

# Magnetische Messfühler en miniature

Tunnelmagnetowiderstands-Strukturen mit magnetostriktiven Materialien ermöglichen kleinere und empfindlichere Dehnungssensoren

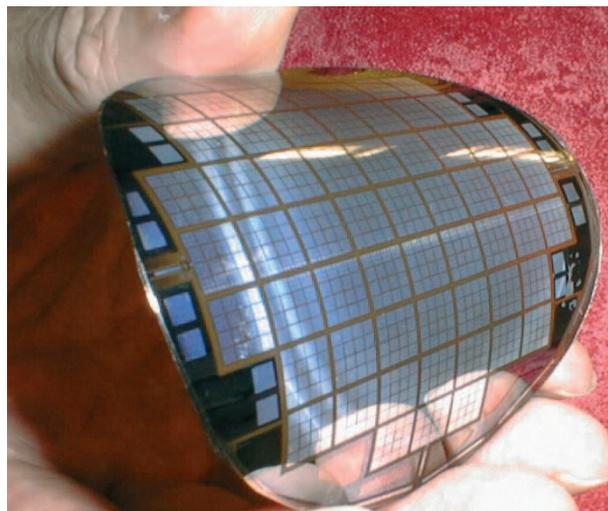
Stefani Dokupil, Markus Löhndorf, Manfred Rührig, Joachim Wecker und Eckhard Quandt

**Magnetische Schichtsysteme eignen sich als hochempfindliche Sensoren für Druck- und Zugbelastungen. Durch Kombination von Tunnelmagnetowiderstands-Elementen und „magnetostriktiven“ Materialien lassen sich Dehnungssensoren realisieren, die höhere Empfindlichkeit und eine weitere Miniaturisierung versprechen.**

Da der Trend allgemein zu immer kompakteren und höher integrierten elektronischen Bauteilen geht, steigt auch der Bedarf an miniaturisierter Sensorik für Regelungs- und Steuerungssysteme, wie man sie etwa in der Medizin- oder Automobiltechnik findet. Herkömmliche Dehnmessstreifen (DMS) und piezoresistive Dehnungssensoren nähern sich zwar allmählich diesen neuen Anforderungen, viele industrielle Anwendungen erfordern jedoch eine noch höhere Empfindlichkeit und das Potenzial zur weiteren Miniaturisierung. Diese Anforderungen könnte eine neue Generation von sehr kleinen und hochempfindlichen Dehnungssensoren erfüllen, bei denen so genannte Tunnelmagnetowiderstands-Elemente (TMR) mit magnetostriktiven Messschichtmaterialien kombiniert werden, welche bei Verformung oder Druck ihre magnetischen Eigenschaften ändern. Die so modifizierten TMR-Elemente könnten Dehnungsmessungen mit einer Ortsauflösung im sub- $\mu\text{m}$ -Bereich erlauben, lassen sich auf einer Vielzahl von Substraten herstellen und reagieren hochempfindlich auf mechanische Druck- und Zugspannungen – bei Verstärkungsfaktoren bis zu 600. Damit übertreffen sie herkömmliche metallische DMS um mindestens zwei Größenordnungen und die besten piezoresistiven Dehnungssensoren um einen Faktor 3 bis 4.

Das Verhalten der magnetostriktiven TMR-Elemente lässt sich in einem einfachen Modell erklären, indem man die freie Energie der magnetostriktiven Schicht minimiert. Dieses Modell und entsprechende Experimente verdeutlichen den Einfluss sowohl des Vorzeichens der Spannung als auch der Magnetostriktion auf die Sensorcharakteristik.

Der Magnetowiderstands-Effekt (Magnetoresistance, MR) beschreibt die relative Änderung des



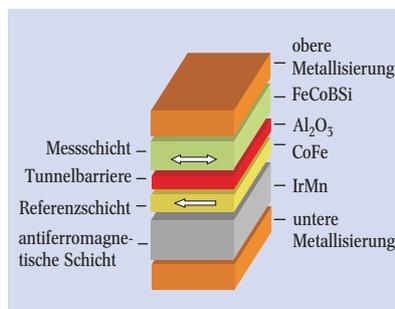
TMR-Dehnungssensoren lassen sich sehr klein und kompakt herstellen. So befinden sich auf dem hier gezeigten Plastik-Wafer rund 10000 magnetostriktive TMR-Sensoren. (Foto: Siemens)

Widerstandes eines Materials bei Anlegen eines Magnetfeldes. Beim TMR-Effekt, der bei Schichtsystemen aus ferromagnetischen Metallen und Isolatoren auftritt, ist die Widerstandsänderung auf einen spinabhängigen Tunnelstrom durch den Isolator zurückzuführen. Michel Jullière entdeckte den TMR-Effekt 1975 in einem Fe/Ge/Co-Dünnschichtsystem bei einer Temperatur von 4,2 K [1].

