

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Doktorarbeit wurde *in situ* mit magnetooptischem SNOM der Streifen-domänenzustand ultradünner Filme von Fe/Cu(100) abgebildet, der nahe dem Spinreorientierungsübergang den thermodynamischen Grundzustand des Systems bildet. Die Streifenbreite ist theoretisch direkt mit dem Sättigungsfeld der zugehörigen Magnetisierungskurve verknüpft. Dies wird hier durch kombinierte SNOM- und MOKE-Messungen erstmals experimentell bestätigt. Zu Beginn dieser Arbeit war noch unklar, ob der Streifen-domänenzustand beim Ummagnetisierungsprozess des Filmes eine Rolle spielen würde. Vorliegende Daten konnten auch mit einer kohärenten Drehung des Magnetisierungsvektors erklärt werden. Erst die Beobachtung einzelner Streifen-domänen im äußeren Magnetfeld, die in dieser Arbeit und kürzlich auch mit SPLEEM am gleichen System erfolgte, zeigt eindeutig, dass sich der Ummagnetisierungsprozess durch eine Anpassung des Domänenmusters an das Magnetfeld organisiert. Damit können die Form der Magnetisierungskurve und Domänenkontraste im Kerr-Mikroskop eindeutig erklärt werden. Die auftretenden Domänenbildungsprozesse weisen eine Analogie zu dem von (viel dickeren) Granatfilmen bekannten Verhalten auf. In theoretischen Publikationen über Streifen-domänen in ultradünnen Filmen findet dies jedoch kaum Erwähnung. Auch bei den Granatfilmen ist nahe dem Sättigungsfeld ein Muster aus Tröpfchendomänen energetisch günstiger als das Streifen-domänenmuster. Der entscheidende Unterschied zwischen beiden Systemen wird erst mit den Resultaten dieser Arbeit klar. Er liegt im lokalen Einfluss von Inhomogenitäten des Substrats (z.B. Polierkratzer) auf die Anisotropien. Anders als bei den Granatfilmen sind solche Inhomogenitäten bei ultradünnen Filmen unvermeidbar, mit zwei Konsequenzen für das Domänenmuster: 1.) Polierkratzer stellen eine bevorzugte „Schiene“ für das Längenwachstum von Streifen-domänen dar und geben damit eine Vorzugsrichtung für die Orientierungsfernordnung der Streifen vor, während bei den Granatfilmen meist Mäanderstrukturen auftreten, denen eine solche Vorzugsrichtung fehlt. 2.) Pinning von Domänenwänden an Polierkratzern ruft eine Positionsfernordnung hervor, die das Auseinanderdriften der Minoritätsstreifen verhindert und damit das Aufreißen von Streifen in der Nähe vom Sättigungsfeld fördert. Dies stellt einen Kanal für die Transformation des Streifen-domänenmusters in eine Tröpfchenphase dar, den es bei den Granatfilmen in dieser Weise nicht gibt.

Das Streifen-domänenmuster ultradünner Filme von Fe/Cu(100) stellt auch künftig einen interessanten Untersuchungsgegenstand dar. Insbesondere ist das Bild vom Übergang des Streifen-domänenmusters in die Sättigung noch nicht vollständig. Na-

he der Spinreorientierung ist neben dem Auftreten der Tröpfchendomänen auch eine kohärente Drehung verkippter magnetischer Momente der Streifen im äußeren Feld ebenso denkbar wie der Kollaps des Streifendomänenmusters, der von den Granatfilmen bekannt ist. Für eine detailliertere Untersuchung sollte man zunächst das Pinning von Domänenwänden unterdrücken. Dazu ist eine höhere Glätte der Filme nötig, die man durch eine große Zahl von *Sputter-Anneal*-Zyklen erreicht. Bisher hindern uns zeitaufwändige Proben transfers und Abpumpverfahren daran. Um den Raum der möglichen Messpunkte eines Experiments um eine variable Schichtdicke zu erweitern, könnten anstelle von Fe-Filmen Fe-Keile aufgedampft werden.

Die Experimente wurden in einer Ultrahochvakuumkammer vorgenommen, die im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wurde und die einen MOKE-Aufbau, ein Kerr-Mikroskop und ein magnetooptisches SNOM kombiniert. Ein SNOM wird damit erstmals im UHV eingesetzt. Es misst hier den Kerr-Effekt mit einem Sagnac-Interferometer, was gegenüber dem konventionellen Aufbau mit gekreuzten Polarisatoren den Vorteil hat, dass ausschließlich magnetooptische Kontraste gemessen werden, nicht aber sonst SNOM-typische Artefakte wie Doppelbrechungseffekte. Das Sagnac-Interferometer liefert simultan zum magnetischen Signal ein Gesamtintensitäts-Signal, das hier für eine optische Abstandskontrolle verwendet wird. Es zeigte sich, dass diese im UHV der konventionellen Scherkraftabstandskontrolle überlegen ist. Das SNOM kann in Anwesenheit äußerer Magnetfelder verwendet werden und hat bei einer Ortsauflösung von 300 nm (kleiner als  $\lambda/2$ ) eine Empfindlichkeit von  $350 \mu\text{rad}$ . Die Abbildung von Domänenmustern in den ultradünnen Fe-Filmen belegt dies. Sie stellt zum ersten Mal eine Anwendung des magnetooptischen SNOM dar, die über die Untersuchung von Testproben mit starken Kerr-Drehungen und vorher bekannten Domänenmustern hinausgeht.

