

Neue magnetoresistive Sensorchips für die Magnetfeldmessung

U. Loreit, Fritz Dettmann, Wulf Andrä,
IMO, Im Amtmann 6, D-35578 Wetzlar

Einleitung

Die seit den achtziger Jahren auf den Markt befindlichen magnetoresistiven Sensoren konnten weltweit nur in sehr wenigen Applikationen Eingang finden. Trotz der sehr hohen Magnetfeldempfindlichkeit und des einfachen, mit Mitteln der Mikroelektronik herstellbaren Sensoraufbaus bei geringen Kosten, führten bei vielen möglichen Applikationen Nichtlinearitäten, Temperaturabhängigkeiten und Nullpunktsdriften zu einem hohen Aufwand beim Anwender. Ziel der Arbeiten im IMO war es deshalb, durch neue maßgeschneiderte Sensoren mit integrierten Parameterkorrekturen weitere Einsatzgebiete ohne Aufwand beim Anwender zu erschließen. In den letzten Jahren wurden beispielsweise neue Sensoren für die Strom- und Längenmessung entwickelt. Seit seiner Gründung im Jahr 1990 war diese Weiterentwicklung der Strukturen und der Technologie der magnetoresistiven Sensoren im IMO in Wetzlar eine der Hauptaufgaben. Die neuesten Elemente in dieser Reihe von Entwicklungen sind Sensoren speziell für die Messung sehr kleiner Magnetfelder. Ein im Auftrag von Philips Semiconductors entwickelter Sensorchip mit der Bezeichnung MFK 1 zeichnet sich durch temperaturunabhängige Kenndaten und eine sehr gute Nullpunktstabilität aus. Haupteinsatzgebiet für diesen Sensor ist der elektronische Magnetkompaß. Ein weiterer Sensor in dieser Reihe ist ein im Auftrag der Firma Schiebel entwickelter Sensorchip mit der Bezeichnung MFK 2. Er zeichnet sich besonders durch eine größere Magnetfeldempfindlichkeit und geringere Kenndatenstreuung aus. Haupteinsatzgebiet dieses Sensors ist die Vermessung des Erdfeldes und seiner Inhomogenitäten. Die hohe Magnetfeldauflösung, die es erlaubt, noch den hunderttausendsten Teil des Erdfeldes zu detektieren, wird eine Reihe weiterer Anwendungen zur Folge haben.

Funktionsweise und Eigenschaften magnetoresistiver Sensoren

Der anisotrope magnetoresistive Effekt tritt bei einer Reihe von ferromagnetischen Legierungen auf [1]. In diesen Stoffen hängt der elektrische Widerstand vom Winkel zwischen der Stromflußrichtung und der Richtung der Magnetisierung im Inneren des Stoffes ab. Bei Parallelität zwischen beiden ist der Widerstand am größten und bei 90° am kleinsten. Die Widerstandsänderung beträgt je nach Material bis zu 6%. 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° gedrehten Leiterbahnstrukturen um etwa 45° gegenüber der Streifenlängsachse ausgelenkt.

