
148             erhaelt die magnetische Flussdichte (Ergebnis in x- und y-Richtung)
149         MatrixX(z+1,s+1) = res(1,1); %Ergebnis in x-Richtung an aktuellen Koordinaten, die
150             sich in der 1. Zeile/Spalte befinden
151         MatrixY(z+1,s+1) = res(1,2); %Ergebnis in y-Richtung an aktuellen Koordinaten, die
152             sich in der 1. Zeile und 2. Spalte befinden
153     end
154 end
155
156 InfluenceX = MatrixX(2:PointsH+1,2:PointsW+1); %Einfluss in X-Richtung
157 InfluenceY = MatrixY(2:PointsH+1,2:PointsW+1); %Einfluss in Y-Richtung
158 quiver(MatrixX(1,2:(PointsW+1)), MatrixX(2:(PointsH+1),1), InfluenceX(:, :), InfluenceY(:, :)); %
159     quiver mit Pfeilen fuer Ergebnismatrix
160
161 axis equal
162 xlabel('X-Position [mm]');
163 ylabel('Y-Position [mm]');
164 xline(-0.3, '-.r'); %rote Linie in der Mitte der Leiterbahn, an der sich die Sensoren
165     befinden
166
167 %Wert aus Matrix nahe an Position der Sensorflaeche
168 Wert_amSensor_auf_Platine_oben = InfluenceX(56,3);
169 Wert_amSensor_auf_Platine_unten = InfluenceX(5,3);
170 Diff_ergebnis = (Wert_amSensor_auf_Platine_oben - Wert_amSensor_auf_Platine_unten)/2;
171
172 %% Stromsweep + Stoerfeldsweep abspeichern in Matrix
173 %Zeile 1 = Strom
174 %Zeile 2 = magn. Flussdichte in Sensorflaeche oben (kein Stoerfeld)
175 %Zeile 3 = magn. Flussdichte in Sensorflaeche unten (kein Stoerfeld)
176 %Zeile 4 = max % Nutzung des linearen Bereichs vom CT100 Sensor (kein Stoerfeld)
177 %Zeile 5 = max % Nutzung des linearen Bereichs vom TMR2104 Sensor (kein Stoerfeld)
178 %Zeile 6 = magn. Flussdichte in Sensorflaeche oben (Stoerfeld von der Seite)
179 %Zeile 7 = magn. Flussdichte in Sensorflaeche unten (Stoerfeld von der Seite)
180 %Zeile 8 = max % Nutzung des linearen Bereichs vom CT100 Sensor (Stoerfeld von der Seite)
181 %Zeile 9 = max % Nutzung des linearen Bereichs vom TMR2104 Sensor (Stoerfeld von der Seite)
182 %Zeile 10 = Diff_ergebnis (Stoerfeld von der Seite)
183 %Zeile 11 = magn. Flussdichte in Sensorflaeche oben (Stoerfeld von Oben)
184 %Zeile 12 = magn. Flussdichte in Sensorflaeche unten (Stoerfeld von Oben)
185 %Zeile 13 = max % Nutzung des linearen Bereichs vom CT100 Sensor (Stoerfeld von Oben)
186 %Zeile 14 = max % Nutzung des linearen Bereichs vom TMR2104 Sensor (Stoerfeld von Oben)
187 %Zeile 15 = Diff_ergebnis (Stoerfeld von Oben)
188
189 if f==1
190     StromErgebnisMatrix(1,i) = Stromvector(i);
191     StromErgebnisMatrix(2,i) = Wert_amSensor_auf_Platine_oben;
192     StromErgebnisMatrix(3,i) = Wert_amSensor_auf_Platine_unten;
193     StromErgebnisMatrix(4,i) = (max(abs(Wert_amSensor_auf_Platine_oben), abs(
194         Wert_amSensor_auf_Platine_unten)))/25.13e-3)*100;

```

```

185     StromErgebnisMatrix(5,i) = (max(abs(Wert_amSensor_auf_Platine_oben),abs(
