

## Der elektronische Kompaß

Im Institut für Mikrostrukturtechnologie und Optoelektronik wurde in Zusammenarbeit mit Philips ein Magnetsensor entwickelt, der im Chip sowohl eine Kompensations- als auch eine Flipspule integriert hat. Das Bauteil ist für die Messung sehr kleiner Magnetfelder konzipiert.

U. Loreit, Dr. Fritz Dettmann, Dr. Wulf Andrä, IMO

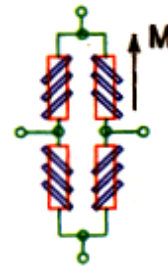
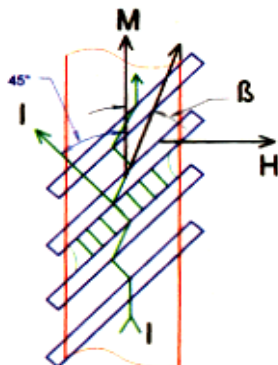
Die seit den achtziger Jahren auf dem Markt befindlichen magnetoresistiven Sensoren konnten bisher weltweit nur in sehr wenigen Applikationen Eingang finden. Sie haben eine hohe Magnetfeldempfindlichkeit und einen einfachen Aufbau. Mit Mitteln der Mikrostrukturtechnologie sind sie zu geringen Kosten herstellbar. Bei vielen möglichen Applikationen führten jedoch Nichtlinearitäten, Temperaturabhängigkeiten und Nullpunktsdriften zu einem hohen Aufwand beim Anwender. Ziel der Arbeiten im IMO war es deshalb durch neue Sensoren mit integrierten Parameterkorrekturen weitere Einsatzgebiete zu erschließen. In den letzten Jahren wurden beispielsweise Sensoren für die Strom-, Längen- und Winkelmessung entwickelt.

Das neueste Element in dieser Reihe von Entwicklungen ist ein Sensor speziell für die Messung sehr kleiner Magnetfelder. Als Haupteinsatzgebiet des im Auftrag von Philips Semiconductors entwickelten Bauteils ist der elektronische Magnetkompaß vorgesehen. Die hohe Magnetfeldauflösung, die es erlaubt, noch den hunderttausendsten Teil des Erdfeldes zu detektieren, wird noch eine Reihe weiterer Anwendungen zur Folge haben.

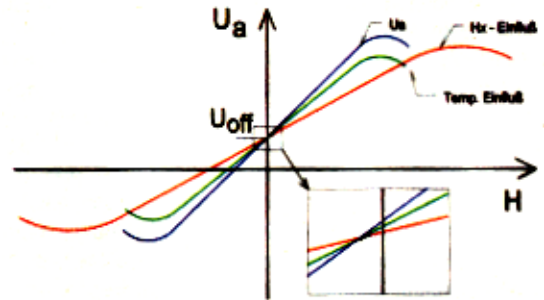
### Funktionsweise und Eigenschaften magnetoresistiver Sensoren

Der anisotrope magnetoresistive Effekt tritt bei einer Reihe von ferromagnetischen Legierungen auf. In diesen Stoffen hängt der elektrische Widerstand vom Winkel zwischen der Stromflußrichtung und der Richtung der Magnetisierung

**Bild 1. Grundstruktur eines magnetoresistiven Sensorelements in Dünnschichttechnik**

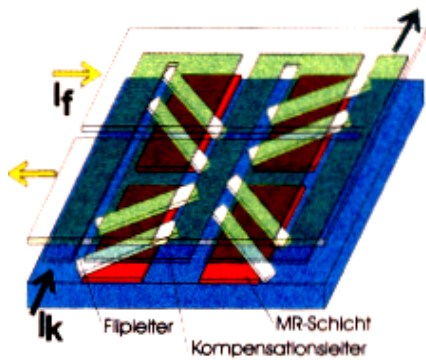


**Bild 2. Prinzipieller Aufbau eines magnetoresistiven Sensors**



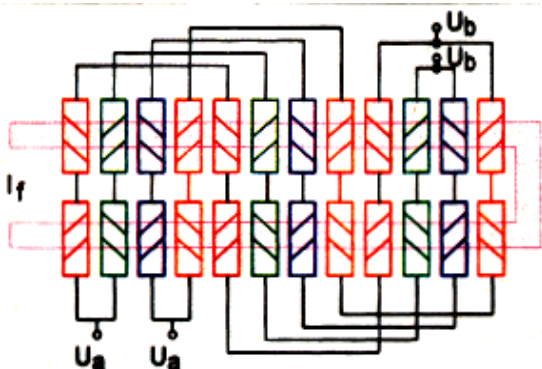
**Bild 3. Prinzipielle Kennlinie des Sensors und deren Veränderung durch den Einfluß von Temperatur und Magnetfeldem in Magnetisierungsrichtung  $H_x$**

