



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**

Abschlußbericht der Infineon Technologies AG für den Zeitraum  
01.07.06 – 30.06.09 zum Vorhaben

# **TMR-TECH**

**TMR-SENSOREN ALS TECHNOLOGIEPLATTFORM FÜR  
ANWENDUNGEN IM AUTOMOBILBEREICH**

(Förderkennzeichen: 13N9084)



**SIEMENS**

**U N I K A S S E L  
V E R S I T Ä T**

**VDI** Technologiezentrum



**Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2006 – 30.06.2009**

**Ansprechpartner:**

**Dr. Raberg  
Dr. Rührig  
Prof. Reithmaier**

**Infineon Technologies AG  
Siemens AG  
Universität Kassel**

## Inhalt

---

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Randbedingungen und Konsortium</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Stand der Wissenschaft und Technik zu Beginn</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>Projektplanung und Ablauf</b>	<b>6</b>
<b>6</b>	<b>Erzielte Ergebnisse</b>	<b>9</b>
6.1	Konzept	9
6.2	Schichtentwicklung	11
6.2.1	Tunnelbarriere	11
6.2.2	Exchange-Biased Freelayar	12
6.2.3	Schichtstabilität unter automobilen Einsatzbedingungen	13
6.2.4	Rauschverhalten von TMR-Sensoren	15
6.3	Prozesstechnologie	18
6.4	Integrierter Stromsensordemonstrator	20
6.5	Simulation von BMM und SMM Membranen	23
<b>7</b>	<b>Verwertung</b>	<b>26</b>
<b>8</b>	<b>Patente und Patentanmeldungen</b>	<b>28</b>

## 1 Kurzfassung

Im Rahmen des TMR-TECH-Projektes wurde die Eignung der TMR-Technologie als Sensorplattform untersucht. Um eine möglichst umfassende Aussage machen zu können, wurden dabei automobiler Anforderungen als Maßstab zugrunde gelegt.

Als Demonstrator wurde ein integrierter Batteriestromsensor definiert, der im Rahmen des Projektes erfolgreich realisiert werden konnte. Dieser Demonstrator ermöglicht die Messung von Strömen bis zu 700A bei einer Messgenauigkeit im empfindlichen Bereich von mindestens 125mA und erfüllt damit die Zielspezifikationen im Hinblick auf den Messbereich.

Zur Realisierung insbesondere des großen magnetischen Arbeitsbereiches wurden verschiedene Anisotropiekonzepte evaluiert und schließlich das EB-Freelayer-Konzept ausgewählt, bei dem die freie Sensorschicht zusätzlich durch einen Antiferromagneten stabilisiert wird. Dies führt neben einem erweiterten Arbeitsbereich auch zu einer deutlich verbesserten Hysterese gegenüber herkömmlichen Formanisotropiekonzepten und damit zu einer höheren Messgenauigkeit bei gleichbleibend hohen TMR-Signalen von 100-150%. Die im Rahmen des Projektes verwendete Materialkombination des Antiferromagneten ist allerdings nur für Einsätze bei Temperaturen unter 100°C geeignet und damit nicht kompatibel zu automobilen Temperaturprofilen. In ersten Versuchen konnten aber mögliche Pfade zu einer Verbesserung der thermischen Stabilität des EB-Konzeptes identifiziert werden.

Die grundsätzliche Stabilität der Basistechnologie auch bei den schärfsten automobilen Anwendungsbedingungen konnte zusätzlich anhand von GMR-Strukturen nachgewiesen werden. Ebenso konnte die Kompatibilität mit der CMOS-Prozessierung und die Funktionalität der CMOS-Auswerteschaltung in Verbindung mit der TMR-Technologie demonstriert werden.

Die Analyse der Projektergebnisse bestätigt die grundsätzliche Eignung der TMR-Technologie als Sensorplattform. Aufgrund der im Vergleich mit GMR erhöhten Prozesskomplexität sind die Vor- und Nachteile für jede Anwendung jedoch im Einzelnen abzuwägen. Von besonderem Interesse ist die TMR-Technologie sicher dort, wo eine hohe räumliche Auflösung gefordert ist.

Die im Rahmen dieses Projektes erarbeiteten Erkenntnisse fließen einerseits in die Entwicklung der nächsten Generation von GMR-Magnetfeldsensoren ein. Zum anderen wird derzeit über ein Projekt zur Entwicklung von hochauflösenden Sensoren nachgedacht. Während dieses Projektes entstanden zudem 9 Patente bzw. Patentanmeldungen.

## 2 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens ist 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) soll anhand zweier unterschiedlicher Anwendungen verdeutlicht werden. Zum einem soll 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 soll 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, ist die Evaluierung einer Plattformtechnologie mit den damit verbundenen höheren Stückzahlen Voraussetzung für eine erfolgreiche industrielle Umsetzung.

Die Eignung der TMR Sensorik als Plattformtechnologie soll im Rahmen des Projekts in Form eines integrierten Demonstrators für die beiden Anwendungsbeispiele (Druck und Strom) gezeigt werden. Dadurch wird einerseits die Nutzung des TMR-Effekts innerhalb verschiedener Sensorapplikationen demonstriert und andererseits auch die Kompatibilität zu CMOS Technologien (bei beiden Anwendungen) und SMM-Technologie (bei Drucksensoren) erarbeitet.

## 3 Randbedingungen und Konsortium

Zur Durchführung des Projekts wurde die in Abb. 1 dargestellte Projektstruktur gewählt:

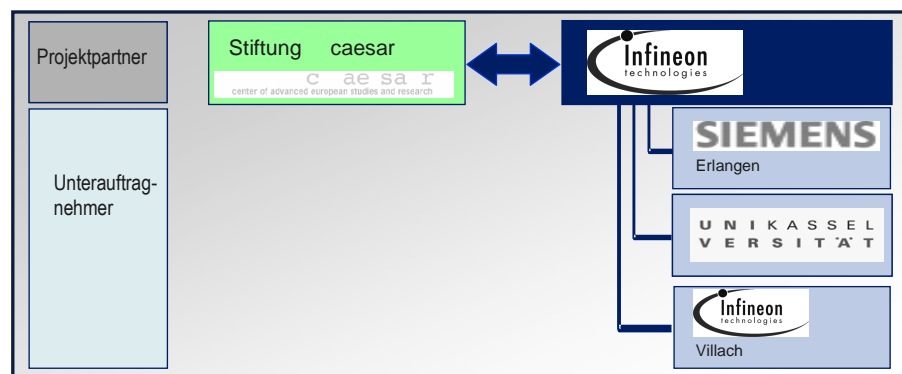


Abb. 1: TMR-Tech-Projektstruktur

Die Stiftung caesar und Infineon sind Projektpartner. Unterauftragnehmer von Infineon sind Siemens Erlangen, Infineon Villach und die Universität Kassel. Infineon ist Konsortialführer. Während der Projektlaufzeit kam es zu zwei wesentlichen Veränderungen, die zu einer zeitweiligen Beeinträchtigung vor allem der Prozessierung führten. Zum einen zog die Arbeitsgruppe von Prof. Quandt von der Stiftung caesar and die Universität Kiel um, zum anderen entschied sich die Infineon Technologies AG, das gesamte GMR-Toolset (das auch für die TMR-Prozessierung eingesetzt wurde) von Essonnes nach Regensburg zu transferieren. Der damit verbundene Zeitverlust konnte jedoch durch die räumliche Bündelung der Aktivitäten in Regensburg ausgeglichen werden.

## 4 Stand der Wissenschaft und Technik zu Beginn

Der magnetoresistive Tunneleffekt TMR (tunneling magneto resistive) wird in der Mikroelektronik seit längerer Zeit intensiv untersucht, da man hofft, damit neue nichtflüchtige und hoch integrierbare Speicherbausteine MRAM (magnetic random access memories) herstellen zu können. Für Sensoren ist der Effekt dagegen noch relativ neu und für technische Anwendungen bisher noch kaum untersucht. Er hat jedoch das Potential aufgrund seiner günstigen Skalierungseigenschaften die Grundlage für zukünftige Lesekopfgenerationen in Festplattenlaufwerken mit höchsten Kapazitäten zu bilden, da dort hohes Signal bei gleichzeitiger weiterer Miniaturisierbarkeit gefordert wird. Hier ist bereits abzusehen, dass die GMR Technologie, die Lesekopfentwicklung in den vergangenen 2 Jahrzehnten entscheidend vorangebracht hat, an ihre Grenzen stoßen wird.

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

Der derzeitige Entwicklungsstand auf dem Gebiet der magnetostriktiven TMR Dehnungssensoren kann hauptsächlich durch Arbeiten belegt werden, die bei der Stiftung caesar im Rahmen eines Pilotprojektes (Förderungs-Nr. 13N7943) und in dem daran anschließenden Projekt MAGNOS (Förderungs-Nr. 13N8492) durchgeführt wurden. Im Folgenden sind zwei der wissenschaftlichen Veröffentlichungen aufgeführt, die den Fortschritt dieser Arbeit belegen können: 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).

## 5 Projektplanung und Ablauf

Aus Abb. 2 geht die Meilenstein- und Balkenplanung des Projekts hervor. Die Projektarbeit wurde in vier große Arbeitspakete mit jeweils mehreren Teilaufgaben und verschiedenen Meilensteinen unterteilt. Für die Bearbeitung der drei Arbeitspakete „Konzept“, „Stromsensor“, und „Allgemeine Grundlagen“ inklusive deren Teilaufgaben wurde Infineon als Hauptverantwortlicher bestimmt. Das Arbeitspaket „Drucksensor“ mit Unteraufgaben wurde hauptverantwortlich von caesar durchgeführt. Die Ergebnisse aus dem letztgenannten Arbeitspaket sind nicht Teil dieses Berichts, sondern werden von der Universität Kiel (vormals caesar) separat berichtet.

Im Folgenden sind die wichtigsten Projekttreffen chronologisch aufgelistet mit den jeweils verabschiedeten Meilensteinen.

- 21.06.06:** Kick-Off Meeting mit allen Projektpartner und Projektträger in München: Gegenseitige Vorstellung der jeweiligen Arbeitsschwerpunkte im Projekt, gemeinsames Projektverständnis, gemeinsame Abstimmung der nächsten Arbeitspakete
- 18.09.06:** Workshop in Villach mit Applikations- und Konzept-Team: Evaluierung der Applikation Batteriesensor
- 22.09.06:** Projektmeeting in München: Vorstellung und Diskussion der TMR-Integrationskonzepts, des Sensorkonzepts, der Stackkonzepte und Zielapplikation
- 08.12.06:** Projektmeeting in Kiel: Diskussion der Analyseergebnisse, der Teststrukturen, erster Simulationsergebnissen, Diskussion der Zielspezifikation
- 22.01.07:** Workshop in Villach mit Design-Team zum Schaltungskonzept
- 28.02.07:** Projektmeeting in Kassel:  
**Verabschiedung des M1: Festlegung der Sensorkonzepte und Demonstratoren**
- 14.05.07:** Workshop in Villach mit Konzept- und Design-Team:  
Festlegung der Schaltungskonzepte
- 07.07.07:** Projektmeeting in Erlangen: Diskussion der Zielspezifikation und Stackkonzepte
- 21.09.07:** Projektmeeting in München:  
**Verabschiedung der Meilensteine**  
**M2: „Zielspezifikation Demonstratoren“**,  
**M3: „Definition der Sensorzelle“**  
**M4: „1. Stackdemonstrator für TMR-Stromsensor“**
- 02.10.07:** Projektmeeting IFX intern in Essonnes  
Statusdurchsprache und Prozessworkshop
- 24.01.08:** Projektmeeting IFX intern in Regensburg:  
Abstimmung zum Transfers Essonnes/Regensburg
- 08.02.08:** Projektmeeting in München:  
Erste Messergebnisse der integrierten Stromsensoren und Planung des integrierten Drucksensors
- 11.03.08:** Projektmeeting IFX intern in Villach:  
Workshop Schaltungsdesign, Demonstratoraufbau und Applikationsthemen
- 10.04.08:** Projektmeeting in Kiel:  
Projektreview durch VDI  
**Verabschiedung des Meilensteins M6 (Prozessfixierung)**
- 01.08.08:** Projektmeeting IFX intern in Regensburg:  
Workshop zu Redesign und Prozessierung des integrierten TMR-Sensors
- 30.09.08:** Projektmeeting in Erlangen:  
Erste Ergebnisse aus der Prozessierung des TMR-Stromsensors in Regensburg, Rauschmessungen an in Essonnes gefertigten Sensoren  
**Verabschiedung des Meilensteins M7: „2. Stackdemonstrator für Stromsensoren“**
- 15.12.08:** Projektmeeting IFX intern in Regensburg:  
Workshop TMR-Prozessierung in Regensburg
- 30.01.09:** Projektmeeting in Kassel:  
Erste Ergebnisse von Kurzläuferlosen aus Regensburg; Rauschmessungen an TMR-Sensoren mit verschiedenen Barrieren, in Serienschaltung und im Magnetfeld; FEM-simulation der Verspannung in Höhe der MgO-Barriere
- 22.04.09:** Projektmeeting in Kiel:

Erste Ergebnisse von integrierten Wafern aus Regensburg; Weitere Rauschmessungen an IFX-Wafern

