Magnetoresistiv hat Zukunft

Erweiterte Messmöglichkeiten durch neue Prinzipien

Wenn Sensoren für magnetische Felder heute in Millionenstückzahlen zu Cent-Preisen hergestellt werden, dann bedeutet das keineswegs einen technologischen Stillstand. Ganz im Gegenteil, die neuen Ideen für verbesserte Funktion sprudeln munter weiter. In Konkurrenz zu den verbreiteten Hallsensoren stehen die magnetoresistiven. Unter diesen kommen jetzt neben den altbewährten AMR- die neuen GMR-Typen immer häufiger zur Anwendung. Ande

Der große kommerzi
der Magnetfeldse
ruht darauf, dass
meisten Fällen „zwecke
werden. Nur in einer Mi
Anwendungen ist die Me
magnetischen Flussdich
sprüngliche Absicht. Sehr
ger dienen sie als physikali
weg, um letztlich ganz ande
zu erfassen; darunter vor alle
chanische wie Position, Versch
weg, Winkel, Drehzahl, Füllstä
usw., oft auch einfach nur die An- oder
Abwesenheit eines Gegenstandes (z.B.
„Autotür geschlossen?"). Ebenso gut
wäre dies auch auf mechanischem oder
optischem Wege möglich. Sehr vielen
Anwendern ist das physikalische Prinzip egal; worauf es ihnen weit mehr ankommt, sind höchste Zuverlässigkeit, kleines Bauvolumen, hohe Genauigkeit und Linearität, Verschleißfreiheit, geringe Stromaufnahme und niedrige Kosten. In dieser Hinsicht erweisen sich die magnetischen Verfahren als besonders günstig.

Weit verbreitet sind die Hallsensoren – heute komplexe ICs mit interner Signalverarbeitung inkl. Temperatur- und Offsetkompensation sowie Programmierbarkeit der Parameter [3]. Sie haben allerdings einige Einschränkungen: Ihr Temperaturbereich ist be-

Vier

Der älteste und am weitesten verbreitete Typ ist der AMR-Sensor; er basiert auf dem „Anisotropen Magneto-Resistiven" Effekt, entdeckt 1857 von William Thomson (Lord Kelvin). Das erste Patent hierauf meldete Ampex, USA, 1966 an. Die Großserienproduktion begann in den 80-er Jahren. Magnetisch hochpermeable Legierungen wie Mu-Metall oder Permalloy ändern im Magnetfeld ihren elektrischen Widerstand, wobei der Winkel zwischen Magnetisierungsrichtung und Stromrichtung eine entscheidende Rolle spielt. Verlaufen beide parallel, ist der Effekt am stärksten. Der Vorteil ge-
enüber den Hallsensoren: Der eigent-
Sensorteil enthält keine Halblei-
lern nur Metalle; dadurch ist
stemperaturbereich größer.
r notwendige Auswerte-
n in einiger Entfernung
niger heiß ist. Der Ef-
gs einige ungünstige
ie ihn für eine Nut-
zunächst schwer ge-
lassen: Die Wider-
st proportional zum
netischen Feldstärke
ximal etwa 3 %. Zu
Erfolg kamen derarti-
st, nachdem es gelungen
nden Effekte zu kompen-
. Dazu bedurfte es einer
Reihe von ausgeklügelten
s wie Brückenschaltung von vier
ensorelementen, Vormagnetisierung
mit zusätzlichen Permanentmagneten
und diagonal aufgebrachte Bahnen aus
hochleitfähigem Metall („Barberpol"-Strukturen). Die starke Nichtlinearität eliminiert man mit Hilfe einer geschlossenen Regelschleife: Eine zusätzliche stromdurchflossene Spule erzeugt ein Magnetfeld, welches das zu messende Feld gerade eben kompensiert. So arbeiten die AMR-Elemente immer in unmittelbarer Nähe ihres Nullpunktes. Um den Offset zu minimieren, hat man das „Flippen" eingeführt: Die Richtung der Vormagnetisierung wird periodisch gewechselt; so wird

