



Exotische ferromagnetische Materialien können eine magnetische Reaktion zeigen, die an das Verhalten eines magnetischen Monopols erinnert. In diesem Artikel werden die Materialien und Syntheseverfahren beschrieben, mit denen solche exotischen „Quasi-Monopol“-Magnete in sogenannten „Schalenferromagneten“ produziert werden können. Wichtig dabei ist die detaillierte Kontrolle der chemischen Zusammensetzung der verschiedenen magnetischen Komponenten auf der Nanoskala.

Ein mysteriöses Material mit magischer Wirkung?

Exotische Ferromagnete mit Quasi-Monopol-Charakter

Von Michael Farle

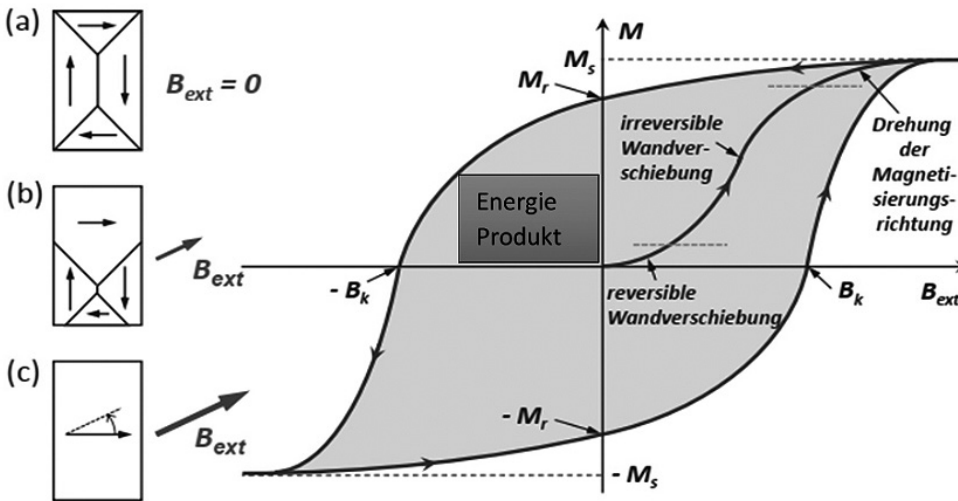
Wir wissen, dass Magnetfelder feste Materialien und Lebewesen durchdringen und ihre Wirkung darin und dahinter spürbar ist. Wenn wir einen Magneten in zwei Teile aufschneiden, bekommen wir zwei Magnete und bei weiteren Schnitten erhalten wir vier, acht ... und dies immer so weiter. Sind diese mysteriösen Eigenschaften nun „zauberhaft-magisch“? Nein, die Physik bietet zwar komplizierte, aber eindeutige Beschreibungen dieses Verhaltens. Zunächst muss Folgendes klar festgestellt werden: Magnete haben immer zwei Pole, einen Nord- und einen Südpol. Diese Pole bilden einen sogenannten Dipol und die Magnetfeldlinien sind immer geschlossen. Diese Aussage gilt auf allen Längenskalen vom Erdmagnetfeld bis hin zum atomaren Dipol. Während man elektrische negative und positive Ladungen voneinander trennen kann, ergeben sich beim Zerteilen eines magnetischen Dipols keine freien Monopole, sondern stets neue Dipole. Also gibt es eigentlich keine Möglichkeit, diese fundamentale Eigenschaft auszutricksen und einen Magneten mit quasi Monopol Charakter zu bauen? Das ist im Prinzip richtig, ein individueller Magnet hat immer zwei Pole! Allerdings kann man magnetische Dipole so anordnen, zum Beispiel in sogenannten Spin-Eis-Konfigurationen, dass man lokal magnetische Quasi-Monopole als Anregungen des magnetischen Systems identifizieren kann [<https://pro-physik.de/nachrichten/magnetische-monopole-im-spineis-gesichtet>]. Bei einem elektrischen Monopol (positive oder negative Ladung) verlieren sich die elektrischen Feldlinien im Unendlichen und führen nie wieder zum eigenen Ursprung zurück wie bei einem Magneten – sogar wenn die beiden Pole des Magneten sehr weit voneinander entfernt sind. Man erinnere sich nur an den Nord- und Südpol der Erde. Der eine kann ohne den anderen nicht existieren. Und hier beginnt die „Magie“.

