

# **Schlussbericht zum Verbundprojekt:**

**Grundlagen elementarer,  
industriell nutzbarer  
magnetoelektronischer  
XMR-Funktionseinheiten  
(MultiMag)**

**Teilvorhaben :  
Prozess-Verifizierung  
und Systemdesign**

**Laufzeit:** 01.07.2008 - 30.09.2010

**Förderkennzeichen:** 13N9912

**Zuwendungsempfänger:** Sensitec GmbH

**Projektleiter:** Dr. Johannes Paul

Lahnau, den 31.03.2011

# I. Kurze Darstellung des Teilvorhabens

## I.1 Aufgabenstellung

Das übergeordnete Projektziel war es, für das Technologiefeld der Spintronik innovative Elemente eines Funktionalitätenbaukastens auf einer industriellen Technologieplattform zur Verfügung zu stellen. Dabei sollte insbesondere Grundlagenwissen von den beteiligten Hochschulen in enger Zusammenarbeit mit dem Industriepartner auf eine produktionsfähige Plattform, d.h. in industriell anwendbare Prozesse und Technologiefolgen umgesetzt werden. Somit wurden in diesem Projekt sowohl wissenschaftliche als auch methodisch-strukturelle Themen behandelt. Zu den wissenschaftlichen Themen gehörten die Definition der erforderlichen Funktionalitäten für den Baukasten, die konkrete Ausgestaltung der Technologiefolgen des Herstellprozesses unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen der Industriepattform sowie der Test und die Erprobung der hergestellten Demonstratoren.

Die einzelnen Funktionalitäten werden realisiert auf Basis der XMR-Effekte. Hierunter werden die verschiedenen Effekte verstanden, bei denen eine metallische Schichtstruktur unter Wirkung eines äußeren Magnetfeldes ihren Widerstand ändert. Insbesondere kommen hierfür der GMR- (Giant Magneto Resistance) und der TMR- (Tunnel Magneto Resistance) Effekt in Betracht. Der auch zu der Familie gehörende AMR- (Anisotropic Magneto Resistance) Effekt kann heute als Stand der Technik und in Großserienapplikationen erfolgreich industrialisiert betrachtet werden [1]. Der GMR-Effekt ist heute in einzelnen Applikationen ebenfalls erfolgreich in die industrielle Nutzung überführt worden [2], allerdings sind aufgrund des komplexen Schichtaufbaus und der daraus resultierenden Vielfalt technischer Realisierungsmöglichkeiten immer noch große Innovationspotenziale zu sehen.

So ist beispielsweise der so genannte CPP(current perpendicular plane)-GMR-Effekt, bei dem der Stromfluß senkrecht durch den Schichtaufbau geführt wird, und nicht wie beim gewöhnlichen GMR-Effekt in der Ebene des Schichtaufbaus, erst in wenigen industriellen Applikationen umgesetzt [3] und es gibt noch vielfältige Forschungsaktivitäten im universitären Umfeld [4].

Die Anwendungen des TMR-Effektes beschränken sich heute weitgehend auf die magnetische Datenspeicherung und als nichtflüchtiger Speicher für Nischenanwendungen [5]. Die Anwendungen in der Sensorik hingegen sind bislang dem Prototypenstadium nicht entwachsen, lassen aber ein insgesamt hohes Innovationspotenzial erwarten.

Der zu entwickelnde Funktionalitätenbaukasten baut daher auf heute verfügbaren Material- und Schichtsystemen auf und soll mittel- bis langfristig eine einheitliche Technologieplattform mit Funktionseinheiten zur Sensorik, zur Speicherung und Verarbeitung (Logik) zur Verfügung stellen. Es ist gezeigt worden [6], dass sich auf der Basis von XMR-Strukturen logische Funktionalitäten realisieren lassen. Dies verspricht nicht nur eine extrem hohe Arbeitsgeschwindigkeit, sondern auch sehr geringe Verlustleistungen. Herkömmliche Halbleiterstrukturen weisen bei immer höheren Betriebsfrequenzen auch immer höhere kapazitive- und Leckströme auf. Deshalb ist bereits heute in Halbleiterstrukturen (z.B. Mikroprozessoren) die pro Fläche erzeugte Verlustleistung der begrenzende Faktor für eine weitere Leistungssteigerung. Somit bietet die Spintronik mittel- bis langfristig eine faszinierende Alternative zu der Halbleiterlogik.

