

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Mikro- und Sensorsysteme (IMOS)



Magnetfeldsensoren

(S 10)

Laborpraktikum Sensorik

Betreuer: Dr. Schneider
Verfasser: Felix Bangemann, Philipp Bartels, Axel Winkler
Ort, Datum: Magdeburg, 04.06.2009
Datei: S10_Magnetfeldsensoren.doc

Inhaltsverzeichnis

1	VERSUCHSZIEL.....	3
2	GRUNDLAGEN ZUM VERSUCH.....	3
2.1	Spannungsinduktion	3
2.2	Hall-Effekt.....	3
2.3	Magnetoresistive Effekte.....	4
2.4	Praktikumsaufgaben	5
2.5	Vorbereitungsaufgaben	6
3	VERSUCHSKONZEPTION UND VERSUCHSAUFBAU	8
4	MESSDATEN UND AUSWERTUNG.....	11
5	LITERATUR.....	14

1 Versuchsziel

Der Versuch dient dem Kennen lernen der Eigenschaften und der Funktionsweise magnetischer Sensoren am Beispiel verschiedener Anwendungen.

2 Grundlagen zum Versuch

Unter Magnetfeldsensoren versteht man Sensoren, die eine von der magnetischen Feldstärke oder der magnetischen Induktion abhängige Größe in eine elektrisch messbare Größe umwandeln. Als zu messende Größen kommen neben der Feldstärke oder Induktion, Winkel, Abstände oder Permeabilitäten als Stoffgrößen, die über verschiedene physikalische Effekte aufgenommen werden können, in Frage.

2.1 Spannungsinduktion

Das Induktionsgesetz besagt, dass in einem elektrischen Leiter eine Spannung U_{ind} induziert wird, sobald er von einem sich ändernden Magnetfeld umgeben ist:

$$U_{ind} = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Hierbei ist N die Anzahl der Windungen. Die Flussänderung $\frac{d\phi}{dt}$ kann auf mehrere verschiedene Arten realisiert werden. Eine mögliche Realisierung erfolgt z.B. durch Dreh- oder andere Relativbewegung eines Magneten oder durch Verschiebung eines Kerns in einer Spule. Ein typisches Beispiel ist ein induktiver Weggeber. Nachteil dieses Sensorprinzips ist die lineare Abhängigkeit der Induktionsspannung vom Maß der zeitlichen Änderung des Magnetfeldes, beispielsweise der Drehzahl.

2.2 Hall-Effekt

Hall-Sensoren sind galvanomagnetische Sensoren. Bei ihnen wird ein dünnes, stromdurchflossenes Halbleiterplättchen der Dicke d senkrecht von einer äußeren magnetischen Induktion B durchsetzt.

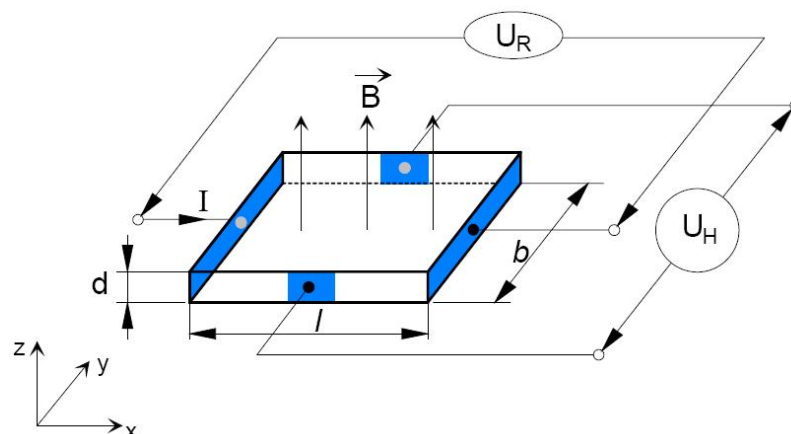


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Hallsensors

Dadurch kann quer zur Stromrichtung eine zum Feld proportionale elektrische Spannung U_H , die so genannte Hall-Spannung abgegriffen werden (Hall-Effekt).

Die Hall-Spannung berechnet sich mit folgender Gleichung:

$$U_H = \frac{R_H}{d} I_0 B \quad (2)$$

R_H ist der so genannte Hall-Koeffizient, eine stoffspezifische Konstante. Ihre Größe wird durch die Ladungsträgerkonzentration im Halbleiterplättchen bestimmt. Sie ist neben den geometrischen Parametern und der Ladungsträgerbeweglichkeit entscheidend für eine hohe Empfindlichkeit des Sensors. I_0 ist der Strom durch das Plättchen.

