

3.2. Domänenausbildung und Domänenwandbewegungen in planaren ferromagnetischen Kernen

3.2.1 Theoretischer Zugang

Wie schon in Abschnitt 2.4. erläutert, erfolgt in ferromagnetischen Körpern aus energetischen Gründen die Ausbildung von magnetischen Domänen unterschiedlicher Magnetisierungsrichtung. Die Art der Domänenausbildung hängt von den magnetischen Eigenschaften und von der Geometrie des Körpers ab. In zahlreichen Veröffentlichungen (z.B. /SMI 91/) wird versucht, Domänenkonfigurationen zu berechnen. Die folgenden Untersuchungen haben allerdings gezeigt, daß in ein und demselben Kern der hier verwendeten Geometrien neben der berechneten (Ideal)-Konfiguration unterschiedliche andere (metastabile) Konfigurationen beobachtet werden können. Daher wurde der Wert solcher Rechnungen für die Sensorentwicklung beim gegenwärtigen Stand als eher gering eingeschätzt.

Zwischen den Domänen befinden sich sogenannte Blochwände, innerhalb derer sich der Magnetisierungsvektor von der Orientierung einer Domäne zur Orientierung der Nachbardomäne dreht. Die Drehebene des Magnetisierungsvektors steht dabei senkrecht zur Schicht. Die Dicke einer solchen Blochwand läßt sich nach /HAE 87/, /MCC 94/ berechnen zu

$$\gamma_w = 4 \cdot \sqrt{\frac{A}{K_1}} = 4 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T_C}{a \cdot K_1}} \quad (3.12)$$

mit dem lokalen magnetischen Austauschenergieparameter

$$A = \frac{k \cdot T_C}{a} \quad (3.13)$$

In dünnen Schichten kann es außerdem zur Ausbildung von Neelwänden kommen. Die Drehebene des Magnetisierungsvektors liegt dabei in der Schicht. Speziell für Permalloy kann in Abhängigkeit von der Schichtdicke d_{NiFe} mit folgenden Wandtypen gerechnet werden /HUB 98/:

$d_{\text{NiFe}} < 30 \text{ nm}$:	symmetrische Neelwand
$30 \text{ nm} < d_{\text{NiFe}} < 100 \text{ nm}$:	Stachelwand (besteht aus 90°-Neelwänden)
$d_{\text{NiFe}} > 100 \text{ nm}$:	asymmetrische Blochwand

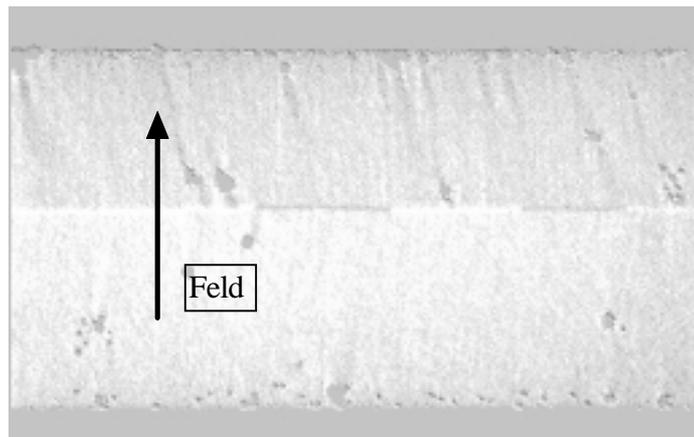


Abb. 3.6: Blochwand in Kernmitte, Kernbreite $100\mu\text{m}$, Kerndicke 460 nm

Abb. 3.6 zeigt das typische und für Schichtdicken von 460 nm erwartete Bild einer asymmetrischen Blochwand in der Kernmitte mit den typischen Abschnitten unterschiedlicher Magnetisierungsrichtung. Das Bild wurde mit einem Kerr-Mikroskop nach /SCH 90/, das in Kapitel 4.2 beschrieben wird, aufgenommen. Eine ausführliche Darstellung der Theorie, der Untersuchungsmethoden und der zu beobachtenden Wandtypen, speziell auch für die verwendeten Schichten mit $d_{\text{NiFe}} = 460\text{ nm}$, erfolgt in /HUB 98/.