**29.06.09:** Projektmeeting in München:

**Verabschiedung der Meilensteine**

**M8: „Demonstrator integrierte Stromsensoren“,**

**M9: „Abschluss integrierter Stromsensordemonstrator“**

**30.06.09:** Projektabschlußtreffen in München mit Vertretern des VDI

Vorstellung der Projektergebnisse; Vorführung Stromsensordemonstrator; Überblick Rauschmessungen und magnetische Konzepte; Simulation der Drucksensormembranen inklusive Zuleitungsgeometrien

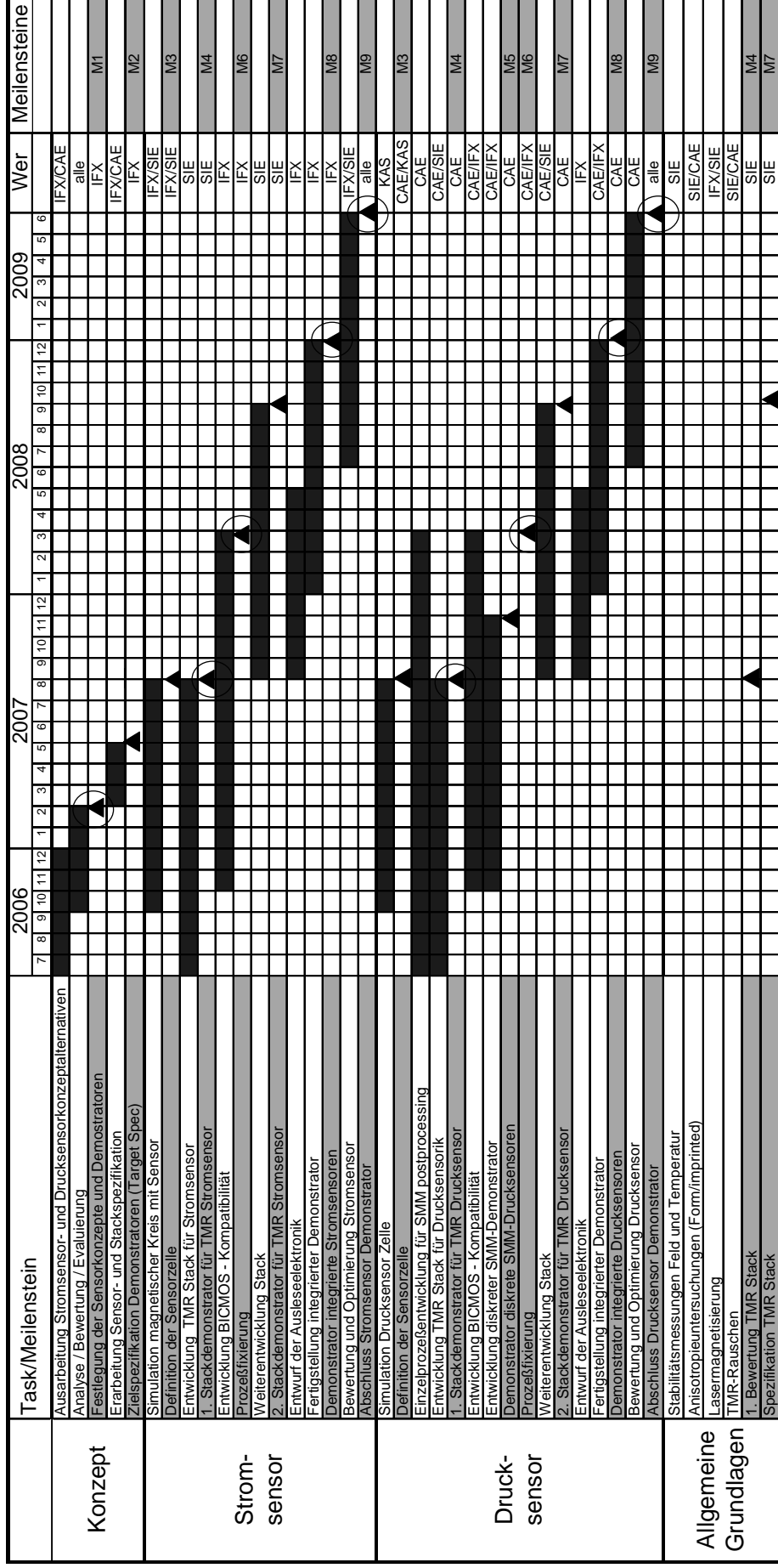


Abb. 2: Balkenplan : Arbeitspaket- und Meilensteinplanung



## 6 Erzielte Ergebnisse

Im Folgenden sind die im Rahmen des Projekts erzielten Ergebnisse in aller Kürze zusammengefasst. Dabei sind in diesem Bericht nur die Ergebnisse von Infineon Technologies inklusive deren Unterauftragnehmer (also ohne die Universität Kiel) gezeigt. Die Universität Kiel wird ihre Ergebnisse in einem eigenen Bericht separat darstellen.

### 6.1 Konzept

Der große Vorteil von TMR basierten Sensoren gegenüber GMR Sensoren ist aus heutiger Sicht das Potential, eine um Faktor 10 höhere Feldempfindlichkeit erreichen zu können. Um diesen Vorteil ausnutzen zu können bietet sich ein Einsatz als Batteriestrom-Sensor im Automobil an. Hier ist v.a. ein hoher Dynamikbereich des Sensors erforderlich, um den Strom der verschiedenen Betriebsfälle detektieren zu können. In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die Anforderungen aus dieser Applikation in eine Zielspezifikation des zu entwickelnden Sensors eingeflossen.

Parameter	Symbol	Target	Unit	Comment
Currentrange 1	I	0 - 1	A	Ruhestrom
Currentrange 1	I	- 1 - 1	A	Laden (Prio 2)
Resolution		2	mA	
Accuracy		6	mA	
Currentrange 2	I	0 - 40	A	Fahrbetrieb
Currentrange 2	I	- 40 - 40	A	Laden (Prio 2)
Resolution		2	mA	
Accuracy		6	mA	
Currentrange 3	I	0 - 200	A	Fahrbetrieb
Resolution		20	mA	
Accuracy		20	mA	
Currentrange 4	I	0 - 1500	A	Startfall
Resolution		80	mA	
Accuracy		5	A	
Operating Temperature	$T_A$	-40 - 125	°C	1000h
Storage Temperature	$T_S$	150	°C	1000h
Soldering Temperatur	$T_{max}$	260	°C	1 Min
Operating frequency range		10 - 10 000	Hz	low -> high currentrange
Bridge or Element resistance	$R_B$	1000	Ohm	
Sensitivity factor		10		For realising high dynamic range
Voltage at Element	$V_{DD}$	100	mV	
Min. TMR-Film Resistivity ( $R_B=1k\Omega$ )	$R_{AREA}$	20	$k\Omega \times \mu m^2$	$R=R_{AREA}/AREA$ (2 Elements)
Target size single resistor		10	$\mu m^2$	
Width in $\mu m$		2-5	$\mu m$	

Tab. 1: Vorläufige Zielspezifikation des Stromsensors aus der Sicht der Anwendung als Batteriestromsensor

Um diesen Dynamikbereich erreichen zu können wurden drei Anisotropiekonzepte evaluiert:

- 1) **intrinsische Anisotropien** beruhen darauf, dass sich innerhalb der magnetischen Materialien Vorzugsrichtungen für die Magnetisierung ergeben (sog. „leichte Achsen“ bzw. Richtungen) entlang derer die Magnetisierung bevorzugt ausgerichtet ist. Durch Diffusion von Atomen in Legierungen (Paarordnung), z.B. nach Auslagerung bei hohen Temperaturen im Magnetfeld, können leichte Achsen induziert werden. Des Weiteren können Spannungen (auf Grund von inverser Magnetostriktion) in dem Material zur Ausbildung von Vorzugsachsen führen. Kristallisation bzw. die Ausbildung von Texturen kann ebenfalls zur Bevorzugung bestimmter Richtungen in dem magnetischen Material führen. Je nach Ursache hängt die Stärke von einer Vielzahl von Parametern ab. Entsprechend schwierig gestaltet sich die genaue Einstellung und Kontrolle.

- 2) **Formanisotropie** (Abb.3) beruht auf der Tatsache, dass sich die Magnetisierung in einem (weich-)magnetischen Körper bevorzugt so einstellt, dass sich keine Magnetpole bilden und Streufelder demnach vermieden werden. D.h. generell sind solche (streufeldfreien) Magnetisierungsverteilungen bevorzugt, in denen die Magnetisierung möglichst parallel zu einem äußeren Rand liegt. Bei Dünnschichtstrukturen sorgt diese Forderung zum einen dafür, dass die Magnetisierung immer in der Schichtebene liegen wird und zum anderen bevorzugt entlang der Längsrichtung des Elements.

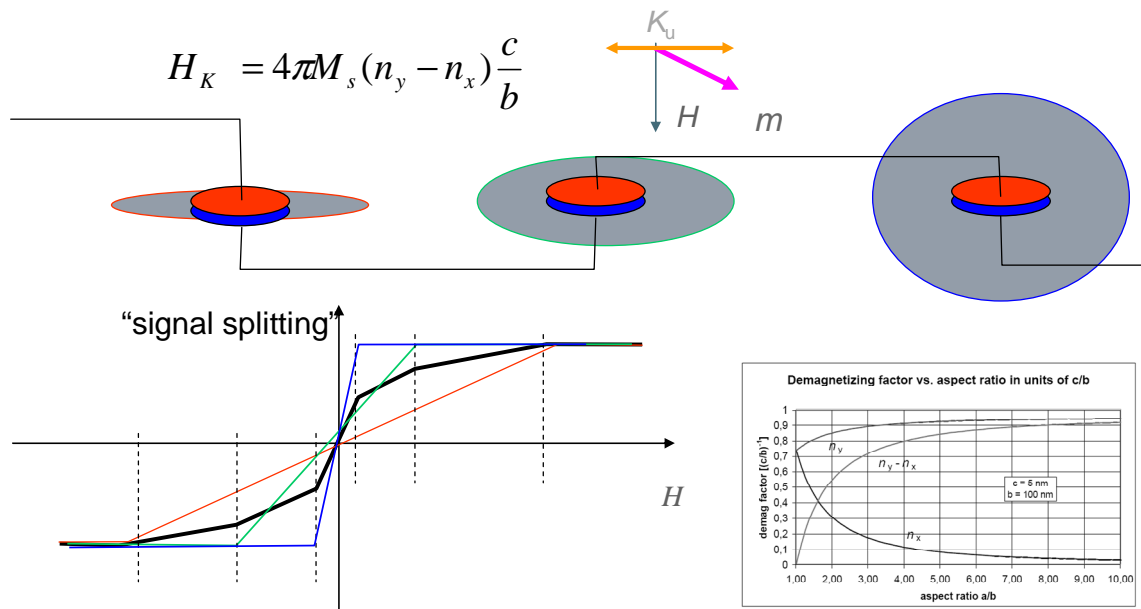


Abb. 3: Kombination von TMR-Zellen mit verschiedener Formanisotropie

- 3) **Austausch-Anisotropie** (Abb. 4) kommt dadurch zustande, dass an eine magnetische Schicht (Messschicht) eine Schicht aus einem natürlichen Antiferromagneten durch direkten Kontakt angekoppelt wird. Der natürliche Antiferromagnet besitzt an der Grenzfläche zu der magnetischen Schicht ungekoppelte magnetische Momente („Spins“), die in der Lage sind die benachbarten magnetischen Momente der Magnetschicht in eine Richtung festzuhalten (zu „pinnen“), die man entweder durch Abscheidung im Magnetfeld, oder durch nachträgliches Anlassen auf eine erhöhte Temperatur (oberhalb der sog. „Blocking- Temperatur“) unter Einwirkung eines Magnetfeldes einstellen kann. Bei dieser Anisotropie handelt es sich demnach um eine unidirektionale (gerichtete) Anisotropie im Gegensatz zu 1) und 2) wo man eine uniaxiale Richtungsverteilung erreicht d.h. zwei gleichwertige Richtungen.

