

## Abstract

This dissertation presents a systematic study of thickness-dependent magnetic structures and phase transitions in helical-antiferromagnetic ultrathin lanthanide-metal films. The advance into the thickness range, where the magnetic properties are strongly altered by finite-size effects, became feasible with the development of resonant magnetic *soft* x-ray scattering using synchrotron radiation and the design and construction of an ultra-high-vacuum compatible diffractometer, carried out in this work.

The scattering process at the Ho and Dy  $M_V$  resonances was characterized in detail for the first time, including the optical parameters as well as the absolute values of the circular-dichroic and linear-dichroic components of the resonant scattering amplitude; the Ho  $M_V$  resonance reveals scattering amplitudes up to  $200 r_0$ , which is of the order of magnitude as predicted by Hannon *et al.* [Phys. Rev. Lett. **61**, 1245 (1988)], and which corresponds to a resonant enhancement of the magnetic-scattering cross section of more than seven orders of magnitude, opening up new opportunities for the study of thin films. A comparison with magnetic neutron scattering on identical samples demonstrated the enormous potential of the new method.

The thickness dependence of the magnetic structure and magnetic ordering temperature of Ho films was investigated down to a film thickness of 10 monolayers, which is of the order of the magnetic period length itself. It turned out that the magnetic structure of films thinner than about 15 monolayers is strongly altered. The development of the magnetic structure with decreasing film thickness is different for films with different interfaces, while the thickness dependence of the magnetic ordering temperature is essentially the same for all films studied, and is qualitatively different from the behavior of ferromagnets. It can be described by a phenomenological scaling law including an offset thickness  $d_0$ , which can be understood as a minimum thickness to establish the antiferromagnetic structure. This behavior appears to be a general property of long-period antiferromagnets, and can be understood on the basis of mean-field calculations.

The extremely high sensitivity of resonant magnetic scattering at the lanthanide  $M_V$  resonance even permits critical-scattering studies above the magnetic ordering temperature in ultrathin Ho films. The data give strong evidence that the films undergo a dimensional crossover in the thickness region where the magnetic ordering temperature is significantly reduced and where a strong deviation of the magnetic structure from that of the bulk has been identified.

Another and also new application of resonant magnetic soft x-ray scattering makes use of the dramatic change of the photon mean-free path at a strong resonances. The resulting tunability of the probing depth was utilized to characterize the depth-dependent magnetization profile at the first-order phase transition between the ferromagnetic and the helical antiferromagnetic phase of Dy films grown on W(110). It could be shown that the ferromagnetic structure is stabilized at the W/Dy interface, while the helical phase develops gradually in the surface region, starting at a seed layer close to the surface.

The results of the present dissertation open the way to further studies of complex magnetic structures in lanthanide-based materials.

## Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit der Schichtdickenabhängigkeit von magnetischen Strukturen und Phasenübergängen in helikal antiferromagnetischen, ultradünnen Lanthanidmetallfilmen. Mittels neuer methodischer und instrumenteller Entwicklungen im Bereich resonanter magnetischer Röntgenstreuung im weichen Röntgenbereich mit Synchrotronstrahlung, konnten magnetische Strukturen erstmals in einem Schichtdickenbereich untersucht werden, in dem sie stark von Finite-Size- und Grenzflächeneffekten beeinflusst werden.

Zur Charakterisierung des Streuprozesses an den  $M_V$  Absorptionskanten wurden sowohl die optischen Parameter als auch die Absolutbeträge der zirkulardichroischen und linear-dichroischen Beiträge zur resonanten Streuamplitude quantitativ bestimmt. An der Ho  $M_V$  Resonanz wurde eine Streuamplitude von bis zu  $200 r_0$  gefunden, welche in dieser Größenordnung von Hannon *et al.* [Phys. Rev. Lett. **61**, 1245 (1988)] vorhergesagt wurde. Dies entspricht einer resonanten Erhöhung des magnetischen Streuquerschnitts um sieben Größenordnungen und eröffnet eine Vielzahl neuer Möglichkeiten zur Untersuchung dünner Filme. Ein Vergleich der resonanten magnetischen Streuung im weichen Röntgenbereich mit magnetischer Neutronenstreuung, durchgeführt an denselben Proben, demonstriert eindrucksvoll die Sensitivität und das enorme Potential dieser neuen Methode.

Die Schichtdickenabhängigkeit der magnetischen Struktur und der Ordnungstemperatur dünner Ho Filmen wurde bis zu einer Dicke von 10 atomaren Lagen untersucht. Unterhalb einer Filmdicke von etwa 15 atomaren Lagen wird die magnetische Struktur stark von der endlichen Dicke des Kristalls und von den Eigenschaften der Grenzflächen beeinflusst. Während sich die magnetische Struktur von Filmen mit unterschiedlichen Grenzflächen beim Übergang zu dünnen Filmen unterscheidet, zeigt die Ordnungstemperatur aller hier untersuchter Systeme im Wesentlichen dieselbe Schichtdickenabhängigkeit. In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Absenkung der magnetischen Ordnungstemperatur mit der Filmdicke sich qualitativ vom bekannten Verhalten von Ferromagneten unterscheidet. Das Verhalten kann mit einem phänomenologischen Skalengesetz beschrieben werden, welches eine Offsetdicke  $d_0$  enthält, die als minimale Dicke verstanden werden kann, die benötigt wird um die antiferromagnetische Struktur zu bilden. Dieses Skalengesetz scheint eine allgemeine Eigenschaft langperiodischer antiferromagnetischer Strukturen zu beschreiben und kann auf der Grundlage einer Mean-Field Rechnung verstanden werden.

Durch die hohe Empfindlichkeit resonanter magnetischer Streuung an den  $M_V$  Kanten der Lanthanide konnte an den ultradünnen Ho Filmen magnetisch kritische Streuung oberhalb der Ordnungstemperatur über einen weiten Temperaturbereich gemessen werden. Die Daten zeigen eine starke Evidenz, dass diese Filme einen dimensional Übergang in dem Bereich zeigen, in dem die magnetische Ordnungstemperatur und die magnetische Struktur signifikant von der des Volumenkristalls abweicht.

Eine weitere neue Anwendung der resonanten Streuung im weichen Röntgenbereich nutzt die deutliche Variation der mittleren freien Weglängen der Photonen an starken Absorptionskanten. Die daraus resultierende Variierbarkeit der Informationstiefe wurde aus-

genutzt, um tiefenabhängige Profile der magnetischen Struktur während des Phasenübergangs erster Ordnung zwischen der ferromagnetischen und der helikal antiferromagnetischen Phase in Filmen von Dy/W(110) zu untersuchen. Es konnte gezeigt werden, dass die ferromagnetische Struktur an der W/Dy Grenzfläche stabilisiert wird, während die helikale Struktur ausgehend von einer komplexeren magnetischen Struktur im Oberflächenbereich zur W/Dy Grenzfläche wächst.

Die in dieser Dissertation erzielten Resultate eröffnen neue Perspektiven für die Untersuchung komplexer magnetischer Strukturen in Lanthanid-basierten Materialien.