

**2.7 GMR-Effekt**  
Praktikum B  
Universität zu Köln  
2. Physikalisches Institut

Maria Melamed, Lisa Marie Gerhard  
Betreuer: Steffen Harms

Durchführung: 09.05.2016

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1	Allgemeine Grundlagen . . . . .	2
2.2	GMR-Effekt . . . . .	4
2.3	GMR-Sensoren . . . . .	9
2.4	Messung des GMR-Effekts . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Versuchdurchführung</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>Versuchsauswertung</b>	<b>12</b>
4.1	Eichung eines GMR-Sensors zur Strommessung . . . . .	12
4.2	Eichung von zwei GMR-Sensoren zur Magnetfeldmessung . . . . .	13
4.2.1	Lange Spule . . . . .	14
4.2.2	Helmholtzspule . . . . .	15
4.3	Messung des GMR-Effekts an Schichtsystemen mit Zwischenschichtkopp- lung . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>20</b>
5.1	Quellenverzeichnis . . . . .	22

# 1 Motivation

In diesem Versuch soll sich mit dem “Giant Magnetoresistance“-Effekt, kurz GMR-Effekt, befasst werden. Dabei geht es um den Einfluss von Magnetfeldern auf den elektrischen Widerstand.

Obwohl schon 1897 eine solche Abhängigkeit erkannt wurde und der GMR-Effekt deutlich größer als der gewöhnliche Magnetwiderstand ist, wurde der Effekt erst vor einigen Jahren entdeckt. Die Bedeutsamkeit dieses Effektes zeigt sich auch daran, dass den Entdeckern dafür 2007 der Nobelpreis verliehen wurde.

Tatsächlich findet der GMR-Effekt auch wichtige Anwendungen. So wird er heute in Festplatten verwendet, indem GMR-Sensoren den Lesekopf darstellen.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Allgemeine Grundlagen

Um den GMR-Effekt und damit den Inhalt dieses Versuchs zu verstehen, müssen einige Grundlagen der Physik bekannt sein.

Daher zunächst einige Informationen über **Magnetismus**: Magnetismus ist ein wichtiges Phänomen in der Physik und hat viele alltägliche Anwendungen. Die anziehende und abstoßende Wechselwirkung magnetischer Körper lässt sich leicht beobachten, die Erklärung ist jedoch klassisch kaum möglich. Quantenmechanisch wird Magnetismus bei Betrachtung des durch Spin und Bahndrehimpuls erzeugte magnetische Moment schon verständlicher.

Magnetismus steht auch in engem Zusammenhang zu elektrischen Strömen, wie beispielsweise die Maxwell-Gleichungen zeigen. Weiterhin wichtig ist, dass Magnetfeldlinien immer geschlossen sind und es keine magnetischen Monopole gibt.

Es gibt unterschiedliche Formen von Magnetismus. So scheinen ferro- und paramagnetische Körper zunächst kein magnetisches Feld zu haben. Gerät dieser Körper jedoch in ein externes Magnetfeld, richten sich die magnetischen Momente (die zuvor in alle Raumrichtungen verteilt waren) parallel dazu aus. Es findet also eine Magnetisierung des Objekts statt.

Beim Ferromagneten sind die magnetischen Momente gekoppelt. Entfernt man das externe Feld wieder, bleiben sie daher weiterhin ausgerichtet und der Körper somit magnetisch.

Bei Paramagneten dagegen verteilen sich die Richtungen der Momente nach Entfernen des Feldes wieder zufällig in alle Raumrichtungen, sodass er keine magnetischen Eigenschaften mehr aufweist.

Antiferromagnetische Körper verhalten sich ähnlich zu ferromagnetischen. Allerdings richten sich benachbarte magnetische Momente antiparallel aus. Daher wirken Antiferromagneten nach außen hin unmagnetisch, weisen aber im Inneren eine sehr geordnete Struktur auf und fallen daher unter den Begriff des Magnetismus.

Wichtig ist hierbei auch die **Hysteresekurve**, die die Magnetisierung beschreibt, also das Verhalten eines auf äußere Magnetfelder reagierenden Materials abhängig von einem solchen äußeren Feld. Diese Kurven haben die in Abbildung 1 zu sehende Form.

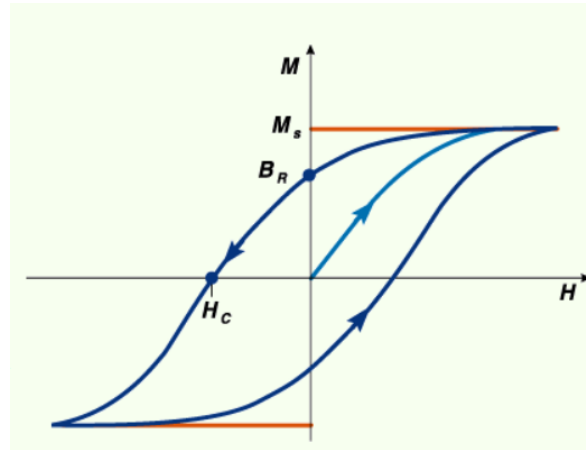
Die spitz zulaufenden Endpunkte der Kurve bei der Magnetisierung  $M_S$  entsprechen der Sättigung. Hier wurde die höchste Magnetisierung erreicht.

Der Schnittpunkt mit der y-Achse  $B_R$  heißt Remanenz. Diese wird auch Restmagnetismus genannt, denn sie entspricht der verbleibenden Magnetisierung des Ferromagneten nach Entfernen des äußeren Feldes.

Der Schnittpunkt mit der x-Achse  $H_C$  heißt Koerzitivfeldstärke und ist in diesem Versuch besonders relevant. Dies ist die magnetische Feldstärke, die nötig ist, um den Ferromagneten vollständig zu entmagnetisieren, das heißt die Remanenz zu entfernen.

---

<sup>1</sup>Quelle: [https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/lm\\_data/lm\\_324/daten/kap\\_25/node154.htm](https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/lm_data/lm_324/daten/kap_25/node154.htm)

Abbildung 1: Hysteresekurve<sup>1</sup>

Hysteresekurve weisen im Groben immer einen solchen Verlauf auf, je nach Material können sie jedoch unterschiedlich schmal, breit oder hoch sein. Die beschriebenen in der Kurve sichtbaren Größen können unterschiedlich hohe Beträge haben. Diese Eigenschaft wird in manchen GMR-Sensoren ausgenutzt.

Eine weitere in diesem Zusammenhang wichtige Größe ist der **Spin**.

Erkenntnis über den Spin ergab der Stern-Gerlach-Versuch, der für die Quantenmechanik sehr wichtig ist. Hierbei zeigte sich, dass Teilchen einen Eigendrehimpuls besitzen, der Spin  $\vec{S}$  genannt wird. Die zugehörige Quantenzahl bezeichnet man mit  $s$ .

Eine grundlegende Klassifizierung basiert darauf, ob Teilchen einen ganz- oder halbzahligen Spin besitzen, was ihre Eigenschaften stark beeinflusst. Teilchen mit ganzzahligem Spin sind die sogenannten Bosonen, Teilchen mit halbzahligen Spin Fermionen. Der Spin der Elektronen ist halbzahlige quantelt,  $s = \pm \frac{1}{2}$ , sie zählen somit zu den Fermionen. Die unterschiedlichen Vorzeichen bedeuten dabei unterschiedliche Richtungen für den Spin. Der Betrag des Spins  $\vec{S}$  lässt sich schreiben als  $S = \sqrt{s(s+1)}\hbar$ .