Nun impliziert der Untertitel dieses Textes Monopoleigenschaften

eines Permanentmagneten (Ferro-magneten), auf die ich später im Text eingehen werde. Doch zunächst müssen ein paar fundamentale Konzepte magnetischer Materialien rekapituliert werden, bevor ich den von uns gemessenen Effekt verständlich machen kann. Ganz allgemein: Es existieren verschiedene Typen, quasi Geschmacksrichtungen, von Magneten. Einige sind abstoßend und andere anziehend. Man kann sogar sagen, dass jedes Material, vom Festkörper wie Metallen oder Keramiken bis hin zu Lebewesen und Gemüse wie Frösche und Erdbeeren, magnetisch ist. Die Fachbegriffe sind a) Diamagnetismus, b) Paramagnetismus, c) Ferro-, Ferri- und Antiferromagnetismus. Ein diamagnetischer Anteil ist in jedem chemischen Element beziehungsweise Atom, vorhanden. Allerdings ist dieser so schwach, dass er durch die Beiträge der anderen Magnetismus-Typen meistens überdeckt wird. Einen Paramagneten kann man sich als aus vielen atomaren magnetischen Dipolen zusammengesetzt vorstellen, die bei endlichen Temperaturen räumlich und zeitlich wild fluktuieren und somit keine Netto-Magnetisierung zeigen. Erst in starken externen Magnetfeldern wie sie zum Beispiel durch Elektromagnete erzeugt werden können, erkennt man den abstoßenden Charakter des Diamagneten und den anziehenden Charakter des Paramagneten. Das mit dem Magnetismus im Allgemeinen verknüpfte Material ist der Ferromagnet oder auch der Ferrimagnet. Beide Materialien erzeugen große magnetische Flussfelder, deren Wirkung wir im täglichen Leben als abstoßende oder anziehende Kräfte zum Beispiel bei Kühlschrankmagneten erleben. Ein Antiferromagnet, der für unsere spätere Diskussion noch wichtig wird, setzt sich hingegen aus antiparallel orientierten atomaren magnetischen Dipolen zusammen. Sowohl in Ferro-, Ferri- und Antiferromagneten sind die magnetischen Momente in ihrer Orientierung über lange

Zeiten („permanent“) stabil. Diese Eigenschaft beruht auf einer rein elektrostatischen Wechselwirkung unter Hinzunahme einer quantenmechanischen Symmetriebedingung (Pauli-Verbot). Beides zusammen beschreibt die sogenannte Austauschwechselwirkung, die letztlich für die Stabilisierung der Permanentmagnete verantwortlich ist. Die energetisch günstigste Orientierung (=Vorzugsrichtung) dieser stark „verhakten“ (gekoppelten) magnetische Dipole in einem makroskopischen Festkörper beliebiger Form ist durch die magnetische Anisotropieenergie bestimmt, die als mikroskopische Ursachen die sogenannte Spin-Bahn und Dipol-Dipol-Wechselwirkung hat.

Nach dieser Kurzzusammenfassung der Magnettypen konzentrieren wir uns auf die Permanentmagnete und insbesondere nachfolgend auf den speziellen neuen Typus des „Shell“-Ferromagneten. Wie schon im Editorial angesprochen, haben Permanentmagnete die bemerkenswerte Eigenschaft einen Energieinhalt zu speichern und diesen für Jahrzehnte aufbewahren zu können. Erst durch spätere Aktivierung mittels eines externen Magnetfeldes kann diese Energie freigesetzt und in andere Energieformen wie Wärme oder Elektrizität umgewandelt werden. Das typische Verhalten eines Ferromagneten in einem externen Magnetfeld ist in Abbildung (1) zu sehen. Man beachte das symmetrische Verhalten sowohl auf der vertikalen Achse als auch auf der horizontalen Achse. Beim Koerzitivfeld B_k dreht sich die negative Magnetisierung in die positive Richtung. Dies geschieht im Allgemeinen nicht sprunghaft, da sich einzelne Bereiche des Ferromagneten, die sogenannten Weiss'schen Bezirke oder magnetischen Domänen, bei unterschiedlich starken Magnetfeldern bilden und drehen. Erst oberhalb eines externen Sättigungsfeldes zeigen alle Domänen in die Richtung des externen Magnetfeldes. Die Sättigungsmagnetisierung ist erreicht.



(1) Typische magnetische Hysterese eines Permanentmagneten. Die Magnetisierung M ist über dem magnetischen Fluss $B_{ext} = \mu H_{ext}$ aufgetragen. Koerzitivfeld B_K , Sättigungsmagnetisierung M_s , remanente Magnetisierung M_r bei $B_{ext} = 0$ und das magnetische Energieprodukt sind eingezeichnet. Man beachte, dass das Produkt aus M und B_{ext} eine Energiedichte darstellt. Somit sind Flächen in diesem Diagramm Energiedichten in Joule/cm^3 . Des Weiteren sind in a) bis c) Weiss'sche Bezirke (magnetische Domänen) eines rechteckigen Magnetfilms schematisch mit ihren jeweiligen Ausrichtungen der Magnetisierung (Pfeile) für verschiedene Magnetfeldstärken B_{ext} gezeichnet. Bei genügend großem Feld sind alle Domänen gleich ausgerichtet, und das Material ist magnetisch „gesättigt“, das heißt die maximal mögliche Magnetisierung ist erreicht. Man beachte, dass die remanente Magnetisierung für Messungen von positivem zu negativem Magnetfeld hin positiv ist, während in umgekehrter Richtung die Magnetisierung negativ ist.

