



Institut für Mikrotechnologie der
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (Hrsg.)

CHARMA

Messtechnik für die fertigungsgerechte
Charakterisierung magnetischer Mikrobauteile

Institut für Mikrotechnologie der
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (Hrsg.)

CHARMA

**Messtechnik für die fertigungsgerechte
Charakterisierung magnetischer Mikrobauteile**

Impressum

© 2011 Steinbeis-Edition

Alle Rechte der Verbreitung, auch durch Film, Funk und Fernsehen, foromechanische Wiedergabe, Tonträger jeder Art, auszugsweisen Nachdruck oder Einspeicherung und Rückgewinnung in Datenverarbeitungsanlagen aller Art, sind vorbehalten.

Institut für Mikrotechnologie der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (Hrsg.)
CHARMA – Messtechnik für die fertigungsgerechte Charakterisierung magnetischer Mikrobauteile

1. Auflage 2011 | Steinbeis-Edition, Stuttgart
ISBN 978-3-941417-35-9

Satz: Steinbeis-Edition

Titelbild: Institut für Mikrotechnologie der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Druck: Frick Werbeagentur / Frick Digitaldruck, Krumbach

Steinbeis ist weltweit im Wissens- und Technologietransfer aktiv. Zum Steinbeis-Verbund gehören derzeit rund 800 Steinbeis-Unternehmen sowie Kooperations- und Projektpartner in 50 Ländern. Das Dienstleistungsportfolio der fachlich spezialisierten Steinbeis-Unternehmen im Verbund umfasst Beratung, Forschung & Entwicklung, Aus- und Weiterbildung sowie Analysen & Expertisen für alle Management- und Technologiefelder. Ihren Sitz haben sie überwiegend an Forschungseinrichtungen, Universitäten und Hochschulen.

Dach des Steinbeis-Verbundes ist die 1971 ins Leben gerufene Steinbeis-Stiftung, die ihren Sitz in Stuttgart hat. Die Steinbeis-Edition verlegt ausgewählte Themen aus dem Steinbeis-Verbund.

126219-2011-01 | www.steinbeis-edition.de

Vorwort

Der vorliegende Bericht entstand während der dreijährigen Laufzeit des durch das BMBF geförderten Verbundprojektes „Messtechnik für die fertigungsgerechte Charakterisierung magnetischer Mikrobauteile“ (CHARMA). Die Arbeiten wurden im Zeitraum vom 1. Januar 2005 bis zum 31. Dezember 2007 durchgeführt. Unser Dank gilt dem BMBF, das die Durchführung dieses Projektes ermöglichte, und der VDI/VDE-Innovation + Technik GmbH für die Betreuung während der Projektdurchführung.

Ziel des Verbundprojektes war die Entwicklung von Messverfahren zur signifikanten Verbesserung der Qualitätssicherung bei der Fertigung von Mikrobauteilen. Die zu entwickelnden Messverfahren sollten es einerseits gestatten, zu einer frühen Beurteilung des Qualitätsniveaus eines Wafers zu gelangen. Andererseits sollten messtechnische Möglichkeiten zur Qualitätssicherung des fertigen Wafers bzw. ohne Waferprozess hergestellter fertiger Bauteile geschaffen werden.

Für die Messung von Schichtgeometrien und Schichtzusammensetzung auf Waferniveau wurde hierbei ein Verfahren abtragender Schichtpräparation mittels fokussiertem Ionenstrahlätzen (FIB) in Kombination mit bildgestützter Schichtdickenvermessung und Röntgen-Elementanalyse zur Bestimmung der Schichtzusammensetzung untersucht. Das zu entwickelnde FIB-Analysegerät sollte dabei in den Fertigungsprozess integrierbar sein und alle notwendigen Analysemöglichkeiten bieten. Die wissenschaftlich-technischen Ziele waren hierbei Entwicklung eines FIB-basierten Präparationsverfahrens, Entwicklung eines Testkonzepts zur prozessintegrierten Qualitätskontrolle und Erprobung des Verfahrens an Demonstratorbauteilen.

