

4.2. Wafermagnetometer

4.2.1. BH-Tracer

Einfachstes Verfahren zum Messen von Hystereseschleifen ist die induktive Methode /HAE 87/. Dabei wird beispielsweise bei Ringkernen der Kern durch ein sinusförmiges Wechselfeld H_p der Frequenz f periodisch ummagnetisiert, das durch einen sinusförmigen Strom I_p in einer auf dem Kern befindlichen Spule erzeugt wird. Der von einer ebenfalls auf dem Kern sitzenden Spule umfaßte Fluß erzeugt in der Spule nach dem Induktionsgesetz eine Spannung

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot A \frac{dB}{dt} . \quad (4.3)$$

Durch Integration erhält man daraus eine der Induktion B proportionale Spannung.

$$U = \frac{1}{R_I C} \int_0^{t_0} U_{\text{ind}} dt \propto B \quad (4.4)$$

mit
$$R_I \cdot C \gg \frac{1}{f} . \quad (4.5)$$

Zeichnet man diese Spannung über dem der anregenden Feldstärke H_p proportionalen sinusförmigen Anregungsstrom I_p beispielsweise auf einem Oszillographenschirm auf, erhält man die $B(H)$ -Kennlinie des Kernmaterials. Die Anwendung dieses Verfahrens auf weichmagnetische dünne Schichten wirkt zwei Probleme auf.

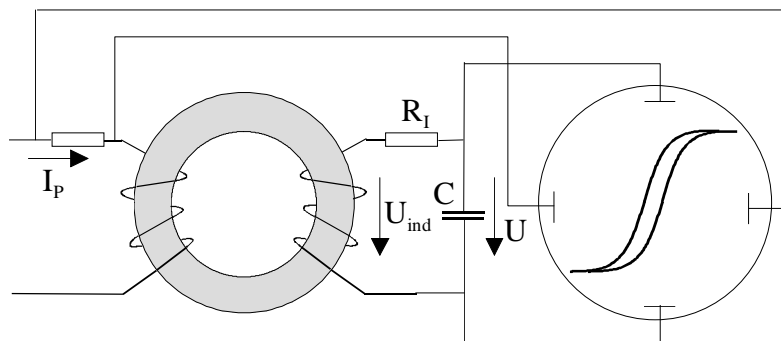


Abb. 4.2: Aufnahme von Hysteresiskurven mit RC-Integration nach /HAE 87/

Die dicht um den Ringkern gewickelte Aufnehmerspule erfaßt ausschließlich den Fluß im Kern. Unter den für die integrierten Spulen verwendeten $0.5 \mu\text{m}$ dicken Permalloy-Filmen befindet sich ein $500 \mu\text{m}$ bzw. $625 \mu\text{m}$ dicker Si-Wafer, der zudem nicht direkt mit einer Spule umwik-

kelt werden kann. Vielmehr kommt durch Verwendung einer Rahmenspule noch mehr nicht zur Schicht gehörender umfaßter magnetischer Fluß hinzu. Abhilfe kann hier durch Verwendung einer sogenannten "figure-8"-Spule entsprechend Abb. 4.3 geschaffen werden. Zur Erzeugung des Erregerfeldes wird eine Helmholtz-Spule von 30 cm Durchmesser verwendet, so daß für beide Teile der "figure-8"-Spule gleiche magnetische Flüsse und ein über die Breite der Spule näherungsweise homogener Feldverlauf gewährleistet werden können.



Abb. 4.3: „figure 8“-Spule für Wafermagnetometer

Der umfaßte resultierende Fluß in den Spulen ist ohne eingesetzte Probe durch die entgegengesetzte Orientierung der Spulenhälften Null. Erst durch die magnetische Polarisierung J

$$J = \mu_0 \cdot (\mu_r - 1) \cdot H \quad (4.6)$$

der Permalloy-Schicht in einer Öffnung der Spule entsteht eine resultierende Spannung U_s , für die jetzt allerdings gilt

$$U = \frac{1}{R_1 C} \int_0^{t_0} U_s dt \propto J. \quad (4.7)$$

Bei einem $\mu_r \approx 10000$ ist der Unterschied zwischen B und J klein und kann gegenüber anderen Fehlerquellen vernachlässigt werden.

Zweites Problem ist die geringe Dicke der Schicht. Daraus resultieren eine geringe Ausgangsspannung und Störungen, die durch die Antennenwirkung der Spule und der Schicht sowie den Barkhausensprünge bei den Ummagnetisierungsvorgängen hervorgerufen werden. Die maximal mögliche Signalspannung bei einem 150 mm - Wafer, 270 Hz Feldfrequenz, 17 Windungen und 1.2 T Sättigungsflußdichte ist $U_s \approx 2,6$ mV, so daß die Auflösungsgrenze einfacher Oszilloskope damit erreicht ist. Außerdem ist mit stark verrauschten Kennlinien zu rechnen.

Abhilfe schafft hier ein Meßverfahren mit phasenabhängiger Gleichrichtung. Das verwendete Verfahren geht auf die Veröffentlichung von F. Gömöry /GOE 91/ sowie H. Jiang und P. Bean /JIA 95/ zurück. Die Probe wird einem alternierenden Feld ausgesetzt, das der Bedingung

$$H(t + T) = -H(t + T / 2) = H(t) \quad (4.8)$$

genügt, also nur ungerade Oberwellen enthält (Halbwellensymmetrie), zum Beispiel eine Sinusfunktion. Außerdem wird eine symmetrische Magnetisierungskennlinie vorausgesetzt, so daß aus (4.8) weiter folgt

$$-M(t + T/2) = M(t) \quad (4.9)$$

$$-B(t + T/2) = B(t). \quad (4.10)$$

In einer die Probe umschließenden Meßspule wird dann eine Spannung erzeugt

$$u_i(t) = \frac{-d\Phi}{dt} = -N \cdot A \cdot \frac{d\bar{B}(t)}{dt} \quad (4.11)$$

und anschließend vom Lock-in Verstärker mit der Schaltfunktion des Phasensensitiven Demodulators (PSD) multipliziert

$$r(t) = \begin{cases} +1 & \text{für } 0 \leq t < T/2 \\ -1 & \text{für } T/2 \leq t < T \end{cases} \quad (4.12)$$

