



# TMR-Tech – TMR-Sensoren als Technologieplattform für Anwendungen im Automobilbereich

**Förderkennzeichen** 13N9053  
**Laufzeit** 01.10.2007 – 30.06.2009  
**Projektleiter** Prof. Dr.-Ing. Eckhard Quandt  
Anorganische Funktionsmaterialien  
Institut für Materialwissenschaft  
Christian-Albrechts-Universität Kiel  
Kaiserstrasse 2  
24143 Kiel

**Kooperationspartner** Infineon



SIEMENS AG



Universität Kassel



## Gliederung

1	Einführung.....	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen bei der Durchführung des Projektes.....	4
1.3	Projektplan.....	4
1.4	Wissenschaftlich-technischer Stand .....	5
1.4.1	TMR basierte Stromsensoren.....	5
1.4.2	TMR basierte Dehnungs- und Drucksensoren .....	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	8
2	Ergebnisse – Berichtszeitraum 01.10.2007 – 30.06.2009 .....	9
2.1	Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse      Teilvorhaben CAU-Kiel .....	9
2.1.1	Hochempfindliche TMR-Dehnungssensoren.....	9
2.1.2	Der TMR-Drucksensor.....	11
2.1.2.1	<i>Drucksensoren auf BMM-Membranen</i> .....	11
2.1.2.2	<i>Untersuchungen zur Langzeitstabilität</i> .....	12
2.1.2.3	<i>Nachweis der Machbarkeit von TMR-Sensoren auf SMM-Membranen</i> ..	13
2.1.2.4	<i>Drucksensoren auf SMM-Membranen</i> .....	13
2.1.3	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	15
2.2	Verwertung der Ergebnisse .....	15
2.3	Veröffentlichungen.....	15
2.3.1.1	Proceedings-Beiträge: .....	15
	• D. Meyners, T. von Hofe, M. Vieth, M. Rührig, S. Schmitt, and E. Quandt, J. Appl. Phys. 105, 07C914, 2009 .....	15
2.3.1.2	Konferenzbeiträge: .....	15

# 1 Einführung

Im Zeitraum vom 1. Oktober 2007 bis zum 30. Juni 2009 wurde das vom BMBF geförderte Projekt TMR-Tech (Fördernummer 13N9053) von der Forschungsgruppe für Anorganische Funktionsmaterialien von Prof. Quandt an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU-Kiel) bearbeitet. Es handelte sich hierbei um eine Vorsetzung der bei der Stiftung caesar in Bonn begonnenen Forschungsarbeiten (TMR-Tech, Fördernummer 13N9083).

Das Gesamtvorhaben zielte darauf ab, den TMR Effekt hinsichtlich seiner Anwendung in Sensorbauelementen zu untersuchen. Dazu sollten die in dem Vorgängerprojekt (MAGNOS) gewonnenen Ergebnisse zum GMR-Effekt auf den TMR-Effekt erweitert werden. Beide Effekte (GMR und TMR) bilden die Basis der Magneto- und Spinelektronik, die wiederum ein Teil ist des BMBF Förderprogramms: „IT-Forschung 2006“ (<http://www.foerderinfo.bmbf.de/de/300.php>).

Für Forschung und Entwicklung war das Projektkonsortium, bestehend aus der CAU-Kiel und der Infineon Technologies AG, München, zuständig. Die genannten Projektpartner, und als weitere Unterauftragnehmer die Siemens AG, Erlangen, und die Universität Kassel, vereinigten dabei Kompetenzen aus den Bereichen der Materialwissenschaften, Dünnschichttechnologie, Mikrosystemtechnik, Nanotechnologie, Mess- und Gerätetechnik, numerische Simulation und Elektronik.

## 1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war die Untersuchung des magnetoresistiven Tunneleffekts (TMR-Effekt) als mögliche Plattformtechnologie für Sensorbauelemente für Anwendungen in der Automobilindustrie.

Der Plattformgedanke in Kombination mit CMOS-Technologie sowie ggf. Oberflächen-Mikromechanik (SMM, surface micromachining) sollte anhand zweier unterschiedlicher Anwendungen verdeutlicht werden. Zum einem sollte das Konzept des magnetoresistiven Dehnungssensors weitergeführt werden und auf den TMR Effekt erweitert werden, der im Vorgängerprojekt MAGNOS als hochintegriertes Bauteil nur auf der Basis des technologisch einfacheren GMR (giant magnetoresistiven) Effekts untersucht worden war. Zum anderen sollte die Verwendung des TMR Effekts in einem Magnetfeldsensor untersucht werden und damit sein Potential für eine Vielzahl von Anwendungen gezeigt werden, die letztendlich auf eine Magnetfeldmessung reduziert werden können (also z.B. in der Positions-

Geschwindigkeits-, Stromsensorik). Auf Grund der Komplexität der zu untersuchenden Technologie, war die Evaluierung einer Plattformtechnologie mit den damit verbundenen höheren Stückzahlen Voraussetzung für eine erfolgreiche industrielle Umsetzung.