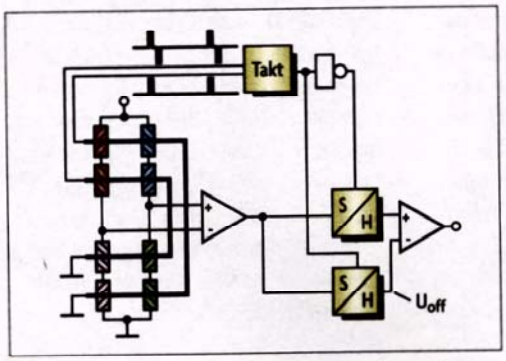

Bild 1. Neuartiger geflippter MR-Sensor mit geteiltem Flip-Leiter. Damit lässt dich die obere Grenzfrequenz bis auf etwa 1 MHz steigern. (Quelle: Sensitec)

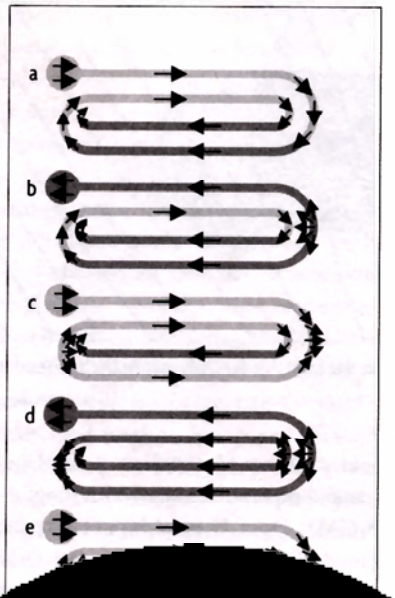

Bild 7. Prinzip des GMR-Umdrehungszählers, hier mit zwei Windungen für zwei Umdrehungen (720°): a) Beginn bei 0° mit keiner Domänenwand in der Spirale, hier sind zwei gerade Teile des Streifens parallel und zwei antiparallel zur Referenzrichtung des GMR-Schichtstapels. b) nach 180° Felddrehung: In der vergrößerten Fläche wurde eine Domänenwand erzeugt und zur ersten Kurve geschoben, dadurch wurde die Magnetisierung der ersten geraden Streifens umgekehrt. Jetzt sind drei Streifen antiparallel und einer parallel zur Referenzrichtung. c) Magnetisierungszustand nach Magnetfelddrehung um 360°; es wurde eine zweite 180°-Domänenwand erzeugt und zur ersten Windung geschoben. Die Magnetisierungsrichtung des ersten Streifens ist umgedreht zu parallel. Gleichzeitig wurde die zuerst erzeugte 180°-Domänenwand von der ersten zur zweiten Kurve verschoben, dadurch wurde die Magnetisierung des zweiten Streifens auf antiparallel umgedreht. Nach 360° Drehung sind also drei gerade Stücke parallel magnetisiert und einer antiparallel. d) Magnetisierung nach 540° Drehung, wo insgesamt drei Domänenwände erzeugt und in der Spirale weitergeschoben worden sind. Jetzt sind vier Streifen antiparallel magnetisiert. e) Nach 720° = zwei volle Umdrehungen sind vier Domänenwänd[illegible] in der Spirale gespeichert, alle vier geraden Stücke sind p[illegible] magnetisiert. (Quelle: IPHT[illegible]

teil, wie z.B. von Sensitec[illegible]
Störungen durch externe M[illegible]

[illegible] gegen-
gesetzt gepolte Magnetfelder erzeugt (**Bild 4**). Damit addieren sich die von beiden Halbbrückenzweigen abgegebenen Signalspannungen.

Stromsensoren dieser Art sind seit mehreren Jahren in Serienproduktion. Auch hier verbleibt ein gewisser Offsetfehler, der von der Temperatur abhängt und die Genauigkeit am unteren Ende des Messbereichs verringert. Die wesentlichen Verbesserungen bei der neuen Serie CDS4000 von Sensitec sind ein kompakterer Aufbau, SMD-Bestückbarkeit und nur noch eine einzelne Versorgungsspannung von 5 V. In Entwicklung befinden sich geflippte Typen, bei denen der Offset wesentlich kleiner und damit die Messdynamik weiter werden wird [1].