$\bar{B}(t)$ ist dabei die mittlere Flußdichte über den Probenquerschnitt. Der dem PSD folgende Tiefpaß mit einer hinreichend großen Zeitkonstante bildet den zeitlichen Mittelwert S des Produktes $r(t) \cdot u_i(t)$ zu

$$S = \frac{1}{T} \int_0^T u_i(t) \cdot r(t) \cdot dt \quad (4.13)$$

und mit (4.8) erhält man unter der Ausnutzung der Periodizität von $\bar{B}(t)$

$$\begin{aligned} S &= -\frac{1}{T} \int_0^T N \cdot A \cdot \frac{d\bar{B}(t)}{dt} \cdot r(t) \cdot dt = -\frac{1}{T} \cdot N \cdot A \cdot \left[\int_0^{T/2} \frac{d\bar{B}(t)}{dt} \cdot dt - \int_{T/2}^T \frac{d\bar{B}(t)}{dt} \cdot dt \right] \\ &= -\frac{1}{T} \cdot N \cdot A \cdot \left[\int_0^{T/2} d\bar{B}(t) - \int_{T/2}^T d\bar{B}(t) \right] = \\ &= -\frac{1}{T} \cdot N \cdot A \cdot [\bar{B}(T/2) - \bar{B}(0) - \bar{B}(T) + \bar{B}(T/2)] = \\ &= -\frac{2}{T} \cdot N \cdot A \cdot [\bar{B}(T/2) - \bar{B}(0)] \quad . \end{aligned} \quad (4.14)$$

Beachtet man nun noch die vorausgesetzte Symmetrie der Kennlinie nach (4.10), folgt schließlich

$$S = \frac{4}{T} \cdot N \cdot A \cdot \bar{B}(0) \quad (4.15)$$

Setzt man nun allgemein einen PSD mit verschiebbarer Phase an

$$r(t - \tau) = \begin{cases} +1 & \text{für } \tau \leq t < \tau + T/2 \\ -1 & \text{für } \tau + T/2 \leq t < \tau + T \end{cases} \quad (4.16)$$

und führt die Rechnung analog (4.14) durch, erhält man

$$S(\tau) = \frac{4}{T} \cdot N \cdot A \cdot \bar{B}(\tau) . \quad (4.17)$$

Um daraus die Magnetisierungskurve konstruieren zu können, werden die Zeitabhängigkeit und die korrekte Phasenlage für $\tau = 0$ des H-Feldes $H(t)$ benötigt. Abb. 4.4 zeigt das aus diesem Prinzip resultierende Schaltbild.

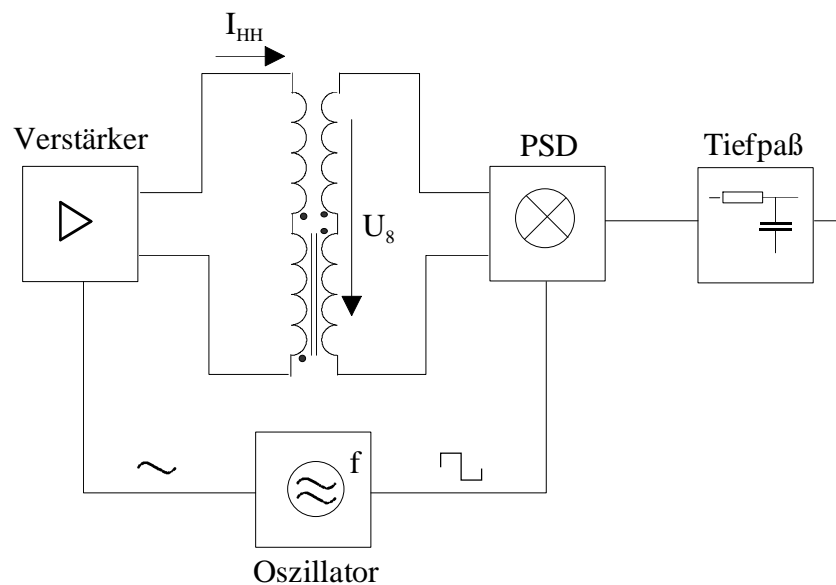


Abb. 4.4: Prinzipschaltbild für Wafermagnetometer

Ausdrücklich ist noch einmal auf die Forderungen bezüglich der Symmetrie entsprechend (4.8) bis (4.10) hinzuweisen, die Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Meßverfahrens sind. Das Verfahren wurde als separater Meßplatz realisiert. Abb. 4.5 zeigt die Skizze des Meßplatzes. Kern ist ein EG&G Lock-in Verstärker 5302. Das Signal des Oszillatorausgangs treibt, von einem Leistungsverstärker LV 103 verstärkt, das Feld in der Helmholtzspule. Der Strom wird mit einem DMM K2001 gemessen. Das Signal der "figure-8"-Spule wird von einem Differential Preamplifier EG&G 5320 verstärkt und durch den PSD des Lock-in Verstärkers phasenabhängig gleichgerichtet. Das Ausgangssignal des Vorverstärkers U_{VV} wird über den Monitorausgang des Lock-in Verstärkers auf einen Oszillographen dargestellt. Damit kann die Symmetrie des Signals (4.8) überprüft werden und die Suche nach der leichten bzw. schweren Achse der Schicht wird erleichtert.