        Wert_amSensor_auf_Platine_unten)) /8.7e-3)*100;
186 elseif f==2
187     StromErgebnisMatrix(6,i) = Wert_amSensor_auf_Platine_oben;
188     StromErgebnisMatrix(7,i) = Wert_amSensor_auf_Platine_unten;
189     StromErgebnisMatrix(8,i) = (max(abs(Wert_amSensor_auf_Platine_oben),abs(
        Wert_amSensor_auf_Platine_unten)) /25.13e-3)*100;
190     StromErgebnisMatrix(9,i) = (max(abs(Wert_amSensor_auf_Platine_oben),abs(
        Wert_amSensor_auf_Platine_unten)) /8.7e-3)*100;
191     StromErgebnisMatrix(10,i) = Diff_ergebnis;
192 else
193     StromErgebnisMatrix(11,i) = Wert_amSensor_auf_Platine_oben;
194     StromErgebnisMatrix(12,i) = Wert_amSensor_auf_Platine_unten;
195     StromErgebnisMatrix(13,i) = (max(abs(Wert_amSensor_auf_Platine_oben),abs(
        Wert_amSensor_auf_Platine_unten)) /25.13e-3)*100;
196     StromErgebnisMatrix(14,i) = (max(abs(Wert_amSensor_auf_Platine_oben),abs(
        Wert_amSensor_auf_Platine_unten)) /8.7e-3)*100;
197     StromErgebnisMatrix(15,i) = Diff_ergebnis;
198 end
199 end %Ende von Stromsweep Schleife
200 end %Ende von Messdurchlaufen
201
202 closefemm;

```

Listing A.8: Relevante geänderte Codeabschnitte für rechteckigen und runden Leiter, sowie für Stromschikane

```

1 %% relevante Codezeilen fuer rechteckigen Leiter
2 %% Code fuer simulation ansteigender Stroeme
3 % Konfiguration fuer Ergebnismatrix vor Schleife
4 StartX = b/3;
5 EndX = (2/3)*b;
6 StartY = h-(1.6/2)-1.3;
7 EndY = h+(1.6/2)+1.3;
8 PointsH = 30; %Anzahl an Punkten in Hoehe
9 PointsW = 15; %Anzahl an Punkten in Breite
10 %
11 % Wertee aus Matrix nahe an Position der Sensorflaechen
12 Wert_amSensor_auf_Platine_oben = InfluenceX(25,8);
13 Wert_amSensor_auf_Platine_unten = InfluenceX(5,8);
14 Diff_ergebnis = (Wert_amSensor_auf_Platine_oben - Wert_amSensor_auf_Platine_unten)/2;
15 %
16 % Position von xline im Verlauf des linearen Bereichs
17 xline([177.365 512.32], '-', 'LineWidth', 1.5, 'HandleVisibility', 'off');
18 %% Zusätzlicher Code fuer Stoerfelder
19 % Stoerfeldobjekt
20 mi_seteditmode('arcsegments')
21 mi_drawarc(b+3,-2,b+3,2,180,1);
22 mi_selectarcsegment(b+3,-2);
23 mi_mirror(b+3,-2,b+3,2);
24 mi_selectarcsegment(b+3,-2);

```



```
25 mi_setgroup(1);
26 % Stoerfeld Eigenschaften
27 mi_addcircprop('iInterference', 0, 1); %Stoerfeld Erzeugung
28 mi_addblocklabel(b+3,0); %Label fur Stoerfeldobjekt
29 mi_selectlabel(b+3,0);
30 mi_setblockprop('Copper',0, 0, 'iInterference',0, 0, 0);
31 mi_setgroup(1);
32 mi_clearselected();
33 %
34
35 %% relevante Codezeilen fuer runden Leiter
36 %% Code fuer simulation ansteigender Stroeme
37 % Konfiguration fuer Ergebnismatrix vor Schleife
38 StartX = -(d/2);
39 EndX = d/2;
40 StartY = -2.2;
41 EndY = d+2.2;
42 PointsH = 60; %Anzahl an Punkten in Hoehe
43 PointsW = 15; %Anzahl an Punkten in Breite
44 %
