

# Magneto-resistive Sensoren in der Meß- und Speichertechnik

DipL-Phys UWE LOREIT,  
Dr.rer.nat. PETER PERTSCH,  
DipL-Phys. HORST PORWOL und  
Dr. rer. nat. OLAF GEBHARDT

Mitteilung der Friedrich-Schiller-Universität  
Jena und des Physikalisch-Technischen Institu-  
tes Jena der Akademie der Wissenschaften der  
DDR

Hauptanwendungsgebiet magneto-resistiver Sensoren ist die Messung schwacher magnetischer Felder und eine Vielzahl weiterer mit magnetischen Feldern gekoppelter Größen (Ströme, Leistungen, Längen, Frequenzen, Kräfte usw.). Sie werden daher zum Aufbau von empfindlichen Magnetometern für Gleich- und Wechselfelder, Positionsnachweis- und Längenmeßgeräten, Magnetköpfen für die Video-, Audio- und Rechentechnik, Bubble-speichern, Strom- und Leistungsmeßgeräten, Strom- und Leistungsvergleichsgeräten und Strom-

$$S = \frac{\Delta U}{U_k H_k} \quad (3)$$

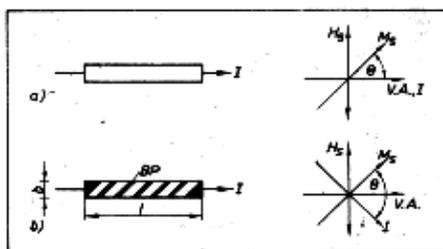
und Leistungskonvertern sowie linearen Multiplikatoren eingesetzt.

Ihre besonderen Vorteile sind eine hohe Empfindlichkeit für magnetische Felder, gute Miniaturisierungs- und Anpassungsfähigkeit, großer Arbeitstemperaturbereich, hohe Stabilität, nahezu völlige Frequenzunabhängigkeit und eine billige, rationelle Herstellung mit konventionellen Dünnschichttechnologien.

## Anisotroper magneto-resistiver Effekt in ferromagnetischen dünnen Schichten

Der anisotrope Magnetowiderstandseffekt ist eine Eigenschaft spezieller ferromagnetischer Materialien. Bereits 1857 von W. Thomson bei Untersuchungen an massiven Nickel-Eisen-Metallegierungen entdeckt, fand er jedoch erst mit der Entwicklung der Mikroelektronik und den damit verbundenen Verfahren der Dünnschichttechnologie breiteres wissenschaftliches Interesse. Ferromagnetische Materialien sind bei Temperaturen unterhalb des Curiepunktes  $T_c$  stets innerhalb makroskopischer Bereiche spontan bis zur Sättigung magnetisiert. Auf Grund dieser Eigenschaft ergeben sich hinsichtlich ihres galvanomagnetischen Verhaltens gegenüber dem bekannten Hall- und Magnetowiderstandseffekt in nichtmagnetischen Metallen und Halbleitern Besonderheiten, die sich in der Widerstandsanisotropie bzw. dem anomalen oder

Obwohl Sensoren auf der Basis des anisotropen Magnetowiderstandseffektes in ferromagnetischen dünnen Schichten erst seit einigen Jahren intensiver untersucht werden, sind sie heute bereits unentbehrlicher Bestandteil moderner Sensortechnik und werden zum Teil schon kommerziell auf dem internationalen Markt angeboten. Dieser Beitrag enthält neben einer kurzen Einführung in die Grundlagen magneto-resistiver Sensoren eine Zusammenstellung der wichtigsten Anwendungsmöglichkeiten und ausgewählte experimentelle Ergebnisse von realisierten Anordnungen.



**Bild 1: Magneto-resistive Streifenleiter. a) Meßstromrichtung parallel zur Vorzugsachse; b) Meßstromrichtung und Vorzugsachse bilden einen Winkel von  $45^\circ$  (V.A. — Vorzugsachse, I — Meßstrom, H — Signalfeld,  $M_s$  — Magnetisierung, BP — Barber-pole)**

planaren Hall-Effekt äußern. Der elektrische Widerstand hängt im Ferromagnetika vom Winkel  $\Theta$ , den die spontane Magnetisierung  $M_s$  und die Meßstromrichtung I miteinander einschließen.

