

# GRUNDLAGEN MAGNETORESISTIVER SENSOREN

F. Dettmann, U. Loreit

Institut für Mikrostrukturtechnologie und Optoelektronik, Im Amtmann 6, 6330 Wetzlar-Blankenfeld

## 1. Einleitung

Zur Einordnung des Einsatzbereiches der Magnetfeldsensoren auf der Basis des anisotropen magnetoresistiven Effektes sind in Bild 1 die vorkommenden Magnetfelder und von den bekannten Magnetfeldmeßelementen die Meßgrenzen von SQUIDS und Hallsensoren dargestellt. Diese Meßelemente haben mit den magnetoresistiven Sensoren gemeinsam, daß sie auf Festkörpereffekten beruhen und daß sie weitestgehend mikrominiaturisiert und so auch in komplexe Dünnschichtanordnungen integriert werden können. Die höchstempfindlichen SQUID-Elemente nutzen die nur bei Supraleitern auftretenden Josephson-Effekte und die Flußquantisierung und müssen zum Erreichen ihrer vollen Magnetfeldauflösung mit flüssigem Helium gekühlt werden. Aus diesem Grunde und wegen ihrer außerordentlich hohen Magnetfeldempfindlichkeit, die sich in einer normalen technischen Umgebung wegen der erforderlichen Magnetfeldabschirmung möglicherweise als Nachteil erweist, ist ein allgemeiner technischer Einsatz der SQUIDS nicht zu erwarten. Hallelemente haben sich ein beträchtliches, noch in stetiger Entwicklung begriffenes Einsatzfeld erobert. Die Lücken, die sich aus der für manche Anwendungen zu geringen Magnetfeldempfindlichkeit und aus den Begrenzungen des Temperatureinsatzbereiches ergeben, könnten durch magnetoresistive Sensoren geschlossen werden.

Der Hoffnung, daß alle noch offenen Probleme der Magnetfeldmessung und ihrer speziellen Anwendungen mit "dem" magnetoresistiven Sensor, das heißt einer einzigen Elementanordnung gelöst werden könnten, muß hier jedoch ausdrücklich von vornherein widersprochen werden. Auf dem Gebiet der elementaren Hallsensoren werden z. B. von Siemens 21 unterschiedliche Typen und von F. W. Beil 27. Typen angeboten, die jeweils spezielle

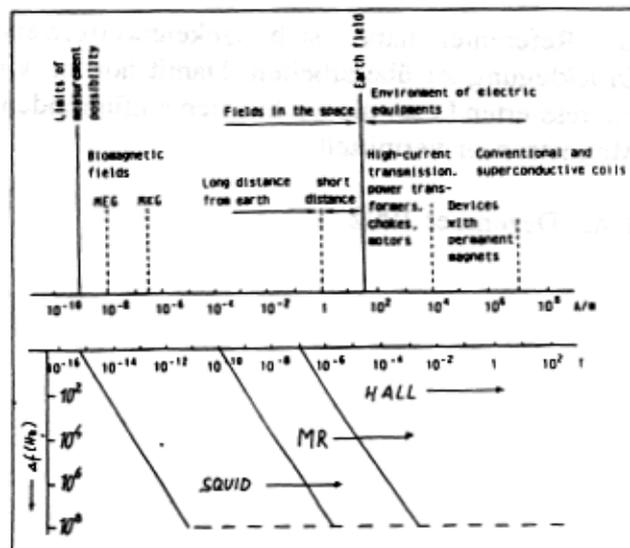


Bild 1: Magnetfelder /1/ und Einsatzgrenzen von Sensoren bei unterschiedlicher Bandbreite

Anforderungen erfüllen. Die mannigfaltigen Einsatzfälle der magnetoresistiven Sensoren werden ein ähnliches Spektrum erfordern.

