

## Kapitel 5

### Zusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt basierend auf einer vorhandenen Technologie zur Fertigung neuartiger integrierter planarer Spulen mit ferromagnetischem Kern die Entwicklung eines integrierten Fluxgatesensors bis hin zu fertigungstauglichen Testverfahren. Grundlage ist die systematische Analyse und modellmäßige Beschreibung der dem Sensor zugrundeliegenden physikalischen Effekte in den integrierten Spulen. Darauf aufbauend werden die Eigenschaften des Sensors optimiert und eine fertigungstaugliche Prüftechnik entwickelt, die bei der Fertigung der Prototypen- und Versuchslose sowie der Design- und Technologieoptimierung erfolgreich eingesetzt wird.

Bedingt durch die komplexe Signalverarbeitung und Sensorstruktur ist eine mathematische Modellierung der physikalischen und signaltheoretischen Funktionsweise des Sensors unerlässlich. Erster Schritt bei der theoretischen Beschreibung der Sensorfunktion in Kapitel 2 ist die Berechnung der Magnetisierung der Spulenkerne durch das zu messende Feld mittels des Summationsverfahrens. Das Verfahren beruht auf einer Diskretisierung des Kerns. Damit können die Entmagnetisierung des Kerns an den Kernenden als wichtiger Gesichtspunkt für das Sensordesign und das Streufeld in der Umgebung des magnetisierten Kerns zur Abschätzung der Wechselwirkung von Sensoren in Zeilen und Matrixanordnungen berechnet werden. Ein erweitertes Spiegelungsverfahren erlaubt die Berechnung der Magnetisierung durch die integrierten Spulen ohne Diskretisierung des Kerns. Dieses Verfahren ermöglicht das Erfassen von Entmagnetisierungs- und Streufeldefekten auf die Gegeninduktivität der integrierten Spulen mit ferromagnetischen Kernen und die Abschätzung des Einflusses von technologisch kritischen Größen wie Kerndicke und -permeabilität. Die beiden Verfahren zur Feldberechnung erlauben den Zugang zum Magnetisierungsverhalten der integrierten Spulen, das sich wegen der extremen Aspektverhältnisse an den Dünnschichtkernen von analogen makroskopischen Systemen signifikant unterscheidet.

Mittels einer einfachen Approximation der nichtlinearen Materialkennlinie des ferromagnetischen Kerns werden das Fluxgateprinzip - ein Modulationsverfahren - vollständig analysiert und die Formen der Empfindlichkeits- und Arbeitspunktkennlinie hergeleitet. Die dabei vorgenommene Erweiterung der Beschreibung für große Offsetfelder gestattet die Abschätzung des Meßbereiches im kompensierten Betrieb.

Die vollständige Analyse der Sensorfunktion - speziell auch im kompensierten Modus, ist wegen der dafür notwendigen Feldberechnungen mit nichtlinearer  $B(H)$ -Kennlinie nur mit numerischen Methoden sinnvoll möglich. Verwendet wird das FEM-Paket ANSYS mit einer Spline-Interpolation gemessener  $B(H)$ -Kennlinien. Die Güte der Approximation der Materialkennlinie