Berücksichtigt man neben dem Spin auch den Bahndrehimpuls  $\vec{L}$  eines Teilchens wie z.B. dem Elektron, ergibt sich dessen Gesamtdrehimpuls als  $\vec{J} = \vec{S} + \vec{L}$ .

Das bereits erwähnte **magnetische Moment** ist ähnlich wie das elektrische Dipolmoment in der Elektrik. Die allgemeine Definition lautet:

$$\vec{m} = \frac{1}{2} \int d^3r (\vec{r} \times \vec{j}(\vec{r}))$$

mit  $\vec{j}(\vec{r})$  der Stromdichte.

In einem Magnetfeld  $\vec{B}$  hat ein Teilchen mit magnetischem Moment  $\vec{m}$  eine potentielle Energie von  $E_{pot} = -\vec{m} \cdot \vec{B}$  und auf es wirkt eine Kraft  $\vec{F} = \nabla(\vec{m} \cdot \vec{B})$ .

Auch der Spin verursacht ein magnetisches Dipolmoment, das mit  $\vec{\mu}$  bezeichnet wird.

Dieses lässt sich berechnen aus

$$\vec{\mu}_S = -\frac{e}{m_e} \vec{S}$$

mit  $e$  der Elektronenladung und  $m_e$  der Elektronenmasse.

Das magnetische Moment eines Elektrons mit Bahndrehimpulsquantenzahl  $l = 1$  wird als **Bohrsches Magneton**  $\mu_B$  bezeichnet:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9,2732 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$$

Das magnetische Moment eines Teilchens mit Gesamtdrehimpuls  $\vec{J}$ , der sich wie oben beschrieben aus Spin und Bahndrehimpuls zusammensetzt, kann mittels des sogenannten **gyromagnetischen Verhältnisses**  $\gamma$  berechnet werden:

$$\vec{\mu} = \gamma \cdot \vec{J}$$

Das gyromagnetische Verhältnis ist eine von der Teilchenart abhängige Konstante. Außerdem gilt:

$$\gamma = \mu_B \cdot g_j$$

Hierbei ist  $g_j$  der sogenannte **Landé-Faktor**, bzw. g-Faktor.

Daraus folgt für das magnetische Moment:

$$\vec{\mu} = \mu_B \cdot g_j \cdot \vec{J}$$

Der Landé-Faktor wurde als Proportionalitätskonstante eingeführt, um die Diskrepanz zwischen theoretisch gemessenem und experimentell ermitteltem magnetischen Moment auszugleichen. Er hängt ab vom jeweiligen Spin und Bahndrehimpuls eines Teilchens. Betrachtet man ein Teilchen nur mit Bahndrehimpuls und ohne Spin erhält man  $g_l = 1$ , für Teilchen nur mit Spin  $g_s \approx 2$ . Allgemein kann der Landé-Faktor über folgende Formel berechnet werden:

$$g_j = 1 + \frac{j(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)}$$

## 2.2 GMR-Effekt

Materialien haben gegenüber elektrischem Strom einen Widerstand. Wie stark dieser ist, hängt von vielen Faktoren ab, wie beispielsweise dem Stoff, aus dem sie bestehen, oder auch die Temperatur, da diese die Stoffeigenschaften entscheidend beeinflusst. Auch äußere magnetische Felder tragen zum Widerstand bei, was durch den Effekt der Magnetoresistenz (MR) beschrieben wird.

Es gibt dabei zwei Möglichkeiten: der elektrische Widerstand kann größer oder kleiner werden. Im ersten Fall spricht man von einem positiven Magnetwiderstand, bei einer Verkleinerung des Widerstandes von einem negativen.

Um die Widerstandsänderung anzugeben, wird der Widerstand relativ zu dem ohne äußeres Feld angegeben:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)}$$

Üblicherweise wird dies in Prozent angegeben:

$$MR = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)} \cdot 100\%$$

Die Größe des GMR-Effekts kann, je nach Materialaufbau, Temperatur sowie weiteren Bedingungen, stark von einigen wenigen bis hin zu hundert Prozent variieren. Insgesamt ist er deutlich höher als der MR-Effekt (deshalb auch “giant“ als Ergänzung in der Bezeichnung), ist jedoch trotzdem nicht leicht zu messen.

Um den Effekt beobachten zu können, muss ein Schichtsystem untersucht werden. Dabei werden zwei ferromagnetische Schichten durch eine unmagnetische Metallschicht getrennt. Die beiden äußeren Schichten koppeln nun über die unmagnetische Schicht hinweg. Nun gibt es zwei Möglichkeiten: Die Felder der ferromagnetischen Schichten können parallel oder antiparallel ausgerichtet sein, die Schichten sind also ferromagnetisch oder antiferromagnetisch miteinander gekoppelt. Tatsächlich findet die antiferromagnetische Kopplung statt, was durch quantenmechanische Effekte, die noch näher erläutert werden, beruht.

Zwingt man nun die beiden Schichten zu einer ferromagnetischen Ausrichtung, ändert sich der Widerstand, was wie folgt erklärt werden kann:

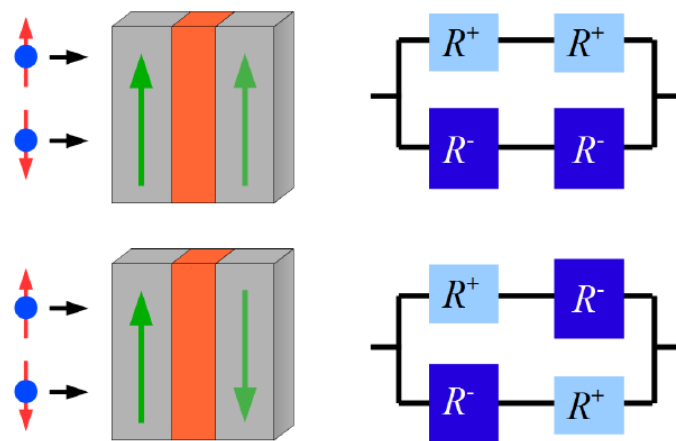


Abbildung 2: Skizze zum Fluss der Elektronen durch die Schichtsysteme<sup>2</sup>

Man betrachtet den Stromfluss durch die Schichten. Die Elektronen im Strom können entweder einen “Spin up“, oder “Spin down“ besitzen. Haben die Elektronen die gleiche

<sup>2</sup>Quelle: Versuchsanleitung

Spinausrichtung wie die Teilchen im Material, dass sie durchdringen, können sie die Schicht leichter passieren, als bei antiparalleler Ausrichtung. Dies ist quantenmechanisch leicht durch das Pauli-Prinzip erklärbar: So sind Elektronen Fermionen und dürfen nicht in Ort und Zustand gleichzeitig übereinstimmen. Stimmen sie also, wie bei gleicher Spinausrichtung der Fall ist, im Zustand überein, dürfen sie nicht auch noch im Ort übereinstimmen und so kommen die Elektronen des Stroms leichter an den Fermionen im Metall vorbei. Bei unterschiedlichem Spin können die freien Elektronen auch die gleichen Orte wie die im Metall gebundenen Elektronen einnehmen und kommen somit schwerer durch die Schicht. Der Widerstand bei gleicher Ausrichtung  $R^+$  ist somit kleiner als der bei unterschiedlicher Ausrichtung  $R^-$ .

Nun durchdringt der Strom aber zwei Schichten. Dies kann, wie in Abbildung 2 zu sehen, als Reihenschaltung von Widerständen betrachtet werden. Der Gesamtwiderstand lässt sich entsprechend berechnen.