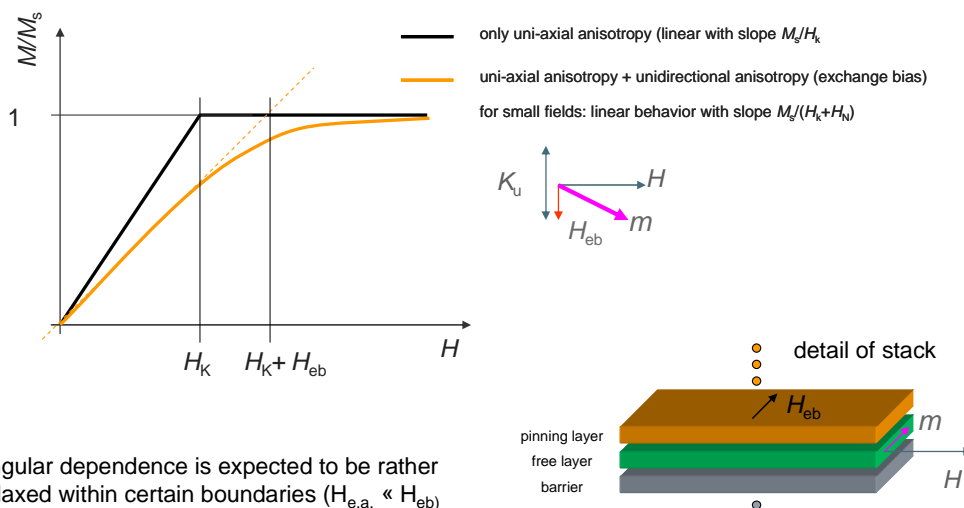


Abb. 4: Exchange bias Schichtsystem zur Vergrößerung des möglichen Messbereichs eines X-MR Sensors

Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass sich mit dem Austauschisotropiekonzept leicht Arbeitsbereiche von  $\pm 20$  mT realisieren lassen, während die Formanisotropie aufgrund der zur Verfügung stehenden Prozesstechnik auf etwa  $\pm 10$  mT beschränkt ist. Zudem führt die Unidirektionalität der Austauschisotropie zu einer inhärent geringeren Hysterese der Kennlinie und damit zu einer verbesserten Messgenauigkeit. Aus diesen Gründen wurde letztendlich das Austauschisotropiekonzept als Zielkonzept für den Stromsensordemonstrator ausgewählt.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil der TMR-Technologie besteht in der Möglichkeit im Vergleich zu GMR sehr kleine Sensorelemente zu realisieren und so Feldverteilungen mit hoher Ortsauflösung zu vermessen. Diese Eigenschaft wurde bei der Realisierung des Stromsensordemonstrators ausgenutzt, indem mehrere Sensorelemente an verschiedenen Stellen des Chips so angeordnet wurden, dass sie die durch den Stromfluss im Leiter erzeugte inhomogene Feldverteilung detektieren. Durch eine geeignete Konstruktion des Stromleiters kann der Arbeitsbereich des Sensors so noch einmal um einen Faktor 10 erweitert werden. Diese Überlegungen resultierten schließlich in der Zielspezifikation für den TMR-Stromsensor (Abb. 5).

<b>Current sensor demonstrator target spec</b>			
Parameter	Symbol	Target	Unit
Currentrange 1	I	0 - 20	A
Currentrange 1	I	-20 - 20	A
Resolution		1	mA
Accuracy		100	mA
Currentrange 2	I	0-200	A
Currentrange 2	I	-200 - 200	A
Resolution		10	mA
Accuracy		1000	mA
Operating Temperature	$T_A$	-40 - 125	$^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature	$T_S$	150	$^{\circ}\text{C}$
Soldering Temperatur	$T_{max}$	260	$^{\circ}\text{C}$
Bridge or Element resistance	$R_B$	1000	Ohm
Sensitivity factor		10	
Voltage at Element	$V_{DD}$	250	mV
Min. TMR-Film Resistivity ( $R_B=1\text{kOhm}$ )	$R_{AREA}$	10	$\text{kOhm}\times\mu\text{m}^2$
Target size single resistor		20	$\mu\text{m}^2$
Width in $\mu\text{m}$		2-5	$\mu\text{m}$

Abb. 5: Zielspezifikation des Stromsensordemonstrators

## 6.2 Schichtentwicklung

Das oben beschriebene Konzept stellt im Wesentlichen zwei Anforderungen an die Schichtentwicklung: zum einen muss ein stabiler Grundstack mit hohem TMR-Effekt bereitgestellt werden, zum anderen wird ein geeignetes Exchange-Bias-System mit gegenüber dem Referenzsystem um  $90^{\circ}$  gedrehter Anisotropie entwickelt werden. Diese Arbeiten wurden zunächst bei Altis Semiconductor in Corbeil-Essonnes begonnen und nach dem Anlagentransfer in Regensburg weitergeführt. Die Auslotung der geeigneten Prozessparameter für die Realisierung der gedrehten Austauschisotropie wurde bei Siemens in Erlangen vorgenommen. Darüber hinaus wurden ausgedehnte Langzeituntersuchungen zur Stabilität des Schichtstapels an GMR-Elementen durchgeführt. Aufgrund der weitgehenden Identität vor allem des Referenzsystems können aus den Ergebnissen Rückschlüsse auf die Stabilität des TMR-stacks gezogen werden.

### 6.2.1 Tunnelbarriere

Basis für fast jeden TMR-Stack, der in den letzten vier bis fünf Jahren entwickelt wurde, bildet eine Tunnelbarriere aus MgO. Theoretische Überlegungen zur Bandstruktur an Fe/MgO/Fe-Strukturen hatten zur Vorhersage von TMR-Effekten bis zu 500% bei Raumtemperatur geführt, die mittlerweile an



Um besonders hohe TMR-Effekte zu erhalten, empfiehlt es sich, amorphes CoFeB als Material sowohl für die Referenzschicht als auch für die Messschicht zu verwenden. Scheidet man nun jedoch IrMn auf dem CoFeB ab, bildet sich nicht die für die Austauschisotropie notwendige Textur aus. Diese kann jedoch induziert werden, indem man eine dünne NiFe-Schicht einfügt. Es zeigt sich, dass sich bereits ab einer NiFe-Dicke von 1,5 nm eine nennenswerte Austauschisotropie ausbildet (Abb. 7 rechts). Die Eigenschaften dieser Austauschisotropie können zusätzlich noch über die Abscheideparameter (vor allem Kammerdruck und Schichtdicke, siehe Abb. 7 Mitte) des IrMn beeinflusst werden.

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine IrMn-Dicke von 6nm für die weiteren Versuche ausgewählt. Für diesen Schichtstapel wurde in Temperversuchen eine Temperatur von 220°C bei 50mT Magnetfeld für 3 Minuten als optimale Prozessbedingungen für das Einstellen der senkrechten Exchange-Bias-Anisotropie bestimmt. Beispielhaft sind die Transferkurven vor und nach dem Umtempern in Abb. 8 gezeigt. Die resultierende „linearisierte“ Kennlinie ergibt sich aus dem erfolgreichen Verdrehen des IrMn-Exchange-Bias gegenüber dem stabilen Referenzsystem. Es lässt sich so ein Arbeitsbereich des Sensors von über ± 20 mT bei geringer Hysterese realisieren - ein wesentlicher Vorteil des in diesem Projekt erarbeiteten Konzepts.

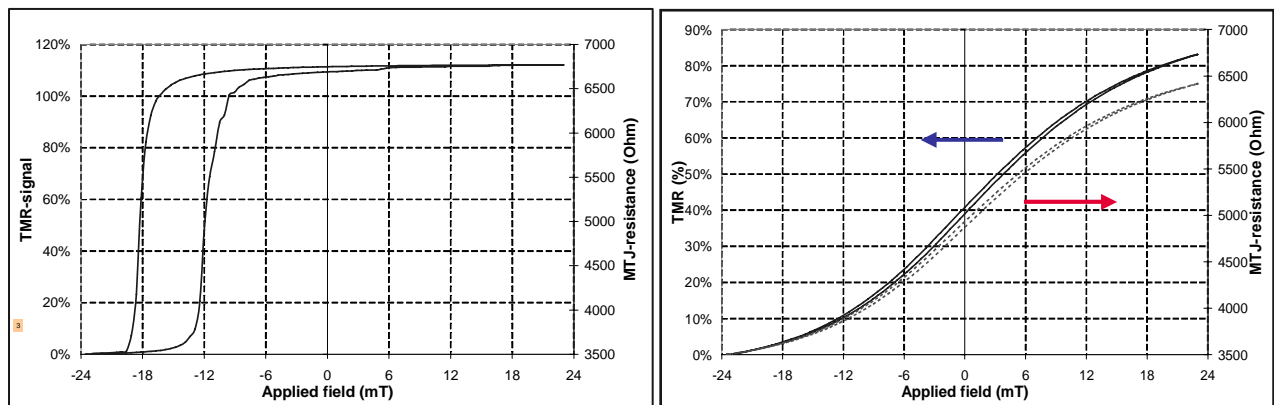


Abb. 8: Die Transferkurven des TMR-Tech-Zielstacks vor (links) und nach dem Umtempern des IrMn-Exchange-Bias bei 220°C und 50mT für 3 min.

### 6.2.3 Schichtstabilität unter automobilen Einsatzbedingungen

Ein wesentlicher Aspekt der Charakterisierungsarbeiten im Rahmen des TMR-Tech-Projektes war die Einsatzfähigkeit des TMR unter automobilen Bedingungen. Dazu wurden ausführliche Stabilitätsuntersuchungen bei Temperatur und Magnetfeld durchgeführt. Um möglichst weitreichende Aussagen machen zu können, wurde dabei zwischen der Stabilität des Referenzsystems und der austauschgekoppelten Messschicht unterschieden. Da das Referenzsystem nahezu identisch mit dem bei Infineon Technologies verfügbaren GMR-Schichtstapel ist, wurden die entsprechenden Untersuchungen bei Infineon am GMR durchgeführt. Untersuchungen zur Stabilität der austauschgekoppelten Messschicht wurden bei Siemens durchgeführt.

Abb. 9 zeigt zunächst die Ergebnisse zur thermischen Stabilität von unstrukturierten GMR-Schichten einmal als Funktion der Deckschicht, zum anderen als Funktion der Auslagerungstemperatur. Die starke Abhängigkeit der Stabilität der Schichtstapel von der Deckschicht (Abb. 9 links) bedeutet umgekehrt, dass das für alle untersuchten Schichtstapel identische Referenzsystem nicht den begrenzenden Faktor darstellt. Die weitere Untersuchung von Schichtstapeln mit stabiler Deckschicht bei verschiedenen Temperaturen (Abb. 9 rechts) erlaubt die Bestimmung einer Aktivierungsenergie.

Abb. 10 zeigt die resultierende Arrheniusauftragung mit dem schärfsten automobilen Anforderungsprofil (175h, 3000h) als Referenzwert. Die hohe ermittelte Aktivierungsenergie von 2,1 eV sorgt dafür, dass diese thermische Belastung für einen GMR-Schichtstapel kein Problem darstellt. Dies gilt uneingeschränkt auch für alle strukturierten GMR-Streifen mit Streifenbreiten zwischen 0,63 und 5 µm, die in diesem Projekt untersucht wurden.

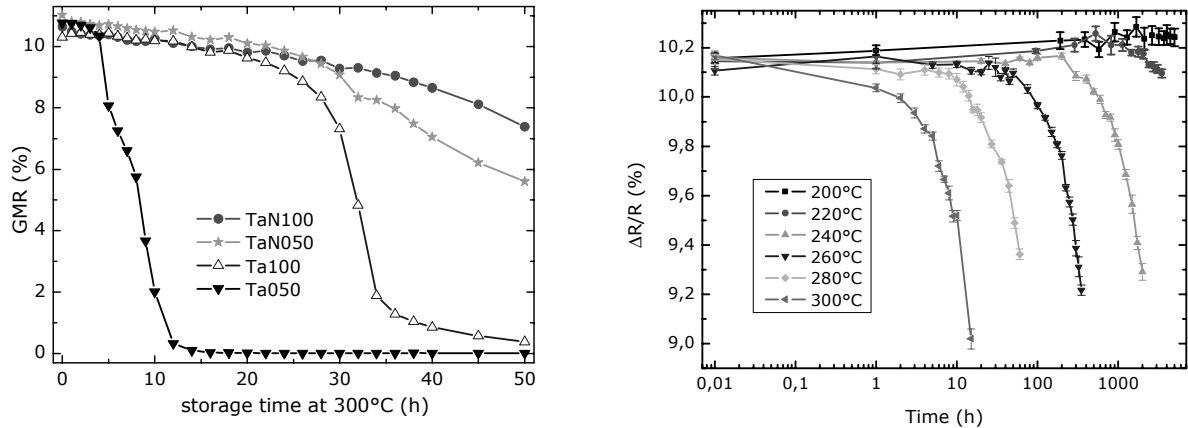


Abb. 9: Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchungen und unstrukturierten GMR-Schichtstapeln: links als Funktion der Deckschicht; rechts als Funktion der Auslagerungstemperatur

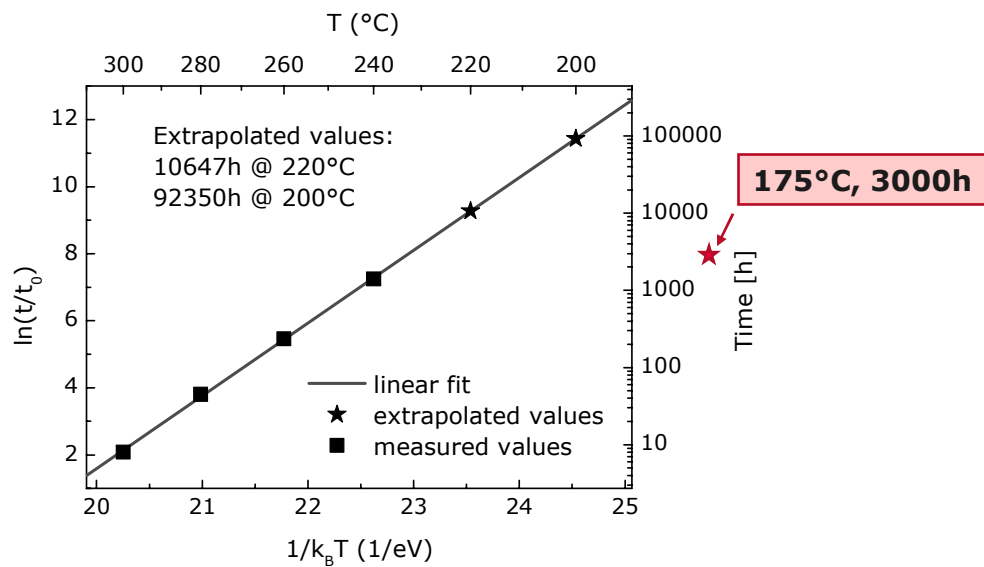


Abb. 10: Arrheniusplot zur Bestimmung der Aktivierungsenergie der thermischen Degradation von GMR-stacks. Es ergibt sich eine Aktivierungsenergie von 2,1 eV, d.h. eine sehr hohe thermische Aktivierung.