und die Diskretisierung werden zunächst anhand der Sensorkennlinien im nichtkompensierten Betrieb überprüft. Dazu werden die FEM-Simulationen mit Methoden der digitalen Signalverarbeitung verknüpft und die berechneten Arbeitspunkt- und Empfindlichkeitskennlinien mit Messungen verglichen. Wichtigstes Ergebnis der numerischen Rechnungen ist jedoch die Analyse des Sensors im kompensierten Betrieb. Dabei wird die numerische Feldberechnung mit digitaler Signalverarbeitung und einem Suchverfahren zur Simulation der Regelschleife gekoppelt. Der eingeschränkte Meßbereich des Sensors FG20 (alle Spulen einfach gewickelt) kann auf die niedrige Gegeninduktivität der am Kernende sitzenden Kompensationsspule zur Meßspule zurückgeführt werden. Aus der hohen Eigeninduktivität der Kompensationsspule resultieren bereits für kleine Spulenströme Sättigungseffekte unter der Wicklung und damit eine nichtlineare Kennlinie. Abhilfe schafft hier der bifilare Sensor FGV04, bei dem Kompensationsspule und Anregungsspule ineinander verwickelt werden. Die durch den größeren Spulenpitch verringerte Eigeninduktivität der Kompensationsspule und die erhöhte Gegeninduktivität zur Meßspule führen zu einem Kompensationsfaktor von ca.  $87 \mu\text{T}/\text{mA}$  gegenüber  $40 \mu\text{T}/\text{mA}$  des einfachen Sensors. Der Meßbereich des Sensors wird nicht mehr durch Sättigungseffekte der Kompensationsspule begrenzt. Allerdings zeigen die gemessenen Sensorkennlinien Nichtlinearitäten in der Größenordnung von ca. 2% des Meßbereiches. Simulationen des Kompensationsverhaltens ergaben, daß diese Nichtlinearitäten aus dem unterschiedlichen Magnetisierungsverhalten der beiden Kompensationsspulen gegenüber dem Meßfeld in der Kernmitte resultieren. Diese Nichtlinearitäten können entsprechend der Simulationsergebnisse durch die trifilare Spulenkonfiguration des Sensors FG33 unterdrückt werden. Allerdings wird das Verschwinden der Nichtlinearität durch eine Hysterese in der Kennlinie erkauft. Damit ist zunächst die Grenze der mit ANSYS möglichen Simulationen erreicht, denn die Simulation von Hystereseeffekten würde die Einführung von Zustandsvariablen erfordern. Ausgehend von den Ergebnissen der analytischen Rechnungen wurde die Entmagnetisierung an den Kernenden als Ursache der Hysterese vermutet. Der daran angepaßte Entwurf des trifilaren Sensors FGV11 mit einer nur in der Kernmitte befindlichen Meßspule und optimiertem Kernendendesign führt schließlich zu einer linearen Sensorkennlinie. Die mit diesem Sensor realisierten Systeme erfüllen in ihren Parametern die Anforderungen der Kompaßapplikation, so daß damit das Entwicklungsziel erreicht wird.

Nach der Analyse und Optimierung von Meßbereich und Linearität steht die Sensorauflösung im Mittelpunkt des 3. Kapitels. Das Barkhausen-Rauschen und die damit verbundenen Domänenwandbewegungen im Kern werden aus der Analyse der nadelförmigen Pulsfolgen der Signalspannungen an der Meßspule als der die Sensorauflösung limitierende Effekt ermittelt und für ein vereinfachtes Modell dieser Pulsfolgen wird eine Hypothese über das Signal- zu Rauschverhältnis in Abhängigkeit vom Sensoranregungsstrom abgeleitet. Die Analyse der Domänenkonfigurationen und Domänenwandbewegungen erfolgt unter Ausnutzung des MOKE an einem Polarisationsmikroskop. Die Domänenbilder ganzflächig abgeschiedener Schichten lassen die Vermutung zu, daß bei der Schichtabscheidung eine unbestimmte, möglicherweise radiale Kristallanisotropie eingeprägt wird. Bedingt durch die Form und Abmessung der Kerne stellt sich im entmagnetisierten Zustand im Kern die theoretisch erwartete Konfiguration mit zwei entgegengesetzt orientierten Längsdomänen und jeweils einer Abschlußdomäne an den Kernenden ein. Neben dieser Idealkonfiguration sind noch weitere Konfigurationen möglich. Gemeinsam ist diesen Konfigurationen, daß sich im Kern nur eine oder zwei Domänenwände

ausbilden, deren Bewegung die Sensorauflösung bestimmt. Anhand von Sensorkernen mit teilweise vorhandenen Spulen wird gezeigt, daß unter den Spulen die Domänenwände bis zum Kernrand angesteuert werden können, außerhalb der Spulen jedoch die Aussteuerung durch Streufeldefekte in der Kernmitte bzw. durch Entmagnetisierung am Kernende abnimmt. Erstmals wurden damit statisch und dynamisch Domänenkonfigurationen mit dem Kerr-Mikroskop in ferromagnetischen Kernen integrierter Spulen untersucht.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen werden zwei Verfahren zur elektrischen Charakterisierung des Auflösungsverhaltens vorgeschlagen. Das erste Verfahren verwendet einen Lock-in Verstärker und dient zur Charakterisierung von Sensoren ohne ASIC während der Entwicklungsphase und zur Technologiekontrolle. Dabei wird das Sensorrauschen durch Varianzbildung aus einer großen Zahl von Meßpunkten für jeden interessierenden Betriebspunkt des Sensors berechnet. Das Verfahren ist sehr zeitaufwendig, gestattet dafür aber eine sehr detaillierte Analyse. Der Vergleich der Sensorkonfigurationen führt auch hier wieder zur Überlegenheit der trifilaren Spulenwicklung, die das theoretisch erwartete Verhalten zeigt. Im Hinblick auf schnelle Produktionstestverfahren wurde ein weiteres Meßverfahren evaluiert. Es nutzt die Messung des Klirrfaktors (THD) des Sondersignals mit einem FFT-Analysator bei Anregung mit einem harmonischen Wechselfeld. Dieses Verfahren liefert bei Aussteuerung mit einem dem Meßbereich der Sonde entsprechenden Wechselfeld schnell eine integrale Aussage über die Güte der Sonde und ist damit auch für den Test unter Produktionsbedingungen geeignet. Außerdem kann mit diesem Verfahren der Anregungsstrom hinsichtlich optimaler Sensorgüte effektiv abgeglichen werden.

