

4.3. Parametermessungen

4.3.1. Meßbedingungen für den Testchip

Durch die speziellen, vom Standard-CMOS-Prozeß abweichenden Prozeßschritte bei der Fertigung integrierter Spulen mit planaren Kernen entstehen zusätzliche Risiken für die Ausbeute und die Zuverlässigkeit der Spulen aber auch der Ansteuer- und Ausselekttronik und somit des gesamten Mikrosystems. Zur Erkennung und Ursachenfindung bei auftretenden Fehlern existieren am IMS für den Standard-CMOS-Prozeß entsprechende Teststrukturen zur Parameterkontrolle /PIE 92/. Dabei handelt es sich um spezielle Testchips (wide kerfs) oder Strukturen im Sägerahmen (narrow kerfs).

Im folgenden sollen analoge Teststrukturen als Testchip (wide kerf) für die technologischen Sonderschritte und die daraus resultierenden spezifischen Risiken entworfen werden. Ziel ist es, die Messungen an den Teststrukturen für die ferromagnetischen Sensorbauelemente analog der PATMOS-Struktur für die CMOS-Bauelemente größtenteils auf dem Parametertestsystem des IMS (Tester HP4062B mit vollautomatischen Waferprober EG2010) durchführen zu können. Insofern wird auf bereits vorhandene Strukturen und Meßalgorithmen zurückgegriffen. Diese werden für die Sonderbauelemente modifiziert und gegebenenfalls ergänzt. Außerdem werden spezielle Strukturen und Meßverfahren zum Monitoring der für die magnetischen Sensoreigenschaften relevanten Parameter entwickelt.

Abb. 4.15 zeigt die Einordnung der Parametermessungen in die CMOS-Prozeßfolge. Die Vormessung (oder der Kurz-Test) dient der Prozeßkontrolle der Parameter und findet am IMS nach der Strukturierung der ersten Metallebene statt. Der Test wird auf einem Testchip durchgeführt und besteht aus Messungen der Transistor- bzw. Dioden-Kennlinien und Messungen einiger wichtiger Prozeß-Parameter (Schlüssel-Parameter).

Ausführliche Messungen finden am Ende des Prozesses statt. Innerhalb der PATMOS-Messung werden alle Sägerahmen-Test-Strukturen (PATMOS-Strukturen, narrow kerfs) im Mapping Modus gemessen. Anschließend werden eine Tabelle mit Mittelwerten und Standardabweichungen von Modell- und Prozeßparametern sowie Wafermaps angefertigt.

Vormessung 1 bietet dabei die Möglichkeit, Parameter ohne den Einfluß der technologischen Sonderschritte zu messen und mit den Werten der PATMOS-Messung nach den technologischen Sonderschritten (NiFe-Abscheidung, KOH-Ätzung) zu vergleichen.

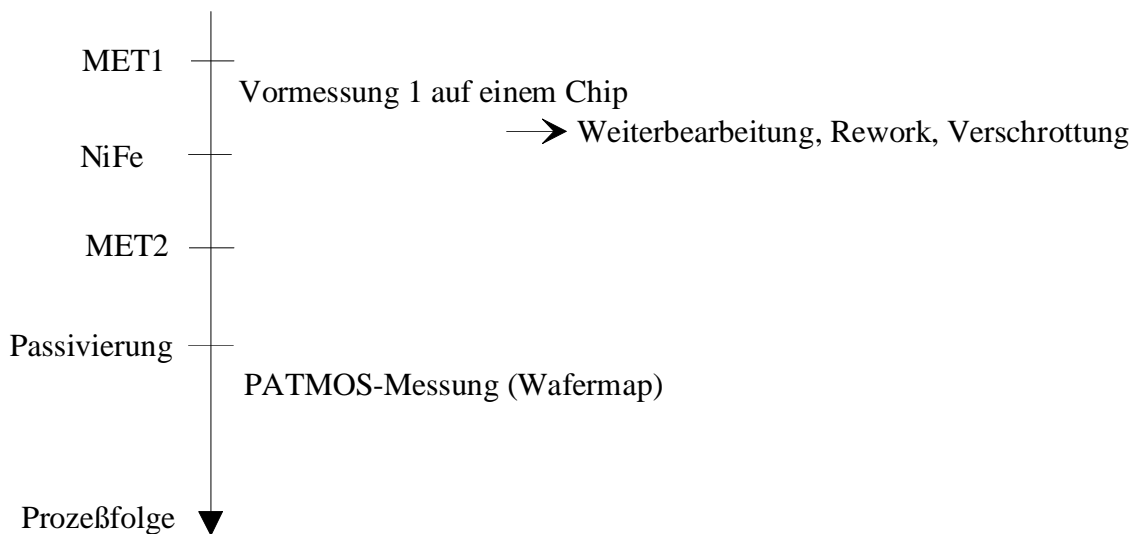


Abb. 4.15: Einordnung der Parametermessungen in die Prozeßfolge

Die zusätzlichen Messungen an den Teststrukturen werden zusammen mit der PATMOS-Messung durchgeführt. Allerdings können spezielle magnetische Parameter und die Kelvin-Kontakte nicht mit dem Tester HP4062B gemessen werden, so daß hier das Ausweichen auf Spezialmeßplätze (siehe auch Kapitel 4.5) notwendig ist.