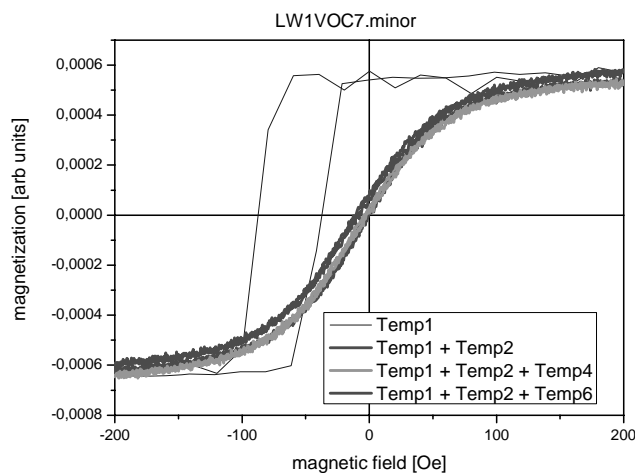


Abb. 11: Transferkurven des TMR-Tech-Zielstacks nach Formierung des Referenzsystems (Temp1), Drehung der Austauschisotropie in der Messschicht (Temp2), 12 h (Temp4) und 48h (Temp6) bei 200°C ohne Magnetfeld.

Einen zusätzlichen Aspekt stellt im Anwendungsfall die Anwesenheit von magnetischen Feldern bei erhöhten Temperaturen dar. Auch hierzu wurden umfangreiche Untersuchungen am Referenzsystem durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass auch bei vergleichsweise hohen Magnetfeldern und hohen Temperaturen die Stabilität des Referenzsystems gewährleistet ist und somit von dieser Seite keine Einschränkungen bezüglich der Verwendbarkeit von TMR-Schichtstapeln in automobilen Anwendungen zu erwarten.

Anders stellt sich die Lage hinsichtlich der austauschgekoppelten Messschicht dar. Die reine Temperaturlagerung des TMR-Tech-Zielstacks deutet nicht auf Probleme bzgl. der thermischen Stabilität hin (Abb.11). Bedenkt man jedoch die Prozessparameter, die zur Einstellung der senkrechten Anisotropie benutzt wurden, wird sogleich klar, dass die thermomagnetische Stabilität der Messschicht äußerst begrenzt ist. In der Tat zeigen sich deutliche Degradationen bereits bei Temperaturen von 100°C und einigen 10 mT für wenige Minuten. Dies ist deutlich schlechter als zu Beginn des Projektes befürchtet. Abb. 7 zeigt jedoch einen Weg auf, wie die thermische Stabilität signifikant über die Abscheidebedingungen des IrMn verbessert werden kann. In der Tat wurde in ersten Versuchen an Schichtstapeln mit modifizierten IrMn-Prozessparametern festgestellt, dass die für Einprägung der senkrechten Anisotropie notwendige Temperatur von 220°C auf über 280°C erhöht werden konnte.

## 6.2.4 Rauschverhalten von TMR-Sensoren

Ein weiterer Aspekt der im Rahmen dieses Projektes untersucht werden sollte, ist das Rauschverhalten der TMR-Sensoren im Vergleich zum GMR. Zu diesem Zweck wurden TMR-Proben in der Siemens-Laborlinie strukturiert und entsprechend den ermittelten Temperaturbedingungen im Magnetfeld wärmebehandelt, um optimale Sensoreigenschaften (hohes Signal, hohen Linearitätsbereich, geringe Hysterese) zu erzielen.

Der Unterschied der einzelnen Proben lag im Wesentlichen in der Abscheidung der Tunnelbarriere. Während bei Infineon entweder eine Mehrlagenbarriere oder eine Einzelbarriere aus MgO verwendet wird, ist bei Siemens ein Prozess etabliert, bei dem erst eine dünne Mg Schicht abgeschieden wird und darauf die eigentliche MgO Barriere vom oxidischen Target.

Ein weiterer Unterschied lag in der Einstellung der Grundmagnetisierung der Messschicht. Während die Infineon Sensoren auf dem in dem Projekt erarbeiteten Konzept der gepinnten Messschicht beruhen, ist die Messschicht bei den Siemens Sensoren ungepinnt und die Linearisierung der Sensorkennlinie beruht auf einer entsprechenden Temperaturbehandlung im Querfeld.

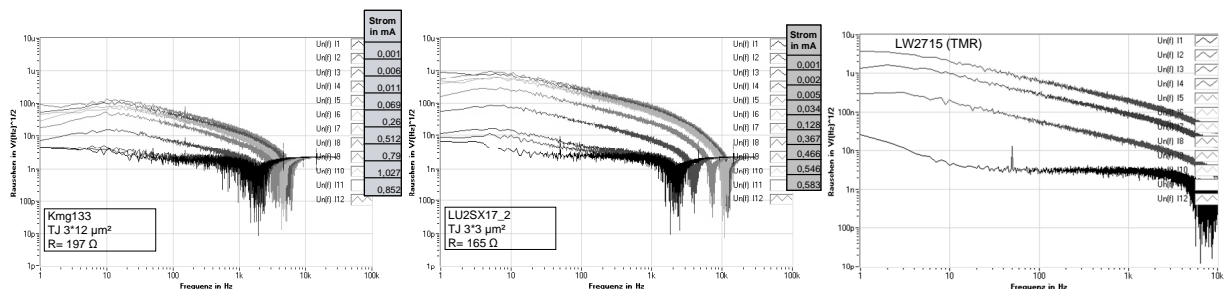


Abb. 12: a) Rauschspannung über der Frequenz für die 3 unterschiedlich hergestellte TMR Sensoren mit ähnlichem Grundwiderständen 150-300 Ω Der Schichtstapel in a) wurde bei Siemens CT MM1 abgeschieden und hat eine Mg/MgO Barriere, b) und c) sind in der ANELVA Anlage bei ALTIS bzw. in Regensburg abgeschieden und bestehen aus einer MgO Multilagenbarriere b) bzw. einer MgO Einzelschichtbarriere c).

Abb. 12 zeigt das Rauschspektrum der verschiedenen Sensoren, bei dem man signifikante Unterschiede beobachtet. Sensorstrukturen mit der Multilagenbarriere (Abb. 12b) weisen dabei eine etwa um den Faktor 10 höhere Rauschamplitude über den gesamten Frequenzbereich auf, als die Sensoren, die eine Mg/MgO Barriere besitzen (Abb. 12a). Die ursprüngliche Vermutung, dass der Barrierenprozess für dieses höhere Rauschen verantwortlich ist, konnte nicht bestätigt werden, da auch die mit derselben Anlage hergestellte Einlagenbarriere ein erhöhtes Rauschen zeigt. Die Ursache für dieses Verhalten konnte im Rahmen des Projekts nicht identifiziert werden.

Neben den Barriereigenschaften wurde der Einfluss äußerer Magnetfelder auf das Rauschverhalten von TMR-Sensoren untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 13 gezeigt. Einerseits nimmt die

Rauschamplitude mit dem Widerstand des Sensors zu, was die Asymmetrie der Rauschspannung zwischen positiven und negativen Feldbereich erklärt. Andererseits zeigt das Rauschen ein deutliches Maximum bei kleinen Feldern.

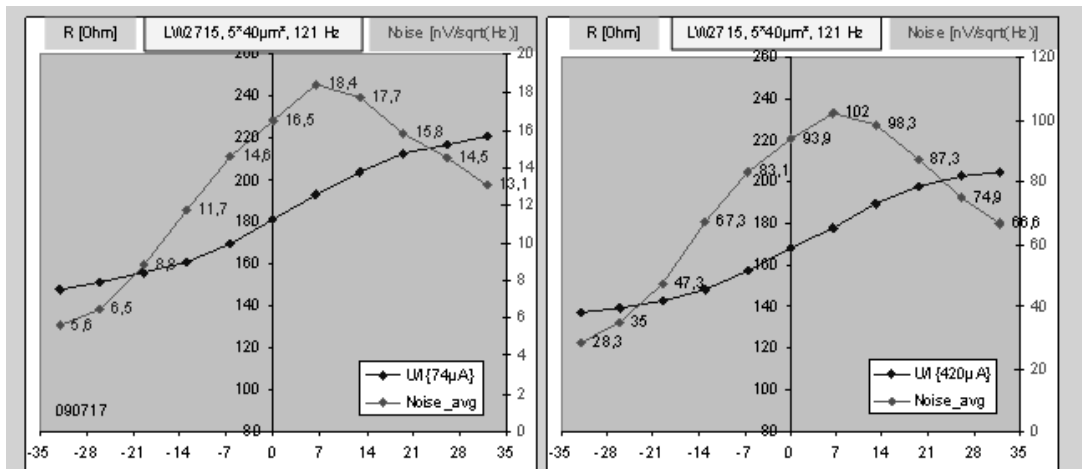


Abb. 13: Magnetfeldabhängiger Widerstand TMR in [Ω] (mittlere Achse) und die bei 121 kHz gemittelten

Rauschamplituden in  $[nV/\sqrt{Hz}]$ . (rechte Achse) in Abhängigkeit des äußeren Magnetfeldes  $[kA/m]$ . Am Verlauf des TMR Effekts (■) erkennt man sehr gut den in Abb 1c gezeigten Verlauf. Das Rauschspektrum (■) dagegen weist ein Maximum in der Nähe des feldfreien Zustands auf. Ebenfalls zu sehen ist eine Überlagerung des Widerstandsverlauf mit dem Rauschverhalten.

Der Grund dafür wird darin vermutet, dass statistische Schwankungen in der Magnetisierung, die zu einer statistischen Widerstandsänderung führen, im Bereich der größten Steigung der Empfindlichkeitskurve den größten Effekt haben. Andererseits sollten solche (evtl. thermisch aktivierten) statistischen Schwankungen mit dem Anlegen eines Feldes unterdrückt werden. Beide Erklärungen können den in den Messungen ermittelten Verlauf qualitativ erklären, können aber nicht experimentell unterschieden werden. Dazu wären z.B. temperaturabhängige Messungen notwendig.

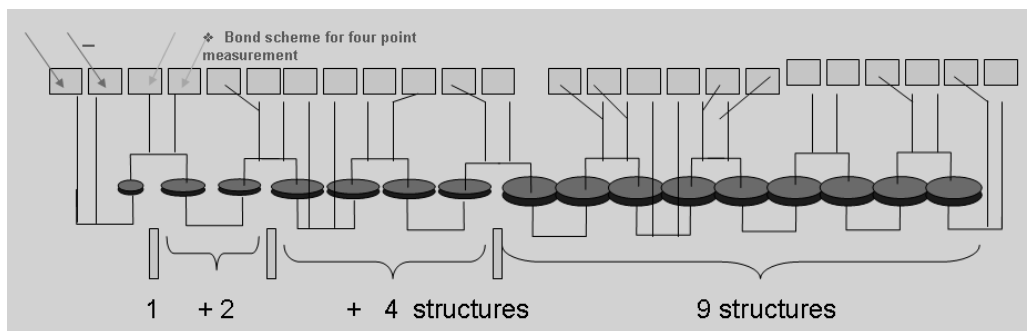


Abb. 14: Serienschaltung von TMR Zellen mit unterschiedlichen Positionen zur Kontaktierung für die den Messstrom bzw. zum Abgriff der Sensorspannung (4-Punktmessmethode). Die Radien der Einzelzelle, der 2-fach, 4-fach bzw. 9-fach Serienschaltung sind 1.8, 2.5, 3,6 und 5.4  $\mu m$  wodurch sich jeweils inverse Flächensummen von  $0,1 \mu m^{-1}$  ergeben.

Bereits in der Planungsphase des TMR Tech Projekts gab es Ideen zur Serienschaltung von TMR Zellen zur Verringerung des Rauschens. Die dem Konzept zugrundeliegende Idee ging davon aus, dass sich die Rauschbeiträge in einer Serienschaltung insgesamt zu einem geringeren Gesamtrauschen führen sollten.

Abb. 14 zeigt ein dafür entworfenes Netzwerk aus in Serie geschalteten TMR Sensoren, mit unterschiedlichen Abgriffspunkten zur Bestimmung des Widerstands bzw. des Rauschens. Die Einzelelemente sind flächenmäßig so angepasst, dass sich in Summe ein vergleichbarer Widerstand wie der des Einzelelements ergibt (Fehler beim Strukturübertrag wie „Schrumpfung“, bzw. Lithographietoleranzen wurden dabei nicht berücksichtigt).



