bmb+f - Förderschwerpunkt

Kondensierte Materie

Großgeräte der physikalischen Grundlagenforschung

Schlussbericht vom 05.07.2004 zum Thema:

Elektronische und mikromagnetische Struktur in neuen magnetoelektronischen Materialien

Zuwendungsempfänger:	Leibniz-Institut f. Festkörper- u. Werkstoffforschung
Projektleitung:	Dr. C.M. Schneider
Förderkennzeichen:	05KS1BD1/0
Förderzeitraum:	01.04.2001 – 31.03.2004
Zuwendung:	619.302,00 EUR
E-Mail:	c.m.schneider@fz-juelich.de
Projektträger:	Projektträger DESY-HS

Genutzte Großgeräte:

BESSY-BESSY

andere-Europa

Angaben zum Projekt:

Veröffentlichungen:	12
Konferenzbeiträge:	12
Diplomarbeiten:	0
Dissertationen:	0
Habilitationen:	0
Patente:	0

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Schlussbericht – Kurzfassung

Zuwendungsempfänger: Leibniz-Institut f. Festkörper- u. Werkstoffforschung

Projektleitung: Dr. C.M. Schneider

Elektronische und mikromagnetische Struktur in neuen magnetoelektronischen Materialien

Im apparativen Teil dieses Verbundprojekts wurde ein spin- und winkelauflösendes Photoelektronenspektrometer auf der Basis eines hemisphärischen Energieanalysators und eines SPLEED-Spindetektors aufgebaut. Durch eine adaptierte Elektronenoptik kombiniert dieses Gerät die Vorteile der expliziten Spinpolarisationsanalyse $P(E)$ und eines abbildenden Spektrometers zur Aufnahme von Winkelverteilungen $I(E,\vec{k})$. Zur Erfassung der Winkelverteilungen wurde ein 2-dim. Delayline-Detektor mit spezieller Ausleseelektronik implementiert.
Der methodische Teil des Projekts beschäftigte sich neben der Photoelektronenspektroskopie auch mit der Weiterentwicklung alternativer magnetooptischer Spektroskopien, vor allen Dingen in der Reflektionsgeometrie. So konnten die Weichröntgen-Äquivalente zu den klassischen linearen magnetooptischen Effekten (transversaler und longitudinaler Kerreffekt, TMOKE bzw. LMOKE) etabliert und für die elementselektive Untersuchung komplexer magnetischer Schichtsysteme eingesetzt werden. Darüber hinaus gelang es, grosse magnetooptische Effekte auch im VUV-Bereich bei resonanter Reflexion an den M-Kanten von Fe und Co nachzuweisen. Diese Arbeiten wurden auf antiferromagnetische Materialien ausgedehnt und führten zum Nachweis eines bislang unentdeckten geraden magnetooptischen Effekts in der Reflexion, dessen spektrale Abhängigkeit direkt mit der spinaufgespaltenen Elektronenstruktur des Antiferromagneten verknüpft ist.
Im grundlagenphysikalisch/materialwissenschaftlichen Bereich konnte am Beispiel der binären Ni_xPd_{1-x}-Legierungen durch spinintegrierte und -aufgelöste Photoemissionsmessungen der konkurrierende Einfluss von Austausch- und Spin-Bahn-Wechselwirkung auf die elektronischen Struktur nachgewiesen werden. Darüber hinaus gelang es, durch surfactant-induziertes Wachstum Filme mit (111)-Orientierung herzustellen und erste magnetische Untersuchungen daran zu realisieren. Durch die Nutzung der magnetooptischen Spektroskopien im weichen Röntgenbereich wurden lagenaufgelöste Untersuchungen der magnetischen Struktur in komplexen magnetischen Schichtsystemen durchgeführt, und verschiedene Kopplungsmechanismen identifiziert. In Co/Cu-Mehrschichtsystemen wurden die magnetooptischen Konstanten im Bereich der $L_{2,3}$-Absorptionskanten vermessen und erhebliche Abweichungen von tabulierten Werten (Henke) festgestellt. Am dem Tunnelschichtsystem Fe/MgO(100) wurde eine erster Einblick in die Entwicklung der elektronischen Struktur der Fe/MgO-Grenzfläche gewonnen. Im dritten Projektjahr wurde mit systematischen Untersuchungen an ferromagnetischen Oxiden, halbmetallischen Ferromagneten und verdünnten magnetischen Halbleitern (DMS) begonnen und erste Zusammenhänge zwischen magnetischem Verhalten und elektronischer Struktur erarbeitet.

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Leibniz-Institut f. Festkörper- u. Werkstoffforschung

Projektleitung: Dr. C.M. Schneider

Elektronische und mikromagnetische Struktur in neuen magnetoelektronischen Materialien

1 Aufgabenstellung

Dieses Projekt verfolgt drei Schwerpunkte: apparativ, grundlagenphysikalisch, und materialwissenschaftlich. Es liefert erstens durch den Aufbau eines hochauflösen-den, spinpolarisierten Photoelektronenspektrometers einen wesentlichen Beitrag zur Instrumentierung von BESSY II und verbessert dort die Möglichkeiten der spektroskopischen Untersuchung magnetischer Materialien. Zweitens werden die Untersuchungsmethoden weiterentwickelt und durch neue physikalische Effekte zusätzliche Untersuchungsmöglichkeiten geschaffen. Drittens, mit Hilfe der etablierten und neuen experimentellen Methoden werden magnetische Materialsysteme für den Einsatz in der Magnetoelektronik untersucht.

2 Voraussetzungen

3 Planung und Ablauf

3.1 Organisatorische Aspekte

Wie bereits in den Zwischenberichten angedeutet, verzögerte sich der Aufbau des Photoemissionsexperiments durch verschiedene Schwierigkeiten, die aber letztendlich alle überwunden werden konnten. Zunächst kam es zu Lieferschwierigkeiten und Qualitätsprobleme bei den Lieferanten. So wurde z.B. die μ-Metallkammer (Fa. Pink) aufgrund von Engpässen beim Rohmaterial und Fertigungsproblemen erst mit fast 9-monatiger Verzögerung ausgeliefert. Bei den ersten Vakuumtests nach dem Ausheizen traten kleinere Lecks auf, die eine nochmalige Überarbeitung der Kammer notwendig machten. Auch der Spin-Detektor (Fa. Focus) wurde erst im Herbst 2002 ausgeliefert und wies dann noch eine Reihe von Justagefehlern und Instabilitäten (Spannungsschwankungen und Einstreuungen) in der Betriebselektronik auf. Letztere wurde in einer funktionsfähigen Version erst im Sommer 2003 zur Verfügung gestellt. Erfreulicherweise wurde der Delayline-Detektor sehr schnell zum Jahresende 2002 geliefert. Damit war es zumindest möglich, das Experiment vakuum-technisch und elektronenoptisch komplett aufzubauen (Abb. 1). Das Scienta-Spektrometer wurde bereits vorab getrennt getestet und erfüllte alle Spezifikationen. Die Tests des Delayline-Konzepts wurden erfolgreich im Frühjahr 2003 durchgeführt. Der Test der Transferoptik und des Spindetektors wurden im Anschluss in Angriff genommen und die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems bis zur Jahresmitte nachgewiesen. Allerdings gab es noch einige Schwierigkeiten mit der elektronischen Ansteuerung, die

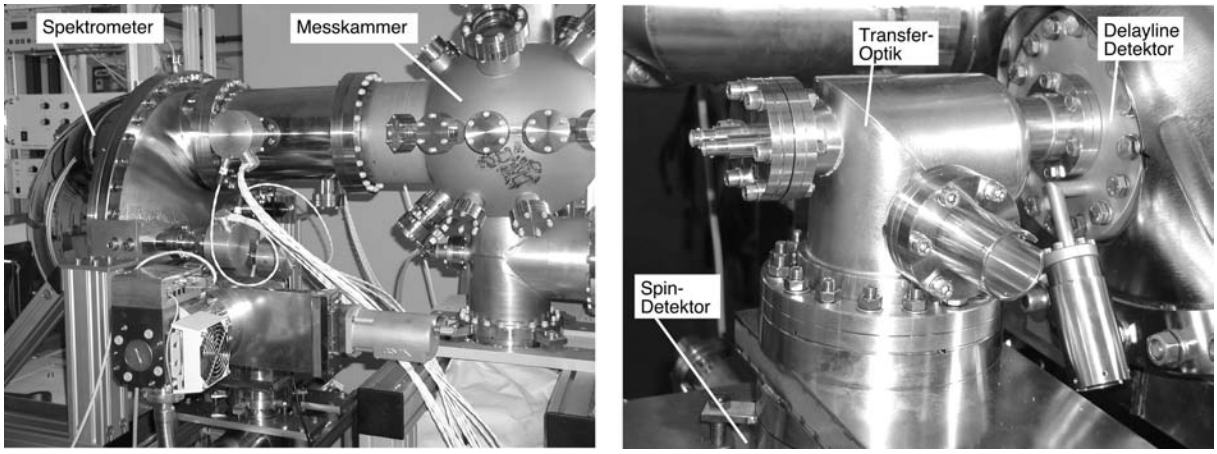

Abbildung 1: Links: Gesamtansicht des Spektrometersystems mit Experimentierkammer. Rechts: Detailansicht des Detektorflansches am Spektrometersystem. Man erkennt den Anschlussflansch des Delayline-Detektors, sowie die zentrisch herausgeführte Transferoptik, die die Verbindung zum Spindetektor darstellt. Der Spindetektor selbst befindet sich unterhalb des Spektrometerflansches und kann durch ein Ventil vakuummässig abgekoppelt werden.

im wesentlichen auf eine sehr eingeschränkte Unterstützung der Fa. Scienta zurückzuführen waren. Darauf wurde von uns ein Alternativkonzept auf der Basis von National Instruments Komponenten entwickelt und der Fa. Scienta zur Übernahme vorgeschlagen. Dies wurde nach einigem Zögern akzeptiert und die entsprechenden Software-Patches entwickelt. Damit wurde das Gerät voll funktionsfähig und steht nun der Nutzergemeinschaft zur Verfügung. Es ist auch im Angebotskatalog von BESSY als Nutzergerät ausgewiesen.