Die im HP4062B vorhandenen Stromquellen erlauben in Verbindung mit der Strombelastbarkeit der Nadeln Ströme von 1 nA bis 10 mA. Die Auflösung der Spannungsmessung (begrenzt durch Rauschen der Adaptierung) beträgt 10 mV. Man erhält damit bei maximaler Stromeinprägung eine Auflösung von 1 Ω . Ein weiterer die Genauigkeit der Messung beeinflussender Effekt ist der Kontaktwiderstand der Meßspitzen (2-10 Ω). Abhilfe kann hier durch Vier- oder Dreispitzenmessungen geschaffen werden.

Zur Dimensionierung der Widerstandswerte der Strukturen werden die spezifischen Widerstände $\rho_{\text{MET}} = 3 \mu\Omega\text{cm} = 0.03 \Omega\mu\text{m}$ und $\rho_{\text{NiFe}} = 20 \mu\Omega\text{cm} = 0.2 \Omega\mu\text{m}$ und die sich daraus mit den Schichtdicken $d_{\text{MET}} = 1 \mu\text{m}$ und $d_{\text{NiFe}} = 0.5\mu\text{m}$ ergebenden Schichtwiderstände R_s

$$R_{s\text{NiFe}} = 0,4 \Omega/\square = 400 \text{ m}\Omega/\square \quad \text{und} \quad R_{s\text{MET}} = 0,03 \Omega/\square = 30 \text{ m}\Omega/\square \quad (4.19)$$

verwendet.

Die im Tester integrierte Kapazitätsmeßbrücke erlaubt bei einer Meßfrequenz von 1 MHz eine Auflösung von 0.01 pF, jedoch wird diese durch Anschlußprobleme (Kabelabschirmung, Antennenwirkung des Chucks) auf 20 pF begrenzt.

Alternativ kann ein Meßplatz für C(V)-Messungen 10pF...2 nF genutzt werden. Dabei ist es nicht sinnvoll, die Kapazitäten an die PATMOS-Padreihe anzuschließen, da die Messungen an einem separaten Meßplatz (direkte Kontaktierung von Poly bzw. MET, meist gegen Substrat) erfolgen.

Die Meßbedingungen für Kennlinienaufnahmen werden analog zur Widerstandsmessung durch die einprägbaren Ströme, die Auflösung der Spannungsmessung und die Kontaktwiderstände der Nadeln begrenzt.

Die PATMOS-Padanordnung besteht aus 24 Pads ($170\ \mu\text{m} \times 90\ \mu\text{m}$, Pitch $120\ \mu\text{m}$). Auf jedes Pad werden zwei Nadeln aufgesetzt. Damit können Vierspitzenmessungen, bei denen nur der Einfluß der Kontaktwiderstände eliminiert werden soll und der Widerstand der Anschlußleitungen zur Struktur vernachlässigt werden kann, an nur zwei Anschlußpads durchgeführt werden. Pad 3 dient der Rückseitenkontaktierung zum Substrat (fest mit Chuck verdrahtet) und ist gewöhnlich mit einem Substratkontakt belegt.

4.3.2. Teststrukturen

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Teststrukturen wurden auf zwei Testchips verteilt zur Kontrolle der Technologieentwicklung verwendet. Innerhalb der Technologieentwicklung können dabei Teststrukturen hinfällig und neue Teststrukturen erforderlich werden, so daß die Testchips an den Stand der Technologie angepaßt werden. Die Teststrukturen selbst werden jedoch nicht verändert, so daß auch für verschiedene Versionen des Testchips die Vergleichbarkeit der Parameter gewährleistet wird. Die Wafermaps und Trends stammen von der Charge V3040 (keine Technologievariation) und V3080 (Variation des NiFe-Schichtstapels und der NiFe-Schichtdicke).

Die folgende Grafik zeigt den Gang des Parameters $R_{\text{COIL_X}}$ über das Los V3040. Die Punkte repräsentieren dabei die Einzelwerte, die Kurve verbindet die Mittelwerte der Wafer.

