

Messung mechanischer Größen mit magnetoresistiven Sensoren

Dr. sc. nat. F. Dettmann, Dr. rer. nat. S. Linke, Dipl.-Phys. U. Loreit, Dr. rer. nat. P. Pertsch Friedrich-Schiller-Universität, Sektion Physik, AG Schichttechnikum

Für die Messung von Längs- und Drehbewegungen, veränderlichen Längen und Winkeln sowie von Drücken mit hoher Empfindlichkeit und Genauigkeit sind berührungslose Meßverfahren die aktuellste Entwicklungsrichtung. Neben optischen Meßverfahren müssen für die Lösung dieser Aufgaben auch magnetische in Betracht gezogen werden. Durch die Entwicklung magnetoresistiver Sensoren (MR-Sensoren), die zur Zeit vom Schichttechnikum der Sektion Physik der Friedrich-Schiller-Universität als Muster geliefert werden können, ist die Möglichkeit gegeben, durch Kombination geeigneter Magnetmaterialien mit dem Bauelement für spezielle Anwendungen effektive Anordnungen zu schaffen, die entsprechende mechanische Größen über magnetische Wirkungen in verwertbare elektrische Signale umwandeln. Nach einer kurzen Beschreibung des Funktionsprinzips und der Eigenschaften der MR-Sensoren werden im folgenden geeignete Grundanordnungen für die Messung von Winkeln und Winkelgeschwindigkeiten sowie von Abständen und Positionen erläutert und experimentelle Ergebnisse dargestellt.

1. Funktionsprinzip und Eigenschaften von MR-Sensoren

Die magnetoresistiven Sensoren nutzen die Abhängigkeit des elektrischen Widerstands vom Winkel θ zwischen Strom- und Magnetisierungsrichtung in dünnen ferromagnetischen Schichtstreifen:

$$R = R_0 + \Delta R \cos^2 \theta. \quad (1)$$

R_0 unveränderlicher Widerstandsanteil. Für $\Delta R/R_0$ sind Werte im Bereich weniger Prozent bekannt. Ohne äußeres Magnetfeld zeigt die Magnetisierung in Streifenlängsrichtung, da während der Schichtherstellung eine Vorzugsrichtung eingepreßt wurde (charakterisiert durch die Anisotropiefeldstärke H_K) und weil die langen dünnen Schichtstreifen Formisotropie aufwei-

sen. Eine Drehung der Magnetisierung ist durch Anlegen eines Feldes H , mit Richtung quer zu den MR-Streifen möglich (siehe Bild 1). Um zu vermeiden, daß die Steilheit der Änderung des Widerstands mit dem Magnetfeld bei kleinen Feldstärken verschwindend gering wird, sind auf dem Magnetschichtstreifen schmale Streifen hoher Leitfähigkeit mit einer Breite s und einem Abstand a unter einem Winkel von 45° aufgebracht. Sie sorgen dafür, daß die Stromrichtung um 45° gegen die MR-Streifenlängsrichtung gedreht ist. Wegen des relativ geringen magnetoresistiven Effektes $dR/R \approx 2\%$ wird eine Brückenschaltung verwendet. Die einzelnen Widerstände jedes Brückenarmes ändern sich, durch entsprechend entgegengesetzte Verdrehung der Stromrichtung durch die Leitschichtstreifen, gegenläufig im Magnetfeld, so daß ein möglichst großes Brückenausgangssignal entsteht. Für dieses gilt näherungsweise

$$U_A = \frac{U_b}{2} \frac{\Delta R}{R_0} \sin 2\varphi. \quad (2)$$

U_b Betriebsspannung der Brücke
 φ Winkel zwischen Magnetisierungs- und MR-Streifenlängsrichtung (Bild 1).

Der Winkel ergibt sich aus den Magnetfeldkomponenten H_x und H_y zu

$$\tan \varphi = \frac{H_x}{H_y}. \quad (3)$$

Die Feldkomponente H_z senkrecht zur Schicht-

$$\frac{H_x}{H_0} \tan \varphi = \frac{H_y}{H_0} - \sin \varphi.$$

ebene hat keinen Einfluß. H_0 ist die Feldkonstante des Sensors, die gegeben ist durch

$$H_0 = H_K + \frac{t}{w} \frac{M_s}{\mu_0}. \quad (4)$$

M_s Sättigungsmagnetisierung des MR-Schichtmaterials,
 t Schichtdicke,
 w Streifenbreite.

