

# Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der Spinreorientierungsübergang von ultradünnen  $\text{Ni}_x/\text{Cu}(100)$ - und  $\text{Fe}_y/\text{Ni}/\text{Cu}(100)$ -Filmen als Funktion der Schichtdicke  $x$  bzw.  $y$  bei 300 K im UHV untersucht. Ein Ziel dieser Arbeit war die Klärung der Frage, ob es sich bei dem SRT von  $\text{Ni}/\text{Cu}(100)$  um einen Phasenübergang erster oder zweiter Ordnung handelt. Ein weiteres Ziel war die Charakterisierung des SRT von  $\text{Fe}/\text{Ni}$ -Zweischichtsystemen auf  $\text{Cu}(100)$ , deren Einzelschichten –  $\text{Fe}/\text{Cu}(100)$  und  $\text{Ni}/\text{Cu}(100)$  – einen entgegengesetzten SRT zeigen. Über die Abbildung der magnetischen Domänenstruktur während des Filmwachstums mittels SPLEEM wurde gezeigt, dass der SRT von  $\text{Ni}/\text{Cu}(100)$  ein Übergang *zweiter* Ordnung ist, bei dem sich die Magnetisierung *kontinuierlich* innerhalb der großen Domänen dreht. In den  $\text{Fe}/\text{Ni}$ -Doppellagen wurde neben einer *kontinuierlichen* Reorientierung der Magnetisierung ein gleichzeitiges Aufbrechen der großen Domänen in *Streifendomänen* beobachtet. Für beide Dünnschichtsysteme wurde die Änderung der Magnetisierungsrichtung in Bezug auf die Orientierung der atomaren Stufenkanten des  $\text{Cu}$ -Substrats während des SRT gemessen, sowie die Größe der Domänen und die Breite und der Typ der Domänenwände bestimmt. Im folgenden werden die Ergebnisse für die untersuchten Systeme im einzelnen zusammengefasst.

In  $\text{Ni}/\text{Cu}(100)$ -Filmen setzt die ferromagnetische Ordnung bei 300 K in Übereinstimmung mit früheren Experimenten bei etwa 5 ML ein. Die in der Filmebene magnetisierten Domänen haben eine typische Ausdehnung von einigen  $10 \mu\text{m}$  ohne systematische Korrelation der Domänenwände zu den Stufenkanten des Substrats. Die großen Abmessungen dieser Domänen, im Vergleich zu den 165 nm breiten Streifendomänen beim Einsetzen der ferromagnetischen Ordnung in  $\text{Fe}/\text{Cu}(100)$ -Filmen von 2.2 ML Schichtdicke, ist auf die parallel zur Oberfläche ausgerichtete Magnetisierung von ultradünnen  $\text{Ni}/\text{Cu}(100)$ -Filmen zurückzuführen. Während in  $\text{Fe}$ -Monolagen aufgrund der großen senkrechten magnetischen Anisotropie die Streufeldenergie durch einen Streifendomänenzustand minimiert wird, liegt die Magnetisierung und damit das Streufeld des  $\text{Ni}$ -Films in der Ebene, in der die Streufeldenergie minimal ist. In der Ebene magnetisierte  $\text{Ni}$ -Filme werden im Schichtdickenbereich von 5 – 9 ML beobachtet. Die Domänenwände, die antiparallel magnetisierte Domänen trennen, sind  $180^\circ$ -Néel-Wände. Diese zeigen ein für Néel-Wände typisches Wandprofil bestehend aus einem Kernbereich und zwei symmetrisch dazu ausgedehnten logarithmischen Randbereichen. Für einen 8 ML  $\text{Ni}/\text{Cu}(100)$ -Film liefert ein solches Profil eine typische Wandbreite von 400 nm. Es wurden keine systemati-