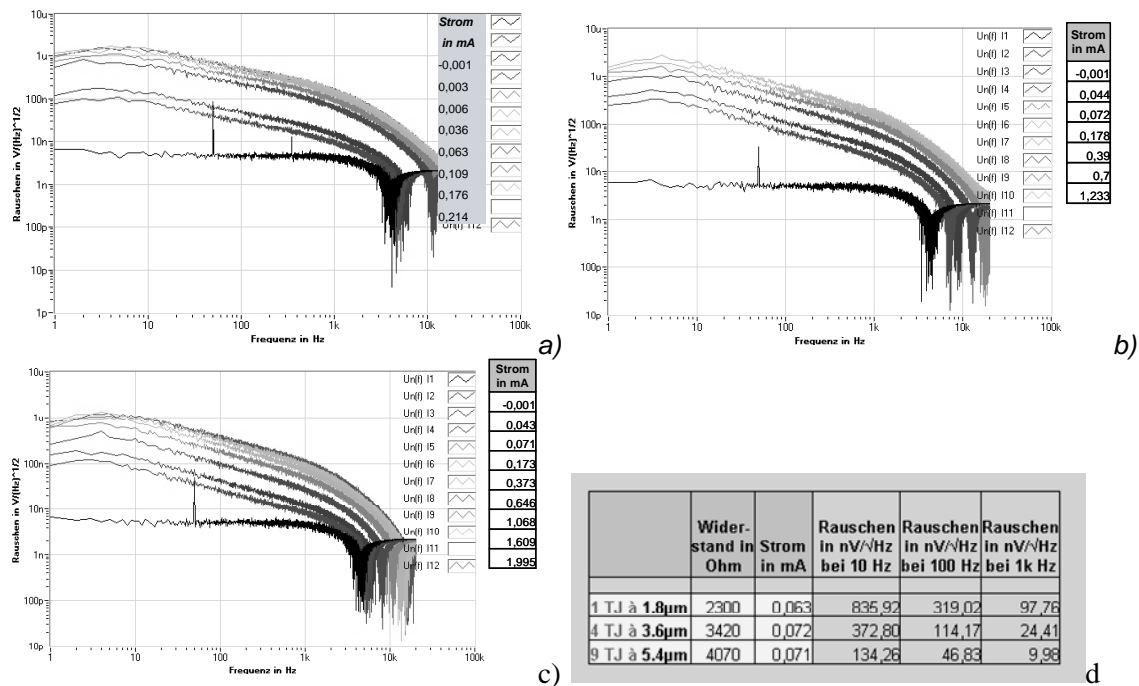


Abb. 15: Rauschspektren der unterschiedlichen Sensorschaltungen a) Einzelelement mit 2.3k $\square$ , b) 4-er Serie mit 3,4 k $\square$  und c) 9-er Serie mit 4,1 k $\square$  Gesamtwiderstand. Sowie ein Überblick der Rauschamplituden bei annähernd gleichem Strom durch die Serie d)

Rauschmessungen an diesen Teststrukturen bestätigen im Wesentlichen das Konzept. In Abb. 15 sind die gemessenen Rauschspektren der jeweiligen Kombinationen gezeigt und tabellarisch die Rauschamplituden bei verschiedenen Frequenzen aufgelistet.

Hat das einzelne Element eine Rauschamplitude bei 1 kHz (@ 0,063mA) von ca.  $100 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  so zeigt die 9-er Serie bei 1 kHz @0.071mA) nur etwa  $10 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  und die 4-er Serie ca.  $24 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Nach der Theorie sollte das 1/f-Rauschen mit 1/Fläche also bei der 4-er Kette auf  $\frac{1}{4}$  und bei der 9-er Kette auf  $\frac{1}{9}$  abnehmen, was das Ergebnis sehr schön erklärt.

Ein Hauptziel des Projekts war die Bewertung des Potentials von TMR Sensoren im Hinblick auf gesteigerte Empfindlichkeit gegenüber GMR Sensoren. Bekannt war, dass die Widerstandsänderungen des TMR Effekts bei der Verwendung von MgO Barrieren und amorphen Messschichten um etwas mehr als eine Größenordnung höher liegen als bei dem GMR Effekt.

Zur abschließenden Bewertung wurden zwei Sensoren aus Standardschichtsystemen verwendet, wie sie derzeit bei Infineon hergestellt werden können. Die Sensoren wurden so ausgewählt, dass sie in etwa den gleichen Grundwiderstand besitzen, um den Einfluss des Widerstands bzw. des Messstroms möglichst auszuschließen. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in Abb. 16 anhand des Rauschspektrums der beiden Sensoren M5027K (= GMR) und LW2715\_4 (=TMR) bei einer Stromstärke von 74 $\mu\text{A}$  direkt miteinander verglichen. Als Referenz dient ein rauscharmer Messwiderstand. Deutlich sieht man, dass der TMR Sensor(a), der einen Signalhub von etwa 100% aufweist über den gesamten Frequenzbereich eine etwa um eine Größenordnung stärkere Rauschspannung aufweist als der GMR Sensor, dessen Signalhub zu 10% ermittelt wurde.

Für die Anwendung interessant ist allerdings das Signal/Rauschverhältnis eines Sensors welches aufgrund obiger Ergebnisse für beide Sensorkonzepte nahezu identisch. Der direkte Vergleich hinkt jedoch in soweit, als dass der TMR Sensor sehr viel kleinere Abmessungen von nur wenigen  $\mu\text{m}^2$  aufweist, während der GMR Sensor mehrere  $100\mu\text{m}^2$  misst. Da das Rauschen umgekehrt proportional zur Sensorfläche ist, zeigen TMR Sensoren deutlich bessere Signal/Rauschverhältnisse für vergleichbare Sensorflächen.

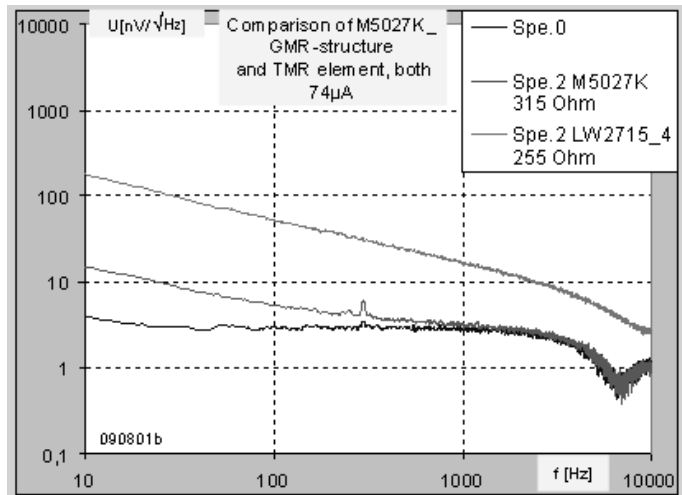


Abb. 16: Direkter Vergleich des Rauschspektrums eines GMR (-) und TMR (-) Sensors mit ähnlichem Grundwiderstand bei einem fixen Messstrom von 74  $\mu$ A

Darüber hinaus wird das Rauschen durch eine Serienschaltung der TMR-Zellen reduziert, während das Signal aufgrund der Biasabhängigkeit wegen des Spannungsteilungseffektes sogar ansteigt. Somit verbessert sich das S/N-Verhältnis in solchen Anordnungen auf zweierlei Weise. Bei der Realisierung des integrierten Stromsensordemonstrators wurde daher eine Verschaltung von zwei TMR-Zellen für jeden Brückenwiderstand implementiert.

### 6.3 Prozesstechnologie

Die Analyse der ersten in Regensburg prozessierten TMR-Kurzläuferscheiben zeigte, dass das für diese Technologie gewählte Integrationskonzept drei kritische Prozessschritte beinhaltet:

- die Kontaktierung der unteren Elektrode über die antiferromagnetische Schicht
- die kurzschlussfreie Strukturierung des TMR-Schichtstapels
- die Kontaktierung des TMR-Elementes von oben

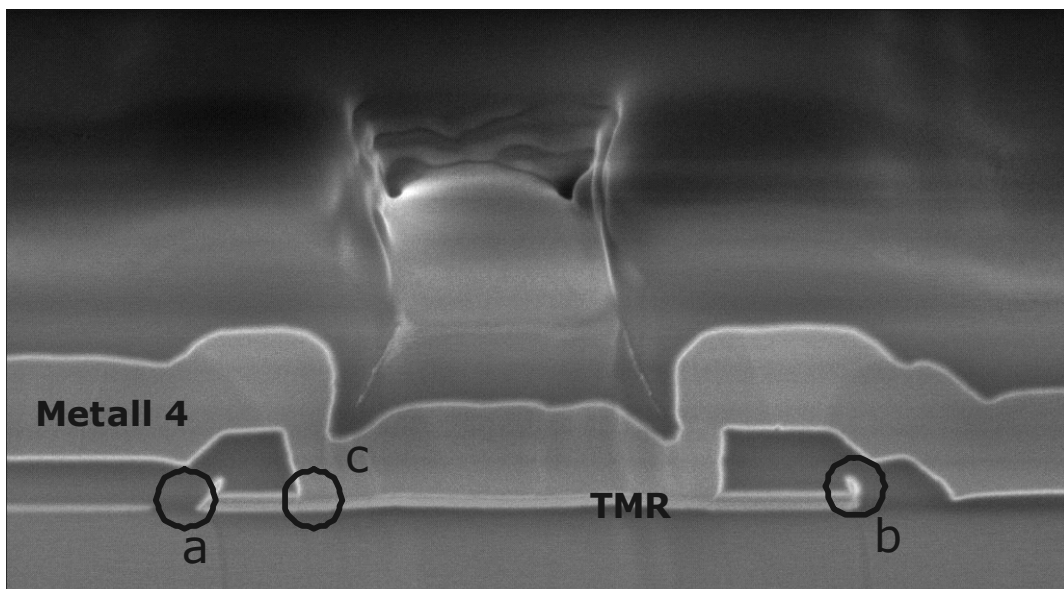


Abb. 17: Querschnittsaufnahme durch ein TMR-Element mit den häufigsten Defekten: a) unterbrochene Zuleitung zur unteren Elektrode; b) Seitenwandredeposition; c) Überätzung des oberen Kontaktloches

Das Ergebnis einer Prozessführung, bei der diese drei Prozessschritte nicht in idealer Weise durchgeführt wurden, ist in Abb. 17 gezeigt. Es fällt zunächst auf, dass die untere Zuleitung, die den Kontakt zum unteren Via (nicht im Bild) herstellen soll unterbrochen ist. Die nur wenige nm dicke

Elektrode ist in der Nähe der TMR-Zelle aufgrund des sogenannten Microtrenching-Effektes durchgeätzt worden (a). Des Weiteren hat der Prozess zur Strukturierung der TMR-Zelle zu Ablagerungen von Stackmaterial an der Zellenseitenwand (b) geführt, was die Gefahr eines Zellkurzschlusses birgt, falls diese Ablagerung in Höhe der MgO-Tunnelbarriere zu liegen kommt. Schliesslich erfolgte an dieser Stelle der Scheibe eine Überätzung des Kontaktloches bis in den TMR-Schichtstapel (c), bei der die Tunnelbarriere entfernt wurde.

Allen drei genannten Prozessschritten ist gemeinsam, dass ihre Prozessfenster durch die TMR-Schichtdicken im nm-Bereich definiert sind. Eine erfolgreiche Integration erfordert daher eine exzellente Kontrolle der Strukturierungsprozesse und dabei insbesondere der TMR-Strukturierung.

Um die Ätzprozessentwicklung in Regensburg zu unterstützen, wurde eine Methode zur schnellen Analyse des Ätzfortschrittes entwickelt. Den Kern dieser Methode stellt die Vermessung der Scheiben mittels Kerr-Magnetometrie direkt nach dem Ätzen dar. Das in Regensburg zur Verfügung stehende Kerr-Magnetometer erlaubt die Aufnahme der magnetischen Signale an verschiedenen Orten auf der Scheibe, die sich dann zu einer Landkarte zusammensetzen lassen. Anhand der Signal-Intensität und der Kurvenform lässt sich die Ätztiefe sehr genau abschätzen. Die Methode erlaubt im Bereich des TMR-Schichtstapels prinzipiell eine nanometergenaue Kontrolle. Diese ist essentiell zur Erreichung des angestrebten Stopps der Ätzung in der nur etwa 2nm dicken MgO-Barriere. Im letzten Zwischenbericht wurden bereits erste Ergebnisse vorgestellt. Dabei fiel auf, dass der Ätzprozess einen starken Gang über die Scheibe induzierte, der es unmöglich machte, einen Stopp in der Barriere über die gesamte Scheibe hinweg zu realisieren. Dieses Problem wurde im Hinblick auf die zeitlichen Rahmenbedingungen zur Fertigstellung eines integrierten Stromsensordemonstrators im abschließenden Projektzeitraum auf zwei Weisen adressiert: zunächst wurde versucht, alle Prozesse des ursprünglichen Integrationsflusses so aufeinander abzustimmen, dass ein möglichst großer Teil der Scheibe funktionelle Bauteile liefert (siehe unten). Zum anderen wurde ein neuartiges Integrationskonzept entwickelt, das unter Verwendung einer Zwischenschicht in der Hartmaske den Ätzstopp in der 1,5nm dicken MgO-Barriere über die gesamte 200mm-Scheibe ermöglicht. Aufgabe der Zwischenschicht ist es, durch eine hohe chemische Selektivität zum Hartmaskenmaterial einen homogenen Ätzstopp für die Hartmaskenstrukturierung zu gewährleisten. Nach ebenso selektiver Entfernung der Zwischenschicht müssen lediglich Deckschicht, IrMn und die Messschicht entfernt werden, bis die MgO-Schicht erreicht wird (d.h. 15 nm statt 165 nm).