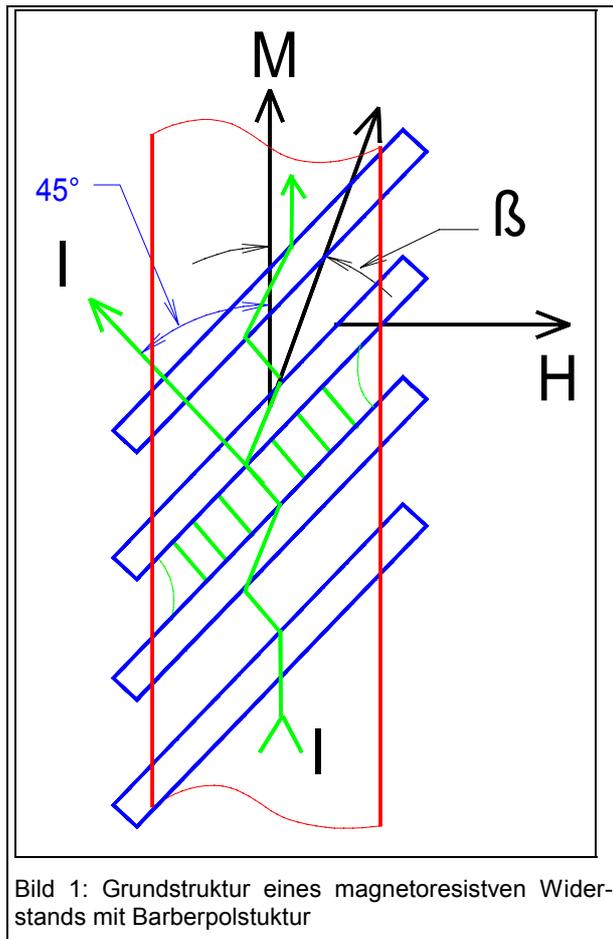


Bild 1: Grundstruktur eines magnetoresistiven Widerstands mit Barberpolstruktur

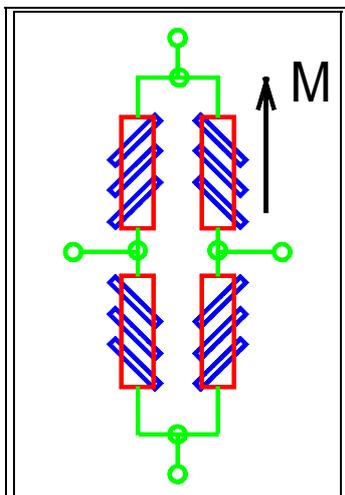


Bild 2: Brückenschaltung aus magnetoresistiven Widerständen

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 Widerstandes 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 Kompensationsspule im Sensorchip integriert haben, wurden in den letzten Jahren von IMO entwickelt. Durch das Kompensationsverfahren, welches den Arbeitspunkt des Sensor

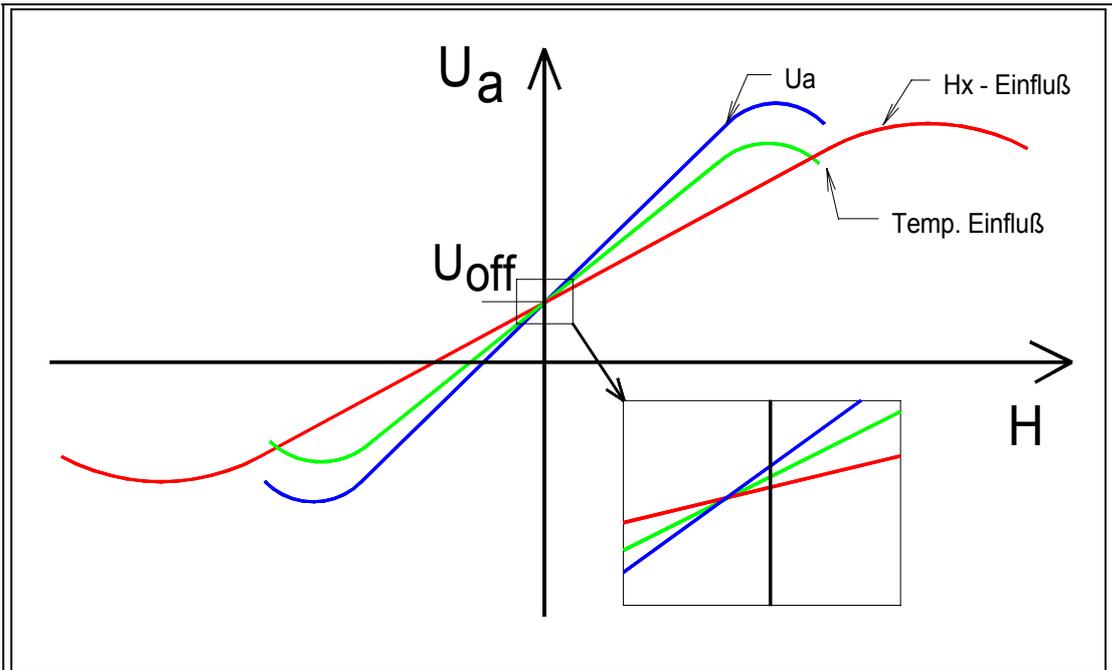


Bild 3: Kennlinie eines magnetoresistiven Sensors und die Wirkung von Temperatur und Magnetfeldern

