

Einmal Erdmagnetfeld zum Mitnehmen

Ein Low-Cost-Schülerexperiment

//////
NILS HAVERKAMP – ALEXANDER PUSCH
//////

In diesem Artikel wird ein Experimentiervorschlag zum Thema Feldlinien und Magnetfeld der Erde vorgestellt. Das Material für das Experiment besteht aus einem Modell der Erdkugel und einem zugehörigen Messinstrument. Es kann selber aus günstigen Materialien und Teilen aus dem 3D-Drucker hergestellt werden. Mit Hilfe des Experimentiermaterials können Schüler/innen einen Eindruck von der Gestalt und Größenverhältnissen des Erdmagnetfeldes bekommen. Neben einem Experimentiervorschlag und beispielhaften Messwerten werden in dem Artikel außerdem die Grenzen des vorgestellten Modells thematisiert.

1 Einleitung

Das Erdmagnetfeld spielt eine wichtige Rolle für das Leben auf der Erde. Es ermöglicht z.B. Navigation mit dem Kompass und bietet Schutz vor geladener Partikelstrahlung aus dem All (vgl. z.B. TIPLER, MOSCA & WAGNER, 2015, 845f.). Ca. 95% des Erdmagnetfeldes entsteht durch die Bewegung des flüssigen äußeren Erdkerns und hat an der Erdoberfläche näherungsweise die Form eines magnetischen Dipolfeldes (Abb. 1).

Gerade für Schüler/innen ist die magnetische Fernwirkung besonders eindrucksvoll aber voller Verständnisschwierigkeiten (HOPF & WILHELM, 2019, 193f.). Oft kennen sie den Effekt eines Kompasses, dass er „zum Nordpol zeigt“. Tatsächlich zeigt ein Kompass aber nicht zum magnetischen Nordpol, sondern er richtet sich entlang des magnetischen Feldes aus. Im Alltag fällt dieser Umstand bei der Benutzung eines Handkompasses allerdings nicht auf. In diesem Artikel stellen wir ein mit einfachen Mitteln herstellbares Low-Cost-Experiment für die Unter-

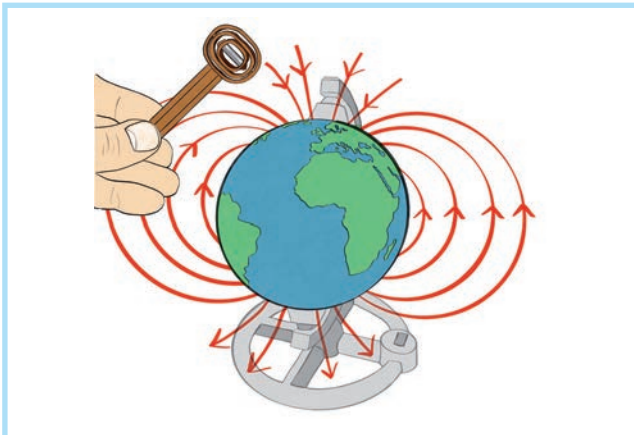


Abb. 1. Vereinfachter Verlauf der äußeren Magnetfeldlinien der Erde am Low-Cost-Experiment (Zeichnung: ROSALIE HEINEN)

suchung des äußeren Erdmagnetfelds mittels einer Magnetfeldsonde für Schülerversuche vor.

2 Erdmagnetfeld in der Schule

Als schulisches Erklärmodell für eine magnetische Wirkung werden in der Regel Feldlinien zur Darstellung von Richtung und Stärke verwendet (z. B. MSB NRW, 2019, 15). Als Kompetenzerwartungen wird im „Inhaltsfeld 2: Elektrischer Strom und Magnetismus“ des Kernlehrplanes NRW G9 zum „Magnetfeld der Erde“ formuliert: „Die Schülerinnen und Schüler können [...]

- Kräfte zwischen Magneten sowie zwischen Magneten und magnetisierbaren Stoffen mit der Fernwirkung über magnetische Felder erklären (UF1, E6),
- in Grundzügen Eigenschaften des Magnetfeldes der Erde beschreiben und die Funktionsweise eines Kompasses erklären (UF3, UF4) [...]
- durch systematisches Probieren einfache magnetische Phänomene erkunden (E3, E4, K1) [...]
- mit dem Modell der Feldlinien die Richtung und Stärke magnetischer Kräfte im Raum darstellen (E6, K3)“ (MSB NRW, 2019, 25f.)