3.1.1 Personalia

Im personellen Bereich musste das Projekt im Dezember 2002 das Ausscheiden von Dr. A. Rijevski verkraften. Herr Dr. Rijevski hat die wesentliche Aufbauarbeit an dem Spektrometersystem geleistet und kehrte aus persönlichen Gründen wesentlich früher als geplant an das Ioffe-Institut in St. Petersburg zurück. Seine Stelle wurde ab 1.1.2003 von Herrn Dr. F. Matthes übernommen, der die Projektarbeiten erfolgreich weiterführte und zum Abschluss brachte.
Der Mitantragsteller Dr. M. Golden wurde bereits im Oktober 2002 an die Universität Amsterdam berufen und schied aus dem Projekt aus. Der Mitantragsteller Prof. Dr. J. Fink wurde im Sommer 2003 emeritiert. Der Hauptantragsteller Dr. C.M. Schneider wurde mit Wirkung zum 1.6.2003 als Leiter des Instituts “Elektronische Eigenschaften“ an das IFF im Forschungszentrum Jülich berufen. Um das Projekt erfolgreich beenden zu können, stimmte das IFW Dresden einem Transfer des Spektrometers nach Jülich zu. Auf diese Weise wurde gesichert, dass die entsprechende Expertise dem Projekt erhalten wurde. Im Gegenzug wurde auch vereinbart, dass die Betreuung des Spektrometers im Nutzerbetrieb zukünftig vom IFF aus zur Verfügung gestellt wird. Die entsprechende Betreuungskapazität wird durch das IFF im Rahmen des Betriebs einer eigenen Beamline (UE-56-SGM) bei BESSY gesichert.

4 Wissenschaftlicher u. technischer Stand

Zu Beginn des Projekts stand kein explizit spinauflösendes Photoelektronenspektrometer bei BESSY zur Verfügung. Das vom Antragsteller aus dem MPI-Halle übernommene ca. 20 Jahre Altgerät war den neuen Anforderungen an der Strahlungsquellen der 3. Generation nicht mehr gewachsen. Basierend auf der Expertise der Antragsteller auf den Gebieten der hochauflösenden bzw. spinaufösenden Photoemission wurde deshalb das neue Gerät konzipiert. Es ist festzuhalten, dass die Methode der spinaufgelösten Photoemissionsspektroskopie in der Periode vor Projektbeginn etwas in den Hintergrund getreten war. Dies lag zum einen an der Popularität der magnetodichroischen Effekte im Weichröntgen- und VUV-Bereich [1], zum anderen an der relativ geringen Verfügbarkeit von zirkular, aber auch linear polarisierter Undulatorstrahlung im Photonenenergiebereich unter 50 eV. Viele der Synchrotronquellen der 3. Generation haben einen Schwerpunkt im Weich- und Hartröntgenbereich gelegt. Mit dem Übergang von BESSY zu BESSY II stehen in Adlershof nur zwei Undulatoren vom Typ U-125 zur Verfügung, die linear polarisiertes Licht in diesem Energiebereich zur Verfügung stellen. Nach letzten Informationen der BESSY-Geschäftsführung soll einer der beiden U-125 auf einen helischen Typ umgerüstet werden, um das Angebot an variabel polarisierter Strahlung in niedrigen Energiebereich zu erhöhen.
Andererseits hat sich gerade in den letzten Jahren – getrieben durch die Nachfrage und Entwicklung in der Spinelektronik – die Notwendigkeit intensiver spektroskopischer Untersuchungen an magnetischen Materialien wieder herausgebildet. Die Vielzahl der neuen bzw. wiederentdeckten Materialien reicht von komplexen Ferromagneten über ferromagnetische Oxide und Heusler-Legierungen bis hin zu ferromagnetischen Halbleitern. All diese Materialsysteme werden gegenwärtig im Hinblick auf ihre mögliche Verwendung in magnetischen Tunnelkontakten, Spintransistoren, oder Spininjektions-Bauelementen diskutiert. Für die Kontrolle der spinabhängigen Transporteffekte ist jedoch die Kenntnis der elektronischen Zustände im Volumen und an den verschiedenen Grenzflächen entscheidend. Diese Information lässt sich aus Absorptionsspektroskopien (XAS, XMCD, XMLD) nur unzureichend entnehmen. Daher ist in den letzten Jahren ein steigendes Bedürfnis nach explizit spinauflösenden Charakterisierungsverfahren zu verzeichnen, die ein detailliertes Bild der elektronischen Bandstruktur liefern, das auch die Ausbildung von Grenzflächenzuständen und die Rolle spinabhängiger Wechselwirkungen (Spin-Bahn-Kopplung und Austauschwechselwirkung) in der elektronischen Struktur berücksichtigen. Dabei müssen Spindetektion und hohe Energieauflösung miteinander kombiniert werden.

5 Zusammenarbeit

Innerhalb des Projekts gab es aktive Kollaborationen auf den Gebieten:

- **Röntgen-Magnetooptik.** Hierbei waren neben dem IFW Dresden auch BESSY (Dr. Mertins, Dr. Schäfers) und die Universität Rostock (Dr. Bansmann) beteiligt.

- **Elektronische Strukturen.** Hier gab eine Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen (Prof. Güntherodt) und der Universität Konstanz (Prof. Rüdiger) zur elektronischen Struktur von halbmetallischen Ferromagneten. In diese Aktivitäten eingebunden sind auch die Theoriegruppen der LMU München (Prof. Ebert) und Münster (Prof. Donath, Dr. Braun). Pro-

ben zu Heuslerlegierungen wurden aus dem IFW Dresden und dem IFF/FZ Jülich zur Verfügung gestellt.

- **Magnetische Strukturen.** Die etablierte Zusammenarbeit mit der AG Schönhense (U Mainz) zur Nutzung der Photoemissionsmikroskopie wurde weiter fortgesetzt.
- **Komplexe magnetische Schichtsysteme.** Diese Kollaboration beinhaltete Verbindungen zu Partnern des BMBF-Leitprojekts "Magnetoelektronik" (IPHT Jena, R. Bosch GmbH), die komplexere magnetische Schichtsysteme (SpinValves) für Untersuchungen zur Verfügung stellten.

6 Erzielte Ergebnisse

Die grundlagenphysikalischen und materialwissenschaftlichen Arbeiten sind eng miteinander verknüpft und werden deswegen im Nachfolgenden nicht unterschieden. Die vorgenommene Einteilung orientiert sich nach wissenschaftlichen Themen und Materialsystemen.

6.1 Magnetische Eigenschaften und elektronische Struktur epitaktischer binärer Legierungsschichten

In Anknüpfung an das Vorläuferprojekt wurden die Untersuchungen an binären Legierungsmodellsystemen fortgesetzt. Bei dem System Ni_xPd_{1-x} stand dabei insbe-sondere spektroskopische Untersuchungen im Vordergrund, um ein besseres Ver-ständnis zwischen chemischer Zusammensetzung und elektronischer Struktur zu erreichen. Diese "Bandmapping"-Experimente erfordern allerdings niedrige Photonenenergien von 10 – 40 eV, die bei BESSY nur in sehr begrenztem Umfang zur Verfügung stehen. Daher war es bislang primär möglich, spinintegrierte Untersuchungen – allerdings mit hoher Energieauflösung – an ausgewählten Ni-Konzentrationen x vorzunehmen. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Verschiebung der spektralen Strukturen mit der Variation der Zusammensetzung und bestätigen damit die früheren Resultate [2]. Erste Untersuchungen des magnetischen Lineardichroismus (MLDAD) zeigen allerdings nur Asymmetrien im Prozentbereich. Zur Beobachtung einer grossen MLDAD-Asymmetrie sollte die Anregung in eine Bandlücke (evanescent state) erfolgen, deren Position bei den Legierungen allerdings unbekannt ist. Aussagekräftiger wären hier MDAD-Messungen mit zirkularem Licht, das allerdings in diesem Photonenenergiebereich nur bei ELETTRA zur Verfügung steht. Aus diesem Grund müssen die bisherigen Resultate durch explizit spinauflösende Photoemissionsexperimente gestützt werden (s.u.). Die bisherigen Ergebnisse zeigen aber auch klar, dass hier eine Unterstützung von theoretischer Seite in Form von Bandstruktur- bzw. Photoemissionsrechungen erforderlich ist. Aus diesem Grund wurde die Zusammenarbeit mit der AG Ebert (LMU München) intensiviert, und das dort entwickelte KKR-Programmpaket im IFW Dresden installiert . Dieses Programm erlaubt u.a. die vollrelativistische Berechnung von ungeordneten Legierungen in einer CPA-Näherung. Es ist zwar noch nicht möglich, damit auch Oberflächenzustände zu erfassen, aber da die von uns untersuchten Filme relativ dick sind (10 – 15 Monolagen), entsprechen viele der spektralen Strukturen der Volumenbandstruktur. Damit ist es jetzt möglich in Kooperation mit der AG Ebert experimentbegleitend Bandstrukturrechnungen durchzuführen (Abb. 2). Die bisherigen Resultate unterstützen die Interpretation der spinintegrierten Photoemissionsdaten.

