

4.4. Sensorcharakterisierung auf Waferebene

Die Teststrukturen **R_COIL_Y1**, **R_COIL_X1** in Abschnitt 4.3. sind neben der Kontrolle der Spulenwiderstände (analog zu **R_COIL_Y**, **R_COIL_X**) zusätzlich auch zur Bestimmung der magnetischen Schichtparameter vorgesehen. Während der Entwicklungsphase wurde die Sensor- und Technologieentwicklung größtenteils mittels „short loops“ (Technologie ohne Elektronik beginnend mit Metallisierung 1) durchgeführt. Die verwendeten Testfelder enthielten daher immer Sensorstrukturen (z.B: FG20, FGV04, FGV11) ohne Elektronikteil, an denen die Bestimmung und Kontrolle der magnetischen Schichtparameter und die Charakterisierung der Spulenkonfigurationen erfolgte. Erst mit dem Übergang zur reinen Fertigung des Sensorsystems mit Elektronik erfolgen diese Messungen dann an den Strukturen **R_COIL_Y1**, **R_COIL_X1**. Dafür werden die Kerne einer geeigneten, möglichst dem Produkt entsprechenden Sensorstruktur in diese Teststruktur übernommen.

Entsprechend Kapitel 2, speziell Abschnitt 2.5 gibt es prinzipiell 4 typische Kennlinien, die zur magnetischen Charakterisierung der Sensoren benutzt werden können.

1. Die Empfindlichkeitskennlinie $U_{2f} = f(H_0)$ mit dem Parameter I_{Exc} .
2. Die Arbeitspunktkennlinie $U_{2f} = f(I_{Exc})$ mit dem Parameter H_0 .
3. Die Kompensationskennlinie $U_{2f} = f(I_{Comp}, H_0 \approx 0)$ mit dem Parameter I_{Exc} .
4. Die Sensorkennlinie $I_{Comp} = f(H_0, U_{2f} = 0)$ mit dem Parameter I_{Exc} .

Die prinzipielle Form der Empfindlichkeitskennlinie und der Arbeitspunktkennlinie ergibt sich aus den Herleitungen in Abschnitt 2.4. Die Messung der 3. Kennlinie entspricht der Kalibrierung des Sensors im Kompensationsbetrieb und damit auch der Kalibrierung des integrierten Sensorsystems, des fertigen Produkts.

Zur Aufnahme von Sensorkennlinien unterscheidet man zwischen Referenz- und Absolutverfahren. Beim Referenzverfahren werden der zu kalibrierende Sensor und eine Referenzsonde der zu messenden Größe ausgesetzt und die Ausgangssignale beider Sonden verglichen. Da als Referenzsonde für DC-Felder nur Fluxgatesensoren zur Verfügung stehen, die bedingt durch die verwendeten weichmagnetischen Kerne ein Störfeld in ihrer Umgebung erzeugen, entfällt dieses Verfahren. Mit dem Absolutverfahren werden die aufgebauten Sensoren und Systeme im Feld einer Helmholtzspule charakterisiert (Abschnitt 4.6). Die Anwendbarkeit des Absolutverfahrens für Sensoren im Waferverbund wird im folgenden Abschnitt diskutiert.

4.4.1. Meßplatz

Kernproblem der Messung an den Sensorbauelementen im Waferverbund ist die Einkopplung eines definierten Magnetfeldes am Waferprober. Die Verwendung von Helmholtzspulen, in denen sich der Waferprober befindet, ist nicht sinnvoll. Die am Markt erhältlichen Waferprober bestehen teilweise aus ferromagnetischen Bauteilen, die bei Ummagnetisierung Hystereseschleifen durchlaufen und zu Störfeldern führen würden. Diese müßten kostenaufwendig durch nichtmagnetische Bauteile substituiert werden. Abb. 4.25 zeigt die Skizze eines am Markt erhältlichen halbautomatischen Waferprobers.

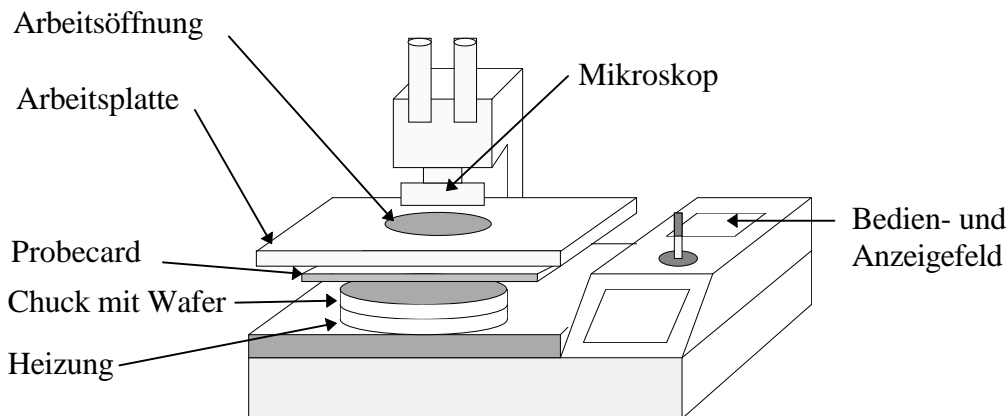


Abb. 4.25: Halbautomatischer Waferprober

Als Alternative bietet sich die Erzeugung eines lokal begrenzten Magnetfeldes an, so daß die Magnetisierung der ferromagnetischen Bauteile des Waferprobers weitgehend vermieden wird. Die Idee dabei ist, das Meßfeld H_0 durch einen unmittelbar in Sensornähe an der Probecard befindlichen stromführenden Bereich mit der Stromdichte S zu erzeugen (Abb. 4.26) und damit eine mit dem homogenen Feld vergleichbare Magnetisierung des Kerns zu erreichen. Die Analyse der Sensorfunktion im kompensierten Betrieb zeigte, daß mit dem Feld der integrierten Mikrospulen eine mit dem homogenen Feld vergleichbare Magnetisierung des Kerns möglich ist.

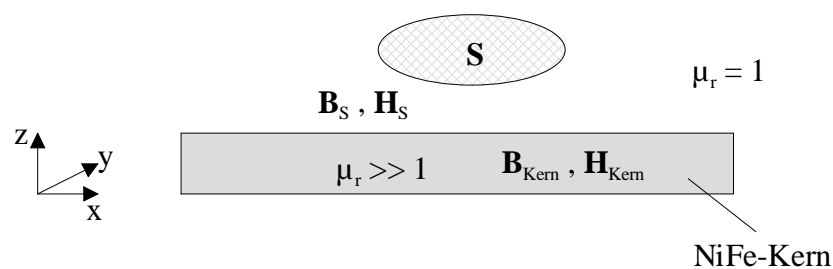


Abb. 4.26: Magnetisierung des Sensors durch stromführenden Bereich

Der Entwurf und erste Messungen mit einer solchen Probecard sowie Abschätzungen der Felder für unterschiedliche Geometrien des stromführenden Bereich bei Vernachlässigung der Randbedingungen am Sensor wurde in /RIE 96/ durchgeführt. Allerdings erwies sich die Vernachlässigung der Randbedingungen bei den Feldberechnung als nicht zulässig, und es kam zu erheblichen Differenzen zu den Messungen.

Zunächst definiert man analog zu Abschnitt 2.5 die inverse Sensorempfindlichkeit im kompensierten Betrieb bzw. den Kompensationsfaktor im inhomogenen Feld H_S des stromführenden Bereiches bezogen auf den im Leiter fließenden Strom I_S

$$K_S = \frac{I_S}{I_{\text{Comp}}} \Big|_{B_{\text{Kern}}=0} \quad (4.20)$$

Wichtige Randbedingung zur Dimensionierung des stromführenden Bereiches ist die maximale Stromstärke der üblichen, am Markt erhältlichen SMU's (z.B. Keithley 238, 2400) von 1A. Außerdem soll durch die Strombegrenzung die remanente Magnetisierung weichmagnetischer Teile des Chucks und der Arbeitsplattform vermieden werden. Die Anordnung sollte mit diesem Strom die maximale vom Sensor zu messende Feldstärke generieren können. In /RIE 96/ wurden ein runder Leiter, ein rechteckiger Leiter und zwei nebeneinander angeordnete Leiter sowie eine miniaturisierte Helmholtzspule betrachtet. Experimentell untersucht wurden der runde Leiter, der rechteckige Leiter und die miniaturisierte Helmholtzspule. Die mechanische Anfertigung der miniaturisierten Helmholtzspule erwies sich allerdings als schwierig und aufwendig, so daß auf eine weitere Entwicklung in diese Richtung verzichtet wurde. Deshalb sollen im folgenden die Eigenschaften der Anordnungen beginnend mit dem runden Leiter als einfachste Konfiguration mit den wenigsten Freiheitsgraden gefolgt vom rechteckigen Leiter feldtheoretisch untersucht werden. Abb. 4.27 zeigt die zu untersuchenden Anordnungen mit den als Freiheitsgraden zur Verfügung stehenden Abmessungen. Später könnten dann, falls notwendig, dem Problem angepaßte Formen des stromführenden Bereiches z.B. entsprechend /PAL 89/ berechnet werden.

