

Magneto-resistive Sensorelemente

0. Einleitung

Die Aufgaben zur Messung, Steuerung und Regelung von Größen und Prozessen gewinnen in Produktion und Forschung ständig an Bedeutung. Eine Grundvoraussetzung für ihre Bewältigung ist die Bereitstellung geeigneter Sensorelemente für die Erfassung der unterschiedlichsten Parameter. Unter den verschiedenen Sensortypen zeichnen sich magnetische Bauelemente durch ihr berührungsloses und damit verschleißarmes Meßprinzip, ihre Zuverlässigkeit unter rauen Einsatzbedingungen und ihre vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten aus.

Letztere ergeben sich dadurch, daß eine ganze Reihe von Meßgrößen mit relativ einfachen Mitteln in ein auf das Sensorelement wirkendes Magnetfeld umgewandelt werden kann. Die Palette der bekannten Magnetfeldsensoren wird durch die in den letzten Jahren zur industriellen Reife entwickelten magneto-resistiven Sensorelemente (MR-Sensoren) bedeutend erweitert und ergänzt. Mit nachweisbaren magnetischen Flußdichten im Bereich Nanotesla bis Millitesla schließen sie unmittelbar an die bei stärkeren Feldern eingesetzten Hall-Sensorelemente an. Magneto-resistive Sensorelemente werden z. B. neben der Messung von Gleich- und Wechselfeldern auch für den potentialfreien Nachweis von Gleich- und Wechselströmen und in Kombination mit ferromagnetischen Konstruktionselementen zur Erfassung von Positionen, Winkeln und Drehzahlen eingesetzt.

Im Beitrag werden Aufbau und Funktionsweise magneto-resistiver Sensorelemente erläutert. Weiter werden einige wichtige Einflußgrößen auf die Sensorelementparameter zusammengestellt, die bei der Konstruktion kompletter Sensoren zu berücksichtigen sind. Schließlich werden die Kennwerte eigener Entwicklungsmuster angegeben.

Dr. sc. nat. **Fritz Dettmann** (50) studierte von 1958 bis 1963 an der TU Dresden Physik. Danach bei Robotron Dresden tätig. 1971 Promotion A mit einer Arbeit über das Schaltverhalten supraleitender Bauelemente. Seit 1973 Oberassistent an der Sektion Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Arbeitsgebiet: Josephson-Effekt und seine Anwendung für hochempfindliche Magnetfeldsensoren. Dazu 1981 auch Promotion B. Ab 1986 an Schichttechnikum mit magneto-resistiven Sensoren beschäftigt.

Dipl.-Phys. **Uwe Loreit** (39) studierte von 1968 bis 1973 an der FSU Jena, Sektion Physik. Danach in den Keramischen Werken Hermsdorf im Betrieb Mikroelektronik tätig (Einsatz von Chips in Hybridschaltkreisen). Ab 1978 im Schichttechnikum der Friedrich-Schiller-Universität Jena (Zyklus-2 für Chipbauelemente). Seit 1984 mit der Herstellung und Applikation von magneto-resistiven Sensoren beschäftigt.

Dr. rer. nat. **Stephan Linke** (34) studierte von 1972 bis 1977 an der FSU Jena. 1982 Promotion über den Einfluß der Realstruktur auf die Eigenschaften schwach supraleitender Verbindungen. Danach im Schicht-technikum der Friedrich-Schiller-Universität, Arbeitsgebiet Darstellung und Charakterisierung dünner Schichten, tätig. Seit 1985 mit der Präparation magneto-resistiver Sensoren befaßt.

Dr. rer. nat. **Peter Pertsch** (48) studierte von 1961 bis 1966 an der FSU Jena, Sektion Physik. Danach mit Fragen der Dünnschicht-Technologie der Hybrid- und Supraleitungselektronik beschäftigt. 1975 Promotion A. Seit 1977 Leiter der Arbeitsgruppe Schichttechnikum der Sektion Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena.