Es werden zwei unterschiedliche "figure-8"-Spulen verwendet. Die erste besitzt eine 3 mm breite Öffnung für zu messende Monitor-Wafer, die nach der Messung nicht mehr in die Prozeßlinie gelangen. Die zweite ist mit einer 2 cm breiten Öffnung versehen, so daß Wafer in Einscheibenbehältern gemessen werden können, die nach der Messung in der Prozeßlinie weiterbearbeitet werden. Der Meßplatz kann damit außerhalb des Reinraumes betrieben werden, ohne daß die Reinraumbedingungen für die Meßobjekte verletzt werden. Nachteil der größeren Spule ist allerdings der schwierigere Symmetrieabgleich im Feld der Helmholtzspule. In der Praxis mußte mit resultierenden Offsets von 0.01 bis 0.02 T gerechnet werden. Die Steuerung des Meßplatzes erfolgt mit dem GPIB-Bus von einem PC aus. Das unter TESTPOINT /TES 95/ erstellte Meßprogramm ermöglicht die Ausgabe eines Meßprotokolls.

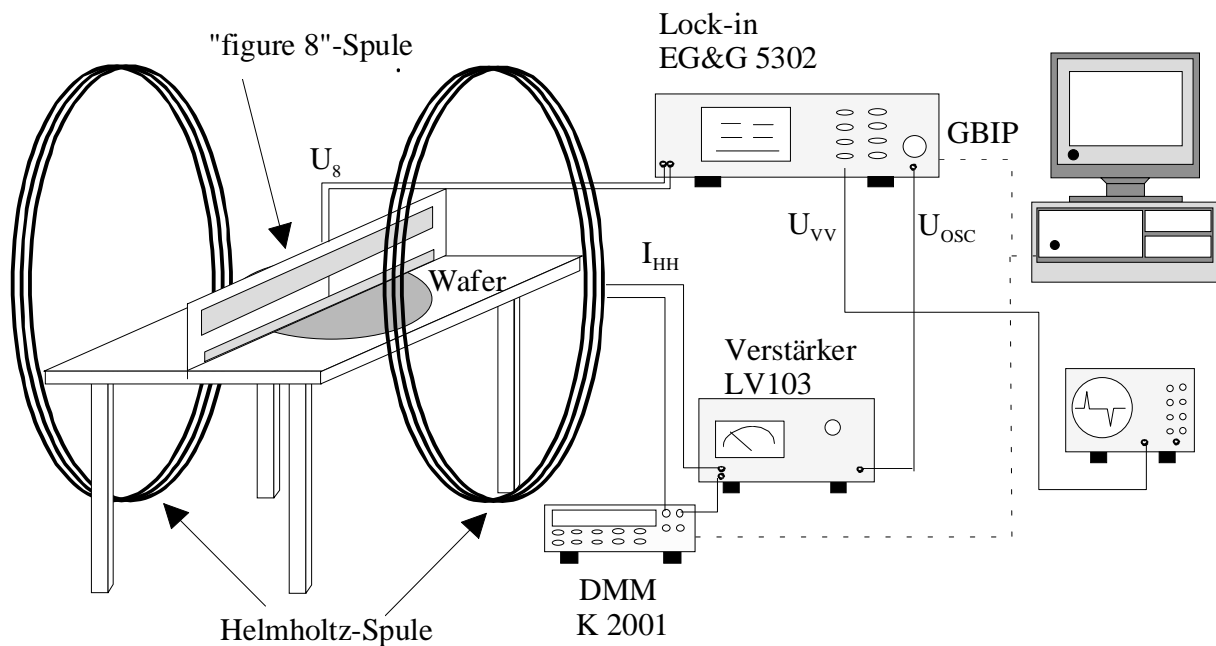


Abb. 4.5: Induktives Wafermagnetometer (BH-Tracer)

Das Verfahren ist ebenfalls als Zusatzoption am nachfolgend beschriebenen Kerr-Effekt-Magnetometer verfügbar.

4.2.2. Kerr-Magnetometer

Das vorher beschriebene Meßverfahren gestattet die dynamische Aufnahme der B(H)-Kennlinie über einen Waferdurchmesser. Eine orts aufgelöste Messung statischer magnetischer Schichtparameter ist mit diesem Verfahren nicht möglich. Ein geeigneter Effekt hierzu ist der in Abschnitt 4.1.2. beschriebene magneto-optische Kerr-Effekt (MOKE).

Die Geräte der kommerziellen Anbieter erwiesen sich wegen der Auslegung für verschiedene Schichten für den bei Permalloy zu messenden äußerst geringen Effekt nur bedingt als geeignet. Durch für die Prototypenentwicklung unnötige Ausstattungen sind die Geräte außerdem sehr kostspielig. Deshalb wurde ein für die Permalloyschichten angepaßter Meßplatz entwickelt. Wichtige Randbedingung dabei war, 150 mm - Wafer zerstörungsfrei messen zu können. Grundlage bildeten dafür die Beschreibung ähnlicher Meßplätze in /GUD 90/, /MIN 92/ und speziell /SCH 95/, an dem auch erste Versuche zur Antestung des Verfahrens erfolgten und dessen Konzept für den aufzubauenden Meßplatz übernommen wurde. Abb. 4.5 zeigt eine Skizze des Meßplatzes.