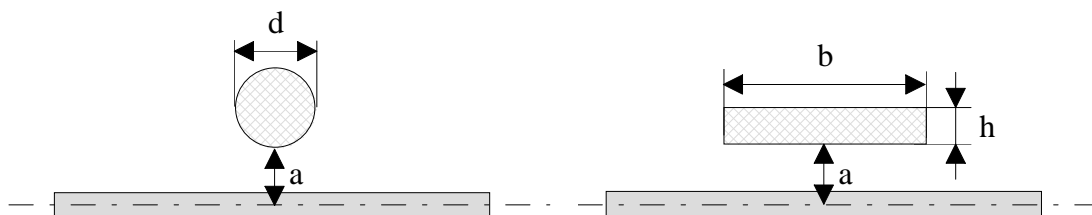


Abb. 4.27: Leiteranordnungen (nicht maßstäblich !)

Ziel bei der Wahl der Abmessung der Anordnung ist es, neben der erreichbaren Feldstärke am Sensor eine Magnetisierung des Sensorkerns zu erreichen, die der Magnetisierung durch ein homogenes Feld nahekommt.

Zur Berechnung der Felder unter Berücksichtigung der Randbedingungen bzw. der Entmagnetisierung sind das Summationsverfahren aus Kapitel 2.2 und die Spiegelungsmethode nach Kapitel 2.3 geeignet. Da der Abstand a groß gegen die Kerndicke d ist und die Magnetisierung

durch das Feld der Leiteranordnung \mathbf{H}_S mit der Magnetisierung durch das homogene Feld H_0 verglichen werden soll, wird das Summationsverfahren verwendet.

Für die Sonden sind derzeit optional die Empfindlichkeiten $20 \text{ mV}/\mu\text{T}$ und $10 \text{ mV}/\mu\text{T}$ vorgesehen. Bei einem linearen Austeuerbereich von $\pm 2 \text{ V}$ ergibt sich daraus als maximale zu messende und durch die Anordnung zu realisierende Feldstärke $H_0 = 160 \text{ A/m}$ ($B_0 = 201 \mu\text{T}$). Zunächst erfolgt die Berechnung der Magnetisierung analog (2.29) mit \mathbf{H}_S anstelle von H_0

$$(\mathbf{M}) = - \left[(\mathbf{N}) - \frac{1}{\chi_M} (\text{diag}_{3n}(1)) \right]^{-1} \cdot (\mathbf{H}_S) \quad (4.21)$$

und dann analog zu (2.33) die Berechnung der Feldstärke H_{Kern} bzw. der Flußdichte B_{Kern} im Kern

$$\mathbf{H}_{\text{Kern}} = \mathbf{H}_S + \mathbf{H}_M = \mathbf{H}_S + \mathbf{N} \cdot \mathbf{M} . \quad (4.22)$$

Die Berechnung erfolgt zuerst für den runden Leiter mit einem Strom von 1 A und einem Durchmesser $d = 0.25 \text{ mm}$. Abb. 4.28 zeigt den Verlauf der Flußdichte im Kern B_{Kern} für verschiedene Abstände der Leiterschleife vom Kern (graue Kurven) verglichen mit dem Verlauf in einem homogenen Feld $H_0 = 160 \text{ A/m}$ (schwarze Kurve).

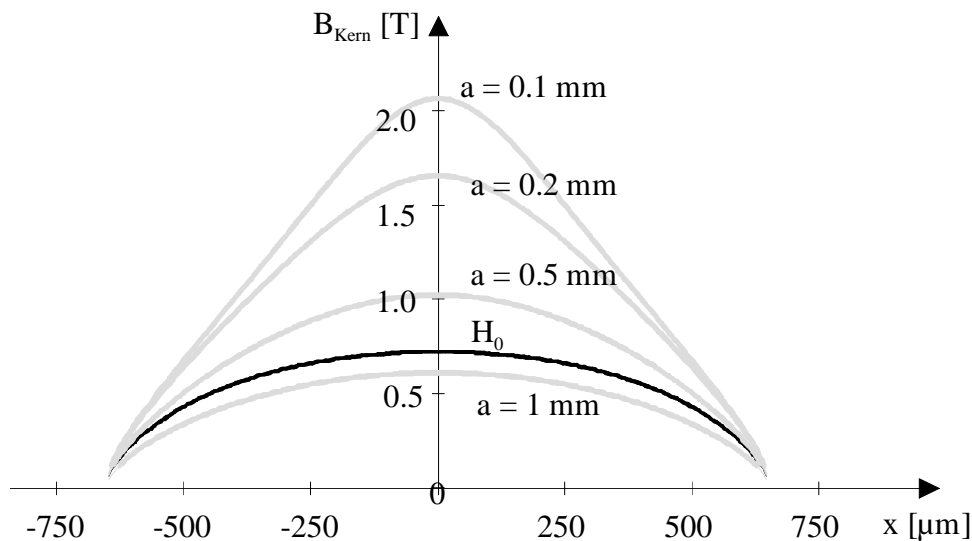


Abb. 4.28: Flußdichteverlauf im Kern bei unterschiedlichem Abstand des runden Leiters

Ab einer Höhe von $a = 0.8 \text{ mm}$ wird mit 1 A Strom nicht mehr die $H_0 = 160 \text{ A/m}$ entsprechende Flußdichte in der Kernmitte erreicht. Allerdings nähert sich mit größer werdendem Abstand die Form des Flußdichteverlaufs dem (Ideal-) Verlauf bei homogenem Feld H_0 an. Um diesen Zusammenhang näher zu untersuchen, werden zunächst die Flußdichteverläufe auf den Mittelwert des Flußdichteverlaufs für H_0 normiert. Anschließend wird dann für jedes x die betragsmäßige Abweichung zum Flußdichteverlauf für H_0 berechnet. Die mittlere prozentuale Abweichung vom Idealverlauf erhält man schließlich aus dem Mittelwert der Einzelabweichungen bezogen auf dem Mittelwert des Flußdichteverlaufs für H_0 .

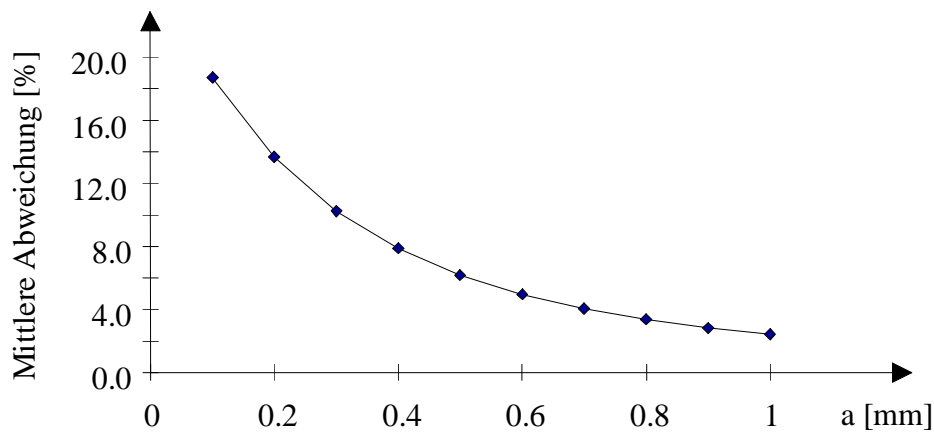


Abb. 4.29: Mittlere prozentuale Abweichung vom Idealverlauf runder Leiter

Für den runden Leiter kann man sich anhand des Durchflutungsgesetzes

$$\oint_{(F)} \vec{H} \, d\vec{r} = \int_F (\vec{J} + \dot{\vec{D}}) \, d\vec{f} \quad (4.23)$$

und der herrschenden Symmetrieverhältnisse leicht überlegen, daß keine Verbesserung dieses Verhaltens durch Vergrößerung des Drahtdurchmessers d zu erreichen ist, da sich dadurch die Feldstärken am Sensor nicht ändern. Deshalb soll nun am rechteckförmigen Leiter der Einfluß der Ausdehnung in Richtung der Kernachse untersucht werden.

Gewählt wird hierzu zunächst der Abstand $a = 0.5$ mm (Dicke eines 100 mm - Wafers). Die entsprechenden Formeln für das Feld eines rechteckförmigen Leiters zur Berechnung von H_s können Abschnitt 2.3 entnommen werden.