45 % Werte aus Matrix nahe an Position der Sensorflaeche
46 Wert_amSensor_auf_Platine_oben = InfluenceX(58,8);
47 Wert_amSensor_auf_Platine_unten = InfluenceX(3,8);
48 Diff_ergebnis = (Wert_amSensor_auf_Platine_oben - Wert_amSensor_auf_Platine_unten)/2;
49 %
50 % Position von xline im Verlauf des linearen Bereichs
51 xline([139.7 403.524], '-', 'LineWidth', 1.5, 'HandleVisibility', 'off');
52 %% Zusaeztlicher Code fuer Stoerfelder
53 % Stoerfeldobjekt
54 mi_seteditmode('arcsegments')
55 mi_drawarc((d/2)+2,0.25,(d/2)+2,2.25,180,1);
56 mi_selectarcsegment((d/2)+2,0.25);
57 mi_mirror((d/2)+2,0.25,(d/2)+2,2.25);
58 mi_selectarcsegment((d/2)+2,0.25);
59 mi_setgroup(1);
60 % Stoerfeld Eigenschaften
61 mi_addcircprop('iInterference', 0, 1); %Stoerfeld Erzeugung
62 mi_addblocklabel((d/2)+2,1.25); %Label fur Stoerfeldobjekt
63 mi_selectlabel((d/2)+2,1.25);
64 mi_setblockprop('Copper',0, 0, 'iInterference',0, 0, 0);
65 mi_setgroup(1);
66 mi_clearselected();
67 %
68 if f>2 %sorgt fuer verschobenes Stoerfeld
69     mi_selectgroup(1);
70     mi_movetranslate(-2,2);
71 end
72 %
73
74 %% relevante Codezeilen fuer Stromschikane
75 %% Code fuer simulation ansteigender Stroeme
76 % Konfiguration fuer Ergebnismatrix vor Schleife
```

```
77 StartX = 0;
78 EndX = (2*b)+sb;
79 StartY = -2;
80 EndY = h+2;
81 PointsH = 15;           %Anzahl an Punkten in Hoehe
82 PointsW = 33;           %Anzahl an Punkten in Breite
83 %-----
84 % Werte aus Matrix nahe an Position der Sensorflaeche
85 Wert_amSensor_auf_Platine_links = InfluenceX(13,8);
86 Wert_amSensor_auf_Platine_rechts = InfluenceX(13,26);
87 Diff_ergebnis = (Wert_amSensor_auf_Platine_links - Wert_amSensor_auf_Platine_rechts)/2;
88 %-----
89 % Position von xline im Verlauf des linearen Bereichs
90 xline([184.7205 533.566], '-','LineWidth', 1.5 , 'HandleVisibility', 'off');
91 %% Zusätzlicher Code fuer Stoerfelder
92 % Stoerfeldobjekt
93 mi_seteditmode('arcsegments')
94 mi_drawarc((2*b)+sb+2,-1,(2*b)+sb+2,1,180,1);
95 mi_selectarcsegment((2*b)+sb+2,-1);
96 mi_mirror((2*b)+sb+2,-1,(2*b)+sb+2,1);
97 mi_selectarcsegment((2*b)+sb+2,-1);
98 mi_setgroup(1);
99 % Stoerfeld Eigenschaften
100 mi_addcircprop('iInterference', 0, 1); %Stoerfeld Erzeugung
101 mi_addblocklabel((2*b)+sb+2,0); %Label fuer Stoerfeldobjekt
102 mi_selectlabel((2*b)+sb+2,0);
103 mi_setblockprop('Copper',0, 0, 'iInterference',0, 0, 0);
104 mi_setgroup(1);
105 mi_clearselected();
106 %-----
107 if f>2 %sorgt fuer verschobenes Stoerfeld
108     mi_selectgroup(1);
109     mi_movetranslate(-b-2,4);
110 end
111 %-----
112 % Start von Sweep Schleife
113 for i = 1:length(Stromvector)
114 %Schaltungseigenschaft fuer Strom neu erstellen
115 mi_addcircprop('iCopper+', Stromvector(i) , 1); %aus Ebene
116 mi_addcircprop('iCopper-', -Stromvector(i) , 1); %in Ebene
117 % ...