Zur Veranschaulichung magnetischer Kräfte bzw. Feldlinien bei Permanent- oder Elektromagneten gibt es verschiedene experimentelle Möglichkeiten: Neben dem Aufstreuen von Eisenfeilspänen oder der Verwendung von Magnetenadelbrettern und Kompassen können auch in drei Dimensionen bewegliche Kompass, so genannte Magnetfeldsonden, verwendet werden. Solche Sonden gibt es bei Lehrmittelherstellern, sie können aber auch auf einfache Art und Weise auf einem 3D-Drucker hergestellt werden (FEISTMANTL & WOITHE, 2017).

Auf <http://physikkommunizieren.de/low-cost-erdmagnetfeld/> gibt es eine Schritt-für-Schritt-Anleitung, um eine Magnetfeldsonde z. B. mit Schüler/innen selber zu konstruieren und anschließend auszudrucken.

Weitere Möglichkeiten zur Untersuchung von magnetischen Feldern sind elektronische Messgeräte wie Hallsonden (z. B. angeschlossen an Cassy-Lab oder Arduino) oder die Smartphone-App Phyphox (s. z. B. STAACKS, HÜTZ, HEINKE & STAMPFER, 2018).

3 Erdmagnetfeld im Feldlinienmodell

Die Feldlinien des Erdmagnetfeldes treten auf der Südhalbkugel aus der Erdoberfläche aus und auf der Nordhalbkugel wieder in die Erdoberfläche ein (Abb. 1). Der magnetische Nordpol liegt also am Südpol, und der magnetische Südpol folglich am Nordpol der Erde. Die magnetischen und geographischen Pole liegen jeweils noch um einige hundert Kilometer auseinander. Diese Abweichung wird Deklination genannt. Der genaue Wert der Deklination schwankt, weil die Positionen der magnetischen Pole langsam wandern.

Der Winkel zwischen den ein- bzw. austretenden Feldlinien und der Horizontalen zur Erdoberfläche wird Inklinationswinkel genannt. Am Äquator beträgt der Inklinationswinkel etwa 0° . Die magnetischen Pole sind als die beiden Orte definiert, wo der Inklinationswinkel 90° beträgt, die Feldlinien also senkrecht auf der Erdoberfläche stehen.

4 Low-Cost-Experiment des Erdmagnetfeldes zum Selberbauen

Die Existenz und die Funktion des Erdmagnetfeldes sind Lernenden durch den Kompass theoretisch bekannt. Durch die Betrachtung eines in Richtung des magnetischen Südpols zeigenden Kompass ist der Verlauf der Feldlinien des Erdmagnetfeldes aber nicht (vollständig) zu erschließen. Dazu ist das Magnetfeld der Erde zu groß und die Messmöglichkeiten zu beschränkt. Häufig wird aus diesem Grund auf Grafiken zurückgegriffen, die das Magnetfeld darstellen (z. B. Abb. 1). Bei einem dreidimensionalen Phänomen bietet es sich aber auch an, mit einem ebenso dreidimensionalen Abbild wie dem hier vorgestellten zu arbeiten (s. Abschnitt 5).

Grundlage für das Low-Cost-Experiment ist ein Globus aus Schaumstoff mit etwa 10 cm Durchmesser. Er kann in die Hand genommen werden und dadurch haptische Lerntypen ansprechen. Der Schaumstoff wird am Nord- oder Südpol aufgeschnitten, um einen ca. 6 cm langen Stabmagneten mittig hineinzuschieben (vgl. Abb. 2, dort zur Veranschaulichung am Äquator aufgeschnitten). Das Loch kann anschließend mit Heißkleber wieder geschlossen werden. Um den Globus hinstellen zu können, kann eine Halterung aus dem 3D-Drucker erstellt werden. Der Globus kann einfach in die Halterung eingesetzt bzw. ihr entnommen werden. Er lässt sich auch in der Halterung drehen. Setzt man den Globus (Abb. 3) in den Haltearm, ist der Globus entsprechend des Winkels zwischen Erdachse und Ekliptik um etwa 24° zum Untergrund geneigt. Aufgrund der Neigung und der Drehbarkeit ist das Modell neben Experimenten zum Erdmagnetfeld auch geeignet, um Tageszeiten (z. B. durch Anleuchten mit einer Taschenlampe) und Jahreszeiten zu betrachten.