Ein aussichtsreiches Anwendungsfeld für MR-Sensoren eröffnet sich möglicherweise in der Verkehrsdatenerfassung. Ein an der Universität des Saarlandes aufgebautes experimentelles System stellt die Anwesenheit eines Fahrzeugs über die Messung der Verformung des Erdmagnetfeldes fest (**Bild 5**). Diese beträgt hier nur wenige Prozent; so kleine Veränderungen lassen sich mit MR-Sensoren noch sicher [illegible]fassen. Zur Messung aller drei Feld-[illegible]onenten braucht man drei ortho-[illegible]geordnete Sensorelemente. [illegible]Messpunkten in definiertem [illegible]en sich auch Geschwin-[illegible]ahrtrichtung feststellen. [illegible]rende Fahrzeug erzeugt [illegible]chen Fingerabdruck", [illegible] teilweise auch die [illegible]rie (Pkw, Lkw, Bus) [illegible]nüber den bisher ver-[illegible]tionsschleifen in der [illegible] die MR-Sensoren den [illegible]ängeren Lebensdauer [illegible]erbarkeit bei fließendem [illegible]e Empfindlichkeit reicht [illegible]er weit. Die Saarländer ha-[illegible]-, GMR- und TMR-Sensoren [illegible]ucht. Die Probleme mit Streuun-[illegible], Temperaturabhängigkeit und eingestreuten Störungen ließen sich durch intelligente Signalverarbeitung weitgehend eliminieren. Ein Prototypsystem mit 108 Sensoren auf dem Boden und an den Wänden wurde in einem Parkhaus installiert, um die Zahl der freien Parkplätze zu ermitteln. Der Autofahrer kann sie auf einem Display über der Einfahrt ablesen [1].

Am Institut für Angewandte Physik der Universität Gießen nutzt man MR-Sensoren zur zerstörungsfreien Materialprüfung. Über induzierte Wirbelströme lassen sich damit Inhomogenitäten detektieren. Dank ihrer Kleinheit erzielen die Sensoren eine sehr hohe örtliche Auflösung und ein sehr gutes Signal/Rausch-Verhältnis. Als besonders geeignet haben sich GMR- und TMR-Sensoren erwiesen.

ordnung der Atome und Moleküle kommen, reichen die Gesetze der klassischen Physik bekanntlich nicht mehr aus, um die Vorgänge zu beschreiben. So beginnt z.B. eine Isolatorschicht zwischen zwei leitenden Schichten Ladungsträger durchzulassen, wenn sie nur dünn genug wird (einige nm). Der TMR-Effekt tritt auf, wenn sich der Isolator zwischen zwei ferromagnetischen Schichten befindet. Sind beide zueinander gleichsinnig magnetisiert, ist der resultierende Gesamtwiderstand niedrig; bei gegensinniger Ausrichtung (antiferromagnetisch) ist er hoch. Das hängt mit der Spinpolarisation der Leitungselektronen zusam-

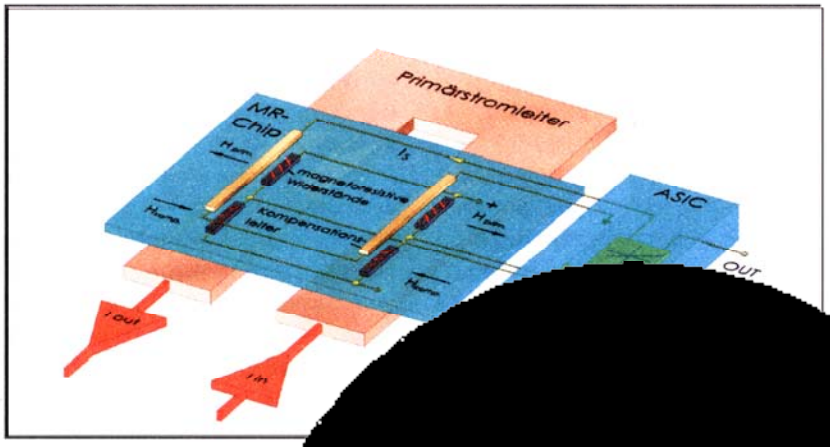

Bild 4. Prinzip des magnetoresis[redacted] nen Einfluss.

