

Magnetismus hoch 3

- Selbstkonsistente Modellierung von Dia-, Para- und Ferromagnetismus -

Daniel Laumann & Stefan Heusler

Institut für Didaktik der Physik
Westfälische Wilhelms-Universität
Wilhelm-Klemm-Str. 10
48149 Münster

daniel.laumann@uni-muenster.de
stefan.heusler@uni-muenster.de

Kurzfassung

Magnetische Phänomene stellen eine zentrale Grundlage für vielfältige technologische Anwendungen unserer Gesellschaft dar. Auch die Grundlagenforschung zu magnetischen Phänomenen ist ein aktuelles und dynamisches Arbeitsgebiet [2], [4], [5]. Untersuchungen von Lernenden sowohl in der Schule als auch in der Hochschule zeigen andererseits, dass diese im Bereich Magnetismus über ein geringes konzeptuelles Verständnis verfügen [11], [12]. Eine potentielle Ursache hierfür ist die geringe Anschlussfähigkeit der unterschiedlichen Modelle in den verschiedenen Ausbildungsphasen. Um diese Anschlussfähigkeit der Erklärungsansätze gewährleisten zu können ist es notwendig ein selbstkonsistentes Modell zu entwickeln, das die Grundlage zur konzeptuellen Weiterentwicklung (conceptual change) darstellt [13].

In diesem Beitrag wird gezeigt wie die zentrale Ausprägungsform Ferromagnetismus mit Hilfe der weniger bekannten Phänomene des Dia- und Paramagnetismus erschlossen werden kann. Diese Herangehensweise ermöglicht die separate Betrachtung des Orts- (Diamagnetismus) und Spindraums (Paramagnetismus) sowie deren Wechselwirkung (Ferromagnetismus). Zur Reduktion der komplexen quantenmechanischen Ursachen für Magnetismus wird ein auf Visualisierungen basierendes Schema gewählt, das zunächst für die Hochschullehre konzipiert wird und durch weitere didaktische Reduktionen und phänomenologische Ergänzungen auch für die Schule zugänglich gemacht werden kann.

1. Einleitung

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts wird der technologische Fortschritt unserer Gesellschaft insbesondere durch Entdeckungen in den Bereichen Elektrizität und Licht geprägt. Neben diesen Teilgebieten der Physik beeinflusst auch der Magnetismus bis heute die Neu- und Weiterentwicklung verschiedenartiger Anwendungen in prägender Art und Weise.

Die Entwicklung von Computer-Festplatten, wurde im Jahre 1988 durch die Entdeckung des Riesenmagnetowiderstands (GMR) revolutioniert [1]. Auch aktuell gelten magnetische Phänomene als potentiell hilfreich zur Optimierung der Speicherkapazitäten und Datenraten digitaler Speichermedien [2]. Die magnetischen Eigenschaften als Gegenstand aktueller Forschung stellen darüber hinaus einen bedeutsamen Bereich der Materialphysik dar [3]. Auch in der medizinischen Physik finden sich zahlreiche vielversprechende Anwendungen magnetischer Phänomene, wie u. a. die gezielte Manipulation ferromagnetischer Nano-Partikel in Blutadern durch äußere Magnetfelder [4] und die Weiterentwicklung der bereits als medizinischer Standard geltenden

Magnetresonanztomographie (MRT) hin zur Erzeugung von Echtzeit 3D-Bildern mit Hilfe magnetischer Nanopartikel (MPI) [5].

Während die fachliche Forschung in der Physik das Verständnis magnetischer Phänomene somit als Potential für unterschiedlichste Anwendungen betrachtet, wird diesem Teilgebiet in der Lehre eine deutlich geringere Bedeutung beigemessen. Die große Vielfalt magnetischer Phänomene und die subtilen quantenphysikalischen Mechanismen erschweren darüber hinaus eine selbstkonsistente Modellierung.