Ein Schaumstoffglobus, ein großer und kleiner Neodym-Magnet sowie die 3D-Druckteile der Halterung und Sonde kosten in Summe etwa 15 €. Für eine weitere Sonde betragen die Kosten für Probemagnet und 3D-Druck ca. 50 Cent. Eine Liste der benötigten Materialien mit möglichen Bezugsquellen, eine Anleitung zur eigenen Konstruktion der Sonde mit der verbreiteten Software Autodesk Fusion 360 (z. B. als Projekt für Schüler/



Abb. 2. Ein zur Veranschaulichung am Äquator aufgeschnittenes Modell mit Stabmagnet

innen) sowie auch fertige Dateien für den 3D-Drucker sind unter <http://physikkommunizieren.de/low-cost-erdmagnetfeld/> zu finden. In Schulen können aufgrund des geringen Preises mehrere Exemplare des Globus sowie ein Klassensatz der Sonden angeschafft werden.

5 Experimentiermöglichkeiten

Mit dem Modell können verschiedene qualitative und quantitative Experimente durchgeführt werden. Einige der möglichen Experimente sollen hier vorgestellt werden.

Experiment 1: Form des Erdmagnetfeldes

Für das erste Experiment wird die Magnetfeldsonde verwendet. Mit der Sonde kann die Inklination, d. h. der Verlauf des äußeren magnetischen Feldes im dreidimensionalen Raum untersucht werden (Abb. 3). Hierfür wird die Sonde durch das magnetische Feld des Globusses geführt. Dabei wird die Ausrichtung des Probemagneten beobachtet. Aus den Beobachtungen können z. B. die Feldlinienverläufe aus Abbildung 1 experimentell überprüft werden oder entsprechende Abbildungen mit Verläufen erstellt werden.

Experiment 2: Magnetische Flussdichte für verschiedene Orte und Abstände

Für das zweite Experiment wird ein Smartphone mit Magnetfeldsensor und der App Phyphox benötigt. Indem das Smartphone senkrecht zur Oberfläche des Modells in verschiedenen Abständen



Abb. 3. Experiment zur Untersuchung der Richtung des Verlaufs der Feldlinien des Erdmagnetfeldes mit einer Sonde

den zum Modell positioniert wird, kann zum Beispiel untersucht werden, wie die magnetische Flussdichte mit größerem Abstand zum Modell abnimmt. In Tabelle 1 sind exemplarische Messwerte in verschiedenen Abständen senkrecht über dem Nordpol, über (Modell-)Europa und über dem Äquator angegeben. Das Magnetfeld des Modells wird außerdem durch das deutlich geringere Magnetfeld der Erde überlagert (ca. 50 μT im Betrag).

Die Lage des Magnetfeldsensors im jeweiligen Smartphone-Modell ist vorab experimentell zu bestimmen und bei der Ausrichtung des Smartphones beim Experimentieren zu berücksichtigen. Aufgrund des starken Magnetfeldes des Modells sowie möglicher induzierter Ströme, sollte das Smartphone nicht zu schnell und nicht zu dicht an den Magneten herangeführt werden. Aus diesem Grund beginnen die Messwerte in der Tabelle mit einem Abstand von 3 cm.

An den Messwerten lässt sich erkennen, dass das Magnetfeld mit zunehmendem Abstand nicht linear, sondern näherungsweise quadratisch abnimmt.