Die Messungen an Sensoren vom Typ FGV11 ergaben, daß mit der derzeitigen aus der Schichtabscheidungstechnologie resultierenden Qualität der Kernlegierung die mit dem Sensor und dem ASIC erzielbaren Auflösungen in der gleichen Größenordnung liegen und für die Kompaßapplikation ausreichend sind. Trotzdem ist hinsichtlich Prozeßsicherheit und Testzeiteinsparung eine Optimierung des Auflösungsverhaltens wünschenswert. In erster Linie kann dies durch gezieltes Einstellen der Kristallanisotropie während der Schichtabscheidung geschehen. Möglicherweise sind auch noch durch Designmaßnahmen hinsichtlich der Formanisotropie Verbesserungen möglich. Grundlage sind dafür die in Kapitel 2 „Sensormodellierung“ abgeleiteten Designregeln für Sensoren mit linearer Kennlinie. Zur Charakterisierung und Bewertung von Technologie- und Designverbesserungen stehen aussagefähige Meßverfahren zur Verfügung.

Nach der Beschreibung der Sensoreigenschaften und ihrer physikalischen Ursachen werden darauf aufbauend in Kapitel 4 fertigungstaugliche Meß- und Prüfverfahren entwickelt. Aus der theoretische Analyse ergibt sich die Notwendigkeit der Kontrolle der Dicke und der magnetischen Eigenschaften der Permalloyschicht. Fertigungstauglich heißt dabei, daß die Wafer zur Messung nicht zerstört werden müssen und in Reinraumumgebung verbleiben können. Der aufgebaute BH-Tracer erfüllt diese Forderungen am besten, da die Wafer in Einzelscheibenbehältnissen unter Reinraumbedingungen gemessen werden können, selbst wenn sich der Meßplatz außerhalb des Reinraumes befindet. Zum Erreichen einer hohen Meßgenauigkeit bei den aus der Schichtdicke resultierenden kleinen Meßsignalen wird im Unterschied zu herkömmlichen Meßplätzen mit phasensensitiver Gleichrichtung gearbeitet. Das Verfahren liefert eine integrale Information über Schichtdicke und magnetische Eigenschaften längs eines Wafer-

durchmessers. Zur orts aufgelösten Messung der magnetischen Eigenschaften wird dieses Verfahren durch ein auf dem MOKE basierendes Magnetometer ergänzt. Der im Rahmen dieser Arbeit erstellte Meßaufbau erreichte Auflösungen von  $1/5000^\circ$ . Allerdings müßte dieses Magnetometer im Reinraum installiert werden, oder aber es können außerhalb des Reinraumes wie bisher nur Dummy-Wafer gemessen werden. Beide Geräte wurden für die Technologie integrierter ferromagnetischer Bauelemente ausgelegt und bewiesen ihre Tauglichkeit u.a. bei der Optimierung des Schichtstapels.

Die Erweiterung der Parametermeßtechnik erfolgt auf zwei Wegen. Zum einen werden für die am IMS vorhandene PATMOS-Prüftechnik Teststrukturen entworfen, die eine Kontrolle der durch die Sondertechnologie bedingten Risiken gestatten. Zur Erfassung der magnetischen Parameter mit Hilfe der Arbeitspunkt-, Empfindlichkeits- oder Kompensationskennlinie an integrierten Spulen wird ein spezieller Spitzenmeßplatz, dessen Kern ein Lock-in Verstärker zur Demodulation der Sensorausgangssignale bildet, entworfen und aufgebaut. Anhand von Versuchslosen wird der Meßplatz erfolgreich evaluiert.