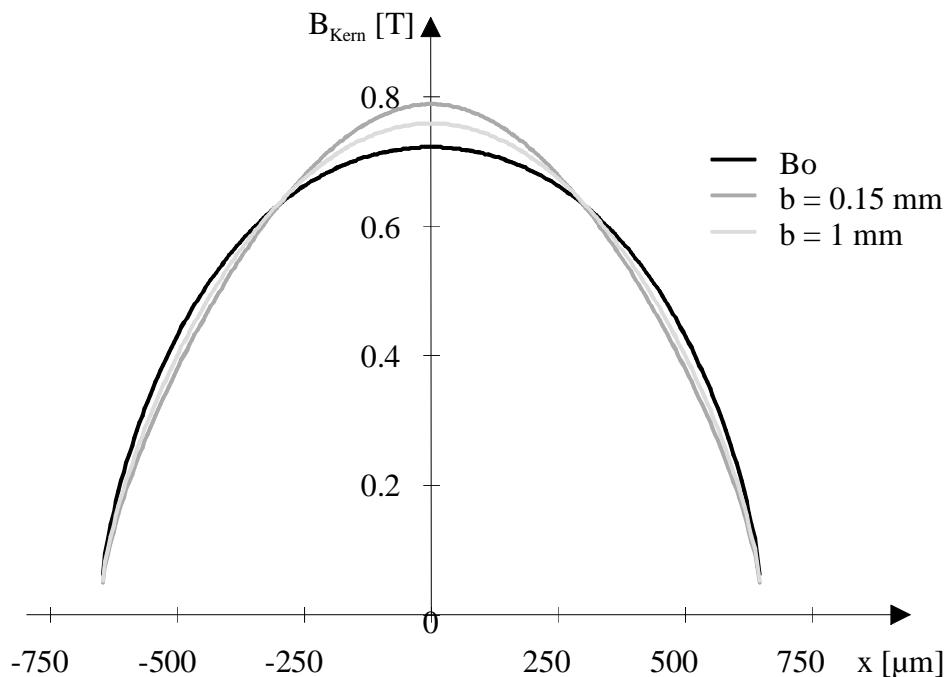


Abb. 4.30: Flußdichteverlauf im Kern bei unterschiedlicher Breite des rechteckigen Leiters

Abb. 4.30 zeigt den Verlauf der Flußdichte im Kern bei Magnetisierung durch das homogene Feld $H_0 = 160$ A/m (Flußdichteverlauf B_0) verglichen mit der Magnetisierung eines rechteckigen Leiters der Höhe $h = 0.15$ mm und der Breite $b = 0.15$ mm bzw. $b = 1$ mm im Abstand

$a = 0.5$ mm zum Sensor. Die Verbreiterung des Leiters führt zur Annäherung an den Verlauf bei Magnetisierung durch ein homogenes Feld. Abb. 4.31 untermauert diese Aussage für einen rechteckigen Leiter mit variabler Breite und $a = 0.5$ mm und $h = 0.15$ mm.

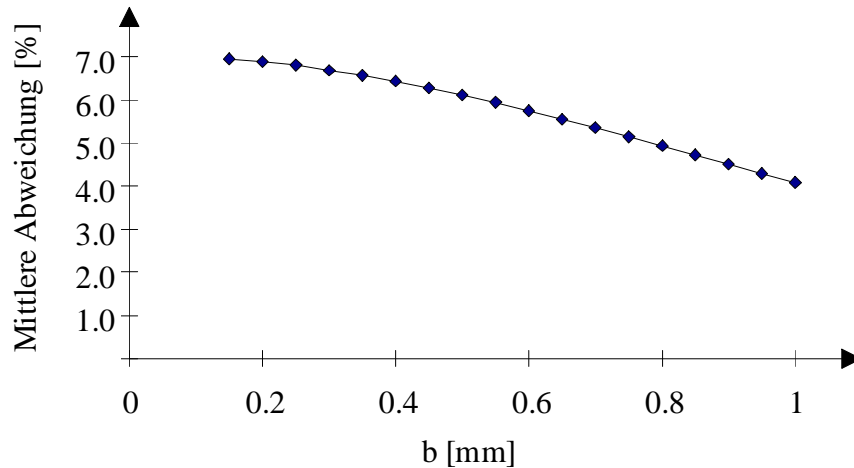


Abb. 4.31: Mittlere prozentuale Abweichung vom Idealverlauf rechteckiger Leiter

Aus Abb. 4.30 ist zu ersehen, daß im Vergleich zum homogenen Feld in der Sensormitte immer noch eine stärkere Magnetisierung erfolgt. Eine weitere Verbesserung wäre durch Anordnungen entsprechend Abb. 4.32 möglich.



Abb. 4.32: Weitere Verbesserungsmöglichkeiten der Leiteranordnung

Für die Entwicklungsphase mit veränderlichen Sensorkonfigurationen wurde eine spezielle Probecard konstruiert, die zur Messung der Sensoren ohne Ansteuer- und Ausleselektronik über geschirmte Anschlüsse der Nadeln (Signale im μV -Bereich) verfügt und über dem Nadelring eine Manipulatoreinheit zur Justage der Leiterschleife gegenüber dem Sensor trägt (Abb. 4.33). Für DC-Messungen können mittels auf der Probecard montierter Relais die Nadeln von den geschirmten Anschlüssen auf den üblichen Probecardstecker umgeschaltet werden.

Mit dieser Manipulatoreinheit ist die Justage der Leiterschleife bezüglich x, y, z und ϑ (Verdrehung in 45° Schritten für XY- und V-Sensoren) zu den Nadeln der Probecard und damit zum kontaktierten Sensorchip möglich. Die ausführliche Beschreibung der Dimensionierung, Auslegung und Konstruktion dieser Manipulatoreinheit findet sich in /RIE 96/. Die Leiteranordnung wird am unteren Ende der Drahtzuführung angebracht.

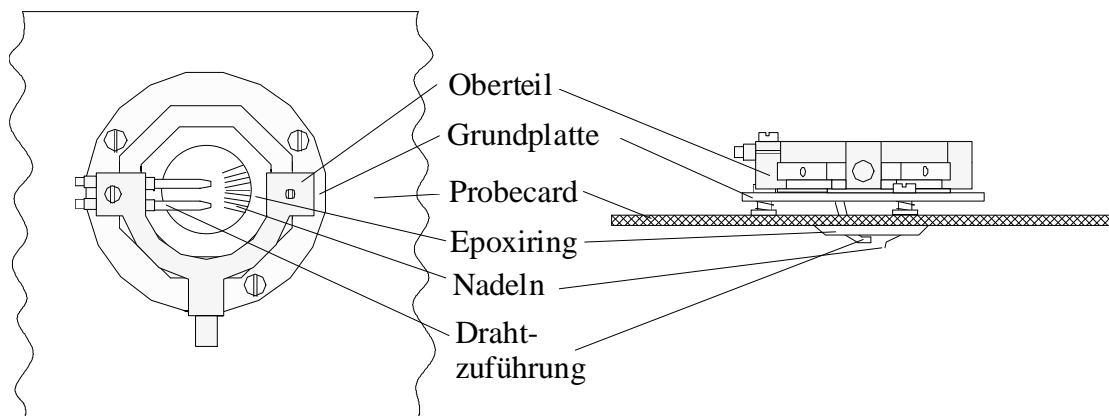


Abb. 4.33: Skizze Manipulatoreinheit zur Justage der Leiterschleife

Hauptziel ist die Messung der Sensorempfindlichkeit bzw. des Kompensationsfaktors im Waferverbund. Damit ist die Frage zu untersuchen, wie genau mit dem Kompensationsfaktor für die Leiteranordnung der Kompensationsfaktor für das homogene Feld geschätzt werden kann. Dazu kann für die einzelnen Leiteranordnungen das Verhältnis der Kompensationsfaktoren für homogenes Feld und Leiteranordnung

$$V = \frac{K_B}{K_S} \quad (4.24)$$

berechnet werden. Setzt man für K_S und K_B die Definitionen entsprechend (4.20) und (2.136) ein und eliminiert man den Kompensationsstrom, erhält man

$$V = \frac{K_B}{K_S} = \frac{B_0}{I_S} \Big|_{B_{\text{Kern},S} = B_{\text{Kern},B}} \quad (4.25)$$

Diese Ableitung scheint zunächst fraglich, da ja die Kompensationsströme für K_S und K_B , um der definitionsgemäßen Bedingung $B_{\text{Kern}} = 0$ zu genügen, nicht gleich sind. Da aber entsprechend des verwendeten Summationsverfahrens lineare Verhältnisse angenommen werden, kann statt $B_{\text{Kern}} = 0$ in beiden Kernen auch die Bedingung $B_{\text{Kern},S} = B_{\text{Kern},B}$ gesetzt und stattdessen für den Kompensationsstrom $I_{\text{Comp},S} = I_{\text{Comp},B}$ angenommen werden. Damit kann I_{Comp} aus (4.24) eliminiert werden. Physikalisch kann V (Einheit $\mu\text{T}/\text{mA}$) damit auch als Kompensationsfaktor der Leiteranordnung gegenüber der Magnetisierung durch das homogene Feld interpretiert werden. Damit läßt sich nun auch die Berechnung von V entsprechend einfach durchführen. Auf den Kompensationsstrom wird verzichtet, für ein homogenes (Referenz-) Feld B_0 wird zunächst die Flußdichte $B_{\text{Kern},B}$ berechnet und anschließend für die Leiteranordnung das I_S gesucht, für das $B_{\text{Kern},S} = B_{\text{Kern},B}$ gilt. Mit dieser Vereinfachung wird V nach (4.5) über (4.6) auch numerisch leicht zugänglich. Durch die Elimination von I_{Comp} ist V auch für die Kennlinien im nichtkompensierten Betrieb verwendbar. Tab. 4.2 beinhaltet V für die Leiteranordnungen nach Abb. 4.28:

a [mm]	V [μ T/mA]
0.1	0.575
0.2	0.461
0.3	0.384
0.4	0.327
0.5	0.285
0.6	0.252
0.7	0.225
0.8	0.204
0.9	0.186
1.0	0.170

Tab. 4.2: V des runden Leiters als Funktion des Leiterabstandes a

Wichtig an Tab. 4.2 ist die starke Höhenabhängigkeit von V. Um eine über den gesamten Wafer gleichmäßige Höhe zu gewährleisten, wurde die Probecard mit einem Kantentaster ausgestattet, der die z-Aufwärtsbewegung des Proberchucks beim Aufsetzen der Nadeln auf den Wafer stoppt. Dadurch wird ein gleichmäßiger Abstand für alle Chippositionen auf dem Wafer gewährleistet.