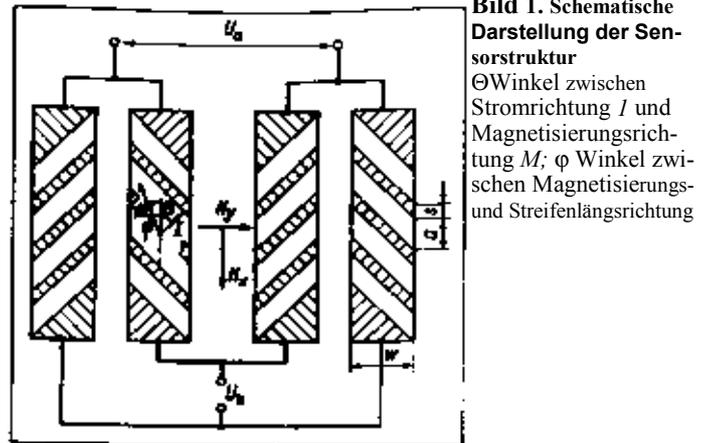


Bild 1. Schematische Darstellung der Sensorstruktur
 Θ Winkel zwischen Stromrichtung I und Magnetisierungsrichtung M ; φ Winkel zwischen Magnetisierungs- und Streifenlängsrichtung

1. Aufbau und Funktionsweise magneto-resistiver Sensorelemente

MR-Sensoren nutzen die Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes dünner, magnetisch anisotroper Schichten $\rho(H)$ vom Winkel zwischen Strom und Magnetisierung aus. Stimmen die Richtungen von Strom und Magnetisierung überein, so erreicht $\rho(H)$ sein Maximum, bei einem Winkel von 90° tritt der um $\Delta\rho$ geringere Minimalwert auf. Die Widerstandsänderung liegt im Bereich weniger Prozent. Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau eines MR-Sensors in Brückenschaltung. Die vier magneto-resistiven Schichtstreifen sind in Längsrichtung magnetisiert (x-Achse). Wirkt senkrecht dazu (y-Achse) ein zu messendes Magnetfeld H_x ein, so wird die Magnetisierung der Streifen aus ihrer ursprünglichen Richtung um einen Winkel φ herausgedreht, und es tritt eine Widerstandsänderung auf. Durch Leitschichtstreifen geringen Flächenwiderstandes, die um den Winkel α gegen die Längsrichtung der magneto-resistiven Streifen geneigt sind, wird dafür gesorgt, daß der durch Anlegen der Betriebsspannung U_b fließende Strom bis auf Abweichungen in Randbereichen in eine Richtung fließt, die um den Winkel $(90^\circ - \alpha)$ gegen die x-Achse gedreht ist. Die magneto-resistiven Streifen haben die Breite w und die Länge l . Der Abstand der Leitschichtstreifen in x-Richtung ist a , ihre Breite in dieser Richtung ist s . Die Dimensionierung von w , a und s beeinflusst die Stromrichtung an den Streifenrändern und bestimmt so die Abweichung δ der mittleren Stromrichtung gegen den Winkel $(90^\circ - \alpha)$. In Längsrichtung der magneto-resistiven Streifen kann ein Stabilisierungsfeld H_x angelegt werden, damit nach Abschalten des Meßfeldes H_x die Magnetisierung vollständig in ihre ursprüngliche Lage zurückkehrt und so Hysterese vermieden wird.

Der Widerstand eines magneto-resistiven Schichtstreifens mit Leitschichtstreifen ($\alpha = 45^\circ$) kann nach bestimmt werden zu

$$R_s = \frac{l}{w \cdot t} \cdot \frac{a}{a+s} \rho(H) \cdot k \left(\frac{a}{w} \right) \quad (1)$$

mit t als Schichtdicke. Die Funktion $k(a/w)$ kann im Bereich $0 \leq a/w \leq 2$ durch

$$k\left(\frac{a}{w}\right) = 0,5 + 0,14 \frac{a}{w} \quad (2)$$

in guter Übereinstimmung mit den Meßwerten approximiert werden. Wird entsprechend Bild 1 aus vier magnetoresistiven Streifen mit unterschiedlichem Vorzeichen von i_x eine Brücke aufgebaut, so ergibt sich bei Anlegen eines Meßfeldes H_y für die Brückenausgangsspannung