Quelle: angepasst nach R. Groß, A. Marx, Festkörperphysik, Oldenbourg München.

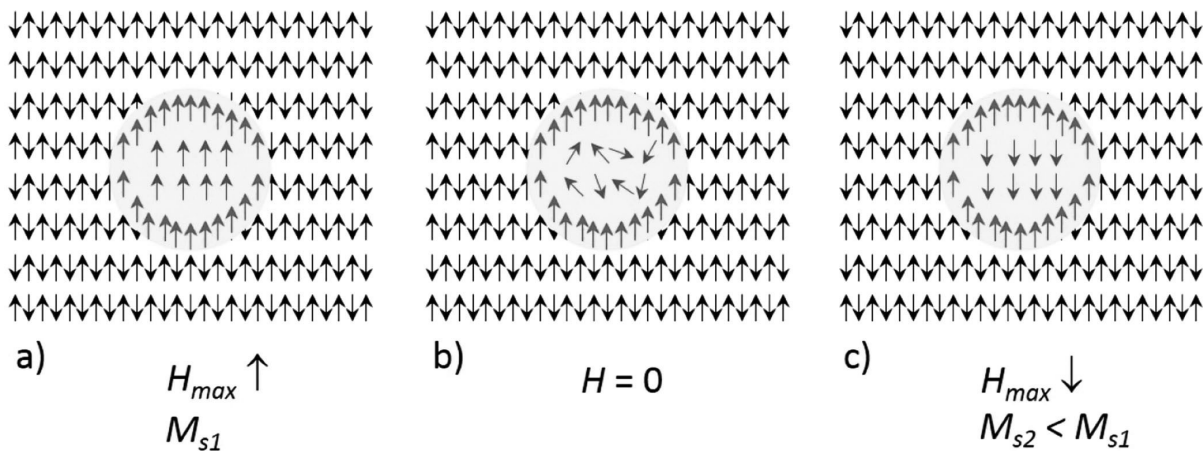
Nach dieser Einstimmung kommen wir nun zum Ferromagneten mit „Quasi-Monopol-Charakter“! Es handelt sich um ein neuartiges magnetisches Material, dessen überraschendes Verhalten am besten im Video nachzuvollziehen ist. Das Phänomen ist im YouTube-Video „Shell Ferromagnetism Narrated“ (<https://www.youtube.com/watch?v=0VlSksW2G-s>) gezeigt. Hier wird ein Daumnagel-großes spezielles magnetisches Material, dessen Herstellung und Zusammensetzung nachfolgend noch näher erläutert wird, einem großen externen Magnetfeld ausgesetzt. Man erkennt: Auf der einen Seite lässt sich das etwa daumnagelgroße Teilchen von einem Magneten, der natürlich einen Süd- und Nordpol hat, anziehen. Dreht man den Stabmagneten um 180 Grad, passiert hingegen nichts. Wie im Video erläutert wird, ist dieser Effekt mehr als ungewöhnlich, und es drängt sich natür-

lich die Frage auf, wie man dieses sehr spezielle Material erzeugt und wie die magnetische Wirkung erklärt werden kann.

Dieses magnetische „Monopol“-Material wird durch Erhitzen einer Legierung aus Nickel und Mangan mit nahezu gleichen Anteilen unter Hinzugabe weniger Prozentanteile des Elements Indium in einem starken Magnetfeld bei rund 380°C hergestellt. Dabei verändert sich der Aufbau des Materials. Es bilden sich einzelne, wenige Nanometer große Partikel, die vergleichsweise viel mehr Indium in der nanoskaligen Ausscheidung eingelagert haben, das aus der umgebenden Matrix „angesogen“ worden ist. Diese Indium-reichen Partikel sind nun die, die andere magnetische Eigenschaften als die umgebende Matrix haben, die sich ebenso einer Veränderung unterzogen hat. Nach dem Abkühlen auf Raumtemperatur verhält sich dieses neu zusammen-

gesetzte Material wie ein einseitiger Magnet, vereinfacht ausgedrückt, wie ein Nordpol. Interessanterweise konnte dieser Monopol-Charakter nur nach Erhitzen – technisch sagt man „Anlassen“ – in einem Magnetfeld erhalten werden. Ohne Magnetfeld war der Effekt nicht existent.