Als Erweiterung geometrischer und chemischer Schichtanalyse wurde im Rahmen des Projektes ein neuartiger Sensor zur Messung magnetischer Eigenschaften von Mikrostrukturen entwickelt. Beispiele, bei denen die magnetischen Eigenschaften von Funktionsschichten von großer Bedeutung sind, sind anisotrop-magnetoresistive (AMR-)Sensoren und giant-magnetoresistive (GMR-)Sensoren in Winkel- und Positionsmessungen und in der Datenspeichertechnik. Für die Qualitätssicherung solcher dünnfilmtechnisch erzeugter und strukturierter Schichten ist die Bestimmung der magnetischen Hysteresekurve von großem Interesse, die Aussagen über magnetische Materialeigenschaften wie Sättigungsflussdichte, Remanenz, Koerzivität und magnetische Permeabilität liefert. Kernpunkt der Arbeiten war dabei die Entwicklung eines neuartigen Mikro-Hysteresemessensors und der notwendigen messtechnischen Verfahren zu seinem Einsatz in der Qualitätssicherung.

Ergänzend wurde eine Möglichkeit zur Schaffung einer dreidimensionalen Messmöglichkeit auf Waferniveau untersucht. Hierfür wurde ein mehrachsiges Messsystem entwickelt, in das bei Bedarf ein dünnfilmtechnisch gefertigter Mikroaktor integriert werden kann. Die Auslegung und Fertigung dieses Aktors war ebenfalls Aufgabe in diesem Projekt.

Garbsen im September 2008

Prof. Dr.-Ing. H. H. Gatzert

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
1 Sensitec GmbH	1
1.1 Wissenschaftlich-technische Zielsetzung.....	1
1.1.1 Wissenschaftlich-technische Zielsetzung AP1.....	1
1.1.2 Wissenschaftlich-technische Zielsetzung AP2/3.....	1
1.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse.....	1
1.2.1 Inbetriebnahme der quantitativen EDX-Analyse.....	1
1.2.2 Dataloader Software.....	2
1.2.3 Geometrische Analysen.....	3
1.2.4 Stöchiometrische Analysen.....	6
1.2.5 Innovativer MR-Stromsensor.....	9
1.2.6 Anforderungsdefinition für die 3D-Messmaschine.....	17
1.2.7 Test Samples für die 3D-Messmaschine.....	18
1.3 Einschätzung des Projekterfolges.....	18
1.3.1 AP1.....	18
1.3.2 AP2/3.....	19
1.4 Fortschreibung des Verwertungsplans.....	19
1.5 Schutzrechtsanmeldungen.....	20
1.6 Veröffentlichungen.....	20
2 X-FAB AG	21
2.1 Wissenschaftlich-technische Zielsetzung.....	21
2.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse.....	22
2.2.1 Zusammenfassung.....	22
2.2.2 FIB-Präparationen.....	23
2.2.3 Ermittlung der Membrandicken über den gesamten Wafer.....	26
2.2.4 Vergleich der verschiedenen Messverfahren.....	27
2.2.5 Untersuchung von FIB-Präparationen im weiteren Waferprozess.....	28
2.3 Einschätzung des Projekterfolges.....	29
2.4 Fortschreibung des Verwertungsplans.....	29
2.5 Schutzrechtsanmeldungen.....	29
2.6 Veröffentlichungen.....	29

3	Spezifizierung, Entwicklung und Herstellung eines fluidischen Chips mit magnetischen Strukturelementen sowie Verifizierung einer magnetismus-basierten Messmethode	31
3.1	Wissenschaftlich-technische Zielsetzung	31
3.2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	33
3.2.1	Entwicklung mikromagnetischer Hysteresemessungen: Design, Konstruktion und Herstellung von Fluidchips.....	33
3.2.2	Schnittstellendefinition.....	34
3.2.3	Entwicklung von 3D-Messtechnik für mikromagnetische Bauteilanalyse: Formeinsätze	35
3.2.4	Entwicklung von 3D-Messtechnik für mikromagnetische Bauteilanalyse: Herstellung von Formeinsätzen mit definierten Fehlstellen.....	37
3.2.5	Versuche zur Herstellung dreidimensionaler Formeinsätze mit definierten Lunkern.....	39
3.2.6	Entwicklung von 3D-Messtechnik für mikromagnetische Bauteilanalyse: Herstellung von 3D-Formeinsätzen mit definierten Fehlstellen.....	40
3.3	Einschätzung des Projekterfolges.....	42
3.4	Während des Vorhabens bekanntgewordener Fortschritt auf diesem Gebiet bei anderen Stellen.....	42
3.5	Schutzrechtsanmeldungen.....	43
3.6	Veröffentlichungen	43
4	Antriebs- und Steuerungstechnik für 3D-Messtechnik	45
4.1	Wissenschaftlich-technische Zielsetzung.....	45
4.1.1	Aufgabenstellung.....	45
4.1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	45
4.1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	46
4.2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	46
4.2.1	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	46
4.3	Einschätzung des Projekterfolges.....	47
4.3.1	Verbesserung des Verhaltens eines 2D-Direktantriebes als Plattform für die Messzelle	47
4.3.2	Anforderungen an die Messzelle.....	49
4.4	Fortschreibung des Verwertungsplans.....	53
4.4.1	Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	53