Die Ursache für die Bewegungsrichtungsänderung ist die Lorentz-Kraft. Gleichzeitig vergrößert sich unter dem Einfluss des magnetischen Feldes der Plättchenwiderstand nach einer etwa parabelförmigen Kennlinie (Gauß-Effekt). Dies wird in den so genannten Feldplatten für sensorische Zwecke genutzt.

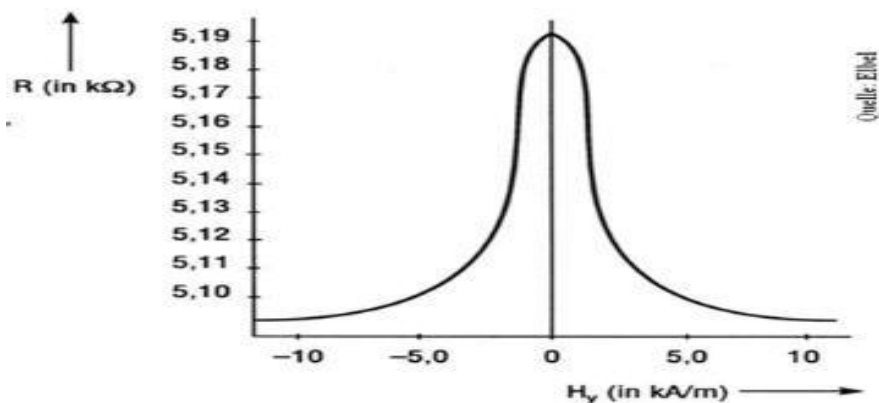


Abbildung 2: Gauß-Effekt

2.3 Magneto-resistive Effekte

Zu den galvanomagnetischen Sensoren gehören auch die so genannten magneto-resistiven Sensoren. Durch den Einfluss des magnetischen Feldes werden die Orbitale der Atome verformt und dadurch der Widerstand des Leiters geändert. Man spricht vom so genannten Magnetowiderstandseffekt.

2.3.1 Anisotroper magneto-resistiver Effekt

Als anisotropen magneto-resistiven Effekt bezeichnet man die Abhängigkeit des Widerstandes ferromagnetischer Materialien vom Winkel zwischen Stromrichtung und Magnetisierung M , welche sich durch äußere Magnetfelder beeinflussen lässt.

2.3.2 Giant-Magneto-Resistance-Effekt

Der „Giant-Magneto-Resistance“ (GMR-Effekt) tritt bei Co/Cu-Vielfachschichten auf. Ohne äußeres Magnetfeld ist die Magnetisierung der Cu-Schichten antiparallel orientiert. Dieser Schichtenstapel, in der Regel zwischen 10 und 20 Schichten, reagiert mit besonderer Empfindlichkeit gegenüber Magnetfeldern. Durch ein äußeres Magnetfeld, das größer als die antiferromagnetische Kopplungsstärke ist, wird die antiferromagnetische Orientierung der Cu-Schichten aufgebrochen und die Magnetisierung der Cu-Schichten parallel zueinander ausgerichtet. Beim Übergang von antiparalleler zu paralleler Ausrichtung der Magnetisierung nimmt der Widerstand der Co/Cu-Vielfachschichten stark ab.

2.4 Praktikumsaufgaben

2.4.1

Machen Sie sich mit dem Versuchsaufbau vor Ort vertraut.

2.4.2

Das Arbeiten mit dem Magnetfeldsensor HMC1002 erfordert eine Kalibrierung aufgrund sich ständig ändernder Umwelteinflüsse (Erdmagnetfeld, Störfelder durch elektrische Geräte usw.). Öffnen Sie dazu in DASyLab 5.6 die Datei "NOOFFSET.DSA". Nehmen Sie anschließend den Motor in Betrieb und starten Sie eine Messung. Warten Sie, bis sich zwei Sinussignale ergeben. Sollte dies nicht der Fall sein, benutzen Sie die SET/RESET Funktion! Durch Anklicken des Buttons "Anzeigen" (grüner Baum) und anschließendes anklicken des Buttons "Schaltbild" erhalten Sie die Anzeige des Maximal- und des Minimalwertes sowie der Amplitude der Funktion $U_a = U_{\text{off}} + U_{\text{ampl}} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ für beide Kanäle. Berechnen Sie aus den erhaltenen Werten U_{off} und U_{ampl} für beide Kanäle!