Der an isotrope Magnetowiderstandseffekt ist somit ein Orientierungseffekt, bei dem für die Änderung des spezifischen Widerstandes  $\Delta\rho = \rho - \rho_\perp$  ( $\rho_\perp$  = spezifischer Widerstand bei orthogonaler Orientierung, d. h.  $M_s \perp I$ ) im Falle magnetisch gesättigter polykristalliner Proben gilt

$$\Delta\rho = \Delta\rho_{\max} \cos^2\Theta \quad (1)$$

Dabei ist  $\Delta\rho_{\max} = \rho_{\parallel} - \rho_{\perp}$  ( $\rho_{\parallel}$  = spezifischer Widerstand für  $M_s \parallel I$ ) der materialabhängige Maximalwert der Änderung. Die relative Änderung  $\Delta\rho_{\max}/\rho_{\perp}$ , auch anisotropes Magnetowiderstandsverhältnis genannt, erreicht bei Raumtemperatur in den für Anwendungen bevorzugten NiFeCo-Legierungen Werte bis zu etwa 5%

Dünne ferromagnetische Schichten besitzen gegenüber massivem Material eine Reihe besonderer physikalischer Eigenschaften, die sich vorteilhaft hinsichtlich einer technischen Nutzung des magneto-resistiven Effektes erweisen. Die Herstellung dieser Schichten kann so erfolgen,

daß sie eine magnetische Einbereichsstruktur mit definierter Vorzugsachse der Magnetisierung  $M_s$  besitzen. Eine besonders vorteilhafte Eigenschaft dünner Einbereichsschichten ist, daß Magnetisierungsänderungen vorzugsweise durch eine reversibel verlaufende Rotation der Magnetisierung erfolgen und Hystereseeffekte weitgehend unterdrückt werden.

Im Bild 1 sind zwei streifenförmige magneto-resistive Elemente aus einachsigen magnetischen Schichten dargestellt, die von einem konstanten Meßstrom I durchflossen werden. Ohne Einwirkung äußerer magnetischer Felder sind diese Elemente parallel zur magnetischen Vorzugsachse magnetisiert, die parallel zur Längsachse der Meßstreifen orientiert ist.

Wird ein magnetisches Signalfeld  $H_s$  in die empfindliche Achse, d. h. in der Schichtebene senkrecht zum magneto-resistiven Meßstreifen, gelegt, dreht sich die Magnetisierung entsprechend der Stärke des wirkenden Drehmomentes in Feldrichtung, und der elektrische Widerstand ändert sich nach Gl. (1). Das zur Sättigung parallel zur Feldrichtung benötigte Magnetfeld  $H_0$  ergibt sich dabei aus der Anisotropiefeldstärke  $H_k$ , die die magnetischen Eigenschaften des Materials charakterisiert, und einem von den geometrischen Abmessungen Schichtdicke d und Breite b der Streifenleiter abhängigen Anteil zu

$$H_0 = H_k + \frac{d}{b} M_s \quad (2)$$

Mit typischen Werten von  $H_k = 3 \cdot 10^5 \text{ Am}^{-1}$ ,  $M_s = 8 \cdot 10^5 \text{ Am}^{-1}$  und  $d/b = 0..0,1$  werden Sättigungsfelder im Bereich von  $3 \cdot 10^2 \text{ Am}^{-1}$  bis etwa  $10^5 \text{ Am}^{-1}$  (bzw. äußere Sättigungsinduktionen  $B_0$  im Bereich von etwa  $5 \cdot 10^{-4}..10^{-1} \text{ T}$ ) erhalten.

Im Bild 2 sind oszillografische Kennlinien der im Bild 1 enthaltenen Elemente dargestellt. Es ergibt sich eine glockenkurvenförmige Kennlinie mit geringer Widerstands-

änderung für schwache Felder, wenn Meßstrom und Magnetisierung im Ausgangszustand parallel gerichtet sind. Wird hingegen die Meßstromrichtung aus der Längsachse herausgedreht und in einen Winkel von etwa 45° zur Anfangsmagnetisierungsrichtung gebracht, ergibt sich eine für schwache Felder linearisierte Kennlinie mit Extrema (Linearitätsgrenze) bei  $H_G = 0,6 H_0$ . Die Auslenkung der Meßstromrichtung erfolgte in diesem Fall durch auf die Magnetschichten aufgebrauchte, hochleitfähige Aquipotentialflächen, die unter dem Begriff Barberpole bekannt sind. Neben dieser Methode zur Linearisierung magneto-resistiver Elemente existieren weitere Möglichkeiten, z. B. die Anwendung vormagnetisierender Felder, der Einsatz magnetostatisch gekoppelter Schichten, schräg gelegte Anisotropieachsen usw. Die Wahl dieser Varianten hängt dann von den speziellen Einsatzbedingungen der Meßstreifen ab.

Die Empfindlichkeit  $S$  der Meßstreifen im linearisierten Bereich wird zweckmäßig als Verhältnis von Signalspannung  $\Delta U$  zur Klemmspannung  $U_K$  an den Enden der Meßstreifen und der Signalfeldstärke  $H_S$  mit

$$S = \Delta U / U_K \cdot H_S$$

angegeben.  $S$  ist also umgekehrt proportional zu  $H_G$

Empfindlichste Sensoren können daher mit  $H_G = 200 \text{ Am}^{-1}$  und  $\Delta U/U_K = 1\%$  Werte von  $S = 50 \text{ mV/V kAm}^{-1}$  erreichen.