im Kennliniennullpunkt hält, kann aber eine weitere Fehlerquelle, die Nullpunktsdrift (Ausschnitt in Bild 3) 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 [1,4,6]. Dabei wird durch periodische Magnetfeldimpulse entgegengesetzter Magnetfeldrichtung die Magnetisierungsrichtung der Streifen regelmäßig umgedreht (Bild 4).

Dadurch wird die Magnetfeldempfindlichkeit der Sensoren umgepolt. Die bei einem bestimmten Magnetfeld vorhandene Sensorausgangsspannung wird somit im „Flipakt“ moduliert. Es entsteht also eine Wechselspannung. Dieses ist in Bild 5 dargestellt. Bisher benötigte dieses Verfahren eine Spule um den Sensor. Dieses macht den Sensor wesentlich teurer und größer. Besonders

	B	M	K	S
A		↑		+
B		↓		-
C		↓		+

Bild 4: Darstellung von 3 Varianten der **B**arberpolrichtung und **M**agnetisierungsrichtung sowie deren Einfluß auf die **S**ensorkennlinie und **S**teilheit

bei der Messung mehrerer Magnetfeldkomponenten gibt es dabei Probleme, da eine Wirkung der jeweiligen Flipspule auf die Sensoren der anderen Komponenten verhindert werden muß.

Im IMO wurde deshalb ein neuer Sensortyp entwickelt, der im Chip sowohl die Kompensations- als auch die Flipspule integriert hat.

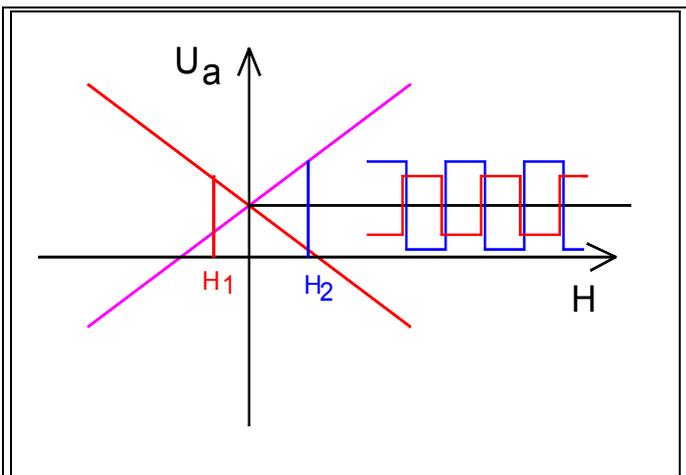


Bild 5: Ausgangssignalform eines regelmäßig geflippten magnetoresistiven Sensors bei zwei Magnetfeldern H_1 und H_2

Aufbau und Funktionsweise des neuentwickelten Magnetfeldsensors

Zur Erzeugung von Magnetfeldkomponenten in der Ebene von Dünnschichtstrukturen sind nur Leitbahnen geeignet, die oberhalb oder unterhalb dieser angeordnet sind. In Bild 6 ist die Anordnung einer Dünnschichtleitbahn zur Kompensation eines Magnetfeldes und zum Einstellen der Magnetisierung (Flip-pen) in dem magnetoresistiven Widerstandsstreifen über magnetoresistiven Widerstandsstreifen dargestellt.