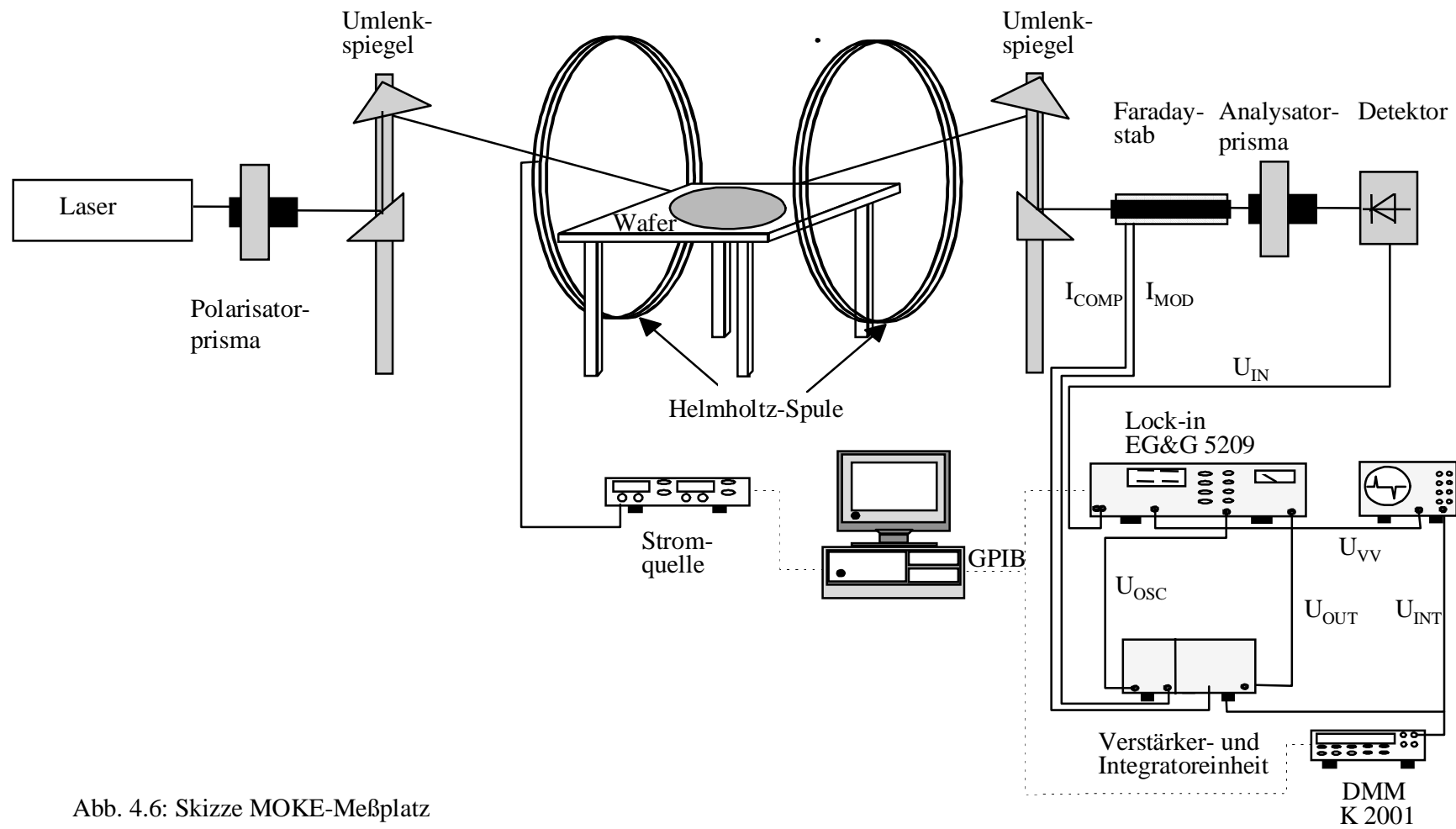


Abb. 4.6: Skizze MOKE-Meßplatz

Die Polarisationssebene des Lichtes des roten Helium-Neon Lasers (632.8 nm, 10 mW, links in Abb. 4.6) wird durch ein Glan-Thompson Prisma (Polarisatorprisma) stabilisiert. Dieser zusätzliche Polarisator ist notwendig, um Einflüsse des Feldes der Helmholtzspulen, die zur Magnetisierung der Probe dienen, auf die Polarisationssebene des Lasers zu unterdrücken. Der zu messende Wafer befindet sich auf einem waagerechten Tisch aus Polycarbonat im Inneren einer Helmholtzspule von 30 cm Durchmesser. Der Tisch verfügt über eine Vakuumhalterung für den Wafer, einen Pinzetteneingriff und eine Aufnahmevorrichtung für die "figure 8"-Spule. Der Laserstrahl wird mittels Umlenkspiegel auf den Tisch und anschließend zur Analysatoreinheit geführt. Alle Teile des Tisches und der Umlenkeinheiten bestehen, soweit möglich, aus nichtmagnetischen Werkstoffen, um parasitäre Effekte des Magnetfeldes auf die Messung zu verhindern. Die Ansteuerung der Helmholtzspulen erfolgt durch einen bipolaren Leistungsverstärker KEPCO BOP 100-4M, der sowohl über die IEEE-Schnittstelle gesteuert Gleichströme für die MOKE-Messung als auch über den Analogeingang gesteuert Wechselströme für die B(H)-Messung treiben kann.

Wichtigstes Element des Meßplatzes ist die Analysatoreinheit. Diese detektiert die durch Wechselwirkung des Laserstrahls mit der magnetisierten Permalloyschicht hervorgerufene Drehung der Polarisationssebene des Strahls. Dazu wird die Polarisationssebene zunächst durch einen Faradaystab mit der Oszillatorfrequenz des Lock-in Verstärkers moduliert. Der Faradaystab aus SF 6 Glas (Verdet-Konstante 0.074 min/(G·cm)) ist 100 mm lang und hat einen Durchmesser von 10 mm. Die um den Stab gewickelte Spule zur Erzeugung des modulierenden Feldes hat 2000 Windungen. Mit der Annahme einer langen Spule erhält man für die Abhängigkeit der Auslenkung ϑ der Polarisationssebene vom in der Spule fließenden Strom I