Das hohe Anwendungspotenzial insbesondere zur Datenspeicherung (MRAM, „magnetic random access memory“, [2]) sowie zur Magnetfeld- und Positionssensorik [3, 4] lenkte in den letzten Jahren die Aufmerksamkeit erneut auf diesen Effekt; sein Mechanismus wurde detailliert erforscht und die Materialsysteme wurden optimiert.

Ein grundlegender Ansatz, die Magnetowiderstands-Technologie zur mechanischen Spannungsdetektion zu verwenden, besteht in der Verwendung von Riesenmagnetowiderstands-Strukturen (Giant Magnetoresistance, GMR) in Kombination mit magnetostriktiven Materialien [5–8]. Bei einem (Co/Cu/Co/Cu/Co)-System konnte ein GMR-Effekt in Höhe von 23 % erreicht werden [9].

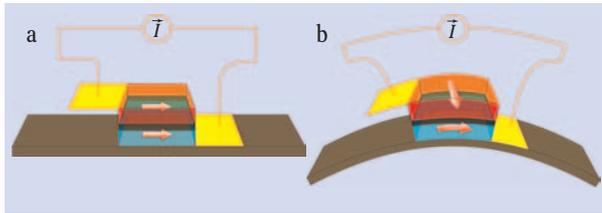
TMR-Strukturen sind deshalb besonders interessant als Spannungssensoren, weil sie im Vergleich zu den GMR-Systemen einen zwei- bis



**Abb. 1:** Schichtaufbau eines TMR-Elements: Die typischen Schichtdicken liegen dabei für die Referenz- und Messschicht zwischen 2,5 und 6 nm und für die Tunnelbarriere bei 1,5 nm.

Dipl.-Physik-Ing. (FH) Stefani Dokupil, Dr. Markus Löhndorf, Dr. Eckhard Quandt, caesar, Ludwig-Erhard-Allee 2, 53175 Bonn; Dr. Manfred Rührig, Dr. Joachim Wecker, Siemens AG, Corporate Technology CT MM 1, Postfach 3220, 91052 Erlangen – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Georg-Simon-Ohm-Preises 2004 an Stefani Dokupil auf der 68. Physikertagung in München.

dreifach größeren Effekt zeigen und zudem kleinere Baugrößen ermöglichen. Im Gegensatz zu GMR- sind TMR-Elemente hochohmig, da hier die magnetische Zwischenschicht isolierend statt leitend ist. Laterale Barrierengröße und Dicke der TMR-Zwischenschicht erlauben es dabei, den Widerstand in einem weiten Bereich einzustellen.



**Abb. 2:** Das Sensorprinzip eines TMR-Elements: Der Tunnelstrom fließt senkrecht durch den Schichtaufbau. Im ungedehnten Zustand (a) sind Referenz- und Messschicht parallel magnetisiert, unter mechanischer Beanspruchung (b) wird die Magnetisierung der Messschicht ausgelenkt. Dadurch ändert sich der Widerstand des TMR-Elements und damit der Tunnelstrom.

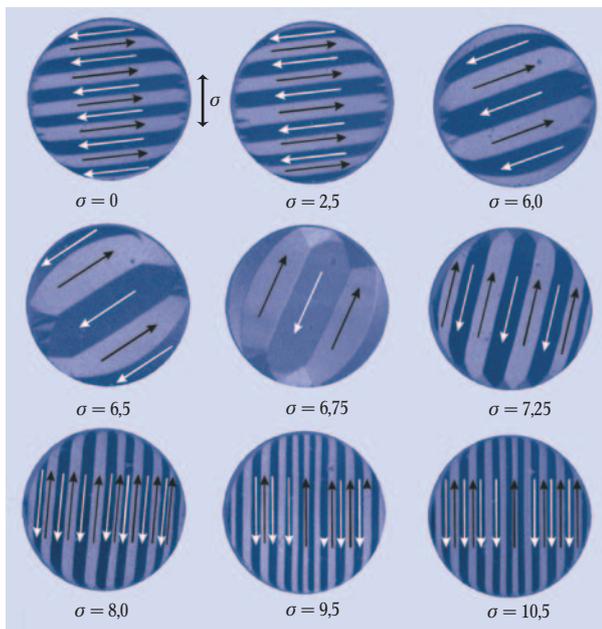
Ein TMR-Element besteht im einfachsten Fall aus zwei magnetischen, dünnen Schichten, die durch eine isolierende, nicht-magnetische Zwischenschicht, z. B. Aluminiumoxid, voneinander getrennt sind. Abbildung 1 zeigt einen typischen Aufbau eines tunneltmagnetoresistiven Elements.