Zur Charakterisierung der Sensortechnologie auf Waferebene wurde ein Meßplatz entworfen und aufgebaut, der den elektrischen Test und die Aufnahme der verschiedenen magnetischen Kennlinien an den Sensorstrukturen ohne ASIC ermöglicht. Während einer künftigen Fertigung des Sensorsystems mit ASIC werden dann an diesem Meßplatz die elektrischen und magnetischen Parameter der Teststrukturen **R_COIL_Y1** und **R_COIL_X1** aufgenommen.

Kern des Meßplatzes ist ein halbautomatischer Waferprober Wentworth AWP 1050 HR mit der zuvor beschriebenen Probecard (Abb. 4.34).

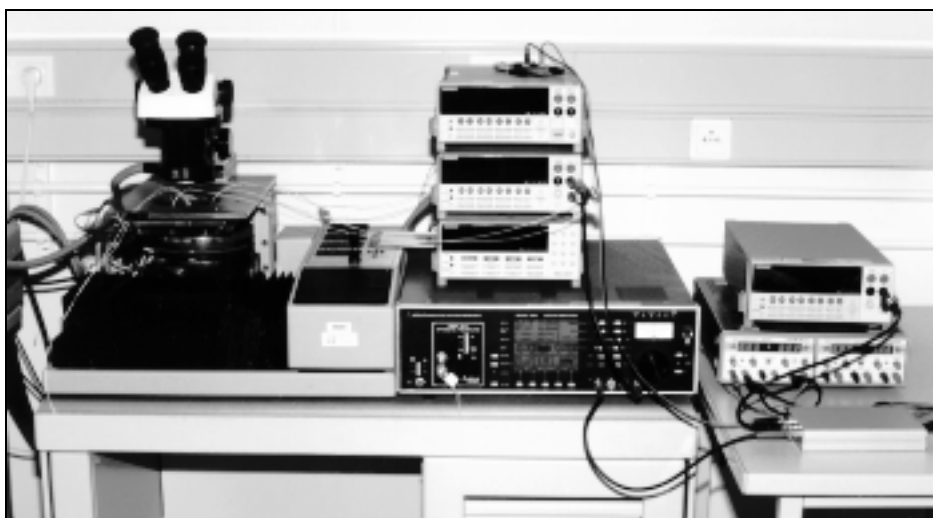


Abb. 4.34: Scheibenmeßplatz zur Charakterisierung der Sensortechnologie

In der linken Bildhälfte befindet sich der Waferprober mit der eingebauten Probecard. Der danebenstehende Lock-in Verstärker EG & G 5301 liefert den Sensoranregungsstrom und detektiert die Sensorausgangssignale. Darüber befindet sich ein Scanner K7001 zur Verschaltung der Meßgeräte DC-seits mit der Probecard und untereinander. Das darüber befindliche Multimeter K2001 dient der Messung des Sensoranregungsstromes. Mit der auf dem Multimeter befindlichen SMU K2400 werden die DC-Parameter der Sensorstrukturen gemessen und die veränderlichen Gleichströme für die Leiterschleife der Probecard oder die Kompensationsspulen des Sensors erzeugt. Rechts im Bild befindet sich ein an den Ausgang des Lock-in Verstärkers angeschlossener Integrator für Messungen am Sensor im kompensierten Modus mit der zugehörigen Stromversorgung HAMEG 8000 und einem Multimeter K2010 zur Erfassung des Kompensationsstromes.

Im folgenden werden die mit diesem Meßplatz erfaßbaren magnetischen Kennlinien und Parameter sowie ihre Verwendbarkeit zur Technologiecharakterisierung und Sensorkalibrierung diskutiert.

4.4.2. Die Empfindlichkeitskennlinie

Diese Kennlinie ist die meßtechnisch am leichtesten erfaßbare. Ihre prinzipielle Form wurde bereits in Abschnitt 2.4 hergeleitet. Für das entsprechend Abb. 2.31 im Abschnitt 2.4 mit einseitiger Sättigung liegende Maximum dieser Kennlinie für kleine Anregungsfelder $\hat{H} - |H_0| < H_K$ läßt sich aus den Gleichung (2.119) für die Höhe $A_{2f\max}$ und die Lage des Maximums $H_{0\max}$

$$A_{2f\max} = -\frac{8}{\pi} \cdot N \cdot A \cdot B_S \cdot f \cdot \frac{\hat{H}}{H_K} \quad (4.26)$$

$$H_{0\max} = -H_K \quad (4.27)$$

ableiten. Zunächst suggeriert (4.27) eine einfache Möglichkeit zur Kontrolle von H_K . Allerdings sind Messungen mit kleinen Anregungsfeldstärken bzw. -strömen wegen des schlechten Signal-Rauschverhältnisses und der damit verbundenen hohen Meßunsicherheit problematisch.

Betrachtet man für größere Anregungsströme bzw. Feldstärken $\hat{H} - |H_0| > H_K$ die sich nun für beidseitige Sättigung nach (2.118) ergebenden Werte für die Höhe $A_{2f\max}$ und die Lage des Maximums $H_{0\max}$

$$A_{2f\max} = -\frac{8}{\pi} \cdot N \cdot A \cdot B_S \cdot f \cdot \frac{\hat{H}}{H_K} \sin\left(\pi \cdot \frac{H_K}{\hat{H}}\right) \quad (4.28)$$

$$H_{0\max} = -\frac{1}{2} \hat{H}, \quad (4.29)$$

erhält man mit der Näherung $\sin(x) = x$ für kleine x für $A_{2f_{\max}}$

$$A_{2f_{\max}} = -\frac{8}{\pi} \cdot N \cdot A \cdot B_S \cdot f . \quad (4.30)$$

Damit läßt sich das Maximum der Kennlinie zur Kontrolle des Produktes $A \cdot B_S$ und mit Annahme eines konstanten B_S für eine gegebene Legierung und Temperatur sowie konstanter (lithographiebestimmter) lateraler Abmessungen der Teststruktur zum Monitoring der Schichtdicke verwenden.

Ein weiterer wichtiger Parameter dieser Kennlinie ist die Sensorempfindlichkeit im nichtkompensierten Betrieb G_0 , der Anstieg der Kennlinie im Ursprung

$$G_0 = \left. \frac{\partial A_{2f}}{\partial H_0} \right| = N \cdot A \cdot B_S \cdot f . \quad (4.31)$$

In Abb. 4.35 ist die Prinzipschaltung des Meßplatzes für diese Kennlinie gezeigt.

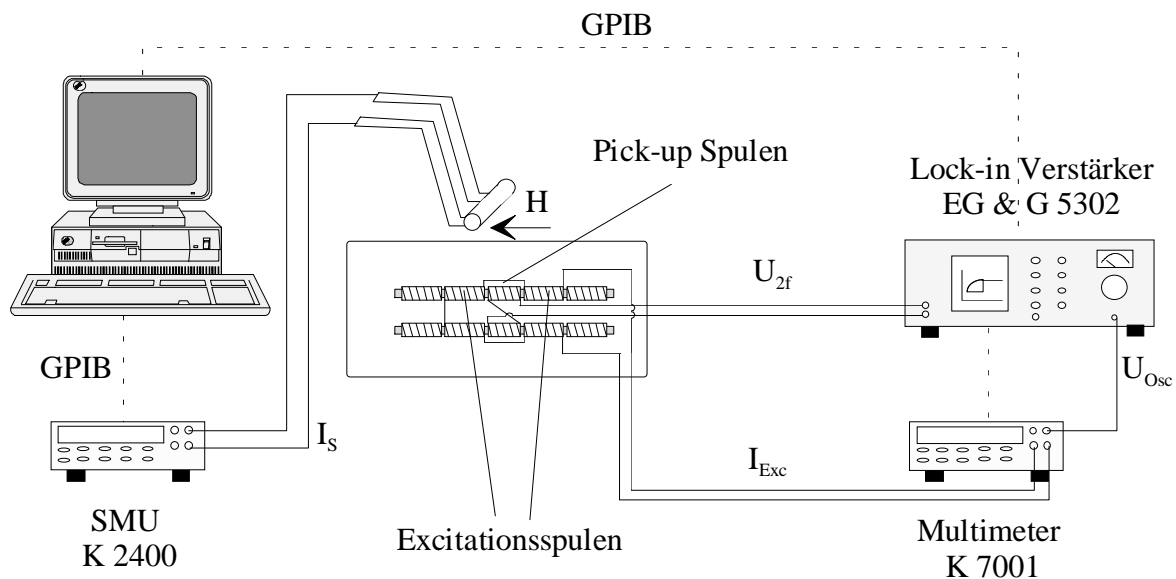


Abb. 4.35: Prinzipschaltung zur Aufnahme der Empfindlichkeitskennlinie

Mit dem Multimeter K2001 und einem Softwareregler wird die Regelung eines konstanten Anregungsstromes I_{Exc} für die Anregungsspulen aus der Oszillatorspannung U_{Osc} ($f = 20$ kHz) des Lock-in Verstärkers realisiert. Mit der SMU K2400 wird der veränderliche Strom I_S in die Leiterschleife eingepreßt und damit am Sensor das veränderliche Meßfeld H_S erzeugt. Auf die detaillierte Darstellung der Verschaltung über den Scanner K7001 wurde im Interesse der Übersichtlichkeit verzichtet. Die Detektion der Kophasal- und Quadraturkomponente der Sensorausgangsspannung U_{2f} (doppelte Frequenz des Anregungssignales) erfolgt mit dem 2-Phasen Lock-in Verstärker EG & G 5302. Damit kann Amplitude und Phase des Sensorsignals erfaßt werden. Die bei dynamischen Wafermessungen notwendige Störunterdrückung wird mit dem als Bandpaß ($f_T = 40$ kHz, 2×20 dB/Dek.) geschalteten doppelten Eingangsfiler und dem Ausgangstiefpaß ($T_L = 20$ ms) des Lock-in Verstärkers erreicht. Diese Möglichkeiten gaben