4.5	Schutzrechtsanmeldungen.....	53
4.6	Veröffentlichungen	53
5	Grundsatzuntersuchungen zu Sensor- / Aktorprinzipien und Sensorkorrektur.....	55
5.1	Wissenschaftlich-technische Zielsetzung	55
5.2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	55
5.2.1	Analyse der Eigenschaften magnetischer Schichten und Opti- mierung von Sensorparametern mittels Simulationsrechnungen.....	55
5.2.2	Auslegung eines elektromagnetischen Mikroaktors unter Anwendung von 2D- und 3D-FEM-Simulationen	69
5.3	Einschätzung des Projekterfolges.....	72
5.4	Fortschreibung des Verwertungsplans.....	73
5.5	Schutzrechtsanmeldungen.....	73
5.6	Veröffentlichungen	73
6	Entwicklung eines Messsystems zur Charakterisierung weichmagnetischer Mikro- und Nanometerschichten.....	75
6.1	Wissenschaftlich-technische Zielsetzung	75
6.2	Der Demonstrator	76
6.2.1	Hysteresemessung nach dem Integrationsprinzip mit sinusförmigem Erregerstrom	76
6.2.2	Positionier- und Antastmechanik.....	77
6.2.3	Messelektronik.....	78
6.3	Software zur Ablaufsteuerung und Datenverarbeitung	80
6.3.1	Unterstützende Funktionalitäten	81
6.3.2	Kommunikationsstruktur.....	81
6.4	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	84
6.5	Einschätzung des Projekterfolges.....	85
6.6	Fortschreibung des Verwertungsplans.....	85
6.7	Schutzrechtsanmeldungen.....	85
6.8	Veröffentlichungen	86
7	FIB-Präparationstechnik für MST-Waferanalyse und Komponenten für mikromagnetische 3D-Messtechnik	87
7.1	AP1 „Entwicklung FIB-Präparation und REM / EDX-Analyseverfahren“ ..87	
7.1.1	Wissenschaftlich-technische Zielsetzung	87

7.1.2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	88
7.1.3	Einschätzung des Projekterfolges für das AP1	96
7.2	AP2 „Entwicklung mikromagnetische Hysteresemessung“	97
7.2.1	Wissenschaftlich-technische Zielsetzung	97
7.2.2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	97
7.2.3	Einschätzung des Projekterfolges für das AP2	109
7.3	AP3 „Entwicklung 3D-Messtechnik für mikromagnetische Bauteilanalyse“	109
7.3.1	Wissenschaftlich-technische Zielsetzung	109
7.3.2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	109
7.3.3	Einschätzung des Projekterfolges für AP3	120
7.3.4	Schutzrechtsanmeldungen	120
7.3.5	Veröffentlichungen	120
7.3.6	Literatur	121
8	Entwicklungsziele	123
8.1	Design und FEM Analyse des Läufers	123
8.1.1	Design und Optimierung des Federsystems	124
8.1.2	Design des Läufers	125
8.1.3	Magnetische Kopplung zwischen Läufer und Stator	126
8.1.4	Design der Metallisierungsebene	128
8.2	Technologieentwicklung	130
8.3	Montage	131
8.4	Funktionstest	134