Auf Grund stets vorhandener Inhomogenitäten der Magnetisierung der Meßstreifen ergeben sich vollständig hysteresefreie Kennlinien wie im Bild 2 jedoch nur, wenn durch ein schwaches Zusatzfeld parallel zur Vorzugsachse  $V.A.$  eine Ausrichtung der Magnetisierung erfolgt. Dies ist z. B. über einen Permanentmagneten, magnetische Hilfsschichten oder im einfachsten Fall durch das Magnetfeld des Meßstromes leicht zu erzeugen. Derartige Zusatzfelder bewirken eine Ausdehnung des Linearitätsbereiches und eine damit verbundene Absenkung der Empfindlichkeit, erhöhen die magnetische Stabilität jedoch wesentlich.

### Signalhöhe, Rauschen, Drift und Frequenzbereich

Das an den Enden der Meßstreifen verfügbare Signal  $\Delta U$  ergibt sich im Falle konstanter Stromspeisung zu

$$\Delta U = j l \Delta \rho(H_S) \quad (4)$$

wobei  $j$  die Meßstromdichte,  $l$  die Streifenlänge und  $\Delta \rho(H_S)$  die erreichte Änderung im spezifischen Widerstand bezeichnen. Thermische Aufheizung und Elektromigration begrenzen  $j$ , wobei im Falle schmaler Streifen auf gut wärmeleitfähigen Substraten Werte bis  $j=10^{11} \text{ Am}^{-2}$  erreicht werden. Mit einem typischen Wert  $\Delta \rho_{\text{max}} = 5 \cdot 10^{-9} \Omega \text{m}$  beträgt die maximale, je Längeneinheit eingesetzten Meßstreifens erzielte Signalspannung damit  $\Delta U/l = 5 \cdot 10^2 \text{ V/m}$ . Die untere Nachweisgrenze wird durch das Rauschen der Meßstreifen festgelegt. Da ein Barkhausenrauschen infolge der reversiblen Ummagnetisierbarkeit durch Rotation fast völlig unterdrückt werden kann, verhält sich der Meßstreifen wie ein belasteter Metallschichtwiderstand. Dessen Rauschspektrum setzt sich

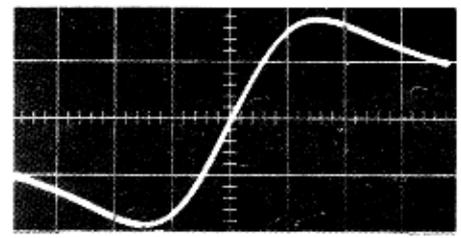
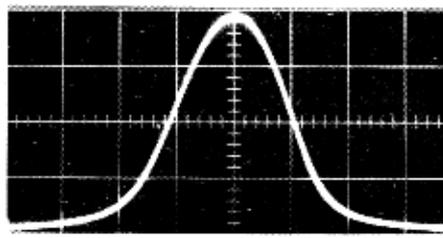


Bild 2: Oszillografische Kennlinien der Elemente im Bild 1. a) Element im Bild 1a; b) Element im Bild 1b [vertikal:  $0,5 \text{ mV/cm}$  ( $\Delta U$ ); horizontal:  $400 \text{ Am}^{-1}/\text{cm}$  ( $H_S$ ); Signalfrequenz:  $f_s = 50 \text{ Hz}$ ]

aus dem frequenzunabhängigen Nyquist-Rauschen des Widerstandes und einem dem Meßstrom proportionalen  $1/f$ -Apteil zusammen, der das Signal-Rauschverhältnis bei niedrigen Frequenzen unabhängig von der Größe des Meßstromes begrenzt.

Infolge des relativ hohen Temperaturkoeffizienten von etwa  $0,25 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  des magneto-resistiven Materials können sich für Anwendungen der Meßstreifen bei niedrigen Frequenzen Störungen durch thermische Drift des Widerstandes nachteilig auswirken. Für praktische Anwendungen magneto-resistiver Sensoren kommen daher vorrangig Wheatstone-Brückenschaltungen mit zwei oder vier magneto-resistiven Meßstreifen zum Einsatz. Bei diesen ist aus Symmetriegründen eine nahezu vollständige Kompensation der Temperaturkoeffizienten der Einzelelemente gegeben. Durch geeignete Linearisierung kann eine für benachbarte Brückenelemente gegensätzliche Widerstandsänderung im Feld  $H_S$  erzielt werden, so daß infolge der Verstimmung der für  $H_S=0$  abgeglichenen Brücke ein offsetspannungsfreies Signal  $U$  abgegriffen werden kann.

Bedingt durch die günstigen Eigenschaften der einachsigen Magnetschichten, sind die magneto-resistiven Meßstreifen für die Messung von Gleich- und Wechselfeldern bis zu einigen 100 MHz prinzipiell einsatzfähig. Probleme können sich bei höheren Feldern durch induktive und kapazitive Einkopplungen in die Meßanordnung ergeben. Dies würde dann entsprechende Maßnahmen wie einen symmetrischen Aufbau, Abschirmungen, Abblocken usw. erforderlich machen.