Schalten Sie den Motor wieder aus.

2.4.3

Öffnen Sie anschließend die Datei "MESSEN.DSA". Drehen Sie das Zahnrad auf 0° und starten Sie eine Messung. Nehmen Sie für beide Kanäle die Ausgangsspannungen von 0° bis 360° in 10° Schritten auf und stellen Sie diese in einem Diagramm dar. Berechnen Sie aus den gewonnenen Daten den Offset und die Amplitude und vergleichen Sie diese mit den angezeigten Werten. Berechnen Sie aus den auf eins normierten Ausgangssignalen den jeweiligen Drehwinkel und vergleichen Sie diesen mit dem angezeigten Wert.

2.4.4

Untersuchen Sie, wie sich ein magnetisches Störfeld auf den Magnetfeldsensor auswirkt.

Schalten Sie dazu eine Spule in Umgebung des Sensors ein und wieder aus. Was geschieht mit dem Ausgangssignal des Sensors? Benutzen Sie die SET/RESET Funktion um das ursprüngliche Ausgangssignal wieder zu erhalten.

2.4.5

Bestimmen Sie die abstands- und drehzahlabhängige Spannung der Sensoren 1...4.

Messen Sie dazu bei folgenden Drehzahlen: 50, 100, 200 und 500 Upm, bei einem Abstand von 0 mm (ACHTUNG: Sensor darf nicht am Zahnrad schleifen).

Anschließend ändern Sie den Abstand von 0 auf 10 mm in Sprüngen von einem Millimeter bei einer Drehzahl von 50 Upm.

2.5 Vorbereitungsaufgaben

2.5.1 Machen Sie sich mit der Wirkungsweise und den verschiedenen genutzten Effekten der Magnetfeldsensoren vertraut.

2.5.2 Leiten Sie die Gleichung zur Bestimmung der Hallspannung her.

Bewegte Ladungsträger in einem magnetischen Feld erfahren die Lorentzkraft:

$$\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (3)$$

Beim Hall-Effekt baut sich ein kompensierendes elektrisches Feld auf, das die ablenkende Wirkung des Magnetfeldes neutralisiert. Für die resultierende Kraft auf die Ladungsträger muss folglich gelten:

$$q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = 0 \quad (4)$$

Der Einfachheit halber wird das Koordinatensystem so gelegt, dass sich die Ladungsträger in x-Richtung bewegen und das Magnetfeld in z-Richtung wirkt.

Somit ist:

$$E_y - v_x B_z = 0 \quad (5)$$

Die Stromdichte j im Leiter lässt sich allgemein durch $j = nqv$ ausdrücken. Löst man nach v_x auf und setzt sie in obige Gleichung, so erhält man

$$E_y = \frac{1}{nq} j_x B_z = R_H j_x B_z \quad (6)$$

Über diese Beziehung wird die Hall-Konstante R_H definiert, welche die Stärke des Hall-Effektes charakterisiert.

Um die Gleichung etwas handlicher zu machen, kann man den Leiter, in dem ja eine Ladungstrennung stattgefunden hat, als Plattenkondensator auffassen. Für diesen gilt die Beziehung:

$$E_y = \frac{U_H}{b} \quad (7)$$

Außerdem kann die Stromdichte j_x im vorliegenden Fall durch $j_x = \frac{I}{bd}$ ausgedrückt werden. Setzt man diese beiden Schreibweisen ein, so erhält man für die Hallspannung U_H einen nur noch von einfach messbaren Größen abhängenden Ausdruck:

$$U_H = R_H \frac{IB_z}{d} \quad (8)$$

Diese Formel ist auch für Leiter mit verschiedenen Sorten von Ladungsträgern korrekt, jedoch lässt sich dann die Hall-Konstante nicht mehr durch $R_H = \frac{1}{nq}$ berechnen.