$$\frac{\vartheta}{I} = 0.322^\circ / \text{A} . \quad (4.18)$$

Die Spannung am Oszillatorausgang (max. 2V) des Lock-in Verstärkers wird zur Ansteuerung der Spule von einer Treiberstufe (Inverter mit OPA 544, Verstärkung 9) verstärkt. Nach dem Faradayglas folgt ein Glan-Thompson Prisma (Analysatorprisma), welches orthogonal zum Polarisatorprisma steht, so daß es ohne Modulation der Polarisationssebene durch den Faradaystab zur Auslöschung käme. Mit der Modulation erhält man am Detektor für den Fall der Auslöschung ein Signal der doppelten Modulationsfrequenz. Wird durch die Magnetisierung die Polarisationssebene des Laserstrahls gedreht, enthält das Detektorsignal zusätzlich eine Komponente mit der Frequenz des Modulationssignals, dessen Amplitude proportional zur Drehung ist. Dieses Signal könnte bereits als zur Kerr-Amplitude proportionale Größe mit dem Lock-in Verstärker gemessen werden. Zur Linearisierung wird die Kerr-Amplitude durch eine ebenfalls auf dem Faradaystab sitzende Spule kompensiert. Dabei bilden der Lock-in Verstärker zur Detektion der 1f-Komponente und ein rauscharmer Integrator (OP 177) mit Leistungsstufe (OPA 544) einen I-Regler. Der Kompensationsstrom, bzw. aus meßtechnischen Gründen die Integratorausgangsspannung, ist nun das Maß für die Kerr-Drehung.

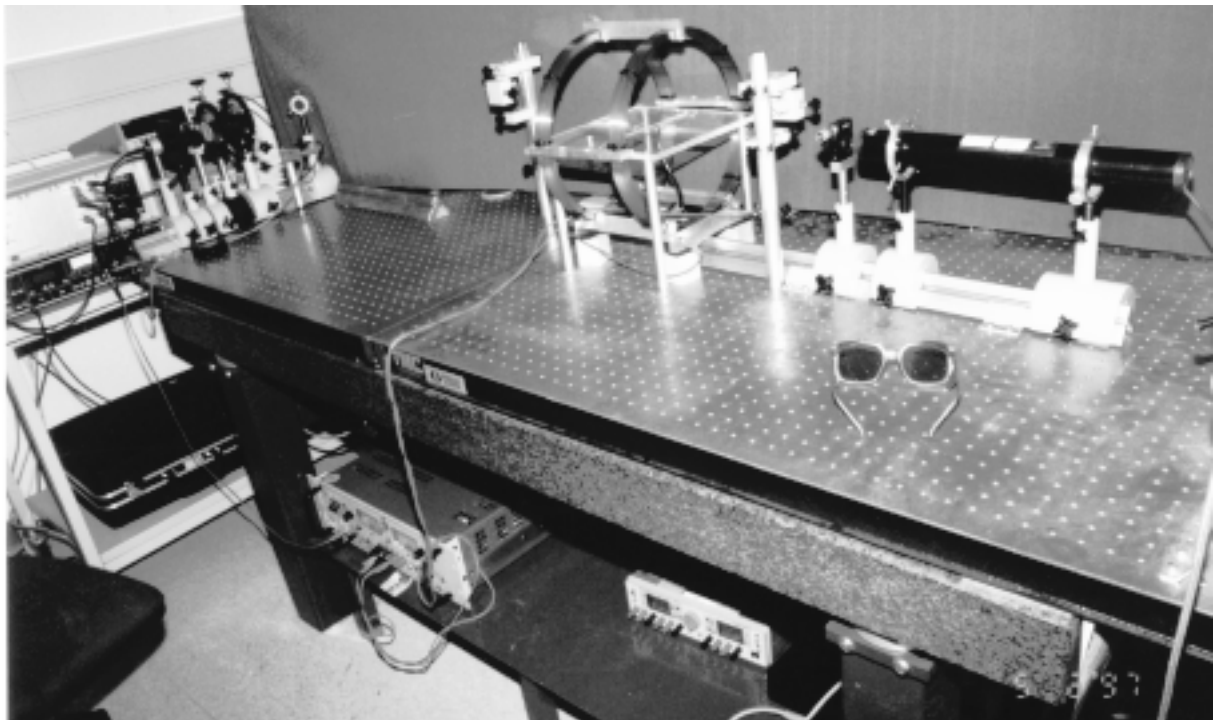


Abb. 4.7: Ansicht MOKE-Meßplatz für Wafer

Mit dem Meßplatz kann eine Auflösung bis zu $1/5000^\circ$ erzielt werden, im Vergleich zu Berichten ähnlicher Meßplätze in /KIM 93/ ($1/100^\circ$) und /SUZ 90/ ($1/10000^\circ$) ein durchaus beachtlicher Wert, der durch die Auslegung der Baugruppen auf die Erfordernisse der kleinen Kerr-Amplituden an weichmagnetischen Schichten möglich wurde. Limitierend ist der derzeitige Aufbau in einem Labor, in dem Störungen der Messungen durch andere Meßplätze und Geräte erfolgen können.

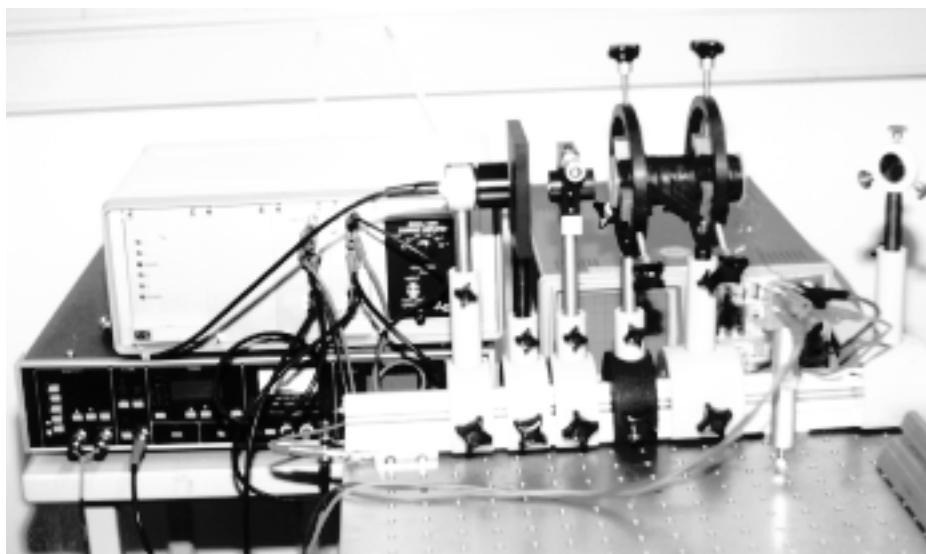


Abb. 4.8: Ansicht Analysator mit Lock-in Verstärker, Kontrolloszilloskop sowie Verstärker- und Integriereinheit

