

# Zusammenfassung


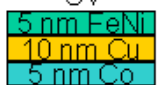
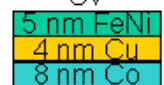
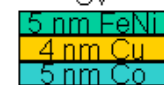
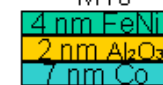
	Probe A	Probe B	Probe C	Probe D	Probe E
<b>Schichtstruktur</b>	Epitaxially grown; 	SV 	SV 	SV 	MTJ 
<b>Substratoberfläche</b>	Cu(001)	Step-bunched Si(111), 4°	SiO/Si(111)	SiO/Si(111)	Step-bunched Si(111), 6°
<b>Aufgewachsen mit</b>	MBE in UHV	RF Sputtering	RF Sputtering	RF Sputtering	RF Sputtering
<b>Benutzte Beamline</b>	X11-SIM in SLS	UE56/PGM2 in BESSY	UE56/PGM2 in BESSY	UE52/SGM in BESSY	UE56/PGM2 in BESSY
<b>Magnetische Eigenschaften</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ SRT</li> <li>▪ Stripe domains in out-of-plane anisotropy region</li> <li>▪ Bloch wall</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Coupling field (= 2 mT)</li> <li>▪ In-plane uniaxial anisotropy</li> <li>▪ Néel wall</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Coupling field (= 0.4 mT)</li> <li>▪ In-plane uniaxial anisotropy (Co film grown in the field)</li> <li>▪ Néel wall</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Coupling field (= 0.4 mT)</li> <li>▪ Negligible in-plane anisotropy</li> <li>▪ Néel wall</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Coupling field (= 1.2 mT)</li> <li>▪ In-plane uniaxial anisotropy</li> <li>▪ Néel wall</li> </ul>

Table: Overview of the samples.

In Zusammenhang mit der Weiterentwicklung der Informationstechnologie ist die Spindynamik in einem weiten Zeitskalenbereich von Femtosekunden bis zu Sekunden und darüber hinaus zu einem der entscheidenden Faktoren für die Datenspeicherung geworden. In dieser Arbeit wurde die Ausbreitung von magnetischen Domänenwänden vor allem im Nanosekundenbereich, aber auch im langsamen Bereich ( $\mu\text{s}$  bis Sekunden) untersucht. Hierfür wurden epitaktisch gewachsene Co/Ni-Doppelschichten auf Cu(001) und Dreischichtsysteme in einer Spin-Valve-Anordnung (SV) und einer Anordnung als magnetischer Tunnelkontakt (magnetic-tunnel-junction, MTJ) untersucht. Die Anordnung der Schichten sowie Substrat, Präparationsmethoden, die verwendete Beamline und einige magnetische Eigenschaften sind der Tabelle zu entnehmen.

Für Probe A konnte, in einem Bereich, in dem eine magnetische Anisotropie senkrecht zur Filmebene vorlag, eine sprunghafte Bewegung der Domänenwände bei Erhitzung des Substrates

bzw. bei der Abscheidung von zusätzlichem Co-Material beobachtet werden. Es ist bekannt, dass epitaktisch gewachsene Ni-Schichten auf Cu(001) eine Anisotropie senkrecht zur Filmebene über einen weiten Schichtdickenbereich von 7 ML bis 60 ML aufweisen. Co-Filme über 1 ML hingegen besitzen auf Cu(001) eine magnetische Anisotropie in der Filmebene. Der Übergang der leichten Richtung der Magnetisierung von senkrecht zur Filmebene zu in der Filmebene mit zunehmender Co-Dicke wird Spin-Reorientierungsübergang (spin reorientation transition, SRT) genannt.