Aus der Gleichung lässt sich der so genannte Hall-Widerstand angeben:

$$R(B) = R_H \frac{B_z}{d} \quad (9)$$

Der Hall-Widerstand charakterisiert ein Hallelement, hat jedoch nichts mit dem gemessenen elektrischen Widerstand an einem Hallelement zu tun. Er gibt das Verhältnis Querspannung zu Strom eines Hallelementes bei einer bestimmten magnetischen Flussdichte an:

$$R(B) = \frac{U_{quer}}{I} \quad (10)$$

2.5.3 Erklären Sie, warum bei Magnetfeldsensoren, welche auf dem anisotropen magnetoresistiven Effekt basieren oftmals eine Barberpole-Struktur eingesetzt wird.

Die Barberpolestruktur ist eine Spiralstruktur. Sie wird genutzt um die Gaußkurve in eine punktsymmetrische Kurve mit einem linearen Bereich um den Nullpunkt zu erhalten:

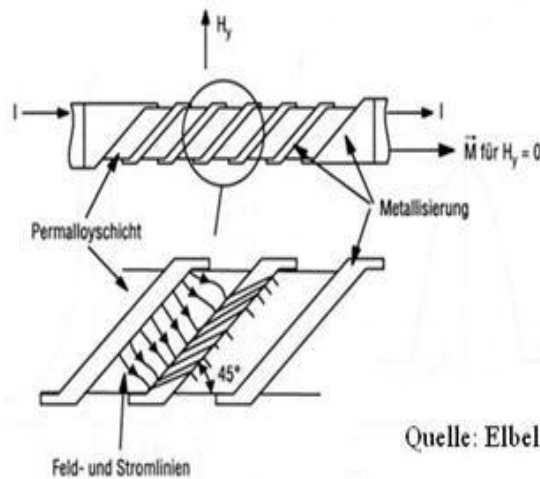


Abbildung 3: Aufbau der Barberpole-Struktur

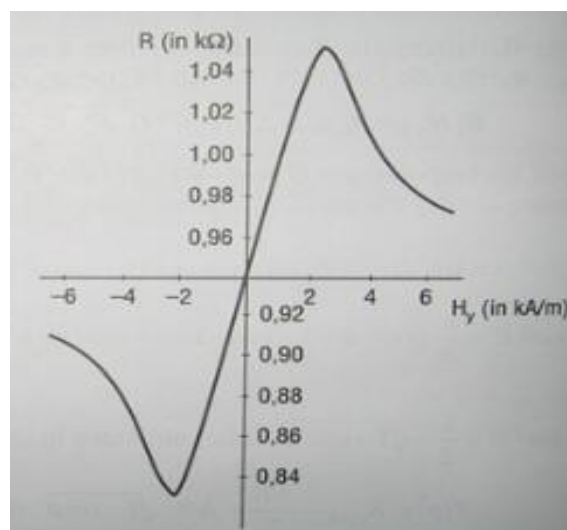


Abbildung 4: Messkurve eines Sensors mit Barberpole-Struktur

2.5.4

Nimmt man mit zwei um 90° versetzte Sensoren eine gleichförmige Drehbewegung auf, so erhält man zwei Ausgangssignale folgender Form:

$$U_{a1} = U_{off1} + U_{ampl1} \cdot \sin(2\alpha) \quad (11)$$

$$U_{a2} = U_{off2} + U_{ampl2} \cdot \sin(2\alpha + 90^\circ)$$

Stellen sie die Bedingungen zur Normierung der Signale auf eins auf und überlegen Sie sich, ob und wie ein eindeutiger Rückschluss auf den Drehwinkel möglich ist.

Die eindeutige Bestimmung des Drehwinkels ist möglich, da man $\sin(2\alpha + 90^\circ)$ in $\cos(2\alpha)$ umwandeln kann und demnach der Winkel im Bereich von -180° bis 180° eindeutig bestimmt ist. Die Normierung des Signals erfolgt, indem man zunächst die Offsetspannungen abzieht und dann durch die Maxima dividiert.

2.5.5 Berechnen Sie die Ausgangsspannung für zwei verschiedene Winkel β zwischen M und I entsprechend Abb. 7 und Gleichung (10)!

Siehe Punkt 3

3 Versuchskonzeption und Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil dient einer stetigen Drehwinkelbestimmung mit einem magnetoresistiven Sensor, der zweite Teil einer Drehzahlbestimmung mit unterschiedlichen Sensoren.

Der erste Teil ist so aufgebaut, dass ein stabförmiger Permanentmagnet vor dem Sensor um 360° gedreht werden kann. Der Antrieb erfolgt über ein Handrad oder zum Abgleichen des Messaufbaues über einen E-Motor, welcher von einem Steuergerät bedient werden kann. Als Referenz zur Winkelmessung dient ein inkrementeller Winkelsensor mit einer Auflösung $0,144^\circ$ pro Impuls.