men, die in Metallen ein[redacted] vorzugen. Tunneln die[redacted] elektronen durch die B[redacted] sie sich auf der gegen[redacted] Elektrode plötzlich in [redacted] Das bedeutet, dass sie k[redacted] plätze finden und nicht g[redacted] beitragen [1].

Der TMR-Effekt ist seit[redacted] 70-er Jahre bekannt. Zu B[redacted] Forschung war er jedoch nur k[redacted] es war nicht möglich, reproduz[redacted] gute Proben herzustellen. Erst in d[redacted] letzten Jahren sind entscheidende Durchbrüche mit Widerstandsänderungen bis zu 300 % gelungen, z.B. bei Sensitec. Im konkreten Aufbau besteht ein magnetisches Tunnelelement (MTJ = Magnetic Tunnel Junction) aus zwei ferromagnetischen Elektroden, typischerweise aus CoFe, NiFe oder CoFeB, zwischen denen sich eine dünne Isolatorschicht befindet, beispielsweise aus Al_2O_3 oder MgO. Um eine

der Elektroden magnetisch auszurichten („pinnen"), wird analog zu den GMR-Spinvalves ein Antiferromagnet, beispielsweise IrMn oder PtMn, angebracht. Dieser koppelt an eine der beiden Elektroden an und fixiert die Magnetisierung der Elektrode in eine vorgegebene Richtung.

Die wesentlichen Unterschiede gegenüber GMR-Sensoren sind: Statt einer koppelnden Kupferschicht sitzt ein Nichtleiter zwischen den beiden ferromagnetischen Schichten, und der Strom fließt nicht parallel zu diesen, sondern senkrecht dazu. In **Bild 3** sind beide gegenübergestellt. Während ein auf AMR- oder GMR-Technologie ba-

[redacted]

höhere Ort[redacted] Messung erreichbar als bei GMR und AMR, was für Verfahren der magnetischen Bildgebung von großem Vorteil sein könnte. Durch Variation der Schichtdicke und der Fläche der Barriere kann der elektrische Widerstand des TMR-Elements um Größenordnungen variiert werden. Schließlich halten TMR-Sen-

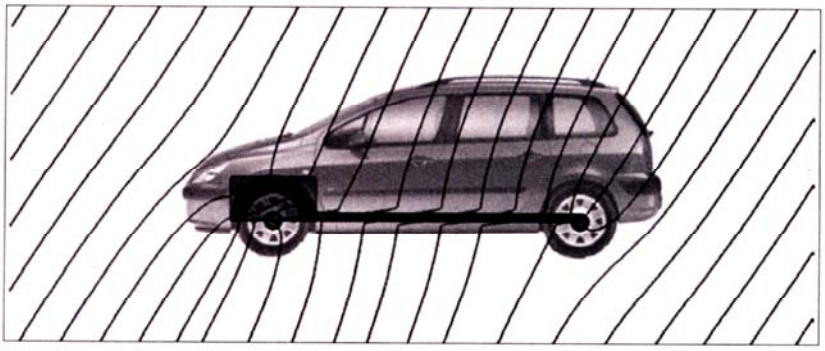

Bild 5. Die Verbiegung der magnetischen Feldlinien der Erde durch einen magnetisch leitenden Gegenstand lässt sich mit MR-Sensoren messen. (Bild: UniSaarland)

soren auch höheren Temperaturen stand als ihre AMR- und GMR-Konkurrenten. Die genannten Eigenschaften lassen ein breites potentielles Anwendungsfeld erwarten.