u.A. den Ausschlag zur Anwendung der Lock-in Technik im Vergleich zur FFT für die Sensorsignalanalyse. Kürzestmögliche, geschirmte Signalführung von und zu den Nadeln der Probecard sowie Masseflächen auf der Probecard sind weitere Maßnahmen zur Stör-
 unterdrückung. Eine ausführliche Analyse der Störsignale am Wafermeßplatz und Maßnahmen zu ihrer Unterdrückung finden sich in /RIE 96/.

Eine automatisierte Aufnahme der Kennlinien erfordert sinnvollerweise auch eine automatisierte Parameterextraktion. Abb. 4.36 zeigt die Empfindlichkeitskennlinie mit den aus ihr extrahierten Parametern. Zunächst werden mittels eines Suchalgorithmus das Minimum U_{MIN} und das Maximum U_{MAX} der Kennlinie sowie die zugehörigen Ströme I_{MIN} und I_{MAX} in der Leiterschleife bestimmt. Aus den Indizes der beiden Extrema wird der Fitbereich für die Geradenapproximation

$$U_{2f} = S \cdot I_{\text{Wire}} + U_{\text{Offset}} \quad (4.32)$$

mit

$$S = \arctan(\alpha) \quad (4.33)$$

des linearen Teils der Kennlinie so bestimmt, daß dieser symmetrisch zu den beiden Extrema liegt und die Hälfte der Meßpunkte zwischen den Extrema umfaßt.

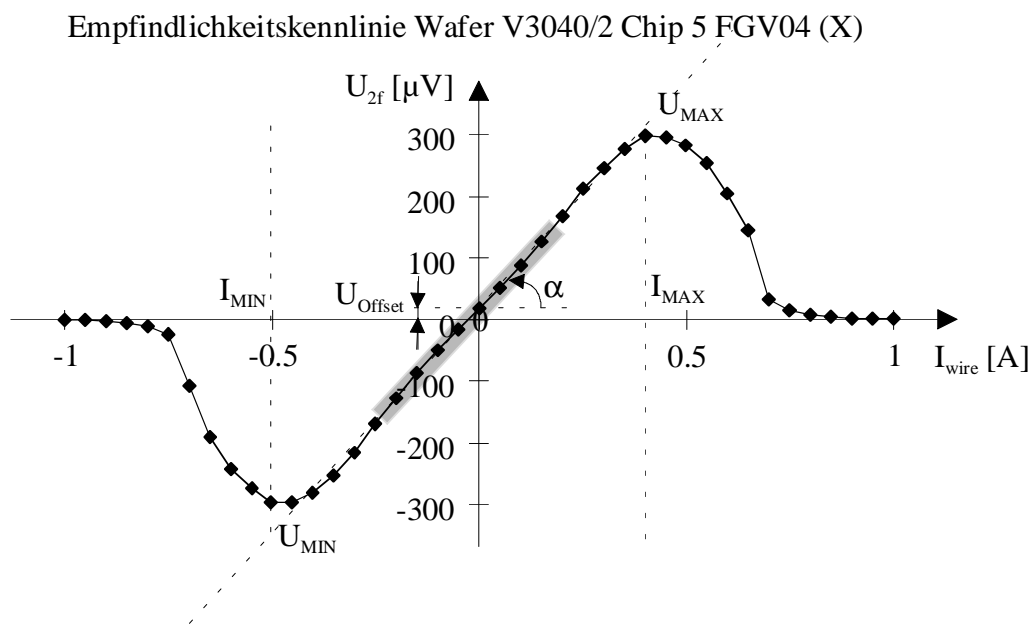


Abb. 4.36: Empfindlichkeitskennlinie mit Parametern

Damit wird ein vom Offset unabhängiges Erfassen der (Nullpunkt-) Empfindlichkeit des Sensors gewährleistet. Ursache des Offsets ist die remanente Aufmagnetisierung von Teilen des Chucks. Erzeugt man für den Offset der beiden Sensorrichtungen Wafermaps, erhält man eine „Landkarte“ der Magnetisierung des Chucks in der jeweiligen Sensorrichtung.

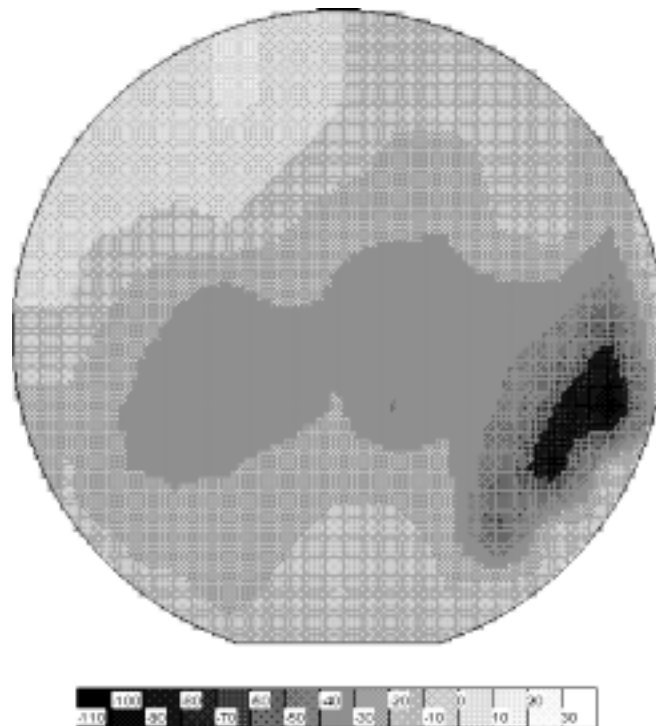


Abb. 4.37: Wafermap des Sensoroffsets [μV] V3040/2 Subchip 23 (FGV04X)

Durch den beschriebenen Algorithmus wird der Einfluß des Offsets hinreichend unterdrückt. Erfahrungen mit mehreren Losen haben gezeigt, daß der Algorithmus stabil arbeitet und daß reproduzierbare Ergebnisse zur Charakterisierung der Sensortechnologie gewonnen werden können. Als Beispiel zeigt Abb. 4.38 den Lostrend für U_{MINMAX} des Loses V3040.

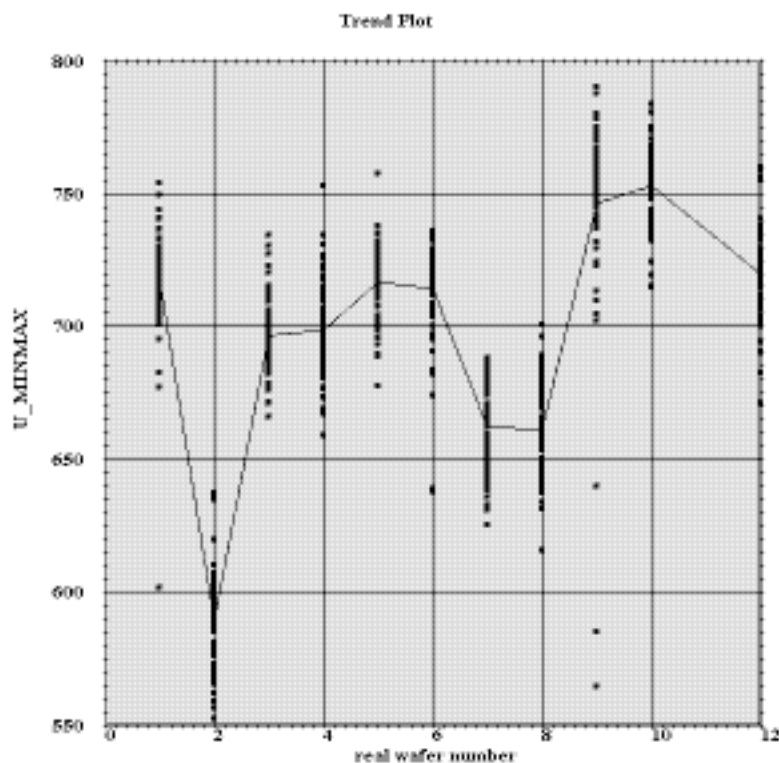


Abb. 4.38: Lostrend U_{MINMAX} [μV] für Los V3040

Die deutliche Abweichung bei Wafer 2 konnte auf einen Fehler beim Aufdampfen des Permalloy zurückgeführt werden. Dabei wurde Wafer 2 fälschlicherweise mit einer zu geringen Schichtdicke bedampft. Die Ergebnisse der Schichtwiderstandsmessungen für das Permalloy im vorhergehenden Kapitel sind damit ebenfalls erklärbar.