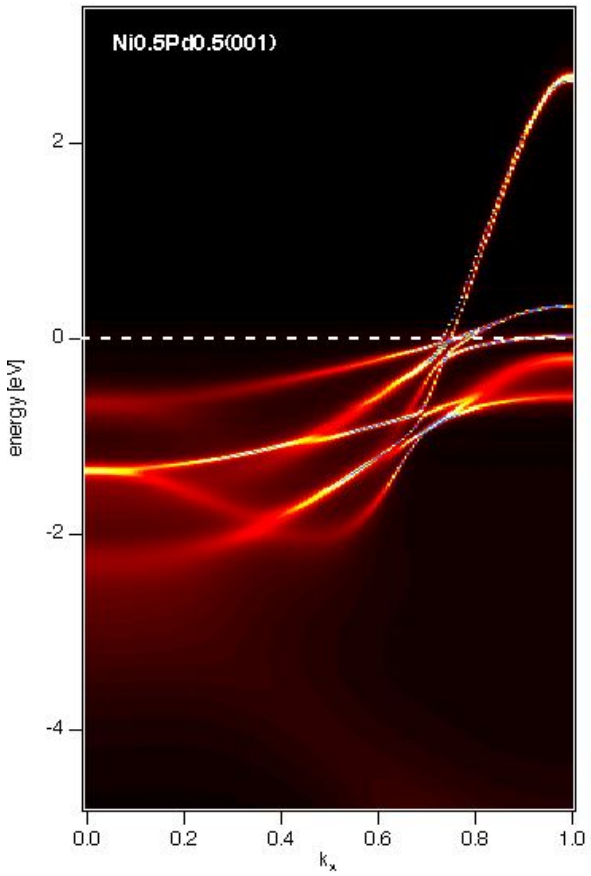

Abbildung 2: Wellenvektorabhängigkeit der Blochschen Spektralfunktionen (Bandstruktur) für eine chemisch ungeordnete $Ni_{0.5}Pd_{0.5}$ Legierung mit (001) kristalliner Orientierung. Die Rechnung wurde mit dem KKR-Paket der AG Ebert vollrelativistisch durchgeführt, um den Einflu der Spin-Bahn-Wechselwirkung und des magnetischen Grundzustands zu erfassen. Die Verschmierung eines Teils der Bänder ist eine direkte Folge der chemischen Unordnung.

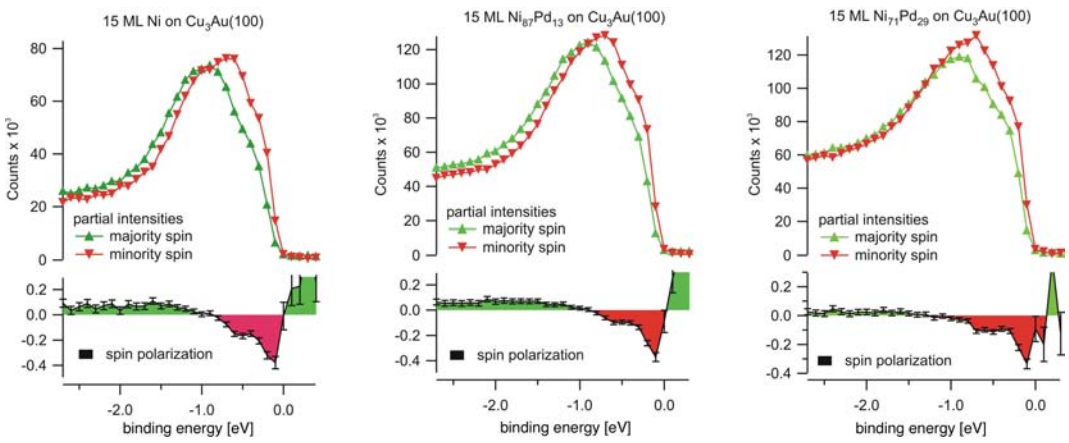

Abbildung 3: Spin- und winkelaufgelöste Photoemissionsspektren von NiPd-Legierungsfilmen in normaler Emission aufgenommen. Die Photoenenenergie beträgt 20 eV. Die Messungen erfolgten am Strahlrohr U 125 1 PGM bei BESSY.

Die ersten spinpolarisierten Photoemissionmessungen an epitaktischen NiPd-Legierungen konnten im Herbst 2003 durchgeführt werden. Die Messungen fanden an an 15 Monolagen dünnen Legierungsfilmen statt. Die Nickelkonzentration wurde zwischen 100% und 71% eingestellt, da in diesem Konzentrationsbereich eine Senkrechtmagnetisierung vorliegt. Schon die spinintegrierten Photoemissionsspektroskopiemessungen (s.o) zeigten ausgeprägte Übergänge an der Fermieenergie und eine von der Photonenanregungsenergie abhängige Dispersion. Allerdings zeigten sich keine ausgeprägten Änderungen mit der Konzentration, wie sie z.B. durch eine reduzierte Austauschaufspaltung oder erhöhte Spin-Bahn-Wechselwirkung induziert über den vergröerten Pd-Anteil in der Legierung hervorgerufen werden könnten. Die spinaufgelösten Messungen stellen einen Ansatzpunkt zur Klärung dieser Fragestellung da, da die Aufspaltung der Spektren in Majoritäts- und Minoritätsbeiträge natürlich auch einen erleichterter Nachweis ber eine relative Änderung beider Spinkanäle ermglicht.
Abbildung 3 zeigt die spinaufgelösten Messungen für verschiedene Legierungszusammensetzungen bei einer Anregungsenergie von 20 eV. Im Falle des Nickelfilms erkennt man eine negative Spinpolarisation, wie sie auch von Meyer et al. [3] berechnet worden ist. Die Änderung in den Spektren mit zunehmendem Pd-Anteil ist nur geringfügig und stimmt somit mit den bisherigen Messungen überein. Man erkennt aber das die energetische Aufspaltung von Minoritäts- und Majoritätsübergang abnimmt. Im Fall fr reines Nickel liegt sie bei 0.3 eV und fr die Legierung $Ni_{71}Pd_{29}$ nur noch bei 0.2 eV. Des weitern erkennt man eine leichte Verbreitung der Übergänge mit zunehmenden Pd-Anteil. Ob dies auf die chemische Unordnung, strukturelle Änderungen oder die geänderte Spin-Bahnkopplung oder Auftauschaufspaltung zurückgeführt werden kann, lässt sich zu diesem Zeitpunkt noch nicht klären. Die Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Ebert (TU München) ist gegenwärtig dabei, das bestehende KKR-Programmpaket so zu erweitern, dass auch *k*-aufgelöste Photoemissionsspektren direkt berechnet werden können. Bislang ist nur die Berechnung von *k*-integrierten Spektren (hochenergetische Photoemission) möglich.

6.2 Magnetische Kopplung in epitaktischen FM/AFM-Schichtsystemen

Eine Materialklasse mit zunehmend technologischer Relevanz sind Antiferromagneten (AFM), die in der Spinelektronik als magnetische Ankerschichten einge-setzt werden. Dabei spielt der Mechanismus der Austauschanisotropie eine zentrale Rolle. Zu den intrinsischen Eigenschaften der Antiferromagneten ist im Gegensatz zu Ferromagneten (FM) wenig bekannt. Aus diesem Grund haben wir die Untersu-chungen der binären Legierungsfilme auch auf antiferromagnetische Systeme des Typs FeMn und NiMn ausgedehnt. Diese Filme werden epitaktisch auf (001) und (111) Oberflächen von Cu und Cu_3Au aufgewachsen. Es zeigt sich, da ähnlich wie bei Ni_xPd_{1-x} auch hier zumindest für die (001) Orientierung ein epitaktisches Lagen-Wachstum bis zu relativ hohen Schichtdicken (wenigstens $15-20$ ML) erreicht werden kann. Dies wird durch regelmässige Intensitätsoszillationen in der streifen-den Elektronenbeugung (MEED) nachgewiesen. Bei der (111) Richtung sind zur Vermeidung von Zwillingsbildungen Surfactants erforderlich. Die FeMn-Filme auf Cu(001) zeigen den Einsatz einer antiferromagnetischen Ordnung bei 300 K bei etwa 1011 ML Schichtdicke, in Übereinstimmung mit den von Kuch et al. (MPI Halle) zeitgleich erhaltenen Resultaten [4].
Die Messung der magnetischen Eigenschaften des AFM erfolgt zweckmässigerweise über eine FM "Kontrastschicht", in diesem Fall einem Co-Film. Bei Übergang in den AFM Zustand steigt die Koerzivität der Kontrastschicht deutlich an. Dadurch ist es möglich, Aussagen über die Ordnungstemperatur des AFM zu gewinnen. Diese Ergebnisse müssen allerdings aufgrund von wechselseitigen Beeinflussungen AFM-FM (proximity effect) mit Zurückhaltung bewertet werden. Zum einen wird nur die Blocking-Temperatur und nicht direkt die Néel-Temperatur des AFM gemessen. Zum anderen kann diese kritische Temperatur durch die Austauschwechselwirkung mit dem FM verändert werden. Ein Vergleich der kritischen Tempera-tur von einkristallinen $Fe_{50}Mn_{50}$ Schichten mit einer und zwei Grenzflächen zu ferromagnetischen Co-Schichten zeigt eine deutliche gegenseitige Beeinflussung von AFM und FM. Die gemessene kritische Temperatur des AFM wurde hierbei durch die zweite FM-Grenzschicht zu niedrigeren Werten verschoben. Es sollen hier noch weitere XMLD-Messungen erfolgen, die direkt den magnetischen Zustand des AFM ohne magnetische Kontrastschicht adressieren können.