Eine Widerstandsänderung in TMR-Strukturen tritt auf, wenn sich der Winkel  $\phi$  zwischen der unteren und oberen Magnetschicht ändert. Während bei Sensoranwendungen oder in MRAM-Elementen die Magnetisierung der weichmagnetischen Messschicht durch Magnetfelder oder Ströme verändert wird, dreht sich bei magnetostriktiven TMR-Strukturen die Messschicht auf Grund einer äußeren mechanischen Spannung in Folge inverser Magnetostriktion (Villari-Effekt). Abbildung 2 veranschaulicht das Sensorprinzip eines TMR-Dehnungssensors. Die daraus resultierende Widerstandsänderung wird beschrieben durch

$$R(\phi) = R(\phi=0) + 1/2 [R_{\max} - R_{\min}](1 - \cos\phi). \quad (1)$$

Der minimale Widerstandswert tritt dabei bei paralleler Orientierung ( $\phi=0^\circ$ ), der maximale bei antiparalle-

**Abb. 3:** Bei der inversen Magnetostriktion bewirkt die äußere mechanische Zugspannung  $\sigma$  (in willkürlichen Einheiten) eine Rotation der magnetischen Domänen, wie hier bei einem 500 nm dicken  $\text{Fe}_{70}\text{Co}_8\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$ -Element (Durchmesser  $220 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_S > 0$ ) gezeigt. (Quelle: Jeff McCord, IFW Dresden).



ler Orientierung ( $\phi=180^\circ$ ) auf. Die Referenzschicht wird i. A. so ausgelegt, dass sie erst bei hohen Feldern ummagnetisiert. Das lässt sich erreichen, indem man hartmagnetische Einzelschichten (z. B. CoFe) oder antiparallel gekoppelte Schichten wie etwa Co/Ru/Co verwendet, die einen künstlichen Antiferromagneten bilden [10], dessen Koerzitivfeld mit abnehmendem Nettomoment ansteigt [11]. Oder es wird, wie in Abb. 1 gezeigt, eine magnetische Schicht auf einem natürlichen Antiferromagneten (z. B. IrMn) abgeschieden und dann durch eine Austauschkopplung zu den unkompenzierten Spinmomenten der IrMn-Oberfläche fixiert („exchange-bias“-Effekt [12]).

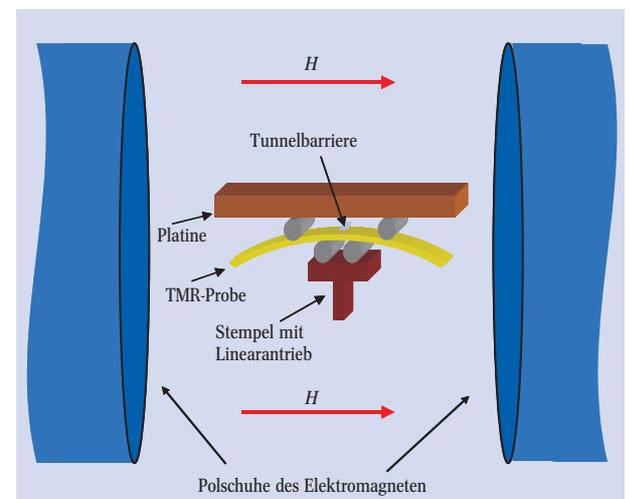
Das Verhalten der magnetostriktiven Messschicht lässt sich mittels Kerr-Effekt-Mikroskopie charakterisieren. So zeigt sich z. B. bei einer  $\text{Fe}_{70}\text{Co}_8\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$ -Schicht, wie die magnetischen Domänen unter Einfluss einer steigender Zugspannung  $\sigma$  rotieren (Abb. 3).