4.4.3. Die Arbeitspunktkennlinie

Ebenfalls in Abschnitt 2.4 wurde die Arbeitspunktkennlinie eingeführt. Das Maximum dieser Kennlinie läßt sich unter Annahme eines kleinen H_0 und der Näherung $\sin(x) = x$ zu

$$\hat{H}_{\max} = 2 \cdot H_K \quad (4.34)$$

berechnen. Das Sensorsignal erreicht dabei den Wert

$$A_{2f \max} = -\frac{8}{\pi} \cdot N \cdot A \cdot B_S \cdot f \cdot \frac{\hat{H}}{H_K} \sin\left(\pi \cdot \frac{H_0}{\hat{H}}\right). \quad (4.35)$$

Die Arbeitspunktkennlinie ist damit entsprechend (4.34) zum Monitoring von Anisotropie- und Koerzitivfeldstärke der Schicht geeignet. Nach (4.16) muß ein kleines Feld H_0 angelegt werden, das aber so groß sein sollte, daß sich das Sensorsignal mit hinreichender Auflösung meßtechnisch erfassen läßt. Praktisch wurden Werte für den Strom durch die Leiteranordnung gewählt, die einem homogenen Feld von 20 A/m entsprechen. Zur Eliminierung des Offsets wird jeweils mit positivem und negativem Feld gemessen und die Signaldifferenz bewertet.

Die Verschaltung des zu messenden Sensors erfolgt auch hier nach Abb. 4.35. Alternativ zur Magnetisierung durch die Leiteranordnung kann das (Differenz-) Feld auch mittels der Kompensationsspulen erzeugt werden - damit läßt sich ggf. der Aufbau der Probecard vereinfachen. Da nur eine konstante, kleine Feldstärke benötigt wird, beeinflussen die in Kapitel 2.5 diskutierten Nichtlinearitäten nicht die Aufnahme der Kennlinie. Während bei der Messung der Empfindlichkeitskennlinie nur am Anfang der Messung der Sensorstrom mittels Softwareregler eingestellt werden muß, ist nun an jedem Meßpunkt die Regelung des Sensorstromes I_{Exc} erforderlich. Dadurch wird diese Messung sehr zeitaufwendig.

Die Parameterextraktion ist für diese Kennlinie sehr einfach. Nach Überlagerung der Kennlinien für positive und negative Feldstärke wird das Maximum der Sensorausgangsspannung und der zugehörige Anregungsstrom bestimmt.

Die folgenden Bilder zeigen Arbeitspunktkennlinien verschiedener Sensoren des Loses V1257. Die Sensoren unterscheiden sich hinsichtlich des Schichtaufbaus des Sensorkerns wie folgt:

V1257/12	20 nm Ta / 440 nm Legierung I (Ni 80%, Fe 20%) / 20 nm Ta
V1257/18	20 nm Ta / 440 nm Legierung II (Ni 82%, Fe 18%) / 20 nm Ta
V1257/24	50 nm Ta / 440 nm Legierung I (Ni 80%, Fe 20%) / 50 nm Ta.

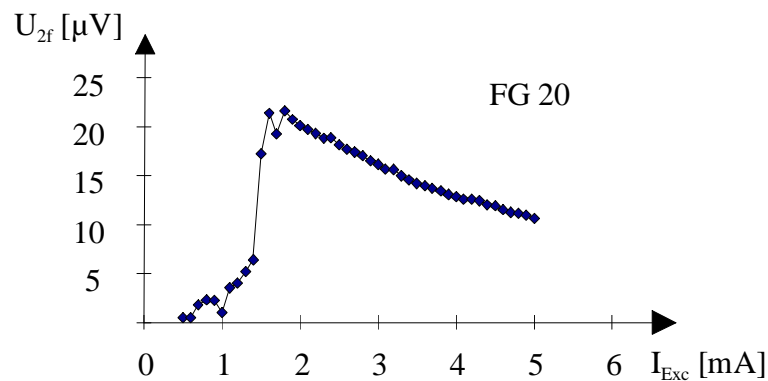


Abb. 4.39 : Arbeitspunktkennlinie V1257/12 Chip 33

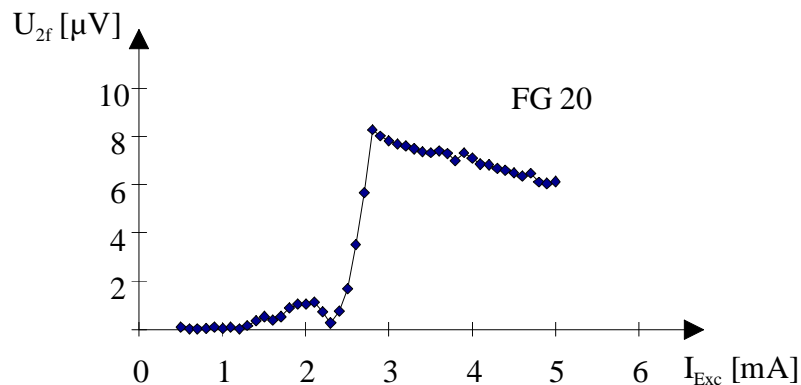


Abb. 4.40 : Arbeitspunktkennlinie V1257/18 Chip 33

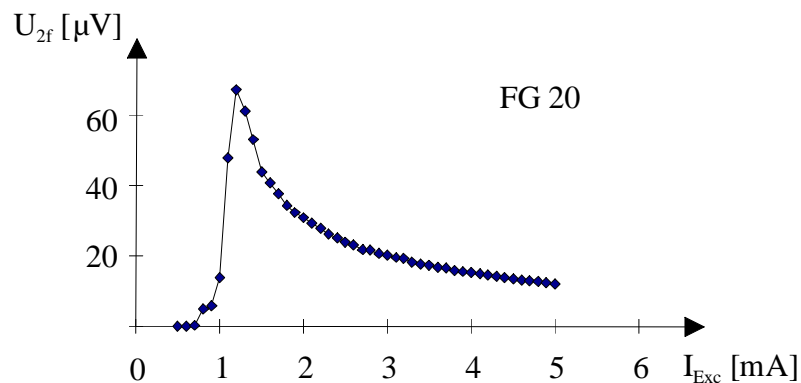


Abb. 4.41 : Arbeitspunktkennlinie V1257/24 Chip 33

Das beste Verhalten, das heißt einen Anregungsstrom im Maximum von $I_{\text{Exc, max}} = 1.2 \text{ mA}$ bei einem Signal von $U_{2f} = 67 \text{ µV}$, zeigt der Sensor von Wafer 24. Der ebenfalls aus Legierung I

gefertigte Sensor von Wafer 12 weist mit $I_{Exc, max} = 1.7 \text{ mA}$ bei einem Signal von $U_{2f} = 22 \mu\text{V}$ bereits deutlich schlechtere Eigenschaften auf. Betrachtet man dazu Abb. 4.12 in Kapitel 4.2., so kann man diese Verschlechterung auf die dünnere Ta-Schicht zurückführen, die offenbar noch keine vollständige Passivierung des Sensorkerns gegen das umschließende Oxid bildet - der Kern wird magnetisch härter. Die schlechtesten Parameter hat mit $I_{Exc, max} = 2.8 \text{ mA}$ bei einem Signal von $U_{2f} = 8.3 \mu\text{V}$ der Sensor von Wafer 18. Dies ist hier in erster Linie auf die Verwendung von Legierung II als Kernmaterial zurückzuführen, die entsprechend Abb. 1.2 deutlich schlechtere magnetische Eigenschaften besitzt. Die Resultate bestätigen die Formeln (4.34) und (4.35). Entsprechend ist das Maximum proportional zu H_K und die Amplitude umgekehrt proportional zu H_K . Demnach eignet sich die Arbeitspunktkennlinie besonders zum Monitoring der magnetischen Schichteigenschaften.

Das folgende Bild zeigt den Trend von $I_{Exc, max}$ über den Wafer für V3040/10. Die Ströme $I_{Exc, max}$ der mit \downarrow gekennzeichneten Chips liegen außerhalb der Limits und sind vermutlich defekt.