## ***1.2 Voraussetzungen bei der Durchführung des Projektes***

Die CAU-Kiel (FG Anorganische Funktionsmaterialien) bringt als zweiter Antragsteller neben der Firma Infineon und deren Unterauftragnehmern ihre Kompetenz in der Entwicklung magnetostriktiver Materialien, der lithografischen Strukturierung und der elektrischen und magnetischen Charakterisierung ein.

Das Projekt beinhaltet die komplette Entwicklungskette von der Konzipierung, Spezifikation und Definition von TMR-Sensorschichtsystemen über die Analysephase diskreter Teststrukturen und die notwendige Si-Prozesserweiterung bis hin zur Realisierung eines integrierten Sensorsystems in Form eines Drucksensor-Demonstrators.

## ***1.3 Projektplan***

Das Ziel von TMR-Tech war, die TMR-Technologie als Plattform für Sensoren im Automobilbereich zu evaluieren. Kriterien zur Bewertung der Eignung als Technologieplattform waren die Erfüllung typischer Spezifikationen der Automobilindustrie sowie die Möglichkeit zur Integration mit CMOS-Technologie und ggf. Oberflächenmikromechanik.

Das Projekt wird von Infineon Technologies AG in Person von Herrn S. Schmitt (Sense & Control, AIM SC D MUC TD3) geleitet worden. Neben der Gesamtkoordination des Projekts lag der Hauptschwerpunkt der experimentellen Arbeiten bei Infineon hauptsächlich in der Anwendung des TMR Effekts in der Magnetfeld-Sensorik (z.B. Strom, Position) und der Bewertung der Eigenschaften für diese Anwendung. Die Siemens AG, CT war im Unterauftrag von Infineon an der Konzeptentwicklung beteiligt und wirkte bei der Entwicklung und Auslegung des magnetischen Schichtstapels maßgeblich mit. Zusätzlich ist die Messmethodik (zur Charakterisierung magnetischer Eigenschaften und Transporteigenschaften sowie für Rauschmessungen) zur Verfügung gestellt worden.

Zweiter Antragsteller war die Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, die sich vornehmlich mit der Integration der TMR Sensoren in Dehnungs- und Drucksensoren beschäftigte. Dabei wurde sowohl auf eigene Technologie in Form von BMM (bulk micro-machined) Substraten als auch auf vorprozessierte Scheiben von Infineon in SMM (surface micro-machined)

Technologie aufgesetzt. Die Universität Kassel (Lehrstuhl von Prof. Reithmaier) hat Infineon im Unterauftrag mit FEM Simulationen zum mechanischen Verhalten von BMM/SMM Membranen und zu deren optimaler Auslegung für TMR-Drucksensoren unterstützt.

## ***1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand***

Der magnetoresistive Tunneleffekt TMR (*t*unneling *m*agneto *r*esistive) wurde in der Mikroelektronik seit längerer Zeit intensiv untersucht, da man hoffte, damit neue nichtflüchtige und hoch integrierbare Speicherbausteine (MRAM, *m*agnetic *r*andom *a*ccess *m*emories) herstellen zu können. Für Sensoren war der Effekt dagegen noch relativ neu und war für technische Anwendungen nur wenig untersucht worden. Sein Potenzial wurde lediglich durch den Einsatz TMR basierter Leseköpfe in neuesten Festplattenlaufwerken mit höchsten Kapazitäten erkennbar. Vorteilhaft waren seine günstigen Skalierungseigenschaften wie hohes Signal bei gleichzeitiger weiterer Miniaturisierbarkeit. Hier war bereits zu Projektbeginn abzusehen, dass die GMR Technologie, die die Lesekopfentwicklung in den vergangenen 2 Jahrzehnten entscheidend vorangebracht hat, an ihre Grenzen stoßen wird.

### ***1.4.1 TMR basierte Stromsensoren***

#### **Literatur**

Wenn man die auf den einschlägigen Fachkonferenzen (z.B. Intermag oder MMM) veröffentlichten Beiträge betrachtete, so sind diejenigen, die sich mit den neueren MR Effekten (GMR, TMR) beschäftigten, in den letzten Jahren immens angestiegen, wobei die Arbeiten nicht nur die Erforschung der Grundlagen der Effekte betrafen, sondern vermehrt auch industrielle Anwendungen. Neben Arbeiten zu Festplatten-Leseköpfen und MRAM Speichern standen und stehen natürlich Magnetfeldsensoren im Mittelpunkt sowie zuletzt auch Vorschläge für Biosensoren mit magnetischem Ausleseprinzip. Neben der Signalsteigerung und höherer Empfindlichkeit sowie der Verbesserung der thermischen Stabilität der Schichtsysteme (in Blickrichtung auf verbesserte Prozesssicherheit) nahm auch die Integrierbarkeit in die existierende Si-Technologie (CMOS-Kompatibilität) einen immer breiteren Rahmen ein.