Die Signalauswertung des Referenzsignals erfolgt über eine „4-fach“ Auswertung mittels „Dasy-Lab“. Um den Einfluss von störenden Feldern aus der Umgebung zu unterdrücken, ist der GMR-Sensor mit einer Abschirmkappe versehen, welche sich abnehmen lässt.

Der Sensor selbst besteht aus zwei unabhängigen Brückensystemen, deren Brückendiagonalen um 45° zueinander verdreht angeordnet sind. Des Weiteren enthält der Sensor noch mehrere Funktionen, bei deren Aktivierung es möglich ist, Störeinflüsse wie Temperaturdrift, Querempfindlichkeiten oder die Verschlechterung des Ausgangssignals durch starke Magnetfelder zu minimieren.

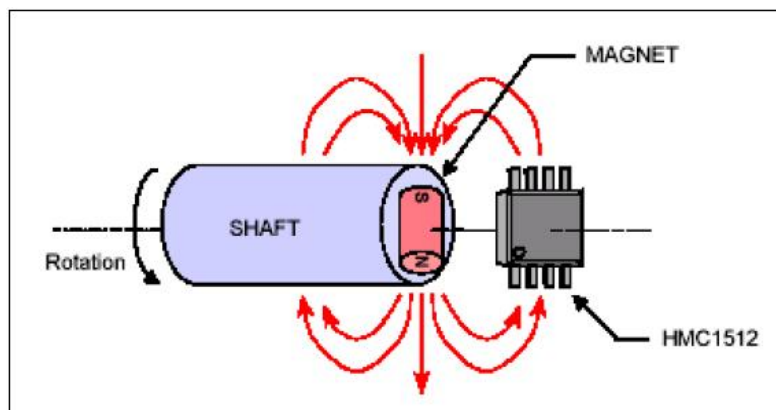


Abbildung 5: Prinzip der Drehwinkelmessung

Der andere Teil des Versuchsaufbaues besteht aus einer zweifach gelagerten Welle, welche mittels eines E-Motors stufenlos in der Drehzahl variiert werden kann. Auf der Welle ist ein Zahnrad montiert. An diesem soll die Drehgeschwindigkeit detektiert werden. Mittels einer Klemmvorrichtung lassen sich die Sensoren befestigen und ihre Lage zum Zahnrad definiert einstellen. Die Auswertung der Messsignale erfolgt über einen Vorverstärker und „Dasy-Lab“.