Wird der Körper durch ein äußeres Feld magnetisiert, kommt es zuerst zu reversiblen und anschließend zu irreversiblen Wandverschiebungen. Die Bewegungsgleichung für die Wandverschiebung lautet nach /DOE 48/, /KLA 91/

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + \beta \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\delta\gamma_w(x)}{\delta x} = 2 \cdot J_s \cdot \sin\phi \cdot H \cdot \cos\theta \quad (3.14)$$

mit der Blochwandmasse m , dem Wirbelstromdämpfungskoeffizienten β , der Änderung der lokalen Sättigungspolarisation $2 \cdot J_s \cdot \sin\phi$ beim Passieren einer Wand mit dem Wandwinkel 2ϕ (180° Blochwand $\phi = 90^\circ$), und der Komponente des angelegten Feldes H in Wandrichtung $H \cdot \cos\theta$, sowie der ortsabhängigen spezifischen Blochwandenergie $\gamma_w(x)$. Für den idealen Kristall ist diese ortsunabhängig:

$$\gamma_w = 4 \cdot \sqrt{A \cdot K_1} = 4 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T_C \cdot K_1}{a}} \quad (3.15)$$

Im realen Kristall ist, bedingt durch Störungen, Verunreinigungen, Oberflächeneffekte usw., mit Variationen der Kristallanisotropiekonstante K_1 und dem magnetischen Austauschenergieparameter A zu rechnen. Daraus resultiert ein ortsabhängiger Verlauf der spezifischen Blochwandenergie entsprechend Abb. 3.7.

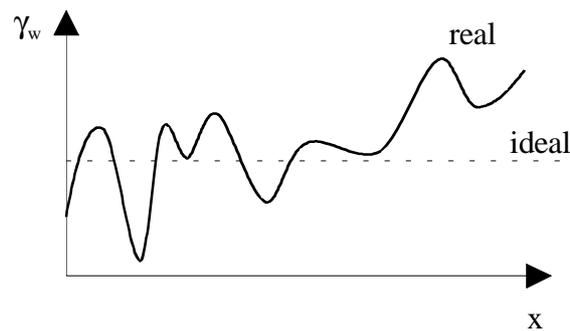


Abb. 3.7: Ortsabhängiger Verlauf der spezifischen Blochwandenergie $\gamma_w(x)$ ideal und real (schematische Darstellung) /HAE 87/

Im Folgenden sollen die Domänenkonfigurationen, die daraus resultierenden Blochwandbewegungen bei Feldänderungen und die Konsequenzen für die Sensorauflösung gezeigt werden.

3.2.2 Kerr - Mikroskopische Untersuchungen

Die Untersuchungen erfolgten mit dem in /SCH 90/ beschriebenen Kerrmikroskop am IFW Dresden. Eine Beschreibung des magnetooptischen Kerr-Effektes (MOKE) und ein Übersichtsbild des Gerätes finden sich in Kapitel 4.1.2.

Zuerst wurden unstrukturierte Schichten untersucht. Die folgenden Bilder (Abb. 3.8) zeigen die Ausbildung sehr großer Domänen bei Magnetisierung in Richtung der leichten Achse und das Entstehen streifenförmiger Domänenkeime bei Magnetisierung in Richtung der schweren Achse (die Probe wurde in Abb. 3.8 b) gedreht) im Idealfall mit Einstellung der induzierten Anisotropie durch ein bei der Schichtabscheidung angelegtes Magnetfeld.