2. Anisotroper magnetoresistiver Effekt Der anisotrope magnetoresistive Effekt tritt in ferromagnetischen Materialien auf, die eine eigene Magnetisierung aufweisen. Ihr Widerstand ist abhängig vom Winkel (3 zwischen der Magnetisierungsrichtung und der Stromrichtung ( Bild 2 ). Die Abhängigkeit ist gegeben durch

$$R = R_0 - \Delta R \sim \sin^2(\theta) \quad (1)$$

Bei Parallelität zwischen Strom- und Magnetisierungsrichtung tritt der maximale Widerstand  $R_0$  auf. Bei einem Winkel von  $90^\circ$  zwischen Strom- und Magnetisierungsrichtung ist der minimal mögliche Widerstand  $R_0 - \Delta R$  erreicht. Wird der Winkel weiter vergrößert, nimmt der Widerstand wieder zu. Bezüglich des Winkels ist der Widerstand eine periodische Funktion. Die Anwendung des magnetoresistiven Effektes erscheint nur in Dünnschichtstrukturen möglich, da nur mit ihnen auf einer begrenzten Chipfläche ein Widerstandswert realisiert werden kann, dessen Änderungen mit der Genauigkeit und Auflösung meßbar sind, wie sie von einem Sensorelement erwartet werden können. Üblicherweise wird mit Schichtdicken unter 50 nm gearbeitet. Die Schichtstreifenbreiten liegen im Bereich von 10  $\mu\text{m}$ . Mit solchen Abmessungen ist es möglich, Widerstände von einigen  $\text{k}\Omega$  auf einer Fläche von etwa  $1 \text{ mm}^2$  unterzubringen. Bei der Herstellung der Schicht wird ein gerichtetes Magnetfeld angelegt. Dieses bestimmt die Richtung der Magnetisierung der Schicht als ganzes, wenn keine äußeren Felder auf sie einwirken. Bei der Strukturierung der Schichtstreifen muß darauf geachtet werden, daß deren Längsrichtung mit der der eingepprägten Magnetisierung übereinstimmt. Ein Maß für die

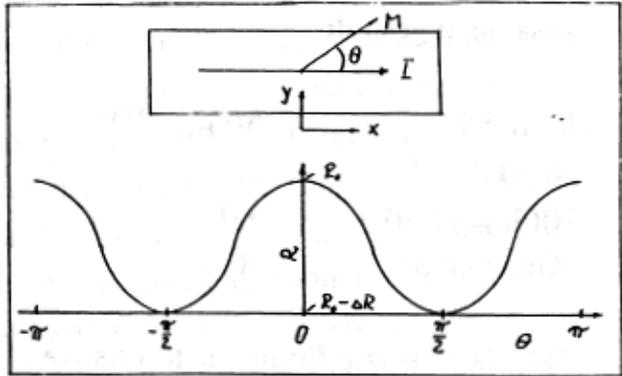


Bild 2: Geometrische Lage und Widerstand eines magnetoresistiven Schichtstreifens

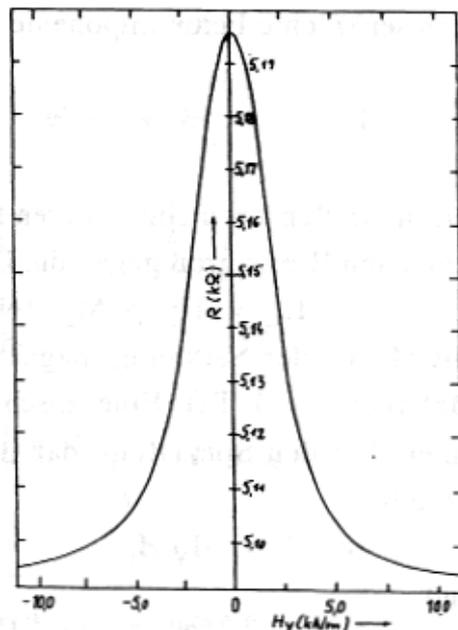
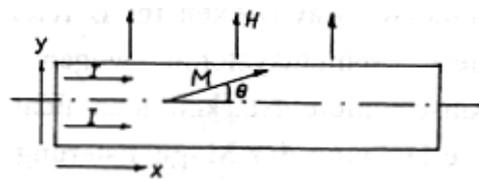