im Inneren des Stoffes ab. Bei Parallelität zwischen beiden ist der Widerstand am größten und bei  $90^\circ$  am kleinsten. Die Widerstandsänderung beträgt je nach Material bis zu 6 Prozent. In Bild 1 ist eine Grundstruktur eines magnetoresistiven Sensorelementes in Dünnschichttechnik dargestellt. Die Magnetisierung zeigt in Längsrichtung der Widerstandsstreifen und die Stromflußrichtung wird durch die um  $45^\circ$  gedrehten Leiterbahnstrukturen um etwa  $45^\circ$  gegenüber der Streifenlängsachse ausgelenkt. Durch ein Magnetfeld  $H$ , das senkrecht zur Streifenrichtung anliegt, wird in dünnen Magnetschichten die magnetische Achse abhängig von der Feldstärke ausgelenkt. Um die Temperaturkoeffizienten des Widerstands dieser Magnetmaterialien nicht zur Wirkung kommen zu lassen, werden üblicherweise Brückenanordnungen verwendet. In Bild 2 ist der prinzipielle Aufbau eines üblichen magnetoresistiven Sensors (z.B. KMZ 10 von Philips) dargestellt. In Bild 3 ist deren prinzipielle Kennlinie und deren Veränderung durch den Einfluß von Temperatur und Magnetfeldern in Magnetisierungsrichtung  $H_x$  dargestellt. Durch diese äußeren Einflüsse ändert sich die Sensorempfindlichkeit, so daß eine genaue Messung der Magnetfeldstärke nicht möglich ist. Eine Verbesserung dieser Sensoren ist durch ein Kompensationsverfahren möglich, bei dem durch eine Spule das Feld am Ort des Sensors auf den Nullpunkt geregelt und damit durch den Spulenfaktor die Empfindlichkeit bestimmt wird. Sensoren, die diese Kompensationspule im Sensorchip integriert haben, wurden in den letzten Jahren von IMO entwickelt. Durch das Kompensationsverfahren, welches den Arbeitspunkt des Sensor im Kennliniennullpunkt hält, kann aber eine weitere Fehlerquelle, die Nullpunktsdrift der Sensoren im Temperaturbereich, nicht beseitigt werden. Zur Lösung dieses Problems wird in der Literatur ein Verfahren empfohlen, das unter dem Namen »Flip«-Prinzip bekannt ist. Dabei wird durch periodische

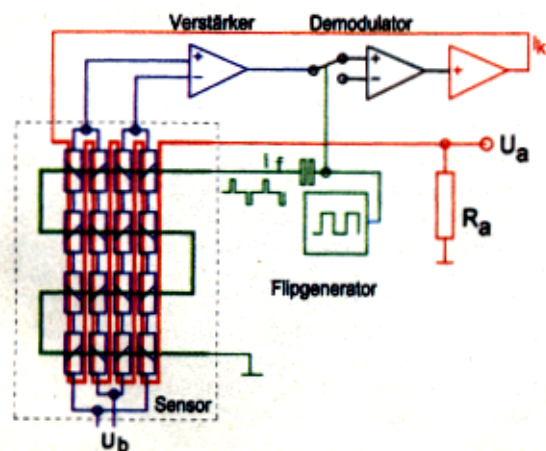


**Bild 4. Anordnung einer Dünnschichtleitbahn zur Kompensation eines Magnetfeldes und Einstellung der Magnetisierung**

Magnetfeldimpulse entgegengesetzter Magnetfeldrichtung die Magnetisierungsrichtung der Streifen regelmäßig umgedreht. Dadurch wird die Magnetfeldempfindlichkeit der Sensoren umgepolt. Die bei einem bestimmten Magnetfeld vorhandene Sensorausgangsspannung wird somit im »Fliptakt« moduliert. Es entsteht also eine Wechselspannung. Bisher benötigte dieses Verfahren eine Spule um den Sensor. Sie macht den Sensor wesentlich teurer und größer. Besonders bei der Messung mehrerer Magnetfeldkomponenten gibt es dabei Probleme, da eine Wirkung der jeweiligen Flipspule auf die Sensoren der anderen Komponenten verhindert werden