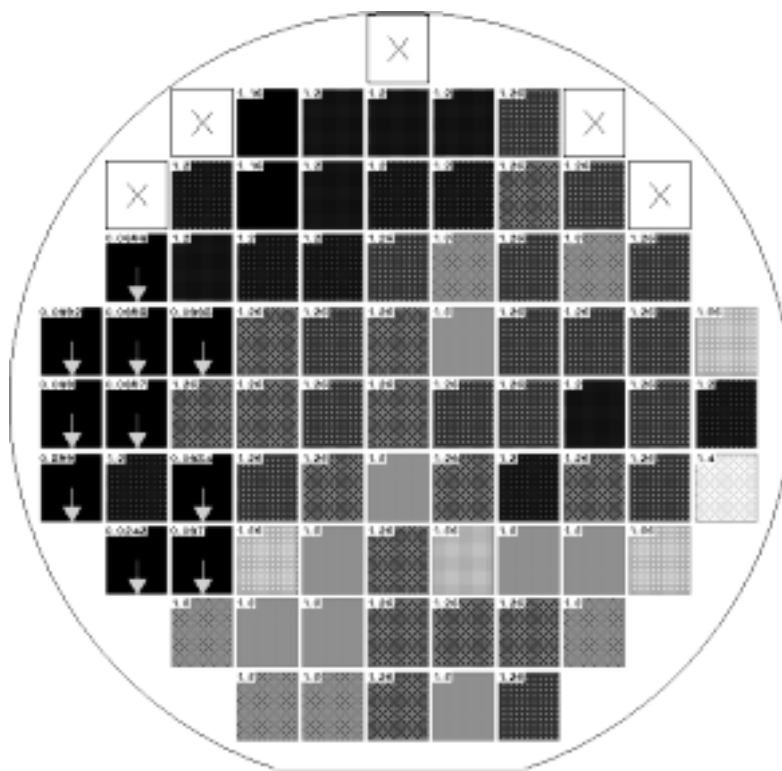


Abb. 4.42 : Wafermap $I_{Exc, Max}$ der Arbeitspunktkennlinie V3040/10 Subchip 2 (FG20X)

Es handelt sich dabei um einen Wafer, der keiner Magnetfeldtemperatur unterzogen wurde. Die inhomogene Verteilung unterstützt das bereits bei den magnetooptischen Messungen gewonnene Ergebnis, daß die verwendete Aufdampfanlage ohne nachfolgende Magnetfeldtemperatur zu einer bezüglich der magnetischen Eigenschaften inhomogenen Schicht mit zufällig eingestellten Anisotropien führt.

4.4.4. Die Kompensationskennlinie

Die bereits bei der Arbeitspunktkennlinie vorgeschlagene Felderzeugung kann auch für die Aufnahme der Empfindlichkeitskennlinie verwendet werden. Allerdings muß nun die mit der Feldstärke veränderliche Gegeninduktivität der Kompensationsspule entsprechend Abb. 2.12 berücksichtigt werden. Es kommt, abhängig von der Spulenkonfiguration, zur Faltung der Gegeninduktivitätskennlinie mit der Empfindlichkeitskennlinie.

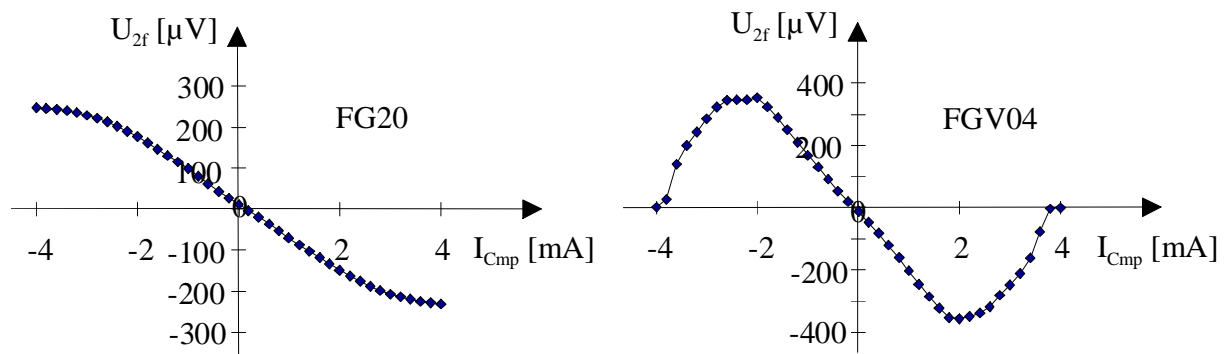


Abb. 4.43: Vergleich Kompensationskennlinie FG20 und FGV04 (vgl. Abb. 2.38) für Los V3040/12 Chip 5

Während die Kompensationskennlinie des bifilaren Sensors die typische Form der Empfindlichkeitskennlinie aufweist, kommt es beim einfachen Sensor zur Sättigung des Kerns unter der Kompensationsspule. Dadurch wird das Maximum der Kennlinie nicht erreicht - die Sensorausgangsspannung bleibt trotz Stromerhöhung in der Kompensationsspule konstant. Damit können für eine derartige Spulenkonfiguration nur die Empfindlichkeit S , nicht aber die anderen Kenngrößen der Empfindlichkeitskennlinie bestimmt werden.

Die Auswertung zu Los V3040 an der bifilaren Struktur führte zu den gleichen Ergebnissen wie bei der Messung der Empfindlichkeitskennlinie. Damit stehen mit Arbeitspunktkennlinie (alternierende Magnetisierung mit Kompensationsspule) und Kompensationskennlinie zwei Verfahren zur Verfügung, die die Charakterisierung der Schichtparameter ohne zusätzliche Magnetisierungseinrichtung an der Probecard gestatten. Das vereinfacht die Anordnung der Strukturen im Testchip und den Parametermeßplatz erheblich, da für diesen nur noch eine Standardnadelkarte mit geschirmten Anschlüssen ohne Magnetisierungseinrichtung notwendig ist und auf eine angepaßte Anordnung von Teststruktur und Kontaktierungspads verzichtet werden kann.

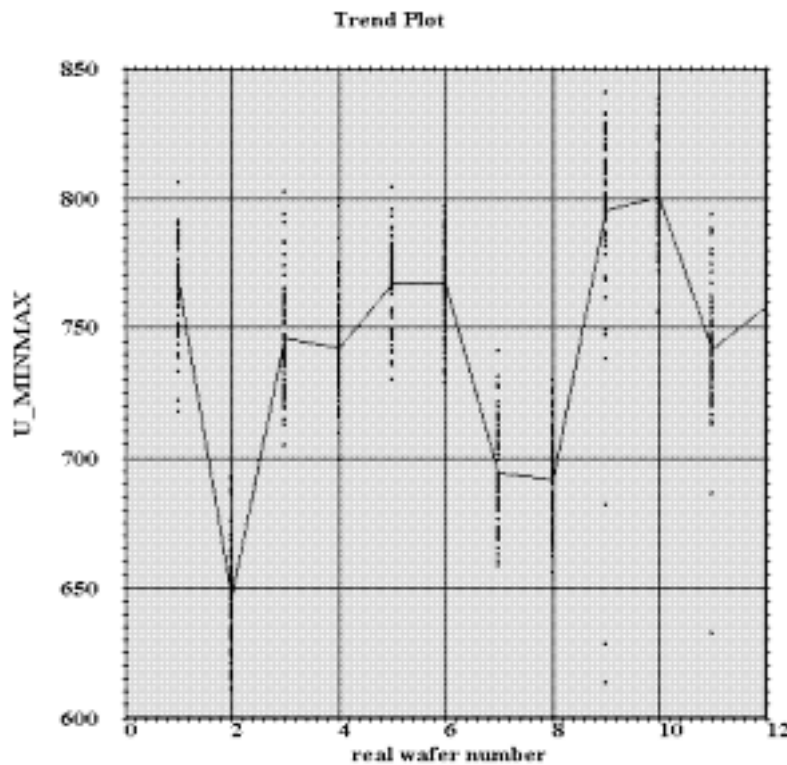


Abb. 4.44: Trend U_{MINMAX} [μV] für Los V3040

4.4.5. Die Sensorkalibrierung auf Wafer Ebene

Eines der Hauptanliegen dieser Arbeit war es, ein Testverfahren für integrierte Sensoren im Waferverbund zu entwickeln. In den vorhergehenden Abschnitten wurde bereits die Magnetisierung der Sensorkerne durch eine stromführende Leiterschleife und die Aufnahme verschiedener Kennlinien zur Charakterisierung der Sensortechnologie an integrierten Spulen auf Wafer Ebene diskutiert. Im folgenden muß nun geklärt werden, ob der Übertragungsfaktor G_H bzw. G_B

$$G_{H,X(Y)} = \frac{U_{\text{OUT},X(Y)}}{H_{X(Y)}} \quad (4.36)$$

$$G_{B,X(Y)} = \frac{U_{\text{OUT},X(Y)}}{B_{X(Y)}} \quad (4.37)$$

des Sensorsystems bereits im Waferverbund zuverlässig bestimmt werden kann und damit eine Sensorkalibrierung auf Wafer Ebene möglich ist. Die Beantwortung dieser Frage für das Sensorsystem würde die Anfertigung einer kostspieligen Probecard für das IC-Testsystem mit einer Leiterschleife zur Magnetisierung der Sensorkerne erfordern. Da in der Entwicklungsphase die Padanordnung des ASIC ständigen Veränderungen unterliegt, wurde auf die Anfertigung einer solchen Probecard verzichtet. Zur Untersuchung wurde daher die in Abb. 4.33 gezeigte

Probekarte mit Manipulatoreinheit für Sensoren ohne ASIC verwendet und damit der Kompensationsfaktor K_S als Schätzwert für K_B des Sensor bestimmt. Die Nachbildung der Funktionalität des ASIC erfolgt dabei durch eine Regelschleife aus Sensor, Lock-in Verstärker und Integrator nach Abb. 4.45.