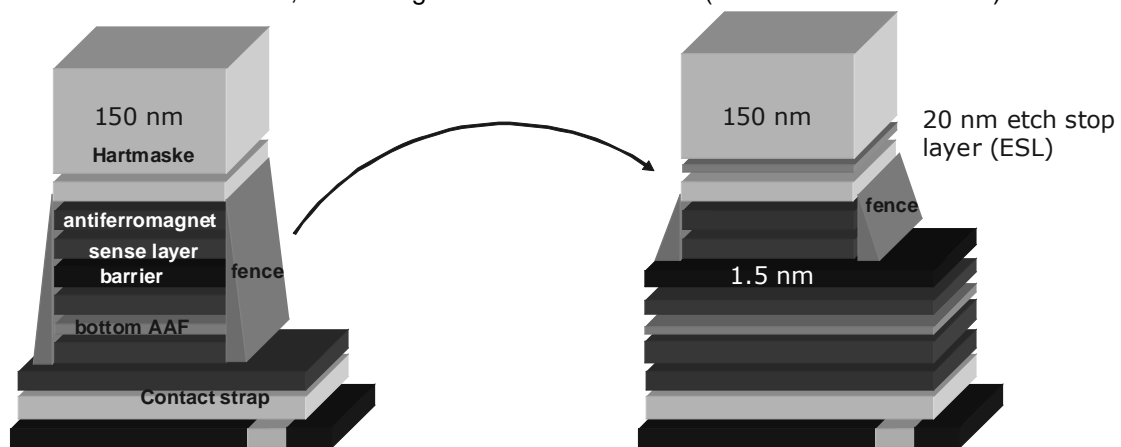


Abb. 18: Vergleich zwischen konventioneller Strukturierung und Ätzstopp in MgO mit Hilfe der Zwischenschicht in der Hartmaske. Eventuell auftretende Seitenwandablagerungen können bei der herkömmlichen Prozessführung zu Kurzschlüssen am Barrierenrand führen, während sie beim Stopp in der Barriere unkritisch sind.

Abb. 19 zeigt das Ergebnis der Kerrmagnetometeranalyse einer auf diese Weise strukturierten Scheibe. Bis auf den äußersten Randbereich (linke obere bzw. untere Ecke) ist die für die Messschicht charakteristische Stufe in der Kennlinie verschwunden, aber das für die Referenzschicht charakteristische Signal vorhanden, d.h. die Ätzung hat homogen über die gesamte Scheibe in der Barriere gestoppt.

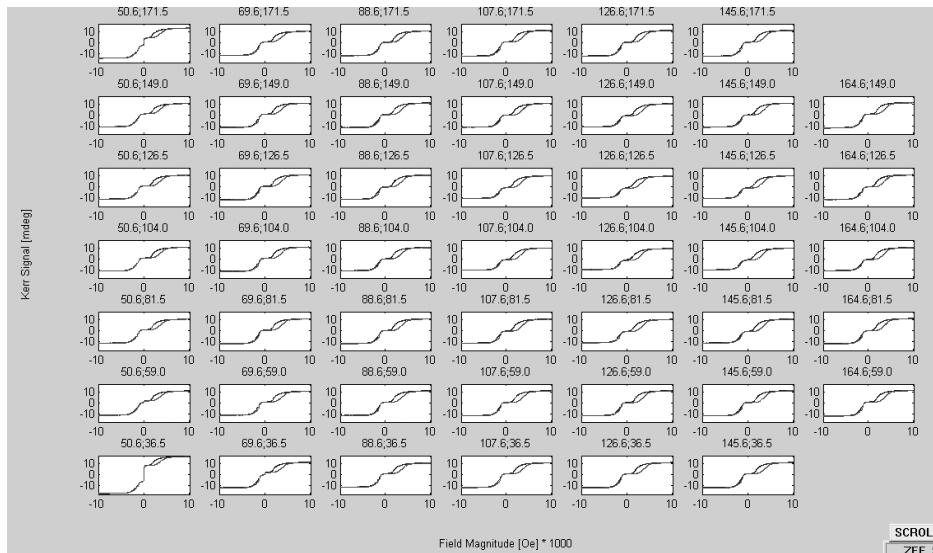


Abb. 19: Kartographie der TMR-Stackätzung auf der 8-Zoll-Scheibe. Bis auf den äußersten Randbereich (linke obere bzw. untere Ecke) ist die für die Messschicht charakteristische Stufe in der Kennlinie verschwunden, aber das für die Referenzschicht charakteristische Signal vorhanden, d.h. die Ätzung hat homogen über den gesamten Wafer in der Barriere gestoppt.

In der weiteren Prozessierung lässt sich die Zwischenschicht ein zweites Mal nutzen, nämlich bei der Herstellung des Topkontaktes. Die dafür nötige Kontaktlochätzung muss zuverlässig auf der Stackoberseite stoppen, ganz so wie es während der Hartmaskenstrukturierung durchgeführt wird. Aufgrund der geringen Anzahl an Kontaktlöchern ist eine Überprüfung mittels Kerrmagnetometrie hier leider nicht möglich, d.h. eine Optimierung des Prozesses kann nur über einen Prozesssplitt erfolgen. Leider traten bei der Durchführung dieser Experimente zum Teil starke Delaminationen auf, die zum Verwurf dieser Scheiben führten. Im Rahmen dieses Förderprojektes konnten daher keine elektrischen Ergebnisse dieser Integrationsvariante präsentiert werden.

## 6.4 Integrierter Stromsensordemonstrator

Hauptgegenstand der Arbeiten im Rahmen des TMR-Tech-Förderprojektes bei Infineon Technologies war die Realisierung eines Stromsensors auf Basis der TMR-Technologie. Aufgrund der oben vorgestellten Überlegungen zum Sensorkonzept wurden integrierte TMR-Sensoren mit folgenden Kernkomponenten gefertigt:

- TMR-Stack mit durch IrMn anisotrop ausgerichteter Messschicht zur Erweiterung des linearen Bereichs und Reduktion der Hysterese
- BiCMOS-Schaltung mit Spannungsversorgung und Verstärkung des Brückensignals in 0,5µm-Technologie (siehe Abb. 20 links)
- Zwei asymmetrisch angeordnete Brücken mit unterschiedlicher Empfindlichkeit, ebenfalls zur Erweiterung des Messbereiches in Kombination mit einer angepassten Stromführung (Abb. 20 rechts).

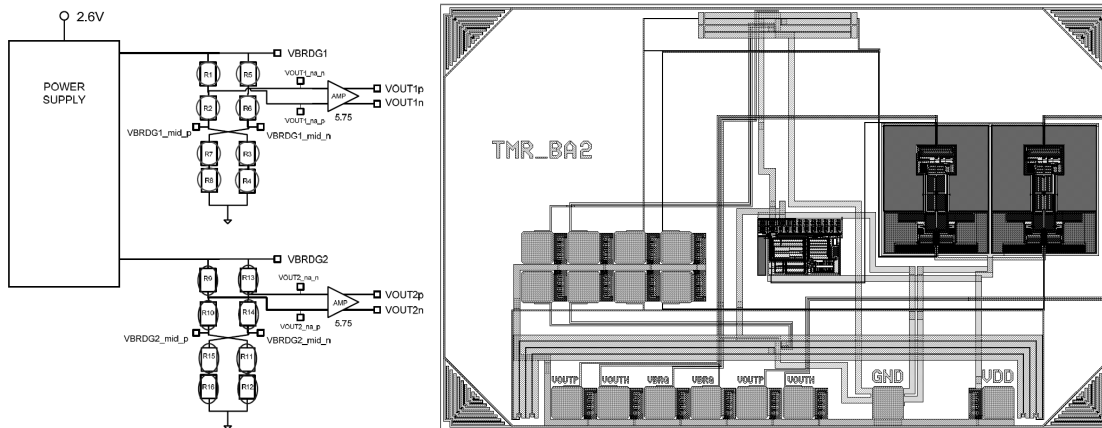


Abb. 20: Links: Konzept der BiCMOS-Grundschiung, Rechts: Layout des integrierten Stromsensors. In der Mitte der Chipoberkante sind die Elemente der unempfindlichen Brücke angeordnet, in den Ecken der Chipunterkante die der empfindlichen Brücke

Abb. 21 zeigt Ergebnisse der Charakterisierung von integrierten Stromsensoren in dem eigens dafür entwickelten differentiellen Spitzenmessplatz. Für die unempfindliche Brücke ( $1,5 \times 16,7 \mu\text{m}^2$ -Zellen) beobachtet man eine Empfindlichkeit von  $1,36 \text{ mV/mT}$ , linear über den gemessenen Bereich. Eine Hysterese ist hier nicht erkennbar. Die beobachteten Werte ( $\pm 30 \mu\text{T}$ ) sind dominiert durch Rauschen der Messung. Obwohl sich eine ganze Reihe von funktionierenden TMR-Zellen auf der Scheibe finden, wird die Ausbeute speziell für die unempfindliche Brücke durch Zellkurzschlüsse beeinträchtigt. Hochempfindliche Brücke ( $5,4 \times 4,6 \mu\text{m}^2$ -Zellen).

Für die hochempfindliche Brücke erhält man eine Empfindlichkeit von  $9,6 \text{ mV/mT}$  linear über Messbereich, was einem Faktor 7 gegenüber der unempfindlichen Brücke aufgrund Formanisotropie entspricht. Die beobachtete Hysterese ist hier kleiner als  $130 \mu\text{T}$ , wobei mehr als die Hälfte davon auf eine Erwärmung der Messapparatur zurückzuführen ist. Generell beobachtet man eine höhere Ausbeute als bei der unempfindlichen Brücke.

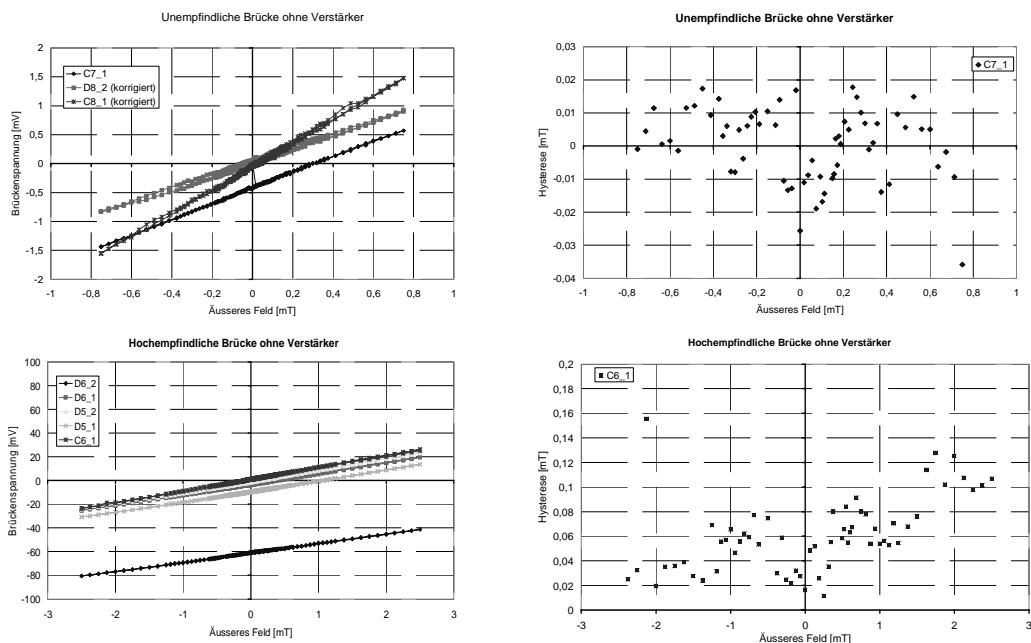


Abb. 21: Kennlinien & Hysterese der unempfindlichen (oben) und der hochempfindlichen Brücke (unten) von verschiedenen Bauteilen

Parallel zur Charakterisierung im Spitzenmessplatz wurden einige Sensoren in einem Standardsensorgehäuse aufgebaut. Obwohl es hier aufgrund von Kurzschlüssen zwischen den Bonddrähten zu Ausbeuteverlusten kam, konnte erfolgreich ein Demonstrator aufgebaut und betrieben werden. Abb. 22 zeigt die Kernkomponenten des Demonstrator-konzeptes: Stromführung über eine

Doppel-U-Geometrie, asymmetrische Anordnung von hoch- bzw. unempfindlicher Brücke und inhomogene Feldverteilung.