Die Ergebnisse einer aktuell laufenden Befragung von Lehrerinnen und Lehrern (N=63, Stand: 03/2015) zeigen, dass das Modell der Elementarmagnete im Bereich der weiterführenden Schule im Unterricht über Magnetismus am häufigsten verwendet wird (vgl. Abb.1), obwohl Rezeptionen dem Modell aus didaktischer und fachlicher Perspektive insbesondere Schwächen im Bereich der Anschlussfähigkeit zuweisen [6], [7]. Anschlussfähigere Modelle wie z. B. das Modell der Kompassnadeln (vgl. Abb.1) finden hingegen weniger Beachtung.

Aktuell existieren vornehmlich im Bereich der Phänomenologie hilfreiche und vielfältige Zugänge zum (Ferro-)Magnetismus [8], [9], [10]. Jedoch stellt die fehlende Anschlussfähigkeit der Erklärungsansätze eine potentielle Ursache für das geringe konzeptuelle Verständnis über Magnetismus in der Schule und in der Hochschule dar [11], [12].

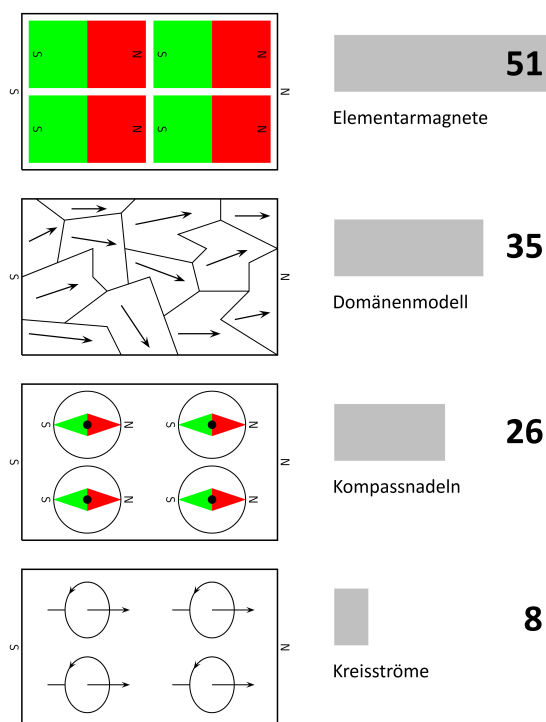


Abb.1: Vorläufige Ergebnisse zur LehrerInnen-Untersuchung: „Welches Modell verwenden Sie in Ihrem Unterricht zur Erklärung von Ferromagnetismus?“ (N=63, Stand: 03/2015).

Es ergibt sich somit das Ziel einer selbstkonsistenten Modellierung von Magnetismus in zweifacher Hinsicht: Einerseits ist es erstrebenswert ein Modell zu entwickeln, das in reduzierter Form zur Einführung von Magnetismus in der Sekundarstufe I eingesetzt werden soll und bei komplexeren Themen in höheren Jahrgangsstufen sowie später im Bereich der Hochschule konsistent erweitert werden kann. Nur durch genetisches Lernen mit Hilfe eines solchen selbstkonsistenten Modells ist die Grundlage zur konzeptuellen Weiterentwicklung (conceptual change) gegeben [13]. Andererseits verbirgt sich hinter dem Begriff „Magnetismus“ deutlich mehr, als der in der Lehre weit verbreitete Bereich des Permanentmagnetismus (Ferromagnetismus). Ein anschlussfähiges Modell sollte somit auch für die beiden weiteren zentralen Ausprägungsformen von Magnetismus (Dia- und Paramagnetismus) konsistente Erklärungsansätze bereitstellen. Insbesondere ermöglicht die Behandlung dieser Ausprägungsformen eine separate Auseinandersetzung mit dem Orts- (Diamagnetismus) und Spinraum (Paramagnetismus). Erst die Zusammenführung dieser Aspekte

bei wechselwirkenden Elektronen ermöglicht ein Verständnis von Ferromagnetismus. Für den Modellierungsansatz ist es im Sinne der Anschlussfähigkeit weiterhin wichtig die quantenmechanischen Ursprünge von Magnetismus darzustellen (Abschnitt 3).

2. Fachliche Klärung

Nachfolgend sollen die zentralen Eigenschaften von Dia-, Para- und Ferromagnetismus mit Hilfe eines einfachen Experiments kurz dargestellt werden. Zur gegenseitigen Abgrenzung der drei zentralen Ausprägungsformen von Magnetismus und zur Darstellung zentraler Eigenschaften eignet sich ein einheitliches Experiment: Wie reagieren verschiedenmagnetische Stoffe auf ein äußeres Magnetfeld?