6.3 Wachstumssteuerung magnetischer Schichten durch Surfactants

Die aus technologischer Sicht interessante (111) Orientierung ist häufig für ein la-genweises Wachstum unzugänglich, da die hohe Beweglichkeit auf der Oberfläche und die ABC-Stapelfolge des fcc-Gitters zur Zwillingsbildung und in der Folge zu einem Inselwachstum führt. Dies äussert sich in einer Unterdrückung der MEED-Oszillationen und wurde auch direkt in unseren STM-Experimenten nachgewiesen. Benutzt man nun eine Vorbedeckung der Oberfläche mit Antimon (Sb), das als Surfactant aus der Halbleiterepitaxie bekannt ist, so lässt sich der Wachstumsprozess drastisch beeinflussen. Ein vergleichbares Verhalten wurde auch bereits mit Pb beobachtet [5]. Bereits eine Vorbedeckung von 0.30.5 Monolagen Sb ist ausreichend, um deutliche MEED-Oszillationen während des Wachstums einer Co- oder Ni-Schicht zu erreichen. Auf diese Weise kann ein Lagenwachstum von Ni/Cu(111) bis zu Schichtdicken > 10 ML erreicht werden.
In jeder Ni-Lage werden dabei nur wenige Prozent(4%) Sb-Atome eingebaut – Sb verhält sich in diesem Fall wie ein Surfactant und verbleibt während des Wachstums der Ni-Schicht an der Oberfläche. Die magnetischen Eigenschaften des Systems werden durch die Präsenz des Sb nicht entscheidend geändert. So findet man einen inversen Spinreorientierungsübergang bei

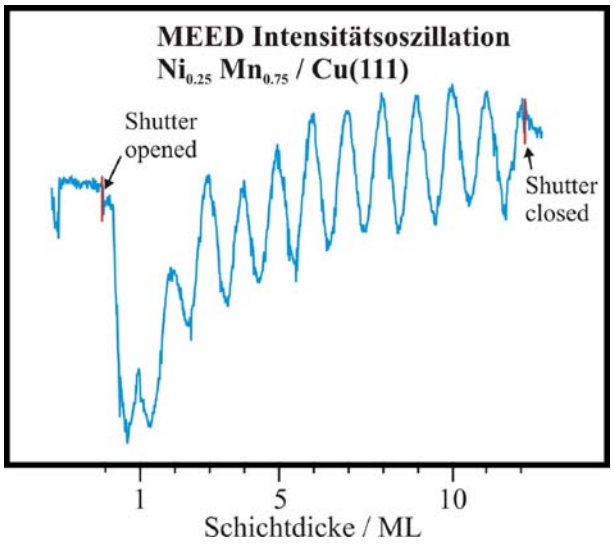

Abbildung 4: MEED Intensitätsoszillation des $(0,0)$ *Beugungsreflexes bei Kosublimation von Ni und Mn auf einen Cu(111) Kristall. Die Substrattemperatur lag bei 300 K. Der Kristall hatte eine Vorbedeckung mit 0.5 ML Sb. Die periodische Intensitätsoszillation weist auf ein Lagenwachstum der NiMn Schicht hin.*

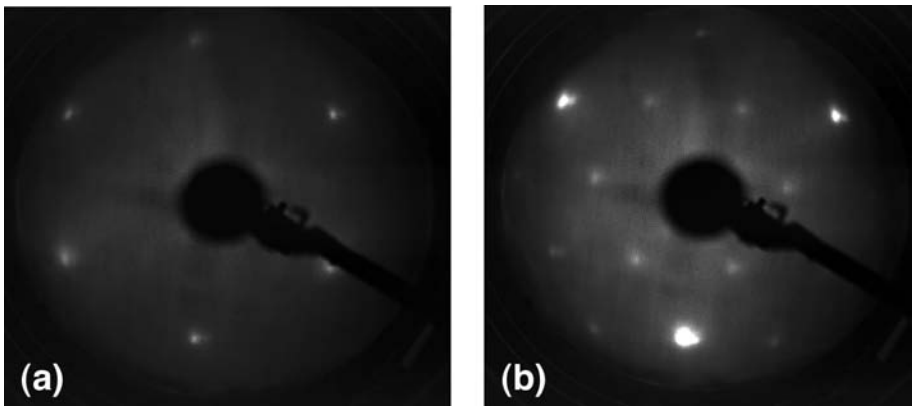

Abbildung 5: (a) LEED Aufnahme eines Ni_2Mn *Films auf Cu(111) bei Raumtemperatur direkt nach der Präparation. Die* $p(1\times1)$ *Beugungsstruktur zeigt, dass der Film pseudomorph auf dem Cu(111) wächst. (b) Nach vierminütigen Tempern des Films bei* $350°C$ *bildet sich eine Überstruktur im LEED Bild aus, die auf eine erfolgte chemische Ordnung des Films schlieen lässt.*

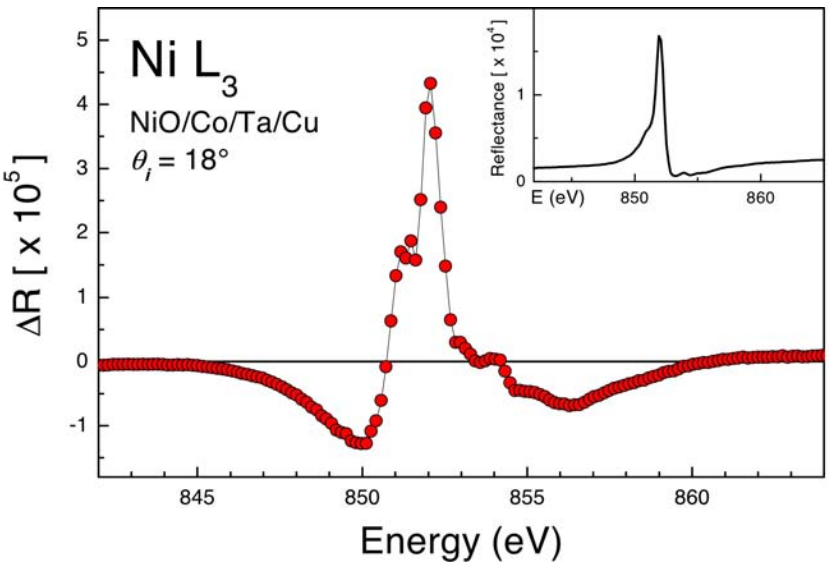

Abbildung 6: Gerader magnetooptischer Effekt in der Reflexion an der Ni L_3-Kante von polykristallinen NiO-Schichten. Das Signal spiegelt die antiferromagnetische Spinordnung innerhalb des NiO wider.

Ni/Cu(111) bei ca. 7 – 8 ML. Seine Lage entspricht dabei dem im System Si(111)/Cu/Ni/Cu [6].
Erste weiterführende Experimente zeigen, da dieser Ansatz auch für das Wachstum von Legierungsschichten verwendet werden kann. So wurden auf diese Weise erstmals Ni_xMn_{1-x}/Cu(111) (Fig. 4) und Ni_xPd_{1-x}/Cu(111) Schichtsysteme hergestellt. Das System NiMn ist hier insbesondere wegen seiner antiferromagnetischen Ord-nung und der relativ hohen Néel-Temperatur von Bedeutung. Durch thermische Nachbehandlung konnte bei diesem System auch eine teilweise chemische Ordnung erzielt werden (Fig. 5a,b). Eine interessante Fragestellung ist der Zusammenhang zwischen chemischer Ordnung, magnetischen Eigenschaften, und elektronischer Struktur.

6.4 Magnetooptik im VUV und weichen Röntgenbereich

Magnetooptische Messungen stellen eine Ergänzung zu elektronenspektroskopi-schen Experimenten dar. Da hierbei die gestreuten Photonen detektiert werden, können auch Messungen in relativ hohen externen Magnetfeldern durchgeführt werden. Von besonderem Interesse ist dabei eine Reflexionsgeometrie, die im Gegensatz zu Transmissionsexperimenten die Handhabung beliebiger Proben – speziell auch technologischer Systeme – gestattet. Aus diesem Grund wurden in enger Zusammenarbeit mit BESSY die Grundlagen der Magnetooptik im weichen Röntgenbereich (L-Kanten) und VUV-Bereich (M-Kanten) untersucht. Dabei konnten die aus dem sichtbaren Bereich bekannten Kerr-Effekte auch im weichen Röntgenbereich nachgewiesen werden. Je nach Material und Lichtpolarisation (linear oder zirkular polarisiert) beobachtet man magnetodichroische Effekte in der Grössenordnung von 20 – 30 %. Die Effekte sind spezifisch für die jeweilige Absorptionskante und bieten damit eine einmalige Kombination aus chemischer, struktureller, und magnetischer Information. Sie eignen sich daher insbesondere für die Untersuchung technologisch relevanter Proben.

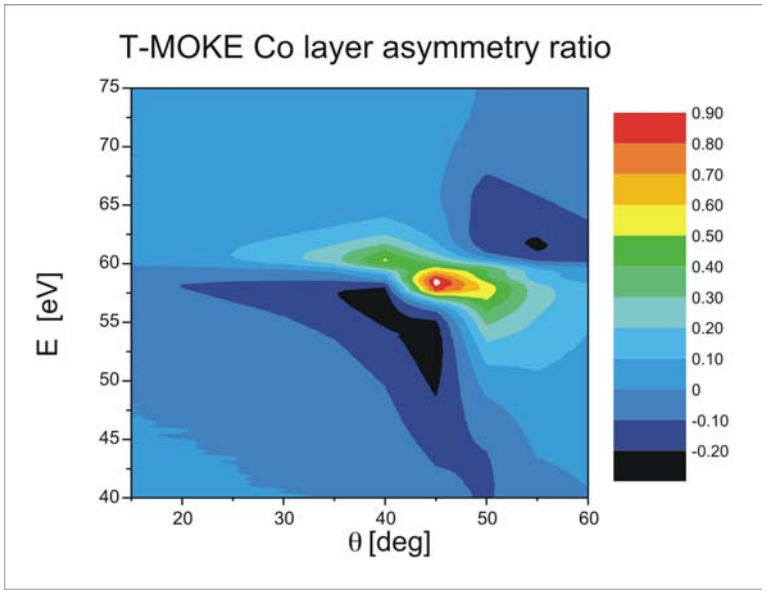

Abbildung 7: Winkel- und Energieabhängigkeit des TMOKE-Signals an der Co M-Kante eines polykristallinen Co-Films. Die Farbdarstellung kodiert den Zahlenwert des TMOKE-Signals.