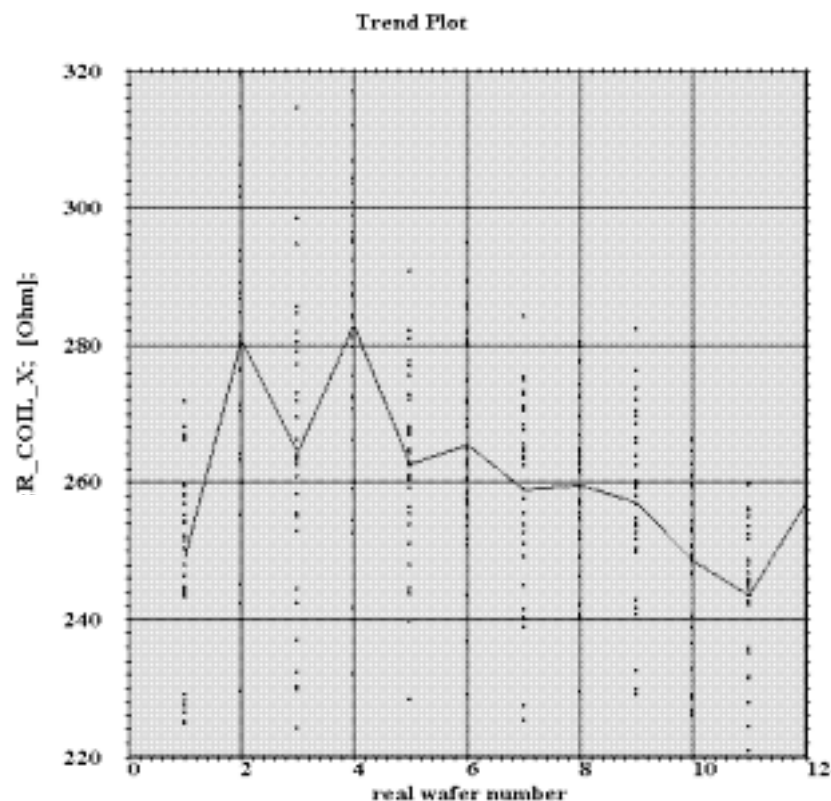


Abb. 4.16: Trend von $R_{\text{COIL_X}}$ Los V3040 über die Wafer

Die wichtigsten Teststrukturen des Testchips, ihr Aussehen, das verwendete Meßverfahren sowie die wichtigsten Ergebnisse der an den Teststrukturen erfolgten Messungen sollen nun beschrieben werden.

R_COIL_X, R_COIL_Y

Es handelt sich um vollständige integrierte Spulen mit Kernorientierung in X- und Y-Richtung (CoilY, CoilX, Kernbreite 100µm, 100 Wdg.) für Widerstands- und Zuverlässigkeitsmessung.

Messverfahren: 2-Spitzenmessung, 5 mA Strom (2 Ohm Auflösung)

Besonderheit: zusätzliche Pads (400 µm x 100 µm) zur 4-Spitzen-Zuverlässigkeitsmessung

Diese Struktur wird in der Entwicklungsphase als Vergleichsstruktur genutzt. Sie wird nach einer endgültig feststehenden Sensorspulenkonfiguration an diese angepaßt (R_COIL_Y1, R_COIL_X1). Ziel der Struktur ist eine schnelle Aussage über die Spulenausbeute, den zu erwartenden Spulenwiderstand und damit über die Qualität der Metallisierung und des Opferschichtverfahrens.

R_COIL_Y1, R_COIL_X1

Es handelt sich um Sensoreinzelkerne in X- und Y-Richtung (parallel zur Fase) mit der Spulenkonfiguration des verwendeten Sensors für Magnetik-, Widerstands- und Zuverlässigkeitsmessungen.

Meßverfahren: 2-Spitzenmessung, 5 mA Strom (2 Ohm Auflösung)

Spitzenmeßplatz mit Lock-in Verstärker zur Sensorcharakterisierung im Waferverbund

Besonderheit: zusätzliche Pads (400 µm x 100 µm) zur 4-Spitzen-Zuverlässigkeitsmessung

Diese Struktur ersetzt CoilY und CoilX, wenn nur noch Sensoren mit ASIC auf dem Wafer vorhanden sind. Bis zu diesem Zeitpunkt werden die Magnetikmessungen an den Sensoren ohne ASIC (FG20, FGV04...) durchgeführt. Die Beschreibung und Diskussion der unterschiedlichen Magnetikmessungen befindet sich im folgenden Kapitel. Als einfachstes Verfahren kommt für die Parametermessung dabei die sog. Kompensationskennlinie in Betracht.