## **Patentsituation**

Aufgrund der Ähnlichkeit zwischen TMR und GMR Effekt musste man natürlich zunächst alle Patente betrachten, die einen Sensor auf GMR Basis beschreiben und da insbesondere die „Spin-Valve“ Patente (z.B: EP 0490608, US 5465185 und US 5701223), die sich mit Sensoren für die magnetische Datenspeicherung beschäftigten. Der TMR Effekt als solches ist seit den 70er Jahren theoretisch bekannt und in den 90er Jahren erstmals bei Raumtemperatur nachgewiesen worden. Seit dem sind einige verfahrenstechnische und anwendungsbezogene Anmeldungen entstanden, die sich mit der zuverlässigen Herstellung TMR basierter Bauelemente, der Vergrößerung des TMR Signals bzw. der Verbesserung der Kennlinie und der Anwendung in Bauelementen befassten. Unter anderem waren dies Bauelemente für Sensor und Speicheranwendungen, von denen man in naher Zukunft die erste Umsetzung in marktreife Produkte erwartet. Die Projektbeteiligten befassten sich alle seit längerer Zeit auch mit TMR Anwendungen und haben in dieser Zeit auch eine Reihe von Patenten erarbeitet, die sich mit Sensor und Speicheranwendungen von TMR basierten Systemen beschäftigten.

Für die Anwendung als Stromsensor existierte ebenfalls schon eine Reihe von Patenten, die sich hauptsächlich mit dem Aufbau und der Kombination eines Feldsensors mit einer Strombahn befassten (US 5621377 und EP 1581817) aber auch insbesondere mit GMR Sensoren (was oftmals dann auch TMR beinhaltet z.B. US 6429640 und WO 2005054887). Es war zu erwarten, dass sich im Laufe des Projekts die eine oder andere Patentanmeldung ergeben wird insbesondere was integrierte Stromsensoren betrifft.

### ***1.4.2 TMR basierte Dehnungs- und Drucksensoren***

#### **Literatur**

Der Entwicklungsstand zu Projektbeginn auf dem Gebiet der magnetostriktiven TMR Dehnungssensoren konnte hauptsächlich durch Arbeiten belegt werden, die bei der Stiftung caesar im Rahmen eines Pilotprojektes (FKZ. 13N7943) und in den anschließenden Projekten MAGNOS (FKZ 13N8492) und TMR-Tech (FKZ 13N9083) durchgeführt wurden. Im Folgenden sind drei der wissenschaftlichen Veröffentlichungen aufgeführt, die den Fortschritt dieser Arbeit belegen konnten: M. Löhndorf, T. Duenas, M. Tewes, E. Quandt, M. Rührig, J. Wecker: Highly sensitive strain sensors based on magnetic tunneling junctions, Appl. Phys. Let., Vol. 81 No. 2, pp. 313-325 (July 2002); M. Löhndorf, S. Dokupil, M. Rührig, J.

Wecker, E. Quandt: Development of strain sensors utilizing giant magnetoresistive and tunneling magnetoresistive devices, Proceedings of SPIE, Vol. 5116 (1), pp. 100-108 (Mai 2003).

Die Ergebnisse der Vorstudie zu dem Projekt TMR-Tech können in folgender Publikation nachgelesen werden: M.-T. Bootsmann, S. Dokupil, E. Quandt, T. Ivanov, N. Abedinov, M. Löhndorf: Switching of magnetostrictive micro-dot arrays by mechanical strain, IEEE Trans. Magn., Vol. 41, No. 10 (Oct. 2005).

Die bei caesar zum TMR-Tech-Projekt durchgeführten Untersuchungen führten auch zu folgender Publikation: Meyners, D., Puchalla, J., Dokupil, S., Lohndorf, M., Quandt, E.: Magneto-electronical Sensors for Mechanical Measurements, ECS Trans. **3**, (25), 2007, p. 223.

### **Patentsituation**

Bekannt waren US-Patente (US 5,168,760 und US 5,856,617), die spezifische GMR-Strukturen zur Nutzung in magnetostruktiven Sensoren beschreiben (s. auch Antrag zum Vorprojekt „MAGNOS“). Nach derzeitiger Kenntnis sind dies aber keine grundlegenden Patente, die einer Verwertung der in diesem Projekt erarbeiteten Lösungen im Wege stünden. Die Antragsteller hatten zu MR basierten Dehnungssensoren im Vorgängerprojekt mehrere Anmeldungen eingereicht, die sich insbesondere mit der speziellen Aufmagnetisierung von Widerstands-Brückenelementen beschäftigten aber auch mit der Kombination von Materialien unterschiedlichen Magnetostruktionskonstanten. Diese berücksichtigten bereits die Möglichkeit GMR durch TMR zu substituieren.

Es waren weltweit nur Konkurrenzarbeiten auf dem Gebiet der magnetostruktiven GMR-Sensoren bekannt. Bei R. C. O’Handley und J. R. Childress „New Spin-Valve Magnetic Field Sensor Combined with Sensing and Strain Compensation“ (1995) ist ein zweielementiger Sensor auf der Basis des GMR-Effekts beschrieben worden, um den Einfluss von mechanischer Spannung und magnetischem Feld auf das Sensorsignal zu trennen. H. J. Mamin et al. erklärte in „High Sensitivity Spin-Valve Strain Sensor“ (1998) einen Sensor aus einer gepinnten magnetischen Lage, einer nichtmagnetischen Lage und einer freien magnetostruktiven Schicht in einem Aufbau, der ein magnetisches Biasfeld benötigte, um die Änderung des elektrischen Widerstands auf Grund der mechanischen Spannung zu detektieren.