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Funktionsprinzip der Data Loader Software.....	2
Abb. 2:	Eingabemaske der Data Loader Software.....	2
Abb. 3:	FIB-Schnitt durch eine Drucksensor-Membran (Ionenbild).....	2
Abb. 4:	Membran-Schichtdicke vs. Wafer-Region.....	2
Abb. 5a:	Liftoff-Prozess vor Optimierungsschritt. Links: Photolack-Struktur nach Metall-Deposition. Rechts: Metallstruktur mit Fencing nach Liftoff.....	3
Abb. 5b:	Optimierter Liftoff-Prozess. Links: Photolack-Struktur nach Metall-Deposition. Rechts: Metallstruktur mit sauberer Kantenstruktur nach Liftoff.....	4
Abb. 6:	NiFe-Magnetjoch mit Schreibspule. Ergebnis der quantitativen EDX-Analyse für den rosa umrandeten Bereich: 52.0 at% Ni, 48.0 at% Fe.....	5
Abb. 7:	Mittels Business Objects erzeugtes Trendchart für Magnetjoch Composition.....	7
Abb. 8:	EDX Line Scan über die Begrenzung zwischen Ausgleichsfläche (links) und Flux Guide (rechts) hinweg. Im Graben zwischen den beiden Ni/Fe-Schichten erscheint das Signal von Al ₂ O ₃ -Passivierungsschichten und Si-Substrat.....	8
Abb. 9:	Chip-Layout des CHARMA Stromsensors. Rot: MR-Streifen, blau: Barber-Pole/Verdrahtungsebene, magenta: Kompensationsleiter, violett: Flipp-Leiter.....	9
Abb. 10:	Schematischer Querschnitt durch den CHARMA Stromsensor. Rot: MR-Streifen. Blau: Verdrahtungsebene. Gelb: Anschlusspads. Orange: Kompensationsleiter (C1) und Flipp-Leiter (C2). Türkis: Grundisolierung (Gap1) und Zwischenisolierung 1 (Gap2). Violett: Zwischenisolierung 2 (BCB1) und Deckpassivierung (BCB2).....	10
Abb. 11:	3D-geometrische Einflussgrößen auf den Kompensationsfaktor in einem MR-Stromsensor.....	11
Abb. 12:	Kompensationsfaktor in Abhängigkeit vom vertikalen Abstand A_MR [m] zwischen Kompensationsleiter und MR-Streifen. Rechnung für $b_{\text{komp}} = 8,0 \mu\text{m}$, $b_{\text{rück}} = 7,0 \mu\text{m}$, $d_{\text{komp}} = d_{\text{rück}} = 2,2 \mu\text{m}$, $b_{\text{MR}} = 7,0 \mu\text{m}$, $A_{\text{rück}} = 5,0 \mu\text{m}$, $I_{\text{komp}} = 1 \text{ mA}$	11
Abb. 13:	Kompensationsfaktor in Abhängigkeit vom lateralen Versatz L_just [m] zwischen Kompensationsleiter und MR-Streifen. Rechnung für $b_{\text{komp}} = 8,0 \mu\text{m}$, $b_{\text{rück}} = 7,0 \mu\text{m}$, $d_{\text{komp}} = d_{\text{rück}} = 2,2 \mu\text{m}$, $b_{\text{MR}} = 7,0 \mu\text{m}$, $A_{\text{rück}} = 5,0 \mu\text{m}$, $A_{\text{MR}} = 0,5 \mu\text{m}$, $I_{\text{komp}} = 1 \text{ mA}$	12

Abb. 14:	Kompensationsfaktor in Abhängigkeit von der Breitenzunahme x [m] der Kompensationsleiter und Rückleiter. Rechnung für $b_{\text{komp}} = 8,0 \mu\text{m} + x$, $b_{\text{rück}} = 7,0 \mu\text{m} + x$, $d_{\text{komp}} = d_{\text{rück}} = 2,2 \mu\text{m}$, $b_{\text{MR}} = 7,0 \mu\text{m}$, $A_{\text{rück}} = 5,0 \mu\text{m}$, $A_{\text{MR}} = 05 \mu\text{m}$, $I_{\text{komp}} = 1 \text{ mA}$	13
Abb. 15:	FIB-Schnitt quer zu den MR-Streifen und Kompensationsleitern (Ionenbild) nach Aufbringen der Zwischenisolierung 2 (BCB1). Die Probe wurde zusätzlich mit 20 nm Au abgedeckt, um Aufladungseffekte bei der Bildgebung zu vermeiden. Unter den grobkörnigen Kompensationsleitern sind die linienförmigen MR-Streifen und feinkörnige Barber Poles sichtbar.	14
Abb. 16:	FIB-Schnitt quer zur Flippleiterstruktur (SEM-Bild) nach Aufbringen der Deckpassivierung (BCB2). Strukturen von unten nach oben: NiFe MR-Streifen + Cu Barber Poles, Al_2O_3 -Zwischenisolierung 1, Cu-Kompensationsleiter, BCB-Zwischenisolierung 2, Cu-Flippleiter, BCB-Passivierung.....	15
Abb. 17:	Hysteresekurven einer 20 nm Permalloy-Schicht, gemessen in unterschiedliche Richtungen. Oben: vor Prozess-Optimierung, Unten: nach Prozess-Optimierung.....	16
Abb. 18:	Ausschnitt aus der Dedicated Row für einen MR-Sensor. Links: im Text näher beschriebene NiFe-Teststruktur.....	17
Abb. 19a:	Links: Rood Technologies Elektronenbild, W-geputtert.....	23
Abb. 19b:	Rechts: SEM-Bild imt Hannover.....	23
Abb. 19c:	Links: SEM-Bild X-FAB.....	23
Abb. 19d:	Rechts: Naomi Elektronenbild.....	23
Abb. 19e:	Naomi Ionenbild – teilweise können die Membrandicken nur geschätzt werden.....	24
Abb. 20	Verschiedene Ansichten im SEM nach FIB.....	25
Abb. 21	Messpunkte auf dem Wafer.....	26
Abb. 22	Membrandickenbestimmung.....	26
Abb. 23	Vergleich der verschiedenen Messmethoden.....	27
Abb. 24	Membrandickenbestimmung mit unterschiedlichen Messmethoden.....	27
Abb. 25:	Wafer 18: Oxidabdeckung des FIB-Grabens.....	28
Abb. 26:	Wafer w22 cross section view nach Resistabdeckung.....	28
Abb. 27:	Abgeformter Testchip für die Vermessung magnetischer Strukturelemente.....	33
Abb. 28:	Ermittelte Bandbreite der Laufzeit und der daraus ermittelten Strömungsgeschwindigkeit der untersuchten Testchips.....	34