Wichtigster Unterschied zu den Strukturen R_COIL_X, R_COIL_Y ist, daß sich nun elektrisch voneinander isolierte Spulen auf dem Kern befinden, so daß sich die Struktur nun auch zum Überprüfen der Isolationswiderstände zwischen den Spulen eignet. Problematisch sind hier vor allem Reste der Opferschicht oder auch Stringer (dünne Metallfäden), die teilweise zu hochohmigen Kurzschlüssen zwischen den Spulen führen können. Diese sind bei mit dem ASIC verschalteten Spulen nicht messbar, stellen jedoch ein erhebliches Zuverlässigkeitsrisiko für das Bauelement dar. Daher ist eine Kontrolle der Technologie auch hinsichtlich dieses Risikos erforderlich.

R_MET1KB_1, R_MET1KB_3, R_MET2KB_1, R_MET2KB_3

Das sind Strukturen zur Messung des Schichtwiderstandes und der Kantenbedeckung Metallisierung 1 und 2.

R_MET1KB_1, R_MET2KB_1 1 x Leitbahn $w = 9,6 \mu\text{m}$, $L = 3370 \mu\text{m}$, $R = 10,5 \text{ Ohm}$

R_MET1KB_3, R_MET2KB_3 3 x Leitbahn $w = 3,2 \mu\text{m}$, $L = 3370 \mu\text{m}$, $R = 31,6 \text{ Ohm}$
parallelgeschaltet $R_{\parallel} = 10,5 \text{ Ohm}$

Messung: Vormessung 1 (MET1KB), PATMOS

Meßverfahren: 4-Spitzenmessung, 10 mA Strom (1 Ohm Auflösung)

Es werden die üblichen Anordnungen zur Charakterisierung von Strukturierungsprozessen verwendet. Es handelt sich um eine breite Leitbahn und 3 schmale Leitbahnen gleicher Länge. Die 3 schmalen Leitbahnen sind parallel geschaltet. Ihre Breiten addiert ergeben die Breite der einzelnen, breiten Leitbahn. Obwohl sich aus der Sensortechnologie primär keine speziellen Risiken für die Abscheidung der Metallisierung und deren Strukturierung ergeben, ist wegen der hohen Stromdichten in den Spulen eine Kontrolle zur Gewährleistung der geforderten Zuverlässigkeitskriterien erforderlich.

R_NIFEKB_1, R_NIFEKB_3

Das sind äquivalente Strukturen zur Messung des Schichtwiderstandes der Permalloyschicht.

R_NIFEKB_1 1 x Leitbahn $w = 9,6 \mu\text{m}$, $L = 3370 \mu\text{m}$, $R = 19,3 \text{ Ohm}$

R_NIFEKB_3 3 x Leitbahn $w = 3,2 \mu\text{m}$, $L = 3370 \mu\text{m}$, $R = 58 \text{ Ohm}$
parallelgeschaltet $R_{\parallel} = 19,3 \text{ Ohm}$

Messung: PATMOS

Messverfahren: 4-Spitzenmessung, 10 mA Strom (1 Ohm Auflösung)

Die Struktur dient neben der 4-Spitzenmessung zur Kontrolle der Schichtdickenhomogenität, der Strukturierung sowie der Legierungszusammensetzung. Abb. 4.17 zeigt den Trend des Parameters R_NIFEKB_1 über das Los.