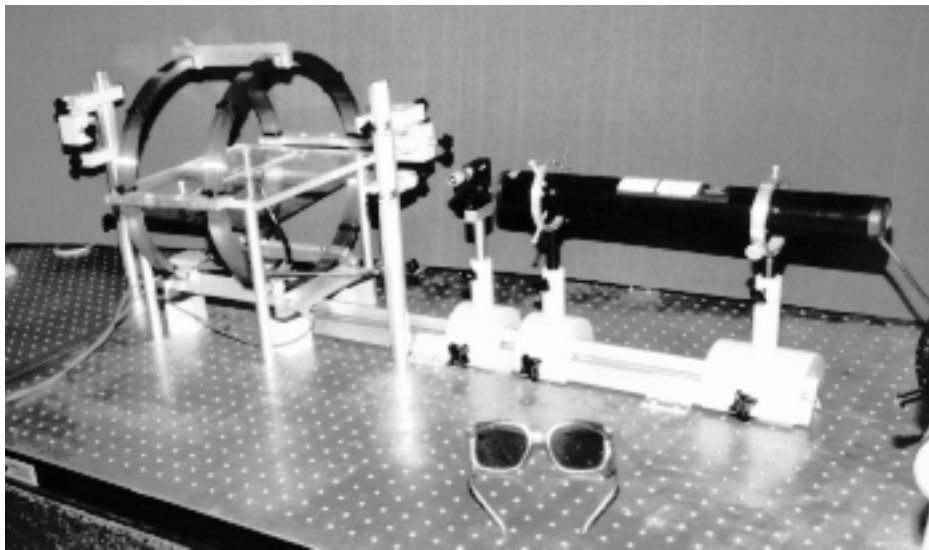


Abb. 4.9: Ansicht Wafertisch mit Umlenkspiegeln, Polarisator und Laser

Dieser Meßplatz ist wieder über IEEE-GBIP-Bus von einem PC-Programm steuerbar und es werden automatisch Meßprotokolle generiert.

4.2.3. Ergebnisse

Neben der Kontrolle der Schichtparameter während der Versuchschargenfertigung wurden die Meßplätze auch zu grundlegenden Untersuchungen an den ferromagnetischen Schichten eingesetzt.

Für das Sensorverhalten hinsichtlich Temperaturänderungen ist die Abhängigkeit der magnetischen Schichtparameter von der Temperatur wichtig. Die Aufnahme der Hystereseschleifen im Klimaschrank kann zweckmäßigerweise mit dem BH-Tracer und der "figure-8"-Spule für die Einscheibenbehälter durchgeführt werden, so daß der Wafer während der Messung bei unterschiedlichen Temperaturen gegen Betauung geschützt ist.

Die Messung wurde mit der Orientierung des Magnetfeldes senkrecht zur Fase (A) und parallel zur Fase (B) durchgeführt. Der Temperaturgang der Sättigungsinduktion B_s entspricht in beiden Ausrichtungen A und B dem aus dem Curiegesetz folgenden Verlauf. Interessant sind außerdem die Abhängigkeiten der Koerzitivfeldstärke H_C und der Anisotropiefeldstärke H_K von der Temperatur. Wie die Sättigungsflußdichte zeigt auch die Koerzitivfeldstärke H_C für beide Ausrichtungen A und B den gleichen Verlauf über der Temperatur. Wafer D34 ist ein Dummy-Wafer des Loses V3040.

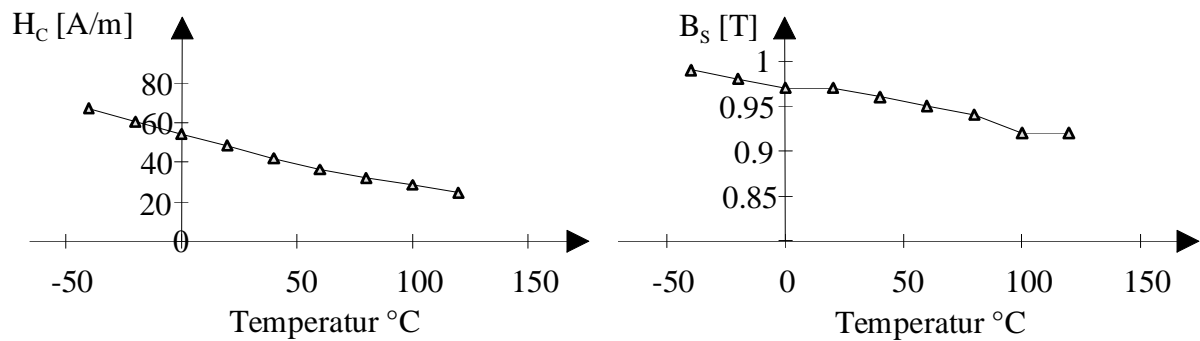


Abb. 4.10: Temperaturabhängigkeit H_c und B_s (Wafer D34)

Im Gegensatz dazu wurden für die Anisotropiefeldstärke in Abhängigkeit von der Ausrichtung des Wafers zum Feld unterschiedliche Trends gemessen (A bedeutet Fase senkrecht zum Feld, B parallel).