Die im dem Projekt MAGNOS erzielten Dehnungsempfindlichkeiten (relative Widerstandsänderung/ relative Dehnungsänderung) von bis zu 600 waren nicht nur im Vergleich zu den

genannten Arbeiten konkurrenzlos. Bei Dehnmessstreifen, die auf der Änderung des elektrischen Widerstands innerhalb eines dünnen Metallfilms basierten, lagen die Werte im Bereich von 2-4, während piezoresistive Sensoren Maximalwerte von 180 erreichten.

### ***1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen***

Für die erfolgreiche Bearbeitung des TMR-Tech-Projektes war eine enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit mit den eingangs erwähnten Firmen und der Universität Kassel notwendig. Ihre jeweiligen Kompetenzen ergänzten sich erfolgreich. Die Infineon AG hat langjährige Erfahrungen in der Entwicklung und Herstellung von Drucksensoren und Drucksensorsystemen, sowohl in Bulk-Micro-Machining als auch in Surface-Micro-Machining. Sie übernahm die Betreuung der Produktentwicklung beginnend bei Design und Layout über die Prozessierung der Halbleiterscheiben bis zur Montage in sensorspezifischen Gehäusen. Die CAU Kiel leistete die Forschungsarbeiten auf den Gebieten der Materialwissenschaften, insbesondere der magnetostriktiven Werkstoffe in Kombination mit den TMR-Sensoren, und ihrer Prozessierung. Dabei waren vor allem Kenntnisse aus der Dünnschichttechnologie und Lithographie sowie in der Anwendung verschiedener Ätzverfahren von Vorteil. Die daraus resultierenden Erfahrungen sind in die Sensor-Fertigung mit eingeflossen. Die Siemens AG hat langjährige Erfahrungen in der Entwicklung von magnetoelektronischen Schichtsystemen und Bauelementen vorzuweisen, die bei der Entwicklung des Stromsensors zum Tragen kamen. Sie unterstützte das Projekt durch Optimierung der Schichtsysteme und lieferte die elektrische Charakterisierung von TMR-Stromsensorelementen. Das Institut für Mikrostrukturtechnologie und Analytik (IMA) der Universität Kassel besitzt grundlegende technologische Möglichkeiten und die Kenntnisse zur Herstellung von Sensoren als Bausteine der Mikrosystemtechnik. Durch eine genaue Berechnung mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) der unterschiedlichen Dehnungsverhältnisse, die bei einer Si-Membran, die unter Über- bzw. Unterdruck steht, vorliegen, konnte die Positionierung von TMR-Dehnungssensoren auf den Membranen optimiert werden.

## 2 Ergebnisse – Berichtszeitraum 01.10.2007 – 30.06.2009

### 2.1 Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse

#### Teilvorhaben CAU-Kiel

Die Forschungstätigkeit an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel schloss unmittelbar an die Ergebnisse der bei der Stiftung caesar geleisteten Entwicklungsarbeit an. Dort wurde bereits die Sensorkonzeption vorgenommen, wurden Varianten für den Herstellungsprozess entwickelt und erprobt sowie ein erster Stackdemonstrator für den Drucksensor erstellt. Über die beiden fortgeführten Arbeitspakete AP3 und AP4 war fortan die CAU-Kiel in das Projekt einbezogen mit dem Ziel der Realisation eines Drucksensors auf TMR-Basis. Im Folgenden sind die wesentlichen Ergebnisse aufgezeigt.

#### 2.1.1 Hochempfindliche TMR-Dehnungssensoren

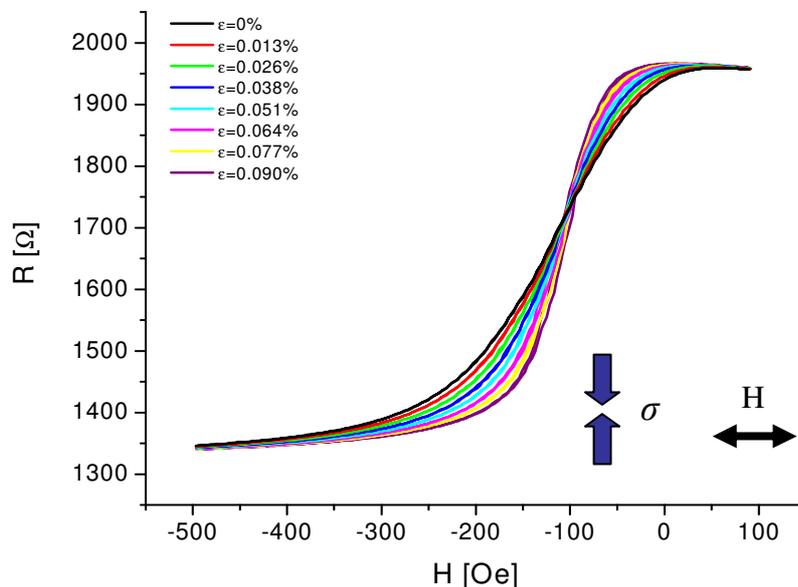
Im Zuge der Weiterentwicklung des Sensorschichtsystems sind verschiedene Materialkombinationen (s. Tabelle 1) auf ihre Empfindlichkeit gegen mechanischen Stress untersucht worden. Die Integration der Materialien in den TMR-Aufbau ist zum Teil beim Projektpartner Infineon vorgenommen worden.