Nun war die Neugierde der Wissenschaftler*innen geweckt. Wie konnte es sein, dass ein makroskopisches ferromagnetisches Material scheinbar nur einen Pol aufweist? Ein Verständnis, besser gesagt, eine funktionierende Beschreibung oder Modellbildung, für dieses überraschende Phänomen erfordert ein tieferes Verständnis der komplexen Wechselwirkungen verschiedener Spielarten von Magnetismus, wie sie stark vereinfacht zu Beginn dargestellt wurden. Aber dennoch will ich im nachfolgenden versuchen, das Modell anschaulich zu beschreiben.



(2) Eine Modellbeschreibung der resultierenden magnetischen Konfiguration nach der Zersetzung der Probe in einem Magnetfeld. Der kreisrunde grau schattierte Bereich stellt die superparamagnetische Ausscheidung schematisch dar und die umgebenden antiparallel ausgerichteten Spins stellen die antiferromagnetische Matrix Ni-Mn dar. Die parallel stehenden Pfeile am Rand des grauen Kreises (eigentlich ein dreidimensionales Partikel) sind durch die Austauschwechselwirkung mit der Matrix in einer festen Richtung fixiert. Ein extern angelegtes Magnetfeld kann deren Richtung zunächst nicht verändern. Erst wenn das externe Feld einen kritischen Wert übersteigt, kann deren Richtung gedreht werden. Die magnetischen Momente (Pfeile) im Inneren des Partikels dagegen können in Magnetfeldern H_{\max} gedreht werden. (a) Alle Spins im Partikel (grauer Kreis) sind parallel zum externen Feld ausgerichtet (in diesem Fall auch zum anfänglichen Feldmaximum der Messung). (b) Das externe Feld ist Null. Die Momente innerhalb des Partikels sind zufällig ausgerichtet, aber die magnetischen Momente in der Schale des Partikels bleiben ausgerichtet. (c) Die inneren magnetischen Momente richten sich in umgekehrter Feldrichtung aus. Die Grenzflächenspins bleiben in der Richtung des während der Entmischung angelegten Feldes ausgerichtet. Die resultierende Magnetisierung ist kleiner als in (a) und führt zu einer vertikalen Verschiebung der Hysterese.

Quelle: Çakır, A., M. Acet, M., Farle: Shell-ferromagnetism of nano-Heuslers generated by segregation under magnetic field, Sci Rep. 2016; 6: 28931. doi: 10.1038/srep28931

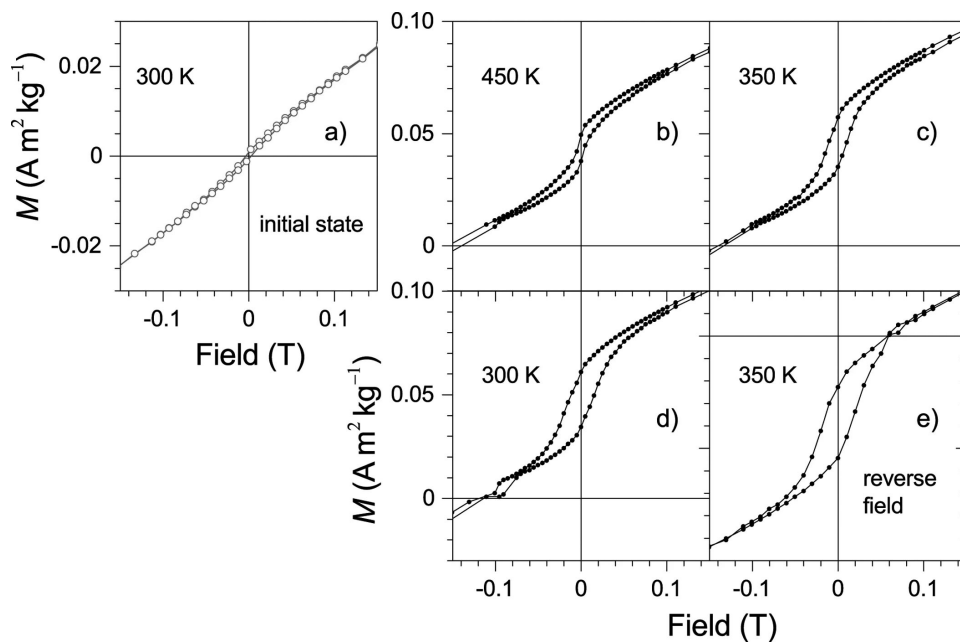
Modellbeschreibung (Cartoon)