Die Ergebnisse dieser Arbeit erlauben den Versuch, das Sagnac-SNOM in den Kanon der magnetischen Mikroskopiemethoden einzureihen, die in den vergangenen Jahren erhebliche Fortschritte an Leistungsfähigkeit verzeichnen konnten: Spinpolarisiertes STM steigerte die Ortsauflösung bis auf atomare Dimensionen [Bod 03], SEMPA [Ung 00] und MFM [Hug 98] liefern sehr große magnetische Kontraste im Bereich von Ortsauflösungen deutlich unter 100 nm. Nur wenige Methoden vereinen aber hohen magnetischen Kontrast mit der Möglichkeit magnetfeldabhängiger Messungen: Dies erfordert meist besondere Tricks wie die Verwendung einer antiferromagnetischen Spitze im SP-STM [Kub 02] oder die starke räumliche Konzentration des Magnetfelds bei SEMPA [Ste 02]. Auch MFM [Lie 02] und SPLEEM [Pop 02] können unter gewissen Voraussetzungen im äußeren Magnetfeld betrieben werden. Vom Magnetfeld unbeeinflusste Messungen läßt im Prinzip aber nur die Magnetooptik zu. Um von diesem Vorteil profitieren zu können, muss das laterale Auflösungsvermögen des SNOM aber noch erhöht werden. Mit blauem Licht sollte in unserem Aufbau eine Ortsauflösung von 150 nm möglich sein. Weitere Auflösungserhöhung ist bei Verwendung aperturloser Sonden denkbar, wie kürzlich vorgeschlagen wurde [Joh 01]. Alternativ wird für magnetooptische Mikroskopie im äußeren Feld häufig Röntgenstrahlung verwendet, bei magnetischer Transmissionsröntgenmi-

---

kroskopie (MTXM)[Eim 01] oder Photoemissions Elektronen Mikroskopie (PEEM) [Sto 93], die bei der Ortsauflösung dem SNOM überlegen bleiben dürften. Ein Vorteil von SNOM ist aber sein im Vergleich zu diesen Methoden recht hoher magnetischer Kontrast, der zudem mit einfachen Mitteln im Labor erreicht wird und nicht an eine Synchrotronstrahlungsquelle gebunden ist.

Die Magnetooptik ist auch bei den meisten aktuellen Experimenten zur ultraschnellen Magnetisierungsdynamik die Methode der Wahl. Diese werden entweder direkt mit fs-Laserpulsen als Pump-Probe-Experiment durchgeführt [Bea 96, Koo 00], oder es wird ein kurzer magnetischer Feldpuls, der mit dem Laser synchronisiert ist, zur Anregung der Spindynamik verwendet [Acr 00, Cho 01, Par 02]. Zur ortsaufgelösten Messung wird solch ein stroboskopisches Experiment an jedem Rasterpunkt durchgeführt. Auf diese Weise sollte sich auch zeitaufgelöstes, magnetooptisches SNOM realisieren lassen. SNOM-Experimente auf der fs-Zeitskala sind in der Vergangenheit z.B. mit der Untersuchung des nichtlinearen optischen Response einzelner Halbleiter-Quantendots bereits eindrucksvoll demonstriert worden [Gue 02]. Für magnetooptische Messungen könnte sich die Verwendung des Sagnac-Interferometers erneut auszahlen: Verwandelt man die ultrakurzen Pulse eines fs-Lasers mit einem Strahlteiler in gegenläufige Teilpulse unterschiedlich hoher Intensität, so könnte der intensivere davon als Pump- und der andere als Probe-Puls verwendet werden. Durch Einfügen von Verzögerungsstrecken (*Delay Lines*) in das Sagnac-Interferometer sollte sich die Zeitverzögerung zwischen den beiden Pulsen einstellen lassen. Die in der Sagnac-Interferenz sichtbare nicht-reziproke Phasenverschiebung ist dann ein Maß für die zeitliche Änderung der Magnetisierung zwischen dem Eintreffen von Pump- und Probe-Pulsen. Anwendungen dafür gäbe es wieder bei den ultradünnen magnetischen Filmen: Nahe der Spinreorientierung sollte sich bei Erhöhung der Temperatur eine Spinpräzession sehr effektiv anregen lassen, da der Wechsel der leichten Magnetisierungsrichtung wie ein effektives senkrechtes Magnetfeld wirkt. Das wurde in Experimenten von Koopmans et al. in der Vergangenheit schon demonstriert [Koo 00]. Interessant ist die Frage, welchen Einfluss die Domänenstruktur auf die Spindynamik hat.