schen Unterschiede in der Domänenstruktur von Ni-Filmen gefunden, die bei Raumtemperatur hergestellt und gemessen wurden zu denen, die bei 100 K hergestellt und gemessen wurden. Am Anfang des SRT, der bei etwa 9.5 ML Ni stattfindet, tritt eine *Verlängerung* der bereits vorhandenen Domänenwände neben spontan ummagnetisierten Bereichen ( $>1 \times 1 \mu\text{m}^2$ ) innerhalb der großen Domänen auf. Diese Beobachtungen sind auf die Erniedrigung der Domänenwandenergie infolge der verminderten effektiven magnetische Anisotropie am SRT zurückzuführen. Die beobachtete *Verbreiterung* der Domänenwände ist ebenfalls eine Folge der verminderten effektiven Anisotropie. Der SRT erfolgt kontinuierlich von einer Orientierung der Magnetisierung parallel zur Filmebene zu einer Orientierung der Magnetisierung senkrecht zur Filmebene mit zunehmender Ni-Schichtdicke. Über Minuten stabile verkippte Magnetisierungsvektoren innerhalb der Domänen werden eindeutig über die Abbildung der drei Magnetisierungskomponenten nachgewiesen. Die Reorientierung der Magnetisierung erfolgt über eine *spiralförmige* Bewegung von der Orientierung der Magnetisierung parallel zu den Cu-Stufen zu der Orientierung senkrecht zu den Stufen und senkrecht zur Filmoberfläche.

In Fe/Ni/Cu(100)-Filmen wurde die Orientierung der Magnetisierung der Fe- und der Ni-Schicht während des SRT als Funktion der Fe-Schichtdicke bei 300 K mittels XMCD und aus elementspezifischen Magnetisierungskurven für beide Schichten separat bestimmt. Diese Messungen zeigen, dass beide Magnetisierungen während des SRT parallel ausgerichtet sind, die Kopplung zwischen den Einzellagen also ferromagnetisch ist. Die Bestimmung der magnetischen Momente pro Fe- bzw. Ni-Atom in senkrecht magnetisierten Fe/Ni-Filmen mittels XMCD bei 300 K liefert ein reduziertes magnetisches Moment von  $\approx 1.7 \mu_B$  für 1 ML Fe an der Fe-Ni-Grenzschicht. In 4 ML Fe auf Ni/Cu(100) wurde ein “high-spin”-Zustand des Fe gemäß der Slater-Pauling-Kurve gefunden. Dies lässt auf ein Wachstum der Fe-Schicht in der kubisch-flächenzentrierten Struktur bis mindestens 4 ML schliessen. Der SRT erfolgt von einer senkrecht zur Filmoberfläche orientierten Magnetisierung für unbedeckte Ni/Cu(100)-Filme (7 – 11 ML) zu einer Ausrichtung parallel zur Oberfläche mit zunehmender Fe-Bedeckung in einer *spiralförmigen* Bewegung. Dabei rotiert die in der Ebene liegende Magnetisierungskomponente von “senkrecht zu den Substratstufen” in Richtung “parallel zu den Stufen”. In dem Reorientierungsintervall (2.5 – 2.9 ML Fe) findet *gleichzeitig* ein Aufbrechen der Domänen in circa 180 nm breite *Streifendomänen* statt, die entlang der Cu-Stufen verlaufen und in denen die Magnetisierung *kontinuierlich* in die Filmebene reorientiert. Die leichte Richtung der Magnetisierung des gekoppelten Zweischichtsystems in der Ebene ist die [001] Richtung, die auch die leichte Richtung im Fe-Volumenmaterial ist. Bei einer Domänenwand, die vor dem SRT keine Korrelation zu den Substratstufen zeigte, wurde am Anfang des SRT die Anhaftung einzelner Wandsegmente an den Substratstufen (*domain wall pinning*) nachgewiesen, aus denen sich mit zunehmender Fe-Schichtdicke Streifendomänen bildeten. Am Maximum der Streifendichte findet ein Übergang von Bloch-Wänden zu Néel-Wänden in einem sehr schmalen

---

Schichtdickenbereich von etwa 0.1 ML Fe statt.