So ergibt sich für den Widerstand von parallel ausgerichteten Magnetschichten

$$R_p = \left( \frac{1}{2R^+} + \frac{1}{2R^-} \right)^{-1} = \frac{2R^+R^-}{R^+ + R^-}$$

Für antiparallel ausgerichtete Schichten dagegen

$$R_{ap} = \left( \left( \frac{1}{R^+ + R^-} \right) \frac{1}{R^+ + R^-} \right)^{-1} = \frac{R^+ + R^-}{2}$$

Ein Vergleich der beiden Terme zeigt unter Berücksichtigung des Verhältnisses  $R_+ > R_-$ , dass  $R_p < R_{ap}$  gilt.

Wenn man also die antiparallel ausgerichteten Ferromagneten durch ein äußeres Feld zu paralleler Ausrichtung zwingt, fällt der Widerstand ab.

Der GMR-Effekt wird nun definiert als

$$GMR = -MR = \frac{R_{ap} - R_p}{R_p} = \frac{(R^+ - R^-)^2}{4R^+R^-}$$

Bei großer Differenz der Widerstände bei den unterschiedlichen Ausrichtungen wird der GMR-Effekt also besonders groß.

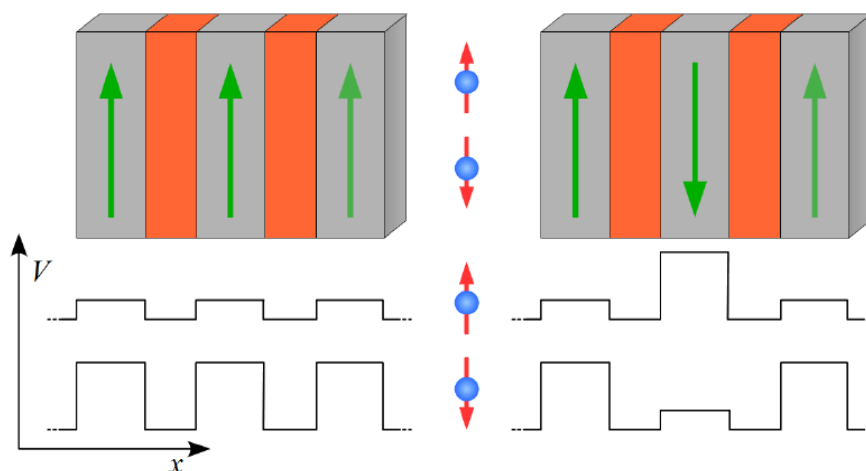
Nun ist noch eine genauere Auseinandersetzung mit der **Zwischenschichtkopplung** nötig. So ist die bereits beschriebene Kopplung über die unmagnetische Schicht hinweg sehr von dieser Schicht abhängig, ihre Dicke hat direkten Einfluss auf die Kopplung. Dass die Magneten überhaupt koppeln, ist auf Quanteninterferenzeffekte zurückzuführen. Um die Situation genauer zu verstehen, ist es hilfreich, die Potentiale zu betrachten, die in Abbildung 3 skizziert sind.

Wie bereits im Bezug auf den Widerstand erklärt, gibt es beim Passieren der Elektronen Unterschiede, je nachdem ob ihre Spinausrichtung derjenigen im Magneten entspricht.

---

<sup>3</sup>Quelle: Versuchsanleitung



Abbildung 3: Potentialstufen für Elektronen in Schichtsystemen<sup>3</sup>

Bei gleicher Ausrichtung ist das Durchdringen “einfacher“ als bei entgegengesetzter. So kommt es auch zu den in Abbildung 3 zu sehenden unterschiedlichen Potentialstufen. Die Breite der Potentialtöpfe entspricht der Zwischenschichtdicke. Der Elektronenimpuls nimmt in diesen Töpfen diskrete Werte an und auch das Energiespektrum wird diskret. Die Energie ist stark von der Breite abhängig. Je dicker die Zwischenschicht, desto mehr sinken die Energieniveaus ab. Wenn nun die Energieniveaus so sehr absinken, dass ein zuvor unbesetztes Niveau unter die Fermienergie (maximal mögliche Energie der gebundenen Zustände) gelangt, so springt die Energie wieder höher. Dies führt zu einer Oszillation der Energie abhängig von der Zwischenschichtdicke. Besonders relevant ist dieser Effekt bei ferromagnetischer Kopplung, da bei antiferromagnetischer die Potentialtöpfe deutlich breiter sind und die Energie daher als konstant angenommen werden kann.

Vergleicht man nun beide Kopplungsarten, wechseln sie sich darin ab, energetisch das Minimum darzustellen. Da Systeme nach energetisch günstigen Zuständen streben, wechseln sich die Kopplungsarten entsprechend ab. Im Grenzbereich dieser Arten kommt es zu Fluktuationen, weshalb sich quasi eine senkrechte Orientierung einstellt.

Insgesamt ergibt sich so bei zunehmender Zwischenschichtdicke, die in Abbildung 5 dargestellte Kopplung.

Es gibt neben dem GMR-Effekt jedoch auch andere magneto-resistive Effekte.

Der **gewöhnliche MR-Effekt** wurde bereits zu Anfang erläutert. Hierbei geht es grundsätzlich um die Widerstandsänderung durch ein Magnetfeld. Dies kann damit erklärt werden, dass Elektronen durch die Lorentzkraft in einem solchen Feld abgelenkt werden. Dadurch verlängert sich ihr Weg, was sich durch eine Erhöhung des Widerstands äußert. Der Effekt hat allerdings eine deutlich geringere Auswirkung als der GMR-Effekt, wie

<sup>4</sup>Quelle: Versuchsanleitung

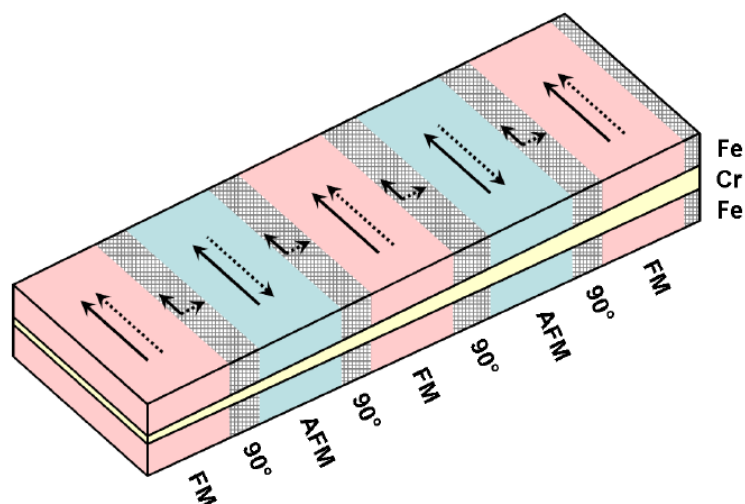


Abbildung 4: Kopplung der ferromagnetischen Schichten bei zunehmender Zwischenschichtdicke<sup>4</sup>

schon an der Bezeichnung erkennbar ist.

Beim **Anisotropen Magnetoresistiven Effekt (AMR)** geht es um die Beeinflussung des Widerstands durch den Winkel zwischen Strom und Magnetfeld. Es wird dabei deutlich, dass der Widerstand bei paralleler Ausrichtung beider Größen etwas größer ist als bei senkrechter. Es handelt sich dabei um einen positiven MR-Effekt, der in allen ferromagnetischen Metallen auftritt. Auch wenn er dadurch zusätzlich zum GMR auftritt kann er hier vernachlässigt werden, da er um Größenordnungen geringer ist.