Noch andere magnetoresistive Effekte

In den Labors schlummern noch vie[redacted] weitere Ideen; welche davon den [redacted] gen Weg bis zu einem industri[redacted] Produkt schaffen werden, ist i[redacted] ment nicht klar absehbar. Au[redacted] Fall wird an allen intensiv we[redacted] beitet, wobei deutsche Firme[redacted] stitute technologisch mit dem[redacted] Welt gut mithalten können. D[redacted] meine Sammelbezeichnung[redacted] „XMR". Außer den schon ge[redacted] fallen hierunter noch:

- CMR: Der „Colossale-Magnet[redacted] sistive"-Effekt ist ein Volumenef[redacted] der vor allem in perowskitischen M[redacted] terialien auftritt. Bei Temperaturen in der Nähe ihrer Übergangstemperatur vom metallischen zum Halbleiter-Verhalten wurden Widerstandsänderungen von mehr als 200 % beobachtet – leider nur bei Materialien, deren Übergangstemperatur unter 100 K liegt.
- GMI: Der „Giant-Magnetic-Inductance"-Effekt tritt vor allem an Drähten auf, die eine [redacted]schicht aus einem[redacted] se S[redacted] we[redacted] sind Str[redacted] Trennung zwisch[redacted] ess-

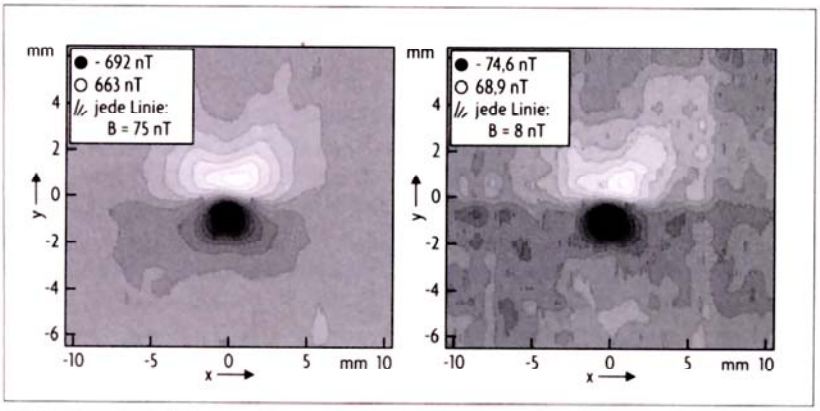

Bild 6. Zerstörungsfreie Materialprüfung mit MR-Sensoren. Hier eine $AlMg_3$-Laserschweißnaht. Die Defekte haben eine Tiefenlage von 0,5 mm. (Quelle: Uni Gießen, Institut für Angewandte Physik)

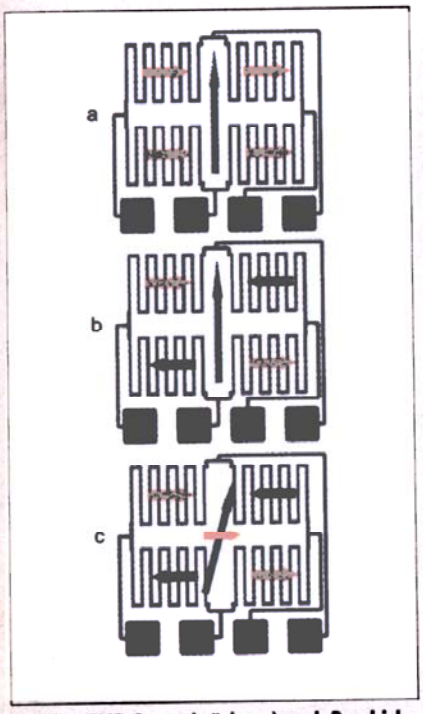

Bild 2. GMR-Sensorbrücke: a) nach Beschichtung und Temperung; b) Pinning-Richtungen nach der Formierung; c) durch ein äußeres Feld parallel zur Pinning-Richtung wird die Free-Layer-Magnetisierung aus ihrer Grundposition gedreht, und das Brücken-nal entsteht. (Bild: [redacted])