$$U_s = U_B \cdot \frac{\Delta R}{R_0} \cdot \cos 2\delta \cdot \frac{1}{2} \sin 2\varphi, \quad (3)$$

$$R_0 = R_0 - \frac{\Delta R}{2} + \frac{\Delta R}{2} \sin 2\delta, \quad (4)$$

mit ΔR als maximaler Widerstandsänderung eines MR-Streifens und wobei R_0 der maximale Widerstand eines MR-Streifens ist. Der Winkel φ ist aus folgender Gleichung zu bestimmen:

$$\frac{H_x}{H_0} \tan \varphi = \frac{H_y}{H_0} - \sin \varphi. \quad (5)$$

H_0 ist die Feldkonstante des Sensors, die nach

$$H_0 = H_k + \frac{t M_s}{w \mu_0} \quad (6)$$

aus der Anisotropiefeldstärke H_k der MR-Schicht und dem Formanisotropieanteil mit der Sättigungsmagnetisierung M_s berechnet werden kann. Die mittlere Abweichung der Stromrichtung von $(90^\circ - \alpha)$ kann aus

$$\cos 2\delta = 1 - 0,08 \frac{a}{w} - 0,11 \left(\frac{a}{w}\right)^2 \quad (7)$$

für $0 \leq a/w \leq 2$ bestimmt werden.

Bild 2 zeigt die experimentelle Abhängigkeit der Ausgangsspannung U_a des Sensors vom Meßfeld H bei unterschiedlichen Stabilisierungsfeldern H_x . Es ergeben sich Kurven, die in der Umgebung von $H_y = 0$ linear verlaufen, wobei der Anstieg mit steigendem H_x sinkt. Bei einem Wert H_{ym} bzw. $-H_{ym}$ wird die Ausgangsspannung maximal bzw. minimal. Die Spannungsdifferenz zwischen Maximum und Minimum wird als Spannungshub des Sensors bezeichnet. Es besteht der Zusammenhang

$$\Delta U_m = U_B \frac{\Delta R}{R_0} \cos 2\delta. \quad (8)$$

Für das Feld H_{ym} gilt

$$H_{ym} = H_x + \frac{H_0}{\sqrt{2}}. \quad (9)$$

Die experimentellen Kurven stimmen im Bereich $-H_{ym} \leq H_y \leq H_{ym}$ sehr gut mit den berechneten überein. Bei größeren H_y treten größere Abweichungen auf, besonders für geringe Werte von H_x . Die Steilheit der Ausgangsspannungskurve ist im Arbeitsbereich bei Konstantspannungsbetrieb der Brücke

$$S_U = \frac{1}{U_B} \frac{dU_s}{dH_y} = \frac{\Delta R}{R_0} \cdot \frac{\cos 2\delta}{H_0 + H_x}. \quad (10)$$

Berücksichtigung von (8) ergibt

$$S_U = \frac{\Delta U_m}{U_B (H_0 + H_x)}. \quad (11)$$

Daraus ist ersichtlich, daß die maximale Sensorempfindlichkeit im wesentlichen durch die relative Änderung des Widerstandes der MR-Schicht und durch deren Anisotropiefeldstärke und Sättigungsmagnetisierung sowie deren Breite und Dicke bestimmt ist. Die Abmessung der Leitschichtstreifen ist hier von untergeordneter Be-