Der **Tunnelmagnetwiderstand (TMR)** ist durch die nicht verschwindende Tunnelwahrscheinlichkeit erklärbar. Werden zwei Ferromagneten durch einen Isolator getrennt, gibt es eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass Elektronen trotzdem durch den Isolator tunneln. Der Widerstand hängt zum einen von der Dicke des Isolators ab, denn je dünner er ist desto größer ist die Tunnelwahrscheinlichkeit. Zum anderen ist aber genauso wie beim GMR-Effekt die Magnetisierungsrichtungen der beiden Schichten zueinander relevant. Parallele Ausrichtung hat auch hier einen geringeren Widerstand zur Folge.

Ein stärkerer Effekt ist der **Kolossale Magnetoresistive Effekt (CMR)**, der den Widerstand um einige Größenordnungen mehr beeinflusst. Grund für diesen Effekt sind Verschiebungen in der Bandstruktur im Magnetfeld, die die Energielücke zwischen Leitungs- und Valenzband so sehr beeinflussen können, dass aus dem Leiter ein Isolator wird. CMR tritt nur bei bestimmten Materialien auf, die beispielsweise auf Mangan basieren, und benötigt ein sehr starkes Magnetfeld. Daher ist er nicht in allen Fällen relevant, so auch nicht in diesem Versuch.

## 2.3 GMR-Sensoren

Zunächst wurden als GMR-Systeme antiferromagnetisch gekoppelte Vielschichtsysteme verwendet. Diese hatten allerdings einige Nachteile wie geringe Empfindlichkeiten aufgrund zu hoher Koerzitivfeldstärken oder die sehr schwierige Herstellung, da die Dicke der Zwischenschicht sehr genau sein muss, was kompliziert umzusetzen ist. Als Alternative wurden daher **Spin-Valve Systeme** eingeführt.

Spin-Valve Systeme bestehen, wie auch andere GMR-Systeme, aus zwei ferromagnetischen Schichten. Diese sind durch eine nicht-magnetische Schicht voneinander getrennt. Damit die Empfindlichkeit auch bei kleinen Feldern gewährleistet ist, haben die Magneten sehr kleine Koerzitivfeldstärken und werden daher als weichmagnetisch bezeichnet. Ein Beispiel für ein solches Material ist Permalloy  $Ni_{80}Fe_{20}$ .

Der noch wichtigere Unterschied ist, dass die Zwischenschicht durch eine deutlich höhere Dicke eine Kopplung nicht mehr zulässt. Damit nun trotzdem ein GMR-Effekt auftritt gibt es zwei Möglichkeiten:

Zum einen können die beiden Magnetschichten aus Materialien unterschiedlicher Koerzitivfeldstärke bestehen. Dies führt dazu, dass sich die Spinrichtungen in den Materialien phasenverschoben umkehren. Parallele und antiparallele Ausrichtungen der Schichten wechseln sich dadurch ab und der Widerstand ändert sich entsprechend. (Genauere Erklärung siehe Abschnitt 4.3)

Zum anderen kann auf eine Seite des Sensors eine antiferromagnetische Schicht aufgetragen werden, wodurch die Magnetisierungsrichtung auf der Seite festgesetzt wird. Dies wird als Pinning bezeichnet.

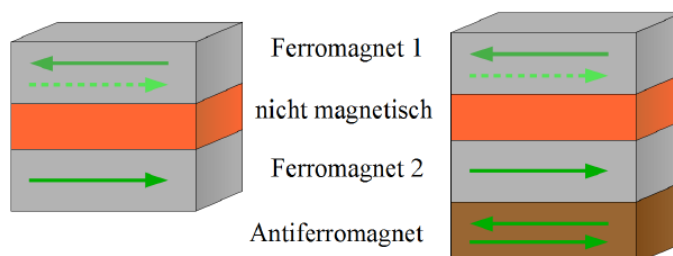


Abbildung 5: Mögliche Spin-Valve-Systeme<sup>5</sup>

Nun ist noch interessant, wie der Strom durch den Sensor geleitet wird. Die intuitive Möglichkeit ist es, den Strom (ähnlich wie in Abbildung 2) senkrecht durch die Schichten zu leiten. Dies ist tatsächlich möglich und wird bei der “Current Perpendicular to Plane“-Geometrie (kurz: CPP) umgesetzt. Allerdings sind die Schichten sehr dünn und haben somit auch einen sehr kleinen Widerstand, der kaum messbar ist. Daher wird in der Praxis stattdessen meist die “Current in Plane“-Geometrie (CIP) verwendet, bei der der Strom parallel durch die Schichten geleitet wird. Die Elektronen passieren den

<sup>5</sup>Quelle: Versuchsanleitung

Sensor dabei nicht geradlinig, sondern werden immer wieder abgelenkt und durchlaufen daher häufig die Grenzflächen zwischen den Schichten. So wird der Einfluss der Widerstandsänderung deutlicher und er kann besser gemessen werden.

## 2.4 Messung des GMR-Effekts

Bei der Vierpunktmethode werden vier Kontakte in Reihe angeordnet. Die Messspitzen werden mit dem Sensor in Kontakt gebracht. Über die beiden äußeren Kontakte wird ein Strom angeschlossen, dessen Betrag bekannt ist. An den inneren Kontakten wird die abfallende Spannung gemessen.

Die Spannung wird also am Widerstand und nicht am Leiter abgegriffen. Dadurch wird die Messung nicht durch die Widerstände der Kontakte verfälscht.

Misst man nun den Widerstand abhängig vom Magnetfeld, können unterschiedliche Kurven entstehen. Wie im vorherigen Abschnitt erklärt, gibt es verschiedene Arten von GMR-Sensoren.

Bei antiferromagnetischer Kopplung ist die Ausrichtung der Schichten linear abhängig vom äußeren Magnetfeld. Somit verläuft die Kurve gradlinig, wobei es ein Extremum bei abgeschaltetem Magnetfeld gibt und dann einen weiterhin geradlinigen Verlauf.

Bei Verwendung von Schichten unterschiedlicher Koerzitivfeldstärke kehren sich die Spinrichtungen phasenverschoben um. Bei sehr geringer Magnetisierung sind die beiden Schichten noch gleich ausgerichtet, der Widerstand ist entsprechend klein. Erhöht man das äußere Feld, erhöht sich auch die Magnetisierung, bis der eine Magnet seine Koerzitivfeldstärke erreicht, seine Spinrichtung sich also umgedreht hat und antiparallele Schichten vorliegen, die wie in Abschnitt 2.2 erklärt einen höheren Widerstand haben. Der Widerstand steigt also immer weiter, bis zu der Stelle, wo die Hysteresekurven den höchsten Abstand haben, also die größte Differenz der Magnetfeldstärken. Hier gibt es ein Maximum. Danach sinkt der Widerstand wieder. Erreicht auch das zweite Material seine Koerzitivfeldstärke, sind die beiden Schichten wieder parallel ausgerichtet und der Widerstand ist vergleichsweise gering. Insgesamt ist also eine Kurve mit Maximum zu erwarten für eine Magnetfeldrichtung des äußeren Feldes. Nun wird das äußere Magnetfeld jedoch in beide Richtungen betrieben, auf der anderen Seite ist genau der gleiche Verlauf zu erwarten. Insgesamt ist die Kurve des Widerstands bei einem Sensor mit unterschiedlichen Koerzitivfeldstärken zur y-Achse symmetrisch und hat zwei leicht verschobene Maxima.