118 end
```

A.4.4 Kalibrierung

Zur Erstellung der Kennlinie bei der Kalibrierung wurde der folgende MATLAB-Code verwendet. Der Code, der für die runde Stromschiene ohne Schlitz geschrieben wurde, weist die gleiche Struktur auf wie der Code für die Kalibrierung der geschlitzten Stromschiene. Der einzige Unterschied liegt in den Daten, die in den

Zeilen 6 und 7 des Codes geladen werden, da hier für die geschlitzte Stromschiene andere Werte verwendet werden.

Listing A.9: Kalibrierung der Sensorplatinen für mehrere Verstärkungen

```

1 set(0, 'DefaultLineWidth', 1, 'DefaultAxesFontSize', 12, 'defaultTextInterpreter', 'latex');
2 close all;
3 clc ;
4 clear all;
5 %%
6 TMR2104 = load('2025_03_12-11Uhr_42min_Calib_Current_Sensor_Rundleiter_TMR2104_AllGains');
7 CT100    = load('2025_02_19_Calib_Current_Sensor_Rundleiter_CT100_AllGains.mat');
8 %% alle Verstärkungen durchgehen fuer TMR2104
9 Erg(8,5) = zeros; %Ergebnismatrix
10 % Schleife zum durchgehen aller Verstärkungen
11 for gainVec= 1:8
12 % Zeit in sec
13 t = TMR2104.timevec(gainVec,:);
14 % Ausgang nach Instrumentenverstärker mit gain zwischen 128 und 1
15 Vamp = TMR2104.Vamp(gainVec,:);
16 % Ausgang Sensor 1
17 S1 = TMR2104.Vs1(gainVec,:);
18 % Ausgang Sensor 2
19 S2 = TMR2104.Vs2(gainVec,:);
20 % Stromausgang gemessen mit Shuntwiderstand
21 I = TMR2104.Imeas(gainVec,:);
22
23 %% lineare Regression mit Polyfit(Methode der kleinsten Quadrate)
24 P = polyfit(Vamp,I,1);
25 Icalc = P(1).*Vamp+P(2);
26 % es wird nur eine begrenzte Anzahl an Werten verwendet
27 xReduz = floor(linspace(1,length(t),5e3));
28
29 % plot von TMR2104
30 scatter(Vamp(xReduz),I(xReduz),5,'filled');
31 hold on
32 % Plot begrenzen, sodass Gerade nicht ueber Maximalpunkte von scatter gehen
33 y_min = min(I(xReduz));
34 y_max = max(I(xReduz));
35 Icalc(Icalc < y_min | Icalc > y_max) = NaN;
36 plot(Vamp(xReduz),Icalc(xReduz),'-w','LineWidth', 1, 'HandleVisibility', 'off');
37 % Speichert jeweils fuer jede Verstärkung Ergebniswerte fuer:
38 Erg(gainVec,1) = TMR2104.GAIN(gainVec);
39 Erg(gainVec,2) = P(1); % Steigung
40 Erg(gainVec,3) = P(2); % Y-Achsenabschnitt
41 Erg(gainVec,4) = P(1).*0+P(2); % Strom bei 0V
42 Erg(gainVec,5) = P(1).*3.3+P(2); % Strom bei 3.3V
43 end %ende von Schleife des TMR2104
44 hold off
45 xlim([0 3.3]);
46 xlabel('$V_{out}$ / V')
47 ylabel('$I_{meas}$ / A')
48 title('TMR2104-rund');

```

```
49 legend('Gain = 128', 'Gain = 64', 'Gain = 32', 'Gain = 16', 'Gain = 8', ...