das Messsignal zum Wechs[redacted] nungssignal; der Offset verb[redacted] verändert als Gleichspannun[redacted] lassen sich mit einem phasen[redacted] lichen Gleichrichter trennen. [redacted] zusammen mit der Magneti[redacted] richtung auch die Brückensp[redacted] nung um, dann wird der Off[redacted] Wechselspannungssignal, da[redacted] leicht wegfiltern lässt, und das [redacted] signal behält Gleichspannungsfo[redacted] So aufgebaute magnetoresistive Se[redacted] soren sind wesentlich empfindlicher als Hallsensoren. Bei einem Messbereich von 1 mT ist eine Nullpunktdrift von unter 10 nT erreichbar, entsprechend einem Dynamikbereich von über 100 dB. Damit lässt sich auch das Magnetfeld der Erde messen, was Hallsensoren nicht mehr können.

Das Flip-Verfahren hat sich etabliert, ist aber doch nicht frei von Nachteilen. So ist der Sensor in beiden Flip-Zuständen magnetisch sensitiv. Da diese zwei Zustände aber nur zeitlich versetzt abgetastet werden können, erfordert die Korrektur des Offsets eine zeitliche Integration. Das schränkt die obere Grenzfrequenz ein. Eine neue Idee von Sensitec (www.sensitec.com) besteht jetzt darin, den Flip-Leiter so zu teilen, dass jeweils die Hälfte aller MR-Elemente erfasst wird (**Bild 1**). Damit ergeben sich jetzt vier verschiedene Zustände. Bei entgegensetzten Flip-Strömen heben sich die Messempfindlichkeiten beider Teile gegenseitig auf, so dass das Ausgangssignal nur noch die Offsetspannung ist. Diese wird in einer Sample &Hold-Schaltung gespeichert und nach Aktivierung des Sensors vom Signal subtrahiert. Da heutige Flip-Sensoren Umschaltzeiten unter 0,2 µs erreichen, kann die inaktive Sensorzeit unter 1 µs gehalten werden. Die obere Grenzfrequenz ist jetzt nicht mehr an die Flip-Frequenz gebunden und lässt sich bis auf 1 MHz hochtreiben. Entwickler Uwe Loreit: „Vor allem die Stromsensoren sollen bis in den MHz-Bereich gehen, damit sie auch sehr kurzzeiti[redacted] se[redacted]

[redacted]

Strom [redacted] fließt. Die Wi[redacted] wird durch unterschiedliche Streuungen der Elektronen in verschieden magnetisierten Schichten verursacht. (Die Entdecker dieses Effekts, Peter Grünberg (Forschungszentrum Jülich) und Albert Fert (Universität Paris), wurden im Oktober mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.) In [2] sind die Vorgänge im Detail erläutert. In praktischen Sensorausführungen werden vier Sensorelemente zu einer Brücke zusammengeschaltet, die Anordnung kann z.B. so aussehen wie in **Bild 2**.

Die erste Massenanwendung fand sich in Leseköpfen für Festplattenlaufwerke. Durch die ultrakleinen Abmessungen (bis weit unter 1 µm) ließ sich die Speicherdichte um rund eine Größenordnung steigern, was hier eine Revolution auslöste. Typen für industrielle Anwendungen sind noch relativ neu, sie nehmen jetzt schnell zu. Erster Hersteller war NVE in Minnesota/USA, inzwischen sind einige weitere [redacted]zugekommen. In Deutschland befas-[redacted]ch z.B. Sensitec, HL Planar und [redacted] damit. In einer groß angeleg-[redacted]chung bei Infineon wurde [redacted] ausreichende Stabilität [redacted] Einsatz nachgewiesen [redacted]nforschung läuft u.a. [redacted]hotonische Technolo-[redacted]jena.de, vormals In-[redacted]ische Hochtechnolo-[redacted]a.