Auf Grund der sehr geringen Effekte bei Dia- und Paramagnetismus empfiehlt sich die Verwendung einer Torsionsdrehwaage an der mit Hilfe einer Halterung die zu untersuchenden Stoffe befestigt werden können (vgl. Abb.2).

Die Reaktion der jeweiligen Probe auf ein statisches äußeres Magnetfeld wird durch die sogenannte (molare) magnetische Suszeptibilität χ_{mol} beschrieben. Diese Größe stellt einen materialbezogenen Parameter dar, der Größe und Richtung relativ zum äußeren Magnetfeld der Wechselwirkung beschreibt. Ist die magnetische Suszeptibilität χ_{mol} negativ, so wird die zugehörige Materie aus dem äußeren Magnetfeld verdrängt (Diamagnetismus). Bei einem positiven Wert von χ_{mol} wird Materie in das Magnetfeld hineingezogen (Para- und Ferromagnetismus).

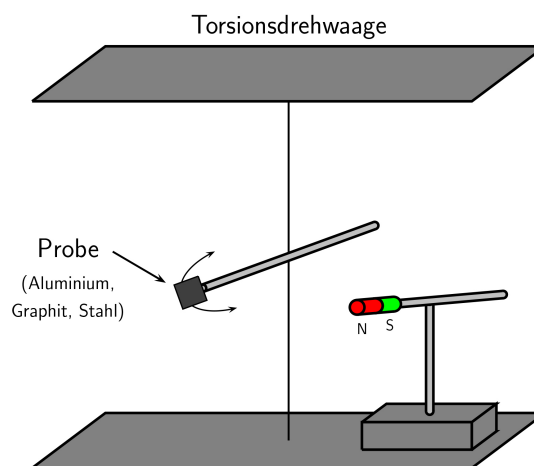


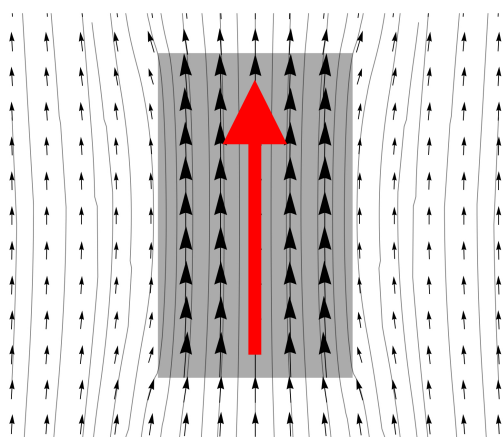
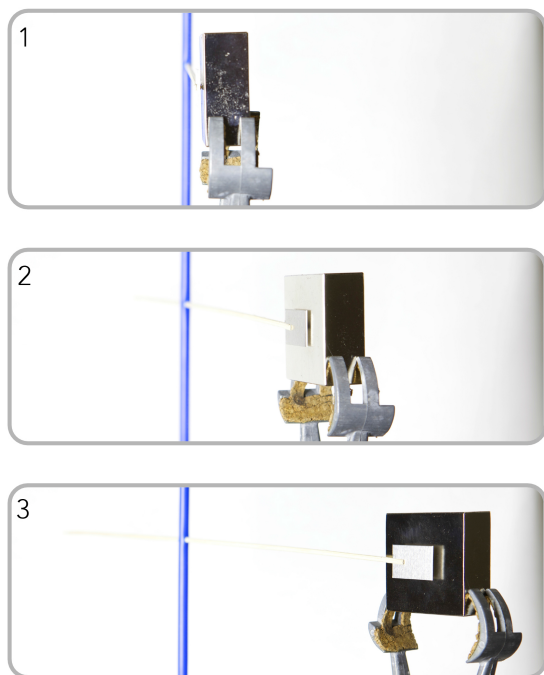
Abb.2: Versuchsaufbau zur qualitativen Bestimmung typischer Eigenschaften dia-, para- und ferromagnetischer Materie (Festkörper).