- Mit zunehmender Temperatur konnte zunächst ein Aufbrechen der Domänen und damit eine Verringerung der Domänengröße beobachtet werden, während die Ordnung in der Orientierung der Domänenwände erhalten blieb. Dies wird als "Stripe-Phase" bezeichnet. Nahe der Curie-Temperatur ist die magnetische Phase auf Grund von Fluktuationen instabil. Dies führte zu einem Aufbrechen der Streifendomänen und zur Nukleation von kleineren Domänen (bubble phase). Schließlich ging der Film in die paramagnetische Phase über.
- Bei Annäherung an den SRT, ausgehend von einem Bereich mit einer Anisotropie senkrecht zur Filmebene, wurde das Auftreten von Streifendomänen in der Doppelschicht beobachtet. Dabei verringerte sich die Periode der Streifendomänen nahe der SRT-Linie, was auf die Konkurrenz magnetischer Energiebeiträge zurückzuführen ist. Durch das Abscheiden von zusätzlichem Co-Material auf die Probe (Co-Keil/12 ML Ni/Cu(001)), also der zeitlichen Änderung der Anisotropieenergie, wurde die SRT-Linie in Richtung kleinerer Co-Dicken verschoben. Die Bewegung der SRT-Linie wurde an Hand des Voranschreitens der Streifendomänen und der Verringerung der Domänengröße bestimmt. Die Co, Aufdampftrate betrug 8 Minuten pro ML.

Die oben genannten Ergebnisse kann man wie folgt zusammenfassen: Die thermisch aktivierten langsamen Ummagnetisierungsprozesse (Nukleation von magnetischen Domänen und sprungartige Domänenwandverschiebung) von eindeutig charakterisierten ultradünnen magnetischen Filmen weisen klar auf eine enge Verknüpfung der Magnetisierungsdynamik mit den intrinsischen magnetischen Eigenschaften, den statischen Beiträgen (Magnetostatik, Austausch, Anisotropie, Zeeman-Energie), der Verzerrung der kristallographischen Struktur und den Spin-Fluktuationen hin.

Die elementspezifische Abbildung magnetischer Domänen mit einer Zeitauflösung im ns-Bereich, die durch Kombination der XMCD-Technik und einer Pump-Probe-Technik mittels eines PEEMs erreicht wurde, erlaubte es, die Prozesse der Magnetisierungsumkehr in isolierten SV- und MTJ-Dreifachlagen auf fundamentaler Basis zu verstehen. Die folgenden entscheidenden Ergebnisse wurden erzielt:

- An Hand von Probe B konnte gezeigt werden, dass die Kopplungsenergie zwischen den beiden ferromagnetischen Schichten einen entscheidenden Einfluss auf den Ummagnetisierungsprozess in der FeNi-Schicht des SV-Dreischichtsystems ausübt. Bei der Ummagnetisierung der FeNi-Magnetisierung in Richtung der Magnetisierung der Co-Schicht dominierte die Bewegung der Domänenwände, während bei der Ummagnetisierung entgegengesetzt zur Co-Magnetisierung die Nukleation der Domänen überwog. An Terrassenstufen wurde auf Grund der lokalen Kopplung die Bewegung der Domänenwände in erstern Fall begünstigt und in Letztem gehemmt oder blockiert.
- Der Einfluss der magnetischen Anisotropieenergie auf den Ummagnetisierungsprozess wurde an den Proben C und D untersucht. Die beiden Proben weisen einen ähnlichen Schichtaufbau auf, wobei die Co-Schicht der Probe C in einem äußeren magnetischen Feld aufgewachsen wurde. Entsprechend lagen dort die leichten Richtungen der FeNi- und der Co-Schicht in Richtung des äußeren Feldes. In dieser Probe verliefen die Domänenwände überwiegend parallel zur leichten Richtung der Magnetisierung. In Probe D waren die Domänenwände zufällig orientiert und die Größe der Domänen geringer (einige Mikrometer). Die Ummagnetisierung konnte im Fall der Probe D mikroskopisch reproduziert werden, nicht jedoch für Probe C. Bei einer vernachlässigbar kleinen Anisotropieenergie (Probe D) liegt die Dichte der Nukleationszentren höher, so dass sich die Domänenwände unregelmäßig ausrichten und so an einer Bewegung gehindert werden. Dies führt zu einer geringeren Geschwindigkeit und einer höheren Reproduzierbarkeit der Bewegung der Domänenwände.
- Für die 4 nm-dicke FeNi-Schicht der Probe B wurde die Geschwindigkeit  $v$  der Domänenwände im viskosen Bereich (300 bis 500 m/s) beobachtet. Die Beweglichkeit der Domänenwände konnte als Steigung aus der Auftragung von  $v$  gegen das äußere Feld zu 100 m/(s mT) bestimmt werden.
- Für die 5 nm-dicke FeNi-Schicht der Probe E lag die experimentell beobachtete Geschwindigkeit der Wände entlang der leichten Magnetisierungsrichtung über 300 m/s und sättigte bei ca. 2000 m/s in einem effektiven Feld von 5.2 mT. Die Beweglichkeit wurde zu 160 m/(s mT) bestimmt. Das Sättigungsfeld (Walker limit field) stimmt mit dem aus  $1/2\mu_0\alpha M_S$  ermittelten theoretischen Wert von 5 mT gut überein. Hierbei bezeichnet  $M_S$  die Sättigungsmagnetisierung und  $\alpha$  die Dämpfungskonstante (=0.01). Bei Feldern, die groß genug sind, um die Spin-Struktur innerhalb der Domänenwände aufzubrechen, kann die Geschwindigkeit fluktuieren oder oszillieren.
- Wie bereits erwähnt besitzt die Probe D eine vernachlässigbar kleine Anisotropieenergie und Domänen im Bereich von Mikrometern. Mit Hilfe zeitaufgelöster Messungen kon-