Neben der Realisierung von Demonstratoren der einzelnen Funktionalitäten ist ein weiterer wesentlicher Punkt die Weiterentwicklung der Schichttechnologie durch universitäres Know-how sowie die Anwendung von neuen Materialien in den Schichtsystemen. Hierbei stehen die Themen Optimierung der Barriere für die TMR-Schichtsysteme, Entwicklung und Optimierung von Schichten aus ferromagnetischen Heuslerlegierungen sowie die Entwicklung von Technologiefolgen für die einzelnen Funktionalitäten im Zentrum der Arbeiten.

Zu den methodisch-strukturellen Aufgabenstellungen innerhalb dieses Projektes zählen vor allem die Etablierung einer effektiven Arbeitsumgebung für die beteiligten Forscher, die Konditionierung und Bereitstellung der industriellen Plattform sowie die Koordination der

Aufgabenstellungen der einzelnen Projektpartner unter dem Gesichtspunkt einer späteren wirtschaftlichen Verwertung sowie der kurzfristigen Realisierbarkeit auf der Plattform.

## **I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Zu diesem Vorhaben haben sich 3 universitäre Partner und die Sensitec als Industrieunternehmen zusammengefunden. Die drei Universitäten sind in ihrem jeweiligen Bereich jeweils führende Forschungseinrichtungen innerhalb von zumindest Europa; die Universität Mainz (Prof. Felser) ist führend in der Simulation und Synthese neuer Materialien für die Spintronic, insbesondere der besonders vielversprechenden Materialgruppe der ferromagnetischen Heuslerlegierungen. Die Universität Kaiserslautern (Prof. Hillebrands) zählt zu den führenden Forschungsgruppen, was schnelle Ummagnetisierungsvorgänge und neuartige Schaltvorgänge in Bauelementen der Spintronic betrifft. Die Universität Bielefeld (Prof. Reiss) wiederum ist führend in der Realisierung von spintronischen Funktionalitäten sowie in Deutschland führend in der Optimierung von Schichtsystemen für TMR-basierte Bauelemente.

Die Firma Sensitec GmbH wiederum betreibt die modernste Fabrik für Spintronik in Europa und ist einer der führenden Anbieter von XMR-Sensorelementen. Somit ergänzen sich die eingebrachten Kompetenzen in diesem Projekt optimal.

Allerdings war es in der Vergangenheit häufig so, dass es einen relativ langen Übergang von universitärer Forschung in industriell verwertbare Prozesse und Technologien gegeben hat. Häufig war bei diesem Prozess auch noch ein Zwischenschritt über ein angewandtes Forschungsinstitut erforderlich, um von der eher Grundlagen orientierten universitären Forschung die Brücke in die industrielle Applikation zu finden. Mit diesem Projekt soll nun ein anderer Ansatz verfolgt werden, bei dem universitäre Forscher und Industrieingenieure unmittelbar zusammenarbeiten und die Forschungsarbeiten auf einer industriellen Plattform umgesetzt werden. Hiermit soll ein signifikanter Zeitgewinn auf dem Weg zu verfügbaren Technologien gewonnen werden.

Aus diesem Grund ist in einem separaten, unabhängigen Projekt, gefördert durch das Land Rheinland-Pfalz [7], Infrastruktur der Industriepattform gefördert worden, so dass die Rahmenbedingungen für eine enge Zusammenarbeit geschaffen worden sind. So können Fertigungsmaschinen für Forschungszwecke genutzt werden, deren Betrieb unter rein wirtschaftlichen Aspekten eines Fertigungsbetriebes nicht darstellbar wäre. Auch konnte eine gemeinsame Büroinfrastruktur, eine Kommunikationsinfrastruktur sowie erforderliche Kapazitäten für Besprechungs- und Tagungsräume geschaffen werden.

Weiterhin ist anzumerken, dass sowohl zwischen den Universitätsinstituten untereinander als auch zwischen den Forschern und dem Unternehmen Sensitec GmbH jeweils langjährige Kontakte und Kooperationen existieren, so dass in diesem Projekt auf einem gewachsenen Vertrauensverhältnis der beteiligten Partner aufgebaut werden konnte.