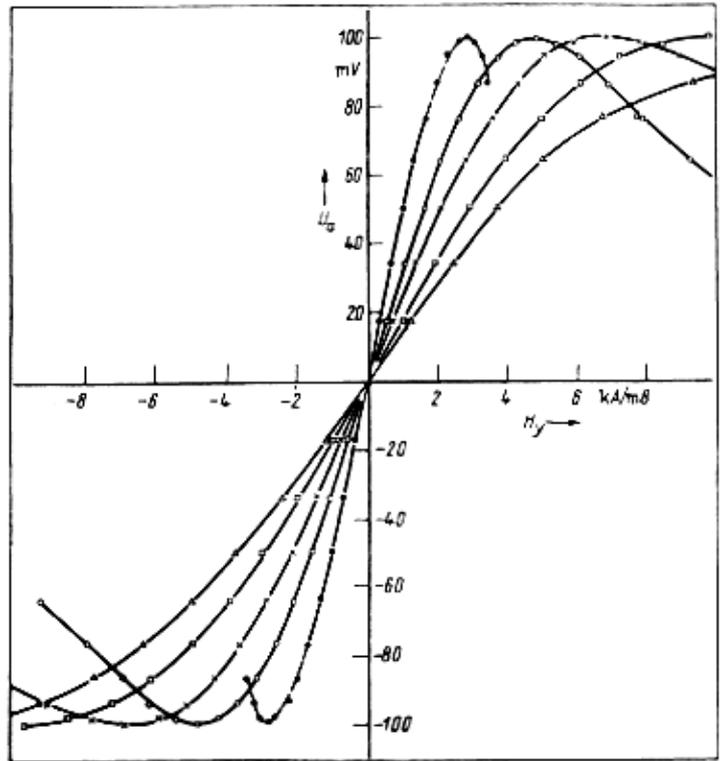


Bild 2. Sensorausgangsspannung in Abhängigkeit vom Meßfeld bei unterschiedlichen Stabilisierungsfeldern H_x

● $H_x = 0$; ○ $H_x = 2$ kA/m; × $H_x = 4$ kA/m; □ $H_x = 7$ kA/m; ▽ $H_x = 10$ kA/m

deutung, spielt jedoch für den Gesamtwiderstand und deshalb für die maximal anlegbare Brückenspannung eine Rolle.

Bei Konstantstrombetrieb der Brücke ($I = I_k$) ist die Ausgangsspannung durch

gegeben, wobei φ , wieder aus (5) zu bestimmen ist. Für die Steilheit

$$U_s = I_k \Delta R \cos 2\delta \cdot \frac{1}{2} \sin 2\varphi \quad (12)$$

im Arbeitsbereich gilt

In der Umgebung von $H_x = 0$ kann die Sensorkennlinie bei Kon-

$$S_1 = \frac{1}{I} \frac{dU_s}{dH_y} = \frac{\Delta R \cos 2\delta}{H_0 + H_x}. \quad (13)$$

stantspannungsbetrieb durch

linear genähert werden. Dabei ist ϵ die zulässige relative Abweichung.

$$U_s = \frac{\Delta U_m}{(H_0 + H_x)(1 + \epsilon)} \cdot H_y, \quad (14)$$

Mit dieser relativen Abweichung ϵ kann die Näherung dann bis zu einem Bruchteil des Gesamthubes ΔU_m genutzt werden, der durch

$$U_s / \Delta U_m = \sin \{2 \arccos [D(1 + \sqrt{1 + 2H_x/(DH_0)})]\} \quad (15)$$

mit

$$D = \frac{1 - \epsilon}{1 + \epsilon} \frac{H_0}{2(H_0 + H_x)} \quad (16)$$

gegeben ist.

Wie aus Bild 3 zu ersehen ist, kommen bei einer zulässigen Abweichung von 1 % ($\epsilon = 0,01$) bei $H_x = 0$ noch 38% des Gesamthubes innerhalb der linearen Näherung nach (14) als Arbeitsbereich in Frage. Bei größeren Hilfsfeldern H_x , wie sie für einen sicheren Betrieb des Bauelementes in vielen Anwendungen erforderlich sind, sinkt dieser Bereich auf etwa 28% des Gesamthubes ab.

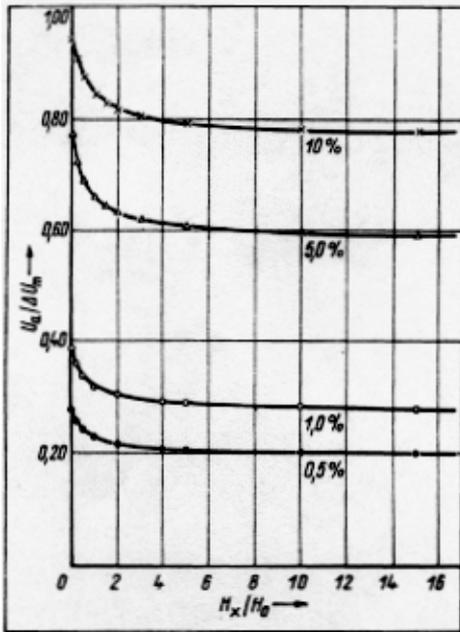


Bild 3. Grenzkurven für den Linearitätsbereich

Unterhalb der jeweiligen Kurve weicht die Kennlinie maximal um den angegebenen Wert von der linearen Beziehung zwischen U_a und H_y ab