Abb. 29:	Galvanischer Formeinsatz mit erhabener 3D-Struktur für Testmessungen.	36
Abb. 30:	Galvanisierter Objektträger für die 2D-Testformeinsatzherstellung.	37
Abb. 31:	Galvanisierter Objektträger nach der mechanischen Bearbeitung.	37
Abb. 32:	Größen und Positionen der eingebrachten Fehlstellen wurden vermessen und dokumentiert.	38
Abb. 33:	Galvanisch hergestellter Formeinsatz (3D-Struktur) mit gezielt eingebrachten Fehlstellen.	40
Abb. 34:	Dokumentation einer Ni-Mikrostruktur (Kanalbreite ca. 50 μm) mit gezielt eingebrachten Fehlstellen.	41
Abb. 35:	Positionsbestimmung der einzelnen Fehlstellen, dokumentiert während des Fertigungsprozesses.	41
Abb. 36:	Verbesserte Lager beim 2D-Tischsystem.	47
Abb. 37:	Steifigkeit mit den alten Lagern (blaue Linie), verbesserte Lager (rote Linie).	47
Abb. 38:	Verhalten des Tisches bei 10nm Schrittweite	47
Abb. 39:	Realisierter Demonstrator.	50
Abb. 40:	Hysterese-Messsensor in Messposition.	51
Abb. 41:	Prinzip der realisierten Steuerung.	52
Abb. 42:	Messmethoden für magnetische Gleichfelder.	55
Abb. 43:	links Ringkernsensor, rechts Mikrosensor (Größenvergleich links oben).	56
Abb. 44:	Sensorvariante Ringkern (links); Feldstärkeverteilung (Mitte); Flussdichte (rechts) Ringkern in den Abmessungen $\text{\O} 3,95 \times \text{\O} 2,15 \times 1,25 \text{ mm}$.	57
Abb. 45:	Berechneter Fluss in Abhängigkeit der Durchflutung (links) und Rückrechnung der simulierten BH-Kennlinie im Vergleich zur angesetzten Kennlinie am Ringkernsensor (rechts).	58
Abb. 46:	Sensorvariante Mikrosensor, Feldstärkeverteilung (links); Flussdichte (rechts).	58
Abb. 47:	Rückrechnung aus statischer Simulation des Mikrosensors an 20 nm Messschicht bei unterschiedlichen Luftspalten zwischen Sensor und Probe.	59
Abb. 48:	Rückrechnung aus statischer Simulation des Mikrosensors an 4,5 μm Messschicht in Abhängigkeit der Messspaltbreite.	59
Abb. 49:	Transiente Simulation des Mikrosensors an einer 4,5 μm Schicht.	60
Abb. 50:	Rückrechnung aus transienter Simulation an 4,5 μm Messschicht, links Mikrosensor, rechts Ringkernsensor.	61
Abb. 51:	Simulierte B-H-Kennlinien bei zunehmenden Abständen mit einer 4 μm dicken Schicht am Ringkernsensor.	62