Bild 3: Geometrische Lage und Widerstand eines MR-Streifens in Abhängigkeit vom Magnetfeld (Breite:  $3 \mu\text{m}$ , Dicke:  $30 \text{ nm}$ )

Drehbarkeit der Richtung der Magnetisierung, die bei der Herstellung eingeprägt wurde, ist die Anisotropiefeldstärke  $H_k$ .

Die relative Änderung des Widerstandes bei Drehung der Magnetisierung um  $90^\circ$  und die Anisotropiefeldstärke für einige Materialien wurden in Tabelle 1 zusammengestellt.

Material	$\Delta\rho/\rho_0$ 100	$H_k$ (kA/m)	Schichtdicke
Ni(81)Fe(19)	2,5	0,15	> 100 nm
Ni(76)Co(24)	5,0	1,20	> 100 nm
“Giant effect“	50	2000	System aus Schichten, je <1 nm

Tabelle 1: Werte für magnetoresistiven Effekt

Bei der Herstellung von Sensorelementen ist zu beachten, daß der magnetoresistive Effekt stark abnimmt, wenn die Schichtdicke wesentlich unter 50 nm liegt. Weit größere Werte als bei den bewährten Materialien NiFe und NiCo werden von Schichtsystemen erreicht, die unter “Giant effect“ aufgeführt sind. Diese Schichtsysteme bestehen abwechselnd aus ferromagnetischen und gut leitfähigen Schichten mit Dicken im Bereich von höchstens einigen Nanometern. Zur Zeit sind diese Schichtsysteme wegen der schwierigen Technologie und der hohen Anisotropiefeldstärken noch nicht praktisch nutzbar.

Die Drehung der Magnetisierung in der ferromagnetischen Schicht wird durch die in der Schichtebene vorhandenen Magnetfeldkomponenten  $H_x$  und  $H_y$  bestimmt. Die dazu senkrechte Feldkomponente  $H_z$  ist ohne Einfluß darauf. Allgemein gilt

$$H_x/H_0 \cdot \tan \Theta + \sin \Theta - H_y/H_0 = 0 \quad (2)$$

Für die in Sensoren einsetzbaren Schichtstreifen, deren Länge groß gegen die Breite  $w$  und deren Breite groß gegen die Dicke  $t$  ist, erhält man

$$H_0 = H_k + M_s \cdot t/w \quad (3)$$

mit  $M_s$  als der Sättigungsmagnetisierung des Schichtmaterials ( für die angegebenen Materialien  $\approx 1$  T ). Eine anschauliche Diskussion der Gleichung (2) erfolgt weiter unten. Für den Spezialfall, daß die x-Komponente des Magnetfeldes nicht vorhanden ist, gilt

$$\sin \Theta = H_y/H_0 \quad (4)$$

und

$$R = R_0 - \Delta R \cdot (H_y/H_0)^2 \quad \text{für } H_y < H_0 \quad (5)$$

und

$$R = R_0 - \Delta R \quad \text{für } H_y > H_0 \quad (6)$$

Eine Meßkurve, die die Abhängigkeit des Widerstandes eines Schichtstreifens vom quer zur Streifenlängsrichtung angelegten Feld  $H_Y$  entsprechend Gleichung (5) zeigt, ist in Bild 3 dargestellt. Abweichungen vom durch die Formeln beschriebenen Verlauf ergeben sich bei höheren Feldstärken oder wenn der Winkel zwischen Strom- und Magnetisierungsrichtung sich  $90^\circ$  nähert.