Die o.g. Kerr-Effekte (L-MOKE mit zirkular polarisierter, T-MOKE mit linear polarisierter Strahlung) skalieren mit der Magnetisierung M, d.h. auch mit ihrem Vorzeichen. Darüber hinaus gibt es aber noch magnetooptische Effekte, die nur vom Betrag der Magnetisierung, d.h. von $|M|$ abhängen. Nach einer Vorhersage von P.M. Oppeneer (IFW Dresden) sollte ein solches Phänomen auch in der Reflexion an Antiferromagneten ein mebares Signal ergeben. Dies wurde auch tatsächlich in unseren Experimenten an NiO und NiMn nachgewiesen (Abb. 5) [7]. Die Spektren zeigen deutliche Unterschiede zwischen dem metallischen (NiMn) und oxidischem System (NiO). Letzteres weist Feinstrukturen auf, die wahrscheinlich auf Multipletts zurückzuführen sind. Eine weitere theoretische Analyse der Ergebnisses zeigt auerdem, da sich aus den spektralen Daten Informationen zur lokalen spinaufgelösten Zustandsdichte des Antiferromagneten gewinnen lassen. Dieser Aspekt soll im Verlauf des Projekts noch weiter verfolgt werden. Die oben dargestellte Methode ist komplementär zum bekannten XMLD in der Absorption.
Die Untersuchungen an den M-Kanten der 3-d Ferromagneten Fe, Co und Ni liefern ein überraschendes Ergebnis. Hier kann die TMOKE-Asymmetrie sogar Werte von mehr als 80% annehmen (Abb. 7). Die grössten Effekte finden sich im Bereich um $\Theta = 45°$ Einfallswinkel, d.h. in der Nähe des Brewsterwinkels. Dies kann qualitativ auf der Basis der magnetooptischen Gleichungen verstanden werden.

6.5 Röntgen-MOKE Untersuchungen an Spin-Valve Systemen

Die oben genannten LMOKE (zirk. pol. Licht, M parallel Streuebene) und TMOKE (lin. pol. Licht, M senkrecht Streuebene) Effekte wurden zur Untersuchung von technologischen Proben (Leitprojekt Magnetoelektronik) eingesetzt. Dabei handelt es sich um sog. SpinValve Systeme, die für den Einsatz in magnetischen Sensoren vorgesehen sind. Sie weisen eine relativ komplizierte Stapelfolge, bestehend aus antiferromagnetischer Ankerschicht, GMR Dreilagenschichtsystem, sowie Puffer- und Abdeckschichten auf. Diese Stapelfolge spiegelt sich in der

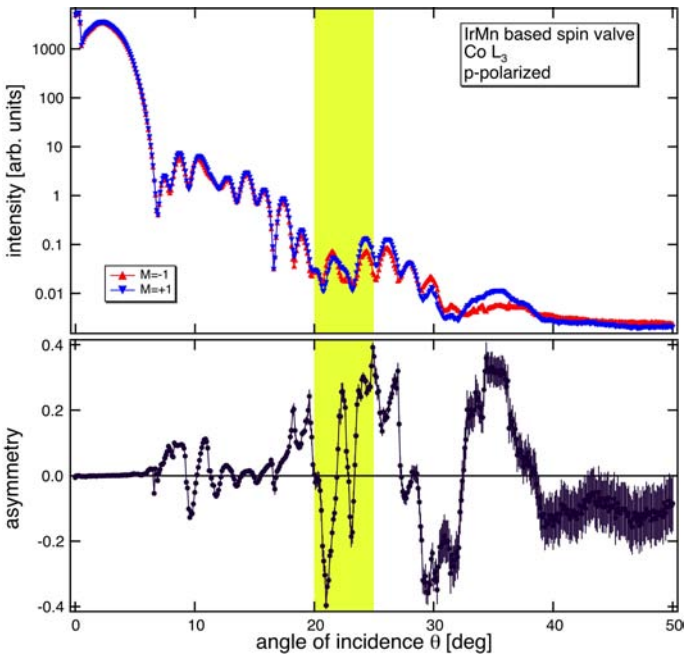

Abbildung 8: Winkelabhängigkeit der gestreuten Intensität (oben) und des TMOKE-Signals an der Co L_3 Kante (unten) eines SpinValve Schichtsystems. Bemerkenswert sind die hohen TMOKE Asymmetrien im Winkelbereich zwischen 20...40°.

stark strukturierten Winkelabhängigkeit des gestreuten Lichts wider (Fig. 8). Eine Modellierung des Intensitätsverlaufs mit Hilfe existierender Reflektometrieprogramme gelingt aufgrund der Komplexität des Schichtsystems bisher nur unvollständig. Ausserdem sind die optischen Konstanten in dem erforderlichen Energiebereich nicht genau bekannt. Das magnetooptische Signal (TMOKE) weist insbesondere im Winkelbereich von $20 - 40°$ eine starke Strukturierung auf, die mit den Reflexionsextrema korreliert ist. Da diese Extrema durch Interferenz der an den einzelnen Schichten gestreuten Amplitudenbeiträgen entsteht, liegt der Schluss nahe, da sich diese Interferenzen auch im magnetischen Signal bemerkbar machen sollten.
Dies ist tatsächlich der Fall, wie die Magnetfeldabhängigkeit des TMOKE-Signals beweist (Fig. 9). Zunächst erwartet man ein Verhalten wie bei $\Theta = 25°$. Diese Messkurve entspricht in etwa einer Magnetisierungskurve, wie sie auch mit klassischen Magnetometern an diesem System erhalten wird. Sie zeigt das Schalten der magne-tisch weichen Schicht bei kleinen Feldstärken. Die aus dem Nullpunkt verschobene Hysterese bei grösseren Feldstärken wird von der magnetisch harten Schicht verursacht, die zusätzlich durch eine unidirektionale Anisotropie (exchange bias) magnetisch "vorgespannt" wird. Letzteres geschieht durch die Ankopplung an den Antiferromagneten.
Durch eine leichte Reduktion des Streuwinkels Θ kann der Kurvenverlauf jedoch deutlich geändert werden. Insbesondere ändert sich der Gesamthub bei maximalem Feld (s. $\Theta = 20°$) und kann für ausgewählte Streuwinkel ganz zum Verschwinden gebracht werden. Die Vorzeichenumkehr der einzelnen Beiträge ist eine direkte Folge der Interferenz. Zur Interpretation mu man berücksichtigen, da sowohl die weiche als auch die harte Schicht Co enthalten. Dieses Verhalten kann auch zum Vorteil genutzt werden, um selektiv das magnetische Verhalten einer bestimmten Schicht innerhalb des Stapels zu bestimmen, oder um eine magnetische Tiefenprofilanalyse zu erstellen.

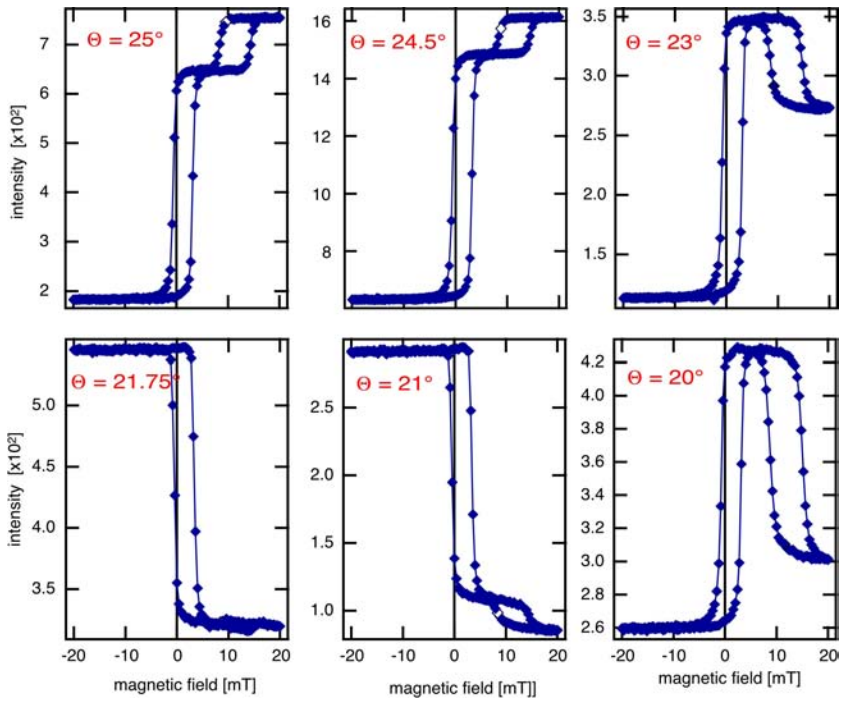

Abbildung 9: Magnetfeldabhängigkeit des TMOKE-Signals an der Co L_3 Kante des in Fig. 7 untersuchten Schichtsystems. Die hystereseartigen Kurven kommen durch das Schalten der magnetisch weichen und harten Schicht innerhalb des SpinValves zustande.