Abb. 52:	Simulierter prozentualer Fehler bei der Messung einer 4 μm dicken Schicht am Ringkernsensor.....	62
Abb. 53:	Flussdichte B bei unterschiedlichen Probengrößen mit einer 4 μm dicken Schicht am Ringkern 2.....	63
Abb. 54:	Flussdichte B bei unterschiedlichen Probengrößen am Mikrosensor.....	63
Abb. 55:	Berechnete Resonanzfrequenzen am Mikrosensor bei kapazitivem Eingang der Elektronik in Abhängigkeit der Windungszahl der Sekundärspule.....	64
Abb. 56:	Mittelung zur Verbesserung der Signalqualität [1].....	65
Abb. 57:	Messungen mit Ringkernsensor über eine Winkeldrehung von 90° [1].....	66
Abb. 58:	Messung mit Ringkernsensor an unstrukturierter 20 nm NiFe-80/20 Probe [1].....	66
Abb. 59:	Messung mit Ringkernsensor an unstrukturierter 2,5 μm NiFe-80/20-Probe oder an unstrukturierten Proben [1].....	66
Abb. 60:	Messung mit Ringkernsensor am Wafer mit 20nm NiFe Teststrukturen [1].....	67
Abb. 61:	Messung am Mikrosensor an unstrukturierter 20 nm NiFe-80/20-Probe.....	67
Abb. 62:	Messungen am Mikrosensor an strukturierter 390 $\mu\text{m} \times 390 \mu\text{m} \times 20 \text{ nm}$ NiFe-81/19-Probe, links 0°, rechts um 90° gedreht.....	67
Abb. 63:	Stromdichte bei 100 kHz, links ohne Lunker, Mitte mit Lunker 60 x 80 μm in 12 μm Tiefe, rechts simulierter Signalverlauf.....	68
Abb. 64:	Querschnitt des Mikroaktors.....	69
Abb. 65:	Kraft-Weg-Kennlinien für verschiedene Durchflutungen bei einem sekundären Luftspalt von 10 μm	70
Abb. 66:	Magnetische Flussdichte im Magnetkreis (Stator und Anker) am Punkt der Kraftkompensation [MAXWELL®].....	71
Abb. 67:	Weg-Zeit und Kraft-Zeit Kennlinien (Durchflutung = 4 A, Federvorspannung=100 μN).....	71
Abb. 68:	Hub-Zeit und Geschwindigkeits-Zeit Kennlinien.....	72
Abb. 69:	Komponenten des Demonstrators.....	75
Abb. 70:	Integrationsprinzip mit sinusförmigem Erregerstrom.....	76
Abb. 71:	Sensorkopf in Messposition.....	77
Abb. 72:	Sensorkopfmechanik.....	78
Abb. 73:	Antastvorgang.....	78
Abb. 74:	Messelektronik-Struktur.....	79
Abb. 75:	Die Hysteresemessung aus Nutzersicht (Aktivitätendiagramm).....	80
Abb. 76:	Kommunikationspfade.....	82

Abb. 77:	Messsystem Kommunikationsstruktur.....	83
Abb. 78:	FIB-Präparationsanlage Micrion MicroMill 9500PV.....	88
Abb. 79:	Schematische Darstellung des Drucksensors.....	89
Abb. 80:	Schnitt durch die Membran des Drucksensors.....	90
Abb. 81:	REM-Aufnahme unter 0° eines FIB-Schnittes, welcher unter 45° angefertigt wurde, an einer Membran eines Drucksensors der Firma X-Fab.....	91
Abb. 82:	Messreihe zum Vergleich von Soll- zu Istwert in der FIB.....	92
Abb. 83:	Magnetfeldsensor der Firma Sensitec.....	93
Abb. 84:	Erster Schnitt durch den Magnetfeldsensor.....	93
Abb. 85:	REM-Aufnahme unter 40°.....	94
Abb. 86:	REM-Aufnahme eines Wirbelstromsensors.....	95
Abb. 87:	REM-Aufnahme unter 30° eines FIB-Schnittes einer Teststruktur.....	95
Abb. 88:	Schematische Seitenansicht eines Mikro-Hysteresemesssensors mit zu vermessender Probe.....	98
Abb. 89:	FEM-Simulationsergebnis einer transienten Simulation zur Berechnung der induzierten Spannung einer Messspule.....	98
Abb. 90:	FEM-Simulationsergebnis einer transienten Simulation zur Berechnung des magnetischen Flusses.....	99
Abb. 91:	Schematische Seitenansicht des Mikro-Hysteresemesssensors.....	100
Abb. 92:	Schematische Darstellung des Mikro-Hysteresemesssensors mit Vorderseitenkontaktpads.....	101
Abb. 93:	Schematische Darstellung des Mikro-Hysteresemesssensors mit Durchkontaktierungen.....	101
Abb. 94:	Prozessfolge des Mikro-Hysteresemesssensors.....	103
Abb. 95:	REM-Aufnahme der Messspule, der Kontaktpads, der zweiten SU-8™-Einbettung und der Vias zur Erregerspule.....	103
Abb. 96:	REM-Aufnahme der Erregerspule, der Kontaktpads und der dritten SU-8™-Einbettung.....	104
Abb. 97:	Lichtmikroskopische Aufnahme des gefertigten Mikrosensorchips mit Vorderseitenkontaktpads.....	105
Abb. 98 :	Rückansicht des gefertigten Mikrosensorchips mit Durchkontaktierungen.....	106
Abb. 99:	Erregerstrom und induzierte Spannung als Differenz aus den Messsignalen mit und ohne 20 nm dicke NiFe80/20-Probe.....	106
Abb. 100:	Hysteresekurve, verketteter Fluss für 20 Windungen der 20 nm dicken NiFe80/20-Probe als Funktion des Erregerstroms.....	107