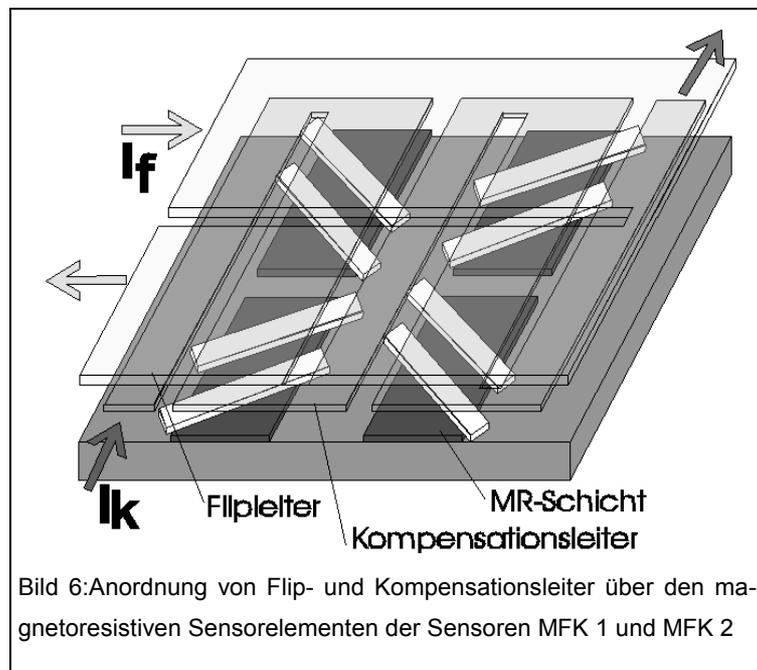


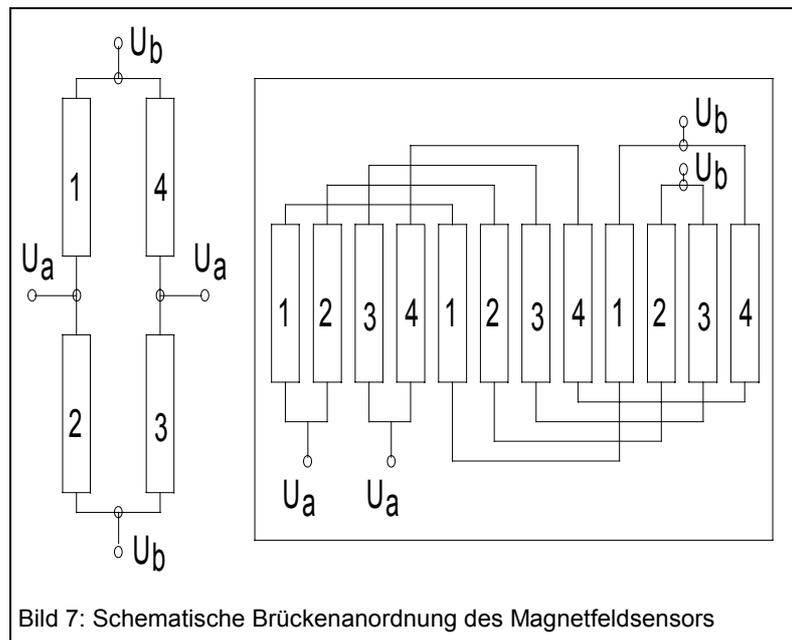
Bild 6: Anordnung von Flip- und Kompensationsleiter über den magnetoresistiven Sensorelementen der Sensoren MFK 1 und MFK 2

Diese 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 1mm, 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 Flippleiter fließen um die erforderliche Feldstärke zur Umkehr der Magnetisierungsrichtung zu erreichen. Damit mit wesentlich kleineren Flipströmen gearbeitet werden kann, wurde die neue Sensoranordnung entwickelt, die in Bild 6 dargestellt ist. Der

magneto-resistive 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 neue Brückenstruktur entwickelt, deren Aufbauprinzip in Bild 7 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 Flipping betrieben werden.



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 Flipping betrieben werden.