6.6 MCDAD in off-normal Photoemissionsgeometrien

Die Verwendung von Display-Spektrometern wie auch das im Projekt beschaffte Gerät – ermöglicht es, grössere k-Bereiche parallel abzutasten. Gewöhnlich wird diese Technik für das sog. "Fermi-Surface Mapping" verwendet. Sie sollte sich aber auch dazu eignen, magnetodichroische Effekte in der Photoemission als Funktion des Wellenvektors zu analysieren. Dabei werden zwei $I(E,k_{||})$-Verteilungen unmittelbar hintereinander für entgegengesetzte Lichthelizität und/oder Magnetisierung aufgenommen. Aus diesen beiden Verteilungen wird dann eine Differenz- oder Asymmetrieverteilung $A(E,k_{||})$ berechnet. Mit dem Display-Mode des Spektrometers können neben Transmissionseffekten an Cu-Oberflächen, die durch spinabhängige Streuung der Photoelektronen an der Oberflächenbarriere herrühren, auch MDAD-Effekte untersucht werden. In Fig. 10 ist ein Beispiel für ein MCDAD-Experiment (Magnetischer Zirkulardichroismus in der Winkelverteilung der Photoelektronen) an epitaktischen Co(001) Schichten dargestellt. Diese Experimente fanden bei ELETTRA statt, da gegenwärtig nur dort hochbrillante zirkular polarisierte Synchrotronstrahlung im Energiebereich unter 50 eV angeboten wird. Die Resultate zeigen, dass sich prinzipiell aussagekräftige MCDAD-Daten auch mit Hilfe eines Display-Analysators erhalten lassen, falls die magnetodichroischen Intensitätsasymmetrien nicht zu klein ($A < 1\%$) sind. In Abb. 10 sieht man die Dispersion von besetzten und unbesetzten Zuständen. Die hellen (dunklen) Linien entsprechen einer positiven (negativen) Asymmetrie. Einzelne Asymmetriespektren für einen festen Emissionswinkel erhält man durch einen vertikalen Schnitt in Fig. 10. Auch hier sind für eine weitergehende Interpretation Photoemissionsrechnungen vonnöten, da der Endzustand des emittierten Photoelektrons durch einen zeitinvertierten LEED-Zustand beschrieben werden muss.

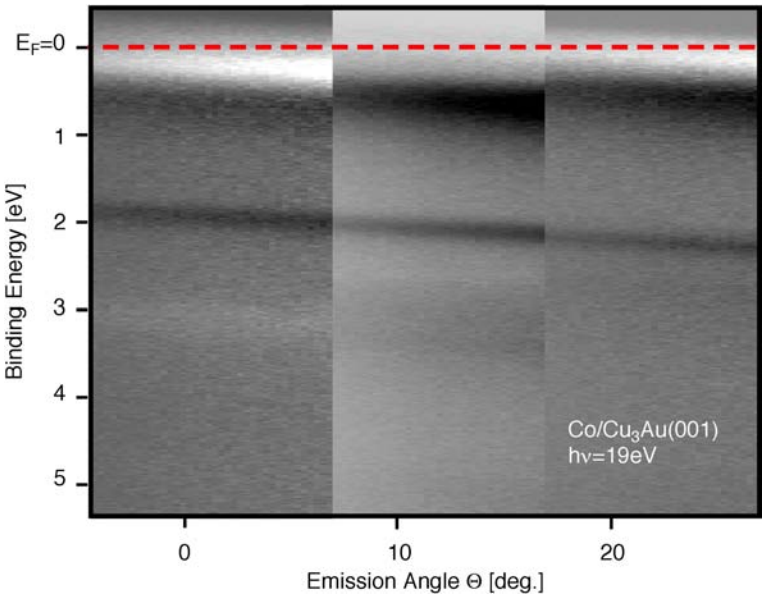

Abbildung 10: Magnetischer Zirkulardichroismus in der Photoemission (MCDAD) an epitaktischen Co-Schichten als Funktion des Emissionswinkels Θ. Auch ausserhalb der Normalemission $\Theta = 0^\circ$ wird ein MCDAD-Signal beobachtet, das mit $k_{||}$ von der Fermikante zu höheren Bindungsenergien dispergiert.

6.7 TMR-Schichtsysteme: MgO/Fe/GaAs(001)

Der Tunnelmagnetowiderstand (TMR) ist neben dem Riesenmagnetowiderstand (GMR) einer der wichtigsten spinabhängigen Transporteffekte. Der Versuch, dieses Phänomen besser zu verstehen, führt über die Untersuchung epitaktischer und wohlcharakterisierter Modellsysteme. Ein solches Modellsystem ist Fe/MgO/Fe, für das unter günstigen Bedingungen TMR-Werte von ca. 1000 % vorhergesagt wurden [8]. Andererseits werden experimentell oft wesentlich kleinere Werte gefunden.

Um einen Beitrag zur Klärung dieser Diskrepanz liefern zu können, wurden spinaufgelöste Photoemissionsuntersuchungen an dem Fe/MgO-Schichtsystem durchgeführt. Dabei wurde schrittweise vorgegangen. In einem ersten Schritt wurden zunächst 10 - 15 Monolagen dicke Fe(001)-Filme auf der (4×6)-rekonstruierten GaAs(001) aufgewachsen. Die spinaufgelösten Spektren (Abb. 11) stimmen weitgehend mit früheren Ergebnissen [9] überein und können qualitativ im Rahmen von Interband-Übergängen innerhalb der Bulk-Bandstruktur von Fe erklärt werden. Aufgrund der gewählten experimentellen Geometrie (normale Emission, 45° Lichteinfall, *p*-polarisiertes Licht) werden sowohl Δ_1 und Δ_5 Bandsymmetrien angeregt – die Trennung der spektralen Beiträge gelingt mit Hilfe der Spinpolarisation und durch Vergleich mit vollrelativistischen Bandstrukturrechnungen, die mit Hilfe des o.g. Münchner KKR-Programmpakets errechnet wurden.

In einem zweiten Schritt wurde auf diese Fe(001)-Oberflächen epitaktisch MgO mit Schichtdicken im Monolagen- und Submonolagenbereich aufgewachsen. Dazu wurde metallisches Mg verdampft und in einem Sauerstoff-Partialdruck von $p_{0_2} \simeq 5 \times 10^{-8}$ mbar auf der Oberfläche abgeschieden. Der Sauerstoff wurde durch eine Düse in unmittelbare Nähe der Probenoberfläche gebracht, um das Restvakuum in der UHV-Kammer möglichst niedrig zu halten. Die LEED-Untersuchungen zeigen, dass das MgO im Monolagenbereich die Gitterstruktur des Fe

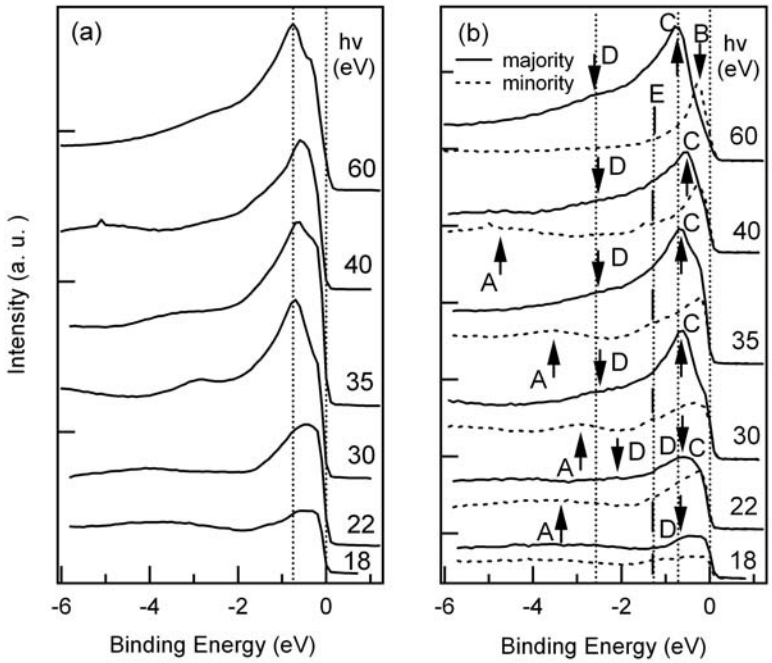

Abbildung 11: Spinintegrierte (a) und spinaufgelöste Photoemissionspektren (b) an einer sauberen Fe(001)-Oberfläche als Funktion der Photonenenergie hν. Die Strukturen A – D können mit Interband-Übergängen in der Volumenbandstruktur identifiziert werden.

annimmt, wie dies auch bereits aus STM-Untersuchungen bekannt ist.
In den spinaufgelösten Photoemissionsspektren (Abb. 12) treten mit der MgO-Bedeckung deutliche Änderungen auf. Es bildet sich eine dominante spektrale Struktur bei ca. 6 eV Bindungsenergie aus (hier nicht gezeigt), die vermutlich mit den O 2p Zuständen verknüpft sind. Darüber hinaus beobachtet man eine Erhöhung des Sekundärelektronenuntergrunds, der durch Streuung der Photoelektronen in der kristallin etwas schlechter geordneten MgO-Schicht entsteht. Durch direkten Vergleich der partiellen Spinspektren sieht man, dass die stärksten Änderungen im Minoritätsspinkanal unterhalb von $h\nu = 40$ eV auftreten, während die Änderungen im Majoritätsspinkanal in der Nähe von E_f erst unterhalb von $h\nu = 30$ eV deutlich werden. Es fällt auf, dass diese Bereiche zum Teil mit Bandlücken in den Endzuständen verbunden sind. Dies deutet darauf hin, dass durch die MgO-Adsorption Oberflächen- und Halbraumzustände der Fe(001)-Oberfläche beeinflusst werden, die in diesen Photonenenergiebereichen ein stärkeres spektrales Gewicht haben. Diese Hypothese wird z.Zt. noch weiter überprüft.