### Herstellungstechnologie

Einachsige magneto-resistive Schichten im bevorzugten Dickenbereich von 20...100 nm können durch Aufdampfen oder Zerstäuben (Sputtern) hergestellt werden. Ein während der Beschichtung parallel zur Trägeroberfläche angelegtes magnetisches Feld bewirkt eine vorgegebene, einheitliche Orientierung der magnetischen Vorzugsachse in der Schicht. Die verwendeten Träger sollen eine geringe

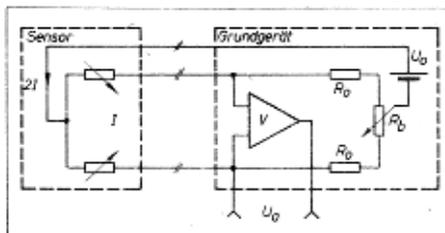


Bild 3: Schematischer Aufbau des erprobten Magnetometers ( $U_0 =$  Betriebsspannung,  $R_0 =$  Brückenwiderstand,  $R_1 =$  Abgleichwiderstand,  $V =$  Meßverstärker)

Oberflächenrauigkeit, hohe Wärmeleitfähigkeit, gute elektrische Isolationsfähigkeit und gegebenenfalls eine hohe mechanische Härte aufweisen. Verwendet werden daher oxidiertes und undotiertes Silizium, Saphir, Berylliumoxidkeramik, Glas oder auch magnetische Materialien wie z. B. Ferrite. Die magneto-resistive Legierung soll eine geringe Eigenmagnetostraktion und Kristallanisotropie bei hohem magneto-resistiven Effekt besitzen. Besonders geeignet sind NiFe-Co-Legierungen (bevorzugtes binäres Material 81Ni19Fe).

Voraussetzungen für einen hohen magneto-resistiven Effekt und geeignete magnetische Eigenschaften der Schichten sind u. a. ausreichend gute Vakuumbedingungen und hohe Reinheit der Ausgangsmaterialien für die Beschichtung. Ebenso erweist sich eine unmittelbar während des Herstellungsprozesses aufgebrauchte Oxidationsschutzschicht als zweckmäßig. Dafür sind besonders dünne metallische oder halbleitende Schichten (z. B. Titan, Silizium) geeignet. Die Herstellung von Zuleitungen und Hilfsstrukturen wie z. B. der Barber Pole erfolgt mit den bekannten Verfahren der Dünnschichttechnologie.

### Anwendungen

#### Messung magnetischer Felder

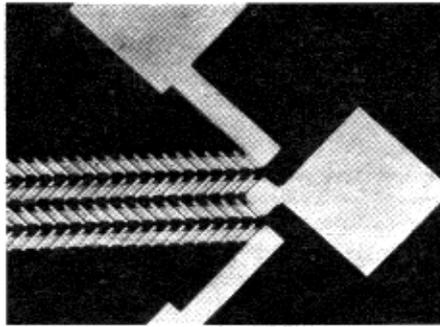
##### Direktverfahren

Eine Wheatstone-Brückenschaltung mit zwei oder vier linearisierten magneto-resistiven Elementen kann als hochempfindlicher Sensor eines Vektormagnetometers Anwendung finden. Diese Magnetometer ermöglichen eine schnelle und einfache Messung magnetischer Gleich- und Wechselfelder im Bereich von etwa 100nT...0,1T. Sie sind damit in der Lage, das magnetische Erdfeld ( $B = 50 \mu\text{T}$ ), dessen Richtung und dessen Änderungen zu messen. Erdfeldvariationen können z. B. durch Anomalien im Erdinneren verursacht sein.

Im Bild 3 ist der Aufbau eines erprobten Magnetometers schematisch dargestellt. Es besteht aus einem auswechselbaren Sensorteil mit zwei linearisierten magneto-resistiven Elementen, der über ein Verbindungskabel an einen Versorgungsteil (Grundgerät) mit dem Meßverstärker gekoppelt ist. Die erforderliche gegensätzliche Änderung der Brückenelemente bei Aussteuerung wird durch senkrecht zueinander orientierte Stromflußachsen der magneto-resistiven Elemente bewirkt. Der Widerstandswert  $R$  der Sensorelemente wird durch die gewünschte Empfindlichkeit  $S$  und die eingesetzte Fläche bestimmt, wobei i. allg. eine mäanderförmige Anordnung

der Streifenleiter erfolgt. Zweckmäßige Werte von R liegen im Bereich von etwa 100 Ω...10 kΩ (Anpassung an die Folgeelektronik, Energieverbrauch).