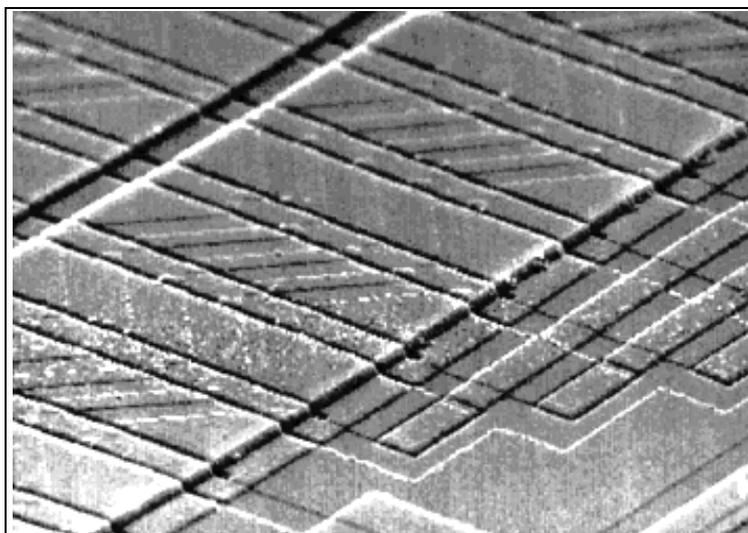


Bild 8: Rastermikroskopische Aufnahme einen MFK 1 Ausschnittes

Die Aufnahme eines Chipausschnittes mit einem Rasterelektronenmikroskop des vom IMO entwickelten Sensors unter der Bezeichnung MFK 1 (**M**agnetfeldsensor mit **F**lip- und **K**ompensationsleiter) ist in Bild 8 zu sehen. In einem SO-8 Gehäuse wird dieser Sensorchip von Philips Semiconductors unter der Bezeichnung KMZ 51 angeboten.

Für den zweiten im IMO entwickelten Magnetfeldsensor mit integriertem Flipleiter MFK 2 wurde eine symmetrische Brückenstruktur verwendet. Dessen prinzipielle Anordnung ist in Bild 9 dargestellt.

Weitere Vorteile der dünnschichtmäßig 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 weitestgehend unterdrückt. In einer Kompaßanordnung können beide 90° gegeneinander verdrehten Chips deshalb direkt nebeneinander montiert werden.

Daten der Sensorchips

Die für den Kompensationsbetrieb entscheidende Kenngröße ist der Kompensationsfaktor. Dieser gibt an, wieviel Magnetfeld durch 1 mA Kompensationsstrom am Ort der Sensorstreifen erzeugt. Die maximal zulässigen 10 mA Kompensationsstrom können an dem Kompensationsleiterwiderstand von $< 400 \Omega$ mit 4 V erzeugt werden. In den folgenden Kenndaten sind die wichtigsten Unterschiede zwischen den beiden Sensortypen gegenübergestellt.