Beim Pinning wird in einer der Schichten die Spinrichtung festgehalten. Die andere Schicht kann leicht durch das äußere Feld magnetisiert werden. Wird es in die gleiche Richtung wie die feste Schicht magnetisiert, handelt es sich um parallele Schichten und damit um einen geringen Widerstand. Bei Magnetisierung in die andere Richtung werden sie jedoch antiparallel und haben daher einen hohen Widerstand. Die Kurve eines Pinning-Sensors ist daher deutlich asymmetrisch.

### 3 Versuchsdurchführung

Der Versuch besteht aus drei Teilen:

Zunächst soll ein GMR-Sensor für Strommessung geeicht werden. Benutzt wird dabei der Sensor AA003-02 der Firma NVE.

Als nächstes wird ein GMR-Sensor in einer langen Spule kalibriert. Hierfür werden zwei Sensoren AA005-02 und AAL002-02 auf die Magnetfeldabhängigkeit der Sensorspannung untersucht. Mit Hilfe dieser Kalibrierung und einer weiteren Messung an einer Helmholtzspule kann dann die Windungszahl dieser Helmholtzspule bestimmt werden.

Im letzten Versuchsteil werden unterschiedliche Schichtsysteme mit Zwischenschichtkopplung betrachtet. Dabei wird die Methode der Vierpunktmessung angewandt. Diese Messung wird in der in Teil 2 verwendeten Helmholtzspule durchgeführt.

## 4 Versuchsauswertung

### 4.1 Eichung eines GMR-Sensors zur Strommessung

Im ersten Versuchsteil wurde der Sensor AA003-02 der Firma NVE untersucht und zur Strommessung geeicht.

Hierfür werden angelegte Spannung und die Spannung am Sensor gemessen. Um aus der angelegten Spannung  $U$  den Strom  $I$  zu erhalten, wird das Ohmsche Gesetz verwendet:  $I = \frac{U}{R}$ , mit  $R = 0,1\Omega$ . Nun wird die Sensorspannung gegen diesen Stroms für Trace 1 und 2 aufgetragen.

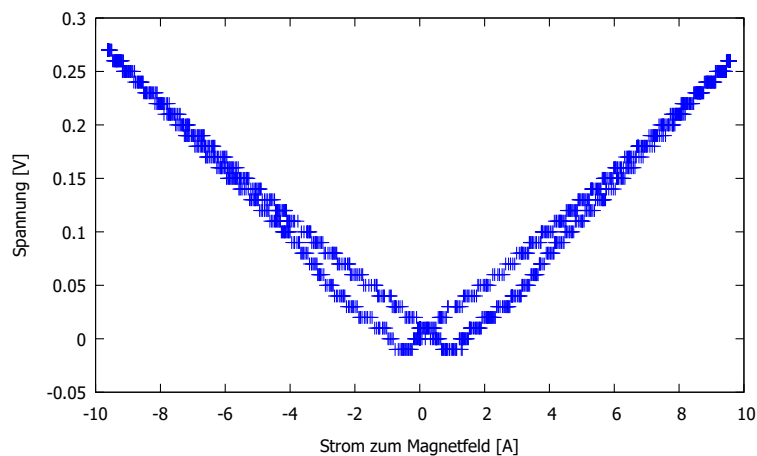


Abbildung 6: Eichkurve des Sensors von Trace 1

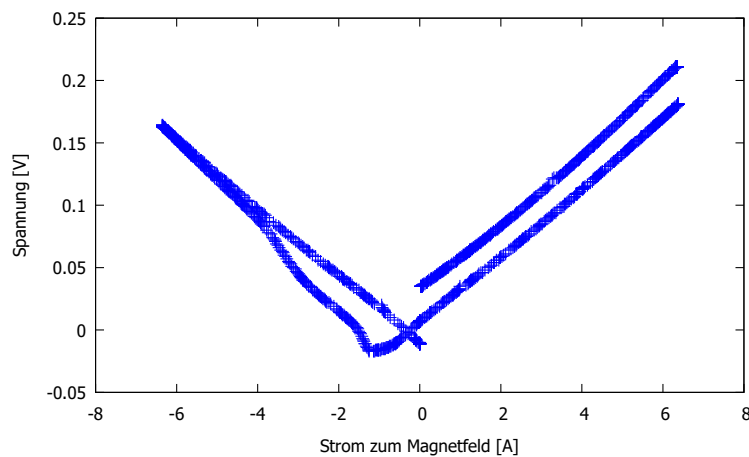


Abbildung 7: Eichkurve des Sensors von Trace 2

In beiden Graphiken ist wie erwartet die lineare Abhängigkeit zwischen Sensorspannung und angelegtem Strom zu erkennen. Der Sprung in Diagramm 7 ist vermutlich auf einen

störenden äußeren Einfluss zurückzuführen, zum Beispiel eine Bewegung am Versuchstisch.

Als nächstes wird das Magnetfeld, dass aus dem angelegten Strom resultiert, an der Stelle des Sensors bestimmt. Hieraus kann dann die Magnetfeldabhängigkeit beziehungsweise die Sensitivität des Sensors errechnet werden.

Für das Magnetfeld eines stromdurchflossenen langen Leiters gilt:

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

Der Abstand zwischen Sensor und Leiter wird abgeschätzt mit  $r = (1 \pm 1)mm$ . Der große Fehler wird gewählt, da diese Schätzung sehr ungenau ist. Für  $I$  wird der maximal angelegte Strom eingesetzt. Bei Trace 1 betrug er 9A, bei Trace 2 6A.

Nun muss noch berücksichtigt werden, dass obige Formel  $H$  in SI-Einheiten ( $\frac{A}{m}$ ) ausgibt. Für die Umrechnung von  $\frac{A}{m}$  in Oersted ( $Oe$ ) gilt:

$$1Oe = \frac{1000}{4\pi} \frac{A}{m}$$

Die zugehörige Magnetfeldabhängigkeit beziehungsweise Sensitivität des Sensors ist dann:

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta H \cdot U_{Betrieb}}$$

Die Betriebsspannung  $U_{Betrieb}$  entspricht dabei der angelegten Batteriespannung,  $U_{Batterie} = (7,55 \pm 0,1)V$ ,  $\Delta H$  ist das oben berechnete Magnetfeld und  $\Delta U = U_{max} - U_{min}$  ist die Spannungsdifferenz der Sensorspannung. Die Sensitivität wird angegeben in  $\frac{mV}{V \cdot Oe}$ .

Aus den Messwerten erhält man folgende Werte:

	H [Oe]	$\Delta U [mV]$	$S [\frac{mV}{V \cdot Oe}]$
Trace 1	$(18,00 \pm 18,00)$	278,75	$(2,05 \pm 2,05)$
Trace 2	$(12,00 \pm 12,00)$	227,85	$(2,51 \pm 2,52)$

Aus dem groß gewählten Fehler des Abstands  $r$  resultieren auch hier die Fehler, die 100% betragen. Ungeachtet dessen liegen die erhaltenen Messwerte aber innerhalb des erwarteten Bereichs von  $S = (2 - 3,2) \frac{mV}{V \cdot Oe}$ , den der NVE Katalog für den Sensor AA003-02 angibt. Die Messung verlief also erfolgreich.

## 4.2 Eichung von zwei GMR-Sensoren zur Magnetfeldmessung

In diesem Versuchsteil wurden zwei GMR-Sensoren der Firma NVE (AA005-02 und AAL002-02) zur Magnetfeldmessung geeicht. Dafür wird zunächst das Magnetfeld einer langen Spule untersucht, und dann mit Hilfe der erhaltenen Magnetfeldabhängigkeit des Sensors und der Messung an einer Helmholtzspule die Windungszahl dieser Helmholtzspule bestimmt.