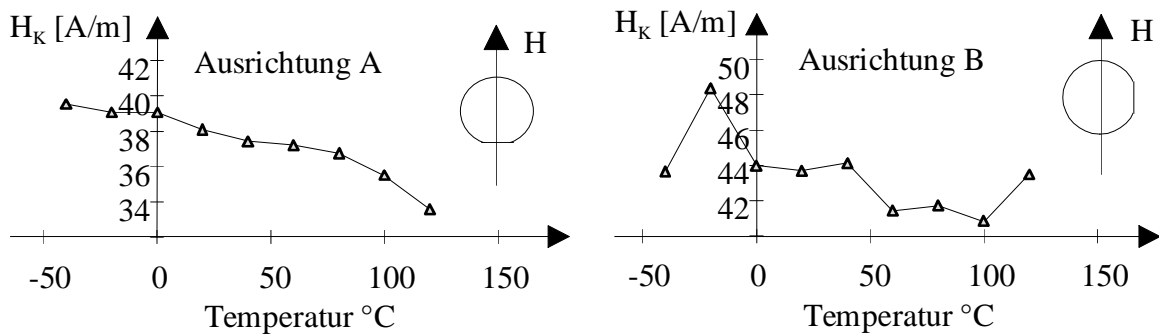


Abb. 4.11: Temperaturabhängigkeit H_k (Wafer D34)

Die Permalloyschichten sind zwischen den Metallebenen von Isolatorschichten (SiO_2 oder Si_3N_4) eingeschlossen. Zur Verbesserung der Eigenschaften des Schichtstapels werden noch Schwermetalle wie Ta oder Mo als Zwischenschicht vorgeschlagen /KIT 84/, so daß folgende Schichtstapel interessant sind (Versuch V3097):

Wafer	Schichtsystem
1	$SiO_2 / 20 \text{ nm Ta} / 460 \text{ nm NiFe} / 20 \text{ nm Ta} / SiO_2$
2	$SiO_2 / 20 \text{ nm Mo} / 460 \text{ nm NiFe} / 20 \text{ nm Mo} / SiO_2$
3	$SiO_2 / 460 \text{ nm NiFe} / SiO_2$
4	$Si_3N_4 / 20 \text{ nm Ta} / 460 \text{ nm NiFe} / 20 \text{ nm Ta} / Si_3N_4$
5	$Si_3N_4 / 20 \text{ nm Mo} / 460 \text{ nm NiFe} / 20 \text{ nm Mo} / Si_3N_4$
6	$Si_3N_4 / 460 \text{ nm NiFe} / Si_3N_4$

Tab. 4.1: Versuch zum Schichtsystem

Kriterium für die Auswahl ist die Beständigkeit der magnetischen Eigenschaften des Schichtsystems gegenüber den thermischen Belastungen der der Schichtabscheidung folgenden Pro-

zeßschritte. Die Untersuchungen wurden an Wafern mit ganzflächig abgeschiedenen Schichten auf 150 mm - Wafern durchgeführt. Diese wurden jeweils nach der Schichtabscheidung, nach dem Abscheiden der Deckschicht (PE-CVD) sowie einer 400°C H₂-Temperung und einer 440°C Temperung untersucht. Beide Temperschritte sind Standardschritte am Ende der IMS-CMOS-Technologie. Da nach den jeweiligen Messungen weitere Prozeßschritte erfolgten, wurden die Messungen im Einscheibenbehälter mit dem BH-Tracer durchgeführt.

Die folgende Grafik zeigt, daß die Kapselung des Permalloy mit einer Mo-Schicht zu stabilen magnetischen Eigenschaften führt. Zur Bewertung wurde die Summe H_{SAT} aus H_C und H_K gemittelt über zwei orthogonale Richtungen verwendet, um den Einfluß von Anisotropien zu unterdrücken.

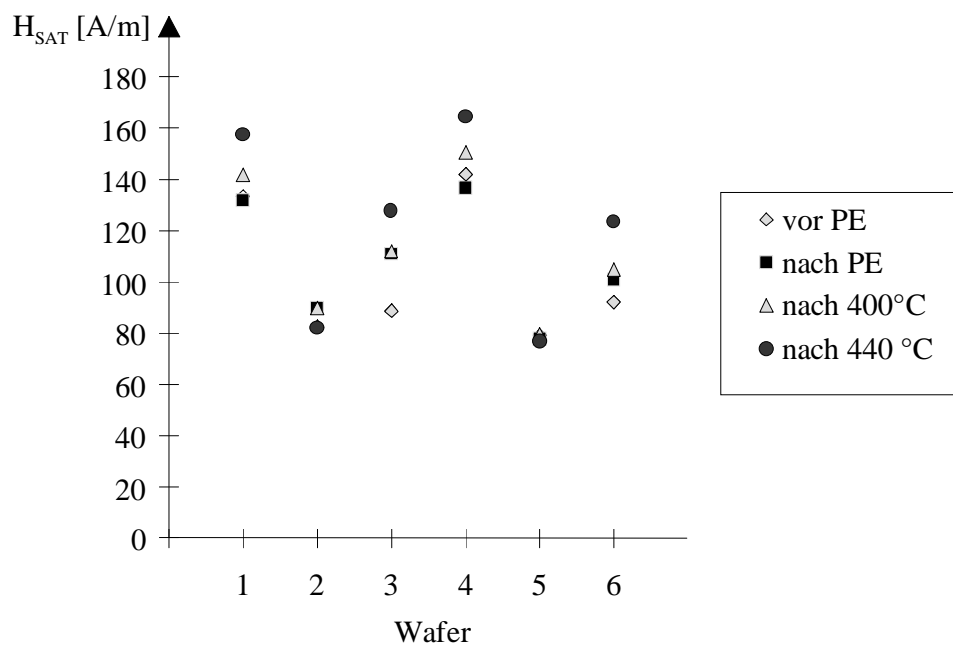


Abb. 4.12: Änderung von H_{SAT} bei PE-CVD und Temperungen (V3097)

In Kapitel 3 wurden die aus der Schichtabscheidung resultierenden Anisotropien als mögliche Ursache für das noch unbefriedigende Auflösungsverhalten des Sensors angeführt. Eine vollständige Neueinstellung der Anisotropien ist nur durch eine Temperung über T_C möglich. Temperschritte über 450 °C sind hinsichtlich der integrierten Sensorelektronik kritisch. Allerdings kann auch durch Temperungen unter T_C die Einstellung von Anisotropien entsprechend /MCC 94/ erfolgen. Die Temperungen erfolgten bei 330°C. Die folgenden Abbildungen zeigen die mit dem BH-Tracer gemessenen Hysteresekurven vor und nach der Temperung.