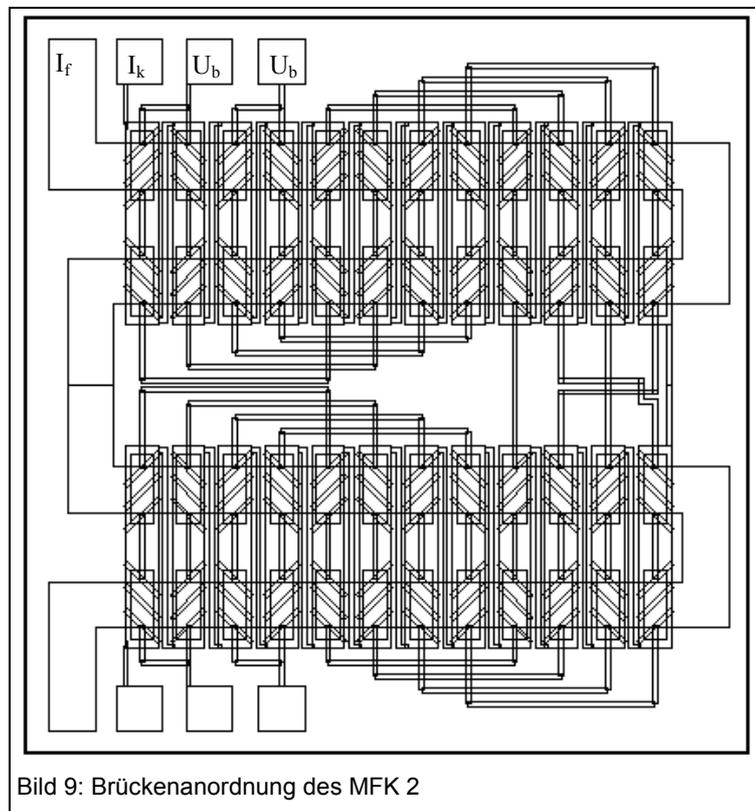


Bild 9: Brückenordnung des MFK 2

	MFK 1	MFK 2
Kompensationsfaktor kA/m/mA	$23 \pm 0,3$	$9,4 \pm 0,05$
Brückenwiderstand k Ω	$1,8 \pm 0,6$	$1,7 \pm 0,5$
Magnetfeldempfindlichkeit mV/V/kA/m	20 ± 5	40 ± 10

	MFK 1	MFK 2
Chipfläche mm ²	1,5 X 1,3	4,05 X 2,9

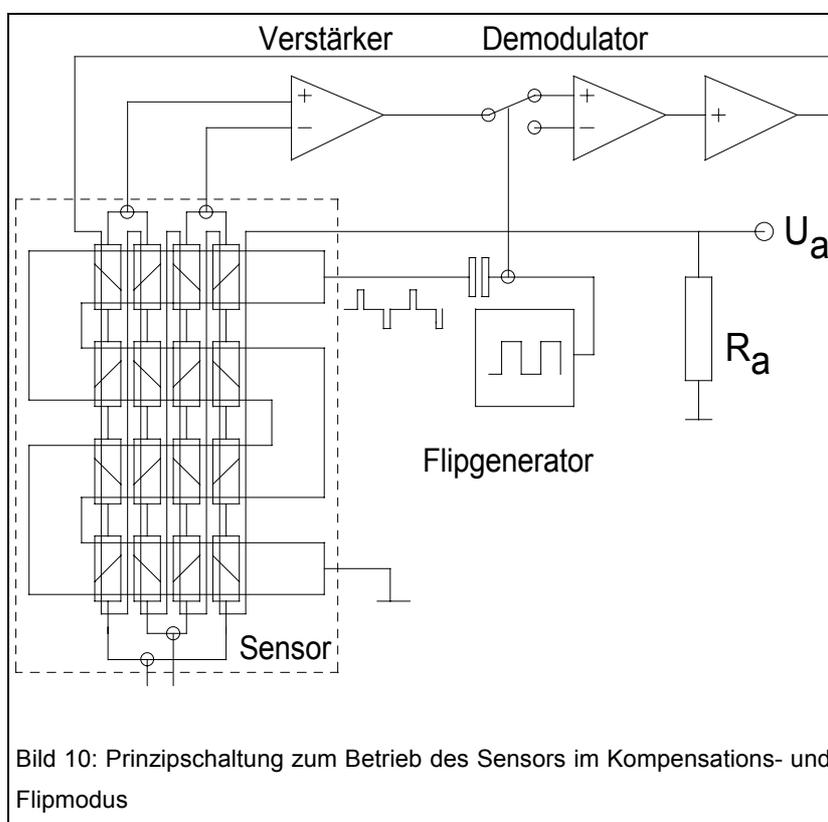
Ein Strom von 1 mA im Flipleiter erzeugt am Ort des Sensorstreifens ein Feld von 5 A/m. Der Flipleiter hat einen Widerstand von $< 5 \Omega$. Zur Erzeugung des notwendigen Flipfeldes von 2 kA/m sind Stromimpulse von etwa 400mA für 5 μ s erforderlich.

Die Sensoren können mit einer Spannung von 10 V betrieben werden.

Die vollständige Daten der Sensorchips MFK 1 und MFK 2 können aus den entsprechenden Datenblättern / 7 / entnommen werden.

Prinzipschaltung zur Auswertung der Sensorsignale und Ergebnisse

In Bild 10 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 $< 0,5 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ erreichbar sind. Damit ist mit diesem Sensor bei einer Bandbreite von 1 Hz etwa 0,001 % 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.

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 „Permaloy magnetic field sensors“, Datenblatt HMR2220P
- / 7 / Datenblätter MFK 1 und MFK 2