Als Probenmaterial eignen sich z. B. Kohlenstoff in Form von Graphit ($\chi_{\text{mol,Gr}} = -6 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$, diamagnetisch [14]), Aluminium ($\chi_{\text{mol,Al}} = 16,5 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$, paramagnetisch [14]) und Eisen in Form von Stahl (ferromagnetisch). Für die Halterung der Proben wird im Experiment idealerweise ein Materi-

al gewählt dessen Betrag der magnetischen Suszeptibilität sich unterhalb des Wertes von χ_{mol} der Proben befindet.

Für das im Rahmen dieses Beitrags durchgeführte Experiment wird Holz ($\chi_{\text{mol,Holz}} \approx -6 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$, diamagnetisch [15]) verwendet. Es verstärkt den diamagnetischen Effekt von Graphit leicht und beeinflusst den para- und ferromagnetischen Effekt auf Grund der Größe noch geringfügiger.

In diesem Experiment zeigt sich, dass eine paramagnetische Probe bei Annäherung eines Permanentmagneten angezogen wird (vgl Abb.3).



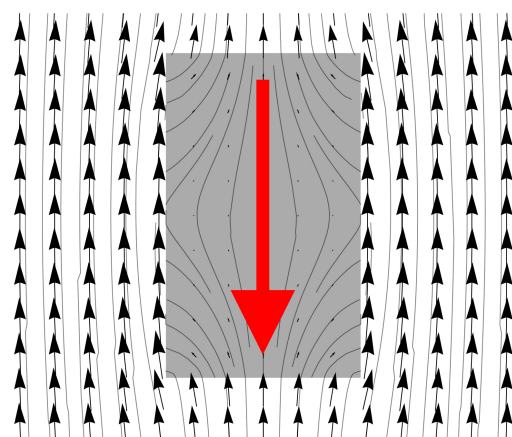
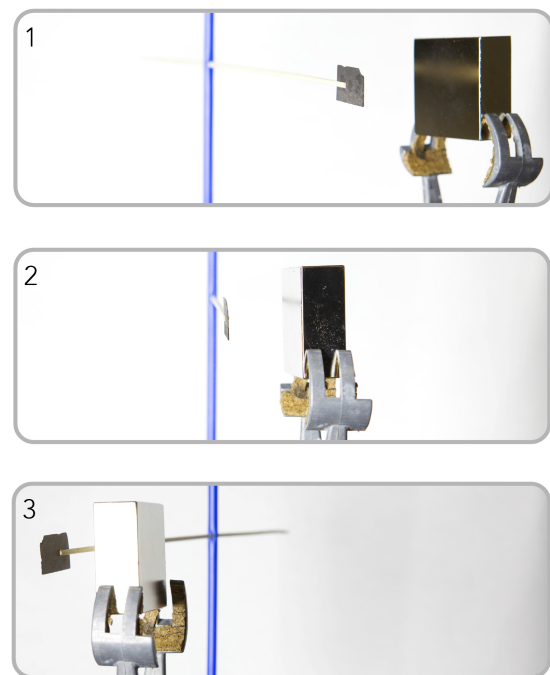
Flussdichte \vec{B} Magnetisierung \vec{M}

Abb.3: Anziehung einer paramagnetischen Aluminiumprobe durch ein äußeres Magnetfeld \vec{B} sowie Feldliniendarstellung der zugehörigen Flussdichte und Magnetisierung \vec{M} der Probe.

Nähert man sich jedoch einem diamagnetischen Material an, wird dieses vom Magneten abgestoßen.

Verwendet man eine ferromagnetische Probe zeigt sich zunächst dasselbe Verhalten, wie im paramagnetischen Fall: Die Probe wird vom Permanentmagneten angezogen. Die Anziehung ist jedoch um Größenordnungen stärker.

Für die Durchführung des Experiments ist es notwendig den Permanentmagneten in der Nähe der Probe statisch zu positionieren, um den Einfluss von Wirbelströmen auf die Relativbewegung der Probe zu beschränken.