Soll die Magnetfeldabhängigkeit des Widerstandes zur Messung der Magnetfeldkomponente  $H_Y$  benutzt werden, so zeigen sich zwei grundsätzliche Mängel. Erstens hat die quadratische Kennlinie eine vom Magnetfeld abhängige Empfindlichkeit, insbesondere bei kleinsten Feldstärken ist die Empfindlichkeit null. Geringe Feldstärken sind also nicht meßbar. Zweitens ist der Widerstand des ferromagnetischen Metallstreifens nicht nur vom Magnetfeld, sondern auch von der Temperatur abhängig. Bei einem Temperaturkoeffizienten von etwa  $0,3\% / K$  bewirken beispielsweise  $10\text{ K}$  Temperaturänderung mehr Widerstandsänderung bei einem NiFe-Streifen als durch das Magnetfeld überhaupt erreichbar ist.

### 3. Struktur magnetoresistiver Sensoren

Für das erste dieser Probleme ist eine Verschiebung des Arbeitspunktes von einem Winkel von  $0^\circ$  zwischen Strom und Magnetisierung auf  $45^\circ$  die Lösung. Dies kann nach der Darstellung in Bild 4 durch Aufbringen von sehr gut leitfähigen Dünnschichtstreifen auf die magnetoresistiven Streifen erreicht werden, die um etwa  $45^\circ$  geneigt gegen die Längsrichtung angeordnet sind. Da die hochleitfähigen Dünnschichtstreifen näherungsweise Äquipotentiallinien darstellen, wird der Strom auf kürzestem Wege die hochohmigen magnetoresistiven Schichtgebiete durch fließen und so ebenfalls um  $45^\circ$  gegen die Längsrichtung der Streifen gedreht sein. Die beschriebene Anordnung wird als Barbcipolstruktur bezeichnet.

Die Magnetisierungsrichtung wird dadurch nicht beeinflußt. Sie weist in den magnetoresistiven Streifen ohne Vorhandensein äußerer Magnetfelder in der

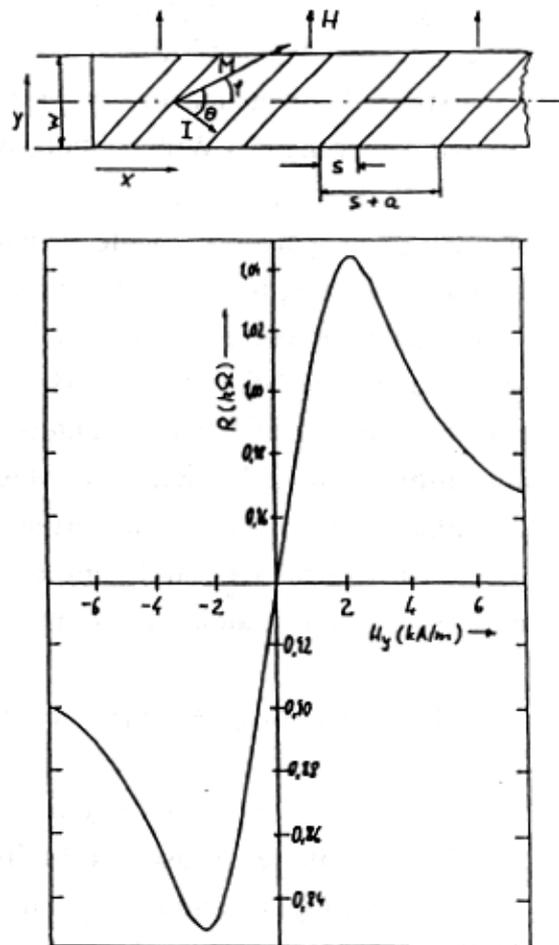


Bild 4: Widerstand eines MR-Streifens mit Barbcipolstruktur als Funktion des Feldes ( $w = 8\mu\text{m}$ ,  $s = 3\mu\text{m}$ ,  $a = 5\mu\text{m}$ ,  $t = 30\text{nm}$ )