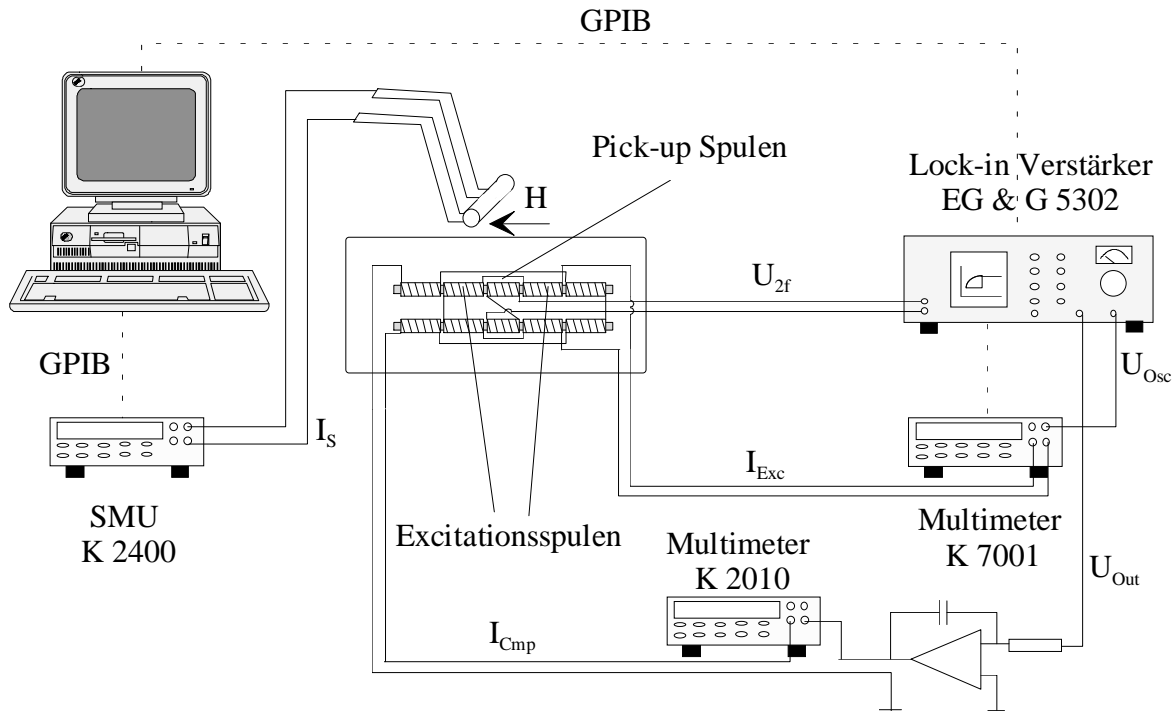


Abb. 4.45: Prinzipschaltung zur Aufnahme der Empfindlichkeitskennlinie

Um einen optimalen Betrieb des Sensors zu gewährleisten, wird vor jeder Messung der Lock-in Verstärker auf die Phasenlage des Sensorausgangssignals abgeglichen.

Im folgenden Bild ist die Kennlinie eines FGV04 und deren Abweichung von der Geradenapproximation dargestellt. Die Abweichungskurve zeigt das für den FGV04 typische Verhalten, es treten keine signifikanten zusätzlichen Störungen auf.

Damit ist mit diesem Verfahren der Funktionstest des Sensorsystems auf Wafer Ebene möglich.

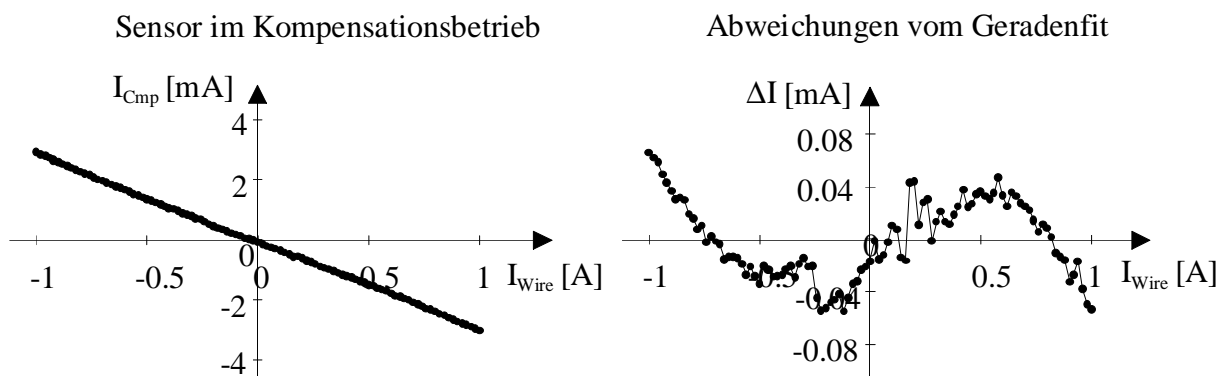


Abb. 4.46: Kennlinie und Abweichung FGV04 auf Wafer Ebene

Die Untersuchungen zur Kalibrierung wurde an Sensoren FGV04 mit den bereits zuvor beschriebenen Unzulänglichkeiten - Nichtlinearitäten und Hysterese - durchgeführt. Dementsprechend ist bei der Berechnung der Kompensationsfaktoren mit Unsicherheiten zu rechnen. Außerdem werden die Materialeigenschaften und damit die Nichtlinearitäten der Kennlinie durch die Temperschritte während des Aufbaus der Sensoren (Bonden und Verkappen) verändert. Trotzdem konnten schon unter diesen Voraussetzungen vielversprechende Ergebnisse erzielt werden.

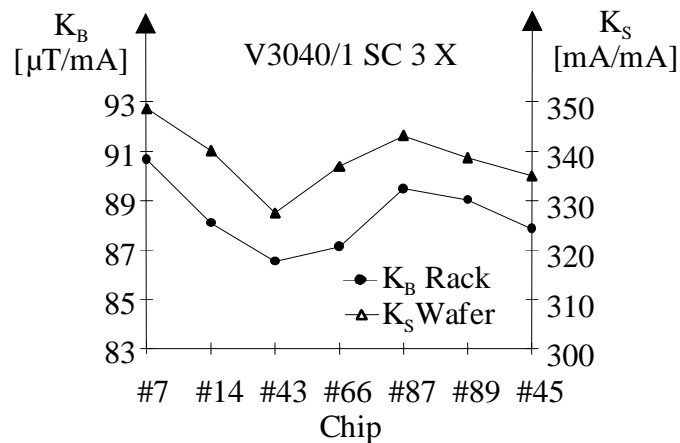


Abb. 4.47: Vergleich Messung Kompensationsfaktor FGV04X auf Baustein- und Waferebene

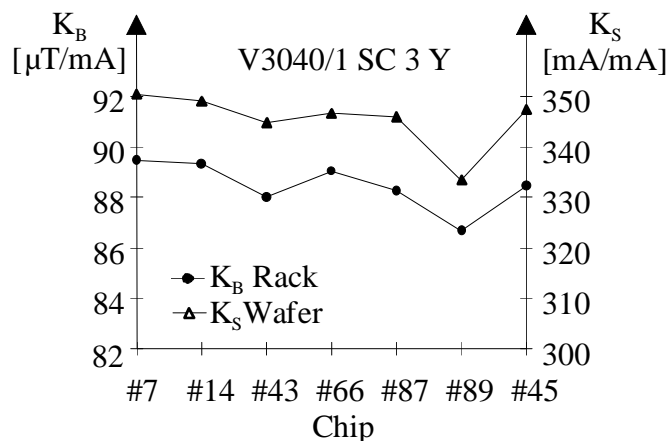


Abb. 4.48: Vergleich Messung Kompensationsfaktor FGV04Y auf Baustein- und Waferebene

Entsprechend Abb. 4.47 und Abb. 4.48 werden die Trends der Kompensationsfaktoren auf Bausteinebene bereits durch die Messung am Sensor im Waferverbund richtig erfaßt. Eine quantitative Aussage über die Güte der Messung des Kompensationsfaktors erlaubt die Berechnung der Schwankung des Verhältnissfaktors V nach (4.24) für die gemessenen Sensoren, der idealerweise eine Konstante ist.

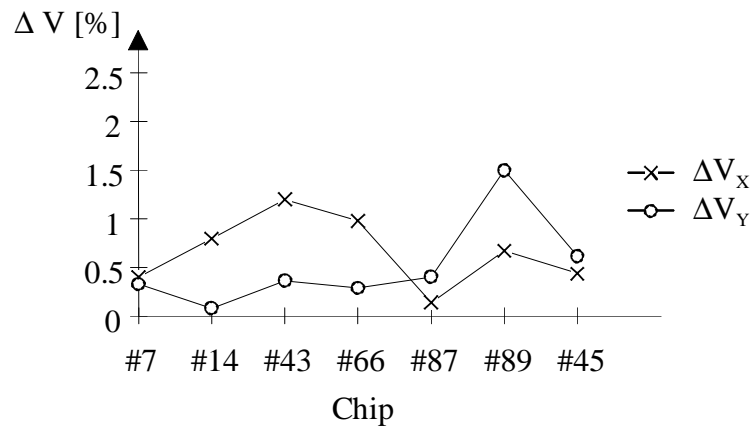


Abb. 4.49: Prozentuale Schwankung V

Abb. 4.49 lässt eine Genauigkeit von 1.5 % erwarten. Zieht man die Unzulänglichkeiten der Sensoren sowie der Probecard mit Manipulator in Betracht, so kann für Sensoren vom trifila- ren Typ FGV11 und einer Probecard mit fixierter Stromschleife eine Genauigkeit von < 1 % erwartet werden.