Flussdichte \vec{B} Magnetisierung \vec{M}

Abb.4: Abstoßung einer diamagnetischen Graphitprobe durch ein äußeres Magnetfeld \vec{B} sowie Feldliniendarstellung der zugehörigen Flussdichte und Magnetisierung \vec{M} der Probe.

Weiterhin kann beobachtet werden, dass die vom Magneten angezogene ferromagnetische Probe die Magnetisierung auch nach Einflussnahme des äußeren Feldes auch ohne dieses behält (Remanenz) wohingegen die Magnetisierung bei den dia- und paramagnetischen Proben nach Wechselwirkung mit dem Permanentmagneten wieder verschwindet.

Das Experiment eignet sich somit als phänomenologischer Zugang zur Abgrenzung und Beschreibung der Eigenschaften von Dia-, Para- und Ferromagnetismus. Aus welchen Gründen die verschiedenen Ausprägungsformen von Magnetismus jedoch solch unterschiedliches Verhalten zeigen bleibt ungeklärt. Ein Versuch zur Klärung im Rahmen des zu Beginn beschriebenen selbstkonsistenten Modells soll nachfolgend dargestellt werden.

3. Modellierungsansatz

Ein Modell zur selbstkonsistenten Beschreibung von Dia-, Para- und Ferromagnetismus sollte, wie in Abschnitt 1 beschrieben, anschlussfähig für die Behandlung komplexerer Phänomene sein. Für eine solche Modellentwicklung ist es notwendig den fachlichen Inhalt im Rahmen eines top-down Design-Based Research Ansatzes zunächst auf der höchsten Komplexitätsebene zu klären, um anschließend Reduktionen vornehmen zu können [16]. Mit Bezug auf das Themenfeld Magnetismus bedeutet dies, dass die Erarbeitung eines Modellierungsansatzes zunächst auf Hochschulniveau erfolgt (Abschnitt 3.1). Nachfolgend sollte das Modell für die Sekundarstufe II (später Sekundarstufe I) didaktisch reduziert und mit passenden Experimenten und Phänomenen verknüpft werden. Für die phänomenologische Ergänzung eines Modells zum Magnetismus liefert die didaktische Forschung bereits zahlreiche Anknüpfungspunkte [9], [10].

3.1. Modell für Dia- und Paramagnetismus

Atomarer Magnetismus lässt sich auf vier grundlegende Einflussfaktoren zurückführen: Betrachtet man zunächst die Orbitalbewegung des Elektrons wird ähnlich einem Kreisstrom durch die bewegte Ladung ein magnetisches Moment $\vec{\mu}_{e,O}$ erzeugt. Analog dazu erfährt auch der Atomkern eine Bewegung im Ortsraum, die das magnetische Moment $\vec{\mu}_{k,O}$ erzeugt. Weiterhin tragen sowohl Elektron als auch Atomkern den Spin \vec{S} als intrinsische Eigenschaft, der jeweils ein weiteres magnetisches Moment $\vec{\mu}_{e,S}$ bzw. $\vec{\mu}_{k,S}$ erzeugt.

Die Abschätzung der Größenordnung dieser magnetischen Momente mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsstromdichte \vec{j} im Ortsraum und der Beziehung

$$\vec{\mu}_S = \gamma_S \cdot \vec{S} \quad \{1\}$$

im Spinraum zeigt, dass es für die Beschreibung der Ursachen von Diamagnetismus ausreichend ist ein

einzelnes Elektron im Ortsraum zu betrachten (vgl. Abb.5). Für die Beschreibung von Paramagnetismus hingegen ist die Reduktion auf ein einzelnen Elektron im Spinraum hinreichend (vgl. Abb.5).

Diese Reduktion wird durch die Elektronenkonfiguration des jeweiligen Stoffs begründet: Besitzt ein Stoff ausschließlich gepaarte Elektronen (z. B. molekularer Stickstoff N_2), so gleichen sich die magnetischen Momente der gepaarten Elektronenspins aus. Für das magnetische Moment ist somit nur der Ortsraum zu betrachten. In diesem ist das magnetische Moment des Elektrons deutlich größer, als das des Atomkerns, da dessen Masse ein Vielfaches von m_e beträgt. Existieren jedoch ungepaarte Elektronen (z. B. bei molekularem Sauerstoff O_2), sind die magnetischen Momente im Ortsraum im Vergleich zu den magnetischen Momenten der Elektronenspins vernachlässigbar klein. Aus diesen Überlegungen und Abschätzungen lässt sich ebenfalls die für dia- und paramagnetische Stoffe typische Richtung der Magnetisierung ableiten.