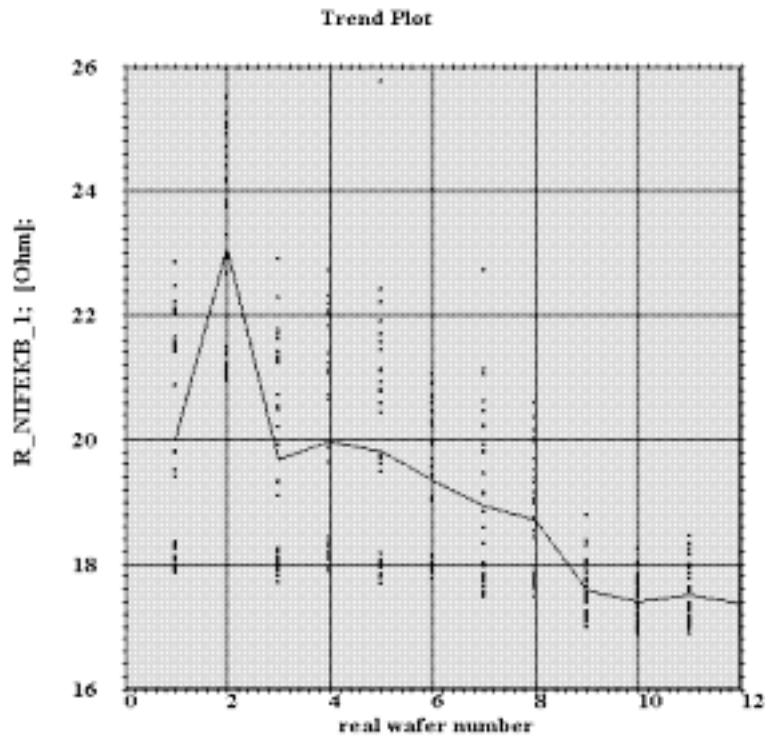


Abb. 4.17: Trend von R_NIFEKB_1 Los V3040 über die Wafer

Auffallend ist die Häufung der Werte um R_NIFEKB_1 = 18 Ω und die starke Streuung bei den Scheiben 1 bis 8. Im Gegensatz dazu zeigen die 3 schmalen Leitbahnen diesen Effekt nicht.

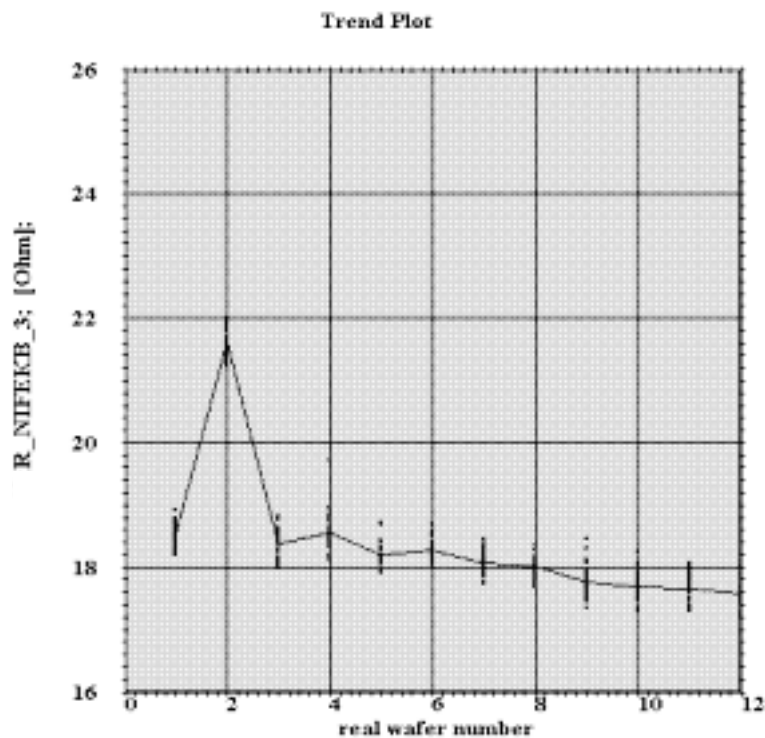


Abb. 4.18: Trend von R_NIFEKB_3 Los V3040 über die Wafer

Ursache ist die Strukturierung der NiFe-Kerne der Scheiben 1-8, die eine Nachbehandlung erforderte. Durch Änderungen beim Opferschichtverfahren für die Scheiben 9-12 konnte dieser

Effekt abgestellt werden und eine schmalere Verteilung von R_NIFEKB_1 erreicht werden. Der signifikant größere Mittelwert von Wafer 2 wird im folgenden Kapitel näher untersucht.

R_CUTMMxxxx

Diese Teststrukturen dienen der Bestimmung des Widerstands von CUTMM (Kontaktwiderstand MET1-MET2).

Struktur:

R_CUTMM_1	Kontaktkette 10 Stk. (Ziel 7 Ω)
R_CUTMM_2	Kontaktkette 100 Stk. (Ziel 70 Ω)
R_CUTMM38000	Kontaktkette 8000 Stk. (Ziel 5600 Ω)
R_CUTMM36000	Anzapfung Kontaktkette 2000 Stk. (Ziel 1400 Ω)
R_CUTMM32000	Anzapfung Kontaktkette 6000 Stk. (Ziel 4200 Ω)

Messung: PATMOS

Meßverfahren:

R_CUTMM_1	Durchgangsprüfung
R_CUTMM_2	4-Spitzenmessung, 5 mA Strom (2 Ω Auflösung)
R_CUTMM_3xxxx	2-Spitzenmessung, 1 mA Strom

Die unterschiedliche Anzahl von Kontakten sind zur Gewinnung verschiedener Aussagen geeignet:

- CUTMM_1** Mit dieser Struktur kann untersucht werden, ob bei Technologievariationen (z.B.: Kerndickenerhöhungen) überhaupt brauchbare Kontakte existieren.
- CUTMM_2** Mit dieser Struktur kann untersucht werden, ob bei Standardtechnologieläufen die Güte der Kontakte dem Zielparameter RCO_MM entspricht
- CUTMM_3** Mit diesen Strukturen kann untersucht werden, ob bei Standardtechnologien die Ausbeute der Kontakte den Erfordernissen der Sensorkonfiguration entspricht. (pro Sensor ca. 880 MET1/MET2 Kontaktstellen mit je 5 Einzelkontakten ergeben 4400 Kontakte je Sensor)

Die Kontakte zwischen den Metallebenen sind wegen der hohen Anzahl in Reihe geschalteter Kontakte je Spule und der hohen Stromdichten neben dem Opferschichtverfahren der kritischste Punkt der Technologie. Durch die Erhöhung der Isolatorstärke zwischen den Metallebenen wird die zuverlässige Füllung der Kontaktlöcher erschwert (Abb. 4.19).

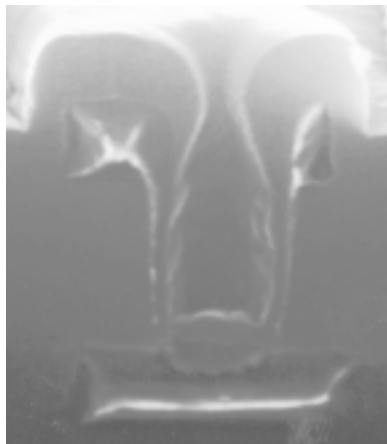


Abb. 4.19: Kontakt MET1-MET2 in der Spulenregion (Kontaktlochgröße 1.6 μm x 1.6 μm)

Die folgende Abbildung zeigt den Trend des Widerstandes der 8000er-Kette über das Los V3040.

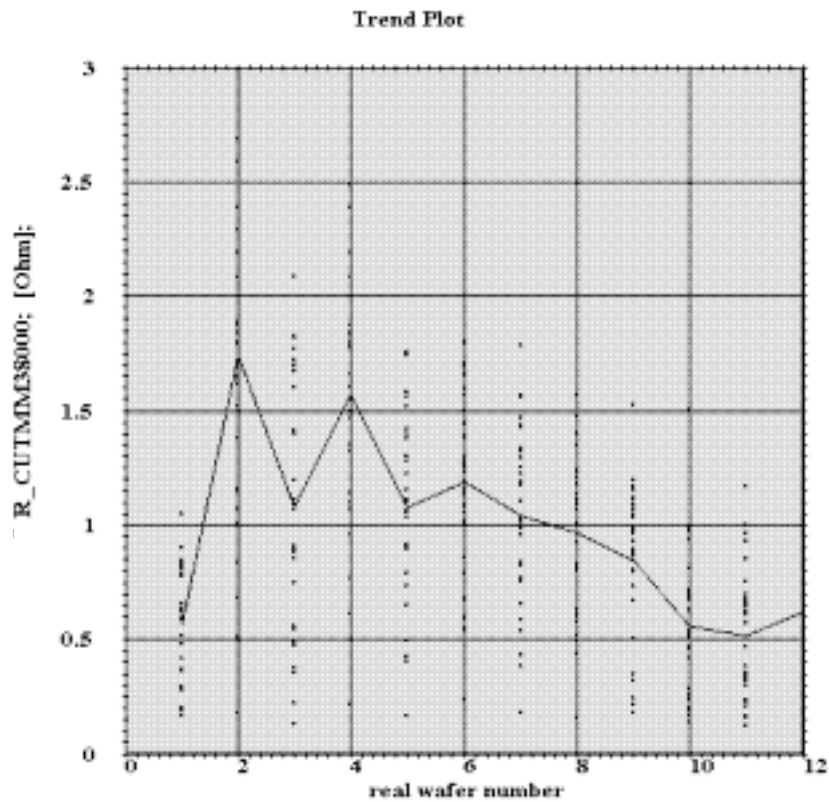


Abb. 4.20: Trend von R_CUTMM38000 des Loses V3040 (auf Einzelkontakt normiert)

Die starke Streuung der Parameter läßt sich mit Hilfe einer Wafermap beispielsweise der Scheibe 1 erklären. Dabei stehen hellere Kästchen für hohe Widerstände, dunklere Kästchen für niedrigere Widerstände, Positionen mit einem „x“ wurden nicht gemessen.