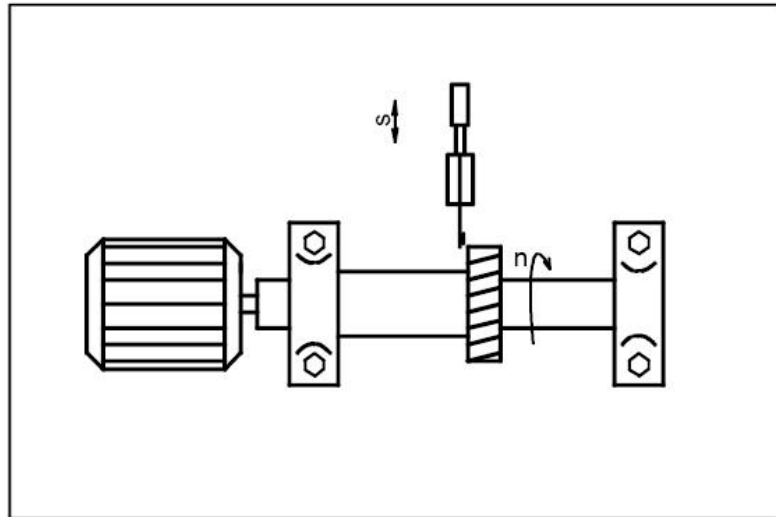


Abbildung 6: Versuchsaufbau zur Drehzahlmessung

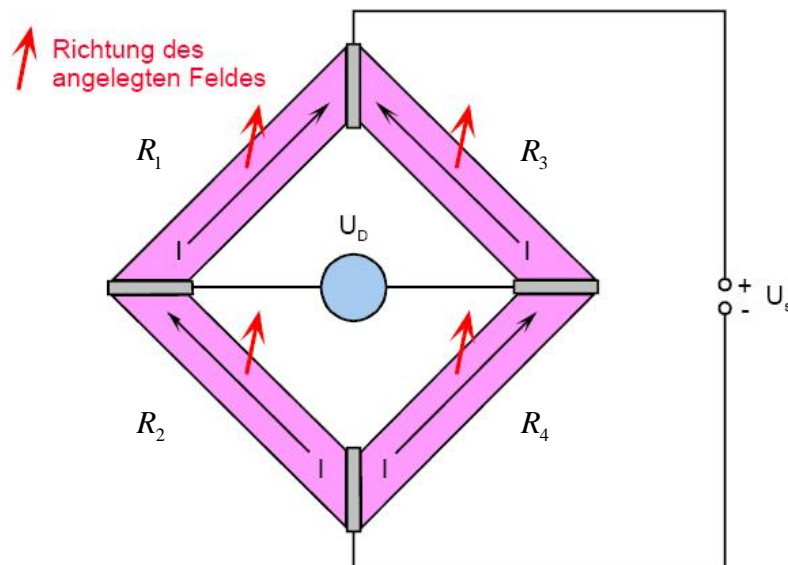


Abbildung 7: Anordnung der Brückenschaltung unter Ausnutzung des anisotropen magnetoresistiven Effektes

Abbildung 4 zeigt die Anordnung einer Brückenschaltung unter Ausnutzung des anisotropen magnetoresistiven Effektes. Der Widerstand dieser Anordnung wird folgendermaßen berechnet:

$$R(\beta) = R_0 + \Delta R \cos(2\beta) \quad (12)$$

Hier ist β der Winkel zwischen der Magnetisierungsrichtung und der Richtung des elektrischen Stromes.

Die Diagonalspannung leitet sich wie folgt her:

$$\begin{aligned}R_2 &= R_3 = R_0 + \Delta R \cdot \cos(2\beta) \\R_1 &= R_4 = R_0 + \Delta R \cdot \cos(2(\beta + 90^\circ)) = R_0 - \Delta R \cdot \cos(2\beta) \\ \frac{U_D}{U_S} &= \frac{R_2 \cdot R_3 - R_1 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \\ &= \frac{(R_0 + \Delta R \cdot \cos(2\beta))^2 - (R_0 - \Delta R \cdot \cos(2\beta))^2}{2R_0 \cdot 2R_0} \\ &= \frac{4R_0 \cdot \Delta R \cdot \cos(2\beta)}{4R_0^2} \\ &= \frac{\Delta R}{R_0} \cdot \cos(2\beta)\end{aligned}$$

4 Messdaten und Auswertung

Spule		Hall		GMR	
Upm	Ampl.-diff.	Upm	Ampl.-diff.	Upm	Ampl.-diff.
54,3	5,72	52	2,34	49	3,29
98,3	10,04	107	2,46	103	3,28
203,4	19,98	202	2,29	198	3,32
453	45,225	496	2,26	496	3,30

Tabelle 1: Umdrehungsabhängige Sensorspannungen

Bei Hall- und GMR-Sensor ist keine Änderung der Sensorspannungen in Abhängigkeit von der zeitlichen Änderung des Magnetfeldes feststellbar. Dies lässt sich dadurch erklären, dass diese Sensoren unabhängig von der Flussänderung arbeiten, sondern direkt die Stärke des Magnetfeldes erfassen.

Die Spule basiert hingegen auf dem Prinzip der Spannungsinduktion, welche direkt proportional zur zeitlichen Änderung des Magnetfeldes steht. Dies ist an den Messdaten ebenfalls erkennbar.

Abstand	Spule	Hall	GMR
mm	Ampl.-diff.	Ampl.-diff.	Ampl.-diff.
0	3,28	2,72	5,51
1	3,25	1,88	4,23
2	3,11	1,37	2,87
3	3,17	1,11	2,32
4	3,20	0,84	1,88
5	3,10	0,56	1,72
6	3,12	0,45	1,47
7	2,96	0,39	0,99
8	2,52	0,44	0,88
9	2,10	0,29	0,74
10	1,69	0,30	0,54