50 'Gain = 4', 'Gain = 2', 'Gain = 1', 'Location', 'northwest', 'FontSize', 12);
51 grid on
52 box on
53
54 %% alle Verstaerkungen durchgehen fuer CT100
55 figure(2);
56 Erg_ct(8,5) = zeros; %Ergebnismatrix
57 % Schleife zum durchgehen aller Verstaerkungen
58 for gainVec_ct= 1:8
59 % time in sec
60 t_ct = CT100.timevec(gainVec_ct,:);
61 % Ausgang nach Instrumentenverstaerger mit gain zwischen 128 und 1
62 Vamp_ct = CT100.Vamp(gainVec_ct,:);
63 % Ausgang Sensor 1
64 S1_ct = CT100.Vs1(gainVec_ct,:);
65 % Ausgang Sensor 2
66 S2_ct = CT100.Vs2(gainVec_ct,:);
67 % Stromausgang gemessen mit Shuntwiderstand
68 I_ct = CT100.Imeas(gainVec_ct,:);
69
70 %% lineare Regression mit Polyfit(Methode der kleinsten Quadrate)
71 P_ct = polyfit(Vamp_ct,I_ct,1);
72 Icalc_ct = P_ct(1).*Vamp_ct+P_ct(2);
73 % es wird nur eine begrenzte Anzahl an Werten verwendet
74 xReduz_ct = floor(linspace(1,length(t_ct),5e3));
75
76 % plot von CT100
77 scatter(Vamp_ct(xReduz_ct),I_ct(xReduz_ct),5,'filled');
78 hold on
79 % Plot begrenzen, sodass Gerade nicht ueber Maximalpunkte von scatter gehen
80 y_min_ct = min(I_ct(xReduz_ct));
81 y_max_ct = max(I_ct(xReduz_ct));
82 Icalc_ct(Icalc_ct < y_min_ct | Icalc_ct > y_max_ct) = NaN;
83 plot(Vamp_ct(xReduz_ct),Icalc_ct(xReduz_ct),'-w','LineWidth', 1, 'HandleVisibility', 'off')
84 ;
85 % Speichert jeweils fuer jede Verstaerkung Ergebniswerte fuer:
86 Erg_ct(gainVec_ct,1) = CT100.GAIN(gainVec_ct);
87 Erg_ct(gainVec_ct,2) = P_ct(1); % Steigung
88 Erg_ct(gainVec_ct,3) = P_ct(2); % Y-Achsenabschnitt
89 Erg_ct(gainVec_ct,4) = P_ct(1).*0+P_ct(2); % Strom bei 0V
90 Erg_ct(gainVec_ct,5) = P_ct(1).*3.3+P_ct(2); % Strom bei 3.3V
91 end %ende von Schleife des CT100
92 hold off
93 xlim([0 3.3]);
94 xlabel('$V_{out}$ / V')
95 ylabel('$I_{meas}$ / A')
96 title('CT100-rund');
97 legend('Gain = 128', 'Gain = 64', 'Gain = 32', 'Gain = 16', 'Gain = 8', ...
98 'Gain = 4', 'Gain = 2', 'Gain = 1', 'Location', 'northwest', 'FontSize', 12);
99 grid on
100 box on
```

A.4.5 Auswertung homogener Störfelder

Die Messungen zur Erprobung des Einflusses externer homogener Störfelder auf die Sensoren werden mit dem folgenden MATLAB-Skript ausgewertet. Als Beispiel ist der Code für den Sensor TMR2104 angegeben. Für den anderen Sensor ist der Code genau gleich. Es wird lediglich der Datensatz für den Sensor CT100 geladen und verwendet, anstatt des Datensatzes für den Sensor TMR2104. Das Skript stellt in einer Grafik die Spannungen der Sensoren vor und nach der Verstärkung durch den Instrumentenverstärker dar, und in einer weiteren Grafik wird der Verlauf des externen Störfeldes gezeigt.