Gesamtwiderstand	$R_m = (1,9 \pm 0,6) \text{ k}\Omega$
Betriebsspannung	$U_b < 12 \text{ V}$
Steilheit bei $H_x = 2 \text{ kA/m}$	$S_u = 3 \pm 1 \frac{\text{mV}}{\text{V kA/m}}$
Ausgangsspannungshub, bezogen auf U_b	$\Delta U_s / U_b \geq 15 \text{ mV/V}$
Offset-Spannung, bezogen auf U_b	$U_{\text{off}} / U_b \leq 10 \text{ mV/V}$
Temperaturkoeffizient der Steilheit bei Konstantspannungsbetrieb	$T_{s,u} < 0,35\% \text{ K}^{-1}$
Konstantstrombetrieb	$T_{s,i} < 0,1\% \text{ K}^{-1}$
Linearitätsabweichung bei 35% von ΔU_s	$< 1\%$
bei 75% von ΔU_s	$< 5\%$
Temperatur Einsatzbereich	$-50 \dots 150 \text{ }^\circ\text{C}$
Gehäuseform	SIL 4 oder DIL 6
Hysterese bei $H_x = 2 \text{ kA/m}$, bezogen auf Spannungshub	$\delta U_s / \Delta U_s < 0,03\%$

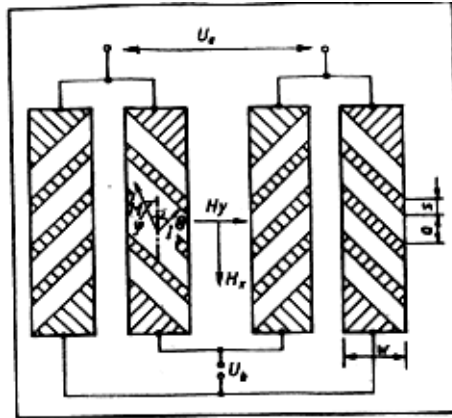


Bild 1. Schematische Darstellung der Sensorstruktur

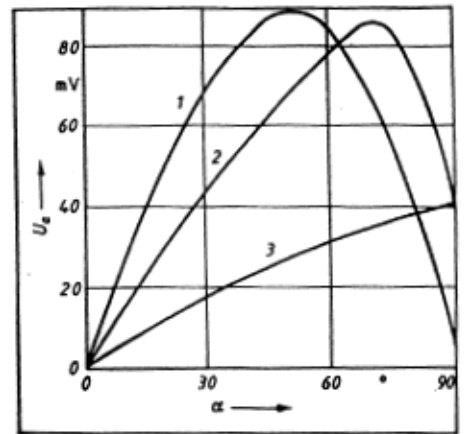


Bild 4. Sensorausgangsspannung in Abhängigkeit vom Winkel zwischen Feld- und MR-Streifenrichtung bei Feldstärken von 1 kA/m (Kurve 3), 4 kA/m (Kurve 2), 20 kA/m (Kurve 1), $U_b = 10 \text{ V}$

Die Drehung der Magnetisierung erfolgt um so leichter, je geringer die Anisotropiefeldstärke H_K und die Sättigungsmagnetisierung des Materials sind. Weiter ist es auch möglich, durch große MR-Streifenbreiten und geringe Schichtdicken den wesentlichen zweiten Term von H_0 so gering zu machen, daß eine leichte Drehbarkeit und damit hohe Magnetfeldempfindlichkeit vorhanden ist.

Wie die Darstellung der Sensorkennlinien im Bild 2 zeigt, kann der Sensor als Meßelement für die Magnetfeldkomponente H_x betrachtet werden. Durch konstante Magnetfelder in MR-Streifenrichtung (H_x) wird die Empfindlichkeit gesenkt und der Meßbereich vergrößert. Ein solches Magnetfeld H_x , das beispielsweise durch einen wenige Kubikmillimeter großen Ferritmagneten in Sensornähe erzeugt werden kann, ist bei vielen Sensoranwendungen erforderlich. Einmal wird damit ein Umklappen der Magnetisierung in die ebenfalls stabile Gegenrichtung durch Störfelder verhindert, zum anderen dient dieses Feld der Vermeidung von Hysteresis in der Sensorkennlinie.