**Bild 5. Aufbauprinzip der Brückenstruktur**



**Bild 6. Prinzipschaltung zum Betrieb des Sensors im Kompensations- und Flipmodus**

muß. Im IMO wurde deshalb in Zusammenarbeit mit Philips ein Sensortyp entwickelt, der im Chip sowohl die Kompensations- als auch die Flipspule integriert hat.

### Aufbau und Funktionsweise des Magnetfeldsensors

Zur Erzeugung von Magnetfeldkomponenten in der Ebene von Dünnschichtstrukturen sind am besten Leitbahnen geeignet, die oberhalb dieser angeordnet sind. In Bild 4 ist die Anordnung einer Dünnschichtleitbahn zur Kompensation eines Magnetfeldes und zum Einstellen der Magnetisierung (Rippen) in dem magnetoresistiven Widerstandsstreifen über magnetoresistiven Widerstandsstreifen dargestellt. Sie müssen mindestens deren Breite und Länge haben.

Ein Leiter der ein Magnetfeld erzeugen soll, das zum Umklappen der Magnetisierung in den Sensorstreifen führt, kann nur quer über den Sensorstreifen liegen und muß so breit sein, wie deren Länge ist. Bei Streifenlängen der magnetoresistiven Widerstandsstreifen im Bereich von 0,5 bis 1 mm, die für einen ausreichenden Sensorwiderstand erforderlich sind, hätte der entsprechende Leiter diese Breite. Es müßten dann aber Stromimpulse von mehr als 3 A durch diesen Flipleiter fließen um die erforderliche Feldstärke zur Umkehr der Magnetisierungsrichtung zu erreichen. Damit mit wesentlich kleineren Flipströmen gearbeitet werden kann, wurde die Sensoranordnung entwickelt, die in Bild 4 dargestellt ist. Der magnetoresistive Sensorstreifen wurde in mehrere kurze Teile aufgeteilt und der Flipleiter mäanderförmig darüber angeordnet. Die einzelnen Teilstücke der Widerstandsstreifen werden so durch einen Stromimpuls  $I_f$  im Flipleiter in entgegengesetzte Richtungen magnetisiert. Damit ihre Widerstandskennlinien keinen entgegengesetzten Anstieg bekommen, wurde die Richtung der Barberpolstruktur abwechselnd entgegengesetzt festgelegt. Die Kennlinien aller Einzelteile eines Widerstandsstreifens haben dann immer dasselbe Vorzeichen in ihrer Empfindlichkeit.

Da für einen Brückenwiderstand im Bereich von  $k\Omega$ ~ mehrere Sensorstreifen in Reihe geschaltet werden müssen, wurde dafür noch eine Brückenstruktur entwickelt, deren Aufbauprinzip in Bild 5 dargestellt ist. Das Besondere an dieser Struktur ist, daß alle vier Brückenwiderstände in gleicher Weise über der Chipfläche verteilt sind, so daß sich die Einflüsse der Gradienten von Magnetfeld und Chiptemperatur sowie der Schichtdickenverteilung und Strukturierungsinhomogenitäten auf das Brückenausgangssignal weitestgehend aufheben. Damit ist die Voraussetzung für sehr geringe Offsetwerte und Temperaturkoeffizienten der Offsetspannung entstanden. Dadurch kann dieser Sensorchip für eine Reihe von Anwendungen auch ohne ein regelmäßiges Flippen betrieben werden. In einem SO-8-Gehäuse wird dieser Sensorchip von Philips unter der Bezeichnung KMZ 51 angeboten.

Weitere Vorteile der dünn-schichtmäßig erzeugten Spulensysteme sind ihre geringe Induktivität und die geringe Reichweite der von ihnen erzeugten Magnetfelder. Dadurch ist eine gegenseitige Störung durch die Flip- und Kompensationsfelder auch bei einer Mehrkomponentenanordnung weitgehend unterdrückt. In einer Kompaßanordnung können beide um  $90^\circ$  gegeneinander verdrehten Chips deshalb direkt nebeneinander montiert werden.