Schichtebene weiterhin in Streifenlängsrichtung. Der Winkel zwischen Strom und Magnetisierung wird jetzt mit  $\varphi$  bezeichnet. Selbstverständlich gilt

$$\varphi = \Theta + 45^\circ \quad (7)$$

Berücksichtigung dieser Beziehung und der Barberpolstruktur ergibt für den Widerstand eines Streifens

$$R = R'_0 - (\Delta R/2) \cdot (1 - \sin 2\varphi) \quad (8)$$

$$\text{mit } R'_0 = l/w \cdot a/(a+s) \cdot \rho/t \cdot (0,5 + 0,14 \cdot a/w) \quad (9)$$

Streifens,  $s$  - Breite der hochleitfähigen Schichtstreifen in Richtung der Länge der magneto-resistiven Streifen,  $a$  - Abstand der hochleitfähigen Streifen in derselben Richtung) und

$$\Delta R' = \Delta R \cdot (0,5 + 0,14 \cdot a/w) \cdot (1 - 0,08 \cdot a/w - 0,11 \cdot (a/w)^2) \quad (10)$$

Die Klammerausdrücke berücksichtigen dabei die unvollständige Verdrehung der Stromrichtung in den Randbereichen der magneto-resistiven Streifen. Für den Zusammenhang zwischen Magnetisierungsrichtung und Feldkomponenten in der Schichtebene gilt jetzt entsprechend

$$H_x/H_0 \cdot \tan \varphi + \sin \varphi - H_y/H_0 = 0 \quad (11)$$

Ohne äußeres Magnetfeld ist der Winkel  $\varphi = 0$ . Nach Gleichung (8) ist der Widerstand damit genau in der Mitte zwischen Maximal- und Minimalwert. Für die relative Änderung des Widerstandes bei kleinen angelegten Magnetfeldern ergibt sich

Für das oben genannte zweite Problem, nämlich die Beseitigung des Einflusses der Tem-

$$1/R \cdot dR/dH_y = (\Delta\rho/\rho) \cdot (1 - 0,08 \cdot a/w - 0,11 \cdot (a/w)^2) / (H_x + H_0) \quad (12)$$

peraturabhängigkeit der Widerstände, bietet sich die Verwendung einer Wheatstone-Brücke aus vier ohne Magnetfeldeinfluß gleichen Widerstandsstreifen an. Eine solche Brücke ist in Bild 5 dargestellt. In jedem Brückenzweig sind magneto-resistive Streifen mit unterschiedlich geneigten gut leitfähigen Schichtstreifen angeordnet, so daß sich bei Magnetfeldeinwirkung ( $H$ ) die Widerstandswerte gegenläufig ändern. Damit ändert sich die Brückenausgangsspannung um das maximal mögliche. Die relative Änderung der Brückenausgangsspannung stimmt damit mit der eines Einzelwiderstandes überein:

$$1/U_B \cdot dU_a/dH_y = \Delta\rho/\rho \cdot (1 - 0,08 \cdot a/w - 0,11 \cdot (a/w)^2) / (H_x + H_0) \quad (13)$$

Diese Größe

$$S_U = 1/U_B \cdot dU_a/dH_y \quad (14)$$

ist die normierte Sensorempfindlichkeit. Sie gibt an, um wieviel sich die Brückenausgangsspannung  $U_a$  mit einer Magnetfeldänderung  $dH_y$  pro angelegtem Volt Brückenbetriebsspannung  $U_B$  verändert.

In Tabelle 2 sind für Sensorbrücken, die aus 30 nm dicken  $Ni_{81}Fe_{19}$ -Schichten bestehen und bei denen eine maximale Änderung des spezifischen Widerstandes von

$\Delta\rho/\rho = 2\%$  auftritt und die eine Sättigungsmagnetisierung von  $M_S = 800 \text{ kA/m}$  haben, die Empfindlichkeiten für unterschiedliche Streifenbreiten aufgeführt. Für die bei der Herstellung eingeprägte Anisotropie wurde der Wert  $H_k = 150 \text{ AJm}$  verwendet.