Die hergestellten MR-Sensoren (Tafel 1) befinden sich auf Si-Chips mit 1 mm² Fläche.

Durch fertigungstechnisch bedingte Ungleichheit der vier Brückenwiderstände kann eine Offsetspannung entstehen. Sie liegt unter 10 mV je Volt Betriebsspannung und kann erforderlichenfalls am Element durch Abgleich beseitigt oder durch äußere Beschaltung kompensiert werden. Der Widerstand der Sensorbrücke liegt im Bereich von 1,3 bis 2,5 k Ω . Damit sind bei verkapselten Sensoren (SIL-4- oder DIL-6-Gehäuse) Betriebsspannungen bis 10 bzw. 15 V zulässig. Die Steilheit der Kennlinie kann Bild 2 entnommen werden. Bei geringen Stabilisierungsfeldern (H_x) sind Werte von etwa

$$4 \frac{\text{mV}}{\text{V kA/m}} \text{ typisch. Sensoren mit geringer}$$

Offsetspannung haben bei Betrieb mit Konstantstromquelle einen Temperaturkoeffizienten von weniger als 0,1 %/K. Linearitätsabweichungen liegen unter 1 %, solange die Aussteuerung 35 % des möglichen Gesamtsignals nicht überschreitet. Sensorstrukturen mit verbesserter Linearität wurden erarbeitet. Die MR-Sensoren zeichnen sich durch eine hohe Zuverlässigkeit und große Lebensdauer aus.

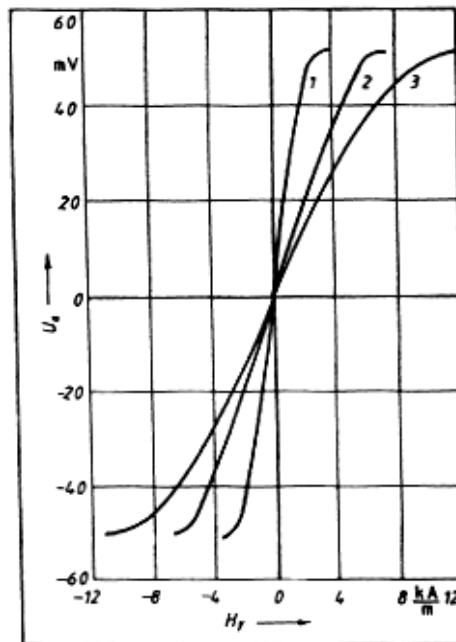


Bild 2. Sensorausgangsspannung in Abhängigkeit vom Meßfeld H_x bei unterschiedlichen Stabilisierungsfeldern H_x (1 $H_x = 0$; 2 $H_x = 4,6 \text{ kA/m}$; 3 $H_x = 10,1 \text{ kA/m}$; $U_b = 5 \text{ V}$)

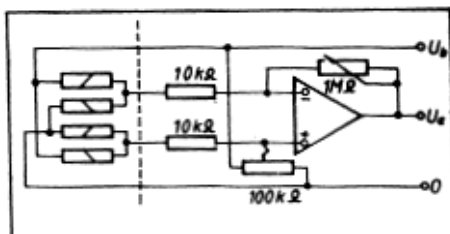


Bild 3. Operationsverstärkerschaltung zur Auswertung des Sensorausgangssignals
Bild 3 zeigt eine einfache Verstärkerschaltung zur Auswertung des Sensorsignals. Mit dem 100-k Ω -Widerstand ist die Kompensation der Offsetspannung möglich. Die benötigte Verstärkung wird am 1-M Ω -Widerstand eingestellt. Die im folgenden dargestellten Meßergebnisse betreffen jedoch alle die unverstärkte Sensorausgangsspannung.