Das im Video gezeigte magnetische Verhalten lässt sich, wiederum stark vereinfacht, folgendermaßen beschreiben (Abb. 2). In dem verwendeten Modell bestehen die Partikel (graue Kreise in Abb. 2) aus einem Kern und einer Hülle und sind in einer antiferromagnetischen Matrix eingebettet, die wiederum eine sehr hohe magnetische Anisotropie aufweist. Die schwarzen Pfeile in Abbildung (2) kennzeichnen die Richtung der atomaren magnetischen Momente in der antiferromagnetischen NiMn-Matrix. Man erkennt, dass diese antiparallel angeordnet sind. Die Richtung der magnetischen Momente („Stabmagnete“) der beiden Untergitter für Moment „nach oben“ und Moment „nach

unten“ zeigend, sind durch die Austauschwechselwirkung in antiparalleler Ausrichtung fixiert, und die Orientierung ist durch eine sehr starke magnetokristalline Anisotropie aufgrund der tetragonalen Verzerrung in diesem Kristallgitter in einer Richtung fixiert. Die Einschlüsse, die im vereinfachten Modell als Kugeln angenommen werden, sind superparamagnetisch und würden im Prinzip zeitlich schnell fluktuieren und somit keine Nettomagnetisierung zeigen. Allerdings sind die magnetischen Momente (Pfeile) der Randbereiche (Pfeile im Kreis) wiederum durch die Austauschwechselwirkung mit den Atomen der Matrix (antiparallele Pfeile auf weißem Grund, Material: $L1_0\text{NiMn}$) ausgerichtet und fixiert. Somit bleibt die Magnetisierungsrichtung der Hülle immer gleich – im Kern dagegen lässt sie

sich von außen beeinflussen. Die Probe lässt sich nur dann anziehen, wenn die Magnetisierung innen und außen gleich ausgerichtet ist – und auch dann nur auf der entsprechenden Seite. Doch dann ist ihre Kraft dreimal stärker als die der Elektromagnete, mit denen man auf Schrottplätzen ganze Autos hochhievt. Weist die Magnetisierung in Kern und Hülle hingegen zu verschiedenen Seiten, so hebt sich die Wirkung komplett auf. [1–5]

Nun sind Videos oder Cartoons des Verhaltens überraschend und Interesse weckend, aber die quantitative Beschreibung erfordert detaillierte Messungen der Magnetisierung dieses Materials als Funktion eines äußeren Magnetfeldes B_{ext} , das heißt die Aufnahme einer magnetischen Hysterese-Kurve. In Abbildung (3a) ist diese für den



(3) Die Magnetisierung von $\text{Ni}_{49.6}\text{Mn}_{45.5}\text{In}_{4.9}$ als Funktion eines externen Magnetfeldes im Bereich $-0.15 \leq \text{Bext} \leq 0.15$ T. (a) Der Anfangszustand bei 300 K. (b) Nach der Temperaturbehandlung bei 650 K, die zur Ausscheidung von $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{25}\text{In}_{25}$ Partikeln (graue Scheiben in Abb. 2) führt, gemessen bei 450 K (c) bei 350 K, und (d) bei 300 K. (e) Magnetisierungsmessung desselben Ausgangsmaterials bei 350 K, das in umgekehrter Feldrichtung bei 650 K ausgelagert worden war. Dies zeigt gegenüber der positiven Verschiebung der Hysterese nach oben auf der y-Achse die umgekehrte Verschiebung nach unten. Man beachte, dass die Hysteresen keine laterale Verschiebung aufweisen und dass die remanente Magnetisierung immer positiv ist – im Gegensatz zu dem konventionellen Ferromagneten (Abb. 1).