Auf Grund der  $180^\circ$ -Symmetrie der Magnetostriktion lassen sich magnetostriktiv nur Drehungen von maximal  $90^\circ$  erreichen, sodass sich nach Gl. (1) die maximal mögliche Widerstandsänderung im Vergleich zur Ummagnetisierung halbiert. Die Empfindlichkeit des Sensors wird durch den Verstärkungsfaktor, den „gauge factor“ (GF), angegeben. Dieser berechnet sich aus dem Verhältnis der relativen Widerstandsänderung und der absoluten Dehnung:

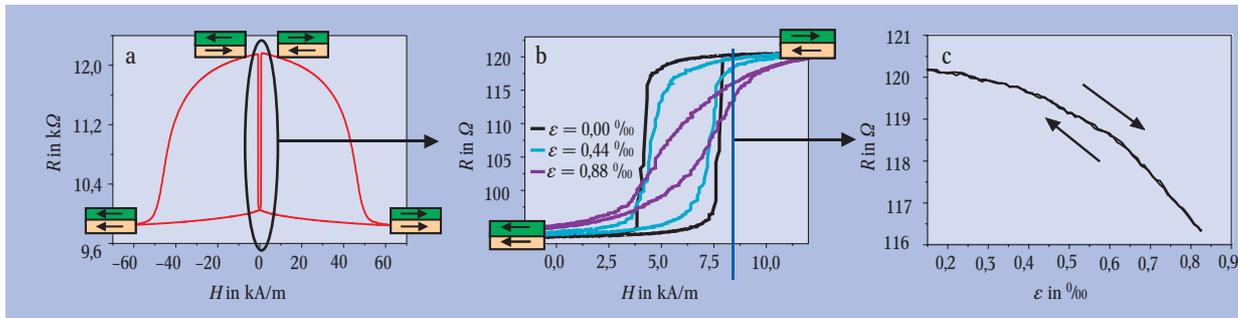
$$GF = (\Delta R/R_{\min})/\Delta \epsilon \quad (2)$$

Die im Folgenden diskutierten magnetostriktiven TMR-Schichtsysteme haben eine magnetisch fixierte Referenzschicht und verschiedene magnetostriktive Materialien als Messschichten. Um ein definiertes Sensorverhalten zu erreichen, muss zusätzlich die Orientierung der magnetostriktiven Messschicht im unbelasteten Zustand eingestellt werden. Eine Möglichkeit, die magnetisch „leichte“ Richtung („easy axis“, E. A.) einzuprägen, stellt die Glühbehandlung im Magnetfeld dar.

Die Orientierung der magnetostriktiven Schicht  $\phi$  in Bezug zur Richtung des angelegten Magnetfeldes  $H$  als Funktion der Spannung  $\sigma$  lässt sich durch ein einfaches Modell beschreiben, das auf der Minimierung der freien Energie basiert. Unter Vernachlässigung der



**Abb. 4:** In einem Dehnungsmessstand wird die TMR-Probe in einer Vier-Punkt-Biegevorrichtung zwischen den Polshuhen des Elektromagneten positioniert und vermessen.



**Abb. 5:** Bei typischen Widerstands-Feldstärke-Messungen lassen sich anhand des „major loop“ (a) Eigenschaften der Referenz- und Messschicht ableiten. Der Hysteresekurvenverlauf des „minor loop“ (b) gibt Aufschluss über das Verhalten der Messschicht. (c) zeigt das Widerstandsverhalten in einem Dehnungsbereich von 0,00–0,88 ‰ bei einem Magnetbias von 8,4 kA/m (10,5 mT).

Formanisotropie wird die freie Energie der Messschicht durch

$$E_{FL} \equiv -K_1 \cos^2(\phi - \beta) - \frac{3}{2} \sigma \lambda \cos^2(\phi - \gamma) - HM_S \cos \phi \quad (3)$$

beschrieben [13], wobei der erste Term die Kristallanisotropieenergie mit den Anisotropiekonstanten  $K_1$ , der zweite Term die magnetoelastische Energie mit der Magnetostriktion  $\lambda$  und der dritte Term die magnetostatische Energie mit der Sättigungsmagnetisierung  $M_S$  repräsentiert. Der Winkel zwischen der angelegten Spannung und dem Magnetfeld wird dabei mit  $\gamma$ , der Winkel zwischen Magnetfeld und leichter Richtung mit  $\beta$  bezeichnet.

### Herstellung von magnetostriktiven TMR-Elementen

Als Probensubstrat dienten 330  $\mu\text{m}$  dicke Siliziumwafer (100), deren Oberfläche aus einer 0,5  $\mu\text{m}$  dicken thermischen Oxidschicht bestand. Alle TMR-Dünnschichtsysteme wurden durch Magnetronspütern hergestellt. Als Keimschicht diente in allen TMR-Systemen eine dünne Tantalschicht als Haftvermittler zum Substrat. Dieser Schicht folgte eine 30 nm dicke Kupferschicht als untere Elektrode, und anschließend die Referenzschicht als CoFe-Einzelschicht oder in der oben beschriebenen „exchange-bias“-Anordnung. Anschließend wurde eine 1,5 nm dicke Aluminiumschicht abgeschieden, die in einem Plasma oxidiert wurde.