2. Grundanordnung zur analogen Winkelbestimmung

Da der anisotrope magnetoresistive Effekt darin besteht, auf Drehungen der Magnetisie-

rungsrichtung mit einer Widerstandsänderung oder, bezogen auf den kompletten MR-Sensor, mit einer Ausgangsspannungsänderung zu reagieren, liegt sein Einsatz als analoger Drehwinkelsensor nahe. Im Bild 4 ist für verschiedene magnetische Feldstärken die Abhängigkeit des Sensorausgangssignals vom Winkel zwischen Feld- und MR-Streifenlängsrichtung aufgetragen. Für große Feldstärken (Kurve 1), bei denen die Richtung der Magnetisierung im wesentlichen mit der des äußeren Feldes übereinstimmt, nähert sich die Kurve der durch Gleichung (2) gegebenen an. In diesem Fall ist unter α' der Winkel zwischen Feldrichtung und MR-Streifenlängsrichtung zu verstehen. Für eine volle Drehung um 360° durchläuft die Sinuskurve zwei ganze Perioden. Für die eindeutige Messung aller Winkel von 0° bis 360° wäre z. B. die Auswertung der Ausgangssignale von zwei um 90° gegeneinander verdrehten Sensoren möglich. Bei schwächeren Steuerfeldern (Kurve 2 und 3) tritt über einen größeren Winkelbereich näherungsweise lineares Verhalten auf. Gleichzeitig sinkt jedoch die maximal zu erhaltende Ausgangsspannung im dargestellten Winkelbereich. Für diese Kurven treten zwischen Feldrichtung und Magnetisierungsrichtung bereits erhebliche Abweichungen auf.

Das Magnetfeld für den Drehwinkelsensor kann durch Ferritdauermagnete geringer Abmessungen (wenige mm³) erzeugt werden. Für geringere Abstände zwischen Magnet und Sensor werden Abhängigkeiten vom Typ der Kurve 1 erhalten. Ob das sich drehende Teil den Sensor oder den Magneten enthält, sollte jeweils von der Zweckmäßigkeit der Gesamtanordnung bestimmt sein.

3. Grundanordnung zur Positloesbestimmung und Verschiebungsmessung

Meßergebnisse in den Bildern 5 und 6 Die Möglichkeit der Verwendung des Sensors zum Anzeigen der Position eines Objekts, an dem ein geeigneter Magnet befestigt ist, wird durch die veranschaulicht. Die dargestellten Spannungen wurden direkt am Sensor gemessen. Sie enthalten auch die Offsetspannung und sind deshalb im positiven und negativen Aussteuer-

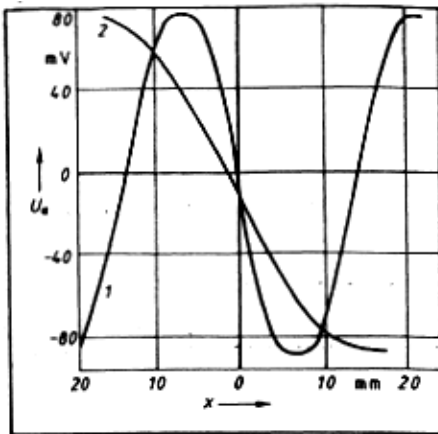
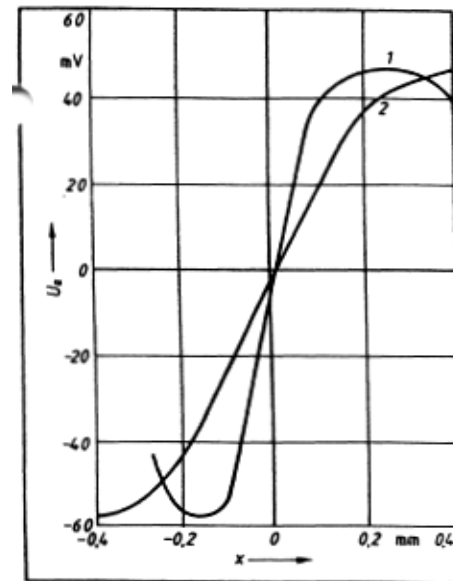


Bild 5. Sensorausgangsspannung bei Verschiebung eines Magneten (30 mm x 14 mm x 13 mm) in Längsrichtung, Magnetisierung und MR-Streifen dazu parallel, Abstand Magnet—Sensor 1 mm (Kurve 1) und