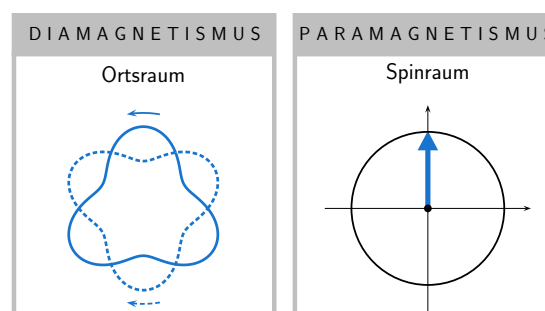


Abb.5: Schematische Darstellung der Visualisierung des Orts- und Spinbeitrags zum magnetischen Moment bei Dia- und Paramagnetismus.

Auf Grund des Bohr-van-Leeuwen-Theorems ist es notwendig, sämtliche Abschätzungen mit Hilfe quantenmechanischer Rechnungen durchzuführen, da alle Ausprägungsformen von Magnetismus eines Ensembles klassischer Punktteilchen im Mittel verschwinden. Aus diesem Grund orientiert sich unsere Modellierung an der quantenmechanischen Natur von Magnetismus. Als möglicher Ansatz für die Reduktion und alternative Beschreibungsform quantenmechanischer Prinzipien gelten mathematisch-fundierte Visualisierungen [17]. Abbildung 5 zeigt dementsprechend im Ortsraum das Elektron als stehende Welle und identifiziert den Spin als Zeigerposition auf der Bloch-Kugel (Darstellung erfolgt jeweils als zweidimensionaler Schnitt).

3.2. Modell für Ferromagnetismus

Magnetismus begegnet uns im Alltag fast ohne Ausnahme in Form von Ferromagnetismus. Die Ausprägungsform unterscheidet sich, wie in Abschnitt 2 am Experiment erläutert, insbesondere durch den Erhalt

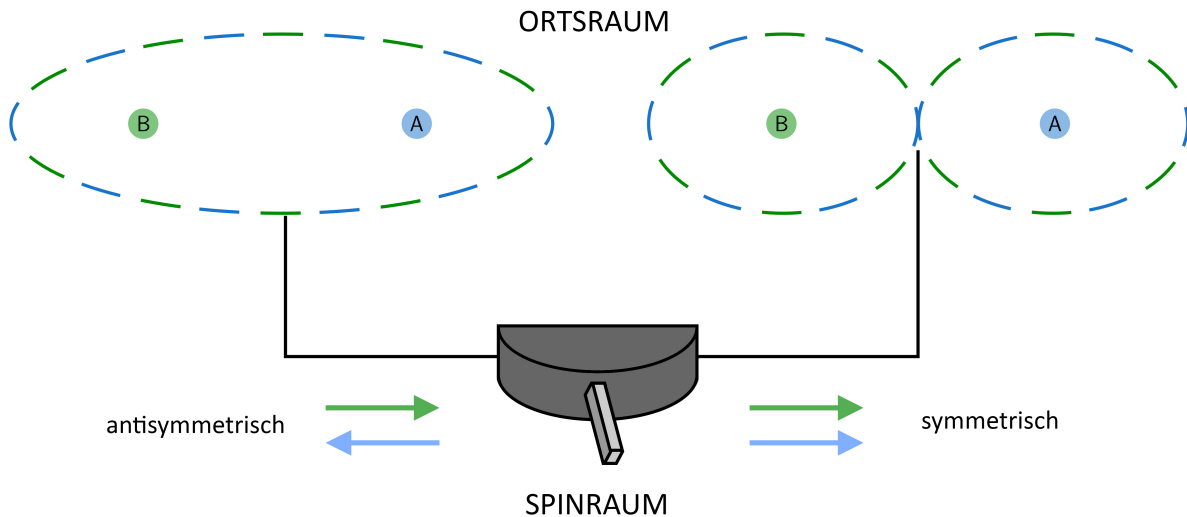


Abb.6: Schematische Darstellung des Spins als Schalter für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen auf Grund des Pauli-Prinzips.

der Magnetisierung ohne äußeres Magnetfeld. Auch für dieses Verhalten lässt sich innerhalb des Modellierungsansatzes eine eingängige Erklärung finden, die nachfolgend erläutert werden soll.