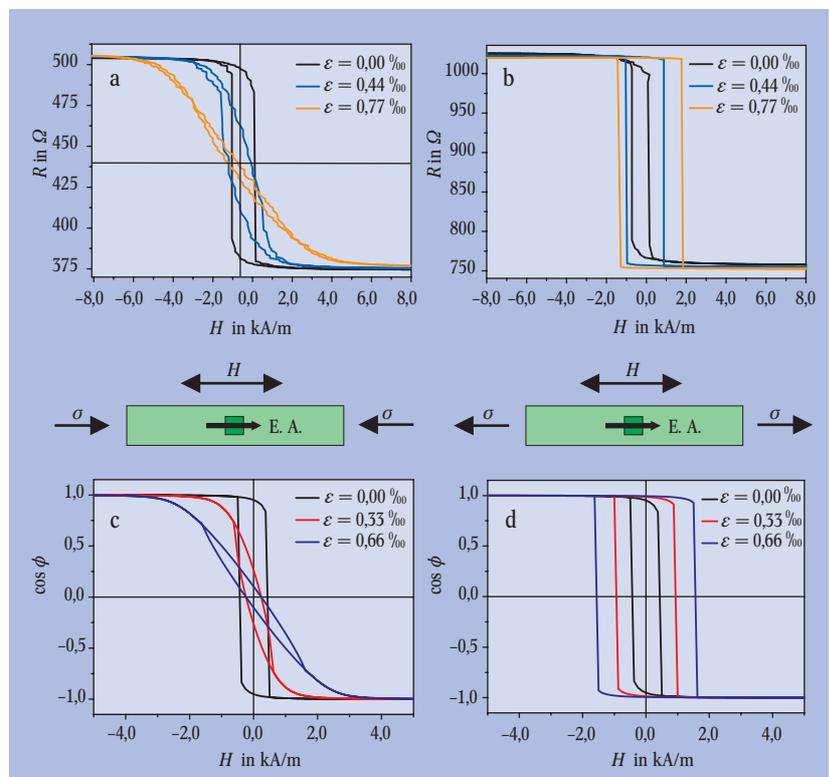
Für die spezielle Sensoranwendung hat die auf die Tunnelbarriere folgende Messschicht zwei Hauptkriterien zu erfüllen: Zum einen muss das Material einen hohen magnetoelastischen Kopplungskoeffizienten besitzen, und zum anderen soll mit diesen magnetostriktiven Materialien ein hoher TMR-Effekt erzielt werden. Im Einzelnen untersuchten wir als Messschichten polykristallines  $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$  mit einer sehr hohen positiven Magnetostriktion von  $\lambda \approx 100 \times 10^{-6}$ , amorphes  $\text{Fe}_{70}\text{Co}_8\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$  mit einer positiven Magnetostriktion von  $\lambda \approx 30 \times 10^{-6}$  sowie polykristallines Ni und amorphes  $\text{Co}_{80}\text{B}_{20}$  als negativ magnetostriktive Werkstoffe ( $\lambda \approx -30 \times 10^{-6}$  bzw.  $-5 \times 10^{-6}$ ). Dabei schützte eine Ta-Schicht den Schichtaufbau gegen Oxidation. Auf diese Schutzschicht wurde dann die obere Elektrode, eine 50–100 nm dicke Al-Schicht, aufgebracht. Die magnetisch leichte Richtung wurde durch Anlassen bei einer Temperatur von 270 °C unter Argonschutzatmosphäre in einem Magnetfeld mit der Stärke von 500 mT eingepägt.

### Versuchsaufbau

Mit Vier-Punkt-Biegung im Magnetfeld lassen sich die magnetostriktiven TMR-Sensoren charakterisieren (Abb. 4). Dazu wurden die Wafer in Biegebalken (3 × 30 mm<sup>2</sup>) vereinzelt und die Elektroden über Drahtbonden mit einer Strom-Spannungsquelle kontaktiert. Die elek-