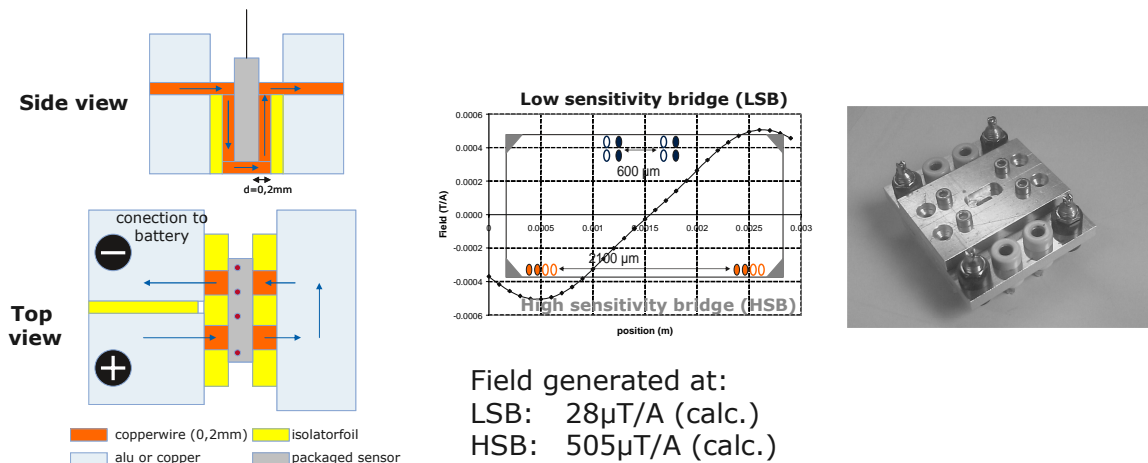


Abb 22: Konzept des Stromsensordemonstrators: Stromführung als Doppel-U-Geometrie in Höhe der empfindlichen Brücke, asymmetrisch dazu angeordnete unempfindliche Brücke. Rechts ist die Bauteilaufnahme mit der integrierten Stromführung zu sehen.

Abb. 23 zeigt die Kennlinie eines in diesem Demonstrator betriebenen gehäuseten TMR-Sensors. Die hochempfindliche Brücke zeigt hier eine Empfindlichkeit von  $11,6\text{ mV/A}$ , was ca.  $414\text{ mV/mT}$  entspricht, und zwar wiederum linear über den ganzen gemessenen Bereich. Unter Annahme eines  $\pm 20\text{mT}$  weiten Arbeitsbereiches lässt diese Signalempfindlichkeit auf einen TMR-Hub von etwa 100% zurück schließen. Der beobachtete Offset der Kennlinie von rund  $72\text{ mV}$  kann durch einen Kurzschluss einer der acht beteiligten Zellen hervorgerufen sein.

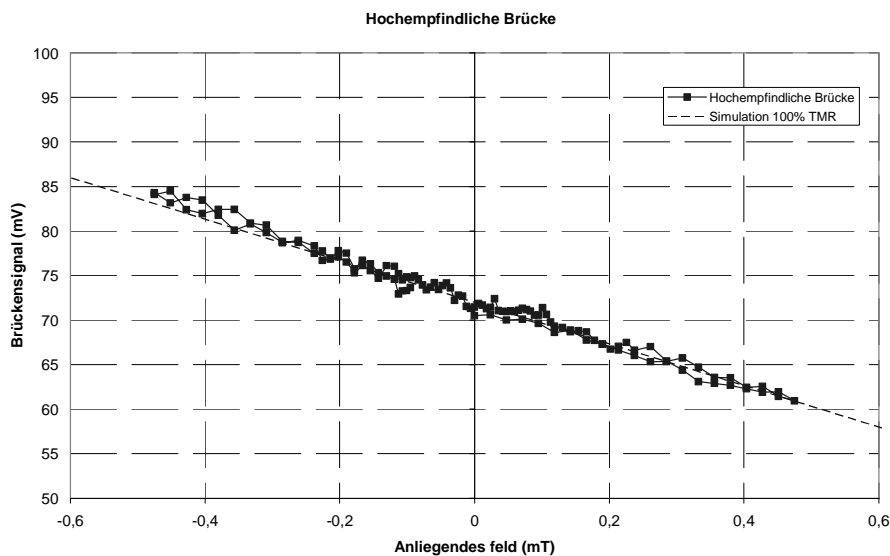


Abb 23: Kennlinie eines gehäuseten integrierten TMR-Sensors

Der vorliegende Demonstrator ermöglicht damit theoretisch die Messung von Strömen bis zu  $700\text{A}$  bei einer Messgenauigkeit im empfindlichen Bereich von mindestens  $125\text{mA}$ . Der TMR Stromsensor erfüllt damit die Zielspezifikation mit Ausnahme der automobilen Betriebstemperaturanforderungen (siehe unten).

## 6.5 Simulation von BMM und SMM Membranen

Als weiterer Teil des TMR-Tech Projektes wurden von der Universität Kassel FEM-Simulation von BMM- und SMM-Membranen durchgeführt, um die Arbeit des Projektpartners cäsar/Universität Kiel zu unterstützen. Hier sollen stellvertretend die Ergebnisse der Simulationen von realen SMM-Drucksensoren mit von der Universität Kiel zur Verfügung gestellten Daten bezüglich der Geometrie, Schichtstruktur und der technologischen Schritte vorgestellt werden. Die Simulationen dienten der Optimierung des realen Bauteils. Insbesondere der Einfluss der Top-Elektrode wurde untersucht und optimiert. Dazu wurden die Daten der Universität Kiel bezüglich der Geometrie und Schichtstruktur detailliert in die Rechnungen eingearbeitet (siehe Abb. 24). Weitere Angaben für die Simulation waren Größe und Position der Top-Elektrode, der exakte TMR-Stack Aufbau und die Prozessschritte (Abb. 25).

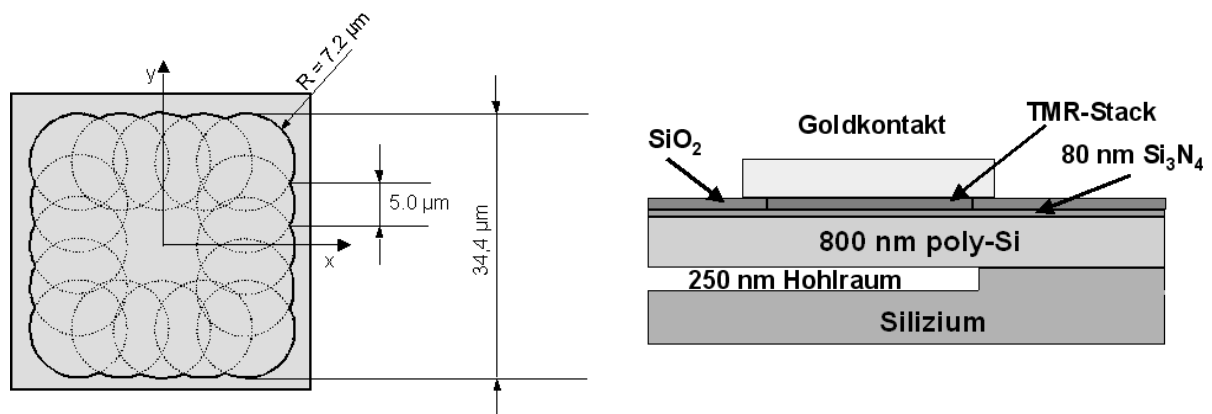


Abb. 24: Geometrie und Schichtstruktur der SMM mit TMR-Sensoren mit den jeweils für die Herstellung der ersten Drucksensoren an der Universität Kiel verwendeten Schichtdicken.

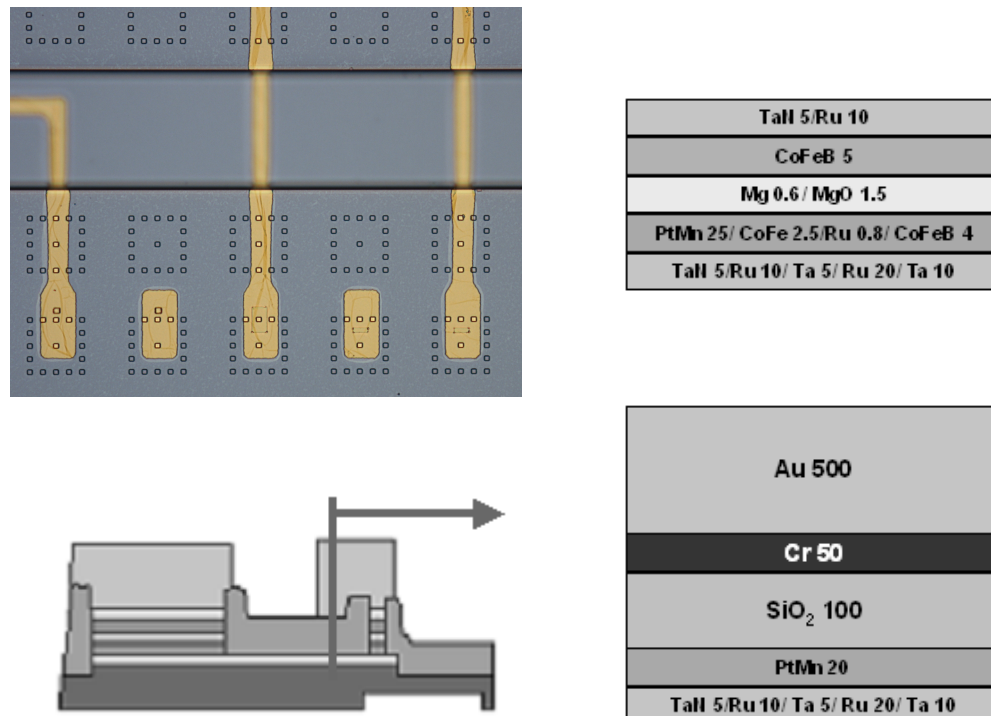


Abb. 25: Layout der SMMs mit Top-Elektrode aus Gold (oben links), Schichtstruktur der TMR-Sensoren (oben rechts), Querschnitt einer SMM und des zugehörigen Schichtaufbaus (unten).

Die Ergebnisse der Simulationen von Auslenkung und Verspannung bestätigten die Ergebnisse der ersten Designstudien. Die maximale Durchbiegung wurde in der Mitte der SMM beobachtet, die maximale Verspannung an den Positionen der Sensorelemente (Abb. 26). Die Geometrie der Top-Elektrode hat

keinen Einfluss auf die Auslenkungs- und Verspannungsverteilung. Lediglich die Maximalwerte ändern sich, was im Folgenden diskutiert wird.

Maximale Auslenkung und Verspannung steigen proportional mit dem Druck im untersuchten Bereich bis 5 bar an. Dies wurde auch in den ersten Designstudien beobachtet. Im Fall mit 100 nm SiO<sub>2</sub>-Schicht und großer Top-Elektrode sind die Werte im Vergleich zu Simulationen mit Top-Elektrode, die nur den TMR-Sensor (1 x 1 µm) bedeckt, geringer (Abb. 27). Dieser Trend spiegelt den Einfluss einer relativ flächigen Top-Elektrode auf die mechanischen Eigenschaften der SMM wieder.

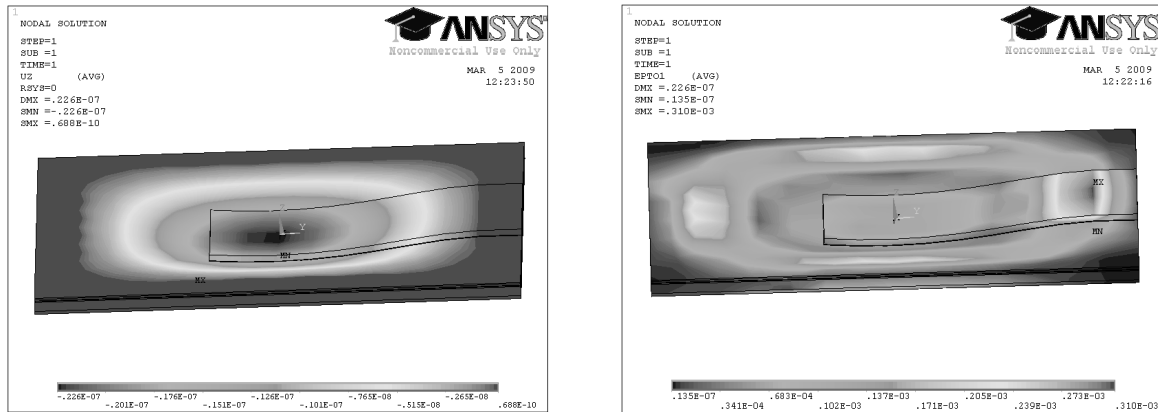


Abb. 26: Typische Auslenkungs- (links) und Verspannungsverteilung (rechts) auf der SMM (in diesem Fall bei 5 bar).