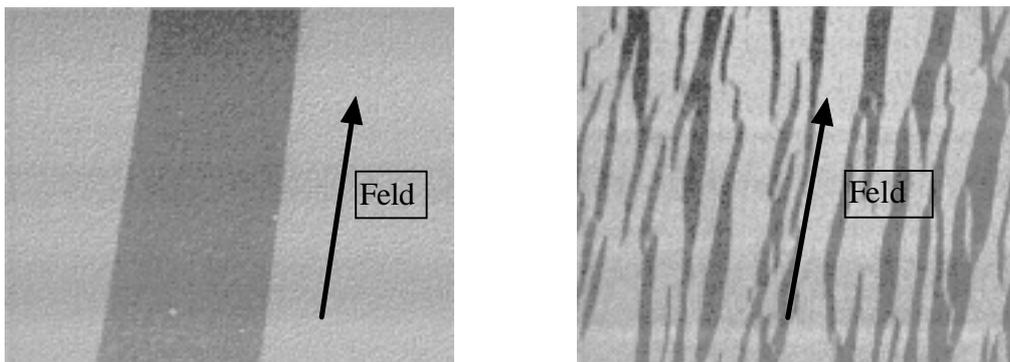


Abb. 3.8: a) leichte Achse

b) schwere Achse

Durch die Rotation der in der verwendeten Aufdampfanlage befindlichen Kalotte zur Halterung der Wafer im Erd- oder Anlagenmagnetfeld ist dieser Idealfall nicht gegeben. Zwar ist die typische Ausprägung der leichten Achse in Abb. 3.9 a) erkennbar, orthogonal ergeben sich aber sehr unregelmäßige Domänenkonfigurationen entsprechend Abb. 3.9 b).

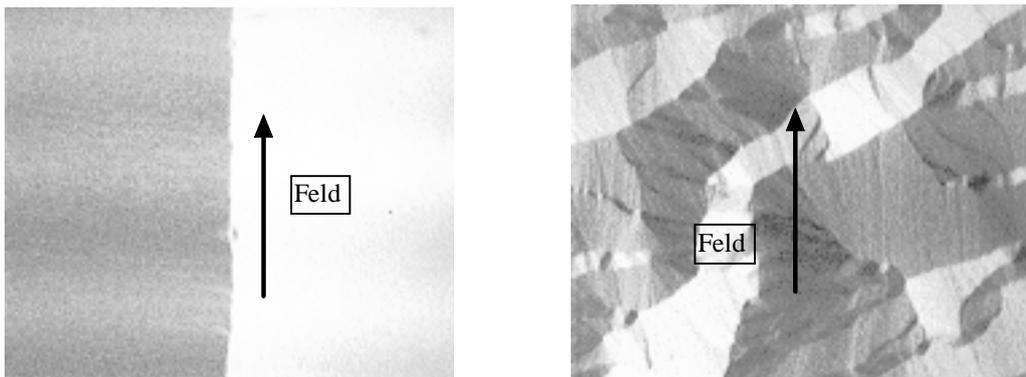


Abb. 3.9: a) leichte Achse

b) schwere Achse

Vermutlich wird durch die bei der Schichtabscheidung erfolgende Rotation im Magnetfeld eine radiale Anisotropie eingepägt. Messungen mit dem MOKE-Meßplatz am IMS und /SCH 95/ bestätigen diese Vermutung. Die Folge sind unterschiedliche, sich nicht definiert einstellende Domänenkonfigurationen. Als ein weiterer die Auflösung begrenzender Effekt ist das "Pinning" einer Domänenwand durch eine Verunreinigung in Abb. 3.10 zu sehen.

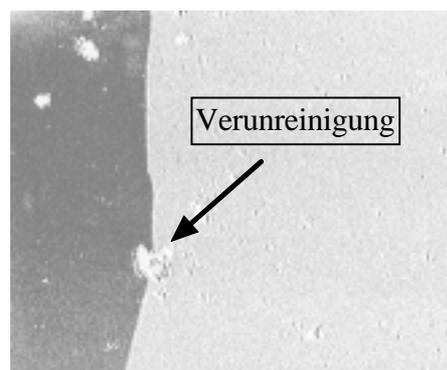


Abb. 3.10: Domänenwand -„Pinning“ an Verunreinigung

Nächster Schritt war die Untersuchung der Domänenausbildung in Kernen ohne integrierte Spulen bei Magnetisierung durch das Meßfeld. Dabei entstehen die Keime für die Domänen an den Kernenden, aus denen sich sehr zufällige Domänenstrukturen entwickeln (Abb. 3.11).