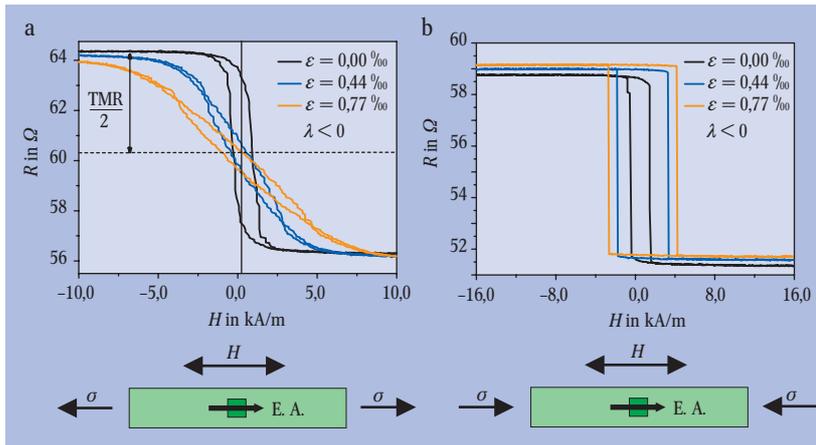
trischen Widerstandswerte konnten damit als Funktion der Dehnung (durch einen Linearantrieb mit einer Empfindlichkeit von 0,005 ‰/ $\mu\text{m}$ ) und des Magnetfeldes aufgezeichnet werden. Der Einbau der Probe in die Biegevorrichtung bestimmte die Orientierung zwischen mechanischer Spannungsrichtung und der Richtung der leichten Achse, das externe Magnetfeld ließ sich dabei in beliebiger Richtung anlegen.

Mit Hilfe einer Widerstands-Magnetfeldstärke-Messung kann das Hystereseverhalten der Referenz- und Messschicht untersucht werden. Durchläuft man dabei einen relativ hohen Feldstärkenbereich, so gibt die Messung Aufschluss über das Ummagnetisierungsverhalten der Referenz- und Messschicht („major loop“). Die Hysteresekurve in Abb. 5a verdeutlicht den geringeren elektrischen Widerstand für die parallele Konfiguration, der bei hohen Feldstärken erreicht wird, sowie das unterschiedliche Schalten der weichmagnetischen (hier der magnetostriktiven) und der hartmagnetischen Referenzschicht. In dem Feldbereich, in dem sich die Messschicht ummagnetisieren lässt, zeichnet



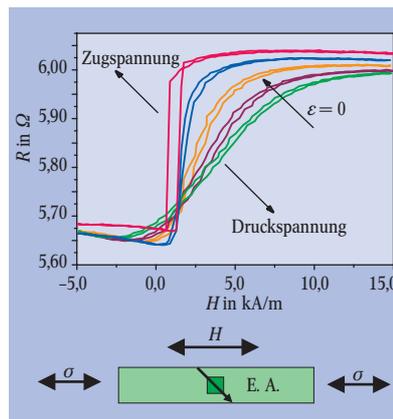
**Abb. 6:** Widerstands-Feldstärke-Messungen bei einer 20 × 20  $\mu\text{m}^2$  großen Tunnelbarriere (Messstrom: 10 mA,  $\sigma$ : mechanische Spannung, E. A.: „easy axis“): a) zeigt das Widerstandsverhalten unter Zugspannung, b) bei Druckspannung. Mit dem Modell der minimalen freien Energie unter Dehnung lässt sich das prinzipielle Verhalten der Messschicht bei Auslenkung der magnetischen Domänen in die harte Richtung (c) bzw. bei zusätzlicher Stabilisierung der magnetischen Domänen in die leichte Richtung (d) gut simulieren.

man die so genannten „minor loop“-Messungen auf. Bei gleichzeitigem Anlegen einer mechanischen Spannung misst man so, wie sich das magnetische Verhalten als Funktion der Dehnung in Folge der inversen Magnetostraktion ändert. Im vorliegenden Beispiel (Abb. 5b) ist die leichte Magnetisierung im ungedehnten Zustand parallel zum externen Magnetfeld ausgerichtet und wird durch eine Spannung aus dieser Orientierung heraus gedreht. Abb. 5c zeigt das eigentliche Sensorverhalten durch eine Widerstands-Dehnungskurve, aufgenommen bei einem konstanten Biasfeld von 8,4 kA/m. Anhand dieser Kurven ließen sich der Messbereich, der Verstärkungsfaktor und gegebenenfalls auftretende Hysteresen des Sensors bestimmen.



**Abb. 7: ▲** Widerstands-Feldstärke-Messungen an TMR-Proben mit negativ magnetostriktiver Ni-Messschicht (Tunnelbarriergroße:  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ , Messstrom:  $50 \mu\text{A}$ ): Messung bei Zug- (a) und Druckspannung (b).

**Abb. 8: ►** Widerstands-Feldstärke-Messung an einem TMR-Element mit 6 nm dicker  $\text{Fe}_{70}\text{Co}_8\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$ -Messschicht, deren leichte Magnetisierungsrichtung durch nachträgliche Glühbehandlung um  $45^\circ$  gedreht wurde. In dieser Konfiguration spricht das Sensorelement auf Zug- und Druckspannung an.