### 4.2.1 Lange Spule

Für das Magnetfeld einer langen Spule gilt bei angelegtem Strom I:

$$H = \frac{N}{L} \cdot I$$

Dabei ist  $N=705$  die Windungszahl und  $L=15\text{cm}$  die Länge der Spule.

Für die Berechnung der Magnetfeldabhängigkeit des Sensors wird nun die Sensorspannung in Abhängigkeit des Magnetfelds aufgetragen und ein Fit durchgeführt.

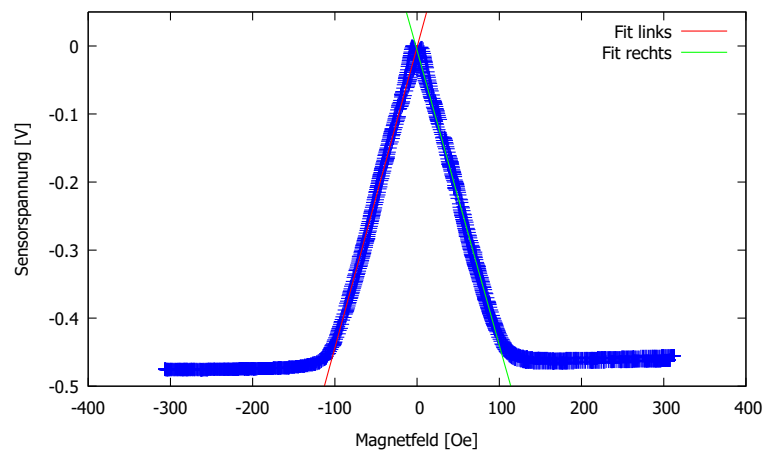


Abbildung 8: Sensorspannung des Sensors 1 in Abhängigkeit des Magnetfelds der langen Spule

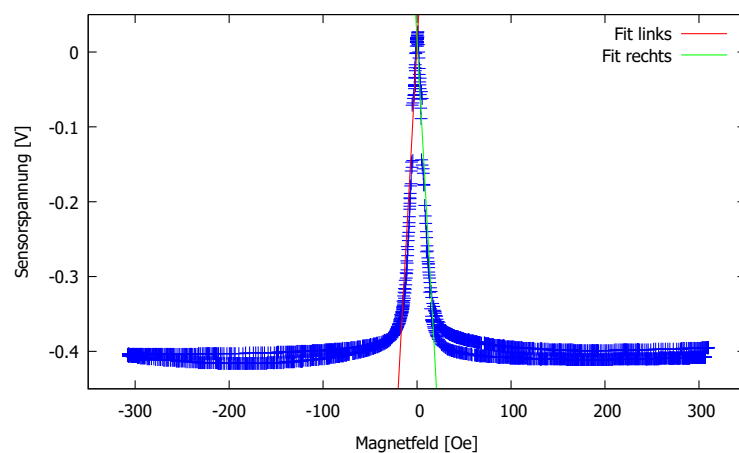


Abbildung 9: Sensorspannung des Sensors 2 in Abhängigkeit des Magnetfelds der langen Spule



Die entstandene Kurve ist achsensymmetrisch zu  $H=0$ , wo auch das Maximum des Graphen liegt. Es wurde auf beiden Seiten des Maximums im linearen Bereich ein Fit durchgeführt. Für die beiden Sensoren ergeben sich aus dem Fit folgende Steigungen für die linke und rechte Seite:

	$\left(\frac{\Delta U}{\Delta H}\right)_{links} \left[\frac{mV}{Oe}\right]$	$\Delta \left(\frac{\Delta U}{\Delta H}\right)_{links} \left[\frac{mV}{Oe}\right]$	$\left(\frac{\Delta U}{\Delta H}\right)_{rechts} \left[\frac{mV}{Oe}\right]$	$\Delta \left(\frac{\Delta U}{\Delta H}\right)_{rechts} \left[\frac{mV}{Oe}\right]$
Sensor 1	4,42	0,03	-4,33	0,02
Sensor 2	22,93	0,30	-22,47	0,17

Hieraus wird für beide Sensoren eine mittlere Steigung berechnet, wobei der Betrag der Steigung auf der rechten Seite verwendet wird. Man erhält für Sensor 1:  $\frac{\Delta U}{\Delta H} = (4,38 \pm 0,02) \frac{mV}{Oe}$  und für Sensor 2:  $\frac{\Delta U}{\Delta H} = (22,70 \pm 0,17) \frac{mV}{Oe}$ . Aus diesen Steigungen kann dann die Magnetfeldabhängigkeit der Sensoren ermittelt werden über:

$$S = \frac{\frac{\Delta U}{\Delta H}}{U_{Betrieb}} \quad (1)$$

$$\Rightarrow S_{Sensor1} = (0,580 \pm 0,008) \frac{mV}{V \cdot Oe} \quad (2)$$

$$S_{Sensor2} = (3,007 \pm 0,046) \frac{mV}{V \cdot Oe} \quad (3)$$

Im NVE angegebene Katalog-Werte waren  $S = (0,45 - 0,65) \frac{mV}{V \cdot Oe}$  für Sensor AA005-02 und  $S = (3,0 - 4,2) \frac{mV}{V \cdot Oe}$  für Sensor AAL002-02. Unter der Annahme, dass Sensor 1 dem Sensor AA005-02 und Sensor 2 dem Sensor AAL002-02 entspricht, liegen die ermittelten Werte im erwarteten Bereich.

#### 4.2.2 Helmholtzspule

Die Eichung für den linearen Bereich der Messung an der Helmholtzspule erfolgt über der Gleichung für die Magnetfeldabhängigkeit, umgestellt nach  $\Delta H$ :

$$\Delta H = \frac{1}{U_{Betrieb} \cdot S} \cdot \Delta U$$

Die Sensoreichung ergibt:

$$H_{Sensor1} = (0,229 \pm 0,004) \frac{Oe}{mV} \cdot U \quad (4)$$

$$H_{Sensor2} = (0,0440 \pm 0,0009) \frac{Oe}{mV} \cdot U \quad (5)$$

Mit Hilfe der Sensoreichung kann nun das Magnetfeld der Helmholtzspule in Abhängigkeit des angelegten Stroms aufgetragen werden. Ein linearer Fit dieser Graphiken gibt dann die jeweiligen Steigungen  $\frac{\Delta H}{\Delta I}$  aus, die zur Berechnung der Windungszahl der Helmholtzspule gebraucht wird.