Analog zum Paramagnetismus ist der Elektronenspin beim Ferromagnetismus vorrangig für die magnetischen Momente verantwortlich. Während die Elektronenspins sich beim Paramagnetismus ohne äußeres Magnetfeld beliebig ausrichten bleiben die Spins bei ferromagnetischen Stoffen näherungsweise in ausgerichteter Stellung. Wie kommt es zu diesem unterschiedlichen Verhalten?

Für die Erklärung ist es notwendig zu berücksichtigen, dass Ferromagnetismus ein kollektives Phänomen darstellt. Da es somit nicht mehr ausreicht den Zustand eines Elektrons zu betrachten, muss nun die Gesamtwellenfunktion Ψ zweier wechselwirkender Elektronen als Produkt aus Ortswellenfunktion Φ und Spinwellenfunktion X betrachtet werden, für die nach dem Pauli-Prinzip stets Antisymmetrie vorliegen muss. Eine symmetrische Spinwellenfunktion X verlangt somit eine antisymmetrische Ortswellenfunktion Φ und umgekehrt. Was bedeutet dies für die Magnetisierung eines ferromagnetischen Stoffes?

Im äußeren Magnetfeld sind näherungsweise sämtliche Elektronenspins in Feldrichtung orientiert, sodass bei der Betrachtung jeweils zweier Atome bzw. Elektronen stets eine symmetrische Spinwellenfunktion X vorliegt (Ortswellenfunktion Φ antisymmetrisch, vgl. Abb.6). Zum Verlust der Magnetisierung ist es notwendig, dass sich jeweils ein Elektronenspin entgegengesetzt zum äußeren Magnetfeld ausrichtet. Dieses Umklappen würde zu einer antisymmetrischen Spinwellenfunktion X und damit instantan zu einer symmetrischen Ortswellenfunktion Φ führen. Die veränderte Symmetrie der Ortswellenfunktion entspricht jedoch der Umordnung der

Elektronen, da für diese eine veränderte Aufenthaltswahrscheinlichkeit resultiert (vgl. Abb.6). Die für die Umordnung notwendige Energie kann bei typischen ferromagnetischen Stoffen und Raumtemperatur nicht aufgebracht werden. Der Spin fungiert in diesem Bild somit als Schalter und beeinflusst den Ort der Elektronen. Ähnlich einem Lichtschalter entfällt der Hauptanteil der notwendigen Energie nicht auf das Umlegen des Schalters, sondern auf die Wirkung – im Fall von Ferromagnetismus also auf die Umordnung der Ortswellenfunktion im Coulomb-Potential.

4. Ausblick und Fazit

Innerhalb des dargestellten Modellierungsansatzes ist es möglich durch eine fachlich begründete Reduktion auf Hochschulniveau Erklärungsansätze für Dia- und Paramagnetismus über die Betrachtung eines einzelnen Elektrons im Ortsraum (Diamagnetismus) und getrennt davon im Spinraum (Paramagnetismus) zu liefern. Betrachtet man die zuvor getrennten Orts- und Spinräume zusammen ergibt die Sachlogik ein Modell für Ferromagnetismus. Insbesondere berücksichtigt dieses Modell die häufig vorhandene Fehlvorstellung, dass magnetische Dipolkräfte die Elektronenspins eines ferromagnetischen Materials stabilisieren und identifiziert Coulomb-Kräfte als eigentliche Ursache. Das Verständnis für Ferromagnetismus unter Berücksichtigung zweier Einflussfaktoren, kann durch die zuvor an den Beispielen Dia- und Paramagnetismus separat betrachteten Beiträge stark vereinfacht werden.