2. Parameter der gefertigten Sensorelemente

Bei den Entwicklungsmustern von MR-Sensoren der Friedrich-Schiller-Universität Jena wurden eine hohe lokale Auflösung und eine möglichst geringe Störfeldbeeinflussung, z. B. durch das Erdmagnetfeld, angestrebt. Gemäß der vorgestellten Funktionsweise sind dafür die Strukturgrößen der Bauelemente möglichst klein zu halten. Empfindlichere Sensoren lassen sich mit größeren Abmessungen der Funktionsschichten (sinnvoll bis in den Bereich von 100 μm) und damit des gesamten MR-Sensors erreichen.

Die magnetoresistiven Sensorelemente werden auf Siliziumsubstraten mit Hilfe fotolithografischer Methoden hergestellt. Die Chipfläche beträgt $1 \times 1 \text{ mm}^2$. Je Brückenwiderstand sind auf dem Chip neun mäanderförmig hintereinandergeschaltete Dünnschichtstreifen aus NiFe bzw. NiCoFe von etwa 30 nm Dicke (t) und 10 μm Breite (w) angeordnet. Die Leitschichtstreifen bestehen aus Aluminium und sind in einem Abstand $a = 5 \mu\text{m}$ bei einer in Magnetschichtstreifenrichtung gemessenen Breite $s = 3 \mu\text{m}$ angeordnet. Um Strukturen dieser Abmessungen mit genügender Reproduzierbarkeit fertigen zu können, ist der Einsatz von elektronenstrahlolithografisch hergestellten Schablonen für die Fotolithografie erforderlich.

Fertigungstechnische Schwankungen in den Schichtabmessungen und -eigenschaften führen zur Ungleichheit der vier MR-Streifenwiderstände der Brücke und bewirken eine störende Offsetspannung. Durch Anbringen von Abgleichflächen, die dem magnetischen Verhalten der gesamten Sensorbrücke angepaßt sind, und Durchführung von Laserstrahlableich können in der Fertigung Offsetspannungen von weniger als 1 mV eingestellt werden.

Die fertigen Siliziumsubstrate werden mit üblichen Verfahren des Zyklus II der Halbleitertechnologie weiterverarbeitet und im SIL-4-oder im DIL-6-Gehäuse als Muster ausgeliefert. Ihre Kenndaten sind in der Tafel zusammengestellt. Es muß darauf hingewiesen werden, daß die Eigenmagnetisierung der Sensorelemente zwar durch die Streifenlängsrichtung vorgegeben, damit jedoch nicht eindeutig festgelegt ist. Ein Umklappen der Eigenmagnetisierung in die Gegenrichtung bei Einwirkung von Störmagnetfeldern kann durch Anlegen eines Magnetfeldes in Magnetstreifenrichtung (H_x) vermieden werden. Beträgt die Feldstärke mehr als 3 kA/m, ist unabhängig von der Vorgesichte die vollständige Ausrichtung der Eigenmagnetisierung gewährleistet. Kleine Ferritmagnete in der Nähe der Sensorelemente reichen zur Erzeugung derartiger Feldstärken aus.

Der Gesamtwiderstand der Brücke ändert sich mit dem Feld H_y solange die mittlere Stromflußrichtung in den MR-Streifen von 45° abweicht. Es gilt

$$R_B = R_0 - \frac{\Delta R}{2} (1 + \sin 2\delta \cdot (1 - 2 \sin^2 \varphi)) \quad (17)$$

Der Winkel φ ist wieder nach (5) zu bestimmen.