[redacted]ng mit Chancen

[redacted]z anderer Mechanismus [redacted]unnel-Magneto-Resis-[redacted]en zu Grunde: der Tunnel-[redacted]ach langer Grundlagenfor-[redacted] scheint sich hierfür jetzt ein [redacted]chbruch anzubahnen. Die Funktionsweise ist nur quantenphysikalisch zu erklären. Wenn die Strukturen so klein werden, dass sie in die Größen-

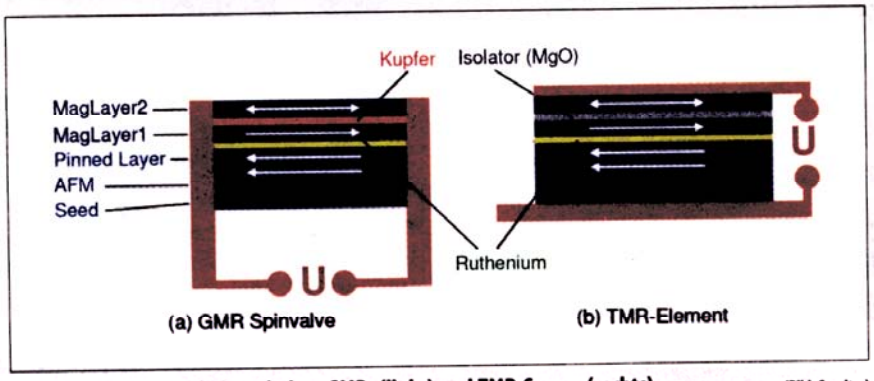

Bild 3. Die Unterschiede zwischen GMR- (links) und TMR-Sensor (rechts). (Bild: Sensitec)

Ein konkret
die Prüfung vo
oder mehrere Anre
den mit Wechselstrom g
dadurch erzeugte magnetische Wech
selfeld wird in das zu prüfende Objekt eingestrahlt. Bei Materialdefekten wie Poren, Mikrorissen oder Einschlüssen ergeben sich charakteristische Signalformen. Wenn der Sensor das Objekt zeilenweise überstreicht, lassen sich zweidimensionale Bilder gewinnen (**Bild 6**), die Informationen über die Materialhomogenität und eventuelle Fehler liefern. Auch ein Prüfverfahren für metallische Drähte wurde entwickelt, das mit vier kreuzförmig angeordneten Sensoren arbeitet [1].

Eine ungewöhnliche Idee für einen magnetoresistiv arbeitenden Umdrehungszähler entstand am IPHT Jena in Zusammenarbeit mit der Firma Novotechnik, Ostfildern bei Stuttgart (www.novotechnik.de). Das Sensorelement besteht aus einem etwa 200 nm breiten, 40 nm dünnen GMR-Streifen (Ni81Fe19 mit Zwischenlagen), der in Form einer rennbahn-ähnlichen Spirale aufgewickelt ist, Länge etwa 500 µm. Am Ende der zu überwachenden Achse befindet sich ein Magnet mit radialer Feldrichtung. Am äußeren Ende der Spirale weitet sich der Streifen zu einer größeren Fläche von 10 µm × 15 µm auf. Dreht sich das Magnetfeld um 180°, wird in dieser eine ferromagnetische 180°-Domänenwand erzeugt. Bei jeder weiteren derartigen Drehung entsteht jeweils eine neue, und alle vorher erzeugten wandern in der Spirale um eine halbe Windung vorwärts. Die-