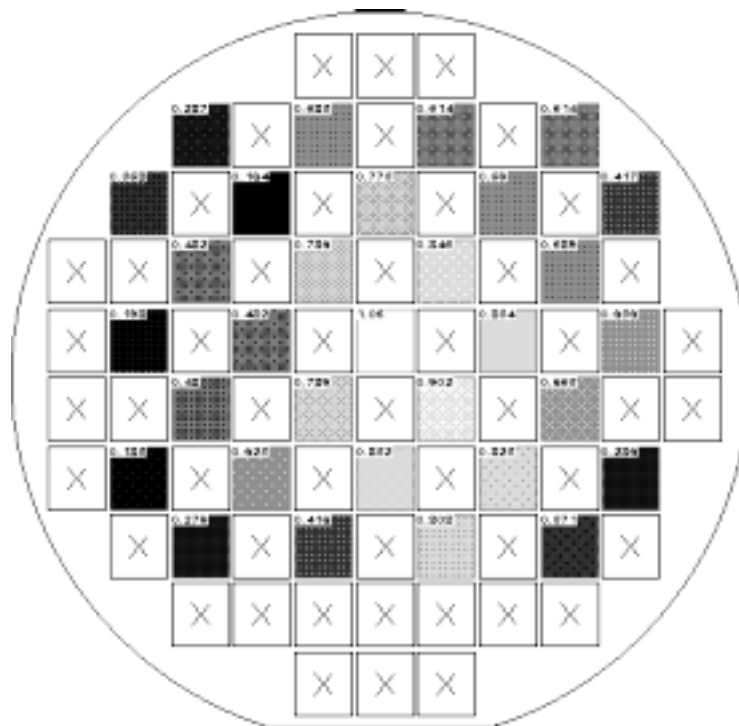


Abb. 4.21: Wafermap R_CUTMM38000 Scheibe V3040/1

Wie Abb. 4.21 belegt, ist die Ursache der hohen Streuung der Gang des Parameters R_CUTMM38000 von der Scheibenmitte $R_CUTMM38000 \approx 1$ zum Scheibenrand $R_CUTMM38000 \approx 0.2$.

Ein Vergleich von Abb. 4.20 mit Abb. 4.16 zeigt, daß die Fluktuationen des Kontaktwiderstandes über das Los und über die Wafer auch die Fluktuationen der Größe der Spulenwiderstände bestimmt. Dementsprechend wurden die technologischen Schritte Kontaktlochätzung und Reinigung sowie die am Prozeßende erfolgende Wasserstofftemperung (Kontaktausheilung) optimiert, um bessere Kontakteigenschaften zu erhalten.

R_CUTMF_10

Mit dieser Teststruktur erfolgt die Bestimmung des Widerstands von CUTMF (Kontaktwiderstand NiFe-MET2).

Struktur: Kontaktkette 10 Stk. Kontakte $1.6 \mu\text{m} \times 1.6 \mu\text{m}$

Messung: PATMOS

Messverfahren: 2-Spitzenmessung, 1 mA Strom (10 Ω Auflösung)

Bemerkung: Mit dieser Struktur kann die Kontaktausbeute und der Zielparame-
ter RCO_MF untersucht werden.

Die Kontakte dienen der Erdung der Kerne (ESD, EMV) und sind für die eigentliche Sensorfunktion unkritisch. Es erfolgt lediglich eine Ausbeutekontrolle. Die folgende Abbildung zeigt eine Wafermap.

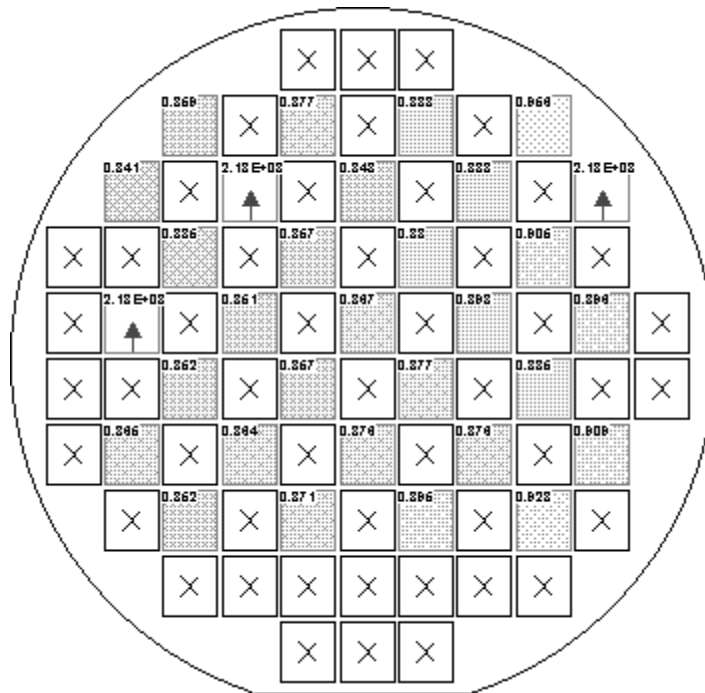


Abb. 4.22: Wafermap R_CUTMF_10 für Scheibe V3040/1 (↑ = offener Kontakt, x = nicht gemessen)