Auf Grund der fachlichen Tiefe des Modells ist dieses anschlussfähig für elaboriertere quantitative Konzepte im Bereich Magnetismus auf Hochschulniveau. Mit Blick auf den Einsatz eines entspre-

chenden Modells in der Sekundarstufe II ist insbesondere die fachliche Reduktion notwendig. Die Verwendung der mathematisch-fundierte Visualisierungen ermöglicht eben diese Reduktion, da das Modell außerhalb der Hochschule nach einem weiteren Reduktionsschritt auch ohne quantenmechanische Formalismen und Rechnungen eingesetzt werden kann. Zudem ist es für den Prozess der Modellentwicklung im Rahmen des Design-Based Research Ansatzes zukünftig notwendig die Perspektive der Lernenden für die Modellentwicklung zu berücksichtigen [16].

5. Literatur

- [1] Grünberg, P. (2007): *Kopplung macht den Widerstand*. In: Physik Journal 6, 8/9, 33-39.
- [2] Comesaña-Hermo, M., Ciuculescu, D., Li, Z.-A., Stienen, S., Spasova, M., Farle, M. & Amiens, C. (2012): *Stable single domain Co nanodisks: synthesis, structure and magnetism*. In: Journal of Materials Chemistry, 22, 8043-8047.
- [3] Reiss, G. & Hütten, A. (2005): *Applications beyond data storage*. In: Nature Materials, 4, 725-726.
- [4] Nacevn, A., Beni, C., Bruno, O. & Shapiro, B. (2011): *The behaviors of ferromagnetic nanoparticles in and around blood vessels under applied magnetic fields*. In: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 323, 651-668.
- [5] Gleich, B. & Weizenecker, J. (2005): *Tomographic Imaging using the Nonlinear Response of Magnetic Particles*. In: Nature, 435, 1214-1217.
- [6] Kuhn, W. (1995): *Das Elementarmagneten-Modell*. In: Praxis der Naturwissenschaften 8, 44, 4-10.
- [7] Merzyn, G. (1989): *Unterricht zum Magnetismus und das Elementarmagnet-Modell*. In: Naturwissenschaft im Unterricht Physik/Chemie, 44, 2-3.
- [8] A. Rachel, E. Heran-Dörr, C. Waltner & H. Wiesner (2012): *Das Eisen-Magnet-Modell im Unterricht – Chance und Grenzen*. In: Naturwissenschaft im Unterricht Physik/Chemie, 127, 10-15.
- [9] Möller, K., Bohrmann, M., Hirschmann, A., Wilke, T. & Wyssen, H.-P. (2013): *Spiralcurriculum Magnetismus (Bd. 2)*. Seelze: Friedrich.
- [10] Von Aufschnaiter, C. & Wodzinski, R. (2013): *Spiralcurriculum Magnetismus (Bd. 3)*. Seelze: Friedrich.
- [11] Barrow, L. H. (1987): *Magnet Concepts and Elementary Students' Misconceptions*. In J. D. Novak (Ed.): *Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*. Proceedings of the International Seminar, Volume III (pp. 12-22). Ithaca, NY: University Press.
- [12] Maloney, D. P., O'Kume, T. L., Hieggelke, C. J. & Van Heuvelen, A. (2001): *Surveying students' conceptual knowledge of electricity and magnetism*. In: American Journal of Physics 69, 7, 12-23.
- [13] Möller, C. (2007): *Genetisches Lernen und Conceptual Change*. In J. Kahlert u.a. (Hrsg.): *Handbuch Didaktik der Sachunterrichts* (S. 258-266). Bad Heilbrunn: Klinkhardt.
- [14] Lide, D. R. (2004): *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. London: CRC Press.
- [15] Rákoš, M., Murín, J., Kafka, D., Varga, Z. & Olčák, D. (1984): *NMR and Magnetic Susceptibility Study of Woods and Cellulose*. In: Czechoslovak Journal of Physics, 34, 332-340.
- [16] Design-Based Research Collective (2003): *Design-based research: An emerging paradigm for educational inquiry*. In: Educational Researcher 32, 1, 5-9.
- [17] Dür, W. & Heusler, S. (2014): *Visualization of the Invisible: The Qubit as Key to Quantum Physics*. In: The Physics Teacher, 52, 489-492.