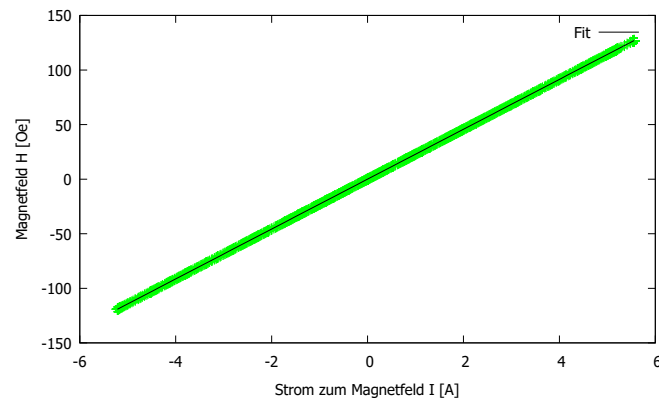


Abbildung 10: Magnetfeld der Helmholtzspule in Abhängigkeit der Stromstärke für Sensor 1

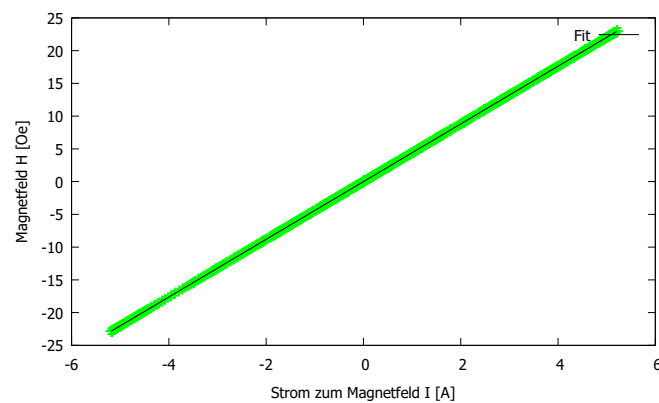


Abbildung 11: Magnetfeld der Helmholtzspule in Abhängigkeit der Stromstärke für Sensor 2

Der Fit ergibt:

$$\left(\frac{\Delta H}{\Delta I}\right)_{\text{Sensor1}} = (22,854 \pm 1,2 \cdot 10^{-10}) \frac{\text{Oe}}{\text{A}} \quad (6)$$

$$\left(\frac{\Delta H}{\Delta I}\right)_{\text{Sensor2}} = (4,4048 \pm 1,8 \cdot 10^{-11}) \frac{\text{Oe}}{\text{A}} \quad (7)$$

Hier fällt direkt auf, dass die Messwerte der erwarteten linearen Funktion sehr nahe liegen, wodurch der Fehler des Fits sehr klein ausfällt.

Um die Windungszahl  $n$  zu bestimmen, wird die allgemeine Formel für das Magnetfeld einer Helmholtzspule benötigt:

$$H = \frac{8}{\sqrt{125}} \frac{I \cdot N}{R}$$

R ist dabei der effektive Radius der Spule,  $R = 65\text{mm}$ .  
Umgestellt nach der Windungszahl N ergibt sich:

$$N = \frac{\sqrt{125}}{8} \frac{H}{I} R$$

Für  $\frac{H}{I}$  kann hier die oben ermittelte Steigung eingesetzt werden. Zu beachten ist außerdem, dass diese Gleichung nur für SI-Einheiten gilt, also wieder Oersted in  $\frac{A}{m}$  umgerechnet werden muss.

Man erhält:

$$N_{\text{Sensor1}} = 165,204 \pm 8,5 \cdot 10^{-10} \quad (8)$$

$$N_{\text{Sensor2}} = 31,841 \pm 1,3 \cdot 10^{-10} \quad (9)$$

Der erste Wert liegt in der erwarteten Größenordnung, der zweite Werte ist jedoch eindeutig zu niedrig. Eventuell liegt dies an einem Messfehler. Auch hier könnte eine Bewegung am Versuchstisch die Ergebnisse beeinflusst haben.

### 4.3 Messung des GMR-Effekts an Schichtsystemen mit Zwischenschichtkopplung

Im letzten Versuchsteil wurden mit der Vierpunktmessung drei Proben untersucht. Gemessen wurden dabei zwei Spannungen, zum einen an der Helmholtzspule, zum anderen an der Probe selbst. Aus der Spannung an der Helmholtzspule kann mit Hilfe der Eichung aus Teil 2 das zugehörige Magnetfeld ermittelt werden. Um den Probenwiderstand zu ermitteln, wird erneut das Ohmsche Gesetz angewandt:

$$R = \frac{U}{I}$$

Dabei ist I der an der Probe angelegte Strom, der während der Messung 0,2mA betrug. Um das Verhalten des Probenwiderstands zu visualisieren, wird er in Abhängigkeit des Magnetfelds aufgetragen.

Zunächst lässt sich feststellen, dass alle drei Graphen bezüglich des Nulldurchgangs der Magnetfeldstärke achsensymmetrisch sind. Bei dem Pinning-Effekt würde Asymmetrie vorliegen, da hier je nach Magnetfeldrichtung der Widerstand sehr unterschiedlich schnell abfällt durch die über die Kopplung ausgezeichnete Feldrichtung. Also liegt bei den Proben vermutlich entweder eine antiferromagnetische Kopplung oder Schichten unterschiedlicher Koerzitivfeldstärke vor.

In Probe 1 (12) liegt ein nicht zu den erwarteten Möglichkeiten passender Verlauf vor. Vernachlässigt man den hohen "Strich" bei einem Magnetfeld von Null, lässt der Graph

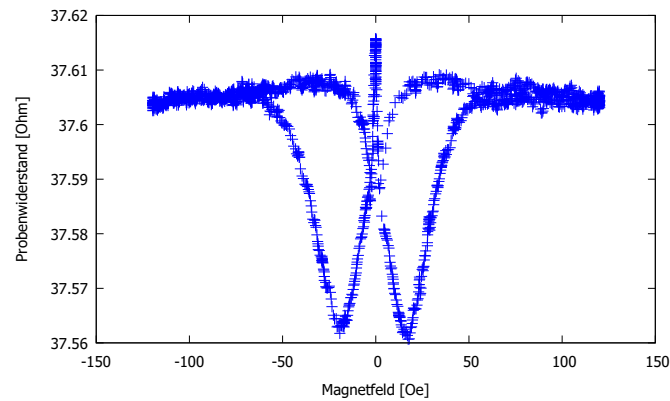


Abbildung 12: Messkurve der Probe 1

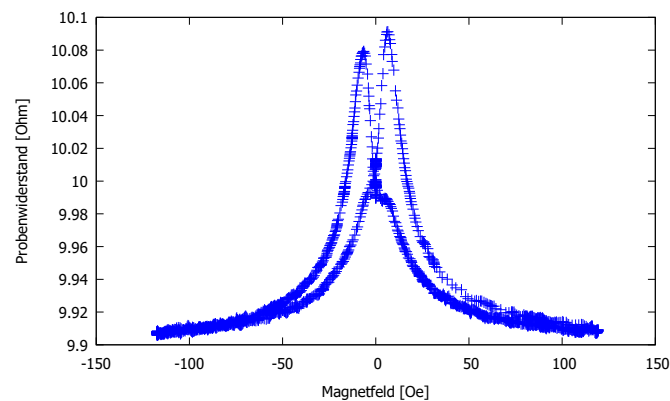


Abbildung 13: Messkurve der Probe 2

durch die verschobenen Maxima ein Sensor mit Schichten unterschiedlicher Koerzitivfeldstärke vermuten. Besonders wenn man es in der Waagerechten spiegelt, ist der Verlauf dann sehr ähnlich dem bei Probe 2. Antiferromagnetische Kopplung hätte einen sehr anderen Verlauf (siehe Probe 3). Insgesamt ist der Verlauf jedoch zu keiner der Möglichkeiten genau passend. Bei der Durchführung war bekannt, dass eine der Proben defekt ist. Der eigenartige Graph könnte also darauf zurückzuführen sein, dass Probe 1 defekt war.