20mm (Kurve 2); $U_b = 10V$

Bild 6. Sensorausgangsspannung bei Verschiebung eines Magneten (2,5 mm x 3 mm x 12 mm) in Richtung der kürzesten Kante, Magnetisierung dazu parallel, Sensorebene dazu senkrecht; Abstand Magnet—Sensor 0,1 mm (Kurve 1) und 1,2mm (Kurve 2); $U_b = 10V$

bereich nicht von gleicher Amplitude. Im Bild 5 wird die Änderung der Sensorausgangsspannung für eine Anordnung gezeigt, bei der ein Dauermagnet mit den Abmessungen 30mm x 14 mm x 13 mm mit der längsten Kante, deren Richtung mit seiner Magnetisierungsrichtung übereinstimmt, parallel zur MR-Streifenrichtung des Sensors in einem bestimmten Abstand angeordnet ist und in Richtung der längsten Kante (x-Richtung) bewegt wird. Bei $x = 0$ befindet sich der MR-Sensor in der Mitte des Magneten. Für größere Abstände (Kurve 2) zwischen Sensor und Magnet wird etwa über den Polabstand des Magneten eine zur Verschiebung proportionale Ausgangsspannung erhalten. Bei kleineren Abständen (Kurve 1) sind nur für kleinere Verschiebungen lineare Bereiche vorhanden. In diesen ist jedoch die Bestimmung der Position mit wesentlich höherer Empfindlichkeit möglich.

Wie Bild 6 zeigt, werden durch die Benutzung kürzerer Magnete noch höhere Empfindlichkeiten ermöglicht. Aus der Darstellung kann man schließen, daß Positionsänderungen von weniger als $0,1 \mu\text{m}$ nachweisbar sind. Für die Messung wurde ein Ferritmagnet mit den Abmessungen 2,5 mm x 3 mm x 12 mm verwendet, der in Richtung der kürzesten Kante magnetisiert ist. Diese Richtung war senkrecht zur Schichtebene des Sensors orientiert. Die Verschiebung erfolgte ebenfalls in diese Richtung. Für $x = 0$ befand sich der Sensor in der Mitte des Magneten. Die Empfindlichkeit der Verschiebungsmessung nimmt auch hier mit größer werdendem Abstand zwischen Sensor und Magnet ab. Die Verschiebung der Magnete gegenüber dem Sensor wurde mit Hilfe des Tisches eines automatischen Vielfachsondentasters realisiert. Damit war die relative Verschiebung mit einem Fehler unter 1% einstellbar.

Mit den vorgestellten wenigen Beispielen wurden Möglichkeiten gezeigt, wie durch einfache Anordnungen mit Hilfe von MR-Sensoren mechanische Größen meßbar sind. Daraus kann der nötige Aufwand und die Größe der zu verarbeitenden Signale abgeschätzt werden. Das Problem der Abschirmung von Störmagnetfeldern ist für die Anwendungen der MR-Sensoren in vielen Fällen unkritisch, da die Felder von Dauermagneten räumlich mit der dritten Potenz des Verhältnisses des Abstandes zur Magnetlänge abklingen. So wird selbst bei starken Dauermagneten in einigen Zentimetern Entfernung bereits der Wert des Erdmagnetfeldes unterschritten. Die Empfindlichkeit der MR-Sensoren wurde so gewählt, daß das Erdmagnetfeld weniger als 1% der möglichen Sensorauslenkung bewirkt. Das Verhältnis des Magnetfeldes des für die jeweilige Anordnung notwendigen Steuermagneten zu den Störfeldern läßt sich durch den geringen Abstand des Steuermagneten zum Sensor in den meisten Fällen auf einen so großen Wert bringen, daß die Störungen vernachlässigbar bleiben.

Literatur

- [1] Säk, E. A.; Zlodejev, G. A.; Malinskij, V. D.: Optoelektronischer Fasersensor für nichtelektrische Größen. Feingerätetechnik 3 (1985), S. 107—108
- [2] Loreit U.; Pertsch, P.; Porwol, H.; Gebhardt, O.: Magnetoresistive Sensoren in der Meß- und Speichertechnik. rfe 5(1985), S. 316—319
- [3] Dibbern, U.: Magnetic field sensors using the magnetoresistive effect. Sensors and Actuators 10 (1986), S. 127—140
- [4] Petersen, A.; Koch, J.: Anwendungen der Magnetfeldsensoren KMZ10. VALVO, Technische Information 86 1105, S. 1—17