Ein an der Friedrich-Schiller-Universität gefertigter Sensor mit vier zu einer Wheatstone-Brücke zusammengeschalteten Meßstreifen ist im Bild 4 dargestellt. Seine Gesamtfläche beträgt etwa 1 mm<sup>2</sup>, die Empfindlichkeit S = 4 mV/kAm. Mit ähnlich aufgebauten, hochempfindlichen und relativ großflächigen Sensoren (Sensorfläche etwa 1 cm<sup>2</sup>) konnten im Grenzfall noch statische Felder mit Flußdichten von B < 1 nT unter Verwendung extrem rausch- und driftarmer Meßverstärker nachgewiesen werden. Die untere Nachweisgrenze für magnetische Felder wird jedoch von den Eigenschaften des Meßverstärkers bestimmt.

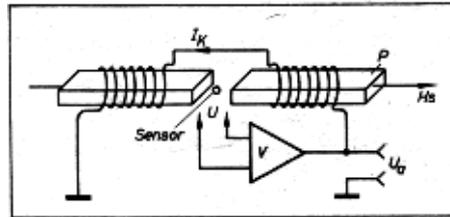


**Bild 4:** Abschnitt eines in Dünnschichttechnik gefertigten Sensors: die Breite der Meßstreifen beträgt  $b = 10 \mu\text{m}$ , die Barberpole bestehen aus einer  $0,2 \mu\text{m}$  dicken Platinschicht

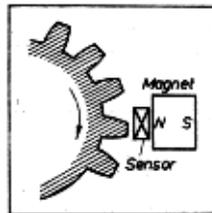
#### Kompensationsverfahren

Eine exakte Bestimmung magnetischer Gleich- und Wechselfelder im Bereich von etwa 1 nT...1 T kann durch Anwendung des Kompensationsprinzips ermöglicht werden. Der magneto-resistive Sensor befindet sich dabei während der Messung in einer Miniaturspule oder im Spalt eines stabförmigen Flußkonzentrators aus hochpermeablem Material, der mit einer Kompensationsspule versehen ist und als hochempfindlicher Nulldetektor arbeitet. Damit ergibt sich eine im gesamten Meßbereich linearisierte Kennlinie, und das Ergebnissignal ist von der jeweiligen Empfindlichkeit des Sensors weitgehend unabhängig. Durch die feldverstärkende Wirkung eines Flußkonzentrators kann abhängig von dessen Dimensionierung eine etwa 10- bis 150-fach höhere Empfindlichkeit erzielt und die untere Nachweisgrenze entsprechend abgesenkt werden.

Im Bild 5 ist der Aufbau einer nach dem Kompensationsprinzip arbeitenden Anordnung schematisch dargestellt.



**Bild 5:** Schematischer Aufbau einer nach dem Kompensationsprinzip arbeitenden Anordnung ( $H_s$  = Signalfeld,  $I_k$  = Kompensationsstrom,  $U$  = Brückenspannung,  $P$  = Permalloy-Flußkonzentrator)



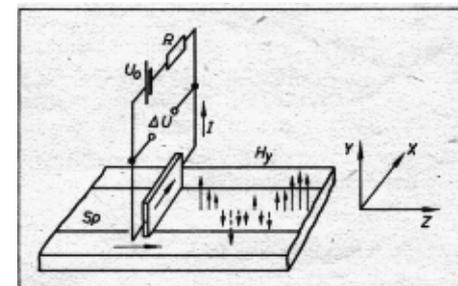
**Bild 6:** Anordnung zur Durchführung einer Positionsbestimmung. Der Sensor mißt Feldänderungen beim Durchgang der Weichmagnete

#### Meßwandler zur Positionskontrolle.

Durch Kombination eines magneto-resistiven Sensors mit einem kleinen Permanentmagneten (das auf der magnetischen Schicht senkrecht stehende Magnetfeld steuert den Sensor nicht aus) kann eine Störung des Feldes des Permanentmagneten über eine Aussteuerung des Sensors nachgewiesen werden. Anwendungsmöglichkeiten derartigen Anordnungen wären z. B. kontaktlose Schalten, Sensoren zur kontaktlosen Drehzahlmessung rotierender Teile und Sensoren zur Steuerung einer kontaktlosen Zündanlage für Kraftfahrzeuge. Da für derartige Anwendungen relativ unempfindliche Sensoren benötigt werden, ist ein hoher Miniaturisierungsgrad mit entsprechend niedrigen Herstellungskosten möglich. Im Bild 6 ist der schematische Aufbau einer Anordnung zur Positionskontrolle dargestellt.