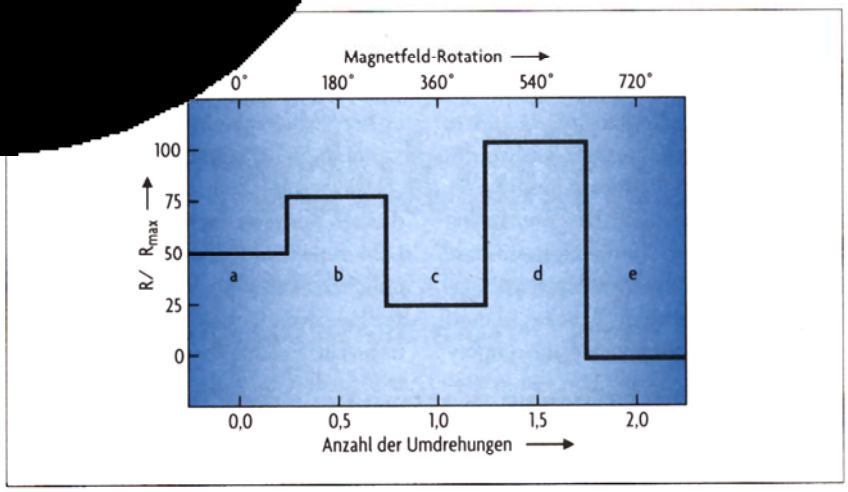

Bild 8. Zusammenhang zwischen elektrischem Widerstand und Anzahl der halben Umdrehungen bei dem GMR-Umdrehungssensor von Bild 7. (Quelle: IPHT/Novotechnik)

ser Vorgang ist wiederholbar und reversibel (**Bild 7**). Bei jeder halben Umdrehung des Feldes nehmen die einzelnen geraden Stücke der Spirale andere Magnetisierungszustände und damit andere Widerstandswerte ein (**Bild 8**), die gemessen werden. Die Zuordnung ist eindeutig. Um Temperatureinflüsse auszuschalten, sind vier derartige Sensorelemente zu einer Brücke zusammengeschaltet, paarweise mit gegenläufigem Wickelsinn. Um einen Gesamtwinkel von N × 360° damit erfassen zu können, muss die Spirale N Windungen haben. Am IPHT wurden bisher verschiedene Versionen für maximal zwölf Umdrehungen aufgebaut.

Die wichtigste geplante Anwendung dieses Sensors ist im Auto an der Lenksäule – in Kombination mit einem üblichen Drehwinkelsensor, um die derzeitige Servolenkung durch eine elektronisch [redacted] verschleißfreies Messverfahren. Entwicklungsleiter Dr. Roland Mattheis: „Die bisherigen Servolenkungen arbeiten hydraulisch und brauchen dafür permanent Öldruck. Das erhöht den Treibstoffverbrauch. Die zukünftigen Systeme verwenden einen Elektromotor, der mit sehr viel weniger Betriebsleistung auskommt, weil er nur dann aktiv wird, wenn man wirklich lenkt. Außerdem wird diese Lösung auch noch preiswerter."

Langfristig hat die Autoindus- [redacted] vor, die mechanische Kopp- [redacted] zwischen Lenkrad und Vor- [redacted] durch eine elektro- [redacted] ersetzen („Steer by [redacted] würde die Möglich- [redacted] dass der Bordcompu- [redacted] lichen Situationen, [redacted] mit seinem Können [redacted] (Schleudern), kor- [redacted] Lenkvorgang ein- [redacted] ment ist das noch [redacted] ftsmusik; wenn man [redacted] zum sicheren Funk- [redacted] ringt, dann könnte ein [redacted] System vielleicht man- [redacted] enschenleben retten. So [redacted] diese neuartigen Sensoren [redacted] wesentlichen Verbesserungen im Auto beitragen.

Literatur

[1] Tagungsband „9. Symposium Magnetoresistive Sensoren und magnetische Systeme", Wetzlar 13./14. 3. 2007; www.sensitec.com.

[2] *Lemme, H.:* Gigantischer Effekt wird industriereif. *Elektronik* 2005, H. 19, S. 76ff.

[3] *Lemme, H.:* Hallsensoren machen Karriere. *Elektronik* 2005, H. 9, S. 68ff.

[4] *Lemme, H.:* Ein Modul für alle Strombereiche. *Elektronik* 1999, H. 18, S. 71ff.

[5] *Lemme, H.:* Magnetfeld-Sensoren – vielseitige Helfer. *Elektronik* 1998, H. 3 , S. 40ff.

Dipl.-Phys. Helmuth Lemme
ist freier Mitarbeiter der *Elektronik* und betreut u.a. die Fachbereiche Sensorik, Photovoltaik, HF-Technik, Chipkarten und Optoelektronik.
hewlemme@onlinehome.de