Für die charakteristischen Sensorparameter sind die Temperaturabhängigkeiten des MR-Schichtwiderstandes ($T_k(R_S) + 0,3\% \times K^{-1}$), der maximalen Widerstandsänderung ($T_k(\Delta R) - 0,1\% \times K^{-1}$) und der Feldkonstanten ($T_k(H_0) - 0,05\% \times K^{-1}$) von Bedeutung. Der größte Temperaturkoeffizient bei $H_x = 0$ ergibt sich für die Ausgangsspannung der MR-Sensorbrücke bei Konstanz der Betriebsspannung. Aus (10) kann man schlussfolgern:

$$T_k(U_a)_{U_B = \text{konst.}} = T_k(\Delta R) - T_k(R_S) - T_k(H_0) \quad (18)$$

Bei Konstantstrombetrieb des Sensors entfällt nach (13) der Wert von $T_k(R_S)$ und es ergibt sich der wesentlich günstigere Temperaturkoeffizient

$$T_k(U_a)_{I = \text{konst.}} = T_k(\Delta R) - T_k(H_0) \quad (19)$$

Bei Auftreten einer Offsetspannung am Sensor ist für diesen Fall jedoch deren Temperaturabhängigkeit zu beachten. Die Widerstandsänderung im Sensorelement beruht auf einer kohärenten Drehung der Magnetisierungsrichtung im gesamten Schichtstreifen. In deren Ablauf treten nur Verzögerungen im Nanosekundenbereich auf. Damit gibt es bis zu Frequenzen von mehr als 10 MHz keine Einsatzbeschränkungen.

Tafel. Kenndaten der MR-Sensoren

Gesamtwiderstand	$R_S = (1,6 \pm 0,6) \text{ k}\Omega$
Betriebsspannung	$U_B \geq 12 \text{ V}$
Steilheit bei $H = 3 \text{ kA/m}$	$S_U = 3 \pm 1 \text{ mV/V/kA/m}$
Ausgangsspannungshub, bezogen auf U_B	$\Delta U_a/U_B < 15 \text{ mV/V}$
Offsetspannung, bezogen auf U_B :	$U_{0ff}/U_B < 10 \text{ mV/V}$
Temperaturkoeffizient der Steilheit bei	
— Konstantspannungsbetrieb	$T_k \sim < 0,35\% \text{ K}^{-1}$
— Konstantstrombetrieb	$T_k i < 0,1\% \text{ K}^{-1}$
Linearitätsabweichung bei 28° von	$< 1\%$
Linearitätsabweichung bei 59° von ΔU_a	$< 5\%$
Temperatureinsatzbereich	$-40 \dots 125^\circ \text{C}$
Gehäuseform	SIL 4 oder DIL 6
Hysterese bei $H_x = 2 \text{ kA/m}$, bezogen auf Spannungshub	$\sim U_a/\Delta U_a < 0,03\%$

Zusammenfassung

Aufbau und Funktionsweise von magnetoresistiven Sensorelementen werden erläutert. Für die vom Standpunkt der Anwendung aus wichtigen Sensorparameter werden Beziehungen angegeben. Wie die Zusammenstellung der Kennwerte von Entwicklungsmustern zeigt, wird durch die magnetoresistiven Sensoren das Einsatzgebiet der Magnetfeldsensoren durch Erschließen des Bereiches von Nanotesla bis Millitesla wesentlich erweitert.

Literatur

- [1] LOREIT, U., PERTSCH, P., PORWOL, H., GEBHARDT, O.: Magnetoresistive Sensoren in der Meß- und Speichertechnik. rfe, Berlin 34(1985) 5, S. 310—319.
- [2] DIBBERN, U.: Magnetic field sensors using the magnetoresistive effect. Sensors and Actuators (1986) 10. 5. 127—140.
- [3] TUMANSKI, S., STABROWSKI, M.: The optimization and design of magnetoresistive barber-pole sensors. Sensors and Actuators (1985) 7, S. 285—295.
- [4] PÖCKER, A.: Dünne magnetische Schichten und ihre Anwendung in der Speichertechnik. Der Fernmelde-Ingenieur 18 (1964), 5. 1—32.

msr
8905