Experiment 3: Magnetische Flussdichte an verschiedenen Breitengraden

Für dieses Experiment wird, wie für Experiment 2, ein Smartphone mit der App Phyphox verwendet. Mit der App Phyphox kann die magnetische Flussdichte auch als zeitlicher Verlauf aufgenommen werden. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, die Feldstärke in Abhängigkeit vom Breitengrad zu untersuchen. Dazu wird der Smartphonesensor wie in Abbildung 4 gezeigt in einem festen Abstand (z. B. in einer durchsichtigen Box) senkrecht über dem Nordpol des Modells positioniert. Anschließend wird eine Messung durchgeführt, während das Modell langsam und mit konstanter Winkelgeschwindigkeit um 180° senkrecht zur Verbindungslinie der magnetischen Pole gedreht wird. Es können entweder der Betrag der magnetischen Flussdichte (Abb. 5) oder die einzelnen Vektorkomponenten (Abb. 6) gemessen werden, um ein Verständnis für Stärke und Gestalt des Erdmagnetfeldes zu entwickeln. So lässt sich am Verlauf des Betrages z. B. erkennen, dass das Erdmagnetfeld am Äquator schwächer ist, als an den beiden magnetischen Polen (Abb. 5). Am Verlauf der einzelnen Vektorkomponenten lässt sich beispielsweise erkennen, dass das Magnetfeld am Nordpol in Richtung des Globusses und am Südpol vom Globus weg zeigt (Abb. 6). Am Äquator steht das Magnetfeld des Modells parallel zur Erdoberfläche. Es sollten sich bei der Rotation um 180° theoretisch Änderungen in zwei kartesischen Achsen zeigen. Ist die Rotation nicht senkrecht zur Verbindungslinie der magnetischen Pole, der Magnet im Modell nicht achsmittig oder der Sensor nicht entlang seiner kartesischen Achsen platziert, ergeben sich auch (kleinere) Änderungen in der dritten kartesischen Achse (Abb. 6).

6 Grenzen des Modells

Modelle sind in der Physikdidaktik u. a. dadurch charakterisiert, dass sie einige Eigenschaften der zugehörigen Objekte darstellen. Sie stellen allerdings nicht die eindeutige und vollständige Realität der Objekte dar, sondern nur eine reduzierte Version (KIRCHER, 2015, 789f.). Zum Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung gehört auch, dass Schüler/innen „mit Modellen,

Abstand vom Modell in cm	Betrag der magnetischen Flussdichte in μT		
	am Nordpol	in Europa (ca. 50ter Breitengrad)	am Äquator
3	2150 (+/-100)	1600 (+/-50)	750 (+/-50)
5	1100 (+/-50)	900 (+/-50)	425 (+/-25)
7	700 (+/-25)	575 (+/-25)	275 (+/-25)
9	450 (+/-25)	375 (+/-25)	175 (+/-25)

Tab. 1. Messungen des Betrages der magnetischen Flussdichte in verschiedenen Abständen zum Modell.



Abb. 4. Möglicher Versuchsaufbau für quantitative Messungen mit dem Smartphone und der App Phyphox

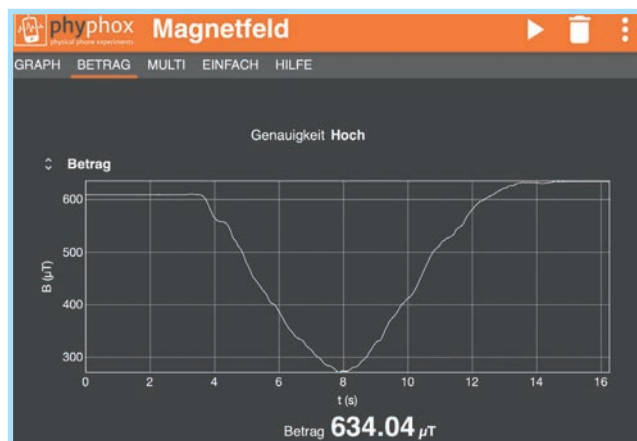


Abb. 6. Magnetische Feldstärke in den kartesischen Koordinatenachsen des Sensors im bei Rotation des Modells um eine Achse senkrecht zur Verbindungslinie von geografischem Nord- zum Südpol