#### Meßwandler für die magnetische Speichertechnik

Magneto-resistive Sensoren haben sowohl in der magnetomotorischen Festplatten-, Floppy-Disk- und Magnetbandspeichertechnik als auch bei Bubblespeichern eine exponierte Stellung als Wiedergabeelemente für analoge und digitale Signale erhalten. Ihre besonderen Vorzüge resultieren



**Bild 7:** Prinzip der Arbeitsweise eines magneto-resistiven Lesekopfes ( $S_p$  = magnetisierte Spur des Speichermediums,  $AU$  = Ergebnisspannung,  $R$  = Vorwiderstand,  $H_z$  = Komponente des magnetischen Streufeldes, die gemessen wird, induktive Wiedergabeköpfe messen deren zeitliche Änderung  $dH_z/dt$ )  
cheisenzähne und ermöglicht so die Bestimmung von Drehzahl und Drehwinkel

aus dem von der Relativgeschwindigkeit zwischen Wiedergabeelement und gespeicherter Information unabhängigen und relativ hohen Ergebnissignal (bis 200 µV je Mikrometer Länge des eingesetzten Meßstreifens). Auf Grund dieser Eigenschaften können sie auch zum Auslesen statischer magnetischer Datenträger wie Kreditkarten, Preisstreifen u. ä. eingesetzt werden.

Hauptanwendungsgebiet magneto-resistiver Sensoren in der Speichertechnik werden jedoch magnetomotorische Datenträger mit

hoher Speicherdichte sein. Da eine hohe Integrationsdichte der Meßstreifen möglich ist, bietet sich in erster Linie ihr Einsatz in Vielspur-Magnetköpfen für PCM-Audiorecorder und ähnlichen Geräten an.

Im Bild 7 ist das Prinzip des magneto-resistiven Wiedergabeverfahrens für ein Magnetband schematisch dargestellt. Das magneto-resistive Element in Form eines vertikal zur magnetischen Spur angeordneten Streifenleiters hat die Aufgabe, den Wechsel des magnetischen Flusses zu erfassen, wobei das senkrecht aus dem Speichermedium austretende Streufeld  $H_y$  gemessen wird. Da  $H_y$  in erster Näherung exponentiell mit dem vertikalen Abstand von der Spur und der Wellenzahl der aufgezeichneten Information absinkt

$$H_y \sim \exp(-ky), \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

( $\lambda$  = Wellenlänge der aufgezeichneten Information, entspricht dem doppelten Flußwechselabstand bei digitaler Aufzeichnung), ist die wirksame Breite des magneto-resistiven Meßstreifens beschränkt. Bei hohen linearen Speicherdichten ( $\lambda$  sehr klein) beträgt die wirksame Breite nur wenige Mikrometer oder gar Bruchteile eines Mikrometers. Die reale Breite der magneto-resistiven Meßstreifen kann jedoch aus technischen Gründen nicht wesentlich unter etwa 5 µm verringert werden, so daß die Auflösungsfähigkeit des magneto-resistiven Sensors im Falle hoher Speicherdichten durch zusätzliche Maßnahmen erhöht werden muß. Eine Möglichkeit besteht darin, hochpermeable Flußführungsstrukturen (Schirmplättchen bzw. ein Magnetjoch) in Dünnschichttechnik anzukoppeln. Die Wiedergabe-Wellencharakteristik entspricht in diesen Fällen der äquivalenter induktiver Dünnschicht-Magnetköpfe.

Unter Verwendung magneto-resistiver Wiedergabeelemente können extrem hohe lineare Speicherdichten bis etwa 5000 Flußwechsel je mm bei Spurbreiten von etwa 10 µm realisiert werden. Die verarbeitbaren Signalfrequenzen liegen im Bereich von 0 Hz bis etwa 100 MHz, so daß auch hinsichtlich der Datenrate beträchtliche Vorteile gegenüber konventionellen Techniken zu erwarten sind.

Im Bild 8 ist ein an der Friedrich-Schiller-Universität gefertigter Magnetkopf mit mehreren magneto-resistiven Lesestreifen dargestellt. Dieser Magnetkopf ist für experimentelle Untersuchungen zur Speicherfähigkeit von Bändern, Floppys und Festplatten geeignet.

#### Meßwandler für elektrische Ströme und Leistungen

Messung elektrischer Ströme Für eine Vielzahl elektronischer Aufgaben werden Bauelemente benötigt, die es ermöglichen, Gleich- und Wechselströme verlust- und rückwirkungsfrei zu messen oder die Eingangsleitungen elektrischer Registriergeräte galvanisch vom Meßobjekt zu trennen. Magneto-resistive Sensoren können auf Grund ihrer hohen Empfindlichkeit das von stromführenden Leiterzügen erzeugte Magnetfeld direkt messen und ermöglichen so eine Messung des Stromflusses. Ebenso kann die Strommessung entsprechend dem Durchflutungsgesetz durch Messung der magnetischen Randspannung einer vom Strom durchfluteten Fläche vorgenommen



Bild 8: Abschnitt eines in Dünnschichttechnik gefertigten magnetoresistiven Wiedergabe-Magnetkopfes. Die magnetoresistiven Meßstreifen werden durch ein Präzisions-Schleifverfahren an der Substratkante in ihre endgültige Form gebracht. Der höher sitzende Meßstreifen hat die Aufgabe, aufgenommene Störsignale zu kompensieren