6.8 Halbmetallische Ferromagneten

Halbmetallische Ferromagnete zeichnen sich durch eine besondere Eigenheit der elektronischen Struktur aus: die Minoritätsspinzustände weisen eine vollständige oder partielle Lücke im Bereich der Fermienergie E_f auf. Dadurch erhält man eine hohe Spinpolarisation P. Ein hoher Wert $P(E_f)$ ist hochinteressant für Anwendungen als Elektrodenmaterial in der Spinelektronik, z.B. in magnetischen Tunnelkontakten oder in Ferromagnet/Halbleiter-Heterostrukturen. Diese Anwendungen setzten allerdings ein umfassendes Verständnis der elektronischen Strukturen

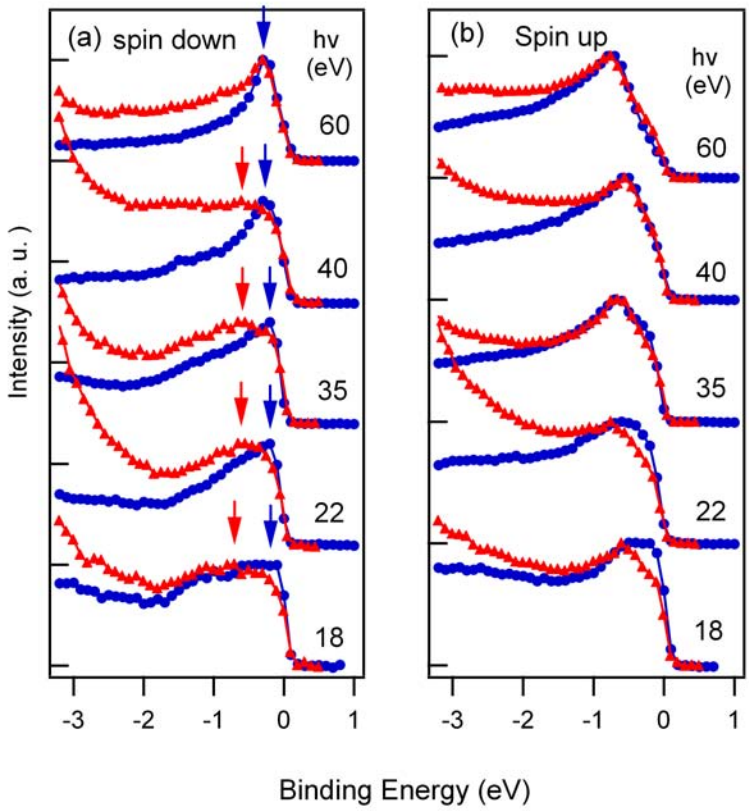

Abbildung 12: (a) Minoritäts- und (b) Majoritätsspin Photoemissionsspektren des Systems 1 ML MgO/Fe(001) bei verschiedenen Photoenenenergien (h$\nu = 60, 40, 35$, and 18 eV), des Systems 1.5 ML MgO/Fe bei h$\nu = 22$ eV (beide rot), und des sauberen 15 ML Fe Films (blau). Die Spektren wurden auf die Maxima der entsprechenden Fe-Spektren normiert.

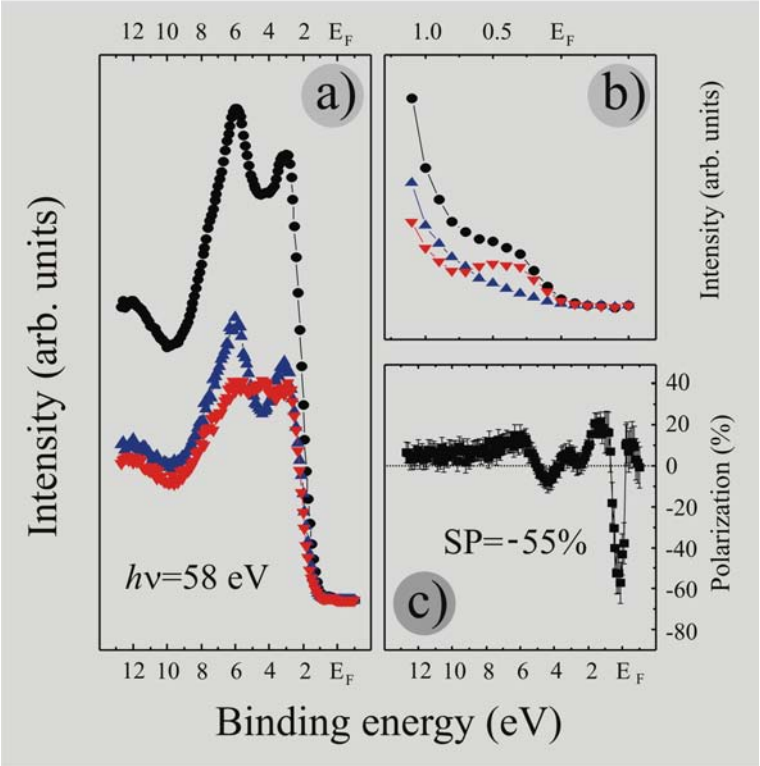

Abbildung 13: (a) Spinaufgelöste Photoemissionsspektren (spin up: ▲ ; spin down: ▼ ; spinintegrierte Intensität: •) eines Fe_3O_4(100) Films aufgenommen bei einer Photonenenergie von $h\nu = 58eV$ in Normalemission, (b) der Bereich um die Fermienergie E_f, und (c) die Photoelektronen-Spinpolarisation als Funktion der Bindungsenergie im System Fe_3O_4(100)/MgO(100).

im Volumen und an den Grenzflächen voraus. Gerade letzterer Aspekt ist von entscheidender Bedeutung, da sich an der Grenzfläche elektronische Zustände ausbilden können, die in der Bandlücke liegen und diese schliessen können [10].
Ein besondere Materialklasse stellen in diesem Zusammenhang ferromagnetische Oxide, z.B. CrO_2 oder Fe_3O_4 dar. An solchen Systemen wurden erfolgreich spinaufgelöste Photoemissionsuntersuchungen in Zusammenarbeit mit den Arbeitgruppen Güntherodt (Aachen) und Rüdiger (Konstanz) durchgeführt (No. FKZ 05KS1PAA/7). Die Ergebnisse werden ausführlich in den Abschlussberichten dieser Arbeitsgruppen beschrieben. Ein exemplarisches Beispiel ist in Abb. 3 dargestellt und zeigt die Resultate an einem epitaktischen $Fe_3O_4(100)$ Film, insbesondere den Verlauf der Photoelektronen-Spinpolarisation mit der Bindungsenergie. Die Spinpolarisation an der Fermienergie beträgt maximal $P \simeq -55\%$.
Mit dem Wechsel des Projektleiters an das Forschungszentrum Jülich im Juni 2003 ergab sich auch die Möglichkeit, dortige Themen in das Projekt zu integrieren. Dies betrifft insbesondere Untersuchungen an *Heusler-Legierungen* und *ferromagnetischen Halbleitern*. Beides sind Materialklassen mit einem hohen Anwendungspotential in der Spinelektronik. Heusler-Legierungen stellen eine besondere Form der halbmetallischen Ferromagneten dar, wobei sich das Interesse in Jülich besonders auf die Voll-Heusler-Legierungen konzentriert. In diesem Zusammenhang werden dort Schichten aus Co_2CrAl, Co_2(Fe,Cr)Al, bzw. Co_2CrSi per Magnetronsputtern hergestellt. Parallel dazu wurde am IFW Dresden eine Initiative gestartet, im dortigen Kri-

stallzuchtlabor Einkristalle dieser Verbindungen herzustellen. Letzteres erweist sich allerdings als komplexes Vorhaben, da während des Abkühlens der Kristallrohlinge Entmischungsvorgänge und Phasenseparationen einsetzten, die verhindern, dass sich primär die gewünschte $L1_2$-Phase ausbildet. Die bisherigen XMCD-Resultate an den polykristallinen Schichtsystemen zeigen überwiegend noch magnetische Momente, die unterhalb der aus der Slater-Pauling-Kurve erwarteten Werte liegen. Dies deutet darauf hin, dass sich die Schichten z.T. noch in einer $B2$-Kristallstruktur befinden, die dem as-grown Zustand entspricht. Der Übergang in die $L1_2$-Phase ist vermutlich durch eine geeignete Wärmebehandlung zu erreichen, an der gegenwärtig noch gearbeitet wird.
Magnetische Halbleiter sind ein anderer Weg, um halbleitenden Ferromagnet/Nichtmagnet-Heterostrukturen zu realisieren. Hier möchte man vor allen Dingen Halbleiter mit einer langreichweitigen ferromagnetischen Ordnung weit oberhalb der Raumtemperatur einsetzen. Die Arbeiten im IFF konzentrieren sich gegenwärtig auf Mn- und Fe-dotiertes Ge bzw. Si. Dabei konnte bisher bei (Mn, Fe)-Konzentrationen zwischen 5% und 8% in Ge tatsächlich ein ferromagnetisches Signal bei Raumtemperatur gefunden werden. Gegenwärtig finden gerade XMCD und EXAFS-Untersuchungen statt, um den Magnetismus der chemischen Komponenten, sowie die chemische Nahordnung um die Mn- bzw. Fe-Atome aufzuklären. In diesem Zusammenhang ist es sehr wichtig, die Bildung ferromagnetischer Ausscheidungen ausschliessen zu können. Diese können ein ferromagnetisches Signal vortäuschen, dass nicht ursächlich mit dem Halbleiter verknüpft ist.