TMR-System	Messschicht	Geeignet für Drucksensoren
TaN/Ta/PtMn/ CoFe(B)/Ru/CoFeB/ Mg(O)/Messschicht	CoFeB	ja
	CoFeB/CoFeBSi	ja
	Co <sub>90</sub> Fe <sub>10</sub>	nein
	CoFe/NiFe/IrMn	nein
	CoFeB/NiFe/IrMn	ja

**Tabelle 1: Verschiedene Materialkombinationen und ihre Eignung für den Einsatz in Drucksensoren**

Die Untersuchungen sind in einem speziellen 4-Punktdehnungsmessstand durchgeführt worden, der die Aufnahme des Magnetowiderstands bei simultaner Dehnung der TMR-Strukturen erlaubt. Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass nur die Sensoren mit CoFeB-basierten Messschichten eine signifikante Reaktion auf mechanische Verspannung aufzeigen.

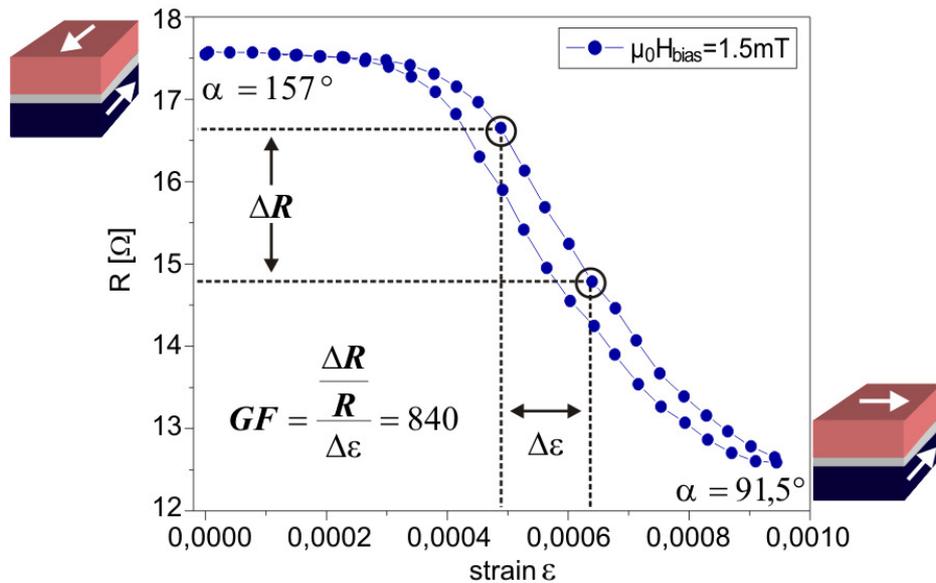
Die Abbildung 1 demonstriert, wie sich der Magnetowiderstand z. B. bei Verwendung einer CoFeB/NiFe/MnIr-Messschicht in Abhängigkeit mechanischer Dehnung verändert.



**Abb. 1: Beispiel für die Änderung des Magnetowiderstands (Minorloop) eines TMR-Sensors mit CoFeB/NiFe/MnIr-Messschicht bei mechanischer Dehnung  $\epsilon$ . Wie durch die Pfeile angedeutet, wurde der mechanische Stress senkrecht zur Magnetfeldrichtung aufgebracht.**

Die übrigen Materialkombinationen zeichneten sich durch ihre geringe Sensitivität gegen mechanische Beanspruchung aus. Sie waren damit für den Einsatz in den Stromsensoren prädestiniert, die keine Querempfindlichkeiten gegen mechanische Verspannungen aufweisen durften.

In der Grafik 2 ist der Gang des Widerstandes in Abhängigkeit der Dehnung für einen  $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$  großen Sensor mit einfacher CoFeB-Messschicht aufgetragen. Ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung ist der Dehnungsfaktor GF, der sich aus dem Quotienten der relativen Widerstandsänderung und Dehnungsänderung berechnet. Anhand des Diagramms kann hier GF zu 840 bestimmt werden. Der Vergleich mit kommerziell erhältlichen Dehnungssensoren (GF = 2-5 für metallische und GF = 100 -140 für piezoresistive Sensoren) zeigt, dass die Herstellung äußerst empfindlicher Sensoren gelungen war.