Tabelle 2: Abstandsabhängige Sensorspannungen

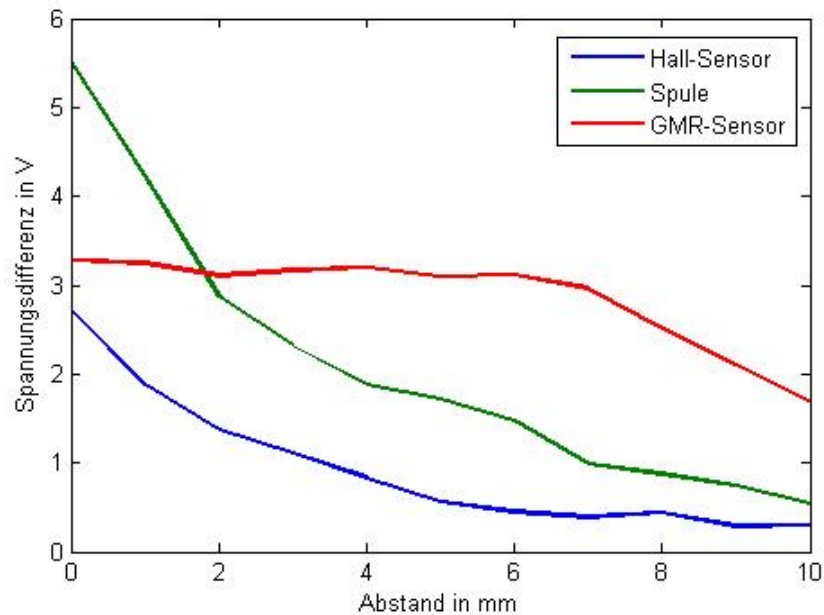


Abbildung 8: Grafische Darstellung der abstandsabhängigen Sensorspannungen

Wie in Abbildung 8 deutlich wird, verlaufen die Kennlinien für Spule und Hall-Sensor ähnlich. Am Anfang ist der Einfluss des Feldes noch sehr stark, je weiter sich der Sensor vom Magneten wegbewegt, desto schwächer wird das Magnetfeld und desto geringer werden die Spannungsdifferenzen der beiden Sensortypen.

Die Kennlinie des GMR-Sensors hingegen ist vollkommen anders. Nah am Magneten ist das Feld stark genug, um alle Schichten des Sensors „umklappen“ zu lassen. Nimmt der Einfluss des Feldes ab (der Abstand wächst), so können ab einem bestimmten Abstand nicht mehr alle Schichten „umklappen“, wodurch sich in diesem Bereich eine lineare Abhängigkeit von der Feldstärke ergibt.

Zusammenfassend kann man sagen, dass mit zunehmendem Abstand die Störeinflüsse größer werden. Bei Spule und Hall-Sensor sind die Spitzen der Störung teilweise größer als die Schwingung selbst. Der GMR-Sensor zeigt sich weniger anfällig für diese Störungen, da seine Funktionsweise auf den Schwellenwerten der Feldstärke zum „Umklappen“ der Schichten basiert.