$w(\mu\text{m})$	1	2	5	10	20	30	100
$S_U \text{ (mV/V)/(kA/m)}$	0,83	1,65	4,04	7,84	14,8	21,1	51,3
$H_M \text{ (kA/m)}$	12	6,0	2,5	1,3	0,7	0,5	0,2

Tabelle 2: Daten von magnetoresistiven NiFe-Sensoren

In der Tabelle sind auch die Meßbereiche der Sensorbrücken angegeben. Näherungsweise kann der Meßbereich mit der Beziehung

$$H_M = (H_0 + H_X)/2 \quad (15)$$

berechnet werden. In diesem Bereich sind die Linearitätsabweichungen kleiner als zwei Prozent. In der Tabelle 2 wurde jedoch in allen Fällen mit  $H_X = 0$  gerechnet. Sensorkennlinien für eine Brücke mit einer Streifenbreite von  $8 \mu\text{m}$  für unterschiedliche  $H_X$ -Felder sind in Bild 5 dargestellt. Aus der Darstellung ist ersichtlich, daß mit größer werdendem  $H_X$  der Meßbereich bedeutend vergrößert werden kann, was jedoch in gleichem Maße auf Kosten der Empfindlichkeit erfolgt.

4. Die Richtung der Magnetisierung in magnetoresistiven Schichtstreifen Bisher wurde der Einfluß der Magnetfeldkomponenten  $H_X$  und  $H_Y$  auf die Richtung der Magnetisierung in dünnen magnetoresistiven Schichtstreifen bereits mehrfach erwähnt und auch z. B. in der Gleichung (11) formelmäßig ausgedrückt. Da sich auf dieser Basis ein anschauliches Verständnis für die Zusammenhänge kaum entwickeln kann, dieses für den Anwender magnetoresistiver Sensoren in ihrer Komplexität jedoch notwendig erscheint, wurde ein mechanisches Analogmodell entwickelt, das im folgenden vorgestellt werden soll.

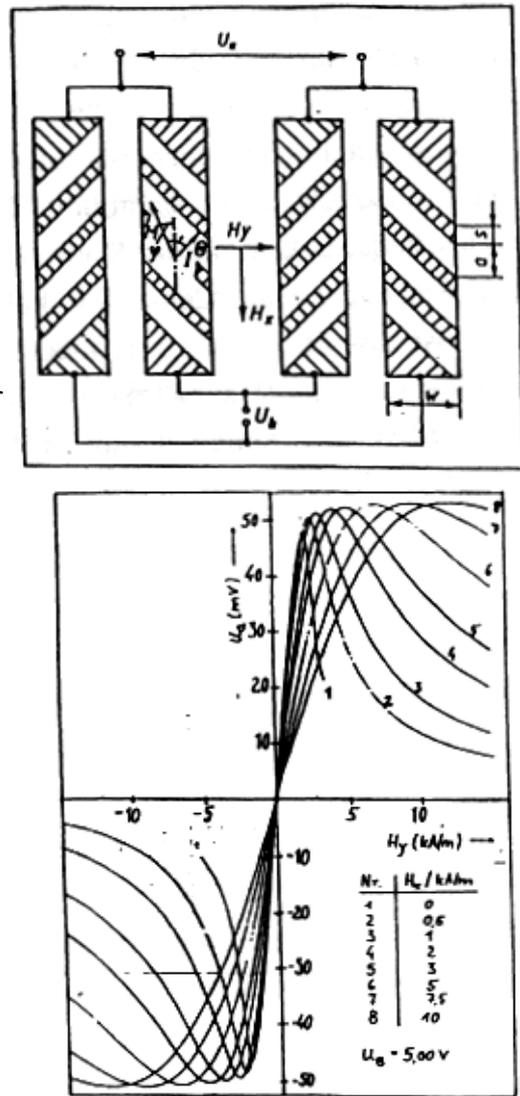


Bild 5: MR-Sensorbrücke mit gemessenen Kennlinien (Chipfläche  $1 \text{ mm}^2$ )