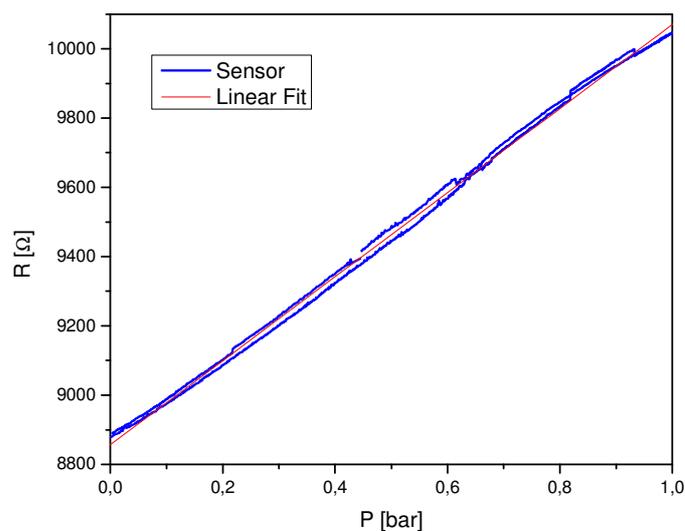


**Abb. 2:** Tunnelwiderstand eines  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  großen TMR-Sensors gegen die Dehnung  $\varepsilon$ . Das magnetische Biasfeld betrug  $1.5\text{mT}$  und die Biasspannung  $10\ \text{mV}$ . Der im Bereich größter Steigung bestimmte Dehnungsfaktor (engl.: gauge factor, GF) beträgt  $GF = 840$ .

## 2.1.2 Der TMR-Drucksensor

### 2.1.2.1 Drucksensoren auf BMM-Membranen

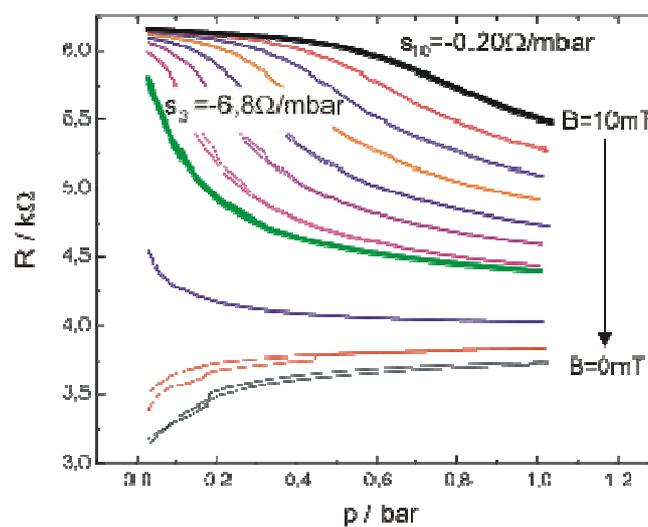
Im Zuge der Arbeiten bei der Stiftung caesar waren Demonstratoren auf BMM-Membranen (bulk micromachined) hergestellt worden. Die Untersuchung ihrer Charakteristika mittels experimenteller Druckwiderstandskurven wurde an der CAU Kiel fortgeführt.



**Abb. 3:** Beispiel für den Gang des Widerstands eines etwa  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  großen TMR-Sensors in Abhängigkeit der Druckbeaufschlagung und in Anwesenheit eines magnetischen Biasfeldes  $\mu_0 H_{\text{bias}} = 2\ \text{mT}$ .

Die Abbildung 3 zeigt das Beispiel eines etwa  $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$  großen TMR-Sensors. Sein Widerstand ist mit konstanter Biasspannung (10 mV) und konstantem Biasmagnetfeld (20 Oe) gemessen worden. Über den gesamten Bereich der Druckbeaufschlagung von 1bar zeigt der Sensor eine lineare und nahezu hysteresefreie Antwort. Dadurch war weltweit zum ersten Mal eine Druckmessung mittels magnetostriktiver TMR-Sensoren geglückt.

Unter den Demonstratoren wurden auch Sensoren mit nicht-linearen Kennlinien gefunden (Abb. 4). Messungen bei verschiedenen äußeren Magnetfeldern zeigten, dass die Sensitivität der Sensoren in weiten Bereichen eingestellt werden kann.



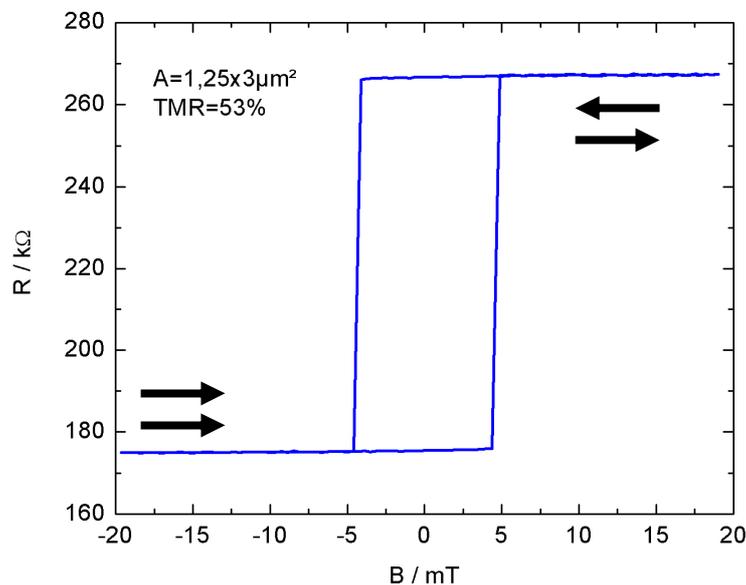
**Abb. 4:** Beispiel für den Gang des Widerstandes bei verschiedenem Druckaufschlag für unterschiedliche Vormagnetisierungen. Durch Anlegen eines äußeren Magnetfeldes lässt sich die Sensitivität in weiten Bereichen variieren (exemplarisch angegeben für  $B = 3 \text{ mT}$  und  $B = 10 \text{ mT}$ ; Biasspannung = 10 mV).