Abb. 3.11: Domänen am Kernende

Für die voll ausgebildeten Domänen wurden unterschiedliche metastabile Zustände beobachtet. Dabei kann es zur Ausbildung von ein oder zwei Blochwänden im Kern kommen, wie in den

folgenden Abbildungen (Abb. 3.12) zu sehen ist. Teilweise enden die Blochwände auch an den Kernrändern.

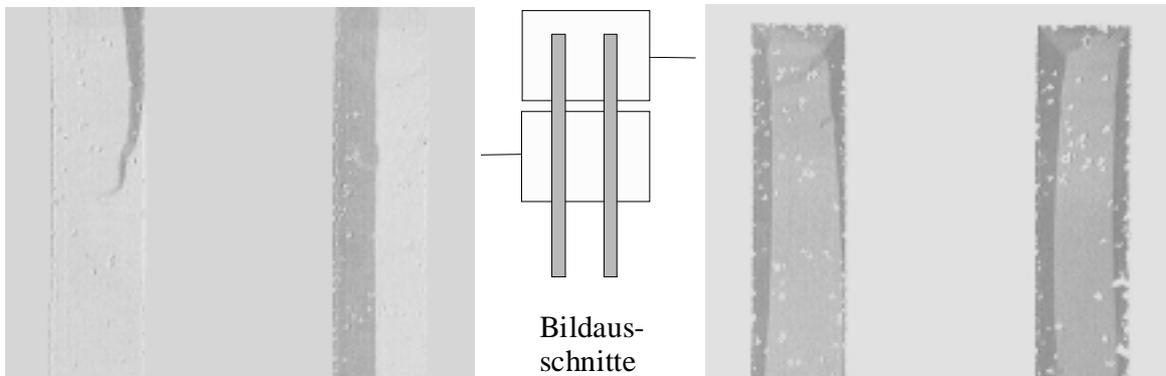


Abb. 3.12: Domänen im Kern bei Nullfeld und ohne integrierte Spulen

Zur Untersuchung der Domänenausbildung bei Magnetisierung mit den integrierten Spulen wurde jeweils nur eine der drei Spulen des Sensors am Kern angebracht, so daß die anderen Kerngebiete mit dem Kerrmikroskop untersucht werden können. Abb. 3.13 zeigt die typische Konfiguration am Kernende nach Wechselfeldmagnetisierung im Bereich der Kompensationsspule.

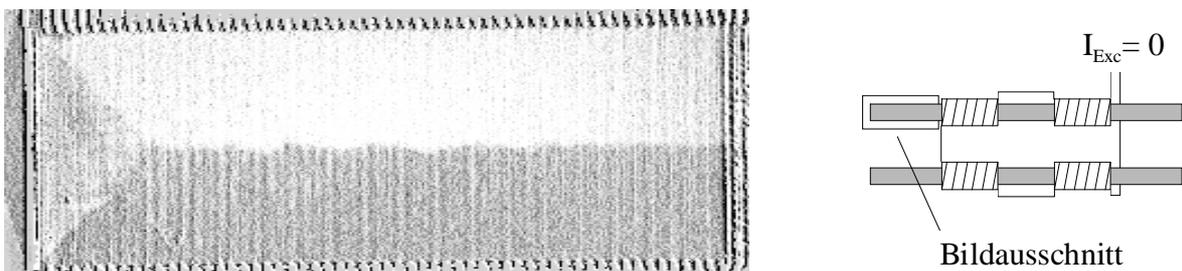


Abb. 3.13: Domänenkonfiguration am Kernende

Die Abb. 3.14 und Abb. 3.15 zeigen die Auslenkung der Domänenwand durch einen Gleichstrom und durch einen Wechselstrom in der Anregungsspule zum Kernende hin.