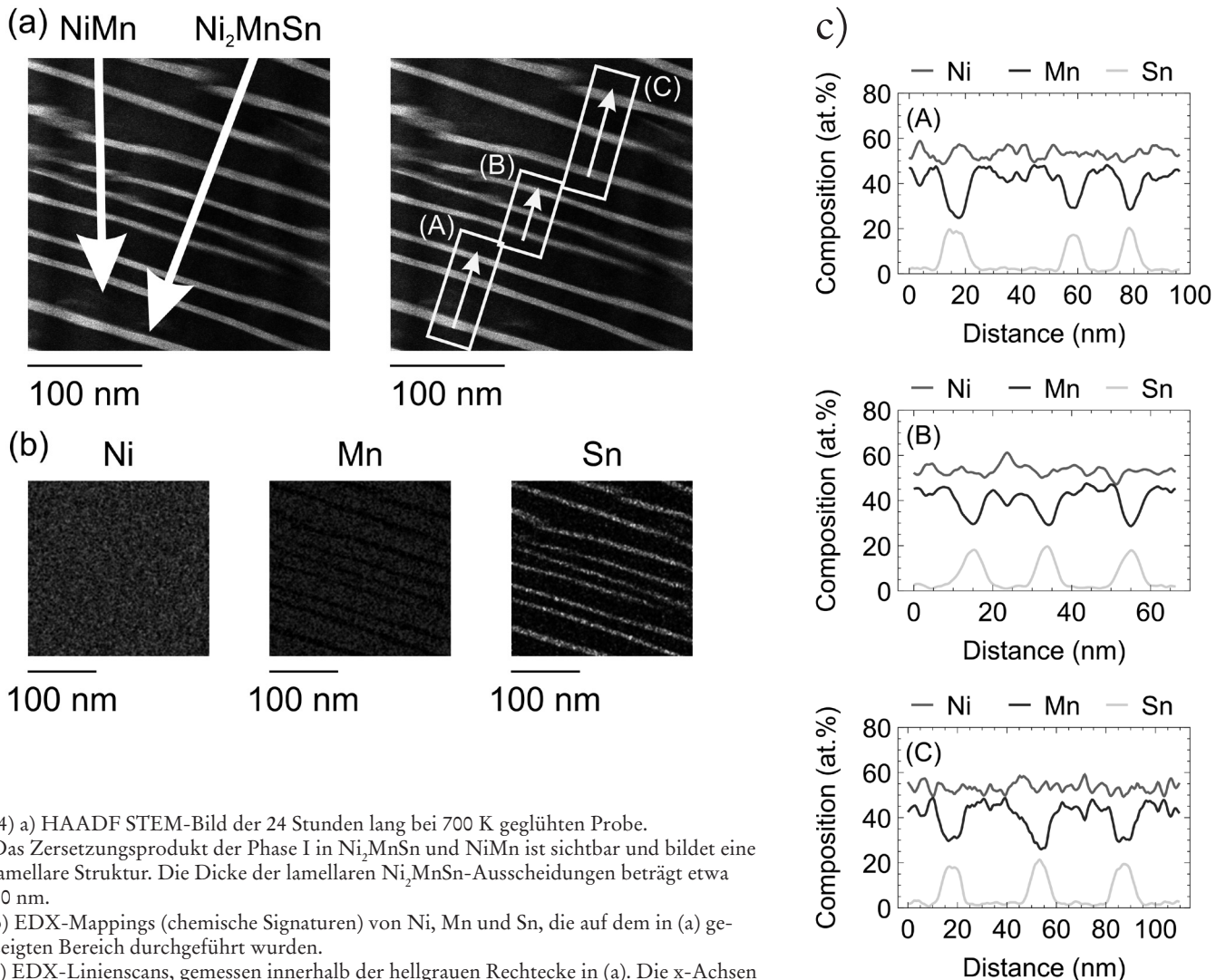
Quelle: Çakır, A., M. Acet, M., Farle: Shell-ferromagnetism of nano-Heuslers generated by segregation under magnetic field, *Sci Rep.* 2016; 6: 28931. doi: 10.1038/srep28931

Anfangszustand des Ausgangsmaterials $\text{Ni}_{49.6}\text{Mn}_{45.5}\text{In}_{4.9}$ gezeigt. [1] Man erkennt, dass das Ausgangsmaterial quasi keine Hysterese aufweist. Die anschließende Auslagerung bei 650 K in einem externen Magnetfeld über viele Stunden liefert nun stark veränderte Hysteresekurven, die für alle gemessenen Temperaturen (b)–(d) eine vertikale Verschiebung der Magnetisierung zeigen. Aufgrund dieser vertikalen Verschiebung ist die remanente Magnetisierung sowohl für den Hysteresezweig, der von großen positiven zu negativen Feldern als auch für den Zweig, der von negativen zu positiven Feldern gemessen wurde, jeweils positiv. Die Manipulierbarkeit dieses Verhaltens zeigt sich in der Hysteresekurve (e). Hierzu wurde das Material in einem um 180° invertierten Magnetfeld ausgelagert. Als Resultat ist die