### 2.1.2.2 Untersuchungen zur Langzeitstabilität

Der Einsatz magnetoresistiver Tunnelstrukturen als Drucksensoren fordert Stabilität gegen die im Betrieb häufig wechselnde Druckbeaufschlagung. Es wurden deshalb TMR-Sensoren, die auf BMM-Membranen positioniert waren, Druckzyklen mit einer Frequenz  $f = 1 \text{ Hz}$  unterworfen. Während dieser Zyklen wurde der Druck um 1 bar variiert. Nach Durchlauf verschiedener Zyklenzahlen wurde der Magnetowiderstandseffekt gemessen, um Veränderungen im Widerstand oder im magnetischen Verhalten sichtbar zu machen. Allerdings konnten selbst nach  $4 \times 10^5$  Zyklen keine mechanisch induzierten Veränderungen der Eigenschaften der TMR-Sensoren festgestellt werden.

### 2.1.2.3 Nachweis der Machbarkeit von TMR-Sensoren auf SMM-Membranen

Um zu demonstrieren, dass TMR-Sensoren mit signifikanter TMR-Amplitude auch auf SMM-Membranen gefertigt werden können, wurden Tunnelstrukturen zunächst in einem vereinfachten Herstellungsverfahren erzeugt, welches noch nicht im Hinblick auf die Verschaltung der Sensoren mit der CMOS-Umgebung optimiert war. Das Diagramm in der Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit des Tunnelwiderstands vom externen Magnetfeld für eine etwa  $1.25 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$  große TMR-Struktur. Die beiden, typischen Plateaus im Widerstand für die parallele respektive antiparallele Elektrodenkonfiguration sind deutlich zu erkennen.



**Abb. 5: Widerstandshysterese eines TMR-Sensors auf einer SMM-Membran. Die Pfeile geben die zugehörige Magnetisierungskonfiguration in den Elektroden an.**

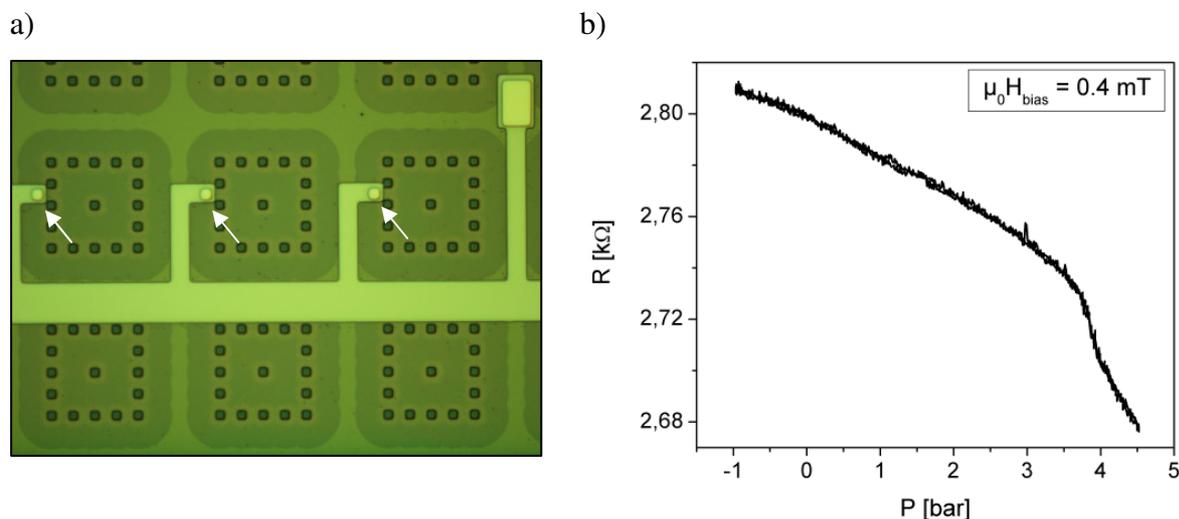
Die Machbarkeit von intakten TMR-Strukturen auf SMM-Membranen konnte somit nachgewiesen werden, obschon die Effektamplitude aufgrund der Rauigkeit des Substrates etwa um einen Faktor 2 kleiner war im Vergleich zur Amplitude von TMR-Elementen auf gewöhnlichen Siliziumwafern.