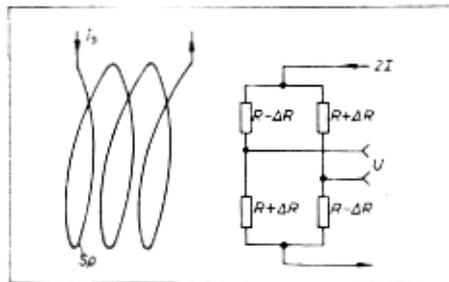


Bild 9: Prinzip der Strommessung durch Bestimmen der vom Stromfluß hervorgerufenen magnetischen Feldstärke ( $I_s$  — Steuerstrom,  $R$  — Widerstand der magnetoresistiven Meßstreifen,  $U$  — Differenzergebnisspannung)

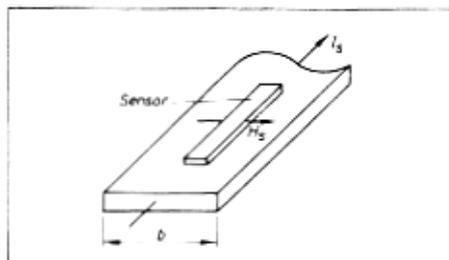


Bild 10: Messung der magnetischen Feldstärke an der Oberfläche eines Bandleiters ( $H_s$  — Signalfeld,  $b$  — Breite des Bandleiters)

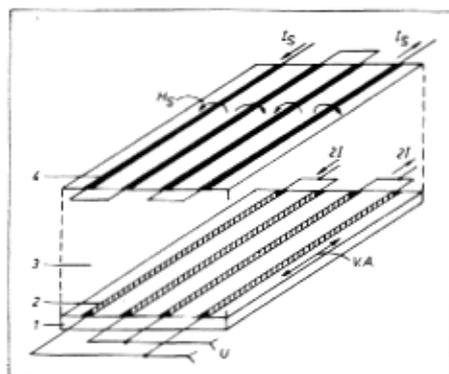


Bild 11: Magnetoresistives Feldeffektbauelement (1 Träger, 2 magnetoresistive Streifenleiter, 3 Isolationschicht, 4 Steuerleiter)

werden, wobei die Meßwerte unabhängig von der konkreten Geometrie des stromführenden Leiters sind.

Im Bild 9 ist das Prinzip der Strommessung durch direkte Bestimmung der vom Stromfluß erzeugten magnetischen Feldstärke schematisch dargestellt. Fließt durch die Feldspule ein Steuerstrom  $I_s$ , entsteht eine zu  $I_s$  proportionale Differenzspannung am Brückenausgang des Sensors.

Für das magnetische Feld an der Oberfläche eines Bandleiters nach Bild 10 gilt näherungsweise  $H_s = I_s/2b$  ( $b$  = Breite des Bandleiters), so daß  $L$  berechnet werden kann. Anordnungen dieser Form können daher z. B. als Einbauteil in Stromschienen, als Tastschleife zur Prüfung des Stromflusses in gedruckten Schaltungen oder auch zur Messung von HF-Strömen Anwendung finden.

Werden ein oder mehrere bandförmige Leiter entsprechend Bild 11 integriert, entsteht ein vielseitig einsetzbares Feldeffektbauelement. Seine Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich als Stromsensor, Impedanzwandler und Magnetokoppler für Trennverstärker. Mit einem experimentell erprobten Bauelement dieser Art konnten Stromempfindlichkeiten  $S_I = \Delta U/\Delta I_s$  von etwa 1 mV/mA bei Isolationsdurchbruch-Spannungsfestigkeiten von größer 1 kV realisiert werden. Im Bild 12 sind oszillografisch aufgezeichnete Kennlinien des getesteten Elementes dargestellt. Die Abweichungen vom linearen Verlauf blieben im dargestellten Bereich kleiner als 1%.

Das Prinzip der Strommessung durch Messen der magnetischen Randspannung entsprechend  $\int H dr = nI_s$  (Durchflutung der umrandeten Fläche,  $n$  = Windungszahl des Steuerleiters) ist im Bild 13 dargestellt. Zur Messung der Durchflutung ist es erforderlich, daß entweder eine Vielzahl magnetoresistiver Sensorelemente das stromführende System umschließen, oder die Umschließungskurve wird von einem hochpermeablen Ringkern gebildet, in dessen Spalt sich der magnetoresistive Sensor befindet. Mit derartigen, als Stromzange verwendbaren Anordnungen können Gleich- und Wechselströme mit Stärken von einigen  $\mu A$  bis zu einigen A ohne Unterbrechung des Leitungssystems verlust- und rückwirkungsfrei gemessen werden. Bei Verwendung eines Ringkerns ist die obere Grenzfrequenz durch die Eigenschaften des Kernmaterials bestimmt. Für Hochfrequenzmessungen ist es daher erforderlich, spezielle HF-Ferritwerkstoffe zu verwenden.