Der Test der Sensoren auf Waferebene stellt wegen der erforderlichen Einkopplung von nicht-elektrischen Größen auf das sich im Waferverbund befindliche Bauelement ebenso Neuland dar wie die Eigenschaften der Spulen selbst. Ausgehend von den Ergebnissen der theoretischen Analyse der Spulen wird zur Magnetisierung des Sensorkernes eine unmittelbar über dem Sensor angeordnete Leiterschleife verwendet, die bei hinreichender Größe und Abstand einen Feldverlauf im Sensor erzeugt, der nur wenig von dem durch ein homogenes Feld hervorgerufenen Feldverlauf abweicht. Ursache für dieses Verhalten ist der starke Einfluß der durch die Kernform gegebenen Randbedingungen auf den Feldverlauf im Kern. Die Abstands- und Positionsabhängigkeit der Feldstärke im Kern wird durch eine feste Montage der Anordnung auf einer Probecard mit Kantentaster unterdrückt, so daß die Positionierung der Leiterschleife zum Sensor mit der Genauigkeit von wenigen Mikrometern der heute kommerziell verfügbaren Waferprober erfolgt. Durch die Montage der Magnetisierungseinrichtung auf einer Probecard können kommerzielle Waferprober ohne spezielle Umrüstung zum Test der Magnetfeldsonden benutzt werden. Die Evaluierung des Verfahrens erfolgt an bifilaren Sensoren vom Typ FGV04 ohne ASIC am Parametermeßplatz, der dafür mit einem Regelkreis zum kompensierten Betrieb des Sensors erweitert wird. Die Ergebnisse lassen Kalibriergenauigkeiten von besser 1.5 % erwarten.

Der Test der aufgebauten Sonden erfolgt in einem Helmholtzspulensystem. Der dazugehörige Tester kann sowohl zum Test mehrerer Sonden parallel als auch zum Test von einzelnen Sensoren ohne ASIC, die in short-loops zur Design- und Technologieentwicklung gefertigt werden, eingesetzt werden. Mittels eines vom Tester gesteuerten Klimaschranks können die Tests über den gesamten spezifizierten Temperaturbereich erfolgen. Die damit gemessenen Temperaturdriften der optimierten trifilaren Sensoren sind kleiner 0.5 %. Bedingt durch die aus dem kleinen Streufeldbereich der Sensorkerne resultierende hohe Packungsdichte werden Parallelmessungen von bis zu 40 Sensoren im Klimaschrank möglich. Dadurch werden die aus den Kennlinienmessungen resultierenden relativ hohen Testzeiten vertretbar.

Damit sind für alle in der Standardtechnologie vorkommenden Tests entsprechende Lösungen für das Mikrosystem geschaffen worden. Die Abstimmung der Prüfschärfe der einzelnen Tests aufeinander, die Bestimmung der Testinhalte und der Bewertungskriterien bleibt wegen der

dafür notwendigen statistisch signifikanten Stückzahlen der Fertigung großer Stückzahlen vorbehalten.

Abschließend wird versucht, die allgemeine Frage nach Methoden zum Testen von Mikrosystemen zu beantworten. Zunächst muß für jedes Mikrosystem von der Analyse und Modellierung dessen spezifischer Wirkungsweise ausgegangen werden. Trotzdem können anhand der innerhalb des Projektes ferromagnetische Bauelemente und anderen Projekten am IMS und entsprechenden Berichten aus der Fachliteratur gewonnenen Erfahrungen einige grundsätzliche Strategien für die Entwicklung der Prüftechnik von Mikrosystemen abgeleitet werden. Dazu gehört bei der Analyse die Zerlegung des Mikrosystems in überschaubare Blöcke, die Absicherung numerischer Rechnungen durch analytische Verfahren und die Kopplung von numerischen Simulationen mit digitaler Signalverarbeitung. Bei der Meß- und Prüftechnik kann durch die Anwendung von Modulationsverfahren und integrierter Signalverarbeitung den aus der Miniatürisierung resultierenden Querempfindlichkeiten, Rausch- und Drifterscheinungen entgegengewirkt werden. Zur Charakterisierung der Sensorelemente ohne integrierte Signalverarbeitung hat sich zur Nachbildung der Signalverarbeitung die Verwendung von Lock-in Techniken gegenüber Verfahren wie z.B. FFT-Analyse bewährt. Diese Verfahren sind im weiteren oft als Ausgangspunkt für eine Parametermeßtechnik geeignet. Testverfahren und eine Parametermeßtechnik auf Wafer Ebene erweisen sich nicht nur zur Kontrolle der Volumenfertigung als sinnvoll, sondern können auch die Lernzyklen während der Entwicklungsphase erheblich verkürzen.

Insgesamt stellt diese Arbeit die Entwicklung des integrierten Fluxgatesensors beginnend mit der Beschreibung, Analyse und Optimierung der integrierten Spulen bis hin zum Entwurf und der Evaluierung von fertigungstauglichen Meßverfahren für die Abscheidung der Permalloy-schicht, für den Test im Waferverbund und als Produkt sowie für die Parameterkontrolle dar. Damit wurden ein marktfähiges Mikrosystem sowie die Voraussetzungen für die Volumenfertigung dieses Mikrosystems aus Sicht der Produkttechnik geschaffen.