Abb. 101: Hysteresekurve gemessen an einer gesputterten NiFe-81/19-Struktur (390 μm \times 390 μm) bei 0°.....	108
Abb. 102: Hysteresekurve gemessen an einer gesputterten NiFe81 / 19-Struktur (390 μm \times 390 μm) bei 90°.....	108
Abb. 103: Sensorkopf für Mikrosensor mit Durchkontaktierungen.....	108
Abb. 104: Schematische Darstellung des Gesamtsystems aus Sensorchip, Federsystem und Mikroaktor.....	110
Abb. 105: Schematische Darstellung des Mikroaktors.....	110
Abb. 106: Seitenansicht des Mikroaktors.....	111
Abb. 107: Kraft-Auslenkung-Charakteristika der verschiedenen magnetomotori- schen Kräfte (Luftspalt von 10 μm).....	113
Abb. 108: a) Magnetische Flussdichte im magnetischen Kern (Stator und Läufer) im Moment der Kompensation von den Kräften [Ansoft Maxwell®] und b) 3D-Ansicht der magnetischen Flussdichte im magnetischen Kern (Stator und Läufer) [Ansoft Maxwell®].....	114
Abb. 109: Fertigungsablauf des Stators.....	115
Abb. 110: Prozess der Strukturierung von SmCo [2].....	115
Abb. 111: AZ-Mikrostruktur auf der oberen Cr-Schicht.....	115
Abb. 112: Isotropes nasschemisches Ätzen von SmCo.....	116
Abb. 113: REM-Aufnahme der Hartmagnete aus SmCo.....	116
Abb. 114: REM-Aufnahme des unteren Kerns und der Pole.....	117
Abb. 115: Strukturen des Pols in SU-8TM.....	117
Abb. 116: REM-Aufnahme der ersten Spulenlage mit Via.....	118
Abb. 117: Obere Spulenlage.....	118
Abb. 118: Angefertigter Stator.....	119
Abb. 119: Versuchsvorrichtung.....	119
Abb. 120: Prinzipieller Aufbau des Aktuators.....	123
Abb. 121: ANSYS-Modell der Feder des ursprünglichen Entwurfs.....	124
Abb. 122: Mittels FEM-Analysen optimiertes Federsystem-Design.....	124
Abb. 123: Design des Läufers mit Details des Federsystems.....	125
Abb. 124: Verlauf der magnetische Feldstärke im 100 μm dicken Anker (Permalloy-Folie) des Läufers.....	127
Abb. 125: Skizze für die Berechnung der elektromagnetischen Kräfte und Auslenkungen des Läufers bei einer fertigungsbedingten Streuung des Luftspaltes zwischen Läuferanker und Spulenkern.....	127

Abb. 126: Elektromagnetische und Federkräfte bei einem Spulenstrom von 420 mA für Abstände zwischen Läuferanker und Spulenkern von 10 μm , 5 μm bis zu 1 μm	128
Abb. 127: Layout der Leiterbahnen für die Kontaktierung, Versorgung und Auslese des Sensors auf der Läufer-Plattform.....	128
Abb. 128: Schematischer Querschnitt der Leiterbahnen auf den Federstrukturen des Läufers für die drei verschiedenen Designvarianten.....	129
Abb. 129: Wichtigste Prozessschritte zur Herstellung des Läufers.....	130
Abb. 130: Galvanisch abgeschiedene Au-Leiterbahnen mit einer Höhe von 10,4 μm und einem Abstand von 1,8 μm	131
Abb. 131: Rückseite des entwickelten Läufers mit integriertem Permalloyanker (Abb. 131a) und Vorderseite mit Au-Metallisierung für die Kontaktierung, Versorgung und Auslese des Sensors (Abb. 131b).	131
Abb. 132: Komponenten des Aktuators, die beim Assembling zueinander justiert und miteinander verbunden werden müssen.	132
Abb. 133: a) Schematischer Querschnitt des Aktuators und b) Detail der Verbindung von Läufer und Stator.	132
Abb. 134: Entfernung der Si-Stege mittels Laser Cutting nach dem Assembling von Stator, Läufer und Sensorr (Schema).	133
Abb. 135: Aktuator mit Sensor auf einer PCB nach dem Kontaktieren mittels Drahtbonden.....	133
Abb. 136: Maximale Auslenkung des Läufers bei einem Strom von 420 mA.....	134