### Daten des Sensorchips

Die für den Kompensationsbetrieb entscheidende Kenngröße ist der Kompensationsfaktor. Dieser gibt an, wieviel

Magnetfeld durch 1 mA Kompensationsstrom am Ort der Sensorstreifen erzeugt wird und beträgt für den MFK  $1,23 \pm 0,3$  A/m/mA. Die maximal zulässigen 10 mA Kompensationsstrom können an dem Kompensationsleiterwiderstand von  $< 400 \Omega$  mit 4 V erzeugt werden.

Ein Strom von 1 mA im Flipleiter erzeugt am Ort des Sensorstreifens ein Feld von 5 A/m. Der Flipleiter hat einen Widerstand von  $< 5 \Omega$ . Zur Erzeugung des notwendigen Flipfeldes von 2 kA/m sind Stromimpulse von etwa 400 mA erforderlich. Der Brückenwiderstand beträgt  $1,8 \pm 0,6$  k $\Omega$ . Der Sensor kann mit einer Spannung von 10 V betrieben werden. Die Chipfläche beträgt  $1,5 \times 1,3$  mm<sup>2</sup>.

### Auswertung der Sensorsignale und erreichte Daten

In Bild 6 zeigt die Prinzipschaltung zum Betrieb des Sensors im Kompensations- und Flipmodus. Für die Empfindlichkeit des Sensorgesamt-systems ist allein der Arbeitswiderstand  $R_a$  im Kompensationsstromkreis bestimmend. Durch die Kompensation können sich Temperaturänderungen nur noch auf die geringen Regelabweichungen auswirken. Diese sind aber bei genügend hohem Verstärkungsfaktor im Regelkreis vernachlässigbar.

Messungen in einer Abschirmkammer haben ergeben, daß mit dem MFK 1 bei Verwendung von rauscharmen Operationsverstärkern Magnetfeldauflösungen von  $< 0,5$  nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  erreichbar sind. Damit ist mit diesem Sensor bei einer Bandbreite von 1 Hz etwa 0,001 Prozent der Feldstärke des Erdmagnetfeldes meßbar. Diese Feldstärkeänderung würde sich bei einer Drehung des Sensors im Erdfeld um ungefähr  $0,001^\circ$  ergeben. Für einen Einsatz dieses Sensors im Kfz-Kompaß ist diese Auflösung nicht notwendig, da nur einige Grad Genauigkeit benötigt werden. Deshalb ist der Einsatz von rauscharmen Bauelementen nicht notwendig. Eine Integration der gesamten Auswerteschaltung mit Interpolationselektronik für die Winkelberechnung in ein ASIC ist möglich und sinnvoll. (ae)

### Literatur

- [1] Eigenschaften und Anwendungen der Magnetfeldsensoren KMZ 10, Philips Technische Information 901228, 1990
- [2] F. Dettmann, U. Loreit »Neuartiger Stromsensor auf der Basis magnetoresistiver Sensorelemente«, Vorträge zum Symposium »Magnetoresistive Sensoren« 25. Juni 1992 in Dortmund
- [3] F. Dettmann, U. Loreit »Neuartiges magnetoresistives Feldgradienten-Sensorelement und Stromsensorkonzept für magnetisch gestörte Umgebung«, Vorträge zum Symposium »Magnetoresistive Sensoren II« 18. März 1993 in Wetzlar
- [4] Patentanmeldung DE 4319146 »Magnetfeldsensor, aufgebaut aus einer Ummagnetisierungsleitung und einem oder mehreren magnetoresistiven Widerständen«
- [5] F. Dettmann, U. Loreit »Potentialgetrennte Stromsensoren mit magnetoresistiven Sensorelementen«, Proceedings Sensor 93 Band 4, S. 237, Nürnberg, 1993
- [6] Honeywell advance information »Permalloy magnetic field sensors«, Datenblatt HMR222OP
- [7] Datenblatt »KMZ 51 Magnetic field sensor«, Philips Semiconductors, August 1994

IMO

Fax (06441) 9788-17

Kennziffer 232