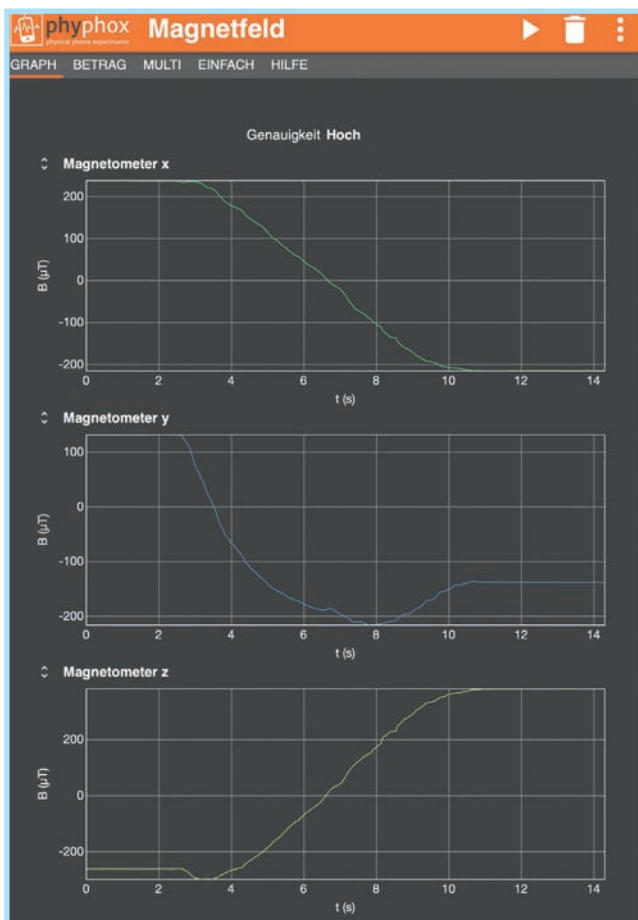


Abb. 5. Gesamtbetrag der magnetischen Feldstärke bei Rotation des Modells um eine Achse senkrecht zur Verbindungslinie von geografischem Nord- zum Südpol

auch in formalisierter oder mathematischer Form, Phänomene und Zusammenhänge beschreiben, erklären und vorhersagen sowie den Gültigkeitsbereich und die Grenzen kritisch reflektieren" (MSB NRW, 2019, 33).

Auch das hier vorgestellte Modell bietet nur eine didaktisch reduzierte Darstellung des realen Erdmagnetfeldes. So kann ein (kurzer) Stabmagnet im Inneren der Erdkugel eine akzeptable Näherung für die Form des Erdmagnetfeldes über der Erdoberfläche darstellen. Es entspricht aber weder den Feldverläufen im Inneren der Erde noch ihrem Ursprung durch den sich bewegendem äußeren Erdkern (vgl. Berkeley Lab, 2003). Auch der Deklinationswinkel ist in einem Modell dieser Größe nicht umsetzbar. Des Weiteren bieten die mit Phyphox aufgenommenen Messwerte Anlass zum Vergleich mit Messwerten des realen Erdmagnetfeldes. Dieses ist mit der App ebenfalls messbar. Diese Modellgrenzen können mit Schüler/innen diskutiert und verdeutlicht werden, um so mehr über den Modellcharakter in der Physik zu lernen.

Literatur

Berkeley Lab (2003). The truth about Earth's core? <https://www2.lbl.gov/Science-Articles/Archive/Phys-earth-core.html> (14.01.2020).

FEISTMANTL, A. & WOITHE, J. (2017). Elektromagneten der Teilchenphysik hands-on – das ATLAS-Magnetsystem. *Praxis der Naturwissenschaften*, 66, 21-28.

HOPF, M. & WILHELM, T. (2019). Schülervorstellungen zu Feldern und Wellen. In H. SCHECKER, T. WILHELM, M. HOPF, & R. DUIT (Hg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht* (S. 185–208). Berlin: Springer.

KIRCHER, E. (2015). Modellbegriff und Modellbildung in der Physikdidaktik. In E. KIRCHER, R. GIRWIDZ & P. HÄUSSLER (Hg.), *Physikdidaktik – Theorie und Praxis* (S. 783–808). Berlin, Heidelberg: Springer.

MSB NRW (2019). *Kernlehrplan für die Sekundarstufe I Gymnasium in Nordrhein-Westfalen. Physik*. https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SI/G9/ph/KLP_Gym_SI_Physik_2019-02-25.pdf (14.01.2020).

STAACKS, S., HÜTZ, S., HEINKE, H. & STAMPFER, C. (2018). Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. *Physics Education*, 53(4). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aac05e> (14.01.2020).

TIPLER, P. A., MOSCA, G. & WAGNER, J. (2015). *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Berlin, Heidelberg: Springer.

NILS HAVERKAMP studiert Physik und Mathematik auf Lehramt für Sek. II an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. n_have04@uni-muenster.de.

DR. ALEXANDER PUSCH ist Studienrat im Hochschuldienst an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster am Institut für Didaktik der Physik. alexander.pusch@uni-muenster.de. ■□