

## Methoden moderner Röntgenphysik: Streuung und Abbildung

G. Grübel, O. Seeck, L. Müller, L. Frenzel, F. Lehmkuhler, M. Riepp

## BESTIMMUNG VON MAGNETISCHEN ANISOTROPIEKONSTANTEN

Die magnetische Freie Energie hängt von einer Summe von Energiebeiträgen ab. Insbesondere liefert die Austauschenergie  $J_{ij}$  zwischen benachbarten Spins  $i$  und  $j$  einen starken Beitrag und ist Voraussetzung für eine langreichweitige Magnetisierung in ferromagnetischer Materie. Der Austauschenergie liegt das Pauli-Prinzip zugrunde, demzufolge versucht das magnetische System den Gesamt-Spin in der Probe zu maximieren, eine parallele Ausrichtung der Spins ist begünstigt. Moderne magnetische Materialien zeichnen sich oft dadurch aus, dass sie eine besondere Form haben, z.B. dünne magnetische Filme (Festplatten) oder Multilag (Magnetsensoren). In solchen Materialien entstehen durch ihre Form (Formanisotropie) bzw. durch ihre Kristallstruktur (Magnetokristalline Anisotropie) zusätzliche Beiträge zur gesamten freien Energie. D.h. es gibt bestimmte Vorzugsrichtungen entlang welcher sich die Magnetisierung ausrichtet. Die (energetisch) bevorzugte Anordnung benachbarter Spins ist dabei nicht unbedingt parallel zueinander, vielmehr z.B. antiparallel (minimieren von Streufeldern an Grenzflächen). Man fasst die einzelnen Beiträge zur Anisotropie-Energie zu einem effektiven Term  $K_{1,\text{eff}}$  zusammen:

$$K_{1,\text{eff}} = K_{1V} - \frac{\mu_0 M_S^2}{2} + \frac{2K_{1S}}{t}$$

Die ersten beiden Beiträge beschreiben Volumenanisotropie der dritte Term Formanisotropie. Zusätzlich zur Anisotropieenergie spielt im Falle von angelegten äußeren Feldern die Zeeman-Energie eine wichtige Rolle in der Betrachtung der gesamten freien magnetischen Energie (Magnetisierung folgt äußerem Feld):

$$\frac{E_Z}{V} = -\mu_0 M_S H \cos \varphi$$

In der folgenden Aufgabe soll die Ausrichtung der Magnetisierung (Komponente entlang des Magnetfeldes) als Funktion des Magnetfeldes für die Fälle  $K_{1,\text{eff}} > 0$  und  $K_{1,\text{eff}} < 0$  untersucht werden. Das externe Magnetfeld sei dabei stets entlang der sogenannten magnetisch harten Achse ausgerichtet, d.h. es wird versucht die Magnetisierung aus seiner Ruhelage herauszudrehen:

$K_{1,\text{eff}} > 0$ : leichte Achse der Magnetisierung senkrecht zur Filmebene ( $M_{\parallel} \parallel H$ )

$K_{1,\text{eff}} < 0$ : leichte Achse der Magnetisierung parallel zur Filmebene ( $M_{\perp} \parallel H$ )

## Methoden moderner Röntgenphysik: Streuung und Abbildung

G. Grübel, O. Seeck, L. Müller, L. Frenzel, F. Lehmkuhler, M. Riepp

1. Überlegen Sie welche Bedingungen für eine magnetische Probe vorliegen müssen, um  $K_{1,\text{eff}} > 0$  bzw.  $K_{1,\text{eff}} < 0$  zu beobachten?
2. Leiten Sie einen Ausdruck für  $M(H)$  aus der Freien Energie her (zunächst unter Vernachlässigung höherer Ordnungen der Anisotropieenergie). Die Magnetisierung  $M(H)$  wird sich derart einstellen, dass die freie Energie minimiert wird (keine Winkeländerung zwischen  $M$  und  $H$  mehr):

$$\frac{E}{V} = K_{1,\text{eff}} \sin^2 \theta - \mu_0 M_S H \cos \varphi$$

( $\theta$ : Winkel zwischen Magnetisierung und Filmnormalen /  $\varphi$ : Winkel zwischen Magnetisierung und äußerem Magnetfeld)

Hinweis: Skizzieren Sie die geometrischen Verhältnisse zwischen einfacher Achse (der Magnetisierung), Magnetisierung und äußerem Feld und finden Sie eine Beziehung zwischen  $\theta$  und  $\varphi$ .

Wie ist die Ausrichtung der Magnetisierung für  $K_{1,\text{eff}} = 0$  für  $H = 0$ ?

3. Man berücksichtige nun auch höhere Ordnungen der Anisotropieenergie:

$$\frac{E}{V} = K_{1,\text{eff}} \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta - \mu_0 M_S H \cos \varphi$$

Hinweis: Beachten Sie, dass es sinnvoll ist die Gleichung jeweils nach  $H(M)$  aufzulösen (Umkehrfunktion). Diskutieren Sie die Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus Aufgabe 2 und 3.

4. Wie verhält sich  $(E/V(\theta))_{\text{min}}$  im Nullfeld ( $H = 0$ ), d.h. die Ausrichtung der Magnetisierung für  $-2K_2 < K_{1,\text{eff}} < 0$  ( $K_2 > 0$ )?