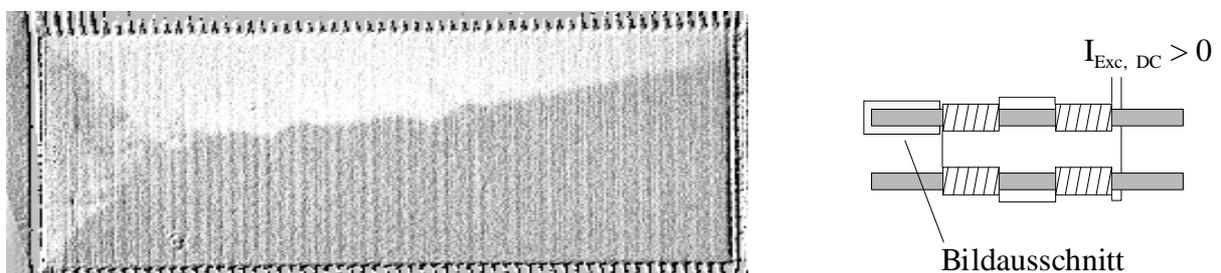


Abb. 3.14: Blochwandverschiebung durch DC-Feld der Anregungsspule

Zur Analyse des Verhaltens bei Wechselfeldauslenkung wurden die Möglichkeiten der digitalen Bildverarbeitung am Kerr-Mikroskop des IFW genutzt. Zunächst wurde ein Domänenzustand mit einer Blochwand in der Kernmitte als Referenzbild (wie Abb. 3.13) aufgenommen. Dieses Bild wurde vom Bild bei anliegendem Wechselstrom subtrahiert. Im Differenzbild sieht man die Wandverschiebungen (helle und dunkle Bereiche gegenüber dem Hintergrund) und erkennt die verschiedenen Wandamplituden. Abb. 3.15 zeigt, wie durch die in in Kapitel 2 berechnete

Entmagnetisierung am Ende der Kerne die Auslenkung der Blochwand zum Kernende hin abnimmt.

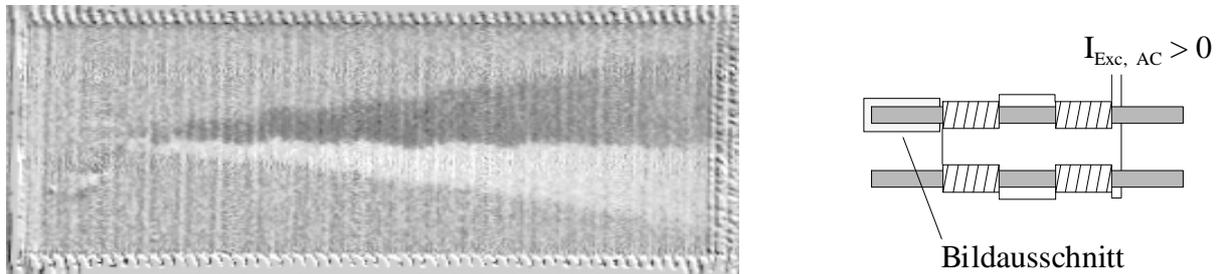


Abb. 3.15: Blochwandverschiebung durch AC-Feld der Anregungsspule

Die Auslenkung durch die Kompensationsspulen in der Kernmitte zeigt, daß auch bei AC-Auslenkung verschiedene Domänenkonfigurationen im Kern möglich sind. In Abb. 3.16 ist die Auslenkung von zwei Blochwänden im Kern durch einen Wechselstrom in der Kompensationsspule zu sehen. Abb. 3.17 zeigt die Auslenkung für nur eine Domänenwand.