6.9 Magnetische Nanostrukturen: Gefüllte Kohlenstoff-Nanoröhren

Im Bereich des Magnetismus sind heute insbesondere Systeme mit reduzierten Dimensionen, z.B. magnetische Quantendrähte und Quantenpunkte, von grossem Interesse. Weit verbreitet ist die Präparation solcher Strukturen auf Oberflächen [11]. Darüber hinaus gibt es eine Reihe von Verfahren zur Herstellung von Quantendrähten in anderen Umgebungen. Am IFW Dresden wurde mit der Arbeitsgruppe des Projektleiters im Rahmen eines Forschergruppenprojekts eine CVD-Methode zur Herstellung von magnetisch gefüllten Kohlenstoff-Nanoröhren entwickelt [12]. Während der Pyrolyse wird ein Metallorganikum (Ferrocen, Cobaltocen, oder Nickelocen) bei hohen Temperaturen ($\simeq 1000°C$) im Reaktor zersetzt und dabei vielwandige Kohlenstoff-Nanoröhren gebildet. Das Metall wird im Zentrum der Nanoröhre als drahtförmige Struktur eingebaut. Diese Drähte weisen Durchmesser von 10 - 20 nm auf und können Längen von mehreren μm erreichen. Sie sind bei Raumtemperatur ferromagnetisch [13]. Durch eine geeignete Vorbehandlung der Substrate gelingt es, diese gefüllten Nanoröhren mit überwiegend senkrechter Orientierung zu wachsen. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für aussagekräftige magnetische Messungen.
An solchen Proben wurden erste Messungen mit Röntgenabsorption- (XAS) und Röntgenemissionspektroskopie (SXE) durchgeführt. Die vorläufigen Ergebnisse zeigen, dass das Absorptionssignal des Ferromagneten gut detektierbar ist. Ein Vergleich der magnetischen Dichroismus (XMCD) Daten fr̈ verschiedene experimentelle Geometrien liefert starke Unterschiede. Insbesondere bei senkrechtem Lichteinfall und senkrechtem Magnetfeld (polare Geometrie) wird das XMCD-Signal sehr klein, obwohl die leichte Magnetisierungsachse entlang der Röhrenachse liegt. Deshalb gibt es bisher noch keine zuverlässigen Resultat zu Spin- und Bahnmomenten in diesen Quantendrähten. Dies deutet darauf hin, dass die Röhren am oberen Ende mit einer graphitischen Schicht abgeschlossen werden, die metallische paramagnetische Nanopartikel enthält. Tatsächlich findet man in SEM-Untersuchungen Hinweise auf solche graphiti-

sche Verunreinigungen. Hier sind noch weitere Untersuchungen notwendig.

7 Voraussichtlicher Nutzen

Das Vorhaben war primär auf die Entwicklung der Methodik und den Aufbau des spinpolarisierten Photoelektronenspektrometers ausgerichtet. Die bislang bearbeiteten Fragestellungen beschäftigten sich mit grundlegenden Problemen der elektronischen Struktur in neuen Materialklassen für die Spinelektronik und den Nanomagnetismus. In beiden Bereichen werden wird eine Detailkenntnis der elektronischen Strukturen immer wichtiger, um ein konsequentes "Spin-Engineering" in Bauelementen und an Grenzflächen zu ermöglichen.
Die bisherigen Ergebnisse wurden in internationalen Zeitschriften publiziert und auf internationalen Konferenzen präsentiert, und damit einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

8 Fortschritte an anderen Stellen

Inzwischen wurde ein weiteres spinauflösendes Spektrometer bei BESSY in Betrieb genommen (O. Rader, W. Gudat). Darüber hinaus wurde ein ähnliches Gerät vom MPI f. Mikrostrukturphysik in Halle (W. Kuch, J. Kirschner) aufgebaut. Weitere Anlagen dieses Typs sind auch bei ELETTRA in Betrieb gegangen (G. Rossi), wo insbesondere ein besserer Zugang zu niedrigen Photonenenergien im VUV-Bereich existiert. Dies lässt eine Vielzahl von interessanten Resultaten zu magnetischen Systemen für die Zukunft erwarten.

Literatur

[1] W. Kuch and C. M. Schneider, Rep. Prog. Phys. **64** (2001) 205.

[2] U. Muschiol, M. Seider, C. M. Schneider and M.-T. Lin, J. Appl. Phys. **89** (2001) 6892.

[3] C. Meyer et al., Surf, Science **454–456** (2000) 447.

[4] W. Kuch, F. Offi, L. I. Chelaru, M. Kotsugi, K. Fukumoto and J. Kirschner, Phys. Rev. B **65** (2002) 140408(R).

[5] J. Camarero, J. J. d. Miguel, T. Graf, R. Miranda, W. Kuch, M. Zharnikov, A. Dittschar, C. M. Schneider and J. Kirschner, Surface Sci. **402-404** (1998) 346.

[6] G. Gubbiotti et al., Phys. Rev. B. **56** (1997), 11073.

[7] P. M. Oppeneer, H.-C. Mertins, D. Abramsohn, A. Gaupp, W. Gudat, J. Kunes and C. M. Schneider, Phys. Rev. B **67** (2003) 052401.

[8] W. H. Butler et al., Phys. Rev. B **63** (2001) 054416.

[9] E. Kisker et al., Phys. Rev. B **31**(1985) 329.

[10] J. Galanakis, J. Phys.: Condens. Matt. **14** (2002) 6329.

[11] F. J. Himpsel, K. N. Altmann, J. N. Crain, A. Kirakosian, J.-L. Lin, A. Liebsch and V. P. Zhukov, J. Electron Spectr. Rel. Phen. **126** (2002) 89.

[12] A. Leonhardt, M. Ritschel, R. Kozhuharova, A. Graff, T. Mühl, R. Huhle, I. Mönch, D. Elefant and C. M. Schneider, Diamond Rel. Mater. **12** (2003) 790.

[13] T. Mühl, D. Elefant, A. Graff, R. Kozhuharova, I. Mönch, A. Leonhardt, M. Ritschel, P. Simon, S. Zotova-Groudeva and C. M. Schneider, J. Appl. Phys. **93** (2003) 7894.

Schlussbericht – Veröffentlichungen

Zuwendungsempfänger: Leibniz-Institut f. Festkörper- u. Werkstoffforschung

Projektleitung: Dr. C.M. Schneider

Elektronische und mikromagnetische Struktur in neuen magnetoelektronischen Materialien

1. *Magnetic Dichroism in Co Films on Cu(100) using Unpolarized Light: A Thickness and Temperature Dependent Study*

   X.-Y. Gao, M. Salvietti, W. Kuch, C.M. Schneider, and J. Kirschner

   J. Electron Spectr. Rel. Phenom. **113** (2001) 137

2. *Magnetic Circular Dichroism in Valence Band Photoemission*

   W. Kuch and C.M. Schneider

   Rep. Prog. Phys. **64** (2001) 147

3. *Electronic Structure of Epitaxially Grown Ni_xPd_{1-x} Alloy Films on $Cu_3Au(100)$*

   U. Muschiol, M. Seider, M.-T. Lin, and C.M. Schneider

   J. Appl. Phys. **89** (2001) 6892

4. *Resonant Magnetic Scattering and Soft X-Ray L-MOKE from Co/Cu Multilayers*

   M. Hecker, U. Muschiol, C.M. Schneider, H.-Ch. Mertins, D. Abramsohn, and F. Schäfers

   J. Magn. Magn. Mater. **240** (2002) 520

5. *Strain-Induced Magnetic Anisotropies in Ultrathin Epitaxial Ni_xPd_{1-x} Alloy Films*

   F. Matthes, M. Seider, and C.M. Schneider

   J. Appl. Phys. **91** (2002) 8144

6. *X-Ray Absorption Spectra at the Ru, Mn-$L_{2,3}$ edges and Long Range Ferromagnetism in $SrRu_{(1-x)}Mn_xO_3$ Solid Solutions*, $0 \leq x \leq 0.5$

   R.K. Sahu, Z. Hu, M.L. Rao, S.S. Manoharan, T. Schmidt, B. Richter, M. Knupfer, M.S. Golden, J. Fink, and C.M. Schneider

   Phys. Rev. B **66** (2002) 144415.

7. *Access to Buried Antiferromagnetic Films Via X-ray Magneto-Optical Reflection Spectroscopy*

   P.M. Oppeneer, H.-Ch. Mertins, A. Gaupp, D. Abramsohn, W. Gudat, J. Kuneš, and C.M. Schneider

   Phys. Rev. B **67** (2003) 052401

8. *Soft X-Ray L-MOKE Measured from Co/Cu Multilayers at the Co $L_{2,3}$ Edges*

   M. Hecker, H.-C. Mertins, D. Abramsohn, W. Gudat, and C.M. Schneider

   J. Appl. Phys. **93** (2003) 6516

9. *Proximity Effects at the Interface between Ferromagnet and Antiferromagnet*

   F. Matthes, A. Rjevski, L.-N. Tong, L. Małkinski, Z. Celinski, and C.M. Schneider

   J. Appl. Phys. **93** (2003) 6504

10. *Understanding the XMLD and Its Magnetocrystalline Anisotropy at the $L_{2,3}$-Edges of 3d Transition Metals*

    J. Kuneš, P.M. Oppeneer, S. Valencia, D. Abramsohn, H.-Ch. Mertins, and C.M. Schneider

    J. Magn. Magn. Mater. (in press, online 02.03.2004)

11. *Layer-Selective Magnetization Reversal in GMR Layer Systems*

    M. Hecker, C.M. Schneider, P.M. Oppeneer, and H.-Ch. Mertins

    Physica B **345** (2004) 173.

12. *Spin-polarised photoemission spectroscopy of the MgO/Fe interface on GaAs(100)*

    F. Matthes, L.-N. Tong, and C.M. Schneider

    J. Appl. Phys. **95** (2004) 7240.

13. *Circular dichroism and bilayer splitting in the normal state of underdoped $(Pb,Bi)_2Sr2(Ca_xY_{1x})Cu_2O_{8+\delta}$ and overdoped $(Pb,Bi)_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$*

    S.V. Borisenko, A.A. Kordyuk, S. Legner, T.K. Kim, M. Knupfer, C.M. Schneider, J. Fink, M. S. Golden, M. Sing, R. Claessen, A. Yaresko, H. Berger, C. Grazioli, and S. Turchini

    Phys. Rev. B (in press)

14. *Magneto-Optical Polarization Spectroscopy with Soft X-Rays*

    H.-Ch. Mertins, S. Valencia, A. Gaupp, W. Gudat, P.M. Oppeneer, and C.M. Schneider

    Appl. Phys. A (in press)