POLYK

Die Teststruktur beinhaltet eine MET1-Leitbahn, die über einer Poly-Kante liegt. Durch die entstehende Topologie ist die Gefahr von Rissen oder Voids in der Isolatorschicht (USG, BPSG) gegeben, durch welche ein Angriff des KOH beim Opferschichtverfahren auf das MET1 der Schaltung möglich ist. Die Ätzrate von KOH z.B. für USG beträgt ca. 3 nm/min, so daß sich für längere Verweilzeiten im KOH kritische Ätztiefen von 150 nm (45 min) ergeben, die durch mögliche Voids oder Spannungsrisse an einer topologischen Kante verschärft werden.

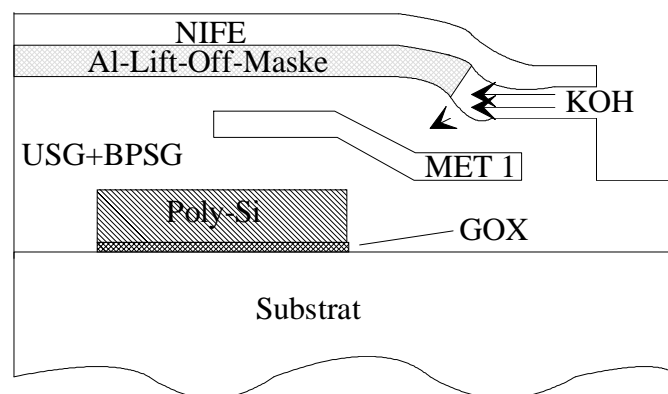


Abb. 4.23: Szenario KOH-Angriff auf MET1 an Polykante

Zielwert:	Durchgang
Struktur:	MET 1- Mäander (26 Leitbahnen, minimaler Pitch, 50 µm lang) über Polykante

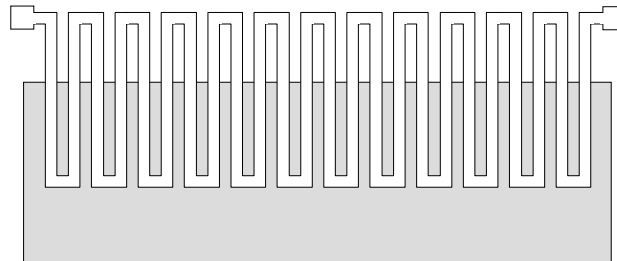


Abb. 4.24: Skizze des Mäanders

Messung:	Vormessung 1, PATMOS
Meßverfahren:	Durchgangsprüfung

NIFEK

Diese Teststruktur beinhaltet einen MET1-Mäander unter einer NiFe-Kante. Durch Abschattungseffekte beim Aufdampfen an den Kanten von NiFe-Strukturen besteht ebenfalls die Gefahr des KOH-Angriffs auf das MET1. Die Struktur ähnelt der in Abb. 4.23 und Abb. 4.24.

Messung:	Durchgangsprüfung
Struktur:	MET 1- Mäander (26 Leitbahnen, Spulenpitch, 50 µm lang) unter Permalloykante
Messung:	PATMOS
Meßverfahren:	Durchgangsprüfung

Technologisch kann diesem Risiko durch Einbringen einer Si_3N_4 -Schicht in die Isolatorschicht (USG) unter den Permalloystrukturen begegnet werden.

Der Testchip mit den beschriebenen Strukturen zur elektrischen Charakterisierung der Sensortechnologie wird durch spezielle Strukturen für Zuverlässigkeitsuntersuchungen der Spulen und zu Diffusionsproblemen, die möglicherweise durch das Sensorkernmaterial hervorgerufen werden können, ergänzt. Auf eine Beschreibung soll hier jedoch verzichtet werden.

Die parallel zur Beschreibung der Teststrukturen dokumentierten Meßergebnisse zeigen, daß mit dem zusätzlichen Testchip eine effiziente Kontrolle der Sondertechnologie möglich ist. Schwankungen technologischer Parameter, die am Produkt nur schwer zu messen sind, sind durch die Teststrukturen meßtechnisch leicht zugänglich. Durch die Messung unmittelbar nach der Fertigung können schnell Informationen über die Güte der Prozeßführung gewonnen werden. In der Entwicklungsphase sichern die Teststrukturen bei Designvariationen am Sensor die Vergleichbarkeit der technologischen Parameter und gewährleisten durch die schnell zur Verfügung stehenden Daten kurze Lernzyklen.