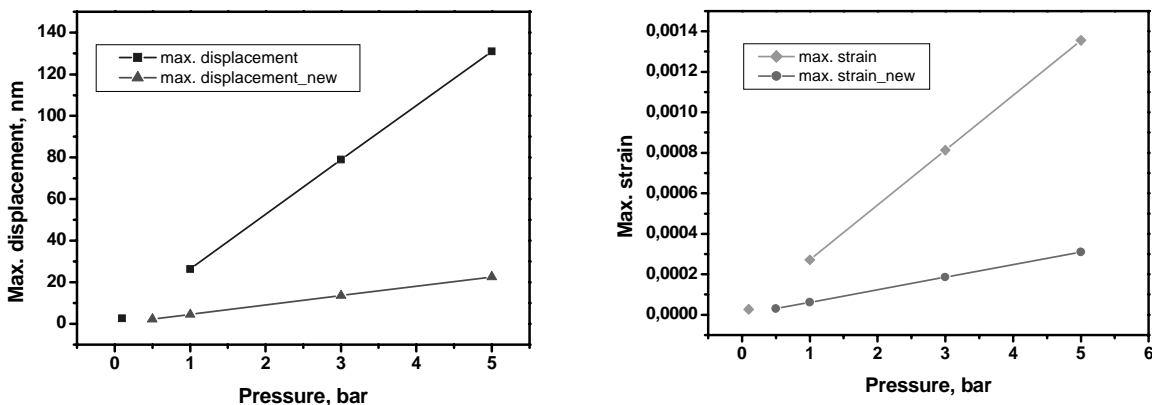


Abb.27: Abhängigkeit der maximalen Auslenkung und der maximalen Verspannung der SMM vom Druck. Vergleich der ersten Designrechnungen mit den Simulationen unter Verwendung der realen Geometrie und Schichtstruktur.

Um den technologischen Schritt für die Abscheidung der Top-Elektrode zu optimieren, wurden mehrere Simulationen mit Variation der Dicke (100 und 500 nm) der Goldschicht und der Größe der Top-Elektrode durchgeführt.

Obwohl die Auslenkungs- und Verspannungsverteilung durch Dicke und Länge nur leicht verändert werden, ist folgendes festzuhalten:

- (i) Die maximale Auslenkung ist bei kürzerer Elektrode etwas größer
- (ii) Höhere maximale Verspannung wird mit dickerer Top-Elektrode erreicht

Der Einfluss der Elektrodendicke ist stärker bei längerer Elektrode. Die mittlere Verspannung ( $\epsilon_{mit}$ ) in den TMR-Sensoren auf die MgO-Schicht wurde als Mittelwert entlang des Sensors von der Mitte nach außen bestimmt. Hier zeigt sich eine lineare Zunahme des Drucks (Abb. 28). Höhere Werte für  $\epsilon_{mit}$  wurde in beiden Fällen mit dünnerer Top-Elektrode berechnet.

Die Verspannungsempfindlichkeit bezüglich der mittleren Verspannung ( $d\epsilon_{mit}/dP$ ) in der sensitiven MgO-Schicht des TMR-Elements wurde über die linearen Abhängigkeiten bestimmt. Ein direkter Vergleich zeigt, dass die Empfindlichkeit bei dünnerer Elektrode (gleiche Länge) und kurzer Elektrode (bei gleicher



Dicke) höher ist (Abb. 29). Die höchste Verspannungsempfindlichkeit ( $> 0,02 \text{ mbar}^{-1}$ ) wurde daher mit kurzer und dünner Elektrode erzielt.

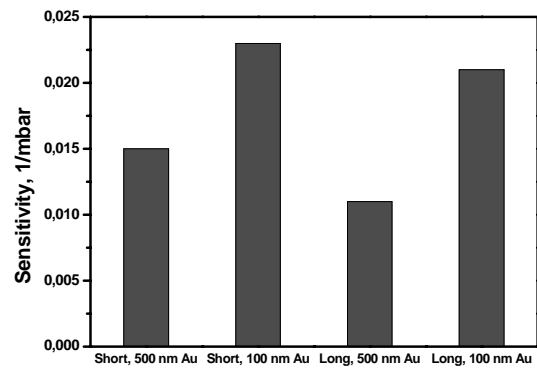
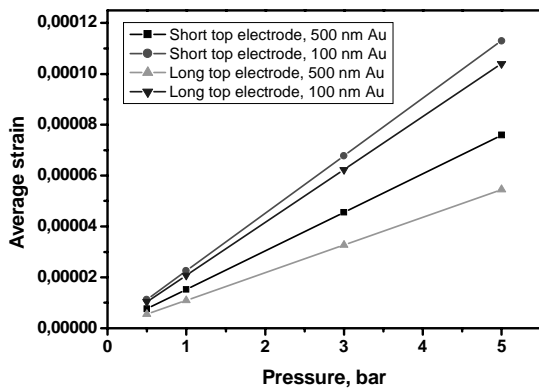


Abb. 28: Mittlere Verspannung in den Sensor-elementen bei Variation des Drucks für verschiedene Dicken und Größen der Top-Elektrode.

Abb. 29: Verspannungsempfindlichkeit der Sensorelemente in TMR-Elementen in Abhängigkeit der Dicke und Größe der Top-Elektrode.

## 7 Verwertung

Sensoren allgemein und solche, die auf Silizium basieren, sind ein schnell wachsender Markt im automobilen Umfeld.

Das Marktforschungsunternehmen Strategy Analytics rechnet für die Automobilelektronik mit einem Sensorgesamtmarkt von 15 Milliarden US Dollar im Jahr 2013, wovon ca. 3 Milliarden US Dollar auf die silizium-basierten Sensoren entfallen.

Die europäische Automobilindustrie wird, vor Nordamerika, die größte Abnahmeregion für Sensoren im Automobil sein.

Einsatzfelder von Sensoren, für die die im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse Anwendung finden könnten, sind in nachfolgender Grafik dargestellt.

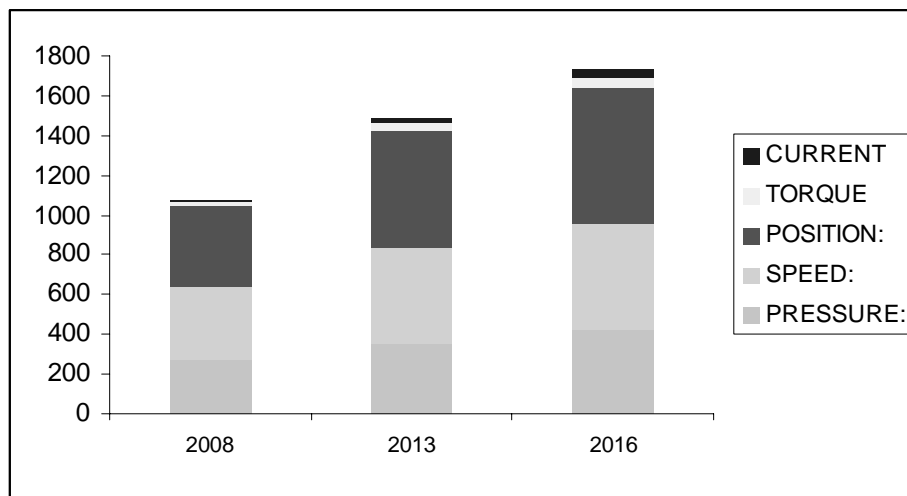


Abb 30: Anzahl Sensoren (mio. Stück) für ausgewählte Anwendungen im Automobil 2008, 2013, 2016

Für die Stromsensorik wird aufgrund der hohen Dynamik im Bereich der elektrischen Antriebstechnik eine besonders hohe Wachstumsrate von 58% p.a. bis zum Jahr 2013 und darüber hinaus vorausgesagt. Bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ist es notwendig, mithilfe eines Batteriemangements den Zustand der Batterie sowohl bei der Ladung als auch bei der Entladung genau zu erfassen. Darüber hinaus benötigt man Stromsensoren, um die Regelung des Elektroantriebes bewerkstelligen zu können. Der Gesamtmarkt der Stromsensorik im Auto soll sich bereits bis zum Jahr 2016 auf 55 Millionen US Dollar belaufen. Bedenkt man, dass bis dahin noch sehr moderate Stückzahlen elektrisch betriebener Fahrzeuge im Markt sind, so lässt sich schnell erahnen, welches Potential hier erschlossen wird, wenn erst einmal größere Fahrzeugstückzahlen in den Markt kommen.

Neben dem elektrischen Fahren gibt es aber nach wie vor interessante Anwendungsfelder für die Magnetfeldsensorik im klassisch angetriebenen Fahrzeug. Die meisten Anwendungen helfen Kraftstoff zu sparen und damit die CO<sub>2</sub>-Ziele besser erreichen zu können.

Die elektrische Lenkung unterstützt den Fahrer bedarfsgerecht mit zusätzlicher Lenkkraft. Alte Systeme waren so ausgelegt, dass dem Verbrennungsmotor über einen Riementrieb zu einer Hydraulikpumpe immer die maximal vorkommende Kraft „entzogen“ wurde. Die elektrische Lenkung stellt nur soviel Kraft zur Verfügung, wie tatsächlich benötigt wird. Die dadurch erzielbaren Kraftstoffeinsparungen sind erheblich. Magnetfeldsensoren werden hierbei eingesetzt, um die notwendige Kraft mithilfe eines Drehmomentsensors zu ermitteln.

Beim Thema „Speed“ geht es auch darum, die Rotation des Motors sehr genau zu erfassen, da dieses Signal (Kurbelwellensensor) maßgeblich für die exakte Synchronisation des gesamten Einspritzsystems auf den Motor ist. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung, die Emissionsstandards (z.B. Euro 5 bzw. 6) einhalten zu können. Um den Verbrauch weiter senken zu können, werden künftig kleinere Motoren eingebaut, die aber möglichst die gleiche Leistung der alten haben sollen. Dies lässt sich über die Aufladung des Motors über Turbolader erzielen. Hierbei geht von geregelten Ladern aus, die hierzu eine

Drehzahlinformation als Rückkoppelung ins Einspritzsystem geben. Bei den neuen automatisierten Getrieben, die ebenfalls zu Kraftstoffreduktion beitragen, werden ebenfalls „Speed“-Informationen benötigt.

Eine weitere Maßnahme zur Kraftstoffreduktion ist die variable Ventilsteuerung, die ebenfalls über neue Sensoren Rückmeldung zur Ventilposition and die Motorsteuerung gibt. Weitere Beispiele zur Positionssensierung sind die Erfassung der Stellung von Gaspedal und Drosselklappe.

Drucksensoren werden ebenfalls bei der Erfassung des Zustands Einspritzsystems und der Umgebungsbedingungen in vielfacher Weise benötigt. Hierbei wird der Umgebungsdruck, der Druck im Ansaugtrakt, im Kraftstoffsystem und im Abgassystem erfasst.

Infineon Technologies als weltweiter Marktführer bei den magnetischen Sensoren für das Automobil wird die im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse bei der Entwicklung neuer Magnetfeldsensoren für die oben genannten Anwendungen mit einfließen lassen.

Hierzu zählen insbesondere die Ergebnisse bezüglich der Stabilität der GMR- und TMR-Sensoren. In Automobilanwendungen ist zwar die Anzahl der Betriebsstunden eines Fahrzeuges überschaubar, dieses sollte aber auch noch nach mehreren Jahrzehnten einwandfrei funktionieren. Auch ist es wichtig die Sensorsignale hinsichtlich Temperatur stabil zu halten, da, wie oben beschrieben, die Einbauorte der Sensoren im Hochtemperaturbereich (z.B. Turbolader und Ventilsteuerung) liegen können.

Das Projekt zeigt, dass das im Projekt gewählte Exchange Bias Konzept für die Messschicht hinsichtlich seiner thermischen Stabilität nicht für den Einsatz im Automobil geeignet ist. Der Schichtaufbau muss weiterentwickelt werden, um ihn „automobilgerecht“ zu machen.

Für das stark wachsende Segment der Stromsensoren könnte der Einsatz von Sensormatrizen auf sinnvoll werden. Hierdurch könnte man eine Art „magnetisches Bild“ der Umgebung erfassen, welches sich, abhängig vom aktuellen Stromfluss durch einen Leiter, verändert. Das Projekt hat gezeigt, dass solche Matrizen mit hochempfindlichen TMR-Sensoren realisierbar sein könnten. Umfangreiche weitergehende Untersuchungen sind aber hierzu notwendig, um die genaue technische Umsetzbarkeit zu verifizieren.

Für Drucksensoren erscheinen die gewonnen Erkenntnisse erst nach weiteren umfangreichen Forschungsvorhaben einsetzbar.

## 8 Patente und Patentanmeldungen

Im Rahmen des TMR-Tech-Projekts sind folgende Patente bzw. Patentanmeldungen entstanden:

- 1) Werth, T., Zimmer, J., "Method of biasing a magneto resistive sensor element", US 11/838,569
- 2) Prügl, K., Zimmer, J., "Integrated Circuit including magneto-resistive structures", US-Patent 7598736
- 3) Zimmer, J., "Concept for detecting a change of a physical quantity by means of a conductor", US 2008/0084205
- 4) Bever, T., Zimmer, J., "Integrated Lateral Short Circuit for a Beneficial Modification of Current Distribution Structure for xMR Magnetoresistive Sensors", US 2009/0128282
- 5) Koss, S., "Magnetic sensor device and method" US 12/052,310
- 6) Raberg, W., Zimmer, J., "Magnetoresistive Magnetic Field Sensor Structure" US 2009/0015252
- 7) Koss, S., Zimmer, J., "Sensor System and Method" US12/185,385
- 8) Raberg, W., Zimmer, J., "Integrated Circuit with Magnetic Material Magnetically Coupled to Magneto-Resistive Sensing Element" US 12/198,143
- 9) Hammerschmidt, D., Zimmer, J., "Magnetic Sensor System and Method", US 12/269,168