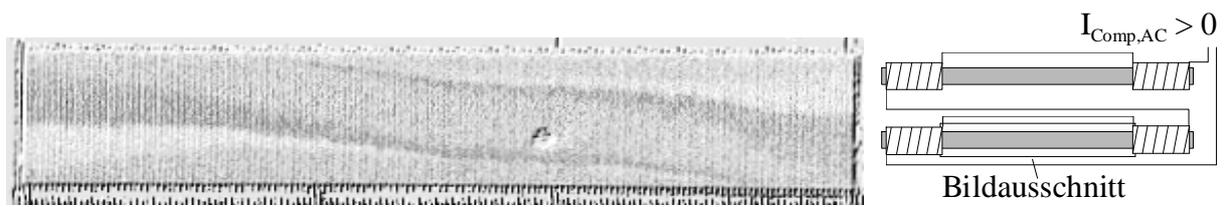


Abb. 3.16: Blochwandverschiebung durch AC-Feld der Kompensationswicklung

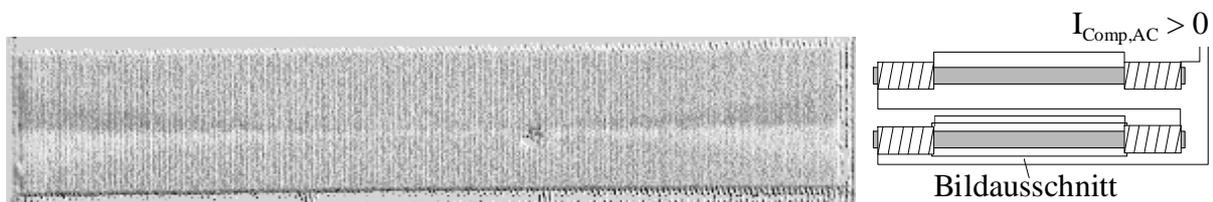


Abb. 3.17: Blochwandverschiebung durch AC-Feld der Kompensationswicklung

Deutlich sichtbar wird in Abb. 3.18 ebenfalls, daß unterhalb der Meßspule zwischen den Anregungsspulen der einfach und bifilar gewickelten Sensoren eine Einschnürung des unmagnetisierten Bereiches erfolgt. Das entpricht wiederum den Feldberechnungen in Kap. 2.5. Auch bei weiterer Erhöhung des Stromes in den Anregungsspulen wird der Bereich zwischen diesen nicht vollständig unmagnetisiert. Folge waren nichtreproduzierbare Abweichungen in den Sensorkennlinien. Abhilfe schaffte hier der trifilare Sensor.

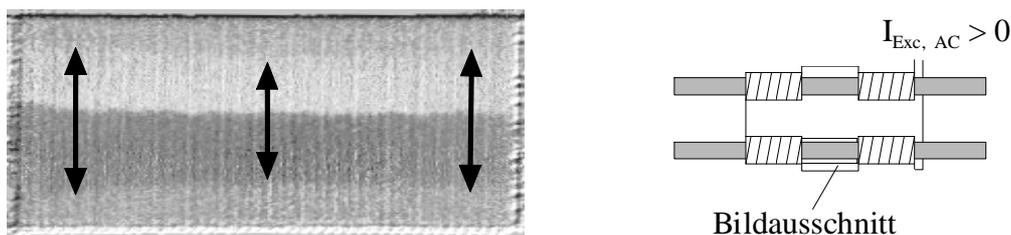


Abb. 3.18: Blochwandverschiebung durch AC-Feld der Anregungswicklung

Wichtigstes Ergebnis ist, daß die Ummagnetisierungsvorgänge durch Bewegung einer oder zweier Blochwände erfolgen, und daß unterschiedliche Domänenkonfigurationen in ein und demselben Kern möglich sind. Die Bewegungen der Domänenwände werden von Verunreinigungen und Inhomogenitäten des Kernmaterials beeinflußt. Bedingt durch die Bauart der Aufdampfanlage muß bei den derzeit verfügbaren Sensoren mit radialen Anisotropien über den Wafer bzw. unbestimmt eingestellten Anisotropien in den Kernen gerechnet werden. Außerdem visualisieren die Untersuchungen am Kerrmikroskop eindrucksvoll die Ergebnisse der Feldberechnungen auf Domänenebene.