Listing A.10: Auswertung externer homogener Störfelder

```

1  set(0, 'DefaultLineLineWidth', 1, 'DefaultAxesFontSize', 12, 'defaultTextInterpreter', 'latex');
2  close all; clc; clear all;
3  %%
4  TMR2104 = load('2025_03_12-16Uhr_32min_Stoerfeld_TMR2104.mat');
5  %% Vergleicht Sensorwerte vor und nach der Verstärkung
6  % reduziert die Anzahl an verwendeten Punkten
7  redu = floor(linspace(1, length(TMR2104.timevec), 10e3));
8  figure(1)
9  % zeichnet Linien zur besseren Uebersicht
10 x1 = [2.665 4.38 6.2 7.8 9.275 11.13 15.73 17.5];
11 tiledlayout(2,1, 'TileSpacing', 'tight', 'Padding', 'tight')
12 % Ausgang nach der Verstärkung mit DC-Kopplung gemessen
13 nexttile
14     plot(TMR2104.timevec(redu), TMR2104.Vamp(redu))
15     ylim([0.9 1.8])
16     xlabel(' ', 'FontSize', 15)
17     ylabel('$V_{\mathrm{amp}}$ / V', 'FontSize', 15)
18     xticklabels([])
19     grid on
20     for n = 1 : 8
21         line([x1(n), x1(n)], [0.9 1.8], 'color', 'k', 'LineWidth', 1.5)
22     end
23 % Sensorspannungen vor Verstärkung mit AC-Kopplung gemessen
24 nexttile
25     plot(TMR2104.timevec(redu), TMR2104.Vs1(redu), ...
26          TMR2104.timevec(redu), TMR2104.Vs2(redu));
27     xlabel('t / s', 'FontSize', 15)
28     ylabel('$V_{\mathrm{sensor}}$ / V', 'FontSize', 15)
29     grid on
30     yticks([-0.1:0.05:0.1])
31     ylim([-0.12 0.12])
32     for n = 1 : 8
33         line([x1(n), x1(n)], [-0.12 0.12], 'color', 'k', 'LineWidth', 1.5)
34     end
35 %% Durch Strom durch Helmholtzspule erzeugtes Stoerfeld plotten
36 % 1 A Spulenstrom => 500 A/m Stoerfeld
37 figure(2)
38     plot(TMR2104.timevec(redu), ...
39          TMR2104.Imeas(redu).*500)
40     xlabel('t / s', 'FontSize', 15)
41     ylabel('$H_{\mathrm{stoer}}$ / A/m', 'FontSize', 15)

```

```
42     grid on
43     xticks([0:2:20])
44     ylim([-1 1].*700)
45     for n = 1 : 8
46         line([x1(n), x1(n)], [-700 700], 'color', 'k', 'LineWidth', 1.5)
47     end
```

A.5 Verwendete Software

In der Tabelle A.1 sind die im Rahmen der Bearbeitung des Themas der Bachelorarbeit verwendeten Softwarepakete aufgelistet.

Tabelle A.1: Verwendete Softwarepakete

Tool	Verwendung
L ^A T _E X	Textsatz- und Layout-Werkzeug verwendet zur Erstellung dieses Dokuments
MATLAB	Plattform für numerische Berechnungen, zur Analyse von Daten und Steuerung von FEMM
FEMM	Simulationssoftware für finite Elemente, in dieser Arbeit Magnetfelder in einer Ebene
Fusion 360	Software für 3D Design zur entwickeln des Platinenhalters
EAGLE	EDA-Software zur Erstellung von Platinenentwürfen
Microsoft Paint	Software zur Bildbearbeitung

B Erklärung zur Nutzung von KI-Tools

Recherche:

KI-gestützten Suchmaschinen [19] wurden verwendet, um relevante Punkte für verschiedene Themen zu identifizieren und zu sortieren/gliedern.

Textverarbeitung und Stilverbesserung:

Ebenso wurden KI-basierte Sprachmodelle zur Unterstützung bei der Formulierung und Optimierung von Textpassagen hinsichtlich Satzstruktur, Rechtschreibung und Grammatik verwendet. Alle generierten Vorschläge wurden von mir überprüft und Teils nach Anpassungen erst danach in der Arbeit übernommen.

Ich versichere, dass der Einsatz von KI-Tools in dieser Arbeit ausschließlich der Optimierung des Arbeitsprozesses diente und nicht den eigenständigen wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn ersetzt hat. Sämtliche KI-generierten Inhalte und Vorschläge wurden von mir kritisch reflektiert und bei der Erstellung der Arbeit in den wissenschaftlichen Kontext eingebettet. Unzulässige Übernahmen oder die unkritische Verwendung von KI-generierten Texten wurden vermieden, um die wissenschaftliche Redlichkeit und Eigenständigkeit der Arbeit sicherzustellen.