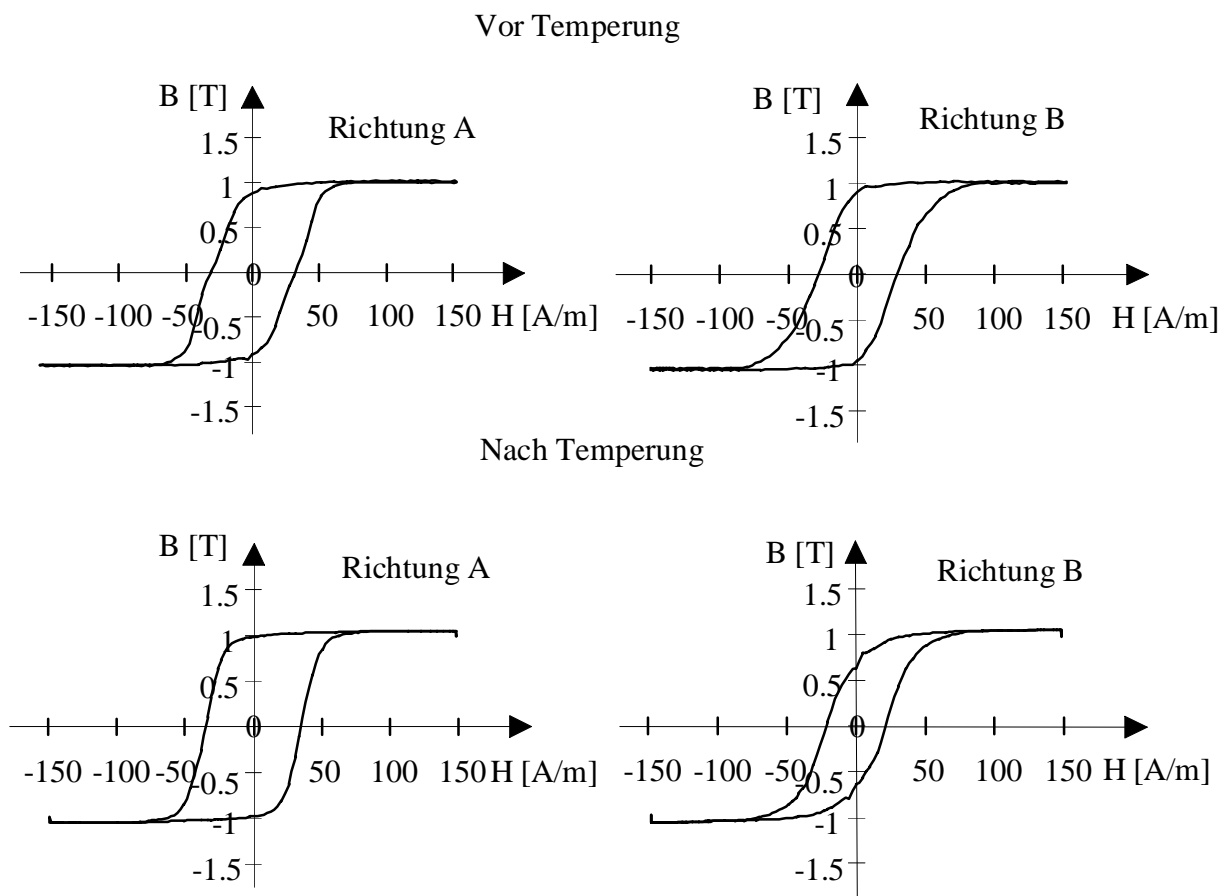


Abb. 4.13: Einstellung der Vorzugsachse mittels Magnetfeldtemperung (V3097/18)

Offenbar kann auch eine Temperung unter T_C zur Einstellung einer definierten Anisotropie führen. Nach der Temperung erfolgte außerdem noch die Messung am MOKE-Meßplatz, die das Resultat bestätigt.

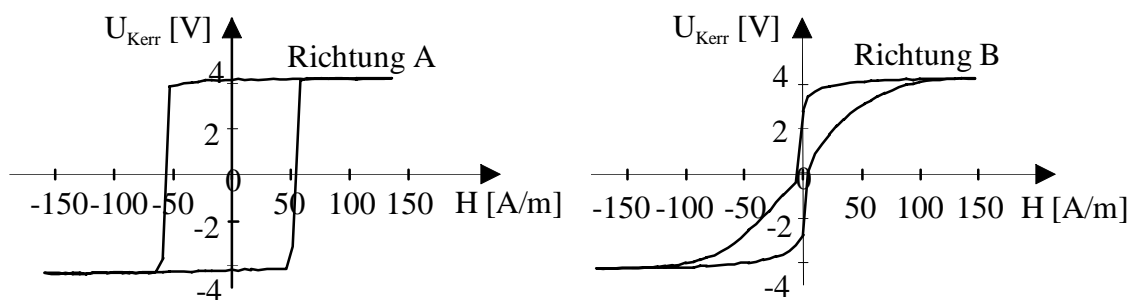


Abb. 4.14: Einstellung der Vorzugsachse mittels Magnetfeldtemperung (V3097/18)

Diese Messungen zeigen die prinzipielle Möglichkeit einer Einstellung der induzierten Anisotropie unterhalb T_C , allerdings sind weitere Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Formanisotropie der strukturierten Kerne notwendig, da eine Temperung vor dem Opferschichtverfahren bezüglich des Verhaltens der Al-Opferschicht und der Prozeßintegration insgesamt kritisch ist.