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Messaufgaben für magnetische Messmethode.....	34
Tab. 2:	Spezifikation für die geplante Vermessung magnetischer Partikel in fluidischen Systemen.....	35
Tab. 3:	Eigenschaften der Messobjekte.....	49
Tab. 4:	xy-Tisch mit Vakuum-Chuck.....	49
Tab. 5:	z-Achse für den Sensorkopf.....	50
Tab. 6:	Standardeindringtiefe in Abhängigkeit von der Frequenz.....	68
Tab. 7:	K-Werte bei verschiedenen Lunkertiefen und -größen.....	69
Tab. 8:	Abmessungen und Federkraft der drei ausgewählten Systeme.....	125
Tab. 9:	Werte für die durch Simulation ermittelten Kräfte und Federkonstanten.....	126
Tab. 10:	Permeabilitätszahl einer galvanisch abgeschiedenen Permalloyschicht und einer gewalzten Permalloyfolie.....	126
Tab. 11:	Mit ANSYS ermittelte elektromagnetische Kräfte und Auslenkungen des Läufers bei einer Variation des Luftspaltes zwischen 10 μm und 1 μm und einem Spulenstrom von 420 mA.....	127

1 Sensitec GmbH

1.1 Wissenschaftlich-technische Zielsetzung

1.1.1 Wissenschaftlich-technische Zielsetzung AP1

Zielsetzung bei der Sensitec GmbH im Rahmen von AP1 war es, durch die Einbindung eines bestehenden Dual-Beam-FIB Systems in eine Waferfertigung für magnetische Sensoren die Inline-Analytik bzgl. Dimensionsmessung und stöchiometrische Zusammensetzung wesentlich zu verbessern.

Dies sollte mit folgenden Maßnahmen erreicht werden:

- Beschaffung eines EDX-Detektors und Integration in das FIB-System.
- Datentechnische Anbindung des FIB-Systems an die Prozessdatenbank der Sensitec-Waferfertigung.
- Entwicklung und Fertigung eines Stromsensors als Testobjekt für 3D-Metrologie.
- Methodenentwicklung auf dem Gebiet der dimensional und stöchiometrischen Analytik anhand von Anwendungsbeispielen aus der Sensitec Waferfertigung und der CHARMA Projektpartner.

1.1.2 Wissenschaftlich-technische Zielsetzung AP2 / 3

Für AP2 – Entwicklung eines Mikrosensors für magnetische Hysteremessungen – und AP3 – Entwicklung eines 3D-Messsystems – sollte Sensitec als Industriepartner an der Erarbeitung der jeweiligen Anforderungsdefinition (Lastenheft) mitwirken. Darüber hinaus war es Aufgabe der Sensitec GmbH, im Rahmen von AP3 geeignete magnetische 3D-Strukturen für Testmessungen an dem von LPKF/innomas/Steinbeis-Transferzentrum (STZ) Mechatronik entwickelten 3D-Messsystem zur Verfügung zu stellen.

1.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

1.2.1 Inbetriebnahme der quantitativen EDX-Analyse

2005 wurde der SEM-Teil des Dual Beam FIB von Sensitec (Typ: FEI Altura 875) um ein Inca Drycool EDX System der Firma Oxford Instruments erweitert. Es besteht aus einem Si(Li)-Halbleiterdetektor mit einer Energieauflösung von 100eV und einer patentierten stickstofffreien Kühleinheit. Damit ist die Aufnahme und standardlose quantitative Auswertung von durch die SEM-Elektronen angeregten Röntgenspektren in rechteckigen Bildausschnitten möglich. Darüber hinaus erlaubt die INCA EDX Software die Erfassung von Elementintensitäten entlang von Linienprofilen (sog. Line Scans) und in 2-dimensionalen Element-Verteilungsbildern (Element Maps).