Magnetisierung nun vertikal nach unten verschoben. Die remanenten Magnetisierungen sind nun jeweils negativ. Dieses Verhalten der vertikalen Hysteresekurven-Verschiebung wird durch das oben gezeigte Modell beschrieben. Das Ausgangsmaterial $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{45}\text{In}_5$ scheidet beim Heizen Partikel (graue Scheiben in Abb. 2) der ungefähren Zusammensetzung Ni_2MnIn aus. Übrig bleibt die umgebende Matrix NiMn , die ein stark anisotroper Antiferromagnet ist [1]. Ni_2MnIn selber ist ein Ferromagnet mit einer Curie-Temperatur knapp oberhalb der Zimmertemperatur. Aufgrund der kleinen Volumina der Ausscheidungen verhalten sich diese Partikel wie Super-Paramagnete, die im Prinzip bei den Messtemperaturen fluktuieren sollten. Aber, da diese Partikel über ihre magnetischen Momente der Hülle mit der umge-

benden Matrix „verhakt“, das heißt über die Austauschkopplung fixiert sind, kann sich ihre Magnetisierung nicht thermisch drehen. Dies wird erst durch Anlegen eines externen Magnetfeldes möglich. Diese komplexe Situation ist vielleicht mit kleinen Tanzgruppen zu vergleichen. Diese Gruppen (Partikel) werden in einem dicht gedrängten Publikum fixiert und können sich nicht umorientieren – es sei denn, ein externes Kraftfeld (Konzert, Orchester) führt zur Ausrichtung.

Allerdings ist das Modell in Abbildung (2) zu stark vereinfacht. Es ist beliebig unwahrscheinlich, dass sich solche perfekten „Cartoonartigen“ sphärischen Ausscheidungen in realen Materialien bilden. Und für ein tieferes Verständnis, das die Möglichkeit zur Manipulation und Optimierung des magnetischen



(4) a) HAADF STEM-Bild der 24 Stunden lang bei 700 K geglähten Probe. Das Zersetzungsprodukt der Phase I in Ni₂MnSn und NiMn ist sichtbar und bildet eine lamellare Struktur. Die Dicke der lamellaren Ni₂MnSn-Ausscheidungen beträgt etwa 10 nm.

b) EDX-Mappings (chemische Signaturen) von Ni, Mn und Sn, die auf dem in (a) gezeigten Bereich durchgeführt wurden.

c) EDX-Linienscans, gemessen innerhalb der hellgrauen Rechtecke in (a). Die x-Achsen der Linienscans folgen der Richtung der hellgrauen Pfeile.

Quelle: Nicolas Josten

Materials bietet, möchten Forscher*innen natürlich die wahre Form und Anordnung dieser Ausscheidungen experimentell bestimmen und „sehen“, das heißt visualisieren. Die Analyse und Charakterisierung steht allerdings vor folgenden Problemen:

a) Kann man die chemische Zusammensetzung der Partikel auf atomarer Skala bestimmen?

b) Ist eine räumliche Auflösung von besser als 1 nm für die Identifikation der Form und Anordnung der Partikel möglich?

c) die Ausscheidungen sind innerhalb (!) des Materials, und deren Identifikation erfordert einen Blick ins Innere. Dieses ist mit der

Fragestellung zu vergleichen, wie man Stecknadelköpfe in einer Torte finden und deren Lage, Form und chemische Zusammensetzung identifizieren kann. Dank modernster Charakterisierungsmethoden in der Transmissionselektronenmikroskopie und mit Hilfe der sogenannten „Atom Probe Tomography“ ist die Informationsgewinnung mit nahezu atomarer Auflösung möglich (siehe hierzu den Artikel von Leopoldo Molina-Luna und Baptiste Gault in diesem Heft). Die Anwendung dieser Analytik liefert nun überraschende Erkenntnisse, wie sie im nachfolgenden Kapitel kurz beschrieben sind.

Die wahre Form der „Partikel“

Wie erwähnt, ist die Bildung von Shellferromagneten nicht auf NiMn-Materialien mit In beschränkt, sondern auch andere Mischungen sind möglich. In Abbildung (4) ist eine detaillierte chemische Analyse von Ni₅₀Mn₄₅Sn₀₅ nach vielen Stunden Anlassen bei 600 K in einem externen Magnetfeld gezeigt. Für das resultierende Material erhält man Koerzitivfeldstärken von rund 5 Tesla. Durch eine clevere Kombination von Transmissionselektronenmikroskopie und „Atom Probe Tomography“ konnte die wahre Morphologie der magnetischen Ein-

schlüsse (Prezipitate) identifiziert werden. Deren Zusammensetzung ist ungefähr $\text{Ni}_{52}\text{Mn}_{29}\text{Sn}_{19}$, und die durchschnittliche Zusammensetzung der Matrix (schwarze Flächen in Abb. 4) ist $\text{Ni}_{54}\text{Mn}_{44}\text{Sn}_{02}$. Man erkennt, dass die „Partikel“ alles andere als Kugeln wie im Cartoon-Modell angenommen sind. Es bildet sich eine wunderschöne lamellare Struktur, die aus nanoskaligen Schichten der verschiedenen Zusammensetzungen besteht. Dank dieser Erkenntnis und dem Wissen, dass man solche „Schichtsysteme“ durch langes Heizen im Magnetfeld erzeugen kann, bieten sich den Forschenden nun weitere Möglichkeiten, durch geschickte Prozessierung magnetische Parameter den Bedürfnissen in verschiedenen Anwendungen anzupassen. Als Ausblick für diese exotischen Magnete kann man an Anwendungen in magnetischer Datenspeichertechnologie und Sensorik denken, denn „einmal mit dem Laser eingebraunt, hält die quasi unipolare Magnetisierung bis in alle Ewigkeit“. Die Reise in exotische Materiallandschaften aus Magneten kann also weitergehen.