nten schnelle Bewegungen der Domänenwände besonders dort beobachtet werden, wo zwei Domänen, vergleichbar zweier Wassertröpfchen, miteinander verschmelzen. Dies kann qualitativ durch die Berücksichtigung der Domänenwandenergie verstanden werden. Die Bewegung der Domänenwand führt durch das Verschmelzen zu einer Absenkung der Domänenwandenergie.

- Der Einfluss der Domänenwandenergie auf die Bewegung der Wand konnte auf andere Weise auch an Probe E beobachtet werden. Nach der Nukleation der Domänen durch den magnetischen Feldpuls dehnten sich diese mit zunehmender Zeit aus. Es gab jedoch eine von der Amplitude des Feldpulses abhängige Verzögerung der Ausdehnung der Domänen. Dieses Verhalten kann durch die Berücksichtigung des Gleichgewichtes zwischen Zeeman- und Wandenergie vollständig verstanden werden. Hierbei führt die Zeemanenergie zu einer Ausdehnung der Nukleationskeime, während die Wandenergie, die für kleine Domänen groß wird, die Ausdehnung hemmt.
- Das für die Nukleation der Domänen notwendige Feld wurde durch die Streufelder der Domänenwände in der Co-Schicht deutlich herabgesetzt (Probe E). Mikromagnetischen Berechnungen nach können die Streufelder die Magnetisierung der FeNi-Schicht fast bis in die harte Magnetisierungsrichtung drehen. Das Drehmoment, das bei dieser Orientierung durch den magnetischen Feldpuls ausgeübt wird, ist so groß, dass die Nukleation der Domänen leicht herbeigeführt werden kann.

Es zeigt sich also abschließend, dass für schnelle Ummagnetisierungsprozesse in magnetischen Vielfachschichten eine hohe Zahl von Nukleationszentren der Domänen, die durch Oberflächen/Grenzflächen-Rauhigkeiten und durch schwache magnetische Anisotropien entstehen, nicht wünschenswert ist. Erstere führen zu einem lokalen Kopplungsfeld, das wie eine Energiebarriere für die Domänenwandverschiebung wirkt. Die magnetische Anisotropie führt zu  $360^\circ$  Domänenwänden aufgrund der Wechselwirkung der Domänen untereinander. Diese  $360^\circ$  Domänenwände lassen sich nur schwer entfernen. Zudem wurde die Geschwindigkeit der Domänenwandbewegung nach der Nukleation der Domänen reduziert. Die Energie dieser Wände ist im Vergleich zu ihrer Ausdehnung recht groß, wenn die Domänen selbst klein sind. Eine Reduktion des Nukleationsfeldes in der magnetisch weichen Schicht konnte dadurch erreicht werden, dass Domänen in der magnetisch harten Schicht erzeugt wurden. Ein kleineres Feld für das Schalten zum Beispiel in einem Lesekopf kann zur Reduktion der Größe der Streufelder von magnetischen Zellen auf Festplatten führen. Dadurch kann die gesamte Größe dieser Bauelemente reduziert werden.

Die hier genannten Effekte in SV- oder MTJ-artigen Systemen konnten somit erfolgreich mit XMCD-PEEM Experimenten mit Pump-Probe-Einfach-Puls-Techniken analysiert werden.