Schließlich ist anzumerken, dass dieses wissenschaftliche Vorprojekt im Kontext eines Förderschwerpunktes des BMBF zu sehen ist, bei dem magnetische Mikro- und Nano-Technologien gefördert werden. Während die überwiegende Mehrzahl der in diesem Schwerpunkt geförderten Maßnahmen sehr anwendungsnah orientiert sind, soll mit diesem Projekt die wissenschaftliche Basis für eine mittel- bis langfristige Perspektive der Spintronik in Deutschland gelegt werden. Die Vision, sensorische, speichernde und logische Funktionalitäten in einer Technologie realisieren zu können, bietet die Aussicht, dass Deutschland nicht hinter Hauptwettbewerber aus Asien und den USA zurückfällt und sich damit in einer wichtigen Schlüsseltechnologie sowohl wissenschaftliche Exzellenz als auch marktfähige Technologien und Produkte sichern kann.

### **I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Vorhaben ist ausführlich zwischen den Partnern abgestimmt worden und in der Folge ist ein Projektplan entwickelt worden. Dabei sind einerseits die aktuellen Forschungsergebnisse sowie der internationale Stand der Forschung in die Planung eingeflossen sowie andererseits die industriellen Bedürfnisse mit dem Aspekt der Realisierbarkeit unter der Randbedingung eines Produktionsbetriebes sowie der Relevanz der zu realisierenden Demonstratoren für eine mögliche Verwertung.

Nach Bewilligung des Vorhabens ist zügig mit der Detailplanung sowie dem Arbeitspaket Konditionierung der Anlagen begonnen worden mit dem Ziel, dass die Forschungsarbeiten möglichst schnell aufgenommen werden können. Allerdings haben einige Universitätspartner zu diesem Zeitpunkt das Problem gehabt, dass in dem Projekt vorhandene Stellen nicht besetzt werden konnten. Dies hat zu einem verzögerten Beginn der Arbeiten dieser Partner, insbesondere in den Arbeitspaketen, die an der Plattform in Mainz durchzuführen waren, geführt. Deshalb hat sich das Projekt als ganzes um ca. ½ Jahr verzögert. Dieser Verzug konnte auch im weiteren Verlauf des Projektes nur teilweise wieder eingeholt werden. Nach ca. 9 Monaten waren dann die letzten vakanten Stellen im Projekt besetzt, und ab diesem Zeitpunkt hat sich eine lebendige Arbeitskulturl und eine gute Zusammenarbeit aller beteiligten Partner ergeben.

Im Gesamtkonsortium wurde sich alle 6 Monate getroffen, um sich über erreichte Ergebnisse auszutauschen und weitere Aktivitäten untereinander abzustimmen. Darüber hinaus hat sich ein regelmäßiges Arbeitstreffen etabliert (alle 14 Tage), in dem die Feinabstimmung und Diskussionspunkte zu einzelnen Aspekten der Forschungsarbeiten durchgeführt wurden. Hierdurch ist eine intensive Zusammenarbeit zwischen allen Partnern gewachsen.

Nachdem das Projekt abgeschlossen war, hat die Sensitec die Nutzung der Plattform für drei Monate verlängert. Dies geschah aufgrund der Tatsache, dass eine wichtige Anlage einige Monate ausgefallen war, was kompensiert werden sollte, aber v.a. und aufgrund des hohen Interesses und der hohen Bedeutung, die Sensitec dem Projekt beimisst.

### **I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Die Arbeiten in diesem Projekt basieren einerseits auf dem bekannten Stand der Prozesstechnologie bei der Sensitec. Hierzu zählen Prozessfolgen und Materialien für die AMR- und GMR-Technologie, die heute bereits in Millionenstückzahlen produziert werden. Insbesondere kann hierbei auf bekannte Technologien zur Strukturierung der Materialien, von Leitbahn und Kontaktflächenstrukturelementen zurückgegriffen werden. Zudem wird die Herstellung von ultradünnen Schichtstapeln aus magnetischen und nichtmagnetischen Materialien beherrscht.

Im Rahmen eines anderen Forschungsprojektes sind zudem auf der industriellen Plattform erste TMR-Schichtstrukturen hergestellt worden [8]. Hierbei kommt dem Herstellungsprozess der Barriere eine zentrale Bedeutung zu. Es konnte gezeigt werden, dass Barrieren aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  reproduzierbar mit ca. 40 % dR/R hergestellt werden können. Für Barrieren aus MgO sind Werte von ca. 70 % realisiert worden. Dies entspricht für das Materialsystem jedoch nicht den in der Literatur angegebenen wesentlich höheren Werten [9]. Da in der Universität Bielefeld Erfahrung mit diesem Schichtsystem vorliegt und an der Universitätsanlage bereits wesentlich höhere Werte realisiert worden sind, bestand ein wesentliches Aufgabenpaket darin, dieses Wissen auf der industriellen Plattform nutzbar zu machen und die Prozesse dahingehend zu optimieren, dass zumindest Werte von rund 180 % dR/R realisiert werden können.