Aus der mittleren kritischen Fe-Schichtdicke des SRT, d. h. unter der Annahme eines diskontinuierlichen Übergangs, ergibt sich eine Fe-Ni-Grenzflächenanisotropie von  $K_{2,Fe-Ni}^S = -93 \mu\text{eV/Atom}$  unter Verwendung der Literaturwerte für Volumen-, Oberflächen- und Formanisotropien der Einzellagen Fe/Cu(100) und Ni/Cu(100). Es wurde gezeigt, dass die Erhöhung der Formanisotropie des Fe/Ni/Cu(100)-Films durch die zunehmende Fe-Bedeckung allein für den SRT bei der kritischen Fe-Schichtdicke nicht ausreicht, sondern dass die Grenzflächenanisotropie einen entscheidenden Beitrag zur Reorientierung der Magnetisierung liefert. In einer Erweiterung des obigen Modells, die der kontinuierlichen Rotation der Magnetisierung Rechnung trägt, wird aus dem Fe-Schichtdicken abhängigen Neigungswinkel der Magnetisierung eine für das Zweilagensystem negative effektive Anisotropiekonstante  $K_4^{\text{eff}}$  bestimmt, während die Summe der Anisotropiekonstanten zweiter Ordnung positiv ist. In Übereinstimmung mit theoretisch entwickelten Stabilitätsdiagrammen der leichten Magnetisierungsrichtung im Anisotropieraum ( $K_4$  vs.  $K_2 - K_d$ ) wird dadurch die beobachtete verkippte Magnetisierung während des SRT charakterisiert. Das gleichzeitig beobachtete Aufbrechen der großen Domänen in Streifendomänen mit kosinusförmigem Profil wird durch die Theorie nicht vorausgesagt.

Abschliessend wurde der SRT von Fe-Lagen auf einem 1.5 ML Ni/Cu(100)-Film untersucht, der bei 300 K paramagnetisch ist. Hier zeigten sich deutliche Abweichungen zu der Domänenstruktur von Fe/Cu(100)-Filmen. Die wichtigsten Ergebnisse sind (i) ein Einsetzen der ferromagnetischen Ordnung bei kleineren Fe-Schichtdicken (1.35 ML) mit einem breiteren Streifendomänenmuster aufgrund des geringeren Streufeldes und (ii) "Spin-canting" beim Auftreten der Domänen infolge der negativen Grenzflächenanisotropie. Qualitativ verläuft der SRT wie bei Fe-Schichten auf senkrecht magnetisierten Ni/Cu(100)-Filmen, die kritische Fe-Schichtdicke für den SRT liegt jedoch 0.6 ML höher. Die mittlere Streifenbreite der Domänen am SRT ist mit ca. 750 nm mehr als viermal so gross und wird auf das geringere magnetische Streufeld aufgrund der wesentlich dünneren Ni-Schicht zurückgeführt. Trotz der geringen Breite des SRT-Intervalls von nur 0.15 ML Fe zeigen die Domänenabbildungen eindeutig eine *kontinuierliche* Reorientierung der Magnetisierung in die Filmebene, also einen SRT zweiter Ordnung. Eine Korrelation der Magnetisierungsrichtung mit den Substratstufen am Anfang und am Ende des SRT wurde in diesem System nicht gefunden.

Das im Rahmen dieser Arbeit aufgebaute UHV-SQUID-Magnetometer, mit dem die Magnetisierung eines ultradünnen Films *in situ* bestimmt werden kann, wurde vorgestellt. Erste Messungen an einem Fe/GaAs(100)-Film wurden präsentiert. Die Konstruktion der UHV-Kammer erlaubt erstmalig Messungen *derselben* Probe mittels SQUID-Magnetometrie und ferromagnetischer Resonanz.