In Bild 6 ist im unteren Bildteil ein Magneto-resistiver Schichtstreifen dargestellt, dessen Magnetisierungsrichtung durch das Feld eines mit N-S gekennzeichneten Magneten aus der Ruhelage  $\Theta = 0$  herausgedreht ist. Im gleichfalls in Bild 6 dargestellten mechanischen Modell ist ein starrer Stab drehbar im Koordinatensprung gelagert. Er wird durch die Kraft der Feder immer zur x-Achse hingezogen. Die Feder ist auf der x-Achse gleitend gelagert, so daß sie stets eine senkrechte Lage einnimmt. Die Länge der Feder entspricht der Koordinate y des Stabendes, an dem die Feder befestigt ist. Am Stabende greift außer der Federkraft noch die äußere Kraft F an, und zwar unter dem gleichen Winkel, in dem auch das Magnetfeld im unteren Bildteil anliegt. Unter Einwirkung der äußeren Kraft F mit ihrer x- und y-Komponente und der Federkraft ist der Stab im Gleichgewicht um den Winkel gegen die x-Achse geneigt. Entsprechend ist im unteren Bildteil die Magnetisierung um einen Winkel gegen die Ruhelage parallel zur x-Achse verdreht. Berücksichtigt man die Drehmomente der beiden Komponenten der äußeren Kraft und der Federkraft, so erhält man zur Bestimmung des Winkels  $\Theta$  folgende Gleichung

$$F_x / (k \cdot s) \tan \Theta + \sin \Theta - F_y / (k \cdot s) = 0 \quad (16)$$

Diese Gleichung hat dieselbe Form wie Gleichung (2) zur Bestimmung der Magnetisierungsrichtung im magneto-resistiven Streifen. Sie enthält nur anstatt der Magnetfeldkomponenten die entsprechenden Kraftkomponenten und statt der Anisotropiefeldkonstante  $H_0$  die bei der maximalen Auslenkung vorhandene Federkraft  $k \cdot s$ . Diese Übereinstimmung berechtigt dazu, alle Schlußfolgerungen für die Einstellung der entsprechenden Winkel von einem System auf das andere zu übertragen. Aus dem in Bild 6 dargestellten wird nun sofort klar, warum mm magnetischen Fall zwischen dem Winkel  $\alpha$ , um den das Magnetfeld gegen die x-Achse geneigt ist, und dem Winkel  $\Theta$ , um den die Magnetisierung verdreht ist, eine Differenz besteht. Diese Differenz wird allerdings um so geringer sein,