Ein wesentlicher weiterer Punkt liegt in der Optimierung der Elektrodenmaterialien. Hier sind insbesondere Legierungen des Heusler-Typs [10] vielversprechend. Während die Universität Mainz führend im Bereich der Modellierung, Synthese und Charakterisierung dieser Materialien ist, bestehen bei der Sensitec erste Erfahrungen mit dieser Materialklasse auf

einer Industrieanlage, die im Rahmen einer Diplomarbeit [11] und einer Doktorarbeit erworben worden sind [12].

## **I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Alle Arbeiten des Projektes konnten im Wesentlichen innerhalb des Konsortiums bearbeitet werden.

# **II. Eingehende Darstellung**

## **II.1 Erzieltes Ergebnis**

Die Ergebnisse lassen sich am besten anhand der im Projekt realisierten Demonstratoren und der realisierten Prozesse darstellen. Basis der Demonstratoren ist ein möglichst optimierter TMR-Herstellungsprozess. Hierbei lag der Schwerpunkt der Arbeiten einerseits in der Optimierung des Barrierenprozesses auf Basis einer MgO-Tunnelbarriere, und andererseits an der Einführung der Heusler-Verbindungen in die TMR-Schichtsysteme. Alle einzelnen Unterprojekte wurden unter der Federführung von den Doktoranden und PostDocs der Universitäten durchgeführt mit Unterstützung und enger Absprache mit Sensitec. Daher finden sich diese Ergebnisse auch teilweise in den Reports der Projektpartner.

### **a) Optimierung TMR-Prozess**

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, das Prozess Know-how der Universität Bielefeld zur Herstellung der MgO-Barriere und der Grenzflächen der angrenzenden Magnetelektroden für die Optimierung der magnetischen Eigenschaften auf die Industriepattform zu übertragen. Nach heutigem Stand der Technik werden in kommerziellen TMR-Sensor-Schichtsystemen entweder Barrieren aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oder aus MgO eingesetzt. Dabei liegt der Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeit und auch der kommerziell hergestellten Systeme in dem System MgO mit CoFeB als Elektrode. Grund hierfür sind die realisierten sehr hohen Widerstandsänderungen  $dR/R$  von vielen Hundert % [9]. Diese ergeben sich ausschließlich bei einer MgO-Barriere, die in kristalliner Form vorliegt. Während  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Barrieren bislang nur als amorphe Schicht abgeschieden sind, ist es möglich, bei moderaten Anlaßtemperaturen eine Umwandlung von amorphem MgO, wie es unmittelbar nach der Abscheidung vorliegt, in eine kristalline Form zu erreichen. Diese Umwandlung wird durch eine Elektrode mit angepasstem Kristallgitter begünstigt. Hier hat sich als Material CoFeB bewährt [9].

Ausgangspunkt der Arbeiten ist ein Prozess, der bereits auf der Plattform im Rahmen von vorangegangenen Diplom- [11] und Doktorarbeiten [12] realisiert worden ist. Mit diesem Prozess sind bislang Widerstandsänderungen  $dR/R$  von bis zu 70 % realisiert worden. Der Prozess mit den überzeugendsten Vorergebnissen wurde ausgewählt und durch Variation der Prozessparameter weiter optimiert. Außerdem wurde der Prozess durch regelmäßige Wiederholung auf seine Reproduzierbarkeit und Prozessfähigkeit untersucht.

Der Prozess zur Herstellung der MgO-Barriere besteht aus verschiedenen aufeinander folgenden Depositionsschritten. Zum Einsatz kommt in jedem Schritt Ionenstrahldeposition von einem MgO-Target. Die einzelnen Schritte unterscheiden sich durch die verwendeten Prozessgase und die Möglichkeit, während des Prozesses die gerade aufwachsende MgO-Schicht mit Hilfe von Ionenbeschuss in ihrer Qualität zu beeinflussen. Durch eine Variation der Dauer der einzelnen Schritte und der Prozessparameter konnte eine Optimierung hinsichtlich eines maximalen TMR-Effektes erzielt werden (siehe z.B. Abbildung 1).