C CD

Der Anhang zur Arbeit befindet sich zusätzlich auf CD und kann beim Erstgutachter eingesehen werden. Auf der CD enthalten sind alle Quellcodedateien mit den unverarbeiteten Messdaten.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Magnetfeld eines geraden Leiters	4
2.2	Messbrücke innerhalb eines TMR-Sensors	5
3.1	Charakteristik des Sensors CT100	7
3.2	Nähere Betrachtung der Messergebnisse des Sensors CT100	8
3.3	CT100 Vergleich steigende und sinkende Feldstärke	9
3.4	Charakteristik des TMR2104	10
3.5	Nähere Betrachtung der TMR2104 Messergebnisse	11
3.6	TMR2104 Vergleich steigende und sinkende Feldstärke	11
3.7	Messaufbau für Charakterisierung der TMR Sensoren	13
4.1	Simulationsaufbau in FEMM für Leiterbahn auf Platine	18
4.2	Ergebnismatrix für rechteckige Leiterbahn	19
4.3	FEMM Simulation Leiterbahn auf Platine	20
4.4	FEMM Simulation einer runden Busbar	21
4.5	Ergebnismatrix für runde Busbar	22
4.6	FEMM Simulation einer runden Busbar mit zwei gefrästen Schlitten	23
4.7	Ergebnismatrix für runde Busbar mit zwei gegenüberliegenden Schlitten	24
4.8	FEMM Simulation einer Stromschikane auf einem PCB im Querschnitt	25
4.9	Ergebnismatrix für Messschikane	26
4.10	Störeinflüsse auf geschlitzter runder Stromschiene	27
4.11	Vergleich der linearen Bereiche bei verschiedenen Strömen im geschlitzten Leiter	29
4.12	Sensorausgangsspannung bei verschiedenen Strömen im geschlitzten Leiter	31
5.1	Rendering der Platine mit Halter und Busbar	35
5.2	Platinendesign für den Sensor CT100	36
5.3	Unbestückte und bestückte Platinen im Vergleich	37
5.4	Verstärkerbeschaltung der externen Verarbeitungsplatine	38
6.1	Messaufbau für verschiedene Versuchsmessungen	41

6.2	Messaufbau zur Kalibrierung und Strommessung	42
6.3	Blockschaltbild für den Messaufbau der Kalibrierungsmessung	43
6.4	Kalibrierungskennlinien des Sensors CT100 bei runder Stromschiene	45
6.5	Kalibrierungskennlinien des Sensors TMR2104 bei runder Stromschiene	46
6.6	Kalibrierungskennlinien des Sensors CT100 bei geschlitzter Stromschiene	48
6.7	Kalibrierungskennlinien des Sensors TMR2104 bei geschlitzter Stromschiene	49
6.8	Helmholtzspule mit Sensorplatine und Magneten im Messaufbau zur Störfeldmessung	52
6.9	Simulation einer Helmholtzspule zur Veranschaulichung des Magnetfeldverlaufes	53
6.10	Blockschaltbild für den Messaufbau der homogenen Störfeldmessung	54
6.11	Vergleich der Sensorspannungen des Sensors CT100 bei Störfeldmessung	55
6.12	Feldstärkeverlauf bei Störfeldmessungen mit homogenem Feld für beide Sensoren	56
6.13	Vergleich der Sensorspannungen des Sensors TMR2104 bei Störfeldmessung	57
6.14	Vergrößerte Störbereiche für beide Sensoren im Vergleich	59
A.1	Simulationsaufbau in FEMM für runde Busbar aus Kupfer	65
A.2	Simulationsaufbau in FEMM für runde Busbar aus Kupfer mit zwei Schlitzten	66
A.3	Simulationsaufbau in FEMM Strommessschikane auf Platine	66
A.4	Störeinflüsse auf rechteckiger Stromschiene	67
A.5	Störeinflüsse auf runder Stromschiene	68
A.6	Störeinflüsse auf Stromschikane	68
A.7	Vergleich der linearen Bereiche und der Sensorausgangsspannung für rechteckige Stromschiene	69