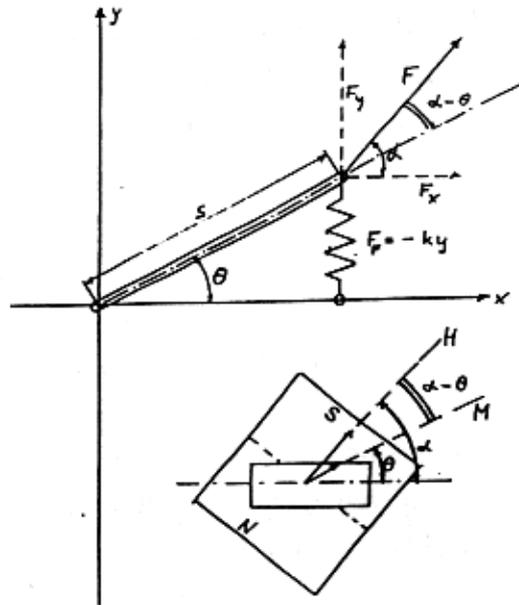


Bild 6; Mechanisches Modell zur Winkelbestimmung, Ruhelage  $\Theta = 0$

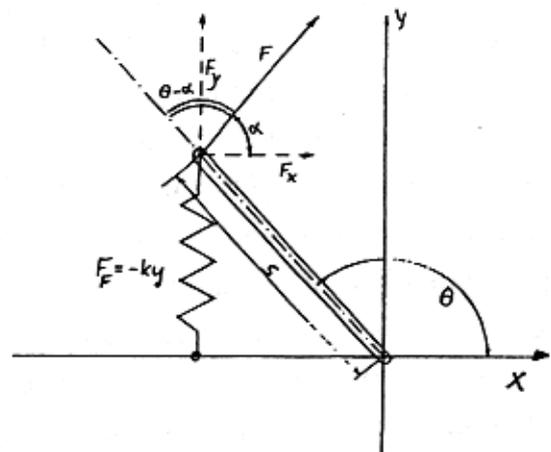


Bild 7: Mechanisches Modell, Ruhelage  $\Theta = 180^\circ$

je größer die Feldstärke des Dauermagneten ist.

Wird im mechanischen Fall eine Kraft in  $y$ -Richtung angelegt, die größer als die maximale Federkraft  $k \cdot s$  ist, so ergibt sich ein Winkel  $\theta$  von  $90^\circ$ . Nach Wegnehmen dieser Kraft ist die Anordnung im labilen Gleichgewicht. Bei kleinster Störung desselben sind die beiden Endzustände mit  $\theta = 0$  und  $\theta = 180^\circ$  völlig gleichberechtigt möglich. Analoges trifft natürlich auch für den magnetischen Fall zu. Deshalb ist es möglich, die Magnetisierungsrichtung durch ein kurzzeitig anliegendes Störfeld umzuschalten. Bei einem einfachen magneto-resistiven Schichtstreifen ist diese Magnetisierungs-umkehr aus dem Widerstandswert nicht erkennbar, da der Sinus der beiden genannten Winkel denselben Wert hat und nur dieser, entsprechend Gleichung (1), von Bedeutung ist. Bei einem Streifen mit Barberpolstruktur ist der Widerstandswert für beide Richtungen der Magnetisierung ebenfalls gleich, die Richtung der Widerstandsänderung mit einem angelegten Feld  $H$  ist jedoch entgegengesetzt. Da Sensorbrücken üblicherweise aus Streifen mit Barberpolstrukturen aufgebaut sind, ist in diesem Fall eine Veränderung der Kennlinie zu verzeichnen. Die beiden möglichen Kennlinien gehen durch Spiegelung an der  $y$ -Achse auseinander hervor. Ein sicherer Ausschluß der Möglichkeit des Umkippens der Kennlinie besteht entsprechend dem mechanischen Modell darin, daß ein stabiles Magnetfeld in  $x$ -Richtung angelegt wird, dessen Stärke größer als  $H_0$  sein muß.

Bei Anlegen eines Magnetfeldes in der  $x$ - $y$ -Ebene mit beliebiger Richtung ergibt sich durchaus nicht derselbe Winkel, wenn die Ausgangslage der Magnetisierung unterschiedlich war. Um das zu demonstrieren, wurde in Bild 7 bei gleicher Kraft  $F$  wie in Bild 6 der Winkel für die entgegengesetzte Ausgangslage gezeichnet. Auch der Winkel  $180^\circ - \theta$  entspricht nicht dem in Bild 6. Das ist schon aus dem Umstand abzuleiten, daß in Bild 6 die Federkraft und die  $y$ -Komponente eine Drehung des Stabes nach rechts bewirken, während in Bild 7 nur die Federkraft nach links dreht.

Die eindeutige Festlegung der Richtung der Magnetisierung ist also in jeder Anwendung von magneto-resistiven Sensoren zu sichern. Bei Anwendungen zur Positionsbestimmung, die ohnehin schon einen Dauermagneten benutzen, sollte die Anordnung so gewählt werden, daß durch das Feld desselben Magneten die Magnetisierung immer eindeutig festliegt.

/1/ R. Boll in "Sensors" Volume 5: "Magnetic Sensors", p. 9, VCH Weinheim 1989