Bei Probe zwei (13) ist deutlich zu erkennen, dass die Maxima verschoben sind, je nach Magnetfeldvorzeichen. Dies lässt klar auf zwei Schichten unterschiedlicher Koerzitivfeldstärke schließen. In diesem Falle ändern sich die Richtungen der Spins in den Materialien phasenverschoben. Entsprechend wechseln sich parallele und antiparallele Ausrichtungen der Magneten ab. Da wie in der Vorbereitung erläutert der Widerstand bei antiparalleler Ausrichtung größer als bei paralleler ist, wächst beziehungsweise sinkt der Widerstand des Sensors sich entsprechend. Bei sehr großem äußeren Feld gibt es eine parallele Aus-

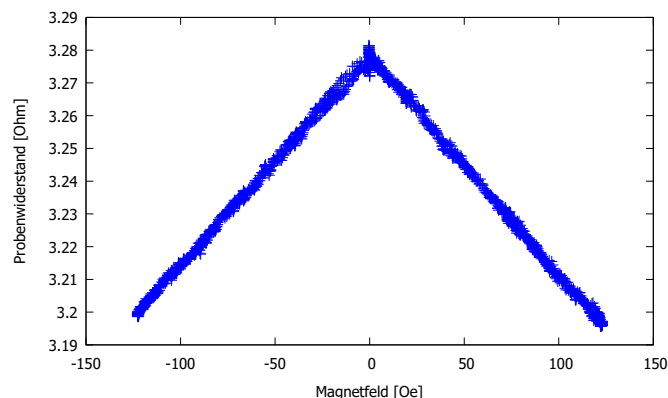


Abbildung 14: Messkurve der Probe 3

richtung, sobald die Koerzitivfeldstärken beider Materialien überschritten wurde. Der Widerstand ist daher recht klein. Kurz vorher, wenn nur eines der Magneten die Koerzitivfeldstärke erreicht hat, sind die Schichten in unterschiedliche Richtungen magnetisiert. Somit gibt es eine antiparallele Ausrichtung und dadurch einen deutlich höheren Widerstand. Noch näher am Nulldurchgang der äußeren Magnetfeldstärke haben beide Schichten ihre Koerzitivfeldstärke noch nicht erreicht, sind also gleich ausgerichtet und haben daher wieder einen kleinen Widerstand. Das jeweilige Maximum der Kurve befindet sich an dem Punkt, an dem die Hysteresekurven des jeweiligen Materials den größten Abstand haben. Offensichtlich gibt es solch einen Punkt auf beiden Seiten (vom Nullpunkt aus gesehen) der Kurve, weshalb es auch auf beiden Seiten ein Maximum in der gemessenen Kurve gibt. Probe 2 hat also einen genau zum erwarteten Graphen eines solchen Sensors passenden Verlauf.

In Probe 3 (14) liegt antiferromagnetische Kopplung vor. Der Graph ist auf beiden Seiten symmetrisch, außerdem gibt es nur ein Maximum, dass an der Stelle ohne äußeres Magnetfeld befindlich ist. Der Abfall ab diesem Maximum ist geradlinig. Das liegt daran, dass die Ausrichtung der Schichten linear abhängig vom äußeren Magnetfeld ist.

## 5 Zusammenfassung

Im ersten Versuchsteil wurde der GMR-Sensor AA003-02 der Firma NVE zur Strommessung geeicht. Ein Plot der Sensorspannung gegen den angelegten Strom, der ein Magnetfeld erzeugt, lässt eindeutig den linearen Zusammenhang dieser Größen erkennen. Ein Sprung in einem der Diagramme weist auf mögliche Fehlerquellen hin, dass zum Beispiel eine Bewegung am Versuchstisch das Ergebnis maßgeblich beeinflussen kann. Beim Umpolen des angelegten Stroms konnte der Kontakt mit dem Versuchsaufbau jedoch häufig nicht vermieden werden.

Trotz dieser Fehlerquellen ergab die Berechnung der Magnetfeldabhängigkeit des Sensors Werte innerhalb des im Katalog angegebenen Bereichs. Die Messung ergab für Trace 1  $S = (2,05 \pm 2,05) \frac{mV}{V \cdot O_e}$  und für Trace 2  $S = (2,51 \pm 2,52) \frac{mV}{V \cdot O_e}$ . Im Katalog angegeben war  $S = (2 - 3,2) \frac{mV}{V \cdot O_e}$ , beide Werte sind also möglich. Die großen Fehler der Sensitivitäten sind darauf zurückzuführen, dass für das Magnetfeld der Abstand zwischen Leiter und Sensor bestimmt werden musste. Dieser war allerdings sehr schlecht zu schätzen, geschweige denn zu messen, weshalb hier ein hundertprozentiger Fehler angenommen wurde, nämlich  $r = (1 \pm 1)mm$ . Daraus resultieren in den weiteren Berechnungen die großen Fehler.

Im zweiten Versuchsteil ging es um die Magnetfeldeichung zweier GMR-Sensoren (AA005-02 und AAL002-02), zunächst im Magnetfeld einer langen Spule. Der Plot der Sensorspannung gegen das angelegte Magnetfeld entsprach den Erwartungen, der Graph war achsensymmetrisch und hatte bei  $H=0$  ein Maximum. Auf beiden Seiten des Maximums gab es einen linearen Bereich, in dem ein Fit durchgeführt wurde. Mit Hilfe der bestimmten Steigung konnte nun auch für diese Sensoren die Magnetfeldabhängigkeit ermittelt werden, wobei auch diese Werte im erwarteten Bereich liegen. Für Sensor 1 wurde  $S = (0,580 \pm 0,008) \frac{mV}{V \cdot O_e}$  ermittelt, bei einem Katalogwert von  $S = (0,45 - 0,65) \frac{mV}{V \cdot O_e}$ . Bei Sensor 2 ergab sich der Wert  $S = (3,007 \pm 0,046) \frac{mV}{V \cdot O_e}$ , bei einem angegebenen Wert von  $S = (3,0 - 4,2) \frac{mV}{V \cdot O_e}$ .

Mögliche Fehlerquellen könnten hier gewesen sein, dass es schwierig war, den Sensor mittig in der langen Spule zu platzieren. Da aber nur in der Mitte der Spule die verwendete Formel genau gilt, könnte eine Abweichung die Werte verfälscht haben.

Mit Hilfe der bestimmten Magnetfeldabhängigkeiten kann nun die Eichung der Helmholtzspule durchgeführt werden. Der Plot des Magnetfelds gegen den angelegten Strom ergibt einen linearen Zusammenhang, mit sehr kleinem Fehler beim Fit. Die daraus berechneten Windungszahlen sind jedoch kleiner als erwartet. Hier liegt vermutlich ein Messfehler vor, beispielsweise störende äußere Einflüsse.

Im dritten Teil wurde der GMR-Effekt an Schichtsystemen mittels Vierpunktmessung untersucht, um festzustellen, welche Art von Schichtsystem vorliegt. Die Zuordnung zu den Sensorarten wurde in der Auswertung erläutert. Bei zwei der drei Proben war die Zuordnung dabei recht eindeutig, eine Probe hatte einen unerwarteten Verlauf. Dies könnte daran liegen, dass die Probe defekt war. Ansonsten kann es durch unterschiedliche Umstände zu Messungenauigkeiten gekommen sein: So war es schwierig, die Pro-

be überhaupt in der Messapparatur anzubringen und den Kontakt zu den Messspitzen richtig einzustellen. Auch Rütteln an dem Aufbau, besonders bei der Umpolung des Magnetfeldes am weiter hinten auf dem Tisch befindlichen Gerät, kann zu Verfälschung und Sprüngen in der gemessenen Kurve geführt haben.

## 5.1 Quellenverzeichnis

- Versuchsanleitung
- [https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/lm\\_data/lm\\_324/daten/kap\\_25/node154.htm](https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/lm_data/lm_324/daten/kap_25/node154.htm)