#### Messung elektrischer Leistungen

Da das Ergebnissignal eines linearisierten magnetoresistiven Sensors proportional zum Betriebsstrom  $I$  und zum Steuerstrom  $I_s$  ist, eignen sich Stromsensoren grundsätzlich als lineare Multiplikatoren. An einer magnetoresistiven Brückenordnung ergibt sich die Differenzspannung mit dem Proportionalitätsfaktor  $k$  zu

Im Bild 14 wird die multiplikative Funktion eines integrierten Feldeffektsensors demonstriert. Außer der Anwendung in Rechen-schaltungen kann mit Hilfe derartiger Sensoren die Leistungsaufnahme elektrischer Geräte ohne

$$U = k I I_s \quad (5)$$

zusätzliche Betriebsspannung gemessen werden. Sie können ebenso als phasenempfindliche Detektoren fungieren. Gegenüber herkömmlichen Meßsystemen können auf Grund des einfachen Aufbaus, der kleinen geometrischen Dimensionen und des relativ kleinen Meßfehlers erhebliche Vorteile erzielt werden.

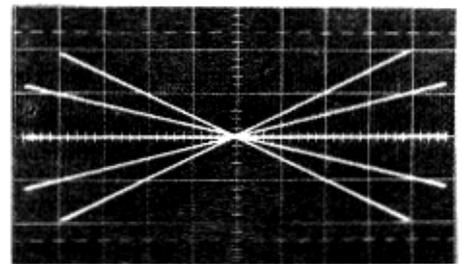


Bild 12: Steuerkennlinien eines getesteten Feldeffektbauelementes [vertikal: 20 mV/cm ( $U$ ); horizontal: 20 mA/cm ( $I_s$ );  $I = \pm 0, \pm 4, \pm 8$  mA; Signalfrequenz:  $f_s = 1$  kHz]

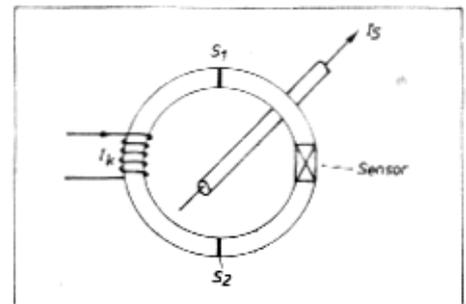


Bild 13: Prinzip der Strommessung durch Messen der magnetischen Randspannung. Der Sensor befindet sich im Spalt eines hochpermeablen Ferritringes, der sich an den Stellen der Hilfsspalte  $S_1$  und  $S_2$  öffnen läßt. Eine Linearisierung und Meßbereichserweiterung ist durch eine Kompensations-spule möglich

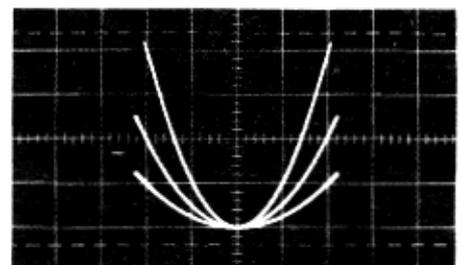


Bild 14: Demonstration der multiplikativen Wirkung (Quadratur) eines magnetoresistiven Feldeffekt-Sensors nach Bild 11 [vertikal: 20 mV/cm ( $U$ ); horizontal: 7,5 mA/cm ( $I$ );  $I_s = 11,7 \mu A/cm; 23,4 \mu A/cm; 46,8 \mu A/cm$ ; Signalfrequenz:  $f_s = 1$  kHz]

#### Zusammenfassung

Magnetoresistive Sensoren sind hochempfindliche Bauelemente zur Messung magnetischer Felder und mit magnetischen Feldern gekoppelter Größen.

Sie können als integrierte Bauelemente mit Methoden der Dünnschichttechnik rationell gefertigt werden und sind weitgehend miniaturisierungsfähig. Auf Grund ihres einfachen Aufbaus, der kleinen Abmessungen und der hohen Meßgenauigkeit sowie der preisgünstigen Herstellung besitzen magnetoresistive Sensoren ein breites Anwendungsspektrum in der Meß- und Speichertechnik.

#### Literatur

- [1] Dibbern, U.: Magnetoresistive Sensoren und ihre Anwendung. Industrie elektrisch-elektronik, Heidelberg 28 (1983) 6, S. 36—38
- [2] Gebhardt, O.: Thesis. Jena: Friedrich-SchillerUniversität 1982
- [3] Richter, W.; Gebhardt, O.: DD-WP 155 220. Magnetoresistives Feldeffektbauelement.
- [4] Gebhardt, O.; Richter, W.: A Magnetoresistive Permalloy Magnetic Field Sensor. Experimentelle Technik der Physik. Berlin 30 (1982) 4, S.363—367