Der höchste TMR-Effekt (48 %), mit einem GF von etwa 600, konnte für ein TMR-System erzielt werden, das mit einer polykristallinen, positiv magnetostriktiven, 2,5 nm dicken  $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ -Messschicht versehen war [14]. Für ein TMR-System mit einer amorphen, positiv magnetostriktiven, 6 nm dicken  $\text{Fe}_{70}\text{Co}_8\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$ -Messschicht ließ sich ein TMR-Effekt von 35 % erzielen. Abbildung 6 zeigt die Auswirkung von Zug- und Druckspannung auf das Widerstandsverhalten an zwei verschiedenen  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$  großen Tunnelbarrieren. Die Spannung war parallel zur leichten Richtung der Probe angelegt, bei gleichzeitig paralleler Ausrichtung zum Magnetfeld.

Mit zunehmender Dehnung durch Zugspannung (Abb. 6a) werden die magnetischen Domänen in der magnetischen Vorzugsrichtung stabilisiert, wodurch sich die Hysterese verbreitert und somit eine größere Koerzitivfeldstärke vorliegt. Im Falle der Druckspannungsmessung (Abb. 6b) dreht die zunehmende Dehnung die magnetischen Domänen in die harte Richtung, was nicht nur den Magnetisierungsverlauf schert, sondern auch die Hysterese verringert.

Das Modell der Minimierung der freien Energie gibt dieses prinzipielle Verhalten bei Verwendung realistischer Fit-Parameter gut wieder (Sättigungsmagnetisierung  $M_S = 2,46 \text{ T}$ , Anisotropiekonstante  $K = 1 \times 10^{-3} \text{ J/m}^3$ , Magnetostraktion  $\lambda = 1 \times 10^{-5}$ , Elastizitätsmodul  $E = 200 \text{ GPa}$ ). Abbildungen 6c und d zeigen den Kosinus des Winkels  $\phi$ , der nach Gl. (1) den Widerstand bestimmt, als Funktion des externen Magnetfeldes für drei verschiedene Dehnungszustände sowohl in Druck- wie auch in Zugspannungsrichtung.

Weiteren wurden Untersuchungen an TMR-Systemen durchgeführt, die mit einer negativ magnetostriktiven Messschicht versehen waren. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse einer TMR-Probe, die eine polykristalline, 6 nm dicke Ni-Messschicht aufwies und zusätzlich mit einer 2 nm dicken Co-Schicht zur Erhöhung der Spinpolarisation versehen wurde. Unter Zugspannung, wie nach Gl. (3) auf Grund des Vorzeichenwechsels in der magnetoelastischen Energie erwartet, verhält sich diese Probe genau umgekehrt zu der positiv magnetostriktiven TMR-Probe (Abb. 6), d. h. dass die magnetischen Domänen bei gleicher Messkonfiguration jetzt durch die Zugbeanspruchung aus der leichten in die harte Richtung gedreht werden. Unter Druckspannung hingegen werden die Domänen in Richtung der magnetischen Vorzugsrichtung stabilisiert.

Die TMR-Elemente in der Messkonfiguration, wie oben beschrieben, waren in Abhängigkeit von dem Vorzeichen der Magnetostraktion nur in Druck- oder Zugbelastung als Sensor einsetzbar. Das Signal eignet sich gut zur Sensoranwendung, wenn die harte Richtung schert und sich ein gradueller Übergang des Widerstandsverhaltens ergibt, so wie es in Abbildung 7a zu sehen ist. Daher galt es, eine Konfiguration zu finden, bei der der Sensor sowohl unter Zug als auch unter Druck empfindlich ist. Dazu wurde eine TMR-Probe, mit einer positiv magnetostriktiven  $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ -Messschicht einer nachträglichen Glühbehandlung unterzogen, mit der die magnetische Vorzugsrichtung in einem Winkel von  $45^\circ$ , relativ zu den Seitenlängen der Tunnelbarrieren, ausgerichtet wurde [15]. Die Hysteresekurve ist dann schon im unbelasteten Zustand geneigt (Abb. 8).

Wird das Tunnелеlement einer Zugspannung ausgesetzt, so führt dies zu einer verstärkten Ausrichtung der magnetischen Domänen parallel zur Spannungsrichtung und zum homogenen Magnetfeld, und die Kurve verläuft zunehmend steiler. Bei einwirkender Druckspannung kommt es zu einer Ausrichtung der Domänen in die harte Richtung, d. h. senkrecht zum homogenen Magnetfeld, was mit einem zunehmend flacheren Kurvenverlauf korreliert.