A.8	Vergleich der linearen Bereiche und der Sensorausgangsspannung für Stromschikane	69
A.9	Vergleich der linearen Bereiche und der Sensorausgangsspannung für runde Stromschiene	70
A.10	Vergleich der linearen Bereiche und der Sensorausgangsspannung für größere runde Stromschiene	70

Tabellenverzeichnis

4.1	Auszug aus DIN 43671 Tabelle 3 „Dauerströme für runde Stromschienen“ [14]	16
4.2	Simulationsergebnisse von magnetischen Feldern mit externer Störung.	28
4.3	Simulation magnetischer Felder - Differenzielle Ergebnisse ohne Störeinfluss	28
4.4	Maximaler Strom im linearen Bereich der Sensoren und unterschiedlichen Leitergeometrien.	30
4.5	Vergleich der prozentualen Nutzung des linearen Bereichs vom Sensor TMR2104	32
5.1	Widerstandskonfiguration zur Auswahl entsprechender Sensoren auf der Platine	35
6.1	Ergebnisse der Kalibrierung bei runder Stromschiene	47
6.2	Ergebnisse der Kalibrierung bei geschlitzter Stromschiene	50
A.1	Verwendete Softwarepakete	104

Listings

A.1	Auswertung der Charakterisierungsmessungen	71
A.2	Simulation eines rechteckigen elektrischen Leiters	77
A.3	Simulation einer runden Stromschiene	80
A.4	Simulation einer runden Stromschiene mit zwei Schlitzten	83
A.5	Simulation einer Stromschikane auf einer Platine	86
A.6	Simulation ansteigender Ströme bei runder geschlitzter Stromschiene	90
A.7	Simulation mit Störfeld bei runder geschlitzter Stromschiene	94
A.8	Relevante geänderte Codeabschnitte für rechteckigen und runden Leiter, sowie für Stromschikane	98
A.9	Kalibrierung der Sensorplatinen für mehrere Verstärkungen	101
A.10	Auswertung externer homogener Störfelder	103

Glossar

Footprint Fußabdruck eines Bauteils auf der Leiterplatte.

0603 Genormte SMD Bauteilgröße für PCB's.

Polyfit MATLAB Funktion zur Bestimmung der Koeffizienten eines Polynoms.

Abkürzungen

2D Zweidimensionale Darstellung.

Abb. Abbildung.

AMR Anisotroper Magnetwiderstand.

BNC Bayonet Neill-Concelman - Koaxialkabel für unter anderem Hochfrequenztechnik.

CAD Computer-Aided Design (computergestützte Konstruktion).

CMR Kolossaler Magnetwiderstand.

EIS Elektrochemische Impedanzspektroskopie.

FEMM Finite Element Method Magnetics.

GMR Riesenmagnetwiderstand.

PCB Printed Circuit Board.

Symbolverzeichnis

$mils$ Tausendstel Zoll.

μ_0 Magnetische Feldkonstante.

H Magnetische Feldstärke in A/m .

B Magnetische Flussdichte in Tesla.

W Leiterbahnbreite.

Ω Einheit für elektrischen Widerstand.

μ_r Relative Permeabilität.

A Leiterquerschnitt.

r Abstand der betrachteten magn. Flussdichte vom elektrischen Leiter.

I Elektrischer Strom in Ampere.

T_{rise} Temperaturanstieg in Grad Celsius.

oz Einheit für Kupfergewicht auf einem Quadratfuß Leiterplattenfläche.

Erklärung zur selbständigen Bearbeitung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle im Rahmen der Arbeit eingesetzten Hilfsmittel, einschließlich KI-gestützter Werkzeuge, wurden ausschließlich als unterstützende Instrumente verwendet, um die Effizienz in der Recherche, Textverarbeitung und Korrektur zu steigern. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

_____	_____	
Ort	Datum	Unterschrift im Original