Summary

Exotic ferromagnetic materials can show a magnetization response reminiscent of magnetic monopole behaviour. This article describes the materials and synthesis processes necessary to obtain such exotic ‘quasi-monopole’ magnets in the form of so-called ‘shell-ferromagnets’, which combine different magnetic components on the nanoscale.

Danksagung

Der Autor dankt neben allen Mitarbeiter*innen seiner Arbeitsgruppe, insbesondere Nicolas Josten, Asli Cakir und Mehmet Acet für die Entdeckung und Beschreibung dieses Phänomens sowie die langjährige Zusammenarbeit. Die Ergebnisse konnten nur erzielt werden dank der großartigen Zusammenarbeit mit dem E-RC am FZ-Jülich, dem Max-Planck-Institut für Eisenforschung (MPIE) in Düsseldorf und der „Functional Materials Group“ an der TU Darmstadt im Rahmen des Sonderforschungsbereiches/Transregio 270 „Hysteresis Design of Magnetic Materials for efficient Energy conversion (HoMMage)“ und dem „Interdisciplinary Center for Analytics on the Nanoscale (ICAN)“.

Anmerkungen/Literatur

- 1) Cakir, A., M. Acet, and M. Farle, Shell-ferromagnetism of nano-Heuslers generated by segregation under magnetic field. *Sci Rep*, 2016. 6: p. 28931.
- 2) Cakir, A., et al., Shell-ferromagnetic precipitation in martensitic Ni-Mn-In Heusler alloys produced by temper-annealing under magnetic field. *Acta Materialia*, 2017. 127: p. 117–123.
- 3) Scheibel, F., et al., Room-temperature five-tesla coercivity of a rare-earth-free shell-ferromagnet. *Applied Physics Letters*, 2017. 110(19): p. 192406.
- 4) Scheibel, F., et al., Shell-ferromagnetism in a Ni-Mn-In off-stoichiometric Heusler studied by ferromagnetic resonance. *Aip Advances*, 2017. 7(5): p. 056425.
- 5) Wanjiku, Z., et al., Shell-ferromagnetism and decomposition in off-stoichiometric $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-x}\text{Sbx}$ Heuslers. *Journal of Applied Physics*, 2019. 125(4): p. 043902.

Der Autor

Michael Farle promovierte an der Freien Universität Berlin in experimenteller Festkörperphysik. Seine Dissertation über magnetische Eigenschaften ferromagnetischer Monoschichten wurde mit dem Karl-Scheel-Preis der Berliner Sektion der Deutschen Physikalischen Gesellschaft ausgezeichnet. Nach seinen experimentellen Studien über magnetische Nanosysteme an der Stanford University (USA), der Universität Straßburg (Frankreich) und der Freien Universität Berlin als Postdoktorand erhielt er 1999 seine erste Berufung als Professor an die Technische Universität Braunschweig. Im Jahr 2002 wechselte er als Professor an die Universität Duisburg-Essen, wo er eine Gruppe von etwa 30 Mitarbeiter*innen (PostDocs, Diplomand*innen, Doktorand*innen und Techniker*innen) leitet. Die Forschung der Gruppe konzentriert sich auf die magnetischen Eigenschaften neuartiger niedrigdimensionaler magnetischer Strukturen (Nanomagnetismus). Farle hat mehr als 300 Arbeiten in begutach-

teten Fachzeitschriften veröffentlicht. Er war Koordinator von zwei von der Europäischen Union finanzierten „Research Training Networks (5./6. Rahmenprogramm)“, stellvertretender Sprecher des Sonderforschungsbereiches SFB 491 und ist aktuell Co-Sprecher des SFB/TRR270 „HoMMage“. Michael Farle war Prorektor für Forschung, wissenschaftlichen Nachwuchs und Transfer der Universität Duisburg-Essen. Er ist Mitglied in mehreren wissenschaftlichen Beiräten.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
D U I S B U R G
E S S E N

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/81847

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20240416-090032-1

Erschienen in: UNIKATE 60 (2024), S. 12-19

Alle Rechte vorbehalten.