### Zusammenfassung und Ausblick

Durch Kombination von magnetostriktiven und magnetoresistiven Effekten, speziell dem TMR-Effekt, gelang es, höchstempfindliche Dehnungssensoren zu realisieren, die sehr klein sind sowie eine weitgehend freie Substratwahl ermöglichen. Das Verhalten der magnetostriktiven Messschicht lässt sich durch ein einfaches Energiemodell in guter Übereinstimmung zu den Experimenten modellieren. Folgende Arbeiten werden zum einen die Integration in CMOS-Technologie und Si-Mikromechanik behandeln, zum anderen sollen die magnetostriktiven Messschichten optimiert und Skalierungseffekte untersucht werden.

## Danksagung

Die Autoren möchten sich für die finanzielle Unterstützung dieses Projektes durch das BMBF (Förderungsnummer 13N7943 und 13N8492) bedanken. S. D. dankt ferner Herrn Prof. Dr. Uvo Hölscher, der die Betreuung dieser Arbeit seitens der Fachhochschule Münster übernommen hat.

## Literatur

- [1] *M. Jullière*, Phys. Lett. **54A**, 225 (1975)
- [2] *S. S. P. Parkin et al.*, J. Appl. Phys. **85**, 5828 (1999)
- [3] *D. DiLella et al.*, Sens. Actuators **86**, 8 (2000)
- [4] *M. Rührig et al.*, IEEE Trans. Magn. MAG-**40**, 101 (2004)
- [5] *R. C. O'Handley und J. R. Childress*, IEEE Trans. Magn. **31**, 2450 (1995)
- [6] *H. J. Mamin, B. A. Gurney, d. R. Wilhoit und V. S. Speriosu*, Appl. Phys. Lett. **72**, 3220 (1998)
- [7] *L. Baril, B. Gurney, D. Wilhoit und V. Speriosu*, J. Appl. Phys. **85**, 5139 (1999)
- [8] *T. Duenas et al.*, JMMM **242-245**, 1132 (2002)
- [9] *W. F. Egelhoff et al.*, J. Appl. Phys. **79**, 5277 (1996)
- [10] *P. Grünberg, R. Schreiber und Y. Pang*, Phys. Rev. Lett. **57**, 2442 (1986)
- [11] *H. A. M. van den Berg et al.*, JMMM **165**, 524 (1997)
- [12] *W. H. Meiklejohn und C. P. Bean*, Phys. Rev. **105**, 904 (1957)
- [13] *D. O. Smith*, J. Appl. Phys. **29**, 274 (1958)
- [14] *M. Löhndorf et al.*, Appl. Phys. Lett. **81**, 313 (2002)
- [15] *M. Löhndorf, S. Dokupil, M. Rührig, J. Wecker und E. Quandt*, Proc. of SPIE **5116**, 100 (2003)

## Die Autoren

**Stefani Dokupil** absolvierte nach dem Abitur zunächst eine Ausbildung zur Krankenschwester und studierte anschließend Physikalische Technik an der FH Münster. Dabei verbrachte sie ein Praxissemester in der Forschungsabteilung der Medizintechnikfirma JOMED in San Diego, Kalifornien. Ihre mit dem Georg-Simon-Ohm-Preis ausgezeichnete Diplomarbeit fertigte



Dokupil beim Forschungszentrum caesar an, in dem sie nun als wissenschaftliche Mitarbeiterin tätig ist.

**Markus Löhndorf** studierte Physik in Hamburg. 1997 promovierte er dort und arbeitete im Anschluss daran am National Institute of Standards and Technology (NIST) in Boulder, Colorado (USA). Seit 1999 forscht er bei caesar und leitet seit 2003 die Arbeitsgruppe Mikro- und Nanostrukturen. **Manfred Rührig** studierte Werkstoffwissenschaften an der Universität Erlangen, wo er auch promovierte. Nach mehreren Auslandsaufenthalten arbeitet er seit 2001 bei der Siemens AG (Erlangen) und beschäftigt sich mit der mikromagnetischen Auslegung von Sensoren und Speicherlelementen. **Eckhard Quandt** studierte und promovierte an der TU Berlin. Ab 1991 forschte er am Institut für Materialwissenschaften des Forschungszentrums Karlsruhe. Seit 1999 leitet er die caesar-Arbeitsgruppe „Smart Materials“. **Joachim Wecker** studierte Physik in Göttingen und wechselte nach der Promotion zur Siemens AG (Erlangen). Er leitet dort z. Zt. eine Projektgruppe zur Entwicklung magnetoelektronischer Bauelemente.