

Diss. ETH No. 9151

Understanding Magnetic Force Microscopy


A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

Christian Schönenberger
dipl. phys. ETH
born July 5th, 1956
citizen of Zürich

accepted on the recommendation of


Prof. Dr. H.-C. Siegmann, examiner
Dr. H. Rohrer, co-examiner

1990

accepted for publication in "Zeitschrift für Physik B"

Zusammenfassung

Magnetische-Kraft-Mikroskopie (MFM) ist eine neue Technik, die es erlaubt, das magnetische Streufeld einer ferromagnetischen Probe mit einer lateralen Auflösung von 10 – 100nm abzubilden. Es wird gezeigt, wie es möglich ist, topographische Details der Probenoberfläche vom magnetischen Streufeld zu unterscheiden und gleichzeitig zu messen. Ermöglicht wurde dies durch die Neuentwicklung eines hochempfindlichen optischen Sensors zur Messung kleinster Verschiebungen bis hinunter zu 0.01\AA (1Hz-20kHz). In der magnetischen Kraftmikroskopie wird eine scharfe ferromagnetische Spitze in das Streufeld der zu untersuchenden Probe eingetaucht. Die Stärke der gemessenen Kraft, welche auf die Spitze ausgeübt wird, hängt von der magnetischen Domänenkonfiguration in der Spitze ab. Deshalb ist ein Verständnis des Spitzen-Mikromagnetismus von fundamentaler Bedeutung.

In dieser Arbeit wurden elektrochemisch geätzte Spitzen polykristalliner Drähte aus Eisen, Nickel und Kobalt untersucht. Auf Experimente basierend wird gezeigt, welche Spitzenparameter zur Beschreibung und für eine einfache quantitative Bildinterpretation notwendig sind. Die Orientierung der Domäne am Spitzenapex fällt mit der Drahtachse zusammen, was auf die Dominanz der Formanisotropie hinweist. Das an der Probenoberfläche gemessene Streufeld der Spitze ist in seiner Grösse vergleichbar mit dem Sättigungsfeld des Spitzenmaterials. Dadurch wird die Anwendbarkeit dieser Technik auf hartmagnetische Proben eingeschränkt. Die effektive Länge L der Domäne am Spitzenapex bestimmt das Abbildungsverhalten: die Kraft folgt der Approximation für einen Punktdipol falls die magnetischen Strukturen der Probe gross im Vergleich zu L sind. Im entgegengesetzten Fall zeigt es sich, dass die Kraftwirkung auf die Spitze besser durch magnetische Testladungen einer Polarität beschrieben wird. Während die Kobaltspitzen durch eine einzelne magnetische Domäne hinreichend gut charakterisiert werden können, muss für Nickel- und Eisenspitzen neben der Enddomäne am Spitzenapex eine magnetische Polarisation im Draht berücksichtigt werden. Für L wurden Werte zwischen 0.5 und 2 μm gefunden. Das

Auflösungsvermögen einer Spitze ist allein durch ihren Spitzenradius bestimmt und hängt nicht von L ab.

Eine neue analytische Theorie gibt uns ein umfassendes Verständnis der Bildentstehung und ermöglicht darüberhinaus, den magnetischen Feldvektor aus einer MFM-Messung zu ermitteln.

Mit der magnetischen Kraftmikroskopie können nicht nur wie in der Bitter Technik Grenzen zwischen Domänen lokalisiert werden, es ist auch möglich ein vollständiges Vektorbild des magnetischen Streufeldes über einer Probe zu erhalten.

Abstract

Magnetic force microscopy (MFM) is a new method for imaging the magnetic stray-field of a ferromagnetic sample with a high lateral resolution of 10-100nm. It will be demonstrated how the topographic features of the surface can be distinguished from and simultaneously measured with the magnetic stray-field. This was made possible by the development of a highly sensitive optical displacement sensor having a detection limit of 0.01\AA (1Hz-1kHz). MFM utilizes a sharp ferromagnetic tip immersed into the stray field of the sample of interest. Since the magnitude of the measured force exerted onto the tip depends on the magnetic-domain configuration in the tip a knowledge of its micromagnetism is of basic importance.

Electrochemically etched polycrystalline iron, nickel and cobalt wires are investigated in this work. Based on experiments we give the basic tip parameters that have to be taken into account to achieve a quantitative image interpretation. The tip-apex domain is found to be oriented along the tip axis, indicating that shape anisotropy dominates. The stray field emerging from the tip apex experienced at the sample surface is comparable to the size of the tip saturation field, thus limiting the instrumental application to hard ferromagnetic samples. The effective length L of the domain at the tip apex determines the image formation: the force due to magnetization patterns of scales which are large compared to L follow the point-dipole approximation. In the opposite case, it is more appropriate to model the force onto the tip as being due to a probing charge (single-pole model). While a cobalt tip can be treated as an isolated domain, for nickel and iron a net polarization in the tip wire induced by the front apex-domain has to be considered. L is found to be $0.5 - 2\mu\text{m}$. The resolution power of the tip is basically given by its apex radius, and does not depend on L .

A new analytical theory provides an overall understanding of the image formation and allows the determination of the magnetic field vector and the estimation of its magnitude from measurements.

With MFM not only can domain boundaries be located as with the Bitter technique but it is also possible to map the magnetic stray-field vector above the surface.