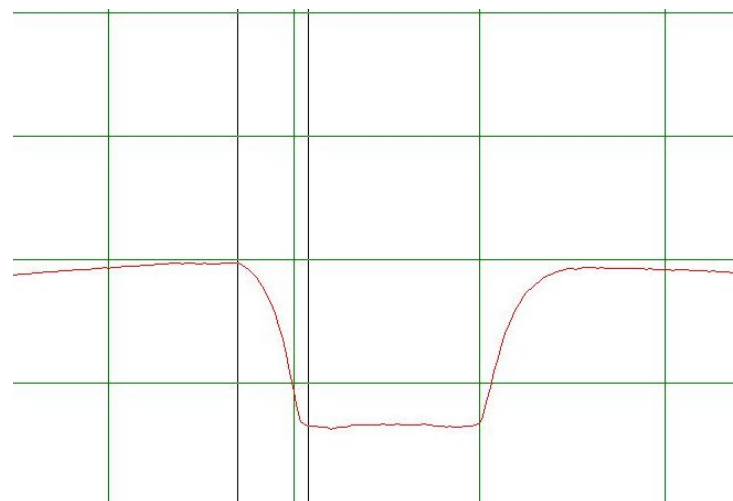


Abbildung 9: Umklappverhalten des GMR-Sensors

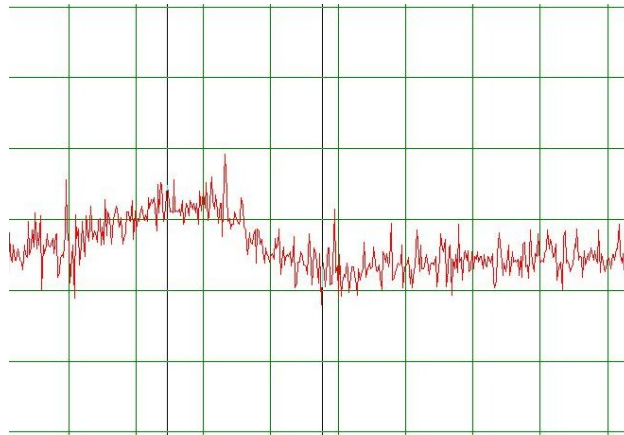


Abbildung 10: Schwingungsverhalten der Spule (10mm Abstand)

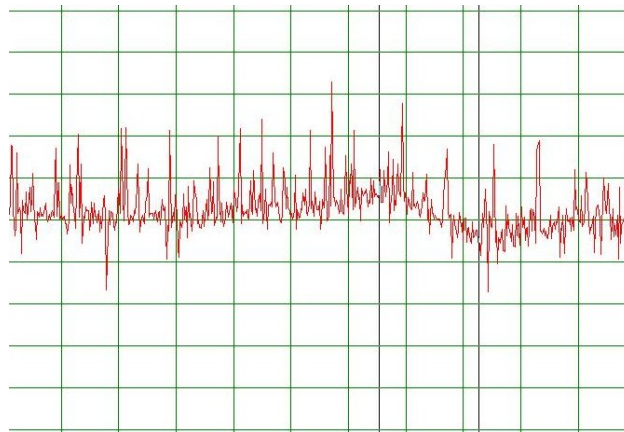


Abbildung 11: Schwingungsverhalten des Hall-Sensors (10mm Abstand)

Als Sensorsignale in Abhängigkeit vom Drehwinkel ergibt sich bei uns das folgende Diagramm:

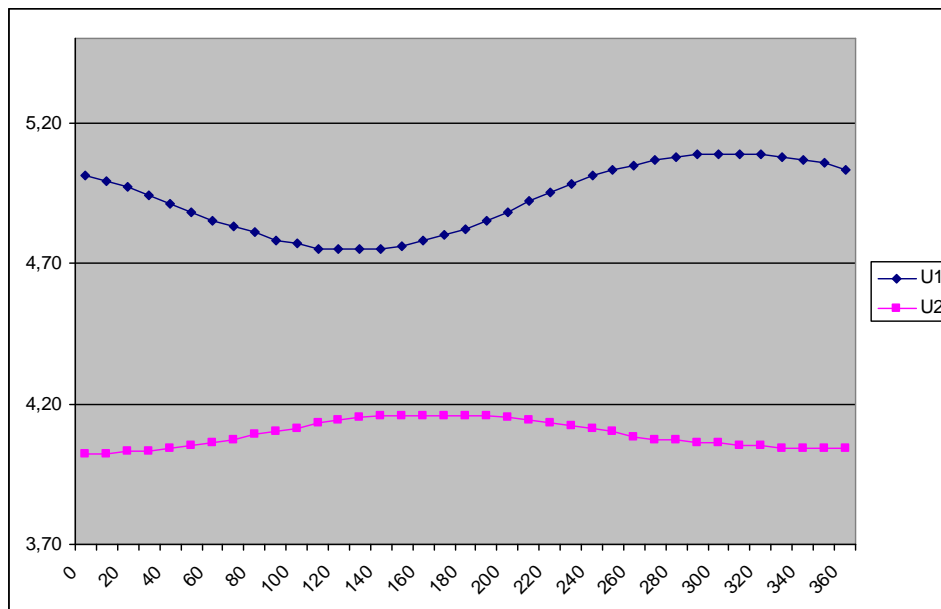


Abbildung 12: Sensorspannung in Abhängigkeit vom Drehwinkel

Damit liegt unter Verwendung von Gleichung 11 die Null-Grad-Marke bei uns bei einem Winkel von $58,03^\circ$.

5 Literatur

- [01] Versuchsanleitung „S10_Magnetfeldsensoren“. URL: http://www.uni-magdeburg.de/imos/mea_sen/welcome.html (Stand: 17.04.09).
- [02] Guan, Yue; Wu, Mingming: „Der Magneto-Resistive Sensor“. URL: <http://www.sascha.uni-saarland.de/sascha2006/de/sensoren/MRsensor.html> (Stand: 04.06.09).