### 2.1.2.4 Drucksensoren auf SMM-Membranen

Im Zuge des Projektes sind mittels einer Kombination aus Elektronenstrahlolithografie, Ionenstrahlätzung und Lift-Off-Prozess TMR-Sensoren auf SMM-Membranen erzeugt worden. Die laterale Ausdehnung der TMR-Strukturen wurde bis in den 1-Mikrometerbereich hinab variiert. Die Aufnahme in der Abbildung 6a zeigt den Aufbau mit den Membranen und

der Zuleitungen für die elektrische Kontaktierung der unteren Sensorelektroden. Für die Lift-Off-Prozessierung kam eine spezielle Ultraschalltechnik mit hohen Frequenzen zum Einsatz, um eine mechanische Zerstörung der nur wenige Mikrometer dicken Membranen zu vermeiden. Des Weiteren hat sich im Zuge der Untersuchungen herausgestellt, dass eine möglichst geringe Materialbedeckung der Membranen wesentlich ist, um eine Versteifung der Membranen zu verhindern. Dieser Effekt wurde in den Simulationsrechnungen der Universität Kassel berücksichtigt. Dadurch konnten sie zur Verbesserung des Designs zum Beispiel der elektrischen Zuleitungen herangezogen werden. Im Diagramm 6b ist die Änderung des Tunnelwiderstands mit veränderlichem Druck am Beispiel einer  $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$  großen TMR-Struktur zu sehen. Es ist eine stetige Abnahme des Tunnelwiderstands mit steigendem Luftdruck erkennbar. Die grundsätzliche Machbarkeit von diskreten SMM-Drucksensoren ist somit demonstriert worden.

Allerdings beträgt der über den gesamten Druckbereich gemessene TMR-Hub nur 5% und der in Analogie zum Dehnungssensor definierte Messfaktor bleibt mit  $\text{GF} = 2.5 \% / \text{bar}$  klein. Es ist allerdings zu erwarten, dass eine weitere Optimierung des Zuleitungsdesigns sowie der Sensorpositionierung zu einer Steigerung der Sensorempfindlichkeit führte.



**Abb.6: (a) Aufnahme von TMR-Drucksensoren (Pfeile) mit etwa  $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$  lateraler Ausdehnung auf SMM-Membranen. Im gezeigten Fertigungsstadium ist nur die elektrische Zuführung zur unteren TMR-Elektrode ausgeführt. (b) Widerstand gegen Druckbeaufschlagung eines  $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$  großen Sensors bei 10 mV Biasspannung und 0.4 mT Biasmagnetfeld. Der anhand der Steigung ermittelte Messfaktor variiert zwischen  $\text{GF} = 0.6 \% / \text{bar}$  und  $\text{GF} = 2.5 \% / \text{bar}$ .**

### **2.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Im Zuge des Projektes ist es gelungen, einen miniaturisierten, TMR-basierten Dehnungssensor mit weltweit größtem Dehnungsfaktor zu demonstrieren. Des Weiteren ist erstmals die Fabrikation von TMR-Drucksensoren auf BMM-Membranen geglückt. Diese Sensoren zeigten nach 400000 Druckzyklen keine Anzeichen für eine Degradation in einer ihrer Eigenschaften. Es sind auch gegen Druckbeaufschlagung empfindliche Sensoren auf SMM-Membranen realisiert worden, sodass alle wesentlichen Projektziele erarbeitet werden konnten. Für eine kommerzielle Anwendung der TMR-Sensoren auf SMM-Membranen ist jedoch eine Steigerung der Sensorempfindlichkeit durch weitere Optimierung der Sensorfabrikation und Sensorpositionierung erforderlich.

## **2.2 Verwertung der Ergebnisse**

Aus der inhaltlichen und konzeptionellen Ausrichtung des Projekts folgt, dass die Hauptverwertung auf den Industriepartner Infineon AG ausgerichtet ist. Die im Vorgängerprojekt MAGNOS erfolgten Patentanmeldungen, die diese Sensoren schützen, sind an die Infineon AG übertragen worden, so dass durch den Wechsel des Projektes von der Stiftung caesar an die Christian-Albrechts-Universität zu Kiel diese Verwertung nicht beeinträchtigt worden ist. Eine wichtige weitere Verwertung besteht allerdings in der Wissensvermittlung an Studenten und Doktoranden im Rahmen von Vorlesungen, Seminaren und Praktika, in denen ausgewählte Ergebnisse der erarbeiteten Technologien vermittelt werden.

## **2.3 Veröffentlichungen**

### **2.3.1.1 Proceedings-Beiträge:**

- D. Meyners, T. von Hofe, M. Vieth, M. Rührig, S. Schmitt, and E. Quandt, *J. Appl. Phys.* 105, 07C914, 2009
- E.Quandt, D. Meyners, T. von Hofe, A. Malave, *ECS Trans.* 16, 297 (2009)

### **2.3.1.2 Konferenzbeiträge:**

- D. Meyners, E. Quandt: *Magneto-electronical Sensors for Mechanical Measurements*, Materials Science and Engineering, Nürnberg, Sept. 2008
- E.Quandt, D. Meyners, T. von Hofe, A. Malave: *Magnetostrictive TMR-Sensors for Mechanical Measurements*, 214th ECS Meeting, Honolulu, Hawaii, Okt. 2008

- D. Meyners, T. von Hofe, M. Rührig, M. Vieth, S. Schmitt and E. Quandt: *Pressure Sensor based on magnetic tunnel junctions*, 53rd Magnetism and Magnetic Materials Conference, Austin, Texas, Nov. 2008
- D. Meyners, T. von Hofe, A. Malavé, M. Vieth, M. Rührig and E. Quandt: *Magnetostrictive magnetic tunnel junctions as pressure gauges*, IEEE International Magnetism Conference, Sacramento, California, Mai 2009